



论创新型工科的力学课程体系

郑泉水¹⁾

(清华学堂人才培养计划钱学森班, 清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 如何培养技术创新拔尖人才, 既是钱学森之问, 更是时代之问——21世纪后, 创新被国家置于发展全局的核心位置. 力学的技术科学或工程科学属性, 内在地决定了它能够、并且应该在回答钱老之问时, 起到基础性的作用. 按照这个信念, 清华大学于2009年设立了定位于工科基础, 同属清华学堂人才培养计划暨国家基础学科拔尖学生培养试验计划的钱学森班(简称钱学森班). 作为负责钱学森班的首席教授, 我在本文里首先论证三个基本观点: (1) 力学同时拥有定量化“基因”(简称量化基因)和技术创新“基因”(简称创新基因); (2) 前者在以往发展得很好, 后者却相对发育不良; (3) 这种发展不平衡有可能正是近30年来力学遭遇较大困境的内在根源, 并且影响到工科创新. 接着, 在简要介绍钱学森班的培养方案和实践案例的基础上, 力图表明: 以“通过研究学习”为牵引, 可以构建一个大幅删减总课时要求却同时加强基础科学地位的课程体系, 激发起学生的强烈学术志趣、有效实现对技术创新基因的强化. 实践说明, 这个培养模式受到了学生们的热烈欢迎和诸多学科导师们的认可. 最后, 对力学面向未来技术创新的关键发展方向, 进行了讨论.

关键词 创新型人才培养, 工科基础, 力学的基因, 通过研究学习, 课程体系

中图分类号: O3 文献标识码: A

doi: 10.6052/1000-0879-18-105

刚进入21世纪, 中国就发生了一场似乎与力学为工科基础相矛盾的运动: 一方面, 中国在迅速成为“世界工厂”后, 对技术创新提出了迫切需求; 另一方面, 全国曾有过的数目近百的力学系, “一夜之间”(十年)就结构性地近乎消失殆尽了, 即从实体运行的力学系, 退化为与某个/些工科系合并后的实体学院下的虚体系, 如清华大学和西安交通大学的工程力学系, 都成为了各自新设立的航天航空学院下的虚体系. 短期看, 这固然突出了特定工科, 有利于

行业研究项目的获取和部分学生的职业去向, 且好像有利于更好的本科生源. 但长期看, 却削弱了力学作为工程科学或技术科学的独特存在, 也不利于一个学校整体的工科发展. 类似的单独实体力学系全面消失的现象, 十几年前就在美国发生过, 但人家可是伴随着“去工业化”和以信息技术为代表的“高科技”运动而发生的.

那么, 究竟是什么引发了上述运动呢? 根本的原因是产业需求的变迁. 以计算机、网络为代表的信息技术, 在短短的半个世纪里, 带给了全球社会经济等方方面面的翻天覆地变化. 在产业界, 微软、苹果、谷歌、脸谱、亚马逊等一大批信息类公司挤入了全球市值最高之列; 类似的现象在中国也可以列举阿里巴巴、腾讯等公司. 映射到大学, 则是产生了基于信息科学的新工科——信息科学与工程; 与此相对照, 其他工科则都是基于物质科学. 具体到清华大学, 恰恰是庞大的信息科学技术学院没有将力学列为工科基础课, 其他工科学院则都列了, 见图1.

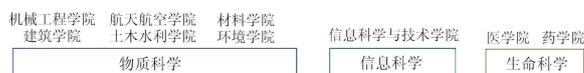


图1 清华大学工科学院的核心科学基础. 虽然医学院(包括生物医学工程等)和药学院也包括越来越多的工程技术内容, 但其学科门类区别于工科. 需要特别指出的是, 虽然信息科学技术和生物医学科学技术等的本科由于总学时的限制, 暂时很少将应用力学列为必修课, 但力学在其中已经有着十分重要和越来越广泛的应用.

需求变化带来的冲击, 不仅仅只针对力学, 也发生在一些传统的工科, 如我国的机械系也曾面临过很大的招生压力.

撰写本文的一个更大背景是“钱学森之问”所

本文于2018-03-19收到.

1) E-mail: zhengqs@tsinghua.edu.cn

引用格式: 郑泉水. 论创新型工科的力学课程体系. 力学与实践, 2018, 40(2): 194-202

Zheng Quanshui. Curriculum structure for innovative engineering education. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(2): 194-202

揭示的国家之痛:“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’不出杰出人才.这是很大的问题.”钱老心中对这个问题肯定是有答案的,因为钱老在退休后的几十年间最为关心、思考最多、研究最多的问题,就是如何理解并破解这道难题.钱老说^[1]:“我是在上个世纪 30 年代去美国的,开始在麻省理工学院学习.麻省理工学院在当时也算是鼎鼎大名了,但我觉得没什么,一年就把硕士学位拿下了,成绩还拔尖.其实这一年并没学到什么创新的东西,很一般化.后来我转到加州理工学院,一下子就感觉到它和麻省理工学院很不一样,创新的学风弥漫在整个校园,可以说,整个学校的一个精神就是创新.”去年,钱老独子、钱学森班顾问钱永刚教授还专为钱学森班用一段话概括了钱老的教育思想(见附件一):“(钱老的)教育思想由两个部分组成,前者是技术科学教育的思想;后者是大成智慧教育的思想,即广义的通识教育思想.他认为,21 世纪的中国公民应该受到全方位的教育.大成智慧教育的核心就是通过对整个现代科学技术体系结构的学习和理解,打破各学科的界限,集理、工、文、艺于一身,贯通古今,培养出能掌握马克思主义哲学,一方面有文化艺术修养,一方面有科学技术知识,既有‘性智’又有‘量智’的新型人才.”

今天,创新已经被摆在国家发展全局的核心位置^[2],对构建创新型工科提出了急迫要求.在力学界,许多著名学者也纷纷加入了对如何培养创新型人才的探讨.如余寿文先生^[3]深入讨论了中国科技人才培养的道路和实现途径是什么?提出工程教育的发展与变化,要求培养多样性的卓越工程人才.杨卫先生^[4]提出在创新 4“阶梯”(管理型创新、开发式创新、技术型创新和源头式创新)中,想要建立现代化经济体系,必须依赖源头式创新;核心是人才.谢和平先生^[5]提出以创新创业教育为引导和突破口,来全面深化教育教学;突出三方面:良好的人文素养,独立思考能力、创新创业能力、协作精神和社会担当能力,多学科的知识面.胡海岩先生^[6]分别从行业需求、培养研究工程师的目标、技术科学的统一性和实践与创新的统一四个角度,对力学教育作

了深度思考.

本文的结构如下:第 1 节阐述了关于力学核心特质的思考;第 2 节分析了工科的力学课程体系、影响它形成和发展的历史、当今和未来的主要因素;第 3 节介绍在创新型工科背景下的清华钱学森班的理念、课程体系、实践案例,以及对如何构建面向未来技术创新课程体系的思考;第 4 节对未来技术发展大趋势作一个大胆预测,并提出了若干开放性的问题.

1 力学的“基因”

面对力学的困境,面对“钱学森之问”和构建创新型工科的挑战,要寻找到解决方案,一条正确的途径应该首先回归到力学的本源,并遵循它的内在“基因”.

那么,力学的本质特征和“基因”是什么呢?

于 1687 年出版的牛顿《自然哲学的数学原理》,标志着力学成为了第一个精确化的科学.从此,研究物质的运动、与受力等的关系、以及量化,成为了力学的基本特征^[7-8].在随后的两个多世纪里,力学和它所代表的科学方法论及数学化手段,主导了科学的发展,相继产生了拉格朗日-哈密顿力学、电动力学、热力学、相对论、量子力学等,成为了今日整个物质科学的基础.20 世纪后,力学沿着物质科学的方向发展,构成了近代物理体系.

牛顿既是近代科学的奠基人,又是微积分的发明者.力学的量化特征,使得力学长期以来与数学密不可分、相辅相成.这个现象一直延续到 20 世纪中叶.如柯西,既是 19 世纪最伟大的数学家,也是应用力学的奠基人之一;又如成立于 1952 年的北京大学数学力学系和成立于 1958 年的清华大学工程力学数学系,直到“文革”前后力学和数学才分家.沿着量化方向,力学促进了许多数学分支的形成和发展.

18 世纪工业革命的兴起,对工程和技术从定性走向定量产生了决定性的推动.以纳维、柯西、泊松、斯托克斯等人在 19 世纪上半叶建立起弹性力学和流体力学基本方程为代表,力学逐渐成为了工科的基础.此后,力学沿着工科基础的方向发展,构成了当今应用力学体系*.

*也许对工科以外的人士需要澄清一下的是:中学和大学物理中的力学,主要指牛顿力学;而大学物理学中的电动力学、热力学、相对论、量子力学等,是与力学并列来看待的.而全球的几乎所有力学系以及工科中的力学,则主要指刚体的力学(包括拉格朗日-哈密顿力学)和变形体力学,统称应用力学.

上述溯源表明,力学作为工科基础,同时兼备了科学、数学和工科三重属性.力学因拥有这个特征,从而天然地扮演着工科基础(或技术科学、工程科学)的独特角色.数学属性带给了力学量化“基因”,而科学属性赋予了力学技术创新“基因”.在过去的—个世纪里,量化基因的代表性发展是创立了有限元法,而技术创新基因的代表作是航空航天技术和工业的诞生.

2 工科的力学课程体系

以清华大学工科为例(见附件二),除了信息科学技术学院之外的其他6个工科类学院,即土木水利学院、建筑学院、机械工程学院、航天航空学院、环境学院、材料学院等,都将理论力学、材料力学和流体力学,或前两者合并为工程力学列为必修课程.全国高校工科在安排力学必修课方面的情况大同小异.

是什么要素促使工科选择了上述力学课程呢?这些要素在今天有了哪些不同、未来几十年还可能发生哪些根本性的变化呢?

2.1 历史的要素

在20世纪50年代电子计算机和60年代以有限元法为代表的基于电子计算机的计算力学出现之前,弹性力学、流体力学等只有很少的问题可以求解.普朗特、冯·卡门等,创立了边界层理论、奇异摄动理论等^[7-8],使得一大类工程中的流体力学问题得到了求解,解决了当时航天、航空中最关键的一些问题.由此,冯·卡门成为了公认的20世纪最伟大的航天工程家和美国国家最高科学技术奖的第一位得主(1962);冯·卡门的学生钱学森成为了美国航天的先驱之一和中国“航天之父”.面对工程师们的大量需求,铁木辛柯自20世纪30年代开始撰写了《材料力学》《结构力学》《弹性力学》《弹性稳定性理论》《工程中的振动问题》和《板壳理论》等20多部教材.这些教材影响巨大,被翻译为世界各国的多种文字出版,形成了工科力学课程体系的主流骨架,延续至今.

顾名思义,材料力学该是研究(固体)材料的力学;但实际上,它基本上局限于梁-杆-轴这类“—维”固体物质.优点是:(1)土木、桥梁、机械等工程中这种材料体系极多、甚至是主体;(2)用微积分就基本上可以求得解析解;(3)这些解析解对于完成“—维”固体材料体系的设计,非常实用.且不仅可

以用于宏观体系,甚至小至10纳米都适用.如原子力显微镜可以测出亚纳米(10^{-10}m)的空间分辨率和皮牛(10^{-12}N)的受力,其核心原理之一是梁的变形.又如广泛应用于物联网、自动驾驶等各种类型的传感器、微机电系统等,多数是采用梁的共振作为核心原理之一.材料力学的上述优点,使得它至今依然充满生命力、被多数工科选为基础课程之一.

受限于材料力学的“—维”体限制,欲研究机械、航空航天、船舶、土木、化工等工程中常常遇到的板、壳等“二维”体、甚至三维体,以及“—维”体的端部或集中受力部位,就需要用到弹性力学.这时,微积分、甚至常微分方程理论都不够了,需要用到数学物理方法、偏微分方程理论、渐近求解的方法(摄动理论、变分法等)、甚至泛函分析理论等.总之,需要投入比微积分多得多的学时.即使这样,能够求解的弹性力学问题,不仅极其有限、也越来越少.这样高的“投入/产出”比,对于大多数工科学生和工程师来讲,是难以接受的;只有那些坚持研究工程难题的人,需要也愿意投入.

理解了上述历史原因,也就不难理解如下几个现象:(1)工科最多安排弹性力学简明教程,主要目的是开阔学生眼界;(2)力学专家常常成了应用数学家;(3)有相当比例的工科顶尖学者其实又是深刻理解和掌握力学的专家.

除了量化基因外,应用力学作为工科基础,本应该还具有的技术创新基因,现实中则比较罕见,更像是异类.但也有极个别的应用力学家华丽转身为新工科“之父”,杰出代表为航天领域的冯·卡门和钱学森、生物医学工程领域的冯元桢等.此外,钱学森还开创了物理力学和工程控制论等.一个不仅有趣,也更值得思考并重视的现象是,这几位都曾长期任教于加州理工,而加州理工的特色是物理与创新.这应该不是偶然现象吧?这个观察激发了我在清华钱学森班创办伊始,就积极思考并不断实践如何去加强力学的技术创新基因,并建立起了与加州理工密切的联系.

2.2 今天的因素和力学的困境

对现代应用力学影响最大的变化的是20世纪50年代电子计算机的出现及随后的高速发展,以及60年代以来以有限元法为代表的各种计算力学方法的涌现.一方面,以应用力学家为主发明了有限元法、创建了计算流体力学等,使得不仅仅弹性力学,

还有更为复杂的塑性力学、黏性流体动力学等各种非线性、复杂边界问题可迎刃而解; 另一方面, 正是这些方法的出现使得曾以量化见长的力学界渐渐陷入了一种尴尬境界——因为越来越多、用户更友好、功能更强大的软件使得非力学专家可以越来越便利地应用这些方法, 传统意义上的力学人的必要性显得不是很充分. 这也直接导致了前面提到的中国和美国大学力学系的全面撤并运动.

然而, 应用力学作为一个学科的独特本质或基因, 决定了它存在和发展的内在理由是工科基础, 而不是与某个甚至若干工程学科的合而为一. 结合只是它的扩展、不是它的本质. 考虑到国内学科划分得太细, 力学划归到任何一个工科, 都将伤及同一所大学的多数其他工科. 因此, 整体而言, 简单的合并只能是权宜之计, 而不是根本性的解决方案. 这种权宜性的结合, 必然因为不同学科本质内涵的不同、使命的不同, 导致价值观的不同和评价体系的不同, 并最终导致力学人要么融入于其他学科而发展、要么被逐渐边缘化. 对个人而言, 这既可能是机遇, 也可能是无奈; 但对整个科学技术来讲, 这既不是必然, 也不都是好事. 这是一个不仅仅在中国, 在全球都没有解决好的难题.

2.3 未来几十年的趋势

每门具体的工科, 常常对应的是一个工业或技术行业的存在. 这个内涵一方面决定了具体工科的现时实用性, 另一方面也决定了它的相对短暂性.

与此对照, 没有单一行业背景的应用力学, 其核心使命, 即研究物质的运动、与受力的关系和量化这些“永恒”存在的主题, 则必然在可见的未来继续扮演工科基础类角色, 尤其是物质科学基础上的新工科的诞生(创新)和走向成熟(量化)之前, 扮演重要的、甚至是关键的角色. 从上述意义上讲, 相对于具体的工科研究者, 力学人既是不幸的(难以在成熟行业扮演主要角色)、也是幸运儿(具有相对长远的生命力).

进入 21 世纪, 人类知识的指数增长态势越发明显, 信息革命、生物技术、纳米技术带来的影响无处不在, 特别是互联网、大数据、人工智能、机器人等对社会、经济、教育、技术和研究的发展, 带来了前所未有的机遇和挑战^[9-10]. 那么, 力学该何去何

从呢? 能否通过强化作为工科基础的角色, 以期长盛不衰? 还是迅速消弥或被同化在不同具体工科之中? 工科的力学以及作为工科基础的力学课程体系应该如何重构, 以适应中国和全球对技术创新和创新型人才培养越来越迫切的需求?

3 面向创新型工科的一个实验田——清华大学钱学森班

带着上述问题, 2009 年迎来了清华大学钱学森班(后面简称为钱学森班)的诞生.

3.1 钱学森班的使命和定位

钱学森班的定位是工科基础, 使命是: 发掘和培养有志于通过技术改变世界的创新型人才, 探索回答“钱学森之问”. 负责该实验班建设的项目组来自于清华大学航天航空学院、微纳米力学和多学科交叉研究中心等十多个院系和研究机构的几十位老师和工作人员组成, 由首席教授负责, 秉承钱老技术科学、大成智慧的教育思想(见附件一), 致力于构建一个开放性的环境, 帮助学生在跨学科范围中学习技术创新和领导力, 完成使命.

从实践的角度看, 对已有 5 届毕业生的统计和调研数据表明, 钱学森班的工科基础定位的可行性得到了广泛认可. 如图 2 所示, 毕业生读研方向大体上是力学占 1/3、其他学科(航天航空、机械工程、土木水利、材料科学与工程、信息技术、生物医学工程、数学、管理等)占 2/3; 又如最近毕业的 2013 级 28 名学生中, 就有 4 名同学获得了 MIT 三个系(机械、材料、信息)、共 5 份博士生奖学金名额.

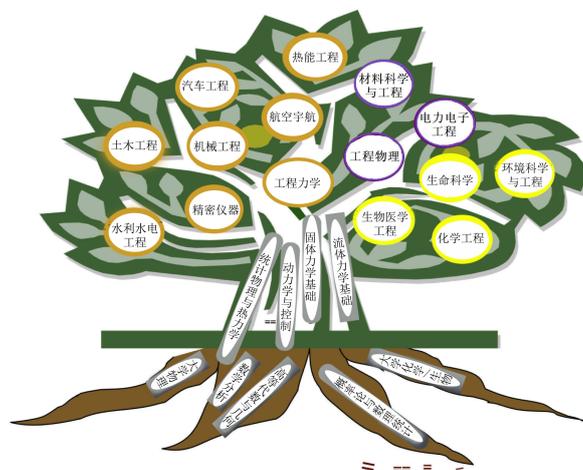


图 2 清华大学钱学森班的工科基础定位和学生去向示意图*

* 此图引自 2014 年 12 月 10 日郑泉水在纪念钱学森诞辰 130 周年学术研讨会上的特邀报告《钱学森力学班: 开放性创新人才培养模式的探索与实践》.

3.2 钱学森班的课程体系和学生的 T 型知识结构

钱学森班培养方案(2016年版)^[11-12]总学分要求是148,分三个层构:荣誉挑战性课组(70学分)、基本结构性课组(>50学分)和全校普遍性课组(如思政、体育、英语等,共28学分);其中挑战性课组含18门课,分为6类:数学、自然科学、工科基础、专业与研究、人文、综合与贯通.这18门课都是高强度的知识学习或研究实践类课程,安排在前三年的6个学期,每学期3门,见图3.这个培养方案被清华大学选为本科荣誉学位唯一的试点方案,从钱学森班2016级开始试运行.



图3 钱学森班培养方案(2016版)的层构^[11]

例如,要求每位学生从《动力学与控制基础》(5学分)、《固体力学基础》(5学分)、《流体力学》(4学分)和《热力学与统计物理》(5学分)等4门课中选择3门,作为工科基础类挑战课.数学类的3门分别是《数学分析》I或II、《高等代数与几何》、《概率论与统计》.自然科学类的3门,则在《大学物理》II、量子力学、化学、细胞生物学等多门课程中选择^[12].

钱学森班的核心培养理念是以学生为中心^[13],鼓励学生按照自己的兴趣和擅长,选择自己的发展方向,包括是加强量化基因或创新基因等.如选择后者,则鼓励深入学习量子力学、固体物理、细胞生物学等;如选择前者,则建议选修更深的数学、计算数学、计算力学等.实验方面,除了必要的培训课程,主要通过研究实践按需自主发展.强烈建议学生不要花太多的时间仅仅为了学分而草草了解已有知识,而是鼓励对知识的深刻把握和融会贯通,弘扬对创造新知识的热情、能力和自信,强调找到自己的发展方向,自主学习.后者主要体现在结构性课程的选择性方面,学生根据自己倾心的发展方向,在相应专业导师的指导下选修结构性课程(见后面一个更具体的案例).

目前国内的力学专业和绝大部分工科专业,不学或仅学很少的化学和生物,物理课程也比较弱.与此对照,钱学森班不仅大大加强了对这些基础科学部分学时的投入,而且大大加强了对学习强度的要求.目的是加固源头创新的根基和提升能力.

与清华大学绝大多数工科的总学分要求170以上相对照,钱学森班不仅大幅度地减少了总课时,同时还加强了对基础课程的强度要求,这是如何做到的呢?背后的理由是什么呢?特别是,钱学森班还要面对这么多且不确定的专业发展方向,学时好像更加不够了,学生们是如何完成知识和能力体系的构建呢?

简要的回答是:钱学森班采用的不是对所有课程作类同要求、对所有学生一刀切的“模具产品”方案,而是因人而异、对不同课程不同要求的“艺术品”方案,鼓励学生自主构建“T”型知识结构和能力体系.这里T型的横向指的是广义的通识教育(也即钱学森所称的大成智慧教育,见附件一):学习和理解整个现代科学技术体系结构、打破各学科的界限,集理、工、文、艺于一身,贯通古今等.特别是关注刚刚开始由于技术突破带来的新方法和技术手段、新思维等.竖向是指在研究的引导下,沿着自己选择和热爱的方向,充分发展,达到相当的深度.

3.3 钱学森班核心力学课程的选择和改革

钱学森班选择或构建的《动力学与控制基础》《固体力学基础》《流体力学》和《热力学与统计物理》,总体上也是清华主要的工科院系(见附件二)所必修的,但钱学森班的这4门课,该深的更深了,可删除的尽量去除了.

为什么选择了这4门课呢?牛顿力学和拉格朗日-哈密顿力学研究的是质点、刚体、或质点/刚体体系的受力与运动的规律,其形态特点是不变形.弹性力学,或更加广泛的固体力学,其形态特点的本质是小变形,源于固体原子/分子之间的相互作用由化学键主导.流体力学研究对象(气体或液体)的原子/分子之间的相互作用由范德华力主导,本质的形态特点是大变形.把学生对大学物理学的认识推进到工程技术中必须面对的复杂材料体系(如混凝土、泥石流)或复杂行为(如湍流、龙卷风),尤其需要构建起变形的概念和严格的数学描述,以及可以“严格地”研究这些复杂现象的连续介质力学体系(如纳维-斯托克斯方程).

抛开门户之见,必须指出的是,虽然以往应用

力学量化基因发展得很好,但却付出了过多的学时代价、效率低。主要原因是课程体系的改革没有跟上,如材料力学、弹性力学等,基本上还是几十年前的体系,学生需要花费太多的时间去学习今天相对价值不大、没有多少用途、今后越来越没有用途的知识,以及训练解题技巧。其原因是由于计算力学的发展,可以相对轻易地获得更好的知识和解决方案。现有的力学课程体系,与 50 年前相比,增加了后者;但对前者虽作了一些清理(减少了课时)、但清理得很不干净。根据上述思路,我们将钱学森班培养模式第 1 版要求的材料力学(4 学分)和弹性力学(4 学分)合并,构建了 5 学分的《固体力学基础课程》,重点发展核心知识、关键概念和科学技术方法论。

类似,理论力学有相当部分内容是静力学理论,与大学物理的力学相比,并没有增加多少新的概念;且用了过大篇幅去介绍如何求解、求解技巧等。再考虑动力学与控制在现代工科中的基础性和重要性,钱学森班把培养模式第 1 版中的理论力学(4 学分)和振动理论(2 学分)合并,并增加控制理论的概念,新构建了《动力学与控制基础》5 学分的课程。

从 2015 年开始,上述两门新课均已经运行了 3 年。初步看来效果还不错。有关更详细的情况,将由《动力学与控制基础》主课老师李俊峰教授和《固体力学基础》主课老师冯西桥教授和陈常青教授另文介绍。

根据我的了解,目前非力学专业的工科只上材料力学,而很少安排弹性力学的主要原因,并非没有需要,而是学时成本太高,不仅这两门课就需要或多于 8 学时,对数学课程的要求也相应增高(如需要增开《数学物理方法》等)。而《固体力学基础》外加完全可以自学的一些通用的计算力学软件(如 ABAQUS),完全可以成为大部分工科的新的基础课。如果这样,则工科的创新研究基础和都可望得到明显提高。

有人担心这样一来,力学教师的课时就不够了?但实际的情况是,如果普遍采用小班(不超过 20 学生,最多不超过 30 学生)制,以加强创新型培养必须的深度学习、讨论、批判性思维、研讨等,那么力学教师的数量不是多了,而是可能不够。这个目标是现实可行的,如四川大学就成功实现了全校性都只安排小班课的做法。我们现在的主要问题之一,不仅强塞给学生的东西太多,其中还有大量内

容本应与时俱进被删除,但因为习惯或教师的原因被保留。这也是造成效率低、学生学习意愿不高的原因之一。

3.4 研究性学习和专业课选择

在钱学森班培养模式里,按照力学、航天航空、机械、精密仪器、能源、汽车、土木等等加盟了钱学森班培养体系的十多个院系,列举了相关专业导师推荐的几门最为专业的专业课^[12]。钱学森班的学生经过前两年的通识教育、初识研究和 SRT(student research training),一般能确定自己大的发展方向,且在提出自己的 ORIC(open research for innovation challenge, 开放自主创新研究)立项建议时,还需要找到自己的导师。这一位或几位导师,就可以帮助学生选择核心专业课。对于主动性强的学生来讲,甚至不需要导师的指导,自己完全可以自主选定有关课程。

以刚毕业的钱学森班 2013 级的学生胡脊梁同学为例,他自己总结的四年以“通过研究学习”为牵引的学习全过程概要如下:

(1) 大一:广泛了解了固体力学、纳米技术和生物工程等众多领域。(途径:上课,实验室参观,参加组会,和老师交流)。

(2) 大二:确定生物物理方向之后投入大量时间科研(2000 小时),同时自主学习了大量生物学和生物实验技术的知识。

(3) 大三:自主提出原创性课题,并联系多个实验室(清华力学系生物力学所、清华微纳力学与多学科交叉中心、清华生命科学院,北大生命科学院,麻省理工)研究讨论,主导和参与完成多个课题,发表多篇论文。

(4) 大四:科研同时深入学习复杂系统科学、发育和进化化学。与不同领域的研究者交流并帮助低年级学生解决研究中的问题,将自己的体会与他们分享(推动钱学森班毕业设计免修和学术沙龙,为低年级同学推荐合适他们的国外课题组)等。

作为胡脊梁同学在清华的主要导师,我对他上述自学的课程宽度和深度都有极深的好印象;在研究方面,他发表了 5 篇论文,其中一篇是作为第一作者,发表在顶尖的科学期刊 PNAS 上。

3.5 档案:钱学森班培养模式第 1 版到第 2 版的演化

清华钱学森班培养模式的发展,至今可分为两

个阶段,第一阶段为2009—2015年,对应的是培养模式第1版。虽然每年都作了修改,但总体框架没有大的变动。第1版突出了3个重点:

(1) 追求师生双赢:清华钱学森班创办8年以来一直坚持的核心理念^[13]包括两个方面:①千方百计地帮助每位学生找到各自独特的、真正热爱的、擅长的发展方向,并鼓励他/她全力以赴去追求;②逐年扩大的志同道合的导师队伍,不是传统上的简单地要求导师作奉献,而是寻求师生双赢为目标。

要达成上述两个目标的每一个都十分具有挑战性。比如,为达成第一个目标,采用了多种方法,如小班上课、导师制、在不同院系之间的流动机制、实验室探究、开设现代力学与工程概论(大一)和现代力学与工程前沿(大三)、特邀讲座、出国研修等。与此同时,不仅允许还鼓励学生按照自己的追求去挑战培养方案。虽然每个方法都发挥了一定作用,但总的效果还是不尽人意。

(2) 重视基础、深度学习:尤其在定量化(数学分析、高等代数与几何、概率论与统计、数学物理方法、计算方法等)、基础科学(物理、化学、生物)和精选的若干门工科基础课程(理论力学、材料力学、弹性力学、流体力学、热力学与统计物理)等方面不仅投入了比清华其他工科更多的学时,同时显著增加了挑战度。比如,这些课程的授课老师都是专门聘请的;要求学生课内/课外投入时间比在1比3左右;大量的讨论;推进研究性学习等。

(3) 鼓励创新思维和研究:从2012年首届(2009届)的大四学生开始,安排每位学生进行为期3到6个月的海外研修。从2012年开始,将学校的任选SRT列为大一至大二期间3学分的必修环节。从2014年开始,创设了ORIC课程,为长达1年(覆盖整个第三学年)、8学分、必修。这些创新型的实践取得了显著成效,逐渐成为清华钱学森班的一大特色,并为构建培养模式第2版奠定了基础。

清华钱学森班每年秋冬举办一次为期1到2天、集中针对一个专题的研讨会。至今共举办了9次研讨会,专题分别为:培养理念(2009)、首届国际顾问委员会会议暨课程体系第1版(2010)、教学方式(2012初)、评价体系(2012)、首次国际评估(2013)、研究实践体系(2014)、荣誉学位暨课程体系第2版(2015)、招生改革(2016)和第二届国际顾问委员会会议(2017)。

但在培养模式第1版的改进中存在几个曾一直没能解决好的难题:学分太多(176~178,与工科的学分要求类似),且不少学生过于重视学分成绩和学绩分,导致的后果之一是,“硬”(科学技术课程)的方面实施得较好,但“软”(价值观、交流、领导力等)的方面提升不足;有相当部分学生的动力不足或不够坚持、目的不明或不正确,延续了高中的学习方法等等。

以2013年初的在京顾问会议和9月国际评估为起点,钱学森班项目组开展了为期近三年的培养模式第2版的构建工作,并在2015年底被选作清华大学本科荣誉学位唯一的培养方案试点^[11]。

这个方案可简称为CRC(course-research-community)体系*,在保持前述3个重点之外,增加了如下三方面的特色:

(1) 循序渐进的研究台阶:创建了系统性台阶式的研究实践体系,核心思想为:“通过研究学习”(learning through research)是最有效的精深学习方法,且帮助每位同学找到自己热情所在的发展方向,据此自主选课和深度学习,找到人生和学业导师,抓住重大机遇等。这个台阶包括:初识研究(大一)、研究学徒(SRT,大一、大二)、自主研究(ORIC,大三)和实习研究员(senior undergraduate research fellow, SURF,大四)。与传统培养模式以课程和知识的学习为中心不同,要求创新和能力提升的研究在CRC体系中处于核心或领航者地位。

(2) 结构清晰的课程体系:培养模式第2版将全部课程清晰地划分成3个课组(挑战性、结构性、普遍性);总课时要求,从第1版的178学时大幅减少为148学时(见图2)。

(3) 朋辈学习和创新生态:开放性和多样性对于创新十分重要。清华钱学森班通过清华的荣誉学位计划、星火计划、思源计划、新雅书院等,构建了与全清华理-工-文多渠道的沟通平台;钱学森班跨年级、跨院系的学生们搭建多种形式的项目组、俱乐部等,有效地实施朋辈学习,提升交流能力和领导力。同时,邀请到了越来越多的、来自各行各业取得了突出成就的人士作为志愿者担任清华钱学森班社会导师,共同打造了一个致力于培养未来创新领袖的生态和文化。

对数学、计算方法和建模的强大把握,是形成量化基因的关键;对物理、化学、生物、力学等基础

* 引自2017年4月11日郑泉水主讲的清华大学学术之道讲座《通过研究学习》。

科学和工科基础,以及关键技术痛点问题的深刻理解,是创新基因的源泉;敢于探索和研究未知,不怕失败,坚持不懈,是实现技术创新的灵魂。

最后,我们想特别说明一下,在钱学森班的实践过程中,我们越来越感到回答钱学森之间的最大挑战,还不在于如何改进培养模式,而是如果突破现有高考体系,招进真正有巨大创新潜力的学生^[4]。

4 若干进一步的观点和讨论

目前国内高校工科的力学课程体系,并没有与半个世纪前(电脑和基于电脑的各类计算方法出现前)的体系有本质或核心内涵意义上的改革。力学工作者经历了短暂的(1960—1970年代)发明强有力的、且越来越方便使用的量化方法(如以有限元法为代表的各种计算力学方法等)的亢奋后,渐渐陷入了一种漫长的“教会了徒弟后,却被徒弟抛弃”的尴尬——大量力学系被撤并。但从科学历史的长河看,回顾应用力学的根本特征(研究运动与受力)和内在基因(量化、创新),我们可以清晰地看到上述困境的必然,并隐约看到如何走出困境的途径。应用力学的核心使命和强大生命力,主要在于(像冯·卡门、钱学森、冯元桢那样)不断地创造新工科;或在新工科待成熟阶段帮助其定量化,尽快走向成熟;或发挥自己的强大定量化优势,帮助解决复杂的、关键性的工程和技术难题。这是应用力学真正成为工科基础、长盛不衰的本源。

培养能引领未来技术创新、改变世界的杰出人才,是力学走出困境、再造辉煌的关键途径。因此,作为必须迈出的一步,应该尽快去构建一个适应 21 世纪的未来需要的应用力学课程体系。为此,力学要做的是轻装上阵、努力创新、开拓新疆土,而不是抱着历史的瓶瓶罐罐甚至故步自封。应该有着“力学人打到哪,那里就是力学”的气概,自信和开放,勇往直前,去拥抱科学技术和工业发展的巨大需求。力学对工科,不要再说“我有什么,你就买什么”;而是“你真正需要什么,我就努力满足你什么。”只要我们群策群力,用心培养未来的拔尖创新型人才,就一定能够不断壮大应用力学,使得力学永葆青春。

最后,我对未来技术发展大趋势作一个大胆的预测。与传统(硬)技术相比较,信息(软)技术有两个特别优势,一是技术发展的迭代周期短(以往主要依赖实验来迭代的硬技术的开发周期通常都要几年、甚至数十年;而主要依赖计算和大数据实现迭代的软技术的周期,一般短至几个月甚至几周),且开

发成本低很多。对于技术创新市场化来讲,这两个优势是巨大的。然而,市场还有另外一个基本法则无所不在:物以稀为贵。低成本和短周期,使得进入的门槛相对较低、竞争对手更多,导致产品一片“红海”,利润下降。例如,当远远超出市场需求的计算机专业毕业生涌向就业市场时,对多数人讲,理想的就业机会和较高的起薪就只能明日黄花了。

就 21 世纪最受关注的“三〇”(Information, Nano, Biologogy)技术而言,我的预测是:未来 10~20 年,信息技术将会越来越发达、越来越重要,但相对市场价值将降低,就像空气和水,谁都离不开,但并不很值钱。未来 30 年内以纳米技术为代表的硬(+软)技术,和未来 50 年内以生物技术为代表的硬(+软)技术,将取而代之成为全球发展的主导技术。

我深信,拥有创新基因的力学,一定将在未来技术发展进程中扮演十分关键的角色!

致谢 感谢每一位参与钱学森班项目的老师、同学和支持者,特别是核心组成员(按拼音顺序):白峰杉教授、陈常青教授、何枫教授、李俊峰教授、刘英依女士、徐芦平副教授、周华女士、朱克勤教授;感谢陈常青、李俊峰、胡海岩、余寿文、周青和张雄等教授对本文提出的宝贵修改意见。

参 考 文 献

- 涂元季,顾吉环,李明(整理).钱学森最后一次系统谈话:大学要有创新精神.人民网-人民日报,2009-11-05
- 中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议.2015-10-29
- 余寿文.大学的本质功能与中国科技人才的培养.高等工程教育研究,2017(1):26-31
- 杨卫.基础研究,要提升源动力.人民日报,2017-12-27
- 谢和平.以创新创业教育为引导全面深化教育教学改革.中国高教研究,2017(3):1-5
- 胡海岩.对力学教育的若干思考.力学与实践,2009,31(1):70-72
- Timoshenko SP. History of Strength of Materials. Columbus: McGraw-Hill Book, Inc, 1953
- 武际可.力学史杂谈.北京:高等教育出版社,2009
- Ray Kurzweil. 奇点临近.北京:机械工业出版社,2012
- Yuval Noah Harari. 未来简史.北京:中信出版社,2016
- 郑泉水,白峰杉,苏芃等.清华大学钱学森力学班本科荣誉学位项目的探索.中国大学教育,2016(8):50-54
- 清华大学.清华大学本科生培养方案.北京:清华大学出版社,2016
- 郑泉水.开放式的创新人才培养.水木清华,2012(10):22-25

14 郑泉水. “多维测评”招生: 破解钱学森之问的最大挑战. 中国教育月刊, 2018(5): 36-45

(责任编辑: 胡漫)

附件一:

钱学森的主要贡献及教育思想

钱永刚 (钱学森之子)

作为享誉海内外的杰出科学家, 钱学森在应用力学、航天工程、系统工程等领域做出了开拓性的巨大贡献. 他提出的开放复杂巨系统概念和“从定性到定量综合集成方法”的理论及其实现形式, 是他晚年最具亮点的学术创新.

他的教育思想由两个部分组成, 前者是技术科学教育的思想; 后者是大成智慧教育的思想, 即广义的通识教育思想. 他认为, 21 世纪的中国公民应该受到全方位的教育. 大成智慧教育的核心就是通过对整个现代科学技术体系结构的学习和理解, 打破各学科的界限, 集理、工、文、艺于一身, 贯通古今, 培养出能掌握马克思主义哲学, 一方面有文化艺术修养, 一方面有科学技术知识, 既有“性智”又有“量智”的新型人才.

(2017.7.24 钱永刚致清华钱学森班首席郑泉水, 已经钱永刚许可刊出)

附件二:

航天航空学院: 材料力学 4 (指 4 学分, 后同)、理论力学 4、流体力学 4、工程热力学 4、弹性力学 4、振动理论基础 2、黏性流体力学 3、振动测量 2、计算固体力学或计算流体力学、计算力学基础 4、力学实验技术 4

机械工程系: 理论力学 4、材料力学 4、流体力学 3 或 4、工程热力学 2;

精密仪器系: 理论力学 4、材料力学 4、工程热力学 2;
能源与动力工程系: 理论力学 4、材料力学 3、流体力学 4、工程热力学 4、基础力学实验 2

汽车工程系: 理论力学 4、材料力学 3、流体力学 3、工程热力学 4

工业工程系: 工程力学 4

土木工程系: 工程力学 (1、2) 4+4、结构力学 (1、2) 4+2、流体力学 4、水力学 2、土力学 (1) 3、弹性力学及有限元基础 2

水利水电工程系: 理论力学 4、材料力学 4、结构力学 (1、2) 4+2、水力学 (1、2) 3+3、土力学 (1、2) 3+2、计算流体力学 3、弹性力学及有限元基础 3

建筑管理系: 结构力学 (1) 4、工程力学 4、土力学与基础工程 3

材料学院: 工程力学 4、流体力学 4

环境学院: 工程力学 4、流体力学 (1、2) 3+2

从竞赛看基础力学教与学的质量提升

——全国基础力学青年教师讲课比赛和全国周培源大学生力学竞赛相关分析与思考

叶志明¹⁾ 黄兴

(高等学校力学基础课程教学指导委员会)

(上海大学, 上海 200444)

摘要 通过对全国基础力学青年教师讲课比赛、全国周培源大学生力学竞赛、参赛各学校情况以及各校基础力学课程的教学课时等方面数据进行相关性数据分析, 初步揭示了教师、学生与其教学情况之间的关联度等问题. 希望通过这些数据

分析对基础力学教学的未来、教学质量的监控及其改革等提供借鉴和参考.

关键词 讲课比赛, 力学竞赛, 学校类型, 教学课时, 教学点评

本文于 2017-07-20 收到.

1) E-mail: zmye@staff.shu.edu.cn

引用格式: 叶志明, 黄兴. 从竞赛看基础力学教与学的质量提升 —— 全国基础力学青年教师讲课比赛和全国周培源大学生力学竞赛相关分析与思考. 力学与实践, 2018, 40(2): 202-206

Ye Zhiming, Huang Xing. Quality improvement of learning and teaching in fundamentals courses of mechanics: role of competitions. *Mechanics in Engineering*, 2018, 40(2): 202-206