

前言

现代科学技术的日新月异，给力学学科提出了新的基础科学问题；中国的社会经济发展对力学提出了新的国家战略需求。进入 21 世纪，和其它学科一样，力学学科进行了回顾和思考、以发展的眼光，直面新的挑战、肩负着使命和责任，满怀着希望和憧憬，来思索未来我国的力学将如何发展、力学将如何面向国家需求来开展基础研究和科技创新等问题。因此，我们迫切需要对当今学科发展现状与趋势做出正确的判断，全面调研我国力学学科的发展态势，为力学在基础研究和工程应用这两个方面取得新的重大进展奠定基础。为贯彻落实全国科技大会和《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的精神，促进学科发展和提高原始创新能力，受中国科协委托，在中国力学学会常务理事会的帮助下，中国力学学会对我国力学学科年度进展进行全面的总结和研究，对国内外状况进行分析和对比，预测学科发展趋势，提出未来几年内重点研究方向和具体措施的提议，遂形成了这份学科发展研究报告。该报告旨在使公众和管理部门进一步了解现代力学在认知世界、促进经济、社会发展，维护国家安全中的重要作用，因此，现代力学是一门具有广泛应用和强大生命力的重要基础学科，扩大力学在学术界和社会中的影响力，使从事与力学相关的研究者正确把握前沿方向，并积极介入面向国家需求的研究项目，同时，为国家管理层面提供权威性的参考依据。

中国力学学会于 2006 年 6 月成立“力学学科发展研究”项目综合小组和 4 个专题小组（固体力学组、流体力学组、动力学与控制组、交叉力学组）。各个专题小组根据其学科特点细分为不同的研究领域，由该领域的专家、学者撰写力学学科发展研究报告。调研组先后召开了 6 次工作研讨会，讨论和确定了调研报告的框架，并对报告进行了多次讨论和修改。2006 年 7 月—10 月，综合组和 4 个专题组开展调查研究，广泛搜集国内外期刊文献资料，进行各分支学科发展专题研究，撰写分支学科的发展研究报告；2006 年 11 月—12 月，对综合组和各个专题组的发展研究报告进行汇总，并进行综合研究。综合组在分报告的基础上，形成调研报告的征求意见稿；2006 年 12 月 11 日，中国力学学会常务理事会组织了专家讨论会，中国科协同志参加了此次会议，对《力学学科发展研究报告》及各专题调研报告进行了充分的讨论，提出修改意见；2006 年 12 月中旬，根据专家意见，完成《力学学科发展战略报告》及各专题调研报告修改稿，在此过程中，根据中国科协的篇幅要求对一些专题报告进行了文字上的精简和删节；2006 年 12 月下旬，进行编辑和排版，遂成此稿，并上报中国

科协。

本报告是在中国科协的正确指导下，调动了力学界诸多专家、学者，涉及高校与科研院所共计 22 个单位，68 人，集思广益后最终完成的，所以，这是集体智慧的结晶。在此，调研组感谢中国科协领导的关心和支持，感谢中国力学学会常务理事会的核心作用，感谢参与这次力学学科发展调研工作的所有专家、学者，感谢为这次力学学科发展调研工作付出辛勤劳动的中国力学学会办公室的所有工作人员！

编写组名单

首席科学家： 李家春

专家组：

专家组组长 方岱宁

专家副组长

王建祥 朱克勤 张 伟 刘青泉 孟庆国 杨亚政

专家组成员

白以龙 陈 滨 陈予恕 程耿东 杜善义 樊 菁 冯西桥

傅德薰 何国威 何友声 洪嘉振 胡更开 黄 琳 黄文虎

黄筑平 姜宗林 李勇池 梁 军 林建忠 刘丽坤 刘铸永

龙 勉 鲁传敬 陆启韶 马延文 梅凤翔 申长雨 沈 青

石耀霖 孙承纬 王敏中 吴承康 吴锤结 吴志强 伍小平

徐健学 杨嘉陵 余寿文 余同希 俞鸿儒 张洪武 郑泉水

朱位秋

学术秘书

陈 杰

目录

前言	1
编写组名单	3
目录	4
力学学科发展综合报告（2006）	11
英文摘要	12
引言	17
一、力学的定义和学科性质	19
二、力学学科的发展趋势	21
三、力学学科的国内研究现状与主要成果	33
（一）学科发展轨迹和现状	33
（二）主要研究成果	35
（三）工程应用的典型实例	43
（四）不足及存在的问题	47
四、力学学科发展目标和具体措施	48
（一）发展目标和前景展望	48
（二）重点研究方向建议	49
（三）实现发展目标的重大措施和建议	53
参考文献	57
固体力学学科发展专题报告	60
英文摘要	60
一、学科性质	61
二、学科发展趋势	62
三、国内现状与主要成果	63
四、措施和重点研究方向建议	66
参考文献	68

附件-----	69 -
多尺度力学-----	69 -
微纳米力学和细观力学-----	73 -
新型材料力学-----	77 -
弹性力学-----	81 -
塑性力学-----	85 -
断裂力学-----	89 -
振动、冲击动力学和波动理论-----	93 -
计算力学-----	99 -
实验固体力学-----	104 -
制造工艺力学-----	109 -
流体力学学科发展专题报告-----	113 -
英文摘要-----	113 -
引言-----	114 -
一、近 5 年的研究成果-----	115 -
二、现状和展望-----	119 -
参考文献-----	125 -
附件-----	128 -
湍流-----	128 -
涡动力学-----	132 -
高速水动力学-----	136 -
高超声速空气动力学-----	140 -
稀薄气体动力学-----	145 -
多相流-----	149 -
非牛顿流体力学-----	153 -
计算流体力学-----	157 -
动力学与控制学科发展专题报告-----	161 -
英文摘要-----	161 -
一、前言-----	161 -

二、动力学与控制学科的特点-----	162-
三、研究历史回顾和发展-----	164-
四、我国学者的研究成果-----	166-
五、今后的主要研究方向-----	167-
参考文献-----	170-
附件-----	172-
非线性系统动力学-----	172-
随机系统动力学-----	178-
稳定性与控制-----	181-
多体系统动力学-----	185-
分析力学-----	191-
非线性振动-----	198-
航空航天动力学-----	203-
交叉力学学科发展专题报告-----	210-
英文摘要-----	210-
一、引言-----	211-
二、学科现状与发展趋势-----	211-
三、展望-----	217-
参考文献-----	217-
附件-----	220-
生物力学-----	220-
环境力学-----	225-
爆炸力学-----	229-
等离子体力学-----	234-
地球动力学-----	239-

TABLE OF CONTENTS

Introduction	-1-
Editorial Committee and Contributors	-3-
Table of contents	-4-
General Report on the Disciplinary Development in Mechanics (2006)	-11-
Summary	-12-
Introductory remarks	-17-
1. Definition and nature of Mechanics	-19-
2. Research trends in Mechanics	-21-
3. Domestic research progresses and principal achievements in Mechanics	-33-
3.1 Development and current research progresses in Mechanics	-33-
3.2 Principal research achievements	-35-
3.3 Paradigms in engineering applications	-43-
3.4 Existing issues	-47-
4. Targets and measures	-48-
4.1 Targets and prospects	-48-
4.2 Proposed major research directions	-49-
4.3 Aim-oriented principal actions and suggestions	-53-
References	-57-
Special Report on the Development in Solid Mechanics	-60-
Abstract.....	-60-
Characteristics of solid Mechanics	-61-
Research trends in solid Mechanics	-62-
Present status and research achievements in China	-63-
Major research fields in the future	-66-
References	-68-
Appendixes	-69-
Multiscale Mechanics	-69-
Micromechanics and Nanomechanics	-73-
Mechanics of New Materials	-77-
Elasticity	-81-

Plasticity -----	-85-
Fracture Mechanics -----	-89-
Vibration, Impact Dynamics and Stress Wave Theory -----	-93-
Computational Mechanics -----	-99-
Experimental Solid Mechanics -----	-104-
Manufacture Techniques and Mechanics -----	-109-
Special Report on the Development in Fluid Mechanics -----	-113-
Abstract-----	-113-
Introduction -----	-114-
Research achievements in recent 5 years -----	-115-
Present status and perspective -----	-119-
References -----	-125-
Appendixes -----	-128-
Turbulence -----	-128-
Vortex Dynamics -----	-132-
High-Speed Hydrodynamics -----	-136-
Hypersonic Gas Dynamics -----	-140-
Rarefied Gas Dynamics -----	-145-
Multiphase Flows -----	-149-
Non-Newtonian Fluid Mechanics -----	-153-
Computational Fluid Mechanics -----	-157-
Special Report on the Development in Dynamics and Control -----	-161-
Abstract-----	-161-
Introduction -----	-161-
Characteristics of Dynamics and Control -----	-162-
Review on research history -----	-164-
Achievements obtained by Chinese scientists -----	-166-
Major research fields in the future -----	-167-
References -----	-170-
Appendixes -----	-172-
Nonlinear Dynamics -----	-172-
Stochastic Dynamics -----	-178-

Stability and Control -----	-181-
Multibody Dynamics -----	-185-
Analytical Dynamics -----	-191-
Nonlinear Oscillations -----	-198-
Aeronautic and Astronautic Dynamics -----	-203-
Special Report on the Development in Interdiscipline of Mechanics -----	-210-
Abstract-----	-210-
Introduction -----	-211-
Research advances and trends in new branches -----	-211-
Prospect and foreground -----	-217-
References -----	-217-
Appendix -----	- 220-
Biomechanics -----	-220-
Environmental Mechanics -----	-225-
Mechanics of Explosion -----	-229-
Plasma Mechanics -----	-234-
Geodynamics -----	-239-

力学学科发展综合报告（2006）

李家春¹、方岱宁²

王建祥³、朱克勤²、张 伟⁴、刘青泉¹、杨亚政¹、孟庆国⁵

¹中国科学院力学研究所、²清华大学、³北京大学；

⁴北京工业大学、⁵国家自然科学基金委员会

General Report on the Disciplinary Development in Mechanics (2006)

Jiachun Li¹, Daining Fang²

Jianxiang Wang³, Keqin Zhu², Wei Zhang⁴, Qingquan Liu¹

Yazheng Yang¹, Qingguo Meng⁵

¹Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences; ²Tsinghua University

³Peking University; ⁴Beijing University of Technology

⁵National Natural Science Foundation of China

英文摘要

Summary

The purpose of this report is to elucidate the nature of the discipline of mechanics, summarize the recent achievements in the field, illustrate some of the exciting activities currently underway in various areas of mechanics, and to bring forth the broad range of frontiers, challenges and applications, which permeate the field.

Mechanics is a basic scientific discipline which is concerned with force, motion and macroscopic, mesoscopic /microscopic mechanical properties of substances (solids, liquids, gases, plasmas, etc.). The major classical branches of mechanics are solid mechanics, fluid mechanics and dynamics & control, which primarily deals with the deformation and failure of solids; the flow of fluids and the related transport of momentum, energy and mass; and the motion and evolution of discrete systems, respectively. However, today's mechanics includes a number of interdisciplinary branches such as physical mechanics, explosion mechanics, biomechanics, environmental mechanics and geomechanics, etc. Still more new and interdisciplinary/multidisciplinary branches will keep emerging.

Since the dawn of civilization, evolving human knowledge as to how substances behave has played an enabling role in predicting the motion of celestial bodies, manufacturing various tools and structures, and getting adapted to the environment for survival. The understanding and experience accumulated for a long time laid a foundation of modern sciences. For example, Newtonian mechanics represented the emergence of real natural science. At present days, mechanics has formed the backbone of many engineering disciplines. The modern development of mechanics was inspired by the industrial revolution, and in the last fifty years propelled by the demands of defense, power generation, transportation, space exploration, predictions of natural phenomena such as earthquakes, oceanic flows, and hazardous weathers, and understanding of bio-systems, etc.

In the last decades, domestic scholars have made remarkable contributions, which exert significant impact in the field. For example, in continuum mechanics, decisive progresses have

been made to the modern theory of representation of tensorial functions and invariance of constitutive relations, which have been widely used to develop the models for various complex materials. As one of the new functional ceramics, the reliability of ferroelectric ceramics is a widely concerned important problem. We have developed systematic and quantitative theory and test systems to explore the constitutive relations and failure process of this kind of material under external mechanical and electric loadings. The problem of singular optimal solution, a severe challenge in structural optimization since 1980's, has been successfully solved. The theory has been implemented in a software applied in industrial and national defense engineering. Many experimental techniques were developed, and they have been applied to measure the motion and behavior of new structures and materials. Micro- and nanomechanics is one of the frontiers and fertile areas of mechanics. New phenomena and responses of various materials at the micro- and nanoscale are being revealed. We have examined and found a series of new mechanical and physical properties of nanomaterials and devices, and proposed important new ideas. For example, the firstly presented GHz nano-mechanical oscillator has attracted a lot of attention and resulted in intensive researches worldwide. In addition, significant new results have been obtained in other directions of micro- and nanomechanics, such as new theories for size effect, nano-structures and mechanics of biomaterials, and biomimetics, and new methodologies for multi-scale computation, etc. Many other new results have been also obtained in conventional areas of solid mechanics including elasticity, plasticity, fracture mechanics, mechanics of composite materials, wave theory, vibration, and impact. Particularly, emerging new materials and structures will continue to provide challenging issues. .

In the field of fluid mechanics, we have made several internationally influential contributions in micro-gravity flows, separation flows, vortex flows, non-equilibrium flows, turbulent flows, vortex flows induced by fishes and birds, and hydrodynamic instability. We have developed various high-accuracy and high-resolution CFD algorithms, for example, the NND scheme, new WENO scheme, nonlinear compact scheme, super-compact scheme, and compact scheme based on group velocity control. We also developed the high-order project algorithm for incompressible NS equations, and high-accuracy and high-resolution impact FD- Fourier Spectral Method, and Spectral-Spectral element method for 3D incompressible viscous flows around a cylinder. Other

internationally influential contributions include the algorithms for microflows, the uniform algorithms for continuum-rarefied flow, and the theory of multi-block and parallel computing methods. In the field of turbulent flow, remarkable achievements include the turbulent model system based on explicit algebraic stress model, the high-order impact nonlinear model, and nonlinear model considering the effects of flow curvature. In the field of vortex flow, several kinds of 3D vortex exact solutions of NS equations are induced; the Batchelor's analysis is extended; and the chaos of Helmholtz vortex rings are found. In the field of hydrodynamic instability, effects of wall suction/injection on the linear stability of flat Stokes layers are investigated finding that the onset of instability of the flat Stokes layers can be suppressed/enhanced by wall suction/injection.. In the study of the linear stability of Bingham-plastic fluid flow between two concentric cylinders rotating independently and with axial sliding of the inner cylinder (spiral Couette flow), the only situation that a yield stress fluid flow is less stable was discovered. Effects of insoluble surfactants on the stability of film flow driven by an oscillatory plate are investigated in the limit of long-wavelength perturbations. It was found that the oscillatory film flow can be stabilized by surface surfactant in the sense of raising the critical Froude number and narrowing the bandwidths of the unstable frequencies.

In the last decade, research on the dynamics and control grew rapidly in China. The Chinese scientists have made great progresses in understanding the nonlinearity and complexity in science and technology in the past decade. For example, the Chinese scholars have made several significant contributions in the global bifurcations and chaos of high dimensional nonlinear systems, dynamics and control of nonlinear stochastic systems, nonlinear dynamics of time-delayed systems, nonlinear dynamics of non-smooth systems, nonlinear dynamics of axially moving viscoelastic strings and belts, firing activities and synchronization of neuronal systems, nonlinear control, and rotor dynamics. Both the established results in the recent years and speculations about future advances in the coming years are thoroughly reviewed. Many important topics were devoted to the theme of "Chaos, Solitons and Fractals", and they will produce a profound influence on the nonlinear science in China, and even in the world as well.

Multidisciplinary mechanics is an area full of exciting opportunities and engineering applications. In biomechanics, researches are carried out in almost all forefronts, particularly, in

cell-molecule mechanics, bone mechanics, blood dynamics and tissue engineering. Physical mechanics is a fundamental frontier and directly related to many important problems in engineering. We have studied the behavior of solids and gases under high temperature and high pressure. Intensive researches have been performed in propagation of stress waves, dynamic fracture, high-velocity impact, and crashworthiness of structures. Because of the complexity of the problems involved, numerous numerical and experimental techniques are developed. The outcome of these researches has been successfully applied to many important practical problems in engineering. The recent researches in environmental mechanics are focused on atmospheric environment, water environment, environmental calamities, and geodynamics, etc. There has been much progress in these areas. Particularly, the needs for understanding many natural phenomena related to flows of mass and energy, such as prediction of micrometeorology and the coupled ocean-atmosphere fluid system, have resulted in a branch of fluid mechanics, namely, geophysical fluid dynamics. With the development of the society, more attention is being, and should be, paid to mechanics related to natural and geological calamities, such as earthquakes, landslides, debris flows, tsunamis, and floods, etc. In recent year, there is significant progress in the research of nuclear fusion. Many TOKAMAK devices, laser devices, and ultrashort laser devices have been upgraded and built, and many relevant researches have been performed.

In this report, some successful applications of mechanics researches, among others, to the solutions of problems in engineering are highlighted. They include the train-track coupled dynamic theory and applications, computation and evaluation of aerodynamics of spacecraft, mechanics of thermal barrier materials in aeronautics and aerospace engineering, development of new mechanical theories for manufacturing processes and their application to molding of plastics and automobile industry, and rock damage mechanics and its application to coal mining. We also carried out the experiment of the thermocapillary migration of liquid drops in the Shenzhou spacecraft in the space.

Examination of the evolution and history of mechanics, and the emerging needs suggests that although remarkable progress has been made, many unsolved issues remain. For example, turbulence of fluids and failure of solids continue to be two foremost fundamental problems in mechanics. Moreover, the needs for breakthroughs in mechanics have intensified amidst the

unprecedented development of high technologies and the society. Therefore, this report identifies some forefronts of the fundamental researches of mechanics and the national needs. On the fundamental research side, they include turbulence, complex flows under extreme conditions, complex dynamics and control of nonlinear systems, micro/nanomechanics, mechanics of new materials under coupled multi-field loadings, multi-scale mechanics and trans-scale coupling, biomechanics, development of new equipment and experimental techniques, scientific and engineering computations and softwares. The major areas that meet the national strategic needs are problems in the national security, in aeronautic and aerospace engineering, in the exploitation of deep sea resources, in environment and calamities, in human health, and mechanics in advanced equipment.

Through analyzing the progress, the current status and the trends of research and application, the report proposes the targets that may be reached in a couple of decades. For this, it also points out some problems which need to be resolved. The suggested measures that should be taken to reach the goals include (1) The independent status of mechanics as a basic scientific discipline must be maintained consistently. (2) Multidisciplinary researches must be encouraged, and all branches should develop harmonically. (3) A particular vital aspect, namely, the training of young investigators of high level is crucial for discipline development in the future, deserves particular support. It is also essential for the continued health of the discipline that proper balance be sought between a focus on fundamental researches and that on the immediate needs. (4) An international mechanics centre in preparation should be established as soon as possible to promote the international exchanges and to foster new directions and young researchers. (5) The research funds for aeronautic and aerospace engineering, and new test equipment should be strengthened. (6) Computational softwares are a basic technology which is vital to the national competitiveness. A national centre for the research and development of softwares should be established to coordinate the R&D of softwares. (7) The fundamental researches and applications of mechanics discipline should be paid more attention at the national level to ensure sustainable development of mechanics and for it to play a better leading role in engineering to meet the national needs and improve the national competitiveness

引言

力学是有关力、运动和介质（固体、液体、气体和等离子体）宏、细/微观力学性质的学科，研究以机械运动为主及其同物理、化学、生物运动耦合的现象。它的主要分支学科有：动力学与控制、固体力学、流体力学和交叉力学。18世纪，连续介质力学的出现使力学学科从物理学中脱颖而出，成为一门独立的学科。1977年，对于力学的性质曾进行过一次广泛的大讨论，在我国制定自然科学基础学科规划时，方毅同志和邓小平同志批示同意将力学学科归入基础学科，确立了力学是一门独立的基础学科的地位。力学作为基础学科之一在1987年国家科委基础研究规划和1999年国家重点基础研究发展规划总纲（草稿）中都有所反映。近30年来的实践表明，这样的认识促进了力学学科的发展，也使力学在经济建设和国家安全方面做出了巨大的贡献。

我国的近代力学事业始于20世纪50年代。从这时起，力学对新中国现代科学发展和国民经济建设肩负着特殊使命，做出了巨大贡献：从两弹一星到深潜弹道导弹核潜艇的研制，从长江大桥到长江三峡的建设，从三次采油到大型水轮发电机组的设计、制造，从天气、灾害的预报到环境治理，无不反映了力学的理论在生产实践中的巨大作用，无不凝聚着力学工作者和相关学科的科学家、工程技术人员的共同心血。目前，中国力学学会的会员总数超过2万人，从事与力学相关研究的两院院士有60余名。对国内86个单位的力学基础研究人员调研结果表明，目前国内拥有5300余人的力学基础研究队伍（具有正高级职称的人员1651人，副高级职称人员2363人，中级职称人员1289人）。

中国在国际力学界处于举足轻重的地位。对SCI源库中106种力学期刊的国际联机检索统计数据表明：2000~2004年间中国力学学科(不含港澳台)的论文数分别为：2000年/655篇、2001年/761篇、2002年/799篇、2003年/931篇、2004年/993篇，2000—2002年世界排名为第3名，2003—2004年世界排名上升到第2名，而中国总的SCI收录论文数为世界第11名。最近5年，在力学类影响因子前10位期刊的论文排行情况为：2000年/13篇、2001年/31篇、2002年/38篇、2003年/40篇、2004年/48篇，中国学者在力学顶尖刊物上发表的论文数呈明显增加趋势，由1.4%增加至约5%，表明中国力学总体水平的提高。目前，我国在国际理论与应用力学联合会（IUTAM）中有4名理事，1名执委会委员，1名大会委员会委员，2名工作委员会委员。我国的力学期刊数已达20余种，其中进入SCI的刊物有3种。我国已经常主办和承办各种国际力学学术会议，近20年来中国力学学会举办的国际会议就

达 100 余次，国外参会代表超过 5 000 人。

力学是我国具有传统优势的学科之一，也是一门独立的重要学科。我国学者钱学森、周培源、钱伟长、郭永怀等，在国际上享有盛名。他们在湍流理论、喷气推进、空气动力学、板壳理论、航空工程、工程控制论、物理力学、广义变分原理、应用数学等方面，以及李四光在地质力学、冯康在有限元法和辛算法方面所做的开创性贡献，赢得了世界力学界的尊重。我国力学学者王仁、程耿东被四年一度的 IUTAM 大会邀请做 1 小时大会专题报告，表明我国在地球动力学和拓扑优化领域具有重要国际影响。原子弹、氢弹爆炸及其小型化，中远程导弹发射，回收技术，载人飞行等，表明我国在爆炸力学、空气动力学的研究具有世界先进水平。我国在泥沙运动力学方面的研究也具有特色，在板块运动和地球构造动力学等方面达到了国际水平。海外的中国力学学者已成为一支举足轻重的力量，目前国际力学界 40 岁左右最出色的学术带头人很多来源于中国大陆。我国力学研究的优势领域为：湍流、流动稳定性、复杂流动等流体力学领域，本构关系、断裂、宏微观力学、计算结构力学与优化设计、光测实验力学等固体力学领域，运动稳定性、非线性振动、结构振动与控制等领域，爆炸力学、微重力、生物力学、环境力学等交叉学科领域，在板壳理论、广义变分原理等与数学紧密结合的力学分支领域。在上述国内相对优势领域已经成长起一批国家自然科学基金委员会的“创新研究群体”。此外，我国学者在国际上做出了一些较有影响的成果，最近 5 年共获得国家自然科学奖二等奖 6 项、国家科技进步奖一等奖 3 项、二等奖 14 项。

随着科学技术的发展，力学学科与其他学科的交叉越来越明显，同时也使得现代力学所涉及对象的复杂性越来越突出，出现了一系列处于科学前沿的新问题和新领域，力学体系正孕育着重大变革，其学科发展前沿为：（1）湍流、非定常流动及控制；（2）复杂介质及超常环境流动；（3）非线性系统的复杂动力学与控制；（4）微纳米力学；（5）新型材料与结构的多场耦合力学；（6）跨尺度关联；（7）生物力学。另一方面，力学结合国家战略需求的重点研究领域为：（1）国家安全中的关键力学问题；（2）航空航天中的关键力学问题；（3）深海环境下资源开采中的关键力学问题；（4）环境与灾害关键力学问题；（5）人类健康科学领域的关键力学问题；（6）先进装备中的关键力学问题。

一、力学的定义和学科性质

力学是有关力、运动和介质（固体、液体、气体和等离子体）宏、细/微观力学性质的学科，研究以机械运动为主及其同物理、化学、生物运动耦合的现象。它的主要分支学科有：固体力学，主要研究材料与结构的变形、损伤、断裂和破坏的规律；流体力学，主要研究流体介质的流动和相应的动量、能量和物质运输的规律；动力学与控制，主要研究离散系统的运动规律和演化。

由于人们可以亲自观察到宏观力学现象，所以力学是人类在生产实践活动中最早取得直接经验，并加以利用的自然科学领域。到 17 世纪，大量积累起来的天文观测事实已经成为原始创新的源泉，并孕育着科学理论的诞生。牛顿适时地提出了三大定律和万有引力定律，建立了牛顿力学。牛顿力学不仅从理论上严格证明了开普勒的行星运动规律，甚至还可以预见未被观察到的行星——天王星的存在，**牛顿力学的出现标志着真正自然科学的兴起和黎明。**

18 世纪，连续介质力学的出现使力学学科从物理学中脱颖而出，成为一门独立的学科。然而，力学中的运动定律，哈密顿力学，能量守恒原理等无时无刻不在物理学发展过程中得到应用。量子力学和相对论则是经典力学向着微观和宇观的衍生，因此，德布罗意认为：**相对论和量子力学形成了我们对整个力学现象领域认识前进途中的两个最高峰。鉴于力学的基础性，它还曾经和继续推动着其他基础学科的发展。**孤立波和激波现象推动了数学家对各种非线性发展方程的研究，解释流动转捩和压杆稳定是研究分岔理论的动力，非线性系统相空间分析促进了动力系统和现代微分几何的发展，哈密顿力学是辛几何诞生的物理背景；天体物理是等离子体动力学的一个重要应用领域；动力气象学的出现推动了大气科学的发展，考虑层结和旋转效应的地球物理流体则是大气动力学和物理海洋学的基础；基于力学原理的地球构造动力学，探讨地壳和岩石圈大尺度构造运动的动力过程和驱动机制，包括地幔对流，涌升热柱，海底扩张，岩石的剪切、挤压、褶皱、破裂和地应力演化等，可以用来解释地震、火山、成矿的原因；应力与生长则是生物力学的重要课题。

在自然规律的科学认识论方面，由于牛顿力学可以准确预测宏观世界物质低速运动的规律，是**自然规律因果论和确定论思想的重要来源和直接证据**。随后，数学家提出了描述不确定现象的概率论和随机论。1960 年，洛仑茨在研究对流运动时，发现了反映内在随机性、对初始扰动敏感依赖的混沌现象，冲击了牛顿的确定论观点，这是是**力学对自然规律认识论**

飞跃的又一重大贡献。

在科学研究方法论方面，伽利略通过在比萨斜塔上有名的自由落体实验，以简单的事实证实了正确的运动规律。“**观察、实验、理论**”科学方法的三部曲是由力学家开普勒、伽利略和牛顿完成的，从而开创了科学研究的崭新时代；20 世纪，力学家谢道夫总结的量纲分析是具有普遍意义的理论方法，它不仅可以指导工业放大和缩尺实验，而且是科学家在复杂纷繁的现象中识别主次因素的有效工具。著名力学家泰勒曾根据 1945 年美国在新墨西哥州爆炸火球的照片，用量纲分析方法计算出原子弹的 TNT 当量使学术界感到震惊。力学家善于应用理论和实验相结合的方法，由表象到本质，由现象到机理，由定性到定量，解决自然科学和工程技术中的关键科学问题。力学家及时地预见到计算将成为科学研究的重要途径，提出了有限元方法，并形成了计算力学学科。在超级计算机出现后，力学中大规模复杂工程问题计算的需求，对于促进计算科学的发展起了重要作用。

马克思指出：“**力学是大工业的真正科学的基础。**”经典力学曾是工业革命的杠杆，随后造就了一个时期的辉煌。例如，在力学原理指导下，瓦特发明了蒸气机离心调速器之后，蒸汽机才真正成为动力。爱因斯坦曾对连续介质力学给予了极高的评价，称其具有“**伟大的实际意义**”。20 世纪初，人类刚刚实现动力飞行，普朗特提出的边界层和升力线理论，使飞机的科学设计成为可能。随后，通过在冯·卡门领导下的古根海姆实验室应用力学学派的共同努力，突破声障和热障，逾越声速，人造卫星，登月计划，使人类进入空间时代，这是力学发展的“黄金时期”。近 50 年来，大型客机、载人飞行和深空探测在流动控制、轻质材料、防热方法、推进技术等方面给力学家提出了新的课题。社会的需求表明，现代力学不仅是航空、航天工程的先导，而且还与能源、环境工程，海洋、海岸工程，石油、化学工程，土木、机械工程。材料、信息工程，生物、医学工程有紧密的联系和广泛的应用，并处于核心地位。例如，由于理解了飓风形成、发展及其与全球天气系统相互作用的机理，飓风登陆和强度的预报将得到改进；对具有群体缺陷、裂纹和裂隙的不连续、非均匀介质的力学演化过程的了解可以减轻因地震、滑坡、泥石流、矿井崩塌等灾害给人类带来的威胁和损失。界面不稳定限制了现有核聚变装置的能量密度，了解和控制这种不稳定可以加速聚变能的利用。核电、风能、高坝和大功率水轮发电机组是能源现代化的关键技术，需要研究极端环境下材料和结构的力学行为和安全评估；要设计出在严峻海洋环境中安全、可靠作业的深水平台，必须正确预测流体动力载荷和海洋结构物的动力响；多相物理化学渗流的研究可以预见在地层中油、气、水、聚合物、表面活性剂的运动和分布，从而通过提高驱动效率和扩大波及面积实

现提高采收率；化学工业的效率也依赖于通过控制流动中“传热、传质和化学反应”过程得以提高；可以制造出各种新一代微尺度装置，如：代替电池的燃烧器、冷却电子系统的先进流动控制装置，检测 DNA 的“芯片实验系统”；血液流动对动脉粥样硬化和血管重建有重要作用，需要更好地理解壁面剪应力与瘢痕的形成，内皮细胞相应的反应与组织生长的关系，才能发展对这些疾病更好的治疗方法。由此可见，力学已经是现代社会经济发展和人类生活中不可替代的重要学科，因此，钱学森说：“**不可能设想，不要现代力学就能实现现代化**”。而探究各种真实介质的复杂力学行为是对力学家新的挑战。

综上所述，力学学科是自然科学的先导和基础，它在学科自身发展和实际工程应用的驱动下不断发展，为人类社会的进步做出了巨大贡献，应用和理论力学学派的光辉成就已经载入科学史册。毫无疑问，现代力学仍将是一门具有广泛应用的和强大生命力的重要基础学科。

二、力学学科的发展趋势

现代科学技术的日新月异，给力学学科提出了新的基础科学问题；中国的社会经济发展对力学提出了新的国家战略需求。进入 21 世纪，和其它学科一样，力学学科进行着回顾和思考、带着发展眼光，直面新的挑战、肩负着使命和责任，满怀着希望和憧憬，来思索未来我国力学将如何发展、力学将如何面向国家需求来开展基础研究和科技创新工作。因此，我们迫切需要对当今学科发展状况与趋势做出正确判断，全面调研我国力学学科发展态势，这将为规划力学学科，并在基础研究和工程应用两个方面上取得重大进展奠定基础。

在 21 世纪，国家面临提高全民的知识层次、生活质量、健康水平和国防实力的总体需求，这也对力学提出了新的国家战略需求。可持续性发展、污染治理的需求呼唤着环境力学的兴起；数字地球的前景为河流动力学、大气环流动力学提供了用武之地；水资源的短缺促进多个力学分支的发展；能源和化工领域中高效清洁的需求推动着化学流体力学和非平衡热力学的前进；对非常规油气能源的强化开发需借助岩石压裂力学和渗流力学的定量模拟；南水北调工程期待着岩土力学一展身手。空间应用的发展需要微重力科学、非线性动力学与控制 and 高速高焓空气动力学的新突破；虚拟制造需要借助于计算力学和材料工艺力学的新进步；深海开发有赖于波、浪、流、内波及其与结构的相互作用，管道多相流和土力学的新发展；工程结构可靠性依赖于故障诊断学、宏微观破坏力学、智能结构力学和主动控制理论的新应用；微机电产业的发展需要开拓微动力学和力电失效学；新材料的研制需要发展细微观

力学和计算材料学；现代化农业和人体健康需要借助生物力学的研究成果；环境灾害预报与防治有赖于灾害力学的研究进展；国防建设更需要力学的发展：载人航天和民用飞机的发展依赖于实验和全机计算空气动力学；在现代战争中的“制信息权”依赖于星座动力学和自主导航；精确打击和突防能力依赖于流体力学和动力学与控制相交叉的运载控制；“禁核试”条件下核威慑的有效性依赖于多介质的计算力学模拟；战略潜艇的隐蔽性依赖于减噪的力学控制，等等。

当今国际理论与应用力学界的研究非常活跃。以 2004 年 8 月在波兰华沙召开的第 21 届国际理论与应用力学大会为例，会议共设置了 55 个主题分会场，代表 1515 人，有 1574 篇文章被接受发表，与前几届大会相比均有明显增加。从会议报告涉及的研究内容来看，除了反映力学的基础和传统的领域之外，还充分显示了国际力学的前沿热点问题和新的发展方向。如固体力学主要包括：微纳米固体力学，计算固体力学，弹塑性与蠕变，疲劳与断裂，接触、粘着、摩擦与磨损，复合材料力学，智能材料与结构，结构优化，冲击与波传播等。流体力学主要包括流动稳定性与转捩，湍流，可压缩流，计算流体力学，流体力学实验方法，复杂与智能流体，环境流体力学，薄膜流动，生物流体力学，颗粒流，涡动力学，液滴与气泡，微流体力学，流动控制等。动力学与控制包括非线性动力学，多体动力学，结构振动与控制，固体和流体中的混沌等。另外，在生物力学领域，细胞力学、组织力学、分子力学、生物材料的力学行为占据一定的分量。这一定程度上反映了力学各领域目前的主要研究状况和趋势，表明理论与应用力学发展的良好态势及其应用的日益广泛。国际理论与应用力学联合会（IUTAM）成立了 4 个新的跨学科的工作委员会来研讨力学的发展，现有的 9 个工作委员会为：非牛顿流体力学和流变学；动力系统和机电学；材料力学；材料加工；计算流体力学和固体力学；生物力学；力学中的微纳米尺度现象；地球物理和环境力学；力学教育。

总之，力学学科的发展呈现出如下趋势：

1) 宏观与微观相结合。力学界正在关注跨物质层次、多尺度的力学现象和非线性并远离热力学平衡态的力学行为，这是力学基础研究的重要发展趋势，这意味着将突破连续介质力学的理论框架；突破简单还原和叠加的经典方法；突破确定性和随机性之间联系的传统概念。如何用全新的微结构力学和跨尺度的关联跨越这条理论鸿沟，表征固体原子集群的力学行为，是力学家、物理学家、材料科学家长期渴求的共同目标。实现这一目标的标志在于创建“微纳米力学”的新学说，并建立其与细观、宏观尺度约化连接的跨尺度关联方法。微纳米力学的创立以及“微—细—宏”尺度的关联将使 21 世纪的材料和系统设计焕然一新。

3) 学科的交叉与融合。力学与其他学科的交叉将进一步扩大与加强。全球气候、环境、海洋、自然灾害等自然界中的诸多问题将不断提出具有学科交叉性和综合性的新的力学问题。在 21 世纪，力学与生命科学和医学相结合的生物力学，力学与地学相结合的地球动力学，力学与物质微观运动规律相结合的物理力学，都将有重要发展。随着高技术的发展，力、热、电、磁、信息等多场耦合的研究问题将不断出现，促进新的学科交叉。诸如磁浮超导、智能材料与结构、生物医学工程和生命支持体系中，均包含这类在多场耦合下的学科交叉问题。

3) 力学与工程技术的结合。随着现代科学技术的发展，力学越来越重视为工程各领域服务，旨在发展力学的理论与方法并应用于工程实际中，为经济发展和国家安全做贡献。力学以工程和自然界的真实介质和系统为研究对象，成为众多门需要精细化、机理化描述的应用科学和工程技术的基础，这使得力学成为技术科学中贡献特别多的一个学科。在解决新的工程技术问题及向其他学科渗透中，力学大大丰富了学科本身。在 20 世纪，力学在一般力学、固体力学、流体力学的架构上，又形成了空气动力学、水动力学、渗流力学、物理化学流体力学、弹塑性力学、断裂与损伤力学、岩土力学、计算力学、结构力学、实验力学、理性力学等分支，并形成了生物力学、物理力学、爆炸力学、环境流体力学、电磁流体力学、等离子体动力学、地球动力学、微机电系统力学等交叉学科分支。新学科分支的涌现，既解决了过去不能解决的问题，又改变了传统的概念。如高速空气动力学的出现，促成了半个多世纪来航空、航天技术的腾飞；断裂、损伤力学的成果深刻地改变着强度设计的观点；结构动力学的发展及地震波的研究，打破了在地震多发区不能盖高层建筑的禁区。“回顾一个世纪，工程力学走过了从工程设计的辅助手段到中心主要手段，不是唱配角而是唱主角了”。

4) 更加重视高性能计算与先进实验技术。面对日益复杂的力学问题，力学的研究手段必须不断更新。现代测控技术和数据处理技术将开拓新的实验力学手段，快速发展的信息科学和计算机技术将不断推动计算力学的进展。一方面，近年来，国际上高性能计算机的发展神速，已推出包括数万个处理器每秒达百万亿次浮点运算的超级计算机，大规模并行处理已成为现代电子计算机发展的主流方向，基于网络环境的网格计算技术也应运而生并得到迅猛发展。随着计算机硬件的高速发展，先进计算机速度与容量已使得超大规模科学与工程计算已成为可能，因此目前受到了包括我国在内的世界各国的高度重视。计算力学产生了 CAE 产业并成为新领域“计算科学”的核心，以计算力学方法为纲，集建模推理、数据测量、智

能控制和力学计算为一体的力学研究手段正在形成。与之对应,将导致一系列新的计算体系,大规模高性能的数值和智能算法,软件系统及其集成,计算可视化与虚拟仿真技术的发展。另一方面,信息与微电子技术的飞速发展对力学先进实验设备的发展起到了巨大的推动作用,使得力学的研究对象发生了极大的变化,微小尺度、高速率、多场耦合、生物实体等给力学测试带来了巨大的挑战。在此背景下,我国实验力学发展了新一代的测量技术,例如,电子散斑干涉和合成孔径雷达干涉的结合新技术、拉曼光谱和 x 衍射结合新技术、基于时间维散斑序列技术,扫描相位、序列强度扫描、脉冲计数以及匹配相关等五种时间序列散斑分析方法、微米/纳米尺度区域变形测量的聚焦离子束云纹方法、扫描隧道显微镜扫描云纹技术等等。在流动测量方面,随着激光多普勒测速技术、粒子图像测速技术(PIV)和激光诱导荧光技术的发展,已经可以实现单点和全场的瞬时速度和温度测量。尤其是近年来 Micro-PIV 和高速 PIV 技术的发展,为研究微观结构的流动特性和非定常流动特性提供了强有力的实验手段。我国实验力学工作者在力学测试系统和设备开发方面取得了显著的进展,为实验力学技术的进一步推广和应用做出重要贡献,例如,微尺度对象动静态全场位移与变形检测系统、力-电-磁-热耦合加载与测量系统、双波长电子散斑干涉仪、研制出三维云纹干涉仪、空间对水溶液晶体生长进行原位实时观察的装置等等。

随着科学技术的发展,力学学科和各学科的交叉越来越明显,同时也使得现代力学所涉及对象的复杂性越来越突出,提出了一系列处于科学前沿的新问题和新领域,力学体系正孕育着重大变革。下面,我们分别较详细地介绍力学学科的主要 4 个分支学科(固体力学、流体力学、动力学与控制、交叉力学)的国内外发展趋势:

(一) 固体力学的发展趋势

固体力学旨在认识与固体受力、变形、流动、断裂有关的全部自然现象,并利用这些知识来改善人类生存条件、实现人类目标。由于固体物质是人类赖以生存、繁衍、生活和生产的物质基础,合理地利用固体物质来设计各种工具和结构并保证其高效、安全地运行,是保障生命安全、促进文明进程、提高竞争力的必要手段,因而,固体力学是人类科学技术史上最先发展的少数学科之一,在人类文明进化过程中占有十分重要的地位。固体力学取得的辉煌成就不但造就了近代土木建筑工业、机械制造工业和航空航天工业的进步和繁荣,而且为广泛的自然科学提供了范例或理论基础。在现代社会中,大到桥梁、航天飞机、大型喷气式客机、核动力结构,小到计算机芯片、生物组织以及近年来高速发展的微/纳米机械等,都

需要进行固体的力学行为研究。“哥伦比亚”号航天飞机的失事再一次昭示了固体力学研究在保障当代和未来复杂材料和结构的安全性以及提高国家竞争力方面的重要性。

进入 21 世纪以来，人类面临许多复杂的力学问题需要解决。固体力学将具有如下发展趋势：研究对象具有跨尺度和复杂性特征；研究手段将突破传统模式的桎梏，以跨学科、交叉性和系统性为特色；研究成果对科学技术发展的推动作用和对人类生活质量的提高将达到前所未有的水平。事实上，与人类的生活和生产最密切相关的客观世界中出现的难题，恰恰是近代固体力学的前沿所在。例如，虽然固体力学已经在材料的强度和韧性方面取得了大量研究成果，使结构材料的发展奠立在新的基础之上，但是固体强度问题还没有根本解决。强度问题的困惑，使得人类还生活在受到象泰坦尼克号海难、彗星式客机和哥伦比亚号航天飞机解体那样的由于材料破坏导致的悲惨事故的威胁中。现有的固体变形和强度理论未能很好地将原子、分子结构、细观结构、试样和实际关注的对象有效地关联起来。因此，固体力学正在发展其基本理论以研究力与热、电、磁、声、光、化学及生命领域的相互作用，实现从原子、分子的微观结构到纳米结构、细观显微结构，直至宏观结构的多尺度关联理论框架的建立。

我们生活的世界安全性的提高和保障仍然有赖于固体力学的进步。人类目前还受到诸如地震、边坡失稳、泥石流、矿井崩塌等自然灾害的威胁，它们造成的损失占全球尤其是我国国民经济损失的相当大部分。这类灾害力学问题在科学上可提炼成为具有群体缺陷、裂纹和裂隙的不连续、非均匀介质的力学演化过程。预测和防范突发灾害的发生，正是近代固体力学可以做出重大贡献的一个方向。

固体力学在陆地和海洋石油勘探采集和输运、核电技术、风能技术、高坝技术和高功率水力发电技术、大型工程结构的选址等重大工程中也发挥着愈来愈重要的作用。人类向海洋和地球深处、邻近空间和外太空的探索将不断地为固体力学研究带来新的研究课题，例如各种极端环境下材料和结构的力学行为和安全性评估等。世界科技和经济竞争的加剧、资源的减少和对生活质量的更高追求迫使我们必须开发先进的工业制造工业，以提高效率，节省材料和能源，从而提高国家竞争力。高新技术材料和具有各种特征尺度的人工结构正在大量涌现，集传感功能和驱动功能为一体的智能材料和结构正进入各个领域。这些新兴的科技领域蕴含着许多与传统领域不同的力学问题。新型材料与结构的多场耦合力学，包括力—电—磁—热耦合场基础理论与体系、破坏理论、智能结构性能等是固体力学领域充满生机的研究方向。

今天的计算力学已经成为力学家通向工程的必由之路，成为关乎一个国家竞争力的关键科学和技术。固体力学研究对象的跨尺度和复杂性需要发展新的方法在非常大的时间和空间尺度范围内高效快速地模拟复杂的物理现象。计算力学的发展，特别是大型计算力学软件的开发，需要创造性的研究工作，既是一项高难度的科学研究，也是一项大规模的工程。力学理论、算法软件和虚拟技术的结合，将发展成效能更大的计算机辅助工程。这样，人们不但可以优化设计、优化加工，还可以在整个工程建造之前，预测、优化工程的服役表现和效能。这将不但会极大地促进计算力学的飞跃发展，更会使一批产业发生质的变化，并成为未来工程界提高竞争力的一个主要技术源泉。

力学在揭示各尺度下的生物功能中起到关键的作用。力学家们开始利用生物学和生物技术来设计材料与器件，这将极大地冲击整个工程界、生物界和医学界。力学家们将从生物学中借鉴和学习知识来设计材料，需要研究生物材料的微结构，发展多层次多尺度设计新材料的方法，使设计出的新材料能够具有生物系统的优越性能。

综上所述，随着科学技术的发展，现代固体力学研究对象的复杂性越来越突出，由此带来了一系列处于科学前沿的新问题和新领域。从另一个角度来看，对本世纪重要的科技领域中新问题的研究也将成为固体力学发展的一个重大机遇。

（二）流体力学的发展趋势

在流体力学中，湍流的研究已经有了百年以上的历史，但仍然是一个最具挑战性的研究领域。目前该领域中受到特别关注的几个科学问题是：均匀各向同性湍流的 Kolmogorov 理论和间歇现象(倍化过程和结构)；壁湍流的拟序结构和动力学；湍流的统计理论；湍流的数值模拟(DNS, LES, 雷诺平均的 NS 模拟)；自由剪切流演化(线性稳定性，非线性发展，混合和控制)。由于统计力学和计算机模拟方法的引入，湍流在统计理论和数值模拟等方面已经取得了较大的进展，特别是湍流的理论研究从经典的解析模型走向计算模型，从实验研究走向数值模拟和实验研究相结合，可以预期，随着计算、实验手段的日新月异发展，对湍流认识将不断深化，我们处理复杂工程湍流问题的能力将不断提高，并已经在众多的工业应用中取得成效。

涡动力学是以研究涡量和旋涡的产生、演化及其与物体和其它流动结构的相互作用以及在湍流发生、发展和流动控制中的作用为主要研究内容，并取得了许多重要进展。在空天安全、超燃发动机、大飞机制造、超大型海面作战平台和深海采油平台等重大国家需求项目中，

涡动力学都发挥着重要作用。在今后几年内需要重点关注的科学问题有：边界涡量的生成和分离；动边界涡动力学的理论、数值计算方法及应用；超声速与高超声速流中的激波、旋涡、声波相互作用、稳定性和共振的研究；基于涡动力学的旋涡诊断和控制技术及其应用；新的定量和定性涡动力学实验方法；旋涡的普遍定义和非定常动边界流动中旋涡的表示和演示技术。

在上世纪末以前，CFD 主要是针对大尺度宏观流动，如：航空航天飞行器超声速绕流问题，研究含激波和间断面流场的高分辨率计算方法。目前，我们已经可以利用巨型计算机，采用合适的网格生成技术和有效的算法，给出各种飞行器的超、高超声速无粘和有粘流动的宏观复杂流场的结果。有待解决的科学问题是：针对多尺度多物理流体运动，开展高精度、高分辨率和高效的数值模拟方法研究；开展多物理流体运动的数值模拟方法研究，特别是对非定常多尺度多物理流体运动的高精度高分辨率计算方法的研究；混合方法和网格生成技术的研究，。例如，流-固耦合、振动与声的耦合、高速冲压下的结构力学和热力学耦合的数值模拟方法。

高速水动力学的发展与水中航行器的高速化的趋势密切相关。与空中和陆上相比，水中运载工具提速较慢，主要原因是水中过高的阻力和空化现象。目前迫切需要研究的相关问题有：自然空泡流和通气空泡流及其稳定性；高速出入水问题；高速水动力学的数值模拟；高速水动力学的试验设备与测试技术等。近年来，水下射弹模型试验的速度越来越高，美国的试验高达 2500~5000m/s。一旦射弹在空泡区域内有不稳定的运动，对射弹的运动稳定性控制带来严重威胁，因此需要加强这方面的研究。目前水下高速运动的研究，多半在水中声速以下的范围。近声速和超声速运动方面的试验与理论研究成果公开发表不多，还有大量工作要做。

高超声速空气动力学与二十一世纪的航空航天技术的目标戚戚相关，在高超声速空气动力学研究范畴，宏观流动规律的改变强烈影响了飞行器绕流的物理特征，并改变了飞行器设计的基本原则，对于高超声速空气动力学的基础和应用研究提出了挑战性的科学问题：高超声速流动的模拟技术；高温空气热化学反应机制；高超声速流动的滞止区域；高超声速边界层转捩；高超声速流动的激波/激波相互作用。高超声速空气是现代空气动力学的前沿学科，有着国家长期发展的战略需求背景。重视、强化高超声速空气动力学研究是非常必要的。

稀薄气体动力学是空气动力学的一个重要分支。了解航天飞行器在高空的气动力、气动热和微机电系统（MEMS）中气体的流动规律都需要研究和发展稀薄气体动力学。按照 Kn

数的大小，稀薄气体动力学分为三大领域：滑流领域（ $0.001 < Kn < 0.1$ ），过渡领域（ $0.1 < Kn < 10$ ），自由分子流领域（ $Kn > 10$ ），其中过渡领域是稀薄气体动力学研究的核心也是最困难的课题。目前需要关注的主要科学问题有：过渡领域的求解；微尺度流动；稀薄等离子体的模拟；有化学反应、等离子体效应、辐射影响、壁面效应等流动的实验和模拟计算的研究等。随着我国航天事业朝着载人、登月和建造空间站的方向发展，稀薄气体动力学的作用将变得越来越重要。

多相流指的是两种或两种以上、相同或不同化学成分物质的固体、液体和气体系统的共同流动，具有强烈的应用背景。比如：污染物在大气与水环境中的沉积与控制；核反应堆的废物排放和处理；高效燃烧和减少燃烧污染；采矿和冶金过程中的旋流分离和运输、粉尘爆炸的预防和控制等。多相流的普遍性、重要性和复杂性，决定了它在流体力学学科中占有重要的地位。目前多相流研究中重要的科学问题可归纳为：受连续相流场特性制约的离散相动力学特性；离散相对连续相特性的影响；离散相之间的相互作用；多相湍流场及稳定性；多相流场数值计算方法；超常离散相多相流。

随着科学的发展，近代流体力学的研究开始进入非牛顿流体的范畴。在自然界和工业中，存在许多非牛顿流问题需要研究，从火山爆发产生的熔岩到洪水带来的泥石流，从管道中煤水浆到大漠中的流沙。这些形形色色不同于牛顿流体的复杂流体和它们奇特的流动现象是非牛顿流体力学的研究对象。该学科目前关注的科学问题主要有：复杂流体本构关系的建立；壁面滑移效应；弹性湍流；非牛顿流的稳定性；管道中非牛顿流体的非定常流；煤—燃油悬浮体的非牛顿流特性；海洋和河口泥沙的非牛顿流特性；环型收缩域中非牛顿液体的流动；非牛顿液体中气泡和液滴的流体力学；粘弹性流体的自然对流和热传导等。

渗流力学研究流体在多孔介质中的运动规律，在环境、石化、农业、水资源等领域都有非常广阔的应用前景，比如：水库诱发的地震、水渗流引起的山体滑坡、过度开发地下水资源引起的地面沉降、地球物理领域的岩浆运动和地幔对流等。随着能源需求和环境灾害形势的日益紧迫，渗流力学将发挥越来越重要的作用，人们对渗流力学的研究也将更加深入。目前需要关注的科学问题有：多相多组分渗流；物理化学渗流；非线性渗流；微观渗流；渗流模拟等。为适应经济和社会发展的需求，渗流力学的研究内容将不断丰富，并为能源的开发利用和相关环境问题的治理提供更为科学的决策依据。

（三）动力学与控制的发展趋势

近 20 年来，动力学与控制学科在理论和应用两个方面均取得了很大进展。下面分几个方面分别论述：

非线性动力学 随着非线性动力学理论和相关学科的发展，人们基于非线性动力学的观点以及现代数学、计算机和实验等工具，对工程科学等领域中的非线性系统建立动力学模型，研究和预测其长期的动力学行为，分析瞬态动力学特性，揭示内在的规律性，提出改善工程系统品质的控制策略。为设计轻质稳定运行的空天飞行器结构、高性能和高精度的机械装备、高速运行的车辆奠定了初步基础。许多过去无法解决的难题源于系统的非线性，而解决难题的关键在于对问题所呈现出的分叉、混沌和分形等复杂非线性现象具有正确的认识和理解。

随着数学理论、计算机代数、数值模拟和图形技术的进步，以及工程实际的需求，非线性动力学理论正在从低维向高维发展，非线性动力学理论和方法所能处理的问题规模和难度不断提高，已逐步接近实际系统。在工程科学界，以往研究人员对于非线性问题绕道而行的现象已经发生了变化。非线性动力学理论在高科技领域和工程实际问题中的应用，已经引起了各领域科学家们的广泛关注，并使这门学科有了强大的生命力。为了说明非线性动力学在工程问题中的应用，有以下实例：(1)大型空天结构（大型空间站中柔性机械臂、卫星天线和太阳能板等）设计与运行中的非线性动力学问题；(2)航天器的混沌姿态运动；(3)系绳卫星的非线性振动与控制问题；(4)飞机结构的非线性振动问题；(5)新型材料柔性结构的非线性振动问题；(6)大型转子、大型发电机组和重型燃气轮机的非线性振动问题；(7)高档数控机床的非线性切削颤振和控制问题；(8)高速轮轨机车行驶稳定性和蛇行运动的非线性动力学问题；(9)高速磁悬浮列车的非线性动力学问题；(10)大型船舶在横浪或纵向波作用下的横摇运动、操纵稳定性和倾覆机理问题；(11)高速车辆半主动悬架系统的时滞非线性动力学问题；(12)车辆系统中齿轮传动和粘弹性带传动中的非线性振动问题；(13)大型海洋石油平台的涡激振动问题；(14)流固耦合机械系统和流体诱发的机械结构的非线性振动问题；(15)大型斜拉桥和高压输电缆悬索结构以及悬索和梁结构之间相互耦合的非线性动力学问题。由此可见研究非线性动力学理论和方法对于解决工程系统中的实际动力学问题具有重要的意义。

分析力学: 1992 年《国际控制杂志》全文翻译发表了 1892 年 Lyapunov 的《运动稳定性的一般问题》，1995 年 Lagrange 的《分析力学》被译成英文。这两件事体现了分析力学的基础性作用和生命力。

经典力学的研究表明，Hamilton 动力学系统具有简单的辛结构。但是，给定辛结构并不能一定得出系统是 Hamilton 的结论，除非系统是保守的或者对其实施了 Darboux 变换。辛

结构作为动力学系统的整体性质，其局部实现可能是 Hamilton 的正则结构，也可能满足辛几何的非 Hamilton 结构，这种非 Hamilton 的辛结构对应着 Birkhoff 动力学。Hamilton 系统也是 Birkhoff 系统的特例。根据 Cauchy-Kovalevski 定理，任何正规的动力学系统，只要满足一定的解析条件，在局部上都可以实现 Birkhoff 表示，而不必进行 Darboux 变换。因此，Birkhoff 力学是包括 Hamilton 力学和非 Hamilton 力学的更一般的动力学理论，它是动力学系统的辛几何结构的最一般的局部实现。

对于具有对称性的力学系统，可以借助等变(equivariant)动量映射将系统约化到一个低维空间上。作为线动量和角动量的几何描述，动量映射对于对称性理论以及微分几何方法的现代发展，发挥了重要作用。例如，在 Lie 群的余切丛上描述刚体和流体运动的 Euler-Poincare 方程可以利用等变动量映射约化到 Lie 代数对偶空间上的 Lie-Poisson 方程。现代约化理论开创于 20 世纪 60 年代至 70 年代，国外一批著名学者为此做出了重要贡献。之后，约化理论及其应用得到了迅速的发展，目前已经形成了各类较为成熟的约化方法。对称性约化是目前分析力学的热门课题之一，它被应用到力学和物理学的若干领域，如固体力学、流体力学、等离子体物理、量子力学等。

振动控制: 随着计算机技术和测控技术的发展，振动主动控制技术有了长足进展，已在航空、航天、机械和土木工程领域得到了一些成功应用。近年来，振动主动控制技术最引人注目的进展是集传感器、控制器、作动器与结构为一体的智能结构。当前，研究的热点是基于压电传感器和作动器的智能结构，控制策略则来自控制、自适应控制、神经网络控制、非线性控制、混合控制等控制理论的新成果。目前智能结构已有许多成功的应用，大到对空间可展天线、太阳能帆板等张开时的振动进行主动控制，小到对提琴和吉他的音箱进行振动控制以改善其音响效果。

随着对振动控制要求的提高，非线性控制和时滞控制正日益引起人们的注意。例如，采用非线性策略解决绳系卫星展开过程的镇定问题，针对液压系统存在的时滞，用时滞反馈对船载吊车的摆动进行控制，采用时滞反馈控制非线性系统的混沌运动等。时滞会使控制系统的特性发生质的变化。由此引起的系统稳定性、分叉等问题需已引起重视。

由于振动半主动控制技术具有能耗低、勿需对原系统作大修改等优点，近年来日益得到人们关注。例如，已研制了多种电流变和磁流变可控阻尼器，针对转子轴承、车辆悬架、桥梁拉索等开发了半主动控制技术。此外，采用半主动控制的动力吸振器技术也有新的进展。为了实现工业应用，一个成功的主动控制作动器应具有：紧凑的结构，大的作动力，大的调

节距离，宽的频率范围。

（四）交叉力学的发展趋势

20 世纪以来，力学有了很大的发展，创立了一系列重要的新概念、新理论和新方法。力学与其它学科的交叉和融合日显突出，形成了许多力学交叉学科：力学与物理学的交叉形成了物理力学，与生命科学的交叉形成了生物力学，与环境科学和地学的交叉形成了环境力学，以及爆炸力学、等离子体力学等都形成了力学的新的学科生长点，不断地丰富着力学的研究内容和方法，并使力学学科始终保持着旺盛的生命力。同时，人类社会和经济发展的更高需求将不断促进力学与其他学科的交叉，促进力学交叉学科发展到一个崭新的阶段。下面分别对交叉力学领域的五个主要分支领域的发展趋势进行阐述：

物理力学：我国著名力学家钱学森认为物质的微观知识与宏观知识之间必定存在着紧密的联系，于上世纪 50 年代初提出和建立起物理力学这门新兴交叉学科。近 50 年来，物理力学获得了很大发展，平衡态和非平衡态统计力学的发展为物理力学提供了新概念、新理论，如：格林函数理论、临界现象理论中的标度律和重正化群理论，广义 Master 方程，非平衡统计算法等。分子动力学方法、蒙特卡罗方法、从头算分子动力学方法，从量子力学密度泛函理论出发的连续计算多尺度方法，以及与蒙特卡罗方法相结合的第一原理分子动力学方法等，为研究介质及材料的平衡或非平衡乃至瞬态力学性质，提供了有力的方法。原子力显微镜和扫描隧道显微镜实现了原子分辨的观测，为原子尺度的微观力学理论分析提供了实验数据。物理力学是一门正在发展中的交叉学科，现今的研究工作主要集中在三个方面：高温气体性质；稠密流体性质；固体材料性质。因此，非平衡态统计力学一定会进一步发展出较为系统的理论，随着计算机技术的迅速发展，计算规模、速度和精度将得到大幅度提高，观测仪器和实验手段也将不断改进，也将促进物理力学不断面向一些更加复杂和困难的实际问题，如：真实物质的平衡相变问题、摩擦问题、高度非平衡问题等，并不断取得突破性进展。

生物力学：自上世纪 60 年代著名华裔力学家冯元桢教授开创了这一新的力学交叉研究领域以来，生物力学的发展历程从主要是定量生理学目标上的宏观层次（组织、器官、整体等）研究，到目前的定量生物学目标上的微观层次（分子、细胞等）研究，并注重与宏观相结合，更加体现了生命现象的力学-化学、力学-生物学耦合。当今生物力学发展正经历着深刻的变化。基础研究逐步精细化及量化，同时推动着生物力学由宏观向微（细）观深入、并强调宏-微（细）观相结合。在基础方面，与生物物理学、生物数学、生物信息学、生物

化学等紧密结合，重点研究生物学的定量化和精确化问题；在应用研究方面，组织工程、药物设计与运输、血流动力学、骨-肌肉-关节力学等正在得到临床认同。当前生物力学发展的前沿领域主要包括：1) 细胞-分子力学与工程；2) 器官-组织力学与工程；3) 骨骼-肌肉-关节力学与工程；4) 生物力学新概念、新技术与新方法等。根据国际生物力学大发展和国内发展现状，在今后一个时期我国生物力学研究应重点发展的领域包括：细胞-亚细胞-分子生物力学，组织-器官力学，骨-关节力学，心血管工程力学，空间生物力学与重力生物学，生命现象系统化和模型化研究，生物力学新概念、新技术和新方法等。同时，针对我国经济和社会可持续发展的需求，积极开展植物生物力学和仿生力学的研究，以及采取必要措施继续促进我国具有原创性的肝胆流变学研究。

爆炸力学：是一个交叉性的力学分支学科领域，研究爆炸、冲击和能量突然沉积等强动载荷下介质、材料与结构的力学响应、效应及工程技术应用。爆炸力学发展的重要科学问题和前沿突破方向主要包括：1) 非均匀性、微结构、相变和化学反应对物质与材料动力学性态影响的实验、多尺度连续介质数值模拟和分子动力学、第一原理计算编码及数值研究；2) 高应变率、复杂应力状态和高能量密度加载下物质、材料与结构的力学性质和响应，包括利用激光、脉冲功率等技术创造的极端条件下物质性态的研究；3) 钝感炸药性能和爆炸安全问题研究，包括非理想爆轰、反应引发和向爆炸转变机制、终点弹道效应研究；4) 建立先进的实验加载技术和快响应、高分辨能力的实验诊断技术，如电磁驱动技术、高幅频高扫速电子相机、线成像光学记录速度干涉仪、高时空分辨热像仪、二维动态散斑诊断技术和激光诱导荧光测量系统等；5) 拓展爆炸力学研究领域，加强与近代物理科学的结合和融合，发展成为当代科学重要生长点—高能量密度物理的主要组成部分之一。

环境力学：是力学与环境科学相结合而形成一门新兴交叉学科，涉及到环境力学的基本建模、大气环境、水环境、岩土体环境、地球内部流动、地球界面过程、环境灾害、工业环境流动、环境多相流动，以及环境力学的计算、实验理论和方法等方面。环境问题的基础研究逐步精细化和量化，大量数据的积累要求模型化和数学化。21 世纪我国的环境力学研究，既要注重学科发展的自身规律和要求，又要紧密结合国家需求和工程实际。必须围绕这两个方面的需求，抓住一个基础（复杂介质流动和多过程耦合）、两个经济发展地区（西部和沿海）、三个方面（水环境、大气环境、灾害与安全），确立优先发展领域，促进学科的发展。一方面强调环境力学中的共性科学问题，包括：“环境力学”中流动与运输的基本方程和求解方法；气、液、固界面的耦合；多相、多组分、多过程，以及多尺度的耦合与分析

等；以及“环境力学”中物理模型实验中的尺度效应问题等。另一方面，瞄准西部开发和沿海经济开发，以及重大工程和影响的实际问题确定学科的重点发展领域：西部干旱、半干旱环境治理的动力学过程——土壤侵蚀机理、沙尘暴形成和输送机理、以及荒漠化治理；以水或气为载体的物质输运过程——污染物排放过程的精确预报、河口海岸泥沙、污染物输运及其对生态环境的影响规律；以及重大环境灾害发生机理及预报——风暴潮/洪水预报、滑坡/泥石流产生机理、热带气旋、全球变暖等。

等离子体力学：等离子体学科具有高度的交叉性，物理、化学、力学、工程技术科学紧密交织，而力学始终是其重要内涵。等离子体力学研究主要包括高温等离子体力学和低温等离子体力学。研究与高比压、高约束、高自举电流份额等性能集成的等离子体有关的科学问题，将是未来的十年内磁约束等离子体研究的重点方向。点火物理基础和高能量密度物理研究，将是惯性约束等离子体研究的重要方向。在热等离子体方面，研制新型的等离子体发生器，等离子体流和喷射与其中的原料颗粒或工作气体以及和环境气体之间的相互作用，热等离子体与材料表面的相互作用以及涂层或膜的形成过程，一直是研究的重点。探索建立偏离局域热力学平衡和考虑稀薄气体效应的等离子体理论模型，具有重要的科学意义和实际应用背景。在大气压非平衡等离子体方面，重点在研究其基本物理过程特别是非平衡特性。在低气压低温等离子体方面，重点是通过实验诊断和理论模型相结合的方法研究等离子体放电参数与外界可控参数之间的关系，以设计出能适应工业界各种不同要求的等离子体放电设备。

三、力学学科的国内研究现状与主要成果

（一）学科发展轨迹和现状

我国的近代力学事业始于 20 世纪 50 年代。从这时起，力学对新中国现代科学发展和国民经济建设肩负着特殊使命，做出了巨大贡献：从两弹一星到深潜弹道导弹核潜艇的研制，从长江大桥到长江三峡的建设，从三次采油到大型水轮发电机组的设计、制造，从天气、灾害的预报到环境治理，无不反映力学的理论在生产实践中的巨大作用，无不凝聚着力学工作者和相关学科的科学家、工程技术人员的共同心血。

力学从 18 世纪开始从物理学逐渐分离出来。物理学以研究时空和物质的结构及其相互作用为对象，力学以研究真实介质的力学性质和行为，包括：位移，变形、破坏、流动、输运等为主要内容，有各自明确的分工，相互并不包含代替。1980 年对于力学的性质曾进行

过一次广泛的大讨论，确立了力学是一门独立的基础学科的地位。这些在 1987 年国家科委基础研究规划和 1999 年国家重点基础研究发展规划总纲（草稿）中都有所反映。20 多年来的实践表明，这样的认识促进了力学学科的发展，也使力学在经济建设和国家安全方面做出了更大的贡献。

目前，中国力学学会会员总数超过 2 万人，从事与力学有关研究的两院院士有 60 余名。对国内 86 个单位的力学基础研究人员调研结果表明目前国内拥有 5300 余人的力学基础研究队伍（具有正高级职称的人员 1651 人，副高级职称人员 2363 人，中级职称人员 1289 人）。

中国在国际力学界处于举足轻重的地位。对 SCI 源库中 106 种力学期刊的国际联机检索统计表明：2000~2004 年间中国力学学科(不含港澳台)的论文数分别为：2000 年/655 篇、2001 年/761 篇、2002 年/799 篇、2003 年/931 篇、2004 年/993 篇，2000—2002 年世界排名为第 3 名，2003—2004 年世界排名上升到第 2 名，而中国总的 SCI 收录论文数为世界第 11 名。最近 5 年，在力学类影响因子前 10 位期刊的论文排行情况为：2000 年/13 篇、2001 年/31 篇、2002 年/38 篇、2003 年/40 篇、2004 年/48 篇，中国学者在力学顶尖刊物上发表的论文数目呈明显增加趋势，由 1.4% 增加至约 5%，表明中国力学总体水平的提高。

目前，我国在国际理论与应用力学联合会（IUTAM）中有 4 名理事，1 名执委会委员，1 名大会委员会委员，2 名专门工作委员会委员。我国的力学期刊数已达 20 余种，其中进入 SCI 的刊物 3 种。我国已经常主办和承办各种国际力学学术会议，仅近 20 年中国力学学会举办的国际会议就达 100 余个，国外代表超过 5 000 人，如中国力学学会自成系列的国际会议有国际流体力学会议、国际实验力学会议等，一些会议规模达到千人，还承办过 6 个 IUTAM 的 Symposium 和 3 个 Summer School。

力学是我国有传统优势的学科之一，也是一门独立的重要学科。我国学者钱学森、周培源、钱伟长、郭永怀等，在国际上享有盛名。他们在湍流理论、喷气推进、空气动力学、板壳理论、航空工程、工程控制论、物理力学、广义变分原理，应用数学等方面，以及李四光在地质力学、冯康在有限元法和辛算法方面所做的开创性贡献，赢得了世界力学界的尊重。我国力学学者王仁、程耿东被四年一度的 IUTAM 大会邀请做 1 小时大会专题报告，表明我国在地球动力学和拓扑优化领域具有重要国际影响。我国力学研究的优势领域为：（1）在湍流、流动稳定性、复杂流动等流体力学领域，在本构关系、断裂、宏微观力学、计算结构力学与优化设计、光测实验力学等固体力学领域，在运动稳定性、非线性振动、结构振动与控

制等领域，在爆炸力学、微重力等交叉学科领域，保持着一支活跃在国际学术研究前沿的研究队伍。(2)在板壳理论、广义变分原理等与数学紧密结合的力学分支取得多项开创性成果。

(3)由我国特定条件和资源而决定的力学研究优势领域。在上述国内相对优势领域已经成长出一批国家自然科学基金委员会“创新研究群体”，如2001年清华大学破坏力学研究组获得了“创新研究群体”、2003年中国空气动力研究与发展中心空气动力学研究组获得“创新研究群体”、2004年大连理工大学计算固体力学组获得了“创新研究群体”、2006年中科院力学所高温高速气体动力学研究组获得了“创新研究群体”。此外，我国学者在国际上做出了一些较有影响的成果，最近5年共获得国家自然科学奖二等奖6项、国家科技进步奖一等奖3项、二等奖14项。下面，分别对力学学科的主要4个分支学科（固体力学、流体力学、动力学与控制、交叉力学）在近几年的研究成果进行介绍。

(二) 主要研究成果

1. 固体力学的研究成果

长期以来，我国固体力学科研工作者在基础理论和国家经济、国防建设方面取得了巨大成就。进入21世纪以来，随着我国社会、经济、科技和教育各方面的快速发展，我国科学工作者在固体力学理论、计算、实验、跨学科研究以及力学在重大工程中的应用等方面获得了一批具有国际领先水平的成果。

我国学者在张量函数表示理论与材料本构方程不变性研究领域为形成现代张量函数表示理论及奠定其应用基础做出了决定性贡献；发现了一些重要的本构不变性性质。首次提出了为建立现代张量函数表示理论完整体系而有待于解决的主要命题；并完整地解决了这些命题。有关结果归结为一系列新的基本定理和连续统对称性原理，这些再加上已有的 Hilbert 定理和 Neumann 原理，构成现代张量函数表示理论的基础、基本框架及其应用基础。“指引了一条对各向异性材料的连续介质力学和物理进行统一和理性研究的途径。”首创各向异性张量函数的完备且不可约表示的系统且简便的方法。“第一次针对所有种类材料对称性，给出了具有实质意义的完整的张量函数表示”。首次获得高阶张量函数表示的系统性结果。首次给出高阶张量正交不可约分解的系统建立方法。发现了非均匀材料的一系列新的不变性性质和减弱依赖性质。开拓了张量函数表示理论在现代力学多方面的应用。这些成果在国际上被广泛应用于建立各种复杂材料行为的模型。

铁电陶瓷作为新一代功能陶瓷的代表,其可靠性问题日益受到关注。我国学者系统且定量地探讨了铁电陶瓷在力电耦合加载下以断裂和疲劳裂纹扩展为代表形式的失效过程,提出电致断裂、电致疲劳裂纹控制和电致畴变增韧的模型。发现裂尖集中电场诱发的铁电畴变区,并确定该区为非常规畴变区;提出电致断裂和电致疲劳裂纹扩展的起因在于裂纹尖端的约束应力场,建立了小范围畴变模型;提出畴变驱动的力电耦合增韧机理,得到畴变造成的屏蔽应力强度因子,阐述了极化电场造成的断裂韧性各向异性和正负电场对断裂韧性作用的非对称性;提出弛豫型铁电陶瓷的电致断裂的机理阐述和标度律;发现在亚矫顽交变电场下的电致疲劳裂纹扩展行为,给出了疲劳裂纹扩展量与电场翻转次数的理论预测值;建立了测量铁电陶瓷耦合变形的本构试验系统,提出了一种基于铁电材料内部电畴分布的宏微观相结合的本构理论。以上研究成果和实验系统受到国内外研究者的大量的引用和应用,产生了广泛的国内外影响。

我国在计算力学的多个研究方向上处于国际领先水平,开发的若干计算力学软件在算法和功能上有特色,解决了一大批国家经济和国防建设提出的问题,打破了西方国家的壁垒。特别是,我国学者在结构的微构造优化、结构拓扑优化以及奇异最优解理论、结构形状优化以及灵敏度分析、结构优化方法与软件应用等方面,都取得令国际同行瞩目的成果,在国际同行中保持重要的影响。

自 80 年代以来,拓扑优化一直是工程结构优化设计领域中的一个最受瞩目的研究方向。但是奇异最优解问题从理论上对结构优化研究提出了严峻挑战。十余年来,对该问题的研究是结构优化领域的重要国际前沿课题之一。我国学者在对此问题的研究中取得了具有原始创新性的研究成果,得到了国内外同行的广泛承认和高度评价。首次正确描述了奇异优化问题的可行域形状以及奇异最优解的本质特点,纠正了以往研究中的错误认识。首次将连续性分析引入奇异最优解研究,为奇异性现象的分析及求解方法的构造提供了有力的理论工具。指出了传统拓扑优化算法求解奇异性问题的固有缺陷以及不同类型拓扑优化问题的本质区别。提出了处理奇异最优解的 Epsilon-放松及其系列算法,成功地将结构拓扑优化和尺寸优化统一在了同一框架之下。上述理论和算法研究成果,在大型结构分析与优化设计软件 JIFEX 中实现,并应用于工业和国防工程等结构优化选型的研究开发中,取得了显著的社会效益。所提出的 Epsilon-放松及其系列算法,受到结构优化界很多学者的重视,被广泛实质性引用和推广。

我国学者针对多场、多尺度的材料和结构力学行为研究的需求,进行实验研究,揭示了

新材料和结构力学响应规律；根据微/纳米材料和微电子技术等高科技发展对实验力学测试技术的需求，发展了新型的力学测试方法、技术，利用这些新方法和技术有效地解决了许多有价值的学术问题。在力学测试系统和设备开发方面取得了显著的进展，为国民经济和国防建设做出了重要贡献。例如，发明和研制的用光测手段测量靶场基地目标运动三维姿态的系列方法和装备，已经在国防建设中得到应用。实验力学实现了与其他学科更广泛的交叉，使得实验力学研究对象和范围不断拓展，产生了新的生长点。例如，基于 MEMS 制作技术在国内首次实现非致冷技术的室温物体红外成像，温度分辨率处于国际先进水平；实验力学在与生物医学工程、土木工程、新材料和器件等的跨学科研究方面也取得了许多重要成果。

近年来，我国固体力学学者研究了纳米尺度下材料和器件的一系列新的力学行为，提出了有重要影响的原创性思想，对纳米材料的性能研究和材料设计，做出了重要贡献；我国学者提出首个 GHz 纳机械振荡器的构想和理论预测并率先进行了系统的研究；提出了纳米晶体的塑性变形模型；提出了多种高效的跨尺度计算方法；建立和发展了新的细观力学理论；在生物材料的微纳米力学与仿生研究中有一系列新发现；在新型功能-结构一体化材料和轻质材料、功能梯度材料、航空航天耐高温材料的力学行为分析方面取得了具有重要理论意义和应用价值的成果。还在弹性力学、塑性力学、断裂力学、振动理论、冲击动力学、制造工艺学，以及应力波和电磁波在非均匀、各向异性、多场耦合介质和新型材料中的传播等领域取得许多重要创新成果。

2. 流体力学的研究成果

在流体力学研究方面，我国学者在分离流、旋涡运动、非平衡流动、湍流、流动稳定性等领域取得了一些具有国际影响的研究成果。在高精度、高分辨率算法的研究中，以 NND 格式、新型 WENO 格式、非线性紧致格式、超紧致格式和直接群速度控制的新紧致型差分方法为代表，取得了许多高水平的研究成果。发展了求解不可压 NS 方程的高阶投影算法和高精度高分辨率紧致有限差分—Fourier 谱方法，以及三维不可压圆柱粘性绕流 DNS 的谱—谱元法。在微流动算法、连续—稀薄流统一算法和分区并行计算理论方面，获得了有国际显示度的研究进展。

我国学者从复杂性科学的角度提出了湍流复杂系统论的观点，从理论上对传统的层次结构模型进行了拓展，阐明了该模型与湍流的另外两类自相似性，即扩展自相似性和广义扩展自相似性之间的联系。在湍流模式研究中，建立了以显式代数应力模式为基础的非线性涡粘

性湍流模式体系。提出了满足可实现性原理的二阶非线性涡粘性模式，无壁面几何参数的近壁低雷诺数模式修正，考虑流动曲率影响的非线性模式，高阶紧致非线性模式。在对标量湍流输运特性的研究中，发现雷诺平均普朗特数和分子普朗特数的倒数呈线性关系，以及亚格子普朗特数在分子普朗特数 1 附近有极值。提出了一种理性的大涡模拟模式，使大涡模拟模式从唯象型走向理性，并在各向异性湍流中进行了推广。在壁面展向周期运动减阻机理研究中，提出了控制减阻率大小的关键参数，揭示了湍流再分配在其中的关键作用。在复杂湍流的大涡模拟研究中，发现了声特性与旋拧射流的湍流涡破碎和流动分离的内在关联(JFM 2005)。

在旋涡动力学的研究中，提出了一类新的理论方法，可基于有限流场数据分析揭示柔性运动物体的受力特性及其与流场涡结构的内在关系(JFM, 2007)；得到了几类纳维-斯托克斯方程的三维旋涡精确解，发展了 Batchelor 有关理论分析的结果；发现亥姆霍兹涡环解的混沌现象；利用特征张量表示张量不变量问题，提出了用兰姆曲面来刻画涡元结构的方法。在实验研究中，发现转捩边界层二次涡环，澄清了高频旋涡产生的机制，揭示了流向涡产生的机理。

在边界层流动稳定性研究中，分析了壁面吹吸气对增强和抑制非定常边界层不稳定性的影响特性(JFM,2006)，揭示了表面活性剂对非定常边界层长波不稳定特性的影响规律(JFM,2006)。在微流动稳定性的研究中，发现了在低雷诺数下，壁面滑移引起了一种新的不稳定性—短波不稳定性，但对于长波的小扰动是稳定的(JFM 2006)。在复杂流体的流动稳定性研究中，在螺旋 Couette 流中发现了宾汉流体的屈服应力对流动所产生的不稳定性效应，而以往的研究一直认为，屈服应力的存在对流动起着稳定的作用。该成果发表后(JFM2004)，国际同行在 JFM (2006)上撰文指出：该效应是由加拿大学者和中国学者各自独立发现，并在其论文中 12 次引用了中国学者的名字。

我国学者开展了高超声速推进系统关键技术和飞行器气动构型的基础研究，装备成国际上首座爆轰驱动激波风洞 JF10。在氢/空气超声速燃烧实验用支板与壁面横向喷注混合的混合增强手段，使燃烧效率达到 90% 以上，并在国际上首次发现了传统的超声速燃烧自点火规律的局限。在煤油/空气超声速燃烧实验中，利用氢引导火焰、燃烧室壁面凹腔和充气雾化的方法解决了煤油点火、煤油/空气混合增强和稳定的超声速燃烧等关键技术问题。在氢充气雾化煤油条件下超声速燃烧的效率可达 80%。提出了凹腔稳定燃烧的新机理。在激波动力学研究方面，获得了平面、轴对称定常超音速流动马赫反射中，马赫杆形状的解析解，

并用数值方法进行了验证。自 1878 年马赫反射现象被发现，马赫杆形状一直未得到解决。研究基于数学物理分析，发现在平面和轴对称马赫反射中，当滑移线与来流夹角较小时，马赫杆的形状为一段圆弧，它后面的流动可以用无旋小扰动方程描述(JFM 2006)。

在“游动的生物力学与仿生技术”研究方面，我国学者采用数值模拟和理论模化分析了鱼体 C 形快速起动的模型流动，发现了鱼体的瞬变加速度引发的附加惯性力对即时产生推力起很大作用，但是在起动过程中的平均推力主要是由涡流场诱导作用所提供的；分析了波状摆动推进的运动学和动力学机理，包括流动控制、减阻和最佳推进效率等。在对果蝇翅作拍动运动的研究中发现：果蝇用超前模式作拍动运动，可产生非定常高升力，其平均值是定常值的 2-3 倍，阐明了产生此高升力的三个原因；该研究成果被国际著名刊物 *J. Exp. Biol.* 在其 *Highlights In This Issue* 中作为“突出成果”介绍。

在过去五年中，我国学者在水动力学的研究领域也取得了一系列进展。特别在气垫船、地效飞行器、微小型扑动翼仿生飞行器、机器鱼的研制方面均获得令人鼓舞的成果。在对细长体通气空泡流的研究方面，对通气空泡的形态特性、非对称性、稳定性、重力效应以及空化器形状对空泡外形的影响等进行了深入的研究，对于低 Fr 数下空泡轴线上翘特性有了新的认识。海水污染、地表水污染和地下水污染，是我国水环境面临的重大难题。我国学者在对渤海湾、杭州湾、长江口和珠江口的近海流场的流动规律和污染物扩散的研究方面取得了一系列进展。从流体力学的角度为我国近海环境的全面规划和综合治理作出了贡献。

3. 动力学与控制的研究成果

在非线性动力学理论研究和应用方面，我国学者在国际上得到了一些较有影响的成果，近几年有 3 个项目获得国家自然科学二等奖，有 3 个项目获得国家科技进步二等奖。我国学者在以下几方面做出了一些有影响的研究工作：非线性随机系统动力学的 Hamilton 理论体系，非线性鲁棒稳定性方面的系统，以 C-L 方法为核心的工程非线性动力学分析方法，神经网络和非光滑系统非线性动力学，时滞系统非线性动力学与控制，高维非线性系统的全局分叉和多脉冲混沌动力学，转子系统的非线性动力学，轴向运动材料的非线性动力学，增量谐波平衡法及其在强非线性振动，碰撞振动系统的非线性动力学，航空和航天动力学等。

近几年来我国学者在哈密顿体系内研究多自由度强非线性系统的随机动力学与控制，在国际上首次提出并发展了随机激励的耗散的哈密顿系统理论，证明了解的泛函结构取决于相

应哈密顿或广义哈密顿系统的可积性与共振性，给出了五类系统的精确平稳解的泛函形式、求解方法及解的存在条件，提出与发展了高斯白噪声、宽带噪声、窄带有界噪声、谐和与白噪声激励下拟哈密顿系统与拟广义哈密顿系统随机平均法，证明了平均方程的形式取决于相应哈密顿或广义哈密顿系统的可积性与共振性，给出了五类拟哈密顿或拟广义哈密顿系统平均方程系数的公式与求平均方程精确平稳解的方法，并将该法用于研究拟哈密顿系统与拟广义哈密顿系统的随机稳定性、随机分岔、首次穿越及非线性随机最优控制。

我国学者长期致力于振动控制系统的非线性动力学研究，揭示了反馈时滞、弹性约束、迟滞阻尼等因素对振动控制系统的影响规律，其主要创新成果：(1) 对于具有反馈时滞的振动控制系统，发现系统含待定参数时的全时滞稳定性、短时滞稳定性、稳定性切换、区间稳定性的代数判据，揭示了时滞和系统参数对系统稳定性影响的规律；提出 Poincaré 板和不动弧段概念，构造了周期振动分析方法；发现非线性自治时滞系统会存在无限多个 Hopf 分叉及相应的共存自激振动，时滞速度反馈系统具有无限多个共存周期振动。(2) 对于具有迟滞阻尼的振动控制系统：使系统非线性参数辨识转化为线性参数估计，实现了金属橡胶、磁流变阻尼等非线性迟滞阻尼器件的实验建模；从局部拟动力学角度构造这类系统的振动控制策略，提出神经网络自适应控制方法并证明其收敛性，实现了车辆悬架受迫振动和飞机机翼模型自激振动的半主动控制。

我国学者为揭示工程结构中突变现象的机理，对包含可分析大型转子裂纹、油膜振荡、低频失稳等各种非线性要素的最具广泛代表性的二阶微分方程，创建了求周期分岔解的理论方法，被国际同行专家称为 C-L 方法。C-L 方法建立了解的拓扑结构与系统参数的全面联系，随着参数的变化共得六种保持性的分叉响应模式，而传统的方法只能得到一种。随后我国学者将 C-L 方法推广到了对称余维 4 和对称余维 5 的情况，可以从更深的层次上了解分叉解的拓扑结构和系统参数之间的关系。

我国学者在高维非线性系统全局分叉和混沌动力学研究取得了有影响的成果，建立了自治系统正规形直接法和非自治系统的正规形复内积平均法，可将系统进行降维处理。改进了共轭算子法，利用改进的共轭算子法获得了高维非线性动力系统的正规形。我国学者在轴向运动粘弹性材料的非线性振动、全局分叉和混沌动力学的研究方面取得了一系列的成果。对多自由度系统的组合振动和模态相互作用动力学研究已经取得一些重要成果，并且扩展到梁、板、壳、弦线、悬索、传送带、流-固耦合结构等系统，涉及不同的本构关系、约束条件和控制方式。

生物神经系统是由数量十分巨大的神经元相互联结的极其复杂的多层次信息网络系统。我国学者对神经元通过放电活动对信息进行编码的影响规律、神经信息的产生、整合和传递进行了研究,其中涉及输电脉冲串的产生过程、大量放电节律模式和复杂的突触连接方式、耦合神经元的同步、信息编码过程、噪声影响、以及神经电生理实验中发现的各种新现象等。对于大脑神经网络系统的感知、学习、思维、记忆等认知功能,以及联络和调节整个生物体活动的功能等典型的复杂非线性动力学行为进行了研究,取得了大量的研究成果。

我国在分析力学理论发展的完善化、数学方法的现代化、工程应用的专门化诸方面取得了显著的成绩。最近 10 年来,围绕着解决所提出的关于分析力学学科发展的 18 个重要问题,我国学者做了大量的、卓有成效的研究工作,特别是在近代分析力学的几个重要方向上取得了进步、提高了国际承认程度。特别是在以下几方面取得了进展,(1)Birkhoff 系统动力学;(2)约束力学系统的对称性与守恒量;(3)非完整约束系统几何动力学;(4)单面约束与摩擦、碰撞非光滑分析。提出了线性动力学对偶体系及在 Kluwer Academic Press 出版的专著,对非完整系统和 Birkhoff 系统动力学所作的重要贡献以及在 Applied Mechanics Reviews (AMR) 上所发表的综述文章等,对于单面约束与摩擦、碰撞非光滑分析的贡献等。

近二十多年,我国学者在柔性多体系统的建模理论与计算方法方面做了大量的工作。推出了不少可以处理柔性多体动力学问题的商业软件,如自主开发的 CADAMB。在刚柔耦合动力学建模理论研究过程中,放弃国内外的学者采用一些假定,即引入“动力刚度项”的修正模式,认为造成零次近似耦合动力学方程缺陷的主要原因应该是在对柔性体变形运动描述时没有考虑大范围运动对其的影响。

4. 交叉力学的研究成果

物理力学:我国学者在物理力学研究方面,取得了丰硕的成果,并对工程技术做出了巨大贡献。高温、高压下辐射不透明度和物态方程的研究,为核爆炸、飞行器再入等问题的解决提供了实用的计算方法和解决途径;建立和发展了炸药平面透镜及二级轻气泡等物态方程的新实验技术;提出了预测炸药最高装药密度的经验方法;从原子与分子的结构理论出发,提出了在高温高压条件下石墨转变成金刚石的结构转化理论框架,受到国际同行的高度评价和重视。我国学者还在离子化气体和高温气体的化学反应及其动力学研究、气体化学反应速率常数的微观理论、气流介质与激光相互作用的理论和数值研究、液体结构的分子动力学研究、量子蒙特卡罗方法研究、晶界弛豫研究、材料断口分形研究,以及固体界面物理力学研

究等方面取得了重要的研究成果，在国际上赢得了重要的学术地位。

生物力学：近十余年来，我国生物力学发展取得了长足的进步，研究几乎涵盖了国际上生物力学的前沿研究方向，主要集中在细胞-分子力学、骨力学、血液动力学、组织工程等方面。我国当前生物力学研究从总体上看仍处于跟踪水平，但一些领域也具有一定的相对优势：生物大分子间特异性相互作用的定量化、作用力对分子键结合与解离的影响方面的研究与国际水平相当；胆汁流变学及胆石成因、胆管力学性质、胆道排石机理及关键技术、肝脏流变学等方面的研究工作具有一定的原创性；血瘀证与活血化瘀研究具有中国特色，而血液流变学则为其定量化做出了重要贡献。

爆炸力学：爆轰冲击波动力学理论，为非理想爆轰理论传播和爆炸装置精密数值模拟指出了发展途径，带动了爆轰实验研究，得到了重要的实际应用。磁压驱动等熵压缩和高速宏观飞片实验开辟了研究更大范围物态方程的新途径。我国在应力波传播、动态断裂、高速撞击、侵彻、结构响应和冲击防护等方面的大量研究，解决了许多工程实际问题。电子相机、高速摄影技术、X 闪光照相技术、宽带（GHz）高速数字示波器以及相关的传感器、光源和快电子学设备已普遍应用于我国爆炸力学实验。已经开发成功测量超短脉冲（皮秒、飞秒）激光照射样品引起的超短冲击波运动的多种技术。国内的爆轰研究较好地满足了射流、射弹、云爆等类型战斗部的设计、实验和数值模拟的需要；爆炸复合、材料合成、表面喷涂等技术已实际应用于工业生产。在离散粒子计算、分子动力学和第一原理计算方面做了很多原创性和较先进的工作。基本掌握爆炸力学近代实验测量技术，高速摄影、X 闪光照相、传感器、激光测速等技术运用比较普遍。一些先进技术如数字散斑、磁压加载、压剪加载、激光干涉和光谱测量，也取得了一定进展。

环境力学：我国的环境力学与国际研究同步发展，自 80 年代以来，力学研究人员积极参与环境问题研究，取得了可喜的成果。如：利用环境风洞和分层水槽，实验研究大气或水体中的污染物对流扩散，为核电厂设计、城市 CBD 规划，苏州河治理提供重要依据；结合长江口航道整治，珠江口治理，研究河口非恒定水流与泥沙输运，在河口海岸工程中发挥作用；建立二维坡面产流、产沙动力学模型，扩展到小流域，分析侵蚀的影响因素，给出土壤侵蚀临界坡度，为西部治理提供科学依据；研究风沙起动临界风速，得到风沙输沙率公式，发现风沙带电现象，分析了它对风沙运动的影响；研究了地球界面过程，模拟了有植被的大气边界层，分析结皮层对土壤水分运动影响及其生态效应；通过湍流模拟，获得波龄，稳定度对海气交换系数的影响，为气候模型参数化提供依据；用涡动力学研究台风异常路径，数

值模拟台风浪、风暴潮灾害。经过 20 余年的积累，逐步形成了环境力学的理论框架，凝聚了环境力学的研究队伍，为我国可持续发展做出了贡献。

等离子力学：近以来，等离子体力学取得了重要发展。我国的聚变研究有较大的发展，先后改造升级或建成了多种托卡马克装置、激光装置和多台超强超短激光装置，并与理论和数值模拟研究相结合，开展了有关磁流体不稳定性、湍流和输运、加热和电流驱动、激光与等离子体相互作用、高温辐射流体力学和内爆动力学等方面的研究，取得一些有意义的研究成果。以 EAST、HL-2A 装置为基础的国内磁约束聚变实验平台和(惯性约束)国家点火装置的建设，将促使我国的聚变研究将会有较快的发展。低温等离子体研究总体上与国际先进水平仍有不小差距，单也取得了较大发展和一些有特色的研究成果，例如层流热等离子体长射流产生与特性研究，等离子体离子注入研究等。我国微电子行业近几年来增长势头很强，在今后十年中，我国在低温等离子体相关方面的研究一定会取得较大的进步。

（三）工程应用的典型实例

1. 机车车辆—轨道耦合动力学理论及工程应用

我国学者运用动力学理论对这一工程科学问题进行了 10 多年的研究，研究成果入选 2005 年度中国高校十大科技进展，获得 2005 年国家科技进步一等奖。其系统性研究成果为：1.) 提出并系统创建了机车车辆—轨道耦合动力学全新理论体系，结束了长期以来将机车车辆、轨道割裂开来研究的局面，为中国铁路大运量、高密度、客货混运、超负荷运输模式下机车车辆及轨道动态安全设计提供了关键理论基础。2) 在国际上首次建立了详细的机车车辆—轨道耦合模型，包括各种典型机车、客车、货车、轨道模型及轮轨动态耦合模型该模型在国际上具有一定影响，被称为“翟—孙模型”，列为该领域四种代表性模型之一，得到德国、英国、瑞典、丹麦、澳大利亚、加拿大、日本等国及我国同行学者广泛引用和采用。3. 研制了具有完全自主知识产权的机车车辆—轨道耦合动力学仿真分析系统 VICT 和 TTISIM，建立了机车车辆—轨道动态作用安全性现场测试评估系统，为超负荷运输模式下机车车辆及轨道系统动力性能优化设计及运用安全性评估提供了关键技术手段。

近年来，机车车辆—轨道耦合动力学理论及技术被广泛应用于我国铁路机车车辆开发设计、既有铁路提速改造、山区铁路扩能改造、重载运输、客运专线建设等 10 多个重点工程（产品）之中，其中包括时速 200km “天梭号”新型机车研制、提速客运电力机车韶山 7E

改进设计，京秦、沈大、哈长线等干线铁路提速改造工程，成渝、黔桂、川黔、贵昆线等山区铁路困难路段扩能改造工程，以及秦沈、遂渝、福厦、广深港等设计时速 200~350km 的新建铁路工程，攻克了一系列工程技术难题，取得了显著的经济社会效益，为我国铁路现代化建设做出了重要贡献。

2. 返回舱气动计算和评估

在返回舱方案论证、方案设计阶段，开展了低速、亚跨超、高超音速气动力计算方法、返回舱气动参数辨识方法、返回舱再入弹道仿真方法的研究，集中全国气动力学研究人员来逐一攻关，解决了气动研究领域由过去普通的飞机导弹类外形到返回舱大钝头外形所引起的许多新的难题。在神舟系列飞船飞行试验阶段，对于每一艘飞船返回舱飞行试验数据都进行了气动参数辨识，得到了返回舱在真实飞行环境下的气动特性；采用飞行力学仿真的方法完成了大量的返回舱飞行性能分析评估工作，为返回舱控制系统改进设计、气动特性天地相关性分析等提供了依据。本项目系统地展示了返回舱研制过程中相关的计算方法研究进展和研究成果。这些研究成果在神舟飞船的研制中发挥了重要作用，为确保载人飞船的成功返回做出了巨大贡献。研究成果包括：1) “返回舱气动一体化设计系统”的建立；2) 气动特性数值计算及气动力数据手册的形成；3) 返回舱飞行试验气动参数辨识及飞行性能分析评估。上述研究成果应用于对神舟 3 号、4 号、5 号、6 号返回舱飞行试验结果的处理，辨识得到了神舟飞船返回舱在真实再入飞行环境下的气动特性，为进一步的气动特性天地相关性分析提供了宝贵的数据，为飞船总体部门采取应对措施提供了重要参考。

3. 航天防热材料与结构力学

航天防热材料的研究和应用是一个多学科交叉的前沿领域，力学在里面起到了举足轻重的作用。航天飞行器承受复杂的飞行载荷，材料与结构的响应严重影响飞行状态，因此力学分析是指导防热材料设计，保证飞行器安全的基础学科，对于烧蚀型防热材料烧蚀/侵蚀/剥蚀机理、使用性能表征；超高温陶瓷材料高温抗热震性能、高温强韧化设计；金属热防护系统防隔热一体化设计、热疲劳问题、健康监测等都是航天防热材料亟待解决的共性科学问题，它向力学工作者提出了新的挑战 and 机遇。

我国学者针对战略导弹弹头、固体火箭发动机喷管等关键防热部件用烧蚀型防热复合材

料开展模拟表征与评价技术研究。建立了过程监测信息完善、功能柔性可调的耐热材料烧/侵/剥蚀研究型试验模拟平台，实现了复杂环境与材料响应控制因素的耦合和解耦、模拟环境与材料响应全过程信息的实时捕获；揭示了服役模拟环境下新型碳基烧蚀型耐热材料响应机理和性能演变规律，实现了超常服役环境与材料响应耦合的多尺度数值模拟；建立了烧蚀型耐热材料科学表征体系与优化设计理论和方法。

超高温非烧蚀型耐热材料是发展高超声速、远程精确打击的新概念杀手锏武器装备的必然要求，我国学者开展了 ZrB₂ 和 HfB₂ 基超高温陶瓷材料的研制，完成非烧蚀型耐热材料表面催化、辐射特性试验研究，建立了超高温陶瓷材料的动态氧化动力学模型。对于航天飞行器大面积热防护系统已经研制了 γ -TiAl 基合金薄板和氧化物弥散增强镍基高温合金薄板；并针对国内高温合金薄板的轧制能力不足，利用 EB-PVD 技术制备了厚度为 0.2mm 左右的金属/陶瓷薄板材料。设计出结构更加合理的金属热防护系统，包括设计满足机体（或弹体）不同形状要求的热防护系统。

上述成果为航天耐热材料自主创新能力的提升提供了强大的技术储备，创造了显著的军事、社会和经济效益。

4. 制造工艺与模具关键技术以及在汽车制造中的应用

在机械加工、汽车制造、轻工和飞机制造等行业，冲压模具设计等方面的难题长期制约着行业的产品升级换代，重要的汽车车身制造模具长期依赖于进口，其中还包括与其相配套的工艺设计、设计软件和工程仿真系统。我国学者围绕冲压工艺中的具体问题，系统研究冲压工艺与模具设计理论、计算方法，以及薄板冲压工艺与模具设计的关键技术，为薄板冲压技术中的起皱、回弹和拉裂等瓶颈问题提供了一整套解决方案。实现了拉延筋理论和工艺的重大突破，攻克了薄板冲压工艺和设计中的重大难题，形成了基于 CAD/CAE/CAM 一体化的、与实际工程应用相配套、自己独立知识产权的关键技术与工艺实验装备。我国学者研发的汽车车身结构及部件快速精细设计、制造分析软件系统中有数项关键创新技术具有国际领先水平，为我国汽车车身部件自主设计、制造，提供了具有完全自主知识产权的核心软件技术。相关成果的推广和技术转化，大幅度压缩了薄板冲压工艺设计和模具设计制造周期，改善了车身结构碰撞仿真精度，成功解决了长期困扰国人的冲压件回弹预示与模面补偿疑难问题，降低了生产成本，提高了产品质量，直接带动了制造业的新产品开发和行业的技术进步，实现了行业跨越式发展。创造了显著的社会效益和经济效益。采用该技术生产的模具已用于

国内知名汽车和一些大型空调制造企业。此外，该成果还成功打入国际汽车市场，中国自主知识产权的高难度 CAE 产品和技术得到国际同行的认同，并成功实现零的突破，其国际影响和潜在的全球化社会效益是巨大的。

材料成形的轻量化、精确化、高效化需要对成形加工过程进行多尺度、多学科模拟仿真，宏、微观塑性本构理论、多场耦合以及率相关塑性大变形的有限元方法则是该领域中重要的基础性科学问题。在这一方面，我国学者已经取得了可喜的成绩，对注塑成型模拟技术开展了系统和深入的研究，发展和完善了高聚物成型过程的物理和数学模型，开发了相关的分析软件和仿真系统，使高聚物成型加工及模具设计建立在科学定量的基础上，为优化模具设计和控制产品成型过程以获得高性能的高聚物制品提供了科学依据和设计分析手段。

5. 岩体损伤力学及其在煤矿深部巷道支护设计中的应用

我国已探明的煤炭储量中，埋深在 1000m 以下的为 2.95 万亿 t，占煤炭资源总量的 53%。目前我国东部的一些矿区都已相继进入 700m 以下的深部，深部开采问题已逐渐摆在我们面前。深部开采面临的工程灾害将以更加明显的方式表现出来，如：巷道变形增大、采场矿压剧烈、采场失稳加剧、岩爆与冲击地压聚增、瓦斯高度聚积、瓦斯压力增大、突水事故几率增大、突水事故趋于严重等，这些灾害都与高地应力下的岩石力学行为密切相关，因此深部岩体的力学性质研究构成了这一问题的基础研究核心。

我国学者根据深部岩体的赋存条件和自然性状，充分考虑了深部岩体高度节理化特征，建立了深部裂隙岩体宏观损伤力学模型，推导出损伤的状态方程。在此基础上，提出了岩体蠕变非线性大变形损伤力学理论及有限元数值方法，成功预测了采动岩体的损伤大变形和蠕变稳定过程，为深部巷道支护设计提供了理论依据。近年来，我国学者将上述理论成果与传统的新奥法结合，提出了基于深部岩体力学特性的深部巷道支护设计方法，发展了相应的技术措施，并通过喷射钢纤维混凝土改善了喷层的整体力学行为，可更好地适应深部岩体大变形的特点。该技术于 2000 年首先在河南省鹤壁矿务局两个矿推广，采用喷射钢纤维混凝土代替原支护设计中的 U 型钢支架，有效地控制了巷道围岩变形，取得了近千万元的经济效益。最近又将该设计方法和相关技术推广到安徽淮南矿业集团望峰岗煤矿-817 水平(埋深 850m)水仓翻修工程(2006 年 9 月施工)，取得了良好效果。

6. 我国神舟飞船上液滴热毛细迁移空间实验

在地基研究的基础上，作为载人航天工程应用系统的有效载荷，2002 年底我国学者在我国神舟 4 号飞船返回舱在轨飞行期间进行了大 Marangoni 数(Ma)液滴热毛细迁移空间微重力实验。正常重力环境中涉及到的流体问题，浮力效应起着重要作用。在微重力环境下，流体内静压、流体的沉降、分层等现象基本消除。实验设备全部安装在飞船的返回舱中。实验装置采用了液滴注入及液路系统采用了双套筒技术及无增压液体存储补偿等专利技术。液滴迁移实验选择在飞船稳定的轨道飞行期间及圈次进行。根据加速度测量和分析，在实验期间加速度水平可达到 $10-5g_0$ (g_0 为地面重力加速度)。在轨飞行实验期间下传工程参数、科学数据及两路图像。

作为应用系统有效载荷在神舟 4 号飞船上进行的液滴热毛细迁移空间实验获得了圆满成功。实验按预定设计，在轨飞行期间实验设备全部工作正常。此次大 Marangoni 数液滴空间实验，液滴热毛细迁移 Marangoni 数达到 5500，为目前国际上实验获得的最大液滴迁移 Marangoni 数。实验观察到了大 Marangoni 数液滴热毛细迁移的非线性动力学特征。实验发现绝大多数尺寸液滴在整个迁移过程中不断加速，在 Ma 扩展到 5500 的情况下，无量纲迁移速度 V/V_{YGB} 值趋近于 40% 左右。与以前地基实验结果相比，无量纲速度 V/V_{YGB} 值随 Ma 数的增大有所增加。空间实验结果与美国研究人员得到的数值及渐近分析解理论预测相比仍存在明显的差异，表明大 Ma 数液滴迁移行为有其自身的运动特征，目前尚未有较好的理论预测揭示其行为规律。新的空间实验结果将对研究和发展新的理论模型提供宝贵的实验基准数据。

（四）不足及存在的问题

从总体上看我国的力学研究也存在如下一些具体的问题：

1. 需要进一步明确力学学科的基础地位：20 世纪 50 年代，力学学科开始在我国建立和发展，并在国家重大工程问题尤其是“两弹一星”等国防建设中起到了不可替代的作用。1977 年，在我国制定自然科学基础学科规划时，邓小平同志和方毅同志批示同意将力学学科归入基础学科。至此，力学一直作为一门独立的基础学科在我国科学技术的发展中发挥其重大的作用。改革开放近 30 年的实践充分证明这一决定是完全正确的。近年来，国家有关部门对力学学科的基础地位的认识不足，导致对学科作用的发挥、资源的投入和队伍的稳定都受到了很大的影响。事实上，力学学科具有相对独立的、完整的理论体系，它在推动国家科技进步中具有其他学科不能替代的作用，建议国家相关部门在学科划分、组织管理中将力

学进一步列为独立学科。

2. 力学学科需要进一步加强在工程技术创新中的引领作用：为实现建设创新型国家的目标，满足《国家中长期科学和技术发展规划》中对力学提出的多方面的需求，力学应该而且能够对工程技术的自主创新起到支撑和引领作用。尽管力学对国民经济发展和国防建设做出了巨大贡献，我们还要通过各种途径进一步加强与行业部门的联系和合作，同时希望国家的有关部门制定有利于促进这种合作的政策和措施。

四、力学学科发展目标 and 具体措施

（一）发展目标和前景展望

目前我们国家正朝着全面建设和谐社会，并逐步达到中等发达国家的目标奋斗。因此，未来 20 年内，我国社会经济全面、协调、可持续发展对力学提出更高要求。在航空航天、海洋工程、动力能源、交通运输、矿产资源开发，污染治理与环境保护、沙漠化防治与水资源利用、化工、生物、医药等诸多方面，面临许多紧迫的发展课题，而在学科发展方面，物理科学、数学科学、地球科学、生命科学等提出大量非常重要又非常复杂的问题与力学相关被纳入中长期规划内容，需要力学深入研究加以解决，从而在力学基础研究和工程应用等两方面都取得重大进展。因此，摆在力学学科面前的任务是非常艰巨而繁重的，比如：对超高速、超高压、超高温和微重力等极端条件下的力学行为的新认识，将为远离热力学平衡态过程提供新的认识。对湍流、固体的强度与破坏、高维多体动力学等基本力学难题将取得革命性的进展。在空间应用、微机电产业、新材料研制、工程结构可靠性、工厂化农业、人体健康、深海开发、环境灾害预防等方面将对力学提出新的国家需求。中国国防更需要力学的发展：空天飞行器的发展依赖于实验和全机计算空气动力学；弹道导弹高速突防依赖于防热材料力学的增韧设计；在现代战争中的“制信息权”依赖于星座动力学和自主导航；精确打击能力和突防能力依赖于流体力学和动力学与控制相交叉的运载控制；核武器的小型化和虚拟实验依赖于多物质的计算力学模拟；战略潜艇的隐蔽性依赖于减噪的力学控制，等等。

总之，在新世纪，前沿科学、高新技术和社会经济的发展对力学提出了具有一系列挑战性的问题。目前，力学研究表现出四个鲜明的特点：

1. 是研究对象的多尺度差异，如从宏观、细观到微观的跨尺度的一体化研究；

2. 是研究对象所处的超常环境，如载人飞船、水下发射、超深开采等造成的超高温、超高速、超高压等服役环境；

3. 是研究系统的复杂性和非线性，如将越来越多地涉及到大型机械系统、运载系统、智能系统、微机电系统和生物系统等的高维非线性系统的多场耦合与复杂动力学与控制；

4. 是与其它学科的广泛交叉与融合，如纳米科技、生命科学等。上述特点将引力学认识手段和理论体系的变革，导致力学必须发展新的理论与方法，使力学在新兴科技发展中继续具有不可替代的作用和地位。

上述特点将引力学认识手段和理论体系的变革，导致力学必须发展新的理论与方法，使力学在新兴科技发展中继续具有不可替代的作用和地位。基于过去 50 年老一辈力学家奠定的坚实基础和目前国家的经济实力对科学研究和人才培养给予相当强度支投入的可能性，我们认为力学学科发展的总体目标为：

1. 力学将适应新时期国家发展的重大战略需求，继续发挥支撑经济发展和国家安全的主力军作用，不断为现代工程技术的自主创新做出前瞻性、引领性的贡献。

2. 造就一支高水平的力学研究队伍，培养一批杰出的力学人才，能够面对激烈的国际科技竞争的挑战。力争在 15 年内，这支队伍能够成为国际力学界具有重要影响的力量。

3. 经过 15 年的努力，中国力学应当、也有可能缩小同美国和俄罗斯两个领先国家的差距，跻身于世界力学强国的行列。

（二）重点研究方向建议

综上所述，科技创新能力是基础研究的一个重要指标。从前面对国内外力学学科发展状况、学科特点、前沿领域、国家需求和发展方向的阐述来看，结合国家中长期科技发展规划，在今后 20 年内，力学学科的发展目标将针对学科前沿领域和面向国家重大需求的重点研究领域两个方面：

1. 力学学科前沿领域

优先发展的研究方向及重要的科学问题，必须是立足创新，瞄准科学前沿和引领未来科技发展的领域。下述研究领域是力学目前的前沿领域和重要科学问题，对这些领域开展研究

对力学学科的自身发展具有重要的学术意义和推动作用,因此是属于力学学科优先发展的研究领域:

(1) 湍流、非定常流动及控制

主要发展方向有: 1) 流动转捩准则和湍流模式; 2) 非定常分离和涡运动的演化机理及其控制方法; 3) 复杂波系的相互作用及机理 4) 空化流动机理与控制; 5) 非定常流动的高精度实验和数值模拟方法。

(2) 复杂介质及超常环境流动

主要发展方向为: 1) 高温气体热力学和化学非平衡流动规律; 2) 电离气体和等离子体流动与控制; 3) 稀薄气体效应; 4) 高焓气流地面实验模拟方法; 5) 高温气体的输运特性和化学反应速率; 6) 飞行器高温气动热环境的精细数值模拟方法, 7) 自然环境中的多相、多组分复杂流动, 等。

(3) 非线性系统的复杂动力学与控制

主要发展方向为: 1) 全局分叉和混沌动力学; 2) 随机与时滞系统的非线性动力学与控制; 3) 变结构多体系统动力学; 4) 多尺度系统动力学与控制; 5) 极端工况下重大装备中的非线性振动与控制。

(4) 微纳米力学

主要发展方向为: 1) 纳米力学的基本理论与体系; 2) 微纳米尺度上的多物理场耦合问题; 3) 纳米材料的力学行为; 4) 微/纳机电系统 (MEMS/NEMS) 中的力学问题。

(5) 新型材料与结构的多场耦合力学

主要发展方向为: 1) 力-电-磁-热耦合场理论与体系; 2) 力-电-磁-热耦合场的破坏力学、失效机理与智能器件的可靠性; 3) 智能材料的本构关系; 4) 智能结构动力学与主被动控制。

(6) 跨尺度关联

跨尺度关联与多尺度计算具有两重内容: 在一个物质描述层次下针对不同尺度下的场结

构特点而进行的级进式多尺度计算，以及跨不同物质描述层次的多尺度计算。主要发展方向为：1) 跨尺度计算方法；2) 多尺度力学的理论与表征方法；3) 尺度效应。

(7) 生物力学

主要发展方向为：1) 细胞-分子力学与工程；2) 器官-组织力学与工程；3) 骨骼-肌肉-关节力学与工程；4) 生物力学新概念、新技术与新方法；5) 功能性仿生材料与器件的力学性质及人工仿生材料的力学设计；6) 自主飞行和自主游动的仿生流体力学。

(8) 仪器设备研制及实验力学新技术与新表征方法

主要发展方向为：1) 高灵敏度微纳观测量方法与技术；2) 力-电-磁-热耦合场加载与量测表征技术；3) 各种特殊环境下的物理力学性能与多维运动参数的测量技术；4) 具有高空间分辨率、高温、实时的全场测试手段和方法；5) 生命与仿生中的实验光电测量技术与表征方法。

(9) 工程科学计算与软件

鼓励工程力学软件开发—自主知识产权的国产化与商业化，迫切需要建立一、两个大型力学计算软件库基地。主要发展方向为：1) 研究开发和集成大型力学与工程计算软件（如结构分析与优化、计算流体力学、空气动力学软件、国防尖端武器研制设计仿真优化软件）；2) 发展力学信息网和数据库（如复杂流场数据库，材料力学性能数据库，各层次结构动力学演化的虚拟现实等）；3) 发展中国自主知识产权的 CAE（计算机辅助工程）与虚拟仿真技术及软件产品。

2. 力学面向国家战略需求的重点研究领域

目前国内急需发展的领域，必须是针对若干制约我国可持续发展的重大难题中的关键科学问题，力争对社会和经济发展产生长远影响。一方面国际霸权主义和台海形势使得我国国家安全和国防建设面临自新中国成立以来前所未有的严峻挑战，而力学是国防技术发展的重要基础。另一方面，近半个世纪以来，随着社会和经济的发展，人类对环境和健康问题的认识逐步深化，相继提出了“可持续发展”、“人类健康科学”等概念。因此，面向国家需求的重点研究领域为：

(1) 国家安全中的关键力学问题

要使我国的国防安全装备水平走上一个新的台阶，力学学科要重点发展爆炸与冲击力学、船舶水动力学、空气动力学、化学反应流体力学和燃烧理论、承载与防热材料/结构的力学一体化设计、武器系统的动力学与运载控制、推进与动力等。这些力学领域已成为各种舰船、航天器、航空器、坦克车辆、兵器、空间武器技术和战略武器的研究与发展的重要的基础和支撑。

(2) 航空航天中的关键力学问题

我国神州五号飞船的研制所提出的 13 项关键技术都与力学密切相关，体现了力学在航空航天领域中举足轻重的作用和地位。相关的核心科学问题为：1) 高速、高机动飞行中复杂流动机理；2) 高温、高速条件下气流的燃烧，热力学和化学非平衡流动；3) 轻质、强韧、抗撞击、防热结构及其材料一体化设计的理论和方法；4) 隐身技术的基础问题。

(3) 深海环境下资源开采中的关键力学问题

我国海洋油气资源储量丰富，21 世纪国民经济的可持续发展迫切需要解决深海海域（2000—3000 米水深）资源开采中的关键力学问题，包括：1) 深水大型浮式结构的风、浪、流载荷与非线性动力响应，深海高压环境下结构的失效理论；2) 海洋土力学与地基承载特性；3) 海床变形、失稳和塌陷判别准则及其对海洋工程结构安全性影响的评估方法；4) 油气水多相界面动力学及其混输计量方法；5) 深海水合物开采中的物理化学渗流问题。

(4) 环境与灾害关键力学问题

环境力学是力学与环境科学相互结合而形成的一门新兴交叉学科，它更强调环境问题的动力学过程和定量化研究。主要发展方向为：1) 多相、多组分复杂流动及多过程耦合作用；2) 自然环境流动的多尺度效应和非线性作用；3) 干旱、半干旱环境治理的动力学过程；4) 以水或气为载体的物质输运过程；5) 重大环境与工业灾害发生机理及防治。

(5) 人类健康科学领域的关键力学问题

人类健康科学领域的力学问题是多学科交叉的新领域，但它有别于生物力学和环境力学，涉及到的主要研究方向有：1) 疾病检测方法与诊断技术；2) 医学材料力学设计、制备与表征方法；3) 人体健康环境发生机理、预报与控制；4) 药物力学：涉及生物大分子-配

体小分子相互作用的热力学、动力学。

(6) 先进装备中的关键力学问题

随着经济发展，一系列重大装备，如，大型空间可伸展结构、高速轨道交通系统、飞机发动机、深海采油平台、超超临界发电机组、燃气轮机机组、高档数控机床、通讯卫星、核电装备等将投入运行。它们的设计建造和运行过程中的高效、经济、准确、可靠、安全对动力学与控制的研究提出了更高要求。开展对极端状况下重大装备的动力学与控制的研究对减少事故、保障安全、延长寿命、提高效益意义重大。这些重大装备所反映出的多场耦合、多尺度、多参数、非线性、快时变、复杂环境和复杂载荷等也为动力学与控制学科提出了新的挑战

(三) 实现发展目标的重大措施和建议

本报告提出力学学科的发展目标和规划是立足于以下出发点：一是要解决具有普遍性和根本性的力学基础和应用基础问题；二是要解决能推动国家和社会发展的重大力学问题；三是要充分考虑我国的现有基础和国际上的发展趋势。为了实现上述力学学科规划的目标，建议采取如下几方面的具体措施：

1. 必须保持力学学科是一门独立的基础科学的长期稳定地位：

回顾历史，1977年在我们国家百废待兴时刻召开了自然科学基础学科规划会议，时任科技部长的方毅同志针对将力学学科归入基础学科问题上专门打了一个报告给邓小平副主席（报告中指出：“.... 不论如何，规划应包括这部分(力学)的，应弥补。”）。小平同志的批示为：“同意方毅同志批示。”至此，力学一直作为一门独立的基础学科在我国科学技术发展中发挥重大的作用。改革开放近30年的实践充分证明这一决定是完全正确的。力学学科对于促进科学发展和推动工程技术进步的作用是不可取代的。因此，必须保持力学学科是一门独立的基础科学的长期稳定地位，使得力学学科得到稳定发展，确保力学长期成为技术科学支撑基础的地位，对于力学学科本身发展和推动先进工程技术的应用是有利的。

2. 加强学科的交叉融合、促进各分支学科的协调发展：

力学研究的方向要根据学科发展趋向和国家经济建设的需求，结合国家经济实力和国情，突出重点，做出“有所为，有所不为”的抉择。在与国计民生和国家安全直接有关领域要加大力量和经费的投入；也要关注远期的基础和探索性研究；学科交叉、融合，相互渗透，往往是新技术、新学科的生长点，因此，在制定规划时一方面要进一步促进各分支学科的协调发展，另一方面要特别注意交叉学科的发展，大力促进各学科间的交叉和交融。

3. 合理规划力学人才的培养，加强力学团队建设：

在一流的高等院校和科研院所，应培养具有创新思想的高素质的力学理论研究人才，以弥补当前理论分析人才的不足；多数学校可以结合某一具体工程技术方向来培养力学人才，这样做，可以发挥各高等院校自己的特色，提高我国工程技术水平，也能满足国家日益发展的经济建设的需求。同时，大力推动力学“创新研究群体”、国内不同重点实验室之间开展实质性的合作。我们必须将优秀人才作用的发挥和年轻人才的培养放在极其重要的位置。建立公正、公平、合理的科研成果和科学人才的评价体系。在科学事业上不能急功近利是历史真理，要把研究成果的创新性和所解决的科学、工程问题的重要性列在评价体系的首要地位，促进有国际影响的原创性成果的涌现。

4. 建立国际力学中心：

为了进一步加强中国力学界与国际学术界的交流，拟在京成立“国际力学中心”，该中心将办成 IUTAM（国际理论和应用力学联盟）和 ICSU（国际科学联合会）在亚洲的分支机构。中心除申办和承办 IUTAM 暑期学校、高级研讨会、世界力学大会及其它力学国际组织的重要例会外，每年还邀请若干位国际学术大师到中国讲学和科研访问，促进实质性的合作研究；组织中心的高级别学科前沿国际研讨会；举办国内外博士生暑期讲座；建立中心的北京网站；发行相关出版物等等。这些活动将对提升我国力学学科的国际学术地位起着举足轻重的影响。

5. 加强面向航天航空的关键力学问题研究的投入力度：

新中国成立以来，以钱学森、周培源、钱伟长、郭永怀为代表的科学家和工程师为独立自主地发展我国的航空航天事业呕心沥血，使我国的航空航天技术得到了很大的发展。“神

舟五号”首次载人飞行与胜利返回地面就是明显的例子。它标志着我国已具备了独立自主地发展空天技术的能力，也说明了力学在航空航天工程中重要作用和地位。但是，总的来说，我国航空航天科技发展是不平衡的，基础研究的技术储备严重不足，和先进国家相比还有相当大的差距。在《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》中明确地提出了：国防科技与航空航天建设为维护国家安全提供保障的迫切战略需要。例如，《纲要》中5个战略发展重点有加快发展空天技术；重点领域及其优先主题中包含了国防与航空航天；8项前沿技术中有空天技术；16个国家重大专项中有4个与航空航天有关（载人航天、大飞机、探月工程、高分辨率对地观测系统；10个面向国家重大战略需求的基础研究中有一项是航空航天重大力学问题。因此，力学作为航空航天科技的支撑学科，将面临一系列极富挑战性的、基础性的研究课题，特别需要加强面向航天航空的关键力学问题的研究。

6. 加强力学实验仪器设备研制的规划与投入：

随着对科学仪器重要性认识的提高，特别是以2000年5月召开的“现代科学仪器前沿技术与分析科学”香山科学会议为里程碑，在科学界逐渐达成以下共识：先进的科学仪器设备既是知识创新和技术创新的前提，也是创新研究的主体内容之一和创新成就的重要体现形式。科学仪器的发展与基础研究的发展是互动的，这主要表现在随着科学仪器的发展，必然推动基础研究的发展，主要表现形式是拓宽了基础研究的领域和缩短了研究周期。力学科学仪器设备为力学家认识世界和验证力学理论提供工具，从微观到宏观揭示了物质变形与运动的客观规律。一方面重大工程装备的实验面临复杂的多场耦合的加载环境，另一方面纳米科技与信息高新MEMS技术给力学实验仪器设备的研制带来了新的挑战。因此，应当高瞻远瞩地及时做出重大实验装备的规划，加大重要的基础设施、装备和配置先进测量仪器的投入，研究所和高等院校要发挥各自的优势，分工合作，使我国力学实验设备进入世界先进行列。

7. 建立国家力学软件开发与计算中心：

软件是国家的一项基础性技术。大规模、高性能的力学计算软件系统，不仅对于力学研究和应用，而且对于工业与高新技术领域及国家安全都是至关重要的。应由国家科技部会同有关部门，在国内优势单位联合的基础上建立研究开发基地和计算中心，提供优良计算环境（高性能计算机系统，网络系统和先进的信息系统），将培养和稳定一支人才计算力学软件开发队伍。目前迫切的是建立一、两个大型力学计算软件库基地。基地的任务一是研究开发

和集成大型力学与工程计算软件，二是发展力学信息网和数据库，发展中国知识产权的 CAE（计算机辅助工程）与虚拟仿真技术及软件产品。这不仅将极大地促进计算力学的发展，更会使一批产业发生本质的提升，更是 21 世纪我国工程界提高竞争力的一个主要技术源泉。

8. 在力学学科的新分支布局国家重点实验室：

我国在固体力学、流体力学和计算力学等方面均有相应的国家重点实验室。为了适应力学学科新分支，尤其是交叉与边缘领域的力学发展，应当适时地在这些新学科分支布局国家重点实验室。目前有一定条件的是在生物力学、微机电力学、航空航天技术科学与力学、环境力学和灾害力学等方向。生物力学学科目前已发展成为从生物个体、器官、组织、细胞乃至生物大分子等不同层次研究生命中应力与运动、变形、流动及生长关系的重要学科。微机电力学具有微动力学和细观机电失效学这样一些新的学科内容，且在先进制造、信息等领域具有重要应用。环境灾害力学的发展切合我国的国情，对国计民生非常重要。航空航天发展关系到国家安全，而力学是航空航天技术科学的支撑学科。这些力学新分支学科的发展迫切地依赖于实验手段，因此在我国建立生物力学、微机电力学、航空航天技术科学与力学、环境力学和灾害力学等方向的国家重点实验室十分必要。

9. 加强国家层面协调和管理：

(1) 近年来，力学所受到的重视，相对不如其它一级学科。其表现为：资金投入相对有限，经费来源没有保证，以至形成目前各主要力学研究基地设备比较落后且无力更新。在这一投入相对不足的情况下，其研究水平仍居世界前列且稳中有升。如果国家能增加对力学的投入，加强对力学的重视，促进国内力学界与国际力学研究主流的接轨，则我国的力学研究水平可望在未来 15—20 年后跻身世界力学强国的行列。因此，为保证保持力学学科是一门独立的基础科学的稳定发展，需要加强国家层面协调和管理，合理安排对力学学科研究的投入，保证力学队伍的稳固，促进我国力学学科的发展和提高；

(2) 但目前在国内由于受管理体制与传统观念的影响，部门行业之间，专业之间，壁垒森严，自成体系，已经达到十分严重的地步，严重地限制了不同学科的交叉活动，制约了力学学科的发展。甚至有些重要而有前途的研究领域，力学家应该参与却无法介入。上述这种严重阻碍力学发展的现象应当引起国家有关部门领导的重视，需要加强国家层面的协调和管

理，切实采取措施，制定相关政策，充分发挥力学工作者的作用，为他们能积极介入工程领域的知识创新活动中去。

参考文献

- [1] 中国力学学会，力学学科发展研究实施方案，2006
- [2] 中国科学院数学学部，力学学科发展调研报告，2006
- [3] 中国科学院数学学部，力学学科资助模式分析报告，2006
- [4] 中国力学学会，力学学科发展蓝皮书 2005 卷-综述篇，2005
- [5] 中国力学学会，力学学科发展蓝皮书 2004 卷-综述篇，2004
- [6] 中国力学学会，2020 年的中国科学和技术—力学篇，2003
- [7] 中国力学学会，力学学科发展蓝皮书 2003 卷-综述篇，2003
- [8] 中国力学学会，力学学科发展蓝皮书 2002 卷-综述篇，2002
- [9] 中国力学学会，学科发展与优先领域战略研究报告，1999
- [10] 国家重点基础研究发展规划总纲（草案），规划起草小组，1999 年 3 月
- [11] 中国力学学会，力学—迎接 21 世纪新的挑战。力学与实践，1995 年第 17 卷第 2 期，1~18。
- [12] 中国科学院数学学部，迎接新世纪挑战的力学—力学学科 21 世纪初发展战略的建议，中国科学院学部文件，1998 年 6 月
- [13] 钱学森，关于现代力学，力学与实践，1, 9-14, 1979
- [14] 郑哲敏等. 自然科学学科发展战略调研报告《力学》卷，国家自然科学基金委，北京：科学出版社，1997
- [15] 郑哲敏、周恒、张涵信、黄克智、白以龙. 力学，见 21 世纪初科学发展趋势课题组编著《21 世纪初科学发展趋势》第 2.03 节，第 39—47 页，1996
- [16] 庄逢甘，力学学会 40 周年的大会开幕报告，现代力学与科技进步，北京：清华大学出版社，p.1, 1997

- [17] 钟万勰, 程耿东, 跨世纪的中国计算力学. 力学与实践, 1999 年第 21 卷第 1 期, 11~16。
- [18] 白以龙, 迅速发展的非线性连续介质力学研究. 力学进展, 1996, 25, 433~436
- [19] 白以龙, 力学几起几落, 源于生活之树长青. 力学与实践, 2000 年第 22 卷第 2 期, 72~75。
- [20] 武际可, 力学史. 重庆出版社, 2000。
- [21] 李国豪、何友声主编: 力学与工程—21 世纪工程技术的发展对力学的挑战, 上海交通大学出版社, 1999 年
- [22] 鲍亦兴, 科学与工程中的应用力学. 力学与实践, 1999 年第 21 卷第 4 期, 1~16。
- [23] 谈镐生, 谈镐生文集. 科学出版社, 2006。
- [24] 崔尔杰. 生物运动仿生力学与智能微型飞行器. 力学与实践. 2004, 26(2): 1~8
- [25] 杨卫, 马新玲, 王宏涛, 洪伟. 纳米力学进展. 力学进展, 2002. 32(2): 161~174
- [26] 伍小平, 实验力学进展, 中国力学学会第十届全国实验力学学术会议大会报告, 2002
- [27] 李家春, 吴承康, 环境力学与可持续发展, 力学进展, 1998, 18(4), 433~439
- [28] 李家春, 自然环境中的流动与输运, 自然、工业与流动 (第六届全国流体力学学术会议论文集): pp. 74-81, 北京, 气象出版社, 2001
- [29] 龙勉. 2001. 细胞-分子生物力学: 与生命科学有机融合的领域. 中国科学院院刊. 16: 408~411
- [30] Michael E. Kassner, Sia Nemat-Nasser, Zhigang Suo, et al., New directions in mechanics, Mechanics of Materials, 2005, 37: 231~259
- [31] T. Belytschko, ICHMM Panel Discussion on Novel Computational Schemes. (Summary). www.RCMM.cqu.edu.cn, 2004
- [32] W. Yang, ICHMM Panel Discussion on Emerging Research Trends in Nanomechanics. (Summary). www.RCMM.cqu.edu.cn, 2004.
- [33] D. McDowell, ICHMM Panel Discussion on Materials Design. (Summary). www.RCMM.cqu.edu.cn, 2004
- [34] D. McDowell, ICHMM Panel Discussion on Cellular Materials. (Summary).

www.RCMM.cqu.edu.cn, 2004

- [35] J. Hafner, Atomic-scale computational materials science, *Acta Mater.*, 2000, 48:71-92.
- [36] A. Needleman, Computational mechanics at the mesoscale, *Acta Mater.*, 2000, 48:105-124.
- [37] L.B. Freund, The mechanics of electronic materials, *Inter. J. Solids and Struct.*, 2000, 37(1-2): 185-196.
- [38] W. Yang, *Mechatronic Reliability*, TUP-Springer-Verlag, 2002.
- [39] Zhu C, Bao G, and Wang N. 2000. Cell mechanics: Mechanical responses, cell adhesion, and molecular deformation. *Annu. Rev. Biomed.* 2:189-220.
- [40] Lim CT, Zhou EH, and Quekb ST. Mechanical models for living cells—a review. *J. Biomech.* 2005.

固体力学学科发展专题报告

英文摘要

Solid mechanics is a subject primarily concerned with the understanding and prediction of deformation, failure and properties of solids. As solids constitute the material basis for survival, living and production activities of mankind, solid mechanics is vital to the arising and advancement of human civilization. The achievements of solid mechanics have led to the progress and prosperity of modern civil, mechanical, aeronautical and aerospace engineering, etc. Today, solid mechanics is essential to design and behavior prediction of large structures such as bridges, spacecraft, aircraft, nuclear plants, etc, and of small objects such as computer chips, cells and MEMS, etc. In the 21st century, we are faced with many difficult and complex issues that related to solid mechanics.

In the last decade, Chinese scholars have made remarkable contributions in solid mechanics. In continuum mechanics, decisive progresses have been made in the modern theory of representation of tensorial functions and invariance of constitutive relations. We have developed systematic and quantitative theory and test systems to explore the constitutive relations and failure process of ferroelectric ceramics. The problem of singular optimal solution, a severe challenge in structural optimization since 1980's, has been successfully solved. Many experimental techniques were developed. Micro/nanomechanics is one of the frontiers and fertile areas of mechanics. We have examined and found a series of new mechanical and physical properties of nanomaterials and devices. Among them, the firstly presented GHz nano-mechanical oscillator has attracted a lot of attention and resulted in intensive researches worldwide. Besides fundamental researches, we have also applied the theory of solid mechanics to solve many important problems in engineering.

We have identified some of forefronts in solid mechanics and national needs including micro/nanomechanics, mechanics of new materials under coupled multi-field loadings and extreme conditions, multi-scale mechanics and trans-scale coupling, biomechanics, development

of new equipment and experimental techniques, scientific and engineering computations and softwares, etc. The major topics that meet the national strategic needs are problems in national security, aeronautic and aerospace engineering, environment and calamities, human health, and mechanics in advanced equipment, etc. This report also puts forward the measures that should be taken to achieve the goals, including the consistent recognition of the status of mechanics as a basic scientific discipline, the training of young investigators of high level, a proper balance between fundamental researches and immediate needs, particular support to computational softwares and experimental techniques, and a better support at the national level to meet national needs and improve national competitiveness.

一、学科性质

固体力学旨在认识与固体受力、变形、流动、断裂有关的全部自然现象，并利用这些知识来改善人类生存条件、实现人类目标。固体力学是整个力学学科中研究规模最大的分支。固体物质是人类赖以生存、繁衍、生活和生产的物质基础，合理地利用固体物质来设计各种工具和结构并保证其高效、安全地运行，是保障生命安全、促进文明进程、提高竞争力的必要手段，也是人类社会进步的重要标志。因而，固体力学是人类科学技术史上最先发展的少数学科之一，在人类文明进化过程中占有十分重要的地位。我国古籍中有关合理利用材料的大量论述，都含有深刻的力学意义。在西方，远在牛顿之前就有很多重要的固体力学研究工作，例如，达·芬奇关于线材拉伸强度的实验、伽利略关于杆件强度的分析。在十八世纪，由于工业发展和战争的需求，法国政府建立了著名的道桥学校和巴黎综合工学校，吸引和培养了大批力学人才。法国因此成为以基础科学教育培养工程师的第一个国家，对工程科学的发展做出了巨大的贡献，成为当时欧洲各国仿效的榜样。

固体力学在现代工业和人类生活中扮演着重要的角色。固体力学取得的辉煌成就不但造就了近代土木建筑工业、机械制造工业和航空航天工业的进步和繁荣，而且为广泛的自然科学提供了范例或理论基础。例如，近 50 年以来，断裂力学的发展大大减少了由于结构破坏导致的灾难性事故，使得人们可以乘坐比以往更加安全、舒适和环保的飞机、汽车、轮船，建造更加安全的桥梁和建筑物。以复合材料力学为代表的先进材料强韧化力学与失效机理的研究，使得各种先进材料在现代工业和社会的各个领域得到广泛的应用，极大地拓展了人类

的活动范围，促进了社会的进步。在现代社会中，从大到桥梁、航天飞机、大型喷气式客机、核动力结构，小到计算机芯片、生物组织以及近年来高速发展的微/纳米机械等，都需要进行固体的力学行为研究。哥伦比亚号航天飞机的失事再一次昭示了固体力学研究在保障当代和未来复杂结构的安全性以及提高国家竞争力方面的重要性。哈佛大学在它的介绍中认为“固体力学位于它的工程、材料科学、地球物理以及宽广的应用科学和技术方面教育和研究活动的轴心”。

二、学科发展趋势

固体力学学科在 21 世纪将具有如下发展趋势：研究对象具有跨尺度和复杂性特征；研究手段将突破传统模式的桎梏，以跨学科、交叉性和系统性为特色；研究成果对科学技术发展的推动作用和对人类生活质量的提高将达到前所未有的水平。事实上，与人类的生活和生产最密切相关的客观世界中出现的难题，恰恰是近代固体力学的前沿所在。例如，虽然固体力学已经在材料的强度和韧性方面取得了大量研究成果，但是固体强度问题还没有根本解决。强度问题的困惑，使得人类还生活在受到象泰坦尼克号海难、彗星式客机和哥伦比亚号航天飞机解体那样的由于材料破坏导致的悲惨事故的威胁中。人类目前还受到诸如地震、边坡失稳、泥石流、矿井崩塌等自然灾害的威胁，它们造成的损失占全球尤其是我国国民经济损失的相当大部分。这类灾害力学问题在科学上可提炼成为复杂介质的力学演化过程。了解和预测这些灾害的发生正是近代固体力学可以做出重大贡献的一个方向。人类向海洋和地球深处、邻近空间和外太空的探索将不断地为固体力学带来新的研究课题，例如各种极端环境下材料和结构的力学行为、大型海洋、空间结构的力学响应和安全性评估等。人类正在追求更干净的环境和更清洁的能源。核电技术、风能技术、高坝技术和高功率水力发电技术正成为能源现代化的关键技术。固体力学在这些技术的发展中起着十分关键的作用。世界科技和经济竞争的加剧、资源的减少和对生活质量的更高追求迫使我们必须开发先进的工业制造工艺，解决其中的力学问题，从而提高国家竞争力。各种新材料和具有各种特征尺度的人工结构正在大量涌现，它们蕴含着许多与传统材料不同的力学问题。动物和植物是怎样在与自然界的长期斗争和适应过程中获得在本身能力限制条件下最佳的结构响应？怎样利用生物力学的知识来提高人类的生活质量？这些都是生物固体力学关注的重大问题。因此可见，随着科学技术的发展，现代固体力学研究对象的复杂性越来越突出，由此带来了一系列处于科学前沿的新问题和新领域。从另一个角度来看，对本世纪重要的科技领域中新问题的研究也

将成为固体力学发展的一个重大机遇。

三、国内现状与主要成果

进入 21 世纪以来，我国科学工作者在固体力学的理论、计算、实验、跨学科研究以及力学在重大工程中的应用等方面取得了巨大的成就，获得了一批国际领先水平的成果。在学科前沿领域奠定了坚实的工作基础和条件，已形成一支处于国际前沿、能协同进行多学科交叉研究、并且具有承担国家重大项目能力的研究队伍。

我国学者在张量函数表示理论与材料本构方程不变性研究领域为形成现代张量函数表示理论及奠定其应用基础做出了决定性贡献；发现了一些重要的本构不变性性质。首次提出了为建立现代张量函数表示理论完整体系而有待于解决的主要命题；并完整地解决了这些命题。有关结果归结为一系列新的基本定理和连续统对称性原理，这些再加上已有的 Hilbert 定理和 Neumann 原理，构成现代张量函数表示理论的基础、基本框架及其应用基础。“指引了一条对各向异性材料的连续介质力学和物理进行统一和理性研究的途径。”首创各向异性张量函数的完备且不可约表示的系统且简便的方法。“第一次针对所有种类材料对称性，给出了具有实质意义的完整的张量函数表示”。首次获得高阶张量函数表示的系统性结果。首次给出高阶张量正交不可约分解的系统建立方法。发现了非均匀材料的一系列新的不变性性质和减弱依赖性质。开拓了张量函数表示理论在现代力学多方面的应用。这些成果在国际上被广泛应用于建立各种复杂材料行为的模型。

铁电陶瓷作为新一代功能陶瓷的代表，其可靠性问题日益受到关注。我国学者系统且定量地探讨了铁电陶瓷在力电耦合加载下以断裂和疲劳裂纹扩展为代表形式的失效过程，提出电致断裂、电致疲劳裂纹控制和电致畴变增韧的模型。发现裂尖集中电场诱发的铁电畴变区，并确定该区为非常规畴变区；提出电致断裂和电致疲劳裂纹扩展的起因在于裂纹尖端的约束应力场，建立了小范围畴变模型；提出畴变驱动的力电耦合增韧机理，得到畴变造成的屏蔽应力强度因子，阐述了极化电场造成的断裂韧性各向异性和正负电场对断裂韧性作用的非对称性；提出驰豫型铁电陶瓷的电致断裂的机理阐述和标度律；发现在亚矫顽交变电场下的电致疲劳裂纹扩展行为，给出了疲劳裂纹扩展量与电场翻转次数的理论预测值；建立了测量铁电陶瓷耦合变形的本构试验系统，提出了一种基于铁电材料内部电畴分布的宏微观相结合的本构理论。以上研究成果和实验系统受到国内外研究者的大量的引用和应用，产生了广泛的国内外影响。

近年来，我国固体力学学者研究了纳米尺度下材料和器件的一系列新的力学行为，提出了有重要影响的原创性思想，对纳米材料的性能研究和材料设计，做出了重要贡献；我国学者提出首个 GHz 纳机械振荡器的构想和理论预测并率先进行了系统的研究；提出了纳米晶体的塑性变形模型；提出了多种高效的跨尺度计算方法；建立和发展了新的细观力学理论；在生物材料的微纳米力学与仿生研究中有一系列新发现；在新型功能-结构一体化材料和轻质材料、功能梯度材料、航空航天耐高温材料的力学行为分析方面取得了具有重要理论意义和应用价值的成果。还在弹性力学、塑性力学、断裂力学、振动理论、冲击动力学、制造工艺学，以及应力波和电磁波在多场耦合介质和新型材料中的传播等领域取得许多重要创新成果。

我国在计算力学的多个研究方向上处于国际领先水平，开发的若干计算力学软件在算法和功能上有特色，解决了一大批国家经济和国防建设中的问题，打破了西方国家的壁垒。特别是，我国学者在结构的微构造优化、结构拓扑优化以及奇异最优解理论、结构形状优化以及灵敏度分析、结构优化方法与软件应用等方面，都取得令国际同行瞩目的成果，在国际同行中保持重要的影响。

自 80 年代以来，拓扑优化一直是工程结构优化设计领域中的一个最受瞩目的研究方向。但是奇异最优解问题从理论上对结构优化研究提出了严峻挑战。十余年来，对该问题的研究是结构优化领域的重要国际前沿课题之一。我国学者在对此问题的研究中取得了具有原始创新性的研究成果，得到了国内外同行的广泛承认和高度评价。首次正确描述了奇异优化问题的可行域形状以及奇异最优解的本质特点，纠正了以往研究中的错误认识。首次将连续性分析引入奇异最优解研究，为奇异性现象的分析及求解方法的构造提供了有力的理论工具。指出了传统拓扑优化算法求解奇异性问题的固有缺陷以及不同类型拓扑优化问题的本质区别。提出了处理奇异最优解的 Epsilon-放松及其系列算法，成功地将结构拓扑优化和尺寸优化统一在了同一框架之下。上述理论和算法研究成果，在大型结构分析与优化设计软件 JIFEX 中实现，并应用于工业和国防工程等结构优化选型的研究开发中，取得了显著的社会效益。所提出的 Epsilon-放松及其系列算法，受到结构优化界很多学者的重视，被广泛实质性引用和推广。

我国学者针对多场、多尺度的材料和结构力学行为研究的需求，进行实验研究，揭示了新材料和结构力学响应规律；根据微/纳米材料和微电子技术等高科技发展对实验力学测试技术的需求，发展了新型的力学测试方法、技术，利用这些新方法和技术有效地解决了许

多有价值的学术问题。在力学测试系统和设备开发方面取得了显著进展，并利用实验力学手段，针对重要工程问题的需求开展了大量研究，为国民经济和国防建设做出了重要贡献。例如，发明和研制的用光测手段测量靶场基地目标运动三维姿态的系列方法和装备，已经在国防建设中得到应用。实验力学实现了与其他学科更广泛的交叉，使得实验力学研究对象和范围不断拓展，产生了新的生长点。例如，基于 MEMS 制作技术在国内首次实现非致冷技术的室温物体红外成像，温度分辨率处于国际先进水平；实验力学在与生物医学工程、土木工程、新材料和器件等的跨学科研究方面也取得了许多重要成果。

在机械加工、汽车制造、轻工和飞机制造等行业，冲压模具设计等方面的难题长期制约着行业的产品升级换代，重要的汽车车身制造模具长期依赖于进口，其中还包括与其相配套的工艺设计、设计软件和工程仿真系统。我国学者围绕冲压工艺中的具体问题，系统研究冲压工艺与模具设计理论、计算方法，以及薄板冲压工艺与模具设计的关键技术，为薄板冲压技术中的起皱、回弹和拉裂等瓶颈问题提供了一整套解决方案。实现了拉延筋理论和工艺的重大突破，攻克了薄板冲压工艺和设计中的重大难题，形成了基于 CAD/CAE/CAM 一体化的、与实际工程应用相配套、自己独立知识产权的关键技术与工艺实验装备。相关成果的推广和技术转化，大幅度压缩了薄板冲压工艺设计和模具设计制造周期，降低了生产成本，提高了产品质量，直接带动了制造业的新产品开发和行业的技术进步，实现了行业跨越式发展。创造了显著的社会效益和经济效益。采用该技术生产的模具已用于国内知名汽车和一些大型空调制造企业。

材料成形的轻量化、精确化、高效化需要对成形加工过程进行多尺度、多学科模拟仿真，宏、微观塑性本构理论、多场耦合以及率相关塑性大变形理论是该领域中重要的基础性科学问题。在这一方面，我国学者取得了可喜的成绩，对注塑成型模拟技术开展了系统和深入的研究，发展和完善了高聚物成型过程的物理和数学模型，开发了相关的分析软件和仿真系统，使高聚物成型加工及模具设计建立在科学定量的基础上，为优化模具设计和控制产品成型过程以获得高性能的高聚物制品提供了科学依据和设计分析手段。

汽车车身作为最复杂的机械产品之一，它的开发和模具设计制造技术是机械制造业信息化综合实力的具体体现。我国学者研发的汽车车身结构及部件快速精细设计、制造分析软件系统中，有数项关键创新技术具有国际领先水平，为我国汽车车身部件自主设计、制造，提供了具有完全自主知识产权的核心软件技术。该成果极大地提高了车身部件的设计和制造效率，改善了车身结构碰撞仿真精度，成功解决了长期困扰国人的冲压件回弹预示与模面补

偿疑难问题，为我国汽车车身和零部件自主创新设计制造技术水平提高提供了强有力的手段。该成果还成功打入国际汽车市场，具有中国自主知识产权的高难度 CAE 产品和技术得到国际同行的认同，并成功实现零的突破，其国际影响和潜在的全球化社会效益是巨大的。

航天耐热材料的研究和应用是一个多学科交叉的前沿领域，力学在里面起到了举足轻重的作用。航天飞行器承受复杂的飞行载荷，材料与结构的响应严重影响飞行状态，因此力学分析是指导耐热材料设计，保证飞行器安全的基础学科。烧蚀型耐热材料烧蚀/侵蚀/剥蚀机理、使用性能表征；超高温陶瓷材料高温抗热震性能、高温强韧化设计；金属热防护系统防隔热一体化设计、热疲劳问题、健康监测等都是航天耐热材料亟待解决的共性科学问题，它向力学工作者提出了新的挑战 and 机遇。我国学者针对战略导弹弹头、固体火箭发动机喷管等关键耐热部件用烧蚀型耐热复合材料开展模拟表征与评价技术研究，取得的成果为航天耐热材料自主创新能力的提升提供了强大的技术储备，创造了显著的军事、社会和经济效益。

我们根据深部岩体的赋存条件和自然性状，充分考虑了深部岩体高度节理化特征，建立了深部裂隙岩体宏观损伤力学模型；考虑到裂隙岩体中裂隙分布，在考虑大变形的基础上，引进损伤力学系统研究了岩体的力学行为，推导出损伤的状态方程。在此基础上，提出了岩体蠕变非线性大变形损伤力学理论及有限元数值方法，成功预测了采动岩体的损伤大变形和蠕变稳定过程，为深部巷道支护设计提供了理论依据。近年来，将上述理论成果与传统的新奥法结合，提出了基于深部岩体力学特性的深部巷道支护设计方法，发展了相应的技术措施，并通过喷射钢纤维混凝土改善了喷层的整体力学行为，可更好地适应深部岩体大变形的特点。该技术于在我国两个矿推广，取得了近千万元的经济效益。在力学研究成果应用于解决工程问题方面，近年来我国固体力学学者还在其他许多领域取得了大量成果，产生了重大的社会效益和经济效益。

四、措施和重点研究方向建议

近年来我国固体力学研究取得了长足的进展，在世界力学领域占有举足轻重的地位。但从总体上看，我们还需要进一步缩小与世界领先国家的差距，特别要促进系统的、原创性的、基础性的重大成果的产生；进一步推动力学研究与实际工程和交叉学科的结合，促进研究成果向工业生产的转化。要达到以上目的，我们需要对以下问题给予极大重视：

- 1) 人才是科学进步的根本保证,我们必须将优秀人才作用的发挥和年轻人才的培养放在极其重要的位置。建立公正、公平、合理的科研成果和科学人才评价体系。在科学事业上不能急功近利,要把研究成果的创新性和所解决的科学、工程问题的重要性列在评价体系的首要地位,促进有国际影响的原创性成果的涌现。
- 2) 世界科学技术的发展历史一再表明:自由探索和基础研究是科学新思想、新理论和新方法的重要源泉,也是培养优秀科技人才的土壤;对自然界的探索和人类改造世界的需求又为科学技术的发展进步提供了无穷的动力。因此,需要以全面发展的观点长期稳定地处理好基础研究、应用基础研究和工程需求的关系,营造在各方面都鼓励创新的环境。
- 3) 从固体力学学科的性质、现状和发展趋势,以及国家需求来看,目前的重要科学问题和前沿领域主要有:微纳米力学、多尺度力学与跨尺度关联和计算、新材料与结构的多场耦合力学、生物材料与仿生材料力学、科学与工程计算与软件、仪器设备研制及实验力学新技术与新表征方法,开展它们的研究对力学以及相关学科的发展具有重要的基础意义和推动作用;国家建设需求的重要支撑点和应用发展方向主要有:固体强度与破坏力学、计算力学软件、固体力学在国家安全以及航空航天工程中的应用、大型工程结构与工业装备的力学问题、爆炸与冲击力学、环境与灾害关键力学问题等。由于实验和计算在力学领域的特殊重要性,需要对实验力学以及新技术与新表征方法,以及计算力学软件开发和自主知识产权的国产化与商业化给予重点支持。 学科的交叉、融合、相互渗透,往往是新技术、新学科的生长点,在制定规划时要特别注意交叉学科的发展。
- 4) 在体制上需要进一步加强行业之间、专业之间、学科之间的交流沟通和合作。在重大工程项目中需要发挥全国相关优势力量进行攻关。例如,我国航空航天科技发展是不平衡的,基础研究的技术储备严重不足,和先进国家相比还有相当大的差距。其中存在大量的与新材料和结构相关的固体力学问题,而我国固体力学工作者是完全有能力解决这些问题的。因此,对于重要和有前途的研究领域,一方面力学家应该积极参与,另一方面也需要国家有关部门统筹协调,采取措施,让力学工作者能积极介入工程领域的知识创新中去,为建设创新型国家作出更大贡献。

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会, 力学—自然科学学科发展战略调研报告。科学出版社, 1997。
- [2] 国家自然科学基金委员会数理科学部, 力学学科发展研究报告。科学出版社, 2006。
- [3] 中国力学学会, 力学—迎接 21 世纪新的挑战。力学与实践, 1995 年第 17 卷第 2 期, 1—18。
- [4] 白以龙, 周恒, 迎接新世纪挑战的力学—力学学科 21 世纪初发展战略的建议。力学与实践, 1999 年第 21 卷第 1 期, 6—10。
- [5] 梁军, 杜善义。2004 防热复合材料高温力学性能。复合材料学报, 22, 73—77。
- [6] 申长雨, 中国大陆的塑料模 CAE 技术研究现状, 先进成形和模具技术研讨会, 2003, 郑州。
- [7] 谈镐生, 谈镐生文集。科学出版社, 2006。
- [8] 武际可, 力学史。重庆出版社, 2000。
- [9] 余寿文, 冯西桥, 杨亚政。2005。第十一届国际断裂大会简介与断裂研究的前瞻。力学进展, (35): 138~140。
- [10] 郑哲敏、周恒、张涵信、黄克智、白以龙, 21 世纪初的力学发展趋势。力学与实践, 1996 年第 18 卷第 1 期, 1—8。
- [11] 钟万勰, 程耿东, 跨世纪的中国计算力学。力学与实践, 1999 年第 21 卷第 1 期, 11—16。
- [12] Bai Y L, Wang H Y, Xia M F, Ke F J. 2005. Statistical mesomechanics of solid, linking couple multiple space and time scales. Appl Mech Rev, 58: 372~388.
- [13] Huang Z P, Wang J. Nonlinear mechanics of solids containing isolated voids, ASME Appl. Mech. Rev., 59 (4), 2006, 210~229.
- [14] Xu B X, Wang M Z. 2005. The quasi Eshelby property for rotational symmetric inclusions of uniform eigen-curvatures within an infinite plate. Proc. R. Soc, A, 461: 2899~2910
- [15] Yang, JL, X.H.Liu, Y L Hua, Plastic dynamic breakup of a free-free beam subjected to impact

at two free ends, Int J Solids Structures, Vol.41, 7091-7110,2004.

[16] Zhang QC, Jiang ZY, Jiang HF, Chen ZJ, Chen, Wu XP. On the propagation and pulsation of Portevin-Le Chatelier deformation bands: an experimental study with digital speckle pattern metrology. Int J Plasticity (IJP). 2005, 21(11): 2150-2173.

[17] Zheng Q, Jiang Q. Multiwalled Carbon Nanotubes as Gigahertz Oscillators. Phys Rev Lett, 2002, 88(4): 045503.

附件

固体力学学科发展专题研究报告之一

多尺度力学

何国威、白以龙

中国科学院力学研究所，非线性力学国家重点实验室

多尺度力学是当代科学技术发展的需求和前沿。在生物科学，材料科学，化学科学和流体力学中，许多重要问题的本质都表现为多尺度，它们涉及从分子尺度到连续介质尺度上不同物理机制的耦合和关联。例如，在生物和化学科学里，在分子尺度上的不同性态产生了生物体尺度上的复杂现象；在固体破坏中，不同尺度的微损伤相互作用产生更大尺度上的裂纹导致材料破坏；在流体力学中，不同时空尺度的涡相互作用构成复杂的流动图案。这些问题的共同特点是不同尺度上物理机制的耦合和关联。只考虑单个尺度上某个物理机制，不可能描述整个系统的复杂现象。因此，多尺度力学的核心问题是多过程耦合和跨尺度关联。

多尺度力学是传统的针对多尺度问题研究的发展，但有着本质的不同。它们都研究不能通过解耦进行求解的多尺度耦合问题。但是，传统的多尺度问题具有相似性或弱耦合，即：不同尺度上的物理过程具有相似性，因此我们可以求相似解；或者，不同尺度上的物理过程具有弱耦合，因此我们可以采用平均法求解。然而，多尺度力学的研究对象具有多样性和强耦合，即：不同尺度上的物理过程既不具有相似性，耦合也不再是弱的了。因此，传统的相似解和平均法对多尺度力学的问题都不适用。

动力系统理论和统计力学为多尺度现象的研究提供了基本方法。在一个给定尺度上的物理过程可以用动力学方程描述，而动力学方程的建立主要依赖于经典力学和量子力学。问题的关键在于不同尺度上物理过程的相互耦合。如果可以忽略耦合，单个尺度上的物理过程完全可以由经典力学或量子力学描述，剩下的就是类似于解方程那样的认识过程，原则上并

不是什么困难的事情。在平衡态统计物理里，不同尺度之间物理过程耦合的基本假设是基于等概率原理的统计平均。但是，大多数多尺度问题涉及统计力学中非平衡态的非线性演化过程，不同的尺度之间存在强耦合或敏感耦合，不能简单地采用绝热近似、统计平均以及微扰等方法处理，而必须将不同尺度耦合求解。特别是存在敏感耦合的情形，小尺度上的某些无序性细节在非线性演化过程中可能被强烈地放大，变成大尺度上的显著效应。统计力学为处理这类问题提供了一个基本出发点。一个直接的方法是从第一原理出发，利用分子动力学，计算分子尺度上的所有细节，然后求得连续介质尺度上的物理性质。但是，由于现有计算机的限制，从第一原理出发的直接法并不现实。一个比较现实的方法是寻找中间尺度进行过渡，它包括基于区域分解的准连续方法和基于粗粒化的粒子动力学法。这些构造模型的方法在不同的问题上都取得了一定程度的成功，但是，它们都不具有普适性。最新的发展是建立在齐次化方法上的非均匀齐次法，它试图给出解决跨尺度关联问题的一般框架。

现代力学中两个典型的多尺度问题是流体湍流和固体破坏，它们既有共同点，但又有所区别：流体湍流表现为不同尺度上多个物理过程的耦合，它没有尺度分离；固体破坏表现为不同尺度上物理机制的跨尺度关联，它具有尺度分离。现详细讨论如下：

(1) 流体湍流：

在流体湍流里，不同尺度上的涡相互作用构成了复杂的流动图案，它们具有不同的物理机制而又相互耦合。在上个世纪，针对不同尺度上物理过程相似的问题，流体力学家发展了求相似解的方法；针对不同尺度上物理过程耦合较弱的问题，流体力学家发展了小参数摄动法。正是相似解和摄动法解决了航空航天中诸如湍流边界层这样的重大问题，形成了力学史上的一个黄金时代。但是，现在对湍流问题的研究与过去有了根本的不同，它表现为要认识不同尺度上不同的物理过程的强耦合。对于这类问题，经典的相似解和摄动法并不适用。因此，必须发展能解决多尺度现象里多样性和强耦合问题的理论和数值方法。

湍流具有从耗散尺度到积分尺度的连续谱，它没有尺度分离，因此平均法并不适用。统计物理为湍流的多尺度模型提供了工具。一般而言，湍流的统计特性可以用矩和概率密度函数描述。但是，矩方程含有非线性引起的高阶矩耦合，概率密度函数方程含有耗散引起的空间耦合。在湍流的解析理论中，直接作用逼近（DIA）已成为矩方程耦合的经典方法；映射封闭逼近（MCA）正发展成为概率密度函数方程的封闭方法。在湍流的唯象理论中，高斯封闭是耦合表象的基础，例如，EDQNM 方法和朗之万方程。

大涡模拟是湍流数值模拟的重要方法。在大涡模拟中，直接计算大尺度，而小尺度对大尺度的影响用亚格子模型反映。现有的亚格子模型是根据能量平衡方程得到的。它能反映小尺度对大尺度能量的影响，不一定能反映小尺度对大尺度其它物理量的影响，特别是随时间演化的非定常特性。多尺度大涡模拟方法考虑了多个不同尺度上多个不同的物理过程的耦合，正成为该领域的重要研究方向。

(2) 固体破坏:

人类社会生活在一个主要由固体介质支撑的环境中, 固体介质的破坏、失效几乎涉及人类生活的一切方面、工程技术的各个领域、以及地震、滑坡、雪崩等多种严重自然灾害之中。但是, 由于固体破坏问题的复杂性, 使之成为固体力学、材料科学、物理学以及诸多相关学科的跨世纪难题。对于多尺度问题, 人们注意到, 虽然平均化常常是一种有效的方法, 但是它只适于预测诸如刚度和传导率这样的一类性质。而断裂或“崩溃”一类现象会依赖于微结构的具体细节, 通常, 平均化的方法是不适用的。因此对于固体破坏的研究, 例如对于地震预测性的争论, 一直在持续着。Herrmann 和他的合作者的书从非均匀介质的角度出发汇集了上世纪后半期这方面的进展。2004 年在重庆召开的会议的详尽总结反映了近年来对此问题的各类看法和学说。

固体破坏预测的困难, 主要联系于它的两个特征: 1. 一大类固体的破坏表现为突发性灾变, 灾变前很难捕捉到明显的前兆; 2. 宏观上大体相同的系统其灾变行为可有显著差异, 即灾变呈现不确定性, 只用宏观平均量不足以表征灾变行为。这类复杂特征的根源在于多尺度耦合效应。固体破坏的演化过程涉及很宽的空间和时间的尺度范围。其破坏过程通常是一种跨尺度演化的过程, 即由大量微损伤的累积并通过跨尺度的非线性串级发展而诱发宏观灾变。在整个过程中, 微小尺度上的某些无序结构的效应可能被强烈放大, 上升为显著的大尺度效应, 对系统的灾变行为产生重要的影响。那么, 该怎么处理多尺度耦合的问题呢? Barenblatt 建议, 要确定材料微结构的变化对宏观行为的控制性影响, 应该将宏观力学方程与微结构转变的动力学方程组成统一的方程组, 耦合求解。特别是, 他还注意到了 Deborah 数的重要性。但是另一方面, 由于不可能对各个尺度上的无序结构及其敏感效应作详尽无遗的描述, 灾变行为呈现不确定性, 跨尺度敏感性就是一个典型的案例。

实现灾变预测的另一种可能的策略是寻找灾变的共性。借用和发展逾渗模型, 自组织临界性, 临界点模型等等在许多文献中被探讨着。另一方面, 这种共性可能表现为损伤局部化和临界敏感性, 它们是典型的多尺度耦合现象, 是需要连接细观与宏观尺度的跨尺度耦合理论框架中阐明的。它们可能是具有普适性的并且可监测的灾变前兆, 因而可为灾变预测提供线索。这表明进一步发展关于固体破坏的跨尺度耦合的理论应是当前最重要的研究方向之一。正如 Kadanoff 指出的, 为了考察材料的失效、地震或雪崩动力学等, 人们开始在所谓的物理动力学领域开展了各种深入的研究。当科学转移到越来越复杂的系统时, 可能统计方法是下一代科学问题的一个重要投入。

流体湍流和固体破坏从具体物理机制来看, 似乎毫不相干。但是从多尺度耦合的角度来看, 无论是基本概念、研究方法还是理论框架, 都有惊人的共同之处。例如: 它们都涉及非平衡、非线性的演化, 不同尺度之间存在强耦合, 不能采用微扰或求相似解的方法, 都存在跨尺度的敏感性, 以致某些涨落会影响全局的突变等等。并且, 二十一世纪纳米科学和生

物技术的发展促进了多尺度力学的发展，一个更具挑战性的范例如下：

(3) 从分子动力学到连续介质力学的跨尺度关联

纳米科学和生物技术的发展促进了从分子动力学到连续介质力学的跨尺度关联的研究。例如，在纳微流动中，分子动力学受现在计算机能力的限制，不能用于整个流动区域的模拟，而 Navier-Stokes 方程不能描述纳微流动中连续介质假设不成立的区域。因此发展了把分子动力学和连续介质力学描述耦合起来的混合法。在混合法里，在连续介质假设成立的区域仍用 Navier-Stokes 方程，而在连续介质假设不成立的区域用分子动力学，然后通过重叠区的粒子动力学把它们耦合起来。这种混合法正得到越来越多的重视，广泛的应用于纳米器件和材料的研究之中。混合法的关键就是从分子动力学到连续介质力学的跨尺度关联。

作为结束语，我们简述开展多尺度力学研究的意义：

首先，多尺度力学促进了处理耦合问题的唯象方法到演绎方法的过渡。例如，在流体湍流里，大多数湍流模型是经验公式，不能直接从控制方程导出。然而，DIA 和 MCA 方法可用逐步逼近的方式推导出湍流模型；在固体破坏中，准连续理论和统计损伤力学试图用统计力学的方式从局部守恒方程出发演绎推导从分子尺度到连续介质的跨尺度关联。这是从经验公式到理性认识的飞跃。

其次，多尺度力学的研究有可能产生新的学科生长点。目前，对多尺度力学的个案处理已有了一定的进展。但是，似乎并不存在对一般多尺度力学问题的普适方法。然而，对于一类多尺度耦合问题个案的处理也许会启发出一定程度上的统一处理方法。这个统一的处理方法多半会来自于学科的交叉，也就是说，多尺度现象里看似毫不相关的物理现象的统一处理，会给多尺度耦合问题的研究带来新的发展机遇。就像十九世纪电学和磁学的统一于具体的麦克斯韦方程和二十世纪生物学与分子科学的结合导致分子生物学的蓬勃发展一样，多尺度力学研究中的新的概念和方法的引入和融合统一会创造出学科发展的新生长点。除了上述统计物理学与流体湍流和固体破坏的结合之外，多尺度耦合的新生长点也许还存在于：软物质和连续介质力学、统计力学的结合；生命现象，如基因系列，蛋白质功能的研究诱发的新的统计力学方法；纳/微米尺度和原子分子间作用相结合的准连续力学理论。

最后，多尺度力学的发展有可能推动力学走向自然科学和技术科学的新前沿。多尺度力学的研究对象涉及分子尺度到连续介质，因此，它不仅涉及经典力学还涉及量子力学；多尺度力学的研究方法是动力系统和统计力学的结合，它涉及到当代科学方法论上的突破；多尺度力学的研究成果不仅可以应用到经典的流体湍流和固体破坏，还可以广泛地应用到材料、生物和化学等的前沿领域。

微纳米力学和细观力学¹

郑泉水¹、胡更开²、王建祥³、冯西桥¹、郭万林⁴

¹清华大学工程力学系；²北京理工大学力学系；

³北京大学力学与空天技术系；⁴南京航空航天大学纳米科学研究所

引言

细观力学主要研究材料的内部结构和性质与材料的宏观性质的关联，这是一个近半个世纪以来有着极为丰富研究成果的领域，最近的研究重点是非线性、动态、多物理场、跨尺度计算和尺度效应等。微纳米力学着重研究从纳米到微米尺度范围材料、器件、生物体等等与受力、变形、破坏等有关的各种行为，这是进入 21 世纪以来最活跃的多学科交叉研究领域之一。微纳米力学借鉴了细观力学多方面的方法和成果，是后者的一个自然延伸。我国学者在这些领域不仅广泛涉猎，也取得了多项有重要影响的成果。本文主要概述了笔者从事研究领域的几个方面的近期进展，及对今后发展趋势的看法。分为：细观力学、纳米材料的表面/界面效应、生物材料的微纳米力学与仿生、和纳米材料/器件的力学。由于笔者认知的局限和篇幅的限制，难免挂一漏万，敬请读者指正。

一、细观力学

细观力学近 50 年取得到了很大的发展。目前研究较为集中的是如何将微结构的分布更准确地引入细观力学模型，这方面的进展包括：相关函数方法，椭球分布界限，双夹杂方法，IDD 细观力学方法，和基于构型界限和细观方法，以及上述一些方法之间的关联。但这些解析的方法目前只能就一些特殊的分布如椭球分布给出简单的表达式，对于更一般的微结构分布目前只能通过数值的方法来实现。近年来还发现了复合材料有效性质具有诸多的与微结构无关的普适关系，如 CLM 定理和复合材料有效性质的减弱不变性。另一个研究热点是非

¹胡更开教授、王建祥教授、冯西桥教授、郭万林教授分别撰写了细观力学、纳米材料的表面/界面效应、生物材料的微纳米力学与仿生、和纳米材料/器件的力学部分或提供了基本素材，由郑泉水统一修改集成为全文。

均匀材料不同物理有效性质之间的关联。近来计算细观力学得到了快速发展,其中包括考虑更合理和复杂的微结构分布形式。最近出现了不少具有微观结构耦合的细观力学研究,如基于应变梯度的细观力学,和基于微极材料模型的细观力学。

塑性细观力学目前的主要研究可以概括为: (1) 如何更好地描述非均匀材料塑性变形不均匀性? 目前的主要方法是在 Ponte Castañeda 变分框架下, 将各相材料的非线性应力(或应变)势函数进行 Taylor 展开。(2) 如何描述非均匀材料所表现出的尺度效应? 目前针对不同的物理机制主要有两种方法, 即考虑材料的表面/界面效应(见下节), 和考虑夹杂和基体微观结构的耦合效应, 或等效成微极或微膨胀介质, 即研究高阶介质连续细观力学。(3) 连续细观力学的增量理论。从细观上预测非均匀材料的疲劳寿命, 迫切需要发展细观模型的增量理论, 但这方面的研究进展一直不大。

二、纳米材料力学中的表/界面应力效应

纳米材料的表面/界面原子数占很大的比例, 具有显著的效应。Gurtin 和 Murdoch 首先建立了关于表面应力的连续介质力学理论基本框架。表面应力和界面应力的引入为纳米材料力学和非均质材料细观力学的发展带来了新的机遇。近几年出现了关于纳米材料力学性能受表面应力影响的较系统性的研究, 在量子点的生长和性能分析、纳米器件的自组装、纳/微米电子器件和材料科学与工程等领域具有重要的应用价值。在连续介质力学框架内, 表面应力被认为是体应力的 Gibbs 意义上的过剩量。因此, 表面应力模型是基于物质的微观结构提出的、并且是受到物理、材料和力学等领域的学者广泛关注的研究纳米材料力学性能的一种连续介质理论模型。

我国学者近年来在本领域取得了一系列重要研究成果。提出了有限变形下的界面本构关系; 导出了界面应力满足的基本方程广义 Young-Laplace 方程; 导出了考虑表面压电效应的表面弹性基本方程; 建立了计及界面应力效应的球形夹杂的 Eshelby 体系; 建立了具有表面/界面应力效应的计算非均质材料等效模量的细观力学框架; 预测了纳米介孔材料的等效弹性模量; 针对纳米介孔材料, 建立了自应变和等效弹性性能的关联; 建立了计及表/界面应力作用的有限元方法理论框架, 等等。在基于表面/界面应力的微生化传感器的机理研究和制备方面也取得了进展, 对于相关微生化传感器的设计有一定参考作用。在实验方面, 国内外学者分别用原子力显微镜测量了铅和银纳米线的弹性模量与尺寸的关系, 基于表面应力理论给出了理论分析结果。许多研究结果表明, 表/界面应力效应带来的材料力学性能的尺

度相关性可以精确地用一个简单的标度律来刻画，它清楚地揭示了材料性能中纳观尺度-微观尺度-宏观尺度的一种耦合关联。

三、生物材料的微纳米力学与仿生

生物材料具有多层次的精美结构，尤其是研究细观和纳观尺度上生物材料的结构与性能之间的关联，为新材料的发展提供了无穷无尽的创新源泉，近几年日益受到关注。我国学者在该领域取得了一些重要的研究成果：观察证实了珍珠母中有机物基质中矿物桥的存在，表明纳米尺度的矿物桥对珍珠母有机质界面的强度和韧性有重要影响；研究了蝉翼的结构及其力学性能；对蚕丝、蚕茧、蜘蛛丝等生物材料和生物结构进行了系统实验研究，发现蚕茧在不同方向均具有优化性能和结构，并成功地仿生制备了多种纳米尺度的生物纤维材料；对贝壳、骨骼等的研究表明，生物材料的优良性能来源于在生物进化中形成的精巧的纳米结构，提出了描述生物材料承载特性的拉伸-剪切链模型，对不同生物材料相似纳米微结构给出了统一的理论描述；提出这类生物材料的优异性能和纳尺度的自修复能力来自软的蛋白质层，并给出与分子动力学一致连续介质力学模型；研究了生物粘附系统的表面纳米微结构，揭示了壁虎的脚具有极强的粘附能力的原因；用细观力学方法研究了牙本质材料的非均匀、各向异性本构关系，研究了骨的微观结构，并进行了仿生骨复合材料的研究。对竹、木等生物复合材料的细观结构进行了分析。研究了蜥螂壳的表面微结构，发现其具有很好的耐磨损和防粘附性能，并进行了仿生应用。研究了绿金龟子等昆虫甲壳的微观结构，建立了典型微结构的力学模型，以说明其强韧化机理。

四、纳米材料和纳米器件的力学

近年来，微纳米力学在全球范围迅速得到了广泛认可和高度重视。我国学者在该领域起步并不晚，并取得了若干有重要国际影响的成果。纳米力学在如下几个方面取得了重要进展：(1) 提出并发展了多尺度方法，研究材料的破坏和强韧性机理、机光电磁热耦合等复杂问题，提出了新的纳米晶体塑性模型，对纳米材料的性能研究和材料设计，做出了重要贡献；(2) 提出了多个有重要影响的纳器件原创性思想，对纳米科技的发展形成了广泛影响，研究了纳米尺度下材料和器件的一系列新的力学与物理力学行为，研究了纳机电系统的能量耗散机理，等。(3) 解释了一系列重要的纳米科学现象，如碳材料奇异的软硬相变、碳纳米管的奇异力学行为，纳米晶体的超塑性、表面效应等；(4) 提出了适用于纳米材料和器件研究的以原子势为基础连续介质力学模型和原子/连续介质杂交模型等；(5) 研究了一系列的

纳米材料和器件的物理力学和复杂力学行为。我国学者提出首个 GHz 纳机械振荡器的构想和理论预测并率先进行了分子动力学实验和耗散机制、纳输运和高压物理力学等研究，发现碳纳米管的巨电致伸缩及其效应，提出机械双稳态的高频纳存储器件原理，提出了纳米晶体的塑性变形⁹晶粒模型，提出了效率很高的原子有限元法、基于分子间相互作用势的分子统计热力学方法和集团统计热力学方法、光滑分子动力学方法和基于分子力学的空间弹簧模型等，实现了超大规模分子动力学模拟晶体位错和塑性动态演化等的模拟，率先或系统性的研究了碳纳米管的奇异力学行为、碳纳米管的连续介质模型适应性、和非局部或高阶模型等。

纳米力学发展遇到的一个瓶颈问题是实验条件的限制，在传统力学实验技术和现代微观表征设备之间还缺乏系统性的微-纳力学实验设备。迄今为止，纳米力学实验手段主要有扫描探针显微术、纳米压痕法以及利用光镊、磁镊等仪器测量生物分子间相互作用力的方法等。我国物理、材料、力学等领域的学者在纳米力学实验方面也作出了不少重要的工作，见本文集有关实验方面的报告。

当前纳米科技研究的主流正从纳米材料向纳米器件发展、从单一学科研究向交叉学科研究发展、从人工纳米结构向生物功能结构和蛋白质系统发展，已经从材料结构和性能研究向纳电子技术、能源技术、生物与医药技术等应用与产业领域发展。在此趋势下，具有定量研究复杂系统行为传统优势的力学及其与量子力学的结合，理论、计算、实验和制备结合必然是十分重要的学科发展方向。

五、小结

微纳米力学在全球范围正在迅速扩展和深入，具有多学科交叉的强烈特征，国际竞争十分激烈。微纳米力学与其它学科微纳米发展方向相比较，在处理大尺度、复杂行为、运动变形和强度等方面具有优势。我国学者不仅需要突出这一优势，还特别需要加强学科内外的合作，以切实抓住历史发展机遇。在细观力学发展方面，我国学者的近期投入渐有减弱，而在非线性、动态、多物理场、跨尺度计算和尺度效应等方面有很多重要问题有待于解决。

新型材料力学

杜善义、梁军

哈尔滨工业大学

引言

新材料是指那些新近出现的和仍在发展中的具有优异性能的材料，它具有传统材料所不具备的高性能。新材料技术是现代工业的共性关键技术，是高新技术发展的基础和先导。新材料不仅是世界工业革命的推动力，也是高技术发展的基础和先导。当今国际社会公认，材料技术、信息技术和能源技术是人类文明的三大支柱，同时也把新材料、信息技术和生物技术作为当代高技术革命的主要标志。事实上，信息技术和能源技术的发展，也依赖于新材料的发展。例如，基于硅单晶的更新，为现代信息技术奠定了基础。

新材料按照其基本组分，可以分为新金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四大类。按照材料的性能分为结构材料和功能材料两大类。在很长的时期里，结构材料是新材料的主体，但随着高新技术的发展，多功能材料愈来愈重要。功能材料的研究开发更需要新的思想，需要利用材料科学技术的最新成就，需要全新的合成和制备技术、表征方法、质量检测和控制技术。对于所有的新材料，共同的要求是：高性能、高精度、高质量、高稳定性、小型化和轻量化。因此，新材料的发展趋势是：结构材料的复合化和功能化；功能材料的多功能集成化和智能化；按特定的应用目标开发新材料；依靠新的合成制备技术开发新材料；依靠材料科学设计新材料。但是要使新材料在实际工程得以应用，首先必须对其强度、使用寿命、可靠性等材料的力学问题加以分析研究，建立起新的性能标准和评价体系后，才能使新材料得以推进和发展。

下面我们就针对几种新型材料研究及使用过程中存在的力学问题作一简单说明：

一、复合材料

复合材料是指由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料，它既能保留原有组分材料的主要特色，又通过材料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联与协同，从而获得新的组分材料无法比拟的优越性能，复合材料包括金属基

复合材料、树脂基复合材料、陶瓷基复合材料等。随着复合材料的广泛应用和人们在原材料、复合工艺、界面理论、复合效应等方面实践和理论研究的深入，使人们更为能动地选择不同的增强材料和基体进行合理的性能设计，采用多种特殊的工艺使其复合或交叉结合，制造出高于原先单一材料的性能或开发出单一材料所不具备的性质和使用性能，如优异的力学性能、物理-化学多功能（电、热、磁、光、耐烧蚀等）或生物效应的各类高级复合材料。因此对于新型材料来说“复合”涵盖的范围也越来越广：从宏观尺度的复合到微观尺度的复合；从结构材料到结构功能一体化材料和功能复合材料；从简单复合到非线性复合效应的复合；从复合材料到复合结构；从材料的机械设计到仿生设计。针对这种新型的复合材料，目前亟需解决的力学问题主要有：（1）复合材料结构对不同能量撞击的响应问题；（2）材料的内部缺陷对材料性能的影响及材料破坏性能的界定；（3）编织复合材料工艺对材料结构性能的影响；（4）复合材料结构使用寿命、疲劳寿命、安全性的准确确定；（5）热载荷，特别是高温对材料力学性能的影响；（6）材料性能的标准检测方法；（7）材料静态及动态破坏机理。

二、功能材料

这是新材料研究的开发的重点。包括了光、电、磁信息材料，能量转换材料，储能材料，敏感材料等，其用途十分广泛。但还有许多问题没有得到解决，限制了功能材料的广泛应用，如（1）适合于热、力、电、磁耦合的多功能梯度材料及结构优化设计理论以及求解方法的建立；（2）用于功能梯度材料多目标优化设计的软件，包括功能梯度材料的优化设计以及相应结构的设计；（3）由于电-磁-力-热耦合多功能材料复杂的显微结构、不同尺度的非均匀性，它们的耦合问题变得更为复杂、更富有挑战性。其在多种载荷作用下，材料非线性耦合机理仍不是很清楚，电极化和磁极化耦合产生的机理以及对断裂强度的影响，特别是缺陷附近集中电场、磁场耦合诱发电畴变和磁畴变发生的机理以及对材料断裂韧性和疲劳特性的影响有待于进一步分析研究；（4）电-磁-力-热耦合材料的断裂、损伤及可靠性问题研究还处于起步阶段，常规的适合于宏观均匀材料的性能测试方法大都已不再适用对其性能进行评价，因此需要建立能准确地对电磁多功能材料的性能进行评价的检测手段、实验方法和评价体系；（5）由于多场耦合问题的复杂性，特别是三维问题，数值模拟仿真分析方法非常重要。但目前还没有通用的有限元软件可以真正地对电-磁-力-热耦合多功能材料的性能进行准确的数值模拟分析。

三、轻质材料

传统格栅增强结构的概念是上世纪 70 年代由美国麦道公司首先提出，其基本构想是：整个结构由铝合金加强肋与蒙皮组成，加强肋呈正多边形网格分布，整个结构表现各向同性。先进格栅增强结构由于其突出的综合性能优势而受到普遍重视，NASA Langley 研究中心研究人员把先进格栅增强结构技术列入未来航天结构技术发展的六大方向之一的低成本结构技术之内；美国空间实验室把先进格栅增强结构 AGS 技术列为迎接未来空间系统技术挑战的四大结构技术之一，并且指出了这项技术未来在航天器燃料储箱、机身等大型复杂部件应用的广阔前景。俄罗斯提出的应用对象包括级间段、内压容器、有效载荷适配器、运载飞船整流罩、飞机中机身舱段、翼盒、直升机垂尾梁、空间望远镜镜身以及建筑结构等。2000 年左右，在西方材料学界，以哈佛大学的 Evans 教授、剑桥大学的 Ashby 教授、MIT 的 Gibson 教授等人首先提出了一种空间点阵材料（结构）。这类材料具有的可能的优越性质——高比强度、高比刚度、多功能性等——越来越受到了材料学界的重视，被认为是最有前景的新一代先进轻质超强韧材料，已经开始应用于航天结构。

近年来，轻金属泡沫材料和蜂窝夹层板在航空、航天结构中得到了广泛应用，尤其是航空结构中使用了大量的蜂窝夹层板结构，而格栅型结构和点阵夹层结构是当前国际上认为最有前景的新一代先进轻质超强韧材料，已经开始应用于航天结构。尤其点阵复合材料为结构进一步轻量化以及材料/结构/功能一体化设计及其实现提供了更广阔的发展空间和可能性，吸引了国内材料、力学等领域的很多学者投入到这方面的研究。但是目前国内学者对空间点阵复合材料复杂的机理及其制备工艺等的研究刚刚起步，而且大多是集中在对其等效弹性性能及其结构拓扑优化的研究上。而对其结构的动态响应、结构的吸能及抗撞击原理、可靠性的评判标准及结构的失效原理等力学问题的研究还很少，理论分析还不够全面和深入。因此，要使这种新型的结构材料得到广泛的应用与发展，还有许多力学问题有待于力学工作者去深入研究。

四、纳米材料

纳米材料科学是一门新兴的并正在迅速发展的材料科学，而且涉及到原子物理、凝聚态物理、胶体化学、配位化学、化学反应动力学和表面、界面科学等多种学科，由于纳米材料体系具有许多独特的性质，在实际应用和理论上都具有极大的研究价值，被誉为 21 世纪最有前途的材料。纳米复合材料已经成为先进复合材料技术的一个新增长点，也是先进复合材料技术研究最活跃的前沿领域之一。纳米复合材料的超常特性使其在航空航天等各领域

具有广泛的应用前景。据报道，香港科技大学将碳纳米管加入聚乙烯纤维中开发出了一种超强纤维，它的拉伸强度超过钢的 8 倍，同时还具有很好的延性。

纳米复合材料研制中存在的有关键问题有：一是分散，均匀分散纳米粒子和纳米管要克服它们由于 van der Waals 键形成的团聚是纳米复合材料制备加工的第一步，纳米片层结构的剥离也至关重要，如果分散得不好，影响材料的性能，导致材料力学性能下降；二是排列，因为尺寸小，很难把纳米管像传统短纤维一样排列在聚合物基体中，缺乏对纳米管的定向排列的控制导致纳米管在复合材料中的增强效果下降。

五、碳/碳复合材料

随着新一代航空航天器向高超声速等方向的发展，苛刻的超高温服役环境对材料及结构的承载与耐热提出了严峻考验，碳/碳复合材料是适应这种需求重要候选材料。碳基耐热复合材料方面主要用于烧蚀耐热和热结构，较好地解决了轻质化、抗热震、耐侵蚀等技术难题。除了传统的碳/碳复合材料以外，近些年来，美、俄、法等国家又开发了许多混杂其它材料的新型碳/碳材料，以满足不同的特殊使用要求，例如：在碳/碳材料中混入 Si_3N_4 、 SiC 、 TiC 、 TaO 、 TaC 、 WO 、 WC 等粉末，以提高碳/碳材料抗粒子侵蚀性能。从目前的实际情况及应用前景可看出碳/碳复合材料的研究和发展趋势大致为：从最初阶段的两向碳/碳复合材料向三向、四向等三维多向碳/碳复合材料发展；从单纯抗烧蚀碳/碳复合材料向抗烧蚀—抗侵蚀和抗烧蚀—抗侵蚀—稳定外形碳/碳复合材料发展；从耐热材料向热结构材料发展；从单功能材料向多功能材料发展。目前对于应用于超高温环境下的碳基复合材料主要力学问题在于：新型碳基复合材料高温烧蚀/侵蚀/剥蚀机理、通过服役环境与材料作用过程的理论建模，建立实验模拟平台和数值模拟平台、发展先进和原位实时测试技术，掌握材料演变和破坏行为，为材料优化设计提供验证手段。

结论

新型材料及其结构形式、服役载荷及使用环境都相当复杂，材料初始缺陷影响和损伤在跨层次结构中的发展、蔓延、传播并最终导致材料破坏与结构失效的机制复杂。因此，如何建立新型材料有效性能实验表征与评价体系，发展高精度的预报理论与方法，有效预测复合材料结构长时服役环境下的性能蜕变规律，给出科学合理的结构失效判据，量化评价新型材料结构的可靠性和安全性，是力学工作者面临的重要课题。

弹性力学

王敏中

北京大学工学院

引言

弹性力学作为一门科学伴随着工业革命而诞生，并被广泛应用于土木、航空、船舶、机械等工程领域。二十世纪末期，弹性理论的发展有两个明显的倾向：其一是理论上进一步深化，许多基本概念和基本问题被细致的研究；其二是弹性力学研究范围被扩张，并与其它物理因素相互耦合，从而出现了许多新的学科，它们极大地丰富了弹性力学的研究领域和应用范围。在这个意义上来说，弹性力学是固体力学前进的发动机。

近年来，我国弹性力学工作者在上述两个方向上做出了不少可喜的创新研究。以下分三个部分来报告这些创新研究。

一、求解体系、变分原理和精化理论

国外弹性力学求解体系以 Timoshenko 为代表，应从体系上进行改革。我国学者将空间坐标 z 模拟时间 t ，从而把弹性理论纳入 Hamilton 体系，该体系突破了圣维南以来的凑合法传统。进一步，基于弹性平面与板弯曲的模拟，将辛体系推广到了板弯曲求解。其中应力函数与位移的模拟，表明弹性力学变分原理中，不应将应力函数排除在外。其中弹性楔以往的所谓佯谬解，也在辛求解体系的约当型下得到了圆满解决。根据结构力学与最优控制的模拟理论，系统阐述了辛对偶体系和分析结构力学与有限元，以及保辛摄动等的新求解方法。

我国学者获得了变分原理及其应用方面最重要和最系统的研究成果，以简单而统一的新途径，系统地建立了耦合弹性静力学与动力学的虚功原理、互等定理和各类变分原理与简化 Gurtin 型变分原理，特别是创造性地提出了耦合弹性动力学的各类非传统 Hamilton 型变分原理和相空间非传统 Hamilton 型变分原理。这些新的变分原理能反映有关动力学初值一边值问题的全部特征，因此它们是对耦合弹性静力学与动力学基本理论的发展与完善。

梁和板是最有价值的工程结构元件，是力学理论应用最广的场所，由于近似方法和程

度的不同，当今已出现了数十种理论。我国学者借助于弹性通解和 Lur' e 算子方法，获得了弹性中厚板的精化理论，获得了迄今最准确的梁的精化理论，其近似精度比著名的 Timoshenko 梁、Leveson 梁都高。

二、各向异性、准晶、压电、电磁等弹性力学

随着复合材料的广泛应用，各向异性弹性力学吸引了众多力学家的研究。我国学者给出了横观各向同性弹性力学轴对称问题用两个应力函数表示的通解；首先给出横观各向同性和各向同性无限体均能适用的统一点力解，并应用于边界积分方程，给出了横观各向同性热弹性力学的另一种通解，并与位势理论相结合给出了币状裂纹精确解。给出了压电弹性力学通解以及无限体、半无限体和两相材料无限体的点力解。此外，在旋转体的平衡、接触和断裂、板壳的弯曲和振动等问题上均有建树，主要成果已收集在两本英文专著中。准晶突破了把固体划分为晶体和非晶玻璃体的传统观念，它具有一种新对称性——准周期对称性。准晶弹性比普通弹性复杂的多，场变量与场方程的数目比普通弹性高出一倍还多，而且是非对称的。我国学者引进了位移势或应力势，使数目庞大的准晶弹性方程组化成一个或少数几个高阶偏微分方程，并且把它们的解用几个复解析函数或积分表示出来；获得了问题的基本解，进而得到不同准晶系的位错与裂纹问题的精确分析解。

压电材料是一种智能材料，被广泛用于航空、航天、军事等高科技领域。对于横观各向同性的压电介质和电磁弹性力学问题，获得了三维问题的通解，位移、电势、应力、电位移和磁势及磁感应强度等都可很简洁地由相应的势函数表示出来，利用所获得的势函数发现了在无限电磁弹性空间中广义位错的基本解，导出了电磁弹性半空间固体的 Green 函数，并研究了横观各向同性电磁弹性体中的币形裂纹问题。我国学者研究了含一椭圆孔压电介质的平面问题，给出了孔及介质内电场的精确解；当孔退化为裂纹时，获得了压电介质含一数学裂纹时的精确解。该解可用来检验电边界条件假设的正确性，是压电介质弹性力学的经典解之一。应用 Stroh 公式进一步研究了含一椭圆孔热压电介质的弹性平衡问题，获得了在远场热载荷作用下孔及介质内的电场和应力场精确解，并通过取极限的方法，获得了含裂纹情况时的解，该解为热压电介质的断裂分析奠定了基础。

我国学者在电磁固体力学方面开展了铁磁结构在磁场作用下的磁-力-热的弹塑性力学特性如弯曲与失稳研究，在系统总能量泛函基础上提出的磁弹性力学的广义变分原理实现了能同时描述铁磁板两类典型实验现象的统一模型，并从理论上揭示出其它已有模型在描述一

类实验现象时存在的缺陷。在此基础上，通过建立磁-力双向耦合的数值计算和理论分析，得到了铁磁板壳在磁场作用下的磁弹塑性弯曲与失稳的定量结果，揭示出在倾斜磁场作用下铁磁板的磁-力相互作用为弯曲模式而不是文献上的屈曲模型通向失稳的路径，定量给出了微小磁场倾角对横向磁场铁磁板失稳临界磁场影响的规律等。

在智能材料与结构控制方面，针对超磁致伸缩材料的磁-力-热非线性本构关系，运用热力学原理和理性力学基本方法得到了有限表征形式的解析本构关系式，而且定量预测结果在全部磁场条件下与实验测量结果吻合良好。在此基础上，给出了利用该类材料振动控制的仿真结果等。另外在压电智能结构控制方面，针对几何非线性柔韧结构给出了主动控制的定量分析结果，并针对其振动控制提出了基于小波理论的控制模式等。

我国学者建立了宏细观统一的铁电材料非线性本构关系，并把该本构关系推广到铁电复合材料和铁磁材料。所提出的铁电材料本构关系成为国际上认可的三种代表性本构关系之一。自行设计并研制出了国内首台达到国际水平的多轴多功能力磁耦合设备，不仅可以进行多轴本构力磁耦合实验，还可以进行力磁耦合断裂实验，并实现数据的自动采集与处理。该设备已经分别在国内外多个研究单位订购使用。我国学者在国际上首先发现了 TbDyFe 合金多晶体的磁场下力磁耦合变形的“伪弹性”现象，揭示了它的铁弹性与应力退磁化现象。建立了一个磁致断裂的小范围畴变理论模型，分析了细长椭圆裂纹尖端延长线上的应力场，解释了实验结果。

三、Eshelby 问题

经典的 Eshelby 体系是 20 世纪弹性力学领域一项奠基性的工作，也是细观力学的基石之一，它针对的是完好粘结界面的情况。然而，在实际复合材料中存在各种各样的非完好粘结界面。因此，非完善和非经典 Eshelby 问题的研究具有重要的理论意义和应用价值，近年来，国内外学者在这方面取得了一系列重要进展。对于类位错型界面，获得了不完善椭圆 Eshelby 问题的解析解，值得指出的是该解的 Eshelby 张量为常量，因此这个解就有了广泛应用的可能。对于纳米尺度的夹杂，界面应力的影响变得显著起来。在这方面，已经获得了计及界面应力效应的 Eshelby 张量、应力集中张量和 Eshelby 能量公式。具有固定或自由边界的有限球域的 Eshelby 问题也获得了求解。

我国学者考虑了各向异性三相椭圆夹杂中的均匀应力场，证明只要合适选择中间界面层的弹性常数，只要内外两椭圆中心相同，各向异性线弹性固体在远场均匀反平面剪切应力

下三相椭圆夹杂上仍存在均匀应力场。他们也获得了面外剪切下具有环向非均匀界面的两个圆柱异相夹杂与一个圆柱 Eshelby 夹杂的相互作用问题的级数形式的精确解。获得了压电复合材料中有关 Eshelby 夹杂三个典型问题的精确解：横观各向同性压电介质中任意形状的 Eshelby 夹杂与圆柱异相夹杂间相互作用；一般各向异性压电介质中任意形状的 Eshelby 夹杂与双压电材料所形成界面的相互作用，该界面可以是理想界面、滑动界面和柔性金属电极层增强界面；以及一般各向异性压电介质中任意形状的 Eshelby 夹杂与椭圆孔洞的相互作用。

Eshelby 于 1957 年证明了一个弹性力学命题：“均匀本征应变场椭球夹杂内所产生的应变场为常量”，对于弹性力学而言它仅是一个解析解，但对细观力学而言却是关键所在，并被称为“Eshelby 特性”。Eshelby 于 1961 年猜想他所证明的命题仅对椭球夹杂成立，这个猜想对于平面问题已被证明是正确的。但我国学者证明了关于旋转对称夹杂“准 Eshelby 特性”成立，即：均匀本征应变场在旋转对称夹杂内所产生应变场的算术平均值为常量，且相应的 Eshelby 张量等于圆形的 Eshelby 张量，并与对称的初始方向无关。

我国学者发现了均匀各向同性线弹材料任意形状的夹杂的 Eshelby 张量场具有统一的、形式简单的不可约结构，即由一个各向同性张量和一个二阶、一个四阶不可约张量构成的各向异性部分组成，其中各向同性张量恰与球形的 Eshelby 张量场相同。利用这个性质，他们进一步研究了对称性并由此证明了一系列平均性质。此外，严格证明了广义二维弹性所具有的最为一般的应力场，位移场，磁感应场等的普适性质。非均匀材料的线性弹性性质自然应该取决于组成材料的性质及其细观结构。我国学者发现并证明了二维弹性时具有一系列所谓的材料参数无关或减弱相关性质，重要的是这些性质与细观结构无关。在表明任意各向异性弹性的基本方程可映射为只含三个材料参数的四方对称材料的方程后，进一步证明了对任意二维各向异性弹性仅依赖于单个材料常数。还提出了一种新的简洁、统一、普适的细观力学方法(IDD 法)等等，并得到了较广泛的应用。

致谢：本文得到了钟万勰院士、丁皓江、罗恩、沈亚鹏、范天佑、周又和、郑晓静、方岱宁、郑泉水、王建祥、陈伟球、高存法等教授的大力帮助与支持，作者在此一并致以诚挚的谢意。

塑性力学

黄筑平¹、余同希²

¹北京大学；²香港科技大学

引言

塑性力学是研究当材料和结构产生塑性变形时的力学行为的一门学科，它是固体力学的一个重要分支。塑性力学不仅是断裂力学、损伤力学等许多研究领域的理论基础，而且在许多工程实际问题中有重要的应用。上世纪八十年代以来，我国出版的有关塑性力学的教材、专著和译著不下数十部，有关塑性力学的国内外学术会议也十分频繁，充分说明了这一研究领域的重要性。下面仅介绍弹塑性本构关系、塑性动力学和塑性加工成形这三个方面的问题。

一、弹塑性本构关系

弹塑性本构关系始终是塑性力学的热点研究课题之一。这至少有以下两点原因：（1）新型材料的不断出现，需要对这些材料的力学行为进行深入研究；（2）随着计算机技术的不断发展和数值计算方法的不断改进，已有可能对结构中的应力—应变进行更为精确的分析，这就需要对材料在弹塑性变形过程中的力学行为予以更为准确的描述。

下面，就计及尺度效应的本构理论、有限变形粘弹性和弹塑性本构关系这几个需要重点发展的研究方向做简要的介绍。

近年来，随着微—纳米技术的发展，材料在微米和纳米尺度下的力学行为的研究已愈来愈受到人们的重视。实验表明，当复合材料中的颗粒尺寸或结构的尺寸小到微—纳米量级时，材料或结构的力学行为表现出强烈的尺度效应，如微米尺寸碳化硅颗粒增强铝基复合材料、微米厚度铝梁的弯曲以及微机电系统中“数字微镜器件”的变形失效问题。经典塑性理论无法解释上述的尺度效应，为此，人们相继提出了几种不同的广义连续介质理论。第一种是对 Cosserat 兄弟理论的进一步发展，称为高阶连续介质理论，认为宏观物质单元是有微观结构的。连续介质的变形不仅需要考虑该物质单元质心的运动，而且还需要考虑相应微结构的转动和变形，如微态理论、微极理论等。这相当于在描述材料变形时增加了自由度，以及相应的对偶变量，并由此引进了可以用来描述表征材料在不同尺度层次上的材料内禀长度。

基于以上理论,我国学者发展了预测非均质高阶连续介质宏观有效性质的细观力学方法,是深入研究这一课题的良好开端。第二种是引进变形量的空间高阶导数,称为应变梯度理论,如CS应变梯度塑性理论、SG应变梯度塑性理论、MSG应变梯度塑性理论、CMMSG应变梯度塑性理论,等等。在这一领域中,我国学者的研究工作比较活跃,不仅在理论上有所发展,而且还将其应用于裂纹扩展、纳米压痕和孔洞增长等实际问题的计算中。在微米—纳米尺度下,表面/界面效应将对材料和结构的力学行为有重要影响。表面/界面效应的研究已成为国际学术界的热点研究课题之一。我国学者在这一方面也取得了许多有意义的成果。对Shuttleworth的表面/界面本构方程进行了推广,首次给出了有限变形下的表面/界面本构关系,为表面/界面效应的研究提供了理论基础。我国学者还在细观塑性力学、积分型本构关系以及材料在循环载荷下的塑性行为研究等方面取得了一系列研究成果。

为了描述高聚物材料力学性能的温度相关性和加载速率相关性,以及生物材料的大变形特征,有必要发展有限变形下的粘弹性本构关系,这在高分子材料科学、生物医学工程等许多领域中都有重要意义。国际上已开始关注这一课题的研究。我国在这一方面虽然也有一些工作,但总体来讲,这一课题的研究还相当薄弱。生物材料力学性能的描述还涉及到生物、化学过程,是多种学科的交叉。因此,这一研究不仅具有实际应用背景,而且还具有重要的理论意义,希望引起我国力学工作者的重视。

有限变形下的弹塑性本构理论是当前塑性力学中的重要研究课题之一。我国学者在这一领域中也开展了相应的研究工作,如基于熵—应变空间中的一个准热力学公设,给出了熵—应变空间及其相对偶的温度—应力空间中的有限变形热弹塑性本构关系,并讨论了应变度量或参考构形改变时的不变性关系。给出了基于拟流动角点理论的塑性本构关系,并用于板料成形的数值计算中。但总的来讲,对于有限变形弹塑性本构关系的研究,无论是国外还是国内,还都没有统一的认识和公认的理论,有必要从材料的微观变形机制出发对其做更为深入的研究。

二、塑性动力学

塑性动力学在国防和国民经济的许多部门中都有重要的应用背景。我国学者在这一领域取得了一系列可喜的研究成果。例如,发现了弹塑性动力响应中的“反常现象”;给出了关于结构最终位移的新的下限定理;给出了刚塑性动力学的间断定理;提出了受轴向冲击圆柱壳屈曲的第二临界速度的概念,等等。此后,塑性动力学的研究在我国一直十分活跃。

塑性动力学包括：在高应变率下材料的动态本构关系；应力波的传播；结构的动力响应；结构的动力屈曲和失效；材料的动态损伤、失效和变形局部化；冲击载荷下材料和结构的能量吸收机理等等。在其中某些方面，我国学者已经有了较好的研究基础，如应力波的传播，结构的动力响应，结构的动力屈曲，结构的动力失效，材料的动态损伤以及微损伤的统计演化，绝热剪切，冲击载荷下材料和结构的能量吸收，等等。以上部分成果可参见综述性论文，此处不再一一列举。

不难看出，在高温、高压和高应变率条件下材料动态本构关系和动态失效的研究在我国还需要加强。这一方面是由于它具有很强的军事应用背景，而国外的资料是保密的；另一方面是由于实验和理论研究的难度较大。但从我国的国防需求来说，加强对材料动态本构关系和材料动态失效机理研究的资助力度还是十分有必要的。

三、塑性加工成形

塑性力学有广阔的工程应用背景，其中典型的例子就是塑性加工成形。它主要有以板成形为特征的冲压成形和以体成形为特征的锻压成形两大类。在板料成形方面，我国学者除少量的工作是基于简化模型的分析外，大部分工作是进行数值模拟。我国学者从力学角度系统阐述了塑性弯曲理论及应用。对板材经历弯曲、冲压、深拉延等成形过程中发生的弹塑性大变形、回弹和皱曲等现象提出了力学模型和分析方法。

由于成形过程涉及到几何大变形、材料的物理非线性和边界摩擦等多重非线性效应，问题本身十分复杂，因此，采用计算机数值仿真技术是解决塑性加工成形过程中力学问题的重要手段之一。进入 21 世纪后，零件粗加工的 75% 和精加工的 50% 将采用塑性成形方式来实现。工业部门的广泛需求对塑性加工新工艺不断提出新的挑战。材料成形的轻量化、精确化、高效化，材料成形加工过程的多尺度、多学科模拟仿真将是塑性加工成形领域的重要发展方向。材料塑性加工制造过程的计算机模拟仿真将是该领域中不可替代的重要手段之一，宏、微观塑性本构理论、多场耦合以及率相关塑性大变形的有限元方法则是该领域中重要的基础性科学问题，需要进行深入的研究。在这一方面，我国学者已经取得了可喜的成绩，自主研发的同类软件已成功地进入国际市场，为我国在这一领域的进一步发展奠定了良好的基础。

锻压成形可分为冷锻和热锻两类。高温锻造是制造大型构件和重要承载部件毛坯的主要工艺，在机械制造行业中占有非常重要的地位。由于高温锻造过程不仅在宏观上表现为率

相关性等力学特征，而且还伴有动态回复、动态再结晶、动态晶粒长大等多种微观组织变化的机制，因此，研究高温锻造过程的物理特征以及相应的热塑性本构关系将是塑性力学、金属学和机械制造学所共同关心的课题。我国学者在热塑性本构关系的建立、材料参数的测定以及高温锻造过程的数值模拟等方面虽然也做出了很多很好的工作，但仍需加强对该领域的支持力度，加强有我国自主知识产权的软件和制造技术的开发，以便更好地为国民经济服务。

在塑性力学应用于工程实际问题方面，我国学者已做出了许多有特色的工作，例如，热推弯管成形工艺过程中力学模型的建立和变形过程的分析。由于塑性力学有很强的工程应用背景，应该鼓励和支持更多的力学工作者将塑性力学的理论应用于我国的生产实践中，做出更多更好的有中国特色的研究成果。

致谢：徐秉业教授，匡震邦教授，白以龙研究员，魏悦广研究员，胡平教授，金泉林研究员，彭向和教授，虞吉林教授对本文提出了许多宝贵的意见，特此致谢！

断裂力学

余寿文、冯西桥

清华大学航天学院工程力学系

引言

断裂力学作为研究材料和结构的断裂失效与裂纹扩展规律的力学学科，从达·芬奇的工作算起已有几百年的历史，但真正成为一门定量的科学并应用于人们对客观世界破坏规律的认识，则是从二十世纪 50 年代开始的。断裂力学从宏观的断裂力学研究开始，向着微—细—纳观尺度的方向拓展，则是近二三十年的事。与此同时，它也在向着更大尺度的方向发展，与大型结构的安全评定、油气储藏甚至地球物理的学科相结合，用以阐明大尺度范围内断裂的力学规律。关于断裂力学的历史发展与近代研究的趋势，Erdogan, Cotterell 和 Krajcinovic 等曾在世纪之交，就不同侧面专文论述。本文仅就近五年来，国内外关于断裂力学研究的现状和若干主要趋势作一简要述评。

一、断裂力学的发展趋势

2005 年 3 月，在意大利都灵召开了第十一届国际断裂大会（ICF11），该会议发表的 1016 篇论文，涉及广泛的研究领域。它的大会邀请报告与分组报告典型地反映了当前断裂力学研究的趋势。大会的开幕与闭幕各有两个报告，这 4 个报告彰显了以往与现在断裂与断裂力学研究的重要问题。

B. B. Mandelbrot 题为“断裂表面粗糙度分形分析与综合和复杂性与无序的重整”的开幕式报告回顾了分形理论发展的历史，揭示反映断裂面粗糙度的新的内禀度量，论述了粗糙度分形几何的描述方法并解释了某些新的发展，彰显了分形理论在多尺度描述的重要性。

G. I. Barenblatt 在题为“疲劳与断裂的尺度律现象”的报告中回顾了结构强度与湍流研究从达·芬奇和伽利略等意大利学者开始研究的历史，从古典的断裂尺度律讲起，仔细考究了以往假设的有效性，发表了基于现代相似律分析的标度律的一般分类，讨论了中间渐近和完全与不完全相似的理论，列举了疲劳与断裂中存在的不完全相似，其“异常量纲”幂次的确定要求更复杂的分析，指出了 Paris 疲劳扩展速率的幂次不是材料的常数。

H. Abe 的闭幕式报告的题目是“金属导线的电致迁移”。随着微电子器件的微细化，金属导线越来越细，电流密度和器件本身的温度越来越高，电致失效问题越来越突出。R. de Borst 报告了损伤与断裂的现代的基于区域的离散化方法，指出有限元和有限差分的标准离散方法不大适宜于处理扩展或演化类的间断。报告详细分析了表述不同间断的界面单元法，它可以比标准的有限元方法更柔顺地处理扩展型的间断方法。另外，无网格法、间断伽辽金法及不同性质形函数的有限元法均注意研究这类扩展间断的计算。报告述评了比较实用于扩展间断的离散化方法，特别列举了在非均匀介质方面的应用。

大会的 8 篇邀请报告分别阐述了断裂力学中的反分析、纳米探针与断裂尺度律、生物系统中的纳米结构的断裂力学概念、断裂局部方法的理论与应用、氢对于应用于燃料电池系统的金属疲劳性质的影响、基于断裂分析的总能量法、以及实验室地震等方面的研究进展。

大会的 45 个专题既反映了传统的断裂研究的进展，也有近年来发展良好而且今后将有较大的增长的与信息、生物、新材料相交缘的断裂研究问题，以及与从原子到纳—微—细—宏观各个尺度的断裂专题和尺度律与尺寸效应的研究。

二、国内断裂力学发展状况与研究成果

近年来，我国力学界在断裂力学的诸多方面，也取得了不少重要的研究成果，以下就其中的若干侧面加以简介。

在新材料的发展中，智能材料、梯度材料、准晶材料得到了广泛关注。尤其在压电、铁电等智能材料的断裂与失效研究中，出版了《力电失效学》等专著；开展了电—磁—力耦合的本构关系以及裂纹扩展的系列实验研究；分析了压电材料裂纹尖端场的特点；研究了含裂纹压电材料的力电冲击响应与波的散射及热效应；用有限元、边界元等方法研究了压电材料的界面裂纹等问题；考察了压电材料的介电断裂、裂纹扩展准则；采用周期结构胞元的方法，得到了压电材料双周期裂纹的封闭形式精确解；研究了压电材料的多尺度断裂分析方法；实验研究了环境引发的压电材料断裂；考虑了压电陶瓷裂尖力电热耦合作用、以及电场梯度效应对能量释放率的影响。此外，还研究了准晶材料与胞体材料的断裂问题、功能梯度材料的断裂、裂纹与夹杂物的弹性波散射等问题。

我国学者在微纳米尺度断裂力学的工作也有了很好的开端。针对贝壳等生物复合材料，阐明了纳米尺度的断裂与通常断裂力学的 Griffith 准则之间的过渡；提出了一种基于原子势的方法研究碳纳米管的变形与破坏，应用于碳纳米管复合材料的分析；针对纳米尺度断裂的

计算分析，基于 Cauchy-Born 法则建立了一种基于原子势的准连续介质力学，并用于研究碳纳米管的缺陷与裂纹萌生行为；实施了千万个原子的系统和数百万步的国内计算量最大的超高速撞击的分子动力学模拟，揭示了超音速传播的激波和冲塞型射流形成的破坏过程；用原子-连续模型研究了断裂的尺寸效应。《结构完整性评价大全》第 8 卷对微纳米尺度的断裂力学进行了总结，其中也涵盖了我国学者的部分工作。

断裂力学中的微尺度效应是工程界关注的重要问题。建立了基于位错微观机制的应变梯度塑性理论（简称 MSG 理论）和基于 Taylor 关系的非局部梯度塑性理论，并应用于裂纹尖端场、微梁弯曲等问题的研究；发展了应变梯度塑性理论并用于研究相应的裂纹尖端场和断裂与压痕接触行为；利用离散位错动力学方法研究了在微尺度下材料的孔洞损伤机制和相应的力学模型。

非均质材料的断裂和损伤力学也取得了明显的进展。对于含有大量微裂纹损伤的材料计算力学，是一个研究的重要课题。发展了岩石等脆性材料损伤的计算软件，并应用于工程结构及基础的破坏与稳定性分析；研究了大量微裂纹存在的脆性材料的损伤和断裂行为；将快速多极边界元方法推广应用于多个微裂纹与微夹杂的等效力学性能的计算；对微米尺度下金属多晶材料的细观损伤与断裂问题进行了系统研究；提出了任意铺设层合复合材料多层基体开裂的“等效约束模型”；解释了环境友好型水性聚合物—异氰酸酯粘合剂粘接胶层的断裂机制。

对于断裂力学的试验研究今后尤应注意提倡和鼓励。我国学者自行设计并研制出了国内首台多轴多功能力—磁耦合试验机，完成了力磁耦合的断裂试验；发展了一体化的界面损伤与开裂的识别方法；研发了高温条件下，薄膜断裂参量的试验方法；测量和分析了骨裂纹尖端压电电位的分布。

应用有限元进行结构的断裂分析在工程界已经相当普遍。对于压力容器和管道与金属结构物中大量存在的体积型缺陷，应用塑性极限分析与安定理论，提出了体积型缺陷的安全评定方法，并且已反映在 2005 年正式实行的我国国家标准之中；研究了弹塑性断裂的三维效应，用于处理航空结构与构件的断裂与疲劳寿命预计；此外，对高温结构的蠕变和老化问题也进行了比较深入的研究，结合油气管道研究了管道的动力扩展。

作为破坏力学的一个分支，损伤力学研究宏观裂纹萌生以前物体在外界作用下的性能衰坏性退化的规律。应用统计力学建立细观损伤的统计力学理论；研究了聚合物断裂的非平

衡态统计理论；研究了高分子材料中微空洞损伤的机制；提出了微裂纹扩展区的损伤本构与演化方程；并将各向异性损伤力学应用我国若干水坝的破坏分析。

三、结束语

综观断裂力学近期进展，不难看出如下新特点：

1. 与纳米材料与技术、信息、生物等工程领域紧密联系，断裂研究呈现多尺度建模与跨尺度联接的力学—物理学—材料学紧密交缘的特点；

2. 断裂研究作为客观世界复杂性研究的一部分，呈现集成化、系统化的特点。它与工程科学、安全保障、保险与法律、设计—检测与识别—安全保障一体化相结合，逐步形成损伤—断裂的系统科学；

3. 发展中国家的断裂研究与应用的紧密结合，使断裂的科学更广泛地为经济发展与人类安全服务，成为国际断裂力学界密切关注的问题；

4. 在关注常规结构与材料的断裂研究—安全保证学科发展的同时，断裂研究正朝着扩展研究疆域的新阶段进步，除了开展对与仿生与生物材料的断裂力学研究外，研究者还能在实验室中模拟“人工地震”的断裂过程。人们还密切关注可持续发展所呼唤的化学—物理—力学的断裂交缘研究，即对工程—生物—自然等各类材料与结构开展新的拓展式的断裂研究活动。

致谢：在本文准备过程中，张克实、张俊乾、汪越胜、蒋持平、陈传尧等教授提供了部分素材和参考文献，特此致谢。

振动、冲击动力学和波动理论

杨嘉陵¹、李勇池²、陈国平³、梁伟¹、刘华¹

¹北京航空航天大学固体力学研究所；²中国科技大学；

³南京航空航天大学

一、振 动

（一）学科内容与发展趋势

振动是机械或结构系统在其平衡位置附近的往复运动，蕴涵着复杂的力学现象。振动的研究历史悠久，在 20 世纪后期线性振动理论的研究已逐渐趋于完善，并逐渐转向非线性振动，突出技术应用和学科交叉研究。进入二十一世纪以来，学科交叉研究的色彩日趋浓厚，促使振动理论和应用都有很大进展。我国学者在振动理论和方法的研究方面取得了许多新进展，缩小了与国外先进研究水平的差距。在非线性和分叉和混沌动力学分析、随机非线性振动、转子动力学、振动控制、故障诊断和健康监测、时滞系统非线性动力学、振动的智能控制、微机电系统动力学等研究方面，我国学者的研究与国外同行日趋同步，部分研究工作具有鲜明的特色。非线性随机动力学与控制的哈密顿理论体系框架的构建，为解决科学与工程中多自由度非线性随机系统的动力学与控制这一极其困难的关键问题提供了一套行之有效的新方法。振动控制从被动控制转向主动控制，线性振动控制转向非线性振动控制，形成了振动控制系统的非线性动力学理论体系，拓展了振动控制的内涵，大大提高了控制效果。在振动与控制的应用研究方面，结合航天器、大型机械设备的设计、状态监测与故障诊断等开展了许多研究工作，解决了若干重大工程问题。

（二）国家需求与重要科学问题

随着先进装备和工程系统的飞速发展，振动研究的新问题不断出现，而振动理论与计算机、测控技术相结合，与航天、航空、机械、动力、车辆、船舶、土木、石化、冶金等工程学科交叉融合，在研究方向和研究内容上发生了很大变化，研究和实验手段更加现代化。

现阶段振动研究领域的重要科学问题主要有非线性振动与控制、非线性随机振动与控制、时滞系统非线性动力学与控制、振动主动半主动控制以及智能控制技术,多场耦合非线性振动、变结构动力学与碰撞振动、大型装备的故障诊断和状态监测、健康监测、微机电系统动力学等。特别需要注重高档数控机床与基础制造装备、大型先进压水堆及高温气冷堆核电站、大型飞机、载人航天与探月工程等工程系统中存在的高维(和无限维)系统、多尺度和多场耦合的非线性振动问题,发展其非线性动力学建模、分析、设计、诊断与控制的理论和方法。

(四) 研究建议

振动是一个理论和应用并重的研究领域,线性振动的基础理论较为成熟,而非线性振动的理论、方法还在不断的发展。现代工程中振动问题的解决,需要更深层次的学科交叉。振动研究需要考虑包括机、电、磁、热和流体等多场耦合因素、各种非线性因素、边界与结合部效应、微机电系统引起的尺度效应等,因此需要发展新的非线性振动分析、实验、仿真、诊断与控制技术,要进一步加强在随机系统的非线性振动、多场耦合环境下结构非线性动力学与控制、时滞系统的非线性动力学、弹性结构/机构的冲击与碰撞振动、柔性机构的刚柔耦合非线性振动、强过载下的非线性动力学稳定性与自激振动、空间飞行器运动与非线性振动耦合、故障诊断与健康监测、微纳米系统动力学等方面的研究,以及相应的非线性振动控制理论和策略的探索。

二、冲击动力学

(一) 学科内容

冲击动力学是研究在各类冲击载荷作用下材料和结构动力特性的力学分支学科。冲击载荷主要包括爆炸载荷、碰撞载荷、强激光载荷、各类射线和粒子束载荷及其它各种原因引起的强动载荷等,这些载荷和通常的准静态和慢变载荷不同,它们一般都具有(相对的)高强度和短历时的特征。冲击动力学按其载荷施加对象的不同特征,又可大体分为材料冲击动力学和结构冲击动力学,前者主要研究各类材料本身在冲击载荷作用下的变形、损伤、失效和破坏的规律,后者主要研究各类有限尺寸和不同形态的结构在冲击载荷作用下的变形、损伤、失效和破坏的规律。与常规动力学问题相比,冲击动力学问题的复杂性和特殊性主要表现在,除了要关注一般动力学问题的惯性效应外,还要关注一些新的问题,如:载荷和材料

或结构间的相互耦合作用，热和力之间的相互耦合作用，运动边界，而特别重要的就是材料和结构中的波动效应，材料和结构响应的应变率效应，材料与结构破坏模式的多样性等等。这些复杂性和特殊性使得冲击动力学研究需要理论研究、实验研究和数值研究的结合和相互补充。冲击动力学的理论支柱主要是材料动态本构关系理论、应力波理论和结构动力学理论，以这些理论为基础人们发展了解决复杂冲击动力学问题的各种动态实验技术和动态数值方法。

（二）研究现状与发展趋势

近些年来，国内外在材料冲击动力学研究方面所取得的主要进展是：以力学守恒定律和不可逆过程热力学原理为基础，建立了材料动态本构关系的一般理论和对本构关系进行了分类，并特别对材料的应变率效应开展了系统研究，发现了不同材料的应变率硬化和软化特性；初步建立了动态损伤力学的理论，并将之与本构关系理论相结合从而建立了含损伤的材料动态本构关系理论；作为高压下材料行为的表现形式，发展了材料流体和固体高压状态方程的理论，并与冲击波理论和实验研究相结合，提出了一系列有重要理论和应用价值的材料高压状态方程形式；发展了时率无关和时率相关材料中的应力波理论，特别是复合应力波的理论及其计算方法；发现了不少材料中存在着冲击相变的现象并发展了冲击相变的理论和相变波的理论；在材料动态失效和破坏的研究方面，人们最为广泛关注并取得重要进展的问题有二，其一是应力波引起的层裂效应研究，提出了多种动态断裂准则以反映材料动态破坏的应变率效应，现在已经将之统一到材料动态损伤演化的理论体系中；其二是材料的热塑性失稳和热粘塑性失稳现象（俗称绝热剪切）的研究，分别发展了计及和不计及应变率效应的、计及和不计及热传导效应的材料失稳准则；已发展了膨胀环、分离式霍普金森杆、单杆、轻气炮、弹道靶等各种动态实验技术，并在测量可靠性和精度方面取得长足进步；已发展了特征线、有限差分、有限元、离散元、光滑粒子等动态数值方法和软件，可以实现对各种复杂冲击问题的数值模拟。

在结构冲击动力学方面，近些年来人们最为关注并取得的重要进展包括：在梁、板、壳结构刚塑性动力学理论基础发展了计及结构弹性变形效应、剪切效应、转动惯性效应、应变率效应等二级效应的结构动态响应理论；提出和发展了各种结构的拉伸失效破坏、剪切失效破坏以及联合失效破坏的动态失效破坏准则；发展了一系列结构冲击屈曲的分析计算方法，并提出了一些新的动态屈曲准则；对变形体之间的高速碰撞问题以及相关的冲击能量吸

收机理、结构耐撞性和安全评估问题开展了广泛的研究，并取得了一些规律性结果；在弹体和射流对目标的侵彻、毁伤规律和机理研究方面，已超越了早期经验公式的总结，发展了一系列新的工程分析方法、弹道实验方法和数值计算方法，“侵彻力学”和“终点毁伤力学”已具雏形。

（三）重要科学问题

1. 岩石、混凝土、纤维编织的复合材料、功能梯度材料等非均匀和各向异性材料的动态本构和冲击损伤破坏规律的研究。这一科学问题的研究对材料变形损伤破坏的非线性效应、应变率效应、非均匀和各向异性效应的耦合表征提出了新的挑战。

2. 非晶材料、纳米材料、形状记忆材料、多胞材料等高新技术材料动态本构和冲击损伤破坏规律的研究。这一科学问题的解决对材料冲击行为研究的宏微观结合提出了新的挑战。

3. 复杂联接的多层复杂结构的冲击损伤破坏和吸能机理研究。这一科学问题的研究对结构冲击响应的总体效应和局部效应的科学描述提出了新的挑战。

4. 发展宏微观观测相结合，机械、电磁、光学测量互补的冲击动力学新实验方法和精密测试系统。这些方面的进展会克服现有测试方法的缺陷，从而大大提高测量结果的稳定性和精度。

5. 将分子动力学计算方法、有限元、有限差分计算方法和离散元、光滑粒子法等无网格计算方法相结合，发展多尺度的耦合型动态数值方法和计算软件。这一方面的进展将大大提高计算的精度和效率，为模拟高速撞击和侵彻等复杂问题奠定基础。

（四）建议

1. 冲击动力学研究和国防科研及许多高新技术研究有着紧密的联系，国家有关部门和企业等应加强协调，结合国防科研和新武器研制中的重大和急迫问题，建立多种形式的联合基金和专项基金，支持冲击动力学的基础和应用基础研究，加快科研成果向实际应用的转化速度。

2. 冲击动力学和材料学科有着紧密的联系，有关方面应努力建立冲击动力学/材料学科

联合基金，实现新材料制备单位和有关高校及科研院所的优势互补，加速新材料研制和改性的进程。

3. 对全国主要冲击动力学研究单位的实验设施建设进行规划，逐步做到各单位既具有主要基本设备，又实现各单位优势实验系列的互补。

三、波动理论

（一）学科内容

波动理论是以奇异面为基础研究波在连续介质中传播的理论。根据材料本构关系与应变率是否相关，可以将波动理论分为应变率无关理论和应变率相关理论。根据应力应变关系，又可以分为线弹性波、非线性弹性波、塑性波、粘弹性波、粘弹塑性波理论等。

（二）研究现状

尽管波动理论体系已经较为成熟，但近年来，随着新技术的需求和研究手段的不断提高，特别是新材料、耦合场、微型化等一些力学热点问题的蓬勃发展，波动研究领域也取得了许多进展，主要集中在以下几个方面：

1. 随着各应用领域低能耗、高安全性的要求，与之密切相关的波的衍射的研究近年来比较多，在利用波函数展开法、奇异积分方程、Green 函数、复变函数等理论方法研究周期分布矩形缺陷、球形粒子和椭圆夹杂、多个共线裂纹、椭圆孔边裂纹、夹杂内裂纹、币形界面裂纹、任意形状界面孔、部分脱胶衬砌的圆孔、浅埋圆形孔洞附近的凸起地形的平面波散射、非均匀材料中平面应变裂纹的波的散射和对波的动力响应等问题的研究方面取得了进展。

2. 近年来多孔介质成为固体力学研究的热点，给波动理论提供了新的增长空间。取得的进展主要有：基于 Biot 各向异性多孔介质理论、混合物理论等分析了无限大中空多孔材料圆柱壳中的应力波、横观各向同性含液多孔介质中 Rayleigh 波、Love 波等的传播特性、波在双孔隙和单孔隙介质界面上的反射透射。对存在气泡的液态多孔材料中的 Frenkel - Biot 波的相速度及其影响参数等问题研究也取得了进展。在多孔介质表面的波反射问题、多孔介

质的粘性和固体颗粒的可压缩性、饱和度对频散特性的影响等方面取得了一批成果。

3. 电磁机敏材料的耦合场、材料梯度效应等复杂情况给波动理论提出了新问题。近年来针对完好粘接界面、弱连接界面、接触界面中压电介质、电磁弹性介质、功能梯度材料中的波进行了较多理论研究。对梯度厚壳在轴对称动力载荷下的波动特性、失谐压电周期结构中波动的局部化、积分方程法和传递矩阵法分析应力波对梯度材料中的裂纹作用、三维多层各向异性介质在一般动载荷作用的动态特性等方面得到了一些研究成果。

4. 粘弹性介质和热力耦合作用下的波动理论在分析方法上近年也有一些发展。例如针对粘弹性基上的弯曲波含随机参数的四阶微分方程的理论解问题和精确积分法研究了粘弹性分层介质中非非常随机波的问题。在微极粘弹性介质波反射、半无限体的热弹性波等问题，以及热弹性变厚度层中的平面波反射和折射等非线性问题研究方面取得了进展。

（三）重要科学问题

1. 波与缺陷的相互作用及对缺陷的影响问题。随着工业领域，特别是航空航天领域中设计人员对动强度需求的明确化，缺陷附近波动引起的材料损伤破坏及波穿过不同类型、不同损伤程度时界面模型和控制方程的建立、方程的有效求解方法、波的散射、传播特性变化的机理成为一个紧迫的问题。

2. 随着器件设计中的多学科综合，在已有力学和电路控制系统研究的基础上，分析层合梯度材料多耦合场下的波传播与相关电子电路的相互联结关系成为智能结构工业实现中的一个需要解决的问题。

3. 复合材料、多孔材料、点阵结构等新材料结构的出现和应用，引起的涉及界面非完整性、材料非均匀性、物理和几何非线性、流固耦合效应等影响下的波动问题的理论和实验研究新的挑战。

（四）建议

波动理论研究涉及国防、传感、生物医学等很多领域，建议国家有关部门建立专项基金支持波动理论的基础和应用基础研究。

计算力学

程耿东、张洪武

大连理工大学工程力学系，工业装备结构分析国家重点实验室

引言

计算力学是用计算机方法求解力学问题的学科。计算力学起源于 50 年代中期诞生的有限元法，并迅速推广至结构、岩土、动力学、稳定性等工程问题的求解，其基础数学理论和求解问题的算法也不断得到完善。计算力学的成就已经使得科学界公认：理论、实验和计算成为现代科学的三大支撑；计算力学产生了 CAE 产业并成为新领域“计算科学”的核心。在 2005 年美国总统信息技术顾问委员会给总统的报告《计算科学：确保美国竞争力》中指出，“计算科学采用先进的计算能力理解和求解复杂问题，已经成为美国科技领导地位、经济竞争力和国家安全的关键，计算科学是 21 世纪最重要的技术领域之一”。21 世纪，人们关心以量子、分子和生物力学为基础的物理和生物系统的模型，关心巨尺度的自然现象（海啸、雪崩），计算力学获得新的发展机遇和空间。

一、新世纪初的计算力学

国际计算力学协会（IACM）于 1986 年成立并组织世界计算力学大会（WCCM），自 2002 年开始，从四年一次改为二年一次，参与队伍日益壮大。结合近几届 WCCM 的报告和我国学者的工作，计算力学当前研究动态和方向可概括成以下方面。

（一）离散化方法

将被研究的客体离散进行计算是主导计算力学发展的主线。有限元方法可以适应复杂的区域形状和边界条件，至今在计算力学中最具影响力的也仍然是有限元法。但是，将结构划分成高质量的网格并不容易，网格局部加密、疏化和优化始终受到注意，三维问题的六面体网格全自动剖分仍未满意地解决；在给定的网格下，构造高性能有限元，特别是能够高精度高效率求解板壳几何物理非线性问题的精化杂交元，相应单元的收敛性证明始终受到关注，包括分片试验的新发展；对于网格不均匀的问题的误差估计和自适应有限元法。1994

年 Belytschko “无单元迦辽金法”一文掀起了无网格法研究热潮，该方法涵盖了相当广泛的一类方法，包括有限点法、自然单元法、单元剖分法等十多种不同名称的方法；国内学者对无网格法也进行了深入研究。Hughes 等提出的等几何法也是值得关注的方法。

（二）针对跨尺度、多尺度问题的计算方法

计算机模拟和传统方法相比的优点之一是在非常大的时间和空间尺度范围内模拟复杂的物理现象。跨尺度问题计算的困难是如何实现不同尺度间的联结。

跨尺度工作的第一类是将不同计算方法分别用于适合的区域，将不同空间尺度和不同层次的模型耦合，例如，我国学者提出的连续介质模型和离散原子模型交叠层模型，可以称为并行多尺度问题。多尺度动力学问题的研究则集中在消除波在界面的反射研究。第二类的特点是信息在不同尺度间相互传递：串行多尺度问题。其中，很多情况下不同尺度的物理规律相同。我国学者利用多尺度均匀化、渐进分析等方法，建立多尺度关联计算模型研究复相材料；采用数学均匀化、数值均匀化方法开展材料和结构的协同分析和优化；开展了非均质材料非线性以及同时考虑空间与时间两尺度的非均质材料均匀化方法研究等。

在时间多尺度研究方面，采用快慢变量分离方法，是解决分子动力学模拟时间尺度过小的方案之一，其中一种较好的方法是可逆参考系演化子算法（rRESPA）。我国学者将 rRESPA 用于大规模晶界演化的数值模拟；提出了光滑分子动力学方法。

（三）高性能算法的发展

构造高性能算法，提高求解速度和精度一直是计算力学研究的重点，我国学者也有诸多贡献。近年来提出了精细积分法，对于定常齐次动力学系统，其精度与计算机的精度相同。我国学者发展了高效线性方程组求解器；适合于在固定网格上表示边界的移动、融合、分裂，结构优化、具有自由界面的流动等问题的水平集方法等一直受到关注；构造分析和优化设计的元模型的减缩基方法、响应曲面法等，神经网络、遗传算法、蚁群算法等软计算方法也在不断提高计算性能。虚拟激励法将随机振动计算效率成数量级地提高，使随机振动理论得以在工程中应用。

（四）在科学和工程问题中的应用

计算力学的生命力在于应用，这也向计算力学提出了大量研究课题，如结构优化、反问题、接触问题等，极大地推动了计算力学的发展。

由于企业竞争加剧，能源资源短缺，近年结构优化得到更多重视。拓扑优化是近二十年的研究热点。相继出现均匀化方法、人工密度法、进化法、水平集方法等；当前关心的问题包括考虑除了柔度和振动频率外的其它目标和约束；三维非线性问题和工程应用；多学科多目标耦合优化；结构和材料的一体化优化设计等。建立标准题库对新方法进行测试受到关心；我国学者在结构拓扑优化、奇异最优解、结构优化方法与应用等方面，都在国际同行中有重要影响。

计算接触力学涉及可移动边界、材料与几何非线性、多场耦合、接触本构关系、解的唯一性问题等。多尺度下接触问题分析也已逐渐成为计算接触力学发展的重要方向之一。计算方法可分为迭代法和数学规划法。将规划法和迭代相结合的方法，在机车、柴油机与摩擦搅拌焊接工艺数值模拟等方面得到应用。关于多孔多相材料的设计、失效破坏、热-流动-力学耦合以及多物理-化学耦合等问题的机理、模型与数值计算方法的研究成为近年来研究的热点问题之一。近年来我们在多相多孔介质应变局部化分析基本理论与算法方面获得了一系列研究成果。

设备和其他支撑技术的进步，包括高性能平行计算机、网络、各种断层扫描成像和可视化设备、现场测试和实验室试验技术，为计算力学发展提供新的空间；由此产生的重要研究领域包括高性能平行计算，网格计算，可视化技术，虚拟设计，软计算方法，软组织力学。其中，虚拟设计是减少研制新产品成本，缩短研制周期，提高企业竞争力的重要手段。

（五）关于 CAE 软件

计算力学建立的模型和方法必须在软件中实现，计算力学通过软件实现其价值。在计算力学基础上发展出 CAE 产业。调查表明，通过引进 CAE 技术，重型装备优化设计通常可以节省材料 10% 以上；西方发达国家的 CAE 年产值达到数十亿美元，并被认为是国家的核心技术，其高端对我国严格“禁运”。虽然已经有一批商品化 CAE 软件，但仍然不乏新出现或是功能更为优异，或是针对特定类型的工程或产品或工艺过程所开发的 CAE 软件。

（六）验证和确认

对于计算结果可靠性的关心，推动了确认(validation)和验证(verification)的发展。确认指是否求解了是否符合原来力学问题的方程，为了确认，应该将计算结果和试验、现场观测相比较，但是，往往计算所能考虑的参数范围比试验和观测的范围更一般。验证是指是否正确地求解方程和模型；为了验证，要建立一批标准考题，减少编程错误，优化算法和程序的性能。由于计算的原始数据及数学模型等都可能有不稳定性，需要研究大规模计算和不稳定性理论的结合，对模拟计算结果的不确定性进行量化。

二、需要重视的问题

(一) 自主知识产权的 CAE 软件研发

自上个世纪 70 年代以来，我国自主研发的许多 CAE 软件在核心算法和若干功能上有特色，反映了我国学者的研究成果，并充分考虑了我国计算机硬件的实际条件、我国的规范和国情，受到用户的欢迎。它们解决了一大批国家经济建设提出的问题，其研发和应用过程培养了一大批从事 CAE 的人才；这些软件的存在也打破了西方国家对我们的壁垒，迫使国外产品大幅度地降价，直接或间接地对国家 GDP 做出了不可低估的贡献。

90 年代以来，大批国外 CAE 软件涌入中国市场，对我国自主开发的 CAE 软件打击很大。一段时间，支持基础研究的部门认为，CAE 软件开发缺乏基础科学问题，支持科技攻关和高新技术发展的部门认为，CAE 软件开发要到市场上去找经费。自主开发 CAE 软件处境极端困难。由于 CAE 的重要性和高科技含量的特点，即使在市场经济非常成熟的西方国家，CAE 软件的发展都得到政府相关部门的支持。

在面临诸多困难的情况下，目前国内仍然“幸存”下来一批致力于 CAE 软件的队伍及具有自主知识产权的软件。尽管我们拥有自主知识产权的 CAE 软件，也在重要工程中得到成功应用，但我国 CAE 软件与国外同类产品竞争中暂时处于弱势，西方国家的大型 CAE 软件目前几乎占领了中国市场。但是，作为一个十三亿人口的社会主义大国，我们还要发展有自主知识产权的 CAE 软件。这是因为，首先，我们能够得到的 CAE 软件产品均为商用版本，很多敏感模块、功能是对中国禁运的，国家安全、国防建设需要国产 CAE 软件。其二，针对特殊问题，CAE 软件的定制与二次开发是必不可少的，而没有源代码的二次开发，注定是低效率和受制于人的。其三，建设一个有自主知识产权的 CAE 软件平台，可以集成我们的科研成果。其四，开发研制 CAE 软件也培养了 CAE 人才，事实上，现在企业技术进步应用

CAE 面临的大问题是缺乏人才，这是和我们缺乏从事 CAE 研究开发的单位有关。我国自主开发 CAE 软件的历史和现状证明我们完全可能开发有自主知识产权的 CAE 软件。

为此我们建议：应该确定合适的发展战略，制定必要的扶持政策支持 CAE 软件的研究和开发。应该成立若干 CAE 理论研究、软件开发的国家级及省部级中心，建设集成计算力学新方法、理论的软件平台，承担工程和科学计算问题的咨询。应该通过政府采购、推广新技术等措施，为有自主知识产权的 CAE 软件开拓生存空间。政府有关部门应该给与 CAE 软件开发持续的专项资金支持；CAE 软件开发的评审标准应该不同于现有的其它项目。

（二）跨学科人才的培养

工程和科学界日益清楚地认识到计算机模拟是解决我们面临的广泛的科学和工程问题不可或缺的工具。基于模拟的工程科学受到科学界的广泛重视；采用计算模拟又可能实现虚拟制造，模拟跨尺度的物理现象。为了适应未来的基于模拟的工程科学对人才的需求，要求我们培养一批具备相当深度的数学、力学及交叉学科知识的人才。从这个意义上来看，我们的学生中的一部分应该增加跨学科的知识。

（三）计算力学呼吁正确的评价标准

理论、计算和实验已经成为认识自然、改造自然，解决科学和工程问题的三大支柱。但过于频繁的各种评审、不合适的评价标准影响了学科和人才的健康发展，不仅计算力学，力学学科也面临类似的困境。存在的一种倾向是对科学研究进行简单的划分，重视认识自然现象的本质，重视直接产生经济效益的活动，轻视改造自然的方法、技术、工具及支撑它们的理论；另一种倾向是忽视学者个人和学科间必要的分工，评价标准求全责备，简单划一。

致谢： 力学界很多同志为本报告提供了材料，在此一并致谢。

实验固体力学

伍小平

中国科学技术大学力学系

引言

实验固体力学是一门力学与新技术（包括声学、光学、电子学，图像分析，计算机等）相交叉的与工程和生产实践相结合的技术性学科。它是根据人类认识自然现象和解决工程问题的需要而发展起来的。几十年来，我国的实验力学工作者为解决我国国民经济建设和国防建设中的技术难题，发挥了不可缺少的重要作用。同时，也为力学学科发展及其相关学科的发展做出了有益的贡献。近十年来，信息技术、微/纳米技术、生物技术等高科技发展迅速，为实验力学学科的发展带来了新技术和机遇，同时使实验力学工作者遇到了新的挑战。我国实验力学工作者在研究工作中及时捕捉具有发展潜力的高新技术，不断开拓新领域，发展了许多新的实验力学方法和技术。与此同时，进一步完善已有技术并拓展它们的应用范围。总的来说，在实验力学的理论、方法、技术及应用等多方面都取得了可喜的成果。主要体现在以下几个方面：

一、多场、多尺度的材料和结构力学行为实验研究成果：

1. 在国际上首先发现了 TbDyFe 合金 (Terfenol-D) 多晶体的磁场下力磁耦合变形的“伪弹性”现象，揭示了高应力高磁场状态下超磁致伸缩材料 Terfenol-D 的力磁耦合行为。
2. 研究了单晶硅基底和纯镍微梁在水介质环境下的毛细粘附行为，建立了以粘附长度、介质体积分数为基本未知量的最小能量泛函，导出了毛细粘附力表达式。
3. 研究了不同温度的淬火热处理条件下，不同溶质原子浓度的加载锯齿曲线和空间带演化和传播，PLC 效应的混沌分叉和临界自组织效应等屈服机理。
4. MEMS 方面，在麦克风波纹膜片中加入优化预应力，增量理论分析表明提高了声学灵敏度。
5. 测量薄膜在腐蚀过渡区与表面龟裂区的残余应力及其分布和影响因素，探讨了残余

应力形成机理，提出了描述这一工艺过程的力学模型。

6. 预测了颗粒集合体内部的微损伤积累和裂纹扩展方向，颗粒的接触奇异性和体内动态接触力的传播规律。

建议今后加强微尺度实验力学测量数据的表征模型与方法、生命与仿生中的表征方法、热—电—磁—力耦合场加载与量测表征技术、声弹性研究。

二、微/纳米材料、微电子技术及信息工程中力学测试新方法和新技术：

1. 将 AFM、SEM、远距显微镜和纳米压痕仪等仪器，综合高速数字图像采集、图象相关处理和模态分析等全场分析技术，实现以高灵敏度、高分辨率对微结构的静动态力学特性研究。

2. 针对电子散斑干涉和合成孔径雷达干涉两个技术领域中的干涉相位条纹图带高强度散斑的难点，提出等值线相关干涉法这一全新概念的干涉处理方法，给出无干涉斑噪声、无相位模糊效应的干涉相位条纹图，解决高强度散斑噪声劣化相位场的质量和精度的难点。

3. 将拉曼光谱和 X 衍射结合，用于 MEMS 结构中的微尺度器件工艺残余应力与毛细力的无损实时检测。

4. 基于时间维散斑序列，提出了扫描相位、序列强度扫描、脉冲计数以及匹配相关等五种时间序列散斑分析方法，实现了检测对象动态大变形的定量检测。

5. 建立了粗糙度与散斑场平均光强和自相关宽度之间的关系，成功的应用于 024-T3 材料微区域在温度、应力及环境介质作用下材料的初期腐蚀机理的研究。

6. 提出应用聚焦离子束制作高频光栅的新工艺，成功在金属和硅器件上制作出 5000 线/毫米-7142 线/毫米的光栅，解决了在微器件上和多孔材料表面制作高频光栅的关键技术问题。

7. 提出了适用于微米/纳米尺度区域变形测量的聚焦离子束云纹方法、扫描隧道显微镜扫描云纹技术，使位移测量灵敏度提高到亚纳米量级。

8. 基于 SR-CT,提出了重建的优化新算法和改善不完全投影数据重建图像质量的方法，提出了数字图像三维相关方法，研究了 X 射线衍射增强成像方法，获得材料内部的损伤演化。

9. 提出一种新的实时相移数字云纹检测方法，使最小缺陷尺寸的检测量级能达到0.5mm。

应加强微小尺度下力、声、光、电多参量量测技术研究；各种特殊和极端环境的实验技术和方法；图像信息的高精度、自动化提取方法；大型结构和复杂系统的实用检测方法与技术研究；生命与仿生中的测量技术。

三、力学测试系统和设备开发中的重要进展：

1. 基于 Linnik 显微光学系统构形，建立起微尺度对象动静态全场位移与变形检测系统，并结合镜面干涉、ESPI、相移 ESPI 和 TSPI 多种计量模式，完成了 Cu 和 NiFe 微桥的变形检测。目前该系统可检测的微尺度对象的特征尺度在数微米量级。

2. 基于高空间分辨原子力显微镜和电子束扫描显微镜的扫描环境，研制了两套低维薄膜单轴拉伸检测装置，可进行微米到亚微米厚度薄膜的单向单轴拉伸变形检测。

3. 研制成功我国首台同时测量二维面内位移场的双波长电子散斑干涉仪。该仪器采用泵浦固体绿激光器和氦氛红激光器为光源，并结合新型滤色和分光系统实现加载一次就同时得到面内位移场。

4. 在空间对水溶液晶体生长进行原位实时观察的装置获得中国国家发明专利。

5. 提出把液晶体作相移器引入错位散斑系统。

6. 针对军用战机的座舱盖和风挡玻璃等透明件对工艺残余应力表征的需求，提出在线实时检测其在制造和安装过程中出现的缺陷和残余应力的方法并研制相关测试系统。

7. 在国内首次制造出高温（550-600℃）高压（70-100MPa）反应釜，并实现零泄露密封。目前正在投入使用，已创造出可观的经济效益，并为油气成藏机理研究做出重大贡献。

8. 研制出气道/发动机动态压力畸变高速数据采集及实时存储处理系统，可用于不间断数据流，将大型现场的测试分析系统的防干扰、提高精度和稳定性技术提高到 0.3 至 0.5% 的一个崭新水平。

9. 研制出三维云纹干涉仪，该设备采用紧凑式光学干涉系统，可以得到物体表面的三维位移场，位移测量灵敏度达到波长量级。该设备已广泛应用在复合材料、电子封装、铁电材料的全场变形分析，并且获得国家发明专利。

仪器的研制很重要，应着重集成创新，使实验室的成果得到较广泛的工程应用。针对科学前沿，开发研制低维材料多场耦合力学测试平台。

四、与经济发展和国家安全有关的实验力学研究成果：

1. 发明和研制了用光测手段测量靶场基地目标运动三维姿态的系列方法和装备，已经总装、海、空军靶场基地推广使用。

2. 发明姿态像机接力的用折线光路直线测量的新概念方法，解决舰船变形影响多种测量精度的难题。

3. 在对新型的光纤光栅传感进行分析的基础上，在国内率先用光纤光栅传感器对桥梁内部的应变进行长期的健康监测，成功地监测了从预应力梁的浇注、混凝土凝固、预应力松张、预制梁吊装、成桥车载试验和营运等全过程。

4. 采用缩比模型实验结合数值分析的方法，研究了高速公路护栏各部件及其系统的基本变形和能量吸收特性，进行结构优化设计。提出的增加防阻块厚度等优化方案简单可行，可望取得显著经济效益。

5. 通过大量实验和机理分析，较全面地了解了用碳纤维薄板加固的混凝土构件的强度、疲劳以及界面损伤等行为。碳纤维薄板加固的方法施工简单，补强快速，已成功地在数十座桥梁上进行了应用，节省了费用和时间，取得了重大的经济和社会效益。

6. 用实验力学和力学分析手段，做了大跨度桥梁的施工监控和长期健康监测一体化，并在跨度超过 140m，主桥长 800 多米的大桥上进行了工程实践。

7. 针对舰船用柴油机及相关材料研究的迫切需要，成功研制了双波长电子散斑干涉仪，同时获得的 u 场和 v 场的数字化信息成为评价柴油机及相关材料强度可靠性的重要依据。这一新成果还可用于动态、瞬态等工程问题的应用研究上。

8. 开展了 MEMS 工艺相关的结构力学性能预测和在位监测研究，提出了高敏感度的等离子过刻监测结构，通过侧向吸合电压正确预测不同刻蚀程度下微梁的弯曲刚度和等效模量。

9. 通过试验，验证卫星结构形式设计方案的科学性与合理性，包括：卫星结构在静载荷作用下的强度和刚度检测；整星及各舱段结构连接的可靠性。根据试验数据，估计整星结构的最大承载能力和结构的设计余量，进而为改进整星的结构设计提供了试验依据。

应加强结构的安全监视、灾难检测与寿命预测等工程上迫切关注的测试。

五、实验力学与其他学科交叉的重要进展：

1. 提出了光学读出基于微梁传感的大分子（蛋白质）折叠构相研究，并在实验上，获得了大分子以及蛋白质在溶液温度、PH 值等环境变化过程中的分子折叠信息；开展微梁传感抗原抗体病毒检测，并取得了高灵敏度无标记的检测结果。

2. 基于 MEMS 制作技术的光学读出非制冷红外成像研究，实现了室温物体红外成像，这是在国内首次实现非致冷技术的室温物体红外成像，温度分辨率最新达到优于 200mK，目前处于国际先进水平。

3. 基于偶对力学的微粒离散介质中体波传播规律研究，不仅发展了在三维介质中波传播频散分析的理论，而且其包含颗粒尺度和材料参数的分析方法可以应用于特异细胞的超声波检测中。

4. 结合微尺度光学干涉技术和探针加载技术，提出了基于全场光学实时检测的光学探针微尺度检测技术以及基于图像模式的探针检测平台。目前该研究已被应用于 IC 芯片、生物植物材料及细胞结构等的力学性能研究。所提供的微载荷可从数百毫牛到数纳牛，位移分辨在数十纳米量级（光学探针）和亚纳米量级（扫描平台）。

5. 利用数字标记点相关法实现纯力矩作用下椎体运动范围的在线测量，针对微区微变形测量率先提出两步数字图像相关法，大大地提高了微区内应变测量精度。相关法还应用在生物体的三维形状恢复，各种关节形状的恢复等。

实验学科和其它学科的交叉和融合，发展面向领域和对象的专门实验技术和实验方法。如材料、生物、微电子等学科都是基于实验力学可以发展出交叉和专门的实验技术的领域，从而使实验力学有更宽的应用和研究领域，有明确的研究对象与背景。

致谢： 本文编写过程中得到了实验力学专业委员会的大力帮助与支持。在此表示感谢。

制造工艺力学

申长雨

郑州大学橡塑模具国家工程研究中心

引言

制造工艺是指将原材料加工并装配成最终产品的各种方法，它使产品获得必要的形状和性能。制造工艺中的许多环节都有力学问题存在，这些力学问题与其他工程领域的力学问题不同，因加工对象、加工方法、加工工艺和手段的不同而变化。因此，制造工艺力学不是离开工艺讲力学，也不是离开力学讲工艺，而是力求从力学理论与制造工艺实践相结合的角度去说明制造中的力学问题，基于具体的制造工艺过程，阐述其中的力学表现，揭示其力学机理，通过深入的力学分析，建立工艺过程力学模型，构造其有效解法，开发模拟仿真软件，评估预测工艺的合理性，使制造工艺由技艺走向科学，由“经验”走向“定量分析”，为工艺的改进、完善、创新提供相应的理论支持和技术指导。

由于制造工艺的多样性和复杂性，使得制造工艺力学以多姿多彩的形式存在。如在激光加工、金属连铸连轧、复合材料成型及多层微结构的封装等工艺中，需要考虑热、光、电、相变、固-流耦合变形等多种效应的变化和耦合，而对于将带来全球技术革命的微电子-微机械-微力学工程中微结构、微器件的封装和制作来说，则需要研究加工过程中及制品的细观力学及智能行为，进行可靠性分析，才能设计出满意的制造工艺和技术。

一、研究现状

铸造及锻造宏观模拟在工程应用中已是一项十分成熟的技术，已有很多商品化软件，并在生产中取得显著的经济及社会效益。目前，模拟仿真技术已能用在压力铸造、熔模铸造等精确成形加工工艺中，而焊接过程的模拟仿真研究也取得了可喜的进展。铸件凝固过程的微观组织模拟以晶粒尺度从凝固热力学与结晶动力学两方面研究材料的组织和性能。20世纪90年代铸造微观模拟开始由试验研究向实际应用发展，国内的研究虽处于起步阶段，但在用相场法研究铝合金枝晶生长、用 Cellular Automaton 法研究铝合金组织演变和汽车球墨铸铁件微观组织与性能预测等方面均已取得重要进展。

冲压成形的力学过程及成形影响因素非常复杂，是一个集几何非线性、材料非线性、接触和摩擦于一体的强非线性问题。冲压工艺力学研究的主要任务就是要解决好冲压过程中板料不同部位之间材料的协调变形问题，既要避免局部区域过分变薄甚至拉裂，又要避免起皱或在零件上留下滑移线，还要将零件的回弹量控制在允许的范围内。近十年来，板材成型的有限元数值模拟技术突飞猛进，研究的广度和深度都大大提高了。目前，板料冲压过程的计算机分析与仿真技术（非线性有限元分析技术）已能在工程实际中帮助解决传统方法难以解决的模具设计和冲压工艺设计难题，如计算金属的流动、应力应变、板厚、模具受力、残余应力等，预测可能的缺陷及失效形式，如起皱、破裂、回弹等。国内几所大学近几年来对汽车覆盖件冲压过程中的工艺力学问题进行了系统而深入的研究，取得了许多可喜的成果。

在塑料加工制造方面，研究领域涉及固体输送、熔融、熔体输送、流动、结晶、固化、分子取向、纤维取向、翘曲变形等。塑料注射成型宏观模拟技术应用已十分广泛，从上世纪 60 年代的一维流动和冷却分析到 70 年代的二维流动和冷却分析再到 90 年代的准三维流动和冷却分析，其应用范围已扩展到保压分析、纤维分子取向和翘曲预测等领域并且成效显著。流行的注塑成型模拟软件有 Moldflow 和 Moldex3D。目前研究的重点是粘弹性、复杂三维流动模拟；分子取向、结晶、残余应力的分析和预测。国内对塑料注射成型模拟技术也开展了系统而深入的研究，取得了可喜的成果，开发了注塑成型分析软件 Z-MOLD 以及塑料注射成型仿真系统 HSCAE。

铸造、锻压、焊接、注塑等成型制造过程的工艺力学问题研究已较深入，机械加工、特种加工及装配等制造过程的工艺力学问题研究尚需进一步深入。基于制造工艺力学的模拟仿真技术正在向虚拟制造成形的方向发展，成为分散网络化制造、数字化制造及制造全球化的技术基础。

二、重要科学问题

随着传统加工过程宏观数值模拟的日益完善，发展微观数值模拟及组织性能质量预测技术就显得十分必要；为满足信息技术、生物技术以及微机电系统的制造生产需要出现的微制造工艺技术，为满足新材料的制造加工需要出现的高能束化制造技术，将大大扩展人们制造加工产品的能力。上述技术涉及的基础理论和科学问题多而且复杂，有待深入研究和解决，主要的科学问题有：

（一）材料的微结构演化

成型加工不仅使材料获得一定形状、尺寸，而且赋予材料最终的组织与性能。研究材料微结构在制造与加工过程的演化，包括形貌演化、相结构演化、缺陷结构演化等，其目标是实现从制造加工到材料微结构到材料力学行为，再反馈到制造加工的闭环过程，预测并优化最终的组织与性能。在理论上需发展可兼顾能量传递和微结构演化过程的理论框架，建立宏、细、微观耦合的多尺度力学模型；在计算手段上，需发展不同尺度的空间离散技术、不同尺度区域的耦合技术和不同时间尺度下的时间加速计算技术。

（二）微制造工艺力学

微制造过程不但涉及到物质在细微观层次物质运动规律的研究，而且涉及到在这一尺度范围内机械运动与其他物质运动形态，包括热、光、电等的相互联系与转化规律的研究。由于尺寸微小，其流动特性和材料与结构的力学行为和物理性质与宏观法则有明显不同：当它受不同环境和不同加工过程的影响时，力学参数也会有明显变化，表现出尺度效应、表面效应、隧道效应都远远超出宏观力学和物理规律范畴。迄今为止，宏观力学中的物理规律不能完全解释和指导微制造工艺、封装和应用中提出的问题，尤其是对其中很多重要问题还缺少有效的实验研究方法，迫切需要开展这方面的工作。

（三）非传统制造工艺力学

非传统制造工艺是指通过引入激光、电子束、离子束、等离子体、微波、超声波、电磁、高压水束流等新能源或能源载体，形成的不同于传统的特种制造工艺，如激光加工、沉积成型等。制造环境从简单的环境拓广为伴随着光、电磁、声、热与化学作用的环境，制造过程从平衡态过程变为非平衡态过程。非传统制造工艺力学具有多场耦合和远离平衡态的特点，一般的工艺开发要难得多，其原因在于，非平衡态工艺的效果强烈地依赖于非平衡态动力学过程，工艺窗口狭窄，单凭工艺试凑，难以成功。随着非传统制造工艺应用的日益广泛，多场耦合和非平衡态动力学过程的研究就显得十分必要。

三、国家需求

制造业是国民经济的物质基础和工业化的产业主体，高度发达的装备制造业是实现工

业化的必备条件，也是一个国家综合竞争力的重要标志。利用基于制造工艺力学的制造工艺过程模拟仿真能将工艺定量优化，提高生产效率，实现节材、节能，是未来制造企业要掌握的十大关键技术之一。中国是一个制造大国，仅次于美、日、德，居世界第4位，但产品自主创新开发能力较差。提高集成能力和创新能力，开发和应用先进制造技术、工艺和装备，改造传统制造业，是提升我国制造业竞争力的关键。力学与材料科学、微机电系统和先进制造工艺这三个重要工程领域的结合将为制造工艺力学带来新的发展机遇，并引导具有重大工程意义的技术突破。

四、研究建议

开展材料微结构演化模拟研究，发展多尺度建模方法和算法；开展微制造工艺力学研究，发展微尺度力学；开展非传统制造工艺力学研究，发展多场耦合作用的非平衡态动力学理论；在此基础上开发高性能、高保真、高效率、多场耦合及多尺度的模拟仿真技术应是制造工艺力学研究的前沿和热点问题。

五、结论

由于制造工艺力学强烈的工程背景，科学问题常常隐匿于材料、机械、工艺之中，难于发现提炼，同时对力学、材料的基础研究有强的依赖性；制造工艺力学的定位至关重要。问题提得过于抽象，偏于科学问题，容易脱离工程；问题过于具体，又混同于一般的制造工艺，力学对工程的指导意义无法体现。另外，强烈的工程应用特点，使得任何基础研究上的发现和突破，都容易使制造工艺力学产生“多米诺骨牌”效应，大幅提升制造业的竞争力。

制造工艺力学是一门应用性科学，对力学基础和工程背景要求较高，对国家、社会的政治经济意义重大，尤其在“制造大国”到“制造强国”转变、节能环保、产业结构调整方面有积极意义。是国家应该投入支持，提供学科深度融合、交叉的平台，这样制造工艺力学才能在大制造系统下发挥作用，为提升制造业的竞争力提供强劲的动力。

流体力学学科发展专题报告

英文摘要

Although it is over 270 years since Bernoulli published his famous textbook “HYDRODYNAMICA” in 1738, fluid mechanics remains an active and important branch of sciences. During the past few decades, research in fluid mechanics has been greatly stimulated by swift advances in analysis and experiment apparatus and a vast enhancement in available computational power. Modern examples include solitons, chaotic behaviour in Rayleigh-Benard convection and non-Newtonian effects in polymer solutions.

In the last four years, remarkable achievements were made by domestic scholars in micro-gravity flows, separation flows, vortex motions, non-equilibrium flow phenomena, turbulent flows, vortex flows induced by fishes and birds, and hydrodynamic instability. We have developed various high-accuracy and high-resolution CFD algorithms, such as the NND scheme, new WENO scheme, nonlinear compact scheme, super-compact scheme, and compact scheme based on group velocity control. We also developed the high-order project algorithm for incompressible NS equations, and high-accuracy and high-resolution impact FD- Fourier Spectral Method, and Spectral- Spectral element method for 3D incompressible viscous flows around a cylinder. Internationally influential contributions include the algorithms for microflows, the uniform algorithms for continuum- rarefied flow, and the theory of multi-block and parallel computing methods. In the field of turbulent flow, remarkable achievements include the turbulent model system based on explicit algebraic stress model, the high-order impact nonlinear model, and nonlinear model considering the effects of flow curvature. In the field of vortex flow, several kinds of 3D vortex exact solutions of NS equations are induced, and the Batchelor’s analysis is extended, the chaos of Helmholtz vortex rings are found. In the field of hydrodynamic instability, effects of wall suction/injection on the linear stability of flat Stokes layers are investigated. It was found that the onset of instability of the flat Stokes layers can be suppressed/enhanced by wall suction/injection. In the study of the linear stability of Bingham-plastic fluid flow between two concentric cylinders rotating independently and with axial sliding of the inner cylinder (spiral

Couette flow), the only situation that a yield stress fluid flow is less stable was discovered. Effects of insoluble surfactants on the stability of film flow driven by an oscillatory plate are investigated in the limit of long-wavelength perturbations. It was found that the oscillatory film flow can be stabilized by surface surfactant in the sense of raising the critical Froude number and narrowing the bandwidths of the unstable frequencies.

The report of fluid mechanics includes 9 topics, which are Turbulence, Vortex dynamics, High-speed hydrodynamics, Hypersonic aerodynamics, Rarefied gas dynamics, Multiphase flow, Non-Newtonian fluid mechanics and Computational fluid Mechanics. Special thanks are due to all the scientists for their contributions to this report.

引言

流体广泛地存在于自然界和工程技术领域，在我们的周围，到处都可以见到与流体运动有关的现象。从宇宙中巨大的天体星云到包围地球的大气层，从地球表面无垠的海洋到地球内部炙热的岩浆，从动物血管中的血液到各种工业管道内的石油和天然气，凡是有流体存在的地方，都有流体力学的问题存在。

自 1738 年伯努利出版第一本流体力学专著“HYDRODYNAMICA”，至今过去了近 270 年。随着时间的推移，流体力学在科学和工程技术领域的重要性日益增长。近几十年以来，由于理论分析、实验技术和计算机能力的不断提高，与流体力学研究相关的交叉研究领域不断增加，流体力学研究有了飞速发展。一方面，它不但在预报和测量流体非线性相互作用所导致的不稳定性、混沌和湍流现象方面有了重大的进展，同时也不断在向其它学科纵深扩展，包括在天体物理、生物学、冶金学、海洋学、气象学、地球物理学和传统工程科学的众多分支学科中发挥重要作用。

新中国成立以来，流体力学工作者为我国现代科学发展和国民经济建设做出了重大贡献。以钱学森、周培源、郭永怀为代表的老一代流体力学学者，分别在空气动力学、湍流理论、边界层理论等方面所获得的杰出研究成果，在国际上享有盛名。我国所取得的重大成果，包括两弹一星和深潜弹道导弹核潜艇的研制，长江三峡等水利项目的建设，油田的开发和大型水轮发电机组的设计，天气预报和大气及水环境治理，都有大量的流体力学问题，凝聚着

流体力学工作者的研究成果、智慧和奉献。

一、近 5 年的研究成果

在过去的 5 年中，中国流体力学研究取得了一系列进展。

我国关于微重力流体物理基础研究取得重要进展。2002 年底在我国神舟 4 号飞船上进行了液滴热毛细迁移空间实验获得了圆满成功。按预定设计，在轨飞行期间实验设备全部工作正常。此次大Marangoni数液滴空间实验，液滴热毛细迁移Marangoni数达到 5 500，为目前国际上实验获得的最大液滴迁移Marangoni数。实验观察到了大Marangoni数液滴热毛细迁移的非线性动力学特征。微重力环境下的实验结果表明，所施加的温度梯度、液滴与母液液体体系界面张力温度系数及液滴尺寸大小是影响液滴热毛细迁移速度的主要因素，迁移速度与其呈正比关系；在所获得的最大Marangoni数情况下，液滴的迁移速度仍然明显低于经典YGB线性理论预测。实验发现绝大多数尺寸液滴在整个迁移过程中不断加速，在 Ma 扩展到 5500 的情况下，无量纲迁移速度 V/V_{YGB} 值趋近于 40% 左右。与以前地基实验结果相比，无量纲速度 V/V_{YGB} 值随 Ma 数的增大有所增加。空间实验结果与美国研究人员得到的数值及渐近分析理论预测相比仍存在明显的差异，表明大 Ma 数液滴迁移行为有其自身的运动特征，目前尚未有较好的理论预测揭示其行为规律。此外，此次实验在空间流体实验技术方面也取得了重要突破和进展，自行开发研制了空间实验设备，成功采用了多项专利技术。为我国今后空间流体实验积累了宝贵的微重力实验经验。力学所作为重力流体物理分系统承担单位获得国家科学技术进步特等奖；胡文瑞院士作为主要参加者获个人国家科学技术进步特等奖。

空气动力学研究是国内流体力学具有优势的研究方向，队伍和成果集中，应用背景明确。近年来，国内学者在分离流、旋涡运动、非平衡流、湍流、流动稳定性等方面取得了一些具有国际影响的研究成果。在高精度、高分辨率算法，如 NND 格式、新型 WENO 格式、非线性紧致格式、超紧致格式和高阶投影算法等方面，取得许多高水平成果。在微流动算法(如信息保存法)、连续——稀薄流统一算法和分区并行计算理论方面，获得了一些有国际显示度的研究进展。中国空气动力研究与发展中心的空气动力学研究组 2003 年获得了国家自然科学基金委员会“创新研究群体”的资助。“九五”以来，国家自然科学基金委员会设立的有关重点、重大基金项目有：超音速燃烧关键技术的力学基础研究(1997)、计算空气动力学中新型算法和杂交技术及其应用研究(1998)、飞行器机动飞行中若干关键的非定常流动问题(2000)、非均匀可压缩湍流层次结构研究(2000)、高速流动中高温效应的实验研究(2000)、细

长旋成体大攻角绕流非对称涡产生机理、结构演化及其控制研究(2004)等，它们实际上都是以航空航天为背景的。从 1997 年开始，国家攀登计划“流体及空气动力学关键基础问题研究”开始实施。特别是 2002 年国家自然科学基金委员会设立的“空天飞行器的若干重大基础问题”重大研究计划，对推动我国空气动力学的学科发展起到了积极的作用。

在湍流研究方面，我国学者开展了“非均匀湍流层次结构”的实验研究。在此基础上，从复杂性科学的角度对湍流和湍流研究的方法论进行总结和提炼，概括了湍流作为复杂系统的 4 点主要特征：多自由度和多尺度、复杂的非线性相互作用、高度的自组织及整体有序化、与环境的开放性相互作用，进而提出了湍流的复杂系统论观点。从理论上对传统的层次结构模型进行了拓展，弄清了该模型与湍流的另外两类自相似性，即扩展自相似性（ESS）和广义扩展自相似性（GESS）之间的联系。在湍流模式理论的研究方面，建立了以显式代数应力模式为基础的非线性涡黏性湍流模式体系。提出了满足可实现性原理的二阶非线性涡黏性模式，无壁面几何参数的近壁低雷诺数模式修正，考虑流动曲率影响的非线性模式，高阶紧致非线性模式。本模式体系的核心特征为：既保持了涡黏性模式在数学和应用上的简洁性又具有二阶矩模式所包含的重要湍流物理机理（如雷诺应力方程中的生成、再分配等），结合了这两类模式的优点，同时也建立了它们之间相互转换的关系与桥梁。在对标量湍流输运特性的研究中，发现雷诺平均普朗特数和分子普朗特数的倒数呈线性关系，亚格子普朗特数在分子普朗特数 1 附近有极值。提出了一种理性的大涡模拟模式，使大涡模拟模式从唯象型走向理性；并在各向异性湍流中进行了推广。在壁面展向周期运动减阻机理研究中，提出了控制减阻率大小的关键参数，揭示了湍流再分配在其中的关键作用。在“微流动稳定性”的研究方面，首次发现在低雷诺数下，壁面滑移引起了一种新的不稳定性——短波不稳定性，但对于长波的小扰动是稳定的(JFM 2006)。

在旋涡动力学的研究中，通过诊断、识别和改善关键流动结构，使得轴流压气机的性能得到提高，找到引起巨型水轮机尾水管低频振动的旋涡不稳定性根源，并发现了有效的控制原理。采用头部扰动和非对称涡响应及其扰动主动流动控制等旋涡控制技术，成功地解决了诸如导弹、火箭等细长体飞行过程中出现的非对称分离和不稳定性等问题。在流体旋涡斑图结构的研究方面，对旋涡结构进行分类，找到了几类纳维-斯托克斯方程的三维旋涡精确解，发展了 Batchelor 有关理论分析的结果；首次发现亥姆霍兹涡环解的混沌现象；利用特征张量表示张量不变量问题，首次提出了用兰姆曲面来刻画涡元结构的方法。在实验研究中，发现转捩边界层二次涡环，澄清了高频旋涡产生的机制，揭示了流向涡产生的机理。首次系统

地给出了动边界处涡动力学的基本过程和理论分析,并根据这一理论利用物体附近局部流动结构的信息求得作用在物体上的合力。运用动边界涡动力学理论和动波浪壁控制技术对包括二维大攻角翼型绕流和二维圆柱绕流的控制进行数值模拟研究,取得了抑制大攻角翼型分离涡脱落、增升减阻的效果,及完全消除圆柱尾涡脱落的控制效果(JFM, 2007)。在复杂旋涡流动的诊断和控制的基础研究中,提出了一类新的理论方法,可基于有限流场数据分析揭示柔性运动物体的受力特性及其与流场涡结构的内在关系(JFM, 2007);找出了影响非定常圆柱绕流升阻力的局部动力学结构(JFM, 2007),

在边界层流动稳定性研究中,分析了壁面吹吸气对增强和抑制非定常边界层不稳定性的影响特性(JFM,2006),揭示了表面活性剂对非定常边界层长波不稳定特性的影响规律(JFM,2006)。在微流动稳定性的研究中,发现了在低雷诺数下,壁面滑移引起了一种新的不稳定性——短波不稳定性,但对于长波的小扰动是稳定的(JFM 2006)。在复杂流体的流动稳定性研究中,在螺旋 Couette 流中发现了宾汉流体的屈服应力对流动所产生的不稳定性效应,而以往的研究一直认为,屈服应力的存在对流动起着稳定的作用。该成果发表后(JFM2004),国际同行在 JFM (2006)上撰文指出:该效应是由加拿大学者和中国学者各自独立发现,并在其论文中 12 次引用了中国学者的名字。

我国学者开展了高超声速推进系统关键技术和飞行器气动构型的基础研究,装备成国际上首座爆轰驱动激波风洞 JF10。在超声速燃烧关键技术的力学基础研究取得重要成果。在氢/空气超声速燃烧实验用支板与壁面横向喷注混合的混合增强手段,使燃烧效率达到 90% 以上,并在国际上首次发现了传统的超声速燃烧自点火规律的局限。在煤油/空气超声速燃烧实验中,利用氢引导火焰、燃烧室壁面凹腔和充气雾化的方法解决了煤油点火、煤油/空气混合增强和稳定的超声速燃烧等关键技术问题。在氢充气雾化煤油条件下超声速燃烧的效率可达 80%。提出了凹腔稳定燃烧的新机理。在超声速燃烧关键技术的力学基础研究取得重要成果。在激波动力学研究方面,首次获得了平面、轴对称定常超声速流动马赫反射中,马赫杆形状的解析解,并用数值方法进行了验证。自 1878 年马赫反射现象被发现,马赫杆形状一直未得到解决。研究基于数学物理分析,发现在平面和轴对称马赫反射中,当滑移线与来流夹角较小时,马赫杆的形状为一段圆弧,它后面的流动可以用无旋小扰动方程描述(JFM 2006)。

在“游动的生物力学与仿生技术”研究中,采用二维 NS 方程数值模拟和理论模化这两种手段,分析了鱼体 C 形快速起动的模型流动。研究表明,鱼体的瞬变加速度引发的附加

惯性力对即时产生推力起很大作用,但是在起动过程中的平均推力主要是由涡流场诱导作用所提供的。还数值研究了欧洲鳗的倒游流动特征和白斑狗鱼 S 形起动的尾鳍动作与推力作用过程。基于数值模拟手段,研究分析了波状摆动推进的运动学和动力学机理,包括流动控制、减阻和最佳推进效率等,并与一些典型活体鱼的实测结果进行了比较验证,研究了钝体脱泻旋涡与翼的相互作用,所揭示的流动规律可以为探讨生物群体运动的有利干扰效应提供基础。采用三维并行有限体积自适应多重网格法和内置边界法数值模拟了 MIT 仿生机器鱼在黏性流体中的自主游动,得到的三维尾涡结构,鱼体表面色彩为压力分布。在昆虫高升力机理研究方面,研究了小昆虫飞行时产生的涡系,解释了涡升力的来源。鉴于昆虫翅拍动运动是由快速加、减速平动,启动后平动,快速转动组合而成,研究发现:在快速加、减速运动和快速上仰运动中,由于在短时间内产生了强涡层,导致了很大的涡量矩时间变化率,从而可产生高升力;启动后的等速平动中,失速涡不脱落,升力近似保持为一较大的常值。对果蝇翅作拍动运动的研究得到以下结论:果蝇用超前模式作拍动运动,可产生非定常高升力,其平均值是定常值的 2~3 倍,阐明了产生此高升力有 3 个原因,一是拍动初期的快速加速效应,其在短期内产生了很大的涡量矩的时间变化率,从而产生了一个升力峰;二是拍动中翅膀的周向转动效应,其消除了失速,从而在拍动过程中维持了大升力;三是拍动结束阶段翅膀的快速上仰转动效应,其也在短时间内产生很大的涡量矩的时间变化率,从而产生另一个升力峰。在昆虫产生高升力的研究方面的工作。国际著名刊物 *J. Exp. Biol.* 在其 *Highlights In This Issue* 中将该成果作为“突出成果”介绍。

在过去 5 年中,中国流体力学研究在水动力学的研究领域也取得了一系列进展。我国学者在气垫船和地效飞行器的研制中,在机器鱼的研制中均获得令人鼓舞的成果。在基础研究方面,我国学者上世纪末即开始探索自然空泡与通气空泡的相关性,嗣后对空化器后的自然空泡与通气空泡的共同作用开展了多方位的试验研究和数值模拟。研究结果表明利用通气空泡减阻是可能的,但空化器与通气位置、通气方向、通气量的协调配合至关重要;通气量对超空泡流的形成存在不稳定区段,有阶跃现象。这说明自然空泡流与通气空泡流相互作用的机理尚需进一步澄清;数值模拟中还发现通气空泡流的水气界面会出现失稳,并以波动形式向后传播。这种波形界面虽然早有提及,但有说服力的研究结果不多,有待深化。近年来对轴对称细长体通气空泡流也开展了不少研究,重点讨论了通气空泡的形态特性、非对称性、稳定性、重力效应以及空化器形状对空泡外形的影响等;对于低 Fr 数下空泡轴线上翘特性提供了新的认识,但通气后泄形态随 σ 数和 Fr 数的变化相当复杂,尚需作深入研究;发现

通气空泡流的阻塞效应十分严重，对试验数据有明显影响。鉴于海水污染、地表水污染和地下水污染，我国水环境面临的重大难题。我国学者在对渤海湾、杭州湾、长江口和珠江口的近海流场的流动规律和污染物扩散的研究方面取得了一系列进展。从流体力学的角度为我国近海环境的全面规划和综合治理做出了贡献。

二、现状和展望

回顾流体力学的发展过程，一系列事实充分表明了它的勃勃生机和无限的活力。在上一世纪中，以非线性科学所取得的最引人注目的两大成果“混沌理论”和“孤立波理论”为例，它们的源头活水无不来自流体力学问题。温故而知新，可以预期在新世纪中，随着理论分析、实验手段和计算机的不断发展，流体力学在“复杂流动”和“复杂流体”的研究中，将面临新的挑战和发展机遇。在实验流体力学的流动测量方面，随着激光多普勒测速技术（LDV）、粒子图像测速技术（PIV）和激光诱导荧光技术（LIF）的发展，已经可以实现单点和全场的瞬时速度和温度测量。尤其是近年来 Micro-PIV 和高速 PIV 技术的发展，为研究微观结构的流动特性和非定常流动特性提供了强有力的实验手段。

作为对 21 世纪流体力学的展望，中国力学学会组织国内有关专家，就流体力学的若干热点研究领域进行了评述，附件给出了 9 个已经完成的专题报告，它们分别是“湍流”、“涡动力学”、“高速水动力学”、“高超声速空气动力学”、“稀薄气体动力学”、“多相流体力学”、“渗流力学”、“非牛顿流体力学”、“计算流体力学”。现综述如下：

湍流是自然科学的经典难题，在 21 世纪将依旧是科学界最具挑战性的方向之一，数学家关心描述湍流的 NS 方程解的存在唯一性；物理学家关心作为非平衡态典型案例的湍流；流体力学家关心真实湍流的机理和预测湍流特性的方法。目前受到特别关注的几个科学问题是：湍流的产生与发展过程中所蕴涵的物理机制；湍流的预测及控制；均匀各向同性湍流的 Kolmogorov 理论和间歇现象；槽道湍流的拟序结构和动力学；湍流的统计理论；湍流的数值模拟(DNS, LES, 雷诺平均的 NS 模拟)；自由剪切流(线性稳定性, 非线性发展, 混合和控制)等。在湍流研究中，标度律的发现是标志性成果之一，发现切变湍流中存在拟序结构则是近代湍流研究的另一重大进展，需要研究的重点是相干结构动力学机理、理论和控制。在湍流的模拟方面，基于雷诺平均的模拟仍然是湍流模拟的主要方法，但模型的普适性仍然存在很大不确定性，在模型的复杂性与预测精度方面如何折衷仍然是需要仔细考虑的。现有模式的致命缺点是没有一个模式能够对所有湍流运动给出满意的结果。若干年以前，解决这

一问题的主流思想是封闭高层次的湍流输运方程和建立非线性的封闭关系式。目前,随着大涡模拟技术的发展,人们更关注于研究雷诺平均和大涡模拟混合模式,以及更注重研究模式应用中的关键问题。大涡模拟目前可以解决一些简单的工程问题,直接数值模拟主要限于机理研究。由于统计力学和计算机模拟方法的引入,湍流在统计理论和数值模拟等方面取得了较大的进展,特别是湍流的理论研究从经典的解析模型走向计算模型,从实验研究走向数值模拟和实验研究相结合,从而将能够处理越来越复杂的工程问题。

涡动力学是流体力学的一个既古老又年轻的分支。它以研究涡量和旋涡的产生、演化及其与物体和其它流动结构的相互作用以及在湍流发生、发展和流动控制中的作用为主要研究内容。在空天安全、超燃发动机、大飞机制造、超大型海面作战平台和深海采油平台、大型水电工程和风力发电等重大国家需求项目中,涡动力学都发挥着重要作用。今后涡动力学的两个主要突破方向为:1) 动边界(如柔性壁面、运动物体、自由边界等)处的涡动力学特性及其控制的研究。目前固定边界处的涡动力学问题经过多年的深入研究,取得了众多研究成果。而对动边界涡动力学的理论、计算和实验研究则十分欠缺。2) 超声速与高超声速流中的激波、旋涡、声波相互作用、稳定性和共振的研究。这一研究不但可将涡动力学扩展到可压缩领域,而且将对国防、航天、航空中的一些关键技术问题的解决发挥重要作用。国际上在这方面的研究刚开始起步,因此抓住学科发展的有利时机,可望在该方向上取得一些突破性进展。在今后几年内需要重点关注的科学问题有:边界涡量的生成和分离;动边界涡动力学的理论、数值计算方法及应用;超声速与高超声速流中的激波、旋涡、声波相互作用、稳定性和共振的研究;基于涡动力学的旋涡诊断和控制技术及其应用;新的定量和定性涡动力学实验方法;旋涡的普遍定义和非定常动边界流动中旋涡的表示和演示技术;旋涡的稳定性和涡破裂机理研究。

高速水动力学的发展与海洋内航行器的高速化的趋势密切相关。水中运载工具提速受到限制的主要原因是水中过高的阻力和空化现象。目前迫切需要研究的相关问题有:自然和通气空泡流及其稳定性;高速出入水问题的数值模拟;高速水动力学的试验设备与测试技术等。近些年,水下射弹模型试验的速度越来越高,美国试验的速度高达 2 500~5 000m/s。一旦射弹在空泡区域内有不稳定的运动,对射弹的运动稳定性控制带来严重威胁,因此需要加强这方面的研究。目前水下高速运动的研究,多半在水中声速以下的范围。近声速和超声速运动方面的试验与理论研究成果公开发表的不多,还有大量工作要做。进行仿生流体力学的研究具有重要意义,鱼类摆尾游动效率高、噪声低,尾迹小,是十分理想的水中推进方式。另

一个需要关注的问题是，在水下运动的潜器会留下长长的湍流尾迹。它们会保留相当长的时间，或者在按海水密度分层的中间流域激起内波扰动，传至很远的海区，或者传至海面与波浪相互作用，留下有特殊信息的痕迹。诸如此类的水动力学特征，成为当今世界军事大国发展水下军用目标的非声探测技术的重要依据。此外，由于环境问题的恶化，河口与海岸水动力学的研究面临新的挑战，需要解决的问题有：多因素耦合的河口与海岸水动力学理论与数值模拟技术；河口与海岸泥沙输运机理及工程效应；波浪、水流与工程结构物的相互作用理论；海岸与近海灾害的形成机理与预警系统。

高超声速空气动力学的发展与航空航天技术的发展戚戚相关。新一代空天飞行器作为未来的商用飞机，实现洲际旅行的朝出晚归；航天飞机可为未来太空开发提供一个更经济、更安全进入轨道的运载工具；高超声速武器具有突防能力强、反应快速、具有精确打击和机动作战的能力。高超声速流动超出了经典气体动力学物性参数、本构理论描述的范畴。在此飞行条件下，其流动特征有：激波层更薄，熵层更厚，熵层内具有强烈的涡团相互作用；飞行器表面摩擦阻力和热传导成倍增加，飞行器表面的温度和压力分布、升力、阻力以及产生的稳定性也与传统超声速飞行器概念截然不同；边界层内流态复杂，化学反应导致了边界层催化效应，边界条件不再是简单的等温或绝热边界。在高超声速空气动力学研究范畴，宏观流动规律的改变强烈影响了飞行器绕流的物理特征，并改变了飞行器设计的基本原则，对于高超声速空气动力学的基础和应用研究提出了挑战性的科学问题，特别是高超声速流动的模拟技术；高温空气热化学反应机制；高超声速流动的滞止区域；高超声速边界层转捩；高超声速流动的激波/激波相互作用。高超声速空气是现代空气动力学的前沿学科，有着国家长期发展的战略需求背景。重视、强化高超声速空气动力学研究是非常必要的。

稀薄气体动力学是空气动力学的一个重要分支，是原子分子物理、统计力学、分子动理论和宏观的气体动力学的交叉学科。在原子和分子结构确立之后，如何从它们出发理解和认识宏观流动中的非平衡和非线性输运过程，是现代力学的核心问题之一。了解航天飞行器在高空的气动力热和微机电系统(MEMS)中气体的流动规律都需要研究和发展稀薄气体动力学。现代稀薄气体动力学的研究是从钱学森的开创性的工作开始的，他按照 Kn 数的大小，稀薄气体动力学分为 3 个区域：滑流区 ($0.01 < Kn < 0.1$)，过渡区 ($0.1 < Kn < 10$)，自由分子流区 ($Kn > 10$)，其中过渡领域是稀薄气体动力学研究的核心的也是最困难的课题。目前需要关注的主要科学问题有：过渡领域的求解；微尺度流动；稀薄等离子体的模拟；有化学反应、等离子体效应、辐射影响、壁面效应等流动的实验和模拟计算的研究等。在 20 世纪，

50 年代末的高真空泵设计迫切需要稀薄气体的知识；80 年代末，美国加州大学伯克利分校的学者利用微电子加工技术制造了一台直径 $100\ \mu\text{m}$ 的马达，目前微系统特征尺度已在亚微米量级。当流动介质为气体在其中流动时，稀薄气体效应已经非常显著。如何利用稀薄气体理论指导微系统的设计，是当前的研究热点之一。可以预计，随着我国航天事业向载人、登月和建造航天站的发展，稀薄气体动力学的作用将变得越来越重要。

多相流指的是两种或两种以上、相同或不同化学成分物质的固体、液体和气体系统的共同流动，应用背景包括污染物在大气与水环境中的沉积与控制；核反应堆的废物排放和处理；高效燃烧和减少燃烧污染；采矿和冶金过程中的旋流分离和运输、粉尘爆炸的预防和控制；油气水多相管流段塞流的控制；血液的循环与凝固等。多相流的普遍性、重要性和复杂性，决定了它在流体力学学科中占有重要的地位。迄今为止，多相流的基础、应用基础和应用研究虽然取得了大量的成果，但仍旧有很多机理没有揭示、很多问题没有得到解决。多相流体力学的发展趋势是：研究受连续相流场特性制约的离散相动力学特性；关注离散相对连续相特性的影响；分析离散相之间的相互作用。多相湍流场及稳定性，多相流场数值计算方法，超常离散相多相流也将是今后关注的重点。随着测量技术的发展和理论研究的深入，世界各国的多相流学者们越来越多地深入到对非线性多相流相界面动力学这一微观本质的研究，试图建立和发展精确可靠的多维多相流数学物理模型。多相流研究对提高工业两相流过程的理论预测精度，改进和完善现有的气液两相流模拟软件，如大型火电站、反应堆热工水力分析软件，油气水多相流流动分析软件等，提高有关工业设备的效率和安全可靠性，有重大实用价值。

流体通过多孔介质的运动称为渗流。渗流力学是研究流体在多孔介质中运动规律的科学，是流体力学和多孔介质理论、表面理论、物理化学、地球物理、土壤学、生物学等相互渗透的一个交叉学科。渗流力学的研究领域分为地下渗流，工业渗流和生物渗流，在环境、工程和技术等领域都有非常广阔的应用前景。水渗流引起的山体滑坡、过度开发地下水资源引起的地面沉降、地球物理领域的岩浆运动和地幔对流等都是渗流研究的问题。随着能源需求和环境灾害形势的日益紧迫，渗流力学将发挥越来越重要的作用。目前需要关注的科学问题有：多相多组分渗流（相间、组分间相互作用机理，相变及相和组分间的传质与传热，多相渗流，多组分渗流）；物理化学渗流（弱碱/无碱体系的乳化和结垢，化学剂吸附和解吸规律，油、水、岩石、化学剂相互间的界面张力，物理过程和化学反应复合条件下的渗流运动，微生物菌种对油水渗流的影响机理）；非线性渗流（非达西渗流，非牛顿渗流，低温渗流，

强迫对流及其与自然对流共存的混合对流分岔和浑沌行为)；微观渗流（三维微观渗流的数学建模，微观模拟和微观测试技术，孔隙层次的三维渗流特征，孔隙层次的三维物理、化学、生物过程，微观渗流特征与宏观渗流现象和规律间的内在联系)；渗流模拟（多组分渗流运动的相似准则，复杂渗流的物理模拟方法和测试技术，非均质多孔介质渗流的精细数学模型)等。为适应经济和社会发展的需求，渗流力学的研究内容将不断丰富，并为能源的开发利用和相关环境问题的治理提供更为科学的决策依据。

非牛顿流体力学的主要研究对象是石油、环境、化工和食品工业中遇到的各种复杂流体。随着科学的发展，近代流体力学的研究开始进入非牛顿流体的范畴。在自然界和工业界，有许多非牛顿流问题存在并需要研究，从火山爆发产生的熔岩到洪水带来的泥石流，从管道中煤水浆到大漠中的流沙。非牛顿流体在流动时会出现一系列不同于牛顿流体的流动特性，比如：无管虹吸、剪切稀化、逆向涡流和爬杆效应等。这些形形色色不同于牛顿流体的复杂流体和它们奇特的流动现象是非牛顿流体力学的研究对象。在工程中必须重视这些区别和了解它们的规律，才能进行正确的设计。与经典流体力学相比，非牛顿流体力学的研究历史较短。应该认识到，凡流体力学关心的科学问题，把牛顿流体换成非牛顿流体之后，都有相应的科学问题存在。在牛顿流体力学中已经解决的经典问题，对非牛顿流体力学可能是一个全新的问题；在牛顿流体力学中尚未解决的问题，对非牛顿流体力学更是一个具有挑战性的问题。该学科目前关注的科学问题主要有：各种复杂流体本构关系的建立和研究；非牛顿流涉及的壁面滑移效应；最新发现的低雷诺数下的弹性湍流；各种非牛顿流的稳定性特性；非牛顿流体在管道中的非定常流动特性；煤——燃油悬浮体的非牛顿流特性；海洋和河口泥沙的非牛顿流特性；环型收缩域中非牛顿液体的流动；非牛顿液体中气泡和液滴的流体力学；黏弹性流体的自然对流和热传导等。以复杂流体为研究对象的非牛顿流体力学，将不断给流体力学的发展注入新的源头活水。

计算流体力学随着计算技术的发展和高速并行计算机的出现取得了迅速发展。数值方法研究近几十年来的主要标志性成果有：60年代的预测校正格式、激波装配方法；70年代的求解跨音速流动的混合差分格式、旋转迎风格式、近似因式分解算法等；80年代到目前的有限体积方法，以多重网格方法为代表的高效数值方法，迎风格式，非结构网格方法，动网格及自适应网格算法，高分辨率激波捕捉格式，紧致格式，DSMC方法，从连续到稀薄流的统一算法，介质界面处理方法（如VOF方法和Level set方法），分区与并行计算方法等。上世纪末针对大尺度宏观流动，如航空航天飞行器超高声速绕流问题，研究了对激波和间断

面具有高分辨率的计算方法。目前已可利用巨型计算机,采用合适的网格生成技术和有效的计算方法,计算各种飞行器的超、高超声速无黏和有黏流动的宏观复杂流场。目前有待解决的科学问题有:适用于多尺度非线性问题计算的高精度、高分辨率数值方法的研究;多物理流体运动的数值模拟方法研究,特别是对非定常多尺度多物理流体运动的高精度高分辨率计算方法的研究;混合方法和网格生成技术的研究;流—固耦合、振动与声的耦合、高速冲压下的结构力学和热力学耦合的数值模拟方法研究;与流体运动有关的新兴或交叉学科的计算流体力学研究。计算流体力学与宇航工业、汽车工业、船舶工业、环境科学、海洋工程等的发展密切相关,是提高我国科技自主创新的重要手段。重视计算流体力学的研究具有重要意义。

在 2000 年,英国剑桥大学 G K Batchelor 教授、H K Moffatt 教授和 M G Worster 教授编辑出版了“流体力学展望”一书。他们邀请了 11 位国际上知名的流体力学专家,就流体力学 11 个重要的研究方向进行了精辟的述评,对 21 世纪的流体力学进行了展望。该书收录的专题报告分别为:“界面流体动力学”、“构形增长原形的黏性指进”、“动静脉中的血液流动”、“剪切流的不稳定性”、“湍流”、“环境对流”、“磁流体动力学”、“流体的凝固”、“地质流体力学”、“海洋动力学”、“全球尺度的大气环流”。这些研究方向不但有历经百年的经典问题,也有脱颖而出的全新问题;不但涉及基础研究,也有重要的应用背景。作为我们前述 9 个专题报告中所未涉及研究方向的补充,以下列出其中的 5 部分内容。

1. 界面动力学研究的问题主要源于现代工业加工技术中出现的问题,比如涂层薄膜等本质上是非线性,界面的显著变形导致强非线性和奇点的出现。与传统的表面波形成对照,这里所涉及的问题受诸多因素比如表面张力、热毛细力、van der Waals 引力和相变的控制。接触线出现在许多重要的问题中,黏性液滴在基底上的延展涉及接触线的移动问题。迄今为止,各向异性的界面动力学还没有成熟的模型。

2. 近年来黏性指进的分形现象日益受到学术界的重视。黏性指进与液体-液体运动界面的不稳定性有关,被称为 Saffman-Taylor 不稳定性,决定界面的非线性发展,产生各种复杂的分形结构。黏性指进现象的发生与界面张力有关,减小界面张力易于出现粘性指进现象,两种介质的黏度比也与该现象的产生有关。在二次采油和三次采油中都存在黏性指进现象,它对采收率有很大影响。向油藏内注入驱替液体,黏性指进可能造成原油回采严重减少,需要研究多孔介质中由黏性指进不稳定性导致的指进花样和规律。

3. 生物流体力学研究生命体中流体的运动特性和规律,动静脉中的血液流动是目前研

研究的热点问题，在医学上具有重要的应用背景。研究发现：由流场决定的剪切应力的瞬时梯度的变化会影响血小板增生因子的分泌，增进血管舒张保证血液流通。血液是由红血球、白血球和血小板组成的复杂流体，具有剪切稀化等非牛顿流体的特性。血管是具有复杂分叉特性的可变形管路网络系统。

4. 流动稳定性研究一直是流体力学关注的重要研究领域，满足 NS 方程的解只有经过稳定性分析，才能确定它是否可以在实验中观察到。流动的不稳定性通常与剪切流有密切关系，剪切流从层流向湍流的转变起始于其层流解的不稳定性。这种不稳定性由 NS 方程的线性稳定性理论和非线性稳定性理论来描述。由于流动的性质不同、初始扰动情况的不同、支配演化过程的主要扰动模式也不同。目前的研究仍以线性稳定性理论为主，流动非线性稳定性的研究还存在许多需要解决的问题。

5. 流体的凝固是一个复杂的过程，除流体流动外，还同时伴随有传热、传质以及多相组元的相变。在流体凝固过程中，液固界面的运动涉及复杂的界面动力学问题。该项研究的应用背景涉及工业生产的材料冶炼和加工以及火山熔岩等地球物理学关心的问题。

流体力学作为一门重要的基础学科，具有渗透力强、介入学科群广泛的特点，一直与数学、天体物理、地球物理、核物理、大气物理、水文、航空航天、车辆、船舶、机械、化工、生命科学、仿生、环保等学科有密切关系。它所研究的问题与社会经济发展和科技进步的重大问题密切相关，比如航天航空、航海、环境和生物医学工程等。流体力学的发展历史已经证明，仍将继续证明，该学科本身不但具有强大的生命力，它的发展对数学、物理、计算机科学的发展和新兴学科的创建同时具有强大的推动作用。我国流体力学工作者今后的任务是要继承以钱学森等著名学者为代表的老一辈科学家献身科学的无私精神和严谨求新的科学作风，在加强流体力学基础研究，进一步提高我国流体力学的学术水平的同时，密切关注与国民经济发展和国防建设相关的流体力学问题，为我国科学和技术的进一步发展贡献力量。

参考文献

- [1] G.K.Batchelor, H.K.Moffatt, M.G. Worster, Perspectives in Fluid Dynamics: A Collective Introduction to Current Research, Cambridge University Press, 2000.
- [2] J.L.Lumley, A.Acrivos, L.G.Leal, and S.Leibovich, Research Trends in Fluid Dynamics, AIP Press, 1966.

- [3] T., Colonus, S. K. Lele, *Progress in Aerospace Sciences*, 2004, 40(6), 345~416.
- [4] Fu Dexun, Ma Yanwen, 2001, *Inter. J. for Numerical Method In Fluids*, 36:773~805.
- [5] Yu-Xin Ren, Miao'er Liu, Hanxin Zhang, *J. Comput. Phys.* 192 (2003) 365~386.
- [6] Arndt R E A, From Wageningen to Minnesota and back: perspectives on cavitation research. 6th Intern. Symp. on Cavitation. Wageningen, The Netherlands, 2006, Sept.
- [7] 何友声, 刘桦, 赵岗. 二维空泡流的脉动性态研究. *力学学报*, 1997, 29(1): 1~7.
- [8] Cokljat D, Slack M, Vasquez S A, Bakker A, Montante G, Reynolds-Stress Model for Eulerian multiphase. *Progress in Computational Fluid Dynamics*, 2006, 6 (1-3): 168~178.
- [9] Lin J Z, Wang Y L, Zhang W F, Sedimentation of short cylindrical pollutants with mechanical contacts. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 17 (6): 906~911.
- [10] John J. Bertin, Russell M. Cummings: *Progress in Aerospace Sciences* 39 (2003) 511~53
- [11] Zonglin Jiang: *Science*, 53(2):10-15, 2004 (in Chinese)
- [12] 沈青 (2003), 稀薄气体动力学, 国防工业出版社, 北京
- [13] Sun, Q.H., Boyd, I.D. (2004) Flat-plate aerodynamics of very low Reynolds number, *J. Fluid Mech.*, 520: 199~206
- [14] 郭尚平, 渗流力学几个方面的进展和建议。第六届全国流体力学会议论文集, 李家春主编, 气象出版社, 2001: 11~22。
- [15] Zhou Ji-Fu, Li Jia-Chun. An optimization approach to the similarity criteria of flows and its application. *Progress in Natural Sciences*. 2006, 16(3): 241~247。
- [16] Wu, J. Z., Ma, H. Y. & Zhou, M. D.: 2006, *Vorticity and Vortex Dynamics*. Berlin: Springer.
- [17] Wu, C. J., Xie, Y. Q. & Wu, J. Z.: 2003, "Fluid Roller Bearing" effect and flow control, *Acta Mechenica Sinica*, 19(5):476~484.
- [18] R.P.Chhabra, J.F. Richardson, *Non-Newtonian Flow : Fundamentals and Engineering Applications*, 1999 Elsevier.
- [19] Jie Peng, Ke-Qin Zhu, Linear stability of Bingham fluid in spiral Couette flow. *Journal of*

Fluid Mechanics, 2004, 512:21~46

[20] Frisch U., Turbulence: the legacy of AN kolmogorov, Cambridge, Cambridge University Press, 1995.

[21] Sreenivasan KR. and Antonia RA., The phenomenology of small scale turbulence, Annu. Rev. Fluid Mech., 1997 29:435~72.

[22] P. Moin and K. Mahesh, Direct numerical simulation: a tool in turbulence research, Annu. Rev. Fluid. Mech., 1998. 30: 539~578.

[23] He GW, Wang M. and Lele SK., On computation of space-time correlations by large eddy simulation, Phys. Fluid, 16 (11):3859~67 (2004).

附件

流体力学学科发展专题研究报告之一

湍流

何国威

中国科学院力学研究所

引言

湍流的特点是具有不同尺度上的拟序结构和随机脉动的相互作用，具有初始敏感性。湍流是自然科学的经典难题，诺贝尔奖获得者海森堡临终时在病榻上说：“我要带着两个问题去见上帝：相对论和湍流。我相信对第一个问题已有了答案”。许多伟大的科学家都正式或非正式的思考过湍流，但他们各有不同的侧重点。数学家关心描述湍流的 NS 方程解的存在唯一性；物理学家关心作为非平衡态典型案例的湍流；力学家关心真实湍流的机理和预测湍流特性的方法。本文仅局限于 NS 方程描述的湍流的机理和预测方法。

湍流的两个典型案例为均匀各向同性湍流和槽道湍流。前者是理论研究的标准模型，着重于湍流中大小尺度漩涡的相互作用；后者是真实湍流的基本模型，着重于剪切对湍流的影响。本文将首先介绍均匀各向同性湍流和槽道湍流的最新进展。这些进展主要得益于统计力学和计算机模拟方法的引入。因此，本文将接着介绍湍流的统计理论和湍流的数值模拟。最后，本文将介绍湍流的一个重要应用：湍流的混合和输运过程。鉴于篇幅限制，本文没有讨论湍流控制和湍流实验。

一、研究现状及重要科学问题

(一) 均匀各向同性湍流的 Kolmogorov 理论和间歇现象

湍流可以根据涡的尺度粗略地分为大尺度和小尺度运动。一般而言，各种湍流的大尺度运动受流动环境的影响很不相同，但是，湍流的小尺度运动具有普适性。Kolmogorov 理论给出了湍流的小尺度运动的普适特性，奠定了湍流理论的基础。该理论指出：充分发展的均匀各向同性湍流存在能量串接过程，因此，湍流的速度结构函数在惯性区满足由量纲分析导

出的正常标度率。

有关 Kolmogorov 理论的重要进展为：(1) 湍流的小尺度扰动存在强烈的间歇，它不满足高斯分布，因此，湍流的速度结构函数在惯性区存在反常标度律。几个重要的反常标度指数模型为分维模型，对数高斯模型和对数普阿松模型；(2) 湍流的小尺度上的不同物理量可以存在不同的间歇，但不同间歇的有限差别并不能导致不同的标度指数；(3) 现有的标度指数模型大多是唯象模型，湍流被动标量的 Kraichnan 模型解析的给出了标度指数的表达式，这是 Kolmogorov 理论近 50 年的最重要进展。

研究需求：识别湍流间歇的几何结构，认识湍流间歇的起源，建立基于湍流结构的统计理论；发展描述间歇的模型，直接从 Navier-Stokes 方程导出间歇模型仍然非常困难，一个现实的目标是发展唯象模型。

(二) 槽道湍流的拟序结构和动力学

槽道湍流是壁湍流的范例，它的特点是具有平面速度梯度，从而维持湍流的速度脉动并使它表现为各向异性。壁湍流的经典结果为从相似性导出的对数律。该结果虽然受不完全相似律的挑战而被修正，但修正前后的结果与实验相比差别并不大。槽道湍流中最激动人心的结果是拟序结构的发现：在壁面附近，扰动不稳定性产生了发卡涡，导致能量从近壁区经对数区传到中心区，构成空间的能量反串接过程。这种空间的能量反串接过程和当地的能量串接过程相互耦合，构成了壁湍流的自维持机制。

研究需求：研究壁湍流的拟序结构和随机脉动的相互作用，探索空间的能量反串接过程的物理机制，发展空间能量反串接过程和当地的能量串接过程相互耦合的模型，为工程湍流模型奠定理论基础。

(三) 湍流的统计理论

湍流的统计理论是指从 NS 方程出发用解析的方式推导出湍流统计量的可解方程。许多这种推导都涉及各种不同的封闭性假设，一个合理的做法是以逐步逼近的方式得到可解方程，而其中的封闭性假设代表不同的逼近程度。Kraichnan 的 DIA 方法解析的导出了 Kolmogorov 的能量谱；重整化群 (RNG) 方法不仅导出了 k-Epsilon 模型，而且应用于被动标量时还可以得到某些精确解；应用概率密度函数方法可以得到多相化学反应流的湍流模

型。

研究需求：DIA 和 RNG 方法仅适用于均匀各向同性湍流，需要发展壁湍流的统计方法。同时，这些方法没有考虑湍流的拟序结构，需要发展描述了拟序结构的统计方法；DIA 和 RNG 方法难以研究湍流的间歇现象，但概率密度函数方法可以研究湍流的间歇现象。在概率密度函数方法中，需要发展替代唯象模型的映射封闭方法。

（四）湍流的数值模拟

在一般情况下，我们并不能从 NS 方程求出湍流的解析表达式。一个较为现实的方法是数值模拟，即用计算机数值求解 NS 方程。现有的数值模拟方法包括直接数值模拟，雷诺平均方法和大涡模拟方法。在直接数值模拟方法中，流动的所有细节都从 NS 方程数值求出，即不用任何湍流模型；在雷诺平均方法中，只有流场的某些统计量被数值求出，所有脉动量对统计量的影响都必须模拟；在大涡模拟方法中，大尺度的运动特征被数值求出，而小尺度对大尺度运动的影响必须被模拟。在与工业和环境有关的湍流问题中，雷诺数一般都很高。这时，即使用现在世界上最大的计算机，直接数值模拟在近期内都是不可能的。现在工程上经常使用的数值方法是雷诺平均方程。由于雷诺平均方程中的湍流模型一般都是根据平衡态理论构造的，因此它很难适用于非定常流。但是，雷诺平均方法在工程湍流仍有广泛的应用，特别是雷诺平均与大涡模拟相结合的混合法，正得到相当的重视。为数值模拟非定常流，大涡模拟正逐渐发展成为一个有潜力的工具。

在大涡模拟中，湍流的速度场分解为大尺度运动和小尺度运动。其中大尺度运动通过直接计算得到，而小尺度运动对大尺度运动的影响必须模拟。这时，大尺度运动满足含有亚格子应力的滤波 NS 方程，在下文中称为 LES 方程。我们要强调的是，大涡模拟求解的是 LES 方程而不是 NS 方程。一般而言，求解 LES 方程包含 3 个基本要素：亚格子模型，数值方法和计算网络。大涡模拟已经得到了系统的发展，它的主要进展是：（1）基于能量谱的亚格子理论和模型，例如，动态涡黏亚格子模型；（2）用滤波算子表示大尺度运动，由此得到的滤波 NS 方程的数值方法；（3）为应用于复杂边界发展的无结构网格上的大涡模拟。

研究需求：为将大涡模拟应用于非定常湍流，如湍流噪声，需要发展预测湍流波数频率能量谱的亚格子模型；为将大涡模拟应用于多相湍流，如化学反应流，需要发展反映湍流多个不同物理机制的亚格子模型；为将大涡模拟应用于工程湍流，如壁湍流，需要发展适用于

大涡模拟的湍流壁模型；为将大涡模拟应用于复杂边界，需要发展适用于大涡模拟的无结构网格方法和浸入边界方法。

（五）湍流的混合和扩散

湍流的扩散是指具有不同浓度的物质在湍流里趋于均匀，其混合的速率比层流更快。该过程与湍流的扩散紧密相关：湍流可以把污染物更快地扩散开来。湍流的混合和扩散在环境流体力学和湍流燃烧中有重要应用，也是湍流理论研究的基本模型。从欧拉描述来看，它是由对流和扩散组成的线性方程；从拉格朗日观点来看，它反应了湍流粒子运动的特性。该领域近期重要的进展为：1) 被动标量具有比湍流速度场更强的间歇。因此，描述被动标量的统计量偏离高斯统计，例如标量结构函数的反常标度律和概率密度函数的长尾巴等。2) 实验和数值模拟发现：在均匀各向同性湍流中，如果被动标量具有均匀浓度梯度，那么，被动标量的小尺度统计量会出现各向异性，这与 Kolmogorov 的经典理论不一致；(3) 最近的实验测量和数值模拟发现：湍流粒子的速度间歇与粒子的空间聚团的几何构型有关，传统的基于高斯统计的朗之万方程不能描述这些现象。

研究需求：1) 发展湍流混合和扩散间歇现象的理论和方法，这是与湍流间歇现象平行的研究；2) 发展能描述间歇和粒子聚团的几何构型的拉格朗日速度模型；3) 高施密特数时湍流混合和扩散的统计特性。

二、小结

湍流的研究特别是湍流模型的研究已取得了丰硕的成果。但是，人们经常抱怨：为何没有一个普适的湍流模型用于解决一切问题？实际上，这种湍流模型并不存在。如果非要说它们存在的话，那就是 NS 方程本身。任何一个湍流模型都是 NS 方程的简化，都是 NS 方程部分物理的描述，它们不可能是普适的模型。因此，如果承认 NS 方程是湍流的原表象的话，湍流模型就是湍流的近似表象。我们所要做的就是构造湍流的近似表象，这种近似表象完全取决于具体问题所需要的物理机制。在这个意义上，湍流不只是一个难题，更是一个研究方向。

致谢：作者感谢李家春院士对本文的鼓励和支持，也感谢 P. Moin 教授, P. Durbin 教授, Y. Kaneda 教授, R. Rubinstain 博士, 王连平教授和王萌教授的有益讨论。

涡动力学

吴锤结

解放军理工大学

引言

涡动力学是流体力学一个既古老又年轻的分支。主要研究涡量和旋涡的产生、演化及与物体和其它流动结构的相互作用，以及在湍流发生、发展和流动控制中的作用。近年来，涡动力学研究取得了许多新进展。从1984年以来“全国分离流、漩涡和流动控制会议”已成功举办了十一届，主导了国内涡动力学的研究和发展。涡动力学研究始终受到国民经济和国防科技中的关键技术和重要应用的促进，并获得强大动力。我们将结合一些重要应用问题来讨论涡动力学的进展。

研究现状及重要科学问题

（一）复杂旋涡流动的诊断和控制

复杂旋涡流动的诊断和控制的基础研究日益成熟，已开始工业中得到应用。目前取得的进展有：发现了影响非定常圆柱绕流升阻力的局部动力学结构，对细长三角翼流场进行的诊断分析；基于涡动，力学分析，通过诊断、识别和改善关键流动结构，使得轴流压气机的性能得到提高；发现了引起巨型水轮机尾水管低频振动的旋涡不稳定性根源，并发现了有效的控制原理；采用头部扰动和非对称涡响应及其扰动主动流动控制等旋涡控制技术，成功地解决了诸如导弹、火箭等细长体飞行过程中出现的非对称分离和不稳定性等问题。

（二）动边界涡动力学

在飞机、舰船、生物、医学、仿生学和各种流动控制等重要应用中大量存在着动边界问题。目前已经系统地给出了动边界处涡动力学的基本过程和理论分析，并根据这一理论利用物体附近局部流动结构的信息求得作用在物体上的合力；运用动边界涡动力学理论和动波浪壁控制技术对包括二维大功角翼型绕流和二维圆柱绕流的控制进行数值模拟研究，取得了抑

制大攻角翼型分离涡脱落、增升减阻的效果，及完全消除圆柱尾涡脱落的控制效果；研究了小昆虫飞行时产生的涡系，解释了涡升力的来源；采用三维非线性无黏数值方法和实验数据研究了 MIT 仿生机器鱼在拖曳摆动状态下的尾涡结构和涡控制的力学机理，但这种拖曳摆动状态与鱼类自主游动有着本质的不同；采用流动显示和 PIV 技术研究了活鱼尾迹中的涡结构；采用三维并行有限体积自适应多重网格法和内置边界法数值模拟了 MIT 仿生机器鱼在粘性流体中的自主游动，得到的三维尾涡结构，与采用 TMV 和线性偏振光技术通过交叉偏振片拍摄到的活鱼游动的尾涡结构十分相似。

（三）旋涡的稳定性

旋涡稳定性问题是涡动力学的核心问题之一，它与湍流的发生、发展以及诸多自然界和工程应用领域中的流动现象有着密切关系，同时在理论上也有其独特的意义。近年来，旋涡的稳定性研究取得了很多成果，人们逐步了解了各类旋涡失稳的过程和机理。在 2006 年五十九届 APS 流体力学年会上，报道了采用三维稳定性分析和线性稳定性分析方法等研究了多种旋涡稳定性问题；实验研究旋转涡对的三维短波椭圆不稳定性问题和对并过程；采用全局稳定性分析方法研究了 Kelvin 涡环在三维无限小扰动下的曲率不稳定性；数值模拟研究旋涡的对并过程的物理机理，结果表明：其中的关键因素是旋转中心附近处应变律和涡量梯度间的相互作用。

（四）涡破裂机理研究

涡破裂指的是在集中涡演化过程中因非线性失稳而引发的旋涡结构的突然变化。许多研究者采用绝对/对流不稳定性(AI/CI)方法进行线性稳定性分析，比如：采用小波分析方法研究了涡破裂过程中的流场特性，发现了破裂过程中的拟序结构决定了全流场的动力学和统计特性，而非拟序部分对破裂过程影响不大；对具有转动顶盖的圆柱形内部流场中的涡破裂过程采用立体 PIV 进行实验和控制研究，发现位于圆形容器的中心的细杆的相对于顶盖的同向和反向转动对涡破裂的尺寸和形态均有影响；数值模拟研究了锥形顶盖对涡破裂的作用，结果表明锥形顶盖会增大涡破裂的边界，从而有利于流体混合；发现了圆管中涡破裂的基本形态是轴对称的，而且在初始轴对称泡状破裂中足够大的绝对不稳定性是导致其向螺旋型破裂的原因；实验研究了浮力对旋转射流中涡破裂的作用，他们发现射流核心区与周围流场间的正(负)温差可有效地增强(减弱)涡破裂过程；采用三维直接数值模拟和大涡模拟方法研究了

压力波在 Lamb-Oseen 涡和涡破裂中的传播过程，研究发现：当压力波在涡核处相交时就会发生涡破裂。

（五）旋涡与激波、声波的相互作用

旋涡与激波和声波的相互作用在航天航空、超燃发动机等超声速和高超声速应用中具有重要意义。例如：在火箭发动机燃烧室中的压力波和涡量波的共振会引起高度非线性不稳定性问题；激波与强涡的多阶段相互作用的数值模拟；超声速混合层的混合机理和涡结构特征的物理分析和数值模拟。尽管该方向的研究非常重要，但所涉及的物理问题极为复杂，至今为止取得的成果还不多。

（六）涡动力学实验研究

近年来，随着计算机、传感器技术和激光技术日益成熟和在流体力学实验中的普遍采用，涡动力学实验研究也取得了诸多进展，但是对诸如鱼、鸟等生物运动过程中的涡动力学实验研究仍非常困难。采用新实验技术的涡动力学实验研究进展有：在实验室里通过电磁方法产生虚拟自主驱动物体所对应的力场，并研究了其所对应的尾迹和涡街，为研究生物运动过程中的涡动力学机理提供了很好的实验方法；采用 PIV 技术研究了在周期入流扰动下的圆柱尾涡脱落过程，这一研究对了解涡致振动的机理和影响因素很有意义；采用 PIV 技术研究了弯曲壁面射流中的纵向涡沿流向的增长过程；利用全息 PIV 技术研究了槽道流中发卡涡的演化过程，采用这一技术可以得到发卡涡的瞬时形态、流向和展向速度分量的三维分布和对应的壁面法向涡量。

（七）旋涡的定义与表征

涡动力学在对旋涡没有普适定义的状态下发展了一个多世纪，但这种状态严重阻碍了对湍流中复杂流动结构的刻画和认识。因此，旋涡的普适定义这一基本问题持续受到关注，并取得一些新进展。比如：提出了一种旋涡的客观定义，认为旋涡是由一组沿零应变率张量方向的流体质点轨迹所组成的；根据旋涡中物质迹线的螺旋紧密度提出了一种新的识别局部旋涡的判断准则和涡核所必备的条件；讨论了一些典型旋涡流动问题，指出以往的定义均不能包含具有强轴向拉伸的旋涡；给出一种显示三维非定常涡片运动的表示方法。

建议

从以上综述可见涡动力学中的重要科学问题主要集中在如下这几方面：旋涡的诊断和控制技术及其应用；动边界涡动力学的理论、计算和应用研究；旋涡的稳定性和涡破裂机理研究；旋涡与激波和声波的相互作用；涡动力学实验研究和旋涡的定义与表征。特别应该重视以下两方面：

1. 动边界处的涡动力学特性及其控制的研究。因为除了湍流问题之外，固定边界处的涡动力学问题已得到多年的深入研究，取得了众多研究成果。而对动边界涡动力学的理论、计算和实验研究则十分欠缺。这一问题的突破将带动整个流体力学学科从主要研究相对静止不动的对象转向研究自然界和工程领域大量存在的动边界问题。

2. 超声速与高超声速流中的激波、旋涡、声波相互作用、稳定性和共振的研究。这一研究不但可将涡动力学扩展到可压缩领域，而且将对国防、航天、航空中的一些关键技术问题的解决发挥重要作用。国际上在这方面的研究刚开始起步，因此抓住学科发展的有利时机，可望在该方向上取得一些突破性进展。

小结

在过去的几年中，涡动力学取得了许多重要进展。随着机理研究的深入和面对越来越复杂的工程应用，越来越多新问题出现在我们面前，其中最复杂、最困难和最紧迫的任务是建立动边界涡动力学理论，发展高精度、高效率的动边界数值计算方法和运动物体动边界实验新技术，开展超声速与高超声速流中的激波、旋涡、声波相互作用、稳定性和共振的研究。同时，将已有研究成果应用于解决国家需求和工程实际中提出的关键问题也是涡动力学研究者所面临的重大课题。

致谢：感谢吴介之教授和陆夕云教授的讨论和建议。

高速水动力学

何友声、鲁传敬、刘桦

上海交通大学

引言

运载器的高速化是人类社会进步的标志之一。与空中和陆上相比，提速最慢的是水中运载工具，主要受阻力太高的牵制。阻力大致与速度平方和介质密度成正比；空中的运载器向宇空发展，介质密度趋于零；陆上运载器的表面绝大部分与空气接触；而水中运载器的表面则主要与水接触，水介质密度比空气的大 800 倍，提速有困难。正是在这样的背景下，高速水动力学及其相关的科学问题受到越来越密切的关注。

研究现状及重要科学问题

（一）自然空泡流及其稳定性

随着速度的增加，水中运载器表面空泡的产生已难以避免，空泡流成为 20 世纪 60~70 年代的研究重点。这些研究基于二维势流理论，自由流线理论和速度图法。三维翼型和轴对称体的空泡流问题大都采用奇点法求解。原苏联学者对低空化数下轴对称细长体空泡流的研究采用的是小参数法，包括奇异摄动法，取得了许多近似解析结果。

自然空化在特定范围内会出现流态脉动，有二种典型形态：一种是空泡末端的抖动，并有少量汽泡局部溃灭。这类脉动对物体运动影响不大；另一种是空泡末端出现回射流或其他原因引起了空泡断裂，断裂部分向后移动以云雾空泡团的形式消失，未断裂部分则孕育成长到再断裂，循环不息。对于这一类脉动积累了较多的二维翼型试验结果，并提出断裂频率的 St 数约为 0.2，它与翼型、雷诺数、空化数和攻角等无关，国内试验结果显示 St 数为 0.135 左右。关于轴对称体的空泡脉动以致断裂的研究还很少，这类脉动对工程设计有较大影响，有待进一步弄清。

近些年，水下射弹模型试验的速度越来越高，美国的试验高达 2500~5000m/s。这时空

化数已低至 $\sigma \approx 10E-4 \sim 10E-6$, 空泡的长径比可达到数百, 完全处于稳定的自然超空泡状态。但是一旦射弹在空泡区域内有不稳定的运动, 使弹肩、弹体或弹尾与空泡界面相擦, 必然引起强烈的反弹, 射弹在空泡内有颠覆、翻滚、或来回碰撞的可能, 弹面的升力甚至会出现迟滞环, 对射弹的运动稳定性控制带来严重威胁, 因此亟需加强这方面的研究。目前水下高速运动的研究, 多半在水中声速以下的范围。近声速和超声速运动方面的试验与理论研究还有大量工作要做。

(二) 通气空泡流及其稳定性

由于人工通气能促成超空泡流, 从而获得减阻效果, 因此一度停滞的通气空泡流研究顿成热门。国外的研究偏重于通气空泡的减阻实效、稳定性和流态模拟。国内于 20 世纪末即开始探索自然空泡与通气空泡的相关性, 嗣后对空化器后的自然空泡与通气空泡的共同作用开展了多方位的试验研究和数值模拟。研究表明利用通气空泡减阻是可能的, 但空化器与通气位置、通气方向、通气量的协调配合至关重要; 通气量对超空泡流的形成存在不稳定区段, 有阶跃现象。这说明自然空泡流与通气空泡流相互作用的机理尚需进一步澄清; 数值模拟中还发现通气空泡流的水气界面会出现失稳, 并以波动形式向后传播。这种波形界面虽然早有提及, 但有说服力的研究结果不多, 有待深化。国内近年来对轴对称细长体通气空泡流开展了不少研究, 包括通气空泡的形态特性、非对称性、稳定性、重力效应以及空化器形状对空泡外形的影响等; 实验研究发现, 通气空泡流的阻塞效应十分严重, 对试验数据有明显影响。对于通气空泡流而言, 当前最迫切的在于弄清空化器激发的自然空化与不同通气方式的通气空泡之间相互作用机理、流态特征、通气量和通气方式对形成超空泡流的控制, 以及通气空泡流的失稳机制与调控等。

(三) 高速出入水

由于水深变化和重力效应的存在, 出入水过程始终属于非定常流动。低速出水仅与自由液面兴波有关, 一般认为基础研究已较成熟, 故鲜有论文发表。高速出水时航行体有附体空泡存在, 接近和穿出水面时, 附体空泡剧变和溃灭并使航行体受到脉冲压力和强干扰。目前在这方面公开发表的论文甚少。出水过程不仅使阻力骤降, 而且会产生附加推力, 这也是海豚出水表演时能跃离水面很高的一个原因; 工程问题中对附体空泡如何溃灭及所产生的影响持有特别的兴趣, 这些都有待于进一步研究。

物体入水问题自从 von Karman 和 Wagner 就水上飞机水面降落所做的开创性工作以来, 得到较为广泛的研究。它涉及船体砰击、空投鱼雷入水、救生艇抛落、跳水运动等。研究入水问题的困难在于: (1) 触水后, 物体湿表面随时间变化和待求; (2) 自由液面剧烈变化, 产生射流和飞溅; (3) 水、气、固三相接触线处有奇性; (4) 高速入水的后阶段有通大气的空腔(或称空泡)尾随, 随物体潜深增加, 空泡出现面封闭或深封闭甚至多次封闭, 很复杂。现有的研究工作可分为两大类。一类是从 Wagner 理论出发, 研究入水初始阶段作用在入水物体上的冲击力。结果表明在小斜升角条件下用一阶等价平板代替入水物体是可行的; 有的应用渐近匹配展开方法求得入水冲击阶段的解析解; 有的研究了平头物体高速入水时水体压缩性对流动的影响。过去的大量工作处理二维垂直对称入水, 三维问题是近年来的研究重点, 但多半以小偏角为前提, 大偏角三维入水还远未解决。另一类是研究高速物体入水后阶段的有关问题, 这涉及空泡封闭及相应的水弹道。国外积累有大量试验数据, 并开展了不少研究, 国内在这方面也取得了一些成果。随着新船型和大型快速船的开发, 对船体砰击研究提出了新的需求, 研究弹性结构入水的流固耦合问题已成了另一个主要方向。目前在基于完全非线性势流理论的流固耦合数值计算方面取得了一些进展。此外, 带空泡的物体入水、包括近声速和超声速入水的研究应予充分重视并加以积极推动。

(四) 高速水动力学的数值模拟

数值模拟是解决高速水动力学问题的有效手段。国际上已有多种较成熟的应用软件。美国 Penn State Univ. ARL 的学者们受 ONR 的委托自 1998 年起编制了 UNCLE-M 程序, 进行了大量计算, 它以三维、匀质、多相、不可压 RANS 方程为基础, 并考虑到质量转换, 即连续方程中包含源项, 可计及液态和汽态之间的相变。该程序先对方程组进行预置处理以提高数值计算的收敛性和精度, 是迄今比较成功的一个程序, 但计算工作量很大, 非启用巨型机难以支持其运行。乌克兰科学院的 IHM 近年来编制了 SC_Design 的程序包, 其中包含 SCAV、STAB、PULSE 等程序, 用来计算轴对称体的空泡形状、受力、运动状态、优化设计等, 有良好的用户界面和动画显示, 但其理论基础是空泡截面独立扩张原理和一些半经验半理论公式, 因此仅可应用于工程近似设计, 难以探索高速流动机理。国内也自行开发了一些软件。开始时主要基于势流理论采用边界元法, 空泡末端则采用 Kinnas 等的闭合模型, 后者显然是一种经验性的近似。近来, 开始在充分利用商业软件的基础上作进一步开发, 如利用 FLUENT、CFX 等软件通过 UDF 进行二次开发, 取得了较好的效果。

总之，超空泡流动涉及到多相、湍流、相变、通气、可压缩性和非定常等复杂情况，在数学建模、数值方法、网格生成、计算机软件研制和开发方面都需努力提高；建立更加符合物理本质的空泡流模型，发展高效、高精度的数值计算方法和网格生成技术，开发平行运算技术和利用巨型机资源是非常必要的。

（五）高速水动力学的试验设备与测试技术

高速水流及空化试验过去都在各类循环式空泡水洞及减压水池内完成的。水洞的空化数下限多半设计在 0.15~0.20。对自然超空泡流而言，空化数通常低于 0.15，因此常规空泡水洞难敷其用。还有一批所谓的高速水洞，工作段截面都很小，也难以承担超空泡流试验。近年来美俄乌等国学者公布了一些特殊试验设备、装置、测试方法及其试验结果。设备分两类，一类是封闭式圆洞或矩形截面洞，洞的一端装有发射器。另一类为开敞式的长水槽或长水池，池端也装有发射器。模型前进动力藉弹射或弹射加自航。前者无法实施等速试验。通气超空泡流试验目前多半在常规的循环式空泡水洞中进行，其缺点是循环水流中聚气量和气泡越来越多，使试验难以为继。因此通气空泡试验最好利用重力式水洞或暂冲式水洞，这是值得进一步研究的问题。空泡流的测试技术除了常规的测速、测压、照明、摄像、高速摄影外，现在常采用内置式传感器。但对于复杂多相流的速度场、涡量场、湍流场、压力场、含汽量场、含气量场、剪切力、气泡尺寸等的测定，都远未解决，这方面的试验技术的改善和开发需要投入相当多的力量。

小结

以上就高速水动力学的基础研究发展现状作了简要评述，根据工程需求，提出一些急需解决的问题。海洋占地球表面 71%，海洋内航行器的高速化是必然趋势，它已成为流体力学学科前沿研究的热门之一。由于理论储备不足，技术手段欠缺，迄今国内外的研究还囿于初步的数值模拟和定性预报的层面，缺乏有力的机理阐明和深入的基础性试验研究与探索。因此，有大量研究工作要做，以便为发展水中高速航行器提供坚实基础。

高超声速空气动力学

姜宗林、俞鸿儒

中国科学院力学研究所

引言

在高超声速空气动力学中，空气介质的微观变化改变了宏观流动规律，强烈影响了飞行器绕流的物理特征和改变了飞行器设计的基本原则。高超声速流动从物理本质上来讲：空气介质的非平衡热力学状态导致了由经典物性方程描述其热力学参数的困难；介质微团的热化学反应尺度突破了气动实验的相似性准则；气体介质本身的振动激发、解离、甚至电离等微观变化通过介质热力学状态的变化与宏观的高超声速流动产生了强关联；具有电离特性的流体与飞行器表面产生相互作用。另外，高超声速流动特有的薄激波层、高熵层、低密度和黏性相互作用等独特流动物理现象更加增加了高超声速流动理论分析、数值模拟和实验研究的复杂性。

高超声速科技已经成为 21 世纪航空航天领域的制高点，新一代空天飞行器可作为未来的商用飞机，实现洲际旅行的朝出晚归；航天飞机可为未来太空开发提供一个更经济、更安全进入轨道的运载工具；高超声速武器具有突防能力强、反应快速、具有精确打击和机动作战的能力。高超声速科技的突破将对一个国家科学技术和国民经济的发展、综合国力的提升将产生重大影响。

研究现状及重要科学问题

（一）高超声速流动的实验技术

为开展空天飞行器气动力/热方面的相关研究工作，从 20 世纪 60 年代起世界各国相继研制了一些先进的高超声速实验设备。主要有两类：一类是自由活塞驱动高焓激波风洞，如美国加州理工学院的 T5、法国 DLR 的 HEG。另一类是爆轰驱动高焓激波风洞，如中国科学院力学所的 JF-10、美国 NASA 的 HYPULSE (GASL)。这些高焓流动模拟设备为研究高超声速流动研究提供了必要的模拟手段和一些重要的实验数据。最能代表国际研究水平的要算

HEG与T5风洞上的实验工作。如1984年发表的Eitelberg等人应用HEG风洞有关研究结果的主要结论还是说HEG设备与测量仪器正处于发展阶段，正在增加对高超声速流动规律的认识。Olivior 1995年发表的Hornung等人T5风洞上的有关工作，得到了一些有意义的结果。他们用CO₂验证驻点区激波脱体距离的双标定律；发现了5°尖锥表面边界层转捩雷诺数随总焓提高线性增加；在研究激波/激波相互作用时发现真实气体效应使得热流增强的激波投射区域加宽。由于高超声速实验模拟的困难，HEG与T5风洞提供的数据还是十分有限的。但是这些研究结果虽然是初步的，却是很具有启发性的，它突显了高超声速空气动力学研究的重要性。研究的主要困难在于能模拟的高超声速流动实验时间太短，流动的定常性差，气体介质的热力学和动力学状态与希望模拟的飞行条件有差距，实验气流区域过小不足以研究化学反应尺度对模型实验结果的影响。例如：日本国家航天实验室的HIEST能提供的实验时间为2ms，但是储室压力变化高达20%~30%。中国科学院力学所的JF-10高焓激波风洞应用新型爆轰驱动器，能提供时间为3-6ms左右的实验气流，储室压力变化也不大，代表了高超声速流动模拟技术的最新进展。但是JF-10激波风洞所提供的高超声速流动的热力学平衡状态尚需要确认。

高超声速流可以粗略地划分为：(1)马赫数5~10的流动主要应用于高超声速推进系统、研究超声速燃烧机理；(2)马赫数10~20的流动主要应用于各种大气再入飞行器、研究高超声速流动气动力/热规律和气动物理现象；(3)马赫数20~30的流动主要应用太空探测飞行器、研究低密度气体的非平衡流动。上述各国发展的高焓流动设备主要模拟第2类高超声速流动。由于第1类流动要求模拟大尺度和长时间；第3类流动则必须模拟高总焓和高马赫数，目前还没有看到适用的模拟技术报道。

(二) 高温空气热化学反应机制

为了描述高温空气的热化学反应机制，已经提出了许多物理模型：如涉及到振动-置换反应耦合和振动-平动能交换过程的Laudau-Teller模型；通过耦合因子修改化学反应速度公式来考虑振动对离解反应的影响的Hammerling-CVD模型；Treanor和Marrone的CVDV模型同时考虑了离解反应对振动的影响；Park提出了建立在经验拟合曲线基础上的双温模型来描述振动-离解耦合关系，双温模型考虑了非平衡导致离解速度的降低以及振动能的消耗，不过振动能的损耗是任意的。Knab建立了CVCV模型，考虑了振动和两种反应的耦合关系。Zeitoun提出了非优先的双温模型耦合系数，Séror改进了其源项以保证相容性，建立了耦合

系数的 CVDEV 模型。由于激波后非平衡区的振动温度低于平衡振动温度，振动能较小，因此离解反应的速度比较低。同时由于振动能的激发，导致离解反应更容易发生，因此会消耗部分振动能，导致振动松弛过程减缓。Olejniczak 对 3 种振动——离解反应模型进行了数值模拟，计算表明它们能够精确地预估脱体激波距离，但振动温度曲线存在差异。半个世纪来关于高超声速流动热化学反应机制的模化已经取得了很大进展，但是这些模型都不同程度地带有各自的经验性、局限性和不确定性。所以，关于高温气体热化学反应机制的研究，进一步提出不依赖于实验数据的物理模型是非常重要的，验证模型时所应用实验数据的不确定性是必须评估的，怎样才能有效地验证物理模型更是应该认真考虑的。

高超声速流动“复现”和测量方面的困难与局限性以及美国 X 计划开展飞行实验耗费的巨大费用凸显了高超声速流动数值模拟研究的重要性。所以，开展高温气体热化学反应机制研究，提出更准确的物理模型，发展高超声速流动模拟平台，对于推动高超声速科技发展和学科研究是具有基础性意义的。

（三）高超声速流动的滞止区域

高超声速滞止区的气动热预测一直倍受重视，在 20 世纪 60 年代早期，来自美国两大科研组织的科技人员受命发展解析方法和实验设备来研究超轨道速度飞行器滞止点的热流率规律。经过努力工作，他们独立给出了各自的研究结果。尽管结果的差别是非常明显的，但是两组科技人员声称各自的研究结果都是计算和实验符合良好，然而符合物理规律的结果只可能有一个。进一步研究表明：产生差别的原因在于他们的实验测量结果只反应他们各自实验设备模拟的高超声速流动规律：其计算结果都受制于应用的物理模型，而物理模型又受到其依据的实验数据的影响。X-15 风洞实验表明飞行器周围的流场大部分为湍流，而飞行实验表明这个流场主要表现为层流，来流扰动是产生差异的主要原因。尽管飞行实验结果表明第二研究组的成果更可信，但是他们对比研究中反映出方法论方面的问题是应该引起重视。

对于高超声速飞行器，热辐射已经成为影响气动热力学环境的一个主要因素。为发展具有预测热辐射能力的方法，必须研究非平衡热化学反应机制，这包括辐射能转换机理、激波层内辐射能的吸收和再辐射。这种研究要求对于控制热辐射现象的基础性物理和化学机制有深入了解，而不幸的是这种机制目前还不清楚。高超声速飞行器的热防护系统被认为是和推进系统并列的两大关键技术，而滞止区具有最恶劣的气动热环境，是防护系统中的重中之重。

（四）高超声速边界层转捩

超声速边界层转捩是气体动力学研究的一大难题，而高超声速边界层转捩由于气体热化学反应更显示其复杂性。随着高超声速飞行器的发展，对于高超声速边界层转捩的研究要求更深入、更迫切。超声速边界层转捩可以导致热传导加剧，热烧蚀率增加，飞行器头部形状变化加速，在转捩点下游形成宏观的粗糙度，这种粗糙度更进一步加剧了湍流对流热传导。2003年美国的一个技术委员会曾建议把超声速边界层转捩作为国家项目开展研究。

目前应用不同的预测方法和实验模拟得到的边界层转捩时雷诺数和局部马赫数关系的差异之大是惊人的。原因在于有太多的流场参数都不同程度地影响着超声速边界层转捩：如局部流动马赫数、表面冷却速率、单位雷诺数、飞行器头部钝度、高熵层发展、局部横向流动、飞行器物面粗糙度、表面突出物、质量射流等等。另外高超声速流动存在解离和电离现象也影响边界层转捩。在考虑有无热传递的情况下已经作了大量的超声速和高超声速流动边界层转捩实验，但是还没有得到适当的半经验模型可以用来精确地预测边界层转捩。最近的研究结果还表明，风洞噪音也影响边界层转捩，而且这种影响几乎存在于所有的高超声速实验结果中。由于缺乏对于实际飞行环境的了解，合理的自由飞行转捩马赫数的理论预测几乎是不可能的。

一般来讲，所有的边界层转捩和湍流理论模型本质上都是半经验的，这就意味着计算结果至多与计算模型依据的实验数据的确信度是等价的。如果由于风洞扰动和其它原因，实验结果的确信度出现问题，那么计算结果也具有同样的问题。这个难题表明对于高超声速边界层转捩研究我们需要本质上更基础的物理模型，这种模型应该不依赖于实验数据，而仅仅依赖于控制方程和流体物理机制。更进一步讲，由于诸多因素的影响，高超声速边界层转捩的风洞和飞行实验数据都具有不确定性，那么更大困难是如何验证一个很好的边界层转捩模型。所以，几十年的研究表明人们关于高超声速边界层转捩有了一定的认识，但是边界层转捩的研究依然是任重道远。

（五）高超声速流动的激波/激波相互作用

高超声速飞行器由于激波/激波相互作用可能引起灾难性的后果。1967年10月X-15A-2的飞行实验已经揭示了这个问题。考虑飞行器的复杂结构，Edney指出有6种激波/激波相互作用模式。研究发现III型和IV型激波相互作用产生的超声速射流能导致热传导率急剧

增加，在激波冲击区域内传导率可以有量级的变化。Keyes 和 Hain 指出：激波干扰出现的热流变化也可能出现在机翼前沿和飞行器控制面区域。随着带有吸气式发动机的高超声速飞行器发展，Gaitonde 和 Shang 注意到：发动机进气道预压缩面的飞行器前体产生的斜激波作用于进气道下唇口处的弓形激波可能产生激波相互作用。由飞行器前体边界层分离产生的斜激波也可能和进气道下唇口激波冲击，形成三激波相互作用，引起更严重的热传递问题。

激波/激波相互作用可能导致高超声速飞行器热防护系统出现严重问题，使得飞行器设计常采用更保守的估计来预防这种气动热力学现象。保守估计将导致热防护系统过重，降低了飞行能力，使得现代高超声速飞行器的发展更为困难。

小结

以上简述了高超声速空气动力学的一些重要研究进展，列举了几个具有基础性意义的研究方向。可以预言这些问题的研究进展将对高超声速科技关键技术的突破起着重要作用。高超声速空气是现代空气动力学的前沿学科，有着国家长期发展的战略需求背景。我国关于高超声速空气动力学的研究尚缺乏深度，不适应高超声速科技发展。所以重视、强化高超声速空气动力学研究是非常必要的。

稀薄气体动力学

沈青、樊菁

中国科学院力学研究所

引言

稀薄气体动力学是空气动力学的一个重要分支。在高空当分子平均自由程与飞行物体尺度相仿佛时，或当物体尺度十分纤细分子平均自由程在常压下同样和物体特征长度相当时，都要采用稀薄气体动力学的方法。欲了解航天飞行器在高空的气动力热和微机电系统（MEMS）中气体的流动规律都需要研究和发展稀薄气体动力学，这使得空气动力学这一分支成为前沿的重要的学科。现代稀薄气体动力学的研究是从钱学森的开创性的工作开始的。按照 Kn 数（ λ/L ，分子平均自由程与流动典型尺度之比）的大小，稀薄气体动力学分为三大领域：滑流领域（ $0.01 < Kn < 0.1$ ），过渡领域（ $0.1 < Kn < 10$ ），自由分子流领域（ $Kn > 10$ ），其中过渡领域是稀薄气体动力学研究的核心的也是最困难的课题。其困难在于要求解带有碰撞项的积分微分 Boltzmann 方程，而实际的问题还往往包含了化学与热力学非平衡。为了求解过渡领域的问题，国际上发展了线化 Boltzmann 方程方法，矩方法，模型方程方法，有限差分方法，间断纵座标方法，积分方法，以及直接模拟方法等等，已开始能解决一些实际问题。由 G.A.Bird 发展起来的 DSMC 方法是一种直接模拟气体中发生的各种过程的方法，已能模拟多维复杂外形并包括气体内部的各种化学、热力学及辐射等过程，其结果并得到微观细节和宏观气动力实验的验证，是公认的能够解决航天中遇到的实际问题的方法。

在国内已发展了有热化学非平衡效应的 DSMC 方法，计算一些外形气动力和羽流污染等问题；提出了基于 Boltzmann 模型方程的统一算法，已求解了一维激波、二维圆柱、三维复杂外形问题并推广于计算微槽道流动计算；应用位置元概念发展了三维绕流直接统计模拟的通用软件，用来求解实际外形的气动力和污染问题，并发展了信息保存法（IP 方法）以用来模拟 MEMS 中低速气体运动的问题，克服了 DSMC 方法求解低速问题时遇到的巨大涨落引起的微小信噪比的困难；并开始用 DSMC 方法研究卫星在空间遇到的污染问题。

研究现状及重要科学问题

（一）过渡领域的求解

对于从自由分子流到连续介质的整个过渡领域的求解，并且要能够包括热、化学、辐射非平衡效应的计算，无疑是稀薄气体动力学研究的最重要的方向。直接求解 Boltzmann 方程，求解 Boltzmann 方程的模型方程，间断纵坐标方法等在向解决多维复杂外形计算方面都取得很大进展，但是在把化学等非平衡效应引入计算之中还有很大的困难。而解决过渡领域的包括热、化学、辐射非平衡效应的气动力热计算问题，是航天事业的迫切需求。美国哥伦比亚号航天飞机（STS-107）在其第 28 次飞行返回大气层时，在得克萨斯州达拉斯附近约 61km 的高空解体。而导致哥伦比亚解体的气动加热和结构破坏正是发生在约 107~92km 的高空，处在稀薄气体的滑流领域。Gallis 等人用 DSMC 方法模拟了这样高度上的未破坏航天飞机的流场和热流以及在假设机翼受损情况下机翼内部的流动，给出了哥伦比亚当时所处的热环境，所得结果与宇航局进行的羽流工程方法的考查结果一致。说明 DSMC 方法在宇航气动计算方面的重要地位。

建议我们应该发展各种类型的求解过渡领域的方法，有所创新。方法要能包含热、化学、辐射非平衡效应，以满足国家航天事业发展的需求。

（二）微尺度流动

20 世纪 80 年代开始的 MEMS 加工制造和应用是高科技发展的前沿。其中的流动的空间尺度为微米量级，时间尺度为微秒量级。气体在其中的流动一般进入了滑流领域，而微槽道，微型泵，微型阀门，微型喷管中的流动会进入过渡领域。DSMC 方法是处理这一领域问题的合适的方法，但当系统中的流动速度很小时，信息噪声比十分小，从而引起统计模拟的困难。其他一些方法，如线化 Boltzmann 方程方法，加滑流边界条件的 NS 方程方法，模型方程方法等，广泛用于微流动模拟。力学研究所发展的 IP 方法已用来模拟微槽道流动，真实尺寸（1 000 μm ）硬盘读写头薄膜空气支撑问题，方腔流动及一些外部微流动问题。Sun 和 Boyd 发展了新的现象论的 IP 碰撞模型，成功解决了热 Couette 流动问题。他们还发展了 IP 和 NS 方程的耦合算法并成功用于有厚度微平板气动性能研究，并基于动量和能量守恒方程，提出了完善 IP 速度和温度更新模型的理论途径。此思路最近的发展，为 IP 方法

在有温度变化情况下更好的应用打开了大门。用方法解决一些实际工程问题并将方法推广于有温度变化的情况有实际的需求和意义。引言中提到的统一算法，已被推广于计算微槽道流动计算。

建议继续发展适用于过渡领域微尺度气体流动方法，是稀薄气体动力学的又一有实际意义的研究方向。

（三）稀薄等离子体的模拟

等离子体技术在受控热核聚变、空间探索、天体物理、气体放电、喷气推进等领域有着广泛的应用。电推进技术是用电加热、电磁力对等离子体加速形成射流产生推力，有高比冲、小推力、小体积、电能源无需氧化剂等优点，在航天领域有着独特的需求，在国外已广泛应用，是我国应加紧发展的一种技术。对于电推动系统的特性和其产生的羽流污染特性的研究都需要模拟稀薄等离子体。为此可用连续介质和直接模拟两种途径。

Oh 等人将 DSMC 方法和 PIC 方法[23]结合起来提出所谓 DSMC -PIC 方法，DSMC 用来模拟等离子体中粒子的碰撞，PIC 计算等离子体自电场对带电粒子的作用。方法广泛应用于电推进器羽流场的计算。最近力学研究所用该方法模拟了高速等离子体的羽流。

建议我国应加紧发展电推进技术和稀薄等离子体的模拟技术。

（四）化学反应、等离子体效应、辐射影响、壁面效应

现在的航天等高科技领域对于流体力学或空气动力学的需求已经不限于介质不发生变化的情况，航空与火箭发动机、电推进、超燃发动机、等离子体隐身、卫星姿控与污染等高新技术领域的空气动力学计算都要包括热、化学非平衡、催化效应、等离子体效应、辐射影响、壁面效应等等。

建议对于这些效应的深入研究，发展连续介质的和从自由分子流到连续介质整个过渡领域的带有这些效应的流体力学的实验及模拟计算方法是空气动力学界面临的重要课题。在有关学科教学和研究方向的安排上都应加以调整。

小结

稀薄气体动力学因其在航天领域所应用的场合是空气密度低的高空，气动力、热之值很

低，而在国内受到不够多的重视。随着航天事业向载人、登月和建造航天站的发展，稀薄气体动力学的作用就变得愈益重要，这可从哥伦比亚号的失事发生的高度和随后的模拟计算窥见一斑。发展稀薄气体动力学要注意过渡领域的求解，尤其是带有热化学非平衡效应的和微尺度的流动，稀薄等离子体的实验和模拟。一般来说，空气动力学要比以往更加深入地对于包括热、化学非平衡、催化效应、等离子体效应、辐射影响、壁面效应的实验和模拟技术进行研究。

多相流

林建忠

浙江大学

引言

多相流指的是两种或两种以上、相同或不同化学成分物质的固体、液体和气体系统的共同流动。自然界中很多现象与多相流相关，如风沙迁移、雪雨降落、泥石流、岩浆流动、微粒扩散、油气运移等；多相流同样也普遍存在于化工、能源、水利、石油、制造、航空航天、环境保护、生命科学等领域所涉及的问题中，如流化床燃烧、物料输送、水流中泥沙沉积、油—水分离、喷雾冷却、粉末喷涂、火箭尾气、污染物扩散、血液流动等。

多相流体力学的研究目的是获得流场中各个相的速度、压力、温度、组分浓度、体积分数、几何尺度等物理量的空间分布和随时间变化的特性；弄清相与相、相与流动系统边界的相互作用；进而掌握相内、相与相、相与边界之间的动量、热量、物质的传递。

研究现状及重要科学问题

通过对近两年发表在国际多相流杂志和主要国际多相流会议上的论文分析表明，研究离散相单个动力学特性以及多个之间相互作用的占 15%；研究连续相流动结构和离散相之间相互作用的占 17%；研究两连续相之间的界面作用、相间转换、分离与混合的占 13%；研究非常规连续相和离散相的占 9%；研究微流动区域或者微尺度离散相的占 8%；研究多相流实验方法的占 10%；研究数值模拟方法的占 8%；研究各类模型的占 5%；与各种工程应用结合的研究占 15%。多相流研究中重要的科学问题可归纳为以下几个方面。

（一）受连续相流场特性制约的离散相动力学特性

20 世纪 60 年代末在单相剪切湍流中发现了拟序结构，80 年代国际上就出现了拟序结构流场中离散相运动特性的研究，国内在 90 年代也有了相关研究。现在这个问题仍旧是研究热点。其研究内容主要包括离散相在拟序结构作用下的运动、分布及其聚集现象，在此基础

上建立离散相 Stokes 数与离散相受拟序结构影响程度的关系，以及连续相与离散相的混合与拟序结构的关系。

（二）离散相对连续相特性的影响

离散相对连续相的作用通常是在连续相方程中增加一源项来体现，离散项对湍流连续相的影响非常重要，目前已有一些结论，如气固两相流中，大颗粒激发湍流，小颗粒抑制湍流，然而大小是相对的，离散相是激发还是抑制湍流，取决于离散相的尺度和流场最小涡的尺度之比。而气液两相湍流比较复杂，气泡是增加或抑制湍流尚无定论。近年来，已出现离散相对连续相拟序结构影响的研究，由于拟序结构一般是大幅度结构，离散相对其影响的机理与小尺度涡结构不同，目前这方面的研究还不充分。

（三）离散相之间的相互作用

离散相的碰撞是影响离散相分布的重要因素。自 20 世纪 90 年代起，国际上有关碰撞问题的研究逐渐增多，提出了一些不同的碰撞模型，但是得到实验验证的很少。在理论模型研究方面，主要是用分子运动理论来建模，从而得出离散相的碰撞规律，但所得结果往往缺乏普适性。而实验方面，随着实验手段的改进，相关的研究逐渐增加，比如用高速流动显示和 PIV 技术对粒子间的碰撞进行直接测量，给出碰撞率的拟合公式。

（四）多相湍流场及稳定性

拉格朗日框架是先模拟出连续相湍流场，然后求解大量离散相的运动，经平均得到其统计特性，双向耦合则再进一步考虑离散相对连续相的修正。该研究的关键是连续相脉动速度的确定，目前从统计量中反求单个脉动量的方法不完善，用到的大多是二阶统计量，实际上高阶的平坦因子和偏斜因子也要考虑。欧拉框架是建立各相的雷诺平均运动方程，然后采用必要的湍流封闭模式进行求解，该领域的进一步深入还有赖于单相流湍流模式研究的突破。稳定性研究方面，一是研究离散相的体积分数、扰动速度、离散相与连续相的速度比等因素对连续相稳定性的影响；二是研究将多相流视作单一混物流场的稳定性。目前国际上在稳定性研究方面，基本局限于线性稳定性分析，只有少数的弱非线性分析。

(五) 多相流场数值计算方法

数值计算方法主要有基于连续相雷诺平均 NS(RANS)方程的数值模拟、大涡模拟、直接数值模拟。对 RANS 的数值模拟很普遍,但模式的选择至关重要;直接数值模拟还只能用于低雷诺数和几何条件相对简单的流场;大涡模拟综合了以上两种方法的长处,但由于连续相和离散相的特征尺度差异较大,离散相对连续相的作用需通过合理的模型体现到计算网格上,即在亚格子尺度模型上还有待于完善。近年来出现了一些新的数值模拟方法,如蒙特卡罗方法;将连续相和离散相融为一体的格子玻尔兹曼方法、拉格朗日乘子/虚拟区域法等。

(六) 超常离散相多相流

离散相的超常主要指的是非圆球和小尺度。非圆球离散相多相流在如纺织、造纸、环保、化工、复合材料、制药、食品加工等领域有广泛应用,目前大多都采用等效表面积来体现非圆球效应,并以此给出阻力系数的修正公式。但是要对非圆球粒子进行较精确的刻画,必须给出粒子的取向分布,因而要增加描述粒子取向分布的方程。国内外虽有相关研究,但仅局限于圆柱和椭球粒子。离散相的小尺度指的是直径大于 1nm 而小于 1 μ m 的粒子,它常见于大气污染物以及材料、化工、药品、食品等产品的生产过程中。研究这类粒子的运动除了要考虑特殊的 London-van der Waals 力、屏蔽静电力、布朗运动导致的脉动力外,还要考虑因新颗粒产生以及颗粒间聚并所导致的总质量密度、总数密度和粒径分布的变化。这是一个较新的研究领域,着重点应放在粒子的动力学模型上。

建议

(一) 基础研究方面

引入新的数学物理方法,揭示相界面动力学的本质属性;离散相之间的碰撞规律及其对连续相的影响;多相湍流场湍流封闭模式的完善;超常颗粒的动力学模型;数值模拟新技术的改进;发展局部测量技术,获取更广泛、系统的实验数据;激波诱导的多相流场中,粒子尺度对流场的影响。大粒径粒子流特殊的能量和传递机制导致的具有振动分离、拱形结构、斜坡崩塌等现象的机理。

（二）应用基础与应用研究方面

微粒容易沉积在人的呼吸道，引发和加剧呼吸道疾病，要研究空气中微粒的分布及其吸入气管后的动力学特性。

随着对太空探索的进一步深入，要加强对微重力下管道内多相流动流型的转换、压降和传热系数变化的研究。

风沙流中的“风沙电”现象影响着风沙运动，而带电风沙流中沙粒荷质比的一般规律以及风沙流与风沙电场的互馈影响还有待进一步研究。

此外，还有污染物在大气与水环境中的沉积与控制；气力和液力输送中的高效输送与防堵防磨；汽水、气固分离器中的高效分离；核反应堆的废物排放和处理；核沸腾传热过程的控制；高效燃烧和减少燃烧污染；采矿和冶金过程中的旋流分离和运输、粉尘爆炸的预防和控制；多相流叶轮机械的节能与防磨；大塔径、高径比鼓泡塔的优化设计；产液气井的改善；油气水多相管流段塞流的控制；血液的循环与凝固；可持续发展能源系统中各部件中的流动和传热等。

小结

多相流的普遍性、重要性和复杂性，决定了它在流体力学学科中占有重要的地位。迄今为止，多相流的基础、应用基础和应用研究虽然取得了大量的成果，但仍旧有很多机理没有揭示、很多问题没有得到解决。我国的多相流研究已经有了几十年的历史，部分研究方向虽已达到国际先进水平，但与美国、日本、法国、德国等国家相比，总体水平上还有差距。因此，多相流研究仍旧是我们国家今后一个时期内需要重点关注和加强的领域。

非牛顿流体力学

朱克勤

清华大学

引言

近代流体力学的发展极其迅速，主要标志之一是研究对象从牛顿流向非牛顿流开拓，由于一系列新的问题进入视野，给人以登高远望的感觉，有“欲穷千里目，更上一层楼”的意境。非牛顿流体在流动时会出现一系列不同于牛顿流体的流动特性。从理论研究的角度，非牛顿流体力学是一门非常具有挑战性的学科。单就建立形形色色的非牛顿流体的本构方程而言，包括引入随流坐标系在内所得到的变换关系，就远比牛顿流体复杂。物理学家、化学家、生物学家、力学家和许多行业的科学家和工程师都表现出对非牛顿流体的浓厚兴趣。始于 20 世纪 20 年代的非牛顿流体力学，相对有几百历史的牛顿流体力学而言，还是一门相当年青的学科。美国 Gulf Publishing Company 在 20 世纪 80 年代陆续出版的巨著“流体力学大全”(Encyclopedia of Fluid Mechanics)共有 12 卷：其中卷 5“浆液流技术”、卷 7“流变学和非牛顿流”和卷 9“聚物流工程”专门介绍非牛顿流体力学的问题，其中既涉及非常数学化的基础理论，也包括在工程中出现的重要应用。

研究现状及重要科学问题

(一) 复杂流体的本构关系

随着科学的发展，人们已不满足于将研究的对象限制在牛顿流体的范畴。从火山爆发产生的熔岩到洪水带来的泥石流，从管道中煤水浆到大漠中的流沙，我们需要面对形形色色的复杂流体和它们奇特的流动现象。近年来，复杂流体成为当今流体力学研究的热点问题之一。在 2002 年 9 月美国 NASA 发布的关于流体物理的研究公告(NRA, 2002)中，一共列出了 6 个研究课题，其中第 1 个课题就是复杂流体的研究。

从连续介质力学的角度，研究复杂流体，最关键的问题就是建立它们的本构关系。非牛顿流的一些经典的本构模型，比如幂律模型、宾汉模型和粘弹性流体的 Maxwell 模型等，无

法描述某些复杂流体的力学特性，需要不断加以开拓。探索各种复杂流体的新本构关系是进一步研究它们流动特性的基础。

关于复杂流体本构关系的研究成果有，应力偶流体模型适用于流场中存在应力偶的复杂流体；微极性流体模型可适用于需要单独考虑流体中微粒元旋转效应的复杂流体；该领域最具科学意义的开拓当属利用油壶和弹簧连接形成的具有分形特征的网络结构，它们所比拟的黏弹性流体的本构关系需要使用分数阶微积分的概念。分数元模型和分数阶导数的 Maxwell 模型就是两个典型的例子，它们的出现不但对非牛顿流体力学的基础理论有重大意义，也同时对数学发展起着推动作用。

（二）壁面滑移效应

由于 Knudsen 数的增加，壁面滑移效应在微流动研究中非常重要。近年来，“Nature”和“Science”陆续载文，高度关注非牛顿流在固壁处的滑移现象及其产生的效应。实验观察表明，一些高分子聚合物流动时，会在固壁处出现滑移现象，不能使用粘性流体的无滑移边界条件。这一现象的存在会导致流动速度剖面、稳定性和转捩特性发生变化。

目前在非牛顿流的壁面滑移效应的研究热点有：在各类经典流动问题中，分析滑移边界条件导致的速度剖面的变化。比如，得到了低雷诺数条件下，幂律流体在扩散槽道流（Jeffery-Hamel 流动）中满足滑移边界条件的 1 阶摄动近似解。与无滑移的情况相比，在壁面附近出现了局部逆流。具有滑移边界条件的流动稳定性分析也是非牛顿流体力学关注的研究热点问题之一。比如在 20 世纪曾对管道 Poiseuille 流的稳定性进行过深入的理论分析和实验研究，在有壁面滑移效应的情况下，关于流动稳定性是增强还是减弱了的问题，目前发表的一系列论文中仍然给出了相互矛盾的结果。目前在理论分析中使用较多的滑移边界条件是 Navier 条件及其高阶近似，微流动中出现滑移边界条件可以通过气体分子运动论进行分析。非牛顿流中出现滑移边界条件的物理机制远比微流动中 Knudsen 数效应导致的边界滑移要复杂，从微观上对其进行分析、从理论上给出定量的关系，是现今非牛顿流体力学关心的一个重要科学问题。

（三）流动稳定性

流动失稳是湍流产生的前兆之一。流动稳定性的研究具有重要意义，一个理论解是否能

够存在，需要进行稳定性分析。由于稳定性理论分析的困难，至今的研究成果主要限于线性稳定性分析的范畴。在非牛顿流体力学中，稳定性研究主要关注流体的非牛顿特性对稳定性产生的影响。

当两种互不相融的流体分层流动时，黏性低的那种流体会处在高剪切区域，也就是在管流中处于临近管壁的部分。因此，在非常黏稠的液体中加入少量粘性低的液体以减少流动的阻力是一种可行且有效的方法。类似的例子有原油在长距离管道输送时掺入少量的水，多层流动的例子还有混合挤压工艺。这些流动流量被流动稳定性，特别是界面间的不稳定性所限制。这种不稳定性会造成减阻效应降低或高报废率。

对管道内多层流的稳定性研究，外面的润滑层由宾汉流体构成，由于宾汉流体在剪切应力低于某一屈服临界值的时候呈现固体的性质，而且管流中剪应力从轴心向外线性增长，因此对于具有足够大屈服剪应力的宾汉流体来说，会有一个包围内部流体的环形区域在流动中不变形。剪应力在屈服面达到屈服应力，而屈服面在两种流体交界的界面外的某处。在界面上，剪应力低于宾汉流体的屈服应力。如果在此处施加一个无限小的线性扰动，那么扰动剪应力也为无限小，无法打破包围内部流体的活塞区的未屈服状态。因此，用屈服应力流体作润滑剂的一个重要物理特征是液面交界处未发生变形。这样一来，界面间的不稳定性就被完全消除了。他们在比较一般的情况下建立了稳定的条件，该分析方法可以作为工业生产中稳定性分析的一种实用的方法。

（四）智能流体

智能流体是一种有重要工业应用背景的人工合成的非牛顿流体，是电流变液和磁流变液的总称。对于智能流体研究的热潮始于 20 世纪的 90 年代，由于它的优良性能和潜在的市场前景，多年来吸引了来自力学、物理、化学和材料学等各个领域的学者。自 1987 年在美国召开第一届国际电流变液会议以来，已举行了十届国际电（磁）流变液会议，其中第九届会议于 2004 年在北京成功举行。作为一种智能流体，它的主要特点是力学特性可以通过外加电场或磁场进行控制。也就是说，由于流体中的悬浮粒子的链化效应，它在瞬间可以从牛顿流体变为黏度很大的类固体，如果需要的话，也可以迅速从类固体复原为牛顿流体 (Nature 2003)。智能流体的出现，为非牛顿流体力学开辟了一个新的研究领域。

智能流体的本构方程采用广义的宾汉模型。与经典宾汉模型不同的是，其中屈服应力不

是一个常数，它是外加电场或磁场强度的函数。从这一点上看，它是一种非常特殊的非牛顿流体。问题的复杂性在于，在流场的理论分析和数值模拟中，不但需要考虑和计算流场中屈服面的位置，也要同时考虑在施加外加电（磁）场的情况下，屈服面位置随时间的变化和对壁面摩擦力产生的影响，以便能为电（磁）流变器件的设计提供必要的力学数据。

小结

综上所述，在新世纪，非牛顿流体力学将发挥越来越重要的作用，面对石油、环境、化工和食品工业中遇到的各种复杂流体，不断给非牛顿流体力学提出了一系列新的研究课题。目前国内对非牛顿流的研究工作已经有了良好的基础，并有广泛的国际合作，取得了一系列研究成果。由于非牛顿流体力学是一门相对年青的分支学科，在基础研究和应用研究两个方面都还存在许多需要解决的问题，是流体力学学科今后相当长时期内需要重点关注和加强的领域。

计算流体力学

傅德薰、马延文

中国科学院力学研究所

引言

采用数值计算方法利用计算机求解描述流体运动的数学方程组,揭示流体运动的物理规律的学科称为计算流体力学(CFD)。CFD的研究方法是根据实际流动中提出的物理问题,研究计算方法,并用于解决实际问题。CFD的成果应主要体现在解决实际流动问题的能力上。

随着实际需求的逐渐扩大和深入、计算技术的飞速发展和高速巨型并行计算机的出现,近年来,CFD有了突飞猛进的发展。在20世纪末以前CFD主要是针对大尺度宏观流动,如航空航天飞行器超声速绕流问题,研究对激波和间断面具有高分辨率的计算方法。该方法在20世纪末基本得到解决,使得已可利用巨型计算机,采用合适的网格生成技术和有效的计算方法,给出各种飞行器的超、高超声速无黏和有黏流动的宏观复杂流场的数值模拟结果。

从上个世纪末开始计算流体力学的研究工作主要针对多尺度复杂流动的正确模拟,开展了高精度方法研究,先后提出了高阶紧致型的差分格式、高阶WENO格式、高阶Galerkin方法、高阶混合型格式、高阶余量分布法、高阶有限体积法等。这些计算方法用于数值模拟了各种多尺度复杂流动,给出了一批典型流动的不可压和可压湍流直接数值模拟结果,促进了湍流数值模拟研究的进展。人们用高精度方法模拟气动声场,研究了湍流及其转换过程中产生噪声的机理,且用于数值研究了化学非平衡流和燃烧流,为非定常多尺度多物理复杂流场的研究打下了基础。直到今天,高精度计算方法仍是国际上CFD前沿性的研究课题。2006年10月在比利时召开的第四届国际CFD学术会议上,该方面的研究内容约占总论文的1/3。在网格生成技术和微流动的直接数值模拟研究方面也有长足的进步。近年来国际CFD研究工作的另一个特点是大量CFD的研究成果已用于解决各种工业中的实际问题。特别在宇航工业的发展中起到了重要作用。目前NASA所使用的超级计算机Columbia有10240个处理器,62 teraflops的峰值(1 teraflops=1万亿=flops),且将继续增大其性能。文中还指出,

NASA 近期所需求的是比现有 Columbia 高 4 倍性能的计算机(包括内存,应用性能的扩大,和更宽的网络技术)。

从 20 世纪末开始,国内 CFD 的研究工作也非常活跃。针对多尺度复杂流动的正确模拟提出了可捕捉激波的紧致型差分格式、群速度控制方法和高精度混合格式。这些方法可用于非定常复杂流动、可压和不可压湍流的直接数值模拟和大涡模拟,给出了湍流从层流转捩到湍流的数值模拟结果,研究了拟序结构的发展规律,为湍流机理及控制的研究打下了良好的基础;在非定常非稳定流的研究中,以数值模拟为基础研究了非定常升力产生的物理机制;研究了先进飞行器的气动布局,为现今飞行器的设计提供了依据。在网格生成技术的研究方面,针对多体绕流非定常复杂流场,发展了多块网格及结构和非结构混合网格等生成技术,正确模拟了复杂非定常流动的发展过程。针对飞行器绕流中流体与结构的干扰问题,发展了高精度、高可靠性的流-固耦合算法,研究了流-固耦合效应及其控制问题。国内 CFD 研究工作,计算方法的研究工作基本上达到了国际先进水平,但在物理问题的研究方面与先进国家相比有较大差距。特别是将 CFD 的成果用于解决实际流动问题方面有更大差距。国内在 CAE (Computer Added Engineering 计算机辅助工程)和计算机虚拟工程方面已开始发展起来,但所采用的 CFD 软件基本上都是国外引进的。

研究现状及重要科学问题

多尺度和多物理流动是很多重要实际流动中的基本物理现象。例如,在航空航天工业中未来先进飞行器要求具有高速、高机动、高隐身和长距离航行的能力。这里提出了跨领域(大范围的马赫数和飞行高度)的湍流及其绕流对气动性能的影响、高焓高超声速的流场和真实气体对飞行器气动特征的影响、发动机中的燃烧流等问题;在可控热核聚变中,多介质的界面与强激波干扰的不稳定性问题、激光、等离子体及电磁场效应对热核聚变的影响问题;等离子体与磁流体在流动控制的应用;汽车碰撞时油料的行为和油箱破裂的效应等都是多尺度、多物理的复杂流动。另外,在船舶工业,环境科学等的流动中多尺度多物理流体都是急需解决的问题,也是推动高技术发展的基础。这些问题是强非线性问题,CFD 是解决这类问题的重要工具。为此要求提出新的理论和具有高精度高分辨率的数值模拟方法。在此基础上发展能正确模拟多物理耦合过程、多尺度时空发展规律的方法,使能给出有较高精度的数值模拟结果。另外,应尽快将研究成果用于解决实际问题。为此要求 CFD 成果软件化。

虽然 CFD 研究工作始于 20 世纪 60 年代初,但仅在近 10 年左右的时间内,其理论和技

术对工程领域产生了巨大的影响。以航空工业为例，CFD 用于飞行器的设计可以给出地面试验无法得到的数据，大大减少了风洞试验。美国战斗机 YF-23 采用 CFD 设计，比 YF-17 减少 60% 风洞试验量，而且改进了人们对物理现象的认识，改进了设计，从而改进了飞行器的性能减少了成本，减少了冒险性。NASA 在飞行器的设计中，高性能计算（或高端计算）是起着主要作用。在航空航天领域中飞行器的设计过去是以地面实验为主，辅以有限的数值模拟。而今是以数值模拟为主，以关键的实验数据为验证。

计算流体力学推动了宇航工业、汽车工业、船舶工业、环境科学、海洋工程等的发展，成为提高科技自主创新的重要手段。然而，目前国际上所推出的 CFD 软件都仅限于模拟宏观流动，国内实际工业问题中所采用的软件基本是由国外引进的。在这些软件中所采用的计算技术比最新高性能计算方法要迟后 6~10 年。

CFD 的高性能计算机技术（包括合适的数学模型，先进的数值计算方法，快速大内存的并行计算机，及数据密集计算等方面）是科学技术创新的基础之一，也是保持国家经济竞争能力和国家安全的基础之一。2005 年美国总统顾问委员会提交给布什总统的报告中明确提出，要发展计算科学来确保美国的竞争能力。我国与美国相比，计算流体力学的研究现状还相差甚远，应当给以足够的重视。

小结

根据以上所提出的问题，建议重点开展以下几个方面的研究课题。

1. 针对多尺度多物理流体运动，开展高精度、高分辨率和高效的数值模拟方法研究。该类复杂流动的正确模拟，要求数值方法对小尺度物理量有较高的分辨能力，且能正确模拟多物理过程的耦合及其干扰。为此要求数值方法具有小耗散和小色散误差。高精度方法具有这样的特征。

2. 在以上工作基础上，研究多尺度流动专用计算方法，并用以模拟实际流动问题。多尺度流动存在于众多领域，如，以不同尺度及相互干扰的非定常非稳定流所表征的湍流、声场及三维非稳定流等。又如，跨尺度跨领域(如马赫数、高度等)的流动以及微尺度流动等。

3. 开展多物理流体运动的数值模拟方法研究。正如前面所述，这是很多重要实际流动中的关键问题。在国内这方面的 CFD 研究还很不够，特别是对非定常多尺度多物理流体运动的高精度高分辨率计算方法的研究和国际上的研究水平相差还较大，已成为解决一些重要

科学技术问题的瓶颈。并将所研究的计算方法用于数值模拟化学反应流、多相流、数值热核聚变的数值模拟等。

4. 混合方法和网格生成技术的研究。为了进一步增强 CFD 研究成果解决实际问题的能力，必须进一步发展混合方法的研究。例如，流-固耦合、振动与声的耦合、高速冲压下的结构力学和热力学耦合的数值模拟方法。开展对于湍流大涡模拟与工程湍流模式耦合（如美国为正确模拟带多分离区的整机绕流问题已开展近 10 年的 DES-Detached Eddy Simulation）方法的研究。

致谢： 特别感谢李椿萱院士，沈孟育教授，叶友达教授，周维江教授，樊菁教授，杨国伟教授为本文所提供的国内 CFD 研究材料。

动力学与控制学科发展专题报告

英文摘要

In the last decades, the research on the dynamics and control grew rapidly in China. The Chinese scientists have made great progresses in understanding the nonlinearity and complexity in science and technology during this period, in particular, in the global bifurcations and chaos of high dimensional nonlinear systems, dynamics and control of nonlinear stochastic systems, nonlinear dynamics of time-delayed systems, nonlinear dynamics of non-smooth systems, nonlinear dynamics of axially moving viscoelastic strings and belts, firing activities and synchronization of neuronal systems, nonlinear control, rotor dynamics. The purpose of the present report on the development of dynamics and control is mainly to reflect research trends in the dynamics and control field covering nonlinear dynamics, stochastic dynamics, stability and control, multibody dynamics, analytical dynamics, nonlinear oscillations and applications to engineering, aeronautic and astronautic dynamics. This report provides both reviews of established results in the recent years and speculations about future advances in the coming years, which may produce a profound influence on the nonlinear science in China, or even the world over.

一、前言

从 20 世纪 80 年代以来,动力学与控制学科(Dynamics and Control)无论在其研究深度和广度上都发生了重大的变化。从经典定义的角度来看,动力学与控制学科主要研究牛顿力学的一般原理和一切宏观离散系统的动力学现象。由于连续介质力学问题可以经过离散化而变成有限自由度系统的问题来处理,并且现代动力学理论可以直接应用于连续系统,因而动力学与控制理论中的原则和方法也同样适用于连续介质力学。与此同时,动力学与控制学科不断的从现代控制理论中吸取有用观点和方法。因此,上述结果使得动力学与控制学科的研究领域和适用范围有了很大的扩展。从现代的观点来看,动力学与控制学科主要研究动力学的基本原理以及一切离散和连续系统的动力学特性与控制问题。而非线性动力学是动力学与控

制学科的主要研究方向。

动力学与控制学科同其它力学学科、工程科学和自然科学的进一步融合与交叉，如与固体力学、流体力学、生物力学、机械工程、航空航天工程、车辆工程、船舶工程和土木工程等的融合与交叉，与计算机科学和控制科学的结合，以及与数学和物理学等基础学科的相互借鉴，使动力学与控制学科在理论和应用上的研究方向和研究内容均产生了重大的变革和创新，在某些研究方向上孕育着重大的进展和突破。在此基础上，新的分支学科不断涌现，学科更加交叉和复合，研究和实验手段更加现代化。例如，与固体力学和流体力学等学科交叉和复合后产生的研究分支和方向有流固耦合系统的非线性动力学，新材料结构和连续体的非线性动力学，粘弹性结构的非线性动力学，悬索结构的非线性动力学；与航空航天工程交叉产生的航天动力学；与车辆工程交叉产生的车辆动力学；与机械工程和电子工程交叉产生的微机电系统动力学、机械柔性结构系统的非线性动力学、机械设备的远程故障诊断和网络智能监测等。在此基础上，还有一些在各个研究分支基础上所提炼出的带有共性和根本性的研究方向，例如 Hamilton 和 Birkhoff 系统动力学，高维非线性系统的全局摄动法、全局分叉和混沌动力学，非光滑系统的非线性动力学，时滞系统的非线性动力学，多柔体、刚体和液体耦合系统的动力学等。在国家战略需求和工程科学研究过程中提出的大量动力学与控制问题，以及学科前沿和学科自身发展所提出的需求，使动力学与控制学科既面临着紧迫的任务，亦使动力学与控制学科焕发着青春和活力。

二、动力学与控制学科的特点

目前动力学与控制学科主要有三个大的研究领域：(1) 非线性动力学；(2) 多体系统动力学；(3) 分析力学。除此之外，航空航天动力学、运动稳定性与控制理论也同样正在成为动力学与控制学科的主要研究领域。

真实动力系统几乎总是含有各种各样的非线性因素，诸如机械系统中的间隙，机械系统和结构中的干摩擦，新型材料结构中的非线性本构关系，结构构件的大变形，机械-电磁耦合产生的非线性，控制系统中的元器件饱和特性，控制策略非线性等等。通常在结构刚度比较大和运行速度较低的情况下，线性系统模型可很好地提供对真实系统动力学行为的逼近。然而，这种线性逼近在许多情况下并非总是可靠的。随着航空和航天工程、先进装备和车辆工程的发展，要求结构和部件尽可能的轻量化，运行精度和速度高。并且这些结构的工作环境较为恶劣。在这种情况下，结构和部件往往产生大变形的振动，被忽略的非线性因素

有时会在分析和计算中引起无法接受的误差，使理论结果与实际情况有着失之毫厘，差之千里之别。特别对于系统的长时间历程动力学和瞬态动力学问题，即使略去很微弱的非线性因素，也往往会在分析和计算中出现本质性的错误。因此，非线性动力学理论的发展为其它工程科学提供了解决方法，同时也使非线性动力学成为有着广泛应用前景的工程学科之一。

分析力学既是数学、力学、物理学这三大学科的基础，又是许多新兴学科的生长点。分析力学不仅是研究现代科学与技术中多种复杂问题的精美工具，而且其运动规律的独特表达形式远远超出了经典力学的限制。分析力学的理论与方法不仅在现代力学和物理学中占有重要的位置，而且为工程学科乃至高新技术的发展提供了强有力的理论支撑。Lagrange 开创于 1788 年的《分析力学》在科学上如此重要，以至于时隔 200 年之久，其经典原著又于 1997 年被译为英文。伴随着科学与技术进步的时代步伐，两百余年来分析力学一直与时俱进。特别是近 40 年来，由于微分几何的进步、流形上大范围分析的发展、对称性理论的渗透、数值计算方法的运用，促使分析力学的研究和发展发生了根本性的变化，把动力学理论推进到本质上的近代分析力学新阶段。分析力学在为工程科学提供理论支撑的同时，与工程技术一直相互依存、相互促进。在现代工程科学和高新技术领域中，存在大量与约束相关的实际问题，它们的数学模型和运动方程依赖于用分析力学的方法去描述、用分析力学的理论去建立。分析力学的研究与发展，应当面向工程实际，一方面从工程中提炼出动力学问题及其模型，然后运用并发展各种方法加以研究解决；另一方面注重基本方法的研究，从一些迫切需要、但又束手无策的问题着手，寻找新的突破点。后一方面分析力学现代发展的薄弱环节。

航空航天动力学主要研究航空和航天飞行器在动态交变载荷下的动力学与振动行为。航空航天器所承受的载荷通常是复杂的极端状态下的动态载荷，对动力学与控制学科提出了大量的需求。随着现代航空航天技术的高速发展，所要求研究的内容更加广泛，已不仅限于传统力学的范畴，在机械电子、导航制导和控制等分系统的结构设计、控制设计、飞行控制、安全保障等的飞行器设计，以及诸如微纳米技术等新技术的应用，都提出了复杂的动力学问题，对动力学与控制学科提出了超前发展的需求，成为学科发展的强大推动力。

运动稳定性理论简称稳定性理论，从理论上讲，运动稳定性与渐近稳定性的研究均可以转化成一新的扰动系统的平衡点的对应性质的研究。稳定性理论的奠基性贡献是俄国数学力学家李亚普诺夫 1892 年的博士论文《运动稳定性一般问题》，其英文译本发表在 IJC 为纪念该文发表百周年的专刊上。研究的特点从理论上在于概念的精确化与理论的完善，例如时变系统的相关研究，在应用上主要针对一些基本的力学对象进行研究，例如陀螺的稳定性等。

上个世纪四十年代开始由于控制科学的发展,使得李亚普诺夫的理论得到了巨大的发展。为了保证系统的正常工作,控制常采用闭环形式,即为了控制对象有期望的结果。从现代的观点看,由于计算机的小型化与性能的保证,开环与闭环控制均经过计算机来实现。因此,本质上讲控制作用的给定与控制器的设计均归结为一种算法设计。

综上所述,动力学与控制学科主要具有以下几方面的特点。

(1) 动力学与控制学科是与数学和物理科学结合的最为紧密的学科之一。数学新方法的提出和发展为动力学与控制学科的发展提供了一些基本方法,动力学与控制学科又为数学提供了实际应用的背景和典型的模型。动力学与控制学科与物理科学同样有着密不可分的联系,两者之间有许多方法和观点是相互借鉴的。

(2) 动力学与控制学科以研究离散和连续系统的力与运动关系为主,包括对所研究的对象和系统进行动力学建模、动力学分析、动力学预测、动力学设计、动力学控制、动态监控与故障诊断等。

(3) 动力学与控制学科呈现出多学科交叉与融合的发展趋势。近年来,随着工程技术的快速发展,提出了越来越多的多物理场耦合作用下系统动力学与控制问题,如固体、流体、热场、电场和磁场相互耦合的动力学与控制问题,这使得动力学与控制学科与固体力学和流体力学的界限越来越模糊。而动力学与控制学科的发展同样需要不断地吸收来自控制理论和系统理论的新方法、新成果和新观点。

(4) 动力学与控制学科是经典的基础学科之一,其尚未解决的主要科学问题都是难题。目前,该学科的基础研究和应用基础研究均以非线性问题、不确定性问题为主攻方向,以现代数学作为重要工具,并涉及到现代控制理论、人工智能等学科的最新研究成果。相对而言,动力学与控制学科基础性强、研究难度比较大,不易在短期内取得研究上的重大突破。

(5) 动力学与控制学科又是一门重要的工程科学,几乎与工程技术的各个领域相关联。在研究队伍中,除了从事基础研究和应用基础研究的力学家和应用数学家外,还有来自航空、航天、机械、车辆、船舶、土木、仪器、测试、控制等各领域的应用研究人员。因此,该学科研究队伍的严格界定比较困难。

三、研究历史回顾和发展

非线性动力学理论的研究和发展已经经历了一个多世纪,为了更好地了解非线性动力

学理论和应用的发展历程，非常有必要简要回顾一下非线性动力学研究和发展的历史。非线性动力学理论的发展大致经历了三个阶段：第一阶段是从 1881 年到 1920 年前后，第二阶段从 20 世纪 20 年代到 70 年代，第三阶段从 20 世纪 70 年代至今。从 19 世纪末起，第一阶段主要是定性理论的发展，主要的源动力来自对于天体动力学的研究，其主要的标志性成果为法国科学家 Poincaré 从 1881 年到 1886 年期间发表的系列论文“微分方程定义的积分曲线”，俄罗斯科学家 Lyapunov 从 1882 年到 1892 年期间完成的博士论文“运动稳定性通论”以及美国科学家 Birkhoff 在 1927 年出版的著作“动力系统”。由于工业和科学技术发展的限制，在这个阶段主要侧重于非线性数学理论上的发展。Poincaré 所提出的用于研究太阳、地球和行星之间相互关系的三体问题至今仍然是一个未解决的世界性难题。

第二阶段主要是非线性振动问题的定量方法研究的发展，代表人物有 20 世纪 30-40 年代的俄罗斯科学家 Krylov 和 Bogliubov，20 世纪 40-60 年代的乌克兰科学家 Mitropolsky，20 世纪 70 年代以后的美国科学家 Nayfeh 等等。在这个阶段，由于科学技术和工业发展的需要，Krylov 和 Bogliubov 二人提出并系统地发展了平均法。在平均法的基础上，Krylov, Bogliubov 和 Mitropolsky 三人共同发展了三级数法，也简称为 KBM 方法。Nayfeh 系统地发展和总结了多尺度方法，并给了在非线性和工程科学中的系统应用。许多科学家利用这些方法解决了大量的非线性振动和工程科学中的问题。在这个阶段中，随着一些新兴工业的发展，抽象提炼出的著名非线性系统和动力学模型，如 Duffing 方程、van der Pol 方程以及 Mathieu 方程等，这些方程至今仍被人们用以研究非线性系统动力学现象的一些本质特征。

从 20 世纪 60-70 年代开始，原来独立发展的分叉理论汇入非线性动力学研究的主流当中，混沌现象的发现更为非线性动力学的研究注入了新的活力，分叉、混沌现象的研究成为非线性动力学理论新的研究热点。俄罗斯科学家 Kolmogorov、Arnold、Melnikov 和 Shilnikov，美国科学家 Small 和 Morse 等数学家和力学家相继对非线性系统的分叉理论和混沌动力学进行了奠基性和开创性的研究。Kolmogorov、Arnold 和 Morse 三人提出了用于研究非线性可积 Hamilton 系统的 KAM 定理；Small 提出了用于描述混沌动力学的 Small 马蹄；Melnikov 开创性地提出了一种度量同宿或异宿轨道破裂后相互之间距离的方法，被后人称之为 Melnikov 方法；Shilnikov 提出了分析高维非线性系统空间轨线的方法，称之为 Shilnikov 轨道。美国科学家 Lorenz、日本科学家 Ueda 和美国科学家 Feigenbaum 等力学和物理科学家则在数值模拟中获得了重要发现，获得了被后人称之为 Lorenz 吸引子、Ueda 吸引子和 Feigenbaum 常数的重要成果。在 20 世纪 70 年代，美国科学家 Li 和 Yorke 提出了周期三意

味着混沌的判断准则。20 世纪 70-80 年代以后，美国应用科学家 Holmes、Guckenheimer、Marsden 和 Wiggins 等人则将分叉和混沌理论与经典的非线性振动理论相结合，发展成为现代非线性动力学理论。他们的杰出贡献使非线性动力学从 20 世纪 70 年代起成为一门重要的前沿学科。与此同时，随着航空和航天工程、先进装备和车辆工程发展的需要，一些工程科学家将非线性动力学理论应用于工程实际问题的研究中，如美国科学家 Rosenberg 提出了非线性模态的概念，美国科学家 Hsu 提出了胞映射方法，美国科学家 Mote 系统的研究了轴向运动弦线和轴向运动传动带的非线性振动问题，美国科学家 Moon 研究了机械-电磁耦合系统的非线性动力学，美国科学家 Nayfeh 系统地研究了柔性结构的非线性动力学，美国科学家 Sethna 应用分叉和混沌理论研究了非线性机械系统的分叉和混沌，加拿大科学家 Paidoussis 系统地研究了流固耦合结构的非线性动力学问题。

四、我国学者的研究成果

在非线性动力学理论研究和应用方面，我国学者在国际上得到了一些较有影响的成果，例如，最近几年有 3 个项目获得国家自然科学二等奖，有 3 个项目获得国家科技进步二等奖。主要在以下几方面做出了一些有影响的研究工作，具体包括：非线性随机系统动力学的 Hamilton 理论体系的建立、非线性鲁棒稳定性方面的系统研究成果、以 C-L 方法为核心的工程非线性动力学分析方法的提出、在航天非线性动力学方面的研究成果、在神经网络和非光滑系统非线性动力学方面的研究成果、在时滞系统非线性动力学与控制方面的研究成果、在高维非线性系统的全局分叉和多脉冲混沌动力学方面的研究成果、在转子系统的非线性动力学方面的研究成果、在轴向运动材料的非线性动力学方面的研究成果、在增量谐波平衡法及其在强非线性振动方面的研究成果、在碰撞振动系统的非线性动力学方面的研究成果、在机车车辆-轨道耦合非线性动力学和机车车辆悬挂系统中的非线性动力学方面的研究成果等。

最近 10 年来，我国学者围绕着解决所提出的关于分析力学学科发展的 18 个重要问题，做了大量的、卓有成效的研究工作，特别是在近代分析力学的几个重要方向上取得了进步、提高了国际承认程度。在以下几方面取得了进展，(1)Birkhoff 系统动力学；(2)约束力学系统的对称性与守恒量；(3)非完整约束系统几何动力学；(4)单面约束与摩擦、碰撞非光滑分析；(5)刚柔混合系统动力学与控制；(6)变结构系统的动力学与控制。我国学者取得的主要成果有：(1) 线性动力学对偶体系的提出以及在 Kluwer Academic Press 出版的专著；(2) 对非

完整系统和 Birkhoff 系统动力学所作的重要贡献以及在 Applied Mechanics Reviews (AMR) 上所发表的综述文章等；(3) 对于单面约束与摩擦、碰撞非光滑分析的贡献；(4) 在力学系统的对称性与不变量方面的研究成果等。

近二十多年，我国学者在柔性多体系统的建模理论与计算方法方面做了大量的工作。推出了不少可以处理柔性多体动力学问题的商业软件，国内如上海交通大学自主开发的 CADAMB。在刚柔耦合动力学建模理论研究过程中，我国学者放弃了国内外学者采用的一些假定，即引入“动力刚度项”的修正模式，认为造成零次近似耦合动力学方程缺陷的主要原因应该是在对柔性体变形运动描述时没有考虑大范围运动对其的影响。在变结构系统的动力学与控制方面，我国学者提出了描述一维散体结构在冲击载荷作用下分析方法，并给出了冲击波传播的性质和规律。在刚柔混合系统动力学与控制方面，针对具有大范围转动的梁、板构件，基于严格的理论分析模型，我国学者找到了其平衡态的位型以及可能产生的动态分岔行为。部分理论研究成果得到了实验验证。

五、今后的主要研究方向

工程系统的动力学建模、分析、设计和控制的一般理论和方法是动力学与控制学科的主要研究范畴，其总体发展趋势是高维(和无限维)、非线性、多尺度和多场耦合系统的动力学。具体地说，今后所研究的工程系统日益复杂，将包括各种非线性因素，机、电、磁、热和流等多场耦合因素，边界与结合部效应，微机电系统引起的尺度效应等。因此需要发展新的非线性动力学理论、分析与仿真技术来研究工程系统的大范围动力学特性，要基于对工程系统动力学的深刻理解来发展新的优化方法实现对系统的动力学设计，还要发展各种主动控制乃至智能控制来使系统获得所需的运动。非线性动力学中具有共性和根本性的一些前沿研究方向有以下几方面。

(一) 大型空天结构设计与运行中的非线性动力学问题

《国家中长期科学技术发展规划纲要》指出，我国将实施载人航天工程、高分辨率对地观测系统工程。这些工程以大型空间可展开结构为平台，并对展开形式、结构尺度、位形精度、振动水平等具有苛刻要求。以高分辨率对地观测系统为例，其天线是展开尺度达 20m 以上的柔性网架、或充气/硬化后尺度 50m 以上的薄膜结构，形面误差在 1mm 内，并要求适应复杂空间环境。这些指标比我国现有空间结构的指标高出数倍，而实现这些指标将必需

研究如下科学问题：(1)多维、非对称展开动力学与精确位形控制；(2)在轨动力学建模、非线性振动分析与控制；(3)低能耗、欠驱动条件下的瞬态与波动响应控制。

(二) 高维非线性系统的复杂动力学、全局分叉和混沌

高维非线性系统的复杂动力学、全局分叉和混沌动力学，是目前国际上非线性动力学领域的前沿课题，受到科学家们的广泛关注。然而目前研究高维非线性系统的复杂动力学、全局分叉和混沌动力学的方法还不是很多，对于高维非线性系统的全局动力学特性研究的还不是十分清楚。因此发展能够处理高维非线性动力学系统的研究方法是十分重要和迫切的。如何研究高维非线性系统的复杂动力学、全局摄动法、全局分叉和混沌动力学，对于解决工程实际问题至关重要。

(三) 时滞系统的非线性动力学与控制

时滞动力系统是描述振动控制、过程控制、远距离通信、激光、生物群体演化等众多动力学问题的模型，是典型的无限维动力系统。尽管对于常微分方程和偏微分方程所描述的非线性动力系统的奇异性和复杂性分析已进行了多年的研究并取得了一批可喜的成果，但当非线性动力系统含有时滞因素时，系统的解空间以及初始空间都成为无限维的，建立的数学模型是泛函微分方程。对于时滞非线性动力系统的稳定性分析，特别是失稳后的动力学行为的分析还没有成熟的、可直接应用的方法和理论，更谈不上数值计算方法。时滞非线性动力系统有着比用常微分方程所描述的动力系统更加丰富的动力学行为。

(四) 随机系统非线性动力学与控制

自上世纪六十年代起，国际上关于随机动力学的研究主要转向非线性系统，提出了一系列研究随机激励作用下单自由度强非线性系统以及多自由度拟线性系统的方法。随机动力学的研究引起了越来越多的国内外学者的关注，研究内容越来越广泛。随机动力学理论已经应用于物理、化学、生物、工程、经济、金融、网络等诸多领域。

(五) 大型飞机中的新型材料结构和连续体的非线性动力学

随着《国家中长期科学技术发展规划纲要》的发布和实施，我国将陆续启动一系列重大装备和工程建设计划，如：载人航天器和大飞机等。随着科学技术的发展，在许多实际问题中必须考虑复杂作用因素。例如，大量粘弹性材料的采用使得考虑温度场的作用成为必需；

智能结构的发展使得功能梯度压电材料成为必需;航天和航空飞行器研制时必须考虑高温气体对结构的作用,使得功能梯度材料成为必需。大型飞机中振动结构受到的复杂作用,使得非线性动力学分析变得异常困难。以新型材料梁、板和壳体结构为主要研究对象,发展分析新型材料结构在力、热、电和磁场的共同作用下非线性动力学的解析方法,发展相应的数值模拟算法,建立研究新型材料结构分叉和混沌动力学的理论框架。

(六) 极端状况下重大装备中的非线性振动与控制

随着我国经济的发展,一系列在极端状况下运行的重大装备将陆续建成并投入使用,例如,燃气轮机机组、大型飞机、空天飞行器、高速轨道交通系统、飞机发动机、超超临界发电机组、通讯卫星、核电装备、微电子封装装备等。上述重大装备在设计建造和运行使用过程中的高效性、可靠性、准确性、安全性对动力学与控制的研究提出了迫切需求。重大装备运行一旦不能满足动力学与振动要求,一方面可能出现难以预料的重大事故,对国家财产、人民生命安全和国民经济运行造成重大损失,另一方面则可能导致运行效率不高、寿命减少、精度降低等问题,导致重大经济损失。因此,开展对极端状况下重大装备的动力学与控制的研究对减少事故、保障安全、延长寿命、提高效益具有重要的理论意义和实际应用价值,而且开展这方面的研究符合国家的发展战略需求。这些重大装备所反映出的多场耦合、多尺度、多参数、非线性、快时变、复杂环境和复杂载荷等也为动力学与控制学科带来了很大的挑战和发展机遇。

(七) 复杂网络系统的非线性动力学

近年来人们对于计算机网络、通信网络、电力网络、生物网络、交通网络、经济网络、社会网络等网络系统开展了研究。每一种网络都有其自身的特殊性质,有其紧密联系在一起独特现象,有其自身的演化机制,但是由于都可以使用网络分析的方法,所以还有其共性。研究表明这些网络有很多相似性和突出的特性,因此网络是研究复杂系统的最基本模型。作为复杂网络研究的中心内容,对于复杂网络系统的拓扑结构、形成和运行机制、动力学行为、同步能力和抗干扰能力等问题的研究和解决具有重要的理论意义和实际应用价值。非线性动力学的方法在复杂网络研究中起着重要作用。

(八) 微/纳尺度系统动力学与控制

近年来,微机电系统(简称 MEMS: Micro Electro-Mechanical System)正走出实验室,成

为 21 世纪初的新兴产业。与传统机械和结构相比, MEMS 的研制过程更具有设计与制造一体化的特征。目前, 对 MEMS 的设计多还在器件水平。除了少数二维器件的设计外, 多数设计借助于 ANSYS 等商品化软件进行试凑。除了一些微加速度计的设计外, 多数设计尚属于结构静强度或机构运动学范畴。可以预见, 随着 MEMS 的实用化, 其动力学问题将日益引起人们的关注。例如, 对于微发动机中的运动部件、微惯导仪器, 必须从动力学角度去进行分析和设计。

(九) 分析力学的若干问题

在现代工程科学和高新技术领域中, 存在大量与约束相关的实际问题, 它们的数学模型和运动方程依赖于用分析力学的方法去描述、用分析力学的理论去建立。分析力学的研究与发展, 应当面向工程实际, 一方面从工程中提炼出动力学问题及其模型, 然后运用并发展各种方法加以研究解决; 另一方面注重基本方法的研究, 从一些迫切需要、但又束手无策的问题着手, 寻找新的突破点。(1)Birkhoff 系统动力学的理论和应用研究; (2)动力学系统对称性的应用研究—对称性约化; (3)非完整约束系统的动力学与非线性控制理论的结合; (4)动力学系统的保结构计算; (5)约束系统非线性动力学的研究。

(十) 弹性体-刚体耦合系统动力学与控制

对于弹性体-刚体耦合系统动力学与控制领域, 开展以下一些关键问题的研究。(1)提高对柔性多体系统动力学响应和失效预测能力的准确性和计算效率。(2)更好地同具体的工程问题相结合。(3)建立精确、高效的动力学模型。(4)充分利用现代数学的研究成果和飞速发展的计算机技术, 将现代控制理论应用于柔性多体系统动力学中以解决大型复杂柔性机构的控制问题。(5)在需要耦合分析的不同物理场中分析柔性多体系统动力学行为, 在设计优化中利用柔性多体动力学理论。(6)用试验技术来验证和促进多体理论的发展。

参考文献

- [1] 黄文虎, 陈滨, 王照林, 一般力学(动力学、振动与控制)最新进展, 北京: 科学出版社, 1994
- [2] 张伟等, 非线性系统的周期振动和分岔, 北京: 科学出版社, 2002
- [3] 陆启韶, 复杂系统的非线性动力学问题, 《力学 2000》(白以龙、杨卫主编), 北京:

气象出版社, 2000, 94-99

- [4] H. Y. Hu and Z. H. Wang, Dynamics of Controlled Mechanical Systems with Delayed Feedback, Springer, 2002
- [5] 朱位秋, 非线性随机动力学与控制 Hamilton 理论体系框架, 北京: 科学出版社, 2003
- [6] Chen Yushu, Leung Y. T., Bifurcation and chaos in Engineering, Springer-Verlag, London, 1998
- [7] 黄琳, 稳定性与鲁棒性的理论基础, 北京:科学出版社, 2003
- [8] 闻邦椿, 武新华, 丁 千, 韩清凯。故障旋转机械非线性动力学的理论与试验, 北京: 科学出版社, 2004
- [9] 马兴瑞主编, 动力学 振动与控制新进展, 北京: 中国宇航出版社, 2006
- [10] 梅凤翔, 约束力学系统的对称性与守恒量, 北京: 北京理工大学出版社, 2004
- [11] Mei F. X., Nonholonomic mechanics, ASME Applied Mechanics Reviews 53(11), p283-305, 2000
- [12] 洪嘉振, 计算多体动力学, 北京: 高等教育出版社, 1999
- [13] 赵跃宇, 梅凤翔, 力学系统的对称性与不变量, 北京: 科学出版社, 1999

附件

动力学与控制学科发展专题研究报告之一

非线性系统动力学

陆启韶¹、徐健学²、江俊²、洪灵²

¹北京航空航天大学理学院

²西安交通大学航天航空学院

引言

非线性动力学研究非线性系统丰富的运动模式和演化过程，是动力学与控制学科的重要组成部分，也是现代科学技术的重要理论基础。非线性系统运动的复杂性来源于多个方面，例如几何关系、本构关系、约束条件、拓扑结构、激励因素、耦合方式、时空尺度、演化机理等，它们都会带来复杂的运动模式。30 多年来，尽管非线性动力学对单自由度简单振动系统和低维映射系统的研究已经取得一系列重要成果，发现了大量新的非线性现象，提出并发展了基本的理论方法，但是面对在理论和应用研究中遇到的高维复杂系统问题往往束手无策，仍然缺乏有效的分析策略和手段。因此，复杂非线性系统研究已成为当务之急。

振动通常（狭义地）指物体（机械系统）围绕平衡点的往复运动，是固体具有弹性和惯性固有特征的表现。外界和环境的作用，系统又会发生有阻尼、强迫、参激和自激振动。分析采取离散或连续数学模型和方法。系统和环境一般是非线性的，这时振动就是非线性振动，其理论机理和动力学现象较线性情形远为复杂，理论与应用研究已成为广泛科学和工程学科前沿。

本文根据当前非线性动力学的研究现状和发展趋势，针对复杂非线性系统动力学与控制的理论和应用研究中的某些重要问题进行探讨和展望。

一、高维非线性系统的组合振动分析与控制

实际非线性振动系统通常是多自由度的，并且存在多种外界激励。除了由外部激励直接激发的主共振、亚/超谐共振模态之外，由于内共振和自参数共振还会引起与非线性项有

关的间接激发模态，并导致多模态相互作用，产生诸如饱和、跳跃、锁相、周期调制、混沌调制以及组合振动等复杂现象。近年来对多自由度系统的组合振动和模态相互作用动力学研究已经取得一些重要成果，并且扩展到梁、板、壳、弦线、悬索、传送带、流-固耦合结构等系统，涉及不同的本构关系（包括粘弹性材料、复合材料、智能材料等）、约束条件和控制方式，成为十分活跃的研究方向。但是，目前这方面的研究主要局限于具体问题，对于组合振动与控制的一般规律和分析方法仍有待于深入探讨。因此高维非线性振动系统的动力学分析和数值模拟是十分重要且难度很大的问题，当务之急是将动力系统理论、数值和实验等有机地结合起来开展研究。

二、非线性时变参数系统或时滞系统的动力学与控制

动力系统理论主要研究自治（时不变）系统的动力学行为。然而，在大量的力学、工程、控制、生物系统等实际问题中会遇到非自治系统，这里着重提及时变参数系统和时滞系统。

以往研究较多的时变参数振动系统主要是参数随时间作简谐变化的缓变系统，它们通常可以用适当的摄动方法处理，至于参数随时间作非简谐变化的一般情形研究很少。研究表明，参数时变对系统的动力学行为有很大影响，例如，定常分岔图一般不再保持，出现分岔转迁滞后或跳跃现象，振动对初值和参数变化规律有明显敏感性，记忆效应、双稳态、动滞后环、脉冲振动等。至于参数时变规律对吸引子、吸引域和安全盆的影响也很大。对于一般的时变参数振动系统，拟静态处理方法已不再适用，奇异摄动方法也有很大局限性。为此，应当加强对时变参数系统动力学的机理的定性和数值研究。

时滞系统动力学和振动是工程、控制、生物神经、网络等学科的核心理论基础。系统的运动同时依赖当前和以前一段时间的状态，由时滞微分方程，一类泛函微分方程表示。一个重要特点是，它的线性化方程的特征方程是超越方程，有无穷多特征根。是有高难度的理论前沿。许多力学、电学、控制、生物系统存在时间滞后现象，可用时滞微分方程、时滞微分-积分方程或差分方程描述。研究表明，时滞对系统的动力学行为有很大影响，即使很小的时滞量，也会导致与无时滞情形截然不同的结果。由于时滞动力系统是无限维系统，理论分析和数值分析的难度很大，目前大多数研究是对线性、单自由度、固定参数等情形进行的。在非线性的时滞系统方面，稳定性的主要研究方法有特征值法和 Lyapunov 泛函法；解的定性研究包括振动性、周期性、有界性、稳定性和渐近性等；分岔分析主要是 Hopf 分岔，对其

它分岔很少涉及；混沌研究大都是数值结果，其机理和判据的理论分析极少。因此，在非线性和时滞振动系统中，多自由度、多时滞、时滞参数等情形都是值得探讨的课题。此外，时滞状态控制、参数控制、鲁棒控制和最优控制等问题也是重要的内容。

三、非光滑系统的动力学与控制

非（分段）光滑系统是一类工程和应用科学中广泛存在的系统，在实际系统中往往存在碰撞、冲击、干摩擦、开关、阈值、脉冲控制等大量非光滑或不连续因素，它们主要是由约束条件、本构关系和控制方式决定的。传统的动力系统理论是针对光滑系统的，而非光滑系统带来了许多新的研究特点，例如向量场的不可微性或间断性导致的强非线性和奇异性，能量耗散机理的复杂性，参数测定的困难等，使得非光滑系统的动力学研究引起广泛兴趣。目前讨论最多的是有分段光滑向量场的系统和有刚性约束的脉冲系统。非光滑系统的振动是强非线性的，对它的研究，理论上，有助于发现新的动力学现象和揭示新的机理；应用上，有助于提高一些重大关键设备的性能和可靠性，如：轮轨间碰撞对高速列车的运行稳定性，铰接结构特性对航天器指向精度和姿态稳定性，大型和高速旋转机械（燃气轮机）静动件间碰摩对机器安全性等的影响。

非（分段）光滑系统在数学上可以用分段光滑的控制方程（常、偏微分或映射）辅以相应的转换边界来刻画。在控制方程存在的相空间中，可以划分出有限个子区域，在每个区域内，控制方程是连续甚至是（有限）光滑的。但在这些区域的转换边界上，相轨迹不连续或连续但非光滑（一阶导数不连续）。前者如恢复系数描述的碰撞振子，在碰撞面（转换边界）上速度发生“跳跃”而不连续；后者如分段刚度描述的碰撞振子，碰撞时，刚度发生变化但速度仍是连续的。

当前，非光滑系统中特有的“擦切”轨道分岔是研究的重点和热点。文献中，通常把转换边界上相轨迹不连续的系统的“擦切”轨道的分岔称为“擦切”分岔，而把转换边界上相轨迹是连续但非光滑的系统的“擦切”轨道的分岔称为“C一分岔”或“边界碰撞”。“擦切”轨道分岔会导致系统的定性性质发生突然的变化，甚至可以造成系统破坏。对于周期“擦切”轨道分岔已有大量且相对成熟的结果，通常是在所研究周期轨道邻域内构造低维的，连续而非光滑的Poincaré的映射，其雅可比矩阵有奇异性（多值和突跳）。周期“擦切”轨道分岔会导致周期轨道消失，或直接产生奇怪吸引子，或发生碰撞增加分岔。

今后需要进一步研究解决的问题主要有：非光滑系统的准确建模，如准确的碰撞和摩

擦模型；准确高效的计算方法，以处理多自由度、多碰撞和摩擦面的问题；在“擦切”轨道分岔研究上，确定“擦切”轨道局部周期轨道消失和存留的条件，探索保持周期“擦切”轨道的反馈控制方法；研究了准周期“擦切”轨道的分岔；开展在不同个数转换边界情况下，分岔类型和特点的研究和分类等。

四、同步、分岔和混沌的控制

同步是耦合振子系统的一种常见现象，在机械、电路、控制、生物系统中有重要意义。在历史上，同步研究只涉及振子周期运动的相位和频率关系。但是近年来，同步研究已经扩展到非周期运动，特别是混沌和随机运动；同步的含意也包括完全同步、相位同步、滞后同步、不完整的相位同步、广义同步、测度同步、随机同步等不同概念。此外，激励和噪声的形式对于同步也有不同的影响。在应用上，目前混沌同步研究以电路和信息系统偏多，其它领域仍然较少。因此，全面研究各个领域的不同类型的同步现象的机理、存在性和稳定性判据、实现同步的方法和实际应用，这是十分引人注目的课题。

随着研究的深入发展和实际应用的需求，人们进一步思考如何通过控制手段去改变以及利用分岔和混沌的问题。分岔控制的本质是对系统的奇异性加以控制和改造，通常包括下列内容：镇定不稳定的分岔轨道、调整分岔点位置、改变分岔类型或分岔轨道形式（例如控制平衡点和极限环的数目及定性性态）、引进新的分岔、优化分岔行为、通过控制分岔过程去进行混沌控制等。混沌系统具有极端敏感性和不可预测性，从而对控制中使用的扰动也十分敏感；混沌吸引子中稠密地嵌入了大量的不稳定周期轨道，可以在广阔的范围内实现控制。因此混沌控制具有与常规控制显著不同的特色和优点。混沌控制通常包括下列内容：抑制混沌的出现、镇定平衡态或周期运动、调整混沌吸引域、将混沌状态转换为指定的周期运动或其它混沌状态等。更进一步，还可以考虑无穷维系统的时空混沌控制问题。目前控制混沌方法的研究相当活跃，相继出现 OGY 法及其改进方法、延时反馈控制法、外力反馈控制法、脉冲控制法、自适应控制法、参数周期扰动法等。混沌控制在道路、通讯、光学、化学、生物、经济等领域的应用也得到重视。

五、网络系统动力学与控制

生物、信息、经济等领域存在更多、更复杂的非线性系统，对这些非传统交叉学科领域的非线性问题的研究极具挑战性。随着科学技术的发展，复杂网络的非线性动力学和控制成为迫切需要解决的问题，其中既包括信息和计算机科学领域的大型信息网络系统，也包括

大型电力网络系统、大型交通网络系统、生物信息网络系统、生态网络系统、经济网络系统。这些复杂网络系统都具有时空复杂性、协同性和统计性的特征，是非线性动力学研究向超大型复杂系统进军的重要突破点，也是非线性动力学理论与应用的又一个重要结合点。

生物神经系统是由数量十分巨大的神经元相互联结的极其复杂的多层次信息网络系统。神经元通过放电活动对信息进行编码，从而实现神经信息的产生、整合和传递，其中涉及输电脉冲串的产生过程、大量放电节律模式和复杂的突触连接方式、耦合神经元的同步、信息编码过程、噪声影响、以及神经电生理实验中发现的各种新现象等。至于大脑神经网络系统的感知、学习、思维、记忆等认知功能，以及联络和调节整个生物体活动的功能，更是典型的最复杂的非线性动力学行为，都有大量的复杂非线性动力学问题，且与传统的机电系统的非线性动力学特性有显著差别。

六、流体-结构(机械)相互作用下非线性振动问题-耦合非线性振动

流体-结构(机械)相互作用下非线性振动是广泛工程领域重要科学问题。涉及能源、核工程、航空航天、机械、土木和电气等学科，如透平气(汽)机、输液管道、飞行器机翼振动、机床切削过程、悬索桥、风力工程、水下结构、电缆和最近神舟五号火箭箭体纵振动和输液管内液氧流耦合振动等。流体和结构是连续体，服从各自动力学方程同时系统因连接处位移和力的条件，流场、位移、应变场相互耦合，产生复杂动力学行为和振动。

近五年，由于对工程和学科的重要性，按流体-结构(机械)相互作用、流体诱发振动、颤振、自激振动主题，重要国际期刊发表论文千篇以上，成为研究前沿。国内研究深度和广度较弱。

考虑流体非线性和壳几何非线性情形，充液壳容器半充液自由表面晃动波、振荡流导致参数共振、水下暂态声波激励、大振幅振荡、行波颤振等都是本质非线性振动。方法有 Donnell 非线性浅壳理论、分阶活塞理论等。输液管情形，有 Poisson、摩擦、接头三种耦合，管壁振动和液体压力脉动，多用水锤模型和方程，关联军机毁坏，大型发电站等需求。流体相对结构流动作用于结构的力会表现出负刚度和负阻尼性质，导致流弹不稳定性和自激振动。反应堆热交换器管阵内外流，风激桥梁悬索是重要实例。

颤振是流体流过结构表面所发生自激振动，线性理论，流速超过临界值结构失稳；非

线性理论，简单是由负刚度负阻尼和非线性项构成张迟振荡模型，维持极限环振荡。机翼颤振新课题，超声速伴随高温，机翼处于复杂热变形，动力学行为可以是稳态、气动热屈曲而动力稳定、极限环振荡、和混沌。偏微分方程结合 Galerkin 方法，转化为常微分方程，在非线性情形的，就可以用现代方法来分析稳定性、分岔和混沌。还有气动弹性模态法、非线性模态法、非线性有限元。悬索桥非线性分析，有多模态耦合，步步迭代。

由此可见，学科发展需要（1）直接给出空间连续系统（无穷维）复杂动力学和振动的分析理论和方法、数学新分支新成就（如惯性流形和非线性 Galerkin 方法等）的引入、或约化为高维离散系统，全面揭示新现象新机制（不出现于低维系统）；（2）涉及流体和固体两个学科的交叉，构成研究前沿。连同其工程重要性，形成重要科学任务。

七、结论

动力学与控制学科主要研究动力学的基本原理以及离散和连续系统的动力学特性与控制问题，其关键在于复杂的非线性本质和行为。非线性动力学研究的最终目的在于深刻揭示非线性世界的复杂性和多样性。我们要坚持理论分析、数值计算和实验紧密结合的优良研究传统，加强与实际应用的联系，重视年青学术队伍的建设，敢于开拓创新，一定可以在各个学科领域的复杂非线性系统的动力学和控制研究中做出重要贡献。

非线性振动理论和应用还有参激振动、内共振、振耦合问题与功率流方法、振动的主动和被动控制等重要方面。需要加强关注的科学问题有以下几点。

1. 科学和工程，关注振动核心是看振动是否发生剧烈变化和定性性质的变化。这涉及局部分岔、多稳态振动初值变动和全局分岔。
2. 连续系统振动直接全面分析理论；揭示连续系统和高维系统振动的新现象和新机制。
3. 特殊种类和跨学科问题，非光滑、时滞、随机、流固耦合。

随机系统动力学

朱位秋

浙江大学力学系

随机动力学源于上世纪初 Einstein 对布朗运动的定量研究,其后由于通讯、航空、航天、土木、海洋等工程的需求,诞生了随机振动与随机结构动力学学科,经许多学者的不断努力,线性随机振动理论已经相当成熟。自上世纪六十年代起,国际上关于随机动力学的研究主要转向非线性系统,提出了一系列研究随机激励作用下单自由度强非线性系统以及多自由度拟线性系统的方法。上世纪九十年代起,我国学者对多自由度强非线性随机系统的研究由 Lagrange 体系转到 Hamilton 体系,利用 Hamilton 系统的可积性与共振性,提出了预测响应、判定稳定性与分叉、估计可靠性及非线性随机最优控制的理论方法,形成了一个非线性随机动力学与控制的 Hamilton 理论体系。

近年来,随机动力学的研究引起了越来越多的国内外学者的关注,研究内容越来越广泛,据检索,每年以噪声为关键词的论文超过 16000 篇,随机动力学理论已应用于物理、化学、生物、工程、经济、金融、网络等诸多领域。特别是近 10 年来,随机最优控制理论在经济及金融领域的应用取得了许多重要的成果。今后特别需要从下列 8 个方面进行研究:

一、非白噪声、非高斯与非平稳随机激励的多自由度非线性系统的动力学

高斯白噪声是最简单的随机激励模型,实际的随机激励往往是非白噪声、非高斯与非平稳的,例如地震是典型的非平稳随机过程,随机脉冲列则是非高斯分布的随机过程。现有的绝大多数理论方法乃针对高斯白噪声激励而发展,对非白噪声、非高斯与非平稳随机激励下的多自由度非线性系统的动力学行为的研究很少。鉴于对非白噪声、非高斯与非平稳随机激励的多自由度非线性系统不能直接应用现有的方法进行研究,需发展一系列新的理论方法研究其响应、稳定性、分叉、可靠性及控制等。

二、无限维非线性随机系统动力学

多自由度系统通常是由连续系统经离散化得到,更精确的描述应该用无限维的系统模型,此外,有些常微分方程描述的系统(如工程中经常遇到的时滞系统)实际上也是无限维的,因此,研究无限维随机动力学系统具有重要理论意义与广阔应用背景。关于无限维非线性随机动力学的研究成果非常少,尚处于刚刚起步阶段,很有必要开展这方面的研究。可从研究较简单的时滞随机系统及具有孤立波解的随机系统入手,发展一系列新的理论方法。

三、高维 FPK、后向 Kolmogorov 以及 HJB 方程的近似与数值解法

扩散过程的转移概率密度由 Fokker-Planck-Kolmogorov (FPK) 方程支配,扩散过程状态变量处于某安全域内的条件可靠性函数由后向 Kolmogorov 方程支配,应用随机动态规划原理研究随机最优控制将导出 Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB) 方程, FPK 方程、后向 Kolmogorov 方程及 HJB 方程是研究非线性随机系统响应、可靠性及控制的最基本方程。当方程的维数很高时, FPK 方程、后向 Kolmogorov 方程及 HJB 方程的数值求解也存在很大的困难。因此,发展新的高效高精度的求解 FPK、后向 Kolmogorov 方程及 HJB 方程的近似与数值方法是具有很大挑战性的研究课题。

四、随机扰动对复杂动力系统分叉与混沌的影响

随机分叉是指由随机扰动引起的动态系统定性性质(如稳定性、拓扑结构等)发生的变化,用稳态概率密度形态的变化来定义的随机分叉一般称为 P 分叉,而用局部 Lyapunov 指数为零定义的随机分叉一般称为 D 分叉,对低维随机系统的随机分叉已有较多的研究,但对高维随机系统,由于计算 Lyapunov 指数非常困难,研究成果不多;另一方面,利用一维扩散过程的边界分类可详细研究一维扩散过程的全局分叉,但对高维随机系统的全局分叉尚无很好的研究方法。最大 Lyapunov 指数与随机梅尔尼可夫过程是判别随机动态系统是否产生混沌的主要指标,还可用胞映射法等定性研究随机扰动对混沌的影响,但总体来说,随机扰动对混沌影响的研究还很不成熟,有些结论甚至是相互矛盾的。区分一个时间序列是确定性系统产生的混沌序列还是随机时间序列仍是一具有很大挑战性的研究课题。

五、随机动力学系统的参数识别

工程结构的几何与材料参数都具有一定的不确定性,常常需要通过测量输入输出来估计参数值,现有时域法及频率法两大类识别系统参数的方法,频率法一般适用于线性及拟线

性系统,常用的有频谱分析法及小波变换法等;当系统非线性很强时,频率法无法精确预测系统参数,此时需用时域法进行研究,需结合现有非线性随机动力学理论,提出一系列非线性随机系统的参数识别方法。由于系统参数识别是力学中的反问题,是一有相当难度的研究课题。

六、最优随机控制理论及应用

随机最优控制理论最早应用于经济、金融领域,后逐渐应用于工程与其他领域。最常用的理论是线性二次高斯(LQG)控制方法,而非线性随机最优控制理论还不够成熟,虽然近几年来我国学者等提出了基于随机平均法与随机动态规划原理的新的非线性随机最优控制策略,但这些理论方法在许多方面尚需进一步完善与发展,特别是为将这些理论应用于工程实际还需解决诸如 HJB 方程快速高精度数值解法、反馈时滞、鲁棒性等问题,也需最优控制实验及实现技术等等。

七、随机动力学与其他学科的交叉

随机性与非线性一样,在自然、社会及工程中普遍存在,许多领域都存在非线性随机动力学与控制问题,将非线性随机动力学与控制的理论方法应用于各相关领域是很有前景的研究课题,可发展诸如随机神经动力学、随机生物群体动力学、随机网络动力学、随机金融动力学、随机经济动力学、随机电力系统动力学等等。

稳定性与控制

黄琳

北京大学工学院

引言

运动稳定性理论简称稳定性理论，是研究发生在系统中特定运动相对初始给定的扰动是否具有稳定性，即在无穷时间区间内是否具有对初值变动的连续依赖性。如果具有稳定性且随时间增大的过程未被扰动的特定运动与经扰动后的运动之间的差能收敛至零，则称为是渐近稳定的。从理论上，运动稳定性与渐近稳定性的研究均可以转化成一新的扰动系统的平衡点的对应性质的研究。稳定性理论的奠基性贡献是俄国数学力学家李亚普诺夫 1892 年的博士论文《运动稳定性一般问题》，其英文译本发表在 IJC 为纪念该文发表百周年的专刊上。这个工作出现后的前五十年，其影响主要在数学力学界而且集中在前苏联的范围内，研究的特点从理论上在于概念的精确化与理论的完善，例如时变系统的相关研究，在应用上主要针对一些基本的力学对象进行研究，例如陀螺的稳定性等。上个世纪四十年代开始由于控制科学的发展，使得李亚普诺夫的理论得到了巨大的发展。

一、研究现状

控制理论的核心问题常提为两种：一种是可否做，一种是怎样做。前者反映在控制理论中一系列概念上，例如可控性、可观测性、可镇定性等，建立这些性质的判定常归结为给定受控系统结构与参数所应满足的条件。而后者则是在前述成立的前提下，给出具体的构造控制器（或算法）的方法。控制理论数十年的发展形成了一个相当庞大的体系，就其系统模式的特征可以概述为：

常系数线性系统。常系数线性系统是相对简单、应用较广且理论比较完善的模式，分为两种：一种是建立在常系数线性微分方程之上的状态空间模式，其基本理论与设计工具是线性代数及其数值方法，另一种是基于有理函数矩阵之上的频域模式。这两类模式与方法既用于控制器设计也用于鲁棒性研究，两种模式的理论常互相渗透，这特别表现在上世纪八十年代出现的控制上。

时变线性系统。 在 Lyapunov 稳定性问题上可以建立平行于常系数线性系统的基本理论，但至今缺少可操作的分析与设计方法。在系数变化是无穷区间上有界变差条件下可以借助“冻结系数法”来讨论稳定问题。

非线性系统。 对于光滑非线性系统，已经发展了微分流形与微分代数两种方法，并已用于某些控制工程问题，例如卫星的姿态控制。但对于系统中存在的本质非线性现象、不光滑非线性和受有不可积的约束时，两类方法均十分局限。

分布参数系统。 分布参数系统泛指状态空间维数为无穷大的系统，包括具时滞与后效的系统、由微分积分方程描述的系统、偏微分方程刻画乃至泛函算子方程的系统。这类系统吸引了数学家的研究兴趣。时滞系统在一定条件下可借助无时滞系统进行讨论。具弹性特征的系统可用基于振型的模态分析法，但此时如何处理输入与输出的溢出问题仍比较困难。

系统的模式还可以有其它特征。就目前的研究而言，控制所关心的首要问题仍然是系统的平衡位置的稳定问题，即使在这样的框架下，下面这些问题仍然是很困难的：

- (1) 非线性与时变系统的分析与设计；
- (2) 模型降阶与分布参数系统的有限维化；
- (3) 由事件驱动的系统 and 各类混杂系统（连续与离散系统的混合，具不同采样的多速率采样系统，开关系统以及离散事件与动态系统的组合等）；
- (4) 具有各种不确定性的系统的控制器设计。

二、面临的挑战

上个世纪三十年代开始引起人们较大关注的自振和八十年代开始的混沌问题，促使人们从关心系统平衡点稳定性转而讨论其它本质非线性的动力学性质。这些性质在线性系统中将不可能出现，例如多个彼此间隔的平衡位置、自振、混沌、同宿轨和异宿轨，对于这类问题的研究在维数不超过 3 时已有一些理论结论，但是当维数高于 3 时，目前大都还只能依据变动系统参数，依靠计算机仿真来进行。由于自振、混沌这些本质非线性现象对于系统的正常运转有时是有害的，有时又是希望发生的，这样分析系统中是否存在这类本质非线性以及设计控制来产生或避免它们的发生是有意义的，特别是对于高阶系统进行研究既有深刻的理论意义又具有很强的应用前景。显然，这要比研究单平衡位置稳定性要困难而呼唤新的理论工具。

复杂运动体控制的理论与技术是力学系统实现性能高要求的关键，也是控制科学发展的一个新的生长点。无论是大空域的复杂飞行运动还是机器人的复杂运动都给控制科学提出一系列新的问题。

（一）多作动器（或控制器）的有效配合。

例如一个近空飞行器，其作动器有舵、喷管和动量轮等，它们各有适用范围，并且也都存在饱和与其它约束，如何建立一种优化理论能根据飞行目的对其进行协同是有意义的问题。与这一问题对偶的是多测量输出（多传感器各自具有一定的适用范围与量程），如何进行输出信息融合，以确定系统状态也是需要解决的。

（二）受约束系统的控制。

力学系统常不可避免地受有各种由物理决定的约束。

这些约束常用系统的状态（广义位移与广义速度）决定的等式与不等式来描述。非完整约束就是以广义速度满足的不可解等式刻画的。由于已经证明含这类约束的系统不能用光滑镇定的办法而引起人们研究兴趣，至今仍是开问题。

（三）强耦合非线性系统的控制。

刚体动力学告诉人们，在刚体的转动运动中存在着很强的耦合效应，在飞机作巡航飞行时对于扰动运动的控制在小偏差下可以采用俯仰，侧滚与航向三通道解耦的办法进行处理，但对于一般机动性强的运动控制来说这种解耦并不合理，如何利用不同通道进行协调控制以达到机动飞行的目的是相当困难的挑战。对于作复杂飞行运动的物体说来存在着各种不同物理特征的系统之间的耦合，例如飞行器长短周期运动的耦合，质心与姿态两运动之间的耦合，刚体与弹性体之间的耦合以及可能出现的流固耦合，怎样处理这些问题也是挑战。

（四）可变对象的控制。

在传统的控制器设计过程中，人们总认为控制对象是不变的，即使由于力学系统在运动过程中，系统的质心、转动惯量产生变化时也基本上不会用控制手段去影响这些变化，但

现在作复杂运动的力学系统，为了完成特定的任务，人们常企图用控制的手段去改变系统的构形，例如用可变翼形的方式来满足空气动力学的要求等，此时可以用智能结构来加以实现，而解决这类问题常常是集流体力学，固体力学，智能结构和控制理论为一体进行的。

（五）稳定性研究的变化。

稳定性理论在十九世纪末出现大致适应当时科技与工程的需求，随着运动体作复杂运动及对其控制的需求，这种在无穷时间区间上渐近性质的讨论已不再适应，代之而起的是必须讨论有限时间区间上的稳定性及用控制手段实现有限时间内镇定，这些都是线性理论无法解决的。

三、结束语

当今是一个信息充分丰富的时代，控制科学面对很多挑战，从对网络的监控（互联网，交通网，电网等）直至对基因的干预，面对的问题很多，本文只就与力学系统相关的问题的内容进行论述，从中可以看出针对力学系统说来，稳定性与控制的研究也充满了挑战而意义重大。

多体系统动力学

洪嘉振，刘铸永

上海交通大学工程力学系

引言

多体系统动力学作为动力学与控制学科的一个分支，已经经历了四十多年的发展历程。当前多体系统动力学的研究对象已经由多刚体系统扩展到柔性多体系统。柔性多体系统动力学是多刚体系统动力学的自然延伸和发展。主要研究柔性体的变形与其大范围空间运动之间的相互作用或相互耦合，以及这种耦合所导致的动力学效应。这种耦合的相互作用是柔性多体系统动力学的本质特征，使其动力学模型不仅区别于多刚体系统动力学，也区别于结构动力学。因此，柔性多体系统动力学是与经典动力学、结构动力学、控制理论及计算机技术紧密相联的一门新兴交叉学科。在航空航天、机器人、高速机构及车辆等各个领域有着广泛的应用，成为目前理论和应用力学最活跃的分支之一。

近二十多年，国内外的学者在柔性多体系统的建模理论与计算方法方面做了大量的工作。推出了不少可以处理柔性多体动力学问题的商业软件，如国外的 ADAMS, DADS, SimPack 和 RecurDyn, 国内如上海交通大学自主开发的 CADAMB。然而，柔性多体动力学有待进一步发展有两个主要原因：第一是当前很多实际问题还没有解决到令人满意的程度；第二是由于实际机械系统对经济、高效、轻质、高速和安全的更高的需求，提出了更复杂的多体系统动力学与控制的模型。本文以期较为全面地总结和概括近年来国内外柔性多体系统动力学的研究现状，对该领域的发展提出一些看法。

一、主要研究方向、现状与展望

(一) 柔性体建模方法

柔性体建模根据参考坐标系选取的不同，可以归为三类：浮动坐标系方法、随转坐标系方法和惯性坐标系方法。浮动坐标系方法是将多刚体动力学与结构动力学结合的一种方法，这种方法使多刚体动力学软件扩展应用于柔性多体系统成为可能。它可以充分利用模态

技术,对于小变形和低速的大范围运动的情况有较佳的计算效率与精度,是目前柔性多体系统建模使用最广泛的方法。随转坐标系方法源于计算结构动力学;惯性坐标系方法源于大变形非线性有限元。与浮动坐标系方法比较,随转和惯性坐标系方法有一些共同的优点:惯性张量的平动部分是线性的常量;考虑了运动的非线性。但是模态缩减法不能方便地用于目前的随转和惯性坐标系方法。直到 80 年代后期,计算效率低是使用这两种方法的瓶颈。根据力学的基本原理,基于不同的建模方法,得到形式不同的动力学方程,尽管在理论上等价,但是其数值性态的优劣不尽相同。显然,评价一个柔性多体系统动力学模型的优劣的重要标准应该是该模型是否能够可靠与高速处理各种动力学现象。因此,有必要对各种建模方法进行对比研究,研究它们适合应用的问题范围,探讨更加高效、精确的建模方法,建立准确和高效的做大范围运动的梁、板、壳和体单元模型。

(二) 刚柔耦合动力研究

柔性多体系统刚柔耦合动力学建模理论的前期研究大致分为如下三个阶段:运动-弹性动力学(KED)方法,该方法方法不计构件大范围运动与弹性变形运动的耦合;混合坐标方法,该方法考虑了构件弹性变形与大范围运动的相互耦合,但是在对柔性体离散时没有考虑大范围运动对其的影响,实质上这种方法是柔性多体系统动力学精度在一种零次近似意义上的耦合;动力刚化问题的研究,1987年 Kane 发现上述模型在处理高速旋转的悬臂梁动力学时会得到错误结论。上海交大课题组在刚柔耦合动力学建模理论研究过程中,放弃国内外的学者采用一些假定,即引入“动力刚度项”的修正模式,认为造成零次近似耦合动力学方程缺陷的主要原因应该是在对柔性体变形运动描述时没有考虑大范围运动对其的影响。基于连续介质力学的基本原理,得到精度在一阶量级上的刚柔耦合项,建立了精度在一次近似意义耦合动力学方程。

刚柔耦合动力学的研究背景主要是两类,一是非惯性系下结构动力学问题,另一类是刚柔耦合多体系统动力学问题。在上述的研究中对于第一类问题取得了相对比较完整的成果。对于第二类问题有待进一步深入研究。为了揭示刚柔耦合的本质,上述研究的物理模型相对比较简单,即旋转物体加悬臂梁。尽管上述有些研究已经考虑大范围运动为平动的情况,但得到的只是初步的成果。对于有多个柔性体与多种铰形式的多体系统的刚柔耦合问题有待进行深入研究。

(三) 非连续的变拓扑问题

多体系统动力学问题中经常遇到非连续的变拓扑问题。如接触碰撞，其物理背景主要有：接合间隙，间歇运动机构，离合器，变化的运动结构机构，机械抓取，空间结构的对接和装配。接触碰撞建模方法首先进行碰撞搜索检测，根据碰撞搜寻运算法则进行了分类：主从法则和等级区域法则。一旦碰撞被侦测到，主要有两种碰撞建模方法：基于接触力的方法和动量-冲量方法。前者可以进一步分为：罚函数方法、拉格朗日乘子方法。后者可以分为：整体法体和局域法。

具有高速算法的大型的软件系统是解决此类问题的一个基础，当前的关键问题是如何正确描述诸如碰撞，间隙等工程常见现象，提出它们力学本构关系，即建立精确而又高效的接触碰撞力学模型。在斜碰撞问题还涉及摩擦问题。目前多简单应用库仑摩擦模型，然而，需要基于粗糙面比较复杂与精确的模型，加入柔性多体系统的接触碰撞模型中去。此外还需进行研究来评估较的速度-力（力偶）之间的关系（包括摩擦和阻尼），间隙，尺寸精度和迟滞性,这样才能真正有效解决当前工程中提出的大量复杂的动力学问题。

(四) 微分代数方程求解技术

受约束柔性多体系统的控制方程为动力学方程(微分方程)同约束方程(代数方程)联立求解的微分-代数混合方程，又称 DAE 方程(Differential Algebraic Equations)。它与纯常微分方程不同，在数值计算上存在困难。在仿真过程中随着误差的积累，约束方程的违约加剧，得到的解已不能表示受约束多体系统的真实运动，必须对约束方程的违约进行抑制，使数值积分得以顺利进行。目前的研究方法大体可分为两类：一种是从微分-代数方程组本身出发，利用现代数学的研究成果将约束方程定义为流形，对微分-代数方程组进行降阶处理，将其转化为由约束方程定义的流形上的常微分方程。另一种方法是在动力学方程中引入附加校正项，当约束方程产生违约时，对动力学方程进行校正。目前的校正方法多为间接校正方法，不能对系统的广义坐标进行直接的校正以满足约束方程，凭经验选取校正系数。

微分-代数方程组的求解方法是多体系统动力学的一个难点。其发展趋势是违约校正不能以破坏系统的动力学方程为代价，校正方法应自动进行，不需人工干预。需要对计算方法的改进以提高计算效率。

（五）多物理场耦合问题

多体动力学主要是预测一个多体系统的机械响应的时间历程。实际的工程对象涉及机械响应和其它形式的物理场相互耦合。当前这方面研究主要集中在热力耦合、流固耦合和机械—电磁耦合方面。有两种主要的应用推动着柔性多体系统热力建模方面的工作，这两种应用包括航天器和高速柔性机械系统。系统由于材料阻尼会产生更多的热。精确模拟这些系统的运动需要考虑双向的热力耦合。当柔性多体系统在流体介质中运转时，该系统和流体的相互作用问题，比如喷气发动机、旋翼飞机、机翼推动式飞行器、潜水机械系统和柔性管道中的流体流动，这些问题的精确和常用解法需要仔细考虑流体的流动和流固表面的相互作用。多体系统与不同物理场的双向耦合作用在生物力学，航天航空，空间结构，和微米、纳米机械中有很多的应用。

理论上，耦合问题中的所有物理场的动力学方程必须联立求解。当前在软件工程上正在研究一种先进的语言，以实现多种物理场动力学模型的联合编程。然而，目前耦合问题主要采用近似迭代的处理方法。应用于耦合场问题的一个特殊情况，即两个场的耦合度在一个方向上非常强。在这种情况下，先单独计算主要场，次要场的贡献利用迭代的结果。由于实际问题中要求的柔性体更轻，运动更快、更精确，这就增加了对耦合响应预测的要求。

（六）控制方法

柔性多体系统控制是现今一个非常活跃的研究领域，比如在柔性机械操纵器和航天器的应用。柔性多体系统逆动力学是控制问题的一个方面，即研究主动力如何使系统产生预期的运动。利用传感器测量系统当前的具体参数，用一个控制法则实现的控制为闭环控制。航天器的控制主要应用于：柔性附加体(如天线、太阳帆板、反射镜等)的重定位；主动振动抑制控制；姿态控制；展开控制。对柔性多体系统控制器的要求主要有两点：反应快和准确跟随预期的轨道。一般来讲，这两个要求是相互矛盾的。也就是说，控制器反应越快越不准确，反之亦然。这里有很多类型的控制法，每一种在其一定的条件下是很有作用的。很多情况下，为了得到最佳的效果，相同一个系统中会使有多种控制法。因此需要对柔性多体系统的控制方法进行进一步研究。

柔性多体系统控制有两个主要的难题，使得它比刚体系统控制困难的多。首先，DOF(Degree of Freedom)的数量要比致动器的数量大的多。一个柔性体有无穷多个 DOF，但

是，致动器的数量通常仍远小于 DOF 的数量，这不可避免地使控制器难以精确地达到预期的轨道。其次，控制器和控制点位置不在一起。这样可以导致波传送延迟和反向的初始运动。波传送延迟，例如致动器在柔性链接一端的运动需要一定时间才能传送到另一端；反向的初始运动，例如在转动的柔性链接的某个方向上作用一扭矩时，它的端点位置起初会向相反的方向移动。

（七）设计与优化

多体系统动力学发展最终应该体现在高效地为机械系统的设计与优化服务。这个服务的平台就是应用软件系统。因此多体系统动力学的研究必须考虑设计与优化软件工程的需求。设计目的在于寻找一种有效的方法能够存储所有需要的系统信息。分层面向对象的柔性多体系统描述方法已被证明非常有效。该方法已经广泛应用与虚拟产品的开发平台。优化目的是取得最小化目标函数的系统参数，目标函数是由满足性能约束的系统性能和系统成本的量组成的。为了评估目标函数和约束，在设计优化的过程中需要估计系统的动力学响应。未来柔性多体系统设计与优化的研究应该着眼于面向对象的设计方法；设计优化方法；虚拟现实；以及设计与分析的互动。

（八）试验研究

过去，实际柔性多体系统的设计和分析主要依赖于试验。从 20 世纪 80 年代开始，计算机速度和计算建模的优点使得计算机模型变得更加可靠。然而，数值上证明正确的建模理论必须得到实验验证才可信。例如上海交大课题组自行设计与研制一套实验平台(包括硬件、软件)，自行设计与开发相应的实验方法进行了刚柔耦合试验。由于刚柔耦合量与大范围运动学量相比，量级小得多，在实验中测量很困难。再加上它的测量会受到环境的因素（如风阻等）严重的影响，故刚柔耦合动力学性态的实验研究在国内外是一个空白，包括 1987 年 Kane 的反例也没有实验的对照。

试验研究依然十分重要因为它们被用来发展，提高，评估数值模型的保真度。通过物理试验和仿真的配合使用，柔性多体系统的物理试验的花费和次数会大大降低。例如，汽车的悬挂系统可以用物理试验来测试，而汽车的其他部分用来仿真。通过在物理试验和仿真的界面使用驱动器和传感器，可以生成试验和仿真需要的界面力。因此未来研究一方面要通过

设计新试验来验证理论，另一方面通过试验可以为进一步深入进行理论研究提供重要的启示，还要注意物理试验和仿真的配合使用。

二、总结

本文综述了柔性多体系统动力学近年来国内外的研究成果。对柔性多体系统动力学的建模方法、刚柔耦合问题、非连续过程问题、数值求解技术、多物理场耦合问题、控制方法、设计与优化和试验研究等研究方向进行了详细的阐述，并对各研究方向的国家需要和今后的发展作了展望。

未来的研究方向是提高对柔性多体系统动力学响应和失效预测能力的准确性和计算效率。今后总的发展趋势主要有：(1)如何更好地同具体的工程问题相结合。(2)如何建立精确、高效的动力学模型。(3)如何充分利用现代数学的研究成果和飞速发展的计算机技术。(4)如何将现代控制理论应用于柔性多体系统动力学中以解决大型复杂柔性机构的控制问题。(5)如何在需要耦合分析的不同物理场中分析柔性多体系统动力学行为。(6)如何在设计优化中利用柔性多体动力学理论。(7)如何用试验技术来验证和促进多体理论的发展。

分析力学

陈滨¹、梅凤翔²、罗绍凯³、刘才山¹、郭永新⁴

¹北京大学力学系；²北京理工大学理学院；

³浙江理工大学数学力学与数学物理研究所；⁴辽宁大学物理系

一、分析力学的学科地位

分析力学既是数学、力学、物理学这三大学科的基础，又是许多新兴学科的生长点。分析力学不仅是研究现代科学与技术中多种复杂问题的精美工具，而且其运动规律的独特表达形式远远超出了经典力学的限制。分析力学的理论与方法不仅在现代力学和物理学中占有重要的位置，而且为工程学科乃至高新技术的发展提供了强有力的理论支撑。Lagrange 开创于 1788 年的《分析力学》在科学上如此重要，以至于时隔 200 年之久，其经典原著又于 1997 年被译为英文！伴随着科学与技术进步的时代步伐，两百余年来分析力学一直与时俱进。特别是近 40 年来，由于微分几何的进步、流形上大范围分析的发展、对称性理论的渗透、数值计算方法的运用，促使分析力学的研究和发展发生了根本性的变化，把动力学理论推进到本质上的近代分析力学新阶段。

二、我国分析力学的研究现状

半个世纪以来、特别是近 30 年来，我国在分析力学理论发展的完善化、数学方法的现代化、工程应用的专门化诸方面取得了显著的成绩。最近 10 年来，围绕着解决文献中所提出的关于分析力学学科发展的 18 个重要问题，我国学者做了大量的、卓有成效的研究工作，特别是在近代分析力学的几个重要方向上取得了进步、提高了国际承认程度。

1、Birkhoff 系统动力学 1927 年美国著名数学家在其名著《动力系统》中提出一类新型方程和一类新型积分变分原理。1978 年 Santilli 改进了 Birkhoff 的结果，并首次提出“Birkhoff 力学”的提法。1989 年前苏联学者 Galiullin 认为，对 Birkhoff 方程进行研究是近代分析力学的一个重要发展方向。

我国学者构造了 Birkhoff 系统动力学的基本理论框架，证明所有完整力学系统和非完

整力学系统都有 Birkhoff 表示, 研究了 Birkhoff 方程的积分方法、对称性和守恒量、稳定性理论和几何描述。Birkhoff 系统是一类新的约束力学系统。Birkhoff 系统动力学是经典力学继 Newton 力学、Lagrange 力学之后的一个新发展, 是 20 世纪在量子力学出现之后发展起来的新力学。

在上述基础上, 对于 Birkhoff 系统的全局分析、分岔与混沌, Birkhoff 系统的不同对称性、各类守恒量以及绝热不变量, 相对论和转动相对论 Birkhoff 系统动力学等方面的研究取得了一系列重要进展。

2、约束力学系统的对称性与守恒量 自 1918 年 Noether 定理问世以来, 对称性与守恒量的研究对当代数学、力学、物理学的发展产生了深远的影响。对称性与守恒量的研究不仅为人们深刻认识复杂系统的内在性质提供了规律性的方法, 而且已经成为解决大量科学问题的有效工具。对称性原理是物理学中更高层次的法则, 近半个世纪以来, 对称性与守恒量在现代物理学中确立了不可动摇的地位。

继 Noether 对称性 (1918)、Lie 对称性 (1979) 之后, 我国学者提出了一种新的对称性-形式不变性(2000)。研究表明, 对于给定的动力学系统, 正如 Noether 对称性直接导致 Noether 守恒量、Lie 对称性在特殊(或一般) Lie 变换下直接导致 Hojman(或广义 Hojman)守恒量, 形式不变性也能直接导致一类新型守恒量。研究三种对称性与三类守恒量之间的关系表明, 每一种对称性不但可以直接导致一类守恒量, 还可以通过其它两类对称性分别间接导致另外两类守恒量。研究溶合上述三种对称性的统一对称性, 由统一对称性可分别得到三类守恒量。这一系列的工作, 不但丰富和发展了对称性理论的内容, 深化了人们对于动力学系统内在性质的认识, 而且拓宽了对称性方法的应用范围。

3、非完整约束系统几何动力学 近 10 年来, 现代微分几何学的应用也极大地促进了非完整力学的发展, 运用辛几何学、纤维丛理论、射丛几何学等手段, 非完整系统的几何结构和几何框架、动量映射、对称性约化等一系列研究成就, 深化了人们对与动力学系统内在本质性质的认识, 使得非完整力学的若干重要的基本问题得到澄清和解决。我国学者在几何动力学框架内深入研究了非完整约束力学系统的守恒量与动量映射; 运用几何动力学以及 Lie 群与 Lie 代数方法, 将非完整约束力学系统纳入 Birkhoff 系统, 从而赋予非完整约束力学系统新的几何结构和代数结构; 研究 Birkhoff 化的非完整约束力学系统的动量映射与对称约化, 构造了具有对称性的非完整约束系统的动量方程、低维流形上的运动方程、关于对称群的重构方程; 利用力学系统的几何不变性质, 初步研究了具有对称性的约束系统的保结构

算法问题。

这些工作是非完整约束力学系统的对称性研究在理论上的深化、应用上的发展，特别是运用几何动力学和 Birkhoff 动力学，开辟了研究非完整约束力学系统的对称约化与保结构数值计算的新途径，这将有助于促进非完整力学在路径规划、稳定性与控制等领域的应用。

4、单面约束与摩擦、碰撞非光滑分析 随着微分包含、变分不等式等现代应用数学理论的发展，由于单边约束与摩擦、碰撞等产生的奇异性问题，在上世纪末引起分析力学领域及许多工程应用领域的广泛关注。如关于碰撞定律的研究发现，Newton 和 Poisson 定律在处理一般刚体含摩擦碰撞问题时，出现系统能量非协调的现象。我国学者指出导致了致这种奇异性的根本原因在于接触处的摩擦作用改变了碰撞过程中的动力学性质，并提出了处理一般刚体碰撞问题的方法。

1872 年 Painlevé 所提出的经典算例表明，在一定构型和初始条件下，含摩擦的单边约束问题同样会导致刚体动力学方程可能出现无解和多解的奇异现象。缺乏对这类奇异性问题所对应的物理现象及其性质的明确认识，已成为分析力学从处理光滑系统拓展到处理非光滑系统的一个重要障碍。我国学者首次从理论、实验和数值计算，证实了 Painlevé 疑难问题必定对应一个切向冲击过程，并给出了与之相对应的切向碰撞的性质和速度跳断的规律。这一研究对完善分析动力学理论和揭示某些复杂机械运动背后的力学机制具有重要的理论意义和工程应用价值。

5、刚柔混合系统动力学与控制 上世纪下叶，随着航天工程的发展，包含弹性体及其它耦合场作用下的力学系统所出现的一些新现象引起分析力学领域的广泛关注，并形成了分析力学的一个新的分支—柔性多体系统动力学。正确地考虑物体刚性运动和柔性效应之间的交耦是这一新领域的核心。这些交耦作用可能影响系统如下的性质：系统的平衡形态及其稳定性；平衡态随参数变化的分岔行为以及平衡态邻近的振动特征及可能的大范围动态转移过程。

针对具有大范围转动的梁、板构件，基于严格的理论分析模型，我国学者找到了其平衡态的位型以及可能产生的动态分岔行为。部分理论研究成果得到了实验验证。这些研究成果不仅有助于正确理解刚柔耦合系统中出现的动力刚化和软化现象，而且为今后发展有效的数值算法奠定了理论基础。

6、变结构系统的动力学与控制 建立能够描述包含变结构过程的分析力学的一般性框

架,近年来已成为包含应用数学、分析力学等领域所关注的一个重要研究方向。变结构过程中可能出现的系统的整体性质在许多工程领域得到应用。如利用散体材料的变结构过程设计高速冲击下的吸能装置等。我国学者提出了描述一维散体结构在冲击载荷作用下分析方法,并给出了冲击波传播的性质和规律。发展变结构系统的理论和方法,并结合我国航天工程的应用是分析力学应关注的一个重要方向。

三、分析力学发展的若干问题

1、Birkhoff 系统动力学的理论和应用研究 作为 Hamilton 力学的推广和发展, Birkhoff 力学更具有一般性和概括性,它适用于保守的和非保守的,完整和非完整的动力学系统。它在理论研究方面已经基本上完备,但在应用研究上还处于起步阶段,国际上初步开展了物理学领域中场论问题 Birkhoff 动力学研究,我国学者关于 Birkhoff 动力学的研究有较高水平。可望在近期取得一定进展的研究方向有:(1)如何将更多的非 Hamilton 系统 Birkhoff 化,并将 Hamilton 系统的若干动力学理论与应用扩展到 Birkhoff 系统;(2)建立 Birkhoff 系统的数值分析方法。今后, Birkhoff 力学的主要研究方向应该是将各类不同动力学理论的 Hamilton 体系扩展到 Birkhoff 体系,这必将产生一系列新结果。

2、动力学系统对称性的应用研究—对称性约化 我国学者在动力学系统的对称性研究方面取得了一系列重要成果,包括在 Lie 对称性、Noether 对称性、非 Noether 对称性、形式不变性、统一对称性方面的研究等等。但是对动力学系统的对称性研究的目的是不是为了得到系统的守恒量。现代物理学中研究对称性的目的是为了得到传递相互作用的规范粒子,以及各种相互作用的统一场论。在动力学与控制学科中研究对称性的目的则是对系统进行约化,再利用约化理论研究具有对称性的动力学系统的若干控制问题。我国学者在对称性约化方面的工作与国外相比还有较大差距,应该注重动力学系统的对称约化的研究。

3、非完整约束系统的动力学与非线性控制理论的结合 分析力学的几何化对非完整力学的现代发展起到了极大地推动作用,它不仅深化了对非完整力学的理论研究,而且也极大地推动了其应用研究。几何力学为非完整系统的非线性控制领域开辟了广阔应用前景,它在非完整系统的可达性与可控性、运动与路径规划、优化控制、路径跟踪、点集稳定化等问题的研究上提供了强有力的工具。近十年,国外学者在非完整系统的控制理论和应用研究上已经取得了不少成果,而我国学者要么局限于非完整系统的动力学研究,要么是局限于非线性控制方面的研究,将二者结合起来研究的工作还极少。只有将二者结合起来,才能在理论和

应用研究两个方面取得更多突破。约束系统的几何动力学成为连接约束系统的动力学和非线性控制理论的最时髦的纽带。

4、动力学系统的保结构计算 数值计算对非完整力学的理论验证和应用研究越来越重要，数值计算不仅是非完整约束力学系统几何动力学的有力补充，而且几何动力学是保结构数值计算的基础。同时，数值计算也是联系非完整力学的理论研究和实际应用的纽带。目前，非完整约束力学系统的数值计算方面的工作屈指可数。这将严重影响非完整力学系统对称约化的理论研究新成果对运动规划等领域的实际应用。由冯康先生开创的哈密顿 Hamilton 系统的辛算法是一种保辛结构数值计算方法，它比著名的 Runge-Kutta 法具有显著的优越性，这是我国数学家能够在国际学术界产生重大影响的少数几项开创性工作之一，并且在力学、原子与分子物理学、大气物理学、天体力学、以及其它工程技术领域取得了许多应用研究成果。国外学者已经充分认识到这种算法的重要意义，并发展了冯康先生的辛算法，提出了更为一般的保结构算法-Lie 群算法或几何算法。要保持我国学者在保结构计算方面的优势，一方面，要加强辛算法在各种约束动力学系统的应用研究，另一方面，要发展辛算法为更一般的几何算法，这种发展仍然保留了保辛结构的思想，适用于具有非辛结构的动力学系统。

5、约束系统非线性动力学的研究 分析力学与非线性动力学同为整个力学学科的基础，非线性动力学的发生和发展与分析力学息息相关。非线性动力学已成为十分活跃、横贯科学技术领域的热点，稳定性、分岔、混沌、分形、孤立子、斑图、格子自动机、神经网络、复杂系统等概念和方法已经逐渐渗透到个分支学科之中。目前，人们更多地将注意力投注在如下极富挑战性的各个系统上，即高维非线性系统、无穷维系统（偏微分方程系统）、广义 Hamilton 系统、迟滞系统、随机系统、非光滑系统、参数激励系统、生物系统等，这些系统的多样性和复杂性从根本上赋予了非线性系统丰富多彩的性态，同时对于非线性系统的分析、设计与控制提出了前所未有的挑战。面对这些相关的复杂而又多样的非线性科学问题，分析力学应当扮演什么样的角色？（1）在理论层面上，对于约束系统的稳定性、分岔和混沌，约束系统的随机运动，约束系统的非光滑分析，约束系统的参数激励，约束广义 Hamilton 系统等，已有少量、初步的研究成果，应该成为分析力学研究者近期关注的课题。（2）密切注意高维非线性系统、无穷维系统等方面研究的新成果，随之开展高维非线性非完整约束系统、无穷维约束系统的研究工作。（3）随着非线性动力学向各个不同科学领域的渗透，寻找分析力学与之相关的结合点，开展相关的研究工作，或者有针对性地建立相应的分析力学理论。

6、分析力学与工程科学、高新技术 分析力学的发生与发展，源于 18 世纪为了解决存在大量约束的工程实际需求的需求。分析力学在为工程科学提供理论支撑的同时，与工程技术一直相互依存、相互促进。在现代工程科学和高新技术领域中，存在大量与约束相关的实际问题，它们的数学模型和运动方程依赖于用分析力学的方法去描述、用分析力学的理论去建立。分析力学的研究与发展，应当面向工程实际，一方面从工程中提炼出动力学问题及其模型，然后运用并发展各种方法加以研究解决；另一方面注重基本方法的研究，从一些迫切需要、但又束手无策的问题着手，寻找新的突破点。后一方面分析力学现代发展的薄弱环节。

四、发展建议

1、关于分析力学的理论体系 分析力学顺延了其历史发展自然形成的组合方式，构建了理论体系框架。我国在此基础上结合自身的研究，构建了具有中国特色的分析力学理论体系框架。伴随着近代分析力学的发展，站在有利于促进学科发展的高度，在动力学与控制 and 近代力学高速发展的今天，需要我们跟上时代的步伐，及时地适当调整、充实、完善分析力学理论体系的组合方式，也需要对分析力学教程的体系处理、内容取舍进行优化组合，融入近代分析力学的最新研究成果。

2、关于分析力学的研究方向 分析力学作为基础研究和应用基础研究，也应该顺应当代力学的发展，去粗取精、优胜劣汰，选择好研究工作的主攻方向。(1) 对于有长远影响的基础研究方向，要组织生力军，给予较长时间、较系统的支持，以期取得较系统的成果，在国内外占有一席之地，提高国际竞争力，推动学科的发展或对工程实际产生较大的影响。(2) 要从工程实际的大量迫切课题中，选择具有共性、又能促进生产发展的课题开展应用基础研究，作为技术储备的后盾，并从中找出新的理论课题、促进学科的发展，把工程实际作为分析力学发展的动力和源泉。(3) 要善于鼓励和支持新的思维、新的概念、新的构想，缩短新的研究方向的孕育过程，加快分析力学的发展步伐。

3、关于分析力学的研究方法与研究手段 先进的数学工具和实验手段，是分析力学储蓄、深入发展的生命力之源。一是要密切关注、善于利用新的数学理论与方法，是分析力学始终站在新的制高点，获得新的生机，取得突破性进展。二是要充分利用最新的计算手段，以最快的速度、最佳的方式处理分析力学负载问题的数值问题。三是要发展利用先进的实验技术与实验装备，充分发挥实验研究对发现新的现象和新的规律的重要作用。理论分析、数

值计算、实验研究三者之间的有机结合、相互促进，是现代力学发展的大趋势。

4、关于分析力学内、外的交叉研究和交叉规律研究 学科交叉点往往就是科学新的生长点、新的科学前沿，这里最有可能产生重大的科学突破。中国科学院院长路甬祥指出：“在新时期里，中国需要加速发展科学技术，其中要大力地提倡学科交叉，注重交叉学科的发展。”就分析力学而言：(1)开展分析力学各个分支之间的交叉研究，发现学科发展的新的生长点，提出新的研究方向，开辟新的研究领域。(2)勾通分析力学各个分支之间、以及各个分支相关研究方向之间的相互关联、相互影响，达到相互协调发展、形成良性循环机制的目的，增强学科发展的活力。(3)观察和调节某一方向的研究进展对分析力学整体发展的动态影响，加快学科的发展步伐。(4)把分析力学融入整个力学学科乃至整个科学技术领域，这将有助于及时借鉴吸收基础科学和工程科学各分支领域的相关研究成果、不断丰富分析力学的研究内容，有助于分析力学与其它各学科领域、各个分支之间关系的研究和交叉性研究，有助于提高分析力学的学科地位。(5)注意分析力学内部各个方向之间、分析力学与其它学科之间交叉规律的研究，提高研究者对于交叉研究方向的敏感性和洞察力。

非线性振动

陈予恕¹、吴志强²、曹登庆¹

¹哈尔滨工业大学航天学院

²天津大学机械工程学院

前言

非线性动力学的基础理论与数学或应用数学有着非常紧密的联系，同时又是机械、土木、航空航天、水陆运输、兵器等工程学科的重要基础。它与技术学科结合推动了现代工程技术的蓬勃发展，具有应用性很强的鲜明特色。复杂高维非线性动力学系统的降维、全局分岔、周期解分岔理论及通向混沌的道路，是当前科学研究的重大前沿课题之一，是各科技工程领域进行自主创新的重要理论基础，在科学与工程中有广阔应用前景、同时也是具有挑战性的国际前沿领域。发展新的分析方法、揭示新的现象及其产生机理一直是非线性动力学理论研究的主题，解决工程动力学疑难问题、探索基于非线性动力学的设计方法，越来越受到各国科学家与工程师们的高度重视。

近年来我国学者在非线性系统分岔与混沌的分析方法，非线性时滞系统的 Hopf 分岔、镇定与控制等基础理论研究方面取得了重大突破。非线性动力学的理论在实际工程问题的创造性应用，获得了在大型旋转机械重大振动故障机理与治理，非光滑机械系统动力学，机械传动系统的非线性振动，振动机械的非线性振动，电力系统的非线性振荡以及生命过程的非线性动力学等方面的重要成果。

一、非线性系统分析方法（C-L 方法）

对于非线性振动系统这类重要的非线性动力学系统，尽管已有不少近似方法，可以用来分析其周期解、概周期解等基本周期解的动力学行为，但一般无法得到周期分岔解，也就无法建立分岔解的拓扑结构和系统参数之间的关系。经典理论甚至对同一类系统会得出似乎矛盾的结论，如对 Mathieu-Duffing 系统，Bogoliubov 和 Mitropolsky 用平均法、Nayfeh 用多尺度法得到了定性特征完全不同的响应曲线。

陈予恕与 Langford 将 Lyapunov-Schmidt 方法引入非线性振动问题,并与奇异性理论结合,提出了能揭示非线性振动系统拓扑周期分岔解与系统结构参数之间关系的方法(Chen-Langford 方法,简称 C-L 方法),分析了广义 Mathieu 方程的周期解分岔,成功统一了长期困扰非线性振动学术界的有关非线性参数激励系统似乎矛盾的结果。该方法的提出也为进行复杂结构的动态优化设计、参数识别和分岔控制提供了新的途径。

以 C-L 方法为基础,陈予恕领导的非线性动力学课题组在非线性和非线性动力学基础理论方面进行了大量的创造性研究。如对高余维分岔的普适分类、高余维非对称分岔的普适开折、约束分岔的分类等问题的研究,使上述理论与方法适用于更普遍的、实际工程中的非线性动力学问题。从而形成了分析非线性系统周期解高余维分岔的方法体系,提出了计算非线性自治系统正规形的直接方法以及计算非自治系统正规形的复内积平均法。这些研究作为揭示高维非线性系统局部分岔和全局分岔机制提供了有力的工具,为洞察重大工程问题的非线性动力学机制提供了新的手段。

二、大型旋转机械非线性动力学

大型高速旋转机械和振动机械是现代工业社会的重要装备,广泛应用于电力、航空、机械、化工、纺织、能源等领域。由于转速高、规模大,其动态行为(振动响应)十分复杂。设备故障往往会引起突发性、灾难性后果。为此,我国学者开展了跨单位的合作,主要完成了以下几方面的工作:

(一) 微小间隙流体力约束自激源非线性动力学建模。

研究了微小间隙(轴承、气封和叶顶间隙等)约束的自激机理、非线性动力学模型;建立了适合于非线性动力学分析的约束力的表征和识别方法;分析了轴承、气封和叶顶间隙与弹性转子的耦合效应以及热弹效应、边界条件等对油膜、气(汽)流非线性激振力的影响规律,并进行了数字仿真和模拟试验验证。为大型旋转机械轴系动力学振动故障的定性分析提供了较现有文献更精确可靠的微小间隙激励的力学模型,为旋转机械的设计提供了非线性激振力的大型数据库和相应计算软件。

(二) 大型旋转机械复杂转子系统非线性动力学重大故障机理。

提出了大型转子系统非线性动力学建模准则、直接建模法、降维建模法等。应用现代

非线性动力学理论与方法，研究旋转机械的亚谐振动、自激振动、分岔、混沌和慢变、突变等异常振动行为；提出了非线性转子系统稳定性量化分析方法；建立了旋转机械几种最典型故障：油膜振荡、碰摩、转轴裂纹、基座松动以及耦合故障等的非线性动力学模型，对轴系横向振动和某些重大振动故障的发生与发展及其破坏过程进行了系统的分析，包括转子碰摩的动力学与控制、转子基础部件松动非线性动力学、裂纹转子的非线性动力学行为等方面。

（三）旋转机械多自由度非线性动力学系统的数值分析技术。

研究同宿、异宿轨道的数值解法，高效率的非对称线性代数求解器；可处理连续介质中非线性问题的大型非线性分析软件系统；非线性系统的降维方法及有效的数值分析方法（高维非线性动力系统的弧长算法、分岔与 Hopf 分岔的数值求解、周期解的追踪等）。

（四）大型旋转机械的非线性动力学设计方案。

在线性设计的基础上，应用非线性动力学的理论，在考虑一些主要部件的非线性因素的情况下，对机组疑难重大失稳振动故障的动力学特性进行分析，并提出了非线性动力学设计思想，使设计的机组具有更好的稳定性。为此，利用各种小间隙约束激励源（油膜力、密封力等）的非线性力学模型，研究高维非线性系统的降维方法及动态响应的求解算法，对模型转子及实际机组（200MW 和 300MW）转子进行非线性动力学分析，探索各种参数变化对动力学特性的影响，以获得机组良好的动力特性（稳定性）。由此获得的一系列参数变化对机组动力学行为的影响规律，为实际机组的设计提供了一个好的解决方案。

（五）应用非线性转子动力学理论解决大型发电机组及设备疑难振动故障。

紧密结合我国火电机组运行的实际状况和理论研究进程，在轴系重大振动故障的综合治理技术研究方面，提出了轴系支撑内共振综合治理技术，偏心润滑参数综合治理技术，轴承负荷分配调整技术，综合类比技术，非线性传递函数法治理技术等。这些综合治理技术已广泛应用于工程实际，解决了七省十余个发电厂的疑难振动问题，取得了数亿元的直接经济效益和巨大的社会效益，推动我国电力工业的科技进步发挥了重要作用。

三、机械系统中的碰撞动力学

动力机械内部或边界上的间隙常导致碰撞振动，即由零部件之间或零部件与边界之间的往复碰撞而造成系统整体的强烈振动，从而带来一系列实际问题。机械系统的碰撞振动和摩擦激发振动属于强非线性问题，并具有非光滑的向量场，研究难度较大。近年来，国内外学者已对含间隙振动系统的稳定性与分岔、奇异性、概周期碰振运动及混沌控制等问题进行了大量的研究。我国学者建立了两自由度含间隙振动系统对称周期碰撞运动的 Poincare 映射方程，讨论了该映射不动点的稳定性与局部分岔，研究了含间隙振动系统对称周期碰撞运动经叉式分岔、倍化分岔、“擦边”奇异性向混沌转迁的全局分岔过程，并且还研究了三自由度碰摩振动系统的动力学，给出了局部动力学的两参数开折；证明系统存在稳定的 Hopf 分岔和 T2 环面分岔。对于接触问题，我国学者基于碰撞—接触过程的细观分析，对含碰摩的斜碰撞振动运动进行了理论和实验研究，提出了分析斜碰撞接触问题的分段分析方法和确定斜碰撞状态关系的步进冲量分析方法，获得了碰撞接触过程系统可以出现的微滑动等现象。

四、振动机械的非线性振动

工程实践证明，应用非线性振动理论来改善振动运输机、振动压路机、包装振动系统等振动机械的动态特性，进行振动机械的非线性动力学设计，特别是对于变质量系统的振动输送，能产生显著的效果。我国学者针对长距离水平运输机的变载荷系统，应用非线性振动理论与自同步理论，采用近共振方法设计变节距弹簧，达到简化机构、节能、降耗、高效的目的，还研究弹性力为连续变化的非线性硬特性弹簧在变载荷系统中的应用，实现系统刚度随载荷基本成线性变化，使得系统振幅较线性振动输送机稳定的多，可实现系统在共振点附近运行，利用调整弹簧预紧量的办法可方便地改变系统的工作点。在同步振动系统耦合效应领域的研究中导出了系统形成同步的耦合条件，给出了振动同步系统结构参数设计和选择的工程方法。在混沌振动压路机的研制和实验中，通过对两台振动参数相当的 10t 级振动压路机对比实验得知，混沌振动的压实度高于一般的简谐振动，但响应的能耗量上升。还研究包装振动模型在随机冲击激励的动力响应，发现冲击激励强度的增加将使系统的安全盆产生高度侵蚀，从而使系统位移和速度超出某个有界区域而导致损坏；但通过简单的增大阻尼可使系统的安全盆的侵蚀减少。

五、电力系统的非线性振荡

深入研究电力系统分岔问题，有助于认识各种复杂现象，特别是貌似随机的振荡、电压的突然崩溃等，有助于深刻了解系统失稳的机理，具有重要的理论和实际意义。我国学者

在分析北美“814”大停电的灾变机理上，提出了建议重视研究的课题，其中包括：大型互联电网的复杂行为、大区互联电网安全性和灾变预报的理论方法。在研究了多时标电力系统模型中的奇异诱导分岔和奇异 Hopf 分岔的特点及其相互关系，为多时标电力系统模型分岔分析提供了新的思路和分析方法，并利用奇异性理论分析了单自由度电力系统在周期性负荷扰动下的周期运动的分岔现象。

六、结束语

我国中长期科技发展规划提出：要把我国建成创新型国家，以加快推进我国的社会主义现代化建设。当前我国装备制造业和国防工业正处在快速发展时期，正在由制造大国向制造强国转变，需要大量高科技水平、高功能的重大装备。现代重大装备系统是机、电、液、磁、光等多物理过程耦合的复杂动力学系统，如高速高精度数控装备、大型空天运载工具、大型超超临界汽轮发电机组、大型燃气轮机、高速列车和高性能车辆等，它们的主要特点是高度耦合、结构复杂、强非线性且维数很高。因此，复杂动力学系统的建模、数值仿真、试验以及非线性动力学演化过程研究；尤其是高维动力系统的降维、分岔和混沌及其工程应用是当前非线性振动领域的重要课题。

航空航天动力学

黄文虎¹、刘丽坤²、郑钢铁²、方勃¹

¹哈尔滨工业大学航天学院；²清华大学航天航空学院

引言

航空航天动力学研究航空航天器在动态交变载荷下的动力学行为。航空航天器所承受的载荷通常是复杂的极端状态下的动态载荷，对动力学、振动与控制提出了大量的需求。现代航空航天技术的高速发展，所要求研究的内容更加广泛，已不仅限于传统力学的范畴，在机械电子、导航制导和控制等分系统的结构设计、控制设计、飞行控制、安全保障等的飞行器设计，以及诸如微纳米技术等新技术的应用，都提出了复杂的动力学问题，对动力学、振动与控制提出了超前发展的需求，成为学科发展的强大推动力。

在这世纪之交的十余年，动力学与控制的研究可以说在相当程度上围绕航空航天的相关动力学问题展开。其原因有以下两个方面：其一是相比其它应用对象，航空航天领域的动力学问题更为突出，而且更具挑战性；其二是其间正值我国航空航天事业发展的关键时期，不仅成功地实现了两次载人航天飞行，而且包括探月工程和大型飞机研制与发展计划在内的一批重大航空航天项目需求的强有力牵引。问题与需求使得航空航天动力学成为动力学、振动与控制这一研究领域的重要组成部分，取得了蓬勃发展。相关文献对此做了一定的总结。

一、研究进展

由于航空航天动力学的研究内容十分广泛，本文不可能对所有的研究问题进行一一介绍和讨论，只概括介绍近年来国内外航空航天动力学在以下几个科学问题及其研究需求方面的情况，并注重介绍我国的成就。

（一）大型复杂飞行器结构动力学

现代航空航天器结构的特点，可以归纳为：规模向更大型及微小型化两个方向发展、构形越来越复杂、技术指标越来越高。大型化是航空航天结构的主要方向。例如国际空间站

长 110 米，宽 88 米，总质量达 400 余吨，各种结构件、舱体和设备由运载工具分 40 多次运往轨道，在轨道上进行组装。微型化则是发展微小卫星、纳米卫星等，也是当今一个吸引人的趋势。

在飞行器飞行过程中的各个不同阶段，存在不同类型的动载荷所引起的不同问题，都需要分别研究。其中尤为值得注意的是由于众多子系统柔度大，模态密集，工作环境恶劣，因而动响应大，非线性问题突出，迫切需要发展动力学、振动与控制新的理论和技术，对航空航天提供有力的技术支持。

研究需求

大型复杂飞行器结构动力学及局部连接结构动力学 大型飞行器结构的特征是：(1) 呈现为低刚度、大柔性、弱阻尼的柔性结构动力学系统；(2) 呈现为多柔体、多液腔、变结构、变质量、变参数、大扰动、多自由度的高维非线性动力学系统；(3) 呈现为柔性体结构振动、液体燃料晃动、多刚柔体系统振动、内外环境扰动与各级控制系统相互作用的复杂强耦合动力学系统。

大型飞行器结构动力学有一系列特殊问题需要解决，包括建模问题，柔性多体系统耦合动力学问题及大型飞机结构完整性问题等。

航空航天结构由多个部件组装而成。结构的连接情况对结构刚度以及模态有重大的影响：哈勃望远镜曾因间隙和昼夜温差而导致帆板“滑动—卡死”周期性运动造成不能精确定位；机构连结间隙造成摩擦滑动和空转下的内撞击，导致太阳能帆板的“堵转”等。总的说，单个连接的情况已有研究，但含大量连接结构的动力学问题尚未有进展。

新型航空航天器动力学及新结构、新材料 新型航空航天器不断出现，例如，大至超高速无人机、长寿命空间站以至设想中的居民点；小至智能变形飞行器、仿生扑翼飞行器，此外还有绳系卫星、薄膜结构天线或卫星等等，均有特殊的动力学及振动控制问题。新结构、新材料和新工艺对航空航天动力学有重要影响，特别是复合材料和智能结构[12]在航空航天器中已广泛采用。

充气空间结构的动力学及展开研究 充气空间结构以柔性薄膜材料制造，发射体积小、重量轻、造价低，发射到预定轨道以后，充入气体使结构膨胀展开成型，生成预先设计的形状加以固化，实现其功能要求。可用于充气空间天线、太阳能帆板支撑结构以及空间防护结构等，其动力学及展开有特殊研究内容。

航天器的液体晃动动力学问题 大型长寿命航天器的液体燃料所占重量比重不断加大，液体晃动频率不断降低，越来越低的晃动频率容易与航天器的结构振动或控制系统的特征频率相耦合，同时晃动会对航天器产生显著的干扰力、干扰力矩及冲击压力，可能对航天器的姿态控制和稳定性产生重大影响。

微小飞行器及 MEMS 技术 微小飞行器是航空航天的一个重要发展方向。为实现微小化、纳米化，首先要实现传感器、作动器、结构件、连接件的 MEMS 器件。这些 MEMS 器件有许多功能是利用振动来实现的，例如，利用梳齿状结构振动的三向 MEMS 陀螺器件组合，其尺度仅是 1cm³ 的立方体。MEMS 器件本身及微小飞行器的动力学、振动及控制是一种新的挑战。

（二）飞行器振动控制及噪声抑制

航空方面，新型、大型客机的减振和降噪，航天方面，整星及仪器舱、各种有效载荷的减振隔振，近年来已不断取得进展。以空间飞行器为例，随着国际运载火箭发射服务市场竞争的日益激烈，采用整星减/隔振技术，改善卫星的振动环境，提高卫星和火箭的安全可靠性已成为大势所趋。在美国空军研究实验室(UFRL)的资助下，美国 CSA 工程公司已研制出两种被动隔振器，成功地应用于 6 次卫星发射任务中。Honeywell 公司研制出主被动一体化振动控制系统 ELVIS 样机，也具有明显减振效果。卫星本体及运载火箭仪器舱结构利用约束阻尼层结构减振，在国内外应用相对普遍。

研究需求

旅客机舱内的减振降噪技术 飞机客舱的噪声主要来自发动机和气动力噪声，它严重地影响了机组人员和乘客的舒适，是现代航空运输的污染问题之一。传统的被动降噪方法已经不能满足日益增长的需求，改进客舱声学环境必须采用新型的主动降噪技术。此外，随着航空发动机功率的提高，航空发动机转子、叶片振动控制以及挤压油膜轴承减振问题也都需要更深入的分析。

整星隔振技术 在发射阶段的整星隔振技术有许多特殊的要求，包括多轴隔振技术、柔性体隔振技术、在降低纵、横向刚度的同时提高侧倾刚度的要求、承受发射过程中较大的过载、工作环境苛刻、变质量、变载荷，以及对柔性卫星隔振效果必须建立新的评价体系等；特别是卫星设计刚度和频率的容许可变动范围很小，而可提供的隔振器结构空间和结构质量

以及可提供的能源均受到极为严格的限制，因此在设计中，设计参数调整的可行性空间极为狭小。针对以上整星隔振的特殊问题，必须从隔振原理、技术及相关的材料、工艺等进行综合分析，全面统筹，实施主被动隔振结合，给出最佳组合，方能达到所需的隔振效果。

在轨有效载荷的减振隔振技术 航天器在轨运行时，受到多种振动载荷的作用，将降低对地或对深空观测的相机、望远镜、干涉仪等敏感的光学设备的成像质量；严重影响在空间进行的大量的流体、生物、材料的微重力实验；使得星际及星地激光通信的高指向精度要求(误差小于 10^{-7}rad)难以实现。Stewart 平台是当前研究最广泛的多轴隔振技术，它以六根具有独立传感、阻尼、作动功能的铰接作动器，将敏感的有效载荷连接于基座，实现精密的六自由度隔振。

(三) 航天器姿态动力学与轨道动力学

现代空间工程和空间科学对航天器的姿态指向精度和轨道的导航、机动精度提出了更高的要求：高精度的姿态控制才能保证对地观测或对深空观测的卫星的成像质量，低能耗的轨道设计和安全高速的轨道机动是降低任务成本、实现航天器复杂的任务目标的保障。

研究需求

自主导航 随着各类探测器的发射成功和科技水平的进一步提高，人类对行星探测的步伐也逐步加快：对月球和火星的无人和有人探测又掀起了高潮；对彗星和小行星的探测也已经成为新世纪深空探测的重要内容。远距离的深空探测造成地面测控站跟踪探测器的长时间的通讯延迟，不仅促使深空探测器需要自主导航，甚至地球卫星为了提高其机动性、隐蔽性、抗干扰性和自主生存能力也需要进行自主导航。自主导航对轨道动力学提出了新的课题。

拉格朗日点的轨道动力学与控制 太阳系中，各星球之间在不同的瞬间存在一定的引力平衡区域，称为各星球间的拉格朗日点，或称平动点。日地平动点是大多数科学卫星的理想位置，而地月平动点则可作为月球探测与开发、深空探测的理想位置和基地，日地、地月平动点任务的轨道设计问题成为航天领域研究的热点之一。“行星际高速公路”(IPS)由所有的行星和卫星的平动点附近的不变流形拼接而成,是贯穿这个太阳系的低能传送轨道所组成的巨大的管式网络，可以大大节省行星际旅行所需的能量。拉格朗日点轨道的轨道嵌入及站位保持等问题是研究的重点。

姿态能量一体化控制 实现姿态—能量的一体化控制是一个复杂的动力学问题。利用

储能飞轮或力矩陀螺可以实现航天器的姿态—能量的一体化控制，减少系统的总质量，提高有效载荷比重，延长航天器的在轨寿命。

卫星编队飞行 编队飞行是由若干颗卫星在轨道上构成一个特定形状，共同绕地球中心旋转。编队飞行中各颗卫星相互通信联系，相互协同工作，共同承担通信、信号处理和有效载荷任务的实现。编队卫星的轨道实现和保持是当前轨道动力学研究的一个热点。

（四）飞行器中的非线性动力学问题

随着航空航天飞行器向着高速、大机动、大型化、微型化等方向发展，飞行器动力学中的非线性问题日益突出。传统的线性分析设计方法已经不能满足飞行器分析设计的需求。非线性动力学系统的理论与方法已取得长足的发展，它一个主要特征是解的多样性，对应跳跃、突变、极限环振荡、甚至混沌运动等特定的物理现象，开展飞行器非线性动力学问题的研究，将有助于深刻认识和揭示多种非线性现象产生的规律及其相互转换的条件和机理，为预防和消除所不希望发生的非线性不稳定现象提供理论基础，为先进飞行器设计提供依据。

研究需求

飞机颤振抑制技术 飞机结构的颤振历来是飞机设计中一个重要的动力学问题，其实质是气动弹性耦合系统出现的不稳定现象，当飞行速度达到临界颤振速度时发生自激振动会酿成灾难性后果。颤振抑制技术是飞机飞行安全的必要保障。

航天器铰接结构非线性动力学 航天器上安装的太阳翼、天线等附件大多是由铰链将附件部件连接在一起构成的，称为航天器铰接结构。航天器铰接结构的非线性动力学特性，尤其是其基频动力学特性，是航天器设计的主要参数，直接关系到航天器控制系统方案的制定，并影响航天器指向精度和姿态稳定度，是设计航天器时需要考虑的重要问题。

航空航天器大角度机动和部件大柔性导致的非线性动力学 传统的飞行器动力学和振动分析一般基于结构的微幅振动。对机翼、天线、太阳能帆板、大型桁架等挠性结构，以及储箱液体晃动等子结构，在航空航天器大角度机动下，部件的大柔性运动将表现为时变的几何非线性及物理非线性。对大型柔性航空航天器，刚体运动的非线性部分、弹性变形的非线性部分、大幅度晃动间的非线性之间的耦合将带来新的复杂现象。

（五）飞行器的动力学环境预示及实验技术

在飞行器飞行过程中将承受复杂和严酷的动力学载荷。动力学环境预示分析是利用精确的飞行器有限元模型、准确的飞行器外力函数、充足的历史实测数据实现对设计中的飞行器动力学环境进行合理的预示。动力学实验技术要在地面试验中模拟飞行器在实际飞行过程中所受的动力学环境，既能够提前、不漏检地查出飞行器存在的强度方面的隐患，又要避免“过”实验的发生。随着计算机和数字技术和传感器技术的飞速发展，大大促进了飞行器的动力学环境的预示能力和试验技术水平的提高。目前一个关注的问题是如何评价和改善地面模拟试验动力学预示结果与实际飞行环境中动力学行为的一致性。

研究需求

大型航空航天器动力学特性预示技术 基于动力学环境预示得到的动力学环境条件，是飞行器及其设备设计和地面实验的主要依据，直接决定着飞行器的结构和设备的设计，影响着地面验证实验的有效性。传统的飞行器动力学仿真预示动特性技术不能完全满足飞行要求，必需进行实尺的地面动力学试验，这对大型飞行器是一个沉重的负担，而且对未来更大规模的飞行器也可能无法实现。所以要研究不必做地面实尺寸的整体动力学试验，而改用局部动力学实验，并结合数字仿真来实现飞行器整体的动力学特性预示，为此需要解决一系列技术关键，包括精确建模、准确估计阻尼值等难题。

力限控制试验技术 在传统的加速度控制振动试验中，试验台的机械阻抗与星箭对接面的阻抗存在很大的差异，如果利用加速度作为控制曲线可能导致严重的“过”试验现象。因此，提出在激振器和试件之间安装力传感器来模拟真实的界面激振力，也就是所谓的“力限”控制试验技术。NASA 在上世纪九十年代将力限控制技术应用于航天器振动试验，现已制订严格的力限控制方法的技术标准。国内在力限控制技术研究和应用方面尚处于起步阶段，采用力限控制技术对提高我国的飞行器设计水平有重要意义。

（六）航空航天动力学中的交叉学科

航天航空器是复杂的动力学系统，它在工程上和学科上都与其它学科广泛交叉，不仅丰富了航空航天动力学的内涵，而且促进了研究的发展。下面仅举两例说明。

研究需求

高超音速下的热气动弹性问题 高超音速飞行的气动加热给高超音速飞行器的设计增加了很多挑战性的问题。热气动弹性是其中的一个关键问题。由于高超音速飞行中气动热

冲击导致结构的瞬态不均匀受热,使结构内部产生不均匀的热应力,改变了结构的刚度分布,也改变了原有结构的模态,这相当于在结构上施加了冲击载荷,使结构产生强烈振动,严重时可能导致结构破坏,或使系统的稳定性降低,导致系统失稳。

超空泡理论与实验研究 水下发射武器可能形成超空泡,将改变其受力状态,可能使运动体的浮力和阻力大幅度减少,严重改变运动体的动力学状态。超空泡流体动力学研究的主要问题包括:超空泡的产生、发展与稳定性;水下航行体在超空泡流场中的流体动力;超空泡水下航行体的运动及稳定性控制。

二、结束语

由于经济建设和国防的迫切需求,航空航天动力学在过去几年里得到飞速发展,同时也面临一系列新的问题。航空航天动力学作为面向航空航天工程实际的应用基础性学科方向,一方面要结合当前亟待解决的工程实际问题,推动国家经济的发展;另一方面要从未来的航空航天技术的前瞻性发展需要出发,解决超前的基础研究和应用基础研究问题,并推动动力学与控制学科的发展。

交叉力学学科发展专题报告

英文摘要

Nowadays, the practical problems in mankind's daily life and production activities have become more complicated than ever. The situation intensively stimulates the development of interdisciplinary subjects in mechanics. Multidisciplinary mechanics is a fertile area full of exciting opportunities and wide applications. Physical mechanics is primarily concerned with fundamental issues of properties of various substances directly related to many important problems in engineering. The behavior of solids and gases under high temperature and high pressure has been studied from microscopic point of view. Further blend of mechanics and life sciences constitutes the contents of biomechanics, and researches in the field are carried out in almost all forefronts, particularly, at cell-molecule level, including bone mechanics, blood hydrodynamics and tissue engineering. Because of the complexity involved in propagation of stress waves, dynamic fracture, high-velocity impact, crashworthiness of structures, a number of numerical and experimental techniques are developed in explosion mechanics. The outcome of these researches has been successfully applied in structural and geotechnical engineering. The recent researches in environmental mechanics are focused on the quality of air and water body, environmental calamities, and geodynamics, etc. Particularly, the needs for understanding many large scale natural phenomena related to the transport of momentum, mass and energy for predicting weather and climate have resulted in the emergence of a branch of fluid mechanics, namely, geophysical fluid dynamics with rotation and stratification effects taken into consideration. With the development of the society, more attention is being, and should be, paid to mechanics related to natural and geological calamities, such as earthquakes, landslides, debris flows, tsunamis, and floods, etc. In recent year, there has been significant progress in the research of nuclear fusion. Numerous TOKMAK devices, laser devices, and ultrashort laser devices have been upgraded and built, and many researches have been performed. In the 21st century, with the advancement of modern science and technology, the press for the development of economy and society will provide opportunities with immense challenges for multidisciplinary mechanics.

一、引言

力学在人类认识自然、适应自然、从事工程建设和实现经济和社会的可持续发展中发挥着日益重要的作用。20 世纪以来，力学有了很大的发展，取得了辉煌的成就，创立了一系列重要的新概念、新理论和新方法。尤其人类面对的实际问题越来越复杂，对解决实际问题的要求也越来越高，力学与其它学科的交叉和融合十分突出，形成了许多力学交叉学科：力学与物理学的交叉形成了物理力学；与生命科学的交叉形成了生物力学；与环境科学的交叉形成了环境力学；以及爆炸力学、等离子体动力学、地球动力学等都形成了力学的新的学科生长点，不断地丰富着力学的研究内容和方法，并使力学学科始终保持着旺盛的生命力。

这些力学交叉学科大多是在上世纪中叶逐步形成的。经过几十年的发展各自形成了自己的理论体系和特色，获得了长足的进步。在火箭喷气推进技术、核工程技术、人类健康、环境治理、灾害防治、空间探测、微电子技术，以及交通、水利、天气预报、矿业工程、武器设计和工业安全防护等方面发挥了重要作用，已成为现代工程技术和社会发展的基础和支柱。结合国际研究发展和我国学者的工作，几个主要力学交叉学科的研究动态、前沿方向和发展趋势可概括如下。

二、学科现状与发展趋势

2.1 物理力学

物理力学是著名力学家钱学森于 20 世纪 50 年代初开创的一门新兴交叉学科,主要针对非常条件下的宏观物性,强调从构成物质的微观粒子结构和相互作用出发,运用物理化学和现代物理学的已有成果,通过构造简化模型,并发展有效的数学和运算方法,阐明介质和材料的宏观性质。物理力学的开创和早期研究,如:高温、高压气体热力学性质、双原子气体辐射计算和光谱吸收系数计算,在当时的喷气推进等工程中起到了重要作用。

近 50 年来,物理力学获得了很大发展。平衡态和非平衡态统计力学的发展为物理力学提供了新概念、新理论,如:格林函数理论、临界现象理论中的标度律和重正化群理论、广义 Master 方程、非平衡统计算法等。量子化学方法和原子分子物理为物质微观图像的清晰化提供了基础。分子动力学方法、蒙特卡罗方法、从量子力学密度泛函理论出发的连续计算

多尺度方法, 以及与蒙特卡罗方法相结合的第一原理分子动力学方法等, 为研究介质及材料的平衡或非平衡, 乃至瞬态力学性质, 提供了有力的方法。原子力显微镜和扫描隧道显微镜实现了原子分辨的观测, 这为原子尺度的微观力学理论分析提供了实验数据。

我国学者在物理力学研究方面取得了丰硕的成果。高温、高压下辐射不透明度和物态方程的研究为解决核爆炸、飞行器再入等问题提供了途径和方法; 炸药平面透镜及二级轻气泡等物态方程的新实验技术, 高温高压条件下石墨转变成金刚石的结构转化理论框架, 受到国际同行的高度评价。在离子化气体和高温气体的化学反应及其动力学研究、气体化学反应速率常数的微观理论、气流介质与激光相互作用的理论和数值研究、液体结构的分子动力学研究、量子蒙特卡罗方法研究、晶界弛豫研究、材料断口分形研究, 以及固体界面物理力学研究等方面取得了重要成果, 在国际上赢得了重要的学术地位。

现今物理力学的研究工作主要集中于 3 个方面: 高温气体性质 (气体在高温下的热力学平衡性质、输运性质、辐射性质等); 稠密流体性质 (高压气体和各种液体的热力学平衡性质、输运性质以及相变等); 固体材料性质 (微观理论研究材料的弹性、塑性、强度以及本构关系等)。随着计算机技术的迅速发展和观测仪器及实验手段的不断改进, 也将促进物理力学不断面向一些更加复杂和困难的实际问题, 如真实物质的平衡相变问题、摩擦问题、高度非平衡问题等。

2.2 生物力学

生物力学是著名华裔力学家冯元桢教授于 20 世纪 60 年代开创的力学交叉研究领域。早期的生物力学主要是以定量生理学为目标的宏观层次研究, 包括: 血液循环动力学、软组织力学、骨力学、血液流变学等方面。20 世纪 90 年代后, 开始强调以定量生物学为目标的微观层次研究, 并注重与宏观相结合。主要包括分子力学、细胞力学、组织工程中的生物力学问题等方面。同时, 骨-肌肉-组织力学、血流动力学及血液流变学等分支学科仍在继续深化。

当今生物力学发展正经历着深刻的变化。基础研究逐步精细化及定量化, 更加注重宏观向微 (细) 观深入、并强调宏-微 (细) 观相结合。在基础研究方面, 重点研究生物学的定量化和精确化问题; 在应用研究方面, 组织工程、药物设计与输运、血流动力学、骨-肌肉-关节力学等正在得到临床认同。当前生物力学发展的前沿领域主要包括: 细胞-分子力学与工程; 器官-组织力学与工程; 骨骼-肌肉-关节力学与工程; 生物力学新概念、新技术与新

方法等。

近 10 余年来，我国生物力学发展迅速，几乎涵盖了国际生物力学的主要前沿方向。尽管我国当前生物力学研究总体上仍处于跟踪水平，但一些领域也具有一定的相对优势：生物大分子间特异性相互作用的定量化、作用力对分子键结合与解离的影响方面的研究与国际水平相当；血瘀证与活血化瘀研究具有中国特色，而血液流变学则为其定量化做出了重要贡献；胆汁流变学以及胆石成因、胆管力学性质、胆道排石机理及关键技术、肝脏流变学等方面的研究工作具有一定的原创性。

根据国际生物力学大发展和国内发展现状，在今后一个时期我国生物力学研究应重点发展的领域包括：细胞-亚细胞-分子生物力学，组织-器官力学，骨-关节力学，心血管工程力学，空间生物力学与重力生物学，生命现象系统化和模型化研究等。同时，针对我国经济和社会可持续发展的需求，积极开展植物生物力学和仿生力学的研究，以及继续促进我国具有原创性的肝胆流变学研究。

2.3 环境力学

环境力学是 20 世纪 80 年代，随着社会和经济可持续发展的迫切需求而发展起来的交叉学科，其内涵涉及大气环境、水环境、岩土体环境、地球内部流动，地球界面过程、环境灾害、工业环境流动、环境多相流动，以及理论建模、计算方法和实验技术等方面。近 20 年来主要在大气环境、水环境、全球环境和自然环境灾害等方面得到了迅速发展。

大气环境主要通过研究边界层和自由大气运动和物质运输，解释各种大气环境现象如：沙尘暴、酸雨、空气污染等。水环境主要强调海洋环流，湖泊、河流和河口海岸带的泥沙、营养盐、有机物、污染物等物质输送及其对生态环境的影响，发展了多相、多组分的精细化预报模型。基于物理过程的土壤侵蚀和风沙运动研究为荒漠化治理提供了理论基础。全球环境研究注重在大型国际研究计划的框架下进行，更加重视各圈层间的相互作用，认识到地球界面过程对气候变化的影响，以及人类活动可以通过温室气体排放和土地利用来影响全球环境。自然环境灾害研究着重研究与地质灾害（如滑坡、泥沙流等）相关的力学问题。有限元、离散元的应用大大促进了地质灾害的研究水平和预测可能性。21 世纪的环境问题研究更加走向精细化和定量化，大量数据的积累要求模型化和数学化，推动着环境科学由宏观向微观深入，并且宏观与微观相结合。力学与环境科学进一步交叉和融合，已是当今环境力学发展的主要趋势。

我国的环境力学与国际研究同步发展,自 80 年代以来,力学研究人员积极参与环境问题研究,取得了可喜的成果。如:利用环境风洞和分层水槽,实验研究大气或水体中的污染物对流扩散,为核电厂设计、城市 CBD 规划,苏州河治理提供重要依据;结合长江口航道整治,珠江口治理,研究河口非恒定水流与泥沙输运,在河口海岸工程中发挥作用;建立二维坡面产流、产沙动力学模型,扩展到小流域,分析侵蚀的影响因素,给出土壤侵蚀临界坡度,为西部治理提供科学依据;研究风沙起动临界风速,得到风沙输沙率公式,发现风沙带电现象,分析了它对风沙运动的影响;研究了地球界面过程,模拟了有植被的大气边界层,分析结皮层对土壤水分运动影响及其生态效应;通过湍流模拟,获得波龄,稳定度对海气交换系数的影响,为气候模型参数化提供依据;用涡动力学研究台风异常路径,数值模拟台风浪、风暴潮灾害。经过 20 余年的积累,逐步形成了环境力学的理论框架,凝聚了环境力学的研究队伍,为我国可持续发展做出了贡献。

21 世纪我国的环境力学研究应更加注重机理研究、规律分析与防治措施的有机地结合。一方面强调其共性科学问题,包括流动与输运的基本理论和方法;气、液、固界面相互作用;多相、多组分、多过程耦合;以及环境力学中模型实验的尺度效应等。另一方面,瞄准西部开发和沿海经济开发以及重大工程中的实际问题:包括西部干旱环境治理(土壤侵蚀、沙尘暴、荒漠化治理等);河流、河口海岸泥沙、污染物输运及其对生态环境的影响规律;以及重大环境灾害发生机理及预报(热带气旋,洪水、滑坡/泥石流、全球变暖)等。

2.4 爆炸力学

爆炸力学主要研究爆炸、冲击和能量突然沉积等强动载荷下介质、材料与结构的力学响应、效应及工程技术应用,已成为近代工程科学技术的一个重要基础和支柱。

由于航空航天和武器技术需求的牵引,爆炸力学的理论和实验得到了长足发展。爆轰冲击波动力学理论为非理想爆轰理论传播和精密数值模拟指出了发展途径,并得到了重要的实际应用。考虑均匀和非均匀反应的冲击起爆理论模型,可以较全面地模拟含能材料在热和冲击加载下的响应、反应以及到爆轰的转变。量子分子动力学计算、分段拟合的解析与经验型物态方程,以及电导率新理论模型提高了对金属—绝缘体转变过程、温密物质和超高压过渡区中物态及物性理论预言的准确性。磁压驱动等熵压缩和高速宏观飞片实验开辟了研究更大范围物态方程的新途径。考虑微结构对陶瓷、混凝土等动力学性能影响的数值模拟,揭示了非均匀、有结构材料冲击响应的介观物理图像和损伤断裂机制的信息。应力波传播、动态

断裂、高速撞击、侵彻、结构响应和冲击防护等方面的大量研究，解决了许多实际问题。磁驱动等熵压缩和高速飞片成为最引人注目的新型加载技术。电子相机、高速摄影技术、X 闪光照相技术、宽带高速数字示波器以及相关设备已普遍应用于爆炸力学实验。

国内的爆轰研究较好地满足了射流、射弹、云爆等类型战斗部的设计、实验和数值模拟的需要；爆炸复合、材料合成、表面喷涂等技术已实际应用于工业生产。在离散粒子计算、分子动力学和第一原理计算方面做了很多原创性和较先进的工作。基本掌握爆炸力学近代实验测量技术，高速摄影、X 闪光照相、传感器、激光测速等技术运用比较普遍。一些先进技术如数字散斑、磁压加载、压剪加载、激光干涉和光谱测量，也取得了一定进展。总之，动高压加载技术、快电子学和光电子学仪器设备、激光测量技术、大型计算机和先进数值编码近年来的飞跃进展，推动爆炸力学发展到了一个崭新的阶段。

爆炸力学发展的重要科学问题和前沿突破方向主要包括：非均匀性、微结构、相变和化学应对物质与材料动力学性态的影响的实验、多尺度连续介质数值模拟和分子动力学、第一原理计算编码及数值研究；高应变率、复杂应力状态和高能量密度加载下物质、材料与结构的力学性质和响应；钝感炸药性能和爆炸安全问题研究，包括非理想爆轰、反应引发和向爆炸转变机制、终点弹道效应等；先进的实验加载技术和快响应、高分辨能力的实验诊断技术；等。

2.5 等离子体力学

等离子体力学主要包括高温等离子体力学和低温等离子体力学。近几十年来，等离子体力学取得了重要发展。在不同规模托卡马克装置上实现了各种改善等离子体约束的运行模式，使得某些区域和输运通道的输运系数已降到新经典理论预言的水平，聚变三乘积已达到或接近氘-氚热核聚变反应的得失相当条件，已具备开展燃烧等离子体物理和聚变堆集成技术研究的条件。间接驱动惯性约束聚变原理实现热核聚变点火的科学可行性得到了实验验证。正在建造中的美国国家点火装置(NIF)和法国兆焦激光装置(LMJ)将用于演示高增益热核聚变点火，其成功的点火实验将是惯性聚变研究的重要里程碑。低温热等离子体已用于耐高温、耐磨损、耐腐蚀、生物相容涂层的制备，高、新技术材料的制备，模拟飞行器再入大气层的高温环境与进行热防护材料的性能试验，危险废弃物的无害化处理；大气压非平衡等离子体已用于大规模生产水处理用的臭氧、等离子体显示屏和用于表面处理、消毒环保、电光源、激光器；低气压放电等离子体已用于微电子器件的刻蚀、镀膜与清洗，金刚石或类金刚

石膜、纳米材料、功能材料的制备，材料表面改性与污染物处理等。

我国的聚变研究也有较大的发展，先后改造升级或建成了多种托卡马克装置、激光装置和多台超强超短激光装置，并与理论和数值模拟研究相结合，开展了有关磁流体不稳定性、湍流和输运、加热和电流驱动、激光与等离子体相互作用、高温辐射流体力学和内爆动力学等方面的研究，取得一些有意义的研究成果。以 EAST, HL-2A 装置为基础的国内磁约束聚变实验平台和国家点火装置的建设，促使我国的聚变研究将会有较快的发展。低温等离子体研究也取得了一些有特色的研究成果，例如层流热等离子体长射流产生与特性研究，等离子体离子注入研究等。随着近几年微电子行业的强势发展，我国在低温等离子体相关方面的研究一定会取得较大的进步。

研究与高比压、高约束、高自举电流份额等性能集成的等离子体有关的科学问题，将是未来十年内磁约束等离子体研究的重要方向。点火物理基础和高能量密度物理研究，将是惯性约束等离子体的研究重点。研制新型的等离子体发生器，等离子体流和喷射于其中的原料颗粒或工作气体以及和环境气体之间的相互作用，热等离子体与材料表面的相互作用以及涂层或膜的形成过程，一直是热等离子体的研究热点。探索建立偏离局域热力学平衡和考虑稀薄气体效应的等离子体理论模型，具有重要的科学意义和实际应用背景。在大气压非平衡等离子体方面，重点在研究其基本物理过程特别是非平衡特性。在低气压低温等离子体方面，重点是通过实验诊断和理论模型相结合的方法研究等离子体放电参数与外界可控参数之间的关系，以设计出能适应工业界各种不同要求的等离子体放电设备。

2.6 地球动力学

地球动力学是力学、地球物理学、地质学、地球化学的交叉学科，它运用力学的基本规律，研究地球整体及其各个圈层耦合的运动状态和机理。研究内容主要涉及地幔对流和热柱、地球板块运动、岩石圈层间相互作用，以及火山、地震、高原、山脉等形成机理。

20 世纪 60 年代以来，地球板块理论的建立促进了地质流体力学新分支的形成，研究了介于地壳和地核间的地幔对流，包括：物质性质随深度和温度的变化，相变界面的影响，以及中脊形成、涌升流、热斑、海底扩张、板块俯冲等，解释了火山、高原、山脉成因。我国学者在 80 年代研究了地震的相互作用和触发的问题。近 20 年来，小尺度的岩浆库流动研究发展很快，考虑了热传导、对流、挥发、熔化等过程影响，特别是由于冷却和结晶导致的组分差异对流。从研究岩浆库演化规律出发解释火山喷发和成矿的机理等。近年来，大型计算

机和并行计算的发展（如日本的“地球模拟器”）成为地球动力学发展的亮点。

当今的地球动力学研究更加注重学科交叉，重要科学问题和前沿方向包括：与地球化学研究相结合，更加关注化学元素的分布和转移成矿的地幔对流研究，行星内部的地幔运动；地核、地幔、地壳和大气圈、水圈的相互作用；高原的形成和演化机理，岩石层非线性动力学及其在地震预报中的应用；断层本构关系，地震孕育发生的循环和动态破裂传播的全过程；以及地球科学与信息科学的结合，发展地球动力学大型计算平台；等。

三、展望

随着人类社会和经济的不断发展，面对的实际问题越来越复杂，对解决实际问题的要求也越来越高，许多复杂问题的解决要求更加精细化和定量化。力学在长期发展历史中形成的建模、分析、计算、实验相结合的研究风格，十分有利于深化对物理过程和基本规律的认识。因此，力学与其它学科的深入交叉与融合日显重要，力学交叉学科的发展将为更好地解决人类社会所面临的复杂问题提供新的理论支撑和技术途径。现代科学技术的飞跃进步，以及社会和经济发展的迫切需求，也为这些新兴交叉学科带来新的挑战 and 机遇，将促进力学交叉学科发展到一个崭新的阶段。

参考文献

- [1] 李家春，吴承康，环境力学与可持续发展，力学进展，1998，28(4)，433~441.
- [2] 李家春，自然环境中的流动与输运，自然、工业与流动（第六届全国流体力学学术会议论文集），北京：气象出版社，2001，74~81.
- [3] 龙勉．细胞-分子生物力学：与生命科学有机融合的领域．中国科学院院刊．2001，16：408~411.
- [4] 钱学森，物理力学介绍，近代物理介绍，北京：科学出版社，1957.
- [5] 朱如曾，钱学森开创的物理力学，力学进展，2001，(4)，489~498.
- [6] ITER Physics Basis Editors et al., ITER Physics Basis, Nuclear Fusion 39, 2137~2638 (1999).
- [7] Li JC, Liu QQ, Zhou JF, Environmental Mechanics in China, Advances in Applied

- Mechanics. 2003, 39: 217—306.
- [8] Lieberman, M A, Lichtenberg, A J, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Wiley, New York, 2nd edition, 2005.
- [9] Lim CT, Zhou EH, Quekb ST. Mechanical models for living cells—a review. J. Biomech. 2005.
- [10] Lindl, J. Development of the Indirect-drive Approach to Inertial Confinement Fusion and the Target Physics Basis for Ignition and Gain, Physics of Plasmas, 1996, 2, 3933-4024.
- [11] Middleton GV, Wilcock PR. Mechanics in the earth and environmental science, New York, Cambridge University Press, 1994.
- [12] Panin VE, Modern Problem of Physical Mechanics. In: Mesomechanics, 2000, Vol. 1, Beijing: Tsinghua Univ. Press. Edt GC Sih, 127-142.
- [13] Proc. of the 13th Symp. (Inter.) on Detonation, Office of Naval Research, 2006.
- [14] Proceeding of the 8th Inter. Conf. on Mechanical and Physical Behavior of Materials under Dynamic Loading (DYMAT), Ed. J. Cirne, R. Dovoneval et al, J. Phys. IV France 134, 2006.
- [15] Raats PAC, Smiles D, Warrick AW, Environmental Mechanics: Water, Mass and Energy Transfer in Biosphere, American Geophysical Union, 2002.
- [16] Shock Compression of Condensed Matter – 2005, Ed. M. D. Furnish, M. Elert, T. P. Russell and C. T. White, AIP Conference Proceeding, v. 845, 2005.
- [17] Shul, R. J. , Pearton, S J, Handbook of Advanced Plasma Processing Techniques, Berlin: Springer, 2000.
- [18] Tsien H S, Physical mechanics, a new field in engineering science. J Amer Rocket Soc. 1953, 23: 17~24.
- [19] Yoshida M., Kageyama A., Low-degree mantle convection with strongly temperature- and depth-dependent viscosity in a three-dimensional spherical shell, Journal Of Geophysical Research, 111, B03412, doi:10.1029/2005JB003905, 2006.

[20] Zhu C, Bao G, Wang N. Cell mechanics: Mechanical responses, cell adhesion, and molecular deformation. *Annu. Rev. Biomed.* 2000, 2: 189-226

附件

交叉学科发展专题研究报告之一

生物力学

龙勉

中国科学院力学研究所

生物力学是研究生命体运动和变形的学科，主要通过生命科学的原理和方法与力学的原理和方法相结合或融合，认识生命过程的（定量）规律，并用以维持、改善人类的健康。生物力学已成为生物医学工程的重要基础性学科，也是现代力学学科的新增长点之一。

一、国际生物力学的发展概况

国际生物力学研究始于 20 世纪 60 年代。著名华裔力学家冯元桢教授于 60 年代初在加州 UCSD 大学筹建了生物工程系，从而开创了生物力学研究领域。美国著名流变学家 Copley 教授几乎在同一时期转向生物流变学研究，推动了血液及体液流变学研究的开展。40 年来，生物力学发展历程可大致分为两个阶段。第一阶段为上世纪 60~90 年代，主要是以定量生理学（人工关节、人工心瓣等）为研究目标、以宏观层次（组织、器官、整体等）为研究对象、以力学符合生理和解剖学需要为研究方法，其特征是力学与生命科学交叉（但有痕迹）。主要内容包括血液循环动力学、软组织力学、骨力学（含创伤、矫形、康复）、血液流变学等方面。第二阶段为上世纪 90 年代至今，主要是以定量生物学为研究目标、以微观层次（分子、细胞等）为研究对象并注重与宏观相结合、以力学符合细胞与分子生物学需要为研究方法，其特征是生命现象的力学-化学、力学-生物学耦合，体现“你中有我、我中有你”的融合。主要内容包括分子力学（蛋白质相互作用、分子马达与分子航标等）、细胞力学（细胞间或细胞-基质相互作用等）、组织工程中的生物力学问题等方面；同时，骨-肌肉-组织力学、血流动力学及血液流变学等分支学科仍在继续深化。

目前，生物力学的学科基础涵盖生物学、医学、农学和力学、物理学、化学、数学等多个学科；研究内容包括从整体、系统、器官到组织、细胞、分子各个层次；研究方法和技术涉及到理论模型、数值计算、离体实验、临床验证等。

二、国内生物力学学科发展和研究现状

我国生物力学研究始于上世纪 70 年代末期，生物力学被首次列入力学发展规划。1979 年冯元桢教授回国讲学、开设生物力学讲习班，直接推动了我国生物力学研究的起步。80 年代以来，一批资深的力学、物理学、医学、生物学工作者加入到生物力学研究行列中，通过加强与国外学者之间的学术交流，建立了我国早期生物力学基地和研究团队。其研究内容主要集中在三个领域：1) 体液流变学：主要涉及胆道（肝脏）流变学、血液流变学、细胞流变学、活血化瘀的流变学效应等方面。2) 血流动力学：主要涉及心室（阻抗）力学及其与临床结合、心瓣（疲劳）力学、心血管力学模拟、人工心瓣及相似参数、血流分析与模拟、脉搏波传播、血管入口流、临床心血管工程等。3) 骨力学：主要涉及颅脑损伤力学、骨压电/动电效应、骨/关节力学、颞颌骨/关节力学、骨折愈合力学、骨应力遮挡效应等。此外，早期研究工作还包括了呼吸力学、软组织力学、药代动力学等方面的研究。这一阶段的发展、积累和成果为开创我国生物力学领域做出了重要贡献，起到了奠基性作用。

近 10 余年来，我国生物力学发展取得了长足的进步，几乎涵盖了国际生物力学领域的主要前沿研究方向，主要集中在细胞-分子力学、骨力学、血液动力学、组织工程等方面。在这一发展过程中，宏-微观结合的趋势也较为明显，如骨力学、生物流变学、组织工程等研究开始深入到细胞-分子水平。我国生物力学工作者还在发展生物医学工程的新概念和新方法，提供新的临床诊治仪器和装备，促进新药设计、筛选与开发等方面做出了重要贡献。

三、学科特点和前沿领域

当今生物力学发展正经历着深刻的变化。生命科学与包括力学在内的基础和工程科学交叉、融合目前已愈来愈成为当今生命科学的研究热点，同时也是力学学科的新增长点。基础研究逐步精细化及定量化，大量数据的积累要求模型化及数学化，为生物力学研究开辟了新的用武之地。现代分子和细胞生物学既提出大量新课题，又带来了许多新工具，推动着生物力学由宏观向微（细）观深入、并强调宏-微（细）观相结合。实际应用的不断涌现，催生着以解决与应用相关的工程技术问题为目标的新的生物工程学。这一新的生物工程学远远超出了基于微生物的、以发酵工程为标志的生物技术及以医疗仪器研发为目标的生物医学仪器这两个传统的领域。不断寻求新的力学和物理原理与方法，与生命科学及其它基础和工程科学进一步融合，已成为当今生物力学发展的主要特色。当今生物力学正经历从“ $X \times \text{Bio} = \text{Bio-X}$ ”（交叉）到“ $\text{Bio} \times X = X\text{-Bio}$ ”（融合）的转变。在基础研究层面上，它将与生物

物理学、生物数学、生物信息学、生物化学等紧密结合，重点研究生物学的定量化和精确化问题；在应用研究层面上，组织工程、药物设计与输运、血流动力学、骨-肌肉-关节力学等正在或已经得到临床或工业界的认同，其核心是解决关键技术问题。

当前生物力学的发展特点可大致归纳为：内涵扩大（生物医学工程；生物工程），有机融合（生命科学与基础和工程科学），微观深入（细胞-亚细胞-分子层次；定量生物学），以及宏观-微观相结合（组织工程、器官力学；信息整合与系统生物学）。宏观生物力学研究仍为主流，但宏观-微观相结合、微观生物力学研究发展十分迅速。当前生物力学发展的前沿领域主要包括：1) 细胞-分子力学；2) 器官-组织力学；3) 骨骼-肌肉-关节力学；4) 生物力学新概念、新技术与新方法等。

四、我国生物力学发展的相对优势

我国当前生物力学研究从总体上看仍处于跟踪水平，但在一些领域或方向有着相对优势和研究特色。1) 分子生物力学：基本与国际研究水平相当，并正处于上升阶段，具有国际竞争力。研究内容主要涉及生物大分子间特异性相互作用的定量化、作用力对分子键结合与解离的影响等。2) 胆道及肝脏流变学：该领域的研究工作具有原创性，在国际上具有一定影响。研究内容主要涉及胆汁流变学及胆石成因、胆管力学性质、胆道排石机理及关键技术、肝脏流变学等。但该领域工作在 90 中/后期有所中断，至今未能继续。3) 血液流变学：“血瘀证与活血化瘀研究”研究具有中国特色，而血液流变学则为其定量化做出了重要贡献。研究内容主要涉及中药药理的血流变学与药物生物力学、血液黏度/黏弹性与心（脑）血管疾病相关性的机理研究及关键技术等。

骨骼、肌肉与关节力学研究在我国发展较早，也取得了较大的研究进展。但作为生物力学与临床医学结合最紧密的领域之一，国内的基础研究与临床结合不够紧密。加强从临床实际出发开展理论与实验研究，将促进我国骨骼、肌肉与关节力学快速发展，进一步走向临床治疗和实际应用。

五、建议重点研究的领域及科学问题

(1) 细胞-亚细胞-分子生物力学：单个细胞的力学性质及其与周围环境的相互作用；细胞的力学-生物学、力学-化学耦合效应及其生物学功能；单个生物大分子的力学理论、建模、实验与生物大分子统计力学；生物大分子间相互作用定量规律及力学-化学耦合；亚细胞组

元力学理论、动力学过程及其组装、重建。

(2) 组织-器官力学：(软)组织-(有限单元)器官力学性质及其生物学功能；组织工程在功能化细胞、功能性生物材料支架、组织性能评测、临床整合等方面的基础研究，以及力学因素对组织工程化培养的影响规律；器官工程预研。

(3) 骨-关节力学：骨-关节的力学理论、模拟与仿真、实验测试；骨-关节生长、吸收、改建、重建的力学调控；骨-关节整合的生物力学；人工关节和康复器械的力学设计。

(4) 心血管工程力学：血管重建与血管力学生物学；人体循环(局部)整体血流动力学与流态分析；心血管系统的模拟与仿真；心血管介入器械的力学设计与临床介入治疗方案；心血管疾病的药物生物力学与流变学。

(5) 空间生物力学与重力生物学：微重力对细胞发育、生长、增殖、分化及凋亡的影响；机体微重力效应的力学规律；空间生物学研究的新概念、新技术和新方法。

(6) 生命现象系统化和模型化研究：在发育模式、病毒演化、仿生、信号转导等方面开展模型化和预测研究，探索生物学过程的模式，并注重生物信息整合。

(7) 生物力学新概念、新技术和新方法：比如，微/纳米尺度的生物力学测试技术；系统生物力学方法；等等。

此外，还应着重关注：

(8) 植物生物力学：我国的粮食生产、生态环境、西部开发等可持续性发展问题均与植物生物力学研究相关，开展植物生物力学研究在我国具有特殊意义。植物生物力学主要包括两个方面：一是力学环境从整体到分子等多层次上对植物发育、生长等的影响规律；二是力学因素对植物生产、输运等的改善作用。

(9) 仿生力学：仿生力学在人类历史上乃至今天，都一直给人类以启发。鸟类、昆虫的飞翔一直以来都是驱动人类航空航天的直观动力，而鱼类的泳动则能为新型水下运输工具设计提供新的思路。研究扑翼飞行和鱼类泳动的力学原理，鸟类和昆虫扑翼运动的力-能转换机理等都极具科学意义和应用价值。

(10) 肝胆流变学：作为我国为数不多、具有原创性的研究领域，其研究成果在上世纪80年代在国际生物力学界具有一定影响。进入90年代，由于研究队伍匮乏和研究重心转移等方面的原因，导致该领域的发展受到很大影响，甚至出现停顿的趋势。应进一步鼓励这一

领域的研究，并结合生物力学目前发展趋势和特点，做出进一步的创新工作。

环境力学

刘青泉

中国科学院力学研究所

环境力学是力学与环境科学相互结合而形成一门新兴交叉学科，主要研究自然环境中的变形、破坏、流动、迁移及其伴随的物理、化学、生物过程和导致的物质、动量、能量输运，定量化描述环境的演化规律和对人类生存环境的影响。环境力学的发展十分有利于深化人们对环境问题中的物理过程和基本规律的认识，促进环境问题的定量化研究。

一、环境力学的沿革与社会需求

环境演化与人类活动紧密相关。17世纪工业革命后，工业的形成和城市聚居引起了局部环境污染。二次大战以后，随着工业和经济迅速发展，不断发生一系列严重的环境污染事件，人类开始认识到保护环境的重要性，并着手进行研究，形成环境科学这门学科。20世纪60年代，工业过程引起的空气和水体污染日益严重，流体力学原理及研究方法被及时引入环境科学，研究空气和水中污染物的对流、扩散等，出现了工业流体力学，形成环境力学的雏形。之后，由于经济的飞速发展，环境问题变得愈来愈突出，环境的含义在不断拓展，涉及到气候、生态、污染和灾害等诸多方面的问题。同时，人类对环境保护和治理的要求不断提高，需要对环境演化、人类活动对环境的影响进行更加细致的定量化了解。因此，在20世纪80年代，将同环境有关的力学问题分离出来，逐步形成环境力学这一新的分支学科。

环境力学的发展是经济和社会可持续发展的迫切需求。近半个世纪以来，由于科学技术飞跃进步，人类社会采取高投入、高消耗的发展模式，综合性的环境问题频繁发生，甚至危及到人类的健康、生存安全。自1972年斯德哥尔摩人类环境会议和1992年里约热内卢世界环境与发展大会以来，人类对环境问题的认识逐步深化，将环境与发展有机地结合起来加以考虑，提出了可持续发展的概念。对环境保护提出了更高的要求，环境研究逐步从定性或统计描述走向从动力学观点的定量描述，迫切需要力学的参与。而力学中建模、分析、计算、实验相结合的研究风格，有利于深化对物理过程和基本规律的认识。如：大气边界层理论的进展，促进了陆气相互作用过程研究，改善了气候预报精度；地球旋转效应的研究，发现了

风生环流的西部强化；多相流的理论研究大大提高了河流泥沙输运、污染物扩散的定量化预测，等等。因此，环境力学的发展将更好地促进环境科学的定量化研究，提高环境演化的预测水平。

我国正处在经济快速发展的重要阶段，特别是西部开发、沿海经济发展，以及大规模的资源开发和能源开发战略的实施，对环境力学研究提出了更迫切的需求，也提供了难得的发展机遇。

二、环境力学的发展状况

环境力学的内涵范围涉及到环境力学的基本建模、大气环境、水环境、地球内部流动、地球界面过程、环境灾害、工业环境流动、环境多相流动，以及环境力学的实验理论和方法等方面。但作为一门新兴交叉学科，近二十年来环境力学研究主要集中在大气环境、水环境、全球环境和自然环境灾害等几个方面。

大气环境主要研究边界层、自由大气运动和物质输运理论，解释各种大气环境现象，如：沙尘暴、酸雨、大气污染等。湍流模式理论的发展，模拟了大气边界层的统计特性和涡结构，并开始研究各种复杂下垫面如地形、植被、风浪上的大气边界层，不仅可以模拟微气象和大气污染，而且研究了对气候的影响。水环境主要研究流域、湖泊、河流、河口、海岸带流动及物质输移，以及大洋中的强迫对流和自然对流。发现了因地球旋转引起的风生环流的西部强化，中尺度涡和由于温盐作用竞争产生的双扩散现象，发展了第三代海浪谱预报模式。逐步认识到泥沙主要以非恒定形式输运；湖泊、河流和河口海岸带的泥沙、营养盐、有机物、污染物等输送将影响近岸区的海洋生态环境。基于物理过程的土壤侵蚀预报模型和风沙运动研究为荒漠化治理提供了理论基础。陆面过程、海气相互作用研究更注重对气候变化的影响。地下水和溶质迁移的研究在农、林、牧业、水资源利用、环境治理中得到重要应用。全球环境研究大都在大型国际研究计划的框架下进行，更加重视各圈层间的相互作用，进一步提出了海洋表层和大气下层研究计划和海岸带陆地、海洋相互作用计划。认识到人类活动可以通过温室气体排放和土地利用来影响全球环境。自然环境灾害研究着重研究与地质灾害（如滑坡、泥沙流等）和自然环境灾害（如洪水）相关的力学问题。有限元、离散元的应用大大促进了环境地质灾害（如滑坡、泥石流）的研究水平和预测的可能性。

环境力学正经历着深刻的变化，环境问题的基础研究逐步精细化和定量化，大量数据的积累要求模型化和数学化。现代力学理论的发展又带来了许多新工具和新方法，推动着环

境科学由宏观向细观深入，并且宏—细观相结合。不断突破传统力学的学科界线，与环境科学进一步交叉和融合，已是当今环境力学发展的主要趋势。

三、学科特点及重要科学问题

环境力学强调对环境问题的演化过程和定量化研究。环境力学的研究对象具有综合性特点，同其它学科的交叉，尤其是与物理、化学、地球科学和生命科学之间的交叉十分突出。环境问题涉及的范围和层次，往往跨越若干时空尺度，由于大小尺度的非线性作用，往往产生多尺度现象。自然环境流动中的物质、能量输运转化过程，大多数都是非均匀、非连续、多组分、多相的。同时，伴随环境流动中的物质、能量输运过程，还会发生各种物理、化学、生物子过程。因此，复杂介质、多过程耦合问题是环境力学研究的显著特征。21 世纪，以复杂介质流动为主体的环境力学研究，将极大地推动环境保护和治理科学技术的发展。

环境力学的共性特点，决定了研究中需要关注的重要科学问题，主要包括：大气、水体、岩土体中的多尺度、复杂介质流动及其所携带的动量、能量、物质输运及转化过程，以及所伴随的物理、化学、生物子过程及其与流动、输运的耦合。同时，环境力学研究必须与具体的环境问题相结合，因此，环境力学的研究内容可概括为三个方面：

(1) 环境流动、输运与伴随的物理、化学、生物过程：多相、多组分相互作用，多尺度效应等；扩散、吸附、乳化、絮凝、蒸发、凝结，化学反应，生物降解、光合，生态演替等子过程，及其与流动输运过程的耦合。

(2) 重大环境问题的发生及演化机理：土壤侵蚀、土地荒漠化；酸雨、沙尘暴、赤潮、泥沙、盐水入侵；全球环境变化（气候变暖，厄尔尼诺）；以及一些重大自然环境灾害（热带气旋、洪水、滑坡、泥石流、海啸、地震等）。

(3) 人类活动的环境影响：污染物排放；土地利用改变；资源与能源开发方式；重大工程影响等。

四、国内环境力学的研究进展

自 80 年代以来，我国力学学科研究人员积极参与环境问题研究，推进力学与环境科学的交叉和融合，相关研究组不断增加，在各自的领域中做出了可喜的成果。如：利用环境风洞和分层水槽，实验研究大气或水体中的污染物对流扩散，为核电厂设计、城市 CBD 规划，苏州河治理提供重要依据；结合长江口航道整治，洋山港建设，珠江口治理，研究河口非恒

定水流与泥沙输运，建立了基于湍流与泥沙颗粒相互作用的输沙理论，在环境和海岸工程中发挥作用；建立了二维坡面产流、产沙动力学模型，并扩大到小流域，分析侵蚀的影响因素，给出土壤侵蚀临界坡度，为西部治理提供科学依据；研究风沙起动临界风速，从风沙流结构入手，通过环境风洞试验获得单宽输沙率公式，发现风沙带电现象，分析了它对风沙运动的影响；研究了地球界面过程，模拟了有植被的大气边界层，分析结皮层对土壤水分运动影响及其生态效应；通过湍流模拟，获得波龄，稳定性对海气交换系数的影响，为气候模型参数化提供依据；用涡动力学研究台风异常路径，数值模拟台风浪、风暴潮灾害；用离散元方法模拟边坡稳定性，考虑降水和库水涨落对滑坡的影响。在这一过程中，他们与大气，海洋，水利，地质，沙漠，水土保持等地学界的科学家合作，参加了我国生态环境定位站的现场观测，取得了宝贵的经验。经过 20 余年的积累，开始采用动力学过程的研究方法，逐步形成了环境力学的理论框架，凝聚了环境力学的研究队伍，同时，在与我国地域特征相关的一些研究中，如多沙河流的泥沙输运、黄土高原土壤侵蚀、西北地区的风沙运动和荒漠化治理，形成了整体优势或地域特色，为我国经济和社会可持续发展做出了贡献。

五、建议重点研究的领域及科学问题

21 世纪的环境力学研究，既要注重学科发展的自身规律和要求，又要紧密结合国家需求和工程实际，将机理研究、规律分析与防治措施有机地结合起来。结合我国的经济和社会发展需求，我国的环境力学研究必须抓住一个基础（复杂介质流动和多过程耦合）、两个经济发展地区（西部和沿海）、三个方面（水环境、大气环境、灾害与安全），确立重点发展领域，促进学科的发展。

一方面，强调环境力学中的共性科学问题，包括：(1)环境流动与输运的基本方程和求解方法；(2)气、液、固界面的耦合；(3)多相、多组分、多过程，以及多尺度的耦合分析等；(4)“环境力学”中模型实验的尺度效应问题等。

另一方面，瞄准西部开发和沿海经济开发，以及重大工程和影响的实际环境问题，包括：(1)西部干旱、半干旱环境治理的动力学过程—土壤侵蚀机理、沙尘暴形成和输送机理、以及荒漠化治理；(2)以水或气为载体的物质输运过程—污染物排放过程的精确预报、河口海岸泥沙、污染物输运及其对生态环境的影响规律；(3)重大环境灾害发生机理及预报—热带气旋、风暴潮/洪水预测、滑坡/泥石流产生机理、全球变暖等。

爆炸力学

孙承纬

中国工程物理研究院流体物理研究所

爆炸力学研究爆炸、冲击和能量突然沉积等强动载荷下介质、材料与结构的力学响应、效应及工程技术应用。主要方向有：爆轰与爆炸，材料与结构的冲击动力学，材料与物质的物态方程、本构关系和动态力学性能，动态损伤、断裂和碎裂，以及在工程技术中的重要应用。由于航空航天和武器技术需求的牵引，爆炸力学得到了长足发展。动高压加载技术、快电子学和光电子学仪器设备、激光测量技术、大型计算机和先进数值编码的飞跃进展，推动爆炸力学发展到了一个崭新阶段。

一、爆轰

炸药等含能材料和爆炸混合物体体系爆轰研究的两大主题始终是安全和效能。因此，在理论层面上需要更深刻地理解爆轰规律，建立更深入的爆轰模型；在应用层面上要求做到精确、有效和安全地使用炸药，可靠地防治爆炸性事故。

近年来爆轰研究的突出进展之一是爆轰冲击波动力学（DSD）理论及应用。在模拟凝聚钝感炸药二维非理想爆轰中，Stewart 和 Bdzil 等应用非线性渐近展开方法研究拟定态弯曲爆轰波的反应区流场，提出了 DSD 概念。从理论上证明了爆轰前沿冲击波的传播和演化主要取决于其法向速度与该波阵面当地平均曲率的依赖关系，在爆轰产物流线组成的内禀坐标系中爆轰反应区可作为一维流管近似解耦处理，为非理想爆轰理论传播和爆炸装置精密数值模拟指出了发展途径，带动了曲率效应、直径效应等爆轰实验研究，得到了重要实际应用。目前，DSD 理论转向研究 ANFO 等工业炸药，推广到更一般的不定常非理想爆轰问题研究。

炸药和爆炸混合物体体系的起爆和安全问题涉及多种因素、多种机制的复杂过程。传统的冲击起爆、燃爆转变和滞后爆轰研究进展不明显，近年来的趋势转向最基本的反应引发问题，例如过程简单的慢烤燃和热爆炸的深入研究。Livermore 国家实验室提出的理论模型同时考虑了均匀反应的热爆炸机制和非均匀反应的统计热点机制，可以较全面地模拟含能材料在热和冲击加载下的响应、反应以及到爆轰的转变。

国内爆轰研究主要关注于应用问题，较好地满足了射流、射弹、云爆等类型战斗部的设计、实验和数值模拟的需要，在 DSD 计算、反应速率、产物物态方程、爆炸驱动、侵彻和爆炸安全防护等应用基础方面开展了许多工作。爆炸复合、材料合成、表面喷涂等技术已实际应用于工业生产，脉冲爆轰发动机的设计和实验取得较好进展。

二、冲击动力学

冲击动力学主要研究强动载荷下，各种材料与简单结构的动力学性质及响应、动态损伤和断裂现象、相关的物理相变和化学反应现象，以及冲击动力学规律与技术的实际应用。主要内容有：物态方程、冲击和等熵压缩、动态本构关系、冲击相变、高速碰撞、动态断裂、反应与起爆机理、动态加载和实验诊断技术。

物态方程理论研究有了很大的发展，量子分子动力学计算、分段拟合的解析与经验型物态方程以及电导率新理论模型研究，提高了对金属-绝缘体转变过程、温密物质和超高压过渡区中物态及物性理论预言的准确性，新版本的表列式物态方程数据库已成为有力的研究工具。由于激光和脉冲功率加载技术的推动，金属材料物态方程精密实验研究已扩展到 TPa 以上超高压范围。采用冲击波回射实验方法，使得冲击加载低密度气体和液体物质的压力达到 102GPa 范围，得到了压缩极限附近更准确的冲击绝热线数据。Asay 等人提出的磁压驱动等熵压缩和高速宏观飞片实验开辟了研究更大范围物态方程的新途径，成为开创动态压缩新领域的变革性能力。最近提出的反积分方法用于处理数个平行实验样品自由面速度历程记录，高精度计算材料动力学性质数据，已经得到多种金属材料、高能炸药、光学窗口材料在 10~102GPa 范围的等熵压缩线，并应用于等熵加载下铁的同素异构相变曲线研究。

强动载荷加载下许多物质和材料性态与其通常动力学性态的主要差别，在于物质内部介观层次的微结晶、内界面和局域性质与快速响应的波运动相互作用，尤其对于塑性流动、动态损伤、固态相变、化学反应等现象。介于宏观与微观（原子）尺度之间的介观尺度微结构对材料动力学性能的影响，以及与此相关的非均匀体系、非平衡过程的研究，已成为当代冲击动力学和爆轰研究的关键问题。国外学者进行了铁单晶体、超晶粒和原产状态粗晶 Armco 铁样品的薄平板撞击层裂实验，得到了自由面速度历程和层裂强度与体应变率的关系。通过加入随机应力场的数值模拟，建立了铜材料在平板撞击下微孔洞成核率与塑性流动应力之间的联系，与不同微结构样品实验比较得到了回退速度与撞击速度的定标关系。通过考虑微结构对陶瓷、混凝土等动力学性能影响的数值模拟，揭示了非均匀、有结构材料冲击

响应的介观物理图象和损伤断裂机制的信息。

国内学者改进实验技术，提高了气炮驱动平板撞击或激光冲击波加载下冲击绝热线的测量精度，提出了疏松材料物态方程的一种新形式。利用分离式 Hopkinson 压杆测量各种材料冲击响应和本构参数的实验技术已日趋完善，得到普遍应用。应力波传播、动态断裂、高速撞击、侵彻、结构响应和冲击防护等方面的大量研究，解决了许多实际问题。初步开展了高能量密度加载下材料与结构冲击动力学的理论和实验研究，包括激光和脉冲功率加载的激光推进、冲击压缩、高速飞片和等熵压缩等。

三、计算模拟方法

传统的连续介质力学数值计算软件在国内外广泛使用，如最常见的 LS - DYNA 软件具有计算多种材料和复杂结构冲击响应、炸药爆轰、传热扩散、断裂侵彻等众多功能，最近发展到电磁场和磁流体力学计算。各种三维流体弹塑性计算编码功能更加先进，如冲击动力学计算编码 PISES，多尺度非均匀体系冲击和反应流动计算编码 CTH，辐射磁流体力学编码 ALEGRA，以及爆轰产物物态计算编码 CHEETAH 等等。高精度高阶差分格式、三维 ALE 流体力学编码、流体介质间断界面和运动界面处理方法、无网格无结构计算方法等技术也有很大进步。

近年来爆炸力学理论和计算研究的突出进步，主要体现在分子动力学和第一原理计算方面。原子尺度下冲击相关现象的分子动力学模拟，帮助人们了解尚不能直接实验诊断的亚皮秒、亚纳米的细观和微观动力学图像，其应用范围已覆盖位错动力学、冲击压缩、剪切带、冲击波传播和相互作用、晶粒边界相互作用、界面动摩擦、动态损伤和断裂、相变、激光辐照效应、流体动力学不稳定性、含能材料反应、爆轰反应区、炸药冲击起爆和感度、爆轰失效和直径效应等等。新的多体势和根据第一原理计算生成的膺势等已能够模拟双原子分子的化学反应和爆轰现象。二维、三维分子动力学计算可处理的分子数已超过一亿，逐步接近实验样品的宏观尺度。

国内学术界在离散粒子计算、分子动力学和第一原理计算方面做了很多原创性和较先进的工作。二维离散元计算较好模拟了橡皮薄膜中裂纹发展的锯齿形途径，探讨了与有限元编码的多尺度耦合计算。量子分子动力学卓有成效地进行了爆轰产物参数、冲击感度的理论计算，并广泛应用于惰性材料力学性能、物态方程和缺陷损伤的模拟。

四、实验加载和诊断技术

传统的气炮和 Hopkinson 杆技术扩展为复杂应力状态加载手段，激光驱动细观和宏观高速飞片的速度达到 100~101km/s 范围。近年来最引人注目的新型加载技术是磁驱动等熵压缩和高速飞片。目前，Sandia 国家实验室 Z 机器等熵压缩实验铝样品的压力已达到 260GPa 以上，驱动直径 2cm、原始厚度 0.8mm（烧蚀后剩余厚度 0.3mm）的完整宏观铝飞片终速度超过 33km/s，并具有很好的平面度，不久有望达到 43km/s。这项技术显著扩展了冲击动力学和物态方程实验研究的范围和视界，已成为各国实验室关注的热点。

电子相机、高速摄影技术、X 闪光照相技术、宽带高速数字示波器以及相关的传感器、光源和快电子学设备已普遍应用于爆炸力学实验。诊断技术发展的主流是以激光和光电子学技术为基础的快响应（亚纳秒）、高分辨率（微米）、高灵敏度的非接触测量技术，例如各种激光干涉测量和光谱技术、散斑技术、激光诱导荧光和拉曼光谱技术、光学窗口技术等。国外研发的线成像光学记录速度干涉仪可以测量样品表面一条线上各点的速度历史，多点 VISAR 系统可同时测量反射面上许多点的速度历史，快响应、高分辨热像仪可以记录样品很小区域内温度剖面随时间的变化。已经开发成功测量超短脉冲（皮秒、飞秒）激光照射样品引起的超短冲击波运动的多种技术，例如利用飞秒探测激光束的频域干涉技术。

我国已经基本掌握爆炸力学近代实验测量技术，高速摄影、X 闪光照相、传感器、激光测速等技术运用比较普遍。一些先进技术如数字散斑、磁压加载、压剪加载、激光干涉和光谱测量，也取得了一定进展。

五、爆炸力学发展的重要科学问题和前沿方向

爆炸力学是与实际应用密切相关的一个自然科学分支，旨在研究爆炸规律和极端条件下物质的响应性态。根据新材料、新工艺、新技术和新装备的发展需要，综合爆炸力学的发展趋势，其重要科学问题和前沿方向包括：

1. 非均匀性、微结构、相变和化学反应对物质与材料动力学性态影响的实验、多尺度连续介质数值模拟和分子动力学、第一原理计算编码及数值研究；
2. 高应变率、复杂应力状态和高能量密度加载下物质、材料与结构的力学性质和响应，包括利用激光、脉冲功率等技术创造的极端条件下物质性态的研究；
3. 钝感炸药性能和爆炸安全问题研究，包括非理想爆轰、反应引发和向爆炸转变机制、

终点弹道效应研究；

4. 建立先进的实验加载技术和快响应、高分辨能力的实验诊断技术，如电磁驱动技术、高幅频高扫速电子相机、线成像光学记录速度干涉仪、高时空分辨热像仪、二维动态散斑诊断技术和激光诱导荧光测量系统等。

5. 拓展爆炸力学研究领域，加强与近代物理科学的结合和融合，发展成为当代科学重要生长点——高能量密度物理的主要组成部分之一。

等离子体力学²

吴承康

中国科学院力学研究所

等离子体学科具有高度的交叉性，物理、化学、力学、工程技术科学紧密交织，而力学始终是其重要内涵。以下简介高温、低温、空间等离子体科研的近期进展。

一、高温等离子体

高温等离子体是指热核聚变实验装置以及未来热核聚变反应堆中的等离子体，其研究目标是实现受控热核聚变能的开发应用，因此亦称为聚变等离子体。高温等离子体包括磁约束等离子体和惯性约束等离子体。

磁约束聚变是利用各种位形的强磁场构成的“磁瓶”来约束高温等离子体，并利用中性粒子束、射频和微波等加热手段将其加热至热核聚变温度，从而实现自持的热核聚变反应。近十多年来，在不同规模托卡马克装置上实现了各种改善等离子体约束的运行模式，形成了内部和边界输运垒，使得某些区域和输运通道（主要是离子热输运）的输运系数已降到新经典理论预言的水平，聚变三乘积已达到或接近达到氘-氚热核聚变反应的得失相当条件，并与氘-氚聚变点火条件相差不到一个量级，表明托卡马克已具备开展燃烧等离子体物理和聚变堆集成技术研究的条件。即将建造的国际热核聚变实验堆(ITER)将是开展该研究的重要实验装置。

惯性约束聚变是利用高功率激光、重离子束或 Z-箍缩装置等驱动器提供的能量，内爆压缩并加热燃料靶丸，使其成为高温高密度等离子体，利用自身的惯性约束自己，并在燃料尚未飞散之前完成热核聚变燃烧过程。三十多年来，在靶物理研究方面，已取得了重要进展。1988 年，间接驱动惯性约束聚变原理实现热核聚变点火的科学可行性得到了实验验证。正在建造中的美国国家点火装置(NIF)和法国兆焦激光装置(LMJ)将用于演示高增益热核聚变

²本文由中国科技大学俞昌旋（高温），清华大学陈熙、蒲以康（低温），北京大学王晓钢（空间/天体）供稿，由中科院力学所吴承康浓缩合成。

点火，其成功的点火实验将是惯性聚变研究的重要里程碑。

近十几年来，我国的聚变研究有较大的发展，先后改造升级或建成了多种托卡马克装置、激光装置和多台超强超短激光装置，并与理论和数值模拟研究相结合，开展了有关磁流体不稳定性、湍流和输运、加热和电流驱动、激光与等离子体相互作用、高温辐射流体力学和内爆动力学等方面的研究，取得一些有意义的研究成果。近年来，我国已正式参加 ITER 国际合作项目，并积极支持以 EAST、HL-2A 装置为基础的国内磁约束聚变实验平台的建设，以及建造(惯性约束)国家点火装置。可以预期在未来的十年多内，我国的聚变研究将会有较快的发展。

研究与高比压、高约束、高自举电流份额等性能集成的等离子体有关的科学问题，以改善 ITER 燃烧等离子体性能的预言能力，将是未来的十年内磁约束等离子体研究的重点方向。主要问题有：(1)湍流和输运物理：识别各种输运机制；发展自恰的输运垒形成的模型，提高其预言能力。(2)磁流体稳定性：各种不稳定性对输运和等离子体可达到的最高密度和压强的影响，不稳定性的控制。(3)波和快粒子物理：研究各种高功率波在复杂的等离子体条件下的传播和吸收物理，以实现磁流体不稳定性控制；研究快粒子激发的模在先进运行模式下的动力学行为。(4)边缘等离子体：研究边缘输运垒形成的强压强梯度区结构及其演化动力学。(5)先进托卡马克运行模式：研究综合利用等离子体的自组织行为，适当的外部控制等离子体参数分布的手段，实现等离子体性能的集成优化，达到聚变堆所要求的等离子体状态。

点火物理基础和高能量密度物理研究，将是惯性约束等离子体研究的重要方向。它的研究涉及等离子体物理、材料科学与凝聚态物理、核物理、高剥离态原子物理、辐射流体力学以及天体物理等多学科交叉，是一个充满新的物理现象和具有重要应用前景的领域。主要研究内容有：(1)激光与高温高密度等离子体相互作用；(2)高温辐射流体力学；(3)内爆动力学和流体不稳定性；(4)热核点火和燃烧物理；(5)物质的热力学性质和高剥离态原子物理；(6)实验室天体物理。

必须强调指出，由于高温等离子体固有的强非线性集体相互作用的特征，必须通过实验诊断、理论和数值模拟 3 种研究手段的密切配合，才能完成研究目标。

二、低温等离子体

低温等离子体是目前得到广泛实际应用的等离子体形式。低温等离子体包括大气压附

近以电弧、感应耦合放电等方式产生的电子温度与重粒子温度相近的热等离子体，大气压下以介质阻挡放电、电晕放电、表面放电、滑动弧等方式产生的非平衡等离子体，低气压下以辉光放电、微波放电等方式产生的电子温度远高于重粒子温度的非平衡等离子体。由于热等离子体具有高达 104K 的温度和较高的粒子浓度与能流密度，非平衡等离子体中含有大量高能量的电子与活性粒子，使它们具有各自独特的应用优势。如热等离子体已用于耐高温、耐磨损、耐腐蚀、生体相容涂层的制备，高、新技术材料的制备，模拟飞行器再入大气层的高温环境与进行热防护材料的性能试验，危险废弃物的无害化处理；大气压非平衡等离子体已用于大规模生产水处理用的臭氧、等离子体显示屏和用于表面处理、消毒环保、电光源、激光器；低气压放电等离子体已用于微电子器件的刻蚀、镀膜与清洗，金刚石或类金刚石膜、纳米材料、功能材料的制备，材料表面改性与污染物处理。此外，大电流断路器、焊接、飞行器隐身与减阻、电推进等众多领域也都涉及低温等离子体。

近几十年来国际上低温等离子体的研究一直在快速增长。我国低温等离子体研究也有了很大的发展，在国际上已有一定影响，但总体上与国际先进水平仍有不小差距。也有一些有特色的研究成果，例如关于层流热等离子体长射流产生与特性的研究，关于等离子体离子注入的研究等。微电子行业的发展一直是推动低温等离子体科研发展的主要动力，我国微电子行业近几年来增长势头很强，在今后十年中，我国在低温等离子体相关方面的研究一定会取得较大的进步。

在热等离子体方面，研制新型等离子体发生器，研究发生器中的基本工作过程，提高发生器工作稳定性、能量转换效率与工作寿命，等离子体流和喷射于其中的原料颗粒或工作气体以及和环境气体之间的相互作用，热等离子体与材料表面的相互作用以及涂层或膜的形成过程，一直是研究的重点。在热等离子体体系中，部分电离气体的流动与传热和电磁场相耦合，并受电极与外加磁场影响，流动与传热具有大温差、高梯度、变物性的特点，并往往涉及三维、非定常、可能偏离局域热力学平衡与局域化学平衡等复杂因素，给参数诊断与数值模拟带来严重挑战。为了适应空间推进、真空喷涂、快速薄膜沉积等应用领域的需求，需要对 101—104 Pa 压力范围内产生的电弧及等离子体射流特性进行深入研究。这一压力范围内的等离子体，非平衡特性更为明显，但又不同于低气压下产生的非平衡等离子体。探索建立偏离局域热力学平衡和考虑稀薄气体效应的等离子体理论模型，具有重要科学意义和实际应用背景。

在大气压非平衡等离子体方面，重点在研究其基本物理过程特别是非平衡特性。包括

研究滑动弧中热电弧放电与非平衡放电状态间周期性转换特性；研究大气压介质阻挡放电和辉光放电中活性粒子的优化产生和稳定均匀大面积放电的实现，提高放电的比功率；提高等离子体显示屏的显示速度、清晰度、对比度与效率。

在低气压低温等离子体方面，重点是通过实验诊断和理论模型相结合的方法研究等离子体放电参数与外界可控参数之间的关系，以设计出能适应工业界各种不同要求的等离子体放电设备。

低温等离子体是目前快速增长、对国民经济有巨大影响的科学技术领域。热等离子体条件下，还有很多复杂因素，需要对其基本过程进行包括参数诊断与数值模拟的深入研究。大气压非平衡等离子体的应用潜力在我国远未发挥，对相关科学问题的研究也较少。预期随着近年来我国微电子工业的快速发展，低气压非平衡等离子体方面的研究也将更为广泛与深入。

三、空间与天体等离子体

人类开发太空、探索宇宙正进入一个新的阶段。多项空间计划的实施，如我国“双星计划”与欧洲的 Cluster 卫星群配合，开始第一次空间六点探测等项目，是对空间、天文科学新的机遇和挑战，也极大地推动了空间、天体等离子体物理的深入研究。

空间天体现象的驱动、触发和演化，涉及许多等离子体物理的基本过程：如磁力线重联，无碰撞激波，等离子体波、射流与剪切、不稳定性和湍流、耗散过程，等离子体加热与高能粒子的产生等。对这些现象和物理过程的研究，是空间天文科学，特别是对卫星、飞船与地面观测结果进行分析研究的基础，对空间开发和宇宙探索具有重要的科学意义。

近年来实施的重要空间计划，都以等离子体物理现象的观测与理论研究为重要内容之一，已取得了一系列重要的进展：日地空间链锁变化的多卫星探测；磁尾和磁层顶区发生磁场重联的观测证据；磁层亚暴的全球物理过程；空间无碰撞磁场重联过程的 Hall 效应驱动，三维磁重联的磁场零点探测等。这些结果为空间等离子体研究提供了重要的观测支持，也对理论和数值模拟工作提出了新的挑战，还为今后空间天文研究以及相关等离子体物理的进一步发展建立了基础。

这些空间计划的主要研究方向是试图建立“空间天气预报模型”。这一努力包含了太阳物理、日地空间物理（包括太阳风过程、太阳风与地球磁层相互作用）以及磁层物理等。在

“日冕物质抛射”现象，太阳风模型，磁暴模型等方面取得了重要进展（如我国科学家提出了 Alfvén 波湍流对太阳风加速与加热模型、磁层亚暴的“锋面模型”等）。今后研究方向将以卫星探测为主(如我国的“夸父计划”），继续集中于上述三个领域中的具体等离子体物理过程。

特别值得提出的是从上世纪 90 年代开始的快磁重联研究，将包含 Hall 效应等非耗散性的“非理想”等离子体效应的广义欧姆定律应用于磁重联过程研究。在理论研究和卫星观测中预见和发现空间特征尺度为离子趋肤深度（即离子惯性尺度）量级的 Hall 电场主导的、声波或者动力学 Alfvén 波为其主要特征的无碰撞快磁重联过程。进一步的主要研究方向是磁重联区的电子动力学过程，如低混杂波、电子 Alfvén 及加热过程，电子压强张量效应等；以及磁重联的三维拓扑与动力学性质等。

地球动力学

石耀霖

中国科学院研究生院

地球动力学是力学、地球物理学、地质学、地球化学的交叉学科，它运用力学的基本规律，研究地球整体及其各个圈层耦合的运动状态和机理。这些耦合的过程，不仅涉及固体力学、流体力学、孔隙渗流、流变学等问题，而且涉及相变、化学反应、电磁学等多种物理和化学问题，机制极其复杂；涉及的时间尺度达数十亿年，涉及的地球深内部达数千公里；因此地球动力学对力学理论的研究极具挑战性。地球动力学过程涉及全球变化、地质灾害等许多实际问题，其研究对环境、减灾等也有巨大的实际意义。

地球动力学的研究主要包括地幔动力学，岩石层动力学，外核动力学，地震力学等主要研究方面。

一、地幔动力学-地幔对流和热柱

地球和其他行星表面的构造运动和形态，都是由其深部地幔物质的运动造成的。地球和行星在其生成初期由于撞击、核幔分异使位能转换为热能，早期的放射性元素也释放大量的热能，具有很高的温度，这些热能驱动地幔对流，造成了岩石圈内形形色色的构造变形，形成了岩石的岩浆变质作用。比较大的行星，如地球、金星，冷却较慢，至今仍然存在活跃的构造运动；而比较小的行星或卫星，例如水星、月球，在三十亿年前内部运动就已经停止了，至今表面依然保留了几十亿年来运行撞击的痕迹。因此，地幔动力学研究，是了解认识地球及其他行星演化历史的核心问题。

地幔对流研究涉及的问题很多。一是物质性质随深度和温度的变化：包括深度和温度相关的黏滞系数、热传导系数的影响、密度变化、热膨胀率变化的影响，以及大陆和海洋板块对地幔对流的影响；二是相变界面的影响，在 410km 的深度，橄榄石变为尖晶石；在 660km 深度，尖晶石变为钙钛矿；最近又发现，在靠近核幔边界大约 2700km 的深度，钙钛矿变为后钙钛矿。这些相变界面会产生密度及其他物理性质的变化，相变时的吸收或放热，都会影响对流的方式和形态。现今地幔对流研究不仅注意传统的流体力学方面研究，而且注意到与

地球化学研究相结合，化学元素的分布和转移成为新的研究重点。地幔动力学研究的另一个重要内容是地幔热柱的形成、影响，以及与海岭的相互作用，与对流的关系等。一个新的领域是开展行星内部地幔运动的研究。

二、外核动力学-地磁发电机

地球的地核 90%是铁，其中外核是液态的，内核由于地球的冷却已经成为固体。外核的铁是电的良好导体，外核的对流不但涉及流体的物质守恒、能量守恒，而且涉及到电磁流体力学问题。外核的对流形成了地球的磁场，不但近几年来人类对地磁场变化的观测表明地磁场长期不断变化和漂移，而且古地磁研究表明，在地质历史上地磁南北极曾经多次反转。据统计在过去的 1 千万年内，约发生了 50 次左右反转，而反转过程以地质眼光来看十分迅速，仅仅用了数千年时间，而且反转时磁极的轨迹总是沿着环太平洋边缘的路径。然而，在距今 8 千万-1.2 亿年的 4 千万年的漫长时间里，地磁场却没有反转，该段时间也是全球玄武岩大量喷发、浅海存在还原环境、石油大量生成的时段。地磁场形成是外核内发生的过程，环太平洋是板块边界，造成它的是岩石圈内的过程，玄武岩的大量喷发主要受地幔对流的影响，而碳质板岩和石油的形成又涉及大气圈和水圈。因此，这些反映了地核、地幔、地壳和大气圈、水圈的相互影响和作用。

地磁发电机研究近年来取得了突出进展，但仍然是很初步的。系统地三维电磁流体模拟可能是主攻方向，但计算方法仍有待改进，用三维数值模拟磁场反转的机制，由热对流或组成对流驱动导体固体内核外的球壳内的外核旋转电磁流体可以形成以偶极子为主的磁场，流体横向方位运动激发环形磁场，高纬度螺旋对流激发极型磁场，以及子午向环流传递磁场。对流热柱中的局部改变可以导致极型场磁极反转，不需要借助于外部场的扰动。目前的典型模拟中 Rayleigh 数取 300，Ekman 数取 0.01，Prandtl 数取 1，Roberts 数取 20，还不能完全覆盖外核内的可能情况。外核的黏滞系数非常小(约 $106 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$)，因此可能存在不同尺度的湍流，而流体外核的高磁扩散率可能压制小尺度结构而促进大规模磁场变化。

三、岩石层动力学

岩石圈是固体地球最外层的圈层，与人类生活关系密切，大规模的构造运动在岩石圈内发生，岩石圈动力学成为地球动力学中研究的重要内容。20 世纪 60 年代诞生的板块构造学说，是地学界的一场革命，发生了巨大的影响。然而，新的观测表明，把板块近似作为刚体是不恰当的，特别大陆板块内部存在复杂的变形，国际上推出了一系列大陆动力学研究项

目。

岩石层动力学研究中，大陆岩石圈内部的变形是一个备受关注的问题，而其中尤其以大陆和大陆碰撞而产生的青藏高原的形成和演化为国内外学术界研究的热点。海洋板块向大陆之下俯冲可以形成弧后盆地，远场弧后扩张可能决定了中国东部新生代的引张和火山活动。GPS 测量提供了大陆板块内部运动速度，从速度计算应变速率，成为全球性的研究项目。然而，从 GPS 速度求应变的数值微分计算的精度还需要提高、误差需要给出估计。地幔与岩石层的相互作用，岩石层的分裂、拆沉和减薄，以及岩石层非线性动力学研究以及在地震预报中的应用也都是研究的前缘课题。

四、地震力学

地震是一种严重的自然灾害，对地震的产生原因、孕育和发生过程的研究，以求实现地震预测乃至控制，具有十分重要的意义。另一方面，地震波穿过地球内部，带来了地球深部的信息，地震学方法仍是现在精密了解地球深内部结构，的唯一方法。

地震方面的力学研究，首先是地震孕育和发生的过程。问题涉及不同的时间尺度和空间大小，十分困难和复杂。我国王仁先生早在 80 年代就注意了地震的相互作用和触发的问题，最近由于观测技术的改进和资料的积累，成为研究的一个热点。一个大地震可能会造成其它地方库伦应力的变化，有时可能利于触发另外一些地震，有时也可能阻止新地震的发生。鉴于静态应力变化量级甚小，人们也注意研究动态触发机制。另外一个研究重点是根据实验确立的断层本构关系，计算地震孕育发生的循环，以及动态破裂传播的全过程。GPS 等新技术的采用，使应力状态变化的研究开辟了新的途径。人们对震后变形可以获得连续的资料，并用粘弹性有限单元法数值方法加以模拟。

五、高性能计算在地球动力学中的应用

虽然对于球对称地球的许多科学问题可以用解析方法求解，但地震层析成像的新技术，显示了地球的横向不均匀性是认识地球动力学问题的关键。对横向不均匀地球动力学过程的研究，数值计算模拟起着越来越重要的作用。

有限元方法的发展和并行计算，成为近年地球动力学发展的亮点。日本的“地球模拟器”超级计算机及其专门发展 GeoFEM 的计算程序，专门用于地球动力学问题的计算。美国发展了 GEON、CIG 等项目，探讨地球科学与信息科学的结合，发展计算地球动力学软件

平台，取得了实质性的进展。我国最近与 GEON 合作，召开了地球科学中的信息基础构架国际研讨会，也迈开了前进的步伐。