doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2021.04.003

欢迎按以下格式引用:阙仁波.钱学森技术科学思想对力学教学的启示[J].高等建筑教育,2021,30(4):16-23.

钱学森技术科学思想对力学教学的启示

阙仁波

(厦门大学嘉庚学院 土木工程学院,福建 漳州　363105)

摘要:对钱学森技术科学思想提出的历史背景作了尝试性的反演,以经验技术与科学技术之间的差异作为切入点来引入和介绍钱学森技术科学思想。以该思想为理念的人才培养模式对力学教学富有启迪性,文中结合具体案例作了深入的阐释。

关键词:钱学森;技术科学;人才培养模式;力学教学

中图分类号:G640;TU-4　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1005-2909(2021)04-0016-08

力学与数学、物理学、化学、天文学、地理学和生物学并列为七大基础学科,作为“最基本的自然科学(恩格斯语)”和“大工业的真正科学的基础(马克思语)”,曾为各学科提供了最具影响力的理论基础和研究范式,亦是工业革命的杠杆。特别地,1910—1960 年的 50 年间,由于助力突破了声障和热障等层层障碍而对航空航天技术作出了杰出的贡献,力学成为技术科学与工程技术相互作用的典范[1]。然而, 20 世纪 60 年代以后,“力学的黄金时代”亦随之而去,计算力学的成熟和计算软件的普及更加剧了该趋势。中美不少高校原来独立的力学系被拆并到其他理工院系[1-4],而力学课亦退化为理工科基础课的一部分。该现象,一方面显示了成熟学科因更具基础性而融入其他学科,另一方面,边缘化亦显示了对力学的重要性认识不足和重视不足。学时的压缩,加之力学课程的难度相对较大,不少学生畏而生厌,给力学教学带来一定的难度。

鉴于上述情形,通过解读钱学森多年前提出的技术科学思想[5-8],探讨力学的学科定位、研究方法和教学模式,并结合实际作一些思考,提出建议,以期达到抛砖引玉之效果①。

一、钱学森技术科学思想的历史溯源

科学哲学家汉森曾说:“观察渗透着理论。”为此,先将镜头拉远,试着从科技史的大背景反演钱学森提出技术科学思想的历史缘起,然后再聚焦该思想,以期从历史中得到更多的借鉴。

修回日期:2020-10-24

作者简介:阙仁波(1979—),男,厦门大学嘉庚学院土木工程学院副教授,主要从事力学教育与研究,(E-mail)2543088860@qq.com。

①注:在钱学森的文章中,“技术科学”亦为“工程科学”,英译皆为 engineering science

(一) 经验技术和科学技术

爱因斯坦于1953年说,西方的发展是以两个伟大的成就为基础的,即,希腊哲学家发明的形式逻辑体系(在欧几里得几何学中)和(在文艺复兴时期)通过系统实验找出因果关系的实验方法[9]。

在古希腊,学者传统和工匠传统是泾渭分明的。

学者研究是为了满足好奇心,而非发展生产力的手段。亚里士多德指出,希腊学术有两个重要特征:1)出自"惊讶",纯粹为"求知";2)以"闲暇"为条件[10]。罗素说,希腊人追求抽象逻辑世界之美和真理沉思至上的内在价值[11]。此时的科学和技术亦是泾渭分明的,科学只认识自然,技术只改造和利用自然,技术不以科学为基础。在古希腊时期,毕达哥拉斯学派建立了数学理性,亚里士多德开创了逻辑理性,阿基米德开创了实验理性,古希腊社会形成了自由研究的文化氛围[12],为近代科学的发生和发展奠定了文化基础。

相比古希腊人的科学理性,罗马帝国时期的罗马人则追求实用理性,他们在军事工程和城市建设等技术方面颇有成就,但在科学方面建树不多,他们的技术,亦只是经验技术,不以科学为基础[10]。

欧洲的文艺复兴是对古希腊民主和科学的复兴,在复兴中开创了近代科学。近代科学的基本特征之一是注重实验,达·芬奇曾说:"实验乃是确定性之母。"伽利略开创了实验和数学相结合的研究方法,牛顿力学更是形式逻辑体系和通过系统实验发现因果关系完美结合的典范[13]。他们都为近代科学奠定了基础。

经历了近代科学革命后,科学迅猛发展。第一次工业革命前后,数学、物理和化学等基础学科取得突破性进展,一方面延续探求自然奥秘的科学传统,另一方面亦关注工程技术的问题。该变化导致了工程技术从以经验为基础的经验技术逐渐转向以科学为基础的科学技术,科学从象牙塔走向工业界,"学"以致"用",并以其杠杆效应,放大了技术对生产力的推动作用。从此,科学,从原来的"求真"转向了"求力"和"求真"、合规律和合目的的统一[14]。工程技术的科学化,大约始于第一次工业革命时期(约1750—1850年),兴盛于第二次工业革命之后(19世纪下半叶至今)[15]。科学与技术的相互催化,使人类在过去约300年的科学技术突变中取得的成果,远远超过了在此前几千年的经验技术渐变中取得的成果。

然而,近代科学,却只是欧洲的独幕剧,并未在中国上演。在众多"李约瑟难题"的解答中,有一种解答颇有见地,亦对本文颇有启示,既要区分科学与技术,又要区分基于经验的经验技术和基于科学的科学技术[16-17],在古代,是中国的技术领先于西方的技术,而近代,是西方的科学技术超越中国的经验技术[17-18]。从库恩科学发展图式看[19],中国处于前科学阶段。

其实,纵观中外科技发展史,早期的技术均属于经验技术,基于科学、以科学作为修饰词的科学技术毕竟只是近代科学革命之后的事。注意本文中"科学技术"中的"科学"即此用法,而非作为与技术并称的名词。经验,是只知其然的知识;而科学,是知其所以然的知识。基于经验的技术开发主要采用归纳法,而基于科学的技术开发主要采用演绎法;经验技术是模仿、后生、单生、技能和渐变的技术,而科学技术是创造、前生、多生、知识和突变的技术[17,20]。

上述发展历程在土木工程中体现为:

文艺复兴时期,达·芬奇研究了确定作用在结构构件上的力及通过实验确定材料强度等问题,但他的发现被埋没在他的笔记本里,15—16世纪的工匠依然只能凭经验和直观判断决定构件的尺寸。最早尝试用解析法确定构件安全尺寸是从17世纪才开始的,一般认为,伽利略的名著《关于两

门新科学的对话》(1638 年)标志着材料力学的开端[21],书中系统描述了通过大量实验研究材料力学和动力学,提出了固体的强度问题,介绍了木梁强度实验,提出了等强度梁的概念,讨论了在重力作用下物体尺寸对强度的影响。1660 年,胡克提出了表征材料应力应变关系的胡克定律。1687 年,牛顿提出了牛顿三大定律。伽利略、胡克和牛顿共同奠定了近代土木工程的理论基础[22]。此后,土木工程技术逐渐从经验技术转向了科学技术,加之工业革命后,金属材料的大量生产,改变了过去以土和木等天然材料为主要建材的局面,使土木工程一改几千年来的缓慢发展模式,进入了突飞猛进阶段,在力学的基础上崛起了一座座高楼大厦。法国 1747 年建立了世界上第一所工科大学——法国巴黎路桥学校,工程师佩罗内领导的巴黎路桥学校研究了石拱桥的压力线,并用力学和材料强度理论对拱桥和桥墩的尺寸进行计算,建了许多坦拱桥,使欧洲的石拱桥设计达到了很高水平。尽管欧洲坦拱桥的出现比赵州桥晚了一千多年,但却是建立在理论基础上的科学设计[22]。虽然用现在的力学和美学去审视赵州桥,都会惊叹其科学性,但毕竟当时的设计建造者没能提炼出理论,减弱了其科学的可重复性和推广普及性。随着工程系统复杂程度的增加,单纯的经验技术不再能胜任。很难想象,没力学理论,古代的工匠能单凭经验确定现在摩天大楼的构件尺寸;很难想象,没美国塔科马桥的风毁事件而引发的桥梁风工程研究,不解决“卡门涡街”所致的风振,以及抗地震等理论,目前世界最大跨径(1 991 m)桥梁——日本明石海峡大桥能成功运营于风振和地震影响皆强烈的地带。

(二)哥廷根应用力学学派

19 世纪末,哥廷根大学的数学家克莱因认为,应将包括数学在内的自然科学知识全面系统地应用于发展工业生产,为贯彻该理念,他于 20 世纪初在哥廷根大学创建了应用数学系和应用力学系,邀请了普朗特等加入,开创了哥廷根大学基础数学、应用数学和应用力学协调发展的黄金时代,使以理论科学基地著称的哥廷根大学成为应用技术的摇篮[23]。克莱因不仅在数学方面贡献卓著,他提出的埃尔朗根纲领表明几何可借助群论方便地分类,对几何学的分类和统一影响深远,他还努力促成数学和物理的学科交叉。哥廷根应用力学学派在克莱因和普朗特的共同领导下,一时成为大师之渊薮,如被誉为“现代工程力学之父”的铁摩辛柯[4]和被誉为“航空航天时代科学奇才”的冯·卡门皆出自该门派。

理论与实际、科学与技术、数理科学与应用科学紧密结合是哥廷根应用力学学派极具代表性的治学理念和学术风格。冯·卡门更是“以填平理论科学与应用技术之间的鸿沟为己任”[23]。他在加州理工学院(CIT)传承和发扬了哥廷根学派的理念和风格,“理”加“工”的综合,发展有理科依据的工科。作为“卡门科班”的学生,钱学森一脉相承,继续传承和发扬了该理念和风格,高屋建瓴地提出了技术科学思想。

如果说钱学森之问,是“对大学的可能世界的极致追求”[24]在中国实现的一种期许,那么基于钱学森技术科学思想的人才培养模式,则是“培养科学技术发明创造人才的模式”[25]在培养技术科学家层面的一种体现,其中暗含让中国教育之症结部分终结之良方,亦可部分看作钱学森之问的回答。

(三)钱学森技术科学思想

钱学森认为,科学理论不能把自然界完全包括进去,总有些东西是不能从科学理论推演出来的。虽然自然科学是工程技术的基础,但又不能完全包括工程技术,将自然科学的理论应用到工程技术,不是一个简单的推演工作,而是个高度创造性的工作。因此,将科学理论应用于工程技术的说法是不确切的,更确切地说是科学理论和工程技术的综合,而综合自然科学和工程技术,产生有

科学依据的工程理论需要另一门学问,即技术科学[7]。

冯·卡门说,科学家发现现存的世界,工程师创造未来的世界。力学既可发现现存的世界,亦可创造未来的世界[26]。一语道破了力学之技术科学的学科定位。在技术科学中,力学属于最早成熟且强势的学科。

根据司托克斯提出的科学研究象限模型[27],技术科学处于巴斯德象限,即应用基础研究(图1)。其研究目标是创造有科学依据的工程理论为工程技术服务,从而可不依赖经验而对新技术进行科学预见,引领工程发展。

技术科学要从工程中提炼科学问题,以工程带科学,但所提炼的应是具有普遍性的工程理论问题,否则将会异化为以工程代科学,不过是解决特例而已。例如,1940 年美国塔科马桥风毁后,其失败的机理由冯·卡门等从事航空工程的科学家给出,他们把航空工程中熟悉的风致颤振理论用于分析土木工程,充分显示了空气动力学的普适性。

相比自然科学的自由探索,技术科学更注重以应用为导向的定向攻关,不是被动地由工程推动,对于工程而言,其具有前瞻性、科学性、基础性和支撑性。如高层建筑或大跨桥梁,要求轻质高强材料,轻质到可谓“斤斤计较”,而对于航空航天材料,则更严苛,如方岱宁院士所说:“轻质是航空航天永恒的追求,‘斤斤计较’远远不够,必须做到‘克克计较’。”如此,方能将更多的能力腾出来承受外荷载而非自重。对于特殊工程,技术科学的目标将从传统的选材料模式进入设计材料模式,以此来推动高性能材料的发展,进而引领工程的发展。

科学与技术之间的作用不是单向度的,不仅是从“学”到“术”的应用转化,亦包括从“术”到“学”的理论建构,是反馈反哺的动态过程,如图 2 所示。

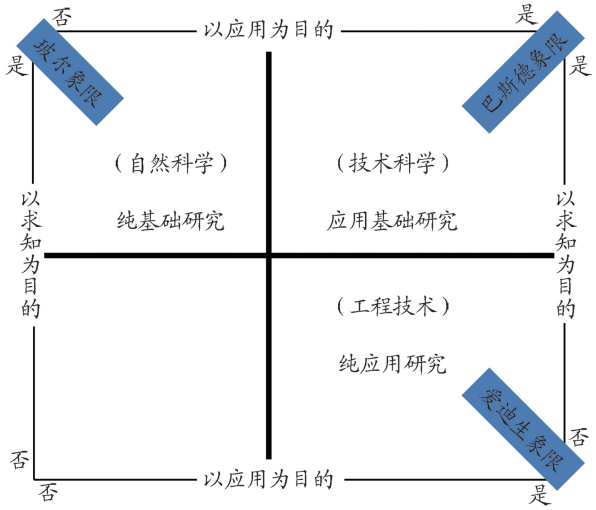

图 1　科学研究的象限模型

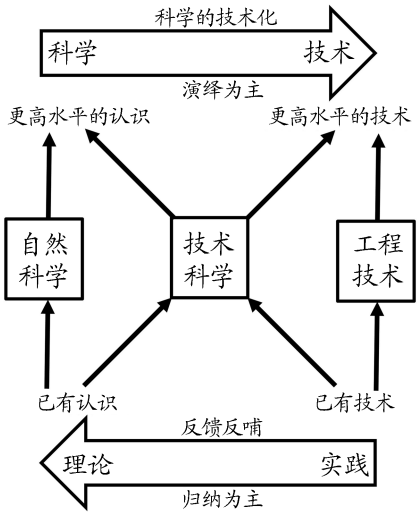

图 2　科学和技术相互作用的动态模型图

二、利用技术科学的统一性启示

现象具有多样性,而经过科学抽象后的实质则具有统一性。从上述可知,技术科学研究的是工程中的共性科学问题,而该过程,采用比较多的是归纳法,但归纳往往只是不完全归纳,却可能得出普遍性。由普遍性通过演绎推理,可得特殊性。已有成果所能演绎的路径不止一条,亦未必已经穷尽,如前所述,科学技术是多生技术,要充分结合工程作学科交叉研究,将科学发现向技术转化的潜能充分释放出来。

教材、专著的撰写以及授课不得不采用自上而下的推演法(演绎法),而重大的科学发现往往是倒过来的,亦即自下而上的归纳法[28]。教材、专著和授课的内容,亦是研究所得的结果。一方面,教学中要学会从统一性中演绎出特殊性,亦要学会不断将特殊性纳入统一性中或发展成统一性,学会普遍联系,把不同领域的共性展现出来,利用相似性,从学透一个分支内容,迅速融会贯通其他分支内容。另一方面,作为一种科研思维训练,要学会从教材、专著和授课的内容中,反演科学发现者的思路历程,从中获得启迪。力学教学中要注重培养学生该种思维方式,特别在课时压缩的情况下,可采取该方式对力学课程内容作整合和优化。

在“大土木”的培养模式下,采用公共力学基础课的原因在于作为技术科学的力学的普适性。理性力学作为一门横断的基础学科,从研究工程中具有共性问题的力学中再进一步研究更具共性的问题,用统一的观点对各力学分支进行系统综合地探讨,并力图用公理体系来演绎力学理论[28-30],构建大统一理论,颇具钱学森“横断综析的大成智慧”的感觉。尽管大多数高校的本科教学,没开设该课程,但教学中可贯穿一些理性力学的思想方法。无论是材料力学、结构力学抑或弹性力学,从理性力学的观点看,都是从本构关系、平衡(或动力)和几何关系三方面建立方程,在边界条件(空间边值问题)或初始条件(时间初值问题)下求解,不同问题的差别只是力学模型所对应的工程背景不同而已。初始条件决定了之后任何时刻物体的位置和速度,边界条件决定了物体其他任何位置的位移、应变和应力,颇具牛顿力学中的决定论[15]感觉,不过对低速宏观的情况,确实如此。

如主应力和对应的应力主向、主应变和对应的应变主向、自振频率和对应的振型、稳定临界荷载和对应的失稳变形形式,从代数的角度看,均可归为特征值和特征向量问题。

如莫尔圆适用于平面应力张量、平面应变张量、刚体的转动惯性矩张量和变形体的截面惯性矩张量,实际上,对于平面情况下的二阶对称张量在坐标轴转动时的分量计算具有普适性。故学过应力莫尔圆即可推而广之。

如土力学中土体的固结方程和热传导方程形式一样,同属于抛物线型方程。

如波动方程可用于描述许多完全不一样的和表面上互不相干的物理现象。

诸如此类,工程统一于力学,力学统一于数学,教学中要善于发现和充分利用技术科学的统一美。

三、学会对经验成分和科学成分的成分分离和成分化合

工程技术问题影响因素甚多,只能抓住主要矛盾和矛盾的主要方面,忽略次要矛盾和矛盾的次要方面,此外,从自然科学到工程技术不是简单的推演,相比自然科学,技术科学中带有更多经验的成分[7]。工程师往往采用不完美的技术解决艰难的工程问题,“对工程科学的学习和研究应沿着欣赏完美、发现不完美、探索更高层次的完美的螺旋式道路去攀登”[31]。一方面,要将工程技术建立在科学基础之上,另一方面,要学会从工程技术课程中分离出工程理论和经验技术,对于前者,要追根溯源找出其所属学科、理论依据和切入方法;对于后者,思考如何改进,使之不断科学化。如此,方能将自然科学和工程技术融合,在推导过程中知其所以然,而不只是套规范,否则将陷入麻省理工学院早期工程师培养模式,即“前两年着重在自然科学,后两年着重专门业务,但是这两部分之间没有结合起来”[7]。

具体到本科力学教育,由于力学课程大多在低年级开设,此时以之为基础的工程技术课还没开设,还处于上述的前一阶段教育中,要把两者联系起来很难。但力学的很多问题,本身就是实际工

程的理论建模,而模型的求解主要依赖于数学和物理,介乎数理科学和工程技术之间,离数理科学和工程技术皆较近,更容易打通学科壁垒。前一部分内容,学生已经具备,只需简单回顾即可,而后一部分,应适当增加工程概念的介绍,缩小力学模型与实际工程间的差距,将数学、力学、工程有机联系,形成一个富有逻辑的有序进阶的知识体系,而非空中楼阁,同时引导学生在学习工程技术课时回顾该部分内容,让他们化分为合。达·芬奇曾说:“力学是数学科学的天堂,因为,我们在这里获得数学的成果。”[30]类似地, 工程是力学科学的天堂,因为,我们在这里获得力学的成果。数学的抽象性因在力学中的应用而减弱,对数学的理解在力学应用中而加强。同理,力学的抽象性因在工程中的应用而减弱,对力学的理解在工程应用中而加强。在后续专业课程中,重点训练从工程中提炼科学问题,进行理论建模的能力。当学生认识力学之大用和学好力学课对工程技术课的作用时,才能激发起他们的兴趣而努力学之。如材料力学对混凝土、结构力学对多高层建筑、土力学对基础工程、流体力学对桥涵水文等,应重视力学课对工程技术课的基础性支撑作用。当然,实际工程中很多计算由计算机完成,但计算机的计算结果需要有把关的工作,此即定性(或概念)力学,故要加强定性(或概念)力学的教学。将计算的繁琐交给计算机后,更应加强这方面,同时亦留出时间和精力作理论创新。

工程技术课程的考核应以尽量多的综合性大作业或课程设计代替知识点的简单考核,训练学生将问题从“体系—体—面—线—点”的先整体后局部解构,到“点—线—面—体—体系”的先局部后整体的逐步解决并综合集成的能力。在工程技术课与力学课结合的过程中强调作为技术科学的力学对工程技术课的基础性和重要性。数学(理)—力学(理工)—工程技术(工),在系统贯通中将知识体系化而非碎片化,更有利于培养学生综合应用自然科学和工程技术的能力,特别是全过程参与而非仅仅解决某个阶段问题的实际能力。

力学的学习应贯穿后续的工程技术课,让学生在应用力学的过程中重新发现力学,如此,才能更好地将工程技术课建立在力学课的基础之上。

四、发挥科学史哲的浸润作用

钱学森说自己是从“工程技术走向科学论”的。钱学森提出的技术科学思想,不仅得益于他亲自践行的专业深度,亦得益于他对科技发展脉络的清晰认识,以及跨学科、跨层次和战略性的哲学高度。他将现代科学技术体系分为 4 个层次,从下到上分别为:工程技术、直接作为工程技术理论基础的技术科学、基础科学、哲学,他将哲学位于改造客观世界的实践技术之上[32]。在谈到爱因斯坦提出狭义相对论,而庞加莱和洛伦兹却没抓住机遇时,杨振宁评论道,研究要有自由的眼光,必须能同时近观和远看同一课题,须远距离眼光与近距离探索相结合,正是自由调节、评价与比较远近观察结果的能力形成了自由眼光。洛伦兹失败是因为他只有近距离眼光,而庞加莱失败是因为他只有远距离眼光,爱因斯坦成功是因为他对于时空有更自由的眼光[33]。纵观钱学森的科学历程,史哲给了他远距离眼光,专业给了他近距离眼光,让他形成了自由的眼光。除了专业,我们亦应在史哲方面向他学习,以拓展知识的维度。

“由于教科书是使常规科学得以延续的教学工具……在每次科学革命以后都必须重写……这样,教科书总是一开始就剔除科学家对他的学科的历史感……随着被重写,科学再一次看上去大体像是个累积性事业。”[19]托马斯·库恩在其著作《科学革命的结构》中的这段话,放在今天也仍然适用。如前所述,科学技术具有经验技术无法比拟的先进性,随着科学的发展而更新,科学革命亦会带来科学技术革命。然而正如托马斯·库恩所言,很多教材都缺乏历史感,学生看到的只是既成的

存在状态,而非演化的发展过程。为弥补教材的不足,多阅读科学史,以获得对科学的整体印象,在塑造历史的思想中汲取智慧,在充满质疑、批判、创新和超越的动态变革史中激起创新精神。多读学科史,获取学科的历史地图,看清学科发生、发展、分支和交叉的脉络,以及在科学史的大背景中与其他学科的关系,在对来处、定位和趋向了解的基础上能更好地寻找研究的切入点。尽管科研追求的是前沿,但历史是曾经的前沿,而今的借鉴。我们既应作共时性的横向比较,亦应作历时性的纵向比较,在历史的经纬中全面比较。力学作为最早成熟并为自然科学特别是物理学奠基的学科,其发展史贯穿整个科学发展史,且“宇宙之大,基本粒子之小,力无所不在”[26]。

哲学是从总体上对世界进行宏观认识,科学是对自然界进行分门别类的微观认识。哲学以“远”的眼光和直觉来洞察,科学以“近”的眼光和逻辑来探究。若能辅以哲学,技术科学家将形成自由的眼光,可全景,亦可聚焦。在“互联网+”的时代,是否亦可仿之:不是“哲学家”,但可作“哲学+”;不从事“哲学专业”,但可从事“哲学+专业”;让“自然哲学”在分离为“自然(科学)”和“哲学”后重新变为“自然+哲学”。形而上,以哲学的方法论为方向感,从哲学的整体观统一和概括,从哲学的高度俯瞰,以避免知识专业化和视野狭窄所带来的不良影响。可阅读专业方法论、工程哲学和科学哲学。力学,本身就富有哲学的意味。牛顿力学中的世界观曾是近代主流科学思想的理论基础,为 200 多年的西方科学思想和世界观提供了总体框架[15]。

类比前述的将技术尽力建立在科学而非经验的基础上,将理念尽力建立在科学的基础上,是所得的启示之一。类比前述的以演绎方式开发的科学技术比以归纳方式开发的经验技术更有效的论述,以科学的理论来指导工作,而非仅靠时间效应去累积经验,亦是所得的启示。

五、结语

自然科学—技术科学—工程技术间的关系,恰似地基—基础—上部结构的关系,技术科学可看作是应用基础研究,技术科学家,要承上启下,突破两个“单纯”(纯科学和纯技术)而将之化合(技术科学),在纵向上形成一个严密的逻辑体系。

技术科学研究的是工程中普遍适用的理论,具有统一性。力学教学中要充分利用该特点,培养学生以一种统一的观点去看问题。

技术科学力求将工程技术建立在科学的基础上。力学教学中,不仅要讨论力学模型的数学求解方法,更要加强力学模型的工程概念介绍,让学生将技术的科学基础和科学的工程背景相融合。力学的学习,不应仅局限于力学课程,更应贯穿后续的工程技术课程,让学生在应用力学中重新发现力学。

教学中,既要让学生了解教材或教学采用的演绎法,亦要培养学生反演归纳的研究思维。

技术科学是跨层次的学科,是科学和技术之间的桥梁,两者对其都有反馈和反哺的作用。加强科学史和学科史的学习,有助于全面了解其演化和变革过程,培养学生创新精神。加强哲学的学习,有助于培养学生从更概括更统一的高度上看待问题。

参考文献:

[1]钱学森. 现代力学——在一九七八年全国力学规划会议上的发言[J]. 力学与实践, 1979(1): 4-9.

[2]谈镐生. 力学的展望——介绍“基础力学”[M]//院士谈力学. 北京:科学出版社,2016: 111-113.

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

[4] 铁摩辛柯奖获得者演讲集:力学·教育·创新[M]. 杨迪雄,程耿东,译. 大连:大连理工大学出版社,2015.

[5]Tsien H S. Engineering and engineering sciences[J]. J of the Chinese Institution of Engineers, 1948(6):1-25.
[6]钱学森,谈庆明,盛宏至. 工程和工程科学[J]. 力学进展, 2009,39(6):643-649.
[7]钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报,1957(3):97-104.
[8]郑哲敏. 工程科学与应用力学(一)——纪念钱学森诞辰一百周年[J]. 力学进展,2011,41(6): 639-641.
[9]许良英,范岱年,编译. 爱因斯坦文集(第一卷)[M]. 北京:商务印书馆,1976.
[10]吴国盛. 科学的历程[M]. 4 版. 长沙:湖南科学技术出版社,2018.
[11]罗素. 我们关于外在世界的知识[M]. 北京:东方出版社,1992.
[12]丹皮尔 W C. 科学史[M]. 北京:中国人民大学出版社,2010.
[13]沈铭贤. 李约瑟与爱因斯坦——"李约瑟难题"的两种不同的回答[J]. 学术月刊,1996(4): 23-29.
[14]吴国盛. 从求真的科学到求力的科学[J]. 中国高校社会科学,2016(1):41-50.
[15]中国科学院,国家自然科学基金委员会. 未来 10 年中国学科发展战略:总论[M]. 北京:科学出版社,2012.
[16]沈珠江. 论科学、技术与工程之间的关系[J]. 科学技术与辩证法,2006,23(3): 21-25.
[17]钱兆华. 科学、技术、经验——谈"李约瑟难题"[J]. 科学学研究,1999,17(3): 14-19.
[18]钱兆华. 对"李约瑟难题"的一种新解释[J]. 自然辩证法研究,1998,14(3): 55-59.
[19]库恩. 科学革命的结构:第 4 版[M]. 金吾伦,胡新和,译. 2 版. 北京:北京大学出版社,2003.
[20]钱兆华. 经验技术和科学技术及其特点[J]. 科学·经济·社会,2001,19(2): 42-46.
[21]范钦珊. 材料力学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2011.
[22]项海帆,肖汝诚,徐利平,等. 桥梁概念设计[M]. 北京:人民交通出版社,2011.
[23]戴世强,冯秀芳. 哥廷根应用力学学派及其对我国近代力学发展的影响[J]. 科技中国,2017(5):88-93.
[24]杨杏芳. "钱学森之问"与中国高等教育哲学的贫困[J]. 教育研究与实验,2014(2): 57-61.
[25]钱学森. 钱学森最后一次系统谈话:大学要有创新精神[J]. 教书育人,2010(1):76-77.
[26]杨卫. 力之大道两周天[J]. 力学与实践,2018,40(4): 458-465.
[27]司托克斯. 基础科学与技术创新:巴斯德象限[M]. 北京:科学出版社,1999.
[28]赵亚溥. 近代连续介质力学[M]. 北京:科学出版社,2016.
[29]中国力学学会. 中国力学学科史[M]. 北京:中国科学技术出版社,2012.
[30]武际可. 力学史[M]. 上海:上海辞书出版社,2010.
[31]胡海岩. 论工程科学中的美学教育[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版),1999(2): 71-74.
[32]钱学森. 现代科学的结构——再论科学技术体系学[J]. 哲学研究,1982(3): 19-22.
[33]杨振宁. 爱因斯坦:机遇与眼光[J]. 物理与工程,2005,15(6): 1-6.

The enlightenment of H. S. Tsien's thoughts on technological science to mechanics teaching

QUE Renbo

(*School of Civil Engineering*, *Xiamen University Tan Kah Kee College*, *Zhangzhou 363105*, *Fujian*, *P. R. China*)

Abstract: Inverse analysis of the historical context in which Qian Xuesen (H. S. Tsien) proposed idea of technological science was performed. The difference between technology based on experience and technology based on science were first introduced. And then the idea of technological science proposed by Qian Xuesen was introduced logically. The talent training mode based on such a philosophy of technological science is inspiring, especially for mechanics teaching. An in-depth interpretation was offered by combining with examples.

Key words: Qian Xuesen; technological science; talent training mode; mechanics teaching

(责任编辑　周　沫)