

力学史与 方法论论文集

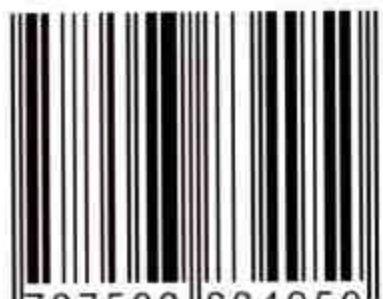
Proceeding of Mechanics History
and Mechanics Methodology

武际可 隋允康 主编

中国林业出版社

责任编辑: 徐小英
杨长峰
李 伟
封面设计: 聂崇文

ISBN 7-5038-3495-1



9 787503 834950 >

定价: 40.00元



03-53
W571
03-031
03-03

力学史与方法论论文集

Proceeding of Mechanics History and
Mechanics Methodology

武际可 隋允康 主编



A1109095



中国林业出版社

100000

图书在版编目 (CIP) 数据

力学史与方法论论文集 = Proceeding of Mechanics History and Mechanics Methodology/
武际可, 隋允康主编. - 北京: 中国林业出版社, 2003.8

ISBN 7-5038-3495-1

I. 力… II. ①武… ②隋… III. ①力学史-文集 ②力学-方法论-文集 IV. 03-0

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 064418 号

出版: 中国林业出版社(100009 北京西城区刘海胡同 7 号)

E-mail: cfphz@public.bta.net.cn 电话:66184477

发行: 中国林业出版社

印刷: 北京林业大学印刷厂

版次: 2003 年 8 月第 1 版

印次: 2003 年 8 月第 1 次

开本: 880mm×1230mm 1/32

印张: 6

字数: 210 千字

印数: 1~2500 册

定价: 40.00 元

前 言

等待已久的力学史与方法论学术研讨会终于召开了。这本文集所收集的就是参加讨论的论文。

一门学科的历史，无论对了解这门学科和预测这门学科的未来、对教学和科学研究、对制定科学研究的规划和对已有科学研究成果的评价上，都是非常重要的。所以世界各国在各个学科的研究队伍和研究成果中都有相当比例属于该门学科的历史。

我国的力学学科发展得相对晚，关于力学史的研究尤其薄弱。例如，我国的力学学科对国外的重要力学史著作几乎没有翻译，对具有历史意义的力学经典著作也没有出版。有关力学史的译著寥若晨星，特别是对近、现代力学史的研究，则几乎是空白。力学界不仅没有专业力学史的研究队伍，也很少有相关的研究成果。

为了使我国的力学事业健康发展，亟需开展力学史的研究，并且必须从无到有地来建立自己的力学史和方法论的研究队伍。开展力学史和方法论的研究，可以促进社会各界对力学学科内容、方法和意义的了解，可以增进社会各界对力学研究的需求和支持，可以使力学界认识我国力学研究走过的道路，从而可以借鉴以往走过的经验和教训，可以活跃学术氛围、推动学术讨论和争论，可以为今后制定力学学科的研究规划提供咨询，可以提高进入力学领域新人对从事工作的兴趣，可以改善力学学科队伍的素质，可以推动公众熟悉我国著名的力学学者和他们的优秀成果，从他们的身上吸取精神力量，等等。总之，开展和加强我国力学史和方法论的研究和学术交流，对我们来说是必须开展的急迫任务。

在力学研究者、教育工作者乃至力学爱好者之中，有一批人，他们热爱力学，并且把对力学本体的兴趣延伸到了它的源头，他们还有对于力学美的追求，对其中包含的哲学观念和原理的追究，从而执着地追溯

力学知识发生的瞬间。

在力学的创造性成果中，原创性的热还不时地送来温暖，激荡我们探索的激情，原创性的光不断地照亮我们的道路，指明永不过时的创造和发现的方法。这也许就是人们喜欢追根溯源的原因。这种爱好来源于对探求自然规律工作的热爱，和顺从它设计和制造人造的世界的激情。

为了把这一批对力学史和方法论有浓厚兴趣的学者团结起来，为了推动我国对力学史和方法论的研究，在中国力学学会支持下，中国力学学会成立了“力学史与方法论专业委员会”筹备组。成员有：武际可（北京大学）、余寿文（清华大学）、隋允康（北京工业大学）、戴念祖（中国科学院自然科学史研究所）、谈庆明、朱如曾（中国科学院力学研究所）、刘肃（中国力学学会）、邱吉宝（北京强度环境工程研究所）、王文标（中国科学院研究生院）、孟庆国（国家自然科学基金委员会）、王希诚（大连理工大学）、戴世强（上海大学）、王振东（天津大学）、兆文忠（大连铁道学院）、高云峰（清华大学）、罗恩（中山大学）、苗天德（兰州大学）。由武际可任组长，隋允康任副组长。

这次在北京工业大学召开力学史与方法论学术研讨会，使具有相同兴趣的学者们有了一个在一起切磋琢磨的机会，我们将在这次研讨会上交流大家的探索研究心得，同时正式成立中国力学学会力学史与方法论专业委员会。

大家提供给会议的论文大体上分布在3个方面：回顾力学史，探讨力学方法论，以史、法贯通于力学教学。我们相信，这次研讨会必将推动我国在力学史与方法论的研究工作，为力学学科的发展做出贡献。

这次会议的召开，得到了中国力学学会、广大力学工作者的支持，北京工业大学校长左铁镛院士、常务副校长张泽院士、副校长侯义斌教授、校长助理卢振洋教授均予以关注；北京工业大学机电学院工程力学部的教师和研究生们参与了筹备，尤其张学胜博士生做了大量的细致工作。在此向有关领导和同仁们致以衷心的感谢。会议和文集还受到国家自然科学基金委员会（10172002项目）和北京工业大学的资助，特此致谢。

编者

2003年7月12日

目 录

前言

- 中国古代为什么没有力学..... 武际可(1)
- 钱伟长先生科学研究的成果和方法 戴世强(14)
- 一代宗师 风范长存——记我国第一代工程力学教授罗忠忱 ... 郭日修(38)
- 牛顿《原理》三百年祭 朱照宣(44)
- 伟人的阴暗面 武际可(48)
- 探索人体奥秘的古老故事——生物力学孕育期一瞥..... 杨桂通(59)
- 力学与计算技术的互动发展 王希诚(68)
- 变分法的历史及其方法论的研究(详细摘要) 何吉欢(75)
- 万有引力定律的发现 胡 新(85)
- 永动机漫话 武际可(94)
-
- 计算力学有限元集成程序系统应大力发展..... 钟万勰(104)
- 固体力学史与方法论的几点注记..... 余寿文(111)
- 浅论力学史和方法论研究的原动力、范畴和探索途径 隋允康(119)
- 应用力学方法初探(摘要)..... 嵇醒、仲政、戴瑛(123)
- 应用力学对偶体系的方法论 钟万勰、姚伟岸(126)
- 对有限元技术发展过程的一种认识(详细摘要) 孙景筠、吕涛(135)
- 科学复兴之难 蔡中民、蔡冰(138)
- 沙漠——颗粒介质——力学研究的一个新使命(摘要)..... 苗天德(144)
- 处理不确定问题的新方法——非概率区间分析模型
..... 邱志平、王晓军、马一(146)

从 Stokes 第一问题的精确解谈起	朱克勤(153)
以“压杆稳定”为例探讨史料、猜想和方法论对材料力学 教学的升华作用.....	隋允康(159)
在工程力学中贯穿素质教育.....	邰 霞(170)
引入力学史教学提高基础力学教学质量(详细摘要).....	王晓春(174)
引古知今 探索方法(详细摘要).....	边文凤(178)
由塔科马海峡桥失稳破坏引发的力学思考.....	邰 霞(181)

中国古代为什么没有力学？

武际可

(北京大学力学与工程科学系, 100871)

【摘要】文章列举历史事实说明：中国古代没有力学；中国的力学最初是外国人送上门来的；即使是送上门来，中国人吸收与消化也颇费周折。文章还分析了中国古代所以没有产生系统的力学知识的原因是：长期集权统治；没有发展的逻辑学；鄙薄科学技术的传统；落后的教育与长期科举制；夜郎自大和闭关保守。

【关键词】近代力学，力学史，中国科技，引进与发展

1 早期中国的力学是外国人送上门来的

19世纪末在中国致力于介绍翻译西方科学著作的英国人傅兰雅(J. Fryer, 1839~1928)于1890年前后，在他编写的《格致须知》的《重学》一卷的引言中，有如下一段话：

“至于重学，不但今人无讲求者，即古书亦不论及，且无其名目。可知华人无此学也。自中西互通，有西人之通中西两文者，翻译重学一书，兼明格致算学二理。”

傅兰雅的这段话说明：第一，中国古代没有力学；第二，中国的力学是外国人送上门来的，后来的历史发展进一步说明的是即使是外国人送上门来，中国人接受也不痛快，甚至有时采取排斥的态度，接受的过程是缓慢和曲折的。

在这里我们首先来介绍傅兰雅的情况。傅兰雅，是来自英国的一位传教士，1861年7月从英国到达香港，在英国一所教会学校任校长。1863年，为了进一步学习汉语，他辞去了香港的工作，到北京担任同文馆的英文教习。后来又上海的一所教会学校任教师。工作之余他还

担任《上海新报》的编辑，介绍一些西学。从 1868 年，傅兰雅到上海江南制造局任译员，这位传教士便以在华推行西方科学知识为主要事业，他 1896 年离开中国到美国定居，其间 28 年他为在中国传播西方科学技术呕心沥血。他的主要贡献是：

翻译了大量西方科学著作，一生共译书 129 种之多，遍及基础科学、应用技术、军事、社会科学各方面，其中也包括力学，当时称为重学。他创办了中国第一份科学普及杂志《格致汇编》；创办了中国第一家科技书店，在中国约近 40 座城市有代销点，出版和销售的书籍达千余种，数十万册；参与创办中国第一所科学普及学校：格致书院。傅兰雅还编写了《格致须知》、《格致图说》等普及科学技术的教科书 42 种，这些教科书在中国早期颁行的新学制的学校中影响很大，有许多被新学校采用为教科书。

1896 年，由于妻、子到美国定居，傅兰雅到美国在伯克利大学任东方语言文学教授，1902 年任系主任，1913 年退休，1928 年逝世。即使是在美国工作期间，傅兰雅仍心系中国，多次重访中国，介绍和帮助中国的留美学生。1911 年他捐银 6 万两，建立上海盲童学校，这是中国的第一所正式的盲童学校。1915 年，他在美国家中与前来参加博览会的黄炎培深情地说：“我几十年生活，全靠中国人民养我，我必须想一办法报答中国人民。”他办的盲童学校，并且安排儿子在美国学校盲童教育，然后派来中国教学。傅兰雅，这是一位把毕生的精力贡献给中国人民的科学技术事业的西洋人。他就是一位真诚把现代科学技术送上门来的西洋人。

傅兰雅尽管把一生的精力贡献给中国人民的科学技术事业，但是由于中国的传统势力太强，进步太慢。所以也有他的苦恼。甲午战争失败之后，他说：“外国的武器，外国的操练，外国的兵舰都已试用过了，可是都没有用处，因为没有现成的、合适的人员来使用它们。这种人是无法用金钱购买的，他们必须先接受训练和进行教育。……不难看出，中国最大的需要，是道德和精神的复兴，智力的复兴次之。只有智力的开发而不伴随道德的或精神的成就，决不能满足中国永久的需要，甚至也不能帮助她从容应付目前的危急。”

傅兰雅的话是他在华 30 多年的深切体会。其实从明末起到 20 世纪

初的 200 多年的发展，也体现了这种情况。我们不妨就力学在中国的传播作一回顾。

最早把西方的科学技术送上门来的是明末意大利传教士利玛窦（P. Matthaeus Ricci, 1552~1610）。他于 1583 年来华，给中国人带来了世界地图、自鸣钟，还有一系列天文和数学书。他与徐光启共同翻译了《几何原本》的前 6 章，还与李之藻合作编写了《同文算指》、《圜容较义》等书，分别介绍西方的笔算和天文。

不过利玛窦和后来的传教士介绍科学技术，其主要目的当然还是为了传教。利玛窦在 1605 年向罗马教庭写道：“如果能有一位天文学家来到中国，我们可以先把天文书籍译成中文，然后就可以进行历法改革这件大事。作了这件事，我们的名誉可以日益增大，我们可以更容易地进入内地传教，我们可以安稳地住在中国，我们可以享受更大的自由。”1735 年，法国传教士巴多明（P. Dominicus Parreniu）在通信中写道：“为了吸引他们的注意，通过自然科学知识赢得他们的尊敬是必要的，他们在这方面简直毫无所知和抱有殷切的希望。”

后来，确实是按照他们确定的方针发展的。一大批懂得西方科学技术的传教士来华。他们带来了西方先进的数学、天文学和力学。还带来了大批介绍西方科学技术的书籍。这些人得到了中国一批渴望吸收西方科学技术的积极分子的配合，进行了一些书籍的翻译和出版。如 1627 年出版了由瑞士传教士邓玉函（Terrenz, Jeannes, 1576~1630）口授，华人王征笔录的《远西奇器图说》一书，是最早介绍西方力学的著作。1606 年来华的意大利传教士熊三拔（P. Sabbathinus de Ursis）与徐光启译成《泰西水法》介绍西方的水利工程，其中有一些流体力学的知识，后被收入徐光启编的《农政全书》中。1610 年来华的法国传教士金尼阁（P. Nicilaus Trigault）后返回罗马，于 1620 年二次来华时携带 7000 多部西方书籍。

对于传教士送上门来的科学技术和西方书籍，一部分人采取积极的态度。如王徵在《远西奇器图说》的序言中说：“《奇器图说》乃远西诸儒携来彼中图书，此其七千余部之一支，就一支中，此特其千百之什一耳。”他还说在听了传教士的介绍后：“令人心花开爽”而“私窃响往”。所以求邓玉函口授，学习并笔录成书。

杭州人李之藻，除了译书外，还自费出版这些译著。他 1730 年完成了《天学初函》丛书的编印工作。这套丛书由 20 册组成，上编 10 册是关于天主教教义方面的，下编 10 册是关于自然科学方面的，包括《泰西水法》、《几何原本》、《测量法义》、《简平仪说》、《勾股义》等。

到了清朝，人们对传教士的所长采取有分析地吸收，取其所长，去其所短。例如在 1782 年编纂的《四库全书提要》在对李之藻《天学初函》的按语中说：“西学所长在于测算，其短在于崇奉天主，以炫惑人心，所谓自天地之大，以致蠕动之细，无一非天主所手造。”

不过这种对西方科学技术抱积极吸收态度的人，毕竟是少数。更多的人和在更多的时候是采取消极的或排斥的态度。从 17 世纪初的明末到 19 世纪尾的清末，偌大一个中国，丝毫没有学习外语的积极性，竟没有一个人学会外语直接从外文翻译西方著作，就是最有力的说明。在这长达 200 多年的历史时期中，所有翻译西方的著作，都是由外国人学会汉语即“西人之通中西两文者”口授，中国人笔录而成。所有的西方学术的确是外国人主动送上门来的。而且中国人对这些东西还是采取鄙视或仇视的态度。

对于排斥西方科学技术的说法，我们举一位作者在文中说：“今按彼自鸣钟，不过定刻漏耳，费数十金为之，有何大益？桔槔之制，曰人力省耳。乃为之最难，成之易败，不反耗金钱乎？”这是从新技术是浪费方面来说的。另一位作者排斥外国的历法是从它违反中国固有的法律和传统说的：“彼云国中首推算历数之学，为优为最，不同中国明经取士之科，否则非天主教之诚矣。不知私习天文伪造日历，是我太祖成令之所禁，而并严劓劓其书者也。假令我国中崇尚其教，势必斥毁孔孟之经传，断灭尧舜之道统。费经济而尚管占，坏祖宗之宪章可耶。”

如果说，从明末到清初，直至康熙皇帝，尽管时紧时松，西方的传教士还被允许一方面传教，一方面传播西方的科学技术。到了 1722 年，雍正皇帝即位，开始执行排斥洋教的政策。除钦天监留用少数懂天文的传教士外，所有外国传教士一律驱赶到澳门看管。他们认为允许传教会最终动摇他们的集权统治。雍正皇帝在驱赶洋教士前，事先打招呼说：“当明万历初，利玛窦来中国也，当时教士不多，不若现在若是众多，及至教堂之遍及个省也，……试思一旦如此，则我等为如何之人，岂不

成尔等皇帝之百姓乎？百姓惟尔等是从；虽现在不必顾虑及此，然苟千万战艘，来我海岸，则祸患大矣。”由于雍正的这种“高瞻远瞩”，西方的传教被认为是“邪教”，许多教堂被查封，传教活动被宣布为非法，从此中国就再也不允许传教士活动了，传教士传播西方科学技术的活动也便中止。

对于康熙皇帝使用洋教徒而雍正皇帝之后的驱赶洋教徒，清人复农氏和杞庐氏有一首竹枝词说：

圣祖当年用楚材，远人恭顺敢生猜。

而今驱遣同羊豕，疑是晴天霹雳来。

不管怎样，由于对洋人不加区分，一律视为敌人，在禁止“邪教”的同时，西方的科学技术也被禁止了。从雍正皇帝即位一直到1840年鸦片战争的一百多年里，中国就再没有人敢于向西方学习科学技术了。又由于对内文字狱的发展，知识分子在总体上，就没有对现实问题感兴趣的研究，而陷人考据中去了。这就是著名的乾嘉学派。即乾隆、嘉庆两朝的对古书寻章摘句和对古董的考据研究所形成的学派。

鸦片战争的失败，使一些有识之士看到，必须向西方学习，提出“师夷制夷”的口号。不过，时间已经过去了一百多年了，西方的力学和其他科学技术学科，力学中的分析力学、天体力学、流体力学、固体力学等分支也大多是在这一百多年中发展成熟的。如果在康熙时期，中国同西方在科学技术方面的差距还不十分大的话，鸦片战争后在科学技术方面，中国对西方的落后就不可同日而语了。

2 中国古代为什么没有力学

在上面，我们曾经提到中国古代没有力学。力学是自然科学中最早精确化的学科，现代自然科学可以说是从力学开始的，而且，直到19世纪末，精确的自然科学可以说主要就是力学。由此从一定的意义上也可以说，中国古代没有精确的自然科学。所以英国哲学家A.N. 怀特海说：“从文明的历史和影响的广泛看来，中国的文明是世界上自古以来最伟大的文明。中国人就个人的情况来说，从事研究的秉赋是无可置疑的，然而中国的科学毕竟是微不足道的。如果中国如此任其自生自灭的话，我们没有任何理由认为它能在科学上取得任何成就。”

从元、明以后，中国的科学技术为什么会长久地落后于西方，这一直是近代中国知识分子讨论不尽的话题。其实，在元以前，所谓中国科学技术的先进，也是主要指技术的先进。在中国历史上直到现今，从来是把科学与技术不加区分的，笼统地称为科学技术。其实，任何科学不发达的民族，在古代都是有技术的。所以我国学者顾准（1915~1974）说：“中国思想只有道德训条。中国没有逻辑学，没有哲学。有《周髀算经》，然而登不上台盘。犹如中国有许多好工艺却发展不到精密科学一样。”

爱因斯坦说过：“西方科学的发展是以两个伟大的成就为基础的，那就是：希腊哲学家发明形式逻辑体系（在欧几里德几何学中），以及通过系统的实验发现有可能找出因果关系（在文艺复兴时期。）”^[6]怀特海说：“希腊终归是欧洲的母亲。”^[4]一般说来，从世界范围来说，现今自然科学的起源，认为是来自古代希腊的，特别是古希腊的逻辑学。为了弄清楚中国古代为什么没有力学，从而没有精密科学，为此我们要回顾一下古代希腊自然科学的情况。

古希腊的科学，为什么在人类历史上占有最为辉煌的一页，从根本上来说是由于在古希腊存在过数百年贵族的民主制。

古希腊是由许多独立的城邦所组成的。大约从公元前800年到公元前100年，希腊在政治上实行贵族民主政治制度。城邦的军事首领是国王，但国王的权力被加强的长老会削弱或制约。间或有些野心家（僭主）征服了其他城邦，建立了僭主制政治（Despotism）。所以古希腊实际上是民主制和僭主制交替出现的政治。即使出现了僭主政治，僭主的权力也无法和后来欧洲的君主以及中国的皇帝相比的。因为，第一，僭主的称号就是一个带有贬义的词，表明他的权力是不合法得到而是窃取的；第二，这种权力不可能自然地由他的子孙继承；第三，大多不能长久而被贵族的寡头政治或民主政治代替。

由于古希腊实行的是以贵族的民主制为基础的政治，所以在决策和决定事情时，主要靠辩论来说服参与决策人以获得多数。长达700年的民主政治氛围中，产生了许多辩论家。由于辩论的普及，就发展了进行辩论所必须遵从的规律以及怎样在辩论中取胜的学问，这就是逻辑学。亚里士多德的著作《工具论》是古希腊逻辑学的大成。由于逻辑学的发

展，古希腊产生了推理的数学。世界上的文明古国都有自己的数学传统，有埃及的古数学，有印度的古数学，有中国的古数学，然而产生推理数学的惟一的地方只在古希腊。而欧几里德的《几何原本》是古希腊推理的巨著。阿基米德关于力学的著作则是古希腊推理数学和力学相结合从而产生现代精密科学萌芽的典范。17世纪欧洲产生的以力学为开端的现代自然科学正是继承和发扬了以阿基米德为代表的古希腊科学传统的结果。古希腊被罗马灭亡后幸亏有阿拉伯人翻译和保存了古希腊的科学文献，才使后来欧洲文艺复兴中重新发挥作用。

古代中国为什么没有力学，从而也就没有精密自然科学呢？

首先，从根本上来说，是因为中国长达数千年的封建集权统治。

中国不仅集权制延续了很长的历史，而且愈到后来有愈益强化的趋势。如果说在商周时代，大事的决定靠占卜、大臣的意见、皇帝的意志三种结论，以多数来决定。皇帝尽管是最高统治者，但是还是要受一些制约。

春秋战国时代，中国曾经有过一个许多小国割据的局面，不过武力兼并的结果，建立了秦的一统集权天下。紧接着是秦始皇的焚书坑儒和汉武帝的罢黜百家独尊儒术，皇帝可以独断专行，封建集权延续了数千年之久。

在封建的集权统治下，一切言行是依“三纲”（即君为臣纲，父为子纲，夫为妻纲）为标准，即使你的“纲”说得毫无道理也得绝对服从，没有丝毫辩驳的余地。何况还有“三年不改父制谓之孝”等一系列死人统治活人的教条。

如果说，欧洲的文艺复兴运动是对古希腊民主和科学的复兴。从开始的文学上歌颂人文主义蔑视神权，到14、15世纪，欧洲的神权和君主专制摇摇欲坠。从而迎来了17世纪的科学繁荣。与此相对照的是，在同一个时期中国正好是明朝，封建的集权制在朱元璋取得政权后被空前野蛮地强化了。1380年，朱元璋以谋反罪杀丞相胡惟庸，株连达一万五千人，并借机取消了宰相，大权由皇帝独揽。文字狱，是几千年封建统治者对知识分子迫害的一种方式。从朱元璋开始，延续至朱元璋之后的数百年，文字狱被发展到最为残酷的地步。朱元璋加强了特务政治，组织了锦衣卫，直属皇帝指挥，专管监视和处置大臣，对大臣首开

“廷杖”进行侮辱处罚。作为奴隶社会的特征，我国的人殉制在秦汉以后便逐渐消失了，而朱元璋却恢复了野蛮的人殉制，1397年（洪武三十年）朱元璋死，殉葬的嫔妃达46人。

集权制的第一个恶果，使中国不可能产生精密科学所需要的逻辑学从而也就没有推理的数学。

在春秋战国，中国也出现过一个阶段的文化繁荣时期，那时舌辩之风也很盛行。相应于这种短暂的辩论风气，也出现了像《墨经》中叙述的逻辑学的萌芽。《墨经》中的逻辑学同《工具论》中的逻辑学是无法同日而语的。后者已经十分完备，以致于1787年德国哲学家康德在他的《纯粹理性批判》的序言中说，从亚里士多德以来，“逻辑学没有能前进一步，因此看起来，逻辑似乎是完成并且结束了。”在集权制之下，一切重要决策都是由皇帝说了算，“朕即真理”没有辩驳和争论的余地，也没有“公理”、“定义”、“推论”等的必要。

逻辑学对于精密科学的重要性，可以从严复在介绍逻辑学时说“是学为一切法之法，一切学之学”中看出^[7]。美国汉学家费正清认为中国科学未能发展同中国没有订出一个更完善的逻辑学有关。在没有逻辑学的条件下，中国的数学始终只停留在计算上，所以中国自古把数学称为算学。中国的数学缺少推理和论证的部分。而推理和论证正是精密科学所必不可少的。以牛顿用万有引力去解释行星运动来说，他必须用到加速度和圆锥曲线的概念。在西方，早在古希腊，公元前200年就有了阿波罗尼（Apollonius，前262？～前190）的《圆锥曲线论》重要著作，其中包含了有关圆锥曲线的400多个命题，详尽地探讨了圆锥曲线的各种性质。而中国的传统数学是没有圆锥曲线的。直到清末圆锥曲线的概念才由西方传教士带进来。

第二，封建的集权制不可能造就现代科技发展的外部需求条件，即没有也不可能形成市场经济。由于没有市场的需求，中国的许多发明创造不能受到全社会的注意，相当多的发明只是为了满足皇权和宫廷的需要。如，和力学有关的发明被中香炉、水运仪象台、记里鼓车等都先后失传，我国四大发明之一的火药，长期被用在焰火和爆竹上，而没有用在为了扩展市场所需要的武器上。另外还由于皇权的需要，把某些研究领域列为禁区，不许一般人涉猎。如天文学，在秦汉以后，历朝历代都

不许民间研究，天文著作被列为禁书，不许民间刻印和私藏，我国古代的许多天文著作也便失传了。所以英国学者李约瑟说：“无论谁想要解释中国社会未能发展出近代科学的原因，那他就最好是从解释中国社会为何未能发展商业以及后来的工业资本主义入手。”^[8]

在集权制之下，有时，皇帝也主张“休养生息”、“民殷国富”的政策，注意发展生产。一些学者认为，生产发展了便会自然地进入资本主义，形成市场经济。顾准说得好：“我们有些奢谈什么也可以从内部自然生长出资本主义来，忘掉资本主义并不纯粹是一种经济现象，它也是一种法权体系。法权体系是一种上层建筑，并不是只有经济基础才决定上层建筑，上层建筑也能使什么样的经济结构生长出来或生长不出来。”^[9]

事实上，到了清朝末年，在中国也产生了一些大商人，但由于强大与狡猾的封建集权统治，这些商人只能作为皇权的附庸，而不能影响当局的政策，更不能动摇皇权的统治。这些商人也只能依靠贿赂的手段，从封建集权那里换得一点点可怜的经营权利。李约瑟说：“资本主义这种社会制度是中国人民从来不习惯的，不需要的，而且愈来愈不愿意接受的。”其实与其说是人民不习惯的，毋宁说是当权者或者说集权的体制所不容纳，所以直到近几年才允许公开在文字上提出市场经济，至于要达到发育的市场经济，那还需要一段长时期的努力。

第三，在集权统治下，从理论认识上形成鄙视科学技术的传统。

由于强大的集权统治，中国的知识分子，自古就分为两大类。一类是依附于统治者，走向上爬“学而优则士”的路。另一种是远离统治者，走逍遥出世的隐士道路。这两种道路的知识分子，各自形成自己的理论系统。

孔、孟为代表的儒家学说，是为走前一条路的理论基础。所谓“修身、齐家、治国、平天下”、“己欲达则先达人”、“忠、恕”、“仁、义”等一系列说教都是为这条道路服务的。

儒家的经典著作《尚书》上，在批判商朝的皇帝纣时说“作奇技淫巧，以悦妇人”。孔颖达注解：“奇技谓奇异技能，淫巧谓过度工巧，二者大同。但技据人身、巧指器物为异耳。”这里“以悦妇人”泛指宫廷游乐。中国传统上视科学技术为“奇技淫巧”就是从这里来的。

实际上，在集权统治下，是有一批人想靠进献发明以图皇帝嘉许达到作官的目的的。古代有许多发明，在没有市场经济的需求下，只能作为宫廷游乐之用。例如与力学有关的发明被中香炉、孔明灯、轮船、爆竹、火箭、焰火、风筝、竹蜻蜓、编钟等都是这样的。上述儒家著作的观点，认为靠这种发明以求晋升的路子是一条不足取的道路，不是仕途的正道。以老、庄为代表的道家学说是为隐士道路服务的。主张“清心寡欲”、“无为而治”。他们主张“无为”到什么程度呢，在《庄子·外编·天地》中有一段：“子贡南游于楚，反于晋，过汉阴见一丈方将为圃畦，凿隧而入井，抱瓮而出灌，滑滑然用力甚多而见功寡。子贡曰：‘有械于此，一日浸百畦，用力甚寡而见功多，夫子不欲乎？’为圃者仰而视之曰：‘奈何？’曰：‘凿木为机，后重前轻，挈水若抽；数如泆汤，其名为橰。’为圃者忿然作色而笑曰：‘吾闻之吾师，有机械者必有机事，有机事者必有机心。机心存于胸中，则纯白不备；纯白不备，则神生不定；神生不定者道之所以不载也。吾非不知，羞而不为也。’子贡瞠然惭，俯而不对。”

这段话深刻反映了道家对于技术革新的无为态度。为了要保持“道”的“纯白”，连任何先进的工具都羞于使用。更不用说去勤奋地进行科学技术研究了。

在周朝的著作《易经》中有一句话：“备物致用，立成器以为天下利，莫大乎圣人。”孔颖达注解：“备天下之物招致天下之用，建立成就天下之器，以为天下之利，惟圣人能然。”中国从古就有很强的“学以致用”的传统，大概就是从这里开始的。在这种认识指导下，人类活动唯一的目的是为了“应用”，认识与发现自然规律的活动是没有任何地位的。也就是说，你要是作一件什么事，他就要问“有什么用”。如果你回答不出有什么用，就被认为是“无的放矢”，这被认为是反对科学研究的最有力的武器。何况这里的“应用”经常被解释为爵位的晋升、财源的开发等等。

总之，在集权统治之下的知识分子，不论是在朝的还是在野的都不屑于科学技术。鄙薄科学技术是他们共同的认识。即使是重视技术的人，也不过是重视器物的应用，而认知科学是没有地位的。这就是集权制之下轻视科学技术的认识上的根源。

第四，在集权统治之下，形成了一套完整的教育体系，这就是科举制度。中国的科举制度始于隋朝，完善于唐。迄今已经有一千多年的历史。

科举制度把读书研究学问同当官紧紧地绑在一起。它与其说是一种教育，倒不如说是一种为了训练皇帝统治下民的奴才而服务的。科举制度要求人们从小读四书五经，钻研当官术，学习写作对皇帝歌功颂德的文章。到了集权制被空前强化的明代，这种文章发展定型为八股文。八股文造成中国颂古非今、褒上贬下、空洞无物的文风。在科举制的形成的初期，唐代的科考内容中，也曾经列入过算学，后来就再也没有实施过考试涉及科学技术的内容。这些都严重地影响科学技术的传播与发展。

在明末，意大利人利玛窦与徐光启合译了西方数学名著《几何原本》。徐光启深感这种知识在中国普及的必要，他在序言中说：“此书为用极广，在此时尤所急需。”它“能令学理者祛其浮气、练其精心；学事者资其定法，发其巧思，故举世无一人不当学。”他预言说：“窃意百年之后，必人人习之。”可惜他的这些话二百多年，在集权制度下的科举制度系统中，没能实现，一直到清末李善兰在同文馆中成立了算学馆，才规定《几何原本》为必读书。至于将几何学、包含牛顿力学的物理学作为普及教育的内容，那是推翻清朝以后的事。

所以近代中国的许多改革的思想家都提出革除科举改革教育的主张。严复批判科举制度“八股取士，使天下消磨岁月于无用之地，堕坏志节于冥昧之中，长人虚骄，昏人神智，上不足以辅国家，下不足以资事畜，破坏人才，国随贫弱。”梁启超则指斥“八股和一切学问不相容，而科学为尤甚。”并呼吁“变法之本在育人才，人才之兴在开学校，学校之力在变科举。”^[11]

第五，在中国封建集权制之下，皇帝因为拥有无上的权威而妄自尊大。哪怕是一个笨蛋，一旦登上金銮殿坐到皇帝宝座上，便变成什么都懂、什么都行的全才。他的话便是“金口玉言”，人们就得俯首贴耳。这就培养皇帝以一种愚昧的优越感自居，把自己称作天子，把自己统治的国家称为天朝上邦，把别的国家和民族一概贬斥为蛮夷。这一点，在明末利玛窦一来到中国便有明显的感觉。他评论说：“因为不知道地球

的大小而又夜郎自大，所以中国人认为所有各国中只有中国值得称羨。就国家的伟大、政治制度和学术的名气而论，他们不仅把别的民族都看成是野蛮人，而且看成是没有理性的动物。在他们看来，世界上没有其他地方的国王、朝代或者文明是值得夸耀的；这种无知使他们越骄傲，一旦真相大白，他们就越自卑。”后来的历史发展证明利玛窦的评论是很得当的。

中国原来没有力学，但是如果能够虚心向外国学习，还是能够很快学会的。然而，这种夜郎自大、闭关锁国的狂妄和对于外来的学术一概排斥的态度，导致了数百年来我国的力学一直落后。迄今为止这种影响也很难说已经得到了廓清，“文化大革命”中不是要批判热力学、相对论吗？不是在批判“崇洋媚外”的旗号下煽起了盲目排外情绪吗？眼下也还是有些人盲目乐观地在说“21世纪将是中国的世纪”，而与学习外国的先进经验和改革开放的方针背道而驰。

通过以上的讨论，我们可以作结论：中国古代没有力学，从而没有精密科学，这是和中国的集权统治紧密相连的。就是说，愚昧是和专制相连的。所以在辛亥革命之后，以陈独秀为首的革命知识分子，喊出了“民主与科学”的口号。科学是和民主共生的，没有民主就不可能有现代科学。现在我们重温这些历史事实，还是有现实意义的。

第一，认识我国古代的落后，可以激励我们奋进。

第二，客观地分析我国古代力学落后的原因，在阻碍现代力学前进的诸多因素中仍然可看到这些原因的影子，它也阻碍整个科学和技术的进步，从中可以启示我们所需要的改革方向。

（注：本文受到国家自然科学基金 10172002 项目的资助，特致谢意。）

参考文献

1. 熊月之. 西学东渐与晚清社会. 上海: 上海人民出版社, 1994
2. [法] J·谢和耐著, 于硕等译. 中国文化与基督教的冲突. 沈阳: 辽宁人民出版社, 1989
3. 邓玉函口授, 王徵译绘. 远西奇器图说. 北京: 商务印书馆, 民国二十五年

4. 怀特海著，何钦译，科学与近代世界，北京：商务印书馆，1997
5. 顾准著，顾准文集，贵阳：贵州人民出版社，1994
6. 许良英，范岱年编译，爱因斯坦文集，第一卷，北京：商务印书馆，1976年
7. 缪勒著，严复译，缪勒名学，北京：商务印书馆，民国二十一年
8. 李约瑟，中国科学传统的贫困与成就，科学与哲学，1982年，第一辑，35页
9. 顾准著，顾准文集，贵阳：贵州人民出版社，1994年，第318页
10. 严复，严复集，北京：中华书局，1986年，第43页
11. 梁启超，中国近三百年学术史，北京：中国书店，1985年，第28页

钱伟长先生科学研究的成果和方法^①

戴世强

(上海大学 上海市应用数学和力学研究所, 200072)

【摘要】 本文通过回顾钱伟长院士的治学生涯和学术成就, 力图具体地探索他的学术思想和治学之道。着重阐明: 钱伟长院士的爱国敬业、矢志不移的治学动力, 勤奋进取、锐意创新的治学精神, 面向实际、求真务实的治学态度, 广闻博览、融会贯通的治学方法, 群策群力、集思广益的治学谋略, 从而指出: 钱伟长院士近六十年来在科学、教育领域叱咤风云、纵横捭阖、业绩辉煌并非偶然。分析表明, 纵贯他的治学经历的学术思想是: 立足于社会实践, 以高瞻远瞩、勇于探索的思路, 根据经济、科技发展的需要来发现、提炼问题, 经过充分调研, 以广泛扎实的知识基础和独辟蹊径的创造性劳动, 建立实际问题的数学模型, 用独创的或先进的方法加以巧妙处理, 将所得的成果经过实践的严格检验, 并上升到新的理论高度加以认识或系统地发展成新的理论, 事实证明, 这种思想指导下的科研实践是卓有成效的。文中还指出, 钱伟长院士创造性地继承了我国先哲深邃的学术思想和德国哥廷根学派优良的学术传统, 并结合当今的实际情况加以发扬光大, 他的探索所积累的经验是我国学术界的宝贵财富。

【关键词】 治学理念, 学术风格, 固体力学, 流体力学, 应用数学, 张量分析, 变分原理, 奇异摄动

^① 节录自《力学进展》2003年第33卷第1期戴世强的论文《论钱伟长的治学理念和学术风格》。

1 引言

钱伟长院士已经走过了九十年的漫漫人生长途，作为遐迩闻名的力学家、应用数学家、教育家和社会活动家，他历经了艰苦立业——事业辉煌——历经坎坷——再度辉煌的曲折过程，如今虽已到了耄耋之年，却壮心依旧、斗志不改，坚守在他的教育和科研岗位上，续写着灿烂的人生篇章。对略微知道他的成长背景和坎坷经历的人来说，钱伟长这个名字多少带一点传奇色彩，心中存在着各种各样的疑问：他是怎样从一个普通的农家子弟成长为知名科学家的？为什么他能在经过二十多年的人生逆境之后，却依然爱国敬业、忘我奉献、矢志不移？他为什么能在诸多科学领域中做出举世瞩目的成就？他为什么能完成常人难以想像的工作量？诀窍何在？笔者认为，所有这些问题可以归结为一个总问题：钱伟长院士有什么样的人生理念和治学方略？回答好这个问题对我们这样的学生后辈将大有裨益，但又相当困难，因为钱伟长院士的人生经历实在太丰富、著述实在太浩繁，仅仅想弄通、弄懂它们，也是穷毕生的精力而难以如愿。笔者近二十多年来，有幸有机会受钱伟长院士耳提面命的教诲，特别是最近的十八年，一直在他所领导的研究所工作，经常聆听他的谆谆教导及发自肺腑的心声，对上述问题或多或少有一些认识，因此，不揣冒昧草成此文。

笔者想从钱伟长院士的学术成就谈起，列举种种实例，论及他的治学动力、治学精神、治学态度、治学方法、治学谋略，而这些又可以概括成：“爱国敬业、自强不息、锐意创新、求真务实、广闻博览、群策群力”这二十四个字。“爱国敬业”是钱伟长先生治学的基本动力，也是他历尽磨难、无怨无悔、奋斗终生的精神支柱；“自强不息”是旧清华的校训，也是新上大的校训，是钱伟长最珍爱的人生格言，也是他身体力行、发奋治学的行动准则，在十年前出版的《钱伟长文选》的扉页上，就有他的自题词：“厚德载物，自强不息，为人民服务”；“锐意创新”是钱伟长先生治学的主要精神，他尊重学术前辈而不盲从，强调不要去咽别人的唾沫，遇到问题要独辟蹊径，尽力用新观点、新方法去解决新问题；“求真务实”是钱伟长先生治学态度之精髓所在，他力主科研要从实际需要出发，在实践中发现和提炼问题，所得到的研究成果必

须经过实践的检验。与他稍有接触的人都知道，他的治学、为人之道讲究一个“实”字，他痛恨阳奉阴违、弄虚作假，为人处世从来都是直言不讳、直来直往，虽因此吃亏而无怨无悔、本性不改，而做学术研究的人都知道，求真务实正是治学的一个基本原则，钱伟长先生是坚持这一原则的典范；“广闻博览”是钱伟长先生治学的基本方法和屡获成功的诀窍和基础，六十年来，他坚持“行万里路，读万卷书”，只要科研需要，他从来不耻下问，向内行求教，在实践中学习，也从来不吝惜精力，博览群书，孜孜不倦地自学，因此总能以简洁、优美的方法解决种种难题；“群策群力”是钱伟长先生作为学术领路人，指导科研工作、培养学生和助手的谋略，他继承并光大了哥廷根学派的优秀传统，大力发扬学术民主，组织各种各样的学术活动，经过他的传道授业，数以千计的学子迅速成长，不少人成了我国科学技术事业新一代的中流砥柱。

2 学术成就：纵横驰骋，硕果累累

钱伟长先生从事科学研究已超过一个甲子，他在科研战场上纵横驰骋、广泛涉猎、成果颇丰，大部分成果及其产生背景和学术思想已在文献[1~8]中作了归纳和综述，本节只作非常扼要的概括。

钱伟长先生学术成果涉及方面之广，钻研功夫之深，影响范围之大，令人叹为观止。根据他的学术活动的大事年表，他从事过的学术研究主要有^[6,7]：

- 1934~1935年，与清华大学物理系的同学顾汉章一起测定北京地区大气参数，并在1935年在青岛召开的全国物理学年会上作了报告；
- 1935~1939年，在清华大学物理系吴有训教授指导下研究稀土元素的光谱分析和X射线衍射；在清华大学化学系黄子卿教授指导下研究溶液理论；开始自行钻研弹性板壳理论；
- 1940~1942年，在加拿大多伦多大学应用数学系与导师J. L. Synge教授合作探索弹性板壳的内禀理论，并完成以此为题的学位论文，获应用数学博士学位，这项研究备受国际学术界关注，产生了深远影响；
- 1941~1942年，参加加拿大研究委员会应用数学组关于雷达天

- 线的研究工作，给出雷达波导阻抗的计算理论与公式；与加拿大多伦多大学应用数学系的 A. Weinstein 合作研究固支受拉方板的振动；
- 1943~1946 年，在美国加州理工学院航空系及喷气推进研究所 (JPL)，在 Th. Von Karman 教授领导下研究火箭弹道、火箭的气动设计、气象火箭、人造卫星轨道、降落伞运动规律、火箭的飞行稳定性、对称超音速锥型流流场计算、圆柱体的变扭率扭转等问题；
 - 1946~1957 年，在清华大学先后研究圆薄板大挠度弯曲问题的渐近解（摄动解和奇异摄动解）、流动润滑理论、构件的压延加工、连续梁特性、扭转问题、扁壳跳跃问题和方板大挠度问题，这些大多属于非线性力学的前沿领域，有关成果在力学界产生了广泛影响；
 - 1958~1976 年，尽管他被剥夺了正常地从事科研活动和公开发表学术论文的权利，但他没有停止过对科学技术问题的探索，从事过以下诸项研究：飞机颤振、潜艇龙骨设计、化工管板设计、氧气顶吹转炉炉盖设计、大型电机零件设计、液压机设计和研制、高能锌空气电池研制、穿甲原理、三角级数求和、变分原理中的拉格朗日乘子法探索等等，这些成果有的见之于他人的著述中，有的在 1980 年以后陆续以论著形式问世；
 - 1977 年至今，先后在清华大学、上海工业大学、上海大学研究环壳理论、广义变分原理、有限元理论、中文信息处理、薄板大挠度的合成展开法、波纹管和其他管板、穿甲力学和断裂力学、加筋壳分析、三角级数求和、板壳的非 Kirchhoff 理论等等，这段时间成为他的学术生涯中的第二丰收期。

迄今为止，钱伟长院士共发表学术论文 200 余篇（部分散佚，收录在案的 168 篇），出版学术专著 15 部，撰写报刊文章 500 余篇（其中直接与学术问题有关的约占 70%），担任过主编或编委的杂志、学术专著（或丛书）、辞典与百科全书 30 种，目前仍任《应用数学和力学》（中、英文版月刊）主编、《力学进展》（双月刊）副主编以及三种国际学术刊

物编委、多种国内刊物的编委或顾问编委（参看文献 [1~26]）。由于他在弹性薄板大挠度理论和广义变分原理方面的出色工作，他于 1955 年和 1982 年两度荣获国家自然科学二等奖；由于他在学术上的卓越成就，1999 年获何梁何利奖。鉴于他对我国力学事业的有目共睹的杰出贡献，他与周培源、钱学森、郭永怀三位院士一起，被公认为中国现代力学的奠基人。

3 治学动力：爱国敬业，矢志不移

钱伟长先生历尽磨难，而对他所从事的教育、科研事业抱着始终不渝的热情，他的治学动力何在？笔者认为，动力来自他的矢志不移的爱国敬业精神。

钱伟长先生出生于乡间寒儒家庭，自幼饱受清贫之苦，在多方资助下方得勉强完成中学学业并进入大学学习。他刚进清华大学的第三天，就遇上了“九一八”事变，尽管他当时是文科全才，而迫于成长环境，理科成绩很差，但在科学救国的热情驱使下，他坚决地要求弃文学理^[2,6,7]。四十多年后，他回顾道：“我是受国耻纪念日对我的灵魂上的冲击长大的，因此最后我从学文改学物理，因为当时我认为没有强大的国力是没有办法对付帝国主义的。……我们每个中国人应该自强不息。我们承认现在不如人家，可是我们不甘于永远这样承认下去，因此我们需要自强不息，就是在承认我们不如人家的基础上赶上去。人人如此，这个国家就强盛了。”（见文献 [5]，361 页）正是这种爱国的信念指导了他的一辈子的学术活动。

大学毕业后，钱伟长先生怀着科学救国的决心，考取庚款出国留学，经过六年奋斗，学术上取得了很大成就，过上了相当安定舒适的生活。1946 年，抗日战争的硝烟刚散，他就毅然放弃已有的一切，希冀立即报效祖国。由于他在科研中接触了大量军事机密，为了让美方顺利放行，他制造了短期回国探亲的假象：轻装简从，将大量书籍、资料留在了办公室，还在住所预付了半年房租。他在回忆这段经历时说：“中国知识分子有民族自尊心、民族自豪感，承认落后，不甘落后，要解决这个落后问题，宁愿牺牲在国外的舒适生活。老实说，我在国外的生活是非常舒适的，我领导了庞大的工程师队伍，就是做‘洋官’的人，当

然我是‘技术官’，可我不稀罕这个，我当时是为美国做事的，做出来的导弹火箭都是美国用的，我干吗，我要回来就回来了，……。”（见文献 [5]，136 页）回国后的生活令他失望，为了维持生计，他奔波于北京的三所大学讲课，仍不得温饱，不得不向单身同事、老同学告贷度日。1948 年友人捎信给他，告知美国加州理工学院喷气推进研究所工作推进较快，愿他回该所复职，携全家去定居并给予优厚待遇，于是他到美国领事馆申办签证，但在填写申请表时，发现最后一栏写有：“若中美交战时，你是否忠于美国？”他毅然决然地填上了“NO”，最后以拒绝赴美了事。当时，他积极地参加了爱国反蒋、迎接解放的活动，在中华人民共和国建国前夕，他与同学一起主动与在北平郊外的解放军首长联系，回校后，又按地下党的布置，在枪炮声中，镇定自若地为学生讲授“射击弹道计算”，一时传为美谈，在同学中留下了难忘的印象。

建国以后，钱伟长先生以空前的热情投入了新中国的建设事业，积极参加和领导教学、科研活动，进入了他学术上的第二个丰收期。但是，1957 年的噩梦打断了这一切，他的 29 个社会职务只剩下教授一职，而且从一级降为三级；他的独子尽管成绩优秀，却受牵连高考落榜；更有甚者，他被剥夺了公开进行科研、发表论著的权利。对于一位热诚的科学家，这是何等重大的打击！面对这样的局面，他没有灰心丧气，继续从事着力所能及的教学和科学咨询工作。据统计，从 1958 年到 1966 年，他完成了科学咨询、建议百余件，讲课 12 门，编写教材约 600 万字，为杂志审稿 300 余件，成了真正的“无名英雄”。在十年动乱中，钱伟长先生遭到更大的厄运，但是仍然痴心不改地进行着“地下”科研工作。就在清华武斗最激烈的时候，他家正处在两派的前沿阵地而又不准搬迁，在室外的混乱枪声中，他依然挑灯夜战，从事三角级数求和的研究工作；在首钢特殊钢厂劳动期间，他与工人亲密无间，与他们一起研制了水压机和热处理设备，并得到了工人的保护；稍后，他又根据国防需要，研制了轻质高性能电池，取得重大突破……。他为什么能身处逆境而报国之心不动摇呢？他自己的回答是：“我不是党员，不过我还是拿党的事业作为我的终身事业。为了我们的民族，我们个人吃点亏不要后悔，不值得后悔。我们历史上有很多英雄人物靠这么点精神，为我们中华民族立了大功绩！这就是公而忘私，……我们的先哲对

我们的教育是很多的，譬如像范仲淹那句‘先天下之忧而忧，后天下之乐而乐’的名言就是很精彩的！换句话说，就是我们要为天下着想，也就是为中华民族、为党的事业着想，……。”（见文献 [5]，171 页）

改革开放时期一开始，钱伟长先生迸发了新的活力。他欣然写道：“四害已除，重新获得了科学工作的权利，欣逢 1978 年党中央号召‘实现四个现代化’并召开全国科学大会，春风拂人，奋起之情油然而生，虽已年近七旬，还能为四化服务效力，感到无限幸福。”“……繁重的教学行政工作，丰富的政治社会活动，广阔的学术天地，使我的生活无限充沛而有意义，虽然岁月催人老，愿夜以继日地奋发工作，以补偿 20 年来失去的珍贵年华；愿以自己点滴汗水，汇入祖国社会主义波澜壮阔的奔腾洪流中去。”（见文献 [2]，69 页，114 页）老人爱国、报国的赤忱溢于言表，近 20 余年来，他一直是这样做的。

4 治学精神：勤奋进取，锐意创新

钱学森院士说过：“钱伟长同志是个多才多艺的人。”^[43]这是一个恰如其分的评价。认识钱伟长先生的人，无不赞叹他学识渊博、才思敏捷，也有不少人认为他是个天才。但钱伟长先生从未承认过这一点，相反，他说：“生而知之者是不存在的，‘天才’也是不存在的。人们的才能虽有差别，但主要来自于勤奋学习。……学习也是实践，不断的学习实践是人们才能的基础和源泉。没有学不会的东西，问题在于你肯不肯学，敢不敢学。自幼养成勤奋学习的习惯，就比一般人早一些表现出有才能，……”（见文献 [3]，212 页）他还说过：“无论谁，也无论有什么样的条件，要想学得好，要想搞出成就，最先和最后必不可少的都是勤奋。这就是说，始终都必须不辞劳苦、勤奋努力，都必须有孜孜不倦、锲而不舍的顽强精神和踏踏实实的学习态度。……我从来不相信有什么所谓‘天才’，而只是相信人的才能是用艰苦劳动培植出来的，天才出自于勤奋。……可能有人说我这个钱伟长是有才能的，其实不然。我愿意不隐讳地告诉青年朋友们，如果我曾作出了一点成绩的话，那么这点成绩也确实是用艰苦学习、不懈努力取得的。……这几十年来，无论在国外还是在国内，也无论条件好坏、环境优劣，我都一直是尽力而为的。因为我清楚地知道，任何人，不管他的天资如何，成就多

么大，只要停止了努力就不能继续进步。今天不努力，明天就落伍；长期不努力，那就必然完蛋！正因为我坚守这个信念，二十多年来虽然经受了各种各样的磨难，但我从未放弃过努力，所以我自信在专业上没有掉队。”（见文献 [3]，215 页）

钱伟长先生在许多不同的场合说过，每个人必须终生学习。可以说，“学到老，做到老，活到老”是他的口头禅，请注意，这里，他把这句常用语的次序颠倒了，目的是强调学习的自觉性和实践的重要性。他认为，只有不断地学习，知识才不会老化，人们才能跟上时代的步伐。他经常举自己的经历做例子：“我 36 岁学力学，44 岁学俄语，58 岁学电池知识。不要以为年纪大了不能学东西，我学计算机是在 64 岁以后，我现在也搞计算机了，当然不像年青人那么好，不过也吓不倒我。真理只有一条，国家需要你干，你就学。可有个基础，这个基础是靠你们在正规的教育里培养的，不要轻视了基础。没有我当时的物理、数学、化学的基础，我现在就什么也干不了，学什么东西都有困难。所以，我不是天才，我的学习是非常勤奋的，我发现很多东西我还不懂，需要，我就学。”（见文献 [5]，143 页）他还说：“到现在晚上八点以后是我的自学时间，一直到 12 点。晚上最安静，我可以安安静静地自学，获得我所不懂的东西。我毕竟是有经验，自学得很快，这是我长期锻炼出来的。我可以这样说，我没有懒过，我的知识没有老化。”（见文献 [5]，36 页）说来令人难以置信，钱伟长先生家里在他 70 岁以前没有电视机，原因是：他是个“体育迷”，特别爱看足球比赛转播，他生怕看电视耽误了他的自学和工作，后来在儿孙辈的强烈要求下才购置了彩电。在他珍藏的照片里，还能看到白发苍苍的他挑灯夜读的动人情景。笔者有一次问他：“钱先生，你还开夜车吗？”他答道：“还开呀，开了 50 多年夜车了，难改了。”

钱先生不仅强调发奋苦读，而且反复强调不能死读书，要“学而时习之”，而且对学问有他的独到见解。他说：“我有很多 20 年前、40 年前不懂的东西，现在还不懂，我有功夫再把它们拿出来解决，有的东西解决了，我觉得就是很大贡献；有的东西没解决，有时晚上还经常在想，怎么这个问题到现在还没解决？不要紧，将来有人解决。学问就是这样，应该觉得自己不懂的东西很多，那你就是很有学问；你觉得什么

东西都懂，你大概是没有学问的。”（见文献 [5]，215 页）

钱伟长先生认为，仅仅想读书、会读书是不够的，要做好科研工作，必须大胆怀疑、锐意创新。他对评定科研工作的优劣有一个简单易行的标准，即“评定一个科学工作，不外乎有几种情况：一种情况是，他有新的观点，用了新的办法，或者是理论上的，或者是实验上的，解决了一个新问题，从来没有人解决过，这是最好的工作。当然这个新观点要有普遍性，因为越有普遍性，这个工作就越好。……第二种，如果是新的观点，用旧的办法，解决了旧问题可是观点是新的，这也不错。如果用了老观点，用了新办法，解决了新问题或旧问题，这是次好的，……还有一种，用的是旧观点、旧方法，就是用得好，用得恰当，解决了新问题，这也不错。最不好是，用老观点、老办法，解决了老问题。”（见文献 [5]，33 页）1997 年，他又把这个标准简化为：“科研工作分为三类：第一类是用新方法解决新问题；第二类是用新方法解决旧问题或用旧方法解决新问题；第三类是用旧方法解决旧问题。第一类最优秀，第三类必须摒弃。”^[28]这里，他特别强调了科研的推陈出新问题。他一针见血地指出：“一个人成功不成功，不看他是不是大学毕业，而是看他有没有创造性。”（见文献 [5]，206 页）接着，特别举了他在清华读书时亲眼见到的华罗庚先生的例子以说明问题。他还说：“我们科技工作者应该跟着时代的步伐前进，而且这个时代是我们创造的，我们要做前人没有做过的工作，要超越时代的水平。”（见文献 [5]，79 页）；他希望把这种治学精神贯穿于教育过程之中：“要使教育培养出来的人都能带着满脑子的问题进入社会，在工作中创新、改革。大批具有创新意识的人不断在时间中探索问题解决问题，国家就会兴旺，社会就会大步前进。”（见文献 [5]，392~393 页）

为了撰写本文，笔者浏览了钱伟长先生的大部分著作，发现其中到处闪烁着创造性的“闪光点”。例如，为了建立板壳的内禀理论，他在读通经典著作的基础上，系统地钻研了张量分析和微分几何，并将其糅合进传统的板壳理论，独特地引进了拖带坐标系，对应力-应变关系用张量作简洁的描述，最终获得了成功；再如，在前面提到的关于超音速锥型流的渐近分析，他根据实际需要，在摄动的渐近序列中，引进了对数因子，简直妙得匪夷所思！要知道，这项工作完成于 50 多年前，摄

动法还没有形成完整的理论！还有，在 2~2 节中我们述及钱伟长先生首创的合成展开法，其构思也是独创性的，此前，固体力学中还没有边界层理论，而流体力学中的边界层理论虽则出现于 1905 年，但其中的一贯做法是“匹配”，即对边界层区和势流区分区求解，而将两个区域合起来摄动求解，绝对是个大创造。1979 年，在上海召开全国首届奇异摄动理论研讨会时，我们有机会仔细学习钱先生的合成展开法，在会议休息时，我问钱先生：“你这样做的思路是从那里来的？”他形象地回答道：“首先，边界层里变量的变化剧烈，那你就得用放大镜或显微镜来放大，也就是把坐标的尺度放开；其次，既然解只有一个，你得把放大后坐标的函数和原坐标的函数归置在一起，大家‘排排坐’，一道展开。”笔者听后豁然开朗，原来创造主要来自物理直观，当然也来自经验的积累。纵观钱先生的所有工作，发现有这样的特点：一是对前人的工作了如指掌；二是不拘泥于成法，不存在条条框框的束缚；三是既有物理学家的创新敏锐性，又有应用数学家的演绎严格性。如果按钱先生前面提出的标准来衡量一下，他的论文的绝大多数属于第一类的第一流的工作。

5 治学态度：面向实际，求真务实

钱伟长先生一贯强调，作为应用数学和力学工作者，应该时刻不要忘记，要为解决实际问题而工作。1984 年，当他亲手创办上海市应用数学和力学研究所时，他提出了该所的办所宗旨：为国民经济建设服务，特别是为上海市的建设服务，在社会实际中提炼问题，上升到理论高度来认识，将所获得的成果回到实践中检验；在出优秀成果的同时，不拘一格地培养优秀人才；请进来，打出去，大力开展学术交流。这里，他特别强调了办研究所必须面向实际 1990 年，他在上海工业大学校庆 30 周年时提出：“一段时间以来，我们的改革重点是‘拆四堵墙’，它们是：①学校与社会之间的‘墙’；②教学与科研之间的‘墙’；③各系和各专业之间的‘墙’；④教学思想上的墙。”（见文献 [5] 首页）其中的一个重点是：办学、治学要面向实际，为社会服务。他经常用他的研究生导师 J. L. Synge 的话来激励大家：“我们应该是解决实际问题的优秀的‘屠夫’，而不是制刀的‘刀匠’，更不是一辈子欣赏自己制造的

刀多么锋利而不去解决实际问题的刀匠。”（见文献 [2]，27~28 页）他的学术兴趣十分广泛，在政治运动中常受讥讽，他说：“有人在‘文化大革命’中贴我大字报，写我是‘万能科学家’，因为我对什么都有点兴趣，都想干一番，都想提点意见，……。”其实，他也不是盲目乱干，最近，他对笔者说：“我做工作一切从实际出发的；有需要，我就干；有不懂的，我就学；边干边学，摸着石头过河，只要对岸有果子要摘，再宽的河也要过。我敢于过河，不怕呛水。”他在谈论应用数学时说：“数学领域是汪洋大海，人们的物质生产活动和社会活动也是汪洋大海。搞应用数学的人必须要有勇气面对这两个汪洋大海，有时还得有大智大勇敢于跳进这两个大海，才有可能勇敢搏斗，抵达彼岸。”（见文献 [4]，215 页）

我们不妨回顾一下钱伟长先生对自己的研究课题的选择。综观他六十年的科研方向，主要扣紧了非线性力学这一主题。关于非线性力学，他在 1982 年的全国非线性力学会议上有过精辟的论述（文载《力学进展》13 卷 2 期，见文献 [4]，208~213 页）他指出，是钱学森的老师于 1940 年前后明确地强调力学中的非线性问题的。他说：“非线性力学的出现是有其工业背景和生产背景的。”接着指出，本构关系、结构大变形、高速飞行、航天轨道计算等等的非线性，迫使人们用新观点、新方法去认识它们、了解它们。因此，基于这一认识，他 60 多年前，就选定非线性力学问题作为一辈子的主攻研究方向，从弹性板壳的内禀理论，到薄板的大挠度（即大变形），到穿甲力学，到非线性弹性力学的广义变分原理，乃至前不久，他以年近九旬的高龄，还在孜孜不倦地研究非 Kirchhoff 假设下的板壳力学问题，出了一批优秀成果。正因为如此，他成了当今仍健在的最高龄的非线性力学权威，在十七年间主持召开了四届国际非线性力学会议。历史证明，钱伟长先生当年根据实际需要所把握的科研方向是正确的、卓有成效的。“文革”结束后，他敏感地发现，在仪器仪表工业、水利工程、化学工程中，需要更好地进行环壳受力情况的计算，对环壳理论进行攻关，取得了一批理论成果和实际成果，发起成立了中国力学学会管道力学专业委员会，挂靠在上海大学，目前，在他领导过的课题组里，已经承接完成了三峡工程中的一系列波纹管膨胀节的攻关项目。

他还强调，在选定问题之后，必须走向实际，深入调研。他说：“你要解决一个问题，就需要收集情况，也需要向已经写出的书本学习，要向许多庞杂的资料进行学习，还要到现场去看问题发生的情况，背景怎么样？这样才能弄清楚这个问题的本质，才能想出处理这个问题的方法，……”（见文献 [5]，25 页）还在“文革”后期，在周恩来总理的支持下，根据军事需要，他承担了小体积、高性能电池的研制任务。此前，他对电池一无所知，他就下工厂、跑图书馆、找化学专家，从掌握第一手资料做起，三年中，他骑自行车跑遍了北京市的大小车间 400 多个，与国内 100 多个电池厂建立了联系，并自己动手翻译了 300 万字的资料，并加以整理，以清华大学锌空气电池研究组名义出版了《锌空气（氧）电池进展》，还亲自动手操作试制极板、测量电学性能，经过一年多时间，研制出一种体积与普通电池相等，而能量高出 8 倍的新电池，性能超出 GE 的同类产品 40%，而且有防水性能，价廉物美，不少电池厂采用了这种电池的生产技术。几年下来，他居然成了电池专门家了。

钱伟长先生一贯认为，应用数学和力学工作者的科研成果必须经受实践的检验。他指出：“‘实践是检验真理的唯一标准’，这是马克思主义的一个科学原则。发展科学要实践，光靠幻想不行，直观的认定也不行，要实践来检验。我们既承认检验真理的唯一标准是实践，就应该把这个原则真正用到科学上面去。”（“学科的融合将形成完整的科学体系”，光明日报，1998 年 6 月 16 日，见文献 [5]，390 页）他有一位极富创造性的学弟——著名应用数学家、美国科学院院士林家翘教授。他们俩的学术观点完全一致，有一次钱先生访问 MIT，两人竟促膝长谈了五个小时。1978 年，林家翘教授提出了应用数学过程，即实验观测——数学建模——分析求解——实践检验，认为所有理工类科研必须遵循这一路线，钱先生对此十分赞同。阅读他的科研著述可以发现，他也一直坚持这一路线，所有工作源自实践，事先充分掌握实验观测资料，演绎过程有充足的依据，所建立的模型经得起推敲，所得结果必定经过与实验或其他已知结果的细致比对。所以，他写的论文是无懈可击的。他的求真务实也表现在对弄虚作假现象的深恶痛绝上。他大声疾呼反对和惩治考试作弊现象，更反对在科研中弄虚作假。在他所领导的上海市应用数学和力学研究所里，有一次发现一名博士生的学位论文里所提供

的计算程序没有可重复性，因此有“假算”的嫌疑，因此，他在各种场合经常举这个例子，要求坚决杜绝这类现象，并要求研究所建立研究生答辩前的程序考核制度。

6 治学方法：广闻博览，融会贯通

钱伟长先生经常告诫我们，治学一定要得法，一定要做到事半功倍。他说：“自学要有本事，第一是会找资料，你需要的资料。第二是自己会读这些资料，能很快从这些资料中最核心最有用的东西，能整理得有条有理，跟原来学的东西挂上钩。第三是要有眼光，能够看到进一步发展的景象。有了这三个能力，你就永远不会落伍，一直到退休为止。”（见文献 [5]，36 页）他经常对身边的研究人员和学生说，查资料要抓两头，一头是所关注的课题的经典著述，另一头是最新文献，这样就容易追本溯源，搞清问题的来龙去脉；他还把自己浏览文献的基本方法传授给大家：按顺序看题目、摘要、引言、结论，只对有价值的文献进行精读。他指出：“论文要常常看，而且要会看，因为论文涉及第一线问题，有的部分你看不懂，因为你没有学过这一方面的东西，怎么办？跳过去。大的东西理解了，小的东西自然会解决，你走路用不着等路上的小石头都捡完了再走，不需要的，跳过去，绕过去，爬过去就行了。总的你要掌握，不要一字一句都去抠，你没有那么多时间。念论文注意那么几条：要节省时间，抓它最重要的东西，抓这篇论文的特色；文中提出什么新观点，这你非要理解不可；用了什么新方法，老方法你不用看；得到了什么结论，好的文章会讲还遗留了什么问题，也应注意。”（见文献 [5]，245 页）他还指出，科学的各个门类是相通的，因此，知识面要宽、阅读面要广，不要局限于本专业，更不要局限于自己的研究方向。他自己在大学时代，过了弃文从理关，在清华物理系站住脚后，他跑到化学系、数学系，修了他们的主要课程，因此，在以后的科研实践中能应付裕如。譬如，在搞高能电池时，他就充分运用了他在化学系学到的知识。在上海大学拆的“四堵墙”就包括了拆各学院、各专业中间的墙；在应用数学和力学研究所，他规定，学流体力学的必须学弹性力学，而学固体力学的必须学流体力学，的确收到了很好的效果。

他经常强调：读书、做学问必须做到融会贯通。他指出：“在学习上懂得了‘勤奋’，做到了‘努力’，也还必须得法。这个法很简单，就是要‘弄通’，要‘理解’，切不要死记硬背。死记硬背的东西是没有用的，也是不可能记得牢的。”（见文献 [3]，215 页）“要勤于思考，多想问题，不要死记硬背。这样你一辈子才会是不断进步的，永远向上的。”（见文献 [5]，98 页）他时常谈论融会贯通取得成效后所产生的愉悦感。他说：“搞科学技术要弄通（有关知识），不要熟读。……当你不通时是焦头烂额，一弄通，你就会非常愉快。从弄通事情里得到的愉快，是没有人能够想像的，比给你做个大官还舒服，我就是一天到晚在自我欣赏里过日子。我在不断地弄通我过去不懂的东西，弄通了，就变成我自己的了。……应该先弄懂全局，在全局中再挖掘细节，次要的细节就不要去管它。……要记住，学习要抓大节，抓大局，不要去抓细节，细节挡你，仍往前走，就像走路有坑不要紧，可以绕过去。”（见文献 [5]，37 页）阅读钱先生的著述，我发现，他弄通的学问真不少，笔者经过思考他至少有三大“法宝”：张量分析、渐近分析（摄动法和奇异摄动法）、变分原理（当然还有其他许多“法宝”），经过几十年的磨练，这些法宝已被运用到炉火纯青的地步。举例来说，板壳内禀理论的主要工具的传统弹性理论加上张量分析和曲面坐标（微分几何）；薄板大挠度理论是非线性微分方程的新的摄动分析；而广义变分原理则在弹性力学的能量泛函变分中融合拉格朗日乘子法，加上一套新的演绎方法。令人感兴趣的是，当钱伟长先生论述电磁场理论时，也揉进了变分原理，而且收到了好效果（见文献 [19]，[45]）。值得一提的是钱先生与众不同的写书方式，一般人著书立说时，手头总是放着一大堆有关书籍，不时翻阅查看，以便“引经据典”。但是，据他当时的一位学生说。钱先生写专著^[19]时却另有一景：他的案头不放任何“典籍”，全书 1000 多个公式，都是信马由缰，随手写来，有时在草稿纸上作些推导，可见他对有关知识早已融会贯通、成竹在胸，而书上的不少结果是出于他本人的创造。

7 治学谋略：群策群力，集思广益

从 1946 年开始，钱伟长先生就在高校里从教，开始了他的传道授

业的生涯。据笔者估计，听过他上课的人数至少是几万名，他亲自传帮带的研究生大约为百名左右。他的教学方法是循循善诱的、启发式的，许多学生评论道：“听钱先生上课是一种艺术享受。他一直把扶持、提携后进作为他义不容辞的责任，也深知，完成任何科研任务，必须发扬团队精神，50多年来，他在实践中带出了一大批科技精英和有用人才。这里想简单评述他作为学术带头人所采取的谋略，着重探讨他的群策群力、集思广益的做法。

钱伟长先生从 Th. von Karman 教授处回来，带来了 Th. von Karman 教授的学术民主作风和举办 seminar 的做法^[46]。早在清华期间，他就主持了一系列研讨班，关于圆薄板大挠度问题研究的发展和完善工作，就是在那个由林鸿荪、胡海昌、叶开沅等研究生参加的研讨班上完成的。而真正将 seminar 制度化并使其大行其道的，是在他主持上海大学（及原上海工业大学）和上海市应用数学和力学研究所之后^[47]。在上海市应用数学和力学研究所，遵循他的“请进来，打出去，加强学术交流”的办所宗旨，每周四雷打不动地召开 seminar，规定所有研究人员和研究生必须参加，并给研究生记学分，十八年来，该所已经举办了 499 期 seminar，由于第一期 seminar 是钱先生亲自主讲的，第 500 期也准备让他主讲。主讲 seminar 的人员中，国外专家、国内专家和所内人员各约占三分之一。许多国内外知名学者登上过该所 seminar 的讲坛，半数以上的国内知名力学家在该所做过报告。这些报告大多是近期研究工作综述，使研究所人员足不出户就知道了国内外的应用数学和力学的发展趋势。钱先生还要求参加 seminar 的人员必须踊跃发问、积极参与讨论。在这种做法带动下，所内各分支学科的带头人也纷纷在晚上举办小 seminar，在更加无拘无束的氛围中细致地讨论问题，许多问题迎刃而解。这种做法使得大批年轻人得益非浅、迅速成长；一些送出去出国深造的人员，很快就能适应国外的新环境，感谢研究所对他们开放式的培养；很多从走出这个研究所的学生，迅速地独当一面，成了学术骨干。

钱先生很能带动青年人与他共同功课难关。一般他不是手把手地教，而经常在自由的讨论中发挥学生的能力，在所有学生开始做课题之前，他会安排一次恳谈，提出他的要求，有时指定一两篇文献，此后，

做得最多的是倾听学生的研究进展报告，一针见血地指出存在问题，让学生在实践中磨练自己。

在他的率领下，上海市应用数学和力学研究所不断地进步，完成了几百项重要课题，已发表学术论文 2000 多篇，人均论文数一直在校内首屈一指，目前在国内外已有一定的知名度，正如一位从事流体力学研究的院士所说：“这是国内从事力学研究的一块福地。现在 seminar 制度已在上海大学推广，学校正在向应用研究型大学的方向前进。”

8 学术思想溯源：先哲名师的影响和哥廷根学派的魅力

下面，笔者尝试着对钱伟长先生学术思想作一番溯本探源，侧重探索先哲名师对他的影响以及哥廷根学派对他的学术思想形成的潜移默化的作用。

8.1 先哲名师的影响

钱伟长先生出生在一个贫穷的农村知识分子家庭，祖父和父叔都是乡村教师。正如他在《八十自述》^[2]中所说：“幼时平时生活虽然清苦，但每逢寒暑假，父亲和叔父们相继回家，就在琴棋书画的文化环境中享受到华夏文化的陶冶。父亲和四叔陶醉于中国文化和历史，用薪资节省下来的钱购藏了四部备要和二十四史，以及欧美名著译本，每年夏天三天的晒书活动我是最积极的参与者，从这些活动中，增长了我对祖国浩瀚文化的崇拜……。”由于父亲英年早逝，钱伟长受四叔钱穆的影响最大，钱穆自学成材，后来成为蜚声中外的国学大师。四叔不仅资助钱伟长完成中等教育，而且经常让其陪读，少年钱伟长跟着博览群书，打下了深厚的国学根底，养成了良好的学习习惯和严谨的学风。投考高中时，由于数理基础差，钱伟长以末名进入四叔任教的苏州高中，得到了钱穆、吕叔湘、陆侃舆等的指点，尤其是数学老师严晓凡让他每晚去教师宿舍为他额外补课，两人一起开夜车，从此钱伟长养成了开夜车的习惯，而且是“六十年一贯制”。钱伟长先生说：在苏州高中老师们的引导下，使我走出了为解决个人生活而学习的小径，启迪了我追求真理、追求学术探索的无尽向往。”^[2]

由于钱伟长少年时代熟读古籍，尤其喜欢读司马迁的《史记》，对他后来的学术风格有很大影响。本来钱伟长的家长们就有游学的传统，

读了《史记》后，更觉得应该像太史公那样，读万卷书，行万里路。因此，只要环境和身体允许，他每年有很长时间在中外各地做学术旅行，至今，国内除西藏以外，他的足迹遍及大江南北、长城内外的所有省、自治区、直辖市；国外到过几十个国家；总行程数以千万公里计。最近他对笔者说：“是司马迁老先生告诉我这样做的。”与一般文人骚客不同的是：每到一地，他并不放眼于山光水色，总是行装甫卸，就到工厂农村考察，或与人作学术交流，或做学术报告。凭借着他的深厚的学术功底，他会经常给东道主出“金点子”。这里仅述一二。1983年钱伟长先生应福建省委书记项南同志的邀请访问福建，在参观闽江上的马尾港时发现，这个1975年耗资6亿元修建的军港，因港址选择不当，已经严重淤塞，弃用已达七年之久，有人提出迁建新港。先生下现场仔细勘察之后，马上想起读过的古书中提到的“束水攻沙”之策，提议用乱石从闽江对岸向江中抛投造乱石堤，堤长约200米，用急流冲去泊位区的淤沙，不必营造钢筋混凝土大坝，用土法即可收“束水攻沙”之效。项南同志当即批准此议，只动用了闽江木船搬运抛投乱石，历时一个月，大功告成，即将报废的港口复活了，迄今没有淤积问题。于是一时传为美谈，报刊上以“专家一席话，救活一军港”为题发表了专题报道。笔者写本文时，想探究这个“束水攻沙”的来历，在钱先生的早期文章《中国古代的科学创造》（原载《中国青年》57期，1951年1月7日，《人民日报》1951年2月1日转载，也可见文献[5]，59~65页）中找到了答案，文中写道：“黄河从上游带着大量的沙粒疾行而下，到了下游，人民都引河水灌田，使河流慢下来，以致入海的出口渐渐淤塞，于是一到水涨，就不时溢出，造成水患。这样的情形，一直到王莽时（公元9~22年）有位长安人张戎科学地提出了水流流速与沙淤的关系。这个科学的结论，为以后有名的水利工程师王景（汉明帝，公元69年）、贾鲁（元至正，公元1351年）、潘季驯（明嘉靖，公元1565年）、靳辅（清康熙，公元1677年）等治河的基本原则。他们根据这个原则，创造了‘束堤束水，藉水攻沙’的治水方法。这些工程师们在坚决地执行这个原则时，克服了不少工程上的困难，发动千百万的人民群众，完成了不少伟大的修渠筑堤工程。”原来先生早就有这样的知识积累！我从中懂得了什么是“厚积薄发”。我进一步查了《辞海》，找到了“束水攻

沙”词条，其中解释道：“束水攻沙，我国自西汉以来治沙的一种主张。其方法是在宽浅河段筑堤束狭河槽，增加流速，利用水流本身力量以冲刷泥沙，防止淤积。西汉张戎指出：‘水长则疾，河疾则通’……。潘季驯则加以运用发展，他在《河议辩惑》里说：‘水合则势猛，势猛则沙刷，沙刷则河深。’又说：‘筑堤束水，以水攻沙’。……”原来先生的话都是有根有据的，没有深厚的国学根底，就不可能如此。顺便提一下，上述文章及其姐妹篇《中国古代的三大发明》（见文献 [5]，68~74 页）写成于钱先生参加赴朝鲜慰问团时，在火车上写成的，由于发表后反应热烈，先生在此两文的基础上，写了《中国历史上的科学发明》^[9]，从中可以看到先生在国学与科技方面的深厚的知识积淀。

8.2 哥廷根学派的魅力

钱伟长先生曾师从于哥廷根学派的传人 J. L. Synge 和 Th. von Karman 教授，哥廷根学派对他的学术思想和治学风格有着根深蒂固的影响。他在《八十自述》中写道：“在加拿大多伦多和美国加州理工大学时，和 Synge, Infeld 教授交往很多，在加州理工学院也多次和 von Karman 教授接触，他们都是欧洲哥廷根学派的传人。哥廷根学派是应用数学的倡导者，他们都有很深的数学根底，有更好的对物理过程的理解，都强调对物理过程的本质的认识是主要的，但在数学方法上从不吝惜使用，力求其用在刀口上，要用得漂亮，用得朴素简洁。为了解决一个实际问题不惜跳进数学这个海洋来寻找最合适的工具，甚至于创造新工具。他们都警告我们，数学在应用数学者说来，只是求解实际问题的工具。Synge 教授甚至说：你们应该有捏着鼻子跳进海洋的勇气，但应该懂得避免淹入海底，懂得在完成任务后爬上来，寻找新的物质运动的主题。数学本身很美，不要被它迷了路，应用数学的任务是解决实际问题，……。”（见文献 [2]，28~29 页）他还说：“Synge 教授的第一课就是阐明哥廷根是主张用数学来解决实际问题的，这和一般数学家的‘应用数学’不一样。数学家是在研究数学问题，从数学中找问题的，哥廷根学派是从物理、化学和一般技术找问题，而要用高明的数学办法去说明物理或技术问题。首先要弄清物理或具体技术问题的本质。其次是要用数学上现已通用的表达方式去表达它，然后按实际问题的需要来求得实际的定量或定性的答案。……Synge 教授说，数学是汪洋大海，

为了解决实际问题，我们应该以不怕淹死的精神，跳进这个汪洋大海，去寻找那最好的数学工具，用来解决实际问题。他力主不要怕数学，但也不能迷在数学中，……一定要在找到宝后，极早爬上岸来，用这个宝去解决实际问题。我们深受教育。我一生中解决过很多问题，也用很多宝，但从来没有迷恋过某一个数学问题。”（见文献 [47]，7~8 页）我国另一位力学大师钱学森院士更是非常重视传承哥廷根学派的学术传统。最近，谈庆明教授写道：“我们应当学习和发扬他（指钱学森院士）所继承和发扬的力学大师普朗特-冯·卡门的应用力学的优良传统。概括地说，应用力学家必须着眼于工程技术中带有普遍性的理论研究对象，通过艰苦细致的研究工作，提出新的科学创见，从而改进工程技术，形成新技术，产生新产业。”^[49]再来看看郑哲敏院士、李家春教授对郭永怀院士的评介，在介绍了哥廷根学派的风格和特点后，他们说：“在美国加州理工学院冯·卡门领导的研究集体使这种风格得到了充分的发展。由于郭永怀的良好数学物理基础和渊博的工程技术知识，他使这种结合达到了十分完美的程度，并带到了中国，影响了我国力学学科和两弹一星事业的发展。”^[50]我国力学事业的三位奠基人不约而同地继承了哥廷根学派的传统，那么这个学派的精髓与魅力何在？

这里我们对哥廷根学派作一简单介绍。先来看看 20 世纪的航空航天大师 Th. von Karman 是怎样评价哥廷根学派的，他在 1967 年出版的自传中写道：“只要一提起哥廷根，我至今仍然感到激动不已。英王乔治二世于 1734 年创办的这所古老的普鲁士大学，有时候人们管它叫乔治亚·奥古斯都大教堂。后来哥廷根大学成了欧洲大陆的哲学、语言学和法学的发源地。我进哥廷根大学时，它又是全世界的一个主要的数学中心。高斯、韦伯、黎曼、普朗克、希尔伯特以及基础科学方面的众英才都是哥廷根大学出身。在学术研究和教学方面，素有“德国大学王子”称号的哥廷根大学，以倡导自由、独创的学风闻名于世。这种治学精神终于使它成为培育 20 世纪科学巨匠的摇篮。正是哥廷根的一批学生，为原子弹和空间时代奠定了基础。”（见文献 [46]，中译本，40 页）他还说：“（哥廷根学派创始人）克莱因认为，工科大学不仅要有坚实的理论基础，还应该真正懂得科学研究的方法。另一方面，数学家也需要具备一些工程技术基础知识。实际上，他就是推动哥廷根大学沿着

这个方向前进的。克莱因的指导思想成了我在亚琛工学院和加州理工学院继续搞科学与技术相结合的动力源泉。……科学与技术密切结合是哥廷根大学的一大改革。此后几十年，它对全世界大学产生了极大的影响。”（见文献 [46]，中译本，63 页）

哥廷根大学有悠久的数学传统，由高斯、狄里克莱、黎曼先后担任学科带头人，但直到 1886 年克莱因（Felix Klein, 1849 ~ 1925）和 1888 年希尔伯特（D. Hilbert, 1862 ~ 1943）的到来，才出现了辉煌的克莱因-希尔伯特时代。克莱因以他的非凡的创造天才和组织才能进行了一系列科学组织活动：大力罗致和提拔人才，引进了当时 26 岁的希尔伯特以及相对论天才闵可夫斯基（H. Minkowsky），首次在德国大学设置应用数学教授席位，任用应用数学家龙格（C. Runge）；创立数学研究所；1898 年创立哥廷根应用数学和技术促进协会，由科学家和经济界领导人（如奥托等）联合组成，这是科学史上第一个把科学界与经济界联系起来的组织，协会成立了一系列科学技术研究所，例如航空和流体力学研究所 [流体力学大师普朗特（L. Prandtl）为领导人]、应用电学研究所、地球物理研究所等等，在哥廷根大学设置应用力学系、应用物理系和应用数学系，这一切为科学与技术的密切结合创造了条件；组织科学教育改革和科学普及活动，seminar 和闻名于世的“数学散步”就此经常化。后来，经过希尔伯特的努力和众多物理学家的参加，哥廷根大学成了当时欧洲的学术中心（见文献 [51] ~ [54]）。在克莱因的领导下，出色的学术成果不断涌现，如普朗特的边界层理论、海森堡的量子论和矩阵力学、卡门涡街等等。

正如文献 [50] 所指出的，哥廷根学派的主要特征是理论与实际、科学与技术、数学科学与应用科学的密切结合。钱伟长先生身体力行，在他的科研工作和科研教学领导工作中，充分实现了这种结合。通读他现存的 168 篇学术论文，都有明显而重要的实际应用背景，大多为了解决当时实践需要的重大问题（详见前文）；笔者在与他讨论科研选题问题时，他说：“目光要远大一些，不要去搞那些没有应用背景的雕虫小技。”试看他为他的博士研究生所作的一些选题：板壳大变形；波纹管计算；穿甲力学计算；河口冲淤；河口风暴潮；冷却的塔流场计算及强度问题等等，这些问题都是实践中急需解决的又有一定理论难度的问

题。2001年，他召集应用数学和力学研究所的业务骨干会议，就谈一件事情：如何把握学科发展新动向，他拿出一堆《应用力学评论》杂志，让大家进行阅读、调研，并考虑如何开展实际需要的重大课题研究。

9 结束语

经过以上的分析，我们可以得到如下结论：

(1) 钱伟长先生的学术思想的精华在于：立足于社会实践，以高瞻远瞩、勇于探索的思路，根据经济、科技发展的需要来发现、提炼问题，经过充分调研，以广泛扎实的知识基础和独辟蹊径的创造性劳动，建立实际问题的数学模型，用独创的或先进的方法加以巧妙处理，将所得的成果经过实践的严格检验，并上升到新的理论高度加以认识或系统地发展成新的理论，事实证明，这种思想指导下的科研实践是卓有成效的；

(2) 钱伟长先生的治学风格的精髓在于：爱国敬业、自强不息、锐意创新、求真务实、广闻博览、群策群力。我们应该努力学习他的热爱祖国、热爱科学的高尚品格；脚踏实地、终生向学的治学态度；勇于创新、刻意求新的无畏气概；藐视困难、百折不回的奋斗精神；提携后进、传道授业的献身理念；发动群众、协力攻关的组织才干。

(3) 钱伟长先生的学术思想的渊源在于：努力吸收古今中外先贤先哲的治学理念，继承发扬哥廷根学派的优良传统，用辩证唯物主义理论武装自己，将理论与实际、科学与技术、数学科学与应用科学的密切地结合起来，科学地调动一切积极性，为祖国的四化事业贡献自己的全部力量。

在本文结束之际，谨向钱伟长先生表示我们共同的祝愿，愿先生继续书写人生的华丽篇章，带领我们为建设强大的中华的漫漫长途上激流勇进！

(本文的写作过程中，曾得到钱伟长院士的具体指导，并经他仔细审阅原稿；还受到李佩教授、谈庆明研究员、李家春研究员的启发；笔者的助手和学生董力耘、卢东强、雷丽、安淑萍等曾帮助查找资料，谨此一并致谢。)

参考文献

1. 钱伟长. 钱伟长科学论文选集. 福州: 福建教育出版社, 1989
2. 钱伟长. 八十自述. 深圳: 海天出版社, 1998
3. 钱伟长. 钱伟长文选. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1992
4. 钱伟长. 钱伟长学术论著自选集. 北京: 首都师范大学出版社, 1994
5. 钱伟长. 教育和教学问题的思考. 上海: 上海大学出版社, 2000
6. 周文斌, 孔祥瑛. 钱伟长传略. 见文献 [3], 杭州: 浙江科学技术出版社, 1992, 1~31
7. 黄黔. 钱伟长. 中国科学技术专家传略: 工程技术篇, 力学卷 1 (中国科学技术协会编). 北京: 中国科学技术出版社, 1993, 166~195
8. 钱伟长. 有代表性的科学论文简介. 见文献 [3], 杭州: 浙江科学技术出版社, 1992, 43~58
9. 钱伟长. 中国历史上的科学发明. 北京: 中国青年出版社, 1953; 修订版, 重庆: 重庆出版社, 1989; 繁体字版, 香港: 南粤出版社, 1991
10. 钱伟长, 林鸿荪, 胡海昌, 叶开沅. 弹性圆薄板大挠度问题. 北京: 科学出版社, 1954
11. 钱伟长, 林鸿荪, 胡海昌, 叶开沅. 弹性柱体的扭转理论. 北京: 科学出版社, 1955
12. 钱伟长, 叶开沅. 弹性力学. 北京: 科学出版社, 1956
13. 钱伟长 (以清华大学锌空气电池研究组名义出版). 锌空气 (氧) 电池进展. 北京: 科学出版社, 1975
14. 钱伟长. 应用数学和力学论文集. 南京: 江苏科学技术出版社, 1980
15. 钱伟长. 变分法和有限元 (上册). 北京: 科学出版社, 1980
16. 钱伟长 (主编). 奇异摄动理论及其在力学中的应用. 北京: 科学出版社, 1981
17. 钱伟长 (编著). 穿甲力学. 北京: 国防工业出版社, 1984
18. 钱伟长. 广义变分原理. 上海: 知识出版社 (多学科讲座丛书), 1985
19. 钱伟长. 格林函数和变分法在电磁场和电磁波计算中的应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1989; 修订版, 上海: 上海大学出版社, 2000
20. 钱伟长. 电机强度设计计算的理论基础. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992
21. 钱伟长. 应用数学. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1992
22. 钱伟长. 微分方程的理论及其解法. 北京: 国防工业出版社, 1992
23. Synge J L, Chien W Z. The intrinsic theory of elastic shells and plates. in Applied

- Mechanics—Theodore von Karman Anniversary Volume, 1941: 103~120 (see also Ref. [1], 59~69)
24. Chien W Z. The intrinsic theory of elastic shells and plates. Part 1, 2, 3. *Quart Appl Math*, 1944, 1 (4): 297~327; 2 (1): 43~59; 2 (2): 120~135 (see also Ref. [1], 79~138)
25. Rutten H S. The Theory and Design of Shells on the Basis of Asymptotic Analysis. 1973, pp.2-3, 23.
26. Chien W Z. Derivation of the equations of equilibrium of an elastic shell from the general theory of elasticity. The Science Report of National Tsing Hua University, Ser. A, 1948, 5: 71~86 (see also Ref. [1], 209~216)
27. Chien W Z. Large deflection of a circular clamped plate under uniform pressure. *Chinese J Phys*, 1947, 7 (2): 102~113 (see also Ref. [1], 169~177)
28. Chien W Z. Asymptotic behavior of a thin clamped circular plate under uniform normal pressure at very large deflection, *The Science Reports of National Tsing Hua University*, 1948, 5 (1): 71~94 (see also Ref. [1], 193~208)
29. Chien Weizang, Chen Shanglin. The solution of large deflection problem of thin circular plate by the method of composite expansion. *Appl Math & Mech*, 1985, 6 (2): 103~120 (see also Ref. [1], 1283~1200)
30. Vol'mir A S. Bending of plates and shells. Moscow: Mir, 1956.
31. 戴世强. 关于圆薄板大挠度问题的正交条件解法. *应用数学和力学*, 1991, 12 (7): 579~586
32. 戴世强. PLK方法. 见文献 [15], 1981: 33~86
33. 周焕文. 奇异摄动法在圆薄板大挠度问题中的应用. 见文献 [15], 1981, 310~339
34. Bromberg E. Non-Linear bending of a circular plate under normal pressure. *Commun Pure & Appl Math*, 1956, 9: 633~659
35. 钱伟长, 郑思梁. 轴对称圆环壳的复变量方程和轴对称细环壳的一般解. *清华大学学报*, 1979, 19 (1): 27~47
36. 钱伟长, 郑思梁. 轴对称圆环壳的一般解. *应用数学和力学*, 1980, 1 (3): 287~299
37. 钱伟长. 细环壳极限方程的非齐次解及其在仪器仪表上的应用. *仪器仪表学报*, 1980, 1 (1): 89~112
38. 钱伟长. 半圆弧波纹管计算——细环壳理论的应用. *清华大学学报*, 1979, 19 (1): 84~99

39. 钱伟长. 关于弹性力学的广义变分原理及其在有限元计算中的应用. 机械工程学报, 1979, 12 (2): 1~12
40. 钱伟长. 高阶拉氏乘子法和弹性理论中更一般的广义变分原理. 应用数学和力学, 1983, 4 (2): 137~149
41. 钱伟长. 大位移非线性弹性理论的变分原理和广义变分原理. 应用数学和力学, 1988, 9 (1): 1~10
42. Chien W Z. Incompatible elements and generalized variational principles. Advan. In Appl Mech, 1984, 24: 93~153
43. 钱学森. 写在《郭永怀文集》的后面. 中国力学学会、中国科学院力学研究所编. 郭永怀文集. 北京: 科学出版社, 1982
44. Chien W Z. Foreword. *J. Shanghai University*, 1997, 1 (1): 1
45. 戴世强. 一本不可多得的应用数学专著—评介钱伟长院士的专著《格林函数和变分法在电磁场和电磁波计算中的应用》. 应用数学和力学, 2001, 22 (7): 771~772
46. von Karman Th, Edson L. *The Wind and Beyond*, Th. von Karman, Pioneer in Aviation and Pathfinder in Space. Boston: Little, Brown and Company, 1967
47. 钱伟长. 怀念同窗益友郭永怀教授. 郑哲敏主编. 郭永怀先生诞辰九十周年纪念文集. 北京: 气象出版社, 1999, 7~9
48. 徐梅英. 积极开展学术活动, 促进科学研究与人才培养. 高教研究, 1989 (2): 41~42
49. 谈庆明. 钱学森对近代力学的发展所做的贡献. 力学进展, 2001, 31 (4): 500~508
50. 郑哲敏, 李家春. 科学和技术结合的典范—纪念郭永怀先生诞辰九十周年. 郑哲敏主编. 郭永怀先生诞辰九十周年纪念文集. 北京: 气象出版社, 1999, 23~26
51. 袁向东, 李文林. 哥廷根的数学传统. 自然科学史研究, 1982, 1 (4): 339~348
52. 高嵘, 李文林. 历史上的数学学派—理论初探. 自然科学史研究, 1998, 17 (3): 218
53. 王自华, 桂起权. 海森伯与慕尼黑-哥廷根-哥本哈根三个科学共同体. 华南师范大学学报, 2000, (3): 3~21
54. 叶政. 从哥廷根学派的兴衰看近代中国数学发展缓慢的原因. 宁波师范学院学报, 1991, (6) 7~11

一代宗师 风范长存

——记我国第一代工程力学教授罗忠忱

郭日修

(海军工程大学船舶与海洋工程系, 430033)

【摘要】 罗忠忱, 1912年到唐山交大任教, 讲授应用力学和材料力学40年, 1952年离开讲台, 是我国第一代工程力学教授。罗教授致力于引进西方先进的工程教育思想, 按照美国工科大学的模式进行工程力学的教学。他讲课精湛, 理论和应用密切结合。他重视培养学生的分析能力和计算能力。他对学生要求严格, 通过每周一次测验和严格评分, 促使学生持续地、勤奋地学习。他对学生的严格要求是建立在对自己严格要求的基础上。罗教授热爱祖国、热爱唐山交大, 把毕生精力奉献给力学教育, 培养了几代高水平的工程师, 其中有许多后来成为誉满海内外的学者、专家。一代宗师, 风范长存。他受到学生们的无限景仰和怀念!

【关键词】 力学史, 工程力学, 力学教育, 罗忠忱

1 引言

罗忠忱, 1880年11月生, 福建闽侯人。早年在北洋大学读书, 后赴美国 Cornell 大学土木工程系继续学习, 1910年毕业, 继入该校研究生院攻读, 获土木工程师学位。1912年回国, 是年8月到唐山交大任教授。他学识渊博, 到校后曾讲授应用力学(现在称为理论力学)、材料力学、水力学、天文学、河海工程等多门课程。由于他对工程力学有很深的造诣, 1917年以后, 专职教授应用力学和材料力学, 直到1952年离开讲台改任研究教授, 他在唐山交大讲授应用力学和材料力学40年。我国按西方模式建立大学, 始于1895年的北洋大学(当时名北洋

西学堂), 继于 1896 年建立上海交通大学 (当时名南洋公学) 和唐山交通大学 (当时名山海关铁路学堂, 1905 年迁唐山)。这些工科大学当时都是聘请外国人任理、工科课程的教授。罗忠忱是唐山交大讲授理工科课程的第一位中国教授^[1], 是我国第一代工程力学教授, 也是我国老一代著名的工程教育家。

罗教授致力于引进西方先进的工程教育思想, 对应用力学和材料力学课程, 他按照美国工科大学, 主要是 Cornell 大学的模式进行教学, 选用美国工科大学相应课程的教材, 采用美国工科大学的教学方法和教学制度, 用英语讲课。40 年代前期, 他采用 Seely and Ensign, Analytic Mechanics for Engineers 和 Seely, Resistance of Materials 作为应用力学和材料力学教材。在罗教授执教下, 唐山交大应用力学和材料力学课程的教学与国际水平是相当的。唐山交大以培养高素质的工程师闻名国内外, 这与罗教授给该校学生打下坚实的工程力学基础是分不开的。罗教授以其深厚的力学造诣、精湛的讲课艺术, 对教学工作极端负责和对學生严格要求而形成了自己的教学风格, 受到学生们普遍赞扬和崇敬。

2 精湛的讲课艺术, 把理论和应用密切结合

罗教授讲课极重视理论分析, 对每个课题, 总是先给学生建立正确的基本概念, 讲清基本原理, 推导基本方程, 说明基本方法。为了阐释基本原理, 他常广征博引, 不受教科书局限, 以引导学生正确地、深入地理解所讲的内容。如在应用力学中讲相对运动, 他建立定坐标系和动坐标系, 用解析方法推导运动方程; 在材料力学中讲授一点的应力状态, 他讲授 Mohr 应力圆; 这些都是当时唐山交大采用的教材中所没有的。

罗教授在讲课中注意启发学生思考, 他讲到问题的关键或难点时, 总要问一个“Why?”, 然后, 他停下来, 目光注视学生, 学生受到启发自然会积极思考, 在教授诱导、学生思考、师生交流的氛围下, 他才开始解释“Because……”。这时, 学生自然会把自己的思考与教授的解释加以比较, 从而提高学生思考问题的能力。

罗教授强调工程力学的应用性, 他认为工科学生学习应用力学和材料力学的目的, 在于应用它们解决工程问题。因此他讲课时, 在进行了

理论分析后，便列举大量典型例题来说明基本原理和基本方法的应用。他在举例得出结果后，还要在理论指导下对结果进行分析讨论。这样，不仅使学生领会了基本原理和方法的应用，而且通过理论—应用—理论这样一个过程，使学生加深了对理论的理解。罗教授常对同一个课题列举多个例题，进行演算，使理论—应用—理论这一过程多次反复，使得学生对该理论及其应用的理解不断深化。尤其是课程中的一些难点，经过罗教授这样列举例题反复讲解，学生往往豁然开朗。他常对同一个例题采用不同的方法求解，并加以分析、比较，使学生融会贯通。因此，他在课堂上列举例题并进行分析、讨论，占他讲课时间很大的份量。

3 重视培养学生的能力

罗教授重视培养学生分析问题的能力，他在课堂上列举例题，总是先画出计算简图，然后分析已知条件和要求的未知量，讨论采用的原理和方法，分析可用的方程，然后列出方程，代入数据，求解。得出结果后，还要在理论指导下讨论、分析结果的意义。

罗教授非常重视培养学生的计算能力，他认为计算能力是工程师的基本功之一，而给学生打下计算能力的基础是理论力学和材料力学课程的重要任务之一。为了培养学生的计算能力，他给学生示范，在课堂上讲解例题时，他都是当堂进行数值计算，得出准确的结果。那时的计算工具是对数表和计算尺，他运用一张4位对数表，灵活地、快捷地对例题进行计算，得出结果后，还要采取措施检查计算的正确性，然后，满意地说：“So, check!”在罗教授言传身教下，学生们在理论力学和材料力学学习过程中，为自己的工程计算能力打下了坚实的基础。

4 严格要求学生

罗教授对学生严格要求。应用力学和材料力学课都是周一到周五每天一节课，每周六还有一节测验课。每次测验课，罗教授都是亲自命题，题目分A、B两组，使相邻座位学生的试题不同。他亲自掌握测验课，亲自评卷，给分极严。他要求学生不仅解题方法正确，而且要求计算正确，稍有差错，扣分很多；他认为工程师计算出差错，会造成严重的工程事故，后果不堪设想，因此，教师必须在学校就严格要求学生计

算正确，使之成为工程师的素养。罗教授把每周的测验成绩计入学期总成绩中。罗教授通过每周测验，促使学生持续地、勤奋地学习。罗教授对期末考试要求更严，试题的份量和难度都比每周的测验更重、更高。尽管唐山交大二年级学生对应用力学和材料力学都非常重视，非常努力，但学期结束时，总有不少学生不及格。罗教授还执行严格的“Double fail”（“两次不及格淘汰”）制度：学生应用力学或材料力学不及格可以补考，补考如不及格必须“重读”，“重读”时期终考试如还是不及格，还可以补考，如补考仍不及格，便是“Double fail”，这名学生便被淘汰、退学。在罗教授的严格要求下，唐山交大确有极少数学生因应用力学或材料力学“Double fail”而被淘汰。

5 严以律己，严肃对待工作

罗教授严以律己，他对学生的严格要求是建立在对自己严格要求的基础上。罗教授备课极其认真，尽管他力学造诣很深，教学经验丰富，但他每次讲课前，都认真准备，写出讲稿。1947年他在和作者的一次谈话中说：“我讲完了课，讲稿就不要了，下次讲课，我再备课，重新写讲稿，我从来不用过去的讲稿讲课。”^[2]由于他的学术造诣和对教学工作严肃认真，他讲课内容充实，条理清晰，分析严密，深入浅出；加之他英语极其流利，讲课时抑扬顿挫，如行云流水；所以他讲课非常吸引人，使学生如坐春风。罗教授作风严谨，讲课时，写黑板非常工整，他一边讲一边在黑板上画图、推导方程、计算例题，一步一步，黑板上井然有序，使学生一目了然。他在黑板上画圆，几乎可与用圆规画的圆比美；这不是画图技巧，而是他对教学工作严肃认真的表现。罗教授上课准时，总是稍提前到教室，上课钟声敲响，他便开讲。他从不说与讲课无关的话，从不迟到早退，不浪费一点时间。他对教学工作极其负责，他曾几度担任唐山交大的领导职务，工作的繁重是可以想像的，但不管行政工作多忙，他从未耽误上课，也从未影响他对教学工作的投入或影响他的讲课质量。

6 爱国情操、无私奉献

1937年7月，芦沟桥事变，日寇发动全面侵华战争，河北唐山随

即陷入敌手，时值暑假，唐山交大未及采取应变措施，罗教授被困在唐山。1937年11月，他获悉唐山交大筹备在湖南复课，为了不受日寇奴役，并为了唐山交大在内地能顺利复课，罗教授于1937年冬毅然辞别病危的八十多岁的老母（次年老母去世），离别妻子儿女，只身去内地，经过长途跋涉，沿途历尽艰辛，于1938年5月到达湖南湘乡唐山交大临时校址，随即投入工程力学教学。随着日寇侵华战争范围的扩大，唐山交大于1939年由湖南经广西迁到贵州平越（今福泉），1944年再迁到四川璧山。这期间，罗教授已是60岁前后的老入了，他以校为家，随学校颠沛流离。抗战期间，内地生活艰苦，罗教授又是单身在校，身边无家人照顾；1943~1945年，他还担任唐山交大校长，工作担子更重。尽管如此，八年抗战期间，唐山交大每学年的应用力学课和材料力学课未曾间断，每周一到周五第一、二节讲课（土木系一节，矿冶系一节）和周六的测验课，罗教授始终面对学生站在讲台上，表现了一个老教授的爱国情操和对力学教育的无私奉献。

1950年11月罗教授70周岁，仍站在讲台上讲课。1951年临近暑假，罗教授向唐山交大领导提出：由于年老、体力不济，暑假后不再任教，请求退休。这件事被当时在校的一年级学生知道了，他们派出代表来见罗教授，说：“下学年我们班将学习应用力学和材料力学，我们请求你推迟退休，再讲一年课，我们作为你最后一班学生，听你最后一次讲应用力学和材料力学。”面对青年学子的殷切期盼，年过七旬的老教授继续站在讲台上，精神矍铄地、精辟地最后讲授了一学年应用力学和材料力学。到1952年暑假后，他改任研究教授，才离开自己在唐山交大付出了40年心血的工程力学讲台。

7 “高山仰止，长怀遗范悼思深”

罗教授严谨治学，严以律己，严肃对待工作，严格要求学生，一生淡泊利名，以教书育人为己任，倾毕生年华、才智，以其学识、师德、人品哺育学生，为祖国培养了几代高水平的工程师，其中有许多后来成为誉满海内外的学者、专家。如著名桥梁专家茅以升，港工专家谭真，铁路桥梁专家汪菊潜，被誉为“预应力先生”的预应力混凝土结构专家林同炎，著名力学家林同骅、张维、刘恢先，著名水利工程专家严恺、

谭清夷，两弹一星功勋科学家陈能宽、姚桐斌，等等，均曾受教于罗教授，真可谓桃李盈门。他们身受罗教授的教诲，都有极深的感受。两院院士张维（唐山交大1933届）说：“唐山交大之所以出了那么多的人才，关键是有一批像茅以升、罗忠忱、朱物华这样的一流教授”^[3]。美国国家工程院院士林同骅（唐山交大1933届）说：“罗师对基本力学的深刻了解为全世界所少有，故在讲授力学问题时，能从多方面解析，使学生易于了解，大有力学大师 Timoshenko 之风”^[4]。清华大学教授黄万里（唐山交大1932届）说：“曾在学十九年，承恩中外师长不啻百人，然于教诲恳切，授法精湛，任职认真，……盖未有出吾师之右者”^[4]。1980年西南（唐山）交通大学为罗教授举行追悼会，著名桥梁专家茅以升（唐山交大1916届）送了挽联，上联表达他们师生之间的深厚感情，下联是：“无意求闻达，有功在树人，此日高山仰止，长怀遗范悼思深。”^[5]这些话，表达了广大学子的心声，是对罗教授一生十分中肯的评价，和对罗教授的无限景仰与缅怀！

罗忠忱教授献身力学教育，功在树人。一代宗师，风范长存！

参考文献

1. 西南交通大学. 罗忠忱教授悼词. 西南交大, 1980年5月20日, 第53期, 西南交通大学校刊编辑室
2. 郭日修. 乐育英才、桃李盈门——回忆罗忠忱教授. 西南交大, 1985年4月30日, 第134期, 西南交通大学校刊编辑室
3. 罗允秀. 怀念张, 维院士. 见西南(唐山)交通大学105周年校庆专刊, 成都, 西南交通大学, 2001, 88
4. 黄安基, 黄棠. 罗忠忱(1880~1972). 见: 中国科学技术协会编. 中国科学技术专家传略. 工程技术篇. 交通卷. 北京: 中国铁道出版社, 1995, 23~31
5. 茅以升. 挽罗忠忱教授联. 西南交大, 1980年5月20日, 第53期, 西南交通大学校刊编辑室

牛顿《原理》三百年祭^①

朱照宣

(北京大学, 100871)

【摘要】回顾了牛顿《自然哲学的数学原理》(简称《原理》)的重大的历史作用和中国从1859年以来翻译和传播的过程。剖析了中国传统科学思维方法不可能得出经典力学的内在原因。从另外的角度揭示了若干问题,其一是“决定论”和“随机论”的困扰;其二是经典力学偏重于连续型数学,对于离散型的数学理论注意的不够;其三是科学界对于引入综合方法的急切心情。本文对于牛顿本人的弱点、缺点也进行了评说。《原理》其书、牛顿其人对我们的启迪是:世界是可认识的,但是这一认识是没有穷尽的过程。

【关键词】牛顿,《自然哲学的数学原理》

牛顿(I. Newton, 1642~1727)在1686年5月8日为他的《自然哲学的数学原理》(Philosophia Naturalis Principia Mathematica)写了序言,在哈雷(E. Halley, 1656~1742)的推动下,1687年《原理》正式发表。三百年来,人们对《原理》见仁见智,无可争辩的是,它对自然科学的发展,乃至整个人类文明,起着重大的历史作用。正是:

Nature and Nature's laws lay hid in night;

God said, "Let Newton be", and all was light.

——波普(A. Pope, 1688~1744)

意思是说:道法自然,久藏玄冥;天降牛顿,万物生明。

中国的力学科学是从西方引进的。阮元(1764~1849)编的科学家传记《畴人传》中列进了奈端(即牛顿)的名字,但只字未提其贡献。

^① 原文刊于《力学与实践》1987年第5期。

1859年，李善兰（1811~1882）翻译了《原理》的一部分，未能出版（现在《原理》的中译本是郑太朴译，1931年出版），而《原理》中的基本结果，则在李善兰所译《重学》（力学）和《谈天》（天文学）中有所阐明，逐渐在中国得到传播。

《原理》给出的运动定律和万有引力定律，不可能在中国固有的科学技术传统中得出。中国的历史文献中，始终没有加速度这种概念。中国的传统数学，也还没有为产生加速度和万有引力定律概念提供必要的工具——圆锥曲线理论。伽利略（Galileo Galilei 1564~1642）从自由落体运动规律中归纳出加速度概念时，用到了抛物线的性质。牛顿从行星运动规律导出万有引力定律，需要用椭圆的性质。在欧洲，圆锥曲线理论这一工具是现成的，早在古希腊，阿波罗尼（Apollonius，约公元前260~前190）在他的《圆锥曲线》专著中列出了400个命题。在中国，椭圆的“椭”字（古文是提手旁）只是“拉长”的意思（如见《史记·平准书》）。“椭圆”一词最早可能见于《测量全义》（1631年）和爱新觉罗·玄烨（康熙，1662~1722）主编《数理精蕴》中《几何原本》的节译本，而“抛物线”一词则在李善兰时期才有。以《原理》为代表的西方科学，促进了中国科学的发展，也冲击着中国的传统科学思维方法。

纪念伟大人物、伟大成就，通常以颂词为主，这里却想从另外的角度提出问题。

《原理》发表以来的三百年，牛顿力学经历了两个阶段：

前280年是一个阶段。那时认为由运动微分方程所确定的动态总是确定性的。发展的“顶峰”就是拉普拉斯（P.S. Laplace, 1749~1827）的决定论。从此“机械论”成为“力学观”的代名词。玻耳兹曼（L.E. Boltzmann, 1844~1906）看到了它的缺点，在大量粒子运动问题中提出统计力学的思想。但他得不到当时权威们的支持而感到压抑以至自杀。随机论打进了物理科学王国，这对传统思想是个巨大冲击。这个冲击连伟大的爱因斯坦（A. Einstein, 1879~1955）也受不住，他深信上帝（指自然规律）不是在掷骰子。以后，人们认为“决定论”和“随机论”非此即彼，牛顿力学和统计力学之间是界线分明的。

后 20 多年则是另一个阶段。以卡姆定理^① 为代表的混沌理论揭示了决定论和随机论之间、牛顿力学和统计力学之间没有不可逾越的界限。混沌理论宣告了玻耳兹曼在这方面比爱因斯坦高明些。它还对玻耳兹曼的论证作了补充。不仅大量粒子的系统要用统计力学，两个自由度的保守系统运动也得用统计力学，连掷骰子本身也既是决定论的又是概率论的。它从根本上为牛顿力学摘除了“机械论”的帽子。

牛顿和莱布尼兹 (G.W. Leibniz, 1646~1716) 发明了微积分。在前 280 年中，微积分和它的后继者 (微分方程、变分方法、泛函分析等等) 成为研究力学问题有力的、不可缺少的数学工具。然而，在最近的 20 多年来，由于电子计算机的发展，人们开始感到在离散型的数学方面，在有限数学方面，理论储备远远不够。也许这是 280 年太偏重于连续型的数学 (力学中以连续统假设为前提)，无限小的数学，而计算机所能认识的则是离散的、有限的数学，同时又具有统观全局，不限于局部的能力。这个问题，也只是在新型的动力学模型 (如映射、点格自动机等) 得到发展后才逐渐认识到的。

近年来，越来越多的人感到在物理科学中“还原论” (reductionism) 方法的缺陷，主张在用分析方法 (这从《原理》以来占统治地位) 的同时，要附加综合的方法。他们甚至想到了中国的传统。例如普利高津 (I. Prigogine, 1917~) 提出要把西方科学方法和中国科学传统结合起来。西方有些学者却“病急乱投医”，有的想从“本体论” (ontology) 中寻找出路；更有的认为即使在社会科学领域中，也要让热力学第二定律把牛顿力学排挤出去。

我们对待牛顿的《原理》，对待《原理》以来的牛顿力学，是和对待牛顿其人一样，既不肯定一切，也不否定一切。太阳也有黑点。牛顿曾设想，按平方反比引力规律物体接近地球时将以螺旋线方式趋近地心 (假设地球可以穿透)。1679 年，比他年长的胡克 (R. Hooke, 1635~1703) 向他提出，应是椭圆而不是螺旋线。牛顿接受了这个意见，并作出了数学证明。在《原理》发表时，胡克要求牛顿在序言中“提一下”此事，但牛顿断然拒绝，甚至给哈雷写信说不惜牺牲《原理》中的一

^① KAM 是 A.N. Kolmogorov, 1903~ ; V.I. Arnol'd 1937~ 和 J. Moser, 1928~ 三人姓氏的合称。

卷，以致后来胡克控告牛顿剽窃他的成果。在和莱布尼兹在争微积分发明权时，牛顿曾在背后做了些小动作，此事在他身后 200 多年才被发现。这些事，使爱因斯坦十分震惊，他批评牛顿“爱虚荣”（见《爱因斯坦文集》商务版第一卷 620 页）。一眚不能掩大德。牛顿晚年终于声称，他是站在巨人的肩上才看得远些，他只是海边拣石头的一个孩子。也许这是“人之将死，其言也善”，然而这终究是正确的认识论。我们正是以这样的认识论来看待牛顿力学、看待中国的科学方法传统。近 20 多年的科学揭露了牛顿力学中的一些新问题，我们不会因而抛弃《原理》以来的成果，正如相对论并非否定牛顿定律一样。我国科学传统方法中整体的观点、系统的观点远比西方多些，但我们也不会忽视固有传统中的弱点。不然的话，为什么连椭圆也得从西方引进呢？我们还是采取分析批判的态度，扬弃（Aufheben）的态度。

《原理》其书，牛顿其人，千秋功罪，可以评说。我们的信念是：世界是可认识的，没有不可认识的东西；认识世界的过程又是没有穷尽的，决不会有哪一天我们认识了宇宙的终极本体。真理总是以相对真理形式出现的，相对真理中又包含着绝对真理。无数相对真理的总和，就是绝对真理。

伟人的阴暗面

武际可

(北京大学力学与工程科学系, 100871)

【摘要】 本文通过大力学家牛顿与胡克、弗拉姆斯蒂德、莱布尼兹之间的关系, 揭示牛顿为人的阴暗面。

【关键词】 牛顿, 弗拉姆斯蒂德, 莱布尼兹, 优先权, 盗版

中国人说: “为尊者讳耻、为贤者讳过”, 外国人也说: “历史是隐恶扬善的”, 都是一个意思, 即介绍大人物时, 尽说好话, 甚或锦上添花地增光加彩, 而把他们见不得人的事情隐去。在一部力学史上最显赫的人物莫过于牛顿了, 后人赞扬他的丰功伟绩时, 总不免凭空添加了许多不符合事实的光彩, 而将他性格的阴暗面和做过的许多丑事隐去。本文就是要根据人们近来考证的一些事实, 来剥去罩在牛顿头顶上那些多余的光环, 让我们认识一下这位力学家的另一面。

牛顿在光学、天体力学、望远镜等方面都有重要贡献, 他不愧是一位科学上的巨人, 但是他在与人相处中, 特别集中反映在与胡克、弗拉姆斯蒂德、莱布尼兹三个人的交往中, 却表现得实在是一位小人。

1 苹果的神话

几乎所有的介绍牛顿的书上, 还有许多教科书上都介绍一个关于牛顿的传奇故事: 1665~1666年之间, 剑桥流行黑热病, 剑桥大学被迫停学, 刚从剑桥拿到学士学位的牛顿回到家乡。一天牛顿坐在苹果树下看书, 这时一只苹果落了下来, 这启发这位当时年仅23岁的学生想到苹果是被地球的引力拉下来的, 从而他就发现了万有引力定理。

尽管这个故事流传得非常广泛, 不过近来严肃的历史学者都不认为是事实。

这个故事最早公诸于众的是由法国作家伏尔泰 (Voltaire, 1694~

1778), 他是一位牛顿研究成果的热情鼓吹者。他 1726 年去英国, 当年写了 25 篇通讯, 其中第 15 篇通讯中有这个故事, 后来他说是听牛顿的侄女说的。其后在 1752 年一位比牛顿小 45 岁的朋友 (William Stukeley) 在回忆文章中说是牛顿去世前一年牛顿告诉他的, 而牛顿是 1727 年去世的, 他写文章时已经是牛顿去世后 25 年了。下面这张 1 英镑英国钞票的背面, 印有牛顿的像, 在牛顿头部的背后画着一株开花的苹果树, 就是为了渲染这个故事、扩大它的影响。



这个故事至少有两点与已经了解的历史事实不符。第一, 万有引力不是牛顿一个人的独立发现, 而是历史上若干人研究的积累的结果, 有的书上把万有引力以牛顿命名, 说成是牛顿万有引力就是这个故事的自然结果, 是对历史的严重歪曲。第二, 在 1665 年, 牛顿对天体的运动规律问题还是一个门外汉, 它把牛顿对万有引力的研究成果提前了至少 20 年。

万有引力发现的实际经过大致是:

开普勒 (J. Kepler, 1571~1630) 最早在探索行星运动规律时, 认为引力就是太阳发出的类似于磁力的流, 这些磁力流沿切线方向推动着行星公转, 其强度随离太阳的距离而减弱。开普勒还曾企图用磁作用机制解释椭圆轨道的产生。他还以月球与海水间的磁性吸引解释潮汐现象。

1645 年, 法国天文学家布里阿德 (I. Bulliadus) 提出一个假设: “开普勒力的减少, 和离太阳的距离的平方成反比。” 这是第一次提出平

方反比关系的思想。

1661年，英国皇家学会成立了一个专门委员会研究重力问题。罗伯特·胡克（Robert Hooke, 1635~1703）、克里斯托夫·雷恩（Christopher Wren, 1632~1723）、爱德蒙·哈雷（Edmund Halley, 1656~1742）在引力问题的研究上都做出了重要贡献。

早在1661年，罗伯特·胡克就已觉察到引力和地球上物体的重力有同样的本质。在1674年的一次演讲“证明地球周年运动的尝试”中，他提出要在一致的力学原则的基础上建立一个宇宙学说，为此提出了以下三个假设：“第一，据我们在地球上的观察可知，一切天体都具有倾向其中心的吸引力，它不仅吸引其本身各部分，并且还吸引其作用范围内的其他天体。因此，不仅太阳和月亮对地球的形状和运动发生影响，而且地球对太阳和月亮同样也有影响，连水星、金星、火星和木星对地球的运动都有影响。第二，凡是正在作简单直线运动的任何天体，在没有受到其他作用力使其沿着椭圆轨道、圆周或复杂的曲线运动之前，它将继续保持直线运动不变。第三，受到吸引力作用的物体，越靠近吸引中心，其吸引力也越大。至于此力在什么程度上依赖于距离的问题，在实验中我还未解决。一旦知道了这一关系，天文学家就很容易解决天体运动的规律了。”胡克首先使用了“万有引力”这个词。他在这里提出的这三条假设，实际上已包含了有关万有引力的一切问题，所缺乏的只是定量的表述和论证。

在1679年，胡克与牛顿之间进行了关于引力问题的交流，在1679年11月，牛顿致信胡克说：“自己关于发现周日运动的想像，即设想一个自由落体落到地球上，通过地面进入地球内部，而不受任何物质的阻碍，则该落体将沿着一条螺旋形轨道运行，在旋转数圈后，最终旋入（或十分接近）地心。”胡克回信说，物体不会按螺线运动，而是按“一种带椭圆状的曲线”运动，它的轨道将“像一椭圆”。1679年12月13日，牛顿写信给胡克说：“我同意你的意见，……如果假定它的重力是均匀的，〔物体将〕不按螺线下沉那个真正的中心，而是以交替升降的形式运行。”

我们从后人清理牛顿同胡克的这些通信中看出，直至1679年，牛顿在天体运动的问题上，还是不得要领的，而且在这以前，关于万有引

力问题已经有了许多重要结果。对于万有引力问题，剩下的惟一问题就是在与距离平方成反比的万有引力作用下天体按椭圆轨道运行的严格证明，胡克写信向牛顿提出了这个问题。后来人们弄清楚了，一直到1685年，牛顿还没有解决这个问题。1686年牛顿解决了它，并且在哈雷的催促下写出了《自然哲学的数学原理》一书。当胡克看到这本书稿后，向牛顿提出把自己在这一方面的研究成果提一下，这个本来是合理的要求却遭到了牛顿的断然拒绝。牛顿向负责出版这本书的哈雷写信说，他不想给胡克任何荣誉，而且称在许多年前他就已经揭示了平方反比定律，指的就是1665年开始的苹果树下的思索。

老年时的牛顿有一段回忆说：“同年（1666年）我开始把引力与月亮轨道联系起来，并找出了如何估计一个天体在球体内旋转时用来趋向球面的力的方法，……，最后在1676和1677年之间的冬天我发现了一个命题：利用与距离平方成反比的离心力，行星必然环绕力的中心沿椭圆旋转，……。”把牛顿的这段话与前面引的他与胡克的通信比较，可以看出在时间上是矛盾的。牛顿在这里把他发现万有引力的时间故意改写在1679年与胡克通信之前，而且造出苹果神话，其目的显然是为了要独吞万有引力这项成果。

牛顿和胡克之间的梁子，不仅表现在对万有引力发明权的争议上，最早表现在胡克对牛顿的光的微粒说有不同的看法，因为胡克对光的本质是站在波动说一边的。1675年，牛顿向皇家学会递交了他关于光的第二篇论文，这篇论文又受到胡克的批评，并且说论文的一些观点是抄袭他的。这使牛顿无比愤怒，虽经皇家学会调解，牛顿的怒气未消，于1675年2月向胡克写了一封回击的信。信中说了与苹果故事流传得同样广的一句话：“如果我比笛卡尔看得更远，那是因为我站在巨人们的肩膀上。”许多人把这句话理解为牛顿的谦虚精神，其实它是对胡克的一种讽刺和蔑视，完全不是人们望文生义的那回事。牛顿的原话是：“笛卡尔所做的是搭了一架好梯子，你在很多方面都把梯子升高了许多，特别是把薄膜的颜色引人哲学思考。如果我看得更远些，那是因为我站在巨人的肩膀上。”牛顿不把胡克和笛卡尔看作巨人，牛顿也没有攀登他们所搭的梯子，他是站在比梯子更高的巨人肩膀上。由于牛顿与胡克的这种过节，所以牛顿的《光学》著作要等到1703年胡克去世以后才

于 1704 年出版。

牛顿独占了万有引力的成果，还不足以解除对胡克的恨，当他于 1703 年被选为英国皇家学会的主席，就下令在皇家学会除去所有的胡克的肖像。所以当时英国许多著名的科学家中就是胡克的肖像没有留传下来。

2 对弗拉姆斯蒂德观测数据的剽窃和盗版

最近英国人大维·克拉克等写了一本书，通过一系列的来往书信和翔实的资料，专门揭露牛顿压制、阻挠天文学家弗拉姆斯蒂德等人的研究并且剽窃他们的成果。



弗拉姆斯蒂德像

弗拉姆斯蒂德 (John Flamsteed, 1646~1719) 是英国首任皇家天文学家，是格林尼治 (Greenwich) 天文台的创始人，是现代精密天文观测的开拓者。他在 1676~1689 年间共作了大约 2 万次观测，测量精度约为 $10''$ ，他对 3000 颗星的测量结果收入了著名的“不列颠星表” (Britannic Catalogue)。

1675 年，弗拉姆斯蒂德被英国国王任命为皇家天文台长，不过条件仍是十分艰苦，不仅得不到足够的办台经费，连年薪 100 英镑也经常拖欠。为了维持天文台的经费，他不得不用额外招收学员的学费来补足，在繁忙的工作之外还要为 140 名数学学生教课。

1694 年开始，牛顿访问了弗拉姆斯蒂德并且向他索要关于月球运动的观测资料，此后牛顿为了验证万有引力理论，还多次写信给弗拉姆斯蒂德索取资料，弗拉姆斯蒂德都满足了牛顿。弗拉姆斯蒂德 1700 年

对他的朋友洛瑟普说：“[牛顿]曾一度想使月球运行表符合他设想的定律，但是，当他开始将自己的定律与天体（即月球的观测位置）进行比较时，他发现自己错了，并不得不全部抛弃自己的定律。我曾给他提供了二百个以上的月球的观测位置，人们会认为这些材料足以限定任何理论；既然他已修改了自己的理论，并把自己的理论调整到完全符合这些观察，所以他的理论描述了这些观察也就不足为奇了，但是，他还是为此而感激这些观察，甚于感激他关于引力的臆测，这些臆测曾使他犯过错误。”^[5]

其时牛顿已是皇家学会主席，在索取资料的时候经常对弗拉姆斯蒂德的工作指指点点，有时还利用自己的高位来羞辱这位可敬的天文学家。这大大激怒了这位天文学家。到1700年之后，他们之间就再没有通信了。牛顿获得了弗拉姆斯蒂德的资料，并且在他的《自然哲学的数学原理》中引用了这些资料，由于他们之间的这种矛盾，在《原理》的第二版出版时（1713年）他将弗拉姆斯蒂德的名字删去了。

然而牛顿和他的支持者哈雷还是急切地需要弗拉姆斯蒂德的进一步的观测资料。他们希望弗拉姆斯蒂德出版他的观测资料，不过弗拉姆斯蒂德却总是认为要反复校核以后才能出版。牛顿和哈雷所做的一件不道德的事是，他们未经弗拉姆斯蒂德的同意私自在1712年出版了弗拉姆斯蒂德以毕生精力得到的观测星图，共印刷了400册，并且把其中的300册回送给弗拉姆斯蒂德。弗拉姆斯蒂德看着这些未经认真校核、充满错误、并且根据牛顿和哈雷理论的需要删改过的印刷品，很生气地把它们全部焚毁了。后来他的星图经过仔细校核后，在他去世后由他的学生于1729年出版（《Atlas Coelestis》）。

牛顿为了获取弗拉姆斯蒂德的观测资料，软硬兼施，牛顿以天文台是皇家学会的下属单位，观测结果应当属他这位皇家学会主席来支配，这样来以势压人。可是皇家学会根本没有供给弗拉姆斯蒂德足够的经费，一切设备都是他自筹来的。弗拉姆斯蒂德的愤怒可以从他给一位朋友（Abraham Sharp）的信中看出：“我和主席（牛顿）的另一个争执是，他形成了一个阴谋，想攫取我的仪器，而送我一个委员会，其中仅有他自己和两位物理学家。主席热度很高并且过分下作。我预先告诉他，别动我的东西，并说明在观象台的所有的仪器都是我自己的，壁上

的拱弧和珍贵的四分仪都是我自己出资做的，其余的是我花自己的钱买的，而摩尔（Sir Jonas Moore）先生送我的六分仪和两只时钟，还有图奈里（Towneley）先生送我的测微尺，是我来皇家天文台之前若干年的事情。”^[5]

关于牛顿与弗拉姆斯蒂德之间的分歧，不仅反映在他们做人的态度上的差别，而且反映在科学态度上的根本不同，英国哲学家拉卡托斯说得好：“牛顿的‘月球理论’是1702年在戴维·格利高利的《天文物理与基础几何》中首次发表的，这实际上是在《原理》一书第一版之后的许多年了。该理论镇静地声称牛顿的理论‘与他用著名的弗拉姆斯蒂德观测月亮的许多位置所证明的现象非常接近。’但我们必须记住，牛顿派从来不让观察的权威胜过他们的研究纲领，在他们的正面启发法的帮助下，他们提出了一个又一个的理论以适应反例。但他们经常是根本无视观察到的反证：他们知道，不仅理论必须不断地受到观察的检验，而且观察也要受到他们的理论的检验。‘最好的观察’（牛顿派文献中常用的一个名词）是那些证认了他们的研究纲领的观察，这在牛顿和弗拉姆斯蒂德的通信当中透露得很清楚。弗拉姆斯蒂德这位首席皇家天文学家是一个真正的未患精神分裂症的归纳主义者；他拒绝让牛顿及其同事们获得他对月亮所作的观察结果，从而比任何其他人都更大地放慢了他们的工作速度。最初，牛顿和弗拉姆斯蒂德是经常通信的，但是，弗拉姆斯蒂德很快开始讨厌牛顿使用他的材料来检验自己的月球理论。”

所以可以说，如果弗拉姆斯蒂德是一位观测和归纳的巨人的话，牛顿确实是一位踩着这位巨人肩膀爬上去的大人物。

3 在微积分发明权上导演对莱布尼兹的指控

关于牛顿与莱布尼兹（Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646~1716）关于微积分首创权的争议，已经有许多著作叙述过，著名的英国物理学家霍金在《时间简史》中叙述得比较简明，他说：“他（牛顿）和德国哲学家高特夫瑞德·莱布尼兹之间发生了更严重的争吵。莱布尼兹和牛顿各自独立地发展了叫做微积分的数学分支，它是大部分近代物理的基础。虽然现在我们知道，牛顿发现微积分要比莱布尼兹早若干年，可是他很晚才出版他的著作。随着关于谁是第一个发现者的严重争吵的发

生，科学家们激烈地为双方作辩护。然而值得注意的是，大多数为牛顿辩护的文章均出自牛顿本人之手，只不过仅仅用朋友的名义出版而已！当争论日趋激烈时，莱布尼兹犯了向皇家学会起诉来解决这一争端的错误。牛顿作为其主席，指定了一个清一色的由牛顿的朋友组成的‘公正的’委员会来审查此案。更有甚者后来牛顿自己写了一个委员会报告，并让皇家学会将其出版，正式地谴责莱布尼兹剽窃。牛顿还不满意，他又在皇家学会自己的杂志上写了一篇匿名的、关于该报告的回顾。”



莱布尼兹像

1684年莱布尼兹发表了微积分的论文。3年后，牛顿在1687年出版的《原理》书的初版中对莱布尼兹的贡献表示认同，但是却说：“和我的几乎没什么不同，只不过表达的用字和符号不一样。”这几句话，由于后来与莱布尼兹的矛盾，在第二版（1713年）时也被删掉了。牛顿的流数理论到莱布尼兹发表论文二十年后，即1704年作为他的著作《光学》的附录中正式发表，附录的序言中，牛顿提到他1676年给莱布尼兹的信，并补充说：“若干年前我曾出借过一份包含这些定理（微积分）的原稿，之后就见到一些从那篇当中抄出来的东西，所以我现公开发表这份原稿。”这话的意思就暗指他的手稿曾经被莱布尼兹看到过，而莱布尼兹的论文就是从他的手稿中抄来的。

1711年3月4日，伦敦皇家学会的秘书斯洛（Hans Sloane）收到莱布尼兹寄来的一封信，信中抱怨其成员开尔（John Keill）指责莱布尼兹把牛顿的微积分改变了少量的符号，伪装为自己的原创发表，并且

声明这不是事实，要求学会给以公正的裁决。这正是霍金所说莱布尼兹的错误，这一状告到了牛顿手上，恰好给了当时作为皇家学会主席的牛顿以售其奸的机会。

后来由于牛顿的导演和亲自出马、匿名运作，形成势不两立的两派。以英国为一派包括英国著名数学家泰勒和麦克劳林都认为莱布尼兹是抄袭者。另一派是欧洲大陆的数学家，包括著名数学家约翰·伯努利等为一派认为牛顿是抄袭者。争论双方停止了学术交流，不仅影响了数学的正常发展，也波及整个自然科学领域，以致发展到英德两国之间的政治摩擦。自尊心很强的英国民族抱住牛顿的概念和记号不放，拒绝使用更为合理的莱布尼兹的微积分符号和技巧，致使整个18世纪英国在数学发展上大大落后于欧洲大陆，这场由牛顿导演捍卫牛顿的战斗，使英国人吃了大亏。莱布尼兹生命中的最后7年，是在别人带给他和牛顿关于微积分发明权的争论中痛苦地度过的。据报道，莱布尼兹死后牛顿为能使莱布尼兹心碎而幸灾乐祸（Following Leibniz's death, Newton reported that he had taken great satisfaction in "breaking Leibniz's heart."），这也许更能够看出牛顿的小人心理。

牛顿在以上所列举的三桩公案中道德低下的表现并不是偶然的。牛顿是一个遗腹子，出生不久，母亲改嫁，由外祖母抚养，从小没爹也没娘，使他心理受到严重扭曲，孤寂好斗。

从1669年27岁时出任剑桥大学卢卡斯教授起，牛顿就沉湎于炼金术和神学。在牛顿遗留下的手稿中，有关炼金术的内容约有65万字之多，而神学内容的有150万字之多。即使是在他写作《原理》和《光学》的时候，他的主要精力仍然集中在炼金术和神学上。牛顿的晚年则迷恋于多赚钱上。有人推荐他去担任伦敦的一所贵族的上流学校的校长，他回信说“每年不过是200英镑，还得每天关在伦敦不出去”为理由回绝了。1696年他离开剑桥出任造币厂督办，1699年出任造币厂厂长，他如愿以赏，从此他在科学上便无所作为了。

1692年，50岁的牛顿表现出心理疾病的严重的迫害狂症状，他那时写的信件表现明显的精神错乱。例如，1693年9月16日，牛顿给著名的哲学家洛克写信说：“先生：我认为你竭力用女人和别的手段来纠

缠我，我的感情大受影响，以致当有人告诉我你有病，将不能活时，我回答说，最好你死掉。……”有人认为，他的精神分裂症状和他迷恋炼金术，每天和水银打交道而中毒有关。

牛顿遗留下许多手稿和文件在 1888 年辗转到了剑桥大学图书馆，其中的很大一部分于 1936 年拍卖，著名的经济学家凯恩斯读过其中的一部分，所以对牛顿的思想发展有较深入的了解，1942 年，在人们纪念牛顿 300 周年诞辰的会上报告了他的结论：

“在 18 世纪以后，牛顿开始被认为是现代第一个和最伟大的科学家，一个唯理主义者，他教导我们沿着冷静的没有色彩的理性思路去思考。

“我并不这样看待他。我认为任何一个仔细阅读过当他最后于 1696 年离开剑桥时收拾起来并且虽然部分散失而仍流传给我们的那盒论文的内容的人，都会发现他不是那样的。牛顿不是理性时代的第一人。他是魔术师中的最后一个，巴比伦和苏美尔人中的最后一个，他是和那些不到一万年开始创造我们的智力遗产的人们用同样的眼睛观察这个可见智力世界的最后一个伟大人物。是被贤人们顶礼膜拜的最后一个神童……

“用通俗的现代语言来说，牛顿是常见的深度精神病患者，……。继承他卢卡斯讲座教授职位的惠斯顿说，‘我所知道的最害怕、最小心、最多疑的性情’……”

造假、盗版、侵权、伪证、迷信、拜金、精神病患者、炼金术士，这些，就是作为一个大科学家牛顿的另一面。

(本文受到国家自然科学基金 10172002 项目的资助，特致谢意。)

参考文献

1. 伏尔泰·哲学通讯·高达观等译·上海：上海人民出版社，1961，65
2. Emilio Segrè. From falling bodies to radio waves - Classical physicists and their discoveries. W. H. Freeman and Conpony, 1984
3. I. B. 科恩著·葛显良译·牛顿传·北京：科学出版社，1989
4. David H Clark and Stephen P H Clark. Newton's Tyrann; The Suppressed Scientific

Discoveries of John Flamsteed and Stephen Gray. W. H. Freeman and Co ([英] 大卫·克拉克, 史蒂芬·克拉克著·王绍婷, 孙嘉芳译·台湾新新闻文化事业(股份)公司出版, 2002年8月)

5. E Walter Maunder, F R A S. The Royal Observatory Greenwich-Its History and Work. This HTML version is copyright; Eric Hutton, June, 2000
6. 王克迪·牛顿, 文集《科学巨星》(第二卷)李醒民主编·西安: 陕西人民教育出版社, 1995
7. 拉卡托斯著·兰征译·科学研究纲领方法论·上海: 上海译文出版社, 1999

探索人体奥秘的古老故事

——生物力学孕育期一瞥

杨桂通

(太原理工大学应用力学研究所, 030024)

【摘要】 简要地回顾了古代探索人类躯体奥秘的故事。有一些故事是古代中外学者关于寻找健康生活的规则的。仅叙述生物力学及其相关的内容。

【关键词】 人体, 生物力学, 故事, 探秘

1 引言

人类对自身躯体奥秘的探索应该是从人会思考就开始的事。有历史记载的事件也已有几千年的光景。但是, 对人体的组织、器官及其功能的科学实验研究则是近几个世纪的事。这些研究工作主要是针对治病、治伤、防病、防外界伤害而进行的。不少事例含有深刻的力学道理。近代生物力学就是主要研究人体各类组织、器官及其功能的科学。而一大部分动植物的力学问题则往往同时也是仿生学专家感兴趣的课题。

17 世纪以前, 中国的科学、技术、医药、文化都是先进的。但是, 由于种种原因, 一个伟大的民族在各方面却长期停留在固步自封的阶段。经验代替了科学实验, 书院代替了自由论坛 (当时西方称为大学), 祖传代替了发展, 等等。17 世纪以后, 科学发展的中心离开了中华大地。近代科学的各个分枝, 如物理学、数学、化学、力学、生物学等等。基本上都是由西方国家传入中国。下面的故事还是先从我们的祖先那里开始。

2 古代对人体的认识概貌

战国时期 (前 475 ~ 前 221) 成书的《黄帝内经》已有对人体解剖、

生理、病理、治疗等基础理论有了系统的阐述。如《灵枢·骨度》对人体的头颅、躯干、四肢各部骨骼的长短、大小、广狭都标记出测量尺寸。公元256~282年,晋葛洪著《肘后救卒方》(3卷),其中记载了颌关节脱臼的整复法和用竹片夹板固定治疗骨折的方法。后又用柳木板固定治疗骨折等多种复位愈合方法。沿用至今的小夹板固定治疗骨折的方法已有2000多年的历史。隋大业年间(公元605~616),巢元方编撰了《诸病源候论》共50卷,其中对断肠缝合与骨伤愈合的处理都有详细论述,如对骨折愈合手术则要求需将碎骨剔除再予缝合,即所谓“碎骨不除,其人必凶”。可见古人已经懂得生长(衰亡)、断裂(愈合)与力(应力)的关系。

到了宋代,人体解剖学有了很大的发展。宋王怀隐著《太平圣惠方》,太医局编辑了《圣济总录》等对人体的组织、器官的认识有了新发展。公元1041~1048年宋廷将处决后的欧希范等56具尸体进行解剖,由画工绘成图谱,称为《欧希范五脏图》。这是中国最早的解剖图谱书。该图虽已亡逸,但据当时宜州推官吴间记载:凡二日,剖欧希范等五十有六腹,皆详视之。吴间写道:“喉中有窍三:一食、一水、一气,互令人吹之,各不相戾。肺之下有心、肝、胆、脾,胃之下有小肠,小肠之下大肠,……”其中除“喉中有窍三”有误外,大部分还是基本正确的。

公元1102~1106年,杨介根据尸体解剖整理成《存真图》一卷。其图谱部分由元代孙焕整理成《重刊玄门脉诀内照图》并保留了下来。其中虽有一些谬误和粗糙之处,但仍是一部珍贵的中华文化遗产。

王清任(1768~1831)著《医林改错》图谱一书,对各器官进行了重新描绘并发现了一些重要器官。例如,他发现了总胆管(津管)、幽门括约肌(遮食)、胰脏(总提)等。这是我国解剖学发展史上有重要贡献的著作。唐宋以后我国医学发展很快,医学流派很多,医学著作也极多,绝大部分至今仍有重要价值,且自成医学理论体系,在世界上独树一帜,是中华文化中的瑰宝。

中国古代对血液循环系统也已有所了解。在《黄帝内经》(前475~前221)中曾有如下记载:“心主身之血脉”,“经脉流行不止,环周不休”。即有了循环的概念。但当时人们并不了解血液循环的实际情况,

也并不清楚有动脉和静脉两个系统。

下面是国外在这方面的概况。

一位生于小亚西亚 Pergamon 的希腊人伽林 (Galen, 公元 130 ~ 200) 一生致力于医学和对人体的探索, 是一位观察敏锐的解剖学家和注重实验探索人体器官功能的学者。在当时有很高的威望。他在纸莎草纸和羊皮纸上写下了不少有价值的书 (有 83 本存留了下来)。其中《论骨骼》《论身体各部器官的功能》和《论解剖过程》等著作达到了古希腊医学研究的顶峰。

在西方, 牛顿以前的整个欧洲, 星占学成了无所不包的自然规律。神秘主义的偏见阻碍了科学探索精神的发展。到中世纪, 德国皇帝腓特烈 (Frederick) 二世 (1211 ~ 1250) 是一个具有超常好奇心和创造力的人, 他研究了自然, 进行了解剖和生理实验, 他还支持别人做科学实验。他组织人把亚里士多德的著作从希腊文译成拉丁文, 并在萨莱诺建立了医学学校, 进行了人体解剖, 还写了一本猎鹰训练技术的书。当时已有了一些大学, 他的做法和著作在大学里广为流传。当时的大学 (university) 是一个很含糊的名词, 实际上是一些知识分子团体, 与同业公会相同, 是自由论坛场所。当时科学的发展还受到了教会的控制。

文艺复兴给科学发展带来了生机。佛罗伦萨的一个律师 S. Piero 和一个农妇 Catarina 的儿子达·芬奇 (Leonardo ad Vinci, 1452 ~ 1519) 是这一时期最杰出的代表者。达·芬奇是一位伟大的发明家、科学家、画家和解剖学家。他做了大量的解剖实验, 包括七个月的胎儿和一百多岁的老人的尸体解剖。他还做了许多关于肌肉的力学模型实验, 发展了心脏瓣膜的模型。为了艺术, 他解剖过飞蛾、苍蝇、鱼、蛙、鳄鱼、鸟、马、牛、羊、熊、狮子、狗、猫、猴子、鸡胚、和小牛。正像他的许多未完成的计划一样, 达·芬奇那庞大的人体解剖学著作也未能完成。

文艺复兴时期, 在西方, 对人体的研究有了很大进展。维萨里 (Andreas Vesalius, 1514 ~ 1564) 发表了《人体的构造》(1543 年), 见图 1。同年哥白尼发表天文学的革命性著作)。

英国人哈维 (William Harvey, 1578 ~ 1657) 于 1628 年发表了《血流运动论》(De Motu Cordis), 研究了血液在人体内的循环运动。尽管

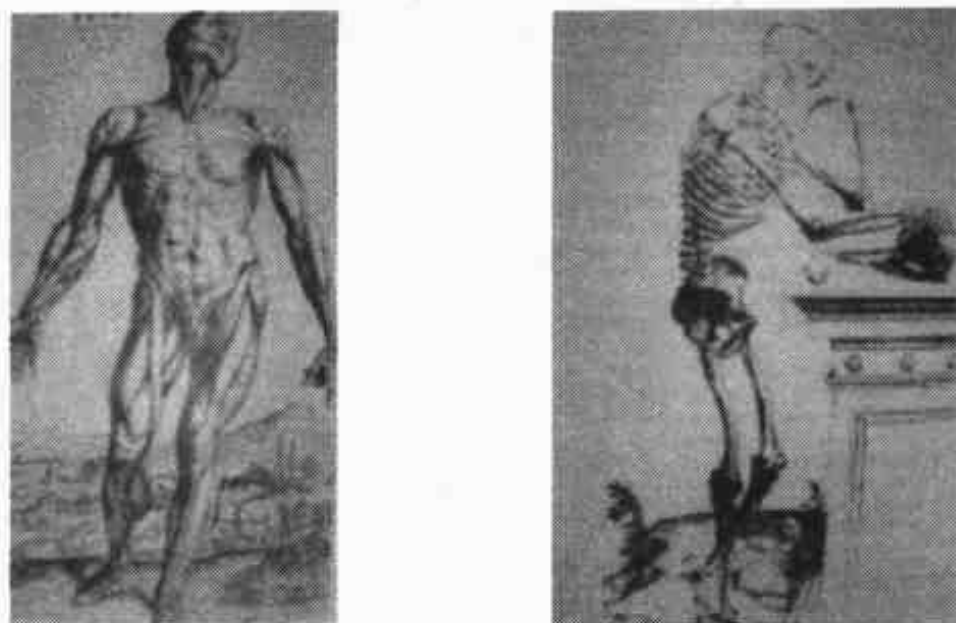


图1 维萨里书中的插图 (1543)

该书包含着不少错误，却仍可认为是一本首先用力学原理分析人体组织器官功能的生物力学著作。哈维生于英国 Folkstone 的一个农民家庭，小时候就玩过屠宰场的动物心脏，后入剑桥大学获文学学士。后入帕多瓦大学学医，1602 年获博士学位，1616 年在一次演讲中就曾宣布过：“就像是通过水泵的两个瓣阀把水压提高一样，”不断的“通过肺进入动脉”。1926 年出版的这本书，超出了所有前人的成果。被人尊为“心血管生理学之父”。

1684 年 Antony van Leeuwenhoek (1632 ~ 1723) 列文虎克发表了《大自然的奥秘》发现了血液循环现象和红血球的形状。

3 生物力学早期的探索

德国人沃尔弗 (Casper Friedrich Wolff, 1733 ~ 1794) 生于柏林，父亲是个高明的裁缝，他先在柏林外科专科学校读书，后又学习数学、哲学。1759 年他发表了《发生理论》和《论肠管的形成》的论文。沃尔弗说：“身体上的各种器官并不始终都是像现在这样存在的，是逐步形成的。”什么是发生的真正的机制？沃尔弗引进了“本质力” (vis essentialis)、内力 (inner force) 这类名词。他还预示了关于动植物在结构上的相似性，他所描述的小囊或小泡或即现在细胞 (当时尚无细胞一词)。沃尔弗的工作证明：在生长发育中，不仅有生长而且还有变化。

生物组织的发生和发育问题的历史连续性带到了19世纪，在19世纪里，这个问题是和细胞理论的发展及显微技术的改进相关连的。到1884年，小沃尔弗（Julius Wolff）首先证实骨组织的变化取决于其所受应力和应变的大小。被称之为骨的适应性原理或沃尔弗定律。

当时任英皇家学会干事长的物理学家罗伯特·虎克（Robert Hooke, 1635~1703）支持沃尔弗的观点，并在《显微图谱》（Micrographia）中描写了软木中发现的“小球”（细胞）。是他首创了“细胞”（cell）一词。每次周会上他都要介绍一个使用显微镜进行观察的实验。并因此得了眼病。当时细胞还不被人们所认识，直到1870~1900年，细胞学才趋于成熟。



图2 虎克所著《显微图谱》的扉页和他的显微镜

数学家笛卡儿（Rene Descartes, 1596~1650）生在一个富有的家庭里，早年多病，母亲在他出生时就去世了，他曾在一所教会学校读书，学校教育给他的感觉是，只有数学才是实实在在的。后对人体的奥秘很感兴趣。他在《论人类》和《论胚胎的形成》等著作中（图3），力图用力学的观点解释宇宙和人类。为此，他还独立地进行了解剖实验，讲述了一套机体活动视为机械运动的理论，用物理学、力学的术语描述了消化和吸收等机体的运动。当时，只有很少人真正理解或相信他的学说。

博雷利（Giovanni Alfonso Borelli, 1608~1674）和笛卡儿观点相同，用数学和力学来解释生理现象，并因其数学和医学的成就使得比萨

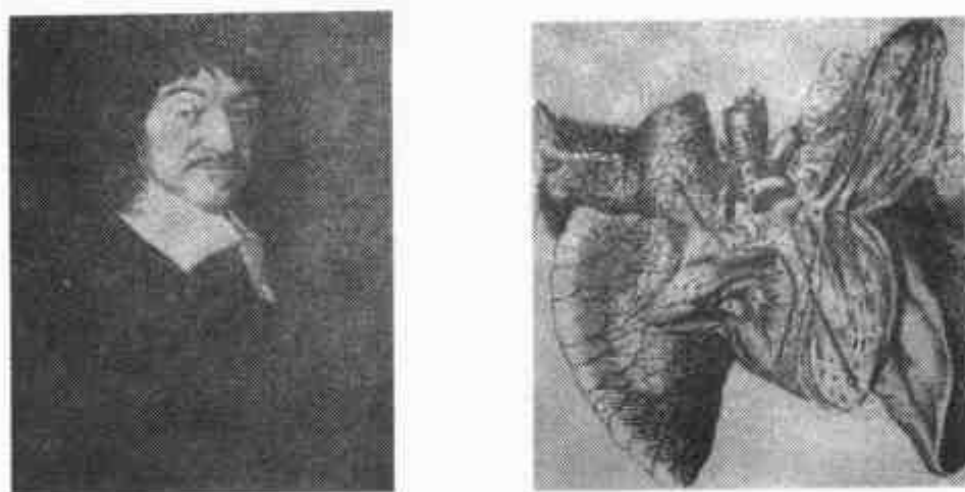


图3 笛卡尔 1649 年的画像和他的书中的心脏解剖图

大学著名起来。

哈勒 (Albrecht von Haller, 1707~1777) 瑞士人, 他是一个多才多艺的人, 他除了做科学工作外, 还是一个诗人、作家和政治家, 任哥庭根大学教授, 他在生理学上也有很大贡献。哈勒用动力学原理解释生理现象, 在《生理学基础》一书中讨论了收缩力的性质, 认为通过这种收缩力“纤维的各种成分互相靠近”。他说: “在生物体中有一种特殊力”, 称为“固有力”, 存在这种力的组织是可兴奋的, 肌肉的固有力或自身的力, 还存在另一种称之为“神经力”, 这种力通过神经从脑中带到了肌肉里, 且有引起肌肉收缩的力量。…”

实际上, 直到 20 世纪初英国学者希尔 (A. V. Hill) 的研究工作取得了重大成果, 才使得肌肉力学的重大发展, 他还因此得到 1922 年诺贝尔医学/生物学奖。希尔由大量实验得出: 在等张力的情况下, 肌肉的收缩张力 P 与肌肉的收缩速度 V 满足下列简单的关系式:

$$(P + a)(V + b) = P_0b$$

其中 a, b 为常数, P_0 为最大收缩力, 而 P_0/a 的数值对高等动物的所有肌肉大致为定值。

4 科学实验的先驱者

在 18 世纪、19 世纪, 由于工业水平的限制, 科学实验的条件自然受到一定的限制。下面是一些有代表性的力学实验的装置, 它们都是研究者自行设计。

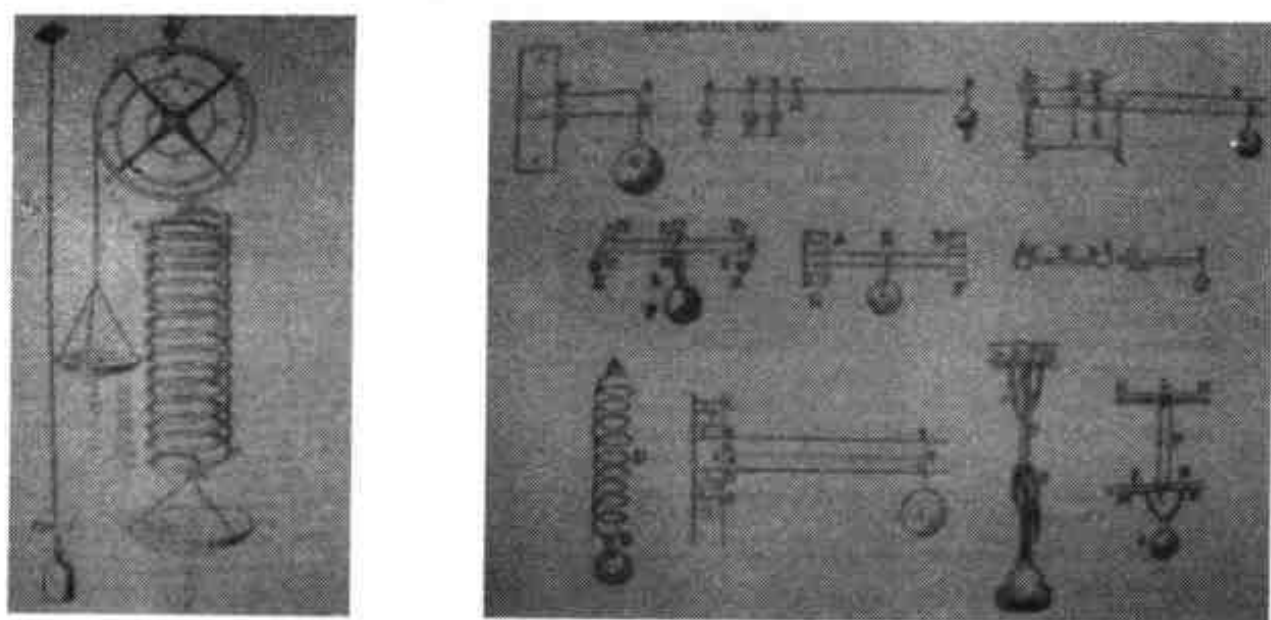


图4 18~19世纪的实验装置

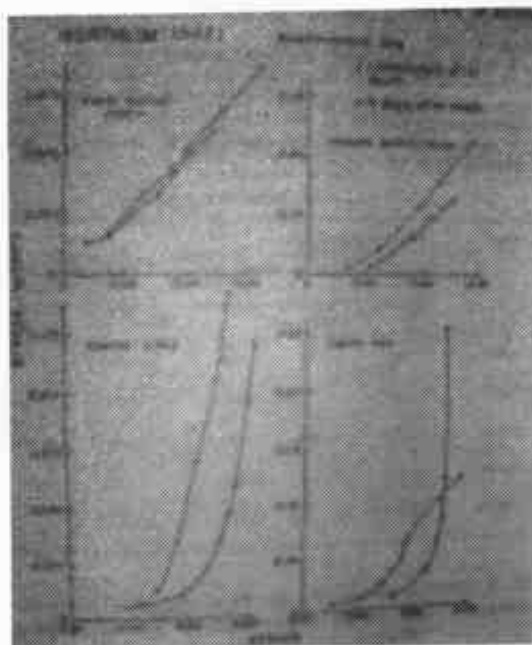
但在19世纪,一些先驱者已经使用比较简陋的装置(图4)做了不少关于人体组织器官力学特性的科学实验,值得特别提出的是沃瑟姆(Guillaume Wertheim 1815~1861)的工作。沃瑟姆19世纪对人体组织(包括骨、肌肉、血管、肌腱、神经等)做过系统科学实验的学者。

沃瑟姆于1815年生与维也纳,他的父亲是维也纳 Hebrew 区的官员,他诞生时其父已经去世,母亲在其出生后不久也离开了人世。沃瑟姆度过了艰难的童年。他先在维也纳学医科,并于1839年取得医学学位,但他放弃了从医,改去柏林大学学习数学和物理,师承 Jacobi, Steiner, and Dirichlet 等著名数学家,沃瑟姆1853年取得科学博士学位。后在巴黎高等技术学校(the Ecole Polytechnique)和法国大学(the Collège de France)从事科学实验,主要是固体材料(包括生物材料)的力学性质。几年后又回到他的祖国继续她的研究工作。

沃瑟姆对不同年龄、不同性别人骨骼、软组织、肌肉、血管、神经等进行了拉伸实验得到了几乎都是非线性应力应变关系。由于实验是用了新鲜材料,所以实验过程中,随着试件水分的丢失其非线性度将不断降低。下式是沃瑟姆得到的人体骨的应力 σ 应变之间的非线性关系为:

$$\sigma = A\sigma^2 + B\sigma$$

其中 A, B 均为常数。此外还得到其他组织的本构关系。此后,对人体组织和器官有了较多的了解。



沃瑟姆的实验结果 (1853)

17世纪以后,西方文化由传教士利玛窦(Matteo Ricci, 1552~1610)等人大量地传入中国,中国人对人体的了解开始走向精细化。不少西方科学著作传入中国,例如,汤若望(Johann Adam Schall von Bell, 1591~1666),邓玉函(Joannes Terrenz, 1576~1630),南怀任(P. Ferdinandus Verbiest, 1623~1688)等译著的《人身图说》和《泰西人身概况》等。

生物力学在20世纪60年代成为一个独立的分枝学科。冯元桢的第一部《生物力学》出版是一个重要标志,其后的三卷集巨著奠定了这一新兴学科的学科特点和理论与实验的基础。这以后,在中国,世界各地,生物力学的研究成果多了起来,科研单位不断兴起。生物力学国际会议和专门学术刊物办了起来。呈现出兴旺发达的景象。

参考文献

1. Magner L N. A History of Life Sciences. Marcel Dekker, New York, 1983 (中译本:李难等译. 生命科学史. 武汉:百花文艺出版社, 2002)
2. Flügge S (Chief Editor). HANDBUCH DER PHYSIK. Truesdell C. (Editor), MECHANICS OF SOLIDS, (1) Springer-Verlag, Berlin, 1973
3. 王晓鹤. 中国医学史. 北京:科学出版社, 2000
4. 武际可. 力学史. 重庆:重庆出版社, 2000
5. Richard Shalak and Shu Chien, Handbook of Bioengineering, McGraw-Hill Book Com-

pany, 1987.

6. 杨桂通, 陈维毅等. 生物力学. 重庆: 重庆出版社, 2001
7. 杨桂通. 医用生物力学. 北京: 科学出版社, 1994
8. Fung Y.C. Biomechanics, Mechanical Properties of Living Tissues, Springer-Verlag, 1981
9. Fung Y, C. Biodynamics; Circulation, Springer-Verlag, 1984
10. Fung Y.C. Biomechanics, Motion, Flow, Stress, and Growth, Springer-Verlag, 1990 (中译本: 生物力学-运动、流动、应力和生长. 邓善熙译. 成都: 四川教育出版社, 1993)
11. 王和鸣. 中医骨伤科学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1996
12. 吴国盛. 科学的历程 (第二版). 北京: 北京大学出版社, 2002
13. 林成滔. 科学的故事. 北京: 中国档案出版社, 2001
14. 符文军. 中华上下五千年. 北京: 时事出版社, 2002
15. 中华文明史 (多卷集). 石家庄: 河北教育出版社, 1992

力学与计算技术的互动发展^①

王希诚

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 116023)

【摘要】 本文简述了力学和计算技术的发展历史, 揭示了它们的互动发展规律, 并分析了现代力学的多尺度发展趋势。

【关键词】 力学, 数学, 计算技术, 进展

力学的发生和发展, 与天文学、物理、数学、计算科学以及工程技术的发展有着密切的联系。电子计算机出现为这一学科的发展注入新的活力, 使之成为以理论、实验、计算为三大支柱的研究体系。综观整个力学学科的发展历史, 计算技术起了重要的作用。本文试图从发展历程上显示两者的互动关系以及力学学科的多尺度化发展趋势。首先对计算技术和力学的发展历史做一个简短的回顾。

1 计算技术的发展历程

计算技术包括硬、软两方面, 硬技术指计算工具和设备, 软技术指数学方法和相应的软件。众所周知, 硬技术的演变过程为手指→刻画→接绳、算筹→笔、珠算→计算尺→机械计算机→电子计算机^[1]。我们称计算尺前的计算用具为古典计算工具, 计算尺和机械计算机是近代计算工具, 电子计算机是现代计算设备。我国是较早发展古典计算工具的国家, 春秋战国时期(前 770 年~前 221 年)就有了筹算法, 能熟练地运用筹棍计算数字; 唐朝末叶, 在筹算法的基础上制造出算盘, 到了宋朝(公元 1274 年)已有了珠算歌诀。近、现代计算设备的发展源于欧美等西方国家, 1642 年帕斯卡(法国)制成第一台加减计算机, 莱布尼兹后来又制成了乘、除台式手摇计算机, 1820 年科尔马制成商业用

^① 本文的工作得到国家自然科学基金项目(10272030)的资助。

计算机的样板和原形,并于1875年生产了15台,开创了计算机制造业,1875年博尔德温(美国)制成四则运算机,这是第一部获得专利的计算机。作为现代计算设备的电子计算机雏形是由巴贝治(英国)和奥德纳(瑞典)发明的,1946年毛希利(美国)和埃克特(芬兰)合作在冯·诺伊曼的帮助下制成了世界第一台电子计算机,开创了现代计算技术的新纪元。此后,电子计算机经过了五代的发展,第一代是20世纪40~50年代的萌芽期和实用期;从第二代1959年美国制造的每秒百万次晶体管计算机到第三代1965年投入使用的每秒上亿次的半导体集成电路计算机,计算机体积缩小了10倍;1971年美国制成大规模半导体集成电路计算机,体积更比第一代缩小了5000倍,达到了计算机的微型化。20世纪70年代中期以后,计算机引入向量、指令先行、交叉存储和多CPU技术,进入第五代超级并行计算机时代^[2]。近年来国际上高性能计算机的发展神速,1996年底已推出每秒万亿次计算机,5年内,前500台高性能计算机的总性能增长25倍,平均每年增长2倍多。2003年6月TOP500公布的年第一名计算机的运算速度已达每秒40.96 Tera (10^{12}) Flops^[3]。目前,IBM公司正在研制每秒360Peta (10^{15}) Flops运算量级的蓝色基因超级并行机。近年来,随着计算机计算能力的迅速增长,互联网络的普及和高速网络成本的大幅度降低以及传统计算方式和计算机的使用方式的改变,网格计算已经逐渐成为超级计算发展的一个重要趋势。网格计算(Grid Computing)是将地理上分布的计算资源(包括数据库、贵重仪器等各种资源)充分利用起来,协同解决复杂的大规模问题,特别是解决仅靠本地资源无法解决的复杂问题。2001年4月,美国癌症学会、美国国家癌症研究基金会和牛津大学等数家领先的科研机构与英特尔公司一起启动了一项利用“端对端”计算模式帮助寻找治愈癌症新方法的研究计划,该计划将集中600多万用户的计算资源,实现超过50太拉(Tera)的网格计算能力。网格计算是一个崭新而重要的研究领域,它以大粒度资源共享,高性能计算和创新性应用为主要特征,已成为21世纪计算技术发展的主流方向。

与计算工具的硬技术相呼应,数学方法和软件也经历了一个漫长的发展期,其历史可以追溯到几百万年前计数方法的产生^[1]。利用一一对应原理的简单计数方法的较早文字记载可见于荷马(古希腊诗人,约

公元前 9 至 8 世纪) 史诗描述的波吕斐摩斯故事, 他是用石子计数羊的数目。古代部族大多以与此相似的方法进行日常活动的计数, 例如, 曾广泛使用于记录帐目的符契, 直到 1826 年还是英国财政部的法定计数器。经过对丈量土地、灌溉农田、实物交易、建筑祭坛和天象观测等实践活动中出现的数学问题的长期思考和研究, 计算技术度过了漫长的萌芽时期。这期间比较发达的地区是中国、巴比伦、埃及和印度。见于文字记载的有莫斯科纸草书 (约公元前 1850 年)、周易 (约公元前 11 世纪) 等。此后, 数学经过古希腊时期 (公元前 5 世纪到 7 世纪), 东方时期 (约 5 世纪到 15 世纪) 和欧洲文艺复兴时期 (15~17 世纪), 这也是初等计算方法的发展时期。这个发展期中对后世影响较大的代表人物有欧几里德 (公元前 330~前 275 年)、阿基米德等, 应着重指出的是文艺复兴时期, 在计算技术上连续发生了 3 次革命性的变化, 第一次是“印度—阿拉伯数码”的定型和普遍采用; 第二次是十进制小数的引用; 第三次是对数的创造和应用。加上代数方程论和数学基本符号化, 构成了计算技术的数字基础。计算技术的方法基础是伴随变量数学 (17 世纪中叶至 19 世纪 20 年代) 的发展而建立的。1638 年伽利略提出了实验数学方法, 在所研究的现象中, 找出一些可以度量的因素, 将数学方法应用到这些量的变化规律中去, 实验数学开创了数学与自然科学的一种崭新结合。1665 年英国的牛顿 (1642~1727) 提出了“流数术”, 并发表了微积分基本定理和曲线极值等三篇文章。随后, 德国的莱布尼兹 (1646~1716) 发表了求极值的新方法, 在 1684 年和 1686 年又分别发表了关于微分学和积分学的论文, 后经由柯西 (1789~1857) 等人的工作完善了由阿基米德所开创, 牛顿、莱布尼兹所完成的微积分方法。此后, 还有伯努利家族、欧拉 (1707~1783)、拉格朗日 (1736~1813) 等在变分法上的研究, 这些优秀工作奠定了作为计算方法这一数学分支的基础。这个时期英雄辈出, 如泰勒 (1685~1731)、克莱姆 (1704~1752)、勒让德 (1752~1883)、拉普拉斯 (1749~1827)、傅里叶 (1768~1830)、高斯 (1777~1855)、格林 (1793~1841)、雅可比 (1804~1851)、厄米特 (1822~1901)、约当 (1838~1922)、切比雪夫 (1821~1894)、柯瓦列符斯卡娅 (1850~1891)、庞加莱 (1854~1912)、伽辽金 (1871~1945) 和菲歇尔 (1890~

1962)等,他们的工作推动了近代数学的发展,也奠定了作为计算数学这一数学分支的基础。电子计算机出现使计算数学作为一门独立的学科而迅速发展,差分法、有限元法和数学规划方法的创立和各类软件的广泛应用使数值计算渗透到各个学科领域。计算机体系的并行化结构又促进了并行计算方法的发展,使大规模科学和工程计算成为可能。今天,计算技术已经在各个学科中确立了自己的地位,继理论和实验之后成为科学研究的第三支柱。

2 力学的发展历程

力学是自然科学中最古老的一门学科,研究力对物体作用的科学^[4,5]。力学的发展历程大致可分为萌芽时期,静力学发展时期,动力学发展时期,刚体力学和应用力学发展时期,近代力学发展时期和现代力学发展时期。萌芽时期是远古时代人们在实践活动中总结出来的一些力学经验,亚里斯多德(公元前384~前322年)在“物理学”和“力学”两部书中对这一时期的力学知识做了概括和总结。静力学时期约为公元前3世纪~16世纪,在使用简单的工具和机械基础上逐渐总结出力学的概念和公理,阿基米德是静力学的奠基人。这一发展期中,由于封建制度和神权的制约,力学经历了一段较长时间的停顿,到15世纪后半叶,欧洲进入文艺复兴时期后,才得以重新发展,达·芬奇(1452~1519)、哥白尼(1473~1543)等是这一时期代表人物,他们使静力学得以完善,并开展了变形体力学(材料力学和流体力学)和天体力学的研究。此后,力学进入动力学发展期,动力学基础由伽里略奠定,经开普勒(1571~1630)对行星运动规律的研究,惠更斯(1629~1659)对物理摆和曲线运动研究,马里沃特(1620~1684)和胡克(1635~1703)等对变形体力学的研究,至牛顿集大成而建立了三大力学定律,使力学学科的科学体系得以完善。18~20世纪中期是力学发展较快的时期,同数学的发展一样,也是一个英雄辈出的时期。经伯努利家族、欧拉、达朗贝尔(1717~1783)、拉格朗日(1736~1813)、拉普拉斯(1749~1827)、傅里叶(1768~1830)、高斯(1777~1855)、泊松(1781~1840)、纳维(1785~1836)、格林、圣维南(1797~1886)、雅可比(1804~1851)、哈密顿(1805~1865)、斯托克斯

(1819~1903)、海姆霍兹(1821~1894)、克希霍夫(1824~1887)、瑞利(1842~1919)、茹科夫斯基(1847~1921)、柯瓦列符斯卡娅、赫兹(1857~1894)、李亚普诺夫(1857~1918)、伽辽金(1871~1945)和米泽斯(1883~1953)等人的杰出贡献使力学形成了理论力学、材料力学、天体力学、弹性力学、塑性力学、流体力学和空气动力学等诸多分支学科。这一时期,力学以主要研究宏观作用问题而与物理学分开,在空间上处于中尺度,所以在没有包括爱因斯坦等物理学家的物理学家的工作。计算机的问世使力学得到长足的发展,特别是并行计算机及其由因特网组成的网格计算体系,配以差分和有限元等数值方法和相应的软件,使大规模数值计算成为可能。现代力学的模型越来越复杂,考虑的物理因素也越来越多,形成了一批有学科交叉特点的新学科,如物理力学、化学流体力学、纳米力学、爆炸力学、岩土力学、生物力学和药物力学等,其研究尺度已深入到细观和微观。

3 力学与计算技术的互动发展

由上而对发展历史的简短描述,不难看出两者的密切联系。它们都经过了远古的萌芽时期,缓慢发展期,复兴期和近、现代发展期。两者相互促进,互动发展,体现出以下特点:

(1) 远古时期:计数制和简单的几何和算术知识首先发展起来,它们促进了由观察和实践活动积累的力学经验知识化,这一时期的特点基本上是计算技术发展在先,力学概念的建立和发展在后。

(2) 远古至近代发展期:生产实践中的大量问题需要从力学上加以解决,促进了力学的发展。这时往往缺乏有效的计算技术的帮助,使得力学家不得不亲自着手解决由力学而引发的数学和计算问题,这由前面关于这一发展期的代表人物的论述便可发现,很多力学家同时又是数学家和计算技术的专家。在缓慢发展期和复兴期,甚至出现了力学家、物理学家、数学家和计算技术专家不可分的现象,如牛顿、伯努利、欧拉、达朗贝尔、拉格朗日、拉普拉斯、傅里叶、高斯、格林和雅可比等。这一时期的特点是力学的发展推动了数学和计算技术的发展。

(3) 近代发展期:力学以研究宏观作用面与物理学分离,并形成了自己的分支。这一时期力学和计算技术虽然仍有相互促进,但基本上处

于相对独立的发展期。

(4) 现代发展期：超级计算能力的出现推动了力学的发展，利用已有的计算环境可以使力学家考虑更复杂、更符合实际的力学模型，更深层的力学问题，更大型的工程问题。计算技术的发展促使力学向深层次和交缘学科方向发展。

4 力学学科的多尺度化发展趋势

从空间上看，早期的力学研究中、大尺度的作用，如杠杆、滑轮等简单机械，太阳系中恒星的运动。随着生产的发展，实践中提出了大量的力学问题，它们大多具有中等尺度，力学不得不研究和解决这些问题，而这时期计算技术的滞后使力学家再难包打天下，大尺度和微尺度问题便归于物理学和天文学范畴。

从时间上看，计算技术是由中、大尺度向微尺度发展，如对日常生产和生活计数，天体运行的历法计算，单位从年、天、小时和秒发展到现代超级计算机的皮秒 (10^{-12}s) 级计算，时间从尺度上已进入微观。

以上分析表明，力学与计算技术的发展在尺度上已不平衡。利用现有的计算环境，力学应该而且必须做的更好。

现代科学和工程的飞速发展力学出了许多难题，例如：

发展强度为钢的 10 倍而重量仅为钢的几分之一纳米材料，发展可将国家图书馆的全部信息凝聚存储在厘米见方大小的纳米材料，制造包括 NEMS 为代表的微电子器件，以光绝缘体、半导体、光半导体为代表的光电子器件等，都必须进行纳米力学的研究。纳米力学包括纳米尺度力学和纳观力学，前者研究特征尺度为 1~100 纳米 (10^{-9}m) 之间的细微结构所涉及的力学问题，后者指从纳米尺度上展示的力学新观察。纳米力学着力于探讨由成千上万原子组成的凝聚态物质所涌现的带有整体特征的力学行为。它兼具连续介质和离散描述的特征，纳米固体力学可细分为纳米塑性力学、纳米断裂力学和纳米结构稳定性等内容^[6]。

核装置设计和核反应过程中力学行为，涉及化学流体力学，含能材料的反应动力学和性能预测，分子激发过程的力学机制，核反应开始后惯性约束聚变 (ICF) 问题等。

如何认识 DNA 的力学行为, 如 DNA 的各种开环、闭环、超绕、扭曲和包装内部的应力作用; 影响 DNA 复制和转录的分子局部力学行为; 为什么具有很长分子链的 DNA 分子挤压在核小体内, 长度压缩了 10000 倍以上而遗传信息不变, 在如此大的扭曲、折叠倍数下 DNA 的力学性质如何? 所有这些构成了 DNA 的力学问题。

药物制造与效用分析, 涉及生物大分子-配体小分子相互作用的热力学; 生物大分子-配体小分子相互作用的动力学; 分子对接设计; 药物分子在水溶液中的行为和分子模拟, 包括分子在水溶液中的力场参数及分子与水溶液作用势等; 药物代谢中的运移过程; 药物生物利用度和膜穿透问题; 这些都是药物力学的研究课题。

上述课题已体现出电、磁、声、光和热等多种效应的作用, 尺度上已进入细、微观, 呈现出多学科交融特点。随着计算技术的飞速发展, 力学工作者冲破数值计算的束缚, 腾出更多精力从事力学中更深层次问题的研究, 多尺度化发展已经成为趋势。国家基金委在数理学部中列出交叉与边缘领域的力学并予以资助, 必将对这一方向上的发展产生深远影响。

参考文献

1. 徐品方. 数学简明史. 北京: 学苑出版社, 1992
2. 钱学森. 关于“第五代计算机”的问题. 自然杂志, 1985, 第 8 卷 (1): 5~9
3. J.J.Dongarra, H.W.Meuer and E.Strohmaier, eds. TOP 500 Report, www.top500.org, 2003
4. 叶开沅. 力学发展简史. 北京: 知识出版社, 1987
5. 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
6. 杨卫等. 纳米力学进展. 力学进展, 2002, 第 32 卷 (2): 161~174

变分法的历史及其方法论的研究 (详细摘要)

何吉欢

(上海东华大学理学院力学研究所, 200051)

1 从一个传说谈起

相传古代有一个 Dido 公主, 国王恩准她用一根固定长度的绳子去围土地, 围多少就给她多少土地。

Dido 公主选择了一块靠海的土地, 因为海岸不需要绳子去围。据记载, Dido 公主围成了一个半圆——围出最大面积的正确形状。

Dido 问题就是著名的等周问题 (iso-perimetric problem)。用现代数学语言一般等周问题可表示为: 给定弧长

$$L = \int_1^2 \sqrt{x'^2 + y'^2} dt, \quad (1)$$

使得封闭面积

$$J = \int_1^2 (xy' - x'y) dt, \quad (2)$$

取极大值。式中 x, y 为容许曲线的参数方程:

$$x = x(t), y = y(t), t_1 \leq t \leq t_2 \quad (3)$$

由于曲线是封闭的, 所以有 $x(t_1) = x(t_2), y(t_1) = y(t_2)$ 。

2 牛顿的工作

历史上第一个变分问题是由牛顿提出来的。1687 年 Newton 提出了旋转体阻力最小问题, 牛顿假定物体表面任何一点的流体阻力与速度成正比。用现代数学的形式, 牛顿的问题是要选择适当的函数 $y(x)$, 使得积分

$$J = \int_{x_1}^{x_2} \frac{y(x)y'(x)}{1+y'^2(x)} dx \quad (4)$$

取最小值。

牛顿自己解决了这一问题，并说：“我想可以把这一命题应用到船舶的建造中去。”现在我们可以考虑更加复杂的情况（如考虑粘性和湍流），不仅可以在船舶建造中，而且在飞机和潜水艇的设计中得到普遍的应用。

3 数学史上的光辉一页——希尔伯特的 23 个问题

1900 年 8 月 6 日，第二届国际数学家大会在法国巴黎举行。年仅 38 岁的 David Hilbert 向国际数学界提出了 23 个 20 世纪待解决的问题，著名的哥德巴赫 (Goldbach) 猜想包含在第 8 个问题——素数问题里。

100 多年来，科学家一直致力于解决 Hilbert 的 23 个问题，哪怕是其中的一小部分，都看成是至高无上的荣誉，因为 Hilbert 的 23 个问题往往与菲尔兹 (Fields) 国际数学奖挂钩，而菲尔兹奖被誉为数学界的诺贝尔奖。在这 23 个问题中有 3 个问题与变分法直接有关。

第 4 个问题：两点间以直线为最短 (Problem of the straight line as the shortest distance between two points)。

第 19 个问题：正则变分问题的解是否一定解析 (Are the solutions of regular problems in the calculus of variations always necessarily analytic)。

第 23 个问题：变分法的进一步发展 (Further development of the methods of the calculus of variations)。

其中第 4 个问题，实质上就是著名的短程线问题 (Geodesic line)。考虑平面上两点，使得连接两点的弧线

$$J = \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{1 + y'^2(x)} dx \quad (5)$$

为最短。

我们将在正文里讨论第 19 个问题和 23 个问题。

4 变分法的历史

变分法的历史非常悠久。历史上最早的变分原理是由 P. Fermat (1606~1665) 提出来的，Fermat 原理是根据当时的光学、哲学、神学

和审美学的原理而提出来的, 是形式上最优美、数学表达上最简捷的一条变分原理, 是现代几何光学的基础。用数学公式可表示为

$$J = \int_{r_0}^{r_1} \frac{ds}{v} \rightarrow \min \quad (6)$$

在 Fermat 之前, Euclid 已证明了光线的反射定律, Heron 提出了最短路径原理。

变分法的发展初期是和微积分的迅速发展分不开的。1687 年 Newton 提出了旋转体阻力最小问题, 从而使得变分法的发展走上正轨; 1696 年和 1697 年 Bernoulli 提出了最速下降线 (brachisto-chrone) 问题及短程线 (geodesic line) 问题。

最速下降线问题可用数学公式表示为

$$J = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\sqrt{1+y'^2}}{\sqrt{2gy}} dx \rightarrow \min \quad (7)$$

许多当时最著名的数学家, 诸如 Leibniz、Newton 及 Jacobi 等都参加了该问题的研究, 从而大大促进了变分法的发展。

当时的科学家对变分法非常乐观, 在 1744 年 Euler 曾这样赞美道: “上帝创造的宇宙的结构是如此的尽善尽美, 以至世界上没有任何事物不显示出极大或极小的性质。因此, 毫无疑问, 世界上的一切结果都可以用极大和极小方法从其终极原因及其有效原因中导出来。”这是对变分法最高赞赏, 一大批科学家年轻学者的热情也非常高涨, 对变分原理及其实际应用的探索也在不断进行之中。同年, Euler 通过繁复的数学推导, 导出了等周问题 (iso-perimetric problem) 的解。

1755 年天才少年拉格朗日 (J. L. Lagrange, 1736 ~ 1831) 应用现在称之为拉氏乘子法的方法十分简捷方便地得到等周问题的解, Euler 给予 Lagrange 很高的评价, 说: “不管如何赞美都是过分的。”拉格朗日在 16 岁 (1752 年) 就被任命为数学教授, 19 岁 (1755 年) 就写出了不朽名著《分析力学》(Mecanique analytique), 但该巨著直至 1788 年才正式出版。为了纪念 Euler 和 Lagrange 的工作, 现在把泛函的驻值条件称为 Euler-Lagrange 方程, 本书简称为 Euler 方程。

1744 年 P. - L. M. de Maupertuis 根据神学思想提出了最小作用量原理。他认为作用是质量、速度和所经历的距离的乘积的积分, 自然界

中任何改变都是要使作用最小。用数学公式表示为

$$\int m v ds = \int m v^2 dt \rightarrow \min \quad (8)$$

Maupertuis 的理论多少有点模糊，因为他没有规定 m , v , s 的乘积是在什么时间域上取的；另一方面他也无法说明为什么他提出的“作用量”是最小的，而不是别的作用量。他的理论后来被 Lagrange 完善了。Lagrange 指出对于单个质点而言，质量、速度和两个固定点之间的距离的乘积的积分是一个极值原理，即

$$\int_{t_1}^{t_2} m v^2 dt \rightarrow \min \quad (9)$$

这一原理现称作 Maupertuis-Lagrange 最小作用量原理。

19 世纪主要研究 Hamilton 原理。1834 年 William R. Hamilton 对最小作用量原理作了改善，这一改善对变分法、微分方程的发展都是很重要的。Hamilton 原理可表达为：对于保守系统，在初态和终态间所有可能的运动中，系统的真实运动是使 Lagrange 作用量的时间积分取最小可能值。用数学表达式可表示为

$$\delta J = \delta \int_{t_0}^{t_1} (T - V) dt = 0 \quad (10)$$

式中， T 为动能， V 为势能， $L = T - V$ 为 Lagrange 作用量。

Hamilton 系统现在已成为研究非线性科学中的一个十分重要的领域。由于广义 Poisson 括号和辛流型的引入，Hamilton 系统已广泛应用于数理科学、生命科学及社会科学的各个领域。特别是天体力学、等离子物理、航天科学以及生物工程中的很多模型都是以 Hamilton 系统的形式出现的。

20 世纪变分法发展非常神速，这主要表现在弹性力学方面。如 1950 年我国钱令希提出了余能原理；同年又出现了 Helling-Reissner 广义变分原理^[1-3]，1954 年又出现了胡海昌-鹭津久一郎 (Hu-Washizu) 广义变分原理^[2,4]；1964 年我国的钱伟长系统地论述了拉氏乘子法并第一次用拉氏乘子法推导得到了胡-鹭广义变分原理^[1]，这无疑是一次重大飞跃。1983 年钱伟长首次发现临界变分现象，并应用高阶拉氏乘子法消除了临界变分现象，从而得到了更为一般的广义变分原理^[1]。这是

固体力学变分法的重要里程碑。在此之前, 建立广义变分原理都是用先验的方法, 即先列出泛函, 然后证明泛函取驻值是否满足场方程和边界条件。

相比之下, 流体力学变分原理的发展远远落后于固体力学。其主要原因是: ①流体力学的变分原理是建立在 Euler 空间基础上的, 因此不能直接套用 Lagrange 空间中的变分原理; ②大多数流体力学问题是强非线性的, 这给建立流体力学变分原理带来了极大的困难; ③没有一种系统方便的方法构造流体力学的变分原理。目前流体力学有限元计算基本上都是 Galerkin-FEM (这种有限元不能处理间断面, 如激波、自由尾涡及自由流面, 也不能处理杂交命题), 这从另一侧面反映了建立流体力学变分原理难度之大! 因此研究流体力学变分原理建立的途径是非常迫切和现实的问题。

诚然, 流体力学变分法的研究经过许多数学家和力学家的长期共同努力, 也取得了一些大的成就。

流体力学的第一条变分原理是 Kelvin 于 1849 年提出来的。在相同的边界条件下, 不可压势运动具有最小动能^[5]

$$J = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \rho v^2 dV \rightarrow \min \quad (11)$$

1868 年 Helmholtz 提出了不可压粘性流体的最小能耗原理^[5]

$$J = \int_{\Omega} \mu D : D dV \rightarrow \min \quad (12)$$

式中, D 为二阶变形率张量:

$$D_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$$

上述两个变分原理都被吴介之等^[6]及何可人等^[7]推广到可压流。另外吴介之等^[6]于 1993 年提出了类似最小 Kelvin 原理的最小似涡能原理, 即在满足同样边界条件的不可压粘性流中, 环量守恒流的似涡能取最小, 即

$$J = \frac{\rho}{2} \int_{\Omega} \omega^2 dV \rightarrow \min \quad (13)$$

式中, $\omega = \nabla \times v$ 。

吴介之等^[6]还证明了流体力学的 Hamilton 原理只适用于环量守恒流。

1929 年 Bateman 提出了第一条可压无旋流体的变分原理^[5]

$$J = \int_{\mathcal{C}_V} P dV \rightarrow \min \quad (14)$$

这一原理已被作者推广到非定常可压有旋流。后来又出现了可压无旋流体的 Bateman-Kelvin 变分原理^[5]

$$J = \int_{\mathcal{C}_V} (P + \rho v^2) dV \rightarrow \max \quad (15)$$

Hamilton 原理在质点力学中的应用是如此的成功,以致许多学者(如 Heivel, 1955)都想套用 Hamilton 原理来建立流体力学的变分原理。结果证明对于理想流体在 Lagrange 空间中的流动, Hamilton 原理是成立的;而在 Euler 空间中,这种努力曾不断遇到困难,例如,1955 年 Herivel 曾在 Euler 空间中导出过理想流体的 Hamilton 型变分原理,但它并不能代表理想流体的所有流动,对于均熵流只能得到无旋方程,然而根据 Crocco 定理,均熵不一定无旋!正如 Truesdell 和 Toupin 于 1960 年指出的那样,质点力学优美的变分法思想可以运用到连续介质力学,但是得到的结果并不是优美的,也没有多大的用处。这是为什么呢?这使作者想起一位名人的话:一个复杂的问题背后可能存在一个十分简单的问题没有解决。那么这一“简单问题”是什么呢?

当时 Herivel 现象曾引起许多科学家的高度重视。1963 年林家翘^[8]对 Herivel 现象作认真研究,对 Herivel 变分原理加了三个所谓的林家翘约束后,变分原理可应用于一般的流体。林家翘约束理论是流体力学变分原理的重要里程碑。但是近半个世纪以来对林家翘约束的实质一直没有搞清,它和 Maupertuis 原理一样,多少有点含糊。林家翘约束已成了流体力学变分原理中的最大疑案。同时由于加上三个林家翘约束,外加三个拉氏乘子数,所以林家翘约束型的变分原理给有限元计算带来了很大的不便。弄清林家翘约束的实质及最大限度地减少林家翘约束数及其相应的拉氏乘子数的总数(简称为林家翘数),使其更简洁、更实用,这不仅具有很大的理论意义,而且还具有非常重要的现实意义。

1968 年 R. L. Seliger 和 G. B. Whitham^[9]进一步发展了林家翘约

束理论。1983年 A. Ecer 和 H. U. Akay^[10]为减少林家翘数作了很多努力,从而使得林家翘约束理论变得实用,并进行了大量的二维有限元计算,取得了很好的成果。1993年刘高联^[11]应用林家翘约束理论建立了变域变分理论,谢定裕^[12]和 Finlayson^[5]分别将林家翘约束理论用于分层流体变分原理和磁流流体的变分原理的建立,所有这些成就都是令人鼓舞的。所有这些理论都有进一步完善或改进的可能性。

1984年钱伟长^[13]运用权余法和拉氏乘子法,推导出了粘性流体力学的广义变分原理,这是非常鼓舞人心的成就。但在处理惯性项时实际上应用了“限制变分”的概念,并误认为得到了“最大功率消耗原理”,这和著名的 Helmholtz 最小能耗原理刚好相反。问题出在哪儿呢?这一问题值得深思。

1990年刘高联教授^[14]总结了建立流体力学变分原理的方法,并提出了一种建立变分原理的反推法(即第二条路线),这种反推法也存在改进的余地。传统的反推法被钱伟长进一步发展,并提出一种权余法^[1]。传统的反推法和权余法都是企图先建立单变量的变分原理,然后再通过拉氏乘子法来建立广义变分原理。作者^[15]在反复实践中于1997年提出凑合反推法(现称为半反推法, semi-inverse method),这种方法可以方便地建立各种多变量的亚广义变分原理及各种广义变分原理,并且不会出现临界变分现象。同时作者还提出了建立二维流体力学广义变分原理的通用公式,该方法把所有由两个守恒型偏微分方程描述的二维流体的广义变分原理的建立完全格式化了。

5 变分反问题

由于变分法是有限元及一些近似方法的理论基础,变分反问题一直受到国内外学者的普遍关注。

在50年代,胡海昌首次推导得到了著名的 Hu-Washizu 变分原理^[19],之后钱伟长系统地论述了拉格朗日乘子法^[20],并提出了建立变分原理的权余法^[21]。刘高联在流体力学变分原理方面也做出了卓有成效的贡献^[22]。

在国外,研究变分反问题的人也很多,譬如在1965年出版的 Hildebrand 的专著^[23]里,比较系统地阐述了变分反问题。

(1) 传统反推法的基本思想

文献^[24]比较详细地阐述了 Hildebrand 的基本思想。考虑薄板的运动方程：

$$D \nabla^4 w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P \quad (15)$$

为了把方程 (15) 转化为一个变分方程 (variational equation)，我们把方程 (15) 乘以 δw ，并积分^[24]，得

$$\delta J(w) = \iint \left\{ D \nabla^2 w + \rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - P \right\} \delta w dV dt \quad (16)$$

分部积分后，我们即可推导得到下面的变分原理^[24]

$$J(w) = \iint \left\{ D(\nabla^2 w)^2 - \frac{1}{2} \rho h \left(\frac{\partial w}{\partial t} \right)^2 - Pw \right\} dx dy \quad (17)$$

上述就是传统反推法的基本思想。

(2) 钱伟长的权余法

每种方法都有局限性，传统反推法也不例外。钱伟长提出的权余法提供了自由选择权函数的方法，大大扩充了传统反推法的应用范围。考虑一非线性阻尼振动方程

$$u'' + u' + u + \epsilon u^3 = 0 \quad (18)$$

假如存在一泛函 $J(u)$ ，使得

$$\delta J(u) = \int (u'' + u' + u + \epsilon u)^3 H dt \quad (19)$$

如果按传统反推法， $H = \delta u$ 。按这样的假设，我们推导不到 $J(u)$ ，传统反推法失效。钱伟长权余法的最大优点是可以自由选择权函数 H 。对于该问题，我们选

$$H = e^t \delta u \quad (20)$$

这样我们能非常方便地推导得以下变分原理：

$$J(u) = \int \left\{ -\frac{1}{2} e^t (u')^2 + \frac{1}{2} e^t u^2 + \frac{1}{4} \epsilon e^t u^4 \right\} dt \quad (21)$$

(3) 刘高联的系统方法

2000 年刘高联提出了建立变分原理的系统方法^[22]。刘高联的系统方法主要由两条路线组成，即反推法和拉格朗日乘子反推法。对第 2 条路线的评论见 [25]。为了说明刘高联的系统方法，我们考虑以下流体

力学方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = f \quad (22)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = u, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial y} = v \quad (23)$$

式中的 f 是源项。当 f 只是坐标的函数时, 按刘高联的第一条路线中的反推法, 可假设存在一泛函 $J(\Phi)$, 使得

$$\delta J(\Phi) = \iint \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - f \right) \delta \Phi dx dy \quad (24)$$

分部积分, 并应用约束条件 (23), 我们可得

$$J(\Phi) = \iint \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + 2f\Phi \right\} dx dy \quad (25)$$

下面我们考虑更复杂的一些情况, 假设源项 f 可表示为 $f = u$ 。则刘高联的反推法或传统反推法将失效, 而钱伟长的权余法将充分发挥其优越性。假如:

$$\delta J(\Phi) = \iint \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} - u \right) G dx dy \quad (236)$$

再选择 $G = e^{-x} \delta \phi$, 我们可以非常方便地得到一面的变分原理:

$$J(\Phi) = \iint \frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + 2f\Phi \right\} e^{-x} dx dy \quad (27)$$

参考文献

1. 钱伟长. 广义变分原理. 上海: 知识出版社, 1985
2. 胡海昌. 变分学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987
3. 牛庠均. 现代变分原理. 北京: 北京工业大学出版社, 1992
4. Washizu K. Variational Methods in Elasticity and Plasticity. New York: Pergamon Press, 1975
5. Finlayson B A. The Method of Weighted Residuals and Variational Principles. New York: Academic Press, 1973
6. 吴介之等. 涡动力学引论. 北京: 高等教育出版社, 1993
7. 何可人等. 流动问题中最小能量耗散定理的推广和最小熵产生原理的局限. 工程热物理学报, 1988, 9 (1): 10~12

8. Lin C C. Hydrodynamics of Helium II. *Proc. of Int. Sch. Phys.*, Academic Press, 1963, 21 : 93~146
9. Seliger R L, Whitham G B. Variational Principles in Continuum Mechanics. *Proc. Roy. Soc. (London) A.*, 1968, 305: 1~25
10. Akay H U, Ecer A. Application of a Finite Element Algorithm for the Solution of Steady Transonic Euler Equations. *AIAA J.*, 1983, 21 (11): 1983~1988
11. Liu G L. A variable-domain variational theory using Clebsch variables for hybrid problems of 2-D transonic rotational flow. *Acta Mechanica*, 1993, 99: 219~223
12. 谢定裕. 渐近分析——在流体力学中的应用. 北京: 友谊出版社, 1983
13. 钱伟长. 粘性流体力学的变分原理和广义变分原理. 应用数学和力学, 1984, 5 (3): 305~323
14. 刘高联. 流体力学变分原理的建立与变换的系统性途径. 工程热物理学报, 1990, 11 (2): 136~142
15. He J H. Semi-inverse method of establishing generalized variational principles for fluid mechanics with emphasis on turbomachinery aerodynamics. *Int. J. Turbo & Jet-Engines*. 1997, 14 (1): 23~28
16. Oden J T, Reddy J N. Variational Principles in Theoretical Mechanics. 2nd ed., Berlin: Springer, 1983
17. 吴迪光. 变分法. 北京: 高等教育出版社, 1987
18. 叶庆凯, 郑应平. 变分法及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1991
19. 胡海昌. 弹塑性理论中的一些变分原理, 中国科学, 4 (1), 1955, 33~54
20. 钱伟长. 弹性理论中的广义变分原理的研究及其在有限元计算中的应用, 15 (2), 1979, 1~23
21. 钱伟长. 广义变分原理, 上海: 知识出版社, 1985
22. Liu, G L. Derivation and transformation of variational principles with emphasis on inverse and hybrid problems in fluid mechanics: a systematic approach, *Acta Mech.*, 140 (2000), 73~89
23. Hildebrand F B. Methods of Applied Mathematics, 2nd Ed., Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hill, 1965
24. Michael H. Meylan, A variational equation for the wave forcing of floating thin plates, *Applied Ocean Research*, 23 (2001) 195~206.
25. He J H. Comments on "Derivation and transformation of variational principles with emphasis on inverse and hybrid problems in fluid mechanics: a systematic approach", *Acta Mech.*, 149 (1~4) (2001): 247~249

万有引力定律的发现

胡 新

(北京大学力学与工程科学系, 100871)

【摘 要】 万有引力的发现与人们研究天体运动有密切的关系, 它是在人类上千年科学活动过程中科学家们不懈努力的结果。本文通过介绍托勒密、哥白尼、第谷、开普勒、伽利略和牛顿等人对天体力学发展的贡献, 阐述万有引力定律发现的历史过程及其影响。

【关键词】 万有引力, 天体运动, 牛顿

1 引 子

关于万有引力的发现, 广泛流传着这样一个故事: 在距今三百多年的一个深秋, 年轻的牛顿正在他家的果园里坐着沉思, 忽然, 一个苹果从树上掉了下来, 落在他的面前。就是这样一个并不引人注意的简单事实, 却激起了牛顿的许多联想。于是, 他自问: 苹果为什么不向天空飞去, 而落向了地面? 把万物拉向地面的神奇力量又是一种什么力量? 而正悬在头上的月亮又为什么不落向地面? 经过一番思索, 牛顿最终发现了万有引力。

对这个故事的真实性这里不必追究了, 而任何一个科学上的重大突破, 都是建立在前人大量工作的基础之上的, 同时, 也是时代的产物。离开前人的工作, 离开当时的科学水平, 任何一个天才的科学家也无法对科学做出真正的贡献。牛顿自己也说: “如果说我比笛卡儿看得远一点, 那是因为我站在巨人的肩上。” 万有引力主要是从研究天体的运动中发现的。在漫长的岁月里, 经过无数科学家的辛勤劳动, 人们才能从错综复杂的现象中发现本质规律, 反过来再用它来指导生产及科学活动, 下面就简要地回顾一下人类科学史上这一辉煌的篇章。

2 托勒密的地心说

其实，古人早就看到了天体的运动，并且有人进行了细致的观察。希腊人就产生了多个天体环绕不动的地球运转的思想，由此，亚里士多德（Aristotle，公元前 384 ~ 前 327 年）据此判定了关于宇宙结构的“地心说”。到了公元二世纪，亚历山大城的托勒密（C. Ptolemaous，约 90 ~ 168 年）第一个提出了天体运行的系统理论，称为“地心说”。大约在公元 150 年，他发表了《伟大论》一书，书中陈述了他“完善的”地心体系。他为了用匀速圆周运动说明行星的不规则运动，提出了三种改进的图形：本轮和均轮的组合、偏心轮以及等大轮。

托勒密根据他的理论计算可以预言行星的位置，而且在长时期内，他的预言和实测的位置相差在 2° 以内（即约小于月亮直径的四倍），这在当时已是相当好的结果了。

由于托勒密的地心体系和人们日常观察的认识相符合，又迎合了当时人们的心意，即人是生活在处于宇宙中心的地球上，而且能够相当准确地预测了行星的位置，以后又因为地心体系和基督教义相符合，在天文学上，托勒密的体系统治了差不多 1400 多年，直到 1543 年，哥白尼的日心体系向它提出挑战。

3 哥白尼的日心体系

其实，早在公元前三世纪，天文家阿里斯塔恰斯就已提出了日心说。他认为太阳是光的来源，应当处于宇宙的中心，而地球和其他行星都围绕它转动。然而，阿里斯塔恰斯并没有给出他的理论细节，对后来的天文学思想很少有影响。然而，在 16 世纪，日心体系在哥白尼的努力下开出了鲜艳的花朵。

哥白尼（N. Copernicus，1473 ~ 1543 年），波兰杰出的天文学家和数学家，同时也是一个受人尊敬的牧师和有才干的官员。早在克拉科夫大学学习时，哥白尼就对天文学产生了浓厚的兴趣，系统学习了天文学的基础知识，阅读了大量的天文学著作，并参与了一些天文学的观测和研究工作。这些都决定了哥白尼对天文学的毕生追求。

他仔细研究了托勒密的地心体系，认为托勒密的这种体系“看来既

不是充分完整的也不是令人充分满意的”。他对托勒密的地心体系有了形象的比喻，说托勒密就像是一位画家，从不同的地方临摹手、脚和人体的其他部位，每个部位都画得非常好，但组合起来，就是一个怪物，因为它们是如此的不和谐。

于是，他开始研究地球的运动，探索天体运动的规律，开始了同托勒密的“地心说”的较量。这是一场没有硝烟的战场，虽然对手的力量是那样的强大，但哥白尼从来就没有退缩过，而是勇敢地向当时最为尖锐也最前沿的问题提出了挑战。他仔细研究了大量资料，阅读了大量的古典著作，发现除了地心理论发展的同时，也有人提出了相反的意见——“日心地动”学说。哥白尼在前人的认识 and 理论基础之上，根据数学、物理和天文学的基本原理，并亲自进行了认真观测，对地球运动给出了科学的说明，创造了自己的“日心说”的体系。

1506年底到1507年初，哥白尼开始构思他的第一篇天文学论文《浅说关于天体运动的假设》，他把这篇论文寄给了老师、同学和熟知的天文学家。这篇论文简要地阐述了他的地动日心的基本思想，批驳了托勒密的地心说。

从1515年开始，哥白尼在《浅说》的基础上，开始撰写不朽著作《天体运行论》。在这部著作中，哥白尼讨论了宇宙的中心、地球的形状、地球月球和太阳的关系、行星的运行规律、地球的公转和自转等当时极为敏感也是极为棘手的问题。1533年，哥白尼终于完成了《天体运行论》的写作，但他并没有急于发表。一方面是因为手稿还要进一步的修改、补充，另一方面，作为神职人员，哥白尼比谁都清楚，他的“日心体系”不仅仅是推翻流行了一千多年的托勒密的地心学说，而且直接撼动了神权统治的基础，同时，这和一般人的感观印象是相反的，因而必将会遭到教会的迫害（布鲁诺就是为了捍卫哥白尼的日心说而被天主教会活活烧死在罗马鲜花广场）。对此，他有过彷徨和犹豫，但他从来没有真正后退过。在很多朋友的支持下，特别是在他的弟子雷蒂克



的关心、鼓励下，他毅然做出了将自己的著作公布于世的决定。但《天体运行论》的原著样本送到哥白尼手里时，这位老人已经奄奄一息，一个小时后就离开了人世。

哥白尼日心学说的出现，标志着近代自然科学的诞生。哥白尼《天体运行论》的出版被恩格斯称为“为自然科学借以宣布其独立并且好像时重演路德焚烧教谕的革命行为”，“从此，自然科学便开始从神学中解放出来，……科学的发展从此便大踏步地前进”。

4 第谷、开普勒和伽利略的贡献

第谷·布拉赫 (Tycho Brache, 1546~1601 年)，丹麦天文学家，出身贵族。他从小就喜欢天文学，阅读过托勒密的《伟大论》和哥白尼的《天体运行论》。在丹麦国王的资助下，他建立一座宏大的天文台的愿望终于实现了。第谷自己设计制造并不断改进观测装置，他的仪器都是大型的，而且安装在沉重而坚固的基础上或者固定在南北方向的墙上，这样就增大了仪器的稳定性，从而增加了观测的准确度。第谷的观测记录是一笔宝贵的财富，后来，第谷把他用毕生精力观测所得的大量资料全部留给了开普勒。

关于行星理论，第谷提出一个折中方案，他设想地球在宇宙的中心，是不动的太阳围着地球运动，而其他行星都绕着太阳运动，但他的理论受到托勒密派和哥白尼派两方面的反对，所以在天文学发展上没有起过什么作用。

开普勒 (J. Kepler, 1571~1630 年)，德国人，擅长数学，信奉哥白尼的日心说，1600 年受聘到布拉格天文台作了第谷的助手。翌年第谷逝世，他把毕生观察的记录都留给了开普勒，但开普勒和老师有不同的兴趣，第谷注重并善于观测，而开普勒则更醉心于数学和理论思考。开普勒根据第谷的观测结果，经过多年的努力，终于在他于 1609 年出版的《新天文学》一书中提出了支配行星绕日运动的两个规律：行星绕日运



动的轨道为一椭圆，太阳位于其中一个焦点上，即开普勒第一定律；太阳和行星的连线所扫过的面积和时间成正比，即开普勒第二定律。开普勒并没有满足已取得的成就，他又花了几年的时间找到了各行星运行周期及与太阳的平均距离的关系，发表在1619年出版的《宇宙的和諧》一书中，即开普勒第三定律：行星运行周期的平方与它们到太阳的平均距离的立方成正比，也叫谐和定律或周期定律。

开普勒定律准确地描述了行星运动的规律，成为天空世界的“法律”，后世称他为“天空立法者”。1627年他出版了他的最后著作《路德福星表》，它的完备和准确超过了前人，在以后很长一个时期中，一直被天文学家和航海家广泛采用。

最后简要的说一下伽利略（Galileo, 1564~1642年）。他用自己的望远镜观察了木星，发现了它周围有四颗小“子星”——卫星围绕着它旋转。他马上把这些子星在木星周围的运动和哥白尼的行星体系相比较，指出它们是类似的现象。这样，他就使人们看到了一个太阳系的小模型，他以此为根据更有说服力地宣扬哥白尼地日心体系。

从哥白尼时代到开普勒、伽利略时代，自然科学发展步伐大大地加快了。前人的努力为全面解决天体运动规律铺好了道路，这时牛顿出现了。

5 牛顿的万有引力定律

伊萨克·牛顿（Isaac Newton, 1642~1727年）在伽利略逝世那一年的圣诞节，出生于英国北部林肯郡的一个农民家里。1661年在舅舅的支持下，18岁的牛顿考入了剑桥大学三一学院。1665年，牛顿从剑桥毕业，并留在学院继续搞研究。这年6月，瘟疫流行，牛顿转回家乡。趁着这个闲暇，他开始考虑一个重大问题：是什么力量拖着行星在轨道上运行？

在那个时候，当时的天才物理学家已经猜测到了支持行星运动的力是引力，这种力和物体的距离存在着平方反比的关系，但是没有人能够证明它，也没有人能够证明在这种力的作用下，行星的轨道就应该是开普勒第一定律中所说的椭圆形轨道。牛顿在苦苦地思考这个问题，当时也有另外三个人正在努力解决这个问题，他们是英国科学家胡克、哈雷

和雷恩。胡克是英国著名的物理学家和天文学家，在当时的科学界已经名声卓著。哈雷是英国天文学家兼物理学家，著名的哈雷彗星就是以他的名字命名的。在天文学上，他还第一个发现了恒星的自行现象。雷恩是当时最知名的建筑师和数学家，他有极敏锐的数学头脑，也经常思考行星运行轨道的问题。三个人为这个问题展开了激烈的讨论，因而有了物理学史上有名的“咖啡馆的打赌”。但是在规定的时间内，三个人都没有能够解决这个问题。这时，哈雷等得不耐烦了，决定去向牛顿请教。他亲自到剑桥的三一学院，向牛顿提出了问题：“先生，当行星受到太阳以和距离的平方成反比的力吸引时，它的运行轨道应该是一种什么样的曲线呢？”



“椭圆！”牛顿毫不犹豫地回答。

“你是怎样知道的呢？”哈雷惊喜地问道。

“计算出来的。”牛顿简单地回答。

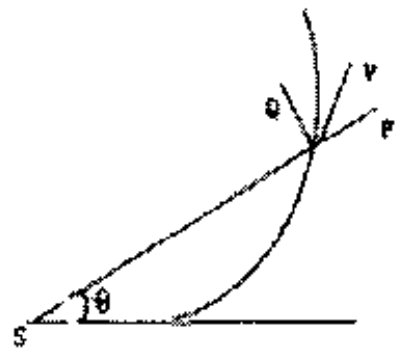
哈雷要求看一下牛顿的计算稿，但牛顿已经记不清楚原稿放在什么地方了，他一时找不到，但牛顿答应在三个月内把计算稿给他寄过去。

其实，牛顿解决了这个问题。他通过严密的计算，其精确的结果已经证明了吸引苹果、石头落向地面的重力和地球吸引月球、太阳吸引行星的力是同一种力，都完全符合平方反比定律。在这个时候，他也证明了在平方反比的引力作用下，行星的轨道就是以太阳为一个焦点的椭圆。这样，他就为开普勒三大定律提供了严密的数学证明。但是这位天才的学者只是把它放在抽屉里，并没有把这个重要的结果拿出去发表，直到哈雷向他请教这个问题。牛顿将题为《运动论》的论文副本给哈雷寄了过去，哈雷读后兴奋异常，他充分认识到这篇论文的重要价值，就再次到剑桥说服了牛顿公布这份重要的研究成果。

就这样，牛顿发现了开普勒第三定律中隐藏着的平方反比的法则，并解决了行星椭圆轨道的问题。牛顿在《自然哲学的数学原理》中写道：“在任何一曲线上运动的质点，如果它的半径指向一静止的或作匀

速直线运动的点，且绕此点扫过与时间成正比的面积，则此质点必受有指向该点的向心力的作用。”“如果环绕周期与半径的立方成正比，则向心力与半径成反比。”之后，牛顿在《论物体在均匀介质中的运动》一文中定义了质量是物质的量，并由体积和密度共同度量，并探讨了质量和力的关系，得出了“力等于质量乘以加速度”的规律，即著名的牛顿第二定律。1685年，牛顿还证明了均匀实心球体的引力等于球心处一个质点的引力，即可以把球体的质量都集中在球心上，这样就解决了有效距离的问题^①。有了这个方法，牛顿就把太阳、行星、月球以及地面上的物体，不管它们的体积多大，都简化成了一个质点来处理，这样不但简化了问题，而且使得计算更加精确了。

至此，牛顿就由特殊到一般，从对天体运动规律的具体分析中，得出了普遍的万有引力定律。这一定律可表述为：任何两个物体（质点）之间都相互吸引，其吸引力的大小和它们的质量的乘积成正比，和它们之间的距离的平方成反比，万有引力的方向是在沿两个物体的连线方向上。



下面根据理论力学的基础知识，由开普勒行星定律导出万有引力的表达式。

设行星 P 绕日 S 运动，二者均看作质点，选日心坐标系为参考坐标系，建立极坐标描述行星的运动。设作用于行星上的径向力为 F ，横向力为 Q ，行星的运动微分方程为：

$$m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = F \quad (1)$$

$$m(r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta}) = Q \quad (2)$$

由开普勒第三定律，行星的面积速度为常数，即

$$\dot{S} = \frac{ds}{dt} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\frac{1}{2} r \cdot r \cdot \Delta \theta}{\Delta t} = \frac{1}{2} r^2 \dot{\theta} = \text{const} \quad (3)$$

^① 在计算时，会遇到这样的问题：地球吸引其表面附近的一个物体或是月亮时，它们之间的有效距离应该怎样计算？是按物体到地面的距离，还是到地心的距离或是其他一个别的点。牛顿就解决了这样一个问题。

由上式对时间求导，可得：

$$Q = 0 \quad (4)$$

由此可知，行星只受到来自太阳的径向力的作用。

根据开普勒第一定律，行星的轨道为一椭圆，太阳位于一个焦点上，由此，行星轨道的极坐标方程为：

$$r = \frac{P}{1 + e \cos \theta} \quad 0 < e < 1 \quad (5)$$

$$\dot{r} = \frac{he \sin \theta}{P}$$

$$\ddot{r} = \frac{he \cos \theta \cdot \dot{\theta}}{P} = \frac{h^2}{r^3} - \frac{k}{r^2}$$

上式中 $k = \frac{h}{p}$

$$F = m(\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) = -\frac{km}{r^2} \quad (6)$$

设太阳质量为 M ， $k = GM$ ，则 (6) 式可写为：

$$F = -\frac{GMm}{r^2} \quad (7)$$

式 (7) 即为万有引力的表达式。现在公认的 G 值是

$$G = 6.670 \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{s}^2$$

6 海王星的发现

1781年，英籍德国人威廉·赫舍尔 (W. Herschel, 1738~1822年) 发现了天王星，这在当时被人们认为是距离太阳最远的行星了。之后，人们发现对天王星的运动的观测与理论计算的结果之间存在着较大的偏差，而且这种偏差不能用距它最近的土星和木星的摄动作用给出解释。此时英国的亚当斯 (J.C. Adance, 1819~1892年) 和法国的勒维烈 (U.J. Leberrier, 1811~1877年) 同时独立地预言了海王星的存在。亚当斯首先完成了计算，并写信给当时的英国皇家天监爱勒，爱勒却对此置之不理。勒维烈在稍晚的时候也独立完成了计算，并把他根据牛顿定律计算的未知行星何日何时在什么地方出现的结果写信告诉了德国天文学家加勒。加勒在接到信的当天夜间，就在离所指处的黄道点相差 $52'$ 处

发现了一颗前所未知的新星。第二天晚上又观察到这颗星相对于恒星背景有了移动。这正是一颗行星！不久，加勒兴奋地写信告诉勒维烈：“你给我们指出位置地行星是真实存在的！”这就是规则地对天文星产生摄动作用的海王星。

海王星的发现，不仅证实了牛顿万有引力的正确性，而且也完全证实了哥白尼太阳系学说的真实性。

1930年，根据类似的计算，天文学家洛维尔（P. Lowell）又发现了一颗行星——冥王星，它距太阳比海王星还远。

7 结 语

自从牛顿提出了万有引力定律，人类对宇宙的认识进入了一个新的阶段，即从单纯的观测、描述天体的运动深入到研究这些运动的内在原因。万有引力的提出是人类历史上开始把宇宙空间作为实验基地进行研究所取得的重大成果。之后，自然科学便以前所未有的速度发展起来了。

参考文献

1. 严峰，李国秀，照亮宇宙的智慧之光——牛顿，合肥：安徽人民出版社，2001
2. 龚时中，牛顿传，武汉：湖北辞书出版社，1998
3. (美) 科恩著，颜锋等译，牛顿革命，南昌：江西教育出版社，1999
4. 张三慧，从伽利略到牛顿，北京：北京出版社，1988
5. 申先甲，牛顿的力学及其哲学思想，北京：人民出版社，1975

永动机漫话

武际可

(北京大学力学与工程科学系, 100871)

永动机的探求者们是想从虚无中得到些什么 (*The seekers after perpetual motion are trying to get something from nothing.*)

——牛顿

【摘要】 本文简要回顾了永动机的历史, 并且说明至今还有不少永动机的痴迷者和借永动机行骗的人。

【关键词】 永动机, 能量守恒, 骗子, 永动机痴迷者

尽管早在 19 世纪中叶以前, 能量守恒定律和热力学第二定律就已经发现, 说明发明永动机是不可能的, 而且任何受过中等教育的人, 都会熟悉这些定律。可是直到现如今, 在国内或国外的报章杂志上, 还偶尔有关于永动机痴迷者的报道。

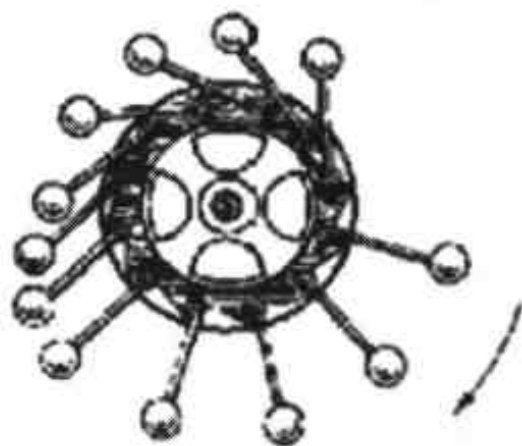
1999 年 8 月, 湖南桃源县仅有初中文化的彭清满, 以自己制成一台“永动机”模型, 以需筹集开发资金为由, 伙同刘成善、冯皎月、刘志明成立“高科技筹款领导小组”, 彭自封组长。百余群众上当受骗, 将 10 余万元交给他们。结果四农民以诈骗为由进了看守所。据 2000 年美国报道拉斯维佳斯的 Michael J. Marshall 组成了 QSFG 公司, 声称拥有一种不用燃料启动的发动机, 有 64 个国家请他去设厂, 并承诺超过 17 亿美元的巨额资助。结果无非是一场骗局。

现今, 积极从事永动机的只有两种人: 一种是文化程度低的人, 这种人对现代科学几乎一无所知, 他们的科学文化水平不会到初中程度; 另一种人是骗子, 他们明知道永动机是做不成的, 为了骗财物, 推销他们的所谓发明。后一种人的活动范围, 主要是第一种人, 只有那些科学文化程度很低的人才会上当受骗。

不管怎么说，随着科学文化的进步和普及，现今积极于永动机的人是少多了。要知道，在历史上，研究永动机曾经时髦一时，特别在西方世界在发展现代科学技术的过程中，有成千上万的人卷入其中。为了说服那些现今对永动机还抱有幻想的人，我们不妨回顾一下永动机的兴衰历史。

据说永动机的概念发端于印度，在公元 12 世纪传入欧洲。

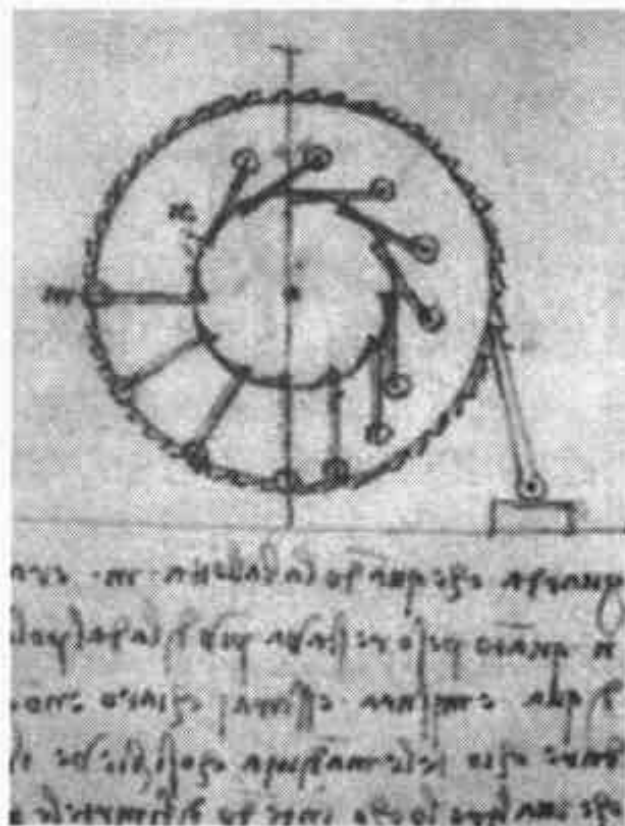
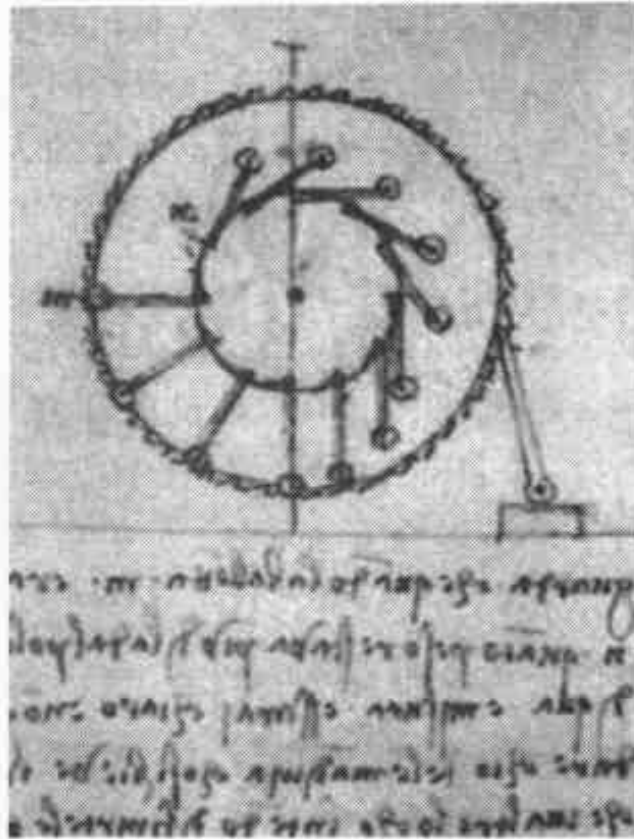
据记载欧洲最早、最著名的一个永动机设计方案是 13 世纪时一个叫亨内考 (Villard de Honnecourt) 的法国人提出来的。如图所示：轮子中央有一个转动轴，轮子边缘安装着 12 个可活动的短杆，每个短杆的一端装有一个铁球。



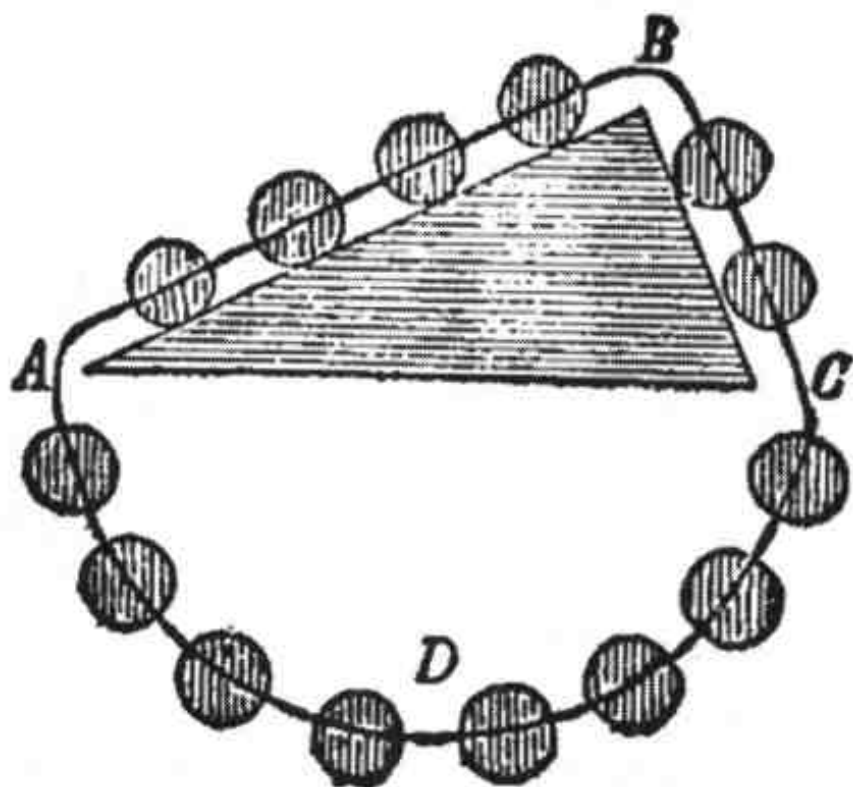
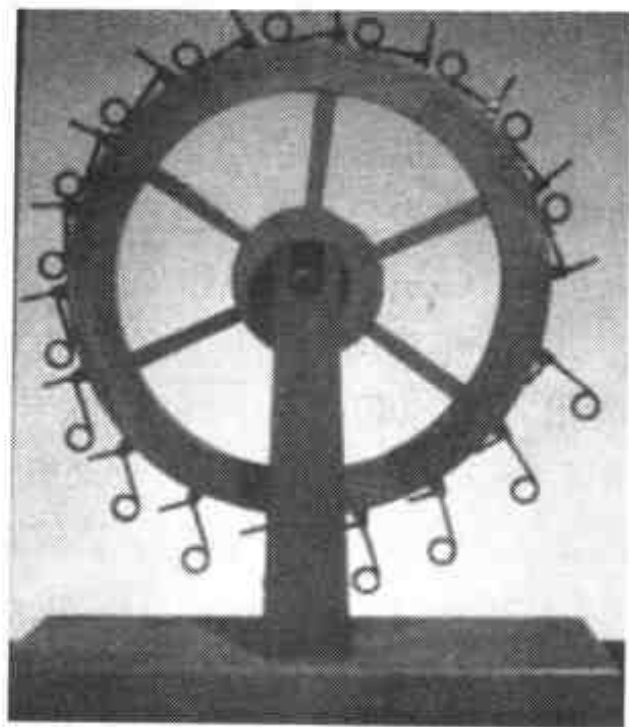
文艺复兴时期意大利伟大学者达·芬奇 (Leonardo da Vinci, 1452~1519) 曾经用不少精力研究永动机，下面的两幅永动机的草图就是从达芬奇的笔记中复制的。尽管达芬奇花了不少精力于永动机，并且自己对手去做永动机，可贵的是他最后得到了永动机不可能的结论。再下面的模型是达芬奇的一个为了论证永动机不可能的实验。

与达芬奇同时代还有一位名叫卡丹的意大利人 (Jerome Cardan, 1501~1576)，他以最早给出求解三次方程的根而出名，也认为永动机是不可能的。

关于永动机的不可能，还应当提到荷兰物理学家司提芬 (Simon Stevin, 1548~1620)。16 世纪之前，在静力学中，人们只会处理求平行力系的合力和它们的平衡问题，以及把一个力分解为平行力系的问题，还不会处理汇交力系的平衡问题。为了解决这类问题，人们把他归结于解决三个汇交力的平衡问题。通过巧妙的论证解决了这个问题。假如你把一根均匀的链条 ABC 放置在一个非对称的直立 (无摩擦) 的楔



形体上，如图所示。这时链条上受两个接触面上的反力和自身的重力。恰好是三个汇交力。链条会不会向这边或那边滑动？如果会，往哪一边？司提芬想像把楔形体停在空中，在底部由 CDA 把链条连起来使之闭合，如下页图，最后解决了这个问题。在底部悬挂的链条自己是平衡



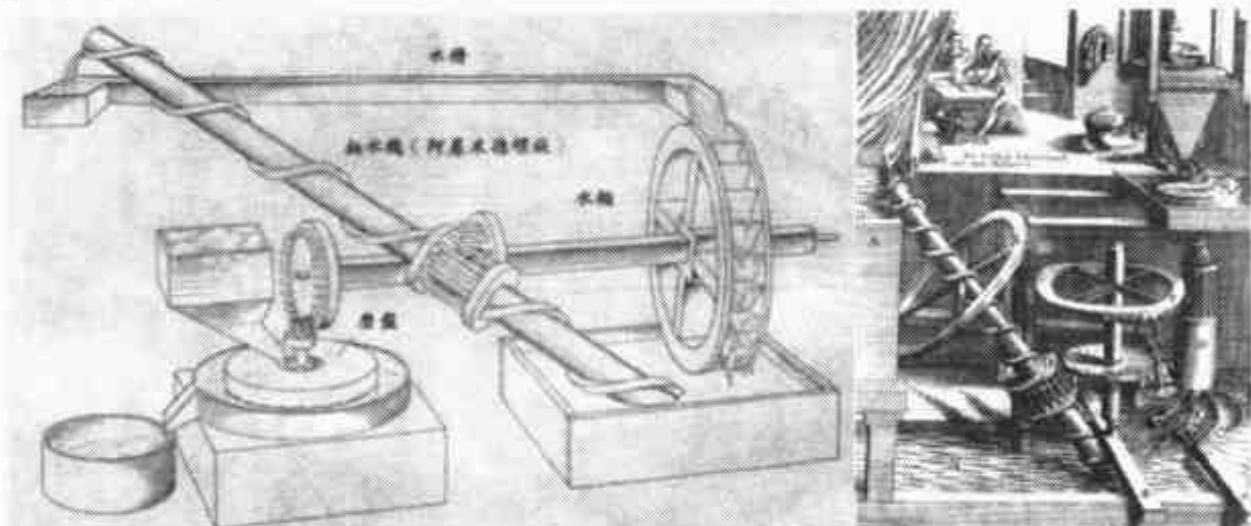
的，把悬挂的部分和上部的链条连起来，斯提芬说：“假如你认为楔形体上的链条不平衡，我就可以造出永动机。”事实上如果链条会滑动，那么你就必然会推出封闭的链条会永远滑下去；这显然是荒谬的，回答必然是链条不动。并且他由此得到了汇交三力平衡的条件。他觉得这一证明很妙，就把上述下图放在他的著作《数学备忘录（Hypomnemata Mathematica）》的扉页上，他的同辈又把它刻在他的墓碑上以表达敬仰之意。汇交力系的平衡问题解决，也标志着静力学的成熟。

随着对发明永动机不可能的认识，一些国家对永动机给出了限制。如早在 1775 年法国科学院就决定不再刊载有关永动机的通讯。1917 年美国专利局决定不再受理永动机专利的申请。

尽管如此，永动机的发明者仍然是前赴后继，顽强地奋斗着。据英国专利局的助理评审员 F. Charlesworth 称：英国的第一个永动机专利是 1635 年，在 1617~1903 年英国专利局就收到约 600 项永动机的专利申请。这还不包含利用重力原理之外的永动机专利申请。而美国在 1917 年之后，还是有不少一时看不出奥妙的永动机方案被专利局接受。

下面我们来列举一些历史上比较著名的永动机案例。

英国医生和哲学家傅勒德 (Robert Fludd)，也是欧洲最后一个著名的炼金术士，下图是他 1618 年所设计的一个典型的永动机：它一方面利用水的重力推动水轮，以作工 (磨麦子)，一方面又将水再抽到高处，以作循环应用。



Jon Wilkins (1614~1672)，英国皇家学会的成员，英国 Chester 地方的主教，后来得到 Wadham 学院的领导职位，在科学技术上有许多贡献。1670 年他提出用化学力、磁力与重力三种方式去造永动机。他是最早提出在利用重力之外构造永动机的学者。当然他在永动机上的所有努力都是以失败告终。

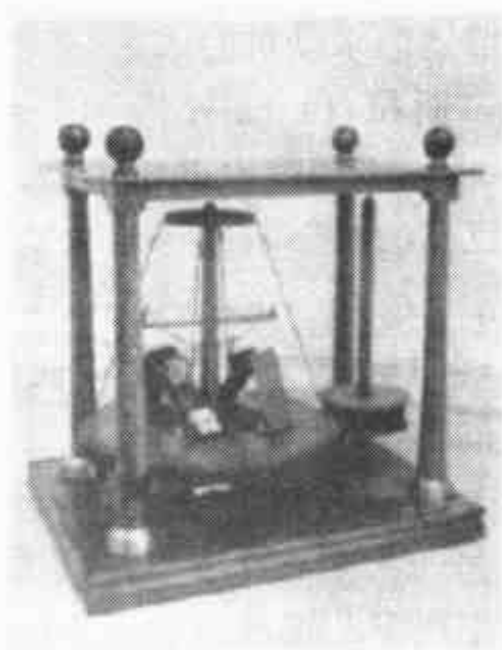
能量守恒定律的发现者之一焦耳 (James Prescott Joule, 1818~1889) 也曾经是一位永动机的痴迷者。他年轻时，正是“永动机热”席卷欧洲的时代，焦耳也狂热地追求永动机，几乎消磨了他全部的业余时间。失败引起了焦耳的深思，他吸取了教训，终于找到了热功当量，为建立能量守恒定律作出了杰出的贡献。这个定律好比一块路标，插在寻

找永动机的十字路口，警告迷途人：此路不通！据说焦耳还现身说法，语重心长地告诫那些仍旧迷恋永动机的人说：“不要永动机，要科学！”

在 1712 年德国人白斯拉（Johann Bessler 或称为 aka Orffyreus，1680—1745）研究了 300 种不同的永动机模型，并宣称他发现了永动机的秘密，从而得到了巨额的投资。他将他的发明用拉丁文和德文写了一本书，说是奉献给上帝、公众、学习的人和作为发明家的他自己。他建造了一部可以自行运转的机器，到 1717 年他赢得了数以千计的人的信服，其中还有例如莱布尼兹这样显赫的人。这部机器通过了在严格的监视下的两次试验，一次是在 1712 年 10 月 9 日，由当地 12 名著名人物组成的委员会审查；另一次是在 1717 年 11 月 10 日到次年的一月 4 日，在更为著名的人们监视下，连续运转了 54 天。不过机器总是用湿布紧紧地蒙上，被他严格看守，其内部秘不示人。当时公众要求他公布技术秘密，他要价是 25000 英镑，这在当时是一个天文数字，由于无人能出得起这笔巨资，加以许多人的冷嘲热讽，说他是骗子，最后，他将所有的模型都打得粉碎，把他的秘密带进了坟墓。有关白斯拉的永动机，迄今还有人收集资料进行研究，有的人认为他是骗子；有的人则认为他是一位天才的发明家，猜测他利用了迄今未知的储能方法。

在 1812 年，美国费城有一位名叫李德黑法（Charles Redheffer）的人，称有一种无需能源的永动机，并且做成了一个模型，对好奇的市民们展示。他还向市政府申请经费去建造更大的模型。1813 年 1 月 21 日，市政府派了 8 位专员来考察李的永动机。这些人注意到李的机器中的齿轮有反方向磨损的痕迹，推测该机器一定是另有一部机器在推动。于是便令当地的一位名鲁肯斯（Isaiah Lukens）的工程师依同样的原理也做了一部“永动机”，而且这部机器的能量来源藏匿得更为巧妙（鲁肯斯的机器迄今仍被费城的公共事物机构所收藏，如下图）。然后把他展示给李德黑法。

李德黑法看到他的把戏被揭穿，便带着他的把戏来到纽约。1813 年，在纽约，他又展示他的机器，又吸引了许多人。这时有一位细心的机械工程师叫福尔顿（Robert Fulton），他注意到这部“永动机”转动时有微小的晃动，他推论机器一定是由一个隐藏了的曲柄，有什么人不时摇动曲柄以致引起机器晃动，剩下的问题是去揭开隐藏的曲柄和它的



操纵者。于是福尔顿就向李德黑法挑战说，他可以揭穿机器能源的秘密，并且说如果没有揭穿，则甘愿赔偿一切损失。李德黑法只好同意。福尔顿马上拆去靠近机器墙壁上的几块板，一根很长的绳子被显露出来。福尔顿顺着绳子来到二楼，在那里他发现一个有胡子的老头，一只手拿着面包在吃，另一只手在转动曲柄。随后李德黑法便逃之夭夭了。^[4,5]



John Worrell Keely

美国费城的机械师吉力 (John Worrell Keely, 1837 ~ 1898)，于

1872年称发明了一种生产以太能的原理。他以一部在水上工作的机器，旅行展出，愚弄了许多科学家。他征集了约50万美元的投资，这在当时的确是一笔巨额的资金。他的“永动机”动作是靠一根藏匿了的通向压缩空气的管子。由于他的机器伪装得十分巧妙，再加他凭借巨额的投资，成了纽约吉力摩托公司的老板，很有社会地位，所以至今还有不少对他的技术的信仰者。^[6]

说到中国人中永动机痴迷者，我想引用有关的回忆：“淮海战役中被俘的兵团司令黄维，在担任国民党联勤副总司令时，便听人说，全世界的科学界都认为迄今还没有发明出来的，是一种不需要使用任何能源的‘永动机’，如果能创造出来，则再也不会存在什么‘能源危机’，便给人类带来了无穷的幸福，永远为人类所敬仰。”从那时起，这位拿枪杆子出身的将军，便下定决心，想突破全世界所有科学家没有发明出的这种不需用任何能源作动力的“永动机”为人类造福。这种愿望虽好，但没有科学基础的人，想造出全世界的科学家都没有能制造出来的东西，真是谈何容易。可是，他始终坚决相信，“只要功夫深，铁杵磨成针”，“有志者事竟成”。所以，他在被俘前没有能完成的“伟大事业”，被俘后，还是专心致志地钻研。这种精神实在可贵。但泼冷水的也很



沈醉（左）和黄维 1986年摄于全国政协语言史
办公室院内

多，他却毫不动摇。战犯集中改造后，他更认为有条件可进一步研究，并绘制出图样，想进行试制。管理人员认为，在改造期间，是以学习与

改造思想为主，这些似有点“不务正业”，而不表示支持。他则不管在任何时候、任何场合都把自己这一愿望提出来，并给这种还没有发明出来的机器定名为“黄维永动机”。他认为只要能制造成功，就可以惊动全世界，个人自由，不请自来。所以，他把学习等视为多余的、没有必要的事，不仅在学习发言中，不厌其烦地反复谈他的“永动机”，而且在外单位找他写一些临时性“外调”材料，询问他解放前的许多情况时，在他写材料的纸上，也是写上他坚决请求支持他创造“永动机”的问题。管理所的负责人拿他实在没有办法，只好同意他的请求，把他设计出来的图纸，送到中国科学院去审查研究。几个月后，得到的答复是：“经过反复实验，这种机器图纸，根本不可能达到不需要任何能源而能自己永远转动的设计要求。”很多人便认为既经过科学院鉴定都认为不可能，不要再搞了。他还是认为负责鉴定的人不懂科学，他的设计是可以实现的。管理所的领导便组织所有战犯和他辩论，他仍不服，还是坚持要继续研究，肯定可以制造出来。由于他始终不放弃他这一主张，而把学习改造放在一边，所以第一批特赦时，虽然他有许多优越条件可以争取早日出去，却没有轮到他。但他满不在乎。当时台湾还是陈诚的势力占优势，他是陈诚的亲信高干之一，他的同事和部下，都在台湾军事方面负重要责任，他的特赦可以起一些影响，而他却坚决表示决不改变他这一志愿，所以几次特赦都没有他。直到1975年，全部释放时，他也得到了特赦。可惜的是，他特赦后有了很多良好的条件，但“黄维永动机”还没有制造出来。全世界的“能源危机”也正在一天天加深，不知他作何感想！出狱后，黄维任全国政协常委，做了许多有益的工作。尽管社会活动繁忙，但他也没有放弃“永动机”，继续研究。后来，周恩来总理得知后，让他把“永动机”的模型拿过去看了。1979年6月，黄维在政协分组会议上，就开发“重力”能源做了长篇学术报告。会议通过决议，要支持黄维提出的科研项目。后来，黄维年迈无精力搞科研，将研制“永动机”的项目交给在江西机械厂当工程师的儿子继续他的目标进行研究。”可以想像，黄维的努力也会像历史上千千万万的永动机痴迷者一样，不会有任何结果。

有意栽花花不发，无意插柳柳成荫。这大概是科学发展的一般规律。科学往往得出和大多数人探求方向相反的结论。探求了三百年的以太，在20世纪初，以太不存在而告终。追求对欧几里得几何中第五

公设的证明，进行了几千年，结果是以 19 世纪非欧几何的诞生而结尾。数百年寻求永动机的热潮，也以能量守恒定律和热力学第二定律的确立而逐渐降温。

我国物理学家冯端等说：“如果要对能量守恒定律的发现论功行赏的话，除了要为那些人所共知的有杰出贡献的科学家树碑立传外，还要建立一座无名英雄纪念碑，其上最合适的铭文将是：‘纪念为实现永动机奋斗而失败的人们。’虽则他们的奋斗目标是荒谬的，但如果没有他们的彻底失败，就不能建立能量守恒定律。这样他们饱受冷嘲热讽的无效劳动才得到些许报偿。”

这段话，对于能量守恒定律建立之前的永动机痴迷者来说，也许是合适的。但是在能量守恒定律建立之后，还痴迷于永动机，就非但没有任何功劳可言，而且是对人力物力的无谓浪费，是无知可笑的行为。至于那些明知永动机做不成，披着科学外衣借以敛财的骗子，则应当坚决打击，并绳之以法。时至今日，还有不少永动机的痴迷者和借永动机行骗的骗子，说明对科学基本原理的普及和教育是一项永恒和艰巨的任务。

（致谢：本文受到国家自然科学基金 10172002 项目的资助，特致谢意。）

参考文献

1. 竟扬言发明“永动机”四农民冒充科学家沦为阶下囚. 中国新闻网, 2002 年 09 月 07 日
2. DAN BELL. Inventor ready to display new motor. Neighborhood Newspaper, Saturday, November 25, 2000
3. Bessler Wheel.com
4. Angrist, Stanley W. Perpetual Motion Machines. Scientific American, 218 (January, 1968): 114~22.
5. Ord-Hume, Arthur W.J.G. Perpetual Motion: The History of an Obsession. New York: St. Martin's Press, 1977
6. Eric's History of Perpetual Motion and Free Energy Machines. <http://www.phact.org/e/crack.html>; <http://www.svpvriil.com>
7. 金源著. 崔泽译. 奇缘——一个战犯管理所长的回忆. shuku.net
8. 冯端, 冯步云. 嫡. 北京: 科学出版社, 1992

计算力学有限元集成程序系统应大力发展

钟万颢

(大连理工大学力学系, 116023)

【摘要】 计算力学有限元集成系统是关键技术突破和系统集成跨越的关键。突破封锁一定要自力更生搞好有限元集成系统, 将科研成果配套成龙。科学计算应有相应的评价标准, 等。

【关键词】 计算力学, 有限元集成系统, 自力更生, 评价标准

借力学史与方法论研讨会召开之际, 谈一些看法。

前些日子, 科技部、教育部、科学院、工程院、自然科学基金(以下简称五部)联合发文《关于改进科学技术评价工作的决定》^[1], 又看了科学院的 2003 科学发展报告^[2]与高技术发展报告^[3], 关系到国家科学技术的发展, 确实需要郑重考虑。我这里就计算力学, 尤其是有限元大规模集成程序系统作一些呼吁。

计算力学致力于研究运用现代计算技术求解工程和科学中的力学以及与力学相耦合问题的理论、算法和软件。当今计算技术对社会的科技进步和经济发展已经成为不可或缺的基础。计算、实验及理论已经成为科学的三大支柱。计算力学在推动应用力学的发展中也起着越来越重要的作用。钱学森指出^[4], “总起来一句话: 今日的力学要充分利用计算机和现代计算技术去回答一切宏观的实际科学技术问题, 计算方法非常重要; 另一个辅助手段是巧妙设计的实验”。计算力学已经成为力学工作者通向应用的桥梁, 是力学和高新技术的结合点, 也是力学发展的主要方面之一。

看看科索沃、伊拉克战争, 就可体会到我们的差距。这是在科技总体水平上的差距, 不能回避的差距。这不是鉴定一个什么“世界先进水平”之类所能掩盖的。美国在空军和精确制导武器上占了决定性的优

势，可谓一支独秀。这是影响世界大局走向的因素。当然，这与计算力学，动力学与控制等应用力学方面的工作密切相关。中国虽然不称霸，但也决不能让这种落后局面长此以往，要靠自己的力量尽快赶上去。

路甬祥指出^[3]：“科技创新能力是国家安全保障能力的基础。”中国科学院在 2003 高技术发展报告航空动力技术部分的一段指出：“航空动力是一个国家产业技术水平和综合国力的重要标志之一，也是发达国家重点发展的高技术产业和对外严密封锁的核心关键技术。”而“没有独立自主的、发达的航空工业，就很难赢得军事、政治、经济、科技强大的社会主义大国地位。1939 年，苏联政府专门开会作出决定，要钱给钱，要人给人，千方百计优先发展航空发动机。20 世纪 50 年代起，法国政府高度重视航空动力的自主研制，为支持民族工业的发展，宁愿使用自己比较落后的发动机，也不去购买和装备比较先进的美国发动机。”他们都做得很成功。空中客车是波音的强劲对手，而俄罗斯战机也不是吃素的。

而我国却长期在测绘仿制的圈子里徘徊。基本上是仿制或采购国外的机种，仍然处于受制于人的被动局面。陷入不断引进、不断测绘仿制的恶性循环，教训深刻，应引以为鉴。

禁运！什么东西是禁运的，是那些 SCI 杂志吗？不是，这些杂志不禁运。但例如有限元大规模集成程序的关键模块，禁运！你不是依靠他们的程序吗，卡住你这些重要模块，捆住你的手脚，谅你翻不了身。难道我们能无动于衷吗？当我们陶醉在 SCI 的统计中时，差距就越来越大。据说中国的 SCI 已经超过俄罗斯，真能认为中国的科技水平超过俄罗斯了吗？这些问题至关重要，应当认真反思。

在技术领域，应用研究与高技术创新要面向国家战略需求，实现关键技术突破和系统集成的跨越^[3]。大家知道，一支部队一定要有严密的组织，一盘散沙没有多少力量。堡垒从内部被攻破，就是其组织涣散。有限元集成系统的作用就在于将分散的研究成果集成。否则这些研究成果就是分散的，是散兵游勇，不集成就发挥不出效果。外国人有集成系统，他们倒可以用得上我们的研究成果。

美国宇航局非常重视应用力学有限元。有限元就是从美国航空业开始的。大规模有限元程序系统 NASTRAN 也是 NASA 投资的。已经发

展成为宇航业的设计研究主要工具之一。他们深知有限元并不仅仅是一门学科，研究研究，发表一批论文，显示一下先进水平就行了，而是用于在战略上占有制高点的重要一环。1988年老布什当选总统，他提出的总统科技国策是 HPCC (High Performance Computing and Communication) 高性能计算及通讯。立意于在至关重要的数学方面保持领先地位。在美国，对数学的理解比中国广泛得多，科学与工程计算，有限元程序系统，计算力学等都包含于其中。这些年来美国武器一支独秀，效果明显。抓基础，他们从来没有放松过。

抓基础看起来一时没有效益；不抓，到需要用时就来不及了。所谓书到用时方恨少，于是只好进口。顾客是皇帝吗，禁运味道如何，就这样长期买下去吗？

我们太在意 SCI，热衷于什么水平之类的报告，却不注意怎么才能真正用上。我国对待计算力学可不当会事，大规模有限元集成系统受到冷遇，与美国的重视成鲜明对照。导致研究成果无法用好。却热衷于鉴定会的什么“世界先进水平”之类的词句宽宽心。或者就是单纯的经济效益。对于应用基础工作关注不够。变成程序系统靠进口。美其名曰与国际接轨，人家承认的结果是人家给你多少，你就只会多少。真正重要的程序模块，尤其是涉及他们重大经济利益和国防实力对比的核心软件，则一律禁运！长此以往，差距只会越来越大，还谈何赶超呢？

程序系统出不了多少论文，显示度不够，从小处说，影响个人上岗提升；从大处说，无助单位评比扬名。但这是工程应用不可缺少的基础关键环节。我们就自甘如此被欺负吗？现在可悲的情况是，只有用进口程序解决不了的硬骨头，才回头找自己去啃。此等体制实在太短视。没有自己的体系，永远受制于人，何日才能翻身喔。

似乎抓基础就看 SCI，这是一个很大的误会。基础不是为了给人家看的。可以打一个比方，集成程序系统就好像是基础工程，埋在地下看不见，看得见的是上面的漂亮建筑。基础没有做好，理论纵然好看，却不能充分发挥其效能。只有打好基础，方能将各种理论用上。

这么多世界先进水平的成果，都是假货吗，不是。有些工作确实很有水平，但很难发挥，因为未曾“系统集成”。“我们引进了许多人了，一个个都很好，但是一个一个好像电线竿子那样插在稻田里，互相之间

联系比较少，没有形成群体的力量。”^[2]可为何不集成呢。

科学计算已经同理论与实验共同构成当代科学研究的三大支柱^[5]。历史上有限元程序系统在科学计算方面是一马当先的，但在我国却受到不公正对待。有限元程序系统出不了多少论文，却有大量的艰苦工作，这可是工程应用不可缺少的基础环节呀。

是中国人水平不够，不会研制大规模有限元集成程序系统吗？绝对不是。我就是干这一行的，当然能。可惜正如辛弃疾词云：“凭谁问，廉颇老矣，尚能饭否。”我已在望眼欲穿中步入古稀。我国许多人的努力也就这样付诸东流了。是政策的冷漠，放任不顾，拖垮的。基础看不见，显示度不好，SCI上不去，总挨贬，谁做谁吃亏。在这种现状下，岂能健康发展。

总算还有个别大学仍在坚持搞有限元集成程序系统。这能算健康发展吗？这是苦苦支撑。虽然如此，在某些重要领域已经具有突出成绩，比进口系统的性能毫不逊色，甚至更好，所以还能苦苦支撑。现在热衷的报账评价，令人哭笑不得。有限元大规模程序系统解决了问题，并为工程所采用。却被说成‘没有实验’。他们懂吗？去软件公司参观，只看见计算机吧。我们做的实验，用户是不相信的。一定要用户自己做的实验与我们的计算结果相符，方能接受。要买多少台材料试验机来充门面吗？Zienkiewicz那里很重视对比实验结果，不过都是与用户的实验结果来对比，他们自己不做实验。用对这个行业根本不合宜的规则来评价，就从根本上将计算给贬了。在这种环境下苦苦支撑，其难可知。许多家本来很有前途的国产程序系统，拖垮了。不是中国人笨，而是政策不到位。总算高校还有些“傻瓜”在苦苦支撑，应特别珍视。学术带头人与科学帅才要立足于在国内科技创新实践中加强培养^[3]。要依靠这些苦苦支撑的“傻瓜”搞上去。

我国好像很希望科研成果早日应用。但从研究到发挥实效有许多环节。工程师的依据是数据。理论再高明，不给出数据人家怎么用。当前这套SCI评价体系，岂能管你应用。大规模有限元集成程序系统对应用力学的重要性可想而知。不然人家为什么还禁运。用SCI来评价计算力学大规模有限元集成程序系统，太片面了吧。

什么科技课题应当抓好呢？其实很简单，什么东西禁运，就应当抓

什么。要自力更生，着重抓，以突破封锁。一定要抓好自己的大规模有限元集成程序系统。这还不清楚吗？外国人很明白怎么卡住你，他们可是专家。他们不会卡你的 SCI，他们会鼓励你干 SCI。

时至今日，计算力学程序系统已经成为各种理论通向应用的桥梁。力学界在历史上第一次向工业界提供了统一求解很多类型问题的方法和工具——有限元分析集成程序系统。有限元法的通用性使得它在土木、机械、航空航天、能源、交通等领域中迅速得到了广泛应用，现在人们可以相当准确地预测出摩天大楼、跨海大桥、汽车、飞机和火箭的力学特性，模拟很多高速碰撞、爆炸和复杂的流动现象。有限元法的通用性使得它可以把固体力学、流体力学、动力学与控制、各种高效算法等不同力学分支中课题的求解统一在一个框架内，组织在一个程序系统中。大规模有限元集成程序系统可以发展为一个产业。这个产业已经拱手让给洋人了，要以史为鉴，难道力学不想发展自己的产业吗。

计算机辅助工程 CAE，当然需要大规模有限元集成程序系统的支持。

现在讲究赚钱，最好短平快、立竿见影，实则浮躁。力学这类基础性的学科就不吃香了。但从大局来看，这些基础性的学科是绝对不可缺少的。

因此，从科技发展和国家安全出发，应用力学和科学计算都是我们应当大力发展的重要基础性学科，其中计算力学又是首当其冲。

在大规模有限元集成程序系统这个极其重要的方面有一个误区。美国有许多商用程序系统，进口程序系统不就得了！这种论调误了很多事。这些进口程序花很多钱（比自己的程序贵很多），虽然牌子响，但用得并不好。最重要的是，知其然而不知其所以然。只能依葫芦画瓢，不知道它是怎么做出来的，更不能进一步加以发展了。美国的程序系统 NASTRAN 也卖给中国，钓你的鱼，重要模块是禁运的。“拿来主义”好，可你拿得来吗，请别忘了考克斯报告。其实这些课题中国人自己也会做。依赖外国人就会永远受制于人。毛主席说过：“嗟来之食，吃下去肚子会痛的。”

其实有限元的某些关键力学计算问题，中国人可以做得更好。例如机械的大规模接触问题，结构优化问题，随机振动计算问题等。做好这

些课题的条件是，以自己国产的有限元集成程序系统为平台，再加上关键模块继续集成，配套成龙。

计算力学在中国曲折艰难地发展，连二级学科也给取消了，要以史为鉴。实际上计算力学大大增强了解决工程和科学研究中力学问题的能力，早为工程界欢迎接受。本来应该比较容易得到社会和企业的支持的。计算力学的主要产品是有限元程序系统，看来应用力学也只有这方面才可能成为产业。但恰恰在这个主要的基础上，得到的支持远远不够。

要什么样的支持？钱当然好。但只是钱，恐怕我国也不能像美国那样给钱。“但是，如果一个人，只追求待遇，或者是只追求个人的发展，没有相容性，在科学理念和做人道德方面有欠缺，他们也就很难成才，尤其很难成大器”^[2]。关键是评价规则，千万不可将计算打入另册，这是三大支柱之一。当前，科学计算在我国仍处于很被动的地位。五部联合发文指出，要“区别不同评价对象，明确各类评价目标，完善各类评价体系”，又“对不同性质的科技创新工作应该建立起不同的评价体系，对不同性质的研究工作应该有不同评价尺度”^[3]。当前执行评价的专家并不是真做计算的。总是从理论的角度观察，这就进入了SCI评价的轨道。他们不明白这一行的特点和艰辛，按一套不适宜的规则来对待，当然结果有失公允，冷了该领域的人心。这又怎能使人安心从业呢？缺了科技计算，赶上世界先进水平只能是一个美好的愿望。

科学计算界要有自己的评价标准。不可用一套SCI来评价。现在的情况是，不讲SCI，就讲赚钱，拜金主义是要走偏路的。贬了三大支柱之一的计算，岂能健康发展。

应用力学一定要抓住有限元集成程序系统，协同发展，方能充分发挥各种理论与方法的效能，不会受制于人，独立自主，方能进入良性循环而发展。系统集成这是一个关键点。

有感于五部联合评价工作的决定^[1]，讲了这些浅见，供批评参考。

参考文献

1. 科技部，教育部，中国科学院，中国工程院，自然科学基金。关于改进科学技术评价工作的决定。国科发基字 2003 年 142 文件。中国科学院，2003

2. 路甬祥. 关于基础研究的若干思考. 中国科学院 2003 科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2003
3. 路甬祥. 关于提高我国科技创新能力的若干思考. 中国科学院 2003 高技术发展报告. 北京: 科学出版社, 2003
4. 钱学森. 我对今日力学之认识. 力学与实践, 1995
5. 学科发展趋势. 21 世纪初科学发展趋势. 北京: 科学出版社, 1996

固体力学史与方法论的几点注记

余寿文

(清华大学工程力学系, 100084)

【摘 要】 本文讨论固体力学史与方法论的三个问题。第一个问题是 21 世纪的固体力学的发展有何新的趋势? 从固体力学发展的历史长卷的展开来看, 由农业社会关注农时的天文学发端的牛顿力学体系, 到工业社会初期的刚体力学至工业社会的连续体力学, 进到现代科学技术发展的后工业社会的计算力学与断裂力学, 进而到了 21 世纪的信息、生物科学与技术的大发展, 必然会迎来与信息生物科技紧密辉映的新的力学。它与非平衡态不可逆过程和多尺度联接及多场耦合的特征不可分离。社会生产的“源”必然涌现新的“流”。第二个问题讨论这一新的力学所具有的特征: 其一是多场耦合: 力、热、电、磁、声、光、环境因素的作用; 其二是由宏观—细观—微观—纳观等不同尺度下的力学行为及其跨尺度联接, 构成现代固体力学的重要方面; 其三是对生物与仿生材料力学行为的研究, 必然牵涉到开放的、非平衡的且远离平衡态的不可逆的连续热力学。第三个问题是由此引起的研究固体力学问题方法论的拓广: 如果说原本由牛顿力学框架中建立的以弹塑性理论为表征的固体力学理论, 从动力学方程、几何(运动学)关系及本构方程和相应的初始及边界条件描述的定界问题或由能量原理描述的泛函变分提法, 随着多场耦合与跨尺度连接问题的提出, 便更一般地要求从物理学的基础上来描述固体力学的新的框架。它必然要考虑新的以往未曾深入研究的驱动力: 如原子结合力, 范德华力, 以及与表面、界面能相关的广义力(或构型力), 即固体力学更“物理化”了。联系上述三个问题, 本文还讨论了现代固体力学在工程应用中的新特点。

【关键词】 固体力学史，方法论，趋势，跨尺度，拓广

一、力学发展的历史的启迪

纵观千年的力学发展历史的长卷^[1]，将会给人们以启迪。由历史可以预测未来，知其兴替。由公元前 2 世纪，阿基米德的 (Archimedes) 的浮力定律，进展到农业社会，观天象，知节气，引起了天文学的发展。于是在 17 世纪，出现了牛顿 (Newton) 和集其大成的牛顿运动定律；随着工业时代的萌芽，蒸气机的发明和应用，出现了刚体力学，拉格朗日 (Lagrange) 建立了分析力学的体系；随着工业社会的出现，大型的建筑，桥梁，结构要求人们了解可变形体系的运动规律，于是有了柯西 (Cauchy)、纳维埃 (Navier)、欧拉 (Euler) 等人构建的弹性体的平衡、运动与稳定性的研究；近代社会特别是航空航天工程的发展，出现了以普朗特 (Prandtl)、卡门 (Karman) 为代表的应用力学学派；而现代高科技社会在 20 世纪后半叶的发展，在固体力学学科领域内，出现了两个重大意义的工程力学分支：有限元理论与方法及断裂力学。它们最先应用于土木及航空工程，不久便几乎为水银泻地般渗透进几乎所有的工程部门，成为力学分析，结构设计，失效防范地强大地工具，推进了生产力的发展，并在应用过程中，又反过来推动了计算力学与破坏力学的发展。

在 21 世纪，信息科技与生物科技成了领头的学科，力学的发展首先将植根于上述科技发展的沃土，同时，力学的发展本身也将为同以往千年历史的流程一样，它首先必然适应这些生产要素活力的驱动，同时信息与生物科技，也呼唤与催生能够深刻描述其客观运动规律的新的力学。这样的力学一定会具有更深刻的物理学背景，力学必将再次与物理学、化学、分子生物学紧密结合，而实现基础学科的新的回归与综合。这样的力学将会具有下列新的特征：它是与物理学（力、热、电磁、…）、化学、生物学的强耦合与交叉；它将是跨越空间、时间的多尺度的力学；它将是非平衡态，可逆非线性过程的开放系统的热力学理论框架之内发展的力学。因此，在研究力学的方法论时，必须从力学发展史中去寻求启迪。千年的力学史表明的一个重要的规律：社会发展的不同

阶段必然催生相应的力学理论；力学理论的发展必然带有社会发展与经济发展需求的印记；社会发展是一条无终点的长河；力学的发展及其方法论也必然是与时俱进而常新的。

二、新力学的轮廓勾划

固体力学发展到今天，以及明天的固体力学将会又什么样的特征？这是力学工作者所关注的事情。我们甚至只能远望这块新园地的部分轮廓，要完全勾划它的轮廓或许为时过早，但明天的发展，往往是今天的事物中可以发现其端倪，若能见微知著，用中国山水画的技法作一勾勒，引发大家的兴趣与讨论，或许是有益的。所以笔者不揣管见，抛砖以期引玉。

新的力学特征之一必然是多尺度与跨尺度的。从巨观的天体甚至宇宙的力学到宏观尺度的各种工程所赖以定量描述的力学已有很多研究者做过描述了；单就微—纳观力学，力—电—光微系统（MEMS, NAMS）以及纳米科技所提出的问题讲，则力学由宏观尺度到微米、纳米的空间尺度的多层次跨尺度已经展现在面前，细微观尺度力学的研究已有相当的时间了^[2]，纳米力学也成为一个研究的热点^[3]，人们正在发展一系列的跨尺度力学模型与计算方法；但是，对于时间的跨尺度研究远逊于空间的跨尺度研究，而且在时空尺度的相平面上，其时空尺度谱的力学研究，刚刚开始。

第二特征是与信息科技与生物科技相联系的，由于信息科学与工程及生物工程的发展，力学已由原先考察的机械运动的范畴拓广到力学与物理学各个领域——声、光、热、力、电（磁）的强耦合研究。牛顿力学方程与麦克斯韦（Maxwell）方程，以至薛定谔（Schrodinger）方程的综合研究运动的规律不仅是机械运动（位移、转动）的规律，而且研究光、热、力、电、磁的场量与力学量的耦合，其中智能材料与结构力学、信息材料的力学应运而生；而当人们研究的视野进入到仿生材料力学及生物力学时，其耦合便与化学和细胞生物学、分子生物学，紧相耦合，科学的大范围集成与交叉成为 21 世纪力学发展的一个新的特征。

第三个特征便是用以描述客观世界物质运动的热力学框架，也拓展了研究的范畴，非平衡（甚至远离平衡态）、不可逆的热力学系统及其

相应的现代力学本构理论的基础发生了新的变化。例如有生命物质的力学运动规律，在那些范围内还可沿用已有的热力学理论，对于有生命的开放系统的热力学框架应该作何新的推广，是一个并未解决的基础性问题。非线性学科给我们打开了许多新的研究园地和提供新的科学方法，物理学中的守恒与对称如何引入力学来研究新的问题，是我们可以开拓的新的处女地。

还可以勾划出其他的新的特征。但只有当人们从各方面的分散的研究，从实验观察到理论总结得以实现时，才可能由如同牛顿—爱因斯坦的“智者”或其群体来集研究之大成，形成 21 世纪的新的力学，而且千年力学的源流常新，其原因盖在于古代的富有哲理性的发问：“问渠哪得清如许，为有源头活水来。”

三、牛顿力学体系面临的新变化

在文 [5] 笔者曾对牛顿力学在固体力学的应用的框架，画出一张“联络图”，目的在于说明应用牛顿力学研究研究固体力学时，应当注意的 3 个方面，即“力”“几何”“固体内禀性质”。它实质上是牛顿力学第二运动定律 ($F = ma$) 在可变形固体力学中的拓延。在新的世纪，这个图 1 所示的框图发生了一些引人注目的变化：

(1) 力（作用力）的范围拓广了：以往研究重力、流体载荷、惯性力…等的外来作用，拓延到了一些新的，未曾在经典的固体力学中出现的力，如范德华力 (Van-der-Waals 力)、Cashimir 力、表面张力、电（磁）力，在极端条件下（强激光，热核反应）的作用。

(2) 运动学的自由度拓广了：人们研究转动梯度、微极与微态理论的变形几何、新的单侧运动学约束、非常大的变形等。

(3) 固体内禀性能的描述引入了新的内容：在传统的金属与合金、高分子、混凝土等固体材料家族中，引进了许多新的成员：智能材料、纳米材料、仿生材料、先进复合材料、生物材料与软材料等，这些固体新材料的研究，要求新的本构关系的描述。而这一描述将充分体现与电、热、磁等物理学领域的新的交叉。

由上述三方面构成的牛顿力学体系框架 (F, m, a 的三支柱) 构成的固体力学的微分提法以及其相应的虚功原理（能量原理或变分原

理)的积分提法的基础上, Suo 在文^[6]指出, 在小尺度力学领域中, 以格里菲斯 (Griffith) 的断裂准则所表征的一类固体力学的物理学提法 (引入表面能) 及其他能量最小原理和守恒律, 将固体力学的方法论拓展了, 更加“物理化”了。钱学森先生提倡的物理力学, 今天又有了许多新的发展。

这些粗略的勾划, 简单说, 牛顿力学的体系的完成使力学得以从物理学的母体中分离出来成为单独的基础学科; 新世纪的力学在某种程度上呈现的“物理化”, 使力学本身“回归”到母体中吸取营养实现新的交叉后成长为更丰满的新的力学基础学科。

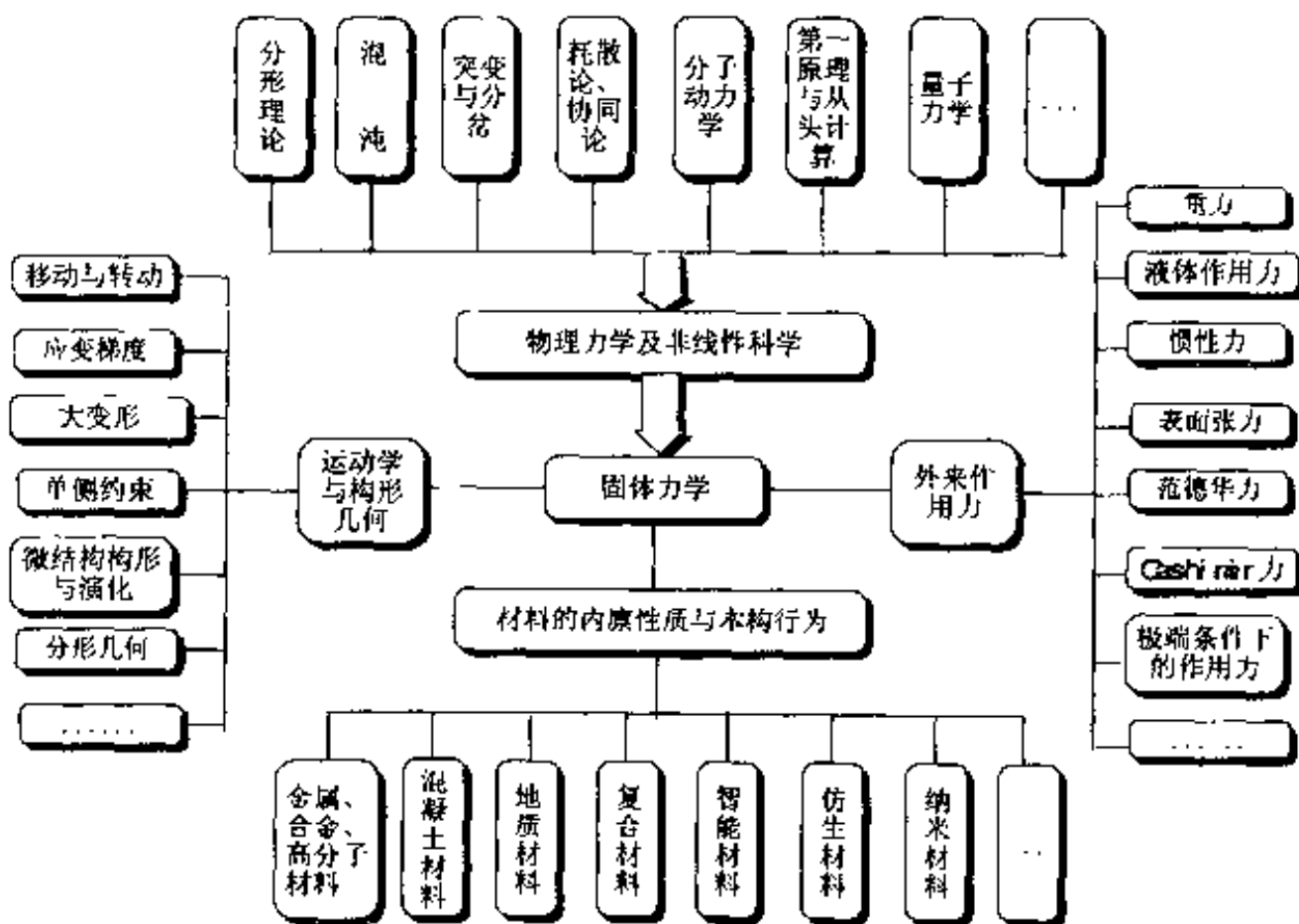


图 1

四、固体力学方法论的几点注记

固体力学的发展过程中, 研究对象的建模, 研究的方法有许多重要的发展和变迁。下文列举几个例子进行分析, 从中可以看到这中间的变化, 希望对以后的研究或许会有启发:

(1) 固体力学中的均匀连续的基本假设：在材料力学、弹性与塑性力学中，人们引入了“均匀连续”的假设，从而构建了固体力学的基本提法，并用于解决大量的各个工程领域中的强度、刚度与稳定性分析的问题。

20世纪中叶发展的断裂力学，引入了裂纹型缺陷的概念，和象征缺陷大小的尺度。人们放松了连续性假设的要求，承认裂纹处的位移间断，但认为缺陷外的介质仍然是均匀连续的。

损伤力学从20世纪70年代开始发展，在损伤力学的模型构建过程中，人们放弃了均匀连续的假设，认为介质内的损伤随受载而发展，介质中存在随时间演化的微裂纹、微孔洞、微结构的界面和剪切带，使得均匀性的假设难以成立，但研究者可以通过选择损伤变量来建立经过某种等效的新的介质的连续损伤力学，或者建立通过选择代表性体积单元的含有损伤内变量的连续热力学框架的细观损伤力学。

(2) 随着固体介质力学行为研究的视野深入到细—微—纳观的尺度，对于固体介质力学行为的研究，出现了两支队伍和两种不同方法的“会师”。其一即是“从上到下”(Top-Down)的方法，由宏观向连续力学—细观力学—微观力学—纳米力学前进。其处理方法也由连续的向着准连续的直至离散的力学发展，从事这方面研究的多是力学工作者和材料工程的研究者；另一是“从下到上”(Bottom-Up)的方法，由原子(甚至更细微的尺度)向着分子团簇直至含有微结构的细观尺度进发，应用量子力学、分子动力学、直至与各种点阵理论、晶体塑性理论相联结。从事这方面的多是物理学与材料学的工作者。这两支队伍的会师将有利于实现多尺度力学的建构与跨尺度连接这一艰巨任务的实现。这种多层嵌套的“黑盒子”的连接的成功，将为新材料设计及其优化开启一扇通往工程应用的大门。

(3) 固体力学中的间断与快变化：如前所述，在牛顿力学框架内的固体力学，人们关注“力”“几何”“内禀性质”。在以材料与结构的强度分析作为其基本任务之一的固体力学，人们常常而对三类间断：“几何”的间断或快变化，即材料与结构构形的间断与突变，几何构形引起的应力集中和裂纹(几何强间断)引发的断裂与破坏；“力”的间断，即外载的扩散，提出了载荷扩散路径及扩散的多通道的优化设计；“内

禀（材料）性能”的间断，出现了表面与界面力学与界面的梯度设计与优化设计一类的力学问题。也就是说，强度丧失，破坏发生往往出现在上述三类间断（或突变）存在的区域，它成为材料与结构强度失效防范的重点，发展这些用于间断分析的固体力学，诞生了“应力集中”“断裂力学”“表面与界面力学”等的新学科分支。当人们进入了多场耦合，多重尺度及跨尺度连接的力学范围时，上述三方面的间断与突变将会催生什么样的力学分支，是一个值得思考的问题。

(4) 固沙林体力学中的多尺度时空尺度谱：在空间范围内，人们将巨观向着宏观—微观—纳观尺度的力学描述前进，但这种进展将是不可穷尽的；在时间范围内，物理学向着秒—毫秒—微秒—纳秒—皮秒—飞秒前进。人们在空间的尺度研究远比时间的多尺度研究投注更多的精力。将来人们将可以在时间—空间的相空间（平面）中，区分出不同的尺度谱的力学。对其间的各种尺度谱的方法论进行分类以催生在相平面中尚未很好研究的力学分支，将是一个很有趣味的研究课题

(5) 损伤及其演化：以往的材料与结构的损伤研究，十分注意损伤演化方程导引的物理与力学基础，但以往的损伤都是材料与结构性能的劣化，因此所得到损伤演化方程的解，其损伤变量都是单调增加的函数。但对于损伤可愈合的情况，其损伤变量的解时非单调变化的，其相应的演化方程也不一定是一阶常微分方程（组），这是一个与生物损伤力学相联系的新问题，必需有新的方法来导引其演化方程，这也是一个有兴趣的研究题目。

五、结束语

力学发展的长河川流不息，力学研究也必需与时俱进。适应新时代的现代力学体系在信息与生物工程的催生下，正在孕育新发展的良机，深入思考力学千年发展史给我们的启迪，将有利于力学研究者为构建新的力学大厦添砖加瓦。面前仍然是一个广袤的尚未开垦的园地，期待着园丁们的耕耘与收获。

参考文献

1. 中国大百科全书（力学卷），北京：中国大百科全书出版社，1991

2. 余寿文. 复杂微力—电系统的微尺度力学. 力学进展, 1995, 25 (2): 249~259
3. 物理力学与纳米科技的多学科交叉若干问题青年学者研讨会文集. 国家自然科学基金会数理科学部, 2002年10月, 北京
4. 余寿文. 固体力学与材料科学交流的几个新课题. 力学进展, 1994, 24(1): 24~36
5. Suo Z. G. Int. J. Solids and Structures. 2001, Vol. 37.
6. 钱学森. 物理力学讲义. 北京: 科学出版社, 1962
7. 庄逢甘, 郑哲敏. 钱学森技术科学思想与力学. 北京: 国防工业出版社, 2001

浅论力学史和方法论研究的原动力、范畴和探索途径

隋允康

(北京工业大学机电学院, 100022)

【摘要】执着地追溯力学知识发生的瞬间,纯粹是一种没有功利性的爱好和兴趣,源于对探知自然规律的热爱,这是研究力学史、力学方法论志存高远的原动力。力学史侧重于时间,力学方法论侧重于空间,二者的结合是完整的时空。从逻辑与历史的一致性探讨了研究力学史、力学方法论的以史为鉴的意义,由于发现知识比知识本身更有价值,要把力学史上每一个知识点都当作创新的素材或案例,发掘其内涵,课堂上的重点是演示力学的发生过程,在科研中应当主动地运用力学史和方法论。力学史和力学方法论的横向延拓移向力学美的范畴,纵向延拓引向力学发展观、力学未来学,全方位地拓广会使力学科学变成力学文化。力学史和方法论应当效法和借鉴数学史和方法论、物理学史和方法论、一般科学方法论和自然哲学。研究力学史和方法论的中国学者,还有一个值得借鉴的宝库——中国传统文化的精粹。

【关键词】研究的原动力,范畴,探索途径,力学史,力学方法论

在力学研究者、教育工作者乃至力学爱好者之中,存在着这样一批人,他们热爱力学,并且把对力学本体的兴趣延伸到了它的源头,从而执着地追溯力学知识发生的瞬间。

像火山喷发一样,当初奔腾着的高温岩浆总是要冷却凝固,力学的创造性成果也必然发生一个相变——由流动态结成凝固态的历史浮雕,但是原创性的热和光却仍然在传播,其中的热不时地送来温暖,激荡我们探索的激情,其中的光不断地照亮我们的道路,指明永不过时的创造

和发现的方法。

这也许就是人们喜欢追根溯源的原因。

也许还有对于力学美的追求，或许有对于其中包含的那些哲学观念和原理的追究。

尽管这种爱好没有功利性，几乎完全是一种纯粹兴趣的驱使，而这种兴趣来源于对探知自然规律工作的热爱，但是也丝毫不排斥他们也时时具有应用力学规律的冲动——不仅去解释由美丽且又和谐的规律构成的这个宇宙，而且用以设计和制造人造的世界。

我们就属于这样一批人。我们这些人或许并不都能做出历代大师对力学做出的那样重大的贡献，然而在探索自然奥秘方面，我们却同历代大师一样兴趣盎然。

兴趣盎然演化为兴趣广泛，目光由力学史、力学方法论移向力学美，目光延拓到力学发展观、力学未来学。总之，审视我们熟知的知识背后更广泛的陌生领域，因为力学的历史包含着方法和美学，它的本质是发展的，而且必然延伸到未来；有趣的是，我们的这种非功利性的研究兴趣同上世纪末以来着力倡导的素质教育和创新教育是完全吻合的。

我们深知，具有非功利主义的研究兴趣是科学工作者最宝贵的素质，尤其在科学界也不能避免心浮气躁或急功近利的时候，它显得更为重要。

用志存高远描述我们这些非功利主义的力学研究者、教育工作者乃至力学爱好者，是再恰当不过的了；志存高远，有高山流水的情怀；高在“横空出世”的峰峦，远在“逝者如斯”的大川；那叠翠的峰峦，印记有方法论的痕迹，那奔腾的大川映照着力学史的源流。

志存高远者与功利主义的追求离得较远，至少在思考力学史和方法论时，顾不得功、利。在这些人看来，探讨何时能出诺贝尔奖的获得者，实为咄咄怪事。实际上，有几人是为追求功名而获成果的呢？科学成果可遇而不可求啊。

“只讲耕耘，不问收获”，是志存高远者的本色。机遇往往偏爱这些人，也许这是：舍弃有形却有无形向有形的转化。

像前辈那些大力学家那样去进行志存高远的研究！哪怕达不到，也决不像匠人那样单纯去追求功利（请恕我用“匠”烘托“家”）。也许生

存需要逼得我们还是不能完全放下功利，那么，我们应当至少能做到：经常挤出一段时间返朴归真，进行一点纯兴趣的研究。换句话说，即使做不成家，也要做一个是心存“家”念的匠。

正如力学的研究离不开时间和空间，力学史、力学方法论的研究也离不开时间和空间，是否可以如斯说：力学史侧重于时间，力学方法论侧重于空间，二者的结合是完整的时空。如果说伽利略、牛顿时空观同爱因斯坦时空观的差异在于时空同运动的物体无关与否，那么不同层次的力学史和方法论研究的差异在于抓知识还是抓能力与素质。

研究力学史和方法论也不能离开对历史与逻辑的关系探讨：历史是逻辑的展开和演化，逻辑是历史的浓缩和提炼。排除偶然性，逻辑与历史的关系就如同 $t \in [0, 1]$ 与 $\alpha \in [0, \infty)$ 的存在一一对应的映射

一样： $\alpha = \frac{t}{1-t}$ ，这是逻辑与历史的一致性。逻辑与历史的一致性还表现

在个体研究者或学习者“心路”逻辑与学科发展历史逻辑的相似，例如，个体出现的正确和错误概念，在学科发展的过程中都能够找到。追溯力学知识发生的瞬间的宝贵就在于以史为鉴的意义，它对于创新的启迪作用，比知识本身更有价值。因此，要在力学史上把每一个知识点都当作创新的素材或案例，发掘其内涵。

力学史和方法论在教学中的应用首先体现在不过于看重知识，而看重于表现知识发生的过程。借助于力学史和方法论，在课堂上重点演示力学前辈如何提炼问题、形成问题、提出问题、处理问题和解决问题的全过程。于是，就要适当地恢复到历史的本来面目，由教科书便于处理的演绎为主的逻辑，回到便于启发创造性的归纳为主的逻辑。

力学史和方法论在科研中具备直接应用的品格，这是毋庸置疑的。像力学前辈那样去思考、去探索，尤其在基本概念上入手，进行突破性的研究，这是力学史和方法论对我们的启发。值得注意的是由论文—专著—讲义—教科书的过程有必要详细予以探讨。

力学史和方法论的延拓也是一个重要的问题。横向延拓，必然移向力学美的范畴，包括探索力学美感，力学审美观念、审美情趣，探讨力学美与力学真的关系等。纵向延拓，必然延伸为力学发展观、力学未来学，向前推动力学的发展，这是从以往—当今—未来在时间轴上的自然

延拓。力学史和方法论的延拓，是对于力学在文化理念上的全方位地拓广，使力学科学应运而生为力学文化这一更大的范畴。

力学史和方法论的姊妹学科是数学史和方法论、物理学史和方法论等，它们发展得更为成熟，大有效法和借鉴之处。但是，不可以简单地类比，一定要注意它们的共性和个性。

力学史、力学方法论还有可以效法和借鉴学科——一般科学方法论、自然哲学（包括自然辩证法）。

研究力学史和方法论的中国学者，还有一个值得借鉴的宝库——中国传统文化的精粹。《老子》25章中指出：“人法地，地法天，天法道，道法自然。”我们作为力学史和方法论的爱好者和业余研究者，如果能遵循老子揭示的方法，以“格物致知”的精神进行探索，恐怕能在“恍兮惚兮”中，实现“熵减”的过程，看到凝固的历史岩浆由固相变回液相的“反相变”，体会到像火山喷发一样的力学的原创性过程。

应用力学方法初探

(摘要)

嵇醒 仲政 戴璞

(同济大学工程力学与技术系, 200092)

应用力学这个名词大家都很熟悉,但是要对它下个定义,却又不很容易。在浩瀚的力学文献中,竟找不到一个贴切的、简明扼要的、包含应用力学这个名词所有主要涵义的标准定义,也找不到一本介绍应用力学的专门书籍。人们又十分偏爱应用力学这个名词,在期刊和学会的名称中,都喜欢采用它,例如: JOURNAL OF APPLIED MECHANICS; APPLIED MECHANICS REVIEW; SOCIETY OF THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS 等。

在深入考究应用力学这个名词的时候,我们会想到工程力学这个名词。工程力学这个名词亦已被广泛使用着,国内外都有以工程力学命名的期刊。在有些地方,应用力学被它取代了。例如:在我国,原来叫应用力学的系和专业,在全国统一专业目录之后,现在都叫工程力学系和专业了。

那么,我们应该怎样来理解在力学学科中除力学外,也常常被提到的应用力学和工程力学呢?它们是否和力学一样,指的同是一级学科?应用力学,工程力学并不与哪一个二级或三级学科相对应。历来,力学专业,应用力学专业,工程力学专业均是按一级学科来设置专业的。可见,力学,应用力学和工程力学都是与力学的一级学科相对应。

工程力学与力学相比较,显然是更强调了力学和工程之间的联系,要求力学工作者能够从工程中提出力学问题,并用力学去解决工程问题。所以,用工程力学作为专业名称更能体现专业的培养目标,是很恰当的。

力学已经能够满足绝大多数的工程需要,而工程离开了力学也将寸步难行。另外,工程还会不断地提出尚未研究过的新问题,要求力学能

够提供答案。工程力学正是在这样的历史背景下被人们所接受和采用。所以，工程力学可以说是体现了 20 世纪中力学进展的基本方向和主要成就。

工程力学要求力学工作者能够从工程中提出力学问题，并用力学去解决工程问题。但没有说明用什么方法来实现。对此，需要探讨如下两个问题：用力学去解决工程问题会遇到什么困难？用什么方法可以解决这种困难？

除一般力学的质点和质点系的运动方程是常微分方程外，固体力学和流体力学研究的对象是连续介质，它们的基本方程都是高阶偏微分方程，有的还是非线性的。以最简单的线性弹性力学为例，其偏微分基本方程的包含未知函数的一般解早已存在，但是要根据给定的边界条件，从一般解推导问题的特殊解，即所谓正解法，却久未找到。自 1830 年线性弹性力学基本方程建立后，在其发展的前一百年中，求解只能靠很难成功的反演法或半反演法。边界条件和载荷条件都要非常简单，才有可能偶尔把解答猜测出来。然而，实际的工程问题都不会如此简单。因此，在力学理论和工程实际之间存在着难以克服的数学求解的困难。

在既没有正解法，反演法和半反演法又用不上的时候，工程问题却急待解决。为此，人们不得不转而寻找其他途径。其一是：发展力学量的实验测量方法，以实验测量结果来替代理论分析。其二是：采用近似解法，只要求基本方程的近似解的表达式。其三是：采用微分方程的数值解法，用大量的计算来获得数值结果。实验测量能得到第一手客观资料，这是很重要的，但需要设备，实物或模型。每个问题都做实验，费力费事，且得不到参数之间的关系，也没有用到力学的基本理论。近似解法误差太大。数值解法的计算工作量大得惊人。

力学的本意是：先建立基本方程，然后只要依靠和利用数学的强大能力，通过解析解，来解决问题。这便是数学力学的做法。然而数学的能力虽然强大，目前尚不能解决力学基本方程的求解困难。因此，希望能找到一种有效的办法，来补充数学力学的不足。能够从工程中提出力学问题，再用力学去完美地解决工程问题，一直是应用力学追求的目标。在力学研究中，应用力学的处理问题的方法在 20 世纪初期大放异彩，大获成功。应用力学令人看到了力学在工程应用中发挥巨大作用的

闪亮前景；在力学和工程之间，开辟了一条巧妙地用力学分析加数学分析来解决工程中的力学问题的通道；用自己擅长的力学分析，使得数学求解变得容易。由力学真正发展成为工程力学，应用力学功不可没，它为力学注入了巨大的生命力和创造力。20 世纪的前五十年，可以说是应用力学的鼎盛时期。

应用力学方法与力学基本方程的数值解法不同，应用力学得到的是解析解，具有解析解的优点。应用力学方法与近似解法不同，虽然应用力学的解也有近似性，但它所具有的精度是近似解法所无法比拟的。应用力学方法与数学力学相比，数学力学重视对力学基本方程的直接求取严格解，严格解当然比近似解要好，但除一些极简单的问题外，都难于求解；而应用力学以简化的方程替代原方程，避开了不可克服的数学困难，但并不放弃利用强大的数学工具所能提供的一切帮助。应用力学与实验力学相比，实验力学回避了力学理论和数学求解，另辟力学量的直接测量方法；可是，应用力学既重视数学的应用，也重视实验研究，把实验、观察和测量作为应用力学建立力学模型的源泉之一，又是检验应用力学结果的主要方法。

应用力学把力学分析，应用数学，实验研究，简化的力学模型，高度近似，充分简化巧妙地、有机地结合和利用起来，组合成一套独特而有效的解决工程力学问题的高超的处理方法。在应用力学解题过程中，起关键性作用的恰恰是力学分析本身。因为，对一个工程中的力学问题，必须从力学上掌握充分和深刻的理解，才能分得出主要因素和次要因素，才能提得出成功的力学模型。在力学的基本方程建立之后，不直接把求解问题的任务全部交给数学，在进入求解前，先用力学分析对所研究的问题进行专门的、深入的、反复的研究和思考，直到能使工程问题简化的力学模型显现出来，把基本方程先简化，然后利用应用数学来求解，这就是应用力学的取得成功的经验所在。换言之，在应用力学中，力学除建立基本方程外，在求解的过程中也发挥了关键性的作用。

本文以 Prandtl 的流体力学附面层理论和现代机翼理论为例说明应用力学方法的特点及强大的解决实际问题的能力。

应用力学对偶体系的方法论

钟万勰 姚伟岸

(大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 116023)

【摘要】应用力学是工程学科的基础学科, 传统欧几里德空间的拉格朗日体系求解方法论有局限性, 其方法以半逆法求解为主, 求解受到很大的限制。通过引入原变量的对偶变量, 可将应用力学诸问题的求解导入辛几何空间, 形成哈密顿体系新的对偶变量求解方法论。从而使得许多有效的数学物理方法如变量分离法以及本征展开法适用于应用力学各学科领域的求解, 扩大了解析求解范围。新的对偶变量方法论可统一应用于各个学科领域, 将有利地促进各学科领域之间的交叉与渗透, 对教学体系的改革也具有深远的意义。

【关键词】应用力学, 辛空间, 哈密顿体系, 对偶变量, 方法论

1 引言

从多个专业的基础课程设置来看, 力学都占有重要的地位。力学作为工程的基础学科有力地推动了诸如航空航天、机械、土木、化工、能源、材料等各方面的飞跃。

在各类数学、物理线性偏微分方程中, 弹性力学方程是最复杂的问题之一。弹性力学基本方程体系早在 19 世纪初便已臻完善, 然而其求解虽费了一个多世纪, 还远不能说已臻完善了, 求解一直是其发展的一个“瓶颈”。工程需要以及严格求解的困难促使各种应用理论得以发展, 如结构力学、薄壁结构、板壳理论, 再加上结构动力与稳定性、土力学、流体力学等问题, 就构成了应用力学的一个体系。这些力学应用理论虽使方程得以简化, 但解析求解仍有很大困难。数学家与力学家通力

合作，既丰富了数理方法又发展了应用力学。其代表著作有柯朗与希尔伯脱的《数学物理方法》，以及铁木辛柯的一套教材《弹性力学》^[1]，《弹性稳定理论》，《板与壳学》，《工程振动问题》，《高等材料力学》等。这一整套解析求解体系构成经典理论体系，涵盖了当年的高度成就，也影响并指引着随后的进展。

20世纪50年代后，计算机及高级语言问世，有限元首先在应用力学中出现，迅速改变了局面。以强大计算能力为后盾，对于结构力学、固体力学等很快就发展出通用灵活的有限元方法，并系统化为大规模有限元程序系统，确立了计算力学的地位。有限元法在结构分析成功的基础上迅即扩展到力学、工程与科学计算的各个方面，取得了极大的成功。有限元分析的成功并未减低解析法的意义。首先，有限元法本是一类数值近似，其理论基础脱离不了解析法；其次，有许多问题，例如断裂力学中的裂尖奇点元、无限域的元等，其本性是解析的；再如壳体问题的边缘效应；复合材料的自由边界及其边缘效应分析等带有局部效应的课题，采用有限元法计算有刚性问题，因而解析法仍有很大的兴趣。

2 单类变量欧几里德空间的拉格朗日体系方法论

科技先进国家经过长期积累，应用力学的教材与教育参考资料已形成一个体系。以铁木辛柯的《弹性力学》来看，其求解占了大半部篇幅，而方法则以半逆法为主^[1]。半逆法是圣维南于1855~1856年提出来的，他解决了弹性柱体的扭转与弯曲问题的某些解，从此成为弹性力学的经典解与经典解法，一直影响至今。半逆法即某种凑合法，它依赖于具体问题而缺乏一般性。半逆法往往只能找到某些解而不能证明已找到其全部解。使读者感到难于措手之点是怎么凑合才能使手中问题得以求解呢？

采用半逆法的原因在于方程组的复杂性。历来的解析求解方法都是在单类变量的范围之内进行的，或者是应力函数（力法），或者是位移法（只有扁壳理论用了混合法），其求解总是用各种方法对未知函数予以消元，得到一个高阶偏微分方程再对一个未知函数来求解。从数学体系的角度看，单类变量的求解属欧几里德空间的拉格朗日体系方法，因此必然导致高阶偏微分方程，以至于分离变量及本征函数展开法等有效

的数学物理方法未能对此实施，结果是半逆法求解这个环节长期未能突破。从柯朗-希尔伯脱的《数学物理方法》来看，其背景也是以单类变量的偏微分方程与变分法、对称矩阵、对称核积分方程、自伴算子的本征问题为其主线的。换句话说，其体系也是处于拉格朗日框架中的，而其几何形态则为欧几里德型的（其度量有如泛函分析那样，有“正定”，“对称”，“三角形不等式”所规定）。

下面我们以微自由振动问题为例来加以说明。在惯性坐标系内，通过一系列消元后，可给出微自由振动问题的拉格朗日函数为

$$L(x, \dot{x}) = \text{动能} - \text{势能} = \dot{x}^T M \dot{x} / 2 - x^T K x / 2 \quad (1)$$

其中 M, K 为对称矩阵。而对应的最小作用量变分泛函为

$$\delta \int_{t_0}^{t_f} L(x, \dot{x}) dt = 0 \quad (2)$$

执行上式的变分就给出惯性坐标系的动力方程

$$M \ddot{x} + Kx = 0 \quad (3)$$

其中 x 是 n 维位移向量，即待求未知量仅有单类位移变量。对当前的方程 (3) 可以用分离变量法进行求解，即令

$$x = \exp(i\omega t) \Psi, K\Psi = \omega^2 M\Psi \quad (4)$$

并最终形成对称矩阵的本征问题。关于对称矩阵的本征问题已经有非常好的数学理论，其问题已解决得很好。但在非惯性坐标内，即为陀螺系统时，拉格朗日函数则为

$$L(x, \dot{x}) = \text{动能} - \text{势能} = \dot{x}^T M \dot{x} / 2 + \dot{x}^T G x / 2 - x^T K x / 2 \quad (5)$$

其中 G 为反对称矩阵。而对应的最小作用量变分泛函为

$$\delta \int_{t_0}^{t_f} L(x, \dot{x}) dt = 0 \quad (6)$$

执行上式的变分就给出非惯性坐标系的动力方程

$$M \ddot{x} + G \dot{x} + Kx = 0 \quad (7)$$

它与方程 (3) 相比仅增加了一个陀螺项。但正是由于当前的方程中有了陀螺项的存在，对方程 (7) 直接分离变量就有困难。于是本征展开等的一套行之有效的数学物理方法无法实施，其求解方法就发生了本质的变化。

类似的问题在应用力学的多个学科领域均存在, 即单类变量欧几里德空间的拉格朗日体系使得许多有效的数学物理方法难于应用。至此就有一个疑问, 非要采用这种传统的消元方法不可吗? 事实上, 这种传统方法不是惟一的, 采用对偶变量的辛几何空间及哈密顿体系就是其回答。

3 对偶变量辛几何空间的哈密顿体系方法论

经典分析力学是力学最根本的体系。拉格朗日方程, 最小作用量原理, 哈密顿正则方程, 正则变换, 哈密顿-雅可比理论等, 是非常优美的理论体系。并且也是统计力学, 电动力学, 量子力学等基本学科的基础。

在分析力学中, 哈密顿提出了其正则方程体系, 这就是状态空间法的开始。如对上节的非惯性坐标系微自由问题引入原变量 q (即位移 x) 的对偶变量

$$p = \partial L / \partial \dot{x} = M\dot{x} + Gx/2 \quad (8)$$

从中可以解出

$$\dot{q} = -M^{-1}Gx/2 + M^{-1}p \quad (9)$$

并引入哈密顿函数

$$\begin{aligned} H(q, p) &= p^T \dot{q} - L(q, \dot{q}) \\ &= [p^T M^{-1} p - p^T M^{-1} Gq + q^T (K + G^T M^{-1} G/4) q] / 2 \end{aligned} \quad (10)$$

上式可简记为

$$H(q, p) = p^T D p / 2 + p^T A q + q^T B q / 2 \quad (11)$$

注意, D, B 为对称矩阵, D 为正定。变分原理为

$$\delta \int_{t_0}^{t_f} [p^T \dot{q} - H(q, p)] dt = 0 \quad (12)$$

完成变分推导, 得到一对偶正则方程

$$\dot{v} = H v, \quad H = \begin{bmatrix} A & D \\ -B & A^T \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中 $v = \{q^T, p^T\}^T$ 为由原变量 q 与其对偶变量 p 组成的辛几何空间

的全状态向量。对于该正则方程组分离变量法就可以实施

$$v = \exp(\mu t)\Psi, \quad H\Psi = \mu\Psi \quad (14)$$

这就导向了 H 矩阵的本征问题。因 H 满足关系

$$JH = \begin{bmatrix} -B & -A^T \\ -A & -D \end{bmatrix} = (JH)^T, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -I & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

因此, H 矩阵为辛几何空间的哈密顿矩阵。哈密顿矩阵的本征问题是有特点的^[2, 3]:

- (1) 若 μ 是其本征值, 则 $-\mu$ 也一定是其本征值;
- (2) 本征向量间有共轭辛正交关系

$$\Psi_i^T J \Psi_j = 0 \quad \text{当 } \mu_i + \mu_j \neq 0 \text{ 时} \quad (16)$$

其中 Ψ_i, Ψ_j 分别为本征值 μ_i, μ_j 对应的本征向量。这种正交之所以称为辛正交, 是因为中间出现了 J 阵。普通的对称矩阵本征向量之间也有正交性, 但中间是 I 阵。表 1 给出了欧几里德空间与辛几何空间的对比关系^[3]。

表 1 欧几里德空间与辛空间的对比关系

Tab. 1 Comparative relationship between Euclidean space and symplectic space

欧几里德空间	辛空间
内积 $\langle \alpha, \beta \rangle$ —— 长度	辛内积 $\langle \alpha, \beta \rangle$ —— 面积
单位矩阵 I	单位辛矩阵 J
正交 $\langle x, y \rangle = x^T y (= x^T I y) = 0$	辛正交 $\langle x, y \rangle = x^T J y = 0$
(标准)正交基	(标准)共轭辛正交基
正交矩阵 $Q^T Q = (Q^T I Q) = I$	辛矩阵 $S^T J S = J$
对称变换 $\langle \alpha, A\beta \rangle = \langle \beta, A\alpha \rangle$	哈密顿变换 $\langle \alpha, H\beta \rangle = \langle \beta, H\alpha \rangle$
对称矩阵 $A^T = A (= A)$	哈密顿矩阵 $H^T = JHJ$
实对称矩阵的本征值皆为实数实对称矩阵不同本征值的本征向量必正交由实对称矩阵本征向量可组成一组标准正交基	如是哈密顿矩阵本征值, 则 $-\mu$ 也是其本征值哈密顿矩阵非辛共轭本征值的本征向量必辛正交由哈密顿矩阵本征向量可组成一组标准共轭辛正交基

有了上述特点, 方程 (13) 就可以用分离变量法和本征展开的一整套有效的数学物理方法进行求解。当然它们基于的是辛几何空间的辛本征问题。

在自动控制的经典理论中,采用的也是尽量消元而成为单输入-单输出的高阶常微分方程的表述。控制论在计算技术的冲击下,出现了现代控制论。现代控制论并不只是在原有经典控制论的理论体系上加以延伸而已,而是使控制论的基本理论体系也发生了根本性的更迭。现代控制论所奠基的辛几何空间法的起点至少也应当回溯到哈密顿正则方程体系。哈密顿正则方程体系也正是对偶变量、对偶方程的体系。线性规划、二次规划以及非线性规划的基本方法也是奠基于对偶变量基础上的。采用辛几何空间的描述,使这些问题的求解达到了新的境界。

对偶变量的求解体系与偏微分方程的传统求解思路正相反。传统的求解思路是努力消元,尽可能减少未知量的数量,而不惜方程阶次的升高。高阶次的微分方程不利于有限元等数值方法的求解,也将为数值求解带来一些难点问题。而在对偶变量体系下,虽然未知量增加了,但阶次降低了,低阶微分方程有利于数值求解,而未知量的增加并不会带来太大的影响。也就是说,对偶变量体系与数值方法的结合,将能更充分地体现出对偶变量体系的优点,充分发挥计算机的优势,去求解工程问题。

4 应用力学的对偶体系

分析力学与控制论既已按其自身的发展而做出了体系换代,粗略想来在理论体系上离开应用力学更远了。然而情况并非如此,现代控制论的数学问题与结构力学的某类问题是一一对应地互相模拟的^[4]。从数学角度看,模拟关系是建筑在哈密顿体系理论基础上的。既然控制论以辛几何空间法为基础发展出整套新的理论体系,则应用力学也理应有对偶变量的辛几何空间法应用的前景。

将原变量与对偶变量组成的辛几何空间引入弹性力学^[2, 3],弹性柱体的圣维南问题就可导出新的一套基本方程。于是分离变量法就可顺利地实施了。过去一套半逆法的解,在辛几何空间中都可用直接法求解出来,而过去因端部条件方面的困难,只能用圣维南原理予以覆盖的一大批解,现在也可以予以求解。

如对平面弹性问题,通过引入原位移变量 $q = \{w, u\}^T$ 的对偶变量 $p = \{\sigma_x, \tau_{xz}\}^T$, 平面弹性问题用辛几何空间的全状态向量 $v =$

$\{q^T, p^T\}^T$ 描述的对偶方程组为

$$\dot{v} = Hv, H = \begin{bmatrix} 0 & -v\partial/\partial x & (1-v^2)/E & 0 \\ -\partial/\partial x & 0 & 0 & 2(1+v)/E \\ 0 & 0 & 0 & -\partial/\partial x \\ 0 & -E\partial^2/\partial x^2 & -v\partial/\partial x & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中变量上的一点表示对坐标的偏导数。将问题描述成 (17) 后, 分离变量法就可以实施

$$v = \exp(\mu x)\Psi, H\Psi = \mu\Psi \quad (18)$$

可以证明, 这里的 H 为哈密顿型算子矩阵, 其对应的是无穷维辛本征问题, 其本征问题的特点与有限维哈密顿矩阵本征问题相同。即有共轭辛正交关系。于是任一个横截面上的全状态函数向量 v 总可以用本征解来展开

$$v = \sum_{i=1}^{\infty} (a_i\Psi_i + b_i\Psi_{-i}) \quad (19)$$

其中 a_i 与 b_i 是待定系数, 而 Ψ_i 与 Ψ_{-i} 是本征函数向量。

在哈密顿本征问题中, 零本征值是一个很特殊的本征值, 这类本征值的解在弹性力学中还具有特殊的重要性。如对于矩形域平面弹性问题, 当两侧边皆为自由边界条件时, 就必然有重根的零本征值。通过理性推导, 可以直接求解出零本征值的所有本征解, 即轴向平移、横向平移和刚体旋转解以及与它们共轭的简单拉伸、常剪弯曲和纯弯曲解。这 6 个本征解就是平面圣维南问题的基本解, 这些解可以张成一个完备的零本征值辛子空间。

弹性力学在用半逆法求解时, 特别强调圣维南原理。圣维南原理表达了一个自相平衡的力系的影响是局部的、不能及远的特性。也就是, 其影响是随距离而快速衰减的。这当然是指数函数的特征。零本征值的本征解并无指数函数, 它对于自相平衡的截面上的力系是不敏感的, 而截面上的非自相平衡的外荷载正是通过这些解向较远的区域传播出去的。零本征值的本征解, 这一个划分将问题表达得很清楚。零本征值的本征解对应的是圣维南问题的解, 而由圣维南原理覆盖的部分对应的是非零本征值的本征解, 为了满足两端边界条件, 或者是域内的外荷载有

突变时，这一部分的解是很重要的。

对偶体系方法论是通过理性的推导，逐步进行下去的，它改变了以往弹性力学求解中大量运用半逆凑合法的传统。例如我们已求解了各种边界的板弯曲问题、层合板及各向异性问题^[3]。由于弹性力学的对偶体系的方法论与传统的半逆解法存在本质的差别，其富有理性的求解方法完全可以直接推广到更复杂问题上去。对偶体系的求解过程是完全相同的，仅是其代数推导将随着问题的复杂程度要逐渐烦琐一点。事实上，利用现有的数学推导软件也可以克服这一困难。这样就可以求得许多以往半逆凑合法无法求解或难于求解的问题，可望求出更多问题的解析解，扩大解析求解范围。

事实上，对偶体系的方法论不仅可用于弹性力学也可用于应用力学的多个方面及数学物理方法中，如控制、振动、波传播等^[5]。这说明应用力学中多门学科相互间是密切关联的。它们有一个公共的理论体系，即对偶变量体系。学懂了一门课，以此类推，就容易学懂另一门课。一套横贯的方法论是很有利的，对于教学体系也有很大的益处。

当代科技的信息化发展，体现在智能化材料，智能化结构，智能化系统，精确制导武器等。充分表现出控制、遥感的多方渗透。结构的控制正日益受到关注。在应用力学教学中不应忽视这种发展趋势。现在世界正在走向 Smart，而力学如不与控制理论相连接，又如何成为 Smart。美国已感到结构与控制工程师在设计中互相分离，因此不利于整体的合理设计。正在呼唤“控制-结构整体设计”。采用同一套理论体系更易于促进力学与现代控制等不同学科领域的相互渗透与结合，这对于培养新一代工程师是很有利的。

6 结束语

根据结构力学与控制理论的模拟，将对偶变量理论体系引入到应用力学，就改变了以往应用力学求解中大量运用半逆凑合法的传统，而导向了理性的求解方法，这也是对偶变量体系方法论与传统方法论的本质区别。这样就可以求得许多以往半逆凑合法无法导出的结果。从拉格朗日体系向哈密顿体系的过渡，其意义还在于从传统的欧几里德型几何形态进入到了辛几何的形态之中，突破了传统观念。从而使对偶的混合变

量进入到应用力学的广大领域。对偶体系还可以进入数学物理方法，并由此辐射到有关领域去，有利于向不同学科领域渗透。相信这是有发展前途的，对于教改也是有利的。

参考文献

1. Timoshenco S P, Goodier J N. Theory of elasticity. McGraw-Hill, 1951
2. 钟万勰. 弹性力学求解新体系. 大连: 大连理工大学出版社, 1995
3. 姚伟岸, 钟万勰. 辛弹性力学. 北京: 高等教育出版社, 2002
4. 钟万勰, 欧阳华江, 邓子辰. 计算结构力学与最优控制. 大连: 大连理工大学出版社, 1993
5. 钟万勰. 应用力学对偶体系. 北京: 科学出版社, 2002

对有限元技术发展过程的一种认识 (详细摘要)

孙景琦 吕 涛

(北京石油化工学院机械系, 102600)

1 前 言

有限元法是一种新兴的科学技术。它使那些用偏微分方程描述的理论问题、应用问题的求解得到突破性进展。因此,它在科学技术界受到广泛注意,在实际中得到广泛应用,它的自身也得到迅速发展。本文在分析了有限元技术的实质以后,阐述了对有限元技术历史发展过程的一种认识。有限元技术这位骄子,是由数学理论及工程技术的发展孕育而成的^[1]。

2 有限元技术的实质及实现有限元技术的理论前提

工程中出现的的大量问题,如温度场、位移场、电场、流场等,常可以用某个偏微分方程来描述。设这个场被记为 Ω ,这个场量,如温度、位移等,被记为函数 u , u 的描述偏微分方程被记为PDE, Ω 即为PDE的定义域。PDE常具有以下形式^{[2][3][4]}:

$$Lu + q = 0 \quad (1)$$

上式中, L 是微分算子, q 是与 u 无关的一般函数。

要在 Ω 上实现对PDE的求解,现在在技术上的主要手段就是有限元法了。该方法通过对PDE的离散及对定义域 Ω 的离散,将 Ω 上的PDE化为 Ω 上的一个代数方程组,即:

$$(PDE)_{\Omega} \xrightarrow[\substack{(PDE \text{ 离散}) \\ (\Omega \text{ 离散})}]{} (\text{代数方程组})_{\Omega} \quad (2)$$

这两个离散的详细过程,读者可以参阅专著[2]、[4]。要使这两个离散成立需要什么理论基础呢?就本质上讲,可以归纳为两个方面,

即本文所说的两个理论前提，即：

(1) 允许将方程 (1) 改写为某种整体对局部具有可加性的等价表达式。这样才能保证在将方程 (1) 的定义域 Ω 划分为单元 (记为 ω) 时，能使该表达式的运算到单元上去进行，然后还能再将诸单元上的运算结果集合到全域上。在现今的有限元法中，是将方程 (1) 改写为某种积分表达式，如加权余值积分表达式或泛函积分表达式，而积分运算具有上述的那种可加性。

(2) 允许在被划分的单元 ω 中，运用合适的函数 ϕ (又叫形函数)，将单元上任一点处函数 u 的值，由单元节点上 u 的特值 \bar{u} 的展开式来表达，即：

$$u = \sum \phi \bar{u} \quad (3)$$

将方程 (3) 代入前面所述的积分表达式后，就可以将其积分表达式化为代数方程组。

3 有限元技术的孕育过程及诞生和发展

现在来看看这两个理论前提的解决过程。

大约在三百年前，牛顿与来布尼兹发明积分法，证明了该运算具有整体对局部的可加性。虽然，积分运算与有限元技术对定义域的划分是不同的，前者进行无限划分而后者进行有限划分，但积分运算为实现有限元技术准备好了一个理论基础。

在牛顿之后约一百年，著名数学家高斯提出了加权余值法及线性代数方程组的解法^[1]。这两项成果的前者被用来将方程 (1) 改写为积分表达式，后者被用来求解有限元法所得出的代数方程组。在 18 世纪，另一位数学家拉格郎日提出泛函分析。泛函分析是将 PDE 改写为积分表达式的另一途经。

在 19 世纪末及 20 世纪初，数学家瑞雷和里兹首先提出可对全定义域运用展开函数来表达其上的未知函数。1915 年，数学家伽辽金提出了选择展开函数中形函数的伽辽金法，该方法被广泛地用于有限元。1943 年，数学家库朗德第一次提出了可在定义域内分片地使用展开函数来表达其上的未知函数。这实际上就是有限元的做法。

所以，到这时为止，实现有限元技术的第二个理论基础也已确立。

20 世纪 50 年代, 飞机设计师们发现无法用传统的力学方法分析飞机的应力、应变等问题。波音公司的一个技术小组, 首先将连续体的机翼离散为三角形板块的集合来进行应力分析, 经过一番波折后获得前述的两个离散的成功。20 世纪 50 年代, 大型电子计算机投入了解算大型代数方程组的工作, 这为实现有限元技术准备好了物质条件。1960 年前后, 美国的 R. W. Clough 教授及我国的冯康教授分别独立地在论文中提出了“有限单元”这样的名词^{[5][6]}。此后, 这样的叫法被大家接受, 有限元技术从此正式诞生, 并很快风靡世界。

4 结 语

从以上分析我们可以清楚地看到, 到 1943 年, 有限元技术所需要的理论基础已经齐备。到了 1950 年, 有限元技术实际应用所需的物质基础, 即大型电子计算机, 也投入了使用。而生产实际, 首先是飞机设计, 又提出了迫切的要求, 于是有限元技术就可以、且必须诞生了。

有限元法首先在实际中应用, 并获得巨大的成功。这在当时曾经在理论界造成一阵迷惑, 有的人甚至批评它缺乏理论基础。但它的实践成功吸引了大量学者来研究它, 并终于发现了该新技术深刻的理论背景和实践背景。目前线性有限元技术已发展成熟, 而对非线性有限元技术的研究正在深入展开。

本文作者将上述认识用在自己对有限元技术的研究及教学中, 感到思路清晰; 用在学生对有限元技术的学习中, 也感到效果良好。

参考文献

1. Annika M, Hakan C. The Development of the Finite Element Method, Report tvsm 7040, Lund University, Sweden, 1987
2. Zienkiewicz O C. The finite element method. Third edition, McGraw-Hill, 1977
3. Vichnevetsky R. Computer Method For Partial Diffrencial Equations, vol. 1, Prentice hall, 1981
4. Niels O, Hans P. Introduction to the finite element method. Prentice Hall, 1992
5. Clough R W. The finite element method in plane stress analysis. proceedings 2nd asce conf. On elfetronic computation, Pittsburgh, PA., sep. 8~9, 1960
6. 林群, 21 世纪初科学发展趋势课题组. 21 世纪初科学发展趋势. 北京: 科学出版社, 1996

科学复兴之难

蔡中民 蔡 冰

(太原理工大学应力所 太原市建筑设计院, 030024)

【摘 要】力学属于科学范畴。而中国“尚无近古哲学”，由中古哲学导致了中国哲学家“及未有以知识之自身为自有其好，故不为知识而知识”，而“多注重于人之是什么，而不注重于人之有什么”。形成了中国“仅有科学萌芽，而无正式的科学”的状态。本文试图说明，中国力学若要科学地发展，哲学上的研究是必不可少的；而中国哲学上的弱点，将引起科学复兴之难。

【关键词】科学复兴，力学发展，哲学

1 什么是科学

什么是科学？在西方已经争论了数个世纪，参加争论的科学家、哲学家、历史学家以及其他有关人员，仍未得出一致意见。戴维·林德伯格在《西方科学的起源》一书指出：有关科学的几个概念已得到有利的支持。①科学是人类藉此获得对外界环境控制的行为模式。②是理论形态的知识体系，技术则是应用理论知识解决实际问题。③依据理论的陈述形式来定义，陈述的形式应当是一般的、定律式的，最好用数学语言表达。④可以用方法论来定义。⑤是个人获取知识和评判知识的某种独特方法。⑥是具体一套关于自然的信念，多少与现行的物理学、化学、生物学、地质学的学说相仿。⑦“科学”和“科学的”经常用来指具有严格、精确或客观等特征的过程和信念。^[1]Jsme Stollman 认为科学“是以方法、非客观实体而存在……”，科学的日的不是寻找真实，而是知识，即以客观考察为基础得出关于世界的观点。不像所谓的“真实”知识，不会经常随着新的发现而改变。^[2]冯友兰在《中国哲学史》注中“……

科学所说之事物，亦在语言文字之外；然此等事物，只是事物，不是科学；语言文字所表之原理公式等，方是科学。”^[3]

自中华人民共和国成立以来，在中国共产党关于科学技术的总方针政策的表述中，“科学”一词是缺少不了的。1949年《中国人民政治协商会议共同纲领》中“努力、发展自然科学，以服务于工业农业和国防的建设。”1952年中科院副院长陈伯达在中科院研究人员会上“……这就是要求科学家在最根本而又最广泛的范围上联系看实际，也就是真正地联系最广大的人民群众。”1956年制定12年科学技术远景规划时提出了“以任务为经，以科学为纬。”1958年张劲夫副院长在科学院分院会议上指出：“以任务带学科”“是按国家生产建设需要提出研究任务，来有计划地组织各门学科的力量进行集体活动”。“‘以任务带学科’的革命性在于，是群众创造的，解决以往传统方法的、按学科分门别类地进行研究，从而造成门类过多、过细弊端的方法。”1960年以聂荣臻名义提出的《关于自然科学工作中若干政策问题的请示报告》中指出：“根据几年来的经验，一方面要继续防止为科学而科学的倾向，另一方面也要防止对理论联系实际作狭隘的、近视的了解。”^[4]2002年中国科学院工作会议，提出了中科院新时期办院方针，即“面向国家战略要求，面向世界科学前沿，加强原始科学创新，加强关键技术创新与集成，攀登世界科技高峰，为我国经济建设、国家安全和可持续发展不断做出基础性、战略性、前瞻性的重大创新贡献”。

现代“科学”一词存在上述一些模糊不清之处，而古代的这个术语（拉丁文是 *scientia*，希腊文是 *episteme*）适用于任何具有严格和确定性特征的信念体系，不管这些信念与自然是否相关。因此，中世纪把神学作为科学。林德伯格为了使于探讨古代和中世纪对自然的研究，使用了“自然哲学”一词的表述；自然哲学在中世纪是一种思想探险，以致牛顿把他的伟大著作冠名为《自然哲学的数学原理》，在牛顿看来，自然哲学是人类探索所而对现实世界的较宽泛的哲学探讨中一个不可少或缺的组成部分。

“科学”在中国无论古代还是现代在文字表述尤其是在思想意识中存在着比西方更混乱更模糊的现象。怎样才能使“科学”一词在国民尤其是在一些持有权力的人的思想认识中有一个明确清晰的概念，惟哲学

而无他径。

2 中国哲学之弱点

哲学一词在西方历史甚久，但对哲学之定义亦不相同。为方便一般是先述认可的哲学内容，知其内容，即可知哲学为何，其定义也就给出哲学包涵三大部：宇宙论、人生论、知识论。宇宙论研究“存在”之本体及“真实”之要素和世界之发生及其历史；人生论研究人究竟是什么，即心理学和人究竟应该怎样，即伦理学、政治社会哲学；知识论研究知识之性质即知识论和知识之规范即论理学。它们之间皆相互有关。由孟太葛的三分法，即方法论、形而上学和价值论，冯友兰把哲学内容分为宇宙论、人生论和方法论。于是使西方哲学与中国哲学产生了对应关系，宇宙论对应天道，人生论对应性命，唯方法论仅在中国古代有讨论之。哲学方法是直觉的、反理智的。“其实凡所谓直觉、顿悟、神秘经验等，虽有甚高的价值，但不必以之混入哲学方法之内。无论科学哲学，皆系写出或说出之道理，皆必以严刻的理智态度表出之。”直觉能使吾人得到一个经验，而不能使吾人成立一个道理。一个经验之本身，无所谓真妄；一个道理，是一个判断，判断必合逻辑。各种学说之目的，皆不在叙述经验，而在成立道理，故其方法，必为逻辑的、科学的。近人不明此故，于科学方法，大有争论；其实所谓科学方法，实即吾人普通思想之方法之较认真、较精确者，非有若何奇妙也。”“科学方法，即哲学方法，与吾人普通思想之方法，亦仅有程度上的差异，无种类上的差异。”

论证，哲学是理智产物，哲学家欲成立道理，必须以论证证明其成立。荀子“其特之有故，其言之成理”，孟子“余好辩哉？余不得已也。”辩，即以论证攻击他人之非，证明自己之是；欲立一哲学的道理非大辩不可，而实行一事则可不辩，缄默也可。近代中国“辩”日状愈下，几乎变成了“权威”的一言堂。

哲学方法论，在宋明之后，中国无研究者。清朝称之为义理学中，其方法论是“为学之方”，此方法论非求知之方法，而是修养之方法；非所以求真，乃所以求善之方法。按冯友兰之分法，方法论与西方的知识论有关；在西方近代史中，一个重要的事是“我”之自觉，“我”已

自觉之后，“我”之世界即分为二：皆“非我”。“我”与“非我”既分，即未“我”如何能知“非我”，则知识论随之而生。中国人的思想中，未显著的有“我”之自觉，亦未显著的将“我”与“非我”分开，因此知识问题未成为中国哲学的重要问题。其历史原因在于中国哲学家特别注意人事，注重于人之是什么，而不注重人之有什么。如人是圣人，即毫无知识亦是圣人；如人是恶人，即有无限之知识，亦是恶人。不喜为知识而求知识，不喜对思想辩论程序及方法进行研究。从而造成了“知”和“行”的不协调性，以致造成了与“行”无关的“知”甚至与“行”关系间接的“知”都被歧视，追求与“行”无关的“知”的人，以及得知而不力行的人，也是要价值所否定。

3 力学的两难

马克思曾预言过“一种科学只有在能运用数学形式时，才算达到了真正完善的地步”。上述对“科学”一词表述与马克思的表述是一致的。我们是信奉马克思主义的，而在自然科学上我们做了些什么？讨论科技发展方向与科技政策的一个中心话语“理论联系实际”始终未能给出清晰的解释，在科学研究中，“理论”对应的是“实验”、经验、观察等；“理论联系实际”或“理论与实际一致”所指的应当是，用以描述对象的命题应与经验观察相吻合，这是哲学的认识论问题；把它用于科技政策也许是冯友兰不幸言中的，在宋明之后哲学方法论在中国没有人研究之故。可喜的是李真真的“确定‘理论与实际关系’的困境：政治指向与发展指向的冲突”一文中已经作了详细的研究，尤其是从哲学上探讨了“理论联系实际”得以透过外在层面转化为科学家内在道德焦虑，进而转化为自我否定内在动力的特征文化与心理依据。

如果说只有能用语言文字表述为原理或公式的，才称之为“科学”；那末，力学和数学是当仁不让的。世界数学家在论述数字的应用时一致认为：数学是一种关键的、普遍适用的、并赋予人以能力的技术。从某种意义上讲，高技术本质上是一种数学技术。”^[5]许多科学家包括数学家已倾向于把数学科学从自然科学中分离出来，作为哲学之下的一个科学层次。而力学呢？我们的根据是牛顿力学已经由牛顿冠名为《自然哲学的数学原理》。但现实又怎样？一些持有不同大小权力的人把“科教

兴国”叫得震天响，而行动为何？把本来已经分得够细的专业名称要么在前面冠以“工程”、“应用”或在后面加上“力学”，要么命名一些内涵不清的专业，如信息与计算科学专业、计算机科学与技术专业等。有的行政领导不让数学专业的教师报考力学专业的博士生；教学计划中基础课课时一压再压；图书馆的书刊越订越少，外文期刊室阅读的人寥寥无几等。很显然目前教育界已经进入了市场经济的潮流，学校以创收为目的，教师为获得报酬而教书，学生为拿到文凭、学位面念书。基础研究何以生存！基础研究的人才何以继之！

力学的两难就在于它的二重性：既有基础性研究即“科学”的一面；又有应用性即技术性一面。如果向科学性一面倾斜，力学元创新经过几代人的努力是不会辜负国民的厚望。但是面临着目前软环境和硬环境的严峻制约，所谓软环境就是指国家科技政策的导向和科研机构基层领导制定的各种规章制度。能给“科学”研究人员以较宽松的条件，如解除研究人员的心理压力，不担心冠以“脱离实际”的帽子；解除养家活口的基本科研经费的压力；去消基层科研管理者对科研人员颁布的没有科学性的，如每年一级杂志上发表几篇文、Ei、Sci 录用几篇、科研经费多少、主讲几门课、课时多少等规章制度；所谓硬环境就是实验室设备仪器的配置的完善以及在一个划定的区域内资源共享免费提供服务。如果力学向技术性一面倾斜，力学就失去他的个性，也就失去了他的生存空间；在急功近利政策的导向如为地方经济服务和一些部门负责人总希望在任期内见到成效的短期效应，“科学”研究，这个“于无声处听惊雷”而无立竿见影的标志性成果，只能悄悄地死去。由于没有原创性的支持，技术性发展也只能靠泊来的洋货。力学何去何从，寄希望于国家的科学和技术政策。

参考文献

1. 戴维·林德伯格著. 王珺, 刘晓峰等译. 西方科学的起源. 中国对外翻译出版公司, 2001
2. 王巍, 安思敏等. “考古学的定位”学术研讨会重谈. 考古, 2002.No.3
3. 冯友兰. 中国哲学史. 北京: 中华书局, 1961
4. 李真真. 确定“理论与实际关系”的困境: 政治指向与发展指向的冲突. 自然科

学史研究, 2002, No. 1

5. 余翔林. “皇冠”与“百草地”. 科学新闻. 2002, No. 16

沙漠——颗粒介质

——力学研究的一个新使命

(摘要)

苗天德

(兰州大学物理科学与技术学院力学系, 73000)

由平均颗粒径为 $0.087 \sim 0.25\text{mm}$ 的无穷尽的无黏性沙粒, 在风力作用下组织成相互嵌套的大小波列, 形成沙波纹、沙丘、直到波长达 20km 沙丘链的浩瀚地貌景观, 尺度跨度达 $10^9 \sim 10^{10}$, 这是大自然的神奇造化。作者在追踪该领域的研究工作中, 通过查阅文献, 发现在更大范围内颗粒介质力学行为的研究正在成为当前国际物理科学的一个热点。目前, 国内力学界对此还缺乏足够重视。本报告拟结合作者的研究心得, 介绍国际上颗粒介质研究关注的要点和一些有趣的结果。综述有关科学家对研究颗粒介质重要意义的见解, 并联想关于经典连续介质理论的改造问题。

介绍内容包括:

1. 颗粒介质的静力学行为

(1) 应力链 (Stress chain); 力在颗粒间传递路径的分形特征及其同颗粒集合体构造历史的相关性。

(2) 搭拱效应 (Arching effects) 与应力浸斜 (Stress dip)。连续介质的平均应力分布与应力涨落问题。

2. 颗粒介质的动力学行为

(1) 沙漠地貌的波列级串 Pattern。“车辙”现象, 自修复行为, 自然造化之谜。

(2) 颗粒聚类与 Maxwell 佯谬。

(3) 颗粒介质在外力作用下的分聚行为, 自组织现象实验个例。

(4) 颗粒流的非线性行为。

综述有关科学家对颗粒介质研究意义的见解: 对天体物理 (星云形

态)、热力学、生命科学、地质学的意义，在材料科学、纳米技术及若干高科技领域的运用，对传统工业的意义。

颗粒介质具有许多有趣的性质，至今未被人们很好的理解。离散介质力学理论的建立，现在看来，离不开非线性动力学和统计力学的最新研究成果，此外还应该有什么？目前尚看不出有头绪的进展，力学家面临着新挑战和机遇：发展非连续介质力学。

处理不确定问题的新方法

——非概率区间分析模型

邱志平 王晓军 马 一

(北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系, 100083)

【摘 要】随着科学和技术的发展,人们已经认识到,研究和处理不确定问题的重要性,并且认识到不确定性并不等于随机性,模糊性和未确知性也都是不确定性。对不确定问题采用什么理论进行的处理往往取决于我们占有统计数据的多少和性质。在本论文中我们将介绍一种处理不确定问题的新理论和方法——非概率区间分析模型。在这种模型中,将不确定变量用集合(如超长方体或椭球)进行定量化,然后,利用区间数学的理论和方法以及各种优化理论和方法来研究不确定问题。与传统的概率统计方法和模糊理论不同,区间分析方法能在具有不确定性参数的概率统计密度或隶属度知之不全甚至知之甚少以至于完全不知道的情况下,对具有不确定性参数进行定量化,并以此为基础计算出结构响应所在的范围。这些分析和计算结果是区间运算的副产品,其他基于确定性参数的数值分析和计算所不能得到的。

【关键词】不确定性, 概率统计, 非概率模型, 区间分析

1 引 言

科学技术的进步和时代的发展,对各种功能的工程结构提出了越来越高的要求,而科学技术的精密化和深刻化又使得在工程结构的分析和设计中需要考虑的因素越来越多,用传统的分析和设计方法已难以解决这样复杂的工程结构问题。要把工程结构的分析和设计做得尽量符合要求、符合实际,就要有新的、符合现代化的分析和设计理论和方法。

工程中所遇到的不确定性^[1~3]主要是指：不定性，不固定性，不可靠性，不可预知性，随机性，意义含糊，易变性，不完全性，未知然而有界性，不规则性等。一个物理量的真实值和近似值的差异，称为误差。在工程实际的测量或计算中，我们对物理量的真实值常常很少知道或不可能知道。大多数情况下，我们知道的只是物理量的近似值和误差界限。所以误差也是一种不确定性。

工程结构中的分析和设计方法一般都基于确定的结构参数和确定的数学模型。然而，实际上，经常存在着与材料性质，几何特性，外力，初始条件，边界条件及与结构部件接头有关的误差和不确定性。虽然，在大多数情况下，误差或不确定性可能很小，但这些误差或不确定性结合在一起都可能使结构响应产生大的，意想不到的偏差或不可预知性。特别是在多部件系统中。

工程结构中的各种误差和不确定性，有的是参数具有制造误差、安装误差或不确定性；有的是参数具有计算误差或测量误差；有的是系统处于不同的工作状况时，参数具有不同的数值；有的是参数具有一定的变化范围；有些参数甚至目前无法精确测量或给出。但是，对于一个具体的结构系统，一般总可以预先知道或估计出某些参数所在的大致范围，且使其偏差相对较小。

工程实际中所存在的参数不确定现象。实际上存在着很多不同的结构参数不确定原因，而且通常是各种现象的混合。就像结构间接头的情况那样。参数不确定性的基本原因在大多数情况下是完全不可理解的。当结构参数的物理特性和外力数值很清楚时，或其不确定量很小时，采用确定性的数值分析方法就可能足够了。不过，大多数工程结构十分复杂，彻底弄清参数不确定原因是不可能或不经济的。在这种情况下，概率与数理统计，模糊统计理论和区间分析方法可能最好的可供选择的分析和设计手段。但是究竟对不确定问题采用什么理论进行的处理往往取决于我们占有不确定量统计数据多少和性质。在本论文中，将介绍一种处理不确定问题的新理论和新方法——非概率区间分析模型。在这种模型中，将不确定变量用集合^[4,5]（如超长方体或椭球）进行定量化，然后，利用区间数学的理论和方法以及各种优化理论和方法来研究不确定问题。与传统的概率统计方法和模糊理论不同，区间分析方法能在具

有不确定性参数的概率统计密度或隶属度知之不全甚至知之甚少以至完全不知道的情况下,对具有不确定性参数进行定量化,并以此为基础计算出结构响应所在的范围。并由这些区间范围给出实际运算结果的近似估计以及近似估计的绝对误差界限。

2 不确定问题的非概率区间分析模型

大多数荷载和结构的其他设计参数,实际上,都具有某种程度的误差或不确定性,都应当看作是不确定变量(即使在设计计算中最后都是按确定变量处理的)。在对结构进行设计和分析时,需要用某些适当的方法对这些不确定变量进行定量化,并针对所讨论的结构研究这些不确定量之间的相互关系,及其对结构行为的影响。

在研究不确定现象的概率模型中,用随机变量或随机函数对随机不确定性进行定量化。在研究不确定现象的模糊模型中,对不确定性用模糊变量或模糊函数进行定量化。在不确定现象的未知然而有界模型或非概率区间分析模型中,目前都用凸集合(如超椭球或超长方体)将不确定性进行定量化。如何选择上述那种模型不确定模型研究工程中的不确定问题,则完全取决于所能知道的有关工程结构不确定信息的性质和程度。

在非概率区间分析模型中,将用区间矢量或区间矢量函数将具有误差或不确定性的结构参数和荷载进行定量化。具体作法如下:

设 a 是结构设计参数的精确值,而 a^c 是相应的近似值,且已知其绝对误差界 Δa ,则结构参数的精确值 Δa 所在的范围为

$$a \in a^I = [a^c - \Delta a, a^c + \Delta a] = [\underline{a}, \bar{a}] \quad (1)$$

式中 $\underline{a} = a^c - \Delta a$, $\bar{a} = a^c + \Delta a$,而 a^I 称为区间参数。

设 b 是结构系统的具有一定变化范围或随不同工况而取不同数值的参数,则结构参数 b 所在的范围或取不同数值的区域可表示为

$$b \in b^I = [\underline{b}, \bar{b}] \quad (2)$$

显然,(2)式也可以转化成(3)式的形式,即

$$b^I = [b^c - \Delta b, b^c + \Delta b] = [\underline{b}, \bar{b}] \quad (3)$$

其中

$$b^c = \frac{(\bar{b} + b)}{2}, \Delta b = \frac{(\bar{b} - b)}{2} \quad (4)$$

这样，利用具有误差或一定变域的结构参数所在的区间范围，按照区间分析或区间数学^[6-8]中的区间运算和代数性质，我们能够确定出结构参数间各种运算的精确结果所在的区间范围

$$r \in r^I = [\underline{r}, \bar{r}] \quad (5)$$

并由这些区间范围 (5) 给出实际运算结果的近似估计以及近似估计的绝对误差界限

$$r^c = \frac{(\bar{r} + \underline{r})}{2}, \Delta r = \frac{(\bar{r} - \underline{r})}{2} \quad (6)$$

这些分析和计算结果是区间运算的副产品，其他基于确定性参数的数值分析和计算所不能得到的。

与传统的概率统计方法和模糊理论不同，区间分析能在具有误差或不确定性参数的概率统计密度或隶属度知之不全甚至知之甚少以至于完全不知道的情况下，对具有误差或不确定性参数进行定量化并以此为基础计算出结构响应所在的范围。

由于没有任何一个数学模型可以准确地描述实际一个工程结构系统。所以，在结构分析和设计中，必须知道结构参数和荷载的误差或不确定性真怎样影响结构系统的性质和行为。目前，国际上正在流行用集合来对具有误差或不确定工程结构系统进行建立分析和计算模型，进而表达真实的工程结构系统。

在建立具有误差或不确定性工程结构系统模型中，对某些结构参数用集合进行定量化时，实际结构系统的某些参数所在的变化范围可能是很复杂的，这种复杂的集合可能难以进行数学处理。因此，可以把它嵌入一个容易处理的较大的集合（如 n 维长方体或椭球）中。可以想像，这个数学上容易处理的的较大集合（如 n 维长方体）所能达到的效果可能不如那个较小集合所能达到的效果好。这是因为覆盖误差或不确定所在范围的集合（如区间，也就是 n 维长方体）有时是一种太粗糙的近似。在这种情况下，根据区间分析模型所确定的结构响应范围相对原有的具有误差或不确定性结构模型的响应范围可能过大。但是，如果充分考虑区间分析的性质和特点^[9]，并进行广泛的区间运算，最终还会

得到满足实际工程要求的, 宽度足够小的结构响应范围一区间。

3 区间参数动力响应问题介绍

考虑具有个自由度的结构动力响应问题

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (7)$$

其中 $M = (m_{ij})$, $C = (c_{ij})$ 和 $K = (k_{ij})$ 分别是结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, 而 $F(t) = (f_i(t))$ 是结构的外荷载。 $x(t) = (x_i(t))$, $\dot{x}(t) = (\dot{x}_i(t))$ 和 $\ddot{x}(t) = (\ddot{x}_i(t))$ 分别是结构的位移、速度和加速度向量。质量矩阵 $M = (m_{ij})$ 是正定的, 阻尼矩阵 $C = (c_{ij})$ 和刚度矩阵 $K = (k_{ij})$ 都是正半定的。

在有限元分析中, 经过整理, 结构的质量矩阵 $M = (m_{ij})$, 阻尼矩阵 $C = (c_{ij})$, 刚度矩阵 $K = (k_{ij})$ 和荷载 $F(t) = (f_i(t))$ 均可以表示成结构参数 $\alpha = (\alpha_i)$ 的函数, 即

$$M = M(\alpha) = (m_{ij}(\alpha)), C = C(\alpha) = (c_{ij}(\alpha)) \quad (8)$$

$$K = K(\alpha) = (k_{ij}(\alpha)), F(t) = F(\alpha, t) = (f_i(\alpha, t))$$

其中 $\alpha = (\alpha_i)$ 是 m 维结构参数向量。这样, 方程 (7) 能被写成如下的形式

$$M(\alpha)\ddot{x}(\alpha, t) + C(\alpha)\dot{x}(\alpha, t) + K(\alpha)x(\alpha, t) = F(\alpha, t) \quad (9)$$

由于结构参数向量 $\alpha = (\alpha_i)$ 是不确定的, 我们可以在结构参数向量约束

$$\underline{\alpha} \leq \alpha \leq \bar{\alpha}, \underline{\alpha}_i \leq \alpha_i \leq \bar{\alpha}_i, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

条件下, 考虑结构动力响应问题 (9), 式中 $\bar{\alpha} = (\bar{\alpha}_i)$ 和 $\underline{\alpha} = (\underline{\alpha}_i)$ 分别是结构参数向量 $\alpha = (\alpha_i)$ 的上界向量和下界向量。

显然, 由于结构参数向量 $\alpha = (\alpha_i)$ 具有一定的变化范围, 所以满足约束 (10) 和方程 (9) 的位移向量不是惟一的, 而是有无穷多组。传统的求解微分方程的解法都不能直接求解这类问题。必须利用新的数学工具解决这类结构动力响应问题。

利用区间数学中区间向量^[10]的表示方法

$$\alpha \in \alpha^I = [\underline{\alpha}, \bar{\alpha}] = (\alpha_i^I),$$

$$a_i \in a_i^I = [\underline{a}_i, \bar{a}_i], i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

(10) 式和 (9) 式可简便地和形式上地写成

$$M(a^I) \ddot{x}(a^I, t) + C(a^I) \dot{x}(a^I, t) + K(a^I)x(a^I, t) = F(a^I, t) \quad (12)$$

求解区间参数线性方程组问题还可叙述成：在已知区间参数 $a^I = [\underline{a}, \bar{a}]$ 的上界 \bar{a} 和下界 \underline{a} 的条件下，求解所有的结构动力位移向量集合

$$\Gamma = \{x(a, t) : M(a) \ddot{x}(a, t) + C(a) \dot{x}(a, t) + K(a)x(a, t) = F(a, t), a \in a^I\} \quad (13)$$

一般来讲，集合 Γ 的形状是很复杂的，难以精确求解的。

按照区间数学的求解原理，求解区间微分方程就是求解包含结构动力惟一集合的最小区间向量

$$x^I(a, t) = [\underline{x}(a, t), \bar{x}(a, t)] = (x_i^I(a, t)) \quad (14)$$

及分量形式

$$x_i^I(a, t) = [(\bar{x}_i(a, t)), \underline{x}_i(a, t)], i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

其中 $\bar{x}(a, t) = (\bar{x}_i(a, t))$, $\underline{x}(a, t) = (\underline{x}_i(a, t))$, 和

$$\bar{x}(a, t) = \max \left\{ \begin{array}{l} x(a, t) : x(a, t) \in R^n, M(a) \ddot{x}(a, t) + \\ C(a) \dot{x}(a, t) + K(a)x(a, t) = F(a, t), a \in a^I \end{array} \right\} \quad (16)$$

和

$$\underline{x}(a, t) = \min \left\{ \begin{array}{l} x(a, t) : x(a, t) \in R^n, M(a) \ddot{x}(a, t) + \\ C(a) \dot{x}(a, t) + K(a)x(a, t) = F(a, t), a \in a^I \end{array} \right\} \quad (17)$$

有关区间微分方程组的求解方法见有关文献。

4 研究方向展望

由于区间分析的特殊性，既可处理非线性问题和不确定问题，又同时具有数和集合的特点，这就决定了它可以解决传统的理论和方法所不能处理的问题。目前有下列一些问题值得研究：① 非概率区间可靠性

问题；② 区间全局优化问题；③ 区间有限元问题；④ 非线性问题的区间算法问题；⑤ 灵敏度分析的区间算法问题。

总之，区间分析是一个新的数学分支，自近 30 年来才为人们所共知，然而大多数数学家，科学家和工程师还未有所闻，在科学研究的园地里的绝大多数地方，尚未传播开来。通常一个问题的原始数据并不能精确的知道，而只知道其包含在给定的界限范围内之中；又是一个给定的过程的理论原理并没有得到完善，但是近似描述其过程的方程已知。对于这两种情况，区间数学分析都希望给出这些问题的未知解的界限。从事研究的都可以运用这一新的工具，新概念和新方法解决他们所遇到的科学问题。

参考文献

1. Elishakoff I. Convex modeling-A Generalization of Interval Analysis for Non-probabilistic treatment of Uncertainty. *International Journal of Reliable Computing*, Supplement, 1995, pp. 76 ~ 79
2. Ang A H-S, Tang W H. *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*. Volume I: Basic Principles, N. Y., John Wiley & Sons, 1975
3. Alefeld G, Herzberger J. *Introductions to Interval Computations*, New York, Academic Press, 1983
4. Ben-Haim Y, Elishakoff I. *Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics*. Amsterdam, Elsevier Science Publisher, 1990
5. Elishakoff I, Elisseeff P, Glegg S A L. Non-probabilistic, convex-theoretic modeling of scatter in material properties. *AIAA Journal*, 1994, Vol. 32, No. 4, pp. 843 ~ 849
6. Moore R E. *Interval Analysis*, Englewood Cliffs. New York: Prentice-Hall, Inc. 1966
7. Moore R E. *Methods and Applications of Interval Analysis*. Philadelphia, SIAM, 1979
8. 沈祖和. 区间分析方法及其应用. *应用数学与计算数学*, 1983, 2 (1): 1 ~ 29
9. Qiu Z P, Gu Y X. Interval Parameter Perturbation Method for Evaluation the Bounds on Natural Frequencies of Structures with Interval Parameters. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1998, 11 (1), 56 ~ 62
10. Bertsekas D P, Rhodes I B. Recursive State Estimation for A Set-Membership Description of Uncertainty. *IEEE Transactions*, 1971, Vol. AC-16, pp. 117 ~ 123

从 Stokes 第一问题的精确解谈起^①

朱克勤

(清华大学工程力学系, 100084)

【摘要】 Stokes 在 1851 年发表的论文《关于流体内摩擦对摆锤运动的影响》中给出无限大平板突然启动的精确解, 即 Stokes 第一问题, 它在粘性流体力学教材中成为求 Navier-Stokes 方程精确解的一个经典例子。本文以 Stokes 第一问题为例, 阐述在经典问题的教学过程中, 如何引导学生从不同数学方法的角度展开积极思维。事实上, 除了教材上通常使用的量纲分析法, 还可以使用分离变量法、拉普拉斯变换和运算微积分等多种方法求解 Stokes 第一问题。在此基础上, 可不断提出新问题, 鼓励学生探索创新。

【关键词】 Navier-Stokes 方程, 精确解, Stokes 第一问题, 教学研究

1 引言

在流体力学的研究中, 寻找 Navier-Stokes 方程 (简称 N-S 方程) 的精确解一直是一个困难但又令人感到兴趣的问题。N-S 方程是一个非线性的偏微分方程组, 至今还没有找到通解。由于电子计算机技术的高速发展, 使用数值方法已经可以解决了很多实际问题。但由于精确解在稳定性分析、验证数值方法的精度、推动数学方法的研究等方面的重要作用, 同时也可以对许多流动现象和规律能作出更深入的解释, 人们一直没有放弃寻找 N-S 方程精确解的努力。

1851 年 Stokes 在他的论文《关于流体内摩擦对摆锤运动的影响》

^① 清华大学研究生精品课程项目资助。

中给出了无限大平板突然启动和作简谐振荡的两个精确解, 被称为 Stokes 第一和第二问题。它们已成为粘性流体力学教科书中 N-S 方程精确解的经典例子。在过去的一百多年里人们只找到了 N-S 方程有限数目的精确解, 根据粗略的统计, 这个数目大约在 80 左右^[1]。

在“粘性流体力学”课程的教学中, 精确解问题一直占有重要的地位。学生在学完微积分、数学物理方程等高等数学课程后, 通过求解流体力学问题的精确解, 可以切身体会到数学在力学中的重要地位和淋漓尽致的发挥, 这为充分发挥他们的积极思维开辟了一片天地。事实上, 除 N-S 方程之外, 在 Stokes 近似下得到的蠕流方程, 在大雷诺数下得到的边界层方程等也涉及一系列求精确解的问题。在后续的“高等流体力学”课程的教学中, 介绍 N-S 方程精确解研究的最新进展和提高学生求精确解的能力对于他们今后开展流动稳定性和非牛顿流等前沿课题的研究具有重要意义。在清华大学多年流体力学相关课程的教学中, 在关于 N-S 方程精确解方面, 我们注意引导学生用不同的数学方法求解同一物理问题, 力求沟通不同问题精确解之间的联系, 积极鼓励思维和创新。本文将从 Stokes 第一问题谈起, 介绍这方面的体会和例子, 希望起到抛砖引玉的作用。

2 用多种方法求解同一问题的精确解

以 Stokes 第一问题为例, 这是指在静止流体中无限大平板的突然启动问题。一块水平放置的静止无限长平板, 上半空间充满粘性不可压缩的静止流体。在 $t=0$ 瞬时, 平板以常速度 U_0 沿自身平面内的轴方向突然启动, 此后保持等速运动, 求流场的速度分布。

取直角坐标系, xOz 平面与平板重合, y 轴垂直于平板。根据对流场特性的分析, 可知压力为常数, 速度仅有 x 方向的分量, 且与 x, z 无关, 即 $u_x = u(y, t), u_y = u_z = 0$, 相应的 N-S 方程为

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

初始条件为

$$u(y, 0) = 0 \quad (2)$$

边界条件为

$$u(0, t > 0) = U_0, u(\infty, t > 0) = 0 \quad (3)$$

它作为 N-S 方程精确解的一个经典问题, 在“粘性流体力学”教材中给出的求解方法都是通过量纲分析得到无量纲变量 $\eta = \frac{y}{2\sqrt{\nu t}}$, 将以上偏微分方程的定解问题转化为常微分方程的定解问题, 从而得到速度场^[2]

$$u(y, t) = U_0[1 - \operatorname{erf}(\eta)] \quad (4)$$

其中误差函数

$$\operatorname{erf}(\alpha) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\alpha} \exp(-\lambda^2) d\lambda \quad (5)$$

我们指导并鼓励学生探索用不同的方法求解 Stokes 第一问题, 现发现除了以上通常在教科书中出现的解法, 该问题还可以用分离变量法、运算微积和拉氏变换法三种方法来求解, 由于这种探索可以充分发挥学生的数学分析和推演的能力, 这就极大提高了学生的学习兴趣。

2.1 分离变量法求解 Stokes 第一问题

表面上看, 解 (4) 中的变量 y 和 t 是不能分离变量的。但如果利用迭加原理, 在找到原方程的一个特解后, 将方程和边界条件转化为齐次的, 就可以用分离变量法求解。最后的利用变量代换得到解 (4), 详细的求解过程可参见文献 [3]。

若将量纲分析法和分离变量法的求解过程相比, 前者将偏微分方程化简为一个常微分方程求解, 较为简洁, 但这需要在解题之前对问题的物理特性作深入和透彻的分析, 将两个自变量组合成一个新的自变量。在对问题的物理特性尚不十分清楚的情况下, 使用作为通用方法的分离变量法仍然不失为一种重要选择。

2.2 用拉普拉斯变换求解 Stokes 第一问题

由于 t 的变化范围是 $[0, \infty)$, $u(y, t)$ 关于 t 的 Laplace 变换为

$$U(y, s) = \int_0^{\infty} u(y, t) e^{-st} dt \quad (6)$$

方程 (1) 两边作 Laplace 变换得到

$$sU(y, s) = \nu \frac{d^2 U(y, s)}{dy^2} \quad (7)$$

解得

$$U(y, s) = C_1 \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{\nu}} y\right) + C_2 \exp\left(\sqrt{\frac{s}{\nu}} y\right) \quad (8)$$

由无穷远边界条件知 $C_2 = 0$ 。对固壁边界条件 (3) 进行 Laplace 变换得到

$$U(0, s) = \int_0^{\infty} U_0 e^{-st} dt = \frac{U_0}{s} \quad (9)$$

所以 $C_1 = U_0/s$, (17) 式成为

$$U(y, s) = \frac{U_0}{s} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{\nu}} y\right) \quad (10)$$

进行反变换得到

$$\begin{aligned} u(y, t) &= L^{-1}\left[\frac{U_0}{s} \exp\left(-\sqrt{\frac{s}{\nu}} y\right)\right] \\ &= U_0 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{y}{2\sqrt{\nu t}}}^{\infty} \exp(-\eta^2) d\eta \\ &= \frac{2U_0}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{2} + \int_{\frac{y}{2\sqrt{\nu t}}}^{\infty} \exp(-\eta^2) d\eta \right] \end{aligned} \quad (11)$$

其中利用了积分公式 $\int_0^{\infty} \exp(-\eta^2) d\eta = \frac{1}{2} \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$, 它与其他方法得到的解 (4) 是完全一致的。

2.3 用运算微积法求解 Stokes 第一问题

运算微积引入 Heaviside 算子, 它的特点是纯粹的符号运算, 定义了一套分数阶导数的运算公式, 通常难以给出和分析中间步骤的物理意义。但它处理问题的方法直捷惊人, 并且最后的结果具有明确的物理意义, 与经典方法的解完全一致, 给人以异曲同工的感受。掌握该方法对于有潜力的优秀学生是很有挑战性和吸引力的。详细的求解过程可参见文献 [4]。

3 沟通不同精确解之间的联系

以平行平板间 Couette 流的起动过程为例。考虑两块相距无限大的平行平板，最初充满运动粘性系数为 ν 的静止流体，然后在某一初始时刻，下板突然以匀速开始运动，并带动流体运动，上板一直保持静止，在足够长时间后成为定常的 Couette 流。

本问题的基本方程和初始条件仍为 (1) (2) 两式，边界条件为

$$u(0, t > 0) = U_0, u(h, t > 0) = 0 \quad (12)$$

通常利用分离变量法可以得到问题的精确解^[2]

$$\frac{u}{U_0} = \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 \nu t}{h^2}\right) \sin\left(n\pi \frac{y}{h}\right) \quad (13)$$

其中 y 是距运动平板的垂直距离。

基于以上精确解，我们可以进一步思考的一个有意义的问题是：如果令两平板间的距离 $h \rightarrow \infty$ ，本问题将从物理上逼近 Stokes 第一问题，而精确解 (13) 是如何向 Stokes 第一问题的精确解 (4) 逼近的？即两个精确解之间数学上的沟通问题。在 $h \rightarrow \infty$ 的情况下，粗略地看，精确解 (13) 的右边项会退化成一，似乎无法向精确解 (4) 逼近；实际并非如此，精确解 (13) 的右边项是无限多个无穷小量之和，为了能求出它的值，令

$$\zeta = \frac{n\pi}{h} \quad (14)$$

将解 (13) 改写为

$$\frac{u}{U_0} = \left(1 - \frac{y}{h}\right) - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\zeta} \exp(-\zeta^2 \nu t) \sin(\zeta y) \frac{\pi}{h} \quad (15)$$

在 $h \rightarrow \infty$ 的情况下，对于任何确定的 y ， $y/h \rightarrow 0$ ；在 (15) 式中， n 的离散变化成为无限小的变化 π/h ，即 $d\zeta$ ；求和从一到无穷变成积分从零到无穷

$$\frac{u}{U_0} = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\zeta} \exp(-\zeta^2 \nu t) \sin(\zeta y) d\zeta \quad (16)$$

不难证明，上式右边的积分就是误差函数。由此从数学上证明了，在 $h \rightarrow 0$ 时，精确解 (13) 的确逼近 Stokes 第一问题的精确解 (4)。

4 因材施教, 鼓励创新

在 N-S 方程精确解的教学中, 对于优秀的学生, 应该强调因材施教, 鼓励他们参与探索未知精确解的工作。对此, 学生需要较大时间的投入, 可采用期末专题报告的形式来进行, 优秀的专题报告可以取代期末考试。我们几年来的教学实践表明, 这种做法不但可行, 而且取得了较好的效果。应该注意的是, 由于学生的经验和文献阅读量不足, 教师应该在专题报告的立题和研究中给以具体的指导, 注意充分发挥学生在数学演绎和分析制图方面的优势。

比如, Fetcau 等人^[5]最近在 International Journal of Non-Linear Mechanics 上发表了在 Maxwell 流体中 Stokes 第一问题的精确解。我们在过去几年的教学过程中, 就已经提出了 Maxwell 流体在一系列情况下求精确解的问题, 其中由本科生参与完成的较之文献 [5] 更复杂的两个精确解 (Maxwell 流体在直圆管内的起动流的精确解^[6]和 Maxwell 流体在直圆管内的振荡流的精确解^[7]) 已经在有关学术刊物上发表。这是在流体力学关于 N-S 方程精确解教学的过程中, 鼓励学生参与研究和创新工作的两个典型例子。

参考文献

1. Wang C Y. Exact Solutions of the Steady NS Equations. Annu. Rev. Fluid Mech., 1991, 23: 159 - 177
2. 王致清. 粘性流体动力学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990
3. 熊俊, 朱克勤. 用分离变量法求解 Stokes 第一问题. 力学与实践, 2000, 第 22 卷, 第 5 期, 62~63
4. 朱克勤, 彭杰. Stokes 第一问题的分数阶导数解. 力学与实践, 2002, 第 24 卷, 第 2 期, 12~13
5. Fetcau C, Fetcau, Corina. A New Exact Solution for the Flow of a Maxwell Fluid Past an Infinite Plate. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2003, 38: 423~427
6. 朱克勤, 路英杰, 沈平平, 王家禄. Maxwell 流体管内起动流的研究. 力学学报, 2003, 35 (2)
7. 朱克勤, 范勇, 沈平平, 王家禄. Maxwell 流体管内振荡流的壁面摩擦力研究. 石油学报, 2003, 24 (1): 89~91

以“压杆稳定”为例探讨史料、 猜想和方法论对材料力学 教学的升华作用

隋允康

(北京工业大学机电学院工程力学部, 100022)

【摘要】 提出“融入史料、补充猜想和贯通方法论”的做法, 旨在升华材料力学教学的水平。通过学生较难掌握的压杆稳定的课堂教学为例予以说明, 首先回顾了欧拉的原创性工作, 进而做了3个猜想, 然后改善了教学内容的组织。实践表明, 上述做法可以收到更好的教学效果。

【关键词】 力学史, 力学方法论, 压杆稳定, 教学质量

1 引言

在材料力学教学实践中体会到, 如果能很好地运用力学史和力学方法论, 那么, 就会向学生们提供颇具启发性的课堂教学, 有可能以知识为素材启迪学生去领悟创新能力。为了说明具体的做法, 本文以压杆稳定理论的教学为例。

学生普遍反映压杆稳定的概念较难理解, 仔细推敲原因, 根子在于现在的大部分教材中缺乏足够清晰的阐述, 也没能从基本概念出发引向欧拉临界力公式, 而是直接运用梁弯曲公式进行推导, 而学生的疑问是, 既然是受压, 怎么又用弯曲公式呢?

为此, 笔者回顾了大数学家欧拉 (Leonhard Euler) 的原创性工作, 从中得出一个结论: 要填补基本概念和理论推导之间的缝隙, 就应站在历史的角度上, 适当引进猜想, 弥补史料的不足, 在方法论的指导下, 对压杆稳定内容给出一个合乎认知规律的介绍, 向学生清晰地阐述压杆稳定现象, 使学生不仅能够较容易地掌握这部分内容, 而且能够启发他

们创新思维意识。下面将介绍如何用历史观和方法论提高压杆稳定理论的教学质量。

2 概念与理论的间隙导致对欧拉研究的猜想

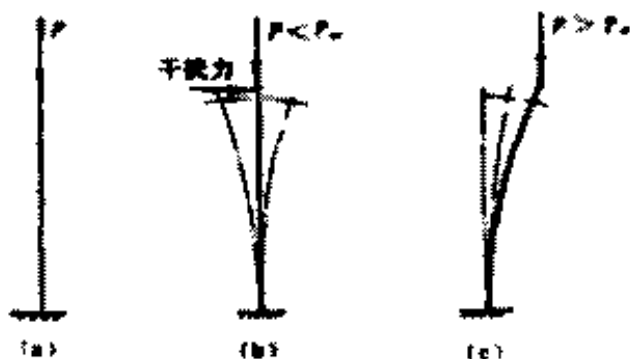


图1 压杆稳定现象示意图

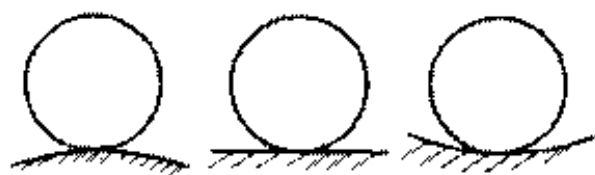


图2 刚球稳定现象示意图

为了使学生们掌握稳定的概念，很多教科书中都从图1(a)所示理想弹性压杆（材料均匀、杆轴线为直线、压力沿轴线方向）谈起。在压力 P 作用下，给一横向干扰力作用，出现两种不同的现象：

(1) 当压力 P 小于某临界值时，若横向干扰力撤消，直杆能回到原有的直线状态 [如图1(b)所示]，称为稳定平衡；

(2) 当压力 P 大于某临界值时，若横向干扰力撤消，直杆不能回到原有的直线状态，[如图1(c)所示]，称为不稳定平衡。

为了说明平衡状态的稳定与不稳定的区别，有的书中还列举图2所示刚性圆球的平衡的不同情况：

(1) 稳定平衡，如刚球在凹面上时，给一干扰力使刚球离开原位置，当干扰力撤消，刚球将回到原有平衡位置；

(2) 不稳定平衡，如刚球在凸面上时，给一干扰力使刚球离开原位置，当干扰力撤消，刚球不会回到原有位置，而是偏离到远处去；

(3) 随遇平衡，如刚球在平面上时，给一干扰力使刚球离开原位置，当干扰力撤消，刚球可以在新位置上平衡。

用刚球揭示平衡的稳定属性，不仅简洁，而且又多出了随遇平衡的概念。

还有的教材用刚性杆的例子作为从刚球到理想弹性压杆之间的过渡。

以上这些做法都有利于初学者在稳定性基点上加深对平衡的认识。

然而，往前进一步，推导压杆稳定公式时，干扰力不见了，更没有加干扰力和撤去干扰力的过程。功亏一篑的叙述，使得并不难的压杆稳定公式推导显得不易理解。

为此，应当追溯欧拉的原创性工作。欧拉在 1744 年的成果《曲线的变分法》一书中，从变分法得出了

$$\frac{Cy''}{[1 + (y')^2]^{3/2}} = Px \quad (1)$$

这一式子同雅科比·伯努里 (Jacob Bernoulli) 的弯曲变形曲率正比于弯矩的理论是完全一致的。在求解式 (1) 时，“由于欧拉并没有将他的讨论局限于只考虑小挠度方面，在分母中的 $(y')^2$ 项是不能将它略去不计的”，“欧拉用级数来积分”。^[1]

欧拉的贡献不是关于梁变形，而是关于变分法方面。如果说这种巨大贡献是在力学中超前地引入先进的数学工具，那么第二个超前的贡献是力学新概念方面的。欧拉提出了压屈载荷的概念。

文 [1] 指出，欧拉在考虑了力 P 与梁轴线有夹角的情况，当此角极小时，就能得到轴向压力作用下压屈的重要情况。…发生压屈的载荷也可由下述公式得到：

$$P = \frac{C\pi^2}{4l^2}$$

欧拉说：“因此，除非载荷 P 大于 $\frac{C\pi^2}{4l^2}$ ，绝对用不着担心弯曲发生；反之，如果 P 的重量大于此值，柱子就不能抵抗弯曲。”

欧拉提出的屈曲载荷就是我们现在在压杆稳定理论中说的临界载荷，在当时人们只研究梁弯曲问题时，欧拉提出了这个概念，不能不说是一个十分超前的贡献。

1757 年，欧拉出版了柏林科学院研究报告《关于柱的承载力》一书，他利用经过简化的微分方程

$$Cy'' = -Py \quad (2)$$

简单地导出了临界载荷公式。

文献 [1] 没有叙述首次提出新概念和简单推导出结果的详细过程。这一过程如果能够披露出来，对于我们如何提出新概念、寻找新方法都

将是一个很好的启迪，对于向学生们讲懂压杆问题也将是非常重要的。

因此，有必要做出猜想，以期找回来从梁的弯曲到梁的压屈之间的一段思维演变的“心路历程”。

3 猜想 1：欧拉的第一个飞跃——从弯曲到屈曲

欧拉得到的式 (1)，实际是图 3 中 $\theta = 90^\circ$ 的情况；欧拉作为数学家，研究 θ 为一般的情况也是很自然的事情：

$$M = xP\sin\theta + (f - y)P\cos\theta \quad (3)$$

其中 f 是端点的总挠度。

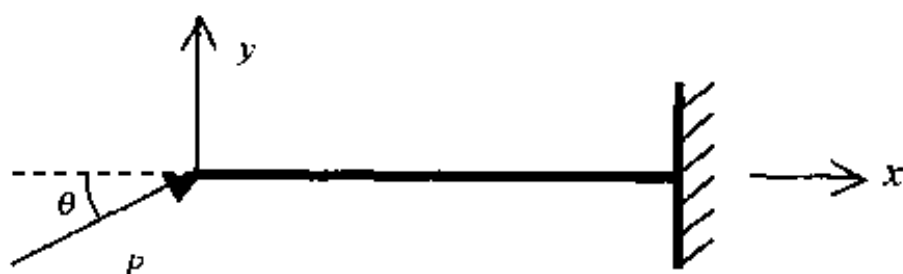


图 3 外力成一角度作用于弹性杆端

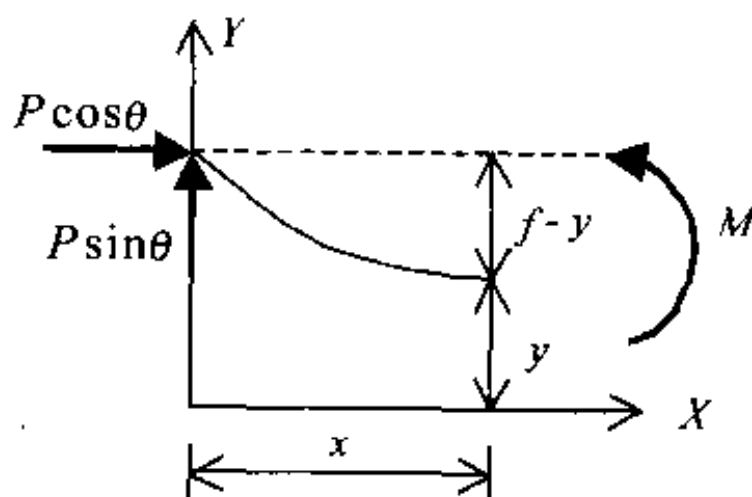


图 4 弹性杆任意截面的弯矩

类似式 (1) 的推导由式 (2) 得到

$$\frac{Cy''}{[1 + (y')^2]^{3/2}} = xP\sin\theta + (f - y)P\cos\theta \quad (4)$$

下面猜想欧拉对式 (4) 的求解，在小挠度情形下， $(y')^2$ 可以略掉，于是式 (4) 成为常系数线性常微分方程：

$$Cy'' + P\cos\theta = xP\sin\theta + fP\cos\theta \quad (5)$$

式 (5) 的解为

$$y = a \sin kx + b \cos kx + \frac{\sin \theta}{\cos \theta} + f \quad (6)$$

其中 $k = \sqrt{\frac{P \cos \theta}{C}}$ 。

欧拉研究 $\theta \rightarrow 0$ 的情况，即外载趋于轴压力的情况，此时

$$y = a \sin kx + b \cos kx + f \quad (7)$$

$$k = \sqrt{\frac{P}{C}} \quad (8)$$

边界条件为

$$x = 0 \text{ 时 } y = f \quad (9)$$

$$x = l \text{ 时 } y = 0 \quad (10)$$

$$x = l \text{ 时 } y' = 0 \quad (11)$$

由此得

$$a = -f \quad (12)$$

$$b = 0 \quad (13)$$

$$\cos kl = 0 \quad (14)$$

由式 (14) 得

$$kl = n\pi + \frac{\pi}{2} \quad (15)$$

当 $n = 0$ 时

$$k = \frac{\pi}{2l} \quad (16)$$

将式 (16) 代入式 (8) 中得

$$P = \frac{C\pi^2}{4l^2} \quad (17)$$

以上就是对欧拉由弯曲问题引向屈曲问题详细过程的猜想。

如果说，考虑与弹性杆轴成一角度的一般载荷和求解非齐次常系数微分方程，对于一位数学家是很自然的事，那么，从中引出屈曲这一新的力学概念则是非常了不起的。

4 猜想 2: 欧拉的第二次飞跃——干扰力的效应代替弯曲载荷

前面已指出, 1757 年欧拉提出了直接求解临界载荷的公式 (2), 从 1744 年在借助弯曲提出屈曲的概念, 中间经历了 13 年, 欧拉完全放弃了弯曲, 把屈曲问题独立地提了出来, 由于文 [1] 没有详细地介绍欧拉的具体做法, 本文只好再进行一次猜想。还是以悬臂梁为例, 式 (2) 与式 (5) 的差别在于 $\theta = 0$, 属于纯轴压载荷的情况, 此时式 (5) 可化为

$$Cy'' + P(y - f) = 0 \quad (18)$$

其实就是式 (2), 只是坐标系稍有差别, 详见图 5。

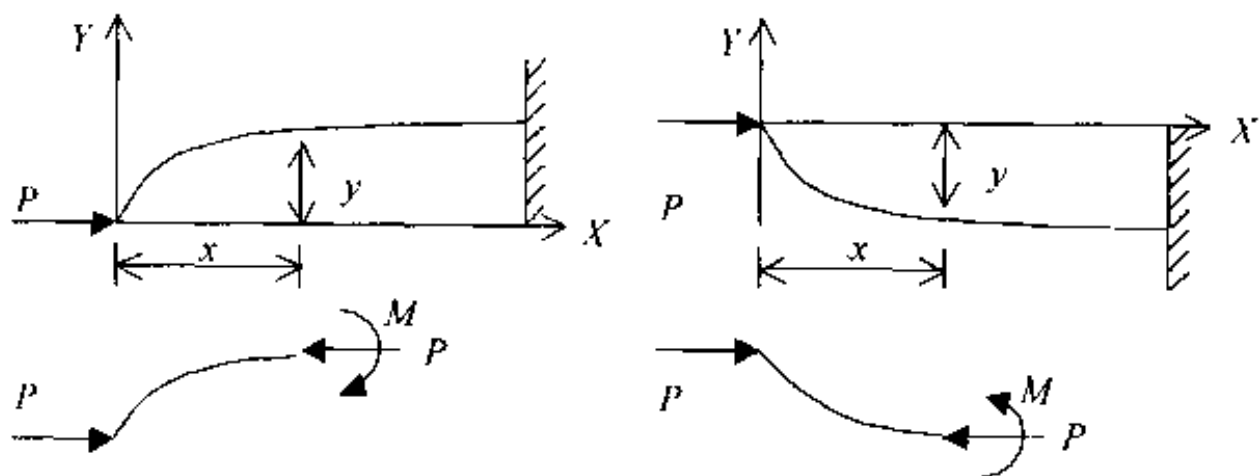


图 5 横向干扰力产生的初始变形

横向干扰力产生的第一种初始变形为图 5 左图所示

$$Cy'' = -M = -Py \quad (19A)$$

横向干扰力产生的第二种初始变形为图 5 右图所示

$$Cy'' = M = P(-y) \quad (19B)$$

两种情况所得的方程都是式 (2)。

欧拉作为数学家, 未必会提炼出横向干扰力的概念, 然而, 式 (2) 右端出现 y , 意味着欧拉有初始变形的概念, 从力学上看: 初始变形是横向干扰力产生的, 尽管横向干扰力已撤消了, 但是初始变形在平衡力作用下保留下来了。这是我们必须向学生强调的, 而这是多数教科书未能给予更多笔墨的不足之处。

欧拉对受压柱承载力的研究，在概念上和方法论上做出了真正开创性的工作，导致后续的工作形成了稳定的研究方向。通过对他在这方面“心路历程”的追索和猜想，明显地看到了他的两次飞跃：①从弯曲到屈曲：当别人还停留在弯曲的范畴深入发掘时，欧拉一下子跨越到稳定的领域中，进行了超前的开拓；②以初始变形代替干扰力，摒弃垂直于受压柱轴线的载荷分量，廓清轴向压力与横向干扰力的界限，而干扰力的作用以初始变形代替。

5 猜想 3：二阶微分方程——刚球平衡与压杆稳定的数学共性

为了向学生们透彻地揭示稳定现象的数学本质，探讨刚球平衡同压杆稳定的微分表达的共同点。

欧拉在 1757 年提出的受压柱简化的微分方程 (2)，可以简洁地表示为：

$$y'' + k^2 y = 0 \quad (20)$$

由其代数特征方程解出一对共轭虚根 $\pm ik$ ，于是其通解为：

$$y = c_1 e^{ikx} + c_2 e^{-ikx} \quad (21)$$

运用欧拉公式

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta \quad (22)$$

解 (21) 可以写成

$$y = a \cos kx + b \sin kx \quad (23)$$

回过头来反思，刚球的三种稳定情况是否也存在类似的表达呢？

如图 6 所示，AB、BC、CD 三段分别是刚球处于稳定平稳、随遇平衡和不稳定平衡的地面情况，相应的条件为：

$$\text{稳定平衡} \quad y' = 0, y'' > 0 \quad (24)$$

$$\text{随遇平衡} \quad y' = 0, y'' = 0 \quad (25)$$

$$\text{不稳定平衡} \quad y' = 0, y'' < 0 \quad (26)$$

3 种情况都与二阶导数有关，然而是不等式形式，能否写成等式形式呢？

先以稳定平衡为例，因为 $y < 0$ 所以在凹坑最低点邻域，适当选取 k^2 ，总可以使 $-k^2 y$ 与 y'' 与相等，即

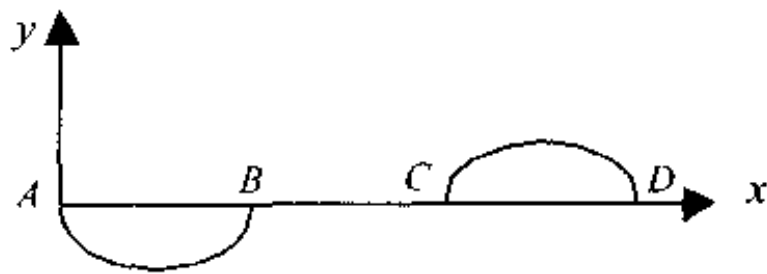


图6 刚球三种稳定对应的地面

$$y'' = -k^2 y \quad (27)$$

同理对于不稳定平衡的凸顶处邻域，也可以建立起式(27)来；而对于随遇平衡，本来 $y=0$ ，因此式(27)也成立。可见，柱稳定满足的含一对共轭虚特征根的二阶微分方程，对于刚球平衡也是成立的。

6 向学生提供从扰动出发的稳定推导

上述对压杆稳定知识发生过程的回顾和猜想，令人深刻地感受到欧拉提出的新概念和新方法论。然而，课堂上还不能直接讲欧拉的方法，因为他对于式(1)和式(2)中的 C 是什么还没有解决，不能苛求于他；不仅欧拉，伯努里也没有解决。

我们应当向学生们提供一个具有两个特点的压杆稳定课程：其一是具有力学概念，即用材料力学语言表达的推导，换句话说，从梁弯曲出发时，像1826年纳维(Claude-Louis-Marie-Henri Navier)确定常数 C 那样，用 EI 代替 C ；其二是，在方法论上充分运用欧拉做法的精粹，强调干扰力造成的初始变形。

无论刚球还是弹性杆在引入稳定、随遇和不稳定平衡的概念时，都是从载荷之外的干扰力讲起的，因此，公式推导时，还要抓住它。可是干扰力是随机的，大小也不确定，是一个抓不住的、来去无踪的过客。如何显化它的作用呢？从1744年算到1757年，至少13年的功夫，欧拉悟出了一个捕捉它、显化它的巧妙方法，这就是，用干扰力产生的初始变形代替它，何况扰动力使受压杆产生横向变形后，就从柱上撤走了，但它产生的变形还在。若这种变形还能保留下来，那就是随遇平衡或不稳定平衡；若这种变形不能保留下来，就是稳定平衡。这样讲，就有：

$$\frac{y''}{[1 + (y')^2]^{3/2}} = \frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} = \frac{-Py}{EI} \quad (28)$$

于是学生就不难理解了。

在讲授中，引用猜想 3 把 $M = -Py$ 中的负号讲清楚，也很重要，因为这是初学者的又一个难点。

总之，在回顾、猜想和融通欧拉原创性研究的基础上，要予以阐发。因为欧拉作为数学家，他的主要兴趣是在解决问题中运用和发展数学，能提出新的力学概念，已经难能可贵了，他不大可能把精力用于沉思更深的力学含义，也不可能整理出有启迪作用的逻辑过程，也就是说，他留给我们阐述他的方法论，诠释其简洁推导的力学意义的任务。如果我们确实在这方面下功夫了，那么在方法论的掌握上肯定会颇有受益，而且会提供给学生们一个有兴趣、易理解的压杆稳定课程。

这当中有如下值得注意的 3 点：

(1) 区别开轴向压力和横向下扰力。如果说在强度、刚度、疲劳等问题中载荷还处于外因，那么，在压杆稳定中，载荷已成为内因了，而横向下扰力成为外因了。

(2) 横向下扰力这个外因并不直接显式处理，而是将它的作用化为受压柱的初始变形予以隐式地处理，由于干扰力作用后即撤销，在推导中用其产生的变形效应是很有道理的。

(3) 轴向压力作为载荷同干扰力产生的横向变形的共同效应，产生了一个纯轴压时不存在的弯矩，而这个弯矩产生了随遇平衡或不稳定平衡。

如果说，欧拉圆满地处理了看不见的干扰力的作用，我们的任务则是深刻地予以力学上的阐发。

最后，笔者向学生揭示：虽然梁弯曲与柱稳定都用了 $y'' = \frac{M}{EI}$ ，但是含义不同，对于梁弯曲：

$$y'' = \frac{M(x)}{EI} \quad (29)$$

从力学上讲，载荷引起了弯矩；从数学上讲，求解是一个积分运算问题。

对于柱屈曲：

$$y'' = \frac{M(y)}{EI} \quad (30)$$

从力学上讲，载荷在横向干扰力产生的变形上引起了弯矩；从数学上讲，是一个求解微分方程的问题。

7 结 语

基于对欧拉受压柱稳定研究的回顾，进行了合理的猜想，升华为方法论的思考，从而向学生们一个富于辩证逻辑的课堂教学。

如果说，某一个学科是一座大厦，其方法论则是设计和施工的技术，学科史是脚手架。设计和施工的技术有些记载下来了，有些还要去总结撰写，而脚手架却拆掉了。因此，方法论和学科史不如学科本身那样完整，需要予以重视，给予研究。

特别是“脚手架”，虽然我们知道一般的搭接技术，但是在楼层节节向上构筑时，每个部位、每个细节的具体做法都遗忘了。其实，有些是很重要的，因为其中包含了一些高明的技巧，若能发掘出来，对今后的施工有借鉴作用。

设计施工的技术、脚手架的搭接或绑扎方法之所以重要，不仅在竣工的大厦的历史上起过作用，更在于往上加高或另外盖新的大厦可以仿效。如果说，请一位没有设计与施工经验的人在纸面上发掘资料，他还可以担当的话，那么，让他去想像资料没有提供的部分，那就勉为其难了。然而，一个有丰富经验的工程师却可以凭猜想去弥补资料记载的不足。以此推及力学史和方法论的研究，研究者自身的力学研究经验是非常重要的，它可以用于领会前辈在创新过程中的心路历程。

有兴趣的学者应当抓住力学发展中的重大概念，进行回顾、猜想和融通，不仅可以提高自身的方法论素养，还可以向学生们提供有兴趣的、深入浅出的课程。

如果我们面对的问题现在仍然是初学者难以理解的，这说明从以往的知识到这一知识之间还有一些需填补的缝隙或需修复的台阶，或者说，在这一知识点周围还有一块值得开发的宝地，那里有可能蕴藏着方法论的瑰宝，发掘的手段是回顾、猜想和融通。

如果我们埋头于发掘，所得回报不仅是得到自圆其说的结论，探索

过程本身就是一种享受，因为，我们用心领略了前辈大师的心路历程。

参考文献

1. S. P. 铁木生可著. 常振戢译. 材料力学史. 上海: 上海科学技术出版社, 1961
2. 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
3. 老亮. 材料力学史漫话. 北京: 高等教育出版社, 1993
4. 郑承沛, 姚希梦, 钱民刚. 材料力学. 北京: 北京工业大学出版社, 1999

在工程力学中贯穿素质教育

邰 霞

(山东青州二炮士官学校四系 402 室, 262500)

【摘 要】现代科学技术地迅猛发展, 国际竞争日趋激烈, 人才是关键, 在人才的培养上必须树立素质教育的观念, 要把知识的传授作为基础。工程力学是培养 21 世纪宽口径、厚基础、高级工程技术人才的最直接、最基础的课程。这要求我们必须转变教育观念, 从偏重知识传授的知识型教育转变到重视能力与素质培养的素质教育上来。任何一门学科都有一部悠久的发展史。力学作为一门古老的学科, 它展示了一部曲折辉煌的发展过程, 也记录了阿基米德、牛顿、爱因斯坦等一代宗师艰险开拓的历程和精彩的趣闻轶事。将力学史渗透到力学的教学中, 一方面可调动学生的学习兴趣和求知欲; 另一方面将不畏艰辛、执着追求的科学精神、辩证唯物主义科学的方法论和爱国主义的思想在潜移默化中传输给学生, 从而达到教书育人的目的。

【关键词】力学史, 素质教育, 教书育人

1 引 言

现代科学技术地迅猛发展, 国际竞争和国力较量日趋激烈, 已经成为当今时代的主要特征。人才是关键, 在人才的培养上必须树立素质教育的观念。工程力学是培养 21 世纪宽口径、厚基础、高级工程技术人才的最直接、最基础的课程。这要求我们必须转变教育观念, 从偏重知识传授的知识型教育转变到重视能力与素质培养的素质教育上来。将力学史渗透到力学的教学中, 在工程力学中贯穿素质教育从而达到教书育人的目的。

2 趣闻力学史，调动学习兴趣

学习兴趣是引发学习动机、推动学习行为的一种重要的心理因素，它能够鼓舞学生主动而愉快地学习，提高学习的积极性和自觉性。例如在介绍流体力学中著名的伯努里原理时首先请同学们对下面的一起“撞船官司”做一个判断。1912年当时世界上最大的邮轮“奥林匹克”号，在大海航行中与一艘比它小得多的铁甲巡洋舰“哈克”号平行地疾驶着。当两艘船相距距离110米左右时，突然发生了意外事故，小船似乎以一种不可见的力量，竟扭转船头对准大船拼命冲来，结果与油轮的右舷相撞，两船都受了重伤。这场“撞船官司”，由当时的海事法庭审理。法庭的判决书说，“奥林匹克”号的船长犯了严重过失，因为他没有向部下发布任何命令，给横冲过来的“哈克”号让路。按照流体力学的观点，这样的判决纯属无理。因为两船之间水流速度的增加，必然会形成低压区，也就是说，在两船各自的外侧与内侧存在着压力差，于是就会迫使两船急速靠拢，这就是伯努里原理的实际应用。这样，在枯燥、单调的学习中融入轻松、愉快的气氛，从形式和内容上调动起学生学习的兴趣，收到良好的效果。良好的开端是成功的一半，再比如学习“轴向拉压杆的变形”时，首先介绍一段胡克与著名科学家牛顿打官司的故事，在笑声中，把纵向变形、胡克定理等引出来，为课堂的授课创造了一个轻松的氛围。在不知不觉中，把知识传授给学生，达到预期的教学目的。

3 发展力学史，贯穿爱国主义教育

通过介绍我国古代辉煌的力学成就，激发学生的爱国主义热情，从而将爱国主义教育融入教学之中。追溯中国古代力学的辉煌成就：有世界现存最早、跨度最大的空腹式单孔圆弧石拱桥——赵州桥；1056年建成的山西应县木塔，采用筒式结构和各种斗拱，历经900多年、经受多次地震考验，巍然不动；利用反推力原理制造的带药火箭是现代火箭的雏形；宋代李诫的《营造法式》指出梁截面高宽之比以3:2为好，这个比值符号矩形兼顾抗弯强度和刚度两方面的因素；沈括的《梦溪笔谈》记载了频率为1:2的琴弦共振，以及“虚能纳声”的空腔效应等力

学知识。痛忆 13 世纪以后中国科学技术大大落后，翻开力学书籍，满目都是外国人命名的定理和公式。中国虽有东晋虞喜发现岁差的天文观测，有北齐张子信 30 年的天文观测，但没有孕育出象开普勒那样的科学家。明代朱载堉在 1610 年《乐律全书》中创立音律十二平均法，比欧洲斯蒂文和默森早几十年得到结果，只是“宣付史馆以备稽考”。由此使学生从中国力学的盛衰中沉思求索，激发民族自强心和历史责任感，领会学好力学与国与民的重大意义，牢固树立爱国主义思想。

4 拼搏力学史，渗透思想教育

力学史教材中有许多科学家为追求真理而献身的动人事迹。如牛顿对物理、力学的研究如醉如痴，终身没有结婚；伽利略勇敢宣传真理而被教会监禁终身，双目失明、晚年凄凉；欧拉一生历尽挫折、劳累过度双目失明，仍勤奋工作，逝世当天下午还在石板上进行演算；更有现代学者钱伟长、钱学森冲破阻力、学成报效祖国的动人事迹。喜观现代，中国力学界又再度崛起，涌现出周培源、钱学森等一大批世界级力学家，引起国际力学界的高度重视。使学生在知识学习的同时，了解科学大厦背后充满着挫折与失败；了解科学工作者在探索科学奥秘的过程中是如何冲破重重阻力，历经千辛万苦攀登科学高峰。在力学教学中，适时地介绍力学家不畏艰险、不怕牺牲、不慕功利、追求真理、勇于实践的事例，潜移默化中影响学生，为学生顽强拼搏、克服困难打下良好的思想基础。

5 辩证力学史，科学唯物教育

力学是一门古老的学科，在它的发展过程中自始至终都充满着唯物主义和唯心主义、辩证法和形而上学的斗争。学生正处于世界观形成阶段，通过力学史的引述，渗透辩证唯物主义教育，对于树立正确的世界观能起到积极的促进作用。例如通过帕斯卡的生平说明确立唯物论的重要性。帕斯卡的前半生在朴素的唯物主义思想指导下从事科学研究，提出了帕斯卡定理，并利用这一原理研制出水压机，同时继续发展了伽利略大气实验，确立了应力计算公式，取得了辉煌的成就。但遗憾的是他晚年迷恋于神学，将自己置身于唯心主义的圈子中，阻碍了他在科学上

的进取与发展。古希腊著名的学者亚里士多德，在他后期的科学研究中，因为陷入了唯心主义和形而上学的泥潭里，错误的提出“凡运动着的事物必然都有推动者在推着它运动，但一个推一个不能无限地追溯上去，因而必然存在第一推动者，即存在超自然的神力”。利用力学资料，使学生充分认识到辩证唯物主义对科学研究的重要作用，对学生以后的学习以至工作都有重要的指导作用。

参考文献

1. 钱令希. 中国力学大百科全书. 北京: 中国人百科全书出版社, 1985
2. 黄钟. 力学万花筒. 北京: 工人出版社, 1988
3. 朱耀坚. 理论力学. 广东: 华南理工大学出版社, 1995

引入力学史教学提高基础力学教学质量

(详细摘要)

王晓春

(成都理工大学环境与土木工程学院, 610059)

高等教育教学改革事关新世纪创新人才培养的大局, 基础力学教学在高等工程教育中占有重要地位。年轻人在学校所受教育的好坏, 他们的能力和素质将直接影响未来人类社会的发展。

科学发展到现在, 已经深入到我们生活的方方面面, 深刻地改变着人们的生活方式和思维方式。今天, 理解科学成了一项迫切的任务, 因为科学在社会生活中占据了太重要的位置, 而人们对它又太缺乏了解, 仅有的了解常常是片面的, 不准确的。如果学生能够熟悉科学研究和思维的方法, 了解杰出科学家人生奋斗的历程, 那么他们在学校的学习将更加积极主动, 对他们将来的成长会大有好处。科学史包括力学史教学, 可以在这方面发挥独特的作用, 帮助正在成长的一代年轻人以理性的态度对待自然, 对待人生和社会, 并在科学活动中弘扬诚实、合作、为追求真理而不屈不挠献身的精神。

1 工科基础力学教学存在的问题

高等工程专业的力学教学现状并不令人乐观。为了完成课程教学进度, 力学教师大多采用满堂灌、填鸭式教学方法, 很少涉及力学史方面的内容, 学生大脑被一大堆概念、公式和符号填满, 没有自由思考的时间, 不知道这些概念、公式在历史上是怎么产生和演变的。以灌输知识为目的的教学在很大程度上剥夺了学生的怀疑和批判精神, 时间长了, 历史性的、进化着的科学理论被神圣化、教条化, 活跃开放的思维被僵化封闭的思维所取代, 在这种情况下, 谈培养学生的创新能力只能是一句空话。

工程专业的学生,普遍存在重工轻理的思想,不愿花大力气学好数理课程,这在某种程度上也制约着基础力学课程的教学质量。工程专业的学生由于对数学学习的重视程度不够,致使他们在学习力学课程时,数学基础不牢,影响了力学课程的正常学习。如何提高工科学生学习数学和力学的积极性,成为基础力学教学改革首先要研究解决的问题。

2 力学史教学与基础力学教学改革问题

电子衍射的发现者之一 G·P·汤姆生曾经指出:“研究科学史有许多理由,最好的理由是要从典型例子看科学发现是怎样作出的。我们需要了解许多实例,因为道路有各种各样,很难找到什么捷径。”力学与其他科学理论一样起源于人们对自然现象的观察和在生产生活中的实践经验。由于宏观机械运动是人们最易观察的自然界的一种运动形式,力学成为自然科学中最早研究并不断完善的学科之一。在高等工程专业的基础力学教学中引入力学史教学,不仅可以增长学生知识,开阔学生眼界,而且可以使学生全面地理解力学的学科性质,了解力学发展的历程,它在整个自然科学理论中的作用和地位,并在学习的过程中逐步树立起严谨的学风和科学的探索精神。

现行课堂教学和考试制度,可以在某种程度上约束那些生活行为懒散、学习不努力的学生。然而,即使在严格的学校规章制度下,课外浪费时间、不上自习、抄袭作业、考试作弊的现象在高校也是存在的。当前,这些现象尤其突出。自然,这些现象与整个大环境有关,与高校教育体制的种种弊端也有很大关系。习惯于在高考指挥棒下学习的学生进入大学以后,失去奋斗目标,学习没有兴趣,由于学分制实行不彻底(没有选课的充分自由),专业界限太强,专业选择没有余地,为考试而学习,在很大程度上剥夺了学生自由发展的空间,挫伤了一部分学生的学习积极性,在整体上给校风和学风建设带来了负面影响,基础力学教学改革在这种情况下难以收到预期的效果。

我们认为,除了继续进行高等教育教学体制改革外,组织编写有机融合学科史的力学基础课教材,适当引入力学史与方法论的材料,丰富教学内容,培养学习兴趣,激发求知欲,变被动应付为主动学习,可以收到良好的教学效果。

榜样的力量是无穷的。科学家个人的人性化形象、伟大的人格力量和献身科学的精神，会在青年学生的成长过程中发挥潜移默化的作用。现行力学教科书中仅有的科学家简介是很不够的，如果在基础力学教学过程中引入力学史教学，不仅可以使学生更加全面了解科学家在科学发展历程中所起作用和对人类知识的贡献，而且会使他们在基础力学的学习过程中，处于更加积极主动的地位，有意识地培养自己自主学习的能力以及分析问题、解决问题的能力，并在分析问题、解决问题的过程中，培养独立思考的习惯，逐步树立怀疑和批判精神，培养创新意识和创新能力。

3 力学专才教育与通才教育问题

我国高等教育法第1章第5条规定：“高等教育的任务是培养具有创新精神和实践能力的高级专门人才……”。如何解决力学专才教育与通才教育问题，实际上是一个因材施教的问题。建国以来，为了培养力学高级专门人才，我国将基础力学教学分为力学专业和非力学专业两大类，在教材编写上并无太大差别，两者都强调力学知识的系统性和完整性，较少考虑学生个体在知识接受能力和兴趣上的差异。学生的个体差异是客观存在的，基础力学教育也应该承认这种个体差异。问题是如何针对学生个体差异，采用不同的教育教学方法。长期以来，这个问题并没有得到很好地解决。

显然，力学专才必须具备坚实宽广的基础理论和系统深入的力学专门知识。要求所有学生都成为力学功底深厚的高级专门人才是不现实的。为了少数对力学有领悟力的学生而要求所有学生都接受极专门的力学训练，这种教育是有问题的，也是智力资源的浪费。

力学属于自然哲学的范畴，数学味很浓，富有哲理，需要有较强的悟性和接受能力。对于那些数学基础薄弱、领悟力较差的学生，在学习基础力学课程时容易产生畏难情绪。对这些学生，要多给鼓励，加强引导，增强他们的自信心和战胜学习困难的勇气。另外，在力学教材的编写上可以借鉴国外优秀教材的做法，删繁就简，只保留最基本的内容，同时引入丰富的力学史料，增强教材的可读性，开阔学生的视野，提高学习兴趣。

在工科基础力学教学中,要通过力学史教学,强调力学在人类社会中作为一种文化的重要性。对于那些不愿学力学的学生,也不要勉强,可以建议他们改学其他科目(当然要有配套完善的学分制作保障)。对于那些对力学有浓厚兴趣的学生,要使他们学有所获,任课教师也要教有所得,教学相长,实现教学改革的根本目标,提高基础力学课程的教学质量。

4 力学史教学与素质教育问题

力学知识积累与能力培养应该是相辅相成的。要实现高等教育的培养目标,不但要使学生掌握必需的基础理论和专业知识,而且要鼓励学生在学习和研究的过程中进行探索和创新。日本明治时期启蒙思想家、教育家福泽谕吉说:“学校不是传授知识的,而是开发人类天资的场所。”如果学生能够从力学学科发展的历史背景中去了解科学家的一生,他们就能从中受到熏陶,得到领悟,他们的潜能就能得到充分的发掘,最终成为具有深厚文化底蕴的创新人才。

21世纪需要大批有真才实学的高素质人才,在对他们的能力要求中,包括动手能力、语言表达能力、信息处理能力、知识更新能力、社会交往能力、群体协调能力和创新能力等。在基础力学教学过程中,如何培养学生的创新意识、创新精神和创新能力,培养发现问题、探索问题和解决问题的能力,是基础力学素质教育的核心内容之一。

单纯的力学知识积累不等于能力提高。力学素质教育实质上是培养学生的科学精神和创新能力,无论对于工科学生还是理科学生,创新能力培养都是必不可少的。对于工科学生,尤其要解决好力学分析与工程方法的关系问题,要认识到力学是技术基础,是应用数学,是自然哲学,是文化,是思维训练良好的工具,是工程师能力培养的必经之路。力学史教学在这些方面可以发挥很好的作用,我们期待着迎来更加人性化的基础力学教学的春天。

引古知今 探索方法

(详细摘要)

边文凤

(哈尔滨工业大学汽车工程学院, 264209)

1 引古论今, 激发学生的爱国热情

知史可以明智。在教学中, 在相应的知识点处, 引入力学史, 让学生了解古人的成就、中外科学家的成就。例如: 在力的概念中, 引入墨子(约公元前478~前392年)“力, 形之所以奋也。”这同牛顿(Newton, 1642~1727)经典力学对力的看法基本一致; 在弹性定律中, 对比郑玄(公元127~200年)的“弓力胜三石, 引之中三尺, 弛其弦, 以绳缓擗之, 每加物一石, 则张一尺”与英国科学家虎克(Robert Hooke, 1635~1703)的“字谜‘ceiion - ssstuv’”; 在材料的力学性质中, 从冷作硬化到中国古代的猴子铠甲; 在梁的合理截面中, 从李诫(于1100年著“营造法式”一书中指出)的矩形木梁的合理高宽比 $h/b=1.5$ 到汤姆氏·扬[英 Thomas. Young (1773~1829) 于1807年著《自然哲学与机械技术讲义》一书中指出]的: 矩形木梁的合理高宽比为 $\frac{h}{b}=\sqrt{2}$ 时梁的强度最大, $\frac{h}{b}=\sqrt{3}$ 时梁的刚度最大; 在压杆稳定中, 从截面的惯性矩 $I_{\min}=I_{\max}$ 最合理, 到古建筑中的梅花柱及应州木塔; 从赵州桥到万里长城; ……

结合课程内容, 引入这些史实, 不但让学生了解了一些力学史方面的知识, 还可以使学生了解我国古代科学家在四大发明以外的, 在力学方面的伟大成就, 学生在听这些内容时, 情绪很高, 当我讲到“让我们为我国古代科学家而骄傲, 为伟大的文明古国而骄傲”时, 学生会情不自禁地鼓掌。当我说到“但是”, 学生会立即静下来, 静听着, “但是, 我们决不能一味地骄傲, 在我们为古人面骄傲的同时, 你会不会想到外

国科技的飞速发展？会不会想到近代中国的落后？会不会想到在当代中国，你的责任和使命？”听到这，同学们显得有些沉重，于是，引导同学：要从我做起，从现在做起，勇于肩负起自己的责任，直至课后，有的同学还会同我讨论这些问题。

引入力学史，激发了学生的爱国热情，提高了学生对力学课的学习兴趣。

2 为我们的科学研究停滞而惋惜，分析停滞的原因

晓今可以明志。在同学们为古代科学家而骄傲的时候，在学生的讨论中，很多学生都会说：“我们有那么辉煌的历史，为什么力学的发展没有发生在我国，为什么我国没有像伽利略、牛顿那样伟大的力学家？”这些问题的探讨不但涉及到方法论的问题，还涉及到社会、政治、经济、文化、教育、意识形态的问题。当毕达哥拉斯（Pythagoras，约公元前580年～前500年）学会为毕达哥拉斯定理的证出而举办“百牛宴”时，我们的皇帝在搞“焚书坑儒”，当牛顿受到国葬时，我们的皇帝在下达“罢黜百家，独尊儒术”的命令。

无人承认科学研究，科学成果被视为方术、甚至邪术，科学家被称作江湖术士，某个研究成果若适用，还可以祖上单传下来，若“当时”不适用，或者“尚没有发现”其实用性，那就会被就地扼杀。科学研究不被社会承认，不被研究者自己承认，没有科学的记录，没有科学的论述，没有科学的总结，没有科学的传播，当然不会有健康地、科学地发展。我们要吸取教训，对自己的思想火花，要及时记录，用科学的方法进行研究。在学习中，鼓励学生写小论文，用科学的方法记述、表述、论述。

3 善于用数学语言进行数学研究

数学使人严密。伟大的意大利科学家、艺术家、雕刻家、建筑学家——里奥纳多·达·芬奇（Leonardo da Vinci，1452～1519）说：“力学是数学的乐园”，这是西方人对力学的认识和对数学的重视。不光是力学，每一学科的健康发展都离不开数学符号的科学使用和数学的严密推演。纵观科学史，谁都会发现“每一位有造诣的科学家，都有深厚的数学功

底，他们都是数学工具的使用专家，并都或多或少地为这个‘工具家族’增添或改进了新的工具”。

总结我国科学停滞的原因。其中一个很重要的原因就是：没有数学符号的科学使用、没有使用数学语言进行严密的理论证明（至少没有保留下来）。毕竟像“周髀算经”（成书于公元前1世纪）勾股定理中“勾三股四玄五”那样的实例有一万个也顶不上毕达哥拉斯定理中的“ $a^2 + b^2 = c^2$ ”这样的一个。由此可见，严密的数学表述是很重要的。就像伟大的欧拉（Euler.L, 1707~1783），他将超前200多年的研究成果——“弹性曲线问题”用数学语言进行了科学的表述，又用“论文”将其科学地传播开去、保留下去。使后人在研究“压杆稳定”时，少走了许多弯路。

在多年的教学实践中发现：工科大学生普遍缺少数学思想和意识，缺少用数学方法解决问题的能力，其表现是：不善于使用数学语言；遇到背景新颖的问题，不会建立数学模型，更不会用数学语言进行表达；不善于利用“解析法”，常常致使简单的问题变得繁杂，解决方法变得麻烦、赘长、甚至无法求解。因此，我非常注重引导学生使用数学语言。例如：用解析法求解桁架的变形协调方程、用解析法进行机构的运动分析等等。

正确地使用数学工具可以使你成为“大家”、严密的数学可以帮助你获得更超前、更深入、更高层次的研究成果。

溶史于教学，可丰富内容，可提高兴趣，可引古明鉴。

由塔科马海峡桥失稳破坏 引发的力学思考

邰 霞

(山东青州二炮士官学校四系 402 室, 262500)

【摘 要】 构件的稳定与失稳是材料力学中一部分重要的内容, 在教学过程中, 贯彻启发式原则, 充分发挥教师的主导作用, 抓住教材中的难点和重点, 提出具有启发性的课题, 激发学生积极思考, 使其具有探求解决矛盾的要求。前苏联著名心理学家捷普洛夫指出: “思维永远是从问题开始的” 提出问题, 设置悬念, 使学生在生疑——释疑——置疑的循环往复中, 产生认知冲突, 造成求知欲望。对吸引其注意力、激发求知思维活动, 起到积极的作用。正如孔子曰: “不愤不启, 不悱不发, 举一隅不以三隅反则不复也。” 教师应积极创造“愤悱”情景, 师生协同教学最大限度地调动学生学习的积极性、自觉性, 共同参与教学活动, 激发思维活动, 增强主动探求知识、独立分析问题、创造性解决问题的能力。

【关键词】 力学, 失稳, 临界力

1 引 言

构件的稳定与失稳是材料力学中一部分重要的内容, 构件丧失稳定的问题给工程造成巨大危害。在教学过程中, 贯彻启发式原则, 充分发挥教师的主导作用, 抓住教材中的难点和重点, 提出具有启发性的课题, 激发学生积极思考, 使其具有探求解决矛盾的要求。教师应积极创造“愤悱”情景, 师生协同教学最大限度地调动学生学习的积极性、自觉性, 共同参与教学活动, 激发思维活动, 增强主动探求知识、独立分析问题、创造性解决问题的能力。

2 以工程史例为悬念引出失稳的概念

为什么要研究稳定与失稳？因为构件丧失稳定的问题已经给工程造成巨大危害，在课堂讲授时首先提出悬念，在调动起同学们的求知欲之后，迅速介绍塔科马海峡桥工程史例：1940年建成的塔科马海峡桥，主跨853.4米，由两道钢板梁和一层不透风桥面组成的开口截面桥跨结构，当风从侧面吹来时，因桥身的阻拦，分成上下两股不稳定的旋涡越过桥身，旋涡对桥身的吸力和压力，产生扭转和弯矩，使桥身振动加剧，1940年11月7日，在风速仅19米/秒的持久袭击下，桥面上下振幅近9米，左右扭转达45°。对于50年没有发生过这样严重桥梁事故的美国工程界来说，引起震惊。塔科马桥因构件失稳而造成严重的破坏。我们把这种受力破坏，称之为丧失稳定性，简称失稳。失稳的定义：在一定的轴向压力作用下，细长杆突然丧失其原有的直线平衡状态现象。反之，如果细长的构件在轴向压力作用下仍保持直线平衡状态，称之为稳定。稳定与失稳是相对的两个概念。稳定问题是工程结构中的重大问题，不容忽视。特别是建筑材料向着轻型、薄型方向发展，工程结构朝着高层、多功能化发展，稳定也就更突出。通过工程史例与概念相结合，使同学们建立起一个初步的概念，为下一步失稳问题的计算垫定了基础。

3 以力学大师为背景推出失稳的公式

瑞士数学家、力学家欧拉通过大量的理论推导、科学的数值计算，得出了失稳的计算公式即临界力公式

$$P_{cr} = \pi^2 EI / (\mu L)^2$$

式中： L ——杆长；

E ——弹性模量；

I_{\min} ——惯性矩；

μ ——与支座情况有关的长度系数；

$E I$ ——抗弯刚度；

μL ——计算长度。

适用范围：弹性范围

μ ——与支座情况有关的长度系数；

当两端固定时 $\mu = 0.5$ ；

当两端铰支时 $\mu = 1$ ；

当一端固定，一端铰支时 $\mu = 0.7$ ；

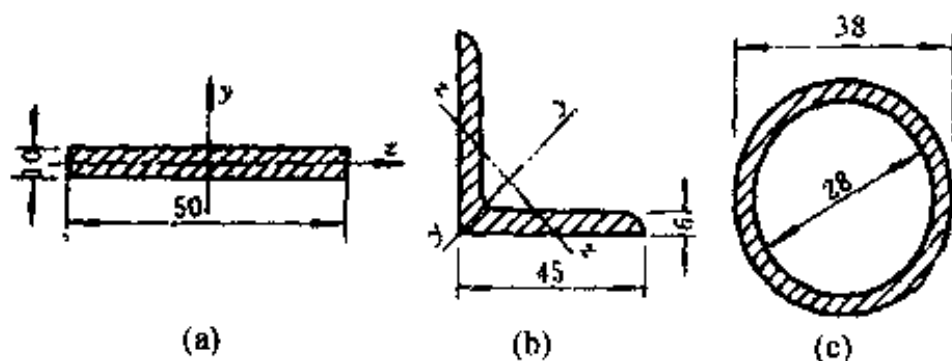
当一端固定，一端自由时 $\mu = 2$ 。

欧拉：1707年4月5日生于瑞士巴塞尔，1789年9月18日死于俄国的彼得堡，主要是在彼得堡科学院工作。1735年因劳累过度导致右眼失明，1741年应德国邀请任柏林科学院院士，在柏林工作25年中发表了大量著作，1766年回到俄国，不久全盲，仍坚持工作，成果由他口述，在大青石板上书写数学算式，由其子笔录。欧拉一生中虽历经坎坷，仍勤奋终身。逝世当天下午，还在石板上进行演算，黄昏与友人进餐时讨论新发现的天王星轨道的方案，夜晚中风去世。在力学教学中，适时地介绍力学家不畏艰险、不怕牺牲、追求真理、勇于实践的事例，潜移默化中影响学生，为学生顽强拼搏、克服困难打下良好的思想基础。使学生在知识的同时，了解科学大厦背后充满着挫折与失败；了解科学工作者在探索科学奥秘的过程中是如何冲破重重阻力，历经千辛万苦攀登科学高峰。

4 以工程构件为例题进行力学的剖析

一端固定、一端自由的轴心受压杆，长度 $l = 1\text{m}$ ，弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 。计算下图中三种截面的临界力。

例：



解：(1) 求矩形的临界力

$$I_{\min} = bh^3/12 = 50 \times 10^3/12 = 4.17 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$\therefore p_{cr} = \pi^2 E I / (\mu l)^2 = 20200 \text{ N} = 20.2 \text{ kN}$$

(2) 求等肢角钢临界力

$$I_{\min} = I_y = 3.89 \text{ cm}^4 = 3.89 \times 10^{-8} \text{ mm}^4$$

$$\therefore p_{cr} = \pi^2 E I / (\mu L)^2 = 18.73 \text{ kN}$$

(3) 求圆环临界力

$$I_{\min} = 7.26 \text{ mm}^4$$

$$\therefore p_{cr} = \pi^2 E I / (\mu L)^2 = 35.3 \text{ kN}$$

$$A_{\text{矩}} = 500 \text{ mm}^2 \quad P_{cr} = 2.02 \text{ kN}$$

$$A_{\text{角}} = 507.6 \text{ mm}^2 \quad P_{cr} = 18.73 \text{ kN}$$

$$A_{\text{圆}} = 518 \text{ mm}^2 \quad P_{cr} = 35.3 \text{ kN}$$

说明：在面积、用料几乎相同的情况下，圆环形柱子的临界力最大（是矩形的 17 倍），这就是地面建筑上，在人员比较密集的商店、图书馆等我们为什么看到圆型柱的原因。因为圆环形柱子施工比较麻烦，真正使用的时候决大多数采用的是圆形。而在地下建筑中，特别是深基础的处理，采用圆环形钢桩。比如上海宝钢一号高炉结构重量为 50000 吨，对于这座超重型的工程，必须保证绝对安全稳定，使用传统的钢筋混凝土地基不能满足强度和承载力的要求，采用的是直径 914 mm、长度为 60m、数量为 144 根的钢桩基础、目前上海宝钢一号高炉安然无恙。

5 以失稳内容为基础拓宽学生的思维

在同学们了解、掌握稳定与失稳的概念和计算的基础上，积极拓宽学生的专业知识面，扩大学生的视野，对于知识的灵活应用具有积极的作用。以香港汇丰银行的结构设计为例，将理论与实践相结合，收到良好的学习效果：香港汇丰银行靠近多台风的维多利亚海弯，它的设计者为了克服台风的影响，煞费苦心，当他看到郑板桥的“兰竹图”后，一锤定音。这是一个悬吊结构，以 8 组钢柱为主要承重构件，每组由 4 根直径 1.4 米的圆管柱组成，共 32 根。充分利用了圆环型截面的特性，成功地抵御了台风对汇丰银行的袭击。正如伽利略所预言的：人类的技术和大自然都在尽情地利用这种空心的固体。这种物体可以不增加重量而大大增强它的强度，这一点不难在鸟的枝杆骨上和芦苇上看到，它们的重量很小，但是有极大的抗弯和抗断力。

参考文献

1. 钱令希, 中国力学大百科全书. 北京: 中国大百科全书出版社, 1985
2. 黄钟, 力学万花筒. 北京: 工人出版社, 1988
3. 朱耀坚, 理论力学. 广东: 华南理工大学出版社, 1995

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 力学史与方法论论文集

作者 =

页数 = 1 8 5

S S 号 = 0

出版日期 =

V s s 号 = 6 0 8 6 0 3 1 6

中国古代为什么没有力学 & 武际可
钱伟长先生科学研究的成果和方法 & 戴世强
一代宗师风范长存——记我国第一代工程力学教授罗忠忱 & 郭日修
牛顿《原理》三百年祭 & 朱照宣
伟人的阴暗面 & 武际可
探索人体奥秘的古老故事——生物力学孕育期一瞥 & 杨桂通
力学与计算技术的互动发展 & 王希诚
变分法的历史及其方法论的研究（详细摘要） & 何吉欢
万有引力定律的发现 & 胡新
永动机漫话 & 武际可
计算力学有限元集成程序系统应大力发展 & 钟万勰
固体力学史与方法论的几点注记 & 余寿文
浅论力学史和方法论研究的原动力、范畴和探索途径 & 隋允康
应用力学方法初探（摘要） & 嵇醒、仲政、戴瑛
应用力学对偶体系的方法论 & 钟万勰、姚伟岸
对有限元技术发展过程的一种认识（详细摘要） & 孙景琦、吕涛
科学复兴之难 & 蔡中民、蔡冰
沙漠——颗粒介质——力学研究的一个新使命（摘要） & 苗天德
处理不确定问题的新方法——非概率区间分析模型
邱志平、王晓军、马一
从 S t o k e s 第一问题的精确解谈起 & 朱克勤
以“压杆稳定”为例探讨史料、猜想和方法论对材料力学
教学的升华作用 & 隋允康
在工程力学中贯穿素质教育 & 郇霞
引入力学史教学提高基础力学教学质量（详细摘要） & 王晓春
引古知今探索方法（详细摘要） & 边文凤
由塔科马海峡桥失稳破坏引发的力学思考 & 郇霞