

第二届全国力学史与方法论学术研讨会论文集

古今力学思想与方法

戴世强 张 文 冯秀芳 主编

上海大学出版社

· 上 海 ·

内 容 提 要

本书为第二届全国力学史与方法论学术研讨会文集,收录了在会上交流的 30 篇论文,涉及古今中外力学思想与方法的阐述。在力学史方面,着重介绍了有代表性的重要的原创性文献、我国资深学者在近代力学发展中的贡献、若干力学分支学科的发展简史;在力学方法论方面,主要阐释了各种应用力学的科研和教学方法、力学中的变换与不变量、力学述解的演进、力学中的哲学理念和美学观念等等,也述及了自然科学与人文科学的关系。

本书内容丰富生动、深入浅出,可供广大的力学和应用数学的科研和教育工作者参考,也可作为科学史与方法论的研究者和爱好者的有趣的读物。

图书在版编目(CIP)数据

古今力学思想与方法/戴世强,张文,冯秀芳主编. —上海:
上海大学出版社,2005.10
ISBN 7-81058-924-5

I. 古... II. ①戴... ②冯... ③张... III. ①力学-思想史-学术会议-文集②力学-科学方法论-学术会议-文集 IV. 03-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 115994 号

责任编辑 王悦生

封面设计 谷夫平面设计

第二届全国力学史与方法论学术研讨会论文集

古今力学思想与方法

戴世强 张 文 冯秀芳 主编

上海大学出版社出版发行

(上海市上大路 99 号 邮政编码 200444)

(<http://www.shangdapress.com> 发行热线 66135110)

出版人:姚铁军

*

锦佳装订厂印刷 各地新华书店经销

开本 890×1240 1/32 印张 8 字数 184 千

2005 年 10 月第 1 版 2005 年 10 月第 1 次印刷

印数:1-1100 册

ISBN 7-81058-924-5/O·031

定价:30.00 元

第二届全国力学史与方法论学术研讨会
2005. 10. 4—7, 上海

主办单位：中国力学学会力学史与方法论专业委员会
承办单位：上海大学、复旦大学

学术委员会

主 任 武际可
副主任 隋允康 余寿文 张 文 王希诚 苗天德 罗 恩
委 员 (按姓名笔画排序)
王文标 王希诚 王振东 王晓春 兆文忠 朱如曾
仲 政 吴柏生 邱吉宝 余寿文 张 文 苗天德
武际可 罗 恩 孟庆国 郑晓静 胡海岩 钟万勰
高云峰 隋允康 蔡中民 戴世强 戴念祖

组织委员会

主 任 戴世强
副主任 张 文
委 员 冯秀芳 麦穗一 葛红霞 何红弟

序 言

第二届全国力学史与方法论学术研讨会即将于 2005 年国庆节在上海大学召开,这是我国力学发展过程中的一件大好事。

我想起英国哲学家弗兰西斯·培根两段名言:

“阅读使人充实,会谈使人敏捷,写作使人精确。……读史使人明智,诗歌使人巧慧,数学使人精细,博物使人深沉,伦理之学使人庄重,逻辑与修辞使人善辩。”

“跛足而不迷路能赶上虽健步如飞但误入歧途的人。”

这里要强调的是,“读史使人明智”以及方法论的重要性。这些年来,我与上海大学的年轻学生常有交往,发现他们中的不少人知识面相当狭窄,特别是理工类的学生,对科学史不甚了了,有“数典忘祖”的苗头:他们对于自己所从事的专业的发展史一知半解,甚至一无所知;另外,学习不讲究方法,不是死读书,就是瞎闯。这些倾向实在是要不得的。

我不由得回想起 50 多年前的往事:1950 年 12 月,我参加了中国人民抗美援朝慰问团,赴东北慰问抗美援朝志愿军回国伤员。当时坐的是火车,在漫长的旅途上,我做了一件很有意义的事情:写成了一篇读史笔记《中国古代的科学创造》,约 5 000 字。写作的动机是,当时国内普遍存在崇洋媚外的倾向,认为中国人在科技方面什么都不行,我一直想写一篇有关中国古代科技简史的文章予以批驳,苦于平时教务繁忙,一直难以动笔,于是就利用了旅途空闲的天赐良机,一气呵成写了此文,发表于翌年的《中国青年》首期,并在 1951 年 2 月 1 日的《人民日报》上转载,赢得读者的广泛欢迎,因此,中国青年出版社向我约稿,让我将此文扩充成书,这就是 1953 年 8 月出版的我写的一本科学史专著《中国历史上的科学发明》。在上述文稿中,我不仅讲了脍炙人口的四大发明,还用丰富的史料讲述了

我们的祖先在农业技术、天文历法、数学力学、水利工程、纺织机械等方面的贡献。例如,我引述了《汉书》、《明史》中记载的我国水利工程师的“筑堤束水,藉水攻沙”的治水方法;到了 1983 年我应邀访问福建时,当时的省委书记项南同志向我提出了治理马尾港的问题,我就据此提出了“束水攻沙”的对策,在实践中收到了奇效。

从上面的例子我们可以知道,了解科学史和方法论确实非常有意义,往往可以使我们耳聪目明、事半功倍。据我了解,中国力学学会力学史与方法论专业委员会是前年成立的,历史不长,但已经团结了一批有识之士,做了一系列很好的工作。我近来因视力不佳,阅读上多受限制,这次浏览了论文集的目录,发现会议的论题非常丰富,涉及世界力学发展史的专题和文献、力学科研与教学方法的诸多方面,特别对我国力学家的具体贡献,做了相当详尽的描述。我深信,这本论文集肯定会带给大家阅读上的享受和思想上的启发。

上海大学校长 钱伟长

2005 年 9 月 22 日

目 录

1920 年以前力学发展史上的 100 篇重要文献	武际可 (1)
中国湍流研究的发展史 I : 中国科学家早期湍流研究的回顾	黄永念 (15)
孤立波与孤立子	王振东 (26)
船舶结构力学在中国开始传播记述	郭日修 (33)
20 世纪上半叶中国学者流体力学研究工作概述	冉 政 (38)
从三足鼎立到力学十强——中国力学教育发展 50 年回顾	王晓春 (51)
非牛顿流体力学简介及发展	丁 鹏 闫相祯 (64)
流体力学在海洋科学中的发展史	包 芸 刘 欢 (69)
郭永怀先生学术思想初探	冯秀芳 戴世强 (77)
力学中的变换与不变量	武际可 (86)
经典弹性力学与应用力学方法	嵇 醒 戴 瑛 仲 政 (93)
弹性杆的 Kirchhoff 理论与力学中时空概念的转换	刘延柱 (103)
土木工程力学发展简史与基本研究方法简介	王长连 (106)
浅谈力学史在力学教学中的几点作用	赵慧明 杨 静 (113)
刍议力学史与方法论融入工程力学教学的做法	冯辉荣 罗仁安 (119)
动态剪切力学测试实验发展综述	崔云霄 卢芳云 陈 军 (130)
有限元软件与力学发展	李茂生 (139)
工程一般力学新体系	龙运佳 (147)
固体力学计算方法的发展	孙秀山 岑章志 刘应华 (152)
关于“组合变形”教学方法的新探索	杨 静 赵慧明 刘玉庆 (165)

管道结构漫谈·····	陈贵清	(169)
整体观在结构力学教学中的运用·····	和 燕	(179)
力学概念中的哲学理念·····	安登峰 和 燕	(185)
力学课中的美育教学尝试 ·····	曲淑英 杜永吉 王心健 周 明 吕玉匣	(190)
浅谈力学理论在工程爆破中的重要性 ·····	张宪堂 张金泉 周红敏	(196)
谈结构力学中的科学思维方法 ·····	严跃成 阿肯江·托乎提 吉尔格	(204)
在力学教学中注重工科学生数学能力的培养·····	边文凤	(208)
力学述解由 2 到 3 的历史演进与方法拓展·····	隋允康	(215)
基于节点计算的数值分析方法在我国的起源 ·····	孙海涛 王元汉	(226)
自然科学与人文修养·····	张 文	(237)

1920 年以前力学发展史上的 100 篇重要文献

武际可

(北京大学力学与工程科学系,100871,退休教授)

摘 要 列举了 1920 年以前力学发展中 100 篇重要文献。

关键词 力学史,重要文献,力学

在力学发展的历史长河中,文献浩如烟海。要在其中选择最重要的 100 种会有一定困难。为此我们确定以下两个选录标准:

(1) 时间限定在 1920 年以前。一方面考虑到近期成果的重要性还有待进一步的历史考验;另一方面由于一战后各国政府介入科学事业,大量的科学成果很难用文献和书来表达。

(2) 范围包括原创性成果和经典性专著。其影响比较长远者。

即使是这样,在选择取舍上仍然是有困难的,可以有不同的方案。更有一些重要成果,找不到原始文献,如风洞的建造、材料试验机的发明等。所以笔者选定的这 100 篇文献也只是从一个方面反映力学学科的发展。

亚里士多德(Aristotle,前 384—前 322)

1. 《论天》(On the heavens),公元前 350 年完成,原文为希腊文。其中落体速度与重量成正比的论断,影响学界达千年。

阿基米德(Archimedes,前 287—前 212)

2. 《论浮体》(On floating bodies)Part I, II,原文为希腊文。最早系统讨论流体中物体的平衡问题。

3. 《论平面图形的平衡》(On the equilibrium of planes)Part I, II,原文为希腊文,在 16 世纪之前只有手抄本流传,16 世纪出版有拉丁文本,1897 年出版英文译本。讨论杠杆原理与图形的重心。

托勒密(Ptolemy, 约 100—170)

4. 《大汇编》(Almagest), 原先以希腊文传抄, 后出版拉丁文版。系统总结了前人的天文学知识, 建立太阳系运行的托勒密体系。

希罗(Hero of Alexandria, 约公元 62 年前后)

5. 《气体力学》(Pneumatics), 原为希腊文。涉及真空、水与空气的压力、虹吸管、玩具和一种用蒸汽驱动的旋转机械。

6. 《力学》(Mechanics), 原为希腊文。介绍了有关运动、平衡和简单机械的知识。

帕普斯(Pappus Alexandrinus, 约 300—350)

7. 《数学汇编·第八卷》(Mathematical Collection, Book 8), 1022 年出版希腊文本, 1876 年出版英译本。汇集了古希腊力学研究的许多成果。

约旦努(Jordanus de Nemore, 约 1220 年前后)

8. 《重物的论述》(Liber de ponderibus), 1533 年出版, 拉丁文。讨论物体的平衡问题, 包含有虚功原理的萌芽。

哥白尼(Nicholas Copernicus, 1473—1543)

9. 《天体运行论》(De revolutionibus orbium celestium), 1543 年出版拉丁文本。提出太阳系的哥白尼系统, 并且从几何上加以严格的论证。

开普勒(Johannes Kepler, 1571—1630)

10. 《宇宙的和諧》(Harmonice mundi), 1619 年出版拉丁文本。总结行星运行的三大定律。

斯蒂芬(Simon Stevin, 1548—1620)

11. 《静力学原理》(Staticae elementis), 1586 年出版拉丁文本。是静力学体系建立的标志性著作。

默森(Marin Mersenne, 1588—1648)

12. 《宇宙的和諧》(Traité de l'Harmonie Universelle), 1627 年以法文出版。最早关于声音、音乐和乐器的著作, 后人称默森为声学之父。

邓玉函(Joannes Terrenz, 1576—1630)、王徵(1571—1644)

13. 《远西奇器图说》, 1627 年, 中文。一本最早以中文介绍西方力学知识的著作。

伽利略(Galileo Galilei, 1564—1642)

14. 《关于托勒密与哥白尼两大世界体系的对话》(The systems of

the world; in four dialogues wherein the two grand systems of Ptolemy and Copernicus), 1632 年出版意大利文本, 1661 年出版英译本。系统论证哥白尼系统, 提出惯性运动的概念。

15. 《关于两门新科学的对话》(Discourses and mathematical demonstrations concerning two new sciences), 1638 年出版意大利文版, 1665 年出版了第一个英译本。总结了材料强度、自由落体和抛体的运动规律。

托里拆利 (Evangelista Torricelli, 1608—1647)

16. 《论重物的运动》(De motu gravium), 1644 年以意大利文出版。证明了孔口出流的速度与液高的平方根成比例, 后人称之为托里拆利定理; 还叙述了在位置最低时, 平衡得好, 是平衡稳定性的最早提法。

波义耳 (Boyle Robert, 1627—1691)

17. 《关于空气的弹性及其效果的物理力学新实验》(New experiments physicomachanical, touching the spring of the air and its effects), 1660 年出版, 英文。以系统的实验论证了气体的弹性。

帕斯卡 (Blaise Pascal, 1623—1662)

18. 《论液体平衡和空气的重量》(Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air), 1663 年出版, 法文。总结和提出帕斯卡原理, 并总结关于气压的一系列实验。

马略特 (Edme Mariotte, 1620—1684)

19. 《论物体的撞击与碰撞》(Traité de la percussion ou chocq des corps), 1671 年在法国科学院宣读, 1673 年以法文出版。总结了前人关于碰撞问题的实验, 从中得出了动量守恒定律。

20. 《论水和其他流体的运动》(Traité du mouvement des eaux et des autres corps fluides), 1686 年以法文出版, 1700 年出第二版。他是第一个研究流体阻力的学者, 书中得到了流体阻力与速度的平方成比例的结论。

惠更斯 (Christiaan Huygens, 1629—1695)

21. 《摆钟论》(Horologium oscillatorium), 1673 年, 拉丁文。讨论了约束在圆上的质点运动规律, 并论证了摆的等时性, 提出等时摆的概念。

胡克 (Robert Hooke, 1635—1703)

22. 《论弹簧》(Lectures of springs), 1678 年, 英文。研究了物体的弹性。

莱布尼兹(Gottfried Wilhelm Leibniz, 1616—1716)

23. 《笛卡儿的一个出名错误的简短证明》(Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii), 1686 年以拉丁文发表在 Acta Eruditorum (GM VI, pp. 117~123) 上。提出活力(即后人所称的动能)守恒定律。

牛顿(Isaac Newton, 1642—1727)

24. 《自然哲学的数学原理》(Philosophia naturalis principia mathematica), 1687 年第一版, 1713 第二版, 1726 年第三版, 拉丁文。总结经典力学的体系, 证明万有引力下行星运行服从开普勒三定律。

雅科布·伯努利(Jacob Bernoulli, 1654—1705)

25. 《等周问题实解》(Solution propria problematis isoperimetrici), 1700 年发表在“教师学报”上, 拉丁文。最早建立的变分问题, 还总结了最速落径问题。

26. 《弹性梁弯曲的假设与证明》(Veritable hypothèse de la résistance des solides avec la démonstration de la courbure des corps qui font ressort), 1705 年刊登在巴黎科学院报上, 法文。建立了与实际接近的梁的弯曲最早的理论。

丹尼尔·伯努利(Daniel Bernoulli, 1700—1782)

27. 《流体力学》(Hydrodynamica), 1734 年完稿, 1738 年出版。总结出流体压力与速度的关系。后人称为伯努利定理。

欧拉(Leonard Euler, 1707—1783)

28. 《力学》(Mechanik), 1736 年, 德文。包括他对质点和质点组力学系统的一系列工作。

29. 《刚体运动理论》(Theoria motus corporum solidorum), 1765 年以拉丁文出版。提出刚体运动的一般方程并解决了一种可积情形。

达朗贝尔(Jean Le Rond d'Alembert, 1717—1783)

30. 《论动力学》(Traité de dynamique), 1743 年, 法文。提出和总结了力学中的达朗贝尔原理和虚功原理。

31. 《流体的阻力》(Essai d'une nouvelle théorie de la résistance des fluides), 1752 年, 法文。提出理想流体中没有阻力的矛盾, 后人称为达朗贝尔佯谬。

莫培督(Pierre de Maupertuis, 1698—1759)

32. 《论宇宙》(Essai de cosmologie), 1744 年提出, 1750 年以拉丁文发表。最小作用量原理最早的一般陈述。

玻素(Charles Bossut, 1730—1814)

33. 《流体阻力的新实验》(Nouvelles Experiences sur la résistance des fluides), 1777 年以法文出版。总结船体阻力实验得到的规律, 开辟了船池实验的新领域。

拉格朗日(Joseph Louis Lagrange, 1736—1813)

34. 《分析力学》(Mecanique analytique), 1788 年在巴黎出版, 法文。分析力学的奠基性工作。

库仑(Charles Augustin Coulomb, 1736—1806)

35. 《论简单机械》(Théorie des machines simples), 1781 年以法文出版。最早给出了摩擦力所遵从的规律。

班琐(Louis Poinso, 1777—1859)

36. 《静力学原理》(Eléments de statique), 1803 年以法文出版。引进了力偶的概念, 系统讨论了力系的简化, 并且最终提出刚体的平衡的条件是力的主矢和主矩为零。

托马斯·杨(Thomas Young, 1773—1829)

37. 《自然哲学讲义》(A course of lectures on natural philosophy and the mechanical arts), 1807 年分两卷出版, 英文。总结关于固体变形的实验结论, 提出弹性模量, 后人称为杨氏模量。最早提出能量的概念。

拉普拉斯(Pierre Simmon Laplace, 1749—1827)

38. 《天体力学》(Mécanique céleste), 共 5 卷 16 册, 于 1798—1825 年间陆续完成, 最早以法文出版。系统发展了围绕天体力学的一套数学方法, 如势论、摄动法等等。

凯利(George Cayley, 1773—1858)

39. 《论空中航行》(On aerial navigation), 1809—1810 年分三次在 Nicholson's Journal 上发表。文章开辟了从空气动力的角度探讨飞行的道路。

泊松(Siméon Denis Poisson, 1781—1840)

40. 《力学教程》(Traité de mécanique), 1811 年分两卷出版, 1832 年

出改进补充版, 法文。影响深远的一套理论力学教材。

41. 《弹性体的平衡与运动》(Mémoire sur l'équilibre et le mouvement des corps élastiques), 1829 年发表, 法文。最早提出弹性体变形时横向变形系数, 后来被称为泊松比。

纳维(Navier, 1785—1836)

42. 《论弹性体的平衡与运动》(Sur les lois de l'équilibre et du mouvement des corps solides élastiques), 1821 年发表在 Bull. Soc. Philomath (177~181), 法文。最早提出弹性体运动的一般方程。

43. 《流体的运动法则》(Mémoire sur les lois du mouvement des fluides), 1822 年提交的研究报告, Mémoires de l'Académie royale des sciences de l'Institut de France 于 1823 年刊出 (p. 389), 法文。最早提出黏性流体的运动方程。

哈密顿(William Rowan Hamilton, 1805—1865)

44. 《论动力学中的一个普遍方法》(On an general method in dynamics), 1834 年发表在 Philosophical Transactions of the Royal Society 上 (Part II, pp. 247~308), 英文。《再论动力学中的一个普遍方法》(On an general method in dynamics), 1835 年发表在 Philosophical Transactions of the Royal Society 上 (Part I, pp. 95~144), 英文。两篇文章发展了分析力学, 引进了后人所称的哈密顿函数和哈密顿方程。

傅里叶(Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768—1830)

45. 《热的解析》(Théorie analytique de la chaleur), 1822 年以法文出版。奠定了解热传导偏微分方程方程的基础, 同时开始使用量纲分析。

卡诺(Sadi Carnot, 1796—1832)

46. 《论火的效率》(Réflexions sur la puissance motrice du feu), 1824 年出版, 法文。热力学第二定律研究的开始。

柯西(Augustin Louis Cauchy, 1789—1857)

47. 《弹性或非弹性固体的运动方程》(Sur les equations qui experiment les conditions d'équations ou les lois du mouvement intérieur d'un corps solide, élastique ou non élastique), Ex. de Math. 160~187, 1828 年以法文发表。总结了自 1822 年开始他本人关于弹性力学数篇论文的结果, 建立了弹性力学平衡与运动的普遍方程。

科里奥利(Gustave Gaspard Coriolis, 1792—1843)

48. 《力学应用于机械》(Cours de mécanique appliquée aux machines), 1831 年向法国科学院提出的研究报告, 1835 年正式发表。对旋转系统提出了一种由相对速度诱导的加速度, 后人称为科氏加速度, 由它产生科氏力。

格林(George Green, 1793—1841)

49. 《论在晶体介质中光的传播》(On the propagation of light in crystallized media), 1839 年发表(CPS, 22pp)。论证了各向异性弹性介质的弹性常数最多有 21 个。

泊萧叶(Jean Louis Marie Poiseuille, 1729—1829)

50. 《流体通过细管运动的实验研究》(Recherches experimentales sur le mouvement des liquides dans les tubes de tres petits diametres), 1841 年发表在 Compte-rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences 上。泊萧叶从 1838 年开始进行管流实验, 1840 年总结出管流中的流动规律, 后人称之为哈根-泊萧叶(Hagen-Poiseulle)流。

焦耳(James Prescott Joule, 1818—1889)

51. 《论电磁的热效应和热的机械值》(On the Calorific Effects of Magneto-Electricity and on the Mechanical Value of Heat), 1843 年在英国的一个协会上宣读。最早给出了热功当量。

雅科比(Carl Gustav Jacob Jacobi, 1804—1851)

52. 《动力学讲稿》(Vorlesungen über Dynamik), 1842 与 1843 年雅科比在 Königsberg 讲课的讲稿, 包含了他 1837 年关于把 Hamilton 方程变换到一阶偏微分方程的变换, 后人称为 Hamilton-Jacobi 方程。1866 年由 Clebsch 出版。

罗素(John Scott Russell, 1808—1882)

53. 《关于波浪的报告》(Report on Waves), 1837 年英文写成, 1844 年正式出版。报告中首次提到他在 1834 年观察到的, 运河在开闭闸门时形成的浅水波可以不变形地传播很远, 文中使用了孤立波名词, 后来孤立波引起科学家们广泛的兴趣。

斯托克斯(George Gabriel Stokes, 1819—1903)

54. 《流体运动的内摩擦与弹性固体的运动与平衡》(On the theories

of the internal friction of fluid in motion, and of the equilibrium and motion of elastic solids), 1845 年发表在 Trans. Camb. Phil. Soc. 上(8, pp. 287~305), 英文。以与纳维不同的方法导出了黏性流体的运动方程, 后人称为纳维-斯托克斯方程。

汤姆孙(开尔文)(Sir William Thomson, 又名 Lord Kelvin, 1824—1907)

55. 《关于弹性体平衡方程积分的注记》(Note on the integration of the equations of equilibrium of an elastic solid), 1848 年以英文发表在 Cambridge and Dublin Mathematical Journal 上(Feb.)。给出了各向同性无限弹性介质在集中力作用下的解, 后人称为弹性力学的基本解或开尔文解。

基尔霍夫(Gustav Robert Kirchhoff, 1824—1887)

56. 《弹性板的平衡与运动》(Über das Gleichgewicht und die Bewegung einer elastischen Scheibe), 1850 年发表在 J. Reine Ange. Math. 上, (Crelle) 40, 51。在直法线假设下给出弹性薄板问题与边条件的准确提法。

麦克斯韦(James Clerk Maxwell, 1831—1879)

57. 《弹性固体的平衡》(On the equilibrium of elastic solids), 1850 年以摘要在英国皇家学会会刊(Trans. Royal Soc.)上发表。1853 年全文发表在 Trans. Royal Soc. Edinb 上(20, 87~120), 英文。开创了用偏振光进行光弹性应力测量。

拉梅(Gabriel Lamé, 1795—1870)

58. 《数学弹性理论》(Traité de la Théorie mathématique de l'élasticité), 1852 年以法文出版。是第一本系统陈述弹性力学的专著, 书中包含了他的若干新研究结果。

59. 《曲线坐标及其应用》(Leçons sur les coordonnées curvilignes et leurs diverses applications), 1859 年以法文出版。书中系统讨论了曲线坐标, 介绍了它们在弹性力学、热传导等领域的应用, 书中还给出了弹性球壳变形的解。

兰金(William Macquorn John Rankine, 1820—1872)

60. 《应用力学手册》(A manual of applied mechanics), 1858 年出版, 英文。总结固体强度方面的实验和理论结果, 提出以拉伸应力作为判据

的强度理论,最早把能量与势能区分开来。

克莱博什(Rudolf Friedrich Alfred Clebsch,1833—1872)

61.《弹性体理论》(Theorie der Elastizität fester Körper),1863年克莱博什以德文提交哥尼斯堡大学(University of Königsberg)的博士学位论文,1883年经圣维南翻译为法文出版,注释使原书扩大了3倍。书中着重讨论了杆的振动问题,其中的起始参数法,后人称之为克莱博什方法,后来发展成为传递矩阵法。

亥姆霍兹(Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz,1821—1894)

62.《论力的守恒》(On the Conservation of Force),1863出版德文本。总结了能量守恒定律的一般形式。

特雷斯卡(Henri Edouard Tresca,1814—1885)

63.《关于固体的流动》(Memoire us l'écoulement des corps solides),Pres. Par div. Savants 18,pp. 733~799,1864年发表。最早提出固体按照最大剪应力的屈服条件,后人称为特雷斯卡条件。

达西(Henry Philibert Gaspard Darcy,1803—1858)

64.《第戎城市公共自来水,注记D》(Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Dalmont, Paris. 647 p. & atlas, Note D),1865年在达西去世后出版,法文。其中注记D是关于渗流的达西定律的原始文献。

克劳修斯(Rudolf Julius Emmanuel Clausius,1822—1888)

65.《热的机械理论基本方程的若干方便的形式》(Über verschiedene für die Anwendung bequeme Formender Hauptgleichungen der mechanischen Wärmetheorie),1865年以德文发表在Poggendorffs Annale上(125, 353~400),1867年以英文发表在The Mechanical Theory of Heat上(pp. 327~365)。提出了熵的概念,总结出热力学第一和第二定律。

波耳兹曼(Ludwig Boltzmann,1844—1906)

66.《气体分子热力学的新研究》(Weitere Studien über das Wärmegleichgewicht unter Gasmolekülen),1872年以德文发表在Wiener Berichte上(66: 275~370)。从经典力学的观点解释热力学第二定律,开辟解决不同层次物理现象之间关系的新路径。

佛科(Jean-Bertrand-Léon Foucault,1819—1868)

67.《佛科科学论文集》(Recueil des Travaux Scientifiques de Léon

Foucault), 佛科生前发表的论文 1878 年由 C. M. Gabriel 整理, 由佛科的母亲出版, 法文。包含了 1851 年的佛科摆与 1852 年的陀螺仪的论文以及关于光速测量的重要论文。

卡斯提也努(Carlo Alberto Castigliano, 1847—1884)

68. 《论弹性系统》(Intorno ai sistemi elastici)。1873 年卡斯提也努提交图林理工大学(Polytechnic of Turin)的学位论文, 其中包含了广泛应用于结构分析中被后人称为卡斯提也努原理的变分原理。

兰姆(Horace Lamb, 1849—1934)

69. 《流体动力学》(Hydrodynamics), 1879 年出版英文本, 以后每版都有补充, 兰姆生前共出了六版。在 1930 年之前是一本流体力学的百科全书, 至今仍有参考价值。

柯瓦列夫斯卡娅(София Васильевна Ковалевская, 1850—1891)

70. 《刚体绕固定点旋转的一个问题》(. Sur le problème de la rotation corps solide autour d'un point fixe), 1888 年应征法国科学院悬赏得奖论文。解决了刚体绕固定点运动的一种情形。

瑞利(Lord Rayleigh, 1842—1919)

71. 《声的理论》(Theory of sound), 1877 年第一版, 1894 年第二版, 英文。总结了弹性体振动的已有成果。发展了计算固有频率的方法。

雷诺(Osborne Reynolds, 1842—1912)

72. 《平行渠道阻力的实验研究情况》(An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels), 1883 年发表在 Royal Society, Phil. Trans. 上, 英文。提出一个标志流体流动状态由层流向湍流变化的无量纲数, 后人称为雷诺数, 标志湍流研究的开始。

马赫(Ernst Mach, 1838—1916)

73. 《力学史评》(Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt), 1883 年以德文出版, 马赫生前出过六版, 1921 年有英文版。书中对经典力学的绝对时空进行了认真的批评, 爱因斯坦称马赫为广义相对论的先驱。

74. 《通过空气投影的照相》(Photographische Fixierung der durch

Projektilen in der Luft eingeleiteten Vorgänge), 1887 年提交给维也纳科学院的研究报告。给出了通过纹影照相得到的超声速流动的相片和研究结果,是最早对超声速流动的研究。

赫兹(Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894)

75. 《关于弹性体的接触》(Über die Berührung fester elastische Körper), 1882 年发表在 Journal fuer die Reine und angewandte Mathematik 上(Vol. 92, pp. 156~171)。提出并解决了两个弹性体接触的变形与应力分布问题,后人称为赫兹接触问题。

布森涅斯克(Valentin Joseph Boussinesq, 1842—1929)

76. 《应用势论研究弹性体的平衡与运动》(Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvements des solides élastiques), 1885 年以法文出版。是继圣维南的《柱体扭转》之后,在弹性力学方面的一本最重要的文献,书中利用势论解决了弹性力学中的许多重要问题,如半平面受集中力的问题、半无限杆的振动问题等。

汤姆孙(Sir William Thomson, 1824—1907)

台特(Peter Guthrie Tait, 1831—1901)

77. 《自然哲学教程》(Treatise on natural philosophy), 1888 年以英文出版。总结从牛顿到当时的力学成果,特别对能量守恒给予关注。

阿培耳(Paul Appell, 1855—1930)

78. 《理论力学教程》(Traité de mécanique rationnelle), 共 5 卷, 1893、1896、1903 年出版前 3 卷,第 4、5 卷是 1920 年之后出版的。前 3 卷分别介绍质点的静、动力学;分析力学;连续体力学。是一套影响很大的力学教材。

乐甫(Augustus Edward Hough Love, 1863—1940)

79. 《弹性的数学理论教程》(A treatise on mathematical theory of elasticity), 1882—1883 年分两卷以英文出版,后多次再版。总结弹性力学成就,发展了薄壳理论。

80. 《地球动力学的若干问题》(Some problems of geodynamics), 1911 年出版。总结了他从弹性力学的观点研究地球的一系列成果,如固体潮、地壳平衡与稳定性、地震波等,许多结果成为后来地球物理研究的基础。

庞加莱 (Henri Poincaré, 1854—1912)

81. 《天体力学的新方法》(Les Methodes Nouvelles de la Mecanique Celeste), 分别在 1892、1893、1899 年分三卷以法文出版。书中包含他新发展的周期解问题、定性方法, 还包含后来称为动力系统混沌的早期思想。

李亚普诺夫 (Ляпунов Александр Михайлович, 1857—1918)

82. 《运动的一般稳定性》(Общая задача об устойчивости движения)。给出了运动稳定性的严格定义, 并且给出了两种判别稳定性的方法。

科尔泰沃赫 (Diederik Johannes Korteweg, 1848—1941)

德弗里斯 (Hugo de Vries, 1848—1935)

83. 《论长波形状的变化》(On the change of form of long waves advancing in a rectangular canal and on a new type of long stationary wave) 1895 年发表在 Phil. Mag. 上(39: 422~433)。提出了一种非线性波动方程, 后人称为科尔泰沃赫-德弗里斯方程(Diederik Johannes Korteweg-de Vries equation), 简称 KdV 方程。

白纳 (Henri Bénard, 1880—1939)

84. 《加热薄层液体持续对流的漩涡胞》(Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide transportant de la chaleur par convection en regime permanent), 1901 年发表在 Ann. de Chim. et de Phys. 上(23: 62~144)。由实验发现在底部加热薄层流体对流(即白纳对流)产生的漩涡胞, 后人称为白纳胞。

恰普雷金 (Чаплыгин Сергей Алексеевич, 1869—1942)

85. 《论气体射流》(О газовых струях), 1902 年作者提交莫斯科大学的博士论文。发展了亚声速气体射流流动理论。

齐奥尔科夫斯基 (Константин Эдуардович Циолковский, 1857—1935)

86. 《利用喷气工具研究宇宙空间》(Исследование мировых пространств реактивными приборами), 1903 年发表在《科学评论》(Научном Обозрении)上。开始了火箭的理论与变质量力学的研究。

普朗特 (Ludwig Prandtl, 1875—1953)

87. 《关于非常小摩擦下的流动》(Über Flüssigkeitsbewegung bei se-

hr kleiner Reibung)在1904年8月12日于德国海德堡召开的国际数学家会上的报告,德文。开创了黏性流体的边界层理论。

巴金汉(Edgar Buckingham, 1867—1940)

88. 《论物理上的相似系统》(On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Analysis), 1914年发表在Phys. Rev. 上(4: 345), 英文。给出了 π 定理, 奠定了量纲分析与模型律的理论基础。

爱因斯坦(Albert Einstein, 1879—1955)

89. 《论运动物体的电动力学》(Zur elektrodynamik bewegter Körper), 1905年发表在Ann. Der Physik上(Vol. 17, p. 897), 德文。提出狭义相对论。

90. 《广义相对论基础》(Die grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie), 1916年发表在Annalen der physik上(Vol. 49), 德文。完整阐述广义相对论的最早的论文。

茹柯夫斯基(Юлий Галактионович. Жуковский, 1847—1921)

91. 《关于附着的旋涡》(О присоединённых вихрях), 最初于1905年在莫斯科数学协会作报告, 1906年由莫斯科大学出版。建立了二维机翼的升力理论。

科恩(A. Korn)

92. 《关于弹性理论与转轴弯曲的不等式》(Über einige Ungleichungen welche in der Theorie der elastischen und elektrischen Schwingungen eine rolle spielen), 1909年发表在Akad. Umiejet Krakow Bulletin Int. 上(pp. 705~724)。给出了弹性力学能量正定性的不等式。

索末菲(Arnold Sommerfeld, 1868—1951)

93. 《对流动转变为湍流的解释》(Ein beitrag zur hydrodynamischen Erklärung der turbulent Flüssigkeitsbewegungen), Atti del Ivcongress Internazionale dei Matematici, Roma, III, 116~124, 1908年在罗马国际会议上报告, 1909年文集出版。对层流稳定性的较早研究, 所得到的非自共轭偏微分方程, 后人称为Orr-Sommerfeld方程。

卡拉索夫(Г. В. Колосов, 1867—1936)

94. 《复变函数在平面弹性的数学理论中的应用》(Об одном приложении теории функций комплексного переменного в плоской задаче

математической теории упругости), 1909 年以俄文出版。开创了平面弹性力学问题的复变函数解法。

冯·卡门(Theodore von Kármán, 1881—1963)

95. 《机械制造中的强度问题》(Festigkeitsprobleme in Maschinenbau), 1910 年发表在 Encyk. D. Math. Wiss. 上(IV, 311~385), 德文。较早的薄板大挠度方程。

96. 《关于流体中动体的力学实验》(Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt. Nachr. der K. Gesell. Der Wiss. Zu Göttingen, 13: 547~556), 1912 年以德文发表。首次证明了在流动中圆柱体后的尾涡以交错排列时是稳定的, 后人把这种尾涡称为卡门涡街。

冯·密泽斯(Richard von Mises, 1883—1953)

97. 《塑性变形固体的力学》(Mechanik der festen Körper in plastischdeformablen), 1913 年发表在 Zustand, Gött. Nachr. 上(582~592)。提出固体在一定应力状态下的一种屈服条件, 后人称为密泽斯条件。

伽辽金(Борис Григорьевич Галеркин, 1871—1945)

98. 《在某些杆与板平衡问题中的级数》(Стержни и пластинки. Ряды в некоторых вопросах упругого равновесия стержней и пластинок), 1915 年发表在 Вестник Инженеров 上(т. 1, pp. 897~908)。提出一种直接离散的近似方法, 后人称之为伽辽金方法。

诺特(Emmy Noether, 1882—1935)

99. 《变分问题的不变量》(Invariante Variationsprobleme), 1918 年发表在 Nachr. d. König. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, Mathphys. Klasse 上(pp. 235~257), 德文。论文给出两个关于动力系统的不变量定理, 对 20 世纪力学和物理的发展产生了深刻的影响。

格里菲斯(Alan Arnold Griffith, 1893—1963)

100. 《固体的流动与断裂现象》(The Phenomena of Rupture and Flow in Solids), 1920 年刊于 Philos. Trans. R. Soc. London A(221, 163), 英文。断裂力学的最早文献。

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

中国湍流研究的发展史 I： 中国科学家早期湍流研究的回顾

黄永念

(北京大学力学与工程科学系, 湍流与复杂系统国家重点实验室, 北京 100871)

摘 要 总结了 20 世纪 30 年代到 60 年代中国老一辈科学家(包括物理学家、力学家)周培源、王竹溪、张国藩、林家翘、谢毓章、张守廉、黄授书、胡宁、柏实义、陈善模、庄逢甘、陆祖荫、李政道、蔡树棠、是勋刚、李松年、谈镐生、包亦和等诸位先生的湍流研究工作。介绍他们对流体力学中最为困难的湍流问题所作出的努力和贡献。

关键词 湍流统计理论, 能量衰变规律, 均匀各向同性湍流, 剪切湍流

引言

湍流一直被认为是物理学中最难而又久未解决的基础理论研究的一个课题。从 1883 年 Reynolds 圆管湍流实验研究算起已经跨越了两个世纪, 湍流问题仍未得到解决。在跨入 21 世纪时, 很多从事湍流研究工作的科学家都在思考这样的问题: 20 世纪的湍流研究留给我们哪些宝贵财富? 21 世纪又应该如何面对这个老大难问题? Yaglom 在 2000 年法国举行的一次湍流讲习班上回顾了 20 世纪的湍流理论发展过程^[1], 指出了其中两个最重要的成就: 一个是 Kolmogorov 的局部均匀各向同性湍流理论, 另一个是 von Kármán 的湍流平均速度的对数分布律。同时又一次向世人介绍著名科学家 Lamb 在临终前对解决湍流问题的悲观看法。由于中国与世界各国在文字和语言上的差异和长期缺乏国际间的交流, 历次湍流研究工作的总结和回顾中, 人们往往忽略了中国科学家的作用。只有周培源教授在 1995 年流体力学年鉴上发表了《中国湍流研究 50 年》才打破了这种隔阂^[2]。但是这篇文章也只局限于周培源教授率领的北京大

学研究组所做的系列研究工作。实际上有很多中国科学家在 20 世纪中做了非常出色的工作。本文仅就半个世纪前的 20 世纪 30 年代到 60 年代他们的湍流研究工作做一个简单的介绍,目的是要引起大家关注中国科学家的湍流研究和对湍流研究所做的贡献。

中国科学家的湍流研究工作可以分成两个方面:一方面是在国内极其困难的条件下坚持开展的研究工作,这方面的工作国际上鲜为人知;另一方面是在国外开展的研究工作,这部分工作国内也不很熟悉。因此,本文将把他们的不懈努力介绍给大家。

胡非在 1995 年发表的专著《湍流,间隙性与大气边界层》中曾专门介绍了中国学者的湍流研究工作^[3],但他的介绍还不够全面,特别是缺少对早期工作的报道。本文可以弥补其中的不足。

1 20 世纪 30 年代的研究工作

在我国最早发表湍流论文的是当时在清华大学的王竹溪先生。他在周培源先生的指导下于 1934 年发表了研究论文《旋转体后的湍流尾流》。“Turbulence”的中文译名“湍流”就是王竹溪先生最早提出来的。这个译名无论从音译还是意译看来都恰到好处。

最早从事湍流研究工作的还有天津大学的张国藩先生。他在 1931 年赴美留学,先进入康奈尔大学学习水利,兼学物理;1933 年获理学硕士学位后转入依阿华大学继续学水利,并兼攻流体力学。他在 1935 年获工学博士学位,博士论文就是《溪流中的落体及湍流的作用》^[4]。他研究了落体落到一流体中的状态以及湍流在其中所起的作用。这一成果后来被研究流态化的人所利用。张国藩先生在获得博士学位后当年就回到中国,将其毕生精力投入到教育和湍流研究事业中。他对湍流研究的看法是:传统的 Navier-Stokes 方程不能用于湍流,必须先把湍流的物理机制搞清楚,按照新的模型建立基本方程,并提出了自己的方程和方程解,形成独特的学术观点。他发表的湍流论文有“湍流的动理学理论”,“试用量子统计方法求湍流能谱分布式”,“一种湍流运动方程式”,“关于湍流阻力问题”^[5,6,7,8]。本文作者至今还保留了张国藩先生一篇尚未发表的文章“湍流能谱与量子统计力学”。今天天津大学成为国内一个湍流研究基地

是与张国藩先生早年的努力分不开的。

周培源先生本人的湍流研究工作是 1938 年在昆明西南联大正式展开的。当时跟随他一起做湍流研究的学生有林家翘先生和郭永怀先生。他最早的湍流论文“论雷诺求似应力的方法的推广和湍流的性质”发表于 1940 年的《中国物理学报》上^[9]。他在这篇文章中首次提出除了雷诺平均运动方程以外,还要研究湍流脉动运动方程,并给出了雷诺应力所满足的动力学方程,从而构成了湍流模式理论的奠基性工作。他的这篇文章的另一个贡献是首次提出了四元速度关联用二元速度关联表示的一个假设,与此后不久前苏联科学家密林奥希可夫提出的假设类似。国际上很久不知道周培源先生的工作,直到 20 世纪 90 年代经 Lumley 指明,才将首创权归于周培源先生^[2]。

2 20 世纪 40 年代的研究工作

周培源先生在 20 世纪 40 年代初曾带领一批中国科学家从事湍流研究工作。其中谢毓章先生 1942 年的硕士论文“湍流库埃特流动和两同心转动圆柱间的湍流”,美籍华裔电机工程学家张守廉先生 1943 年的博士论文“圆管中的湍流”,天体物理学家黄授书先生的硕士论文“湍流射流”都是周培源先生指导的^[10,11]。遗憾的是我们没有能找到有关的资料,无法进行介绍。胡宁先生 1944 年的博士论文“各向同性湍流中的三元和四元速度关联函数方程的注解”和“两种不同密度流体的湍流混合”也是周培源先生指导的。胡宁先生还在《中国物理学报》上发表了两篇湍流论文:“无限长圆柱和回转体后湍流尾流中的速度和温度分布”,“一排等间距平行圆杆和方格后湍流尾流中的速度和温度分布”^[12,13]。他详细地分析了风洞网格湍流中的流动特性。

周培源先生本人于 1943 年到加州理工学院做访问教授,于 1945 年在美国应用数学季刊上发表的论文“关于速度关联和湍流脉动方程的解”^[14]详细地分析了湍流脉动方程的求解,特别是文中有关脉动压力满足的泊松方程的求解是以后湍流模式理论有关压力—速度梯度关联的模化的基础。他还在同一杂志上发表了论文“在两无限平行平板间湍流流体的压力流动”和“沿半无穷平板的湍流流动”^[15,16]。1948 年他还发表了“速

度关联和湍流涡量脉动方程”的清华大学科学报告^[17]。

美籍华裔林家翘先生原本由周培源先生介绍去英国剑桥大学 G. I. Taylor 教授那里当研究生,但由于第二次世界大战爆发,英国对德国宣战,林先生无法赴英,只好转到加拿大多伦多大学跟随 J. L. Synge 教授做研究工作。然后于 1941 年转到美国加州理工学院跟随 von Kármán 教授做研究工作。他于 1943 年在美国应用数学季刊上发表第一篇湍流论文“在湍流流体中单摆的运动”^[18]。他与 Synge 教授于 1943 年发表的“各向同性湍流的一个统计模型”中首次提出“先求解后平均”的新想法^[19],从而成为周培源先生在 50 年代展开的湍流研究新方向的基础。他们在文章中提出用 Hill 球涡作为湍流元的想法实际上是最早提出湍流元的第一个涡元数学模型。林家翘先生于 1944 年在 von Kármán 教授指导下完成了博士论文“论湍流的发展”。他和 von Kármán 教授一起发表的论文有“各向同性湍流理论中的相似性概念”和“各向同性湍流的统计理论”^[20, 21]。林先生自己还发表了很多重要的文章。其中包括 1947 年的“有关湍谱的评述”,1948 年的“各向同性湍流衰变规律的注解”,“论各向同性湍流的衰变规律和谱”^[22, 23, 24]。最重要的综述性文章是“湍流,理论概念”和“湍流统计理论”^[25, 26]。

美籍华裔柏实义先生于 1943 年在美国 NACA 发表了他的第一篇湍流论文“旋转圆柱间的湍流流动”^[27]。实际上这篇文章是他在 1939 年加州理工学院的博士论文。以后又陆续发表了“平行平板间的湍流流动”,“圆管内的湍流流动”和“常温时两种气体混合的湍流射流”等论文^[28, 29, 30]。他还在 1957 年出版了一本湍流专著《黏性流动理论·第 2 卷·湍流流动》^[31]。书中详细介绍了他本人的湍流研究工作。

美籍华裔陈善谟先生于 1947 年在美国得尔富特大学完成的博士论文是“悬浮在湍流中的小粒子运动的平均值和关联问题”。他在 50 年代发表了“湍流剪切流中的能谱”,“海森伯和奥布霍夫湍流理论的输运过程基础”和“湍流中粒子的扩散”几篇关于湍流的文章^[32, 33, 34]。由于有了平均剪切,湍流能量能连续地生成,雷诺应力也不为零,因而可以更好地了解湍流的特性。关于陈善谟先生的湍流研究工作的详细情况可参考欣茨所著的《湍流》(中译本)上册第四章的内容^[35]。

3 20 世纪 50 年代的湍流研究工作

庄逢甘先生于 1947 年赴美国学习,师从美国加州理工学院的 Liepman 教授。他在 1950 年完成了博士论文“湍流的统计理论”^[36]。在该论文中他利用了 Heisenberg 谱输运项的一个假设,首次得到了准确的湍谱解,并给出了 Burgers 方程的初值问题的准确解。1951 年庄逢甘先生回到中国,经周培源先生的推荐到中国科学院数学研究所工作。他对随机边界条件的 Navier-Stokes 方程进行了长期研究。他于 1953 年发表了“论湍流的衰变”的文章^[37, 38]。文中引入了双尺度湍流的概念,引起学术界的重视。他在文章中首次引入湍能耗散率的时间导数作为一个新的基本特征量,研究了湍能从初期到后期的衰变规律。同年还在数学学报上发表论文“拟线性抛物型方程的辐射问题与湍流数学模型”^[39]。他还和胡海昌先生一起翻译出版了《湍流的微结构》一书^[40],对我国湍流研究工作的开展起到了一定的作用。

清华大学的陆祖荫先生于 1950 年在清华大学发表了“湍流中 Kolmogorov 局部相似性的讨论”的论文^[41]。他在文中利用了 Kolmogorov 的局部相似性的思想和林家翘先生简化 Kármán-Howarth 方程的方法计算了均匀各向同性湍流中横向二元速度关联量。计算结果发现与 Townsend 的测量数据有差别。他认为差别的原因是实验雷诺数可能太小。

美籍华裔李政道先生在 50 年代初期曾涉足研究过湍流。他在 1950 年发表了“各向同性湍流中的涡黏性系数的注解”的湍流论文^[42]。并于 1951 年发表了“二维流体与三维流体中湍流间的差异”^[43]。他在文章中通过海森伯湍流模型与实验结果的比较,计算了各向同性湍流中的涡黏性系数,证明了二维平面中不存在湍流运动。李政道先生还在 1952 年的一篇文章中详细探讨了高雷诺数湍流中各个运动模态之间的能量配分问题。他证明了湍流中速度场的每一个运动模态是能量均分的,所有的模态同样被激发。他还在这篇文章中讨论了电磁流体湍流问题^[44]。

周培源先生在 50 年代率领他的一批学生(包括蔡树棠先生、是长春先生和陈定亚先生)继续从事湍流统计理论的研究工作。他和蔡树棠先

生从 50 年代初就开始了“先求解后平均”的湍流研究新途径。他们在 1956 年的一篇文章“涡球在黏性流体中的运动”中首次引进了一种我们称为周球涡的黏性球涡^[45]。这篇文章最早是在 1955 年北京大学“五·四”科学讨论会上由周培源先生做了口头报告。他们在 1957 年的文章“均匀各向同性湍流在后期衰变时的涡性结构”中用一种二阶轴对称球涡作为湍流元计算了均匀各向同性湍流二元速度关联^[46]。他们还在 1957 年发表了“自由湍流的后期运动”的论文^[47]。周培源先生本人还在物理学报上发表了“湍流理论的近代发展”的综述性文章,总结了 20 世纪前半世纪的湍流研究的进展^[48]。

4 20 世纪 60 年代的研究工作

60 年代初期周培源先生在北京大学数学力学系组织了一个由高年级本科生参加的湍流讨论班。继续带领他的助手是勋刚先生,学生李松年、叶文虎、谭学勤和本文作者开展了湍流研究^[49]。周培源先生还亲自讲授湍流理论的课程。本文作者在 1965 年用周培源先生和蔡树棠先生提出的轴对称二阶球涡计算了三元速度关联^[50],理论计算的结果十年后得到实验的证实。

谈镐生先生在 60 年代初期对网格湍流的特性进行了深入的研究。他和林松青先生在 1963 年发表了一篇湍流论文“网格生成湍流的后期衰变”^[51]。他们在低速水槽实验中发现网格湍流后期能量按时间的一 2 次幂衰减。据此他们提出了互相独立,取向随机,只通过黏性耗散进行衰变的后期湍流动力学模型,并由此导出了一 2 幂次规律。谈镐生先生还对非均匀湍流做了研究。他和 D. A. Lee 在 1967 年的文章“非均匀湍流的研究”中特别考虑了一种不同于密度分层的速度分层湍流模型(即轴对称湍流模型)^[52]。文章得出两点结论:一是能谱在波数空间的原点即使初始时刻解析,以后也变得不解析;二是对称条件、质量守恒条件和轴对称条件都不足以限定能谱在原点的局部性质,从而不能确定这种分层湍流的后期衰变规律。他们的研究工作也可参考欣茨所著的《湍流》上册第三章有关的内容。

美籍华裔鲍亦和先生在 1965 年和 1968 年的湍流论文“大波数处湍

流速度和标量场的结构”中提出一种在大波数处湍流能量、热量和质量交换的机制^[53, 54],即一种能量的连续级串过程。他在大波数处导出了一个新的与实验测量比较符合的能谱函数和标量谱函数。

60年代中期由于“四清运动”和“文化大革命”的爆发,国内科学研究工作完全处于停顿状态,湍流研究工作也被迫中断了。直到70年代初期经过周培源先生的不懈努力才得以恢复湍流研究工作。

5 20世纪70年代的研究工作

“文化大革命”从60年代中期一直延续到70年代中期。但在70年代初周培源先生就冒着极大的政治风险写信给周恩来总理,希望国家重视基础理论的研究工作。他的意见得到了周恩来总理的充分肯定,并作出了十分重要的指示,要周培源先生把基础理论研究搞上去。为此周培源先生从1972年开始就着手准备在北京大学成立湍流研究小组。他一方面通过北京市将作者本人从宁波一个工厂调回北京大学,另一方面又将分散在北京大学各处的几名从事实验研究工作的先生集中起来,其中包括叶文虎、盛森芝、曾继才等先生,而后魏中磊先生也加入进来。同时还将租借给三机部的大风洞实验设备要了回来。由此组建了北京大学湍流研究小组。这个研究小组在1973年就在《力学情报》(后改名为《力学进展》)上发表了论文“湍流理论简述”。文中介绍了当时湍流研究的发展状况,鼓励我国的科技工作者来积极参加湍流研究工作。有趣的是由于当时的环境不容许署名发表文章,文章是以北京大学湍流工作小组的名义发表的。1974年10月周培源先生和本文作者在《清华北大理工学报》第一卷第一期上发表了论文“均匀各向同性湍流的涡旋结构理论”。这份“文化大革命”色彩的历史上惟一一次两校联合出版的学报只短短存在了两年便消失了。这篇论文同时还在1975年的《中国科学》上发表。

6 结论

以上介绍了我国很多著名的老科学家在他们从事研究工作的初期都曾涉足研究过湍流问题。虽然他们中间很多人只进行了初步探索便改行

转向其他方向,但他们的参与本身就表明湍流问题的巨大科学吸引力和其研究价值的重要性。这里我们看出其中大部分研究工作是与清华大学、北京大学和美国加州理工学院的师生分不开的。这些单位至今都仍然是湍流研究的基地。有人预言 21 世纪是湍流世纪。今天有志向的年轻科学家不妨仿效老一辈的科学家,立志攀登科学的高峰,向湍流这个老大难问题进军,希望湍流问题能在大家的坚持不懈的共同努力下在本世纪内得到解决。我们也就不会像兰姆那样把遗憾留给后代了。

由于时间的仓促和所接触到的资料有限,肯定还有很多人的很多工作被遗漏或未曾提及,敬请谅解。同时希望大家提供线索和资料,使我们的总结更完善。关于周培源先生的工作还可参考周培源科学论文集^[55]。

参考文献

- [1] A. Yaglom, The century of turbulence theory; The main achievements and unsolved problems, in “New Trends in Turbulence”, (Editors: M. Lesieur, A. Yaglom and F. David), Springer, 2001, 1 - 52
- [2] Pei-Yuan Chou and Ru-Ling Chou, 50 years of turbulence research in China, Annual Review of Fluid Mechanics. 1995, 27: 1 - 15
- [3] 胡非. 湍流, 间隙性与大气边界层. 北京: 科学出版社, 1995
- [4] Djang Gwoh-Fan, The falling of bodies in a stream and the effect of turbulence, Ph. D. Iowa University
- [5] Zhang Guofan, A kinetic theory of turbulence, Chinese Journal of Physics, 1948, 7(3): 176 - 191
- [6] 张国藩. 试用量子统计法求湍流能谱分布式. 天津大学学报, 1962, 11: 1~16
- [7] 张国藩. 一种湍流运动方程式. 天津大学, 1962, 12: 23~32
- [8] 张国藩. 关于湍流阻力问题. 天津大学, 1964, 16: 87~94
- [9] Chou Pei-Yuan, On an extension of Reynolds' method of finding apparent stress and the nature of turbulence. Chinese Journal of Physics, 1940, 4(1): 1 - 53
- [10] Zhang, S. L. The Turbulent flow in a pipe. Chinese Journal of Physics, 1944, 5: 124 - 137
- [11] Huang S. S. The turbulent jet. Chinese Journal of Physics, 1944, 5: 105 - 123
- [12] Hu Ning. Velocity and temperature distributions in turbulent wakes behind an infinite cylinder and a body of revolution. Chinese Journal of Physics, 1944, 5: 1 - 29

- [13] Hu Ning. Velocity and temperature distributions in turbulent wakes behind a row of equally spaced parallel rods and behind a square grid. Chinese Journal of Physics, 1944, 5: 30 - 48
- [14] Chou Pei-yuan. On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation. Quarterly of Applied Mathematics, 1945, 5(1): 38 - 54
- [15] Chou Pei-Yuan. Pressure flow of a turbulent fluid between two infinite parallel planes. Quarterly of Applied Mathematics, 1945, 3(3): 198 - 209
- [16] Chou Pei-Yuan. The turbulent flow along a semi-infinite plate. Quarterly of Applied Mathematics, 1947, 5(3)
- [17] Chou Pei-Yuan. On velocity correlations and the equations of turbulent vorticity fluctuation. Science reports of National Tsing Hua University, 1948, 5(1)
- [18] Lin Chia-Chiao. On the motion of a pendulum in a turbulent fluid. Quarterly of Applied Mathematics, 1943, 1: 43
- [19] Synge, J. L. and Lin, C. C. On a statistical model of isotropic turbulence. Trans. Roy. Soc. Canada, 3rd Ser. Section 3, 1943, 37: 1 - 35
- [20] Von Karman, T. and Lin, C. C. On the concept of similarity in the theory of isotropic turbulence. Reviews of Modern Physics, 1949, 21: 516 - 519
- [21] Von Karman, T. and Lin, C. C. On the statistical theory of isotropic turbulence. Advances in Applied Mechanics, Vol. II, 1951, 1 - 17
- [22] Lin Chia-Chiao. Remarks on the spectrum of turbulence. Proceedings of the 1st Symp. In Appl. Math., Amer. Math. Soc. 1947, 81
- [23] Lin Chia-Chiao. On the law of decay and the spectrum of isotropic turbulence. Proceedings of the 7th Int. Congr. Appl. Mech., 1948, 2: 127
- [24] Lin Chia-Chiao. Note on the law of decay of isotropic turbulence. Proceedings of Nat. Acad. Sci., Wash., 1948, 34: 540
- [25] Flugge, S. and Truesdell, C. Encyclopedia of Physics, Vol. 8/2, Fluid Dynamics II. Springer-Verlag, 1963, 438 - 523
- [26] Lin Chia-Chiao, (editor) Statistical theories of turbulence, Turbulent Flows and Heat Transfer, Princeton University Press, 1959, 196 - 253
- [27] Pai Shih-I. Turbulent flow between rotating cylinders. NACA TN 892, 1943
- [28] Pai Shih-I. On turbulent flow in circular pipe. Jour. of the Franklin Inst. 1953, 256(4): 337 - 352
- [29] Pai Shih-I. On turbulent flow between parallel plates. Jour. Appl. Mech. 1953, 20(1): 109 - 114

- [30] Pai Shih-I, On turbulent jet mixing of two gases at constant temperature. Jour. Appl. Mech. , 1955, 22(1): 41 - 47
- [31] Pai Shih-I. Viscous Flow Theory, Part II. Turbulent Flow. D. Van Nostrand Company, Inc. , 1957
- [32] Tchen, Chan-Mou. On the spectrum of energy in turbulent shear flow. Jour. Research Natl. Bureau Standards, 1953, 50(1): 51
- [33] Tchen, Chan-Mou. Transport processes as foundation of the Heisenberg and Obukhoff theories of turbulence, Phys. Rev. 1954, 93(1): 4 - 14
- [34] Tchen, Chan-Mou. Diffusion of particles in turbulent flow, Adv. Geophys. 1959, 6: 165 - 173
- [35] J·O·欣茨著,黄永念,颜大椿译. 湍流. 上册, 1987, 356~399
- [36] Chuang Feng-Gan. On the statistical theory of turbulence. Final Report, NA-CA, Con. NA, W5777, 1950
- [37] Chuang Feng-Gan. On the decay of turbulence. Acta Scientis Sinics, 1953, 2(3)
- [38] 庄逢干. 湍流耗损的研究. 中国物理学报, 1953, 9: 201~214
- [39] 庄逢干. 拟线性抛物型方程辐射问题与湍流数学模型, 数学学报, 1953, 3(4)
- [40] 奥布霍夫, 雅格洛姆著, 庄逢干, 胡海昌译. 湍流的微结构. 北京: 科学出版社, 1953
- [41] 陆祖荫. 湍流中科尔莫哥洛夫局部相似性的讨论. 清华大学科学报告, 1950, 5: 451~458
- [42] Lee Tsung-Dao. Note on the coefficient of eddy viscosity in isotropic turbulence. Phys. Rev. 1950, 77: 842
- [43] Lee Tsung-Dao. Difference between turbulence in a two-dimensional fluid and a three-dimensional fluid. Jour. Appl. Phys. 1951, 22: 524
- [44] Lee Tsung-Dao. On some statistical properties of hydrodynamical and Magneto-hydrodynamical fields. Quar. Appl. Math. , 1952, 10: 59 - 74
- [45] 周培源, 蔡树棠. 涡球在黏性流体中的运动. 北京大学学报, 1956, 1: 39~49
- [46] 周培源, 蔡树棠. 均匀各向同性湍流在后期衰变时的涡性结构. 力学学报, 1957, 1(1): 3~14
- [47] 周培源, 蔡树棠. 自由湍流的后期运动. 北京大学学报, 1958, 4: 405~413
- [48] 周培源. 湍流理论的近代发展. 物理学报, 1959, 13(3): 220~242
- [49] 周培源, 是勋刚, 李松年. 高雷诺数下的均匀各向同性湍流运动. 北京大学学报, 1965, 11(1): 39~52

- [50] 黄永念. 均匀各向同性湍流后期衰变时的三元速度关联. 力学学报, 1965, 8(2): 122~132
- [51] Tan, H. S. and Ling, S. C. Final stage decay of grid-produced turbulence. Phys. of Fluids, 1963, 6: 1693 - 1699
- [52] Lee, D. A. and Tan, H. S. Study of inhomogeneous turbulence. Phys. of Fluids, 1967, 10: 1224 - 1230
- [53] Pao, Yih-Ho. Structure of turbulent velocity and scale fields at large wave number. Phys. of Fluids, 1965, 8(6): 1063 - 1075
- [54] Pao Yih-Ho. Transfer of turbulent energy and scalar quantities at large wave-numbers. Phys. of Fluids, 1968, 11(6): 1371 - 1372
- [55] 黄永念, 石光漪, 黄超光编. 周培源科学论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1992
- [56] 北京大学湍流工作小组. 湍流理论简述. 力学情报, 1973
- [57] 周培源, 黄永念. 均匀各向同性湍流的涡旋结构理论. 清华北大理工学报, 1974, 1(1): 29~53
- [58] 周培源, 黄永念. 均匀各向同性湍流的涡旋结构的统计理论. 中国科学, 1975, 2: 180~198

孤立波与孤立子

王振东

(天津大学力学系, 天津 300072)

摘 要 简要阐述孤立波与孤立子发现和研究的历史, 由此可看出力学基础研究的深刻意义。

关键词 孤立波, 孤立子, 力学基础研究

引言

现代自然科学正发生着深刻的变化, 非线性科学贯穿着数理科学、生命科学、空间科学和地球科学, 成为当代科学研究重要的前沿领域。孤立波与孤立子正是推动非线性科学发展的重要概念之一, 而此概念最初的提出, 正好来源于流体力学的研究。孤立子起源于孤立波, 它已在非线性光学、磁通量子器件、生物学、等离子体及光纤孤立子通讯等一系列高科技领域有了令人瞩目的应用, 所以了解孤立波与孤立子的研究历史, 对于学习与研究力学史和科学史, 均是很有必要的。

1 孤立波的发现历史

拉塞尔(John Scott Russell, 1808—1882, 注: 曾有译为罗素, 现根据周光炯先生所译, 译为拉塞尔)是苏格兰一位优秀的造船工程师, 对船体的设计有独到的见解, 做过重要的贡献。1834年8月为研究船舶在运动中所受到的阻力, 他在爱丁堡格拉斯哥运河中, 牵引船舶进行全尺寸的实验与观测。最初, 牵引船舶的动力是两匹马, 以后改用滑轮和配重系统。在实验中, 他观察到一种他称作孤立行进波的现象。当时他骑着马追踪观察一个孤立的水波, 在浅水窄河道中的持续前进, 这个水波

长久地保持着自己的形状和波速。这一奇妙现象的发现,就是孤立波和现今关于孤立子研究的起始。

拉塞尔后来在做学术报告和发表文章时,是这样描述他的发现的:

“我把注意力集中在船舶给予流体的运动上,立刻就观察到一个非同寻常而又非常绚丽的现象,它是如此之重要,以致我将首先详细描述它所表现出来的外貌。当我正在观察一只高速运动的船舶,让它突然停止时,在船舶周围所形成的小波浪中,一个紊乱的扰动现象吸引了我的注意。在船身长度的中部附近,许多水聚集在一起,形成一个廓线很清楚的水堆,最后还出现一尖峰,并以相当高的速度开始向前运动,到船头后,继续保持它的形状不变,在静止流体的表面上,完全孤立地向前运动,成为一孤立行进波,直到河道的转弯处才开始消失掉。”



图 1 拉塞尔

拉塞尔还继续生动地描述了他对这一现象所做出的反应:

“我立刻离开了船舶停留的地方,准备用步行去跟上它,但发现它运动得很快,我即刻骑上马,在几分钟之内赶上了它,并发现它以一均匀速度沿静止流体表面作孤独的运动。跟随它一英里多以后,我发现它开始逐渐衰减,并在运河的转角处最后消失。这一现象只要船舶快速行驶时,突然让它停止,就可以重复观察到。它是如此的重要和有趣,以致后来诱使我进行了许多有关水波课题的实验。”

为了进一步验证这一现象的存在并了解其性质,拉塞尔在 1837 年 8 月又在一长 20 英尺、宽 1 英尺的水槽中,进行了一系列受人工控制的实验,获得了与现场实验相同的结果。同时根据这些实验结果,他提出了孤立波的传播速度

$$c = \sqrt{g(h_0 + a)}$$

其中 g 是重力加速度, h_0 是静止水的初始深度, a 是孤立波的高度。

2 关于孤立波的争论与问题的解决

纵观力学和物理学的发展史不难看到,每当开始引入一种新思想或新概念的时候,往往会受到怀疑和非难,并常会引起激烈的争论,孤立波的命运也是如此。

当时科学界的权威们对拉塞尔的这些结果,一开始时就表示了怀疑和反对。甚至连当时对波动研究颇有造诣的英国天文学家艾里(George Biddell Airy, 1801—1892)爵士,与英国流体力学家斯托克斯(George Gabriel Stokes, 1819—1903)爵士也对此提出质疑,怀疑在静止水面上能存在不变形的行波。他们的怀疑的问题主要有:一个完整的波动为什么会全部在水面上,而不是一部分在水面上,一部分在水面下;波在传播的过程中,为什么波幅不会衰减;波的运动速度也与他们的研究结果不符。



图2 艾里

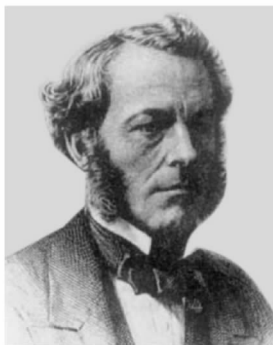


图3 斯托克斯

这一争论延续到19世纪70年代才初步得到解决。1862年和1865年H·E·巴津(Bazin, H. E.)对孤立波进行了一系列的实验,证明了拉塞尔的工作是正确的。英国科学家瑞利(John William Strutt Rayleigh, 1842—1919)在经过仔细的研究后指出,斯托克斯所研究的波,水深与波长之比接近于1,而拉塞尔所发现的孤立波,这一比值接近于0,他们二人研究的具体对象是有差别的,因此各自得到的波的传播速度也就不同。瑞利在1876年发表的著作中,首次使用了孤立波(solitary wave)这

一专门术语。他说“这就是拉塞尔先生给他描述的那个奇特的波起的名字”(拉塞尔在 1840 年的报告中称他发现的波为 A large solitary progressive wave)。

拉塞尔与艾里、斯托克斯的争论,最终于 1895 年由数学家 D·J·科尔特弗(Korteweg, D. J.)和他的学生 G·德·弗里斯(de Vries, G.)所解决。他们在小振幅与长波的假定下,从流体动力学导出了关于孤立波的方程(后人称之为 KdV 方程)。这一方程的行波解,在波长趋于无限的情况下,正是拉塞尔所发现的孤立波。KdV 方程的提出,从理论上阐明了孤立波的存在,给这场争论画上了句号。



图 4 瑞利

从拉塞尔的发现到 KdV 方程的提出,大约经历了 60 年时间,孤立波才为学术界普遍接受。拉塞尔当时已经知道了孤立波的一些重要性质,如:孤立波在传播过程中保持波形和速度不变;两个孤立波碰撞时互相穿透且维持原来的波形和速度;孤立波的波幅愈高,其传播速度愈快等等。

拉塞尔当时发现孤立波的河流,是流经在苏格兰、爱丁堡 Heriot-Watt 大学校园附近的 Union Canal。为纪念拉塞尔这一重要的科学发现,他当年发现孤立波的地方,已被列为历史名胜受到保护。英国 Heriot-Watt 大学在 1982 年曾举办了纪念拉塞尔逝世 100 周年学术讨论会,来自世界各地十几个学科的科学家的聚集一堂,热烈地交谈和讨论有关孤立波和孤立子的学术问题。

3 60 年沉寂后的复甦

虽然 1895 年 KdV 方程从理论上阐明了孤立波的存在,但当时学术界还没有能回答孤立波是否稳定;两个孤立波碰撞后其速度和波形是否改变;以及在流体以外的其他领域,孤立波是否也存在等重大问题。

从 19 世纪末到 20 世纪中,关于孤立波的研究工作处在沉寂时期,没有明显的进展。尽管在非线性电磁学、固体物理、流体动力学、神经动力

学等学科中,相继提出了一些与孤立波有关的问题,但当时有关孤立波的已有的知识,在新问题面前显得很不够用,且这些问题与应用数学之间相互促进的关系,也没有得到足够的重视。人们似乎已忘记了拉塞尔发现孤立波的重要意义。

经过了约 60 年的平静时期之后,1955 年由于费米(Enrico Fermi)、帕斯塔(John Pasta)、犹拉姆(Stan Ulam)(以下简称 FPU)发表了“Studies of Nonlinear Problem”一文,重新燃起了人们对孤立波的兴趣,使得对孤立波的研究又活跃了起来。FPU 实验原先是要研究一维非线性动力学系统:一根一维的、连续分布的弦两端固定,将其分成 N 段,每段当成一个单元;并将每个单元简化成具有相同质量的质点,其间相互作用力包括线性和非线性部分。FPU 在 Los Alamos 的 Maniac I 计算机上进行数值计算,出乎人们意料地得知:能量集中在最低的振动模式。1965 年,美国普林斯顿大学的应用数学家 Martin D. Kruskal 和贝尔实验室的 Norman J. Zabusky 对 FPU 结果的进一步研究发现,若用弦的位移表示,它们正好满

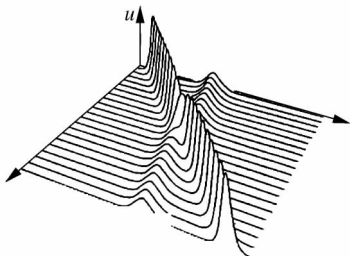


图 5 两个孤立波的碰撞

足 KdV 方程。图 5 表示两个 KdV 孤立波的碰撞,可以看到三个特点:孤立波在碰撞前后保持高度不变,像是“透明地”穿过对方;碰撞时两个孤立波重叠在一起,其高度低于碰撞前孤立波高度较高的一个(这表明在非线性过程中,不存在线性叠加原理);碰撞后孤立波的轨道与碰撞前有些偏离(即发生了相移)。他们在数值实验中,既研究了

两个孤立波的碰撞,也研究了四个孤立波的碰撞,并首次引入“孤立子”(soliton)这一术语,用来描述这种具有粒子性质的孤立波。

之后,在固体物理、非线性电磁学和神经动力学等学科里也发现了与孤立波有关的问题,促使人们考虑在流体以外的领域,孤立波是否存在?若存在的话,其表示孤立波演化的微分方程应如何求解?这些问题引起了人们的关注。

目前在不同的著作中,对孤立波和孤立子两者含义的区别,认识并不完全一致。多数作者称波形分布在有限的空间范围内,且具有弹性碰撞

性质,即碰撞后保持原有的速度和波形的孤立波为孤立子。而对呈非弹性碰撞的一类,仍称为孤立波。还有的作者称 KdV 方程和其他类似的方程的单孤立波解为孤立波,多孤立波解为孤立子。当然,也有作者认为,孤立波与孤立子两词沿用至今,已无严格的区别。现在物理学界,亦有人将孤立子简称为“孤子”。

从事孤立子理论研究的数学家们,多数采用以是否弹性碰撞来区分的意见。但物理学家对孤立子的定义要宽松些,认为只要波的能量有限,且分布在有限的空间或时间范围内,即使在传播过程中波形发生变化(例如光纤中的高阶光孤立子),也都称为孤立子。

4 孤立子研究进展及其应用

20 世纪 60 年代以来,孤立子的研究有了突飞猛进的发展。除了在流体,还在固体物理、激光、电气工程、等离子体、生物学等领域相继发现了孤立子的存在。而且在数学领域,逆散射方法的提出与推广,也为求解孤立子演化方程提供了有力的数学工具。1972 年夏天在美国召开了一次时间长达 3 周半的孤立子学术讨论会,来自数学、力学、物理学、电气工程、生物学、地质、地球物理等十多个学科的学者聚集在一起,交流对孤立子研究的进展和经验。

由下面的几个例子可看出孤立子研究及其应用的新进展:

在超导研究方面,约瑟夫逊(Brian D. Josephson)效应中的磁通量子实际上就是孤立子,于是将孤立子的研究方法引入进来,现已促进在研发耗能特别小、速度特别快的新型计算机器件上有新进展。

在生物学方面,发现了达维多夫(Davydov A. S.)孤立子,探讨了生物体蛋白质中孤立子的传播问题,为弄清肌肉收缩的机制提供了有力的途径。

孤立子在高科技方面最具代表性的成功应用,是光纤中的光孤立子(亦称光孤子)。它具有长距离传输损耗小、无需中继站、比特率(单位时间传输的信息量)高等优点。联合国教科文组织、国际原子能机构和国际理论物理中心,于 1995 年 2 月在意大利联合召开了“光纤中超速传输系统”会议,其内容主要是讨论光纤中的孤立子问题。现普遍认为,光纤孤

立子通信有希望成为超高速率和超长距离通信的重要手段。

5 结语：170 年历史的启示

从 1834 年流体运动中孤立波的发现,至今正好已有 170 年的历史。60 年的争论、60 年的沉寂,当今在多学科、多领域的重要应用,充分说明了力学基础研究的重要性。力学中基本规律的发现与研究,有极其深刻的意义。

以史为鉴,由这段 170 年的历史不难看出:那种用急功近利的眼光,来看待力学基础的研究和教学,显然是违背科学史和短视有害的。

参考文献

- [1] 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
- [2] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 章克本. 流体力学(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2000
- [3] 黄景宁, 徐济仲, 熊吟涛. 孤子: 概念、原理和应用. 北京: 高等教育出版社, 2004

船舶结构力学在中国开始传播记述

郭日修

(海军工程大学船舶与海洋工程系, 武汉 430033)

摘 要 本文先简述船舶结构力学的建立和发展。由此转入本文主题: 记述 20 世纪 50 年代船舶结构力学这一学科在中国开始传播的史实。

1 船舶结构力学的建立和发展

19 世纪 80 年代, 钢材代替木材成为主要的造船材料, 船体结构的重量在船舶排水量中占的比例增大, 加之钢材的采用使各种船舶的主尺度逐渐增大, 在这种形势下, 要求合理决定船体主要构件的尺寸, 尽可能降低船体结构自身的重量, 成为船舶建造、使用中迫切需要解决的问题。对于民用船舶, 各海运国家的船舶检验机构制定各自的船舶规范, 规定不同大小的各种民用船舶的主要构件尺寸的最低标准, 这些船舶规范都是在各种民用船舶建造和使用中积累的经验的基礎上制定的。军用船舶则没有这类规范。为了合理地决定军用船舶主要构件的尺寸, 减轻船体结构的重量, 需要有新的理论和方法, 通过计算来决定船体主要构件的尺寸, 类似当时已有的桥梁结构力学(或称为结构理论)。经过多年的努力, 20 世纪初, 俄国学者布勃诺夫(И. Г. Бубнов)在军舰设计的实践中, 合理地解决了有关船体强度计算的基本问题, 包括: 计及船体柔性构件屈曲的船体总纵强度的计算方法, 船体局部结构强度的计算方法及其应力与船体总纵弯曲应力的相互联系, 船体结构强度校核的许用应力, 以及船体强度计算所依据的载荷等问题^[1]。1909 年布勃诺夫首次在彼得堡工业大学开设“船舶结构力学”课程, 1912、1914 年布勃诺夫的两卷本专著《船舶结构力学》出版^[1], 标志着船舶结构力学这一新兴学科的建立。

此后, 由于前苏联造船学界的继续努力, 到 20 世纪 40 年代, 船舶结

构力学取得了巨大的进展,一系列堪称巨著的船舶结构力学专著在 40 年代出版^{[2]~[6]},可谓集当时“船舶结构力学”之大成。20 世纪 40 年代,前苏联高等学校造船专业普遍将“船舶结构力学”作为主要专业课纳入教学计划,在五年制教育计划中,该课程约占 400 学时,是延续几个学期、包括多门课程的大课程。该课程包括基础理论和专门问题两部分,基础理论部分包括“弹性理论”、“杆与杆系的弯曲和稳定性”、“板与圆柱壳的弯曲和稳定性”等课程,专门问题包括“水面船舶结构力学”、“潜艇结构力学”、“船舶振动”等课程,并出版了多种船舶结构力学教材。

旧中国造船工业比较薄弱,造船技术也比较落后,国内仅两三所高校设有造船系,以民用船舶制造为专业,沿用英美学制(四年制)、课程和教材,“船舶结构”讲规范设计,设有船舶结构力学计算的内容。旧中国和前苏联没有学术上的交流,对俄罗斯和前苏联从 20 世纪初到 40 年代在船舶结构力学领域的进展和成就是不了解的。

2 船舶结构力学在中国的传播

1949 年 11 月大连海军学校成立。1951 年初,大连海军学校第二分校(海军工程大学前身)组建造船系,这是新中国设置的第一个以军舰设计制造为专业的造船系。参照当时苏联相应高校造船专业的教学计划,大连海军学校第二分校在造船系教学计划中设置了“舰船结构力学”课程,并在造船系组建了“舰船结构力学”学科组(后改称教研室),承担“舰船结构力学”课程的教学任务。学科组成员有郭日修(学科组组长)、王裕玮、史习赓。由于大连海军学校的军校性质,把“船舶结构力学”课程定名为“舰船结构力学”,以凸显军用舰船为课程对象。建校之初,学科组对“舰船结构力学”的内容不了解,国内没有其他高校设置这门课程,也没有可供使用的教材,因此,学校聘请前苏联专家来校指导这门课程的教学,学科组在专家指导下积极展开工作。

学科组和专家首先研究确定在“舰船结构力学”这门大课程下设置“杆与杆系的弯曲”、“板的弯曲和结构稳定性”、“水面舰船结构力学”、“潜艇结构力学”、“舰船振动”五门课,共 273 学时,分在四个学期连续讲授。当时的学制是四年,前苏联的学制是五年,所以我们开设的“舰船结构力

学”课程和前苏联高校开设的有差别：由于学制短、教学时数少，我们不开设“弹性力学”课程，但加强材料力学课；上述五门课的内容和时数较前苏联高校相应课的内容和时数少一些，但保留了该课程的基本的、主要的内容。

专家从 1951 年春到 1952 年秋陆续为学科组编写了《杆和杆系的弯曲》、《板的弯曲和结构稳定性》、《水面舰船结构力学》、《潜艇结构力学》、《舰船振动》共五卷“舰船结构力学”教材，学科组一面组织人力翻译这些教材，一面对它们展开学习、讨论，并提出问题向专家质疑、请教。教材翻译、校阅后，大连海军学校印刷出版。由于 1951 年 9 月“舰船结构力学”要开始上课，教材从翻译、校阅到出版，时间很紧促，所以当时教材用油印出版，以应教学急需。这是我国翻译、出版的第一部“舰船结构力学”教材，共五卷。到 1953 年初，这五卷教材全部出版。

在翻译教材过程中，学科组遇到的一个很大的困难是俄文名词的中译问题。当时，中国没有统一的船舶工程名词，而“船舶结构力学”在当时是一门引进的新的学科，其中有很多新的名词，而且是俄文名词，它们没有现成的中文译名。针对这种情况，学科组先将俄文名词的英译名词找出来，然后看这个英译名词有无中译名词。因为，在旧中国，英文的船舶工程技术文献译成中文还是不少的，有些英文名词虽无规定的、统一的中译名词，但是有习惯使用的中译名词。这样处理，解决了很多俄文名词的中译问题。但有的俄文名词的中译，按这条路也走不通，便只能根据名词的俄文原意，学科组来定中译名词。

给学员第一次讲授“舰船结构力学”课程是从 1951 年 9 月开始的，五门课程安排在四个学期讲授，其中四门课程由郭日修讲授，“潜艇结构力学”由王裕玮讲授。第一次学习这门课程的学员是大连海军学校第二分校造船系第一期学员，他们都是 1950 年抗美援朝参军的大学生，分配来海军学校造船系学习。他们都曾在地方大学造船系学习了两年，个别的曾学习了三年，因此他们到大连海军学校后，继续学习造船系三、四年级课程。他们有很好的数学和力学基础，对学习“舰船结构力学”这样一门新课程饶有兴趣，学习很投入。任教的教师讲授这样一门新课程也很认真，力求讲好。学员提出的一些问题，促使老师对课程内容深入思考，师生互动，教学相长，使这门课程的教学进展顺利。

从1951年9月到1953年6月的四个学期中,学科组相继完成了“舰船结构力学”这样一门大课程的五门课的教学。这一过程,使学科组成员对“舰船结构力学”有更深入的理解、掌握。在总结这两年的教学工作中,学科组感到1951年夏到1953年初翻译、印刷的“舰船结构力学”教材,限于学科组当时对课程内容理解的水平和翻译时间的仓促,教材的翻译质量不尽如人意;油印出版的教材也不能适应以后教学的需要。因此,学科组从1953年冬开始,根据专家编写的《舰船结构力学》教材的俄文原稿,重新校阅、修改翻译稿,力求准确地表达原意。有些俄文名词的中译也作了必要的修改。校阅、修改后的《舰船结构力学》译本,由第二海军学校正式出版(铅印)。每卷书末都附有“俄中名词对照表”,便于读者查阅,同时,也是为了广泛听取读者对俄文名词中译的意见。从1954年6月第一卷《杆与杆系的弯曲》出版到1956年12月第五卷《舰船振动》出版,《舰船结构力学》教材五卷全部正式出版。

“舰船结构力学”课程虽然在课堂上讲授完了,但舰船结构力学的理论和方法如何应用于船体结构设计和强度计算,当时还没有实践机会。1955年9月至1956年5月,第二海军学校造船系组织几名教师在专家指导下进行毕业设计,设计内容按五年制学制的要求,还稍扩大一点,为指导学员毕业设计作师资的准备。这是我国船舶设计制造专业进行的第一次毕业设计。在这次毕业设计中,学科组帮助设计者应用舰船结构力学理论和方法,对所设计的舰艇进行船体结构设计和强度校核。这是船舶结构力学理论应用于船体结构设计的一次有益的尝试。当时,前苏联转让的几型舰艇的技术资料也到了国内^[7],通过阅读其中关于船体结构强度计算的技术文件,对比我们应用舰船结构力学理论和方法于舰船结构设计和强度计算的尝试,使我们对舰船结构力学理论和方法的应用,有较深入的掌握。

1955年军事工程学院海军系建立舰艇设计制造专业,1959年上海交大、华中工学院、大连工学院、华南工学院等高校造船系都设置军用船舶设计制造专业,在他们的教学计划中都设置“船舶结构力学”课程,并安排毕业设计。第二海军学校将所出版的舰船结构力学教材和毕业设计资料复制件提供给这些兄弟高校,供他们讲授“船舶结构力学”课程和指导学员毕业设计作参考。

为支援兄弟高校讲授“船舶结构力学”课程,第二海军学校向他们输送了师资,或为他们培训了师资。如史习赓、许辑平于1954年和1956年先后从第二海军学校调往军事工程学院船舶结构力学教研室;华中工学院、大连工学院、华南工学院曾于1958—1961年间派教师或教师小组到第二海军学校造船系学习“船舶结构力学”课程,如骆东平、曾广武、王云龙、姚蕴芳(女)等多人,他们回去后都成为各自学校船舶结构力学的骨干教师,并在专业上都取得了成就。

尤其令人高兴的是,在新中国第一批学习“舰船结构力学”的学员中,很多人后来都成为我国造船工程领域知名的领导干部、专家、学者,如郑明、邓三瑞、施国庆、陈冠茂、武杰、范尚雍等,他们为我国的造船事业的发展作出了重要的贡献。

参考文献

- [1] 第二海军学校舰船结构力学学科组. 舰船结构力学(卷 I ~ V). 大连: 第二海军学校, 1954. 6~1956. 12
- [2] 巴布柯维契. 弹性理论. 1939(俄文)
- [3] 巴布柯维契. 船舶结构力学, 第 I 部、卷 I、卷 II, 第 II 部. 1941, 1945, 1947(俄文)
- [4] 西曼斯基. 潜艇结构力学, 1948(俄文)
- [5] 西曼斯基. 船舶结构动力计算, 1948(俄文)
- [6] 西曼斯基. 在坞内及下水时船体强度计算. 1946(俄文)
- [7] 当代中国丛书. 当代中国船舶工业. 北京: 当代中国出版社, 1992

20 世纪上半叶中国学者 流体力学研究工作概述

冉 政

(上海大学,上海市应用数学和力学研究所,上海 200072)

摘 要 流体力学研究在中国的兴起并没有太长的历史。20 世纪上半叶以周培源、钱学森、郭永怀院士为代表的第一代流体力学中国学者在流体力学的诸多研究方向上取得了国际性的学术贡献,本文主要罗列部分研究工作以及相关历史性文献。

关键词 流体力学研究,中国学者,学术贡献

1 流体力学研究在中国的兴起

流体力学研究在中国的兴起并没有太长的历史。据周培源与王竹溪先生考证^[1]:国内最早的工作是 1933 年王竹溪^[2]有关湍流的一项研究,1933 年,王竹溪从清华大学毕业后,在物理系做周培源的研究生,在短短的时间内,他就出色地完成了一项流体力学的湍流理论研究工作,并把结果写成了一篇学术论文,于 1934 年在《清华科学报告》上发表。目前还可以找到的是 1933 年有关张国藩先生^[3]在美国 Cornell 大学的硕士论文,这也是早期与流体力学研究有关的中国学者文献之一。

当时的研究主要有两个重要的研究方向:不可压缩湍流和可压缩流动。因这两者在近代的航空事业上都有很重要的应用。清华大学物理研究所是当时中国湍流研究的中心,其毕业生差不多一半做湍流研究。周培源先生^[4]是 1938 年开始他的湍流理论研究的。后来,在西南联大物理系,有六位青年和他一同工作,在助教中有林家翘^[5]、胡宁^[6]、郭永怀,此外还有两名硕士研究生与一名大学生。1935 年在美国 Iowa 州立大学获哲学博士学位的张国藩^[7]先生的博士学位论文也与湍流研究有关。在此

期间,中国学者有关可压缩流动的研究工作大多是在国外完成的。较早的工作可追溯到钱学森^[8]1938 年与冯·卡门合作的一项有关可压缩边界层的研究。钱学森^[9]在美国加州理工学院的博士论文工作是在 1939 年 6 月结束的,论文为《高速气动力学问题的研究》等四篇。此后钱学森成为冯·卡门的助手,帮助他指导研究生的论文。1940 年,由于王助的推荐,钱学森成为成都航空研究所的通讯研究员,写了一篇题为《高速气流突变之测定》的专论(刊登在该所报告第二号上)。

2 中国学者的学术贡献

早期中国学者的研究工作是在国内发表的,特别是周培源先生及其学生的工作大多见于《中国物理学报》与《清华科学报告》(甲种)。在国外发表的散见于各种专门期刊,其中以美国应用数学季刊上发表的为多。在国外的留学生也有一部分做类似的工作。下面简述一些有代表性的工作。

张国藩^[10]: 终生从事湍流研究,他认为流体力学传统 Navier-Stokes 方程不能用于湍流,而必须先把湍流的物理机制搞清楚,按新的物理模型建立基本方程。为此他完成了下列工作: ① 类比分子运动论的方法,建立了湍流“温度”、“压强”和“熵”等新物理量,并将它们编入流体力学方程。后来他又发展了上述思想^[11],用量子统计方法求湍流能谱分布式; ② 论证了湍流运动是一种非牛顿流体运动,内部阻力应用幂数式表示,并依此建立了他自己的湍流运动方程式。

江仁寿^[12]: 在留英期间,在 Andrade 教授的指导下,采用一种新方法对液态金属钠和钾的粘滞性作了测量和研究。

周培源: 于 1938 年在西南联合大学时即开始进行不可压缩黏性流体的湍流理论研究,在国际上首先提出了湍流脉动方程,建立了具有独创意义的湍流理论。1945 年,周培源^[13]发表了《关于速度关联和湍流涨落方程的解》的论文,它在国际上至今仍有着影响,并被誉为“现代湍流模式理论的奠基性的工作”。湍流模式理论的奠基人周培源是我国湍流理论研究的领头人。周培源在国际上最早考虑脉动方程,并由这组方程导出二元和三元速度关联函数所满足的动力学方程,再引进必要的假设来建立

湍流理论。1940 年根据这一模型,他对若干流动问题做了具体计算,其结果与当时的实验符合得很好。1945 年,周培源在论文《关于速度关联和湍流涨落方程的解》中提出了两种求解湍流运动的方法:一种是把平均运动方程和关联函数所满足的方程逐级近似求解;另一种是将平均运动方程与脉动方程联立求解。由于这组方程的高度复杂性,在 20 世纪 40 年代,要联立求解是不可能的,但他的这种思路却为湍流研究者开辟了崭新的途径。

钱学森:1938 年,钱学森与冯·卡门合作进行的可压缩流动边界层研究^[14],揭示了即使一个运动的热体与外界冷空气在某一飞行马赫数时有相当的温度差,对物体的冷却仍逆变为加热。这是由于空气受压缩,温度升高和边界层传热率增加的结果。钱学森和冯·卡门给出了发生这种逆变的马赫数计算公式。他们当时在考虑此问题时,还只有理论上的兴趣,后来证明,这显然是一个实际问题。例如,垂直起飞火箭就与它有关。钱学森^[15]在 1939 年发表了关于可压缩流体二维亚声速流动的研究结果,冯·卡门在 1941 年发表了关于空气动力学中压缩效应的研究成果。他们对翼上的压缩作用,共同提出了一个更普遍一些的修正,不用扰动很小这一假设,而是基于经过他们修正的流动方程的另一种线性化,使它能应用于高速流动,特别是应用于计算作用在翼型上的诸力。卡门-钱学森方法^[16]能给出某一速度范围内的满意结果。钱学森与郭永怀^[17]合作,最早在跨声速流动问题中引入上下临界马赫数的概念。他们发现,对某一给定外形,在均匀的可压缩理想气体来流中,当来流马赫数达到一定值时,物体附近的最大流速达到局部声速,这时的来流马赫数即为下临界马赫数;当来流马赫数再高时,物体附近出现超声速流场,这时数学解仍然存在,但当来流马赫数再增加时,数学解突然不可能,即没有连续解,这就是上临界马赫数。所以真正有实际意义的是上临界马赫数,而不是以前大家所注意的下临界马赫数,这是一个重大发现。

郭永怀^[18]:1939 年,郭永怀以优异成绩考取了中英庚款留学生。经过一些波折,于翌年 9 月到加拿大多伦多大学,在应用数学系主任辛格指导下从事研究。他仅以半年时间就完成了《可压缩黏性流体在直管中的流动》的论文,并获得了硕士学位。他的出色工作受到导师辛格的赞赏。他着重对跨声速理论与黏性流动进行了深入的研究,先后发表了《可压缩

无旋亚声速和超声速混合型流动和上临界马赫数》(与钱学森合作)、《关于中等雷诺数下不可压缩黏性流体绕平板的流动》、《弱激波从沿平板的边界层的反射》等重要文章,解决了跨声速流动中的重大理论问题。与此同时,为了解决边界层的奇异性,他改进了庞加莱、莱特希尔的变形参数和变形坐标法,发展了奇异摄动理论。为此,钱学森于 1955 年在 *Advances in Applied Mechanics* 杂志上发表文章,将这一方法命名为 PLK 方法。值得一提的是,郭永怀在 50 年代初就注意到高超声速流动这一方向,研究了高超声速激波边界层干扰和离解效应。郭永怀因在空气动力学与应用数学中的研究成果而驰名世界。

王承书^[19]: 在美国时从事统计物理学和稀薄气体力学的研究,根据 Boltzmann 方程研究稀薄气体力学中的输运过程,声波在单元和多元气体中的传播和衰减,并发现了线性化的 Boltzmann 积分算符的本征函数及本征值,提出了被称为 WCU 方程(王-Uhlenbeck 方程)的多原子分子气体的修正 Boltzmann 方程。

卢鹤绂^[20]: 系统阐述了容变粘滞性的唯象理论。

胡宁^[21]: 1938 年在昆明毕业后留在西南联合大学物理系做助教,在周培源的指导下从事流体力学理论研究工作。

林家翘^[22]: 从 20 世纪 40 年代到 60 年代初,他主要从事流体力学理论方面的工作,涉及许多重要的课题: 高速空气动力学、湍流、流体运动稳定性理论、浅水波、边界层流动等,其中最重要,影响最大的是关于流体力学稳定性理论的工作。1944 年,林家翘对平行流稳定性的研究取得了突破性的进展。他首次运用渐近分析方法求出了完整的中性曲线,从而得出了临界雷诺数。他的理论结果被后来的实验和数值模拟所证实。他在流体力学的流动稳定性和湍流理论方面的工作带动了一代人在这一领域的研究探索。

李政道^[23]: 1950—1951 年讨论了湍流,通过将 Heisenberg 湍流模型与实验结果相比较,而计算了各向同性湍流的涡流黏性系数,证明了在二维空间中不存在湍流。其结果在气象学海洋学中有应用。

庄逢甘^[24]: 在美国期间,他就读于加州理工学院,在著名流体力学教授李普曼(L. W. Liepmann)指导下攻读航空工程和数学。1948 年 6 月获硕士学位,1950 年 6 月获博士学位,博士论文题目为“湍流统计理论”。同

年5月,他受聘为加州理工学院的研究学者。1941年,Kolmogorov提出了湍流的局部相似性理论,但他所使用的湍流特征长度和湍流特征速度都不是惟一的,从量纲分析入手,庄逢甘^[25]提出了两种不同的湍流特征长度和湍流特征速度,在假设湍流统计分布是定常的情况下,庄逢甘求得了一组新的湍流能量衰变与湍流尺度的扩散公式。庄逢甘在中国空气动力学发展方面有十分深刻的见地^[26],这些思想目前仍在指导中国的流体力学发展。

沈元^[27]: 1945年夏天,沈元的博士论文《高马赫数下绕圆柱的可压缩流动的理论探讨》通过了答辩,在伦敦大学接受了哲学博士学位。他的论文用速度图法证实了高亚声速流动下,圆柱体附近极限线的存在,从理论上和计算结果上证实了高亚声速流动下,圆柱体表面附近可出现正常流动的局部超声速区。它揭示出只有在气流马赫数增加到一定数值时,圆柱体表面某处流线才开始出现来回折转的尖点,这时正常流动才不复存在。这一研究结果表明:在绕物体(如机翼)的高亚声速流动中,若马赫数不超过某一定值,就可能保持无激波的、含有局部超声速区的跨声速流动。它针对当时高速飞行接近声速时产生激波的问题,从理论上探讨无激波跨声速绕流的可能性。第一次从理论计算上得出高亚声速绕圆柱体流动的流线图,得出速度分布,以及在某一临界马赫数以下,流动可以加速到超声速而不致发生激波的可能性。通过这方面的研究,可以掌握高速气流的规律,了解机体形状和产生激波阻力之间的关系,探索是否可能让飞机在无激波的情况下接近声速,从而为设计新型高速飞机奠定理论基础。这个成果,虽然带有近似性,但在沈元之前,还没有人从理论上算出来,因此是一项首创性的成果。根据这项研究成果写成的学位论文,获得答辩委员会的很高评价,被推荐在英国皇家航空研究院第9873号报告上发表。沈元本人被接纳为英国皇家航空学会副高级会员。

这项研究成果,在论文正式发表之前,就引起了国内外航空界的注意。1945年9月,当时已经享有盛誉的物理学家周培源到巴黎出席国际应用力学学术会议,特地从法国赶到英国,通过中国驻英使馆找到沈元,向他了解这项研究的情况。英国著名空气动力学家戈德斯廷(S. Goldstein)博士应邀到美国麻省理工学院(MIT)讲学,曾经介绍了沈元的这项成果。英国赖特希尔(M. J. Lighthill)教授(后来是皇家航空研究院的院

长)1947 年在英国最高的学术刊物《皇家学会会志》上发表的文章中也引述了沈元论文的结论。一直到 50 年代,英国著名学者豪沃思(L. Howarth)出版的两卷集著作《近代流体力学发展高速流动》一书中,还详细谈到沈元十几年前做的工作及成果。可以说,沈元的研究成果对当时航空科学在高亚声速领域内的发展,起到一定的推动作用。沈元取得哲学博士学位后,在英国又住了一年,主要是到以生产喷气发动机著称的罗伊斯·罗尔斯公司考察技术。

3 一些统计结果

到 20 世纪 70 年代,在流体力学最高学术杂志 *Annual Review of Fluid Mechanics* 上撰写与流体力学研究有关的专题文章的中国学者有:易家训、冯元桢、吴耀祖、沈申甫、梅强中。他们的学术论文细见表 1。这足以证明他们在流体力学学术界的地位。

表 1 *Annual Review of Fluid Mechanics* 上撰写专题文章的中国学者一览

作 者	论 文 题 目	年 份
易家训	Stratified flows	1969 年
冯元桢 Zweifach, B. W.	Microcirculation: Mechanics of blood flow in capillaries	1971 年
吴耀祖	Cavity and wake flows	1972 年
沈申甫	Finite-element methods in fluid mechanics	1977 年
梅强中	Numerical methods in water-wave diffraction and radiation	1978 年

易家训还主编过从 1971 年到 1977 年的具有重要影响的力学杂志^[28]: *Advances in Applied Mechanics*, 这是很高的学术荣誉。另外,钱学森先生^[8]1938 年的一篇论文,被 H. Schlichting^[28]列为流体力学 40 篇历史性文献之一。

众所周知,在流体力学界有几本有重要影响的专著,即

(1) H. Schlichting, 《边界层理论》;

- (2) L. Prandtl,《流体力学概论》;
- (3) R. Courant, K. O. Friedrichs,《超声速流与冲击波》;
- (4) A. S. Monin, A. M. Yaglom,《统计流体力学》;
- (5) von Dyke, M,《摄动法及其在流体力学中的应用》。

在这些著作中对第一代中国流体力学学者的工作都有所反映。说明了中国学者在流体力学研究领域的出色贡献。

由于以周培源、钱学森、郭永怀院士为代表的第一代流体力学中国学者的杰出研究工作,为中国赢得了国际声誉。其中大部分人均当选为院士,得到了学术界的认可。除林家翘在 1962 年当选为美国国家科学院院士外,还有一些在美华人当选为美国工程科学院院士(见表 2)。在 1955、1957、1980 年,中国科学院院士选举中均有流体力学学者当选(见表 2),成为中国流体力学研究的领袖人物。

表 2 美国工程科学院中的流体力学华人学者一览*

英 文 名	中文名	出生年份	出 生 地	供 职 单 位	入选年份
Cheng Hsien K	郑显基	1933	北京	南加州大学	1988
Shen, Shan-Fu	沈申甫	1921	吴兴	康奈尔大学	1985
Wu, Theodore Y	吴耀祖	1924	常州	加州理工学院	1982
Yih, Chia-Shun	易家训	1918	贵州	密西根大学	1980

注:资料来源:《华人科学家在世界上的学术地位》,见:杨振宁:《杨振宁文集——传记,演讲,随笔》,原载《科学》1996 年第 48 卷第 3 期。表中列出的是 1995 年 7 月的统计结果。

表 3 中国科学院院士中的流体力学华人学者一览

姓 名	入 选 年 月	专 长
周培源	1955	广义相对论,湍流理论
钱学森	1957	空气动力学,工程控制论
郭永怀	1957	空气动力学
林家翘	1994(外籍)	流动稳定性

续 表

姓 名	入 选 年 月	专 长
李政道	1994(外籍)	粒子物理,场论,统计物理,流体力学
沈 元	1980	空气动力学
胡 宁	1955	粒子物理,场论,统计物理,流体力学
王承书	1980	统计物理,稀薄气体力学
庄逢甘	1980	空气动力学,湍流,计算流体力学

4 人才培养

周培源先生创立了中国的湍流学派,他一直注重人才的培养,可谓桃李满天下的一代宗师。特别是他创立的北京大学湍流国家重点实验室,为中国湍流事业的发展起了决定性作用。比较著名的弟子有:王竹溪、胡宁、林家翘、蔡树棠、黄永念、李松年、陈十一、孟庆国等。

钱学森先生在美国指导的空气动力学博士生有罗时钧,他回国后,创办了中国科学技术大学近代力学系。指导的研究生有马兴孝,但已不是流体力学专业了。

郭永怀先生也一直关心中国流体力学的人才培养,他长期担任了中国科学技术大学化学系主任,还参与了清华大学力学班的建设,并担任了副班主任。指导了一批研究生,比较著名的弟子有:张涵信、俞鸿儒、李家春、戴世强等,其中已有三名学生当选中国科学院院士(张涵信、俞鸿儒、李家春)。

总之,在学术研究取得国际性研究成果的同时,老一辈流体力学家还为中国流体力学事业培养了一大批人才。

5 关于卡门-钱学森公式

1939年,29岁的钱学森^[15]发表了关于可压缩流体二维亚声速流动的

研究结果,完成了在二维无黏性定常亚声速流动中估算压缩性对物体表面压力系数影响的公式,即卡门-钱学森公式。这一公式被列为空气动力学领域的一项重大成果。1941年,钱学森和卡门^[29]发表了《关于空气动力学中压缩性效应的研究成果》一文,全面系统地阐述了卡门-钱学森公式。钱学森的这一成就最早被反映在1944年R. Courant, K. O. Friedrichs^[30]写的报告中,1952年,德国出版了著名的空气动力学家奥斯瓦梯许^[31]的《气体动力学》一书,这是当时可压缩流体空气动力学方面的一本权威性巨著。作者在书中专门设了一节“卡门-钱学森公式”,介绍了钱学森师生的早期成果,并引用和列举了钱学森在气体力学方面的重要文献9篇。这一年,还出版了流体力学创建人德国著名科学家普朗特的名著《流体力学概论》的英文版,该书首版是德文版,1942年出版。该书也列入了钱学森师生最早的研究成果。

同年,美国出版了夏皮罗(A. H. Shapiro)^[32]的《可压缩流的动力学与热力学·第一卷》。1954年出版了第二卷,作者在书中设了“卡门-钱学森压强修正公式”和“卡门-钱学森方法的推广”两节,对钱学森师生的成果做了总结介绍。1953年,英国出版了霍华斯(L. Howarth)^[33]主编、英国流体力学学者集体撰写的《流体动力学的新发展》一书,在该书第7章中设有“卡门-钱学森近似法”一节,对钱学森的这一著名成果做了详细阐述。

在前苏联,对钱学森的在空气动力学方面的科学成就也表示出了极大的尊重。别洛娃^[34]教授,在其气体动力学讲义中专门论述了钱学森的这一贡献。钱学森是当之无愧的空气动力学世界级领袖人物,他为中华民族在世界学术界赢得了巨大声誉。

有关可压缩修正问题,在前苏联和西方学术界中有不同的说法,在前苏联学者著的《苏联航空科技发展史》^[35]中,有这样的论述:C·A·赫里斯季安诺维奇利用了恰普雷金的线性偏微分方程,早在1940年就创立了一种理论,根据这一理论可以计算出在亚临界流速条件下空气的可压缩性对任何翼型的压力分布和气动特性的影响。后来,C·Γ·努任和Γ·Φ·布拉戈,以及美籍匈牙利力学家冯·卡门和中国的力学家钱学森都得出了相同的曲线。

这种由西方学者和当时的苏联学者相互独立地做出科学贡献的情况

可能与当时的政治环境有关,在其他科学领域也有类似情况。

后记

(1) 由于资料有限,本文没有反映出陆士嘉先生、林同骥先生、谈镐生先生,以及在美的一些华人学者,如易家训、吴耀祖等人的工作;

(2) 本文只罗列一些事情,有关评价可参见有关文献,但并不代表作者的观点。

参考文献

- [1] 周培源,王竹溪. 中国近三十年来之理论物理学. 科学,1950,(4)
- [2] C. C. Wang(王竹溪). Turbulent wake behind a body of revolution. The Science Reports of National Tsing Hua University, A2, 1934: 307 - 326
- [3] G. F. Djang(张国藩). A Physical view of the nature of molecular aggregation in liquids and of the mechanism of flow; [dissertation]. Cornell, 1933
- [4] P. Y. Zhou. On an extension of Reynolds' method of finding apparent stresses and the nature of turbulence. Chinese J. Phys. 1940, 4(1): 1 - 33
- [5] C. C. Lin(林家翘). Pressure flow of a turbulent fluid through a circular pipe. (unpublished)
Velocity and temperature distribution in turbulent jets. The Science Reports of National Tsing Hua University, 1941
- [6] N. Hu(胡宁). Velocity and temperature distributiona in turbulent wakes behind an infinite cylinder and behind a body of revolution. Chinese J. Phys. , 1941
The turbulent flow along a semi-infinite plate(unpublished)
- [7] G. F. Djang(张国藩), Falling of bodies in a stream and the effect of turbulence. 在 State University of Iowa 哲学博士学位论文, 1935
- [8] Th. von. Kármán and H. S. Tsien. Boundary layer in compressible fluids, Journal of the Aeronautical Sciences. 1938, 5: 227 - 232
- [9] H. S. Tsien. Problems in Motion of Compressible Fluids and Reaction Propulsion. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy, CIT, California, 1938
- [10] 张国藩. A kinetic theory of tuebulence. Chinese Jornal of Physics, 7 - 3, 1948, 176 - 191

- [11] 张国藩. 试用量子统计方法求湍流能谱分布式. 天津大学学报, 1962, 11: 1~16
一种湍流运动方程式. 天津大学学报, 1962, 12: 23~32
- [12] E. N. da C. Andrade and Y. S. Chiong(江仁寿). On the determination of viscosity by the oscillation of a vessel enclosing a fluid. Proc. Roy. Soc. , 1936, 48: 247 - 260
Y. S. Chiong(江仁寿), Viscosity of liquid sodium and potassium. Proc. Roy. Soc. , 1936, A, 157: 264 - 277
- [13] P. Y. Zhou. On velocity correlations and the equations of turbulent fluctuation, Quart. Appl. Math. , 1945, 3: 38 - 54
- [14] Th. von. Kármán and H. S. Tsien, Boundary layer in compressible fluids, Journal of the Aeronautical Sciences. 1938, 5: 227 - 232
- [15] H. S. Tsien. Two-dimensional subsonic flow of compressible fluids. Journal of the Aeronautical Sciences, 1939, 6: 399 - 407
- [16] 亚声速气流中空气的压缩性对翼型压强分布的修正公式。这个公式是 1941 年冯·卡门引用他的学生钱学森 1939 年发表的论文而提出的。经过大量的实验证实, 卡·钱公式相当准确, 在空气动力学计算中有着广泛的应用。这是以中国人名字命名的公式之一
- [17] H. S. Tsien and Y. H. Kuo. Two-dimensional irrotational mixed subsonic and supersonic flow of a compressible fluid and the upper critical mach number. NACA TN - 995, 1946. 1980 年, 钱学森在给中国空气动力学研究会成立大会发的贺信中再次提及此项工作, 他写道: 34 年前, 郭永怀同志和我对某些物体如圆柱体外的二维无粘无旋流提出了一个猜想, 即当来流马赫数达到一临界值时, 大于首次在场出现局部声速, 而又小于 1 时, 方程式的解不存在, 我们称为上临界马赫数, 而把首次出现声速的称为下临界马赫数。我们的猜想涉及到非线性偏微分方程的理论。我们当时, 我现在都无力解决。这个记录见: 王文华编著, 钱学森实录, 四川文艺出版社, 2001, 291
- [18] 郭永怀的有关文献可参见《郭永怀文集》(中文本), 科学出版社, 1982
- [19] C. S. Wang(王承书). The quantum theory of the second virial coefficient of the diatomic gas. Dissertation, Dr. , Michigan Univ. , Ann Arbor, 1944
C. S. Wang and G. E. Uhlenbeck. On the transport phenomena in rarefied gases. Studies in Statistical Mechanics, Vol. 5, 1970 (North-Holland Publishing Company, Amsterdam)
- [20] 卢鹤绂. 容变粘滞性之唯象理论. 中国物理学报, 1950, 7: 564

- 从声现象中研究容变粘滞性及压缩性. *J. Acous. Soc. Ame.*, 1951, 23: 12~15
 容变粘滞性与声之变速及吸收. *中国物理学报*, 1951, 8: 1
 可压缩流体之逸散函数. *中国物理学报*, 1951, 8: 143
- [21] 胡宁的有关文献可参阅[24]
- [22] C. C. Lin. On the stability of two-dimensional parallel flows. *Proceedings of the National Sciences*, 1944, 30: 316 - 324
 On the stability of two-dimensional parallel flows. *Quarterly of Applied Mathematics*,
 Part 1, General theory, 1945, 3: 117 - 142
 Part 2, Stability in an inviscid fluid, 1945, 3: 218 - 234
 Part 3, Stability in a viscous fluid, 1945, 3: 277 - 301
- [23] T. D. Lee. Note on the coefficient of eddy viscosity in isotropic turbulence. *Phys. Rev.* 1950, 77: 842
 Difference between turbulence in a two-dimensional fluid and in a three-dimensional fluid. *J. Ap. Phys.*, 1951, 22: 524
- [24] Chuang F. K(庄逢甘), Cole, J. D and Roshko, A. On the statistical theory of turbulence. Final Report. NACA Con. NAW5777, 1951
 Chuang F. K(庄逢甘). On the decay of turbulence, *Acta Scientis Sinics*, 1953, 2(3)
- [25] 周培源. 湍流理论的近代发展. *物理学报*, 1959, 13(3): 220~242
- [26] 毛国良等. 庄逢甘院士和航天空气动力学的发展. *空气动力学发展学术讨论会文集*, 北京空气动力学研究所, 1995, 北京
- [27] 沈元, 博士论文《高马赫数下绕圆柱的可压缩流动的理论探讨》, 伦敦大学, 1945
- [28] Schlichting, H. *Boundary Layer Thoery*, 7th Edition, McGraw-Hill Book Company, 1979, 参考书目
- [29] A method for predicting the compressibility burble. Technical Report No. 2, The Aeronautical Research Institute, Chentu, China, 1941
- [30] R. Courant, K. O. Friedrichs, *Supersonic flow and shock waves*. Springer-Verlag, 1976
- [31] Oswatitsch, K. *Gas Dynamics*. Academic Press, New York, 1956
- [32] Shapiro, A. H. *The dynamics and thermodynamics of compressible flow*. Vol. 1, Vol. 2., Ronald Press, New York, 1953 and 1954
- [33] Howarth, L, (ed): *Modern developments in fluid dynamics*. High Speed Flow. 2nd. Clarendon Pres, Oxford, 1956

- [34] A·B·别洛娃. 气体动力学讲义. 北京: 科学出版社, 1956
- [35] A·И·马卡列夫斯基等编, 叶学琼等译. 苏联航空科技发展史. 北京: 航空工业出版社, 1987 年, 第 318~319 页, 战后年代空气动力学的研究
- [36] 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
- [37] 戴念祖主编. 20 世纪中国物理学论文集粹. 湖南教育出版社, 1993
- [38] 周培源科学论文集. 中国科学技术出版社, 1992
- [39] 钱学森文集(1938—1956). 北京: 科学出版社, 1991
- [40] 中国科学技术协会编. 中国科学技术专家传. 北京: 科学出版社, 1989

从三足鼎立到力学十强

——中国力学教育发展 50 年回顾

王晓春

(四川大学应用力学系,成都 610065)

摘 要 2004 年教育部公布了力学一级学科院校排名,其中力学排在前 10 位的大学——清华大学、上海交通大学、北京航空航天大学、中国科学技术大学、北京大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学、天津大学、大连理工大学、西北工业大学——无一例外地为国内著名大学,而且其力学专业都是在 20 世纪 50 年代创办的(见表 1),如果从 1952 年北大创办我国第一个力学专业算起,距今已有 50 余年的历史了。本文述及以下四个论题:① 艰难曲折的 25 年(1955—1979)——形成三足鼎立之势;② 改革开放的 15 年(1980—1994)——在探索中前进;③ 继往开来的 10 年(1995—2004)——迎接新世纪的挑战;④ 开创创新时代的艰巨任务——建设力学科学大国的世纪梦想,据此回顾中国力学教育 50 年发展历程,并结合现状给出作者的评述。

关键词 高等学校,力学,教育,历史,现状

表 1 十大名校力学专业或力学系创建时间(以创建时间先后排序)

学 校 名 称	专 业 或 系	创建时间	创 建 人
北京大学	力学专业	1952	周培源、钱伟长、钱敏、吴林襄、叶开沅、陈耀松等
北京航空航天大学	空气动力学专业	1956	沈元、陆士嘉等
大连理工大学	工程力学系	1957	钱令希、唐立民等
西北工业大学	数理力学系	1957	胡沛泉等
清华大学	工程力学数学系	1958	张维、杜庆华、黄克智等

续 表

学 校 名 称	专 业 或 系	创建时间	创 建 人
上海交通大学	工程力学系	1958	罗祖道、何友声、董石麟等
中国科技大学	近代力学系	1958	钱学森、郑哲敏、朱兆祥等
哈尔滨工业大学	工程力学专业	1958	陶城、王铎等
西安交通大学	工程力学专业	1959	蒋咏秋、嵇醒、唐照千等
天津大学	应用力学专业	1959	严宗达等

1 艰难曲折的 25 年(1955—1979)——形成三足鼎立之势

20 世纪 50 年代中期,中国力学界迎来了一大批留美学者回国。著名力学家王仁于 1955 年 4 月回到祖国,8 月,到北京大学报到,被聘任为副教授,筹建固体力学教研室,后来又担任数学力学系副主任,主管力学专业工作。1955 年 10 月,留美著名科学家钱学森克服重重困难回国。同年回到祖国后来成为著名力学家的还有郑哲敏。1955 年 11 月,钱学森、钱伟长、朱兆祥等一起筹建中国科学院力学研究所。1956 年 1 月 5 日,力学所正式成立,钱学森任第一任所长。著名力学家、应用数学家郭永怀于 1956 年 11 月回到了阔别 16 年的祖国,并立即投身于祖国的建设事业。在周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀等著名力学家的共同倡导和组织下,中国应用与理论力学学会(中国力学学会的前身,至今沿用原英文译名)在 1957 年正式成立,钱学森被一致推举为第一任理事长,周培源、钱伟长任副理事长^[1]。力学所和力学学会的成立是中国力学界的大事,从此中国力学科学研究有了自己的专门机构,同时力学所也承担着培养力学高级人才的重任。在力学所建所初期,还在人力上支援了北大、清华。

从 1958 年开始,先期派往前苏联和东欧的留学人员陆续回国,他们被派往各地与国内同仁在一批高等学校开办力学专业(见表 2)。为了在国内尽快培养急需的力学人才,缓解高校力学师资紧缺的压力,钱学森、钱伟长、郭永怀、张维和杜庆华等共同建议在我国举办工程力学研究班。

从 1957 年春开始,由中国科学院力学研究所和清华大学共同负责,先后举办了三届,共培养了 290 余名学员^[2]。在首届清华力学班开出的课程有:钱伟长的应用数学、郭永怀的流体力学概论、杜庆华的弹性力学、李敏华的塑性力学、黄茂光的平板理论等。学员由高校教师、研究院所的科技人员和应届工科毕业生组成。在完成两年的近代力学理论培训和结合实际的专题研究工作之后,他们分赴各地,充实力学师资队伍,迅速成长为力学教学和科研骨干力量。北大、清华、力学研究所在培养人才的过程中,自身也在不断壮大,很快在中国力学界形成三足鼎立之势。至此,中国力学教学、科研队伍已初具规模。

表 2 20 世纪五六十年代创办力学专业或力学系的部分其他院校

学 校 名 称	专 业 或 系	创建时间	负 责 人
复旦大学	力学专业	1958	叶敬棠
同济大学	工程力学专业	1958	李国豪、徐次达、翁智远
华东水利学院	工程力学系	1958	徐芝纶、赵光恒
浙江大学	力学专业	1958	王仁东、谢贻权
山东工学院	工程力学专业	1959	刘先志
重庆大学	工程力学系	1959	杨绪灿
湖南大学	工程力学专业	1959	熊祝华
兰州大学	固体力学专业	1960	叶开沅
中国科技大学	爆炸力学专业	1963	钱学森、郑哲敏、朱兆祥

周培源、钱学森、钱伟长、郭永怀是我国近代力学事业的开拓者。我国高等学校力学专业的设置,近代力学的发展方向的把握,当时学科近期发展规划和远期奋斗目标的制定,无不凝聚着他们的智慧和心血。在这几位大师的组织领导下,经过短短的几年,就使我国力学学科的面貌大为改观,特别是近代力学起步有很高的基准,在某些方面已接近于当时世界先进水平。本来,循此轨迹,中国力学事业应该能有更好的发展。可是,随着反右的开展,政治运动接踵而至,中国的力学事业遭受挫折,特别是

理科力学专业备受摧残,力学教育事业几乎陷于停顿。这里,就以著名力学家钱伟长为例,他的经历具有一定的代表性。

1957年,钱伟长因建议理工合校(后来的发展证明他的建议是正确的)及参加民盟会议等,而受到批判。1958年,他被错划为右派分子,除保留教授职务外,其余职务全部撤销,并长期受到不公正的批判。“文化大革命”期间,他深受冲击。1968—1971年间,被下放到北京特种钢厂炼钢车间劳动锻炼。1982年,中共中央改正了把钱伟长划为右派分子的错误决定^[1]。1983年,中央任命钱伟长为上海大学(原上海工业大学)校长。

1955—1980年正是国际理论和应用力学界充满活力的时期,20世纪力学许多分支学科,例如断裂力学、生物力学,都是在这一时期形成或取得重要进展的。2001年中国力学界评出的20世纪国际理论和应用力学十大进展,其中除了第4项和第5项以外,有八项都是在这期间取得的(见表3)。由于长达十余年的政治运动的干扰,中国力学家痛失良机,没能跟上国际力学发展的前进步伐。除了几位力学前辈1955年以前完成的工作外,中国人的名字与这些成就几乎无缘。虽然如此,中国力学事业仍然在曲折中艰难前进。到1965年,北京大学力学专业已经形成90多人高水平的师资队伍,组建了流体力学、固体力学与一般力学三个教研室。1979年3月24日正式成立北京大学力学系。

表3 2001年中国力学界评出的20世纪国际理论和应用力学十大进展^[3]

序 号	名 称	提出或形成年代	代 表 人 物
1	有限元方法	1960	J. H. Argyris, R. W. Clough, O. C. Zienkiewicz, 冯康
2	断裂力学	1921, 1956, 1968	Griffith, Irwin, Rice
3	生物力学	1969, 1983	Y. C. Fung
4	稳定性、分岔和混沌理论	1886, 1892	Poincaré, Lyapunov
5	边界层理论	1904	L. Prandtl
6	塑性力学和位错理论	1923, 1951, 1961	Taylor, Drucker, Iliushin
7	湍流统计理论	1921—1962	G. I. Taylor, von Kármán Kolmogorov, 周培源

续 表

序 号	名 称	提出或形成年代	代 表 人 物
8	奇异摄动理论	1948—1953	郭永怀, 钱伟长, 林家翘
9	力学的公理化体系	1950—1975	J. G. Oldroyd, W. Noll, A. C. Eringen
10	克服声障、热障的力学理论	1940—1953	钱学森, 郭永怀

1956—1957 年, 根据我国 12 年科学规划的要求, 北航在国内率先设立空气动力学等专业。1977 年全国恢复高等学校统一招生, 1978 年又恢复研究生招生。1978 年北航按 6 大类 21 个专业组织本科生招生, 其中航空工程数学力学类含空气动力学和飞行力学、航空结构力学与强度两个专业。

1958 年 7 月 3 日, 1957—1958 年度清华大学第七次校务行政扩大会议决议, 成立工程力学数学系。设立以流体力学、固体力学和计算数学为研究方向的三个专业。从 1969 年起先后将计算数学专业调整到计算机科学与技术系和应用数学系; 一般力学专业调整到精密仪器系, 工程力学数学系改名为工程力学系。到 1978 年, 一般力学专业又调回工程力学系。

1977 年以来国内又有一批高校力学专业独立建系或成立力学研究所, 见表 4。

表 4 20 世纪七八十年代力学专业新建系、所或独立建系的部分院校

学 校 名 称	系、 所	成立时间	负 责 人
南京航空学院	空气动力学系	1977	戴昌晖
太原工学院	工程力学系	1978	杨桂通
浙江大学	力学系	1978	王仁东、谢贻权
北京大学	力学系	1979	周光炯

续 表

学 校 名 称	系、 所	成立时间	负 责 人
华中工学院	力学系	1979	李 灏
北京航空学院	固体力学研究所	1980	高镇同
天津大学	力学系	1983	周 恒
复旦大学	应用力学系	1984	叶敬棠
上海工业大学	应用数学和力学研究所	1984	钱伟长
中山大学	力学系	1984	孙明光
北京工业学院	应用力学系	1985	薛大为
兰州大学	力学系	1986	叶开沅

今天看来,中国力学事业与共和国一起走过了一段艰难曲折之路,正如中国科学院院长路甬祥所说的那样,“艰难曲折的六七十年代成为开拓者们值得回忆的英勇的时代”^[4]。

2 改革开放的 15 年(1980—1994)——在探索中前进

这一时期是我国高等教育在恢复和探索中前进的阶段。改革开放的社会环境为中国力学事业的发展提供了历史性机遇。随着高考制度的恢复,高校教师尤其是基础课教师包括力学教师严重缺乏,为了充实力学师资队伍,许多高校开办了力学师资班并恢复招收培养研究生。同时为了尽快提高教师的业务水平,缩小与国际学术界的差距,从 1980 年开始,北大、清华等一批高校连续派出一大批教师出国进修。他们回国后,带来了新的思想与方法,并成为各个研究方向的骨干和学术带头人。随后,重点高校的力学学科和中科院力学研究所开始设立博士点招收博士生,加快了力学人才的培养。1981 年国家教委批准的首批力学博士点单位有北大、清华、上海交大、北航、兰大、大工、哈工大、浙大、西南交大、中国科大、天大、同济、南航、国防科大等高校以及中科院力学所等科研单位。

随着研究生培养质量的提高和招生规模的扩大,国内一些著名大学先后建立研究生院。1984年,清华在国内高校中率先成立研究生院,其中固体力学为国家重点学科。1982年,哈工大航天科学与力学系开始招收博士研究生。1984年,哈工大再一次被列为全国重点建设的15所院校之一。同年,成为全国首批试办研究生院的22所院校之一。北航的流体力学学科是国内同类专业中设置最早的,也是首批国家教委批准有权授予博士学位(1981年)和设立博士后流动站(1983年)的学科。

随着市场经济体制的确立和国门进一步打开,国际学术交往日益增多。20世纪80年代中期,国内高校出现了改革开放以来的第一轮留学热潮,以致影响到了北大、清华等一批高校的研究生招生。尤其是到了90年代初期,这些高校的教育主管部门感叹一流的学生大多流失到国外,国内的研究生院很难招收到优秀的本科毕业生。其实,对于中国力学事业来说,这只是问题的一方面和暂时的困难。由于受市场经济的冲击和教育科研经费投入严重不足,造成基础科学人才流失,影响到青年力学教师队伍的稳定,对于本来就已经青黄不接的力学教育科研队伍,更加大了人才的缺口。这就迫使力学界反思:力学的作用和地位到底是什么?力学该如何发展?

早在1978年8月,中国科学院力学研究所牵头召开了全国力学规划会议。大会通过了“1978—1985年全国基础科学发展规划——理论和应用力学”。“规划”明确了“力学是许多工程技术和自然科学学科的基础”,强调了力学的新变化以及交叉学科的发展。这些精神指引了我国力学发展的正确方向。

1994年4月,原四川大学与成都科技大学强强联合,在全国率先掀起了理工并校、组建新型多科性综合大学的风暴。这在全国起到了示范带头作用。同年5月,在著名力学家钱伟长校长的领导下,新上海大学组建成立。不久,许多兄弟院校纷纷效仿,一批新型多科性综合大学如雨后春笋般出现在祖国的大地上。我国的力学学科与其他基础学科一样,在经历了经费短缺和人才流失的困难以后,开始走出困境。新一代力学工作者成长起来了,他们肩负着承上启下的历史重任,正沿着前辈们指引的道路开拓前进。

3 继往开来的 10 年(1995—2004)——迎接新世纪的挑战

1995 年以来,“力学界的专家学者们根据国家实施科教兴国战略的需要,反复研讨了在下世纪初国家经济、科技、社会发展中力学的战略地位和发展策略,认为力学是促成经济建设真正转到依靠科技进步和提高劳动者素质的轨道上来的强大科学和技术武器,并精选出了对国家有迫切需要、又有长远影响的九个关键性力学问题”^[5]。这些研讨活动,先后形成了若干个指导性文件,同时指出了力学发展面临的困难和问题,其中的两个突出问题是:“一个是科研队伍的中空现象,很多科研骨干已向技术开发转移,重要的课题组解散或不配套;另一个是后继乏人,现在的高材生不愿学力学,他们奔外语、生物、经济去了,不少工学院教常微分方程只是一带而过,而且多数不讲授偏微分方程,使弹性力学、流体力学等课程无法讲授,相当多的研究生热衷于学外语和计算机课,认为学数学和力学吃力不讨好”^[6]。今天看来,10 年前提出的问题并没有完全解决,同时力学教育面临新的挑战。

近几年我国高等教育的招生和在校生规模持续快速增加。据来自教育部的统计,2003 年全国各类高等教育总规模达到 1 900 多万人,普通高校在校生达到 1 108.56 万人,是 1995 年的 5 倍多。开办力学专业的高等学校从最初的几所增加到现在的八九十所。与此同时,随着 20 世纪三四十年代出生的老一辈力学家的陆续退休和五六十年代出生的力学家的缺乏,力学教学科研队伍的人才短缺和青黄不接开始变得日益严峻。10 年前,中国力学学会就已经预测到今天可能出现的情况^[7],虽然没有出现维持不下去的局面,但形势却也不容乐观。

如果以在两院院士名录中的力学家当选时的年龄结构来分析,可以看出力学人才的缺口和年龄断层。据不完全统计,中国科学院 1955 年的首批院士中的力学家当选年龄大多在 40 岁左右,最大的是周培源,53 岁;最小的是钱令希,39 岁;其余按年龄大小排列,依次是黄文熙 46 岁、钱伟长 43 岁、李国豪 42 岁、张维 42 岁。这应该是当选院士的最佳年龄:太大,工作不了几年就要退休;太小,可能水平还够不上。

遗憾的是,1980 年新增院士中的力学家当选年龄已上升到 60 岁左

右,除了胡海昌 53 岁、庄逢甘 55 岁和郑哲敏 56 岁以外,其余的均在 60 岁以上,他们是徐芝纶 69 岁、沈元 64 岁、谈镐生 64 岁、林同驥 62 岁、王仁 60 岁,与 1955 年相比,最大的相差 16 岁,最小的相差 14 岁,这种状况一直持续到 20 世纪末,40 岁左右的力学院士始终没有出现。如今,这些院士(包括 1999 年当选的力学院士)当中年龄最小的也已 60 多岁。如果按 65 岁年龄退休计算,那么现在一线的已所剩无几了。

历史翻开新的一页,进入 21 世纪,情况终于有了变化,随着 2001 年著名分形岩石力学家谢和平当选中国工程院院士,使我们在两院院士名录中看到了多年未见到的 45 岁力学家的身影。2003 年又有两位当选院士的力学家年龄在 50 岁以下,他们是清华的杨卫 49 岁和哈工大的欧进萍 44 岁。这是一个可喜的变化。但是,高水平的中年力学家无论在数量上还是在国内外影响上都仍未达到上个世纪 50 年代的水平。中年力学工作者任重道远,他们肩负着承上启下、开创新时代的历史使命。

4 开创新时代的艰巨任务——建设力学科学大国的世纪梦想

从 2004 年教育部公布的力学一级学科院校排名来看,清华大学以其工科力学的绝对优势排名第一,而排在第二、第三的也是工科力量很强的上海交大和北航,北京大学排在了第五,上个世纪 50 年代后期形成的三足鼎立之势已不复存在。取而代之的是工科力量很强的院校占据了大半江山,且在招生院校数量和生源数量上大大超过传统理科院校,进入力学 10 强的理科名校也只有 2 所。据不完全统计,2004 年招收工科力学的院校有 60 多所,而招收理科力学的院校只有 10 多所。同时,理科力学出现了严重的人才短缺:一方面原有队伍老龄化,一方面后继乏人,招不到优秀的学生。如果说,开办我国第一个力学专业的北京大学在力学界的地位下降还不算十分明显的话,那么,地处西北的兰州大学就没有那么幸运了。

据兰州大学网页介绍,“1995 年,美国《科学》周刊评出了中国 13 所最杰出的大学,兰州大学位居第六”。曾几何时,兰州大学的理科力学专业在全国也很有名,先后培养出了院士 1 名,担任校长级领导职务的力学家 3 名,首届“中国青年科技奖”获得者 1 名,国家杰出青年科学基金获得者

2 名,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授 1 名。在 20 世纪八九十年代达到鼎盛时期的兰大力学专业,其实力的衰退十分惊人,2004 年教育部公布的普通高等学校综合实力排名,兰州大学掉到了 30 名以后,这与其 10 年前位居中国高校第六的地位形成强烈的反差,从一个侧面反映了兰州大学整体学术地位的下降和地处西北、面对“孔雀东南飞”的无奈。这正如兰州大学副校长郑晓静在 2005 年 6 月 1 日在四川大学举行的“中美公立研究型大学校长研讨会”各代表团分组讨论会上所说的那样:如何挽留人才是我们学校所面对的最重要也是最让人头疼的问题,很多优秀教师流向了东部发达地区,因为那里的收入相对较高。兰州大学今日理科力学专业和整个学校的困境具有一定的代表性。

当今高校之间的激烈竞争和学科间的竞争,无不是资源和人才的竞争。力学学科要发展,靠什么?靠人才,靠后继有人,靠优势资源配置。以清华为代表的一大批院校所办工科力学专业的崛起和以北大为代表的传统名校所办理科力学专业的衰退,固然有其学科发展的自身逻辑,但是,依笔者看来,还有以下一些深层次的原因。

(1) 力学界和高等学校事实上存在的理论学派和应用学派的对立;

(2) 我国学界和决策部门在学科规划和实施过程中存在的基础科学与应用科学之争;

(3) 科学与技术这两个概念在国人心中长期混淆,以致影响到纯理科学科的发展^[8, 9];

(4) 对力学学科的双重地位认识不清,这可以从政府有关文件得到佐证。国务院学位委员会、原国家教委 1997 年颁布、现仍然在使用的《授予博士、硕士学位和培养研究生的学科、专业目录》里赫然将力学一级学科划归“工学门”,从而影响到国家对理科力学基础研究的资源配置和支持;

(5) 地域差别,直接影响学校与学校在竞争中的地位,造成人才流向发达地区;

(6) 名校效应,可以使北大这样的少数高校获得更多的人才和优势资源配置,但像兰州大学这样的既无地域优势又无人才优势的高校很难重振昔日的雄风;

(7) 校长效应,则是影响校际之间、学科之间竞争的重要因素。

表 5 所列高校大多是力学名校。从表 5 所给数据,我们还可以做一

些分析。这里清华与北大的关系很具有代表性。从 1952 年开始,我国近代力学事业的开拓者周培源先后任北京大学教务长、副校长、校长等职,为北大力学专业的创建和发展起了关键的作用,1982 年周培源离任。随后北大力学专业被后来居上的清华力学大大超越,部分原因恐怕是清华先有著名力学家钱伟长、张维任副校长,后有著名固体力学家余寿文任副校长,而北大 1982 年以后再没有力学家出任校长或副校长。再看 2004 年力学一级学科排名第二的上海交通大学,先有力学家、航空教育家范绪箕任校长,后来有著名流体力学家何友声任校党委书记,现在则有力学家叶取源、张圣坤、沈为平三位副校长,由此可见上海交大力学学科的地位非同一般。另外,由于著名力学家钱伟长从 1983 年出任上海大学校长至今,该校的力学学科成长很快,已跻身全国力学名校之列。像上海大学这样占尽地域优势和人才优势而蒸蒸日上的学校,与地处西北而艰难维持的兰州大学一样,在我国高校竞争和力学学科发展上同样具有典型代表意义。

表 5 部分高校与力学家担任校级领导的情况(学校按力学实力排序)

学 校 名 称	力 学 家	担 任 职 务	任 职 时 间
清华大学	钱伟长院士 张维院士 余寿文	副校长	1956—1958 1957—1983 1994—
上海交通大学	范绪箕 何友声院士 沈为平、叶取源 张圣坤	副校长、校长 校党委书记 副校长 副校长	1979—1984 1986—1992 1997—现在 1997—现在
北京航空航天大学 (北京航空学院)	沈元院士	院长	1980—1982
北京大学	周培源院士	教务长、副校长、 校长	1952—1981
哈尔滨工业大学	黄文虎院士 欧进萍院士	校长 副校长	1983—1985 现任
大连理工大学 (大连工学院)	钱令希院士 程耿东院士	副院长、院长 校长	1979—1985 1995—现在

续 表

学 校 名 称	力 学 家	担 任 职 务	任 职 时 间
天津大学	张国藩	副校长、校长	1952—1966
西北工业大学	季文美 罗时均	校长 副校长	1982—1984 1978—1983
上海大学 (上海工业大学)	钱伟长院士 刘人怀院士 周哲玮、叶志明	校长 副校长 副校长	1983—现在 1986—1991 现任
国防科技大学	周鸣鹄	副校长	1978—1984
同济大学	李国豪院士 翁智远、徐植信 万钢	校长 副校长 校长	1977—1984 1978—1990, 1978— 2004—
重庆大学	杨绪灿	副校长	1978—1987
湖南大学	熊祝华	副校长	1983—1985
四川大学	谢和平院士	校长	2003—现在
兰州大学	郑晓静	副校长	现任
太原工业大学	杨桂通	校长	1983—1995
河海大学 (华东水利学院)	徐芝纶院士 姜弘道	副院长 校长	1956—1983 1993—2003. 3
南京航空航天大学 (南京航空学院)	范绪箕	副院长	1956—1979
宁波大学	朱兆祥	校长	1985—1988

经过 50 年艰难曲折的奋斗,中国力学专业教育从无到有,从起步维艰到发展壮大,为国家培养了大批的力学专门人才,为国家经济和国防建设做出了贡献。但是,我们应该看到,我国的力学专业教育和力学科研水平仍然参差不齐,与欧美发达国家相比,还有很大差距。从上文我们已经看到,50 年来中国力学界整体上缺少对国际理论和应用力学进展的原创性贡献,这不能不引起我们的深思。我们缺少的是基础性的、原创性的成果以及国家对基础研究工作持久的支持,从而影响到国家整体核心竞争

力的提高。要实现几代人一百年来的强国之梦,我们必须发展和壮大我国的基础科学和文化力量,尤其要发展和壮大理科力学基础研究队伍,从而带动基础科学和文化力量的全面增长,建设力学科学大国,迎来中华民族的伟大复兴。显然,这是一项长期的艰巨任务。

参考文献

- [1] 中国科学技术协会编. 中国科学技术专家传略·工程技术编. 北京: 中国科学技术出版社, 力学卷 1, 1993; 力学卷 2, 1997
- [2] 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
- [3] 20 世纪理论与应用力学十大进展. 力学进展, 2001, 31(3): 322~326
- [4] 路甬祥. 百年科学思想史考察. 光明日报, 2002-10-17
- [5] 白以龙, 周恒. 迎接新世纪挑战的力学——力学学科 21 世纪初发展战略的建议. 力学与实践, 1999(1): 6~9
- [6] 谈庆明. 也谈力学——基础和前沿. 力学与实践, 1995, 17(4): 4~5
- [7] 中国力学学会. 力学——迎接 21 世纪新的挑战. 力学与实践, 1995, 17(2): 1~18
- [8] 邹承鲁, 王志珍. 科学与技术不可合二为一. 科技日报, 2003-08-05
- [9] 陈磊. 科学论争: “高科技”有错吗? 科技日报, 2005-06-08

非牛顿流体力学简介及发展

丁 鹏 闫相祯

(中国石油大学(华东)研究生院, 东营 257061)

摘 要 非牛顿流体力学作为新兴边缘学科,在各工业领域应用广泛。本文简单介绍非牛顿流体力学及其在各行业的应用现状,回顾了非牛顿流体力学的发展史,重点论述非牛顿流体力学的研究内容、研究方法,并对非牛顿流体力学的未来发展作出展望。

关键词 非牛顿流体,力学,研究

回顾 20 世纪,流体力学经历了迅速的发展,到 20 世纪中叶形成和产生了一系列新兴的力学领域,如生物力学、多相流体力学、流变学和非牛顿流体力学等。其中,非牛顿流体力学因与人类生活密切相关而日益受到重视。

非牛顿流体力学是由流变学发展起来的研究非牛顿流体应力与应变关系以及非牛顿流体流动问题的学科。

流变学^[1]是在 20 世纪后半叶发展起来的,它是力学、化学与材料和工程科学之间的新兴边缘学科。流变学是研究材料流动与变形的科学。非牛顿流体的流变性质及其运动规律是非牛顿流体力学的基本内容,它又称为流体的流变学,同时也是现代流体力学的一个重要分支。非牛顿流体力学的研究已应用于各工业领域及自然现象分析,是化学、生物学、食品工程、石油工程、冶金工程、化学工程等当代科学发展中的前沿方向之一。

1 非牛顿流体力学发展简史

非牛顿流体力学的研究始于 1867 年英国物理学家 J·C·麦克斯韦

提出的线性粘弹性模型。麦克斯韦发现,材料可以是弹性的,又可以是黏性的。对于黏性材料,应力不能保持恒定,而是以某一速率减小到零,其速率取决于施加的起始应力值和材料的性质。这种现象称为应力松弛。许多学者还发现,应力虽然不变,材料棒却可随时间继续变形,这种性能就是蠕变或流动。

此后数十年间,非牛顿流体力学没有重大进展。直到第二次世界大战后,随着化纤、塑料、石油等工业的迅速发展以及应用数学、流体力学等学科的研究不断深化,形成了非牛顿力学的应用需求和理论基础。

1950年,J·G·奥尔德罗伊德提出建立非牛顿流体本构方程的基本原理,首先把线性粘弹性理论推广到非线性范围。此后,W·诺尔、J·L·埃里克森、R·S·里夫林、C·特鲁斯德尔等人对非线性粘弹性理论的发展也作出了贡献。1965年特鲁斯德尔和诺尔所著《力学的非线性场论》一书概括了当时有关非牛顿流体力学的主要成果;1975年荷兰科学家K·沃尔特斯等人创办了《非牛顿流体力学杂志》,经过数十年的发展,已经成为主要的国际性力学刊物。70年代后期相继出版了《非牛顿流体力学》、《聚合物加工》、《流变技术》等专著。1984年,荷兰的考特和戴维斯出版了关于非牛顿流体力学流动的数值计算专著^[2]。进入20世纪90年代,非牛顿流体力学的数值模拟方法逐渐受到重视,相继研究了非牛顿流体在垂直、倾斜及水平圆管和偏心环空中层流与紊流动,非牛顿流体在偏心环空中的紊动扩散理论,活动套管和井壁渗透对顶替效率的影响及注水泥模拟实验方法^[3],钻头表面流场模拟^[4],泥浆撞墙模拟^[5],污泥流动性及管道输送^[6]等。

2 非牛顿流体力学的研究内容

非牛顿流体是剪应力与剪切变形速率之间不满足线性关系的流体^[7]。自然界和工业界中存在着大量非牛顿流体,如建筑材料中的沥青、水泥浆;下水道中的污泥;食品工业中的奶油、蜂蜜和蛋白;大多数油类和润滑脂;高聚物熔体和溶液以及人体中的血液等。所以非牛顿流体力学的理论在化纤工业、塑料工业、石油工业、化学工业、轻工业、食品工业等许多部门有广泛的应用,它也涉及许多材料制品的加工和输送。非牛顿

流体力学的研究对这些工业的发展具有重大的现实意义。

钻井工程的发展,石油的开采和输送,要求人们了解非牛顿流体在环空中运动,非牛顿流体力学的进展,为研究和改善原油的流动性,提高原油管道输送的技术经济水平,以及对提高钻井速度、减小钻头磨损,奠定了理论基础^[3]。

城市污水和工业废水处理过程中排出的废弃物的流动与输送、河流泥沙运动、土建工程中水泥浆和砂浆的运动等,都涉及流体中带有固体颗粒的问题,这类问题是非牛顿流体力学研究的范围^[4]。

生物流变学研究人体或其他动植物中有关的非牛顿流体力学问题,例如血液在血管中的流动,心、肺、肾中的生理流体运动和植物中营养液的输送。

因此,非牛顿流体力学既包含自然科学的基础理论,又涉及工程技术科学方面的应用。并且在同其他各种工程技术以及同自然科学的其他学科的结合中,开拓了自己新的应用领域,已经发展成为一个独立的学科。

3 非牛顿流体力学的研究方法

目前,进行非牛顿流体力学的研究可以分为现场观测、实验室模拟、理论分析、数值计算四个方面。

现场观测是对自然界固有的流动现象或已有工程的全尺寸流动现象,利用各种仪器进行系统观测,从而总结出流体运动的规律,并借以预测流动现象的演变。

不过现场流动现象的发生往往不能控制,发生条件几乎不可能完全重复出现,影响到对流动现象和规律的研究;现场观测还要花费大量物力、财力和人力。因此,人们建立实验室,使这些现象能在可以控制的条件下出现,以便于观察和研究。

作为现代流体力学的一个重要分支,同物理学、化学等学科一样,非牛顿流体力学离不开实验,尤其是对新的流体运动现象的研究。实验能显示运动特点及其主要趋势,有助于形成概念,检验理论的正确性。非牛顿流体力学发展史中每一项重大进展都离不开实验。

模型实验在非牛顿流体力学中占有重要地位。这里所说的模型是指

根据理论指导,把研究对象的尺度改变(放大或缩小)以便能安排实验。有些流动现象难于靠理论计算解决,有的则不可能做原型实验(成本太高或规模太大)。这时,根据模型实验所得的数据可以用像换算单位制那样的简单算法求出原型的数据。

现场观测常常是对已有事物的观测,而实验室模拟却可以对还没有出现的事物、没有发生的现象(如待设计的工程、机械等)进行观察,使之得到改进。因此,实验室模拟是研究非牛顿流体力学的重要方法。

理论分析是根据非牛顿流体运动的普遍规律如质量守恒、动量守恒、能量守恒等,利用数学分析的手段,研究非牛顿流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。

在非牛顿流体力学理论分析中,本构方程或本构理论具有决定性意义,是该学科的理论基础。

本构方程,或物质或材料的流变状态方程,是在某些假设下,对物质或材料的力学行为的数学描述。众所周知的牛顿常粘度定理和胡克定理,是属于早期的特殊情形下流体和固体物质的本构方程。由于非牛顿流体种类繁多,本构方程的类型也是很多的。随着新型材料的出现,还将不断地建立新型的本构关系。

数学的发展,计算机的不断进步,以及各种计算方法的发明,使许多原来无法用理论分析求解的复杂非牛顿流体力学问题有了求得数值解的可能性,这又促进了非牛顿流体力学计算方法的发展,从而为非牛顿流体的数值模拟奠定了基础。

近年来,在石油化工行业和其他涉及非牛顿流体运动的课题中,经常采用电子计算机做数值模拟,这可以和物理实验相辅相成。数值模拟和实验模拟相互配合,使科学技术的研究和工程设计的速度加快,并节省开支。非牛顿流体流动的实验研究要比牛顿流体困难得多,因而数值模拟在非牛顿流体力学的研究中发展很快,其重要性与日俱增。

解决非牛顿流体力学问题时,现场观测、实验室模拟、理论分析和数值计算几方面是相辅相成的。实验需要理论指导,才能从分散的、表面上无联系的现象和实验数据中得出规律性的结论。反之,理论分析和数值计算也要依靠现场观测和实验室模拟给出物理图案或数据,以建立流动的力学模型和数学模式;最后,还须依靠实验来检验这些模型和模式的完

善程度。

4 非牛顿流体力学的展望

从麦克斯韦建立第一个非牛顿流体模型到现在的 140 年,特别是从 20 世纪 50 年代以来,非牛顿流体力学已发展成为基础科学体系的一部分,同时又在土建、建材、石油、化工、食品、生物学、医学等方面得到广泛应用。

今后,人们一方面将根据工程技术方面的需要进行非牛顿流体力学应用性的研究,另一方面将更深入地开展基础研究以探求非牛顿流体的复杂流动规律和机理。前者主要是指:数学方法和电子计算机的不断更新,将使非牛顿流体力学的应用领域进一步扩展。后者主要包括:通过湍流的理论和实验研究,了解其结构并建立计算模式;多相流动;流体和结构物的相互作用;生物学和环境流体流动等问题;有关各种实验设备和仪器等。

可以预见,非牛顿流体力学有着极其广阔的应用前景,对于人类生活和社会经济建设的各个方面有着不可忽视的作用。而化学工业、材料工程和其他工程科学在新世纪的发展,必将推动非牛顿流体力学进一步的大发展。

参考文献

- [1] 韩式方. 攀登新世纪自然科学发展高峰. 西南民族学院学报, 2001, (27)1
- [2] Crochet M J, Davies AR. Numerical Simulation of Non-Newtonian Flow. Science Publishers, The Netherlands, 1984
- [3] 郑永刚. 非牛顿流体流动理论及其在石油工程中的应用. 北京: 石油工业出版社, 1999
- [4] 崔桂香, 潘岩. PDC 钻头表面流场的数值模拟. 石油学报, 1994, (15)3
- [5] Yue Pengtao, Xu Shengli. Numerical investigation on two-dimensional cylindrical mud impacting walls and mud surfaces. Journal of China University of Science and Technology, 2001, (31)5
- [6] 沈仲棠. 非牛顿流体力学及其应用. 北京: 高等教育出版社, 1989
- [7] 陈文芳. 非牛顿流体力学. 北京: 科学出版社, 1984

流体力学在海洋科学中的发展史

包 芸 刘 欢

(广州中山大学近岸海洋中心, 广州 510275)

摘 要 本文列举历史事实, 简要回顾流体力学与海洋科学相结合的历史过程, 总结该领域的重要进展, 并对其发展前景做出展望和预测。

关键词 流体力学, 海洋科学, 发展史

1 引言

学科的形成发展从来都不是独立的, 而是各学科间相互结合、相互促进的结果, 流体力学也不例外。自从流体力学出现以来, 就被广泛地应用到各个领域中去, 与多门学科广泛地联系起来, 例如海洋、河流、航天航空、生物、环境科学等。在本文中, 我们选取海洋领域, 来回顾一下流体力学在海洋科学中的发展历史, 以及老一辈科学家的杰出贡献, 总结这一领域的重要进展, 并且展望未来的发展前景。

2 古代流体力学与海洋科学的初步结合

流体力学是力学的重要分支之一, 它像其他学科一样来自于生产实践, 所以古代的流体力学同人类的生产活动有紧密的关系。早在春秋战国时期, 《墨经》中就已经出现了关于浮体规律的探讨、曹冲称象以及怀丙打捞铁牛等事件。然而, 古代中国人的流体力学(或称水力学)主要是应用在修堤防、挖河道、筑堰坝上, 甚至战争双方使用水攻和防水攻, 却很少与海洋联系在一起。

直至 17 世纪, 经典流体力学开始形成, 流体力学才逐步应用到海洋科学中去。1687 年, 牛顿提出了引潮力理论, 同时论述了向心加速度。

1740 年,欧拉进一步提出了牛顿提出的力的水平分力作为引潮力是成立的。1738 年,提出了著名的伯努利定理。1752 年,达朗贝尔获得了连续性方程。1775 年,拉普拉斯将地转加速度的水平分量用于潮汐论。1835 年,法国的科里奥利(Gaspard Gustave de Coriolis)研究了自转地球上旋转坐标系的流体运动,论证了地球自转偏向力,因此这种偏向力被称为科氏力。1823 年、1845 年,纳维、斯托克斯分别导出了黏性流体运动的基本方程组,这就是著名的 N-S 方程。费雷尔(William Ferrel)于 1856 年最早叙述了地球自转对风海流的影响。以上种种理论成果的出现,表明了流体力学已经在海洋研究领域崭露头角。

3 近代流体力学与海洋科学的全面融合

19 世纪末开始,随着对流体力学认识的加深,关于海流的理论和研究方法也开始蓬勃发展起来。1870 年,克罗尔(James Croll)根据热传导作用计算了海流输送到两极的热流。1874 年,他又进一步指出,只靠直接的热力学过程是不能保持海洋循环的,风应力对于太阳热转换为海洋环流的中间过程起着十分重要的作用。1875 年,克罗尔坚决支持风海流论,认为密度差海流不足以说明与实际海流相对应的海面倾斜。1884 年,霍夫曼(P. Hoffmann)也赞成风成水平海流论,反对稳定的垂直海流说,认为由于摩擦的作用,表层流会引起深层弱流。

佐普里茨于 1878 年首先重视了水的粘滞性即内摩擦,并用数学表达式表示了海流,但由于没有考虑到地球自转力的影响,因此他的计算值与实际的观测值有差异。然而,他却认识到:由于黏性流体中的摩擦,使海面流逐渐传递到下层。挪威气象台长莫恩于 1876—1878 年参加了挪威海调查,归航后,他根据调查数据,于 1885 年假定在 300 英尺深度等压面为水平面,绘制了海面等高线地形图。同时,还假定沿倾斜海面而作用的重力分量与科氏力平衡,计算出表面海流,并绘制出海流图。虽说当时的海水密度是不准确的,但莫恩提出的原理和方法直至今天仍然是正确的,从这个角度讲,可以说莫恩是海流力学计算的先驱。在计算中,他忽略水层间的摩擦,并将与风海流引起的相对水位定义为“风海面”,将根据水温、盐度的垂直观测计算出的海面称为“密度海面”,这两种海面结合后的

海面称为“海流海面”。他的一系列论著为后人留下了宝贵的遗产。

1905 年,埃克曼发表了海洋力学方面的埃克曼风海流理论。埃克曼是皮叶克尼斯教授的学生。在埃克曼风海流理论发表以前,即 1898 年,皮叶克尼斯曾发表了著名的环流定理。它是将流体力学运用到海洋学领域的具有划时代意义的论文。



挪威的 V·F·皮叶克尼斯(Vilhelm Firma Bjerknes)教授,1862 年 3 月 14 日生于奥斯陆,1951 年 4 月 9 日去世。他的父亲 C·A·皮叶克尼斯是奥斯陆大学的数学教授,流体力学的权威。他的儿子

海洋力学计算环流定理的创始人
V·F·皮叶克尼斯教授

子 J·皮叶克尼斯是美国加利福尼亚大学的气象学教授。皮叶克尼斯一家三代都是学者,他于 1898 年撰写了《流体力学的基本定律及其应用——特别是在大气和世界海洋方面的应用》一书,在气象学和海洋学研究方面建立了“挪威学派”,发展了锋面理论等。

皮叶克尼斯和他的儿子于 1933 年合著了《物理流体力学》(德文)一书。他认为大气和海洋的密度同样受压力以外的因素的影响(海洋受海水温度、盐度的影响;大气则受湿度、温度的影响)而发生变化,是斜压场,而且二者都表现出巨大的湍流黏性。因此,这二者又都是正压场,它们是均匀而不压缩的理想气体,而从忽视摩擦的经典力学的定律来看是不相适应的。同时,他还查明了由于海洋中密度分布不均匀引起的水压梯度力、地球自转偏向力、摩擦力的平衡,建立了新学说,他的学生埃克曼建立了划时代的风海流理论,可以说这是海洋力学不朽的辉煌成果。

埃克曼的风海流理论,考虑到内部摩擦这一根本的重要因素。施密特把由于大气的不规则的涡动而进行质量交换的湍流叫做交换系数(die Austauschgrösse),L·F·理查森(1922)和 G·I·泰勒(1915)则把它叫做涡动粘滞性(eddyviscosity)。埃克曼用涡流的摩擦系数置换了黏性系数。埃克曼在力学理论方面的成果有七。① 在相当深的大洋中,当没有沿岸干扰时,风所引起的表层流对于风向呈右偏 45° ;② 其结果是,流速直

接随风速而变化,与纬度的正弦的平方根成反比(一般地说流速相当于风速的约 2%);③海面下任意深度的流动都呈右偏,而且越接近下层,偏向越大,随着深度的增加,流速则按照衰减曲线逐渐减低。下层的流向与海面的流向正相反(180°)时,其流速只相当于表面流的 3%~4%;④这个水层的合成运动量的方向与风向成直角;⑤形成水压梯度的海面水位差与梯度正交产生流动,但不包括海底(流向朝向梯度线);⑥在这当中,流流向梯度方向发生相当大的转向。这个底层的厚度与在上层的厚度中转向 180° 角的层的厚度基本相等。被称为摩擦影响深度的这个层的平均厚度约为 100 米,受风的影响而直接发生变化,它的变化与纬度的平方根成反比;⑦摩擦影响深度随海水深度的增加而减小,摩擦效应相对地比偏向力的影响更具有很大的重要性。海流在海面与压力梯度的方向或风的摩擦的牵引方向的偏差逐渐减少。埃克曼的论文(1905)中最显著的发现就是阐明了埃克曼输运和埃克曼螺旋。这个发现第一次解释了南森在北极海盆测定海流时,发现的随着深度的增大,流向旋转而流速减低的事实。根据他敏锐的直觉认为,这种现象是由于地球自转偏向力而产生的,并委托埃克曼从力学上进一步进行了解释(最初南森向皮叶克尼斯请教时,他把年轻的学生埃克曼叫来,让他们见了面。埃克曼在这个晚上就以“埃克曼螺旋”的形式求出了这个问题的解,但作为论文发表却是九年以后的事)。

以后,埃克曼自己和他的在海流方面的继承者对他提出的海流理论反复进行了各种修正和补充,从梯度流(*gradient current*)的理论发展到被称为元素流(*elementary current*)的合成流(表层流+深层流+底层流)理论,并澄清了地形的影响。此外,埃克曼的学生耶尔德舒塔特(*Fjerlids-tadt*),英国的戈茨布拉夫(*Goldsbrough*),挪威的 H·U·斯维尔德鲁普,美国的蒙克、斯托梅尔,日本的日高孝次、野满隆治等在这方面都创立了不朽的业绩。

从 19 世纪到 20 世纪这一历史时期,随着流体力学的进步,海洋学也有了显著的发展。1851 年,福科(*Jean Bernard Leon Foucault*)最早观测了地球自转偏向力所引起的振动(福科摆),1852 年发明了陀螺仪,推进了地球绝对旋转的研究。这项研究是笛卡儿(1629)的惯性定律、动量守恒原理的继续。1933 年 8 月,古斯塔夫森(*Torsten Gustafson*)和库伦堡(1936)发表了在波罗的海实际测量惯性流的经过,1964 年 7 月,南日俊夫

和赤松英雄乘气象厅凌风丸在北纬 $31^{\circ}37.5'$, 东经 $143^{\circ}08.5'$ 的日本海沟附近深层(1 000 米、2 000 米)用斯沃洛中性浮子测量了惯性流。以后,许多人都相继发现了惯性流的重要性。

斯维尔德鲁普(1947)认识到了“涡度”在风海流理论中的重要性,并把斜压海洋的风流理论应用于东部太平洋的赤道海流,1948 年,罗斯贝的学生——青年科学家、年仅 23 岁的斯托梅尔综合了战前罗斯贝、蒙哥马利、德范特等提出的水平混合的见解和科氏力的南北变化以及 β 效应,解释了黑潮和墨西哥湾流等在大洋西侧形成的幅度较窄的强流,即风海流西岸强化的现象。在这以前,1936 年罗斯贝根据哥廷根学派托尔明(Tollmien)等的研究,指出:越往下游,墨西哥湾流的质量输运越大,形成“湍动尾流”(turbulent wake stream)。从瑞典来到美国的罗斯贝、从挪威来到美国的斯维尔德鲁普都是近代海洋物理学的巨人,他们把北欧的海洋学和气象学移植到美国,使美国在战后成了世界第一流的海洋研究中心。

多年来,内陆海盆里海、亚速海为逆时针方向环流,咸海为不规则的顺时针方向环流这一问题,一直是个谜。斯托克曼(1940)指出,如果风速从左向右减小,则具有气旋性涡度(Cyclonic 涡度),对应海盆的水平循环成逆时针方向(与此相反时则形成顺时针方向)。

关于赤道逆流的成因,肖特、克鲁梅尔、斯维尔德鲁普、德范特等相继研究了 60 年,但仍没有弄清楚其原因所在。1944 年,斯托克曼指出,信风带中的横方向风速分布可能成为赤道上逆流的成因,根据东西带状风应力 τ 成分的实际分布从理论上确定的逆流边界,与实测结果十分一致,并适用于深度变化的浅海盆(在底和岸,流速为零)。于是,解开了咸海的顺时针方向环流之谜。在这个基础上,西蒙诺夫进一步发展了这个理论,说明了这种奇异的顺时针方向环流的发生与特有的盛行风和在该海西部的海渊具有特殊的地形有关,费多罗夫(1955)将这个理论一般化,应用到深海,同时计算了科氏力,并把它成功地应用于北海。斯托克曼于 1947 和 1951 年分别研究了由于海上风场的涡度所引起的环流型,探讨了质量场、风和总输运量间的数值关系以及海底地形对非均匀海洋环流的影响。斯维尔德鲁普(1947)用同样的方法研究了太平洋赤道海流系。斯托梅尔(1948)也用这种总输运量的方法找出了西部边界流西岸强化的原因,这

在海洋力学上是一个伟大的发现。

关于赤道潜流理论,虽然有斯托梅尔(1960)、查尼(1960)的研究,但到目前为止,尚未取得成功。因此,需要从与大环流的关系来考虑这个问题。此外,海流力学方面的成果还包括研究了冰的漂流、冰丘脉、冰压域等问题,以及岛屿周围的不正规的海流问题。至此,我们可以看到,流体力学已经全面渗透到海洋科学领域当中,在海洋研究中的方方面面,都出现了流体力学的身影。

4 现代流体力学在海洋科学中的发展前景

自从计算机出现以来,流体力学发展进入了一个新的阶段。所谓的现代流体力学,指的是用现代的理论方法、计算和实验技术,研究同现代人类社会生产活动和生存条件紧密相关的流动问题的学科领域。所以,现代流体力学正处于一个用理论分析、数值计算、实验模拟相结合的方法,以非线性问题为重点,各分支学科同时并进的大发展时期。随着计算流体力学的发展成熟,建立了计算流体力学的完整的理论体系,超级计算机性能的飞跃,使得对于像雷诺数高达 10^5 这样的典型流动的湍流问题的数值模拟得以实现。因此,把计算流体力学应用到海洋科学中去,对水流运动、泥沙输运、海床演变进行数值模拟,有助于人类揭示其内在规律,甚至出现了“地球流体力学”这样的学科分支。它是主要研究大气、海洋运动的一般规律的学科分支,包括全球尺度、天气尺度、中尺度的运动,其特点是要考虑旋转和层结效应,包括泰勒柱、埃克曼层、地转近似、罗斯贝波、惯性波、内波、双扩散、异重流等现象,深化了人类对自然现象的认识。

1974 年 Mellor G 和 Yamada T 将一系列湍流模型引入行星边界层——海洋和大气中,随后在简单的一维混合层动力学、二维河口等问题中开始有人响应。T. J. Smith 等(1977)用 k -方程模型和 $k-\epsilon$ 模型研究了二维振荡渠道流,并模拟了 Humber 河口潮流的垂直结构,其结果与 Johns 的抛物型湍黏性系数方案相比,与实测符合得更好。而两种湍流模型比较结论是:若 k -方程中混合长 l_m 选得与 $k-\epsilon$ 模型计算所得相近,则 k -方程是模拟振荡渠道流的最优方案。P. B. Leonard 等(1977)用 MLH 封闭模拟了非均匀混合河口的盐度分布;B. Johns(1978)用 k -方

程封闭计算了渠道中的潮流;R. M. Clancy(1981)用 M-Y 的 level 2 封闭模型对混合层结构进行了长期预报。1982 年 G. Mellor 和 T. Yamada 再次撰文介绍湍流模型在地球物理流体力学中的进展,引起海洋界普遍关注,在浅海三维动力学研究中许多学者考虑了这个问题。Blumberg A 和 Mellor G 研制的目前海洋界广泛使用的 POM 模式中,使用了 M-Y level 2 $\frac{1}{2}$ 封闭模型;欧洲大陆普遍使用的 HAMSOM 模式后来也加入了混合长封闭;Leendertse 模型采用了湍能封闭,Johns B, Davis A 等也将 k - ϵ 方程封闭用于风暴潮、潮流及混合等问题研究。

1987 年、1997 年两届列日国际海洋流体动力学会议均以海洋湍流为主题,对海洋湍流研究起了很大的促进作用,特别是 1997 年会议,由于计算技术与观测手段的进步,海洋湍流的复杂性得到认识,三维湍流模型得以发展。但模型本身没有超出前述三种模型的范围,湍流对生物种群分布的影响没有得到充分认识。从会议论文可见, $k-k_1$ 模型与 $k-\epsilon$ 模型得到广泛应用,特别在斜压海洋的混合过程中似乎更为成功。Burchar d H 在海洋的加热、自由对流、风搅拌、底混合四种湍流过程中,对这两种两方程模型进行比较,在通量边界条件下,两者得到相近的结论。

在国际流行的动力学模式进入中国之前,我国海洋界的绝大部分动力模式还是采用了湍流的线性参数化。20 世纪 90 年代中期以来,POM、ECOM、HAMSOM 等成熟的海洋动力学模式引入中国,不仅提高了我国海洋模式研究的能力,而且使湍流封闭问题普及,似乎不以模型封闭湍流就不是高级的动力学模式。这些成熟模型的最大特点是对斜压海洋的某些过程的较好模拟。

5 结语

就目前的发展趋势而言,把计算流体力学应用到海洋科学是一个大的发展方向。近十几、二十年来,通过理论分析和数值实验,对计算稳定性的研究在理论和方法上都取得了一些新的结论,获得了一些新的进展。然而,在这个领域里,还有很多我们亟待解决的问题。首先,目前数值模拟已成为模拟海洋运动的主要手段,如何把计算地球流体力学的理论和

方法与大气海洋模式结合起来,把已经取得的研究成果应用到海洋运动的具体模拟,是一个非常重要的课题。其次,进一步从根本上搞清楚产生非线性计算不稳定的机理,为设计更加精确、更加省时的差分格式,在物理学和数学上提供更加坚实的理论基础,为海洋模式的研制提供更加有效的数值工具,是计算流体力学要加强研究的另一个重点课题。回顾历史,展望未来,流体力学必将在海洋科学中发挥它的重要作用,成为研究海洋不可缺少的一个重要支柱。

参考文献

- [1] 戴念祖. 中国力学史. 河北教育出版社, 1988
- [2] 李家春. 现代流体力学发展的回顾与展望. 力学进展, 1995, (25)4: 442~451
- [3] 林万涛, 董文杰. 计算地球流体力学的回顾、进展与展望. 地球科学进展, 2004, (19)4: 599~605
- [4] 穆穆, 季仲贞, 王斌等. 地球流体力学的研究与进展. 大气科学, 2003, (27)4: 689~712
- [5] Clancy R M, Martin P J. Synoptic forecasting of the oceanic mixed layer using the Navy's Operational Environmental Data Base: present capabilities and future applications. Bull Amer Soci, 1981, 6: 62
- [6] Mellor G, Yamada T. Development of a turbulence closure model of geophysical fluid problems. Rev Geophys Space Phys, 1982, 20: 851
- [7] Xing J, Davies A M. Application of turbulence energy models to the computation of tidal currents and mixing intensities in shelf-edge regions. J Phys Oceanogr, 1996, 26: 417-447
- [8] 魏皓, 鹿有余, 孙文心等. 湍能封闭模型及其在渤海潮流模拟中的应用. 青岛海洋大学学报, 1997, (27)4: 453~458
- [9] 黄大吉, 苏纪兰, 陈宗庸. 三维陆架海模式在渤海斜压过程研究中的应用. 海洋学报, 1996, (19)1: 1~10

郭永怀先生学术思想初探^{*}

冯秀芳^{1, 2} 戴世强¹

(1 上海大学, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

(2 宁夏大学数学计算机学院, 宁夏 750021)

摘 要 郭永怀先生是著名的科学家, 在力学和应用数学方面有卓越贡献, 他又是我国力学事业和国防科研奠基人之一。矢志不渝的爱国情怀, 实事求是的学术品格, 勤学严行的治学精神都是郭永怀先生留给我们的宝贵的精神财富, 谨以此文表达我们对郭先生的崇敬和怀念。

关键词 力学, 应用数学, 上临界马赫数, PLK 方法, 两弹一星

在中国科学院力学所的绿荫中矗立着一尊汉白玉雕像。人们每每从这里走过, 崇敬与怀念之情都会油然而生。这尊雕像塑造的人物, 就是为我国“两弹一星”事业做出突出贡献的著名力学家郭永怀先生。1968 年 12 月 5 日, 郭永怀先生踏着与往常一样忙碌的脚步登上了西北基地飞往北京的飞机, 中央领导在等待听取他的汇报, 妻子在企盼着他归来的消息, 然而飞机在北京机场离地面 400 多米的时候, 偏离开降落的跑道, 歪歪斜斜地向 1 公里以外的玉米地里一头扎了下去……当人们辨认出郭永怀先生的遗体时, 他和警卫员牟方东紧紧地拥抱在一起, 当人们费力地将他俩分开时, 才发现郭永怀先生的那只装有绝密资料的公文包毫发无损地夹在他们胸前。为了表彰他的功绩, 1968 年 12 月 25 日, 中华人民共和国内务部授予郭永怀



^{*} 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10342004)。

先生烈士称号。郭永怀先生是一位刚正不阿的爱国者,直面百般刁难的美国当局坚定地回答:“中国是我的祖国,我想走的时候就要走。”他是一位勤学严行的科学家,思想深邃,勇于攻坚,在突破“声障”,进一步提高超声速飞行速度这一科学成就中创造性地做出了自己的一份贡献,并为我国的“两弹一星”事业鞠躬尽瘁;他是一位诲人不倦的良师,甘做“一颗铺路的石子”,为祖国培养了一大批力学科学研究的骨干。郭永怀先生虽然离开我们已经三十多年了,但他渊博的学识、真挚的爱国情怀以及优秀的品德值得我们再次回顾他那短暂而有价值的人生。

1 学术成就:纵横求索,异域扬名

巴斯德曾经说过:机遇只偏爱那种有准备的头脑。1939年夏天,郭永怀先生、钱伟长先生和林家翘先生同时报考中英庚款留学生,他们从众多的考生中脱颖而出,以总分超过350分的相同的分数被破格录取,踏上了异国求学之路。他们来到了加拿大的多伦多大学,出于回国后可以更好地报效国家的考虑他们都选择了应用数学系,在应用数学系主任J. L. Synge教授指导下从事研究。郭永怀先生仅用了半年的时间就完成了“可压缩黏性流体在直管中的流动”的论文,获得了硕士学位。1941年5月他又来到了美国西岸加州理工学院古根海姆航空实验室,师从航空大师 von Kármán,进行跨声速流动不连续解的研究,经过四年的艰苦探索,他完成了有关跨声速流动不连续解的出色论文,获得了博士学位。1946年秋,应Sears教授的邀请,郭永怀先生来到了康奈尔大学航空研究生院任教并从事黏性流体力学方面的研究。在康奈尔大学的十年间,先后发表了“可压缩无旋亚声速和超声速混合型流动和上临界马赫数(与钱学森先生合作)”、“在中等雷诺数下绕平板的不可压缩黏性流动”和“弱激波在平板边界层上的反射”等重要文章,解决了跨声速流动中的重大理论问题:出现激波的条件,激波对于气动力的影响以及连续亚超声速混合流的存在的可能性,为人类突破声障作出了重要贡献^[1]。与此同时,郭永怀先生还推广了庞加莱的变形参数法和莱特希尔的变形坐标法,钱学森先生于1956年在《应用力学进展》(*Advance in Applied Mechanics*)的一文中将这种方法命名为PLK方法(庞加莱、莱特希尔、郭永怀),PLK方法在力

学和其他学科中都得到了广泛的应用。现在摄动理论成为比较完整和系统的学科,郭永怀则是这门学科最重要的十几位理论奠基人之一。郭永怀先生因在跨声速流与应用数学方面的成果而驰名世界。

2 学术品格:坚持真理,实事求是

郭永怀先生的一生是“追求真理、坚持真理的一生”,他不仅学识渊博,更重要的是他的刚正不阿、主持正义赢得了人们的崇敬。1957年钱伟长先生受到不公正的对待被错划成右派,很多人出于个人的考虑,唯恐避之不远,但郭先生仍然委托他做力学学报的审稿工作,这在当时那样的政治环境下是需要极大的勇气的。曾有一位教授投稿给力学学报,经钱伟长先生审阅发现有很多力学的基本概念是错误的,钱先生指出论文中的51条基本错误,并认为该文章不宜发表,文章的作者居然提出“左派教授的文章不许让右派教授审查”的无理要求,郭永怀先生说:“我们相信钱伟长的意见是正确的,这和左、右无关”,公正地解决了这一无理的纷争^[2]。当“文化大革命”时期力学所许多研究课题被迫停止、人员被调离的时候,平日很和蔼、耐心的郭永怀先生愤怒了,他大声疾呼:力学所不能“散”,基础研究必须搞下去!他顶着压力,采取各种措施,保护着一些研究骨干不被改行,让一些科研项目坚持下去,为力学所今日的发展保存了一定的实力^[1]。郭永怀先生实事求是,服膺真理,从不因人废言,明辨是非的处世原则不啻为当时“风雨如晦,鸡鸣不已”的动荡年代里一缕明媚的阳光。

3 学术动力:心系故土,鞠躬尽瘁

“我自认为,我作为一个中国人,都有责任回到祖国,和人民一道,共同建设我们的美丽的山河”^[3],这是郭永怀先生的心声,亦是他没有丝毫个人主义痕迹的爱国主义精神的体现。在国外学习和工作的日子里,郭先生始终挂记着祖国,寻找回国效力的机会。1955年8月,朝鲜停战协定签订后,经过中国政府的外交努力,美国政府取消了禁止中国学者出境的禁令。郭永怀先生的妻子李佩教授说:“禁令一旦取消,老郭就坐不住了,整天和我盘算着回国的事。美国的许多朋友、包括已经加入美籍的华人

朋友劝他，康奈尔大学教授的职位不错，孩子将来在美国也可以受到更好的教育，为什么总是记挂着那个贫穷的家园呢？不劝倒罢，劝的人越多老郭越来火，他说，家贫国贫，只能说明当儿子的无能！”^[5]为了减少不必要的回国的阻挠，在他快回国的时候将自己多年来一笔一画写的工整清楚的科研文章和教学讲义的授稿，在他们住房的后院一页页烧掉，面对妻子的不解，他说：“省得找麻烦，反正东西都在我脑子里了！”随后，在康奈尔大学航空工程研究生院院长 W. Sears 为他送行的野餐会上，利用烧烤香肠和汉堡牛排的炭火余烬，郭永怀先生把上次没有烧完的一大叠讲义一页一页地烧光。当时在场的他的同事和学生们看着闪闪火焰，都许久默默无言。郭先生的同事们表示惋惜，希望他改变计划，来自亚洲和中国的学生们说：“您给我们指出了方向，我们应该回到自己该去的地方。”^[4]

1945 年 8 月 6 日和 9 日，美国在日本广岛和长崎投下人类历史上的最先两枚原子弹，顷刻间，世界震惊，日本 20 余万人口伤亡，两座城市被夷为平地。曾经不可一世欲吞并中国和东南亚的日本帝国宣布无条件投降。整个 50 年代，是新中国的多事之秋，美国至少对中国有过四次核威胁，箭在弦上，一触即发。世界核科学技术的发展，也加强了中国政府发展核技术的紧迫感。英国继美国、前苏联之后，于 1952、1957 年，先后成功地爆炸了第一颗原子弹和氢弹；前苏联于 1954 年率先建成了世界上第一座原子能发电站，为人类和平利用原子能开辟了新纪元。面对如此严峻的国际形势，中国领导人深感在今天的世界上，“我们要不受人家欺负，就不能没有核武器这个东西”。为了捍卫祖国的尊严和维护世界和平，毛泽东主席果断决定研制核武器，发展核工业。

1957 年 10 月 15 日，我国与前苏联签订了《国防新技术协定》。在协定中前苏联明确承诺向中国提供原子弹数学模型和图纸资料，1958 年，负责核武器研制的二机部九局在京成立。后来成为负责核武器研制、生产整个过程的研究设计院——九院（中国工程物理研究院的前身），开始了“两弹”研制工作。1959 年 6 月，前苏联当局背信弃义中断了原子弹等重要项目的援助，看来靠谁都不如靠我们自己，中共中央决定：自己动手，从头摸起，准备用八年时间搞出原子弹。毛泽东还说：“赫鲁晓夫不给我们尖端技术，极好！如果给了，这个账是很难还的。”正是在这样艰难的情况下，于 1956 年 11 月毅然放弃国外优越的工作和生活条件携妻挈女回到

了阔别 16 年的祖国的郭永怀先生,在著名科学家钱学森的推荐下,加入了研制“两弹”的科研工作者的行列。他负责与力学有关的技术问题,并对研制工作中某些关键性问题的解决发挥了重要的作用。对于原子弹,郭永怀先生提出用特征线法进行爆轰波理论计算,并与理论物理学的研究结果相结合,从而实现了较为优越的引爆方式;对于氢弹,郭先生提出了采用航空中常用的结构形式,使弹体重量明显减轻,由于他提出要增加性能良好的减速装置,从而保证了我国第一颗氢弹空投顺利试验成功;为了实现原子弹的武器化、实用化,郭永怀先生主张对核航弹的结构、外型、弹道引信与环境试验等问题进行预研,从而改善了航弹的增阻特性。郭永怀先生还竭力主张对导弹核器进行声致疲劳和冲击试验,以保证武器系统的安全与可靠性^[1]。

在致力发展中国核武器的短短八年里,郭永怀先生总是在西北戈壁和北京之间穿梭。在海拔 3 800 多米的青海金银滩,郭永怀先生和年轻人一起出入帐篷,风餐露宿,为我国核武器事业倾其全部的精力和热情,甚至生命。在四川绵阳中国工程物理研究院这个诞生了中国核武器的地方,我们从众多人饱含泪水的回忆中领略到一个崇高人格所具有的巨大能量。郭永怀这个名字已经成为中国核武器人的神圣的象征。

4 培养人才:孜孜不倦,言传身教

“我们这一代,你们及以后的二三代要成为祖国的力学事业的铺路石子”^[6],郭永怀先生曾用这样的话语来教导自己的学生,他自己也是从回国之日起就以培养人才为己任,乐此不疲。

当我国恢复建立研究生制度时,郭永怀先生就积极筹划力学所的研究生培养。在第一批招生中,他一人就带了 5 名研究生,以后又亲自带过几批。他主张:培养人才要“言教、身教,以身教为主”。在教学和科研中,他自己做表率,经常同年轻人一道解决一个个技术难题;当建国初期国家急需成批的力学人才时,郭永怀先生和钱伟长先生组织并领导了清华大学力学研究班,他除负责研究班的日常组织工作外,还亲自执教讲授流体力学概论。清华大学力学研究班前后共办了三届,毕业生达 290 多名,现在这些学员全部都成为了我国力学事业的中坚力量;当中国科学技术大

学创建时,郭永怀先生在繁忙的工作中还担任化学物理系系主任,并亲自讲授高速边界层。

郭永怀先生经常教育《力学学报》编辑人员,注意在学术刊物上建立正确的学风与文风,扶植新生的事物,爱护幼苗。他本人就是这方面的模范。对于年轻人送来的文稿、译稿,他总是反复推敲,逐字逐句加以批注和修改^[7]。郭先生在培养学生的时候总不忘提携后进,希望他们能早日具备独立的科研工作能力。1963年前后,当时在清华大学工作的张涵信同志投寄了一篇由他和郭永怀先生联合署名的论文,经审查通过后送请郭先生最后定稿时,他大笔一挥把自己的署名勾掉。并表示:“国外的工作条件比国内优越得多,如果不是为了我国科学事业的发展,我何必从国外回来!说实在话,我从回国之日起,已把个人科研上的得失置之度外。我认为不署名有利于青年人增强独立工作的意识,有利于他们迅速成长。”^[8]由此郭先生坦荡宽厚的胸襟可见一斑。所有这些有目共睹的事情,只能让我们更加怀念郭先生,更加努力做好自己的工作。

5 学术思想溯源:名校文化的熏陶,名师的指点以及哥廷根应用力学学派风格的传承

郭永怀先生堪称是“科学与技术结合的典范”,由于“他良好的数学物理基础知识和渊博的工程技术知识,使得”“理论与实际,科学与技术,数学科学与应用科学的结合”“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。”郭永怀先生之所以能具备良好的数学物理基础知识,与他早期受到不同的名家指点,以及名校文化的熏陶不无关系。郭永怀先生17岁那年以优异的成绩考入青岛大学附中,成为四乡八疃第一个公费中学生,1929年夏,进入天津南开大学预科班学习,由于他的勤奋好学,活跃的思想表现和对数学的浓厚兴趣,被申又辰教授看中,于是便经常给他以重点指导。1931年7月,由于他对光学的兴趣,升入南开大学物理系。1933—1935年在北大物理系就读,毕业后当助教兼做研究工作。曾经和吴大猷等一起研究过喇曼效应,抗战爆发后,曾在威海中学任教一个时期。1938年3月,威海沦陷,他又辗转跋涉到昆明西南联大工作,同时跟随周培源先生学习流体力学,研究湍流理论,这一

时期他先后得到过顾静薇、饶毓泰、周培源等教授的指导，博采众家之长，奠定了坚实的数学物理基础。南开大学秉承“允公允能、日新月异”的校训，弘扬“爱国、敬业、创新、乐群”的光荣传统，培养了以周恩来、陈省身、吴大猷、曹禺等为代表的一大批杰出人才，为民族振兴和国家富强做出了重要的贡献。北京大学作为新文化运动的中心和五四运动的策源地，作为中国最早传播马克思主义和民主科学思想的发祥地，作为中国共产党最早的活动基地，为民族的振兴和解放、国家的建设和发展、社会的文明和进步做出了不可代替的贡献，在中国走向现代化的进程中起到了重要的先锋作用。爱国、进步、民主、科学的传统精神和勤奋、严谨、求实、创新的学风在这里生生不息、代代相传。郭永怀先生先后在南开大学、北京大学及西南联合大学（南开大学与北京大学、清华大学合组长沙临时大学，后长沙临时大学迁往昆明，改称西南联合大学）学习、工作过，谙悉他们的校训，秉承了他们优良的传统，确立了自己科学救国的思想。

郭永怀先生在国外求学期间，曾师从加拿大多伦多大学数学系主任 Synge 教授和美国加州理工学院的 von Kármán 教授，他们都是哥廷根应用力学学派的传人。哥廷根应用力学学派于 20 世纪初发源于德国的哥廷根大学，由知名的数学家菲利克斯·克莱茵和力学家普朗特开创，并由普朗特的学生冯·卡门将其带到了美国。理论与实际，科学与技术，数学科学与应用科学密切结合是该学派最具代表性的治学理念和学术风格，他们主张从复杂的扑朔迷离的问题中，寻找出最基本的物理过程，然后再运用简化了的数学方法加以分析，从而把理论与设计结合起来。郭永怀先生无论是在参与“两弹一星”的研制还是授课育人，无不以此为指导思想。良好的学术交流环境和民主作风也是哥廷根应用力学学派之所以很吸引人的秘诀，正是在这样的环境下，才有了日后的冯·卡门、邓哈托、普拉格、纳戴等国际知名的力学大师。良好民主作风体现之一就是举办讨论班，冯·卡门受益于这样的讨论会，“在学术讨论会上，我不仅结识了许多物理学家和数学家，而且对各个科学分支——从初露头脚的原子理论到沙漠的砂粒运动都怀有浓厚的兴趣，日后我不独钻一门，能从事空间技术多方面的研究工作，正是靠在哥廷根打下的基础”，并把这个优良的传统带到了美国，发扬光大。他每周主持一次工作会议和一次学术活动，周周都开，神圣不可侵犯。在工作会议上，他希望每个人都报告自己的工

作,不管是教授还是学生,讨论十分活跃,说错了也不要紧^[9]。“开始时,有些同学感到,怕提的问题暴露出自己知识贫乏。不久,他们便发现这种集体‘会诊’对解决问题大有好处。”现在由于钱伟长先生和郭永怀先生将这一传统带回中国并发扬光大,举办讨论班的做法已经在全国遍地开花,一片喜人的景象。当年郭永怀先生在中科院力学所的电磁流体力学研究室也组织了每周一次的研讨班,集中攻读留比莫夫的有关专著,并研讨相关的几个研究方向。讨论的气氛非常热烈,常常为一个有歧见的问题争吵得脸红脖子粗,结果总是郭先生的意见成为定论,大家常为郭永怀先生的许多真知灼见所折服^[10]。

郑哲敏院士和李家春院士在《科学和技术结合的典范——纪念郭永怀先生诞辰九十周年》^[11]一文中恰当地总结了郭永怀先生一生的工作,“他总是将当前有重大应用背景的科学问题作为自己的研究方向,尤其是同国家结合民族利益紧密相关的问题;他善于通过观察和思考,提出既能反映问题本质,又能具体进行定量分析的简化数学模型来进行研究;他能运用一切现有的有效数学手段,或研究和发展新的数学方法,得到满足工程需要的解答;分析所获得的结果,深入研究其中的规律,进一步指导未来的工程实践。这是他取得重大科学成就的关键。”无论是过去、现在还是将来,应用力学始终是我们坚持的方向,这也是我们怀念郭永怀先生的一种方式吧。

参考文献

- [1] 郑哲敏. 郭永怀生平事迹介绍. 见: 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, 1~5
- [2] 钱伟长. 怀念同窗益友郭永怀教授. 见: 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
- [3] 郭永怀. 我为什么回到祖国——写给还留在美国的同学和朋友们. 光明日报, 1957-06-07
- [4] 李佩. 访罗湖忆当年. 见: 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, 6
- [5] 金志涛, 王士波, 许运江等. 为“两弹一星”殉职的郭永怀. 炎黄春秋, 2001, 3: 12~16
- [6] 戴世强. 当好铺路石子. 见: 郑哲敏主编. 郭永怀纪念文集. 北京: 科学出版社,

1989,26

- [7] 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
- [8] 李毓昌. 高山安可仰,徒此挹清芬——回忆郭永怀先生高尚的道德情操. 见: 郑哲敏主编. 郭永怀纪念文集. 北京: 科学出版社,1989,20~22
- [9] 谈庆明. 钱学森对近代力学的发展所做的贡献. 力学进展,2001,4(31): 500~508
- [10] 戴世强. 钱伟长学术思想浅论. 江南大学学报(人文社会科学版),2003,2(2): 31~40
- [11] 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. 见: 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

力学中的变换与不变量

武际可

(北京大学力学与工程科学系, 100871)

摘 要 本文从历史发展上叙述了在力学发展中的变换方法与不变量方法。

关键词 变换, 坐标变换, 变换群, 李群, 对称

1 引言

古希腊哲学家赫拉克利特(Heraclitus, 约公元前 540 年—前 480 年)说:“人不能两次踏入同一条河。”极言万物无时无刻不在变化。研究事物的变化乃是科学的真谛。不过, 为了区分事物、识别变化的事物, 我们必须抓住变化事物的不变性质。所以认识在变化过程中, 事物的不变性质, 乃是研究这种事物的关键。

在力学中, 最早朴素地认识不变性质的, 大约是物体处于平衡时, 进行微扰平衡不改变。13 世纪约旦努在他的《重物的科学》中, 就以这种观点来处理杠杆平衡问题。实际上, 这就是后来发展的虚功原理的萌芽。

力学是研究物质在空间中位置变化的科学, 而几何学是专门研究空间结构的学科。所以力学和几何学有着天生不可分的联系。所以在 1627 年出版的我国最早的力学文献《远西奇器图说》中说“数学、度学, 重学之必须, 为兄弟内亲, 不可相离者也。”这里重学就是力学, 度学就是指几何学。

所以力学同数学的发展是同步的, 或者说, 有什么样的数学就有什么样的力学, 反过来在一定的程度上也可以说, 有什么样的力学就有什么样的数学。力学的研究经常是要了解客观事物的质和量两个侧面, 而质与量是不可分的, 所以力学同数学自古便有紧密联系的传统。力学的任务

是研究物质在空间中的运动,而几何是研究空间的,所以力学与几何有着最为密切的联系。力学与物理学的革命性的发展常常是与几何联系在一起的。从阿基米德到斯蒂芬时代,力学的研究内容是静力学。在几何方面的主要工具是欧氏几何。相应的计算工具是常量的代数运算。

从伽利略、惠更斯到牛顿、莱布尼兹的时代,力学研究的主要内容是自由质点的运动,特别是解决在引力作用下的自由质点的运动。在几何方面的主要工具是解析几何,特别是有关圆锥曲线的解析几何。在计算方面的主要工具则是引进了变量,发明了微积分,而且微积分的发明人牛顿与莱布尼兹自己也是著名的力学家,是那个时期的力学学科的开拓者。从拉格朗日到哈密尔顿和雅科比时代,力学主要的研究内容是约束运动。在几何方面的主要工具是引进了 n 维空间的概念,后来经过黎曼的严格化,就是流形或黎曼几何。而在分析方面的主要工具则是引进了泛函的概念,并且发展了求泛函极值的方法,也就是变分法,拉格朗日自己就是早期开拓变分法的主将。

在 20 世纪末,力学又进入了一个重要的新阶段,这就是以庞加莱与李亚普诺夫为代表的发展动力系统的定性理论时代。定性理论与运动稳定性的研究本来是从天体力学中提出来的一个理论课题,之后发现在一切力学系统中,甚至在由一切非线性常微分方程决定的系统中都有普遍理论与应用意义。简单地说,定性理论是研究系统解的性质随参数而变化的方向,例如有没有周期解的变化、有没有极限环的变化、解稳定与不稳定的变化等等。相应的几何方面的主要工具就是拓扑学,而相应的计算工具是同伦与外微分等。至今经过了 100 多年的发展,它仍然是世界上很受关注的研究领域。

2 一些重要变换的历史

在所有的变化中,最为基本的变化就是位置的变化。为了描述位置的变化,从历史上说,首先就要把位置用数量来表述。这就是坐标的引进。

1637 年笛卡儿(Rene Descartes, 1596—1650)发表了 *La Géométrie*, 奠定了解析几何的基础。从而产生了坐标变换的概念。

1893 年李 (Marius Sophus Lie, 1842—1899) 出版了他积九年研究的成果于三卷书 *Theorie der Transformationsgruppen* 中。奠定了李群也就是变换群的基础。

1872 年, 德国数学家克莱因 (Felix Christian Klein, 1849—1925) 在论文 *Vergleichende Betrachtungen über neuere geometrische Forschungen* 中提出以变换来区分非欧几何的理论。后来被称为爱尔朗根纲领 (Erlangen program)。

在引进了坐标和时间的变换后, 人们自然要讨论在这些变换下, 哪些力学量保持不变。于是人们定义了以下三个力学量, 即: 动量 $= m\dot{\mathbf{r}}$ 、角动量 $= m\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}$ 和能量 $= \frac{1}{2}m\dot{\mathbf{r}}^2 + U(\mathbf{r})$ 。人们立即发现, 这三个力学量分别在坐标的平移、旋转和时间的平移之下保持不变。这就是著名的力学中的三大守恒定律。

1904 年洛伦兹 (H. Lorentz, 1853—1928) 引进了时间和空间变量的洛伦兹变换, 在洛伦兹变换下, 时空距离 $dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$ 是不变量。其中 c 是光速。洛伦兹变换后来在相对论的发展中起了非常重要的作用。

在研究了许多个别的不变量之后, 人们需要从一般的观点来讨论变换和不变量。在力学问题被牛顿和拉普拉斯等人提为微分方程组之后, 一个力学系统的变化可以用动力系统 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x})$, $\mathbf{x}, \mathbf{f} \in \mathbf{R}^n$, 设给定初值为 \mathbf{x}_0 , 它的解是

$$\mathbf{x} = \varphi(\mathbf{x}_0, t) \quad (1)$$

这个解实际上给出了从 \mathbf{x}_0 到 \mathbf{x} 的一个带参数 t 的变换。李是系统研究这种变换的第一人。这个变换构成了一个单参数变换群, 也称为单参数李群。

设 $g(\mathbf{x})$ 为 \mathbf{x} 的任一函数, 一般来说如果

$$\sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial g}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

则 $g(\mathbf{x})$ 就是在变换 (1) 之下的一个不变量。显然这个条件是充分必要的, 这是因为

$$\frac{dg}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{dx_i}{dt} \frac{\partial g}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^n f_i \frac{\partial g}{\partial x_i} = 0$$

进一步讲,力学中的各种定律和各种方程,都是讲在一定条件或过程中的不变量,都可以统一纳入不变量的理论中去讨论。

3 勒让德变换与贝克隆变换

1787年,勒让德(Adrien-Marie Legendre, 1752—1833)在蒙日关于最小曲面研究的启发下,给出了勒让德变换。勒让德变换在力学和物理上的应用,可以把作用量的自变量换成与原来变量对偶的变量。由此就可以发展出一系列的另外的作用量和运动方程的新的表述形式。

勒让德变换是从以下偏微分方程出发的:

$$R \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + S \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} + T \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

其中若令 $\frac{\partial z}{\partial x} = p$, $\frac{\partial z}{\partial y} = q$, 再令 R, S, T 仅是 p, q 的函数。令曲面 $z = f(x, y)$ 的切平面为

$$px + qy - z - v = 0 \quad (4)$$

则应当有

$$R \frac{\partial^2 v}{\partial p^2} - S \frac{\partial^2 v}{\partial p \partial q} + T \frac{\partial^2 v}{\partial q^2} = 0 \quad (5)$$

式(4)在变量 x, y 与它们的对偶变量 p, q 之间给了一个变换。把这个变换具体写出来就是对它求微商得

$$\frac{\partial z}{\partial x} = p, \quad \frac{\partial z}{\partial y} = q; \quad \frac{\partial v}{\partial p} = x, \quad \frac{\partial v}{\partial q} = y \quad (6)$$

考虑到上面变换的雅科比矩阵应当互逆,即

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial p}{\partial x} & \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{\partial q}{\partial x} & \frac{\partial q}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} & \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial p} & \frac{\partial y}{\partial p} \\ \frac{\partial x}{\partial q} & \frac{\partial y}{\partial q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 v}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 v}{\partial p \partial q} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial p \partial q} & \frac{\partial^2 v}{\partial q^2} \end{pmatrix}$$

于是有

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial^2 v}{\partial q^2}, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{\Delta} \frac{\partial^2 v}{\partial p \partial q}, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial^2 v}{\partial p^2}$$

其中

$$\Delta = \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 v}{\partial p^2} & \frac{\partial^2 v}{\partial p \partial q} \\ \frac{\partial^2 v}{\partial p \partial q} & \frac{\partial^2 v}{\partial q^2} \end{vmatrix}$$

这个变换把一个拟线性方程(3)变到一个线性方程(5)。

把以上的思想推广,设有 n 个变量 q_1, q_2, \dots, q_n 的函数 $U=U(q_1, q_2, \dots, q_n)$,它具有直到二阶以上的连续微商,取新的一组变量

$$Q_i = \frac{\partial U}{\partial q_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

它们组成对原变量 q_1, q_2, \dots, q_n 的一组变换其雅科比行列式

$$\left| \frac{\partial Q_i}{\partial q_j} \right| = \left| \frac{\partial^2 U}{\partial q_i \partial q_j} \right| \neq 0$$

从式(7)可以把原变量反解出来得

$$q_i = q_i(Q_1, Q_2, \dots, Q_n) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

考虑新函数

$$U^c = \sum_{i=1}^n Q_i q_i - U \quad (9)$$

可以证明

$$q_i = \frac{\partial U^c}{\partial Q_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (10)$$

两个函数 U 和 U^c 的关系由式(9)给出。对应的变量和函数的关系分别由式(7)和式(10)给出。它们概括了力学与物理中许多对偶关系。

在力学中常见的内能 $\delta U = \theta \delta s + T$; $\delta \Gamma$ 与自由能 $\delta F = s \delta \theta + T$; $\delta \Gamma$ 之间有关系 $s \theta - U - F = 0$ 。

变形能密度 $\delta W = T$; $\delta \Gamma$ 与余变形能密度 $\delta W^c = \Gamma$; δT 之间有关系

$T: \Gamma - W - W^c = 0$ 。

它们都是勒让德变换的实例。

在分析力学中,拉格朗日方程是

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

其中拉格朗日函数是 $L(q, \dot{q}, t) = T(q, \dot{q}) - U(q, \dot{q}, t)$, T 为动能, U 为势能。哈密顿函数与拉格朗日函数之间的关系是 $H(p, q) = \sum_{i=1}^n \dot{q}_i p_i - L(q, \dot{q}, t)$ 。这实际上也是一个勒让德变换。在这个变换下,拉格朗日方程就变换为哈密顿方程

$$\begin{cases} \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i} \\ \dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

4 结论

我们列举了力学中的一些重要变换。通过这些变换以及在变换之下讨论不变量的思想,一直是力学乃至物理学研究客观规律的一种主导方法。这种方法指引下已经取得了许多重要成果,而且还在发挥着重要作用。

(1) 我们可以说,力学和物理研究的内容就是研究物质运动在时间和空间变换下不变的性质。不同的变换引发了不同的研究领域。

(2) 人们对变换研究的范围,随着历史的发展也在不断地扩充。开始是研究坐标的变换,后来研究坐标与时间的变换。再后来考虑速度以及各种导数的变换,最后像勒让德变换那样,讨论未知函数也参与变换。于是我们有正则变换、接触变换、贝克隆变换、达布变换等等。力学和物理越发展,所引入的变换就越多。

(3) 通过研究变换可以把问题分类,以区分不同类型的。

(4) 通过变换可以把问题化简,化归到同一等价类的最简单的情形来

求解。

(5) 不同的变换下有不同的不变量,求得了不变量往往就得到动力学问题的一个第一积分,甚至得到问题的解。

(6) 力学和物理的许多规律往往表述为一定的方程或等式。方程和等式从另外的角度来看,也可以看作是一种特别的不变量。所以对变换和不变量的讨论实际上关系着整个力学和物理学的发展。

参考文献

- [1] 武际可,王敏中,王玮. 弹性力学引论(修订版). 北京大学出版社,2001
- [2] Н. Х. Ибрагимов. группы преобразований в математической физике. 1982
- [3] Peter J. Olver. Applications of Lie Groups to Differential Equations. Springer-Verlag,1989

经典弹性力学与应用力学方法

嵇 醒 戴 瑛 仲 政

(同济大学航空航天与力学学院, 固体力学教育部
重点实验室, 上海 200092)

摘 要 本文从经典弹性力学的半逆法的特点与应用力学方法的特点的比较上, 阐述了应用力学方法是在经典弹性力学的半逆法的基础上发展出来的。应用力学方法的源在经典弹性力学。

关键词 经典弹性力学, 半逆法, 应用力学方法

1 引言

力学的本意是: 先建立基本方程, 然后依靠和利用数学的强大能力, 通过解析法来解决问题。这便是数学力学的目标。然而应用数学的能力虽然强大, 尚不能以正解法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, 来补充数学力学面对工程问题的不足。

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, 应用力学的处理工程问题的方法在 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能发挥巨大作用的灿烂前景; 在力学和工程之间, 开辟了一条巧妙地用力学研究数学分析的结合来求解工程中的力学问题的通道。

20 世纪的力学所取得的进展, 在现代工程中所发挥的作用, 离不开应用力学方法。许多代表性论文, 作为应用力学方法的范例, 是学习应用力学方法的一个有效途径^[1,2]。

本文从经典弹性力学的半逆法的特点与应用力学方法的特点的比较上, 阐述了应用力学方法是在经典弹性力学的半逆法的基础上发展出来的。应用力学方法的源在经典弹性力学。

经典弹性力学的正解法具有数学力学的特征,而经典弹性力学的半逆法则具有应用力学方法的特征。所以学习经典弹性力学的正解法和半逆法的时候,应该根据它们各自不同的特征,对正解法应该从数学上去把握,对半逆法则不能只从数学上去把握。对半逆法的学习,重点应放在如何从三维弹性力学基本方程出发,得到简化方程的过程上。这一过程是半逆法的精髓所在,也是应用力学方法取得成功的关键所在。

应用力学范例是应用力学方法的流,而弹性力学半逆法是应用力学方法的源。从源和流两个方面来学习、研究、掌握应用力学方法,以提高我们的力学研究水平,提高我们的创造性,也必会产生事半功倍的效果。

2 有关应用力学的论述^[1,2]

自 20 世纪 80 年代起,我们的力学前辈多次对应用力学作了精辟的论述。择要如下:

1982 年,为了更好地传播应用力学,挽回“文化大革命”的损失,加速力学发展,当时的中国力学学会理事长钱学森院士在中国力学学会第二届理事会扩大会议开幕式上的讲话^[3]中说:“力学发展到现在,主要是应用力学。从过去 30 年代,40 年代,50 年代,一直到 60 年代,70 年代的发展来看,就是要建立一个准确的数学模型,用电子计算机最后得出答案,提供工程技术人员使用。”他进一步阐述:“建立数学模型,第一必须有力学的理论,也就是说,要搞清现象的机制、机理。为了搞清这个问题,我们又要深入到许多问题中去。有了关于机理的了解之后,怎样变成一个数学模型?这是第二个问题。第三,上计算机也有许多考虑。第四,为了弄清机制机理,有时需要做实验,要做到比较精巧,测量又要打中要害是不容易的。”他还说道:“力学或叫应用力学,有两个方面的服务对象,一是为工程设计服务,直接为发展生产力服务;另一个是为发展自然科学服务。”这是钱学森先生在当今计算机时代对应用力学的全面、精辟、透彻的论述。

到了 1995 年,正处于世纪之交之际,中国力学学会在《力学与实践》上刊登了《力学——迎接 21 世纪新的挑战》一文^[4],钱学森为此总结了

100 年来的力学发展^[5],他说道:“从过去 100 年力学发展的情况看,力学是一门处理宏观问题的学问。总起来一句话:今日力学是一门用计算机计算去回答一切宏观的实际科学技术问题的学科,计算方法非常重要;另一个辅助手段是巧妙设计的实验。”钱学森先生指出了应用力学的宏观性,又一次强调了应用力学与计算力学、力学实验相结合的重要性和必要性。

1997 年,钱学森在祝贺清华大学工程力学系建系 40 周年的一封信中^[6],鼓励并告诫工程力学系的师生们要跟上时代。他说:“由此展望 21 世纪,力学加电子计算机将成为工程新设计的主要手段,就连工程型号研制也只用电子计算机加形象显示,都是虚的,不是实的,所以称为‘虚拟型号设计’(virtual prototype),最后就是实物生产了。”他强调有了电子计算机之后,应用力学和工程之间的关系已提升到“虚拟型号设计”的阶段。

郑哲敏院士也对应用力学作了专门的论述^[7]:“本世纪以来,应用力学发展了自己一套行之有效的方方法论,那就是在捕捉主要影响因素的基础上,建立数学模型,并发展了多种有效的解法,用于求得解析解或用于求数值解。这种方法论又是在力学研究中不断得到充实、创新与发展。”他还强调:“既然目的在于应用,那么对于应用力学工作者来说,深入而不是肤浅地了解应用对象、应用的环境、应用的条件就是十分必要的了。”值得我们注意的是郑哲敏院士把应用力学归结为方法论,并把这种方法论总结为:在捕捉主要影响因素的基础上,建立数学模型。这为我们学习和掌握应用力学,指出了一条由方法论入门的途径。

3 应用力学方法的特点^[1, 2]

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直接求取严格解,严格解当然比近似解好,但除一些极简单的问题外,都难于求得严格解;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,同时也不放弃利用强大的数学工具所能提供的一切帮助,先简化,后求解。由此可见,应用力学方法(见图 1)更能满足工程的需要;但是,数学力学方法所提供的典型问题的解析解常常具有重要的理论意义,

是检验理论正确性的最佳办法。

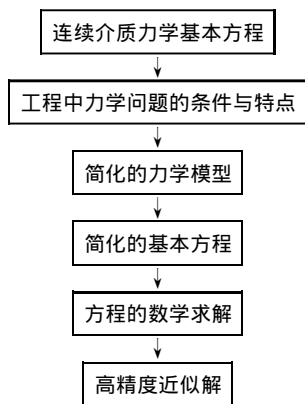


图 1 应用力学方法的特点^[2]

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,省去了繁重的数值计算。应用力学方法与近似解法(里茨法,伽辽金法)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,应用力学却既重视数学的应用,也重视实验研究,把实验、观察和测量既作为应用力学建立简化力学模型的源泉之一,又作为检验应用力学结果的主要方法。

由此可见,应用力学(见图 1)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,必须从力学上充分和深刻地理解,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,先通过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,这就是应用力学取得成功的经验所在。换言之,在应用力学中,力学

在提供连续介质基本方程之后,在求解的过程中也发挥了关键性的作用。

4 学习应用力学方法的途径

从文[2]所举应用力学方法的范例中,我们可以看到:应用力学方法的运用没有一成不变的路子,套用老路不能解决新问题。这就是为什么应用力学特别强调创造性研究的原因。创造性是应用力学的灵魂,学习应用力学,就是要学习这种创造性。

从所举应用力学方法的范例中,我们可以看到应用力学大师们高超地运用应用力学方法解决实际问题的能力。我们很难找到一本力学书,从中我们可以系统学到高超的运用应用力学方法来解决实际问题的能力。但是我们可以自己挑选足够数量的应用力学方法的范例,深入细致地钻研到彻底透彻领悟,从中领略应用力学方法的精髓,看出问题是如何迎刃而解的。日积月累,举一反三,掌握应用力学方法是迟早的事情。

从所举应用力学方法的范例中,我们可以看到应用力学大师们在选题上的深厚功底。他们在所选的题目中,已经蕴涵了应用力学方法的创新要求和对工程的现实意义,让应用力学有用武之地。选题不高明,也就不会有高明的应用力学成果。所以,用应用力学的观点在工程中提取尚待解决的力学问题,和用应用力学的方法去解决问题,是同样重要的事情。第一是要能选到能起到范例作用的题目,第二才是看能不能解决。如何选题?这也是我们学习应用力学的一项重要内容。

从所举应用力学方法的范例中,我们还可以看到应用力学大师们的研究常常能走在工程技术发展需要的前面,能够解决工程技术中的关键重大问题,同时又能为应用力学开拓前进的方向,他们的论文的价值难以估量。这也是我们在学习应用力学时梦寐以求的。

由此可见,学习应用力学范例是学习应用力学方法的有效途径,这正是文[2]所要阐明的。应用力学范例是用应用力学方法解决工程实际问题的成功例子,是应用力学方法的流。那么,应用力学方法的源头在何处呢?本文试图说明应用力学方法的源在经典弹性力学中。

弹性力学的经典著作和教材不胜枚举,最具代表性的有[8~12]。国

内出版的弹性力学的经典著作和教材也为数不少,例如[13~20]。

纵览弹性力学的经典著作和教材,可以发现,经典弹性力学的全部内容可归纳为三个主要部分,即基本理论部分、正解法部分和半逆法部分。这三个部分各有特点,都很精深,而半逆法部分尤为庞大。一般情况下,弹性力学的课程学习,大部分时间都是花在半逆法部分上。然而,人们往往没有把弹性力学的正解法和半逆法分得很清楚,常常把正解法和半逆法并列为弹性力学的解析解法,把正解法和半逆法都看作是数学力学的范畴,而忽略了半逆法的应用力学方法的性质。认为学习弹性力学就是学习数学弹性力学,结果是在学习弹性力学的时候,忽略了从半逆法中吸取应用力学方法的精华,把注意力仅放在求解过程中的数学的推导上。

在弹性力学的经典著作和教材的书名上,可以看到几乎所有的著作都冠以弹性力学、经典弹性力学,或数学弹性力学,很少用应用弹性力学(applied elasticity)这个名称。如果用到英文的应用一词,也只用 application,而不用 applied,如[12]。

1953年,王启德^[21]所著应用弹性力学一书,虽然在书名上用了 applied elasticity 这个词,但是他在书中并未提醒读者注意从中吸取应用力学方法的精华。

在经典弹性力学中强调突出半逆法与应用力学方法的联系的意义,在于提醒读者注意从经典弹性力学著作中吸取应用力学方法的精华,而不是将弹性力学的学习只当作是应用数学的运用和实践。

5 经典弹性力学中的基本理论部分

经典弹性力学的基本理论部分包括:基本假设,一点的应力分析,一点的应变分析,胡克定律,平衡方程,连续性条件,以及弹性力学基本方程和边界条件的建立。

经典弹性力学的基本理论部分还包括:弹性力学边值问题和求解途径,Navier 方程,应力函数,圣维南原理,弹性力学解的惟一性,弹性力学 Papkovich 一般解等。

此外,还包括:弹性力学变分原理,Betti 互换定理,Somigliano 积分,

弹性力学差分方程等。

经典弹性力学的基本理论部分的内容比较固定,构成整个弹性力学的理论基础。弹性力学的数学模型建立完成之后,求解各种各样的弹性力学问题成为研究的重点。

6 经典弹性力学中的正解法求解部分

弹性力学崇尚严格的解析解,祈求获得同时满足全部弹性力学方程和边界条件的解析解。弹性力学的先驱们为此竭尽全力,在应用数学的海洋中,寻求一种完美的正解法。

在弹性力学 Papkovitch 一般解中,包含有四个任意的调和函数,如果能够做到根据特定问题的特定的边界条件,运用数学方法,按部就班地把四个未知的调和函数全部确定下来,这可算是最理想的正解法。可是,至今没能做到这一点。

直到 20 世纪中叶, Muskhelishvili 的专著^[10]问世之后,人们才有了一种名副其实的解法:弹性力学平面问题的复变函数解法。弹性力学平面问题的双调和函数一般解的复数形式中,包含有两个任意的解析函数,对弹性力学平面的圆域问题,这两个未知的解析函数总可以根据圆域上给定的边界条件的复数形式完全确定。通过复变函数的保角变换,如果能够做到将非圆域变换到圆域,这种方法也可以用来求解非圆域的平面问题^[8,10]。在用复变函数解法求解弹性力学平面问题时,不需要预先估计位移或应力应变场的特征,不需要预先构思未知函数的形式,只需要按部就班,履行解法中所包含的数学推演全过程,问题就完美地解决了,得到的是严格的解析解。

除了弹性力学平面问题的复变函数解法,人们举不出别的名副其实的正解法。Muskhelishvili 的专著^[10]堪称弹性力学书海中的瑰宝,数学力学中的楷模,一枝独秀,让人们真正领略到了弹性力学正解法的风采。

没有充足的时间去钻研 Muskhelishvili 的专著^[10]的读者,可以以 Sokolnikoff 的 *Mathematical Theory of Elasticity*^[8] 中的第五章作为替代读物。

值得注意的是有些弹性力学教材在介绍弹性力学平面问题的复变函数解法时,并没有像[8]那样按正解法作清楚透彻的叙述。

7 经典弹性力学中的半逆法求解部分

不论弹性力学的正解法——弹性力学平面问题的复变函数解法——有多神,有多美,能够提供的解答毕竟有限,只限于弹性力学平面问题中适合于复变函数解法的问题。

在经典弹性力学的历史发展过程中,为了克服直接求解三维弹性力学基本方程中遇到的不可克服的数学困难,半逆法在圣维南柱体扭转问题中被首先采用而取得了巨大成功。半逆法的出现扭转了弹性力学基本方程无法求解的局面,推进了弹性力学理论联系实际的进程。以 Love 的专著^[9]为代表的弹性力学书籍中所包括的问题广泛,类型多样,数量众多,意义重大的研究成果,几乎都是半逆法的产物。

圣维南半逆法的要点是:在求解弹性力学问题时,对应力、应变、位移的某些分量提出假设,但仍保留足够的自由度以满足弹性力学的方程和边界条件^[8,93页]。铁木辛柯在《材料力学史》中有一段话说出了半逆法的由来^[22,193页],他说道:“圣维南提供了半逆解法(semi-inverse method),利用此法,只要假定位移和应力的一些特征,从而推求出这些量的其余特征,使之能满足所有的弹性方程。”他指出:“凡学过基本材料力学近似解的工程师都能用这个方法得出有使用意义的精确解来。”

材料力学中,圆轴扭转的位移表达式是

$$u = -\theta xy, v = -\theta x^2 \quad (1)$$

圣维南也试过用这个位移表达式来处理非圆截面轴的扭转问题,但是用这种方法所得的结果与实验不符。因此圣维南假定截面将发生翘曲,并假定所有各截面的翘曲都一样:

$$w = \theta \cdot \varphi(x, y) \quad (2)$$

θ 是单位扭转角, φ 是翘曲函数。由式(1)和(2)所推出的扭转应力自动满足协调方程,如果翘曲函数 φ 能满足:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (3)$$

则弹性力学平衡方程也满足了。根据轴的侧面不受力的条件,可导出关于翘曲函数 φ 的边界条件:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} - y\right) \cos(nx) + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} + x\right) \cos(ny) = 0 \quad (4)$$

式中, n 是截面边界的外法线方向。单位扭转角 θ 的大小由扭矩决定。

到这里,一个复杂的三维弹性力学扭转问题已简化为只需要求解式(3)和(4)所表示的 Neumann 问题就行了,所得到的结果和求解全部三维弹性力学方程同样是严格精确的。

我们不能因为半逆法得到的解析解是严格精确的,就不问半逆法和正解法有什么不一样。如果把半逆法和应用力学方法的特点加以比较,就可清楚地看到:半逆法具有和应用力学方法相同的特点。惟一差别是应用力学方法追求的是高精度近似解,而圣维南半逆法解扭转问题得到的是严格解。既然如此,我们为什么不从弹性力学中大量的半逆法的解例中去探索应用力学方法的精微?

由此可见:文[2]中所提到的应用力学范例是应用力学方法的流,而弹性力学半逆法是应用力学方法的源。应从源和流两个方面来学习、研究、掌握应用力学方法,以提高我们的力学研究水平,提高我们的创造性,也必会产生事半功倍的效果。

8 提高弹性力学课程教学效果的教学法

弹性力学是力学专业的重头课,从材料力学到弹性力学,学生会感到两门课程的反差很大,材料力学通俗易懂数学少,工程性强,弹性力学从头到底是数学推导,开始不习惯,以后就习以为常。殊不知,材料力学是应用力学方法加初等数学,而弹性力学(半逆法)则是应用力学方法加高等数学分析,二者一脉相承。

在弹性力学的教学过程中,突出半逆法和应用力学方法之间的联系,会产生很好的教学效果。

参考文献

- [1] 嵇醒,仲政,戴瑛.应用力学方法初探(摘要).见:武际可、隋永康主编.力学史和方法论文集.北京:中国林业出版社,2003
- [2] 嵇醒,仲政,戴瑛.应用力学方法初探.力学季刊,2004,25(4): 470~477
- [3] 钱学森.钱学森理事长在中国力学学会第二届理事会扩大会议开幕式上的讲话.力学与生产建设,北京大学出版社,1982
- [4] 中国力学学会.力学——迎接 21 世纪新的挑战.力学与实践,1995,17(2): 1~18
- [5] 钱学森.我对今日力学的认识.力学与实践,1995,17(4): 1
- [6] 钱学森.钱学森教授给清华大学工程力学系的一封信(1997 年 3 月 30 日).中国力学学会会讯,1998,211(2): 3
- [7] 郑哲敏.谈谈应用力学.力学与实践,1995,17(1): 1~3
- [8] I. S. Sokolnikoff. Mathematical Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Co., 1956
- [9] A. E. H. Love. A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Dover Publications, 1944
- [10] N. I. Muskhelishvili. Some Fundamental Problems in Mathematical Theory of Elasticity. Noordhoff Ltd., Groningen-Holland, 1953
- [11] S. Timoshenko and J. N. Goodier. Theory of Elasticity. McGraw-Hill Book Co., 1970
- [12] H. Reismann, P. S. Pawlik. Elasticity: Theory and Applications. John Wilson & Sons, 1980
- [13] 钱伟长,叶开源.弹性力学.北京:科学出版社,1956
- [14] 王龙甫.弹性理论.北京:科学出版社,1978
- [15] 徐芝纶.弹性力学.北京:人民教育出版社,1980
- [16] 武际可,王敏中.弹性力学引论.北京:北京大学出版社,1981
- [17] 樊大钧.数学弹性力学.北京:新时代出版社,1983
- [18] 杜庆华,余寿文,姚振汉.弹性理论.北京:科学出版社,1986
- [19] 杨桂通.弹性力学.北京:高等教育出版社,1998
- [20] 吴家龙.弹性力学.北京:高等教育出版社,2001
- [21] Chi-The Wang. Applied Elasticity. McGraw-Hill Book Co., 1953
- [22] S·P·铁木辛柯著,常振楫译.材料力学史.上海科学技术出版社,1961

弹性杆的 Kirchhoff 理论与 力学中时空概念的转换

刘延柱

(上海交通大学工程力学系, 200030)

1859 年 G. R. Kirchhoff (1824—1887) 对不考虑轴向变形的圆截面杆, 在刚性截面假定和无体积力作用的条件下, 根据弹性杆的平衡微分方程与刚体定点转动微分方程之间的相似性, 提出了弹性细杆平衡的动力学比拟理论。1862 年 Clebsch 在其弹性力学著作中论述了这一理论。根据 Kirchhoff 理论, 经典刚体动力学几种可积情形的椭圆函数解即可移植到弹性杆静力学。其中拉格朗日 (J. L. Lagrange) 情形和欧拉情形刚体定点转动分别与一般受力状态的圆截面杆和受力矩单独作用的非圆截面杆的平衡相对应。判断拉格朗日情形重刚体绕垂直轴永久转动稳定性的 Maievskii (1865) 条件也转换为判断受轴向拉扭的圆截面直杆平衡稳定性的 Greenhill (1883) 公式。刚体动力学的经典结论与弹性杆几何形态之间的对应关系在 Nizzete, Goriely (1999) 的论文中作了详尽的对照。作为弹性杆静力学的理论基础, Kirchhoff 理论在 Love (1927) 的弹性力学著作中有详细的论述, 也见于 Timoshenko (1953) 的材料力学史。国内关于 Kirchhoff 弹性杆理论的论述见于武际可、苏先樾和陈至达的著作。

弹性细杆的平衡和稳定性问题除电缆、绳索、钻杆、纤维等传统背景以外, 20 世纪 70 年代以来, 将弹性细杆作为 DNA 简化力学模型的理论研究促使弹性杆力学在分子生物学领域中得到振兴。基于 Kirchhoff 动力学比拟理论, 以分子生物学为背景的研究论文大量涌现, 使这一理论在沉寂一个世纪以后重新引起注意。自 1743 年 D'Alembert 在惯性力概念基础上提出将静力学方法用于动力学研究的“动静法”以来, Kirchhoff 动力学比拟又一次在静力学和动力学之间架起了桥梁, 即将动力学方法应用

于弹性杆的静力学研究。

动力学比拟理论的基本思想是时空概念的转换,即将动力学中的时间变量 t 置换为一维空间变量的弧坐标 s 。利用时空转换,原则上任何动力学研究方法均可引入弹性杆静力学。如将经典分析力学中的时间变量置换为弧坐标,可产生弧坐标分析力学,将 Lyapunov 运动稳定性理论中的时间变量置换为弧坐标,可产生弧坐标 Lyapunov 稳定性理论。时空变量的转换过程同时也向分析力学、运动稳定性等传统学科提出有待解决的新问题。

从弹性力学最小势能原理出发,可以导出与分析力学形式相同的哈密顿 (W. R. Hamilton) 原理,仅时间积分变量 t 被弧坐标 s 代替,哈密顿作用量被弹性杆的总势能代替。从弧坐标哈密顿原理出发,可以导出弧坐标拉格朗日方程、哈密顿正则方程或 Boltzman-Hamel 方程。Kirchhoff 方程及其初积分可用任何一种分析力学方法导出。经典分析力学的一些基本概念,如完整约束与非完整约束的含义在弧坐标分析力学中应重新加以阐释。杆的端部约束条件常以积分形式出现。定常约束,即同一约束条件施加于全杆的情形在弹性杆中并不多见,而约束条件随弧坐标改变的非定常约束在弹性杆中则普遍存在,因为作为 DNA 模型的弹性杆往往在不同区域内受到不同的几何约束。例如,当考虑 DNA 在不同弧段自相接触或与蛋白质分子接触的可能性时,约束仅存在于杆的局部范围,即弧坐标的有限区间以内。产生约束的位置则有待于在计算过程中确定。在分析力学中,时间变量 t 只能朝正方向单调增大,约束的出现只影响随后的运动。而弧坐标 s 的变化具有可逆性,在 $s = s_0$ 处出现的约束不仅影响 $s > s_0$ 的状态,而且也影响 $s < s_0$ 的状态。这种特殊的“分段约束”问题在经典分析力学中尚无先例。必须建立新概念,研究新问题。

将时间变量 t 置换为空间变量 s 以后,原则上 Lyapunov 关于运动稳定性的严格定义和定理,以及各种形式的稳定性判据均可照搬到弹性杆的平衡稳定性。由于弹性杆仅占据有限空间域,关于平衡稳定性的判断仅在弧坐标的有限范围内进行,因此弹性杆的平衡稳定性属于在有限区间内考察的实用稳定性范畴。根据 Lyapunov 运动稳定性理论导出的稳定性判据超出了弹性杆稳定性的实际要求。Lyapunov 运动稳定性理论中的时间变量 t 从发生初扰动的时刻起只能朝正方向单调变化。考虑到

弧坐标变化的可逆性,若初扰动位置不在弹性杆的端点,当弧坐标 s 朝正、负两个方向变化时,渐近稳定性或不稳定性可持相反结论。Lyapunov 稳定性是对初值的稳定性,不同于工程中判断确定边值条件下弹性杆屈曲的欧拉稳定性。以受轴向力作用的直杆为例,压杆受微扰的挠性线切线倾角在零附近变化而符合 Lyapunov 稳定性定义。拉杆的受微扰平衡状态为带回环的挠性线,其切线倾角在大范围内变化而符合 Lyapunov 不稳定性定义。但按照欧拉稳定性概念,对于确定的弹性杆端部约束,只要有与原平衡状态不同的新平衡状态出现,即认为原状态失稳,据此导出压杆失稳的欧拉载荷。于是对于相同的物理现象,根据两种稳定性概念可得出截然不同的结论。

弹性杆平衡方程的非线性必然导致分岔与混沌等非线性现象的出现。由于时间变量被弧坐标所取代,动力学中的时间历程概念转换为弹性杆空间分布的几何概念。动力学中的周期运动转换为两端连接的封闭弹性杆。因此弹性杆的混沌概念应形象地理解为对初值极端敏感且在空间中无规则分布的往复缠绕状态。混沌动力学的理论和研究方法均可用于分析弹性杆的混沌几何形态。

在静力学范畴内研究弹性杆的稳定性,由于无时间变量参与,不可能根据挠性线变化的时间历程来判断受扰后弹性杆的运动趋向。更严格的稳定性判断必须在动力学范畴内进行。在分子生物学或其他相关的工程领域内,也提出一系列弹性杆动力学问题待解决。将动力学比拟理论的应用范围扩展为弹性杆的动力学,必须建立以弧坐标 s 和时间 t 为双重自变量的离散系统的动力学和运动稳定性理论。作为新的力学领域,这方面的工作目前还很不完备,相关的基本概念和定理都有待建立和系统化。

土木工程力学发展简史与基本研究方法简介

王长连

(四川建筑职业技术学院, 四川德阳 618000)

摘 要 近 20 年来,在土木工程力学绪论讲授中,基本上都以叙述力学发展简史与基本研究方法为契机,扼要地介绍了土木工程力学发展简史与基本研究方法。

关键词 力学发展简史,力学基本研究方法

引言

从教 30 多年,教建筑力学或土木工程力学也有 20 多年了,可以说,每次讲绪论时,基本上都要介绍一点力学发展简史。最近几年,除了坚持讲力学发展简史外,还增添了土木工程力学基本研究方法简介。这样做,使我受益匪浅。其主要收益是:在讲绪论时讲点力学发展简史心里觉得亮堂,好像亲眼看到或感到所讲力学内容,是怎样一步一步发展起来的,它们在整个力学中占什么地位,各部分之间关系怎样,讲到什么程度才能满足学生需要等。将所授力学内容放在这种情景中去讲,觉得很亲切、很简单、很好记忆,也觉得很容易把问题说清楚,讲这些内容就如数家珍一样,自然而然地从内心迸发出来,有一种非吐不快的感觉。老师这样讲,同学们听了也津津有味,知道所学内容的来历,以及它的用途,学起来有趣,复习起来有劲,当然就容易学了。

另外,在讲课中,当讲到什么新问题时,只要了解其发展情况,总要讲几句来历。同学们喜欢听故事,讲力学知识来历也就相当于讲故事,这样做也就使枯燥乏味的力学变得有趣了,同学们只要对力学产生了兴趣,那么学起来就自然而然有劲了。

最近几年,又增加了土木工程力学基本研究方法简介,其效果更好

了。这是因为,把分散在土木工程力学中各部分的研究方法,集中在绪论中讲,肯定是讲不深讲不透的,但在这里集中讲一讲,先有个印象,以后再讲时就不那么陌生了;过去一知半解,现在有了知道详情的机会,在这种情景中详细讲述,正好符合同学们渴求深知的欲望,所以同学们学起来就会觉得容易,这也就无形中提高了教学效果。

综上所述,在绪论中讲点力学发展简史与基本研究方法的好处是:

(1) 学习者知道了所学力学知识发展的来龙去脉,也就是对所学力学知识思路清晰,有了清晰的学习思路,在这样的情景中再学所学内容,显然就变得好学了。

(2) 学点力学发展简史,也就是先知道所学力学全局,在全局的指引下,学习其中一部分知识,当然就觉得心中有数了。

(3) 学习策略特别强调学习情景,将所学知识放在一定的情景中去讲,特别好接受,其实介绍力学简史,也就造就了学习力学的情景。

(4) 人人都有好奇心,人人都有追根究底的想法,在绪论中讲点力学发展简史与基本研究方法,就等于给同学们讲了力学知识的来历,也就满足了同学们的好奇心理要求。同学们在这种情景中听讲,当然就容易接受了。

(5) 讲点力学发展简史便于理论联系实际。

这是我讲绪论必讲力学发展简史与基本研究方法的一点感受,在此介绍给同行们共勉。为了使同行们有点切实感觉,现将我这方面的讲稿整理如下,仅供同行们参考。

1 土木工程力学发展简史

力学是研究物质机械运动规律的一门学科,是最古老的科学之一。远在公元前 6 世纪,人类对力、平衡和运动就有了初步的认识。公元前 4 世纪至前 3 世纪,中国春秋时期,在墨翟及其弟子的著作《墨经》中,就有了关于力的概念,杠杆的平衡及重心、浮力、强度和刚度的概念。

17 世纪至 18 世纪末,在这一时期,力学在自然科学领域占据中心位置,最伟大的科学家几乎都集中在这一学科中,如伽利略、惠更斯、牛顿、胡克、莱布尼兹、伯努利、拉格朗日、欧拉、达朗贝尔等等。由于这些杰出

科学家的努力,借助于当时取得的数学进展,使力学取得了十分辉煌的成就,在整个知识领域中起着支配作用。到 18 世纪末,经典力学的基础(静力学、运动学和动力学)已经建立并得到极大的完善,并且开始了材料力学、流体力学以及固体和流体的物性研究。

19 世纪,欧洲的主要国家相继完成了产业革命,大机器工业生产对力学提出了更高的要求,为适应当时土木工程建筑、机械制造和交通运输的发展,主要是材料力学、结构力学和流体力学得到了发展和完善。建筑、机械中出现的大量强度和刚度问题,由材料力学或结构力学来解决。作为探索普遍规律而进行的弹性力学基础研究,也取得了极大的进展。

20 世纪上半叶,在这个时期力学发展的主要推动力,来自于以航空为代表的近代工程技术。1903 年莱特兄弟飞行成功后,飞机很快成为重要的战争和交通工具。1957 年,人造地球卫星发射成功,标志着航天事业的开始。力学解决了各种飞行器的空气动力学性能问题、推进器动力学问题、飞行稳定性和操纵性等问题。由此人们清楚地看到了力学研究对于工业发展的先导性。

在这一时期,固体力学由古老的材料力学、19 世纪发展起来的弹性力学和结构力学及 20 世纪前期建立理论体系的塑性力学和粘弹性力学融合而成,且发展很迅速,很快又建立和开辟了弹性动力学、塑性动力学等新的领域。空气动力学则是流体力学在航空、航天事业推动下的主要发展。在固体力学、流体力学形成力学分支的同时,以质点、质点系、刚体、多刚体系统等具有有限自由度的离散系统为研究对象的一般力学,也在技术进步的促进下继续发展。另外,力学与工程技术的联系越来越密切,力学实验研究的规模越来越大,能力越来越强。形成了善于从复杂的自然现象、科学实验结果和工程技术实践中,抓住事物的本质,提炼成力学模型,采用合理的数学工具,分析掌握自然现象的规律或者进而提出解决工程技术问题的方案,最后再和观察或实验结果反复校核直到接近实际为止的科学研究方法。

20 世纪 60 年代以来,力学同计算技术和其他自然科学学科广泛结合,进入了现代力学的新时代。由于电子计算机技术的飞速发展和广泛应用,由于基础科学和技术科学间的相互渗透和综合,以及宏、微观相结合的研究途径的开拓,力学出现了崭新的面貌,满足工程技术要求的能力

也得到了极大的增强。

自 1946 年电子计算机问世之后,计算速度、存储容量和运算能力都有所提高。过去力学中大量复杂、困难而使人不敢问津的问题,由此有了解决希望。60 年代兴起的有限元法,发源于结构力学。一个复杂的连续体结构,经离散化处理为有限单元的组合后,计算机便可对这种复杂的结构系统计算出结果来,有限元法一出现,就显示出无比的优越性,被广泛地应用于力学的各个领域,甚至向传热学、电磁场等非力学领域渗透。

由于力学与基础和技术学科间相互渗透,产生了许多新的力学生长点。例如由冯元桢等创造的生物力学,吴学谋等创立的泛系力学,李宗吾创立的社会力学,吴甘霖创造的心力学与陈玉松创造的思想力学等,这只是各个学科相互渗透的部分事例。

在固体力学中,一般假设材料均匀连续、各向同性,但实际材料中往往存在着大量裂隙、损伤等,由位错理论和断裂力学,分别从微观和宏观的角度具体解决了上述问题。20 世纪 60 年代以来,断裂力学的迅速发展改变了工程界对强度或安全设计和材料性能评价的传统观念,促进了设计技术的发展。

力学不仅有着悠久而辉煌的历史,而且随着工程技术的进步,其本身也得到迅速的发展。力学研究的对象、涉及的范围、研究的手段都发生了深刻的变化,力学解决工程实际问题的能力也得到很大的提高。例如,由传统的金属材料、土木等材料力学行为的研究,扩大到新型复合材料力学行为的研究,出现了复合材料力学,再扩大到高分子材料、陶瓷材料、功能材料等力学行为的研究;由传统的连续体力学行为的研究,发展到含缺陷体,细观、微观结构力学的研究;由传统的电、光测实验技术研究到发展了全息、云纹、散斑、超声、光纤测量等力学实验技术;由传统的静强度、刚度设计,发展到断裂控制设计、抗疲劳设计、损伤容限设计、结构优化设计、动力响应计算、监测与控制、计算机数值仿真、耐久性设计和可靠性设计等。

对于土建高职高专和本科专业来讲,主要讲授土木工程力学,它是由理论力学、材料力学、结构力学中的主要内容,按照相似、相近内容集于一的原则,重新组合成的一门综合学科。它是一门重要的技术基础课,广泛应用于建筑、机械、冶金、煤炭、公路、铁路、石油、化工、航空和航天等工程中。由于改革开放以来,在这些行业都得到飞速的发展,高层建筑、超

高层建筑、大跨度桥梁和大型机械层出不穷,这样对力学的要求也越来越高,因而土木工程力学也随之得到发展。

总之,力学和工程是紧密结合的。力学在研究自然界物质运动普遍规律的同时,不断地应用其成果服务于工程,促进工程技术的发展;反之,由于工程技术进步的要求,也不断地向力学工作者提出新的课题,在解决这些课题的同时,力学自身也不断地得到丰富与发展,新的力学分支也就层出不穷。所以,力学是一门既古老又年轻的科学,它在古代和现代科学技术发展中都具有举足轻重的地位。可以预言:在未来的技术发展中都离不开力学,同时,在技术发展中也会促进力学本身的发展。

今天,人们已经普遍认识到,要使土木工程建设不断地在既有水平上得到提高和发展,就必须对土木工程力学进行研究;要使土木工程设计既保障工程安全可靠,又能省钱,土木工程建设人员就应准确、熟练地掌握土木工程力学,只有这样才能灵活、无误地解决土木工程设计、施工中遇到的问题,只有这样才能更好地为祖国的建设服务。

2 土木工程力学基本研究方法简介

土木工程力学是一门古老的学科,其本身有一套成熟的分析问题和解决问题的方法,且广泛地应用于各类工程技术中。它的基本研究程序是,实践—抽象—推理—结论,再回到实践的多次往复过程。在这个过程中常用的方法有:

2.1 受力分析法

一般讲,土木结构或构件上,受力都是比较复杂的。在计算内力和变形前,一定要弄清哪些是已知力,哪些是未知力,这些力之间有什么内在联系,根据计算需要确定研究对象,画出受力图,这一分析过程叫物体的受力分析。掌握这一分析方法十分重要,它是解决各种力学问题的前提,如果这一步错了,那么以后一切计算皆出错。

2.2 平衡条件和剖析法

平衡条件是指物体处于平衡状态时,作用在物体上的力系所应满足

的条件。由物体的剖析原理知,如果一个物体或物系处于平衡状态,那么它所剖分成的任一部分皆处于平衡状态。因此,当要计算哪个截面的内力时,就可假想地用一平面将这一截面切开,任取一部分为研究对象(哪部分简单就取哪一部分),画出受力图,利用平衡条件算出未知力,这是求解各种未知量的一种普遍方法。

2.3 变形连续假设分析法

土木工程力学的研究对象都是假设为均匀连续、各向同性的变形固体,尽管它不完全符合实际情况,但基本上可以满足工程要求,且能使计算大大简化。变形连续条件是指变形连续固体受力变形后仍然是均匀连续的。也就是说,均匀连续变形固体,在受力变形后,在其内部既不引起“空隙”,也不会产生“重叠”现象,这样就可以用数学连续函数来分析、计算问题。

2.4 力与变形的物理关系分析法

变形固体受力作用后都要发生变形,根据小变形假设可以证明,力与变形成正比(即力与变形为线性关系),可以用应力、应变间的物理关系来描述。如胡克定律就反映了材料的线弹性性能和力的最简单的物理关系。利用力、变形和应力、应变的物理关系可以方便地解决一些困难问题。

2.5 小变形分析法

小变形系指结构或构件,在外力等因素作用下产生的变形与原尺寸相比是非常微小的,为了简化计算,在某些具体问题计算中可忽略不计,即外荷载的大小、方向、作用点在变形前后都一样,仍用原尺寸进行计算,可以用叠加法计算内力和变形,这样可大大简化计算工作量,但对于有些问题这样处理是不妥当的,那已经属于大变形的范畴了,本书不予研究。

2.6 刚化分析法

前已叙述,土木工程力学的抽象研究对象为质点、刚体、质点系和变形固体,但从实际上讲,它的研究对象归根结底是变形固体(或变形质

点系),质点、刚体(或刚体系),那只是根据研究问题的需要而简化来的力学模型,这种简化方法叫物体的刚化,其刚化原理是,处于平衡状态的变形体,将其刚化后仍处于平衡状态。根据这一原理,在研究平衡问题时可将处于平衡状态的变形体当作刚体来处理,从而使计算问题得到简化。

2.7 实验法

材料的力学性质都是通过实验测量出来的。因此,实验是土木工程力学课程的一个重要的教学内容,通过实验可使学生巩固所学的力学基本理论,掌握测定常用建筑材料力学性质的基本方法和技能,提高学生动手能力和实事求是的思维方式。

浅谈力学史在力学教学中的几点作用

赵慧明 杨 静

(中国矿业大学理学院力学系, 徐州 221008)

摘 要 力学是自然科学中的一门基础学科,力学的发展有着悠久的历史。对学习力学课程的大学生而言,了解一些力学史,可以提高自己学习力学的兴趣,更可以培养自己的科学素养以及勇于探索的科学精神。本文结合自己的教学实践,简单介绍了力学史在力学教学中所起的几点作用。

关键词 力学史,力学教学,科学素养,科学精神

1 引言

众所周知,力学是自然科学中的一门基础学科,科学史很重要的部分就是力学史,所以,了解力学史有助于弄清科学发展的规律^[1~4]。从学习力学的角度来说,了解力学概念和理论的发展,不但可以加深对这些概念和理论的理解,而且可以进一步认识力学这门学科的特点。当代大学生作为未来力学工作者或科技工作者的一员,更应该把握住力学发展的趋势,了解它的动向,使自己自觉地推动力学前进。

对于理工科的大学生,力学课是一门重要的专业基础课,是其他专业课的前提。但是很多同学感到力学课比较难学。究其原因,同学们对于力学概念不能很好地把握,又不是很了解力学在工程中的重要地位;现在力学课的学时普遍偏少,上课的速度有所加快,同学们有可能陷入一个个的概念与公式的包围中,而不能灵活运用这些知识解决实际问题。如果在教学过程中,适当地加入一些力学史的知识,让同学们了解概念的来源,了解理论的发展过程和所基于的工程实际,则可能会促进同学们对力学概念和理论的理解;当同学们了解了力学家为解决工程实际问题所付

出的一代又一代的不懈努力后,他们又会为力学家们对科学的献身精神所折服,并化为激励自己前进的动力。

本文结合自身将一些力学史的知识加入力学课堂教学的实践,简单介绍力学史在力学教学中所起的作用。

2 增强学习力学知识的兴趣,提高教学效果

对很多同学来说,力学课都显得比较难学,概念多、公式多,理解上也有些抽象。实际上,力学是一门和工程实践结合紧密的学科,不仅来源于实践,在实践中的应用更是无处不在。如果把力学史中一些有趣的实例结合适当章节加以讲述,就会让同学对力学产生亲近感,感到力学不再是枯燥无味,而是生动活泼,有血有肉的了。下面略举几例加以说明。在讲授冷作硬化现象时,可以引入“瘤子甲”的故事:宋朝沈括在《梦溪笔谈·器用》中讲到:青海西宁一带的羌族善于锻造铁铠,甲片青黑色,光洁透亮,每个甲片上均有一个突出的小块,故名“瘤子甲”。北宋驻宁夏的一个叫韩琦的军事指挥官,曾拿此种铠甲作打靶实验,距离 50 步远,用强弩射它,却射不进去,其中一箭似乎射中了甲片,其实凑巧射中了甲片上用来穿带子的孔,但箭头却被“瘤子甲”的空洞刮得反卷了。后来,岳飞的孙子岳珂在《愧郈录》的《冷端(锻)甲》一则中谈到:“甲不及火,冷砧则劲可御矢,谓之冷端。”可见,冷锻甲片的方法在宋朝境内也曾用过。另外,在北京琉璃河出土的一件西周早期的铜戈,金相分析表明,它的刃部可能经过冷锻。在讲材料可以分为塑性和脆性两类时,可以简单提一下“双色剑”的故事,《吕氏春秋·别类》中有记载:春秋战国时,有一些青铜剑的刃部和脊部的颜色不同,刃部含锡多,呈白色,脊部含锡少,呈红色,因此叫做双色剑。这种双色剑,刃部含锡多,故硬度高,而锋利;脊部含锡少,故韧性好,不易折断。刃部与脊部坚柔配合得当,因此既锋利,又不易折断。在讲授弯曲内力时,可以简单讲一下中国木结构建筑中的一绝:斗拱。中国古代的大规模建造多采用木结构,而木材的顺纹和横纹的力学性质不同,横纹方向不抗压。中国古代工匠就发明了斗拱,用以分散压力对木梁的影响,使梁的承载能力得到改善。

在讲授理论时,讲解理论的起源和发展,不仅可以增加讲课的生动

性,活跃课堂气氛,增强同学对理论的理解及理论与工程实践的联系,更可以使同学认识到该理论的重要性,提高同学学习的主动性。关于压杆的理论,由于早期的结构设计对稳定性的认识不足,因此产生了一些事故,尤其是19世纪后期到20世纪初的这段时间内,由于钢铁材料在桥梁及其他一些结构中大量使用,使得承压杆变细,导致事故发生:1876年12月29日晚8时许,火车驶过美国阿什特比拉大桥时,大桥断裂,列车坠入河中,有92人遇难;1891年5月14日,一座莱茵河支流比尔斯河上的单轨铁桥坠毁,造成74人蒙难;1907年8月29日,加拿大魁北克劳伦斯河的大桥在施工中倒塌,桥上74人坠河遇难。经查,这些事故的发生均与稳定性有关,这也促使科学家对稳定性进行更深入、更全面的研究,才有了今天教材上的这些内容。这个事例不仅告诉同学“压杆稳定”一章的重要性,还告诉同学作为科技工作者责任之重大,以后工作,必须小心又谨慎,认真又仔细,保证自己工作准确无误。

3 激励探索未知领域的勇气,培养科学探索精神

牛顿从苹果落地这一现象发现了经典力学的基本规律。可以说,每一条力学理论的建立背后都有一段发人深思的故事。有的是如牛顿那样从司空见惯的普通现象中去发现科学真谛;有的则是经过无数次的实验及艰苦不懈的努力,甚至是几代人共同努力才获得一些结论;有的力学家年轻有为,有的力学家奋斗一生,直至耄耋之年,有的甚至为科学牺牲自己的生命。这些力学史实都激励着人们去思索、去探索自然的奥妙。这些力学史实都可以在适当的时机加以讲述,费时不多,却能收到良好的效果。例如讲授压杆稳定时,要讲欧拉公式,这时可以讲一下欧拉的生平及其对力学的贡献。当讲到欧拉13岁时入读巴塞尔大学,15岁大学毕业,16岁获硕士学位,年仅26岁(1733年)即成为彼得堡科学院院士时,同学们都对此充满了惊叹;然而命运多桀,1735年,当欧拉还只有28岁时,就瞎了一只眼睛,1766年,另外一只眼睛也瞎了,但是他仍然以坚强的毅力坚韧不拔地从事科学研究,一生共有著述886种,其中很大一部分是在双目失明的情况下完成的。欧拉一生中虽历尽挫折,仍勤奋工作终身。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计算新发现的

天王星轨道的方案,夜晚中风去世。生命不止、研究不息的科学探索精神吸引了同学们的眼光,同学们无不流露出崇敬之情。这样的事迹激励了同学刻苦学习的精神,无形中加强了为科学献身的意识。又如在讲求图乘法时,向同学们介绍该方法是由一名俄国大学生在学习莫尔积分法时独立导出的,这让同学认识到科学并不是高不可及的。只要认真思考,善于发现问题,大家都可以为科学的发展作出贡献。

4 培养科学的素养和实事求是的精神

在科学发展的道路上,并非一切都犹如我们的教材一章一章展开那样的一帆风顺,而是充满了困难和曲折。一名大学生应该不断培养自己的科学素养,养成一种能够正视困难、实事求是的科学精神。力学史中有很多这样的例子,可以让同学了解。例如,牛顿通过《自然哲学的数学原理》确立经典力学,并在 18、19 世纪用来解释客观世界的规律上取得了巨大的成功,后人称之为牛顿力学。牛顿力学也不是尽善尽美,但是由于牛顿在科学界的地位,两百年没有人能动摇牛顿力学,然而并非无人反对。如赫兹提出“力学原理的有限的有效性”,马赫也对牛顿的绝对时空观进行了批评,开尔文则在《19 世纪热和光的动力学理论上空乌云》中认为,经典物理理论(这里所说的经典物理本质上就是经典力学)本来是晴空万里,但是在上世纪末出现两朵乌云。在 20 世纪里,针对这两个困难,发展出了相对论和量子力学。这样的事实可以引导同学去发现和探索身边的力学问题,尊重权威,但不迷信权威,要敢于坚持自己正确的观点。另一方面,科学家也要敢于正视自己的错误,实事求是,不断推进科学的进步。纳维对中性轴的三次认识的过程是一个这样的例子:纳维在中性轴位置的问题上,从 1813 年到 1826 年的十多年间,经历了一个由错误逐渐转变到正确的过程。起初,在 1813 年,他认为中性轴的位置无关紧要,可以取在横截面的边缘;1819 年,他认为中性轴的位置应该这样来取:横截面上拉应力对中性轴的力矩应等于压力对中性轴的力矩;直到 1826 年,他才应用静力学三个平衡方程,给出了正确的结论:中性轴必定通过横截面的形心。纳维敢于否定自己,不断创新,才使中性轴位置问题得以正确解决。青年学生也要有这种否定自我的勇气,承认事实,以真理为准,以人

民利益为重,自强不息,把自己的事业做好。

5 培养爱国主义的情操

教书育人是一名教师的责任。在实施课堂教学的过程中,一方面让同学们学好专业知识,一方面可以通过力学史的知识来增强民族自豪感,培养爱国主义情操。力学,在中国有着悠久的历史:在我国山西朔县峙峪文化遗址中发现了距今 3 万多年的、做工精细的石簇,商周时期的青铜鼎的柱足及戈、矛、戟的横截面形状都符合现代力学设计原理,商周的车轴中间粗、两头细,这也符合变截面梁(等强度梁)的设计;战国秦昭王时蜀郡守李冰父子主持修建的都江堰,巧妙地应用了流体力学的原理,工程施工巧妙,它保证了成都平原两千多年来的灌溉、防洪,使成都平原成为天府之国;东汉经学家郑玄在注释《考工记·弓人》时写道:每加物一石,则弓长一尺。这是历史上对弹性变形的最早描述,在胡克之前约 1 500 年,故胡克定律亦称为郑玄-胡克定律;隋朝李春率人建造的赵州桥,是现存世界上最古老、跨度最大的敞肩石拱桥,它在结构、地基的处理、外观上都达到尽善尽美,两侧小拱的存在减少了桥的重量,增加了可靠性,使它历经千余年而不坏,在 1958 年还能通过载重汽车,外国人称:“它的结构是如此合乎逻辑和美丽,使大部分西方古桥相比之下显得笨重和不明确。”在 1991 年被美国土木工程师学会选定为 12 个“国际历史土木工程里程碑”之一;建造于辽代清宁二年(1056 年)的应县木塔,是世界上现存最古老的木结构塔式建筑,采用双层套筒结构,内外紧密结合,联成一体,符合现代高层建筑理论,是一种抗震性能最好的体系,900 多年来,应县木塔经历了烈日严寒、狂风暴雨以及地震(1305 年应县曾发生烈度为 8 级的地震)和炮弹袭击,而至今仍然巍然屹立。力学在中国有许多让中国人引以为自豪的成就,在讲课时,适当向同学介绍,可以极大地鼓舞同学们的民族自尊心、自信心、自豪感和爱国主义的情操,并进一步转化为学习的动力,提高学习效果。

6 结语

通过多次教学实践证明,将力学史的知识适当地加入课堂教学的做

法是成功的。同学们对此有很高的兴趣,同时也加深了对书本知识的理解,活跃了课堂气氛,提高了教学效果。同学们对这种教学方法也是认可的,在同学对课堂教学效果的评价中多次给出“优”的评价。

当然,让同学们多了解力学史的知识,还有许多其他的影响,如可以从前辈科学家的创新活动中学习他们处理问题的方法,可以从各种典型案例中找典型人物,引为自己的榜样,树为自己的学习楷模,等等,在此不再详细叙述。

参考文献

- [1] 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
- [2] 老亮. 材料力学史漫话. 北京: 高教出版社, 1993
- [3] 周光炯. 从考古看史前流体力学的发生与发展. 力学与实践, 2001, 23 (5): 72~77
- [4] 中国大百科全书力学编辑委员会. 中国大百科全书·力学卷(电子版). 北京: 中国大百科全书出版社, 1999

刍议力学史与方法论融入工程力学教学的做法

冯辉荣^{1,2} 罗仁安^{2,3}

(1 福建农林大学交通学院,福建福州 350002;

2 上海大学,上海市应用数学与力学研究所,上海 200072;

3 上海大学理学院,上海 200444)

摘 要 本文论述了在力学教学过程中渗透力学史,贯穿方法论,培养创新型人才的重要意义,其中主要阐明了工程力学要求实施创造教育、力学研究中的创新方法、工程力学学习研究中培养良好的认识论和方法论意识、工程力学“一课多能”及“一题多能”对创新能力培养的实例等方面的问题。

关键词 力学史,方法论,工程力学,创新型人才

引言

第一届全国力学史与方法论论文集中收录了武际可、戴世强、隋允康、钟万勰等教授、专家学者们就力学史与方法论方面的 25 篇论文成果。他们的独到见解,和创造性思维使笔者受益颇丰,心中对某些观点产生了共鸣,萌生了对力学史与方法论一吐拙见的冲动。在前辈们的启发下,现将几年来从事力学教学与研究中对力学史与方法论的浅薄见解写出来,希望得到各位专家学者们的指点和斧正。正如隋允康教授提出“融入史料,补充猜想和贯通方法论”的做法,旨在升华力学教学的水平^[1]。笔者将从工程力学发展创造教育、培养创造型人才、力学研究中的创新方法、科学与技术的方法论、工程力学课中如何渗透力学史与贯穿方法论的“一课多能”作用,即工程力学中可融入德育、智育、体育、美育等的素质教育、认识论与方法论、创造性思维、对“五基”人才的培养作用和在教学与科研相结合中培养实践能力等作用。最后以“一题多能”教学实例加以说明,旨在点明在力学教学过程中渗透力学史,贯穿方法论,培养创新型人才的

重要意义。

1 工程力学要求实施创造教育,培养创造型人才

1.1 创造型人才是创造教育的要求,是力学发展与时代发展的要求

恩格斯指出:“科学是研究未知的东西,科学教育的任务是教学生去探索,去创新。”创造教育是对传统教育的重大改革^[2]。“新世纪素质教育工程”是教育部确定的 2003—2007 年 5 年 6 大教育工程之一^[3]。而培养创新型人才已成为新世纪教学改革的中心议题。许多高校也将“锐意创新”作为校训。许多科学家以“锐意创新”为治学的主要精神,例如戴世强教授在《钱伟长先生科学研究的成果和方法》一文中回顾了钱伟长先生的治学生涯和学术成就,探索了他的学术思想和治学之道^[4]。其中“锐意创新”就是钱伟长院士治学的主要精神,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,尽量用新观点、新方法去解决新问题^[4]。钱先生一针见血地指出:“一个人成功不成功,不是看他是不是大学毕业,而是看他有没有创造性。”钱先生的学术思想和治学之道无处不显示出他作为一位遐迩闻名的力学家、应用数学家、教育家和社会活动家对创新能力的要求。他的教育理论同样给教育界带来了创新的理论与活力。

钱伟长先生在《力学工作者的任务和方向》^[5]中指出:“现在全国各个学校,除了文、法还没有力学外,理、工、农、医都有力学,连体育学院也有力学。因为力学是无处不存在的,从研究自然现象的理科到研究工程生产的工科,研究人身的医科,研究植物的农科,都有力学问题。……力学已有近 400 年的历史,比任何学科都早。自然科学是从力学开始,起初如自然哲学。在自然哲学里仅有一本书是牛顿写的,名字就叫《自然哲学的数学原理》。那本巨著到现在已经 300 多年,它历史最长,内容最丰富。……如想全面发展、创新、前进,就需要力学。第一是大批生产任务要我们来帮助解决。解决生产实际中出现的难题,是我们义不容辞的责任。第二是大量的教学任务。国家的教育肯定还要发展,只要发展生产,就要大量的科技人员,任何科技人员的培养都离不开力学。我们的知识分子不是

多了,而是少了。第三,经过了那么多年的闭关自守,我们的力学落后了,有许多空白。别人已经发展了,我们却还不知道。我们要大量去填补这些空白,要进行若干开发性的研究工作。”工程力学作为力学的一个分支同样担负着若干开发性的研究工作,在此,创造性人才就是力学发展和时代发展的要求。

因此,作为一位力学工作者是否能在老先生的指引下,在理论知识的教学过程中,不断探索新的视角,把训练学生的创新思维、创新方法、创新素质以及培养创新意识放在首位,而不是满足于对基本理论的一般理解和应用,不是单纯的就事论事,则可能发现新问题,找到理论发展的新知识增长点和理论运用的新领域,从而真正完成从简单到复杂、旧知识到新知识、旧理论到新理论的升华和创新过程。与此同时,教师本身也将得到进一步的提高,和方法论的升华。“创新是核心,人才是关键。”对于每位老师,不但要有创新意识,更要懂创新理论和创新方法论。当然要培养创新型人才就必须了解创新型人才的结构要求。

1.2 创新型人才的基本智能结构^[6]

创新型人才智能结构如图 1 所示。

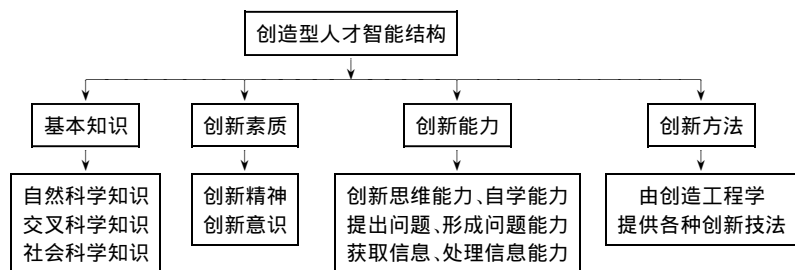


图 1 创造型人才智能结构图

1.3 渗透力学史与方法论是工程力学创造教育的要求

什么是创造教育?创造教育是创造学的一个分支,它是研究教育的对象、目标、内容、特征、方法和管理,开发人们创造力的一门科学^[7]。在当前数字化信息时代的人才竞争状态下,为了大力开发创造型人才,尤其在儿童、少年,和青年、中年等的不同层次教育中,积极发展创新教育。

创造的过程实质上首先是构思解题方案的过程,解题是广义的,可能是物质的、精神的,也可能是系统的或局部的。工程力学能提供创造教育的载体和平台,如果能明确创造教育的目标和融入创造教育方法论,就能达到培养创造型人才的要求。

(1) 创造教育的目标。创造教育以开发创造能力为目标,而传统教育以知识积累为目标。创造教育要求人们突破原有的知识范围,尽力扩大新的知识。现有知识的突破,则可通过创造教育以提高素质,进而掌握创造思维、创造技法,不断地开发创造力。现代的创造者,不仅需要扩大专业知识,更重要的还需要接受多学科科学。通过现代化知识的学习、对原有传统方法加以研究总结,并与新学科、文学艺术等学习相结合,就会大大提高创造能力。中外力学界的许多著名科学家都是学识渊博的人,比如钱学森院士说过:“钱伟长同志是个多才多艺的人。”这是一个恰如其分的评价^[4]。培养、开发创造型和通才型,并具有综合创造能力的人才,这就是创造教育的目标。

(2) 创造教育与传统教育方法的区别(见表 1)。

表 1 创造教育与传统教育方法的区别

类 别	一般传统教育	创 造 教 育
类 型	单纯教学型	探讨开发型
目 的	传授知识	开发创造思维能力
方 法	1. 单纯在课堂	1. 课堂和走出课堂、参观现场、渗透历史,做社会调查
	2. 单纯教书讲授	2. 讲话、讨论、交流总结、质疑、答疑
	3. 单纯按教材讲	3. 课本和现代知识相结合 思想、方法论和实践相结合(含力学实验) 教学和科研相结合
	4. 固定知识和目标范围	4. 开发和超越原有知识范围,开发创造思维和能力
	5. 单纯理论性	5. 理论与实践相结合
特 征	1. 记忆型	1. 应用探索型
	2. 学生型	2. 综合创造型

(3) 渗透力学史与方法论是工程力学创造教育的要求。从创造教育与传统教育方法的区别可以看出,在工程力学的教学与科研中,尤其在创造教育中渗透力学史与方法论,与实践相结合,不但可以增添课程的趣味性,走出课堂、参观现场、做社会调查、质疑、答疑、理论与力学实验结合,教学和科研相结合,超越原有知识范围,开发创造思维和培养综合创造型能力等都说明渗透力学史与方法论是工程力学创造教育的要求。

2 力学研究中的创新方法

力学中的创造思维方法很多,在此仅列出十种常用的创新方法,如图2所示^[7]。按创新型人才的基本智能结构要求,作为力学工作者本身应具备一定的创新型人才的素质,才能在工作中和人才培养中发挥更好的作用。不但要了解自然科学知识、交叉科学知识,还要了解社会科学知识,当然还要知道力学研究中有哪些创新方法,并将这些方法融入教学中去。

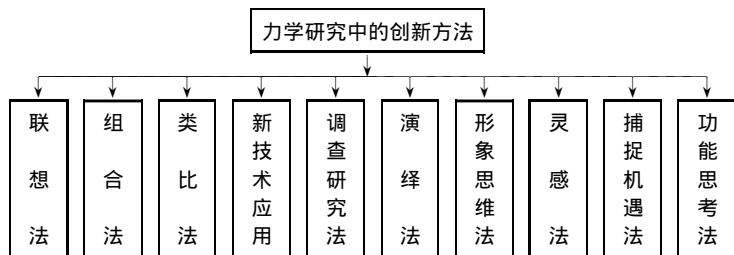


图2 力学研究中的创新方法

3 工程力学“一课多能”

教学过程不是纯粹的知识积累,而是不断创新的过程,应使工程力学发挥“一课多能”的作用。从创造教育与传统教育方法的区别可以看出,在工程力学的创造教育中应渗透力学史和方法论,并与实践相结合,运用联想法、功能思考法等创新方法组织教学。

3.1 工程力学的德育、智育、体育、美育功能

在工程力学的教学过程中,渗透力学史与方法论可起到培养学生德育、智育、体育、美育的功能,例如在上第一堂绪论课中,可以多介绍学科的发展历史,科学家研究的坚苦历程,学科前沿与动态,以及我国力学发展与国际上的差距,介绍我国力学家李四光、郭永怀、钱学森、钱伟长等人为力学的发展所付出的努力和为了祖国的繁荣与富强所做出的牺牲与贡献,介绍他们爱国奉献、锐意创新的治学精神等。通过这些可大大激发学生的爱国热情,学习前辈的治学精神与方法,学习前人治学与做人的优良品质。工程力学的学习与研究过程是锻炼学生发现问题、提出问题、分析问题、解决问题等的智育过程。介绍力学原理在体育运动中的应用,如抛物线原理,可以让同学在体育运动中体会力学知识,达到体育与力学教育的双重效果。介绍世界上的优美建筑如悉尼歌剧院的历史,不但体现了“混凝土的建筑艺术”的美学价值,并让学生了解到“板壳力学”等力学知识在工程中的应用与发展,体现了人类运用力学知识的优美设计的美学价值。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^[8]。

3.2 工程力学学习研究中培养良好的认识论和方法论意识的功能

工程力学的科学研究中渗透着许多认识论与方法论等自然辩证思维的应用。力学是以实验为重要基础的学科,许多力学理论和规律都是从实验中归纳总结出来的。在观察实验的过程中,力学工作者们对以下若干认识论问题都应引起充分注意,并应将其渗透在力学的实验教学与科研工作中。

(1) 工程力学中关于观察与理论的关系:

波普尔、汉森、库恩等哲学家否认有纯粹的中性观察,明确提出“观察渗透理论”。观察之所以渗透着理论,首先是因为观察不仅是接收信息的过程,同时也是加工信息的过程。人在观察过程中必然对外界的信息进行挑选、加工和评价。这就与一个人的理论知识背景有关。不同的知识背景、不同的理论指导,甚至不同的生活经验,对同一事物会得出不同的

观察陈述^[9]。例如,在低碳钢的拉伸实验中,通过实验的观察,可以加深学生对低碳钢力学性能对应的四个变化过程的认识,并体会观察与理论的关系,而在普通人眼里仅仅是看到试件被拉断了。又如,在过年、重大的活动及庆典时放的礼花,普通人看到的是五颜六色、异彩纷呈的景色,而力学工作者在欣赏的同时,可能想到了爆破的机理、焰色反应等不同的问题。爱因斯坦指出:“理论所以能成立,其根源就在于它同单个观察联系着,而理论的真理性也正在此。”^[10]总之,观察与理论是辩证的统一,统一的基础是观察,我们在工程力学教学与研究中都应充分重视这一点。

(2) 工程力学中关于观察与实验的客观性:

观察的客观性是由物质世界的客观实在性所决定的。但观察又是一个复杂的认识过程,是观察者的认识和实践活动。如何保证观察的客观性呢?这需要解决以下几方面问题:

首先,科学观察要求实验结果可以用某种标准的方法进行重演。这是科学研究中必须共同遵循的基本原则。实验中发生的情况或事件能够被多个观察者重复检验,一般来说,就保证了科学实验结果的客观性。不可重复的观察和实验结果,其客观性就会受到怀疑。众所周知,诺贝尔科学奖金有一套严格的评选制度,所有成果都要经过一段时间的考验,凡实验结果都要经过多次重复验证。因此,在 1901 年至今的全部授奖成果中,除个别例外,没有发生其实验结果后来被否定或被发现是弄虚作假的。其次,科学观察要求以正确反映客观事物本质的理论为指导。这类理论能提供正确的概念系统、推理规则和消除假象与误差的方法,从而把日常观察中模糊不清的现象变得清晰起来。再次,科学观察要求使用先进的观测技术和观测仪器。这是保证观察客观性的物质基础。最后,科学观察要求一个科学工作者要有严谨的实事求是的学风,即要尊重客观实际,不急于求成,全面地、坚持不懈地进行长期观察,努力防止片面性,避免以主观愿望影响观察和数据整理。这既是保证观察客观性的前提,也是获得科学成果的重要条件。

(3) 工程力学中关于观察实验中的机遇:

在科学实践过程中由于意外的事件导致科学上的新发现,即在客观世界中出现的科学发现的机会,称为机遇,机遇是相对于原来预定的研究计划和目的而言的。它的最大的特点就是意外性。它是有利于创造性思

维活动的客观条件^[11]。工程力学教学与科研中应培养学生抓住一切机遇的意识。

机遇产生的客观根据在于自然界本身就是偶然性和必然性的辩证统一。偶然性以必然性为支柱,必然性通过偶然性为自己开辟道路。当偶然现象出现的时候,如果能捕捉住它,并进一步揭示出其背后的必然性,就能作出科学发现。

为什么有的人抓住了机遇,获得显著成绩,有的人却放过了机遇,这中间的原因固然十分复杂,但从认识论上来说却有两点是值得注意的。第一,在机遇面前,一个科学家取何种态度,在很大程度上取决于他对偶然性和必然性的理解,如果在他看来,这种意外出现的现象只是一种纯粹的偶然性,他会放弃它,继续走自己选定的认识道路;反之,如果他能意识到或感觉到,在这种偶然性的背后可能隐藏着某种必然性,这种必然性或者是已有的科学认识尚未揭示的,或者可能是与原有的科学认识相悖的,那么他就无论如何也不会把它轻易放过了。第二,在上述情况下尽可能作出后一种判断,还需要有作为科学认识主体及时发现问题的认识能力上的准备。它要求科学工作者(力学工作者)要具有开放的思路、活跃的思想和广博的知识背景。人们常说,在科学上偶然性往往大于必然性,很多科学成果都是科学家“想入非非”的结果,这些科学上的“异端”成就了科研上的“领跑者”。而诺贝尔奖的宗旨正是奖励有开创性的科学家^[12]。

正如巴斯德所说:“在观察的领域里,机遇只偏爱那种有准备的头脑。”有所准备,才能有敏锐而深刻的洞察力。

3.3 工程力学对“五基”人才培养的功能

“五基”教学就是在基础理论、基础知识和基本技能这“三基”基础上,加入基本思维和基本能力,我们称之为“五基”教学^[13]。如何开展“五基”教学,为本科教学提出了新的研究课题,应该鼓励处于教学第一线的广大教师在教学过程中不断实践、不断创新、不断总结。工程力学的解题、质疑、答疑、问题式教学和启发式教学等过程都可为工程力学“五基”教学提供实践的平台。另外,应将教学与科研相结合,培养实践能力。力学实验是培养实践能力的重要环节。教学中培养学生关注力学史与方法论,关注力学发展新动态。

4 工程力学“一课多能”及“一题多能”对创新能力的培养实例

举例法是力学教学中的重要方法。教师通过对典型例题的分析、讲解和延伸,不但可以有效地帮助学生正确理解、掌握和梳理知识,而且能在教学过程中培养和锻炼学生的创新能力。但是,因为举例法的普通,它常常会在教学中被忽视,而未能发挥更好的作用,更难以起到创新能力的培养作用,留给学生的只是“题海”的乏味。因此,应从最平凡最普通的例题入手,对课堂教学中例题的作用与组织设计应引起教师们的高度重视。

4.1 多功能例题的特点

在此只对多功能型例题作必要的说明。多功能型例题是指例题的题干基本相同,却可以改变问题的题设,设计成多个题设,各题设之间可以不相互依存,每项题设可包含一个知识点,从而形成一个有贯穿多个知识点功能的题干载体。它具有延续性、可分解性、可综合性、联想创新性等特点。多功能例题的延续性与可分、合性就意味着它的联想创新性。通过对同一例题的不同设问,有利于开展问题式教学和启发式教学;有利于学生充分发挥自己纵、横双向联系能力,开展知识点的横向、纵向比较;有利于调动学生的课堂积极性;有利于学生展开讨论与交流;有利于学生联系生活实际;有利于学生课后的总结与复习;有利于课堂的互动性与活跃性;有利于提高学生分析和解决工程实际问题的能力,培养创新能力。

4.2 “延续性多功能”典型例题在工程力学教学中的应用举例

在讲解运动学和动力学中,选择“沿直线轨道以匀速 v_0 只滚不滑的车轮”作为“一题多能”典型例题的题干。它贯穿了近 10 个知识点:点的运动学——动点的运动合成与分解——速度合成定理——加速度合成与分解——平面运动分析——基点法——瞬心法——平面运动刚体的动能。具体教学过程因人而异,在此不便展开,但应注意以下一些方式和方法。

“延续性多功能”典型例题在讲解时,以培养学生独立思考的能力为

主,而不应灌输死知识,导致学生死记硬背。应在例题讲解之前进行置疑,启发学生应用所学知识点,先进行几分钟的独立思考、演练,调动学生思维积极性之后再进行讲解,这样有利于学生跟着教师的思路一起完成例题的解答。在讲解中抓住“三基”,开展“五基”教学。适时强调重点、难点所在,解决问题的关键所在。工程力学的解题、质疑、答疑、问题式教学和启发式教学等过程都可作为“五基”教学提供实践的平台。这样,才能真正起到“一举多得”的很好效果。

5 结语

引用隋允康教授文[8]中所述:如果说,某一学科是一座大厦,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,方法论和科学史不如学科本身那样完整,需要予以重视,给予研究。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修养,还可以向学生们提供有兴趣的、深入浅出的课程。

参考文献

- [1] 隋允康. 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. 见: 武际可, 隋允康主编. 力学史与方法论文集. 北京: 北京林业出版社, 2003, 160~169
- [2] 戚昌滋, 侯传绪. 创造性方法学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987, 10
- [3] 徐光宪. 我对素质教育的认识. 大学化学, 2004, 19(3): 1~7
- [4] 戴世强. 钱伟长先生科学研究的成果和方法. 见: 武际可, 隋允康主编. 力学史与方法论文集. 北京: 北京林业出版社, 2003, 160~169
- [5] 钱伟长. 钱伟长文选. 杭州: 浙江科学技术出版社, 1992, 157~168
- [6] 谢芝馨. 新编工程力学学习指导书. 北京: 机械工业出版社, 2002, 1
- [7] 戚昌滋, 侯传绪. 创造性方法学. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987, 6~13
- [8] 隋允康. 浅论力学史和方法论研究的原动力、范畴和探索途径. 见: 武际可, 隋允康主编. 力学史与方法论文集. 北京: 北京林业出版社, 2003, 119~122
- [9] 姜振寰. 科学技术哲学. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2001, 79~84
- [10] 爱因斯坦文集. 第1卷. 北京: 商务印书馆, 1976, 115

- [11] 李思孟. 自然辩证法新编. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997, 299, 308
- [12] 10 年? 20 年? 中国科学家问鼎诺贝尔科学奖——除了时间, 还需要什么. 文汇报, 2004-10-11
- [13] 施开良, 陈令梅, 姚天扬等. 培养创新型人才要重视基础抓好“五基”教学. 大学化学, 2004, 19(3): 16~18

动态剪切力学测试实验发展综述

崔云霄¹ 卢芳云¹ 陈 军²

(1 国防科技大学理学院技术物理研究所, 长沙 410073;

2 西南流体物理研究所, 绵阳 410073)

摘 要 动态剪切实验是指剪切加载应变率处于 10^2 以上高应变率力学实验, 本文回顾了近 40 年来高应变率剪切力学实验的发展现状, 并重点研究了基于 Hopkinson 杆的高应变率剪切实验检测技术的发展现状, 分析比较了现有的几种测试技术存在的优缺点。

关键词 高应变率实验, 动态剪切, Hopkinson 杆

1 引言

不同加载条件下材料可能表现出不同的响应特点。在高应变率动载作用下, 材料和结构的响应涉及到应变率相关和波传播效应, 与其在静态加载下的行为大相径庭。因为像强度、韧性这一类力学性能可能会随应变率的改变而改变, 所以需要在对应应变率条件下完成材料的力学测试, 以便对材料的性能做出正确的评估。

早在 19 世纪, 就已经有科学家开始探索了高应变率力学实验, 当时的实验仅仅是为了探索准静态实验的外推公式。真正进行大规模高应变率力学实验技术研究是从 20 世纪开始的。在二次大战影响和带动下, 军事科技和军工企业为研制大规模杀伤性武器, 纷纷对各种炸药等含能材料的材料本质和爆炸性质进行研究, 这样就加速了这方面的实验研究。

在战后, 随着高速切割和冲压机械加工的发展, 研究材料在冲击作用下的力学性能和结构响应成为机械设计的需要。另外汽车的普及所带来的撞车等交通事故, 研究物体在高速冲击下的材料响应以及爆炸冲击等工程问题, 也带动了高应变率剪切实验的发展。伴随着人们对材料性质

研究的需求和对高应变率下的力学本质的探索,这门新兴的技术越来越受到人们的重视。

高应变率下的实验可以说是对低应变率下的实验技术的一种推广,但是它又有自己的困难。因为在高应变率下,材料中存在应力波的传播,一方面,应力波理论的建立要依赖于对材料力学性能或本构关系的了解;另一方面,材料在高应变率下的动态力学性能的研究需要依赖于应力波理论的分析指导。这两方面的问题互相耦合构成了高应变率实验技术发展以及固体力学动力学研究的困难^[1]。

传统的高应变率实验对轴向的压缩、拉伸研究较多,但在实际应用中,材料的受力乃至破坏,一般是处于复杂应力状态下,伴随着法向应力和剪切应力的复合加载。在复杂应力状态下,材料的变形和破坏模式等都表现出明显不同于理想加载情况的行为特征,惯性效应和应变率相关等影响明显。很大程度上,材料的破坏是由于剪切造成的。剪切实验消除了拉伸实验中存在的颈缩问题,也消除了压缩实验中的鼓包问题。另外,将轴向压缩、拉伸的数据换算到切应力、切应变很难推广到高应变率范围。正是这一原因,各国科学家对高应变率剪切实验进行着不断探索和实践。

对于静态或者准静态的实验,一般是使用材料试验机。在高应变率力学实验测试当中,动态剪切测试又是发展相对缓慢的,这主要与高应变率下的纯剪切实验实现较为困难有关。就动载技术而言,20年前,国内外开始发展利用气炮、电磁炮加载飞片进行平行倾斜碰撞^[2~4]实验和利用爆炸加载各向异性石英晶片传递冲击波^[5,6]来实现复合压剪动载的实验,用于研究含能材料的特殊起爆机制,或者研究惰性材料的动态破坏行为,目前这类实验已有了一定的工作基础。但是冲击波的传播事实上已涉及到结构响应的效应,很难从这类实验直观得到材料应力应变本构规律的描述。

在1914年Hopkinson首先提出了压杆技术,采用一根长的弹性杆研究子弹冲击或是炸药爆炸造成的压力,当时是通过测量杆动量对冲击载荷的脉冲波形进行预估^[7]。1949年,Kolsky改进并提出SHPB(分离式Hopkinson压杆)技术^[8],将原来的一段加载杆改为入射杆和透射杆两部分,试件夹在两根压杆之间,将入射、反射、透射三部分信号分开测量,从

而使这一装置可用于测量材料在冲击载荷下的应力应变关系。

SHPB 技术本质是基于—维弹性波理论的,其实验原理很简单,即通过在杆的一端施加载荷产生一个弹性波 ϵ_i 在杆中传播,弹性波通过试件时,使试样发生高速变形,传入透射杆一个弹性波 ϵ_t ,同时反射回入射杆一个弹性波 ϵ_r ,分别记录下入射、透射、反射的波形变化,根据—维应力波理论确定试样材料的应变率、应变和应力:

$$\frac{d\epsilon_s}{dt} = \frac{c_0}{l_0}(\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) \quad (1)$$

$$\epsilon_s = \frac{c_0}{l_0} \int_0^t (\epsilon_i - \epsilon_r - \epsilon_t) dt \quad (2)$$

$$\sigma_s = \frac{EA}{2A_s}(\epsilon_i + \epsilon_r + \epsilon_t) \quad (3)$$

在 $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 的高应变率范围, SHPB 技术是一种成熟的实验技术,广泛用于获取材料压缩应力应变曲线,建立材料的动态本构关系,为材料动态力学性质研究提供了有效途径。Hopkinson 杆技术设计巧妙,测试方法简单易行,并且试件的应变率范围恰好包括了流动应力随应变率变化发生转折的应变率,因此大多数的动态剪切实验都是围绕 Hopkinson 杆技术进行改进的。

2 研究现状

目前,基于 Hopkinson 杆的高应变率剪切动载实验技术的实验思路主要有三类:

2.1 直接利用现有的 Hopkinson 压杆 (SHPB, Split Hopkinson Pressure Bar), 对试样进行改造

直接利用现有 SHPB 装置,改造试样形状进行剪切实验是一个比较直接的思路。1981 年 L. W. Meyer 等人提出帽形试样^[9],将压应力转化为试样某部位的剪应力,用于测试剪切破坏强度。这一思路可以在无扭转装置的条件下实现对材料的剪切变形,以及实现对材料的损伤断裂实验。利用帽形试样可以研究材料的绝热剪切带,观察微观结构的变化。

一时间受到各国力学家的关注,到现在仍然在使用^[10~12]。1994年 L. W. Meyer 提出一种预扭斜圆柱的试样结构^[13],用于研究绝热剪切。这一方法同样实现了对材料的压剪加载。1999年魏志刚等人采用这一种试样对钨合金的绝热剪切行为进行了研究^[14]。2000年魏志刚等提出阶梯形圆柱试样用于研究金属绝热剪切行为^[15]。2002年 D. Rittel 等提出缺口圆柱试样^[16],即在圆柱体试样外侧预制两条斜 45°刻槽,利用 Hopkinson 杆实现剪压加载。

这些改进的方法有其不同的研究背景,有的是用于材料破坏现象的观测或定性研究,虽然实现了压剪(或多向应力)复合加载,但用于材料本构参数测试存在局限性。有的可以利用测到的压缩信号反演试样受载,但是其本质与动态剪切的实现存在区别,应力状态不理想,定量分析测试效果不是太好。研究试样存在的问题还有试样本身的复杂性带来的加工、数据处理的困难。可见,仅仅改进试样来实现动态剪切可能是不够的,特别是对于实际应用当中的压剪复合加载的分析的要求难以满足,改进试样甚至会增加量化的复杂性。

2.2 Hopkinson 扭杆(TSHB,Torsional Split Hopkinson Bar)技术

1966年 W. E. Baker 发现材料的动态压缩实验中,对相同的材料,不同的研究者往往得到差异较大的结论。他认为在分析中导致误差的主要原因是纵向冲击下由于横向运动本质是三维的,而分析中使用的是一维波动方程。W. E. Baker 根据 Hopkinson 杆原理最早提出扭杆加载思想^[17],其夹钳机构由滑块组成,气枪子弹打击滑块使夹钳放松,产生扭矩脉冲,用于测定材料在冲击扭转下的应力应变关系,得到相应的扭转剪切的分析数据。扭杆克服了 SHPB 实验固有的两个缺点^[18]:

- (1) 弥散效应所导致的波形振荡影响数据处理和结果的分析;
- (2) 摩擦效应破坏了试件的状态均匀。

扭杆技术就其加载方法来说,有三种方式:储存应变能突然释放、爆炸加载和气动加载。W. E. Baker 最初使用的加载方法属于储能释放法。1971年 J. Duffy 通过炸药爆炸加载形成较短的脉冲上升时间,并在加载杆和入射杆之间增加了一个脉冲整形器对 1100-O 铝进行了成功的实验^[19]。该实验为以后的扭杆实验奠定了坚实的基础。同年,Nicholas

采用气动加载^[20],在输入杆的一端对称固定两个悬臂杆,两个启动活塞成相反方向作用于悬臂杆上,产生冲击扭矩。1972 年 Frantz 和 Duffy 将扭杆用于应变率递增条件下的实验^[21],即先用静态方法预扭试样,不卸载,直接叠加动态冲击扭矩,他们证明了 Hopkinson 扭杆是研究金属中应变率历程影响的一种很方便的方法。而后不少的力学家们在 J. Duffy 实验的基础上主要是对加载装置作了大量的研究,目的都是为了克服扭杆本身具有的入射波幅值控制困难的缺点。1976 年 Eleiche 改进夹钳,用两个铰接的半圆桥臂和切槽螺栓组成,螺栓拉断时释放扭矩^[22]。1984 年 T. Vinh 等使用马达驱动的电磁加载装置,使扭杆应变率加载较为平稳^[23]。在 20 世纪 80 年代初,国内的力学家也开始探索研究扭杆实验技术^[24]。2004 年 H. Huang 为研究动态摩擦对剪切破坏的影响,在扭杆基础上改为压扭复合加载^[25]来实现压剪加载,为扭杆的扩展应用给出了一个较好的思路。

由于不存在轴向实验时存在的惯性与摩擦的影响,扭杆测试涉及的实验范围很广,可对不同材料进行实验。虽然扭杆克服了 Hopkinson 压杆的弥散效应、泊松比导致的颈向膨胀等不良影响,它也存在明显缺点:

(1) 加载波对实验影响较大,只要加载脉冲是有干扰的,它会一直保持这种特征,从而就没法给出恒应变率加载;

(2) 由于使用短的、薄壁管状试样,试样的加工费用较高,制作困难,处理数据麻烦;

(3) 另外稳定的固定试样在扭杆之间,以及阻抗匹配也是一个费神的问题。

总的说来,Hopkinson 扭杆是高应变率剪切实验中一个常规方法,可以提供可靠的材料剪切数据,适合进行递增应变率实验以便对应变率历程进行研究。对于扭杆加载,因为试样形状复杂,加工困难,后续实验数据处理存在困难等,扭杆提供的剪切数据属于扭转剪切,与实际中存在的复合压剪的数据存在差异。即使对于压扭复合加载,因为压、剪应力波难以同时达到,不能实现动态压、剪载荷的同时作用。因此,从研究复杂应力下材料本构关系的需求出发,希望发展能形成相对理想的复合应力状态(例如轻气炮平面斜碰撞实验造成的平面压剪复合动载),便于进行材料本构参数的定量测试和分析的复合压剪动载实验技术。从根本上说,

扭杆也是属于改进 Hopkinson 杆系结构的产物,它的成功为后面的改进工作指明了一个方向:改进杆系结构有助于实现理想的动态剪切加载。

2.3 改进 Hopkinson 杆的杆系结构

扭杆实验时应变速率上限近似为 $3\,000\text{ s}^{-1}$,然而为了研究金属高速成形操作或裂纹的周向快速扩展这类情况,希望能将应变率扩大几个量级。正是基于这一目的,研究者通过改进杆系结构来实现高速剪切。1979 年 J. Harding 等设计了一种双剪实验装置^[26],输出杆由一根管材代替,输入杆可以滑进这根管材中去。输入杆的下端和输出杆的上端都开有沟槽,以便与一块薄板试样相配合使用,该装置实现的最大切应变率达到 $40\,000\text{ s}^{-1}$ 。1994 年 J. R. Klepaczko 也采用类似装置进行了实验^[27]。这一方法存在的缺点是,在切应变加大时,端部端相对中段有所转动,这样试样就不再以纯剪切方式变形。

冲塞实验的改进思路很类似于双剪实验,不过,冲塞实验加载时,试样为一块平板,使用改进的 Hopkinson 杆加载在平板上冲出一个圆孔。1970 年 A. R. Dowling 等设计了冲塞实验^[28],目的是评估材料动态性质,观测破坏损伤模式。冲塞实验虽属于一种工艺性试验,但被用于研究各种不同的材料在应变率直到大约 10^4 s^{-1} 条件下的应变率敏感性问题,如研究炸药的冲击感度,还有不少的冲塞实验就是针对复合材料研究展开的^[29~32]。另外,在测试材料动态断裂韧性方面,有研究者使用单压杆研究高速剪切和裂纹扩展速度^[33,34]。

不论是双剪实验还是冲塞实验,都是对 Hopkinson 杆的杆系结构进行大胆改进。这两种实验出发点是为了研究材料的绝热剪切或动态断裂破坏,虽然主要是确定剪切速度等一些参数,但是他们的思路已经包含了压剪复合加载的成分在内。在动态剪切实验中,改进杆系结构来满足实际应用的需要应该是一个比较好的思路。

3 结论

无论是改进杆系结构还是改进试样形状,其目的都是为了实现材料的动态剪切测试。从应用角度看,改进应该是针对性强、测试分析简便可

行、测试结果量化较好。但是不管如何改进都需要服从 Hopkinson 杆的最根本的假定：一维假定，否则，盲目的求新求怪只会是徒劳无功。只有在服从理论的前提下，大胆设想，利用分离式 Hopkinson 杆技术，积极改进、不断创新，实现高应变率下的剪切加载，甚至压剪复合加载，才能更贴近研究材料本构行为的实际需要。

对已有的高应变率下的动态剪切实验的量化、标准化，以及结合分离式 Hopkinson 杆技术进行改进设计，有望成为解决动态剪切实验设计难题的发展趋势。另外，仿照飞片加载技术，设计一种能同步进行压缩和剪切加载，并能定量测量实验装置是目前高应变率动载实验技术探索的一个很有前景的设计方案。

参考文献

- [1] 王礼立. 应力波基础. 北京: 国防工业出版社, 1985, 1~4
- [2] Clifton, R. J. and R. W. Klopp. Pressure Shear Plate Impact Testing. Metals Handbook: Mechanical Testing, 9th Edition. Vol. 8. 2002; American Society for Metals
- [3] Okada, M., N.-S. Liou, and V. Prakash. Dynamic Shearing Resistance of Molten Metal Films Under High Pressures and Extremely High Shearing Rates. Experimental Mechanics, 2002(42): 161 - 171
- [4] Abou-Sayed, A. S., R. J. Clifton, and L. Hermann. The Oblique-plate Impact Experiment. Experimental Mechanics, 1976(8): 127 - 132
- [5] Kim, K. S., R. J. Clifton, and P. Kumar. A Combined Normal and Transverse Displacement Interferometer with an Application to Impact of Y-cut Quartz. Journal of Applied Physics, 1977(48): 4132 - 4139
- [6] 卢芳云, 陈丕琪等. 材料压剪加载的实验测试. 国防科技大学学报, 1995, 17(4): 116~123
- [7] [美] 美国金属学会. 高应变率压缩试验, 金属手册, 机械工业出版社, 第九版, 第八卷, 1994, 239~246
- [8] Kolsky H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading. Proc. Phys. Soc. B 62, 1949, 676 - 701
- [9] Hartmann, K. H., H. D. Kunze and L. W. Meyer. Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals, Plenum Press, New York, 1981, 325 - 337
- [10] M. A. Meyers. Dynamic Behavior of Materials. New York: Wiley-Interscience

Publication,1994

- [11] F. D. S. Marquis, M. A. Meyers, Y. J. Chen, and D. S. Kim. High-Strain, High-Strain-Rate Of Tantalum. Metall. Mater. Trans. A, Physical Metallurgy and Materials Science, 1995, 26(10): 2493 - 2501
- [12] 王春奎,刘小苹等. LY-12 铝高温凝聚态动力学性质研究——高温冲塞剪切破坏强度的测量. 高压物理学报,1992, 6(2): 108~115
- [13] L. W. Meyer, E. Staskewitsch, et al. Adiabatic shear failure under biaxial dynamic compression/shear loading. Mechanics of Materials, 1994 (17): 203 - 214
- [14] 魏志刚,胡时胜. 微细观结构对预扭转钨合金材料绝热剪切的影响. 弹道学报, 1999, 11(1): 15~19
- [15] 魏志刚,李永池等. 冲击载荷作用下钨合金材料绝热剪切带形成机理. 金属学报,2000,36(21): 1263~1268
- [16] D. Rittel, S. Lee, and G. Ravichandran. A Shear-compression Specimen for Large Strain Testing. Experimental Mechanics, 2002(42): 58 - 64
- [17] Baker, W. E. and Yew, C. H. Strain Rate Effects in the Propagation of Torsional Plastic Waves. J. Appl. Mech. Trans ASME, 1966, (33): 917 - 923
- [18] 马晓青. 高速碰撞动力学. 国防工业出版社, 1998, 40~49
- [19] J. Duffy, J. D. Campbell, and R. H. Hawley. On the Use of a Torsional Split Hopkinson Bar to Study Rate Effects in 1100 - O Aluminum. J. Appl. Mech. , 1971, 38: 83 - 91
- [20] T. Nicholas, Strain-rate and Strain-Rate-History Effectes in Several Materials is Torsion. Experimental mechanics, 1971, 11(8): 370 - 374
- [21] R. A. Frantz and J. Duffy. The Dynamic Stress-Strain Behavior in Torsion of 1100 - O Aluminum Subjected to a Sharp Increase in Strain Rate. J. Appl. Mech. , 1972, 39: 939 - 945
- [22] Eleiche, A. M. and Campbell, J. D. Strain-rate Effects during Reverse Torsional Shear, Experimental Mechanics, 1976, 8: 281
- [23] Vinh, T. and Khalil, T. Adiabatic and Viscoplastic Properties of some Polymers at High Strain and High Strain Rate, Institute of Physics Conference, Oxford, England, 1984, 39 - 46
- [24] 赵西震. 分离式 Hopkinson 扭杆技术及 L4 纯铝的动态剪切应力-应变曲线. 力学学报, 1986, 18(4): 323~327
- [25] Huang, H. and R. Feng. A Study of the Dynamic Tribological Response of

- Closed Fracture Surface Pairs by Kolsky-bar Compression-shear Experiment. International Journal of Solids and Structures, 2004, 41: 2821 - 2835
- [26] J. Harding and J. Huddart. The Use of the Double-Notch Shear Test in Determining the Mechanical Properties of Uranium at Very High Rates of Strain, Proc. 2nd International Conf. Mechanical Properties at High Rates of Strain, The Institute of Physics, London, 1979, 49 - 61
- [27] Klepaczko, J. R. An Experimental Technique for Shear Testing at High and very High Strain Rates. Int. J. Impact Eng. , 1994, 46: 25 - 39
- [28] A. R. Dowling, J. Harding, and J. D. Campbell. The Dynamic Punching of Metals. J. Inst. Metals, 1970, 98: 215 - 224
- [29] Werner, S. M. , and Dharan, C. K. H. The Dynamic Response of Graphite Fiber-Epoxy Laminates at High Shear Strain Rates, Journal of Composite Materials, 1986, 20: 365 - 374
- [30] J. Harding, L. Dong, Effect of Strain Rate on Interlaminar Shear Strength of Carbon-Fiber Reinforced Laminates, Composites Science and Technology, 1994, 53(3): 347 - 358
- [31] Riendeau S. , and Nemes J. A. , Dynamic Punch Shear Behavior of AS4/3501 - 6, Journal of Composite Materials, 1996, 30: 1494 - 1512
- [32] Hosur, M. V. , et al. Experimental studies on the punch shear characterization of satin weave graphite/epoxy composites at room and elevated temperatures. Materials Science And Engineering, 2004, A368(1 - 2): 269 - 279
- [33] 董新龙, 王礼立, 王悟, 虞吉林. 40CrNiMoA 钢的动态剪切断裂行为研究. 爆炸与冲击, 1999, 3: 30~36
- [34] 张晓欣, 刘瑞堂, 王永东. 多功能 Hopkinson 压杆型试验装置的研制与应用, 实验力学, 2003, 18(2): 251~256

有限元软件与力学发展

李茂生

(中国石油大学, 博 2002, 东营 257061)

摘 要 阐述了有限元和有限元软件在力学发展中的地位和作用。回顾了有限元软件的发展史和国内有限元软件发展的一些特点,介绍了有限元软件发展过程中的一些重要事件,并展望了有限元软件的发展趋势。

关键词 力学, 有限元, 单元, 非线性, 软件

1 引言

力学是力与运动的科学,它研究的对象主要是物质的宏观机械运动,它既是基础科学,又是众多应用科学特别是工程技术的基础。它过去建立在牛顿定律和经典力学的基础上,现在则扩大到量子力学描述的微观层次。

由于解决科学和工程技术问题需要大量的计算,力学工作者在电子计算机出现之前就已经提出了不少有效的数学工具和计算方法。在高速电子计算机出现后,力学的计算更是如虎添翼,新的计算方法迅速出现,如从结构力学中发展起来的有限元法,现在已是各种科学问题(远不限于力学)的基本算法之一。流体力学计算的需要,极大地推动了有限差分法的发展。现在,计算力学已是整个计算科学中最重要的支柱之一。

1956年“有限元”这个名词第一次出现,到今天有限元在工程上得到广泛应用,经历了四十多年的发展历史,理论和算法都已经日趋完善。有限元的核心思想是结构的离散化,就是将实际结构假想地离散为有限数目的规则单元组合体,实际结构的物理性能可以通过对离散体进行分析,得出满足工程精度的近似结果来替代对实际结构的分析,这样可以解决很多实际工程需要解决而理论分析又无法解决的复杂问题。

近年来随着计算机技术的普及和计算速度的不断提高,有限元分析

在工程设计和分析中得到了越来越广泛的重视,已经成为解决复杂的工程分析计算问题的有效途径,现在从汽车到航天飞机几乎所有的设计制造都已离不开有限元分析计算,其在机械制造、材料加工、航空航天、汽车、土木建筑、电子电器、国防军工、船舶、铁道、石化、能源、科学研究等各个领域的广泛使用已使设计水平发生了质的飞跃,主要表现在以下几个方面:① 增加产品和工程的可靠性;② 在产品的设计阶段发现潜在的问题;③ 经过分析计算,采用优化设计方案,降低原材料成本;④ 缩短产品投向市场的时间;⑤ 模拟试验方案,减少试验次数,从而减少试验经费。

在这个信息-计算机时代,像许多其他方面的进步一样,在非线性和有限元分析中,软件常常比文献更好地代表了最新的进展。国际上早在 20 世纪 60 年代初就开始投入大量的人力和物力开发有限元分析程序,但真正的 CAE 软件是诞生于 70 年代初期,近 15 年则是 CAE 软件商品化的发展阶段,CAE 开发商为满足市场需求和适应计算机硬、软件技术的迅速发展,在大力推销其软件产品的同时,对软件的功能、性能,用户界面和前、后处理能力,都进行了大幅度的改进与扩充。

力学的发展与数学物理方程的发展是并行的不可分割的过程。从力学的角度看,建立起基本方程就将问题对数学的要求表达清楚了,接下来就是如何去求解。常常是基本方程建立起来了,然而其求解却非常困难,长期得不到有效的途径。弹性力学与流体力学的基本方程在 20 世纪早已建立,然而对于它们的求解方法至今尚需研究发展。基本方程建立起来了,找不出其数值解答,问题还是不能解决。因此求解是通向应用的必经之路,也是当前艰巨的任务。

在计算机问世之前,求解只能通过解析法。数学家与力学家通力合作,对工程力学的数理方程进行求解,既发展了工程力学也丰富了数理方法。然而可以用解析法求解的问题毕竟有限,因此工程师与力学家努力简化分析计算的模型,并提出了包括各种变分原理及其他近似方法在内的多样手段。

2 国外有限元发展

有限元方法有多种溯源。通过在波音研究的工作和 Turner, Clough,

Martin 和 Topp(1956)的著名文章^[1],使有限元方法得以闻名。不久之后,在许多大学和研究所里,工程师们开始将有限元方法扩展至非线性、小位移的静态问题。但是,由于计算条件的限制,以及当时人们对它的理解, *Journal of Applied Mechanics* 许多年都拒绝刊登关于有限元方法的文章。然而,工程师们为了解决现场的实际问题,他们非常清楚有限元方法的前途,因为它提供了一种处理复杂形状真实问题的可能性。

在 20 世纪 60 年代,由于 Ed Wilson 发布了他的第一个程序,研究有限元程序的学者也多了起来。这些程序的第一代没有名字。在遍布世界的许多实验室里,通过改进 Berkeley 早期开发的软件,工程师们扩展了新的用途,由此带来了工程分析的巨大冲击和有限元软件的快速发展。Berkeley 开发的第二代线性程序称之为 SAP(structural analysis program)。由 Berkeley 的工作发展起来的第一个非线性程序是 NONSAP,它具有隐式积分进行平衡求解和瞬时问题求解的功能。

Argyris(1965)^[2],Marcal 和 King(1967)^[3]对第一批非线性有限元方法做出了大量的贡献。当时在 Brown 大学任教的 Pedro Marcal,发展了第一个非线性商业有限元程序进入市场,于 1969 年建立了一个公司,程序命名为 MARC,目前它仍然是主要软件。大约在同期,John Swanson 为了核能应用在 Westinghouse 发展了一个非线性有限元程序。为了使 ANSYS 程序进入市场,他于 1969 年离开 Westinghouse。尽管 ANSYS 主要是关注材料非线性而非求解完全的非线性问题,但多年来仍垄断了商业非线性有限元的舞台。

在早期的商用软件舞台上,另外两个主要人物是 David Hibbitt 和 Klaus-Jurgen Bathe。Hibbitt 与 Pedro Marcal 合作到了 1972 年,后来与其他人合作建立了 HKS 公司,使 ABAQUS 商业软件进入市场。因为该程序是能够引导研究人员增加用户单元和材料模型的有限元程序之一,所以它对软件行业带来了实质性的冲击。Jurgen Bathe 是在 Ed Wilson 的指导下在 Berkeley 获得博士学位的,不久之后开始在 MIT 任教,期间发表了他的程序,即 NONSAP 软件的派生品,称之 ADINA。

直到大约 1990 年,商用有限元程序集中在静态解答和隐式方法的动态解答。在 20 世纪 70 年代,这些方法取得了非常大的进步,主要贡献来自于 Berkeley 的研究人员: Thomas J. R. Hughes, Robert Taylor, Juan

Simo, Jurgen Bathe, Carlos Felippa, Pal Bergan, Kaspar Willam, Ekerhard Ramm 和 Michael Ortiz。他们是 Berkeley 的杰出研究者中的一部分,是早期有限元的先行者。

当代非线性软件的另一个主流是显式有限元程序。Wilkins(1964)在 DOE 实验室的工作强烈地影响了早期的显式有限元方法,显著的例子是 hydro-codes 的软件。

1964 年, Costantino 在芝加哥的 IIT 研究院发展了可能是第一个显式有限元程序(Costantino, 1967), 它局限于线性材料和小变形由带状刚度矩阵乘以节点位移计算内部的节点力。它首先在一台 IBM7040 系列计算机上运行, 花费了数百万美元, 其中 IBM7040 系列计算机的速度远远低于一个 megaflop(每秒一百万浮点运算)。刚度矩阵存储在磁带上, 通过观察磁带驱动能够检测计算的过程。每一步骤完成时, 磁带驱动都将逆转以便允许阅读刚度矩阵。这些和以后的 Control Data 机器有类似的性能, 如 CDC6400 和 6600, 他们是 20 世纪 60 年代运行有限元程序的机器。一台 CDC6400 价值近 1 000 万美元, 有 32 kB 内存(存储全部的操作系统和编译器)和大约一个 megaflop 的计算速度。

1969 年, 为了实现对空军销售的计划, 高级研究人员开发了著名的单元乘单元的技术, 节点力的计算不必运用刚度矩阵, 发展了名为 SAMSON 的二维有限元程序, 它被美国的武器实验室用了 10 年。1972 年, 该程序的功能扩展至结构的完全非线性三维瞬态分析, 称之为 WERCKER。这一工作得到美国运输部计划经理 Lee Ovenshire 的基金资助, 它在 20 世纪 70 年代初期就预言汽车的碰撞实验可能被仿真所代替。

然而, 由于计算机软硬件条件的限制。在当时运行一个 300 个单元模型的仿真, 对于 2 000 万次模拟需要大约 30 小时的计算机机时, 花费大约 3 万美元, 这个费用相当于助理教授 3 年的工资。Lee Ovenshire 的计划资助了若干个开拓性的工作: Hughes 的接触-冲击工作, Ivor McIvor 的碰撞工作, 以及由 Ted Shugar 和 Carly Ward 在 Port Hueneme 所从事的关于人头颅的模拟研究。但是, 大约在 1975 年, 美国的运输部认为仿真太昂贵, 决定所有的基金转向实验方面, 使这些研究努力令人心痛地停止下来。在 Ford 公司 WRECKER 勉强生存了下一个 10 年。而在 Argonne, 由 Belytschko 发展的显式程序被移植应用在核安全工业上, 其程

序命名为 SADCAT 核 WHAMS。

1975 年,在 Sandia 工作的 Sam Key 完成 HONDO,它是具有单元乘单元功能的显式方法。程序可以处理材料非线性和几何非线性问题,并且有精心编辑的文件。然而,这个程序遭遇到 Sandia 限制传播的政策,基于保密的原因,不允许发布程序。后由于 Northwestern 大学的研究生 Dennis Flanagan 的工作,这些程序才得以进一步的发展,他将程序命名为 PRONTO。

Lawrence Livermore 实验室的 John Hallquist 的工作是显式有限元程序发展的里程碑。1975 年,John 开始他的工作,1976 年,首先发表 DYNA 程序。他慧眼吸取了前面许多人的成果,并且与 Berkeley 的研究人员紧密交流合作,包括 Jerry Goundreau, Bob Taybor, Tom Hughes 和 Juan Simo。他之所以成功的部分关键因素是与 Dave Benson 合作发展了接触-冲击相互作用,他的令人敬畏的编程效率,以及计算程序 DYNA—2D 和 DYNA—3D 的广泛传播。与 Sanlia 相比,对于程序的传播,在 Livermore 几乎没有遇到任何障碍,因此,像 Wilson 的程序和 John 的程序,不久后在全世界的大学、政府和工业实验室里到处可见。

Hallquist 关于有效接触-冲击算法的发展(与今天的有效算法相比,是原始的第一批算法,但是仍然常常采用它们),采用单点积分单元和高阶矢量使工程仿真得以有显著性突破的可能。单点积分单元与沙漏控制的一致性,通过几乎是一阶量值的完全积分的三维单元,可以提高三维分析的速度。

在 20 世纪 80 年代,DYNA 程序首先被法国 ESI 公司商业化,命名为 PAMCRASH,它与 WHAMS 也有许多相关的子程序。1989 年,John Hallquist 离开了 Livermore,开始经营他自己的公司,扩展 LSDYDA——商业版的 DYNA 程序。

在过去的 10 年,计算机成本的迅速下降和显式程序功能的强健带来了设计的革命。第一个主要的应用领域是有价值的汽车碰撞。然后,应用的领域迅速扩展。在越来越多的工业领域,非线性有限元仿真正在代替样品原型的试验。通过仿真正常工作、跌落试验和其他极端加载情况。可以对蜂窝电话、手提电脑、洗衣机、链锯和许多产品进行设计、优化。制造过程也应用有限元进行仿真,例如锻压、薄金属板成形和挤压。对于某

些仿真问题,隐式方法的功能也变得越来越强,很明显,两种方法的功能都是必要的。例如,显式方法可能最适合仿真薄金属板成形的加工过程,在回弹过程模拟中,隐式方法将会更加合适。今天,隐式方法比显式方法的功能增加得更加迅速。对于处理非线性约束,例如接触和摩擦,隐式方法已经有了明显的改进。稀疏迭代求解器也已经成为更加有效的工具^[4]。

3 国内有限元发展

在 20 世纪 70 年代初,我国也开始了软件的开发,最初开发的是求解特定结构的程序,逐步发展到通用的大型数值模拟软件开发。在计算力学软件的研制和推广过程中,出现了一大批通用软件,如大连理工大学先后开发了通用有限元软件 JIGFEX、DDDU 和 DDJ/W,航空工业界开发了 HAJIF 软件,邓达华等开发了 MAC 有限元软件,北京火箭软件公司开发了有限元自动生成系统。这些软件有很先进的设计思想和独到的高效计算方法。国外软件的引进在中国的工程应用中也起了重要的作用,例如,70 年代末引进并开发的 SAP5 以及随后引进的 ADINA,在土木建筑、航空航天、机械工业中得到了广泛应用,不仅解决了大批工程问题,而且普及了有限元的知识,开拓了有限元在中国的市场。随着计算机技术的发展,特别是微机的广泛使用和各种功能强大的计算机软件工具和开发平台的出现,近年来开发的软件,如北京大学袁明武等开发的 SAP84、大连理工大学顾元宪等开发的 MCADS,后处理和图形功能不断增强,并和土建、机械、航空航天和船舶等行业的设计的结合日益密切。在中国土木建筑界,有关高校和中国建筑设计研究院等开发的基于有限元分析的建筑计算机辅助设计软件,如建筑工程界开发的大型 TBSA 系统,已经基本上占领了中国市场。

在爆炸冲击数值模拟方面,北京应用物理与计算数学研究所冯其京等开发了三维流体弹塑性欧拉型数值模拟程序 MEPH3D,该程序在高速碰撞的三维计算方面进行了初步的探索,考察研究了适合于高速碰撞三维数值计算的弹塑性流体力学欧拉数值方法,分别对计算格式、界面处理、三维程序总体设计、前后处理等关键技术进行了深入细致的研究。另

外,西安国瑞电子有限公司与国外公司合作,开发 CISDA 软件,前后处理采用美国 EDS 公司的 FEMP8.0 软件,能进行结构非线性静动力分析、高速撞击爆炸瞬态动力学分析、多相流体动力学分析等,在功能的主要指标上与 DYTRAN 程序类似。

在防护工程领域,爆炸冲击数值模拟软件的开发在早期与国外基本同步,但进入 20 世纪 90 年代后,由于受国外软件的冲击,进展缓慢。其中,周早生等编制了岩土工程几何和材料非线性静、动力有限元分析程序 REASP,该程序是针对岩土类介质的特性而研制开发的大型科学计算软件,为研究块体介质岩体地表及地下工程开挖、喷锚支护、复合结构的作用机理提供一种较科学的分析手段。杨秀敏等研制了二维流体弹塑性动力程序 RRPM,在触地爆炸、浅埋爆炸等的计算分析中发挥了重要作用。另外,在空气冲击波方面,王家俊与杨科之基于有限差分法、陆遐龄等基于有限体积法分别编制了三维计算程序。

我国数值模拟软件的开发起步较早,但到目前为止,我国在国际上尚未出现一个有影响的数值模拟软件系统,无论在军用方面还是民用方面,均与国外相比存在很大的差距。与当今国外蓬勃发展的数值计算软件业相比,不难发现存在以下问题:① 没有一支高质量的稳定的研究开发队伍;② 缺乏长期的维护和进一步的开发;③ 对数值模拟的重要性认识不足;④ 对自主知识产权的数值模拟软件认识不充分;⑤ 数值模拟计算知识产权的落实需要一个过程。

4 有限元发展展望

力学要应付时代对它的挑战,就必须发展自己的理论、实验、计算三大支柱,三者互相扶持,缺一不可。今后计算机硬件的功能肯定将有更大的发展,力学必须充分利用这种时代给予的机遇,应该加强计算力学的算法研究和软件开发,以回答理论探索 and 实际建设中的问题。当然,计算力学也并不仅仅是按力学中现成的理论作一些计算而已。计算力学有很大的能动作用,它拓展了设计分析的领域,成为力学通向工程应用的桥梁;它极大地增强了力学的手段,发现了许多未知的现象;对力学的理论体系发生了深刻的影响。所有这些清楚地表明,计算力学已成为工程力学中

最活跃的成员之一。计算力学的发展现仍处在年轻阶段,在本世纪定会取得更大的成就。

参考文献

- [1] Turner MR, Clough R, Martin H and Topp L. Stiffness and deflection analysis of comp;ex structures, J. Aero. Sci. , 1956, 23(9): 805 - 823
- [2] Argris JH, Elasto-plastic matrix displacement analysis of three-dimensional continua. J. Royal Aeronautical Society, 1965, 69: 633 - 635
- [3] Marcal PV and King IP. Elastic-plasitic analysis of two dimensional stress systems by the finite element method. Int. J. Mechanical Sciences, 1967, 9: 143 - 155
- [4] 庄茁. 连续体和结构的非线性有限元. 北京: 清华大学出版社, 2002

工程一般力学新体系

龙运佳

(中国农业大学, 北京 100083)

工程一般力学即工程学科用理论力学, 理论力学是学前苏联教材 теоритическая механика 遗留至今的别扭直译, 它在“学”前添“理论性”, 学(名词)就是理论, 无须再描述, 不如称工程一般力学以阐明其普遍性与实践性。

体系是概念、方法、理论的演绎与整合, 尽管一般力学三定律无一由 Newton 发现, 但全世界公认他的历史贡献就是建立一般力学的原始体系, 可见建立体系的重要作用要大于发现个别的定律与定理, 对这一点, 很多人因受不重视演绎法的传统文化的影响而不以为然。

体系的重大作用, 绝非言过其实, 近代历史上的各类革命, 都是在相应的科学体系建立之后, 经过一定时间, 被人们理解、消化、接受后出现的, 如 Newton 体系推进了英国产业革命, Maxwell 体系促成电磁技术革命, Karl Marx 体系催生了社会主义革命等。

体系是与时俱进、吐故纳新的不断生长的活体, 如一般力学继 Newton(1642—1727) 体系后生出 Lagrange(1736—1813) 体系, 随后又长出 Hamilton(1805—1865) 体系等, 我国因受“枪打出头鸟”文化传统的熏陶, 新体系很多时候难成气候。

体系要有先进性、开放性、完备性、简单性、统一性与实证性, 建立一种科学, 必须以由实践得到的基本概念及其基本关系出发, 运用简单的逻辑规则演绎出经实践检验的结论, 统一组成先进、完备、有层次的开放体系。工程一般力学体系大致有以下几类:

(1) 以概念作核心的体系从运动学受力图到静力学, 再到动力学。

(2) 学美国教材的体系从静力学到动力学(运动学整合入动力学)。另一类体系从运动学到动力学(静力学由动力学逆向演绎)。

(3) 学前苏联教材时遗留至今,抢尽先机全面占领市场的体系从静力学到运动学,再到动力学。

本文为第一类体系,其目录如下:

工程一般力学新体系

引 言(见附录)

运动学 受力图

1 体的运动理论

1.1 基本运动

1.2 约束系统

2 点的运动理论

2.1 点运动

2.1.1 矢径法

2.1.2 坐标法

2.1.2.1 自然坐标法

2.1.2.2 直角坐标法

2.2 体上点的运动

2.2.1 定轴转动体上的点

2.2.2 平面运动体上的点

2.2.3 平移体上的点

2.3 点的合成运动

2.3.1 三种运动(相对、绝对、牵连)

2.3.2 合成运动

3 解除约束理论

3.1 体的约束力

3.2 受力图

静 力 学

4 平衡理论

4.1 虚功平衡理论

4.1.1 广义坐标,虚位移

4.1.2 理想约束,广义力

4.1.3 虚位移原理

- 4.2 力的平衡理论
 - 4.2.1 力对轴之矩
 - 4.2.2 平衡方程式
 - 4.2.3 摩擦与自锁
 - 4.2.4 静不定问题
 - 5 简化理论
 - 5.1 力系主矢主矩
 - 5.2 力系简化结果
- 动 力 学
- 6 动能理论
 - 6.1 动能定理
 - 6.1.1 动能
 - 6.1.2 功率方程
 - 6.1.3 功能方程
 - 6.1.4 有势力的广义力
 - 6.2 完整系统理论(第二类拉氏方程)
 - 7 动量理论
 - 7.1 动量定理
 - 7.1.1 动量矢与冲量
 - 7.1.2 动量定理,质心定理
 - 7.2 动量矩定理
 - 7.2.1 动量矩
 - 7.2.2 动量矩定理
 - 8 静化理论
 - 8.1 动静法
 - 8.1.1 质点系动静法
 - 8.1.2 刚体系动静法
 - 8.2 动力学普遍方程
 - 9 选修理论
 - 9.1 非完整系统理论
 - 9.1.1 约束方程类型

- 9.1.2 第一类拉氏方程
- 9.2 相对非惯性系统动力学
- 9.3 振动理论
 - 9.3.1 自由振动
 - 9.3.2 强迫振动
 - 9.3.3 消振隔振
- 9.4 碰撞理论
 - 9.4.1 碰撞特点
 - 9.4.2 碰撞动力学
 - 9.4.3 恢复系数
- 9.5 陀螺近似理论
- 9.6 刚体定点运动理论
- 9.7 流体理论
 - 9.7.1 流体欧拉方程
 - 9.7.2 流体伯努里方程
- 9.8 变质量系统理论
- 9.9 非线性系统混沌理论

第二类体系,前一种分散并削弱了运动学,后一种从动力学到静力学又到动力学,层次结构欠分明。

第三类体系,由静力学开始,起点水平低,体的运动没讲,却先讲约束,完备性不足,约束、受力图具有全局性,不限于静力学,放在静力学使层次结构欠分明,静力学的虚位移原理却放在动力学,欠统一性,没有适于用计算机算的第一类拉氏方程及前沿的混沌学等内容,先进性不足。

第一类体系,比较严格地以基本概念为核心构成先进而开放的主次分明的体系,避免了与大学物理的不必要重复,避免了以“人物”、“对象”、“方法”等非基本概念为核心建造体系时引发的种种问题。它先讲运动的几何性质(从体到点讲运动学),再讲运动状态改变的原因(受力图),进而建立物体运动变化与受力的关系(静力学从虚功到力,从平衡到不平衡再到简化,动力学以动能、动量、惯性力等概念为整合的核心),据反映,从运动学讲到混沌学的体系,对于建立非静态的唯物辩证的世界观,降低学时,提高教学质量,极为有效。

附录:

引言

工程一般力学(工程学科用理论力学)是研究宏观质点系(如刚体、弹性体、散体等)在远低于光速时,机械运动(空间位置随时间的变化)理论的基础科学,是其他各类力学与有关专业课的基础,这门体系严密的技术基础课的任务是培养抽象建模,逻辑思维,开发创新的能力,解决工程中可用之处处理的相关力学问题,它还兼有基础与应用,经典与现代的两重性,也是当代计算机运动仿真与虚拟设计的理论基础。

用它研究工程问题,按以下步骤进行:

- (1) 确定已知问题与待求问题。
- (2) 略去次要因素,作简化假设后,建立力学模型。
- (3) 进行运动学分析,受力分析,画受力图。
- (4) 用动力学或静力学理论,将工程问题变为数学问题。
- (5) 用数学原理求解析解,若无精确解,则用计算机求数值解。
- (6) 对所得解进行讨论后,处理实际问题。

本体系是参照教育部高等工科院校理论力学课程教学基本要求,在作者“工程一般力学新体系”讲义的基础上,结合四十余年教学积累,为多学时各专业编写。它围绕基本概念(如速度、平衡、动能、动量、惯性力等)用其演变,通盘整合其基本理论与基本方法,将传统的运动学(运动变化的几何性质)、静力学(运动不变时,受力之间的关系)、动力学(运动变化与受力的关系)的内容组成脉络清晰,由浅入深的理论体系。

动力学选修理论有:振动理论、碰撞理论、流体系统理论、陀螺近似理论、刚体定点运动理论、变质量系统理论、非完整系统理论、相对非惯性系统动力学、非线性系统混沌理论,各专业可按需取舍。

本体系适用于机械、土木、航空、船舶、兵器等工科各专业。

固体力学计算方法的发展

孙秀山 岑章志 刘应华

(清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘 要 本文简要回顾了固体力学计算方法的发展过程。从早期通过解析方法求解简单问题开始, 固体力学的计算方法经历了一个从精确解法到近似解法、从解析方法到数值方法的发展过程, 这一过程可以依据其历史阶段分为三种类型: 传统解析方法、近似求解方法(古典数值方法)和现代数值方法。文中分析了不同发展阶段中典型固体力学计算方法的形成及其特点, 探讨了这些方法对固体力学发展的作用以及影响, 总结了这些方法之间的关系。

关键词 固体力学, 计算方法, 发展过程, 继承关系

1 引言

固体力学是在经典牛顿力学框架下最先发展起来的学科之一, 主要研究可变形体在各种外界因素作用下, 其内部各个质点所产生的位移、运动、应力、应变以及破坏等的规律, 是力学中形成较早、理论性较强、应用较广的一个分支^[1]。固体力学的发展首先是建立在弹性理论基础之上的, 随后在工业发展的推动下, 固体力学中有关塑性理论、强度理论以及稳定理论等得到了进一步的发展^[2, 3]。在传统的固体力学理论中, 一般把研究对象看作是由无限个假象的元素组合在一起的连续体, 因此研究对象(连续体)中的力学量(如位移、应变、应力等)就可以假设为空间或时间的连续函数。这样, 对于一个确定的固体力学问题, 借助于数学方法最终可以将其转化相应的偏微分方程(或方程组)在给定条件下的边值问题或初值问题, 如经典弹性理论中 L-N 方程或 B-M 方程的狄利克雷(Dirichlet)边值问题和诺依曼(Neumann)边值问题。对于这类方程(或方

程组)的求解一直贯穿着固体力学的整个发展阶段,成为固体力学的重要研究内容之一。

从早期通过解析方法求解简单问题开始,固体力学的计算方法依据其历史发展过程大致经历了如下三个阶段:传统的解析方法、近似求解方法(古典数值方法)和现代数值方法,其中每个阶段里都出现了多种分析方法和计算方法。在这些方法的发展中,尤以计算机技术的出现和应用为转折点,标志着固体力学计算方法的一个飞跃,促使了固体力学无论在理论研究方面还是在实际工程应用中都有了显著的进步^[4, 5]。另一方面,随着计算方法的不断改进和完善,以有限单元法为代表的现代数值方法不仅把固体力学的应用广泛推向了诸如航空、土木、机械等工程领域,而且也把诸如固体力学、一般力学、流体力学等诸多力学分支的问题的求解统一在一个框架体系内^[6]。计算方法的成熟及其工程应用的成功,促成了计算固体力学的诞生,这一学科成为计算力学学科的一个重要组成部分。在今后的几十年中,计算固体力学很可能将突破经典力学的框架,继而渗入到诸如量子力学、分子动力学、材料科学、生物力学等领域中,形成新的交叉学科^[7]。

在以下的几节里,将分别讨论不同发展阶段中典型固体力学计算方法的形成及其特点,并分析这些方法对固体力学发展的作用以及影响,最后一节将对本文做一小结。

2 传统解析方法

传统的解析方法是固体力学发展初期所采用的一种计算求解方法,这一方法所解决的主要是一些简单的弹性力学问题、稳定问题以及后来出现极少的塑性力学问题。除了少数简单问题可以由基本方程和边界条件直接求出解函数之外,多数能求得解析解的问题往往借助于一些专门的数学手段和工具,具有代表性的包括应力函数法、试凑法(反逆法和半逆法)以及复变函数法等。

2.1 应力函数法

艾里(Airy, G. B.)在1862年发表的一篇有关矩形截面梁的截面应力分布问题的论文中首次用到了应力函数^[8]。虽然艾里的研究并不完

全,但他开创了求解弹性问题的应力函数方法。随后麦克斯韦(Maxwell, J. C.)在 1890 年改进了这一方法,建立了求解应力函数的微分方程^[9]。后来,莫雷拉(Morera, G.)和普朗特(Prandtl, L.)又进一步完善了这一方法^[10]。应力函数法的基本思想是,在以应力为未知量的 B-M 方程中引入某些函数,这样就把待求问题转化成求解以这些函数所表示的调和方程,这些引入的函数就是应力函数,它们自动满足平衡方程,其偏导数的组合即为应力分量。

应力函数法的出现进一步推动了弹性理论的发展,同时也使研究对象逐渐从各向同性体扩展到各向异性体。列赫尼茨基(Лехницкий, С. Г.)在 1947 年出版的专著《各向异性板》(*Anisotropic Plates*)中利用应力函数法求解了多种正交各向异性平面问题,包括矩形截面梁、方板、圆板以及孔板等^[11]。应力函数法是后来发展起来的多种固体力学解析求解方法的基础。

2.2 试凑法

试凑法是由圣维南(Saint-Venant, B.)在 1853 年提出的用于求解柱形杆扭转及弯曲问题的一种解析方法^[8]。后来乐甫(Love, A. E. H.)在 20 世纪初进一步将这一方法与位势理论结合,给出了三维 L-N 方程的一般位移解^[9]。试凑法目前一般分为两类:反逆法和半逆法,可以用于求解柱形杆扭转或弯曲问题、平面问题以及空间问题等。反逆法的基本思想是先找出微分方程的一个特解,然后根据微分反演出边界条件。半逆法的基本思想是根据边界条件假设一个能部分或全部满足边界条件或基本方程的解函数,其中包含了一些待定系数,然后调整这些待定系数使其满足所有边界条件和域内方程。试凑法求解柱形杆扭转问题时一般是以应力函数为基础的,使用试凑法的关键是要选择合适的解函数(位移函数或应力函数),有时会需要将解函数展开成三角级数(傅立叶级数)或幂级数的形式,这些解最终是用无穷级数来表示的。

在固体力学发展的早期,很多弹性力学问题都是通过试凑法与应力函数法相结合解决的,但随着一些数值求解方法的出现,试凑法的应用已经减少,但这一方法仍是后来进一步发展的解析-数值结合方法的基础。由于试凑法经常会受到截面及边界形状的限制,此时复变函数法就成了

另一种有效的求解方法。

2.3 复变函数法

在固体力学发展的早期,许多重要的弹性力学平面问题都是通过复变函数方法解出的,这种方法先由哥罗索夫(Колосов, Г. В.)在1910年的论文集中给出来,此后陆续有一些研究者利用复变函数法求解了多种带有圆孔或椭圆孔板的问题,穆斯海里什维里(Муселишвили, Н. И.)在1949年进一步对这一方法进行了总结和完善,形成了一套比较完善的固体力学求解方法^[12]。孔板集中问题、接触问题、线弹性断裂力学问题等领域都广泛采用了复变函数求解方法。在复变函数方法中,应力、应变、位移等变量可以通过某一解析函数来表示,这样该方法实际上是把求解满足微分方程的调和函数(或双调和函数)问题归结为求解相应解析函数(复应力函数)的问题。

由于复变函数法可以适用于任意曲线坐标系,因此这一方法在多连通域、复杂几何形状以及高应力梯度等问题求解中广泛使用。复变函数法统一了先前的多种解析求解方法和求解问题的类型,拓展了解析方法的工程实用范围,使固体力学传统解析方法更为完善和灵活。

3 近似求解方法(古典数值方法)

对于固体力学问题,精确的数学解(解析解)只有在少数简单情况下才是可行并具有实际意义的。随着固体力学自身的发展以及实际工程问题的出现,许多复杂的问题求解开始逐渐引入了近似的求解方法。近似计算求解方法在数学形式上是利用近似解代替精确解,近似解不一定严格满足基本方程或边界条件,即放松了对解的限制。与传统解析解法对数学的完美要求相比,近似解法更注重在工程问题中的实用性。近似解法的出现在一定程度上表明了固体力学已经从初期的单纯理论研究逐渐转入到实际工程应用之中,这是固体力学数值方法的开始阶段。

3.1 比拟法

如果不同的物理问题最终都可以转化成同一个数学问题,那么这些

物理量之间就存在着一定的比拟关系,这就是比拟法的基本思想。最重要的比拟法是由普朗特(Prandtl, L.)在 1903 年提出用于求解扭转问题的“薄膜比拟法”,即通过薄膜的平衡方程建立扭转应力函数与薄膜挠度的关系,然后利用实验测得薄膜挠度后就可以确定应力函数的分布规律^[10]。这一方法随后被梅尼兹(Meinesz, V.)和铁摩辛柯(Timoshenko, S. P.)用于梁弯曲问题中。除此之外还出现了其他一些比拟方法,例如,基尔霍夫(Kirchhoff, G. R.)在 1858 年研究细长杆平衡时提出了动力比拟法,雅克布森(Jacobsen, L. S.)在 1925 年研究变直径杆扭转问题时提出电场比拟法等^[8]。使用比拟法的前提是要有一个已知的或能够求得的“参照量”,因此这一方法不具有普遍性,仅限于求解一些少数比较简单的问题。

虽然比拟法与现代数值方法没有多大的关系,但它是固体力学早期的一种对近似求解的探索,从历史发展的角度来看,这种方法体现了求解方式从解析思想到数值思想的转变。在古典数值方法中,具有代表性的方法是以变分法为基础的里兹法以及加权余量法。

3.2 里兹法

瑞利(Rayleigh, L.)在 1877 年出版的著作中关于求解复杂系统的振荡频率时,首先提出了基于能量来计算频率的思想,后来里兹(Ritz, W.)在 1909 年对这一思想进行了总结与完善,并把它用于研究矩形板的弯曲问题,建立目前固体力学计算中广泛使用的里兹法(有时也称为瑞利-里兹法)^[8]。里兹法实际上是作为近似方法的一种变分法,它把传统的微分方程转换为能量泛函的变分形式,这样在给定边界条件下的力学问题就转换成能量泛函的极值问题。里兹法的基本思想是,首先选择一组能满足边界位移约束的容许函数组成试函数,然后调整其中的待定系数来满足能量泛函取驻值或极值条件,这样就会得到问题的近似解。

里兹法是从能量泛函的角度出发来求解微分方程定解问题的,它为以后出现的有限单元法等现代数值方法奠定了理论基础。通过与最小势能原理或最小位能原理结合使用,里兹法在物理和力学的微分方程近似解法中得到了广泛的应用,但由于这一方法是在求解问题的全域上定义试函数,因此在求解域形状复杂的问题以及改进局部求解精度上遇到

困难。

3.3 加权余量法

加权余量法的思想最早由伽辽金(Галёркин, Б. Г.)在 1915 年研究杆件与平板平衡问题时提出^[13],在随后的几十年中出现了很多种类近似计算方法,直到 1956 年克兰德尔(Crandall, S. H.)把这些方法统一称为“加权余量法”(method of weighted residuals, MWR,有时也称为加权残值法)^[14]。加权余量法直接从微分方程和边界条件入手来获得近似解,是一种通用的数值计算方法,可用于求解线性及非线性问题。加权余量法的基本思想是,首先假设一个含有待定系数的试函数,将其代入微分方程及边界条件,然后引入一个权函数消除由此产生的余量并组成一个线性(或非线性)方程组,求解这一方程组可确定试函数中的待定系数,这样试函数就是满足微分方程及边界条件的近似解。由此可见,加权余量法与里兹法的重要区别是,前者的试函数不一定要满足位移边界条件。根据权函数的不同,加权余量法一般可以分为最配点法、子域法、小二乘法、伽辽金法和力矩法等,这些方法之间还可以互相结合使用^[15, 16]。此外,加权余量法中的伽辽金法与前述的里兹法也有着一定的联系和区别,如果两者取相同的试函数,那么获得的近似解是一致的;两者区别是,里兹法中的试函数一般具有极值性,因此里兹法近似解往往代表了真实解的上限或下限,而伽辽金法近似解则无法明确表明这一界限性质。

在加权余量法中,试函数的选取是一个至关重要的问题,不同的试函数会导致不同的计算结果、计算速度和收敛速度等,试函数没有统一的选取方法而多数情况下依靠经验,这是加权余量法进一步发展的最大障碍。不过作为一种通用的数值方法,加权余量法为后来的新型数值方法的发展创造了基本条件。

3.4 有限差分法

有限差分法作为一种微分方程的数值解法很早就出现了,但在固体力学中使用有限差分法最早是由朗格(Runge, C.)在 1908 年求解平面扭转问题时提出的,后来经过理查森(Richardson, L. F.)和索斯维尔(Southwell, R. V.)的逐步完善与发展,有限差分法逐渐用于求解多种弹

性力学问题,如梁弯曲问题、平面桁架及空间桁架等^[17, 18]。有限差分法的基本思想是,首先在求解区域上划分网格,然后在网格的节点上利用差分方程代替微分方程,原问题的微分方程转换成一组线性方程,求解这一方程组便可获得网格节点的近似解。可以通过直接差分法、积分插值法以及变分法建立有限差分法的求解方程。

有限差分法是直接求解微分方程来获得近似解的一种方法,目前在流体力学领域应用是非常广泛而成功的,但对于固体力学中的复杂问题,尤其是具有复杂几何形状的问题,有限差分法精度会降低甚至发生困难。

4 现代数值方法

以里兹法和加权余量法为代表的古典数值方法有一个共同的特点是,近似函数(试函数)是建立在整个求解区域之上的,这样就会产生一个非常现实的问题:当研究对象是一个复杂的结构或具有复杂几何形状时,这种近似方法不易满足精度要求,有时甚至会得出错误的结果。现代数值方法则抛弃了这种在整个求解域上选取试函数的思想,求解模型中采用了“离散化”的思想,近似函数(试函数)仅需在局部满足微分方程。这是一种有效的数值计算思想,包括有限单元法在内的后来发展起来的多数现代数值方法都采用了这种计算思想。现代数值方法开创了数值计算的新局面,并在此基础上产生了固体力学的一个新分支学科——计算固体力学。

4.1 有限单元法

有限单元法的基本数学思想是由柯朗(Courant, R.)在1943年利用变分方法求解圣维南扭转问题时提出的,但当时科朗特只是把微分方程转换成了一组代数方程而没有对其进行求解^[19]。十几年之后,特纳(Turner, M. J.)等人在1956年借助于电子计算机研究了飞机结构问题,这是有限单元法首次成功地用于求解弹性力学问题^[20]。克拉夫(Clough, R. W.)在1960年正式提出了“有限单元法(FEM)”这一名称^[21],随后这一方法在1965年就被阿杰里斯(Argyris, J. H.)推广到了非线性问题的求解之中,显示出了有限元的强大功能和广阔应用前景^[22]。

有限单元法的数值求解思想是,将连续的求解区域离散成一族有限个并且按一定方式相互联结在一起的单元的组合体^[23, 24]。这些离散的单元可以把复杂的求解域化为具有一定几何形状模型,解决了以往很多方法求解复杂区域时遇到的困难。有限单元法作为数值分析方法的一个重要特点是,利用一个单元内假设的近似函数来分片地表示整个求解域上的未知场函数,这一未知场函数一般由单元节点的数值及其插值函数来表示,这样一个连续的无限自由度的问题就可以转化为单元节点上有限自由度的问题。标准的有限元求解方程可以通过能量泛函的变分原理建立,此时有限单元法可以看作是里兹法的一种特殊形式,从而里兹法的所有理论基础都可以适用于有限单元法,这实际上是从理论上说明了有限单元法是求解连续介质力学问题的普遍方法。此外,有限单元法的求解方程也可以通过加权余量法中的伽辽金法来建立,这种途径可以避免求解问题的变分泛函不存在或尚未找到的情况,从而进一步扩展了有限单元法的应用领域。

一般认为,有限单元法的出现直接促成了计算固体力学的诞生^[25]。随着有限单元法和计算机技术的不断发展和完善,这一方法的应用逐渐形成了一个标准的过程,包括模型的建立、方程的形成与求解、结果的获取以及解释等过程,一般对于研究对象的类型或形状等因素的依赖程度大大降低,这是有限单元法与其他数值方法相比的一个巨大优势所在。这样,在对某一问题分析过程中不必过多地专注于方法而是转向对象模型,即由面向计算方法转为面向模型分析和研究。对于解决实际工程问题而言,这种转变无疑是一个很大的进步,因为此时的目的是获得合理的结果,而不是采用什么样的方法。当然,有限单元法在处理某些问题上也有不足之处,例如在高应力梯度问题和高速冲击问题等领域,有限单元法的精度和效率还需要进一步改进,这也间接促使了其他一些数值方法的产生。

4.2 边界单元法

边界单元法是继有限单元法发展起来的另一种有效的数值计算方法,它的数学基础是传统的位势理论和积分方程理论,如弗雷德霍姆(Fredholm)积分方程、希尔伯特(Hilbert)积分方程等,而数值方法则是借

鉴了有限单元法中的单元离散思想。贾斯万(Jaswon, M. A.)在1963年首次提出了间接边界单元法的概念^[26],里佐(Rizzo, F. J.)则在1967年首次把直接边界单元法用于求解弹性问题,建立了弹性力学问题的离散化边界积分方程格式^[27];随后克鲁斯(Cruse, T. A.)在1969年给出了三维问题的数值求解方法^[28]。班努杰(Banerjee, P. K.)和巴特菲尔德(Butterfield, R.)在1977年发表的论文中首次使用了“边界单元法(BEM)”这一名称^[29]。在随后的几年中,经过一大批学者的努力,边界单元法到了20世纪80年代初已经基本成熟,而且被广泛应用于求解经典弹性力学、断裂力学、热传导、流体力学、电磁场、多场耦合等问题以及用于求解诸如弹塑性、蠕变、粘塑性等材料非线性和几何非线性问题^[30, 31]。

在数值技术上,边界单元法采用了有限单元法的单元离散技术,在单元模式以及插值函数上都继承了有限单元法的思想。它通过将边界离散为边界元,将边界积分方程离散为线性代数方程组,再由数值方法求解线性代数方程组,从而得到原问题的边界积分方程的解。边界单元法的最大优点是降低了求解问题的维数。边界单元法只是将实体模型的边界进行单元离散,这样带来的一个重要的好处是特别便于模拟复杂的几何形状。边界单元法的另一个优点是它的高精度。如果使用解析基本解,则由边界单元法获得的解精确满足域内微分方程,只是在一般情况下边界条件不能精确满足。当插值函数能精确描述边界变量的精确分布时,边界单元法的解将没有离散误差,只有运算误差。

与有限单元法一样,边界单元法的求解方程一般可以通过能量泛函的变分原理建立,此时位移的变分取为基本解;此外还可以通过加权余量法建立,此时权函数取为边界单元法中的基本解。边界单元法可以解决有限单元法处理应力高度集中或奇异问题时遇到的困难,在无限域问题以及断裂力学问题等领域边界单元法有着很大的优势。但边界单元法一般依赖于求解问题的基本解,因此不具备有限单元法的普适应用的特点,在一定程度上它可以看成是有限单元法的一个重要补充。

4.3 无网格法及其他一些发展中的方法

无网格法是近20年才发展起来的一种新型数值方法,目前正处在发展的黄金阶段,是国际上数值方法研究的热点之一。“无网格法”(mesh-

less method)这一名称是由贝莱斯科(Belytschko, T.)及其合作者在1996年发表的一篇综述文章提出的^[32]。实际上有关这一方法的思想在20世纪70年代就已经出现了。露西(Lucy, L. B.)和金戈尔德(Gingold, R. A.)在1977年研究天体物理问题时提出的“光滑质点流体动力学(SPH)”方法一般被看作是无网格法的首次出现^[33, 34]。无网格法的基本思想是,首先在求解区域内定义一些离散的节点,然后在这些节点上构造试函数,将求解问题的微分方程转化成一组代数方程,求解这一方程就可以得到原问题的解。根据试函数和微分方程等效形式的不同,无网格法目前已经出现了十几种不同的表现形式。张雄等研究者指出,如果试函数采用具有紧支性质的函数,那么通过加权余量法可以建立上述所有形式的无网格法,而且还可以建立新型的无网格法^[35]。此时,采用紧支函数的加权余量法与传统的加权余量法的区别是,前者的紧支试函数是定义在离散的节点上而不是全域上。

与有限单元法相比,如果说边界单元法是把体问题转换成面问题、把面问题转换成线问题,那么无网格法做得更为彻底,它直接把体、面、线问题都转换成了点问题。虽然无网格法也采用了离散化的思想,但它与有限单元法等其他数值方法的重要的区别是,前者是通过函数逼近而不是通过单元插值来获得近似解,因此无网格法不需要单元网格。无网格法的这一特点使其在高速冲击、动态裂纹、流固耦合等涉及到大变形及不连续问题上获得了巨大成功,而基于传统网格的数值方法在这些领域则遇到了困难。然而,由于无网格法中的试函数大多都不是多项式,为保证精度往往需要在节点子域内(或借助背景网格)进行高阶数值积分计算,使得无网格的计算量远大于基于传统网格的数值方法的计算量,因此计算效率是无网格法目前面临的重要问题之一。此外,无网格法在边界条件处理上也不如有限单元法等方便,尤其是试函数在满足基本边界条件(即第一类边界条件或狄利克雷边界条件)上还存在一定的困难。总体说来,无网格法还不如有限单元法和边界单元法等成熟,它与边界单元法一样,有着显著优点的同时也有着明显的不足,还没有具备像有限单元法那样广泛的适用性。

其他一些用于求解固体力学的计算方法还有诸如有限体积法、离散元法等,这些方法基本与有限单元法类似^[36];还有包括诸如有限条法、无

限元法、半解析单元法、样条边界元法、半解析差分法等所谓的半解析方法^[37],这些方法实际上就是解析方法与数值方法相结合的产物,与传统边界单元法的思想类似;还有各种数值方法之间的相互耦合,如有限元—边界元法,有限元—半解析元法,半解析—边界元法等^[37]。这些数值方法仍在不断发展之中,也是计算固体力学研究的内容之一。

5 总结

固体力学计算方法的形成和发展,既有其学科自身的要求,也有实际工程问题的推动。计算机技术的出现与不断发展使得固体力学的现代数值方法进入了以前所未有的深度与广度,这种发展过程既有横向的,即新方法不断形成;也有纵向的,即原有方法的不断完善与改进。面对如此众多的方法,很难用一个统一的标准把某一方法划分为某一类别。本文仅从总体发展趋势上,按照传统的解析方法、近似求解方法(古典数值方法)和现代数值方法的顺序把固体力学中一些典型的、具有比较重要意义的计算方法的发展简要回顾了一下,这种叙述过程基本是按照从精确解法到近似解法、从解析方法到数值方法这一历史过程和逻辑过程展开的。在很多时候,同一阶段不同的方法之间、不同阶段的不同方法之间都是并行发展或交替发展的,有些方法彼此之间不一定有严格的时间前后区分,但这并不影响对总体发展趋势的了解。回顾这些计算方法的发展过程,可以看到很多方法之间体现了历史继承关系以及补充完善关系,这些关系逐渐促进了以有限元方法为核心的现代数值方法日趋完善并得到了广泛的应用,在此基础上产生了计算固体力学这一新的学科分支。

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, 1985
- [2] 杜庆华, 熊祝华, 陶学文. 应用固体力学基础(上册). 北京: 高等教育出版社, 1987
- [3] 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2000
- [4] Carroll M M. Foundations of solid mechanics. Applied Mechanics Reviews, 1985, 38(10): 1301-1308

- [5] Pao Y H. Applied mechanics in science and engineering. *Applied Mechanics Reviews*, 1998, 51(2): 114 – 153
- [6] 钟万勰,程耿东. 跨世纪的中国计算力学. *力学与实践*, 1999, 21(1): 11~16
- [7] Oden J T, Belytschko T, Babuska I, Hughes T J R. Research directions in computational mechanics. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2003, 192(7 – 8): 913 – 922
- [8] [美] 铁摩辛柯著,常振楫译. 材料力学史. 上海: 上海科学技术出版社, 1961
- [9] [美] 铁摩辛柯,古地尔著,徐芝纶,吴永祯译. 弹性理论. 北京: 人民教育出版社, 1964
- [10] [美] 铁摩辛柯,盖尔著,胡人礼译. 材料力学. 北京: 科学出版社, 1978
- [11] [苏] 列赫尼茨基著,胡海昌译. 各向异性板. 北京: 科学出版社, 1963
- [12] [苏] 穆斯海里什维里著,赵惠元译. 数学弹性力学的几个基本问题. 北京: 科学出版社, 1958
- [13] Galerkin B G. Series solution of some problems of elastic equilibrium of rods and plates. *Vestn. Inzh. Tech.*, 1915, 19: 897 – 908 (in Russian)
- [14] Crandall S H. *Engineering Analysis: A Survey of Numerical Procedures*. New York: McGraw-Hill, 1956
- [15] Finlayson B A, Scriven L E. The method of weighted residuals — a review. *Applied Mechanics Review*, 1966, 19(9): 735 – 748
- [16] 徐次达,陈学潮,郑瑞芬. 新计算力学加权残值法——原理、方法及应用. 上海: 同济大学出版社, 1997
- [17] Southwell R V. *Relaxation Methods in Engineering Science: A Treatise on Approximate Computation*. London: Oxford University Press, 1940
- [18] Richardson L F. The approximate arithmetical solution by finite differences of physical problems. *Trans. Roy. Soc. (London)*, 1910, A210: 307 – 357
- [19] Courant R. Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibration. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 1943, 49: 1 – 23
- [20] Turner M J, Clough R W, Martin H C, Topp L C. Stiffness and deflection analysis of complex structures. *J. Aero. Sci.*, 1956, 23: 805 – 823
- [21] Clough R W. The finite element in plane stress analysis. *Proceedings of the 2nd ASCE Conference on Electronic Computation*. Pittsburgh, Pa., Sept., 1960, 345 – 378
- [22] Agyris J H. Elasto-plastic matrix displacement analysis of three-dimensional continua. *Journal of Royal Aeronautical Society*, 1965, 69: 633 – 635

- [23] Zienkiewicz O C, Taylor R L. The finite element method (5th Edition). Oxford; Boston: Butterworth-Heinemann, 2000
- [24] 王勖成. 有限单元法. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [25] 程耿东, 李锡夔. 计算固体力学发展中的若干问题. 见: 黄克智, 徐秉业主编. 固体力学发展趋势. 北京: 北京理工大学出版社, 1995, 1~21
- [26] Jaswon M A. Integral equation methods in potential theory. Proceedings of the Royal Society of London; Series A, 1963, 275: 23 - 32
- [27] Rizzo F J. An integral equation approach to boundary value problems of classical elastostatics. Quarterly of Applied Mathematics, 1967, 25(1): 83 - 95
- [28] Cruse T A. Numerical solutions in three-dimensional elastostatics. International Journal of Solids and Structures, 1969, 5(12): 1259 - 1274
- [29] Banerjee P K, Butterfield R. Boundary element method in geomechanics. In: Gudehus G, ed. Finite Elements in Geomechanics. London, New York: John Wiley & Sons, 1977, 529 - 570
- [30] Brebbia C A, Telles J C F, Wrobel L C. Boundary Element Techniques: Theory and Applications in Engineering. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1984
- [31] 杜庆华, 岑章志, 嵇醒等. 边界积分方程方法——边界元法. 北京: 高等教育出版社, 1989
- [32] Belytschko T, Krongauz Y, Organ D, Fleming M, Krysl P. Meshless methods: An overview and recent developments. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1996, 139: 3 - 47
- [33] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The Astronomy Journal, 1977, 8(12): 1013 - 1024
- [34] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and applications to non-spherical stars. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 18: 375 - 389
- [35] 张雄, 刘岩. 无网格法. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [36] 吴永礼. 计算固体力学方法. 北京: 科学出版社, 2003
- [37] 曹志远, 张佑启. 半解析数值方法. 北京: 国防工业出版社, 1992

关于“组合变形”教学方法的新探索

杨 静 赵慧明 刘玉庆

(中国矿业大学力学系, 徐州 221008)

摘 要 关于组合变形, 传统的教学方法是按照组合变形的分类逐一介绍。本文以外力分析法为基础, 介绍一种分析组合变形的一般性方法, 可以用来分析任意一种组合变形。

关键词 组合变形, 外力分析法, 新探索

1 引言

在国内绝大多数材料力学教材中, 对组合变形的教学均是按照组合变形的分类来逐一介绍的。但是充其量只能介绍拉(压)弯、弯扭及斜弯曲几种, 而且对于每一种组合变形的判定只能通过教材中给定的外力特点来分析。那么如果构件受任意载荷、发生的是更为复杂的组合变形, 怎样分析? 同学们对这个问题就感到很棘手, 特别是分析不清楚组合变形是由哪几种基本变形组成。本文针对这一问题介绍一种分析组合变形的一般性方法——“外力分析法”。

2 外力分析法

该方法的特点是给出了组合变形是由哪几种基本变形组成的一般分析方法, 而这正是解决组合变形问题的关键。

2.1 外力作用形式分类

根据作用在构件上的外力的方位, 可以分为以下四种情况:

(1) 外力与横截面平行作用且过截面形心, 但与主轴不重合, 如图 1 所示;

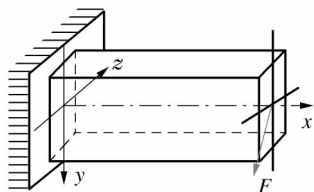


图 1

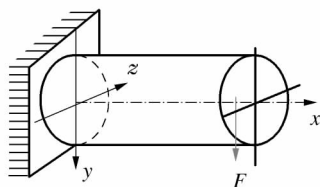


图 2

- (2) 外力与横截面平行作用, 但力作用线不通过形心, 如图 2 所示;
 (3) 外力过截面形心与横截面斜交, 如图 3 所示;

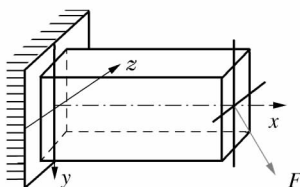


图 3

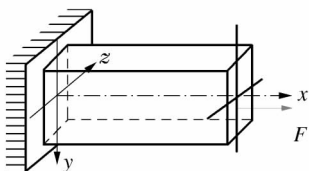


图 4

- (4) 外力与横截面垂直, 但与杆轴线不重合, 如图 4 所示。

2.2 外力分析方法

针对不同的外力作用形式, 采取不同的处理方法。主要有以下三种方法:

- (1) 将外力沿横截面形心主惯性轴分解。对于上述第(1)种外力作用形式可以采取此方法, 如图 5 所示。

图 5 中分解以后得到 F_y 和 F_z , F_y 使构件产生在 xOy 平面内的弯曲变形, F_z 使构件产生在 xOz 平面内的弯曲变形, 所以该组合变形是由发生在两个互相垂直的平面内的弯曲变形组合而成, 也就是所谓的斜弯曲。

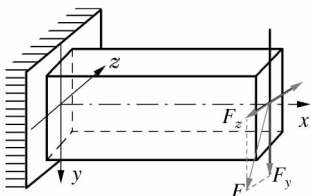


图 5

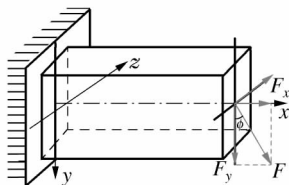


图 6

(2) 将外力沿横截面的法线与切面方向分解。对于上述第(3)种外力作用形式可以采取此方法,如图 6 所示。

图 6 中分解以后得到 F_y 和 F_x , F_x 使构件产生拉伸变形, F_y 使构件产生在 xOy 平面内的弯曲变形,所以该组合变形是由拉伸与弯曲组成。

(3) 外力向截面形心处简化。对于上述第(2)种和第(4)种外力作用形式可以采取此方法,如图 7 和图 8 所示。

值得注意的是,图 7 和图 8 中的外力 F 在向截面形心处简化时,要伴随一个附加力偶的出现,这个力偶是产生扭转变形还是弯曲变形呢?可以这样来说,作用在与杆轴线相垂直的平面内的力偶是产生扭转变形;作用在通过杆轴线的平面内的力偶是产生弯曲变形。

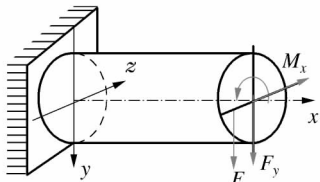


图 7

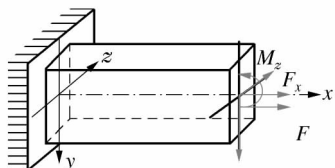


图 8

图 7 中外力 F 在向截面形心处简化时,得到 F_y 和 M_x , F_y 使构件产生在 xOy 平面内的弯曲变形, M_x 使构件产生扭转变形,所以该组合变形是弯曲和扭转变形的组合。

图 8 中外力 F 在向截面形心处简化时,得到 F_x 和 M_z , F_x 使构件产生拉伸变形, M_z 使构件产生在 xOy 平面内的弯曲变形,所以该组合变形是拉伸和弯曲变形的组合。

3 结束语

由此可见,对于作用于构件端部的外力,通过三种外力分析方法进行分析,使得得到的每一个力或力偶对应着一种基本变形,因此组合变形是由哪几种基本变形组合而成就很清楚了,这是至关重要的。只有把这一点弄清楚,才能采用叠加法分析组合变形的应力、强度和刚度问题。这种外力分析方法可以分析任意一种组合变形。

教学实践证明,在这样的教学思路下,学生可以很容易地掌握分析组合变形的方法,在很短的时间内了解常见的几种组合变形,提高教学效果。另外,按照传统的教学安排,组合变形需要 4 学时,现在只需 2~3 学时,提高了教学效率。

管道结构漫谈^{*}

陈贵清

(唐山学院科研处,河北唐山 063000)

摘 要 本文主要介绍了管道结构的定义、古代管道和现代管道工程的一些情况、管道的分类、管材的类别及要求。通过一些管道事故案例,分析了现代管道系统发生事故的原因。最后介绍了一门新的学科——流体传输管道动力学。

关键词 古代管道,现代管道,管道分类,管材要求,管道事故,管道动力学

1 管道结构

用于输送液体、气体或松散固体的管道及其支承结构。输送松散固体时用水或气体作介质。管道必须能防漏和耐受输送物质的温度、压力(内力)、腐蚀和磨损作用。管道结构还要承受其自重、输送物料重和各种外荷载,如土荷载、水荷载、风和由风产生的振动荷载、人群、车辆和施工机械所产生的荷载、温度作用和地震作用等^[1]。

管道结构设计会涉及到许多力学知识,诸如:理论力学、材料力学、结构力学、流体力学、土力学、机械振动等。

2 古代的一些管道结构

人类在早期只能依靠泥土、木料及其他天然材料从事营造活动(civil

^{*} 本文受唐山市重点实验室项目基金(04363901B-1)和唐山学院博士创新基金(03001C)联合资助。

engineering,土木工程一词即渊源于此),后来出现了砖和瓦这种人工建筑材料。

我国是最早使用管子输送流体物质的国家,早期使用的管道结构主要是陶制的,陶管具有较高的耐酸碱性,主要用于排水。考古挖掘出的一些陶制文物足以说明这一点。

(1) 河南省登封王城岗龙山文化时期城址出土的 4 300 多年前的城市排水管道。这种陶制管道每节长 35~45 厘米不等,直筒状,两端粗细不同,细部有榫,可以套接。出土时管道呈北高南低状,宜于向城外排水(见图 1)。



图 1 河南省登封王城岗出土的陶管

早在公元前 5 000 年,中国在烧制陶瓷的柴窑中已按照热烟上升原理用烟囱排烟。这也许是最早应用流体力学知识的例子。



图 2 华清池畔发现的陶制水管道及建筑遗址

(2) 陕西省考古所在对华清池保护范围边缘地带的原省游泳馆旧址进行考古发掘时,清理出一座唐代大型的建筑遗址,目前已发掘部分东西长 80 余米,可见该建筑十分宏伟。考古部门在这处建筑遗址的旁边还发现了总长约 40 余米的 5 条陶制水管,据推测,它们很可能就是唐代华清池汤池的排水管道。

(3) 战国时,秦在建都咸阳后修建了上林苑。上林苑规模

宏大,地跨现在的西安、咸阳、周至、户县、蓝田等地,面积之大算得上是空前的。在这个夯土台基处发现
有两条陶制管道组成的暗排水
道,在台基西边发现有红烧土、
有散水和廊道遗存。

(4) 郑韩故城是春秋时期郑国和战国时期韩国先后建都的都城遗址,位于新郑市城关附近的双洎河与黄水河交汇处。这处属战国晚期至西汉初期的大型制陶遗址,距今约 2 300 年。在陶制的井口周围,还出土了陶制的完备排水系统。陶制的管道排列整齐,纵横交错,其中主管道是方形,分管道是圆形。每隔一段,方形主管道上就设有明渠。考古专家说,这是古人为了清理污物方便而设的,作用类似于现在的窨井。



图 3 战国秦上林苑中夯土台基里的暗置陶水管道

(5) 在浙江省温岭市大溪镇的古城遗址发现,在离地面只有 20 厘米的地方分布着密集交错的供排水管道,最大内径达 18 厘米。据专家考证,这些供排水管道属于宋代。

(6) 武夷山城村汉城,位于武夷山景区 21 公里,紧靠南武路。城址面积 48 万平方米,宫殿中的室内浴池为我国所发现的古代最早的宫内浴池,其供、排水管道设施非常严整、完备,是古代宫殿建筑的典范。

(7) 距今 3 000 多年的克诺索斯宫(Knossos)位于希腊伊拉克里翁城(Iraklion)南 5 公里。王宫铺设至今看来依然比较科学、完备的供水、汇雨和排水系统。在东宫王后寝宫旁边的盥洗室看到的部分排水管道相当别致,它是由一节节两头小、中间大的橄榄状陶土烧制的圆筒衔接起来的。当污水通过管道排到外面时,根据水力学原理,水流随着管道口径的变化产生冲力,达到避免堵塞排水系统的目的。看,这里竟然应用了水力学!

(8) 在伊拉克巴格达郊区的考古挖掘中,发现了约在公元前 2500 年建的砖砌排水管,并有支管和住房的用水清洗的厕所连接,这是极少的古代排水管中流入生活污水的例子。

(9) 公元前 6 世纪为罗马广场排水建造的,称为大阴沟的拱形管道,高 4.2 米,宽 3.6 米,至今仍在使用。如此大的拱形管道一直可以使用至今,说明其强度、刚度设计都很好,说明了古罗马人对材料力学知识掌握得很好。

(10) 约在公元前 200 多年,已出现了用竹筒输送卤水的管道,由于竹子可就地取材又较耐腐蚀,这项技术流传至今。宁厂古镇引卤栈道石孔起点位置的海拔高度在 237 米左右,末端的龙门峡口处,石孔位置的海拔高度只有 140 米左右,全程 80 公里,自然落差 97 米,降幅为 1.21‰,所以,在小范围内看,几乎是水平的,且中途没有高低起伏,这正是古时引卤(即输卤)之必须。现在,输卤管道一般都用钢铁管或塑料管,而过去能用作输卤管道的只有桤竹,即先将竹子的内节打通,外用篾箍加固,以防竹子破裂而漏水,然后用牝牡相衔的方法,将竹子一根一根地连接起来,就成了输卤的桤竹管道。桤竹管道不同于现代金属制作的管道,它没有金属材料的可塑性(主要指可加弯头),便适应不了不规则转弯的地形。古人为解决这个难题,创造了架“别支”的办法,即在转弯处置一圆木盆,并在圆木盆上朝拐角的两个方向凿孔,以连接转向不同方向的桤竹。

(11) 1974 年至 1975 年,在咸阳市东咸阳源的考古挖掘工作发现,秦始皇的咸阳宫建有御用的高级浴室,室内有浴池、取暖的壁炉、大型地漏及排水管道等。

(12) 在胶南市区西南 26 公里处海滨,有一座古老的高台,那就是声著史籍的琅琊台。1993 年以来,人们在琅琊台发现 5 处古陶管。现在便于游人参观的是在观龙阁下环山路边的两处。陶管直径 30 多厘米,壁厚 5 厘米,节节相套,中间用当地棕色粘土粘合缝隙。条条陶管通琅琊台中,但谁也不知通达多远多深。经中国历史博物馆考古专家用碳 14 测试,这些陶管是战国时期烧制的,是我国目前发现的古代最完备的陶质管道设施。

(13) 秦咸阳城遗址是全国重点文物保护单位。位于咸阳城东 16 公里处渭城区窑店镇境内。东西横距 12 公里,南北纵距 6 公里。秦咸阳城始建于公元前 350 年,作为秦国都城长达 144 年,公元前 206 年被项羽焚毁。在长陵火车站附近,出土有陶圈古井 70 多眼,并与若干 10 多米长的陶质管道组成一个密集的供排水系统。

(14) 秦甘泉宫遗址是陕西省重点文物保护单位。位于咸阳城西 45

公里处乾县注汧乡南孔头村。秦代文化遗址。遗址东西横距 250 米,南北纵距 400 米。甘泉宫兴废年代待考。出土文物有陶质筒形水管、90 度拐弯管道、蛟龙绕玉璧空心砖、种类繁多的云纹瓦当、板筒瓦残片等。

(15) 明朝建都北京,大量采用砖和条石建筑地下排水管道。宽达 1 米左右,高达 2 米左右。

(16) 在河北易县燕下都出土了属于战国(公元前 475—前 221 年)后期的圆形陶制排水管。

(17) 陕西西安出土了汉朝五角形陶制排水管。

中国古代没有力学^[2]。这是说在古代力学没有形成一门独立的学科,但其思想在管道结构与制作中是处处存在的。一些古代陶制管道至今保存完好,说明了古代劳动人民的高超智慧。例如,应用材料力学的知识,我们知道同样面积、同样材料的横截面,空心圆管的抗弯性能要大于矩形截面的管道;陶管埋设的深度和管壁厚度的大小是密切相关的,埋管越深,上面承重能力越大;埋管越浅,上面承重能力越小。用料相同的情况下,陶管越粗,输送能力越大,但安全性越差。古人是如何计算的?这是一个谜!

另外,利用水流随着管道口径的变化产生冲力,可以达到避免堵塞排水系统的目的。这也符合现代水力学原理,令人惊叹!

3 现代的管道结构

世界现代管道始于 19 世纪中叶。1859 年 8 月,美国宾夕法尼亚州打出第一口油井,1863—1865 年试用铸管输送原油,因漏水未能实际应用。到 1895 年才生产出质地较好的钢管,并于 1911 年在输气管道的钢管连接技术上采用了乙炔焊接,1928 年采用了电弧焊接代替了乙炔焊。之后使用了无缝钢管和高强度钢管,使管道建设的耗钢量大大降低。

油、气管道的增压设备——泵,最初以蒸汽为动力直接驱动;19 世纪 90 年代初,出现了内燃机后使用内燃机驱动;1920 年开始用电动机直接驱动,缩小了设备的体积,提高了输送效率;1949 年开始用内燃汽轮机驱动的离心式泵,效率有了很大提高。

1879 年,中国用铸铁管从旅顺市的龙引泉引水供水师营驻军用水,这

标志着引进西方供水技术的开始。

现在,一些超远型输油、输气管道也已投入使用或建设中,例如:

(1) 中哈原油管道全长 3 088 公里,从哈萨克斯坦境内里海岸边的阿特劳出发,经过肯基亚克与阿塔苏,最终到达中国新疆的独山子,计划于 2006 年贯通。

(2) 从新疆一直延伸到上海的 4 000 公里西气东输管道干线,穿越丝绸之路并且横跨中国 10 个省区。2002 年 7 月实施的这项重大能源工程,目前管道焊接全线贯通,上游气田正在开发,2004 年建成 140 亿立方米生产能力,2005 年 1 月 1 日正式供气,设计每年输气能力 120 亿立方米。

(3) 继西气东输工程之后,实施西部大开发战略的又一标志性工程——新疆独山子至兰州原油成品油管道工程将于 2004 年 10 月全线开工。整个工程将于 2006 年建成投产。该工程由中国石油天然气集团公司建设,全长 3 986 公里。

(4) 我国第一条“地下大动脉”大庆至秦皇岛输油管线直通油港码头,全长 984 公里,年输油能力 2 000 万吨。港内原油管道总长 4 524 米,管道直径 630 毫米,年输油能力 1 500 万吨。

现代的管道结构有以下的发展趋势:(1) 以高新技术为手段,建设长距离、大管径、高难度的管道输运系统;(2) 在管道设备中不断采用新材料、新技术,特别是使用了电子遥控技术,大大提高了管道输送的自动化水平;(3) 除了输送油、气之外,还在研究输送煤炭、矿石、粮食等大宗货物,甚至研究在大口径管道中配备形似集装箱的车厢来输送旅客,以扩大管道的输送功能。

4 管道的分类、管材的类别及要求

按管道敷设的方式可分为地下管道、水下管道和架空管道三种。

承受高温高压的管道要用金属管;有压管道均用环形断面,主要材料为钢、铸铁、预应力混凝土、石棉水泥、塑料、玻璃钢(增强塑性)等。无压管道多为自流管道,其断面不限于环形,如城市的雨水和污水管、农田灌溉管等,主要用混凝土和钢筋混凝土、砖石砌体、陶土制品等。

接口构造应根据管道材料、安装方法和使用要求等条件确定。管道通

常采用焊接接口。铸铁管和预应力混凝土管大多采用承插式接口。预制混凝土与钢筋混凝土圆管可采用平口、企口或承插口等形式。现场灌注钢筋混凝土管可用橡胶或塑料止水带做接缝。接口分为刚性和柔性两类。架空管道,尤其是输送油、气等高温介质的管道应设置伸缩接口或Ⅱ型膨胀弯。

防蚀和防渗问题。管道应考虑管内外介质的化学腐蚀作用而采取必要的防腐蚀措施。对输送高温介质的管道要有相应的保温措施。砖砌管道一般用水泥砂浆抹面防渗。

附属设施。应根据使用要求和受力条件设置各种必要的附属设施:给水管道上应设置阀门或阀门井,在有压管道上的转弯处应设置防止推力的支墩;排水管道上应设置各种用途的检查井、阀门井、跌落井和进出水口等。架空管道支承处应按伸缩要求做活动或固定支座。

5 现代管道运行中的事故分析

管道运输是与铁路、公路、水运、航空并列的五大运输方式之一。压力管道是在一定温度和压力下,用于运输流体介质的特种设备,广泛用于石油化工;冶金、电力等行业生产及城市燃气和供热系统等公众生活之中。这些介质有些是具有爆炸危险性、毒性或对环境有破坏性,一旦泄漏将会造成人员伤亡、财产损失、环境污染和巨大的经济损失(参见图4~9)。随着工业生产的发展及城市燃气和热力管网的普及,各类管道的数



图4 2005年1月31日上午9时左右,杭州市某化工厂的输气泵管发生爆炸引起大火



图5 2004年1月8日成都地下管道爆炸,40米大街如“地震”开裂



图6 2004年5月29日下午7时45分, 泸州纳溪区发生天然气管道爆炸



图7 2004年2月27日18时,石家庄一居民小区地下管道发生爆炸



图8 2005年1月20日下午4时左右,乌鲁木齐发生一起天然气管道爆炸事件



图9 2003年4月24日,消防队员在加拿大多伦多市中心的天然气爆炸现场进行救援

量不断增加,特别是运输可燃性、易爆性及对人体和环境有害性介质的压力管道的数量逐年递增,这也使发生事故的可能性增大。

从1994年到2003年共发生造成人身伤害的管道事故112起,造成死亡299人,受伤844人,直接经济损失7 869.27万元。综合其原因主要有:

(1) 设计原因主要包括: 选用材料不当; 阀门、管件选型不合理; 静态和动态应力分析失误等。这与材料力学的知识有密切的联系。

(2) 制造原因主要是指:管子、管件(三通、变径管等)、阀门制造缺陷引起的事故。

(3) 安装原因主要是指:施工安装质量低劣和违章施工引发的事故。

(4) 管理不善主要包括:使用管理混乱,无操作规程,违章操作;不按规定进行定期检验等。

(5) 管道腐蚀主要原因是:年久失修,也有是属于管理疏忽、防腐措施不善等原因,有的甚至因错用材料致使腐蚀速度加快。

6 一门新学科——流体传输管道动力学

由于管道事故频发,促进了设计者对管道动力学特性的研究,并逐渐成为一门独立的学科分支——流体传输管道动力学^[3]。

流体管道的动态问题,通常是指流体管道内的非恒定流动及其引起的管道的机械振动。非恒定流动会降低管道结构的效率,增加耗能,缩短元器件寿命,使仪表失灵等,但其主要危害还是引起管道的振动和噪声。

管道的机械振动会引起管道连接部位的松动或管道发生破裂,轻则造成泄漏,重则引起爆炸而酿成重大事故。所以,控制流体管道内的非恒定流动及其引起的管道振动是极为重要和必要的。流体管道动力学的任务就是对管内非恒定流动和管道机械振动的动态特性进行分析研究;对管道系统进行合理的设计,控制管内非恒定流动和减少管道机械振动;对因机器固有特性或系统正常工作不可避免产生的流体脉动或冲击,采取合理的消振和滤波措施。

从19世纪初叶到20世纪中,管内非恒定流动的研究主要是关于大直径管内的压力脉动和水击(水锤)分析。20世纪50年代后期,随着航空航天等高新技术领域的发展,管内非恒定流动的研究转到小直径管。研究内容包括管道的瞬态响应和频率响应,流体惯性和黏性对管道动态过程的影响。

流体管道的振动,通常是一种典型的流固耦合振动^[4]。管内流体振动引起管道作机械振动,而管道机械振动反过来又会影响到管内流体的动态行为。由此产生了形形色色的流固耦合现象。流固耦合问题由于其交叉性质,从学科上涉及流体力学、固体力学、动力学、计算力学等学科的知

识;从技术上与不同工程领域,如土木工程、航空航天、船舶工业、动力、海洋、石化、机械、核动力、地震地质、生物工程等均有关系。

近 30 年来,流体管道的振动问题一直是研究的热点,发表的文章数量之多就像当年研究结构稳定性一样。

参考文献

- [1] 中国大百科全书. 土木工程卷. 北京,上海: 中国大百科全书出版社,1987,212
- [2] 武际可,隋允康主编. 力学史与方法论论文集. 北京: 中国林业出版社,2003, 1~13
- [3] 蔡亦钢编著. 流体传输管道动力学. 浙江: 浙江大学出版社,1990
- [4] 邢景棠等. 流固耦合力学概述. 力学进展,1997,27(1): 19~36

整体观在结构力学教学中的运用

和 燕*

(河南理工大学, 河南 454003)

摘 要 结构力学是与工程实践紧密相连的一门重要学科,在目前的教学中,存在整体观念强调不够从而教学效果不佳的现象,笔者提出两种方法:目录法和比较法。经教学运用,效果良好。

关键词 整体观,结构力学,教学,目录法,比较法

1 问题的提出

结构力学是大土木学科体系下的一门重要课程,也是与工程实践紧密相连的一门重要课程,在土建、水利、道桥等各专业中,都有结构力学课程的设置,因此,研究结构力学的教学方法,从而更好地指导学生,是一件很有意义的事情。

作为结构力学课程的一名主讲教师,笔者在多年的授课中,也积累了一些心得体会,在与同行的交流切磋中窃以为应加强对整体观的认识与应用。

所谓整体观即为一种整体的观点,看问题、分析问题只有站到一定的高度才能一目了然。没有整体观念,就像没有穿珍珠的线,再多的珍珠也形不成项链。在结构力学的教学中曾流行一种“解剖术”,追求“目无全牛”的庖丁式方法,其实是对庖丁法的一种误解。很多老师认为只要把每一个单元每一个细部的问题解决了,整体自然就解决了,其实不然。笔者在起始授课时也十分重视细部,常对学生强调不同类型的题型一定要认真掌握,细处明白了,整体自然就清楚了。然而,授课效果并不好,很多学

* 和燕,女,1973年生,毕业于西北建筑工程学院,焦作大学讲师,河南理工大学工程力学专业研究生,主要从事力学的教学与研究。

生在刚接触一些问题时总是感觉十分清楚,然而时间一长,所学内容搅到一起,常常不知所措,慢慢就想放弃。笔者在一段时间的反思后才明白原因,这就是整体观念强调不够的结果。

结构力学课程一般在大二开,学生虽然已经接触到大学和以前学习方法的不同,但很多学生还形不成自己行之有效的学习方法,还需要教师的帮助和引导。在这种情况下,当学生接触到结构力学后,常常恐惧其问题的繁多,如果教师只强调各种题型的重要性,学生常产生一些排斥心理。在被动的情绪下,天天困惑于繁多的结构力学问题,学生常疲于计算疏于思考,暂时是可以记住一些典型问题的解法,但当学的内容多时就难起作用,效果不好自然是难免的。

为使学生摆脱困境,增强对结构力学课程的兴趣,提高教学效果,笔者曾尝试了一些方法。在这些方法中,比较重要的有目录法、比较法、综合图表法。

2 整体观在结构力学教学中的运用

2.1 目录法

目录法即利用目录来增强学生对课程整体观念的一种方法,其表现有大目录法和小目录法。大目录法即将全书的目录(可根据需要适当调整、变化)通过树形层次图表达在一张纸上,通过直观图表使学生把握知识的轮廓。小目录法是指在具体知识的学习运用中,也利用图表将具体知识点集中串联起来,从而达到既突出重点又涵盖全面的目的。前者在学生需要对课程作整体概括时比较好用,而后者则在学生具体研究问题时很有用。在结构力学教学中,当学生首次接触课程、每章做一小结及总复习时可以使用大目录法把握思路;而在每章具体知识的学习中则宜使用小目录法来掌握细节。下边以包世华先生主编的结构力学教材为例来说明:

在需作整体概括时可画大目录图(图1):

在具体的章节中可画小目录图帮助理解掌握(图2,以力法为例说明);当然,也可作更详细的目录图(此处略)。

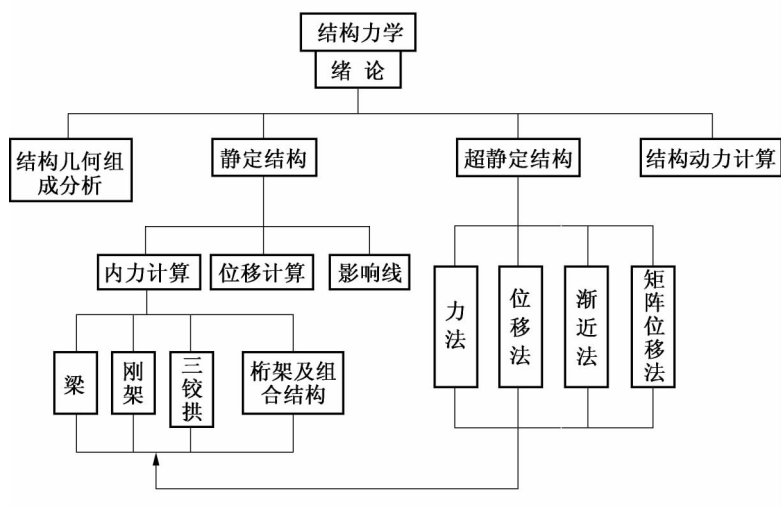


图 1 结构力学大目录树形层次图

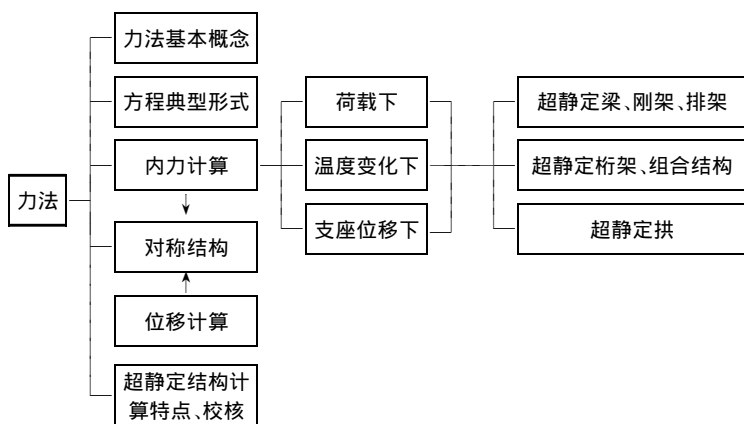


图 2 力法目录图

在笔者的授课中,当学生看到这种形式的目录,总是一阵惊喜,因为他们清楚地看到了结构力学的全貌、层次,一个章节就是一张表,一门结构力学就是一张表,没有了厚书的威慑,没有了被摆布的拒绝,余下的就是好奇和将其扩展的冲动,而能将学生的好奇心调动起来,无疑就是一个成功的引导。

在学生的具体使用中,他们也不断地丰富这些看似简单的目录表,经常反映不同的使用方法,比如:每一次听课前,先在表中找到相应的位置,作一记号,听时就没有盲目的感觉;做题时也先看看表,知道到了哪个位置,无形中就将题型作了分类;复习时也先看看表,很有能出能入、能合能分的感觉,一张简单的图表仿佛变成了一段密码,自己一看就知道掌握的情况,用起来十分方便。

有了不同层次的目录,就像在远处看山,一切尽收眼底。

2.2 比较法

有了整体概念后,我们需要利用庖丁式方法找联系、关节,再肢解、解剖,即所谓的化整为零,在这个过程中,最易被人忽略也最为重要的一点就是整体观,也就是我们所说的比较。

在结构力学的教学中,我们需要能将问题分解,化难为易,逐个解决,同时应该记住结构力学是一门系统的科学,不同的方法只是在解决问题的前提下的不同的表现,很多地方是有联系的,记住这个联系会引导我们同中求异、异中求同,从而更好地认识这门科学及其中的各种问题。

比如在学过力法和位移法后,不妨作一比较(见表1),从中可以更好的看到它们的本质。

表1 力法与位移法比较表

	基 本 概 念	基 本 方 程	基 本 步 骤
力 法	以多余约束力为基本未知量,以静定结构为基本体系,通过变形条件建立力法方程,在基本未知量求出后,通过平衡条件计算结构全部内力的一种方法	$\delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \cdots + \delta_{1n}X_n + \Delta_{1p} = 0$ $\delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \cdots + \delta_{2n}X_n + \Delta_{2p} = 0$ $\cdots \cdots$ $\delta_{n1}X_1 + \delta_{n2}X_2 + \cdots + \delta_{nn}X_n + \Delta_{np} = 0$	1. 选基本未知量与基本体系 2. 列基本方程 3. 计算系数与自由项 4. 解方程,求基本未知量 5. 作内力图

续 表

	基 本 概 念	基 本 方 程	基 本 步 骤
位 移 法	以结点位移为基本未知量,以超静定结构为基本体系,通过平衡条件建立位移法方程,在基本未知量求出后,利用位移和内力的关系求杆件和结构的内力的一种方法	$k_{11}\Delta_1 + k_{12}\Delta_2 + \cdots + k_{1n}\Delta_n + F_{1p} = 0$ $k_{21}\Delta_1 + k_{22}\Delta_2 + \cdots + k_{2n}\Delta_n + F_{2p} = 0$ $\cdots \cdots$ $k_{n1}\Delta_1 + k_{n2}\Delta_2 + \cdots + k_{nn}\Delta_n + F_{np} = 0$	1. 选基本未知量与基本体系 2. 列基本方程 3. 计算系数与自由项 4. 解方程,求基本未知量 5. 作内力图
联系 (均为超静定问题的求解方法)	有如下对应关系: 多余约束力——结点位移 静定结构——超静定结构 变形条件——平衡条件	有对应关系: 柔度系数 δ ——刚度系数 k 未知力 X ——未知位移 Δ 力 F ——位移 Δ	两种方法大的步骤相同,在每一步的细节上有很大差别(见基本概念上的联系)

比较法是整体观念的一种表现,没有整体观,就很难对看似不同的问题作一比较研究;在比较法中,求同存异是很重要的一点,借用这个外交词汇,我们确实能得到深刻的启示。

3 小结

在结构力学的教学中,正如在其他各种问题的处理中,都需要方法论的指导,而笔者认为,在各种方法的运用中,一定不能忘记我们的出发点和终结点,那就是整体观。在整体观中,目录法追求的是“跳出去,旁观者清”的境界,力求避免“不识庐山真面目,只缘身在此山中”的困惑;而比较法追求的是“化零为整”的目标,力求避免“盲人摸象”导致的可笑结局。只有在整体观念的指导下,我们才可能避免中间辛辛苦苦,结局一盘散沙、浑然不解的学习苦旅;才会在看似枯燥的学习中,体会到别人不能体会的追寻规律的幸福和克服困难的乐趣。

由于种种原因,在我国高校,方法的研究、应用十分薄弱,希望我们的

莘莘学子能尽早走出困境,真正步入知识的神圣殿堂,享受到学习和应用的乐趣。

参考文献

- [1] 包世华主编. 结构力学. 北京: 中央广播电视大学出版社,1993
- [2] 杨天祥主编. 结构力学. 北京: 高等教育出版社,1993

力学概念中的哲学理念

安登峰¹ 和 燕²

(1 西安建筑科技大学, 西安 710055;

2 河南理工大学, 河南 454003)

摘 要 力学是人们从生活实践中感受、总结、提炼出来的, 因此, 力学中常常渗透有许多有“人情味”的概念, 透过这种表象, 当再思考时, 能得到许多人生上的启示: 比如受力、运动、静止、平衡、变形、强化、破坏等等, 通过比较、深化, 我们可以借鉴力学上的原则为人生做一些参考和指导, 从而更好地筑建自己的人生大厦。

关键词 力学, 生活, 哲学

力学是人们从生活实践中感受、总结、提炼出来的, 因此, 力学中常常渗透有许多有“人情味”的概念, 这自然是很容易理解的。然而, 在笔者的工作中, 由于经常体会、思考这些概念, 却得到一些有用的人生启示, 现奉献出来与大家分享。

1 内力和外力

力学中, 外界施加在物体上的作用力叫外力, 如荷载、温度、支座变化等引起的力。在外力作用下, 物体内部所产生的抵抗力叫内力。外力有分布力与集中力, 按不同的方式可使物体发生拉、压、弯、剪、扭的变形。在均匀分布的外力下, 由于物体截面的规则与否, 也会出现不同的内力分布。

生活中, 当我们把上面的“物体”换成“人”时, 可以看到, 概念仍然成立。每一个人, 每时每刻都要受到许多外力的作用, 不仅仅是上面的几种原因, 也不仅仅是上面的几种形式。在这些外力的作用下, 我们也必然会

产生相应的抵抗力,但日常生活中,很少有人注意自己的内力,自己内力的大小。如果我们明白,不光力学中有内力,生活中也需要时,我们一定会有意识积累自己的内力,我们的内力也一定会有很好的增长,这在社会日益飞速变化的今天,无疑是件好事。

2 运动、静止、平衡、不平衡

力学中,当有外力作用时,物体即会发生加速运动,这是一种不平衡的状态。当外力为零时物体即保持平衡。平衡有两种,匀速运动状态和静止状态,两种结果的出现取决于运动的初始状态,当初始速度为零时,即保持静止;当不为零时即出现匀速运动。

生活中,常常可见在外界作用力(金钱、地位、名誉、虚荣等)的作用下,人们心理失衡,心理抵抗力(可视为一种特殊的外力)减少,当人们所受力系的总外力大于零时,难免会作出许多疯狂的举动(“加速运动”),而进入失控的不平衡状态。许多人开始加速时,常误以为是在进步,这是一种假象,很多灾难是出现在许多辉煌之后的,就像一辆汽车在路面上一直加速,它的最终结果不是撞坏就是摔入沟中一样。

因此,在我们的生活中,迫于外力我们不得不行动,然而,在行动中,在进步时,必须控制速度,保持平衡,让自己的人生之车匀速行驶,在匀速中思考,选择,再前进,千万不可贪图一时的快感,一味加速。加速是快,但一味加速的结果是失控。

另外,很多人明白平衡,却不知道平衡也包含静止,当他们在无忧无虑中贪图享乐、虚度时光时,不知道“流水不腐”的水早就腐臭了。

因此,我们强调平衡,却也不主张静止,我们不能让自己的这部车撞坏、摔坏,也不能让它在原地锈坏。

3 变形(弹性变形、非弹性变形、弹性后效、永久变形、塑性变形、蠕变)

力学中,在外力作用下,物体会发生变形,绝对不发生变形的刚体是理论上的抽象模型,在现实生活中是不存在的。变形有弹性变形、非弹

性变形,前者在外力去掉后会恢复原状,后者则会保存下来。在非弹性变形中,有一部分会随时间慢慢消失,这是弹性后效,最后不能消失的部分叫永久变形。在一定的应力之下,永久变形随时间会慢慢增加,这是蠕变,属流态变形,而和时间无关、只和应力有关的永久变形叫塑性变形。

生活中,我们常常可以看到类似的现象。当看到一个伟大的人,听到一则激动人心的事时,我们常会觉得热血沸腾,觉得自己在净化,在提升,好像自己也伟大、崇高了起来,马上就能做出惊天地、泣鬼神的壮举了。然而,当诱因一旦失去,我们啪的从半空坠地,又恢复原来的生活,又恢复原来的自己了。这里,主要是大多数人不明白变形的力学原理,而明白的人又大意了,于是让一个简单的现象一再出现。

从力学中可以看到,上面的现象是弹性变形。如果真想让自己这块材料有点变化,必须继续加载,持续用力超过“弹性极限”。我们要明白,产生的“非弹性变形”中,还有“弹性后效”会失去,因此,用力必须延长时间,而长期用力的另一个好处是还会带来“蠕变”。

因此,当我们有一天发现了触动自己的事,我们不要一时激动就马上行动,应该多接触它,让它对自己继续施加影响,直到使自己发生了“塑性变形”后再行动,这样才能取得较好的效果。

4 脆性材料、塑性材料、强化

力学上,脆性材料是指抗拉强度低、变形能力差、抗压能力强的一些材料,如铸铁。塑性材料是指抗拉强度高、延伸性能好的一些材料,如低碳钢。铸铁的应力应变曲线比较简单,没有明显的弹性阶段,也没有屈服和颈缩现象,在较小的拉应力下就被拉断。由于其抗拉强度低,不宜作抗拉零件材料。在工程中,为了更好地利用,可以将其球化处理成为球墨铸铁来改变其力学性能。

低碳钢应力应变的曲线比较复杂,有四个明显的阶段:弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、颈缩阶段。为了提高材料强度,我们可以在第一次加载时,使材料强度达到屈服以上,然后卸载实行第二次加载,在第二次加载时,材料的比例极限会提高,但塑性和延伸率却有所下降,这就是冷作

硬化,也可简称强化。

生活中,人也可简单分为两类,有脆性性质的人和有塑性性质的人。前者就像上面的脆性材料,抗拉强度低,抗压强度高,也即能受压不能受拉,在好话、顺境下多飘飘然,在逆言逆境下则表现出众。因此,对这类人,不能让其太顺,应做某些环境、心理处理,使其性能有所改变,就像将铸铁加工成球墨铸铁。塑性性质的人表现比较复杂,在外力下会出现多个阶段,可类似称做弹性、屈服、强化、颈缩。对不同的人,在不同的外力下,达到各阶段的时间和强度是不同的。故而,我们应明白自己是何种类型的人,我们的各个阶段极限在什么范围。如果我们想让自己一直顺利工作下去,就应把外力放在限定范围内;如果想让自己得到强化,必须加载超过屈服极限,然后卸载后再加载即可。生活中有很多人在颈缩阶段出了问题,我们应引以为戒。当然,对两种性质都有的人,我们更应慎重,可以仿照力学上的叠加和简化来处理。

5 材料破坏

力学上,材料破坏可分为三类:强度破坏、刚度破坏、稳定性破坏。当材料在外力下达到容许强度时发生强度破坏;达到容许刚度时发生刚度破坏;当出现类似细长杆在受压下丧失直线形状的平衡而过渡为曲线平衡时,发生失稳现象,出现稳定性破坏。其中强度破坏又可分为屈服破坏和断裂破坏,前者如普通碳钢,以发生屈服现象、出现塑性变形为失效的标志;后者如脆性材料铸铁,其失效现象则是突然断裂。

生活中,人们也会经常出现失效状态,导致失效的原因也有类似的三种:强度、刚度和稳定性问题。当抵抗不住外力的侵袭时,如果我们强度不行,会出现毁灭性的打击(如断裂)和较大的变形(如屈服);如果我们在外力(如糖衣炮弹)下刚度不行,变形超过限值,则会出现“刚度破坏”(如腐败);如果我们的稳定性不行,则可能在刚度强度均好的情况下出现最令人可惜的稳定性破坏(如家庭解体所带来的灾害)。因此,我们应在日常生活中着重加强自己的强度、刚度和稳定性,不要让我们成为类似力学实验或实际工程中被废弃的材料。

6 超静定结构和疲劳破坏

超静定结构和疲劳破坏是力学工作者非常熟悉的两个名词。超静定结构体系是指有多余约束的几何不变体系,在外力作用下如果某些支撑失效,结构仍能保持平衡,继续承载;疲劳破坏是指材料在较低强度下由于反复加载,变形积累很快而导致的材料在较低强度下的破坏。

在日常生活中,每个人都有许多负荷,在不经意中我们都变成了结构,谁都不愿让自己一承载就破坏,因此我们应该多想想超静定结构,多给自己几个多余约束,而不要念念不忘它的“多余”。在生活中,也有这种现象,我们承受的并不多,可在日复一日年复一年的循环中我们忍无可忍,终于有一天崩溃了,让所有的人都感到诧异,这其实就是发生疲劳破坏了。因此,不管是力学还是生活,多余常常并不多余,而简单也常常并不简单。

7 结语

力学中的哲学不仅仅体现在上面的几个概念之中,在很多其他的名词中,我们同样会得到许多的顿悟,如应力集中、强度储备、安全系数等等。由此,我们可以看到,力学不仅仅是个很专业的学科,它也能对人们的生活起着指导意义,了解了它,熟悉了它,洞彻了它,我们的人生大厦肯定也会经济、安全、适用和美观。

参考文献

- [1] 孙训方,方孝淑,关来泰编.材料力学.北京:高等教育出版社,1992
- [2] 包世华主编.结构力学.北京:中央广播电视大学出版社,1997
- [3] 邢维君等编.理论力学.西安:西北建筑工程学院内部教材,1994
- [4] 杨桂通、树学锋编著.塑性力学.北京:中国建材工业出版社,2000
- [5] K. C. Cole 著,丘宏义译.物理与头脑相遇的地方.吉林:长春出版社,2003

力学课中的美育教学尝试

曲淑英* 杜永吉 王心健 周 明 吕玉匣

(烟台大学土木工程学院,烟台 264005)

摘 要 美学教育是当代大学生素质教育的重要内容之一,它对于健全大学生的人格品质,培养大学生的创造素质与创新能力至关重要。在高校开展美育研讨与实践,有着重要的学术价值与现实意义。

关键词 大学生,素质教育,美育

1 引言

20 世纪 90 年代中期,我国高等学校开始了以素质教育为指导思想的教育教学改革探索,其基本内容是厚基础、宽口径、增强适应性。这些探索不仅得到了理论界的关注与认同,也得到了决策界的明确支持。教育部陆续推出了一系列加强大学生文化素质教育的重大举措,包括印发《关于加强大学生文化素质教育的若干意见》,成立“高等学校文化素质教育指导委员会”和设立“国家大学生文化素质教育基地”。中共中央国务院《关于深化教育改革,全面推进素质教育的决定》中明确指出:“要将美育纳入到学校教育的全过程”。随着科学技术的飞速发展和教育改革的逐步深入,融科技教育、人文教育、美育于一体的全面素质教育,已在高等教育界形成了共识。各高校在进行教育思想讨论的基础上,大都进行了相应的教育教学改革的实践探索,从举办人文与自然科学讲座到开展丰富多彩的课外活动,乃至建立新的课程与教学内容体系,进行人才培养的整体改革。烟台大学在实施德、智、体、美全面育人的教育教学改革中,以人

* 曲淑英,女,40岁,烟台大学土木工程学院,教授,副院长,主要从事结构工程的教学与研究。

文教育为根基,课堂教学为龙头,艺术教育、第二课堂为两翼,在学生中广泛开展审美教育,以美导真,以美引善,以美促智,让大学生在美的滋养中成长,使学生树立正确的审美观和人生观,创建了“以美育人”新模式,成为山东省第一个高校审美教育研究基地,教育部本科教学水平评估烟台大学的突出特色。

烟台大学土木工程专业,拥有一个结构工程省级重点实验室;一个结构工程硕士点;一支结构合理的教学、科研队伍,其中教授 8 人,博士 11 人,依托山东省面向 21 世纪教改课题、山东省试点课及烟台大学教改课题的支持,率先探讨并实践了土木工程专业学生结合专业课进行人文素质教育、美育的思路:通过起于知识、启迪精神、渗透美育、行为互动、营造氛围、以悟导悟、以人为本、止于境界的方式,将自然科学知识、社会科学知识,在一定程度上转化为学生的思想素质、道德素质、文化素质、心理素质、敬业素质、审美素质。

2 基本思路

土木工程专业学生加强素质教育的途径与方法,既涉及大学素质教育的基本理论和一般实践原则问题,又涉及土木工程专业教育的特殊性。要解决好这些问题,必须立足于教改实践和学校的大环境。在理论研究的基础上,烟台大学土木工程学院提出了土木工程专业学生加强素质教育的总体方案,包括培养目标的确定,课程与教学内容体系的设计,教学手段与方法的改革。最后,依托结构工程学科的重点课程力学系列课(山东省省级试点课,省级结构工程重点实验室)的教改环境,落实改革方案,进行改革试点。

3 实施方案

3.1 完善文化素质教育课程体系

对文化素质教育课程体系建设,进行了三个阶段的探索:在第一阶段,主要是进行试点,将课程体系分为 5 个系列,每个系列由 1~2 门核心

课程(必修)与3~5门选修课程组成;在第二阶段,主要尝试将大土木专业前三学期打通,课程分必修、限选和任选三大类,并分别提出要求;在第三阶段,选修人文、艺术课程的学分要求(由2学分提高到6学分),同时提供“艺术欣赏概论”、“中国京剧艺术”、“应用美学”、“美术欣赏”、“国画”、“书法”、“健美操”、“舞蹈”、“声乐”等46门艺术选修课的平台,为学生提供更广阔的美育天地,培养学生对美的感受、鉴赏和创造能力,以及和谐美好的情感,经过三个阶段的探索,初步建设和完善了一套以人文教育为根基,课堂教学为龙头,艺术教育、第二课堂为两翼的素质教育、渗透美育的课程体系。

3.2 将美育落实到专业课堂教学中

课堂教学过程中存在着大量的美学现象或因素,是教学研究人员不可置疑的事实。但这些美学现象或因素,究竟以何种形式存在,如何挖掘这些美学现象或因素,并使之成为具体的、有章可循的课堂教学的美学标准是我们研究探讨的重点。

首先是教师的教学艺术美。现代教育学认为,教学活动是教师、媒体、学生三者之间的完美结合。课堂教学是教师与学生的双向交流活动,如果教师不学习掌握一些美学理论,不提高自己的美学造诣,不树立自身的美学形象,就很难在教学过程中发挥美学的效应,就很难用端庄的仪表、严谨的教姿、生动的语言、巧妙构思的板书打动、影响、感染、培养学生,就很难实现寓教于美。

为此,我们在组织研究的基础上,充分挖掘课堂教学中美学因素,将教师的仪表教态、一言一行、举手投足、形体动作、眼神变化、图表绘制、板书设计、多媒体课件的设计、使用等无声有声的信息载体都作为可发挥的美学因素,通过交流探讨相应的标准。实践证明这些美学因素不仅对教学效果起着直接或间接的影响,而且对完善学生的品格,陶冶情操、开拓思路、激发情趣、实现自身的美化等都起到了潜移默化的作用。

如对土木工程专业的基础课理论力学的教学,教师不是简单地对科学知识的传授,而是将科学知识、科学思想、科学方法、科学精神综合形成一个体系。通过对宏观物体的机械运动遵循牛顿定律的研究,引导学生探讨真理标准的规范。通过对平衡方程的严密论证、推演,探讨逻辑论证

的规范,求真的态度,继而提升到思想境界和人的道德标准,向学生传授这个体系,使其接受并形成科学的素质及为人处事的优秀思想和作风,达到力学的科学精神对思想意识的渗透、美育的结合。另一方面充分挖掘力学课程的外在价值,即力学知识系统对于社会的实用功能,理论与工程实际的联系和应用。如:航空、航天事业,人造卫星的发射,航天飞机的升空;航海事业,大型船只的设计与制作,核潜艇的建造;高速公路、高速铁路与高速磁悬浮列车,大型桥梁的设计与建造;飞速转动的计算机软、硬盘驱动器;先进的体育运动器材与训练方法等,将力学的内在价值和外在价值结合在一起。

自编的力学多媒体课件,借鉴 1 200 多年前“夜半钟声到客船”用力学概念描述科学事实的诗句,将原 22 学时各种变形、内力的计算、内力图的绘制等内容,编成简便易掌握的顺口溜。如:剪力图快速化法口诀:

外伸端,自由端, 没有 P 力作零点。
无力梁段水平线, 集中力偶同样看,
均布荷载对斜线, 小 q 正负定增减,
集中力处有突变, 左顺右逆画竖线,
增多少?降多少?集中横力作参考。

弯矩图快速化法口诀:

弯矩图,较复杂, 对照剪图来画它,
自由端,铰支端, 没有力偶作零点。
剪图水平弯图斜, 剪力正负定增减,
天上下雨池水满, 向上射出弓上箭。
剪图轴线交叉点, 弯矩图上极值点。
均载边界无横力, 光滑吻接无痕迹。
集中力处有转折, 顺着外力折个尖。
集中力偶有突变, 反着力偶符号弯,
升多少?降多少?集中力偶作参考。
弯矩图形已画完, 注意极大极小点,
数值符号截面点, 三大要素标齐全。

仅用 8 学时学生便顺利接受,学生在叹服诗句的语言美和科学美的完整结合时,也将学术的博大精深与治学的纵横思维交相辉映。

3.3 开设第二课堂,开发美育空间,提高创新能力

结合专业课教学,成立力学科技小组,开设第二课堂,力学实验中心为适应教学改革的需要,实行全天候开放。作为开放实验室的基础,实施实验室“网上预约系统”,学生自己选择实验内容,自己设计实验方案,自己独立完成实验。学生在开放实验室完成的高耸入云的摩天大楼、彩虹飞架天堑之上的悬索桥、斜拉桥设计模型充分显示了其美学素质。美学作为一门技术,其指导思想不仅体现在外观造型上,还广泛体现在物质产品(或建筑)的原理、结构、材料、工艺和色彩等上面,即体现在产品内在美和外美的和谐统一上。学生在开放实验室里通过模型的设计、原理的分析、工程应用的比较等,其综合素质不断的得以升华提高,如学生通过对设计作品的分析,在老师的指导下,将每个同学单体设计引申到整体、群体设计中,我们的学生竟能从学习的力矩的概念推广到重量矩、色彩矩的概念,进而去讨论服装的设计、个人的穿着与自身的气质、学校环境的协调等,得出形式美的法则:比例协调、对称均衡、节奏明快、多样统一、色泽和谐等多种因素;形式美的规律来源于客观世界,又与人们的心理生理相适应;美与技术有着千丝万缕的联系,当今的大学生就要集技术、美学于一身,成为既有科学技术知识,又有一定美学素养的工程师、设计师。

同时,学生参与完成的力学组合实验台,在全国力学教学工作研讨会上,得到了包括全国教学名师清华大学袁驷教授在内的与会者的一致好评,并申请了发明专利(ZL031440088)和实用新型专利(ZL03204973.0)。目前,该实验机目前已被山东理工大学、辽宁交通工程学院等全国十余所高校联系采用。

4 实施的效果

近年来,土木工程学院通过以力学系列课为龙头,开放实验室为平台,全面实施以素质教育为核心的教育体系,为大学学生的学习与创新营造了很好的人文环境,培养了大批高素质创新型人才。承担省级教学改革项目2项,校级教学改革课题多项,获教育部普通高等学校优秀教材二等奖1项,山东省优秀教学成果一等奖1项、二等奖2项、三等奖7项,烟台

大学优秀教学成果一等奖 6 项。

2000 年土木工程学院学生参加“全国周培源大学生力学竞赛”获山东赛区一等奖、二等奖、三等奖各一人(山东省前 10 名中列 1、4、9 名,占 3/10);2004 年参加“全国周培源大学生力学竞赛”(山东省前 10 名中列 1、6、7、10 名,占 4/10);近三年参加山东省大学生“挑战杯”竞赛 23 人次获特(一、二)等奖,连续 5 年考研率在 20%以上,一次就业率在 92%以上,自 2000 年以来连年获山东省百篇优秀学士论文,本科生参与有实际工程背景的研究课题 30 余项,写出的小论文近百篇。有多位同学被评为山东省百名优秀本科毕业生,有一名同学获山东省十佳优秀毕业生称号,有一名同学获全国土木工程专业优秀毕业生称号,2004 年国家教委组织的对烟台大学本科教学水平评估获得优秀,评估专家对土木工程专业的育人模式给予了很高的评价。

5 结语

美育能够大大开拓学生的视野,充分调动大学生学习、钻研的积极性。美育又是教育的有效手段,也是当代大学生能心甘情愿地去接受、在潜移默化中受到熏陶,在不知不觉中培养起高尚的情操,使优秀传统教育思想得以继承与创新的一种育人模式。

参考文献

- [1] 中共中央国务院. 关于深化教育改革 全面推进素质教育的决定. 北京: 人民日报, 1998-03-21
- [2] 学习九届人大三次会议《政府工作报告》问答. 北京: 中共党史出版社, 2000, 220
- [3] 曲淑英, 王心健. 力学课教学中的形象化教学探索. 电化教育研究, 1999, 4: 67~69
- [4] 胡士弘. 钱学森. 北京: 中国青年出版社, 1997, 258~259

浅谈力学理论在工程爆破中的重要性

张宪堂^{1, 2} 张金泉¹ 周红敏¹

(1 山东科技大学工程爆破研究所, 青岛 266510;

2 同济大学桥梁工程系, 上海 200092)

摘 要 目前工程爆破在科研、教学和施工等方面对力学理论基础的要求呈下降趋势, 主要依赖于计算机模拟和经验公式, 这对爆破理论和技术安全的提高是非常不利的。本文就此问题分析了力学基础理论在工程爆破中的重要性, 阐述了工程爆破理论学习过程中必须掌握的力学知识, 以及进一步深造可以发展的一些方向, 对从事工程爆破行业的科研技术人员具有一定的参考价值。

关键词 力学, 工程爆破, 重要性

1 引言

通过炸药爆炸产生的能量做功而达到一定目的的工程爆破, 是一个集炸药爆轰的控制、介质获得爆炸能量的动力性质和断裂特性、爆破效果的预测与分析等所组成的复杂过程。半个世纪以来, 我国的工程爆破技术在大量的实践基础上已有长足的进步和发展, 但爆破的理论研究工作落后于工程实践。现有的一些爆破工程设计方法和安全评估分析大都只是实验室结果, 离工程应用尚有一定的距离, 只能起到定性的指导作用, 所以很大一部分常用公式还局限在 20 世纪五六十年代的经验或半经验性结果, 缺乏足够的理论依据^[1~3]。工程爆破是一种实用性和综合性较强的系统工程, 它涉及的力学理论既广泛又复杂。但是目前工程爆破在科研、教学和施工等方面对力学基础的要求却呈下降趋势, 主要依赖于计算机模拟和经验公式, 这对爆破理论和技术安全的提高是非常不利的。本文就此问题分析了力学基础理论在工程爆破中的重要性, 阐述了工程爆

破理论学习过程中必须掌握的力学知识,以及进一步深造可以发展的一些方向,对从事工程爆破行业的科研技术人员具有一定的参考价值。

2 工程爆破的力学基础

工程爆破是一项实用性和综合性较强的系统工程,它涉及的力学理论既广泛又复杂。主要有弹塑性动力学、爆炸力学、流体动力学、材料力学、结构力学、岩土力学、损伤力学和实验力学等学科。随着工程爆破的发展和应用,人们对于复杂条件下爆破介质特性和工程安全性的预测和控制防护这些难度相当大的问题,感到迫切需要寻找一些新的途径和方法予以解决。因此,多个力学学科的渗透和结合成为工程爆破技术发展的必要条件。

2.1 爆炸力学是工程爆破的基础理论

爆炸力学主要研究爆炸的发生和发展规律,以及爆炸力学效应的利用和防护的学科。爆炸力学是流体力学、固体力学和物理学、化学之间的一门交叉学科,其基本特点是研究高功率密度的能量转化过程,大量能量通过高速的波动来传递,历时特短,强度特大。其次,爆炸力学中的研究,常需要考虑力学因素和化学物理因素的耦合、流体特性和固体特性的耦合、载荷和介质的耦合等。

工程爆破机理研究促进了爆炸力学的发展,爆炸力学的应用研究推动了流体和固体介质中冲击波理论、流体弹塑性理论、粘塑性固体动力学的发展。爆炸在固体中产生的高应变率、大变形、高压和热效应等推动了凝聚态物质高压状态方程、非线性本构关系、动态断裂理论和热塑不稳定性理论的研究。爆炸的瞬变过程的研究则推动了各种快速采样的实验技术,其中包括高速摄影、脉冲 X 射线照相、瞬态波形记录 and 数据处理技术的发展。爆炸力学还促进了二维、三维、具有各种分界面的非定常计算力学的发展。

爆炸波在介质中的传播以及波所引起的介质的流动变形、破坏和抛掷现象是爆炸力学研究的中心内容。爆炸包括空中爆炸、水下爆炸、地下爆炸和高速碰撞等。相应的应用在工程中多为水压爆破、水下爆破、地下或隧道爆破、深孔爆破和拆除爆破等。对于水下爆炸,水的高速空化及其

消失往往是重要的因素。对于地下爆炸和高速碰撞,则须考虑在高温、高压、高应变率条件下,介质的本构关系和破坏准则。这些都属于介质的基本力学性质。因此,在这些极端条件下,爆破介质的力学性质是爆炸力学和其他力学学科共同感兴趣的合作研究领域。

爆轰的流体力学理论是波在可反应介质中当化学反应和力学因素强烈耦合时的流体力学理论。气相、液相、固相、混合相物质的稳态和非稳态爆轰、爆燃和爆轰间的转化、起爆机理和爆轰波结构等都是爆轰学研究的对象。它是研究爆破后介质运动状态的理论基础,如爆破堆积、爆破飞石、爆生气体等。

此外,爆炸力学实验技术(如冲击波高压技术)为冲击载荷下材料的力学性能的研究提供了方法和工具,如爆炸成形、爆炸焊接、爆炸合成金刚石、爆炸硬化等。

2.2 实验力学为工程爆破提供了经验公式和数据的依据

工程爆破在发展的初期,由于其复杂性,难以构筑较为完整的力学理论模型。为了描述和指导工程爆破的实践,主要依靠建立在模型律和相似准则基础上的相似实验,以及对大型和重要爆破工程的科研观测,搜集数据,量纲分析,找出经验规律及公式。如在土石方爆破中,典型的应用有爆破效应的近似体积药包法原理;用近似能量准则,推导出著名的鲍列斯科夫硃室抛掷爆破漏斗和药量计算公式。在小规模爆破时,用能量准则推导出预裂、切割爆破的线装药密度以及掏槽爆破的装药量公式。这些经验规律和公式,可以解决一定范围内的具体工程设计和参数优化问题^[4]。

2.3 多个力学分支学科的综合是爆破工程得以安全实施的前提

如前所述,多个力学分支学科的渗透和结合成为工程爆破技术发展的必要条件。只有从力学的角度分析清楚被爆体的力学性质、结构特点、赋存条件和有害效应等因素,才能使爆破工程顺利安全地完成。如控制拆除爆破技术,它不同于一般的土石方爆破技术,它是基于对爆炸力学与材料力学、结构力学、断裂损伤力学和流体动力学等工程学科认知,在已有爆破技术基础上发展起来的。由于拆除爆破要求对爆破后产生的

破坏效果要精心的控制,特别是对爆破可能产生的影响要严格控制,在拆除爆破技术发展的进程中,国内外学者采用高速摄影、应力应变、振动测试等多种手段进行了观测,分析了不同建(构)筑物在爆破作用下的失稳、解体、倒塌机理和构件破碎过程。提出了对不同结构和环境条件采用原地坍塌、定向倾倒、折叠倒塌爆破拆除方案,或是采用水压爆破拆除的方案^[5]。

3 工程爆破理论发展现状

3.1 岩石爆破破岩机理的研究进展

国内外学者结合岩体力学、结构力学、地震工程力学、爆炸力学和应力波理论等,建立了一套适用的设计计算和安全评估方法,促进了工程爆破CAD系统的研究,岩体爆破机理及破坏范围、条形药包爆破作用场特性、爆破岩石鼓包运动发展规律和抛掷堆积计算方法,爆破地震波谱特性及建筑结构爆破动力响应分析方法,岩质高边坡爆破动力稳定安全分析以及爆破减振安全准则与控制技术研究等等,解决了一批工程技术急需的问题。

在爆破作用机理、爆炸应力波传播、炸药的能量分配、爆破鼓包运动、抛掷堆积形状、预裂爆破成缝机理、岩石破碎机理、爆破工程地质、岩石爆破性分级以及爆破振动效应观测和分析等研究方面,取得了一大批理论研究成果。从几次国际岩石爆破破碎学术会议和国内的爆炸力学和工程爆破会议来看,岩石爆破破岩机理目前主要集中于爆破造成岩石的破碎、裂缝的形成和发展、岩石断裂过程的模拟和破碎效果的预测。虽然在岩石爆破破碎的模型研究、计算机数值模拟、爆破块度的图像分析技术等方面取得了一些进展,但这些进展和实际爆破工程的要求还有相当的距离。大量的爆破工程设计基本上还是基于经验的总结,特别是我国在爆破施工中的经验,如大型土石方的硐室爆破、公路边坡土石方爆破、隧道井巷开挖技术等^[1~5]。

3.2 拆除爆破机理研究现状

拆除爆破是基于对爆炸力学与材料力学、结构力学、断裂损伤力学和

流体动力学等工程学科认知,在已有爆破技术基础上发展起来的。目前,拆除爆破中计算立柱的最小爆破高度仍采用传统的压杆失稳原理,即将立柱爆破后裸露钢筋部分看作单根主筋的压杆,利用失稳临界应力确定的方法。1992年卢文波提出了基于结构力学的钢架失稳计算方法,以此确定立柱的最小爆破高度。此外,国内外许多研究者用平面杆系结构有限元法和结构力学中的直接刚度法计算结构爆破前后的内力分布,并力图完成建筑物拆除爆破的辅助设计。

在构筑物倒塌过程研究中,国内外学者利多利用有限元方法和离散元法(DEM)^[6]研究倒塌过程的数值模拟,以确定爆破缺口位移、爆破顺序和分段时间差对爆破倒塌的影响。同时,由我国留美学者石根华博士提出的用DDA法(不连续变形分析法)模拟倒塌过程,是与有限元连续变形分析法相平行的非连续变形方法。与有限元的不同点是可以计算不连续面开裂和旋转等大位移的静力和动力问题,而建筑物失稳、倒塌过程,可视为结构由连续变形过程到非连续变形过程的变形问题^[9]。

3.3 水介质爆破机理研究进展

早在1948年库尔就研究总结了水中爆炸的各种主要现象和变化规律;二战期间,库克伍德和贝特提出了水中爆炸的近似理论;泰勒提出了气泡振荡理论;1945年以后,高速摄影机和电子计算机技术的发展,促进了室内模拟试验、数值计算和数值模拟的研究;1962年,霍顿用数值方法研究得出了水下爆破冲击波传播和衰减的理论解。上述理论是水压爆破的重要基础。国内对水压爆破理论的研究起步于1976年,铁道部第四勘测设计院和北京科技大学对水压爆破的作用特性进行了试验和研究,得出了一些有价值的结论。

水压爆破的理论体系应包括四个方面:一是炸药爆轰在水中引起的气波效应研究,主要研究炸药在水中爆炸时是如何传递能量的,以及该过程中的数值特征;二是介质破坏机理的研究,主要研究介质在气波效应作用下是如何破坏的,以及破坏过程的数值特征;三是布药参数的研究,主要研究药包重量、个数、位置;四是水压爆破公害研究,主要研究水压爆破引起的震动、飞石、空气冲击波、噪音。水压爆破理论体系的四个方面是

相互联系的,气波效应、壁体破坏机理的研究属于水压爆破机理研究,它在水压爆破理论体系中起着基础性作用,布药参数中药量计算是水压爆破理论的核心问题^[8]。

4 工程爆破中亟待用力学解决的问题

4.1 岩石爆破机理

爆破作用是强冲击载荷作用于难于准确描述的岩土介质的效应,爆破理论研究的问题远比经典的固体力学或流体力学要复杂和困难。但是爆炸过程和爆破作用毕竟都是可以用力学描述的现象。目前主要存在以下问题亟须解决^[1~5]：

(1) 在节理裂隙岩体爆破机理研究中,由于岩块的生成、边界的判定和方程的求解都有一定难度,因此寻求对单元形状进行简化的方法是解决问题的关键,同时,建立模型时还有很多难以确定的常数取值问题。

(2) 随着细观力学的引入,断裂力学和损伤力学近年来也有很大的发展。用损伤力学研究岩石的爆破损伤问题时,急需解决的是如何准确定义材料的损伤能量、损伤演化规律,以及如何正确地给出损伤能量及其演化规律的材料动态本构关系。

(3) 关于岩石破坏强度理论其问题在于如何突破宏观框架,在现有断裂力学、微观力学、损伤力学的基础上,采用宏、细、微相结合的方法来研究。

(4) 把爆破过程视为复杂的系统工程,综合利用信息论、控制论、耗能结构基础论、突变论、分形理论、损伤理论和非线性理论,通过计算机模拟爆破,描述裂纹的产生和扩展,预测爆破块度的组成和爆堆形态。

4.2 拆除爆破机理

未来城市高层建筑物的拆除技术提出的问题是:高层建筑物密集,允许倒塌的范围约束较多;高层建筑结构多样化,结构复杂,强度高。高层结构已从一般框架、框架—剪力墙、剪力墙三大常规结构发展为筒体、筒

束、套筒式结构,拆除设计难度增加。随着建筑物拆除高度、跨度和难度的增加,爆破拆除技术中的科技含量也相应地增加。在将来的爆破拆除中将需要考虑风荷载、地震效应和噪声污染等问题,这就要求在结构力学、流体力学、弹塑性力学、断裂力学和材料力学方面对拆除爆破技术进行研究。例如,对钢结构倒塌属于弹塑性领域的动态大变形现象。因此需注意以下几方面的研究:① 对主要构件弹性阶段的静力分析,核查塑性铰预定发生部位的应力;② 对主要构件进行弹塑性阶段的静力分析,求出结构的极限载荷,研究倒塌的确定性;③ 研究钢结构发生大变形时力—位移关系;④ 模拟倒塌过程的各个阶段。

4.3 水介质爆破机理

水介质爆破过程是一个非常复杂的过程,目前,水介质爆炸研究正引起世界各国的重视,尚有许多问题需要人们解决,我们应加紧这方面的研究,以满足国防抗爆要求和工程爆破要求。目前有如下问题需要进一步研究^[9]:

(1) 水下爆炸及水下爆炸载荷作用下的结构物动态响应机理研究。水下爆炸载荷下的动态响应属大变形、高度非线性、流固耦合的瞬时动态响应,需进一步详细研究其作用机理。

(2) 抗爆结构设计研究。应进一步研究结构设计变量对其抗爆性能的影响,搞清各个构件在水下爆炸过程中的变形特点和性能特征,进行抗爆结构设计和优化设计方法研究,研究开发出在满足常规强度、使用要求下安全可靠、成本合理、方便实用的新型抗爆结构型式,提高舰船和水下结构的抗爆性。

(3) 近场水下爆炸结构动态响应研究。在近场发生水下爆炸时,其生成的气泡不是完全逸出水面,部分会接触到船体表面而溃灭,并激起船体严重的鞭状起伏运动。这一过程能导致船体梁屈曲、船壳撕裂及船体梁强度受损。这类气、液、结构的瞬态相互作用更为强烈及复杂,有许多问题尚待研究。

(4) 复合材料结构在水下爆炸载荷作用下的动态响应机理研究。

(5) 裂纹在水下爆炸载荷作用下的力学行为研究。

(6) 潜艇、扫雷艇、高速船抗爆性能研究。

5 结语

通过对岩石爆破机理、拆除爆破机理、水介质爆破机理三种典型工程爆破机理的现状和亟须解决的问题分析,可以看出各种力学原理贯穿了从设计到施工的整个爆破工程。但是,我国工程爆破在科研、教学和施工等方面对力学理论基础的要求却呈降低趋势,理论基础研究滞后于生产实践,许多高校科研机构青年技术骨干改行择业。所以加强工程爆破的力学理论基础研究 and 教育已是迫在眉睫,爆破技术人员有一个清晰的力学概念是爆破工程成败的关键。

参考文献

- [1] 汪旭光,周家汉,王中黔等. 我国爆破事业的发展和在新世纪的展望. 工程爆破文集——全国工程爆破学术会议论文集(第七辑). 乌鲁木齐: 新疆青少年出版社等,2001,1~11
- [2] 郭声琨,汪旭光,陈积松. 中国工程爆破的成就与发展战略. 工程爆破,1999,5(4): 1~7
- [3] 汪旭光,王国利,贯荔等. 国际工程爆破技术发展现状. 工程爆破,1998,4(4): 66~70
- [4] 周家汉. 第七届国际岩石爆破破碎学术会议概述. 工程爆破,2003,9(1): 54~60
- [5] 汪旭光,刘永,熊代余. 略析第六届国际爆破破岩学术会议. 工程爆破,2000,6(2): 87~93
- [6] 郑炳旭. 爆破力学在工程中的应用. 华南理工大学学报(自然科学版),2003,31(增刊): 91~94
- [7] 汪旭光,于亚伦. 21 世纪的拆除爆破技术. 工程爆破,2000,6(1): 32~35
- [8] 尹群,陈永念,胡海岩. 水下爆炸研究的现状和趋势. 造船技术,2003,(6): 6~12
- [9] 林大能,刘小春. 水压爆破的发展与现状. 矿业研究与开发,1999,8(增刊): 7~9

谈结构力学中的科学思维方法

严跃成 阿肯江·托乎提 吉尔格

(新疆大学建筑工程学院, 乌鲁木齐 830008)

摘 要 本文从提高学生素质的角度谈教学方法的改进;从方法论的观点,谈结构力学中的科学思维方法。

关键词 结构,思维,分析,方法

随着科学技术的迅速发展及教学改革的深入,学生能力的培养愈显其重要性。而思维、创新能力的提高又往往是诸多能力培养的中心问题。

从培养创新能力和思维方式的角度来反思我们以往的教学方法,还存在不足之处。比如,我们在教学中注重讲述知识,而很少去谈论科学方法;我们注重对学生的技能培养,却较少考虑对学生思维能力和创新意识的培养。在科学技术日新月异发展的今天,任何一种技能都可能面临被淘汰或更新的局面,而正确的思维方式 and 创新能力将伴随人的一生并使其收益无穷。如果我们在教学中注重培养学生的思维能力和科学素质,尽可能地把力学中应用的分析方法上升到方法论的高度去认识它、讲解它,就可以让我们的学生站在发明者的肩膀上,开阔眼界,提高起点。

笔者从多年的结构力学教学工作中体会到:结构力学具体计算方法中包含着分析问题的一般方法,这些方法正是科学辩证的思维方法在实际问题中的具体应用。举例如下:

1 结构的计算简图(建模法)——分析综合方法

要解决一个结构力学问题,涉及到对实际结构的受力状态进行抽象和简化。前人总结的建模要点是:要善于抓住原型中起主要作用的因素,摒弃次要的因素。也就是要善于分析综合,分清主次(分析)、抓大放小

(综合)达到简化和逼真的双重目的。

培养分析综合能力是方法论学习中的一个重要方面,建模中的分清主次和抓大放小的方法,是分析综合方法的一种运用形式。

2 受力分析与构造分析的关系——对比联系方法

静定结构中各杆件的约束反力和内力都可用平衡方程求解,而高效率的求解工作是我们所期待的,这就需要对隔离体的选取方式和选取顺序进行优化。所得的规律是:根据结构的构造特征来选取隔离体,选取隔离体与几何组成的过程正好相反,两个过程正好互为逆过程,概括地说,就是“后搭的先拆”。用这种对比联系方法,很容易掌握所学的内容。

3 影响线的机动作法——交叉比拟方法

影响线的机动法是一种巧妙的交叉比拟方法。本来是一个静力学问题,这里却用比拟方法把它变成一个作位移图的几何问题。从而开辟了一条用几何方法处理静力学问题的思路。该方法的巧妙之处在于建立了影响线量值与位移图量值之间的比拟关系。而虚功原理正是静力法与几何法之间作交叉替代的理论基础。

4 单位荷载法——迂回侧击方法

单位荷载法是虚功原理的一种应用形式。有时直来直去的解题方法并不简便或遇到困难时,采用迂回侧击的方法可能会出奇制胜,单位荷载法就是最好的例子:虚设单位力,求实际的位移,即采取避实就虚、在虚中求实的方法,使问题迎刃而解。可以说,单位荷载法是一种智取的方法。

5 铁路、公路的换算荷载——等效替代方法

铁路、公路上的移动荷载形式多样,即便是给定移动荷载去求某一量值(反力或内力)的最大值,也还是要用试算的方法,计算很繁杂。如果用

等效的均布荷载代替移动的车辆,问题就简单多了。所谓“等效”的概念,在这里指替代的等效均布荷载与原荷载引起的某一量值的最大值相等。等效替代方法可以使问题变得更加清晰、明了和简单。

6 力法——过渡转化方法

力法的解题思路是:解除结构中的多余约束代之以相应的约束力,使超静定结构变成静定的基本结构,利用变形协调条件求解多余的约束力,进而求出结构的内力。整个求解过程是在静定的基本结构上进行的。力法把超静定结构拆成静定结构,再由静定结构过渡到超静定结构,力法起到了搭桥的作用,将超静定问题与静定问题联系起来加以比较,从中找到由静定过渡转化到超静定的途径。

7 位移法——有限元方法

位移法的解题思路是:把结构拆成杆件,将杆件作为单元,先作单元分析,得出单元的刚度方程,再把杆件综合成结构进行整体分析,得出整体刚度方程,进而可求解结构的位移和内力。位移法的过程是一拆一搭、拆了再搭的过程,它把复杂结构的计算问题转变为简单杆件的综合问题,这就是杆系结构有限元计算方法的核心内容。随着计算机的广泛应用,有限元法已成为解决各种复杂结构计算问题的行之有效的方法之一。

8 力矩分配法——形象思维方法

目前,结构力学中传统的手算方法已逐渐被电算代替,但力矩分配法仍是工程技术人员习惯使用的手算方法,该方法之所以能沿用至今,一是它不用求解联立方程,二是它的物理概念生动形象,便于记忆。该方法解题过程可形象地概括成两大步:第一步,固定节点,加入刚臂,这时,杆端产生固端力矩,刚臂上产生不平衡力矩;第二步,放松节点,消除刚臂,这时,需加入反号的不平衡力矩去消除刚臂上的力矩,加入的这个力矩按比

例分给各杆的近端(转动端),并传递到远端,于是,各杆的近端得到分配力矩,远端得到传递力矩。对于多个刚节点的结构,只要重复以上的运算过程,经过几次循环后可求得杆端弯矩的渐近解。这种形象思维方法将生硬的数学计算过程变成有形的物理概念,整个计算过程可用八个字来概括:固定、放松、分配、传递。

力学课程中有许多前人总结出来的科学方法,值得我们学习和借鉴。我们向学生传授知识时要高屋建瓴。古人云:“授人以鱼足解一日之饥,授人以渔足食终身之鱼。”这一至理名言也应成为我们教育工作者的座右铭。

在向学生介绍科学思维方法的同时,还应向他们介绍一些好的学习方法,这对提高学习效率大有帮助。正确的学习方法加科学的思维方法可起到如虎添翼的作用。以上是笔者在教研过程中的一点体会,希望能与兄弟院校交流讨论。

参考文献

- [1] 龙驭球,包世华等. 结构力学. 北京: 高等教育出版社,1996
- [2] 龙驭球,包世华等. 结构力学教程(I). 北京: 高等教育出版社,2000

在力学教学中注重工科学生数学能力的培养

边文凤

(哈尔滨工业大学汽车工程学院, 山东威海 264209)

摘 要 目前,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。本文针对这种问题,剖析了典型实例,分析了问题的根源,最后提出了几点建议。

关键词 工科大学生,数学能力,培养

1 引言

科技创新和知识创新都离不开数学基础。马克思曾指出:“一种科学只有在成功地运用数学时,才算达到了真正完善的地步。”英国著名物理学家汤姆逊说过:“如果不能用数学来表示,那么你的认识是不够的,不能令人满意的,可能只是初步的认识,在你的思想上,还没有上升到科学的阶段,不论你讲的是什么。”

一个民族、一个国家是否兴旺发达,其主要标志是公民的教育水准和文化素质的高低,而数学素质是文化素质的一个重要组成部分,直接关系到公民是否能适应现代化社会的需要,能否用数学的思想和方法来分析和解决现实生活的问题。如果在教学中只注重知识的传授,忽视知识发生过程中数学思想和方法的教学,那么只能培养出“模仿型”和“记忆型”的人才,只能应付考试,与我国经济腾飞的要求很不适应,数学教育的最终目的不在于传授几个知识点,讲解几种解题方法,应当有更为深刻的内涵,就是数学思想和方法的教学,通过它们,去实现对学生的培养和发展。

目前,数学思想正向一切领域渗透,数学方法取得越来越广泛的应用。学生毕业后走向工作岗位,许多具体的数学知识可能忘掉了,但数学

思想和方法将伴随着他,并启发、激励他去研究新问题,作出新发现。因此,学校所培养的不仅是知识型人才,而且是智能型人才,也就是说,不只是给学生传授一定的知识,更重要的是培养学生能力,其中主要是创造能力。

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、冗长,甚至无法求解。本文结合机械及力学教学中常见的问题揭示产生这些问题的根源,并探讨避免产生这些问题的方法。

2 典型实例剖析

下面是笔者遇到的比较典型的三个例子,从中可见一斑。

(1) 在材料力学中,求解桁架各杆的变形关系或节点位移时,“所有的教材”都是通过小变形放大图来处理的。通过小变形放大图来寻找桁架各杆变形量间的几何关系,既繁琐又不便于数值计算,问题复杂时甚至无法求解。即使是图 1 所示的简单结构,当 1 号杆和 3 号杆的抗拉、压刚度 $E_1A_1 \neq E_3A_3$ 时,通过小变形放大图求解变形协调方程也很不方便。学过材料力学的人都有同感。如果用“微分解析法”,问题就不成为问题了。

例 1 求图 1 所示结构的变形协调方程,结构的几何关系为

$$\begin{cases} L_1^2 - L_2^2 = (AB)^2 \\ L_3^2 - L_2^2 = (BC)^2 \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)微分整理得:

$$L_1 dL_1 + L_3 dL_3 - 2L_2 dL_2 = 0 \quad (2)$$

式(2)便是图 1 结构在任意受力状态下的各杆伸长量之间的变形协调方程。

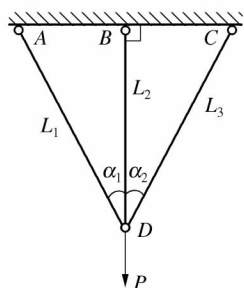


图 1 4 节点桁架

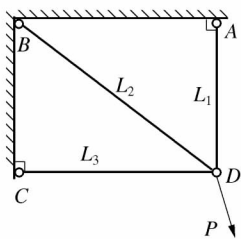


图 2 4 节点桁架

例 2 求图 2 所示桁架结构的变形协调方程。

$$L_2^2 = L_1^2 + L_3^2 \quad (3)$$

对式(3)两侧取微分,得:

$$L_2 dL_2 = L_1 dL_1 + L_3 dL_3 \quad (4)$$

式(4)就是图 2 所示结构各杆伸长量之间的变形协调方程。

(2) 在机械原理教学中,机构的运动分析都习惯用图解法而不习惯用解析法,如图 3 所示的机构,在当前位置时,如果 α 角变小, β 角是变小还是变大?学生们常争论不休。最后,不得不严格按比例尺画几个图进行比较,才能知道。其实,由正弦定理 $\frac{\sin \alpha}{l_2} = \frac{\sin \beta}{l_1}$ 即可轻松地解决此类问题,将正弦定理两侧同时对可变量取微分,得:

$$d\beta = \frac{\cos \alpha l_1}{\cos \beta l_2} d\alpha \quad (5)$$

式(5)完全清楚明确的表示出了 α 角与 β 角之间的变化关系。

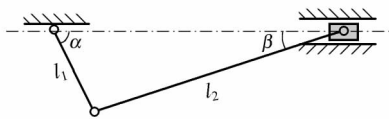


图 3 曲柄滑块机构

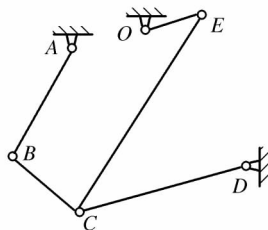


图 4 组合机构

(3) 对图 4 所示的组合机构进行全程运动分析。这是一位本科生毕业设计的一部分,该机构由两个基本机构组成(曲柄摇杆机构 OECD 和双摇杆机构 ABCD)。

在刚开始对此问题进行研究时,真是愁煞了该同学,用机械原理中学过的作图法,左一张图,右一张图,怎样也画不清楚运动关系。后来,他问笔者该如何处理,笔者建议他试试“解析法——先写出各个节点的位置坐

标,然后再进行速度和加速度分析。这样,问题就迎刃而解了。

上述几个问题,反映了许多工科大学生不善于利用数学知识去解决问题。

3 根源分析

3.1 工科数学教学的误区

在教学中只注重数学知识的传授,忽视知识发生过程中数学思想和方法的教学,教学过后学生得到的是几个知识点、几种解题方法。学生在数学学习中就表现出来只善于解方程,不善于列方程,不知道如何把具体的实际问题建成数学模型。使数学教育在“智力价值”和“实用价值”的取向上严重失衡。学生解决课堂习题的能力是提高了,但解决工程实际问题的能力却并不高。

3.2 忽视各门课程之间的联系,各自为政

以机械工程学科为例,数学、物理、力学、机械原理分科教学,各自独立,没有联系,互相割裂。对质点系的运动都有过描述,但是所用的方法不尽一样,于是,一些教师和学生就觉得前一门课讲的方法对后一门课来说是一种干扰,感到别扭。力学教师觉得物理方法太幼稚,使学生学习力学方法时固守已有的物理方法,而不容易接受新的力学方法。而机械原理教师对力学方法也有同样的看法。

3.3 工程类课程教学中的误区

由于工程类课程的内容不断增多,而学时又不断压缩,教材中或课堂教学中的知识结构已经不再具有系统性,而是一些知识碎片的堆砌。在这种情况下,工程类课程教学往往是重经验,轻理论;重形象,轻抽象;重结论,轻过程。只要好用,拿来就用,也不管来龙去脉。

教工程课程的教师,大多都是工科毕业的,在数学上先天不足,又没教过以数学知识为主的课程,数学方面没有得到弥补。在教学中,一涉及到数学就望而生畏,能绕开的尽量绕开。于是,他们的学生,只能使用现

有的结论,而不可能找出新的结论。

总之,数学课教学中重理论,轻应用,而工程课教学中重实用,轻理论,学生不知道如何把数学理论与工程实际联系起来。

4 几点思考和建议

4.1 工科数学教学中数学思想数学意识的培养

第一,注重数学基础理论知识和基本技能的传授,从而使学生有形成数学意识的物质基础。数学意识不可能独立于数学知识之外而独立存在。没有一定数量的数学理论知识和数学基本技能的积累,是不可能形成真正的数学意识的。但数学知识又不等于数学意识,也就是说,学生掌握了足够的数学知识的基本技能也不等于就形成了相应的数学意识,只有当他对这些数学基础知识的理解、认识及运用深刻到“自觉”的程度,并能“自觉”对数学知识进行加工、组织和应用时,数学知识才能转化为数学意识。所以教师在传授数学知识时既要注重数学基础知识的积累,又要注重学生各种数学技能的平衡发展,还要注重让学生掌握精确的数学思想方法,只有这样才能为学生数学意识的形成奠定良好的基础。

第二,加强数学理论联系工程实际,在学生运用所学数学知识分析问题、解决问题的过程中培养学生的数学意识。数学发展到今天已经被高度地抽象化了,数学教学如果不把应用性放在一个合理的重要的位置上,那么数学或被遗忘或高高在上让人望而生畏。所以,把所学数学知识和应用有机地联系起来,这既是数学教学目标的要求,也是提高学生数学素质,培养其数学意识的必经之路。

第三,开设建模课程,提高学生的建模能力,发展学生的数学意识。国际数学联盟主席戴维在《振兴美国数学——未来的关键资源》一文中说:“高新技术的本质是数学技术”。那么什么是数学技术呢?我国著名的科学家钱学森指出:关于数学技术,我的简单理解是,用数学语言和计算建立数学模型,用于解决实际问题。我们知道一个工程技术人员在未来的工作中面临的是实际问题的原貌而并非是直接的数学问题,由于它

不会以简化和抽象的形式出现,所以必须经过深入细致的分析和合理的抽象后,再用合适的数学工具才能将其转化为清晰的数学问题,即要建立合适的数学模型,而一个数学模型的好坏常常是解决问题成败的关键所在。所以将一个实际问题“翻译”成一个数学问题并用数学的方法加以解决的能力即数学建模能力对未来的工程技术人员来说是极其重要的。我们可以毫不夸张地说,未来的工程技术人员如果不具备良好的数学素质,没有一定的数学建模能力,是根本无法立足于迅猛发展的未来社会的。所以在学校的数学教育中,适当开设相关科目以培养学生的建模能力是极其必要的。

数学建模既是通过建立数学模型来解决各类实际问题的方法,又是以实际问题为核心的、以融合各门学科和多种技能解决实际问题为主线的一门课程。在进行建模教学时,首先提出一个生产和工程中的实际问题,然后引导学生来分析其主要特征和主要关系,并进行数学的抽象和概括。在提出适当的假设后,用数学这个工具建立各种量之间的关系即建立模型。然后再用数学的理论、方法来求解模型。得出数学上的结果后,再返回到实际问题中去回答解释最初的实际问题。值得注意的是,由于建模教学的特殊性,所以在建模教学时应针对不同的模型采用不同的方法而且要特别突出实践环节。这样,教师在数学建模过程中,既让学生学会了如何把学到的数学知识运用到实际中,又使学生学会了如何把“碰到”的实际问题“归纳”成为数学问题。

在教师这种有意设定的建模教学中,学生已有的数学知识、数学理论、数学思想方法将会被逐渐地发展完善起来。所以说,加强数学建模能力训练既是培养学生数学意识的有效途径,又是发展其数学意识的重要环节。

4.2 工程类课程教师自身数学修养的提高

加强数学修养,培养数学思想和数学意识,掌握更多的数学方法,提高数学能力。

在备课和教学中努力用数学方程描述工程实际问题,进行严密的数学推导,得出最后结果。尽量避免只讲结论不讲过程的做法。

4.3 学科课程与数学课程相结合

数学、物理、力学、机械原理分科教学,对质点系运动学都有讲述。后一门课的教师必须把前几门课的知识联系起来,讲清楚本门课所用的方法与前几门课的方法有哪些区别与联系。

5 结束语

数学是美丽的,而光讲不用或光学不用,不但显现不出数学的魅力,还会使之枯燥乏味。要培养大学生的数学思想,使他们能够在遇到任何问题时,都能立刻想到:解决此问题的数学模型是什么?解决此问题的数学工具是什么?(哪个定理、定律可用?)如果能够如此,解决问题的效率将大大提高,解决问题的方法也会变得“轻巧”。还会使更深层的问题浮出水面,变得清晰透彻。

培养大学生的数学思想,不仅仅是数学教师的使命,也是其他课程教师的责任。尤其是工科教师,首先要使自己有数学思想,并善于利用数学去解决问题,在授课时,遇问题能够提出与传统教材中的“图解法”等不同的“解析法”。这样,学生就会在比较中,了解“解析法”的“妙处”,从而使“数学思想”在头脑中生根、发芽、开花、结果。这将是大学生在事业中腾飞的强劲翅膀。数学方法简洁、精确、内涵清晰、形式优美,使用她,会令你陶醉、可使你的理论水平迅速得以提升。行动起来,好好使用数学工具吧。

参考文献

- [1] 恩格斯. 自然辩证法. 北京: 人民出版社, 1971
- [2] M·克莱因. 古今数学思想(第二册). 上海: 上海科学技术出版社, 1979
- [3] 王敏, 李颖. 浅析数学意识及其培养. 辽宁教育学院学报, 2000(6)
- [4] 吴秀君. 注重数学应用, 提高建模能力. 武汉教育学院学报, 2000(3)

力学述解由 2 到 3 的历史演进与方法拓展

隋允康

(北京工业大学机电学院, 北京 100022)

摘 要 “述”指表述,“解”指解答,“力学述解”意思是力学研究的表述与解答。“2”为力学表述的 2 要素,是指状态变量与方程/方程组两个方面,对于力学解答则是通过求解方程或方程组,得到状态变量。“3”为力学表述的 3 要素,是指状态变量或设计变量、约束方程/方程组或约束不等式/不等式组、目标函数三个方面,对于力学解答则是求解由 3 要素构成的数学规划,得到真实的状态变量或最优的设计变量。在科学的演进过程中,“力学述解”的由 2 到 3 与“数学述解”的由 2 到 3 交织在一起,牛顿之后的数学力学大师们早已把握了最优化原则的精髓;然而,由于当时没有形成极值问题的现代数学规划提法,3 要素的表达多体现为取极值的鞍点条件,从而表现为 2 要素形式。今天,我们应当把对力学规律的 2 要素表述提升到 3 要素表述的高度,这将使我们升华洞察力学问题的境界,有助于开展创新的工作;或在研究中遵循最优化原则使探索工作成功和有效;或在工程实际中以最优设计、最优建造、最优控制或最优运行回报社会。

关键词 最优化思想,变分法,数学规划,力学规律,表述,解答

1 引言

力学研究的表述与解答可以简称为“力学述解”,无论从力学史还是从方法论,都可以看到从 2 到 3 的变化。

几乎每一位善于思考的“力学人”,都曾经受到了分析力学的震撼或冲击。是的,乍一学习分析力学,不理解从牛顿方程推出拉格朗日方程和哈密顿原理、又可以反推出牛顿方程的意义;后来从虚位移或可能位移入手,理解了其中的奥妙:原来可以在无穷多种满足约束的位移中,通过找到满足某个物理量极小值得到真实的运动;只要细心去领会,就会从哈密

顿原理中,感受到真与美的交融。无怪乎法国力学家莫培督(Pierre Louis Moreau de Maupertuis, 1698—1759)说:“主宰宇宙的上帝总是选择最简单的手段来达到其目的的……”力学乃至整个物理规律中最优性确实令人惊叹!本质上,这就是“力学述解”从 2 到 3 的历史演进与方法拓展变化。

本文拟从数学规划的角度去理解“力学述解”的由 2 到 3 与“数学述解”的由 2 到 3 交织和发展。

2 数学规划的 3 要素本质

鉴于数学规划明确地以 3 要素进行数学述解,有必要对数学规划予以问津,进而用其思想去审视力学中饶有兴趣的理念——以最优化形式表达的力学规律。

数学规划论是一门研究最优化理论、方法和应用的学科,从 20 世纪 50 年代末、60 年代初开始发展起来。数学规划含有设计变量、目标函数和约束条件 3 个要素。一个数学规划问题的提法是:

$$\begin{cases} \text{求 } x \in E^n \\ \text{使 } f(x) \rightarrow \min \\ \text{s. t. } g_j(x) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, m) \end{cases} \quad (1)$$

其中设计变量 x 是 n 维欧氏空间中向量, $f(x)$ 是评价设计优劣的标准,称为目标函数, $g_j(x)$ 是限制设计的第 j 号设计变量。数学规划给出这一问题在最优点满足的库恩-塔克(Kuhn-Tucker)条件:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(x^*)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j^* \cdot \frac{\partial g_j(x^*)}{\partial x_i} = 0 \\ g_j(x^*) \leq 0 \\ \lambda_j^* \geq 0 \\ \lambda_j^* g_j(x^*) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

当约束皆为等式时, $m < n$, 可以将 $g_j(x) = 0$ 化为一对约束 $g_j(x) \leq 0$ 与 $g_j(x) \geq 0$, 分别对应乘子 μ_j 与 ν_j , 写出它的库恩-塔克条件后, 记 $\mu_j - \nu_j = \lambda_j$, 于是得:

$$\begin{cases} \frac{\partial f(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j^* \cdot \frac{\partial g_j(\mathbf{x}^*)}{\partial x_i} = 0 \\ g_j(\mathbf{x}^*) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

故可以把库恩-塔克条件理解为处理等式约束的经典拉格朗日 (Lagrange) 乘子法的推广。

较经典数学分析, 数学规划具有求解极值上的优势, 不仅可以列出不等式约束的必要条件, 而且还给出了如何一步一步走向最优点的优化算法。数学规划中各式各样的寻优算法非常多, 本文限于篇幅不能列举, 但是可以以无约束优化为例, 说明这一算法可以概括为

$$\mathbf{x}^{(\nu+1)} = \mathbf{x}^{(\nu)} + \alpha^{(\nu)} \mathbf{S}^{(\nu)} \quad (4)$$

其中 $\mathbf{x}^{(\nu)}$, $\mathbf{x}^{(\nu+1)}$, $\mathbf{S}^{(\nu)} \in E^n$, $\alpha^{(\nu)} \in E^1$, $\mathbf{x}^{(\nu)}$, $\mathbf{x}^{(\nu+1)}$ 分别为第 ν 次和第 $\nu+1$ 次设计, $\mathbf{S}^{(\nu)}$ 为从第 ν 次设计点走出的下降方向, $\alpha^{(\nu)}$ 为沿着 $\mathbf{S}^{(\nu)}$ 方向走出的步长。

3 力学规律中蕴含的 3 要素本质

由于经典数学分析在研究极值点时只是潜心满足的必要条件——方程的求解, 未能从寻极值的角度一步一步由解极值点走向极值点, 因此对相应的经典力学和物理学只是关注满足极值点条件表达的力学、物理规律, 除了站在高层次的大师, 一般对最优性原理并不那么热心。

除了前面提及的有限维欧几里得空间 (Euclidean Space) 描述的解决函数极值的数学规划, 还有在无限维希尔伯特空间 (Hilbert Space) 中描述的解决泛函极值的变分法。例如哈密顿原理可以表述为: 在有势力作用下的具有理想和完整约束的质点系, 当由 t_1 时刻演化到 t_2 时刻时, 真实的运动使哈密顿作用量取极小值:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt \rightarrow \min \quad (5)$$

其中拉格朗日函数或动势为 $L = T - V$, T 与 V 分别为动能与势能。一般多用哈密顿作用量的变分等于零表达哈密顿原理, 这里用极小值为的是与数学规划的提法一致。

哈密顿原理揭示了一个深刻的原则: 在无数个可能的运动中, 真实的

运动是满足某个物理量极小值的解。换句话说,力学的运动遵循某个量极小化原则。分析力学之后发展起的变形体力学中,仍然有类似的原理出现,如最小总势能原理,以通过有限元方法得到线性系统的离散方程为

$$Ku = P \quad (6)$$

其中 K, u, P 分别为总刚度阵、总位移向量和载荷右端项,其实它是如下结构总势能取极小值的鞍点条件:

$$\Pi = \frac{1}{2} u^T K u - P^T u \rightarrow \min \quad (7)$$

尽管式(5)与式(7)分别是泛函极值与函数极值,但都是以某个目标最优化表达的物理规律,而且相应的鞍点条件若不是偏微分方程就是代数方程。力学中不仅有最小总势能原理,还有最小总余能原理、胡海昌-鹭津广义变分原理等等。总之,力学规律服从最优化的原则。其实光学里有费尔玛(Fermat)原理,即真实的光程使以下的泛函取最小值:

$$\int_A^B n ds \rightarrow \min \quad (8)$$

一般地讲,在物理学的各个领域中都有类似的服从最优化的原理,由某个物理量极小化得到表达运动规律的鞍点条件,通常是偏微分方程或代数方程的形式。以往在力学和物理学中,不以式(5)、(7)、(8)这种数学规划的形式表述,只是一般地写出取极值的必要条件。本文强调以数学规划的形式表述,旨在凸现 3 要素的本质。

4 揭示力学规律从 2 到 3 的本质

力学乃至物理学各个分支开始都是探求代数方程组、常微分方程组或偏微分方程组表达物理规律,发展到一定的阶段,物理大师们将它们上升为一个函数或泛函的最小值问题的表达方式;换句话说,由解方程问题上升到解优化问题。为了简洁地说清楚这个问题,我们以代数方程为例予以解释,设某个物理定律开始是如下方程:

$$f(x) = 0 \quad (9)$$

其中 $f(x)$ 与 x 的向量维数相同,都是 n 阶。后来发现,式(9)实质是如下

一个数学规划问题取极值的必要条件:

$$\begin{cases} \text{求 } \mathbf{x} \in E^{n+m} \\ \text{使 } \Psi(\mathbf{x}) \rightarrow \min \\ \text{s. t. } g_j(\mathbf{x}) = 0 \quad (j = 1, \dots, m) \end{cases} \quad (10)$$

由拉格朗日乘子法,得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Psi(\mathbf{x})}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{\partial g_j(\mathbf{x})}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, \dots, n) \\ g_j(\mathbf{x}) = 0 \quad (j = 1, \dots, m) \end{cases} \quad (11)$$

式(11)消去 m 个拉格朗日乘子,就是式(9)。

从式(10)看,它作为待求解的优化问题,包含 3 个要素:变量(即前面所述的设计变量)、目标函数和约束条件,而式(9)只含 2 个要素:变量和状态方程组。

也就是说,从解方程组得 2 个要素发展到解规划的 3 个要素,这是物理规律表达上的变化。如果到了“3”的“门口”没有进去,还停留在“2”的“走廊”上,岂不是太可惜。

显然,如果力学或物理规律在“2”的阶段上是代数方程,那么它在“3”的阶段上,目标函数是一个函数,而状态变量 \mathbf{x} (当处理结构优化问题时,称为设计变量)是一个数量向量;如果力学或物理规律在“2”的阶段上是微分方程,它在“3”的阶段上,目标函数是一个泛函,而状态变量是一个函数;代数方程与微分方程只是形式上的不同,本质上还是从解方程组到解优化问题的差别、从 2 到 3 述解方法的飞跃。

5 分析力学从 2 到 3 述解的首创与示范作用

在诸多学科中,分析力学做出了从 2 到 3 的述解方法的首创工作。

包括牛顿力学的以往的研究,描述和解答的是实际发生的运动或状态,这是无懈可击、极为合理的方法论;然而分析力学突破了这种思维定势,首次从满足约束的无数种可能的运动中找出真实运动,而且结论令人叹服:使某个物理量极小化的运动是真实的运动。

只要认真回顾一下分析力学演进的过程,结论是一步一步得到的,一

点也不突兀。从根本上说,它植根于虚功原理。而这一原理又是那样合情合理与朴素无华。首先考虑静力平衡问题:既然力学系统是平衡的,它在任意可能位移上做的功必然等于零;反过来说,力系在任意可能位移上做的功为零,就必然是平衡的力系。作为一个充分必要条件的结论,它是不难想到的,也是容易令人接受的。该思想最可贵之处在于:①突破了就力谈力的局限性,而从做功的角度谈力的平衡;②突破了就真实运动谈真实运动的束缚,而从所有可能运动的角度寻找真实运动。

至于推广到处理动力问题,借助于达朗贝尔原理就不难实现,而达朗贝尔原理则是把牛顿方程的右端项移到左端的结果,也是十分自然的处理。注意到动力情况下真实运动的虚功为零,就找到了能够理解哈密顿原理的原因,原来哈密顿作用量极小并不神秘,其根源就在于:不真实运动的虚功的不为零,而真实运动的虚功为零。在达朗贝尔原理的基础上,得到动力学普遍方程或达朗贝尔-拉格朗日原理又是十分自然的事情:

$$\sum_{i=1}^n (F_i - m_i \ddot{r}_i) \delta r_i = 0 \quad (12)$$

由此推得拉格朗日第二类方程

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0 \quad (13)$$

其中 L 为动势或拉格朗日函数。

从动力学普遍方程推出拉格朗日第二类方程,一步一步,令人信服。推导能够成功,除了借助于广义坐标、广义速度、广义力等概念,还借鉴了从牛顿方程推出功能关系的类似处理。但是,其表达式能够化为动势表达,实在难能可贵。应当说,动势的提出为哈密顿原理的提出,奠定了重要的基础。

尽管拉格朗日第二类方程已经非常优美了,但它还不是某个物理量取极小值的鞍点条件,因此它还是 2 要素的力学表述形式,既然没有找到目标函数,还没有实现 3 要素的表述。

从动力学普遍方程不仅可以推出拉格朗日第二类方程,也可以推出哈密顿原理即式(5),但是后者的得到还有赖于变分法。从动力学普遍方程推出哈密顿原理,可谓力学述解实现了由 2 到 3 的飞跃。这种看法是

从数学规划的角度反观哈密顿原理得出的结论,表面上看,3要素并不明显,我们只看到了极小化的目标函数——哈密顿作用量,另两个要素状态变量和约束条件分别是隐式表达的。

关于约束条件,哈密顿原理所表达的是消掉了约束后独立自由度的形式,分析力学提供的拉格朗日乘子法可以处理显式约束的情况。

分析力学发展的鼎盛时期真是一个天才辈出的时代,约翰·伯努里、达朗贝尔、费尔玛、莫培督、拉格朗日、哈密顿、雅可比、泊松……,这么多科学家参与到相关的研究中,使力学述解从2到3的早期工作日臻完善。

这些开创工作在物理学所有的分支学科中起了方法论的示范作用。

注意到几何光学与波动光学的差别,把已有的力学理解为“几何力学”,哈密顿在1834年就得到了“波动力学”的方程式,已经走到了量子力学的边缘。因此说:“哈密顿-雅可比方程是后来通向量子力学的惟一的门径。”^[1]

分析力学在力学和物理学各分支学科的巨大影响和示范作用,随着时间的推移,会越来越明显。文献[1]指出:牛顿以后的200年,经典力学的发展“大体说来可以分为两方面:一方面是有限自由度和一般原理的研究;另一方面是连续介质力学,即流体力学与固体力学的研究。”前述的虚功原理、最小作用量原理、变分原理、拉格朗日方程、哈密顿方程等等都是包括在第一方面的研究中,众所周知,这些研究成果都极大地影响了物理学的各个分支试图用作用量(本质是能量)极小化或本文提到的从2到3的力学述解的方法论处理问题,有趣的是,原本并行发展的连续介质力学的研究,当发展成熟以后,也回过头来从哈密顿原理中表现的方法论中汲取营养,今天我们看得很清楚,有限元、边界元等计算力学的数值方法的理论基础都植根于在哈密顿原理之后发展起来的各种力学变分原理。当今,力学等学科哈密顿体系和辛几何的研究,表明3要素的力学述解真是富有学术活力的方法论。

6 力学述解从2到3与数学述解从2到3的交织

数学述解从2到3的发展可以追溯到古典数学分析,最典型的是求函数极值的必要条件和充分必要条件、等式约束的拉格朗日乘子法,但是这些表达式不强调设计变量(或状态变量)、目标函数和约束条件3要素,

而是仅仅把优化条件列出来,还是表现为 2 要素,因为那时关注点是在极值点的性态,或者说是为了理论的推导,而不是寻求从非极值点走向极值点的算法实现。

当时的数学与力学、物理并不分家,数学述解从 2 到 3 与力学、物理述解从 2 到 3 是交织在一起的,这种状态一直持续到求泛函极值的变分法。

有一个极好的例子表明力学述解从 2 到 3 与数学述解从 2 到 3 的交织。如果说,拉格朗日得到以他的名字命名的第二类方程是从力学角度推出,那么,欧拉则是从数学角度得到拉格朗日第二类方程。

得到哈密顿原理的关键是找到或发现一个可以作为根本出发点的量,这就是拉格朗日函数或动势 L 对时间的积分,也就是哈密顿作用量:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L(t, q_1, \dots, q_s, \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_s) dt \quad (14)$$

从泛函求极值角度即按变分法出发,令 $\delta S = 0$ 可以推导出:

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} \sum_{i=1}^s \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \delta q_i dt = 0 \quad (15)$$

由于 δq_i 的任意性,也就得到拉格朗日第二类方程,换句话说,哈密顿原理的得到,表明拉格朗日第二类方程实际是哈密顿作用量取极值的必要条件,这是较之拉格朗日形式的一个重大突破。

从数学规划角度看虚位移,可以找到它与可行解的对应,满足约束的可能位移实际是相应优化问题的可行解。

如果说力学述解从 2 到 3 与数学述解从 2 到 3 的早期的交织是鱼水交融、十分自然的,那么,数学规划出现之后,二者的交融是人为的,原因在于:数学规划虽然产生得很晚,但不是为了满足力学或物理述解从 2 到 3 的发展需求,而是为了人类进行最优设计的要求。然而,其观点和方法对于揭示自然规律也是有益的。

7 3 要素力学述解的意义和作用

揭示力学述解从 2 发展到 3 的阶段,意义和作用很大,可以从两个方面来把握:① 教学改革;② 力学研究和应用。

在基础力学和大学物理的教改中,只要花少许的笔墨,就能完成从“2”到“3”表达力学和物理规律的画龙点睛。这样做,可以花很少的代价达到较强烈地熏陶学生综合素质的作用。学生会深刻感受着:力学和物理规律原来遵循着最优化的原则,在可能的运动中,真实的运动总是使某个物理量取最小值,这会强烈地震撼我们的学生们。

以往的注意点多集中在通过这样一个最优性的原理推出的表达运动规律的方程组。其实,更有意义的是最优性原理本身:首先它揭示了重要的方法论和把握自然规律的理念,把真实的物理运动放在可能的运动中去寻优,真实运动竟然是满足某个最优性原则的可能运动!这是多么奇妙的自然规律啊,进一步,我们可以从自然世界的最优去寻求人造世界的最优,或者说,作为人造世界的“造物主”,人类理所当然地向自然世界的“造物主”(自然规律)学习,进而去进行最优设计。既然自然世界竟然遵循着最优化的原则,那么在人造世界中,仿效自然规律作出最优化的设计来,自然是理所当然、顺理成章的事情了。

从“2”到“3”的揭示会对学生们产生长远的影响,如果他们将来是从事研究的,那么他们将以优化的途径把握分析,并且由以往单一地寻找方程组的解法,进而用许多寻优的解法解出规划问题的解,这就是说,他们有了更多的求解途径;如果他们将来是从事工程实践的,那么,他们就会直接地从事最优设计、最优建造、最优控制或最优运行,那些丰富多彩的优化方法会成为他们得心应手的工具。

从力学的研究和应用看,尽管都是从最优的观点处理问题,但是模型却有根本的差别:在以优化思想解决分析问题的做法中,变量是表征运动规律的状态变量,目标函数与运动规律相关;在以优化思想解决设计问题的做法中,变量是表征待确定的参数即设计变量,目标函数与设计实现的优劣相关。后者虽然也离不开对物理规律的把握,但它在确保符合规律前提下、关注设计参数的最优确定,目标函数直接与设计相关,间接与物理规律相关,实质是“力学或物理背景下人工制品的最优设计”。

分析问题通常是(偏、常)微分方程或代数方程组,如果能够表示成泛函极值问题或函数极值问题,那么,就可以用求泛函极值或函数极值代替解方程组(其实是取极值的必要条件)。

特别是,当泛函极值在数值离散化时变成了函数极值,就可以用数学规划提供的数值寻优算法代替解方程组的工作。

这意味着,有更多的优化算法代替解方程组的方法,必然可以在多种解法中选优。

从变分法去了解数学规划,是由难向易的过程,不难掌握,却获益甚多。学习数学规划可以不进行结构优化,而是用于分析——计算泛函极值或函数极值问题表达的分析问题。

一句话,搞分析的人,学习数学规划是大有裨益的。

前面已经指出,有限元静力分析方程式(6)是式(7)总势能问题的取极值条件。解式(6)是在解方程组的范围内做文章;若解式(7),则可运用数学规划中求无约束极小值的各种解法,在并行计算时,比式(6)更方便。若有约束条件(例如接触问题):

$$G(u) \leq 0 \quad (16)$$

更加凸现优越性。式(6)与(16)联合求解很困难,原因是不得不进行严格不等式与等式的假定和判断,不断地试算;若式(7)与(16)联合,则可使用不等式约束下的极小值的解法,海阔天空,多种选择。

力学述解从 2 到 3 的发展,对于力学的研究和应用有三方面的作用:

(1) 解析理论推导工具——推导出揭示物理、力学规律的微分方程组(早期);

(2) 数值方法推导工具(20 世纪 60 年代之后)——变分原理+离散概念(有限元、边界元、无网络法等)→数值计算的代数方程组;

(3) 数值算法计算工具(值得努力去发掘,发展空间很大)——变分原理+离散概念+数学规划→最优化数值寻优代替解代数方程组。

变分原理的作用由 1 到 3,“与时俱进”,特别应当注意第(3)点——最优化方法拓宽了数值试验手段,我们可以按优化途径进行数值模拟分析,也就是说,数学规划积极参数值计算,可以大有作为。

8 结语

从“力学或物理背景下人工制品的最优设计”回头看力学或物理规律

表现出的最优特点,自然会产生一个感受——力学或物理规律怎么像是某个最优设计的产品!就会更加感到自然规律的奥妙,从而增加学习、研究和把握它的兴趣。

我们可以得出如下结语:

(1) 最优化理论升华了认识事物的观念。

① 从 2 \rightarrow 3:

解方程组——2 要素(变量、方程组);

求解规划——3 要素(变量、约束方程组或约束不等式组、目标)。

② 涵盖了分析:

分析方程组是某个优化问题的鞍点条件。

(2) 最优化方法拓宽了数值试验手段。

可以按优化途径进行数值模拟分析,数学规划及其参数值计算。

(3) 最优化方法直接使人造世界尽善尽美。

用于最优化设计、最优建造、最优控制、最优运行、最优管理等。

(4) 以往对哈密顿原理的理解与评价,多从能量的角度出发,本文首次提出了从 2 到 3 的力学述解。

本文呼吁用数学规划的思想审视基础力学和大学物理的教学,建议在教改中凸现最优化的思想,揭示从 2 到 3 的述解,一方面可以培育教师和学生洞察事物的敏锐视觉和开拓创新的能力,另一方面又可以在认识世界中,提升理性思维的水平,使相关课程的教改取得“欲穷千里目,更上一层楼”的结果。

参考文献

- [1] 武际可. 力学史. 重庆: 重庆出版社, 2001
- [2] 梁昆淼. 力学. 北京: 人民教育出版社, 1980
- [3] 武清玺, 冯奇. 理论力学. 北京: 高等教育出版社, 2003
- [4] 隋允康. 建模·变换·优化——结构综合方法新进展. 大连: 大连理工大学出版社, 1996

基于节点计算的数值分析方法在我国的起源

孙海涛 王元汉

(华中科技大学土木工程与力学学院,湖北武汉 430074)

摘 要 基于节点计算的方法在解决传统有限元法处理较困难的领域取得了明显的成效,受到普遍关注。中国学者在此类方法的发展中,从B-Spline样条函数应用的角度,得到了一种完全基于节点计算的数值分析方法。本文证明了国内学者的方法与国外研究的等价性。国内学者所提方法的计算结果在一些问题中显示出比国外学者所提方法有较大的优越性。

关键词 数值分析,节点,控制方程,样条函数,逼近

1 引言

数值分析方法是许多工程和科学技术问题得以求解的重要方法,其核心思想是用简单的数值插值或逼近代替复杂的真实场函数,通过一定形式的方程控制形式,施加给定的边界或初值条件后,将待求解问题转化成线性方程组求解。按方程控制形式的不同,数值分析方法可分为强形式和弱形式的数值分析方法。典型的强形式的数值分析方法是最早由Euler提出,至今仍在某些工程和科学领域广泛应用的有限差分法^[1](FDM),其他还有微分求积法^[2]。强形式数值分析方法的基本特征是用待求节点附近有限个节点上场函数值的线性组合,逼近场函数的各阶导数(记函数自身为零阶导数),然后,将此简化后的场函数逼近关系代入控制微分方程,进而得到一组代数方程,对此代数方程组求解,即可得到给定节点的函数值。FDM不需数值积分计算,是数值分析方法中最早得到应用的方法,已经发展出各种函数及其导数插值格式,至今仍在计算流体力学等领域中有着重要的应用,其求解过程为构造场函数及其各阶导数逼近格式,施加边界条件,求解代数方程。但FDM在不规则域上边界条

件难以精确满足,求解精度较低,满足函数及其各阶导数的插值逼近形式是同一线性组合关系的插值格式很难找到,而且不同的问题,其程序编制难于统一,因而其应用严重受限,在很多领域被弱形式的有限元法(FEM)^[3]所取代。弱形式的方程控制形式因其扩大了函数的选取空间,在工程和科学技术中得到了广泛的应用,发展得最为活跃,影响最大的FEM是典型的弱形式数值分析方法的代表。因为弱形式的求和特征,FEM需求解单元域上的积分计算问题,这点由于数值积分技术的发展,总体上已得到很好的解决,其求解过程为按选定规则选择弱形式的控制方程,构造场函数的逼近格式,施加边界条件,完成数值积分形成代数方程,代数方程求解。但由于FEM分片插值特性,其数值解的连续性受到分片插值函数的连续阶影响,最终数值解需作平滑处理(即所谓后处理)。另外,FEM计算严重依赖于计算网格,计算网格的产生(所谓前处理)本身就是一件十分困难的工作,特别当网格畸变严重时,FEM处理就会很困难。再则,连续性问题导致的数值锁也是FEM的固有缺点。边界元法(BEM)是另一种弱形式的数值分析方法,它具有将待求问题从全部求解域向求解域边界转移的特点,而且所选取的基本解都能优先满足指定的边界条件,因此在计算量和计算精度上较有优势,对一些无限域和半无限域问题,比FEM有效。但边界元方法的核心工作——基本解的求取——十分困难,目前的结果也十分有限,对非线性问题还无能为力,程序的通用性也差,还未产生大规模的应用结果。

弱形式的数值分析方法极大地扩张了场函数的选择空间,使得场函数的选择更灵活多变。正是这一特点,弱形式的数值分析方法仍然继续发展,其中基于节点计算的无网格法是过去十年中取得较大成功的数值分析方法的代表。本文所指的基于节点的计算方法即是以弱形式表现的无网格法数值方法。虽然许多国内学者在无网格法的其他方法中取得了很好的成就,但本文仅从具有方法性原创意义角度探讨基于节点计算的数值方法在我国的起源。

2 基于节点计算的无网格法

数值分析方法最基本的工作是对场函数的数值逼近,基于节点计算的

数值分析方法中,以无网格法最引人注目。无网格法的研究也是从场函数逼近形式开始。无网格法有多种场函数逼近格式,基于散点数据逼近、函数积分变换、最小二乘误差消除,以及利用计算几何 Delaunay-Voronoi 对偶惟一性特点的场函数逼近格式等,在无网格法中都得到应用。每种插值格式都形成一种类型的无网格法,若以这些插值形式的历史作为无网格法研究起源,则有些牵强。较为一致的看法是:数值方法明确以不需要划分单元为目的。据此标准,无网格法历史可以从 20 世纪 70 年代对非规则网格的 FDM 研究开始。1977 年 Lucy^[4],Gingold 和 Monaghan^[5] 分别提出了光滑质点流体动力学 (SPH) 方法,成功地应用于天体物理、冲击波模拟、流体动力学、高速碰撞等边界条件易于实现的无限域问题。作为一种数值分析方法,其稳定性、收敛条件等问题有较完整的研究。1979 年 Lancaster^[6] 在一份报告中提出移动加权最小二乘法用于多项式和样条逼近,稍后,1981 年 Lancaster 和 Salkauskas^[7] 明确提出移动最小二乘法 (MLS) 的概念,并用于产生计算平面。1992 年 Nayroles 和 Touzot 引入移动最小二法的插值形式,将其应用于在有限元法中有广泛应用的 Galerkin 法,提出了扩散元法 (DEM)^[8]。针对 DEM 中对形函数计算及边界条件的不满足的缺点,1994 年 Belytschko, Lu 和 Gu 对 DEM 进行了改进,提出了无单元 Galerkin 法 (EFG)^[9],针对 EFG 计算需要背景网格作数值积分的问题,Beissel 和 Belytschko^[10] 于 1996 年提出了节点积分方案。EFG 法成为现阶段应用最广的无网格法,在动态裂纹扩展模拟、板壳分析、消除数值锁现象等方面得到广泛的应用。研究表明,EFG 法的收敛速度和精度都要高于 FEM,最大的缺陷是计算量大,对矩阵的反复多次求逆也限制了精度的提高。EFG 拉开了无网格法研究的序幕,此后各种无网格法不断出现,典型的有 Onate, Idelsohn, Zienkiewicz 利用 MLS 构造近似函数提出了有限点法^[11],Liu, Jun, Zhang 应用积分变换的概念,提出了再生核质点方法 (RKPM)^[12],Duarte, Oden 利用 MLS 构造单位分解函数,提出了 hp 云法^[13],Melenk, Babuska 提出了单位分解法 (PUM)^[14],Zhu, Atluri 提出了局部边界积分法 (LBIE)^[15] 及无网格局部 Petrov-Galerkin 法 (MLPG)^[16],De, Bathe 提出了有限球 (FSM)^[17] 方法,Braun, Sambridge 基于 Delaunay 猜想,提出了自然单元方法 (NEM)^[18]。

从各种无网格法插值格式实际应用的角度看,无网格法插值形式可

分为核近似、最小二乘法和计算几何恒等关系,其中以核近似和最小二乘法应用最广。各种插值形式的数学基础并不一样,核近似是以 Dirac 函数的特性作为插值理论基础。考虑场函数 $u(x)(x \in \{x^1, x^2, x^3\})$, 可用 Dirac 函数 $\delta(x)$ 表达为

$$u(x) = \int_V \delta(x-y)u(y)dV \quad (1)$$

上式作理论分析十分方便,但在数值分析中,奇异函数的计算在计算机中很不方便,通常用具有类似奇异函数特征的核函数 $w(x-y, h)$ 近似代替 Dirac 函数,因此场函数的近似函数在域上的表达式为

$$u^h(x) \approx \int_V w(x-y, h)u(y)dV \quad (2)$$

式中 h 为核函数的特征尺度。由式(2)出发,可以应用积分变换的概念,引入各种变换,包括小波等方法再现函数。对式(2)作离散处理,可得到场函数的近似计算格式。SPH 法、RKPM 法的插值形式可归于此类。

移动最小二乘法是无网格法中应用最普遍的插值形式,其数学基础是 Ritz 法和加权最小二乘误差消除方法。同样,考虑场函数 $u(x)(x \in x^1, x^2, x^3)$, 将 Ritz 法中的广义坐标 a_i 考虑为变量,场函数的近似表达式为

$$u^h(x) \approx \sum_{i=1}^m a_i(x)p_i(x) = \mathbf{p}^T(x)\mathbf{a}(x) \quad (3)$$

计算节点场函数残值

$$R_j = \mathbf{p}^T \mathbf{a} - u_j \quad (4)$$

构造域上对计算点有影响的残值泛函

$$J = \sum_{j=1}^n w_j(x) R_j^2 = (\mathbf{P}^T \mathbf{a} - \mathbf{u})^T \mathbf{w} (\mathbf{P}^T \mathbf{a} - \mathbf{u}) \quad (5)$$

其中

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_1(x) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2(x) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n(x) \end{pmatrix} \quad (6)$$

为各节点残值的权函数。

$$\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T \quad (7)$$

是节点场函数列向量。而

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= [p_1, p_2, \dots, p_n] \\ p_j &= [p_1(x), p_2(x), \dots, p_m(x)]^T \end{aligned} \quad (8)$$

对泛函 $J(a(x))$ 关于 $a(x)$ 取驻值, 得

$$\mathbf{PwP}^T \mathbf{a} = \mathbf{Pwu} \quad (9)$$

将式(9)代入式(3)得

$$u^h = \mathbf{p}^T (\mathbf{PwP}^T)^{-1} \mathbf{Pwu} \quad (10)$$

令

$$\boldsymbol{\phi}^T = \mathbf{p}^T (\mathbf{PwP}^T)^{-1} \mathbf{Pw} \quad (11)$$

则

$$u^h = \boldsymbol{\phi}^T \mathbf{u} \quad (12)$$

式(12)具有 FEM 的一般表达形态, $\boldsymbol{\phi}^T$ 称为移动最小二乘法的 (MLS) 形函数。由于权函数光滑作用, $\phi_{ij} = \delta_{ij}$ (δ_{ij} 为 Dirac 函数) 一般不成立, u 并不等于节点的场函数值, 此时 u 为计算点场函数控制值。失去奇异性的式(11)使得式(12)变得更光滑, 即可导阶更高, 但导致边界条件处理困难, 这是无网格法的难点之一。计算场函数对坐标的导数, 可化为对 $\boldsymbol{\phi}$ 的导数, 求导规则符合一般函数求导关系

$$\boldsymbol{\phi}_{,k}^T = \mathbf{p}_{,k}^T (\mathbf{PwP}^T)^{-1} \mathbf{Pw} + \mathbf{p}^T (\mathbf{PwP}^T)^{-1}_{,k} \mathbf{Pw} + \mathbf{p}^T (\mathbf{PwP}^T)^{-1} \mathbf{Pw}_{,k} \quad (13)$$

类似地可求更高阶导数, 如果其导数存在。

3 移动最小二乘与样条插值

国内学者对无单元法概念的建立是基于样条插值逼近。1979 年, 我国学者石钟慈首先发表了《样条有限元》^[19] 一文, 打开了 B-Spline 基函数作为有限元插值基函数应用的大门。但《样条有限元》一文并不是

简单地考虑场函数的插值形式变化,而是明确地提出了无需单元的概念,这正如插值形式并不是无网格法研究的起源一样,无网格法必须明确是否需要单元。石钟慈在《样条有限元》一文中对 B-Spline 在插值格式,边界条件处理,及与标准 FEM 各种插值形式,如线性插值、Hermite 插值计算量、计算特征等作了分析比较,得出了 B-Spline 样条有限元在规则域上优于标准 FEM 的结果,文中给出了简单及复杂支撑板、弹性地基板、板梁组合结构的计算结果。尽管文中表明应用范围在规则域上,实际上只要计算域能用直角坐标或极坐标方便地描述,文中方法均可得到应用。

广西大学的秦荣^[20]在样条函数在计算力学中的应用方面做了大量的应用研究工作,将其推广到薄壳问题计算、及其他问题的计算。秦荣还将 B-Spline 插值与边界元法结合^[21],用于求解不规则域上的工程与力学问题。合肥工业大学的沈鹏程^[22]、何沛祥等学者应用混合变分原理,在多变量样条有限元法方面做了大量的工作。刘效尧^[23]也在 B-Spline 函数在力学与工程实际问题的数值分析应用中做了很多工作,取得了丰硕的成果。值得指出的是,上述学者在应用 B-Spline 时均明确声明所用方法不需划分单元,只需计算域上的点。

可以证明,B-Spline 插值实质是移动最小二乘法的一个特例。证明如下:

对式(11)作如下处理,构造均匀正则空间基 $p^T = [1]$, 则有

$$\phi^T = \left(\sum_{i=1}^n w_i \right)^{-1} (w_i(1), w_i(2), \dots, w_i(n)) \quad (14)$$

式(14)中, n 是在点 i 的定义域内的节点数。式(14)即是 Shepard 插值公式。通常认为 Shepard 插值精度较低,应用较少。但在规则域中,容易构造优先满足边界条件的函数,避免了无网格法中对边界条件处理的困难,实际上能得到很好的结果。恰当地选择权函数 w_i ,可以形成方便快捷的计算格式。式(6)中 w_i 的选取应满足如下条件:

$$w_i \begin{cases} > 0 & \text{在 } \Omega_i \text{ 内} \\ \equiv 0 & \text{在 } \Gamma_i \text{ 上} \end{cases} \quad (15)$$

式中, Ω_i, Γ_i 分别为 i 点的紧支域及其边界。特别地,当

$$w_i(x) = w_j(x - x_i) \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n w_i(x_j) \equiv \text{const} \quad (17)$$

成立时,可得到样条函数插值的一般形式

$$u(x) = \sum_i w_i u_i \quad (18)$$

显然,B-Spline 基函数满足上述条件,其他还有许多具有类似紧支对称特征的函数,如余弦样条基函数(K 为正偶数)

$$C(x) = \cos^2\left(\frac{\pi}{K}x\right) \quad x \in [-K, K] \quad (19)$$

满足条件(16)、(17)。对二维问题,若取

$$w_i = w_i(x^1)w_j(x^2) \quad (20)$$

则式(18)变为

$$u(x) = \sum_i \sum_j w_i w_j u_{ij} = w(x^1) \otimes w(x^2) u_{ij} \quad (21)$$

式(21)即是《样条有限元》一文中的张量积方法(Kroneker 法)。

从时间上来看,上述国内学者的工作都是在 20 世纪 70 年代末至 80 年代中期完成的,其无单元概念的建立明显早于国外学者。

4 样条插值与移动最小二乘插值计算比较

以 MLS 为一般插值形式,可以导出样条插值关系(18)。但样条插值关系(18)比(12)的应用更具便利快捷,特别是当计算域可以变换成均匀规则的矩形域时,此时样条插值关系导出的数值分析方法比 MLS 具有三个方面突出的优点。

(1) 矩阵可逆与等分布原则。按 MLS 插值关系式(12),其成立的结果是式(11)成立,而式(11)成立必须是矩阵式(8)的逆存在。满足矩阵式(8)的逆存在,要求计算域内对计算点有影响的节点在节点分布方式及节点数上要满足一定的要求。如影响域内的节点不能分布在一条直线附近,这等价于 FEM 中的锐角三角形判断,影响域内的节点数不应少于

MLS 基函数项数等。在样条插值函数中没有这些限制。按 de Boor^[24] 的观点,散点插值稳定收敛应满足等分布条件:

$$h_i^2 |f(x_i)''| = h_{i+1}^2 |f(x_{i+1})''| \quad (22)$$

这点在 MLS 中难于体现,即使是规则域,节点分布也不能均匀分布。另外,角点处的节点边界条件也是一个复杂的问题。

(2) 数值积分与基矩阵。如同 FEM 中一样,MLS 插值形式所形成无网格法仍然需要数值积分,这种数值积分有时在背景网格内完成(因而非真正意义上的无网格法),有时在节点上完成(真正无网格法,但数值结果稳定性很差)。而样条插值函数基在均匀节点分布时,不需要进行数值积分,只需要根据边界条件形成基矩阵即可,而且由于具有紧支域特征的对称权函数积分的变尺度关系,基矩阵的计算十分简单,只需计算少量边界附近的元素,然后根据对称或反对称的关系即可写出基矩阵。

$$\int_L \left(\cdots \int_L C(x) dx \right)_{(p)} dx = h^p \int_l \left(\cdots \int_l C(hx) dx \right)_{(p)} dx \quad \left(h = \frac{L}{l} \right) \quad (23)$$

$$\int_L C(x)^{(m)} C(x)^{(n)} dx = h^{1-(m+n)} \int_l C(hx)^{(m)} C(hx)^{(n)} dx \quad \left(l = \frac{1}{h} L \right) \quad (24)$$

式中 p 为积分次数, m, n 为微分阶。利用变尺度性质,在均匀加密节点时,基矩阵元素值不变,只需考虑尺度因子的影响,前面的计算结果可充分利用。

(3) 边界条件施加。由于 MLS 插值一般不具备 Dirac 特征,故基于 MLS 方法的无网格法在边界条件的处理上是通过修正控制方程的方式实现的,无形中增大了计算工作量,也有损于计算结果的稳定性和计算精度。在基于样条插值的数值计算中,可以通过样条基函数的组合优先满足边界条件,因而其计算结果的精度能得到提高。

在计算矩阵的带状特征上和全域连续阶上,样条插值关系的结果要优于 MLS 插值关系的结果。

5 基于节点计算数值分析方法的方法特征

基于节点计算的无网格法是一种局部逼近全域连续的数值分析方法,大多数数据无网格法是全域计算方法,在数据的准备工作上只需对节点进行描述,前处理工作量大为减少。基于节点计算的数值分析方法还有别于基于单元的 FEM,基于单元的 FEM 采取分片逼近方法,结果片内连续,片与片之间不连续或连续阶过低,需对最终结果作平滑处理,导致计算结果的次生误差。因而在方法上基于节点计算的数值分析方法具有先天的优越。

通常认为 Shepard 类函数只具常数再生特征,计算精度较低。实际上若在插值函数上选取了精度较低的插值函数形式,但在其他影响数值计算结果的因素上能精确地满足,同样能得到令人满意的结果,且计算量也有显著的降低。正如简单的低阶插值函数能在复杂的问题上得到比高阶插值函数更好的结果一样,数值解的精度是一个综合考虑各种因素数的结果,数值结果证明了上述结论。

基于节点计算的无网格法在结果的收敛性和稳定性分析上还有许多没有得到数学上的证明,而其特例——基于样条插值的计算方法,可以充分利用研究成熟的样条函数收敛及稳定性理论,得到严密的数学理论支持。

参考文献

- [1] Mitchell A R, Griffiths D F. The Finite Difference Methods in Partial Differential Equations. Wiley, Chichester, 1980
- [2] Bert C W, Malik H. Differential quadrature method in computational mechanics. Applied Mechanics Review, 1996, 49(1): 1 - 28
- [3] Zienkiewicz O C, Morgan K. Finite Elements and Approximation. Wiley, Chichester, 1982
- [4] Lucy L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis. The Astron, 1977, 8(2): 1013 - 1024
- [5] Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics: theory and applications to non-spherical stars. Mon. Not. Roy. Astrou. Soc., 1977,

18: 375 – 389

- [6] Lancaster P. Moving weighted least-squares methods in Polynomial and Spline Approximation. NATO Advanced Study Institute Series C, Riedel, Dordrecht, 1979, 91 – 102
- [7] Lancaster P, Salkauskas K. Surfaces generated by moving least-squares methods. Mathematics of computation. 1981,37(155): 141 – 158
- [8] Nayroles B, Touzot G, Villon P. Generalized the finite element method; diffuse approximation and diffuse elements. Comput. Mech. , 1992, 10: 307 – 318
- [9] Belytschko T, Lu Y Y, Gu L. Element-free Galerkin methods. Int. J. Numer. Methods Eng. , 1994, 37: 229 – 256
- [10] Beissel S, Belytschko T. Nodal integration of the element-free Galerkin method. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. , 1996, 139: 49 – 74
- [11] Onate E, Idelsohn S, Zienkiewicz O C. A finite point method in computational mechanics; Applications to convective transport and fluid flow. Int. J. Num. Meth. Engng. , 1996, 39: 3839 – 3866
- [12] Liu W K, Jun S, Zhang Y F. Reproducing kernel particle methods. Int. J. Numer. Methods Engrg. , 1995, 20: 1081 – 1106
- [13] Duarte C A, Oden J T. Hp clouds; a meshless method to solve boundary-value problems technical report 95 – 05. Texas Institute for Computational and Applied Mathematics. University of Texas at Austin, 1995
- [14] Melenk J M, Babuska I. The partition of unity method. Int. J. Num. Meth. Engng. 1997, 40: 727 – 758
- [15] Zhu T, Zhang J, Atluri S N. A local boundary integral equation (LBIE) method in computational mechanics, and a meshless discretization approach. Comput. Mech. , 1998,21: 223 – 235
- [16] Atluri S N, Zhu T. Anew meshless local Petrov-Galerkin (MLPG) approach in computational mechanics. Comput. Mech. , 1998, 22: 117 – 127
- [17] De S, Bathe K J. The method of finite spheres. Comput. Mech. 2000, 25: 329 – 345
- [18] Braun J, Sambridge M. A numerical method for solving partial differential equations on highly irregular evolving grids. Nature, 1995, 376: 655 – 660
- [19] 石钟慈. 样条有限元法. 计算数学, 1979, (1): 50~72
- [20] 秦荣. 结构力学的样条函数方法. 广西: 广西人民出版社, 1985
- [21] 秦荣. 样条边界元方法. 广西: 广西科学技术出版社, 1988

- [22] 沈鹏程,何沛祥. 多变量样条有限元法. 固体力学学报, 1994, 15(3): 234~243
- [23] 刘效尧. 样条函数与结构力学. 北京: 人民交通出版社, 1990
- [24] de Boor. A Practical Guide to Splines. New York: Springer-Verlag Inc. , 1978

自然科学与人文修养

张 文

(复旦大学力学与工程科学系, 上海 200433)

摘 要 本文阐述自然科学与人文修养之间的关系, 强调包括力学工作者在内的自然科学工作者必须有足够的人文修养, 自然科学与人文科学之间存在着互动关系, 而现代高校的核心在于人文教育。

引言

首先, 允许我摘录北京青年报 2005 年 7 月 31 日的报道:

7 月 29 日, 温家宝总理看望 94 岁的人民科学家钱学森先生。温总理谈了最近正在组织制定新一轮科技发展规划, 确定重大专项, 确定未来 15 年科技工作指导方针, 集中力量, 发挥优势, 攻克重大课题, 实现自主创新, 重点跨越, 支撑发展, 引导未来时,

钱老说: “您说的我都同意, 但还缺一个。”

“好哇, 我就是想听您的意见。”温总理亲切地说。

钱老说: “我要补充一个教育问题, 培养具有创新能力的人才问题。一个有科学创新能力的人不但要有科学知识, 还要有文化艺术修养, 没有这些是不行的……”

“您讲的很重要。”温家宝频频点头, 接过话茬, “像您这样的老一代科学家不仅科学知识渊博, 而且文艺修养也很高。李四光先生就会谱曲, 您也是一样。”

“可能就是艺术方面的修养, 使您的思想更开阔。”温家宝说, “而现在学理工的往往只钻研理工, 对文学艺术懂得很少, 这不利全面发展。”

“现在中国没有完全发展起来, 一个重要原因是没有一所大学能够按照培养科学技术发明创造人才的模式去办学, 没有自己独特的创新的东

西,老是‘冒’不出人才。这是个很大的问题。”病榻上的钱学森坦诚建言。

“我们的教育还有些缺陷。”温家宝坦率承认,“全面培养人才,这个意见我将带回去和有关部门研究。”

温家宝紧紧握住钱学森的手,久久不愿放开。

.....

这段话,其实应引出了一个根本性的问题,大学应该怎么办学?人才应该怎么培养?科学事业需要怎样的人才?科学发展是靠怎样的人才?钱先生讲的“具有科学技术发明创造性的人才的模式”是什么模式?我们现在的学生是什么模式?我们讨论力学史和力学方法论,我们能不能从具体的力学发展上,来论证钱先生的判断。即:科学的发展靠了有人文修养的科学家。是他们,发掘出新方法新模型新领域。

复旦大学,刚刚度过了它的百年校庆。大学该怎么办?今年9月,复旦大学新生入学,采取了一个非常大的动作:第一年,新生不进入各系,只分文、理、医三大块进行教学。在寝室安排上完全打乱,连文、理、医也不分。一年后,还可以根据学生志愿,适量调整院系。这一举措当然带有爆炸性,褒贬不一,见仁见智。而我,是非常赞成的。

1 自然科学与人文修养的关系

我一直认为,大学生应该有文学、历史、哲学、艺术的基础,这些似乎“无用”的知识,实际上在熏陶一个人的心灵和个性。心灵和个性是靠这些“无用”的东西陶冶出来的。庄子曰:“人皆知有用之用,而莫知无用之用也。”

我其实没有实力来谈这个问题。我平时看点文章,有点资料收集,但没有整理的能力,杂乱无章,通过举几个例子来说明。

1. 20世纪50年代还没有计算机专业,IBM当时急需大量程序员,结果招了不少学文艺、语言、历史的文科学生,后来发现,他们的表现不比学数学和工程的差。在如何让使用者理解机器指令方面,甚至有优势。因此,IBM至今每年仍要招一部分文科生从事技术工作。

2. 医生是非常专门化的行业,在美国,没有学位绝对不能从医。但美国许多医学院学生要学“Narrative Medicine”(叙述医学)课程,让学生研

读小说,学会从病人主诉中提取有用信息。进行交流和沟通。

3. 16 世纪瑞士钟表大师塔·布克在自己作坊里可以把钟表制作得误差低于 0.01 秒,但他被罗马教廷关入监狱失去自由后,怎么都做不出误差低于 0.1 秒的钟表。他知道,原因是他失去了个性。他参观金字塔后,发现这么巨大工程的各个部件竟衔接得如此天衣无缝,于是他断言:金字塔的建造者不可能是奴隶,只能是自由人。在过分指导和过严监管的地方,别指望发生奇迹。也别指望在中国目前的教育和科技体制下出诺贝尔奖。

4. 我在哈佛时的老板丘成桐教授,他今年暑假在杭州突然作了个演讲,大谈数学与文学的关系。数学和力学不完全相同,但有联系,是亲戚,可以借鉴。他指出:大部分数学著作枯燥乏味,而有些令人叹为观止,原因何在?答曰:个人气质。而气质与文化修养有关也。

一个人在选择研究难题,选择研究方向上,文化修养起了关键作用。阿基米德的浮力定律,或者牛顿的微积分,爱因斯坦的相对论,他们的原始思维,其实最主要的是形象思维。即使欧拉的变分法的开创性思想,也是在探索大自然现象中由灵感而来,绝不是单纯逻辑推理的产物。在这里,形象思维是第一位的。大而言之,一个力学家,他对大自然的感受的深刻与肤浅,决定了他的成果的原创性的深刻与肤浅。我体会毛泽东的实践论,也包含了这个含义。

丘老师讲到了数学的意境与感情。他说,不少伟大的数学家,以文学、音乐来熏陶自己的气质,直追问题的本源,以达到高超的意境。浓厚的感情使我们对研究对象发生痴迷,从而对对象产生直觉和悟性。这种对大自然的感情,是要长期培养的。他说,一个为了争院士或者政协委员头衔而千里奔波者,是难以想像他们会对大自然有深厚的感情。他们的文章再多,也聊无新意。这当然已经是在批判当今的社会现象了。

因此,丘的结论是,我们要做出成果,必需解除名利的束缚,使对大自然的直觉无拘束地释放出来,这是数学家气质的最重要一步。

5. 无独有偶,去年 5 月,上海市科协和上海市美协联合举办国际科学与艺术展。这是严谨的科学和浪漫的艺术在“山顶”的一次会合,社会效果非常好。这个展览吸引了 8 万余名观众流连忘返,他们感叹:没有想到,科学原来如此美丽。上海市科协主席沈文庆院士说:杨振宁、李政道

的诺贝尔奖就是美在“对称中的不对称”。《文汇报》指出：“和谐之美正是科学家和文学艺术家共同追求的最高理想境界，是科学和艺术以各自不同的形式努力表现的共同目标，所以科学和艺术从来是相通的、互动的。”李政道在会上讲：科学的目的是追求真理。了解客观世界的动力是美好的情感。一个人如果没有情感，就没有创造的原动力。情感是什么？就是一个人的人文精神，包括了科学精神。他还说，科学+艺术是一枚硬币的两面。科学和艺术就是智慧和情感二元性。

6. 前面讲到温总理说李四光先生会谱曲，我查到了资料，在智效民著的《胡适和他的朋友们》一书中讲到：李四光是中国有史以来第一支小提琴曲作者，同时拉得一手小提琴。他 1915 年留英，1918 年在法国做学术报告时谱写了“行路难”曲，现手稿保存在上海音乐学院。我相信，李四光的地质力学的创造性思维肯定与他的人文功底有极大关系。

7. 近距离地观察我生活周围的人，我发现，许多有成就的长者，都有非常好的人文修养，反过来，凡思维敏捷者大多有好的人文修养。

(1) 程不时：中国“运十”和“初教 6”总设计师，清华大学管弦乐队第一小提琴手和总指挥，2000 年中央电视台春节联欢晚会小提琴表演者。

他说过：“我有两种兴趣：一个是工程，严密的理性思维，掌握科学知识，用来改造世界。一个是醉心文学艺术，陶冶情操，净化心灵。”

(2) 再近距离：复旦大学有许多自然科学的教授都能歌善舞，他们的形象思维能力丝毫不低于文科老师。苏步青（诗词、书法），谢希德（集邮、钢琴），李大潜（通读中外名著）。就我们今天的与会者中，武际可教授的书法和人文知识，戴世强教授的交通流建模灵感，只有请他们自己来现身说法了。

2 为什么自然科学工作者要加强自己的人文修养

我个人的体会是：

1. 人的本性是追求美。好奇，探索，认识周围世界，是人类与生俱来的本性。是对美的追求的本性。科学是讲逻辑的，逻辑本身就是一种美。没有美的修养，杂乱无章的思维和表达肯定不美，不受欢迎。也一定在科学上做不出好成果。如果一个教师在课堂上分析一个自然现象时，杂乱

无章,语无伦次,学生肯定打瞌睡。如果这个教师讲的层次清晰,条理分明,学生肯定会感到精神百倍。我本人听过钱学森先生的讲座,他的高度概括、条理和推理,完全是一种美的享受。

Helen Vendler 曾经指出:凡是被人类永远铭记在心的先人,都是因为他们为人类创造了美而不是其他。这里的美,我理解为包括科学美和人文美。全世界的多元文化创造了无与伦比的美。

2. 简洁、条理、逻辑、高度的概括、抽象和普遍性,这就是科学美。科学美的核心首先是真。一个好的科学家,他的目标是在他的领域里,追求真理的简洁性、真理的普遍性。他绝对反对烦琐哲学。科学的抽象越简单,就越深刻普遍,越真。这个能力哪里来?人文教育。一个优秀的科学家,他的人文艺术修养肯定是高的。

3. 自然现象是客观的,但科学抽象是人为的、主观的,是体现人类创造力的。科学研究中最重要的功夫是直觉,用我们力学的行话讲就是建模。建模要靠灵感和悟性。胡适说的“大胆假设,小心求证”。第一句就是人文精神,第二句是科学精神。一个科学家的想像力主要不是来源于严密逻辑,而是来源于人文的情感思维。爱因斯坦说过:物理给我知识(解决问题),艺术给我想像(发现问题)。人文知识可以提升精神境界,开放想像力,形象思维解决原创性问题。等到进入逻辑推理阶段,路已经走了一大半。真正的高质量的创新在于“大胆假设”,然后“小心求证”。

4. 其实,提高人文修养,还不仅仅是提高科研创新能力。更本质的,是造就一个自觉推动社会进步的优秀的人,担当社会责任的人。按我们过去的话来讲,就是有政治方向的人,是“降大任于斯人”的人,一个有崇高思想境界同时脚踏实地的人,一个有社会责任感、虚怀若谷的人。怎样培养这样的人呢?回答是人文教育。因此,人文教育高于科学教育。

5. 回到哈佛大学校长 H. Summers 的讲话里。他说“我们需要将小聪明与大智慧区分开来”。“要让学生意识到,光有点小聪明、掌握一些工具技巧是远远不够的。要将方法和手段的问题与人性的问题、人们的爱和恨的方式的问题区分开来。”“我们能够掌握顶级的基因工程技术。我们能够对小脑在刺激下做出的反应给出解释。但我们更需要一种最基本的判断力,这种判断力既无法从对自然科学的探寻中得到,也不能从社会科学中获得。”“一个正在思考当今世界面临的重大发展政策挑战的人,是

该去读一本发展经济学的名著,还是读一本康拉德的小说呢?我会强烈推荐后者。”

我理解他讲的就是人文精神的培养。这是和谐社会所希望的人,是以人为本的社会所需要的公务员。如果我们培养了一大批这样的人,社会就不会倒退。用一个字来概括,就是这个人很“美”。他的心灵和智慧都很“美”。他的内在很美,他的外表也一定美。

联合国科教文组织 1998 年在巴黎召开的一次高等教育会议上,提出了人的灵性与人性的结合问题,掌握了科学可以干好事也可以干坏事,就看你接受的人文教育了。否则的话,“当人类彻底揭开生命奥秘时,就是人类彻底灭亡之时”。我们强调培养“有责任感的人才”。这就是人文教育高于科学教育。

也千万不要把科学教育和人文教育看成为能力教育,甚至工具教育。那是非常非常功利的观念。从这点上来讲,我们的基础普及教育早就偏离了正确方向。我们现在是调动全社会的力量,进行全面的应试教育,全面的功利教育。培养出来的孩子有非常功利的头脑,社会的责任感丧失了。这样的孩子不美。他们的心灵是缺损的。

归结起来,我体会,人文修养有三大功能:① 做人方向,人性,情操,人文导向;② 为科学提供精神动力;③ 为科学提供灵感源头。我在电话里问杨叔子院士:人文教育的作用是什么?他说四个方面:方向、动力、创造力和应用。他多了一个应用。

3 科学与人文的互动作用

至于科学对人文的作用,我因为人文基础差,不敢班门弄斧。我这里提出一些比较表层的东西供参考。

科学丰富和提高了人类对美的认识。科学追求美,追求真。科学的美在于它的简单、抽象和普遍性。科学规律揭示得越简单,就越深刻、越普遍、越真、越美。爱因斯坦说过,人们是想以最适当的方式画一幅简单易懂的世界图画。举一些简单性的例子:

(1) 生物现象千变万化,现在提炼出最基本的架构是基因。

(2) 马克思的政治经济学,解剖出资本主义最基本的元素——商品和

剩余价值。

(3) 爱因斯坦的非常简单的质能互换公式 $E = mc^2$ 和时空转换公式 $l = l_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 揭示了宇宙最基本的规律。高度的概括体现出自然规律的高度普遍性。

(4) 笛卡儿直角坐标——人类科学思想史上最伟大的成就之一，它把几何和代数联系起来，几何曲线成了代数方程，几何论证成了数学推导。各个几何定理成了代数的统一处理。抽象的代数通过几何形象予以直观解释。这是科学与艺术结合一个典例。

(5) 分析力学，把宏观的有限自由度的机械运动统一到 Lagrange 方程。Lagrange 当时提出这一分析体系时，曾非常骄傲地说，我不需要图形。这和笛卡儿的解析几何有异曲同工之美。

(6) 不要小看了笛卡儿。只有运动的数学语言才能承担起工业文明。工业文明需要笛卡儿坐标十字架。农业文明是静态的，少变化，它不需要笛卡儿，也不需要微积分。笛卡儿坐标和微积分为西方工业文明的到来做了前期准备。恩格斯早就说过，只有数学进入了的科学，从“描述科学”跃入“精密科学”，才真正成为科学。生物过去是以描述和分类为主的，现在用到了数学。经济科学也开始进入了“精密科学”。

(7) 非线性现象里的同构和分形——一个数学公式配以不同参数，在笛卡儿坐标系中描绘了各种美轮美奂的图形。现在多媒体艺术采纳了这个技术。

(8) 喷泉式飞机、流线型轿车、杨浦大桥，凡是符合大自然规律、与大自然和谐匹配的设计、造型都是非常美的艺术品。

(9) 悉尼歌剧院的艺术构思是依靠结构工程师才实现的。一个成功的建筑艺术必然是和艺术和科学的高度结合的产物。火柴盒式的、缺乏审美的公寓建筑是温饱时代的产物，再也不要出现了。

(10) 美国 7 月 4 日的“深度撞击”引起的人造美妙天象，是高超的艺术之笔。

4 现代高校的核心：人文教育

这可能要越出了本文题目，但又必需涉及。

1. 哈佛大学校长 H. Summers 在去年的世界校长会议上讲：大学的最根本的使命（不是任务）是传承人文科学精神和传统。他认为，任何一个具体的研究课题（经济的、生物的等等），大学如果不做，别人会来做。但如果我们著名的高等学府不做人文培养，谁能填补？“如果我们葬送了人文教育的薪火相传，一切将覆水难收。”“对一所大学来讲，再没有比加强人文学科研究，也即对美的理解，更重要的使命了。”

要知道，这位哈佛大学校长是 MIT 出身，搞工的。他为他当年没有受到人文教育的熏陶而深感缺憾。

注意：在这里，他把人文教育归结为“美的理解”。

2. 我这里不想搬洋人的话吓人，主要是我非常同意他的观点。中国教育家蔡元培先生也强调教育乃“培养人格之事业也”。长期担任清华大学校长的梅贻琦也认为教育的根本任务是四书中《大学》的开头四句话：“大学之道，在明明德，在新民，在止于至善。”关键是“止于至善”。解放后我们折腾了多少年，其实我们的老祖宗早就告诉我们教育的目标了。事实上，现在就有着一批踏踏实实的校长们在努力地做着，他们是先行者。举个例子吧。

5 年前，时任北大常务副校长的王义道，曾大声疾呼“人文精神教育”，他在一篇论文中说，“中外科学大师除了掌握本门学科外，一般都有较高的文化修养”，“经济学家要像厉以宁教授那样，工程技术专家要像杨叔子院士那样”。

杨叔子院士，原华中理工大学校长，机械工程专家。从事先进制造技术，设备诊断、信号处理、无损检测新技术、人工智能与神经网络。是一位成就卓著的机械工程学家，一个有着深厚文学修养的诗人。

在华中地区高校的学生心目中，杨叔子无疑是一个灵魂人物。“他不仅仅是一个科学家，更是一个有深厚人文精神的教育家。”在很多人的印象里，清瘦的杨叔子“表达时诗歌辞赋、哲学词库，信手拈来，让人暗暗称奇”。从 5 岁起，他在父亲的指导下学习古诗词，延续至今。在一次面对学生的演讲中，杨叔子谈到了《老子》：“1999 年 2 月，我看到报纸上登了一份世界最权威的联合国教科文组织 1998 年世界科学报告摘要。上面讲，大爆炸之前世界上什么都没有，连空间和时间都没有，我看得掉眼泪！为什么？2 500 年前的老子，他所得的结论和 2 500 年后联合国教科文组织



的世界科学报告一模一样！”

杨叔子在担任校长的4年里，力主“人文素质教育”，“华工”掀起了“人文风暴”。杨叔子说：“科学人文，和而不同。”他认为科学和人文共生互动、相同互通、相异互补、和而创新。直到今天，华中科技大学在教学上还深刻地烙着“杨叔子时代的痕迹”——所有学生（包括理工科），每年考一次中国语文，不及格的不发毕业证；在校生每年必须拿两个人文学科学分，否则不能毕业。于是在武汉，理工科的学界出现了新的一幕：华中科技大学的学生在和外校学生交流时，说自己平时还学《老子》、《论语》，让其他学校的学生颇感讶异。后来“华工”的做法被许多学校仿效。

我已经邀请杨叔子院士今年10月来我校做报告。他欣然答应前来。我在电话里问他：人文教育的作用是什么？他说：四个方面：方向，动力，创造力，应用社会。

3. 高等教育的责任。我们要培养现代人，现代人的形象是怎样的？

（1）情感重于智力，做人先于做事，人文高于科技。人文是培育一个人的精神世界，科学是侧重物质世界的。

（2）科学精神与人文精神交融——形成正确的人生追求，即联合国要求的“有社会责任感的人才”。

（3）科学知识与人文学知识交融——形成完整的知识基础，即有活跃的创新精神、有灵气，又有理性分析能力的人。

（4）科学思维（抽象思维）与人文思维（形象思维）交融——形成优秀

正确的逻辑思维和直觉思维方法。

总之,高等教育(“教育的龙头”——江泽民)承担的通识教育,是大文理教育,培养出的人具有高尚情操,道德修养,审美能力和人文精神。

我校哲学系张汝伦教授在上海“世纪人文论坛”上作的讲演指出:人文教育是通过对人类千百年积累下来的精神成果的吸纳和认同,使学生有独立人格意志,有丰富的想像力和创造性,有健康的判断能力和价值取向,有高尚的情趣和情操,有良好的修养和同情性,对个人、家庭、国家、天下有责任心,对人类命运有担当。

大力提倡人文教育的潘光旦教授指出:如果学校培养的只是有一技之长而无人文情怀又自以为是专家,那只是一个“畸形的、零碎的、不健全的人”,这样的人越多,合作就越困难,冲突也越多,国家的和谐康泰越不可问。

现代社会的功利价值取向使得人们重视看得见的东西,而对无形的倒是更重要的东西却处于庄子曰的“莫知无用之用也”。人们关心的是找个好专业有个好工作。毕竟修养不如金钱来得实在。这就告诉我们,社会本身还需要提高素质和修养,因此,高等学校的大文理教育,将任重而道远。

从高等教育再看基础教育,那更应该强调素质教育,摒弃应试教育,反对文理分班。小学里压缩自然科学教育,加强人文教育,做人教育(不是意识形态教育)。