

工程科学与卓越化:一个共生相济铁律 ——典型工程科学发展史话及其对 卓越工程师教育改革的启示

陈向东^{1,2,3}, 洪冠新⁴

(1. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191; 2. 北航老教授协会, 北京 100191;

3. 清华大学技术创新研究中心, 北京 100084; 4. 北航中法航空学院, 浙江 杭州 311115)

摘要: 本文分析工程科学与卓越工程推进之间相辅相成关系, 将其比作一种共生相济规律, 通过比较西方工程科学发展典型史实和新中国建国初期航空工业发展先进机型典型历史, 说明本土工程科学发展更需要卓越工程实践的挑战和卓越工程人的工程规律领悟和再创造, 由此对卓越工程师培养和教育改革提出建议。研究强调工程科学理念的重要地位, 不能简化为自然科学的应用, 必须重视其本土卓越工程实践中的创造和发展含义。

关键词: 工程科学; 工程卓越化; 卓越工程师教育改革; 工程科学发展史; 共生相济规律

中图分类号: T-1; T09; G642. 3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0566(2026)08-0071-13

Engineering science development vs. creation of engineering excellence: An iron rule of symbiosis and mutual promotion ——Selected historical accounts of engineering sciences and their implications for education reform in cultivating excellent engineers

CHEN Xiangdong^{1,2,3}, HONG Guanxin⁴

(1. *The School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China;*

2. Senior Professor Association of Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Technology Innovation Research Center, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Beihang Sino-French Aeronautic Institute, Hangzhou 311115, China)

Abstract: This article provides an analyzing work on the key complementary relationship between local excellent engineering projects and solid development of Engineering Science, referring such relationship as the law of symbiosis and mutual promotion, via typical historical cases in Western countries and cases in early new China during 1950's in aero-industry. The article emphasizes that all local excellent engineering projects need new version of engineering sciences learnt and created, and equally, any development of local engineering science needs real engineering challenge-based success and local excellent engineers to learn and to create the version, together with the ever grand new product. The

基金项目: 北京航空航天大学高等工程教育改革项目“二元能力在卓越工程师培养中的探索与实践”(ZD-20240114); 中国工程院战略研究与咨询项目“我国重大工程技术创新管理战略研究”(2023-JB-09)。

作者简介: 陈向东(1953—), 男, 山东淄博人, 博士, 北京航空航天大学经济管理学院退休教授, 北航老教授报告团成员, 清华大学技术创新研究中心学术委员会委员, 研究方向为技术创新管理、国际技术转移、高等工程教育改革、工程科学史。

paper then raises corresponding call and suggestion for education reform for excellent engineers. The important conceptual engineering science is therefore emphasized to be well placed upon its local excellent engineering practice needs, critically differing from natural science, particularly from so called application of such science.

Key words: engineering science; engineering excellency creation; history of engineering science; education reform for excellent engineers; rule of complementarity & reinforcement

我国已经进入当今世界第二大经济体发展境遇,特别是,我国社会主义经济强国的发展使命使得这种发展境遇具有前沿经济体特有的问题和挑战。一方面,我国作为有 14 亿人口、后来居上但资源有限、地区发展相对不均衡的大国,倡导新质生产力和质量型发展意味着高科技、高价值和多样化发展路径,需要更多融合我国人文社会因素的工程科技创新;另一方面,不可忽视的是,经济发展进入世界前沿时代的国家,意味着没有其他经济发展偶像和模式可以简单拿来学习,因而尤其需要本地化的工业文化与先进科学、技术、工程多种智慧的融合发展,需要不断重新认识科技和工程理念的本土再创造。2021 年习近平总书记在两院院士大会上深刻指出:“现代工程和技术科学是科学原理和产业发展、工程研制之间不可缺少的桥梁,在现代科学技术体系中发挥着关键作用。”特别需要从事卓越工程发展的科学家和工程师,以及工程教育者认真领会。

本文试图从工程科学的发展历史出发,作这样的理念型探讨,强调工程科学的核心理念和本土发展正应在工程卓越化的进程中自立自强,尤其在今天推进我国工程教育、提升卓越工程人才培养的主题上不可或缺。

本文首先追溯工程科学这一学术名词及其内涵的典型发展历史,从中总结工程科学与卓越工程相辅相成、共生相济的史实,突出其中工程科学汲取当时当地卓越工程问题而发展,从而对推动工程卓越化进程起到决定性作用,并由此强调对高等工程教育改革,尤其对卓越工程师培养机制改革的重要启示。

目前,有关工程科学的辨析已有很多,大多分布在工程哲学、工程管理和工程教育等领域,如李伯聪教授^[1]以格物(对所有物,抽象)和格器(对人工物,具象)比较自然科学与工程科学的区别,从

中国哲学层面作深层划分;郑丽娜等^[2]从工程科学与技术科学的区分角度考察工程技术科学认知,提出工程技术创新与卓越工程师培养协同机制。本文希望通过对其演化历史史实的分析强调,工程科学与科学(或称作自然科学、基础科学)的区分十分重要,尤其不能认为工程科学是科学在其已有知识层面的简单应用甚至简化。工程科学应当是针对人工世界的一种思想和知识的创造!应当十分清晰地强调:工程科学是人类创造世界得来的知识,而自然科学是人类探索、发现世界得来的知识,两类知识的认识目标不同、主导者不同,认识方法和知识体系也不尽相同。特别是,工程科学的发展具有一定的本土性,至少在启动、发展和行动者层面,具有特别重要的本土性意义。同时,本土意义的工程科学发展,必然是伴随着本土工程卓越化发展的问题和挑战而发展,并将继续以其创造知识的过程积累来影响以后的工程卓越化创造,这就必然给植根本土国情的卓越工程师培养教育提出改革期望。

一、关于“工程科学”的再讨论

(一)工程科学的起源和发展

为认识工程科学这一术语的理念内涵发展,需要梳理早先西方发达国家开创工程科学的典型历史,这大致可分两段时期来认识。

工程科学的起源更多体现在 18 世纪到 19 世纪西方所谓“科学革命”(science revolution)时期。本文根据国际上工程技术史学家研究总结^[3],认为科学革命体现在科学推动工程技术变革的过程上,最重要的作用应表现在其理念发展的两个十分重要的时期,其一是出现所谓“新科学理念(the new ideology of science)^[4],表现一种新的意识形态,即所谓科学“启蒙”时期;而本文则强调这类总结的第二个典型时期,即工程科学的出现和发展时期,而第一个理念时期与第二个理念时期的过

渡,是靠着“用”(或“有用”)联系起来的。

在整个所谓科学启蒙和更早的中世纪,西方国家的“科学”术语大多归类于所谓自然哲学(natural philosophy)的研究工作,对自然现象的观察并试图提出各种世界观新见解,是形成今天普遍称之为科学活动的主要工作内容,也深刻影响当时及后世科学家和政治家,以及工业开发群体的思想和行为。这一批自然哲学家,虽然其学问只是被作为哲学的一个分支,却催生大量对自然界的新知识,最初普遍被认为不是“有用”的学问,和各种工业实践特别是可称之为“工程”甚至“技术”的实践完全没有关系。由此形成一种认识传统,即科学活动的宗旨是探索和发现自然,是不以实用为目的的,因此与十分实用的“技术”完全隔绝。甚至直到20世纪中叶,欧洲的主流大学还在理念上坚持远离市场,以避免科学活动太过急功近利,以至于陷入大学何以成为新技术孵化器的尴尬讨论。

但是,伴随着工业革命而发生的科学革命终究带来必要的意识理念变化:科学应当是有用的!科学活动或多或少与技术发生了关系。可以看到的是,科学革命“恰好”也发生在技术活动最为密集的时代,比如桥梁、造船、蒸汽机、枪炮制造等等,其背景时期正是西方国家资本主义合并殖民主义(直至帝国主义)蓬勃发展,通过武力大幅向外扩张时期,在政治和社会(表现为君主政治和民族国家)的意义上,都是“科学”母国工程技术有长足需求和大力发展的时代,或者说知识的“需求拉动”成为更重要的动力因素。其中科学理念变革最关键的表现就是在“用”的眼界上和在做事的方法论意义上。

但本文必须强调,“工程科学”的起源和发展其实是更为独立的(根据国际上对工程科学欧洲背景的研究^[5]):“工程科学”并未直接发源于所谓科学革命,即当时被称作自然哲学家的社会精英其实并没有给工业革命带来直接的引导和影响,带来直接影响的还是那些接近或直接参与工业第一线的科学家的贡献。这些最初的工程科学认知实践和成果,虽然也有个别自然哲学的联系,比如

某些领域的工程学问用当时的词汇叫做机械哲学、实验哲学等,但绝大多数工程科学学问和知识体系,是亲身参与工业革命推进过程中的科学家和工程师促成的知识财富。更准确地说,科学革命带来的新理念、新意识,对后来工程进步的实践影响更多地是一种溢出效应,而深刻反映机械科学相关的工程知识和实验、试验方法的进步,典型工业革命中的新技术、新发展,都是与当时叫作“工程科学”的发展密不可分。譬如,牛顿力学至多只能解释两点之间的受力及其变化,并不能决定大型铁桥的钢缆在多种复杂受力之下的应变规律;波义耳定律可以定义理想空气中压力和体积关系,但无法对了解工作中的蒸汽机蒸汽运动规律提供任何有用的帮助;传统流体动力学的伯努力方程对解释非层流状态中的流体运动规律效果有限,不尽如人意,还得依靠参与现场的技术专家解决这些世纪问题。

更有甚之,冶金业和钢铁新材料的出现、蒸汽机的发展进步,纺织业作为新工业形态的崛起,由此而来的专用机器的问世,标志着大规模的可以称之为“工业”的高效率生产力形态等,都只能是与工程科学息息相关,那些传统的作坊式小规模工匠经验模式必须让位给叫做工程科学的知识类型,英文称作“rule-of-thumb”(流行于17世纪欧洲工匠,尤其是木匠、纺织工以拇指测量经验模式,俗指经验法则)的低质生产力对付不了大工业,因此新技术、新工业必须由工程科学来支撑和推进。

(二)工程科学及其相关基础科学研究有着本土性意义

概括说,在当时西方国家的工业环境里,包含应用机械学的发生发展,材料力学、弹性力学、结构力学、机械学和机器设计理论,又比如服务于水轮机、船舶结构(或说船舶工程)的流体力学,及其相关领域如弹道学、航空动力学、高速流体力学,以及内燃机构造中的热动力学发展历史等,都孕育一个又一个崭新的工程科学类型和作用内涵。这同时也说明,伴随着新工业形态的成功进化,工程科学本身是要动态发展的,并且一定是负载于那些发展母体(国家、特定组织乃至个人),是一种

本土型发展演化体,其中最为重要的本土型机制,就是与工程科学互为支撑的工程教育体系。

这些学问的提出和研究需要有相应的专家、学者参与,也需要相应的支撑机构提供资源,因此这些机构,特别是教育机构,都是非常重要的基础设施。同时,本文希望强调,这些形成工程科学研究主题的发现和定义也非常重要,有些工程问题显而易见,但仍有大量关键工程问题(尤其是工艺问题)背后的科学问题,现场的工程人员不一定能发现,还需要一定水平的工程专家,特别是训练有素的工程科学家。因此,处在早先工程科学的奠基起步发展的年代,专门学校、专门学术机构的介入极其重要。

从相关研究中,可以看到英国、法国、德国、美国等国家先后建立相应的机构,虽然称呼不一,但都不同程度地起到了将基础性工程科学研究与工程实践相联系的重要纽带作用,进而生成其特色型工程科学,更多相关的工程新思想、新方法就是在这种纽带联系和建立过程中产生的,于是这些新思想和新方法与生俱来都有一定本地特色,虽然在其传播过程中也有通用特征,但工程科学的本土化特质是重要的品格铸就,虽同为工程科学的标签,决定其后发展的品格却可能不尽相同。更由此可见,所谓基础科学研究不仅仅是在支撑自然科学活动,基础科学研究也在支撑工程科学活动,代表了基础研究所具有的理论探索和方法论意义上的科学,而这两者的目标、机构、使命感一定是不同的。因而,工程科学及其相关的基础科学研究(机构和人才)更有本土性意义。

(三)中国语境下“工程科学”概念提出及其内涵

历史上,Bernard Forest de Belidor^[3]是第一位在他的工程教科书中采用“工程科学”这个术语的人,时为 1729 年。英国第一个面向工程科学的刊物《工程师》出现于 19 世纪,其发刊词写道(采用“应用科学”的称谓):当今“存在一种叫做应用科

学的科学,是那两个均非次要中的一个(one of no minor importance);虽然物理学原理演示起来是美丽的,应用科学却是任何时候都是美丽的!”。诙谐的开场白明确标识,这个所谓“应用科学”与那个“科学”是截然不同的。

我国的工程科学原创概念是钱学森先生最早提出。钱学森先生在 1947—1948 年第一次提出“工程科学”的概念和理念^①,解放后 1955 年钱先生回国后更进一步明确提出“工程技术科学”以及“技术科学”概念,部分原因是为契合当时中国科学院的技术科学部名称,实际含义应是相同的。事实上,钱学森先生于 1954 年所著《控制工程论(Engineering Cybernetics)》本身就是一部工程科学著作。

时至今日,由中国科学院与国家自然科学基金会组织出版,“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”项目组编写的《中国工程科学 2035 发展战略》(2023)一书对工程科学(以“工程学科”表达)作了明确定义:“工程学科是研究人造物质与系统(包括其伴生的有害物质)的制造、工作原理、行为调控原理以及与自然界的相互作用规律的科学与技术,是联系自然界与人类社会的桥梁。”并强调了与自然科学之间的关系:“工程学科描述多种自然科学机制集成为人造物质与系统的原理,并利用自然科学知识解释和描述人造物质与系统的行为规律。……同时工程学科也越来越植根于宽广的自然科学基础,并形成相互促进或牵动发展的趋势。因此,植根于自然科学基础的工程学科兼具显著的技术特性,是科学和技术的高度融合。^[6]”这里,所谓显著的技术特性,应当就是强调工程科学必须具备的“有用”和“造物”的品格。

相对而言,我国高等工程教育体系,更多受到建国初期苏联体制的影响,更多强调专业技术学科,而对工程科学部分从体量上和教学上缺少必要的组合,这正是本文希望着墨的部分。

^① 1947 年 7—8 月,钱学森回国期间,在浙江大学、交通大学、清华大学发表题为《工程与工程科学(Engineering and Engineering Science)》的演讲,其后在《中国工程师学会杂志(Journal of Chinese Institute of Engineers)》发表。

更需要看到的是,工程科学不仅在于说明某项技术的内在道理,工程科学的动态发展其实还包含另外一个职能,即研究、阐发、解释直至应用某种技术的过程,从而形成新的思想、新的规律的认识。在这个意义上,是把技术现象提问和获知于科学。这一行为和过程反映的正是将工程技术问题(类如知其然不知其所以然)提炼为科学问题的发现和定义,进而更有效率地解决问题,并产生新的工程科学理论,这也正是工程科学发展最重要和最需要的反哺路径。本文正是希望通过历史上的典型事件和实践,强调那些当时当地的卓越工程(首次出现的造物)或者工程卓越化(首次大幅提升工业质量的过程)怎样体现此类反哺,来突出这样的工程科学与卓越工程发展两者之间“共生相济”的现象和规律,而这一点尤其对我国今天本土卓越工程师的培养和教育改革有着更为重要的意义。

二、典型卓越工程史话:西方工业革命时期与新中国建国时期

本文根据工业科技特别是工程科学历史研究资料,希望提炼西方工业革命时期和我国建国初期典型工业造物史实,来特别说明工程科学与当时当地的卓越工程之间的缘起、演化和共生特点。

(一)西方工业革命时期典型工程问题与工程科学缘起

本文以工程科学发展逻辑,归类其中典型史实,突出其中工程科学问题起因、解决工程问题及其具体人和机构(突出工程科学教育机构地位和作用),表1和表2展示了工程科学内涵与卓越工程发展之间的关系。

根据上表归类比较,本文得出以下两点重要启示。

表1 工程科学发展典型历史:与卓越工程发展问题的对照

时代	典型卓越工程与工程科学问题及事由	相关人及相关机构工程科学活动	工程科学成就	工程科学动态组成内涵
1729	小规模材料试验机设计制造问题	Pieter van Musschenbroek 荷兰物理学家、数学家和自然哲学家,发明电学莱顿瓶	“几何方法测度的物理实验”,修正补充伽利略自然科学理论 ^[7]	材料张力、压力、剪切力测度
基本同上	巴黎塞纳河桥梁建设石材强度问题	Jean Rodolphe Perronet ^② 法国国立路桥学院(Ecole des ponts et chaussées 1747 建立)首任校长	多种理论设计并制造大型实验装置测试石器强度;使用类似器械测试造桥石材 ^[3]	材料弹性分析 弹性力学 结构力学
	剪切力测试的弹性损失问题;材料弹性性质分析	Jacob & John Bernoulli ^[7] 法国皇家科学院院士其子 Daniel Bernoulli 续此研究 其学生 Leonhard Euler ^③ 续此研究 ^[7]	■ 运用莱布尼茨数学方法法国皇家科学院院士其子 Daniel Bernoulli 续此研究 ■ 数学方式分析弹性条在不同负荷之下运动和性质	
1773	工程试验,张力与剪切力共同作用情形下材料强度变化问题	法国;Charles Augustin Coulomb ^④ ^[7-8] 法国工程师、物理学家 法国梅济耶尔皇家工兵学校(Ecole Royale du Génie de Mézières)	■ 数学最大最小理论和实验结合法分析解决弹性弯曲问题,演示证明弹性中性线,修正伽利略错误 ^[9] ■ 首次对拱形材料稳定性结合数学和物理因素做出分析	
1807	对工程材料弹性问题的学术兴趣	英国;Thomas Young, 自然哲学家、物理学家,光的波动说奠基人之一	提出任何材料都有自身特定弹性性质,发明杨氏模数,以 Young's Modulus 标识材料特性,其研究适用于船体中支撑结构,应用于英国海军造船 ^[7]	通用弹性指数
1814—1817	造船、建桥,吊桥建筑等钢铁材质引入新的材料强度问题;铁路、铁桥建设铸铁材料强度问题	英国;Thomas Tredgold ^[7] 土木工程师、工程学科重要奠基人,提出“工程是驾驭源于自然界的力量以供人类使用并为人提供便利的艺术”	为测度铸铁强度开展系列工程试验,出版“铸铁强度实践”,提供系统型工程数据,有指导性作用,被译为法文、德文、意大利文广为传播	铸铁材料强度测度(经验数据)及力学原理
1838	铁路、铁桥建设铸铁材料强度问题	英国;Hodgkinson, E ^⑤ 苏格兰;William Fairbairn ^⑥ 土木工程 ^[3]	设计11种测试机器,完成对全尺寸铸铁桥墩的强度测试,得出诸多柱式强度设计的原理性知识;对铸铁梁和柱体强度开创性研究奠定现代结构工程基础	
1822	铁路、铁桥建设铸铁强度和结构问题弹性力学的数学表达问题	法国;Augustin-Louis Cauchy 巴黎综合理工学院(The Ecole Polytechnique)和国立高科路桥学院两学府毕业生,法国国家科学院院士 ^[3]	数学方程描述压力摒弃牛顿力学压力作用于微粒假设,压力(Stress)不是力(Force),其数学分析认定施压情景应属六维度而非三维度	结构力学 弹性力学
19世纪20年代	铁路、铁桥建设铸铁强度和结构问题弹性力学的数学表达问题	美国;James Finley ^⑦ , 土木工程师; 美国;Squire Whipple, 土木工程师, 德国;Karl Culmann ^⑧ (Karlsruhe 理工学院毕业生) 土木工程师 ^[3]	二维度模型试验决定铁索弯曲程度,决定悬挂支柱长度,形成不同地理条件下均可适用的设计原理体系;主持制造第一座铁索悬吊桥,影响美国及英国桥梁建设风格和方法,到1820年美国大约建立20—40座悬挂桥,其桥梁设计和强度数据传入和影响英国(1819)	数学分析 钢铁材质强度;悬挂桥梁情景下铁索强度及桥梁结构。

② 法国土木工程师,被誉为现代土木工程奠基人之一。

③ 后为俄罗斯圣彼得堡科学院院士、普鲁士科学院院士。

④ 提出静电与磁作用的库仑定律、发明扭秤、奠定土力学基础,电荷单位“库仑”(C)以他命名。

⑤ 工程师与应用数学先驱,1847年任伦敦大学学院机械工程教授。

⑥ 土木工程师,以桥梁箱型梁设计、铁结构工程研究著称。

⑦ 誉为美国铁桥之父。

⑧ 被誉为图解静力学(Graphische Statik)奠基人。

表 2 蒸汽机制造作为工程科学的发展比较

年代	蒸汽机作为卓越工程的工程科学问题	代表人物及其身份	工程科学主要成果及其相关卓越工程	工程科学组成内涵
1768	蒸汽机效率问题 纽科门机效率低 工作原理未知	英: John Smeaton 通过学徒制完成实践教育; 被誉为最优秀土木工程师和机械师, 首位以现代工程师方式工作	以水力推动机器作动力模拟逐一改变动力及部件参数, 将纽科门动力机效率翻倍, 称作参数观测法(其他参数保持定常仅使其一改变) ^[10]	蒸汽机能量计算中的参数关系观测是工程科学典型方法。
1796	蒸汽能量和蒸汽压缩关系描述问题以及如何计算功率问题。	英: Davis Gilbert ^[11] (未知) 英: John Southern (未知) (瓦特助手)	■ 曾以标尺度量压力—容积曲线以下部分, 并标识其与给定机器作工有关。 ■ 开发特定装备(将铅笔连接到压力表实现在接触活塞的纸张上画出工作曲线)发明“指示器图形”瓦特将此保密至 1822 年	成功展现蒸汽机内压力与容积的图示关系及可测度(可调节)给定机器功率。 压力—容积(P-V)关系图是热动力学基础部分(1850 年代)
1811	瓦特专利到期	英: Arthur Woolf (未知) 康沃尔地区 ^[12]	■ 发明康沃尔发动机	公认热动力学开端著作(1849)
1824	康沃尔发动机 (小气缸蒸汽压缩大缸作工)提效原理问题。	法: 卡诺(Sadi Carnot) 工程师, 数学家, 巴黎综合理工毕业, 热力学奠基人。 ^[3]	■ 研究并出版通用情景下(不考虑蒸汽等媒介)热机理论著作	卡诺热力学第一和第二定律 卡诺理想热机
1834	理解卡诺热力学理论的实际用途问题	法: Emile Clapeyron, 法国巴黎综合理工学院毕业生。 ^[11]	■ 将卡诺热力学理论翻译为数学形式和图示化, 推广卡诺的理论学说。 ■ 对气化现象的专门研究	卡诺周期 卡诺周期的四边形循环理论 克莱皮龙方程

注: 以上两表: 本文作者根据 Channell, D. F. < The Rise of Engineering Science-How Technology became Scientific > Springer, 2019, 部分典型内容分类编辑作表。

(1) 工程科学有其独特、便于工程创造的理论体系, 并经由实验验证, 取得可靠的工程安全临界数据或效率运行规律

从大量工程科学发展的成果上看, 工程科学在形式上取决于两个维度的知识, 其一是工程结构的理论构造, 其二则是对组成或支撑该结构的元素(材料)性能的把握, 前者往往依靠数学的应用和对物理学的理解, 而后者则只能依靠科学的实验和试验, 其中所牵涉的实验观念、方法、技巧、装备制造等, 又或多或少属于技术、技能的范畴。所有这些也体现了特定文化乃至民族和本土品质。当然, 由于科学认知的方法和自然规律的普适性, 工程科学在其积累和传承过程中, 文字和图文陈述有共通性和共同性, 但在不同领域的工程科学创造的起始期, 即可以称为当时当地工程卓越化的发展期(表现为从无到有的开拓创造, 或从弱到强的质量跃迁), 其本土表现仍然有重要差异。

从历史上看, 英国人比较依赖科学实验, 与法国人行为形成对照。英国工程人员更早开始对材料强度性质进行研究, 大多采用实验方式, 而理论上的贡献较少。英国较早开始建立冶炼和冶金工业, 对铸铁这种材料的使用和分析大多采用实验

方法获得实用知识, 积累起大工业经验特征的工程科学品格。值得补充的是, 英国依托这些更为科学的工程试验方法, 在冶金材料、造船、建筑乃至军工装备领域形成技术优势, 并在 1840 年鸦片战争中占据上风。专门研究鸦片战争的茅海建^[13]认为, 清军在和侵略者英军对阵时, 从武器上说, 清军在火药成分上并不弱于对方, 差异在于, 此前英国歇夫列里经过多次实验, 1825 年写出火药的最佳化学反应方程式, 确定了爆炸力最佳配比(硝、硫、炭比例 74.84%、11.84%、11.32%), 以及分别确定枪用火药最佳比和炮用火药最佳比; 而广东水师提督关天培在战前所用火药配比相对粗略, 特别是含硝石太多(80%、10%、10%)易受潮不易保存, 爆炸力低, 两者之差, 反映科学实验方法差异; 其余如铸铁技术温度低而至铁炮强度差等, 都指向工程的科学观差异。

法国工程师则比较崇尚数学的抽象描述和分析方式, 1824 年在塞纳河上建造里程碑式的滑铁卢桥时, 使用铁质新材料设计建造悬挂桥梁过程中, 法国工程师 Navier 甚至完全使用他开发出的数学模型而未做科学实验, 导致施工过程出现问题, 更有一钢缆支撑塔突然向河面倾斜, 致使桥梁工程完全撤销, 由此奠定了工程科学必须包含理

论与实验两个基本部分的传统,工程教育也大都采用兼有理论分析和实验、试验验证结合的方式,工程科学内涵也如此定义、传承下来。

(2)推进本土卓越工程进程中,创造新工程科学的关键人才团队十分重要,由此体现工程科学发展过程中工程教育的本土意义

在早期工程科学的发展中,数学和物理学作为基础自然科学学科,有着实际支撑作用,而创造更为适用的工程数学、对原始物理学的重新理解与改造,实现工程创造过程中的科学规律新认识,正是取得更为有用的新工程科学成果的常见路径,而在种种工程科学发展历程中,都体现了本土工程人才培养的重要性!

早期工程科学的发展过程人才多样,当事人来自科学、工业和政府背景,甚至自学成才的工程能手,都能贡献工程科学进步和卓越工程的解决方案,但尽管如此,仍然突出了工程师这类人才培养机构的重要作用。法国是最早提供现代工程科学创造队伍人才的国家。法国综合理工学院(École Polytechnique)、巴黎高科路桥大学(École des Ponts ParisTech)是最早成建制培养现代工程科学人才的工程教育机构,而巴黎路桥军团(Corps des Ponts et Chaussées)则是专门从事现代工程,也就是当时承担卓越工程项目的成建制团队。其毕业生Cauchy的工作更为典型,他摒弃传统上牛顿力学把压力作用于微粒情形,认为压力(stress)不是力(force),不能应用牛顿的视觉和方法,他的数学分析结果认定,分析工程施压情景应以张量概念从六个维度而非以空间向量概念的三个维度去认识^[3]。这些创造性的工作展示出,工程科学连接科学和技术的视角,会导出全新的概念,这些概念既不属于自然科学范畴,也不属于技术范畴,只能属于工程科学。

不同国家工程教育机构的发展及其工程师地位还需要社会的响应。例如,英国工程科学教育一直落后于德国^[14],19世纪60~70年代,还曾有

过工程师和科学家培养教育体制之间孰重孰轻的大辩论,其间德国的“*Technische Hochschulen*(直译为技术学院)”一度被认为是一种“水管工”学术机构,工程师也一直被划为“高等劳工”阶层^[14];但到了19世纪七八十年代后期,随着普法战争德国胜利,工业化热潮提升了新工业阶层的政治地位,于是技术的科学化本身得到充分重视^[14]。而技术转化为科学最关键的转变还是靠人,德国的雷藤巴赫(F. J. Redtenbacher),被公认为是将机械工程确立为一门科学学科的奠基人之一,在其任职期间推动德国最早培养工程师的学校(*Polytechnische Schule at Karlsruhe*,1825,即现在KIT)实现根本转变,提倡机械设计的理论化与系统化教学。他与该校学生勒洛(F. Reuleaux^⑨,有铸铁厂和机械车间学徒经历)合作,改进机械工程理论,创造出含有自己工程实践新观点的改造型科学分析^[15],集中体现在勒洛的三部传世之作:《机器构造的相关结论》(1848)、《机械学原理》(1852)、《机器构造》(1862)^[3],是典型的完成工程科学从实践到理论的创造性工作,就此形成该校理论和实践相结合的教学体系,包括必要的课程安排(高级机械学、数学、工业界实习),其德文版教科书连续再版多届,某些版本被翻译为法文。他的名言:“一部机器是无法只凭机械学原理就生产出来,还要有所需材料的实践知识、有使用工具的熟练、使用辅助机器的娴熟!”

(二)我国典型工程卓越化发展史话及其蕴含工程科学的史实

作为本土从无到有类型的卓越工程代表,我国自行设计制造高性能飞机应当具有典型性。本文根据航空工程科学领域唯一的两院院士顾诵芬等科学家所编航空人物史料文献^⑩,选取两个机种的自行设计制造过程,说明通过卓越工程的推进,以本土科技力量发展和掌握工程科学规律的重要意义。尤其本文希望突出工程科学与卓越工程发

⑨ 勒洛, F. (Franz Reuleaux), 德国机械工程专家, 机构运动学创始人, 1875 年出版《理论运动学》, 系统阐述机械元件运动规律, 奠定现代机构学理论基础。

⑩ 参见: 顾诵芬等编, 《中国飞机设计的一代宗师: 徐舜寿》[M]. 北京, 航空工业出版社, 2008 年。

展之间相辅相成、共生相济的进步规律,也表现我国科技人员克服艰难,运用科学和智慧,团结奋斗的跨越精神。

1. 航空工业新机种设计制造:第一架亚音速喷气歼教机(歼教1)设计制造(1956—1958)

提出这个机型的设计出于三个目的:一是航空部队需要(高空、中、低空均相对缺乏);二是客观条件(国内没有高速风洞,只能设计制造中、低空,选择中级);三是决心和意识,认为对于一个新成立的飞机设计室,没有设计经验也没有试验手段,因此要设计一架新飞机,借此掌握“需要和可能”相结合的原则(徐舜寿语)。根据总设计师徐舜寿在筹建工作会议上的报告,认为当时国内有条件:人(全国四个飞机厂设计人员 300 人,其中有 50 大学毕业生,有 20 人在国外设计过喷气式飞机)、科学理论(理论方面较差,但各大学有几十位教授和讲师,空气动力、强度等领域较有研究)、必要设备(全国有低速风洞三个)、必要资料(十来种苏联飞机生产资料)，“虽然空气动力和强度原始资料不多,但在图纸和生产技术方面还是相当多的,十分宝贵”(徐舜寿语);同时了解到,典型国家如意大利、日本、荷兰、英法都有这样的教练机,因此设计制造此型飞机有现实意义。据此可知,当时代表工程科学的“空气动力、强度的原始资料”是缺乏的,但有关生产技术方面相对丰富。这个例子也足以说明,工程科学与工程制造的相互支持,在第一架歼教机的制造上是通过我国建国初期一群优秀的科学家+工程师实现的。

前期准备:1956 年 8 月,四局^①发出《关于成立飞机、发动机设计室的命令》。由此,中国第一个飞机设计室在沈阳 112 厂成立,徐舜寿为主任设计师,黄志千、叶正大为副主任设计师,在全国召集各路飞机设计科技精英,一时间科技尖子贡献航空科研成为重中之重。根据当年航空科技负责人王西萍局长回忆:“主导思想,就是充分利

用生产走在前面的条件,下决心从局机关和各生产厂调集拔尖技术骨干去搞科研。”经严格考核(其中数学分析能力为要件之一),至 1957 年 8 月到位共计 108 人,其中技术人员 92 人(大学 34、大专 33、中专 25 人),技术骨干包括局机关的徐舜寿、黄志千、吴大观、胥凌、荣科、顾诵芬、管德、程不时、范棠、刘多朴及厂子里的叶正大、虞光裕、高镇宁、何文治、陆孝彭、屠基达等^[16](网上查询均为本土航空工程大学科班出身),非常年轻的一支队伍;后又增加歼教 1 设计人员沈尔康、吴孟伟、陈嵩禄、郭松林、林家骅、冯钟跃、李文龙、汪子兴、李克唐、张颖芝、林梦鹤、席汶、赵智明、王培宏等(网上查询多为本土工程大学航空专业毕业及航空企业骨干)。全体科技人员平均年龄 22 岁!其中参加过实际飞机设计工作人员仅数人。我国第一架喷气式飞机的设计、制造由此起步。

当时的科技氛围是,苏联提供我国仿制的米格 17,是 1954 年已经停产的机型,同时,转让技术“严格限制在飞机制造技术方面,不希望我们掌握研究、设计、试制、开发技术”,而这些部分正是相关航空工程科学的关键。

这样一群科学家+工程师在徐舜寿带领下迅疾展现的工作能力可以通过以下方面表现。

一是从飞机设计资料奇缺状态,通过广为收集、掌握设计所需要的工程科学资料,使当时 112 厂飞机设计室成为国内拥有航空机设计资料最多场所,来源包括外文书店购买、大量个人收藏,各类中外文书刊和手抄资料等。例如,黄志千在英国手抄《飞机设计规范》和用描图纸所描 Derwint(达汶)发动机推力曲线图(推力约 1 500 kg),而当时北航恰好有这样一台抗美援朝时缴获样机。后曾在英国工作的 410 厂发动机设计师虞光裕和该所负责人吴大观按照徐、黄两位设计师要求,提出参考该型号、将用于歼 5(仿米格 17)苏式发动机

^① “四局”是中国航空工业早期政府管理机构的简称,全称为“第三机械工业部第四局”(也曾隶属二机部、一机部),负责统一领导新中国航空工业的修理与制造工作,如今其职能已整合进“中国航空工业集团有限公司”(百度百科)。

缩型成功用在歼教1上^⑫。

二是组织技术委员会,学习各方所长,室内以技术民主、博采众长、科学决策方式汲取必要工程科学智慧:设计组建立伊始,还曾走访、邀请、咨询多位国家新建航空和军工院校专家解决工程科学难题,如北航张桂联教授(震颤、气动)、南航程宝渠教授(设计打样)、哈军工马明德教授(风洞)、罗时钧教授(气动,哈军工后到西工大)^⑬等,这些一流航空工程科学大家后来都成为我国航空科学与航空工程教育奠基人。

三是编制我国首部自用《设计员手册》,并扩充到《零件设计原则》《设计员手册第二册》等,以及《设计室图纸文件管理制度》,这三个文件以后成为国内唯一可行的飞机设计执行文件,后续歼8设计时也在使用。

四是敏锐捕捉国际上飞机飞行新问题和新技术,如颤振现象及处理技术;1955年国际上如何防颤振刚刚发展成一门跨领域新工程科学学科,全室即认真学习冯元桢的英文版《空气弹性力学引论》,Bisphnhoff著的《气动弹性力学》美国版本一出版徐舜寿即买来学习,并组织国内教授学者,结合设计问题学习讨论如何寻找气动弹性途径和方向解决飞机设计中的颤振问题;在成功解决歼教1飞机设计同时,也建立起这门气动弹性力学专业,造就出管德院士这样的气动弹性科学大家。

五是发展计算机辅助设计新技术,很早配备学习计算数学专业人员并加以培训,先购买模拟计算机后数字计算机,使该所拥有计算机辅助飞机设计名家,一直到歼8设计时都能起到支撑作用。

歼教1在实际设计工作中,是一种热情、谨慎、发扬科研民主的过程:对大部件、大系统的设计总图,采取集体审查办法:设计者贴图纸,讲解依据、思路、意图、数据、问题等,有关当事人参加并提问题,形同答辩,通不过修改后再来,通过了则所有参加者当场签字。徐舜寿作为主任,终身保持一

线参加具体设计、现场指导的工作作风。他还特别要求设计员广泛收集飞机资料,避免我国设计的飞机成为米格型飞机仿制品。

歼教1设计出炉,再经空军使用和苏方设计科学部门多方检验修改,从图纸经打样、制造部门众多航空人的努力,终于脱身成为真正的飞机,其中更有很多充满热情和科学精神的感人故事,而我国第一所飞机设计室的科学家+工程师们严谨和一丝不苟的科学努力也终于得来圆满回报!1958年7月26日首飞,到8月5日完成8次飞行试验,举行祝捷大会,叶剑英元帅出席,苏联航空工业部发来贺电(苏联当时还没有中级喷气教练机)。歼教1典型数据见表3(与典型国外荷兰制造同类飞机对比)。

表3 第一架歼教1型喷气式飞机
与国外同类机型主要性能比较

主要性能指标	歼教1(1958年首飞,后未列装下马) 串联双座、两侧进气、单发、下单翼	荷兰福克S.14(1951年首飞,1955年服役) 并列双座、机头进气、单发、平直下单翼
最大速度:	850 km/h	730 km/h
巡航速度:	571 km/h	—
海平面爬升率:	28.4 m/s	16.3 m/s
实用升限:	14 500 m	11 500 m
航程(内油):	957 km(外挂副油箱1 328 km)	950 km
空重:	3 149 kg	3 765 kg
正常起飞重量:	4 159 kg	5 350 kg
发动机:	喷发1-A(沈阳410厂发动机设计室,吴大观主任,虞光裕总设计师)涡喷,约1 600KGF	罗尔斯·罗伊斯 Derwent8型发动机涡喷,约1 560KGF

来源:歼教1数据来自徐舜寿传记,对比资料通过人工智能软件采集。

从表3可以看出,主要指标相比,我国歼教1气动与动力设计更强,两侧进气为更先进设计,速度、升限、爬升率性能领先,结构更轻,虽然成熟度较低、航电和武器系统简单,而我国设计队伍年纪轻,从设计到首飞仅仅1年9个月,研制速度超过了当时航空工业堪称雄厚的捷克(L-29)和日本(TIF2)。30年后的80年代,空军需要最大航速800 km/h喷气教练机,着手重新研制L-11教练机时,气动布局还是参考了歼教1,研制成功相关机型陆续装备部队。更为宝贵的是,歼教1的工程科学创造过程培养了我国以后的新一代卓越飞机设

^⑫ 苏联米格17整机+VK-1发动机全套技术曾转让中国,而VK-1原型机是在克里莫夫RD-45F涡喷发动机(源自英国尼恩Nene发动机,苏联二战时缴获仿制)基础上放大推力,定型VK-1,推力2 700 kg,装备米格17。

^⑬ 这些名单是徐舜寿“文革”期间笔录,为免牵连当时隐去姓名,80年代由顾诵芬院士补上。

计师:如强 5 飞机总设计师陆孝彭、歼 8 飞机总设计师顾诵芬、气动弹性专家管德、歼 7 改进型总设计师屠基达、“飞豹”总设计师陈一坚,以及运 10 副总设计师程不时^[17]。

徐舜寿作为第一架中国自主设计喷气式飞机的总设计师和帅才型组织者(刘鸿志语,刘鸿志 1936 年参加革命,抗美援朝时曾任东北空军航空工程部副部长,是一位尊重知识、尊重人才、事业心强、知人善任的革命老干部,60 年代任航空科技领导人),带领我国第一所飞机设计室的成员,完成了工程科学科学家与工程师为一身的完美塑造,也为后来的航空人立下榜样,更代表了新中国第一代航空工程科学发展的叙事风格。

2. 我国航空工业新机种设计制造:第一架超音速战斗机歼 8 飞机的研制

我国第一架自行设计制造的超音速战斗机歼 8 飞机研制,1964 年 10 月启动,1969 年 7 月首飞,1980 年 2 月白天型定型,1986 年 7 月全天候定型。

从 1961 年 2 月在苏联提供米格 21 歼击机制造权但资料短缺不全甚至存在错误的情景下,开始以摸透米格 21 为基础(1964 年基本完成),随后自行研制是院所和高层科研一致的意识 and 决心。

第一是人才。副所长、飞机设计总负责人徐舜寿按照聂荣臻元帅(时任国防科委主任)提出的航空科研尖子人才选拔标准(“有特殊才能的、特别努力的、有较大成就的人”)再将技术骨干分为三类:技术尖子、尖子培养对象、一般技术骨干,技术尖子仅选拔顾诵芬、管德等 7 人^[16],这七人在以后攻坚式设计和克服工程困难面前真正起到了卓越工程师的杰出作用。而徐舜寿本人作为航空科研组织的帅才,对 601 所的科研体制建设起到了非常重要的推进作用。

第二是解决工程科学短板问题。由于缺乏高空高速气流流体力学的工作参考,振动问题又是在风洞中测验不出来的,解决歼 8 研制中的振动问题曾陆续经历过马赫数 0.86、1.24 等多个速度层级飞行中的难点^[16]。负责气动弹性理论和设计的管德在其后的随感录中曾这样写道:“我们在

歼 8 飞机的气动弹性分析中,始终把飞机设计和应用研究紧紧地结合在一起,消化国外的计算、试验方法,掌握其中的关键,用到自己的飞机设计中来,是应用研究;自己的飞机气动弹性分析中发生了问题,要想解决好,不能就事论事,更不能马虎对付,得把它提高一步,研究它的本质、规律,研究影响它的主要因素,也是应用研究。”很显然,管德老师实际上就是在强调探讨歼 8 气动弹性的科学规律,并把这种科学探索认作是非常确切的应用科学研究,据此更是明白体现:这种应用科学就是一种解决本土问题的工程科学,是一种民族和本土先进技术的科学,在工程卓越化发展的攻坚时刻更是如此。管德老师也说过形成这类科研成果的两种形态:“我们在歼 8 飞机的气动弹性分析中,始终是出两个成果,一是出飞机设计方案,一是出论文、出研究报告。在计算方面,既有飞机的计算结果,也有计算方法的研究报告。在试验方面,既有飞机的试验结果,也有试验技术的研究报告;既有歼 8 飞机本身的计算、试验结果,也有对某一个技术问题的规律性研究报告。^[16]”十分确切的说明了工程科学和飞机设计技术的关系。在这样的基础上,“我们从对超声速的气动弹性分析一无所知,到建立起自己的一套设计手段,而且不断更新。把这一套手段用到歼 8 飞机上,保证了设计目标的实现。说明我们只要努力奋斗,我们是可以承担起这种任务的”^[16]。管德院士一生都在追逐飞行器气动弹性问题,是这一主题上的工程科学大家。他还曾特别记到,“我有一个破本子,上面收集了 1950 到 1988 年,近 40 年来的气动弹性领域的文献目录,这对于我,实在获益匪浅”^[16]。网上至今还有感叹文章:“管德硬生生把飞机震颤问题,算成了工程学!”管德院士在北航图书馆有 22 本记录,包括他的著作和他亲自指导的博士生论文,都是有关气动弹性的领域和主题,展现了管德老师作为航空科学大家的学习与创造集于一体的工程科学发展之道。

第三是群策群力体现我国国防科研组织机制优势!上至国家领导层再到基层设计和试飞飞行

员,都在为此机型的振动问题出谋划策。1963—1964年,聂荣臻元帅根据钱学森等专家意见,任命全国顶尖层次的空气动力学专家组建国防科委第十六专业组(空气动力专业组)^[16],代表中国空气动力学最高水平。组长钱学森,副组长六名,其中也有当时北京航空学院副院长沈元。这个高级别空气动力学咨询组定期专题讨论工程难题,徐舜寿推荐601所顾诵芬和管德加入该组,他们当时都是30岁出头的年轻人,和全国顶尖空气动力学科学家如钱学森这样的大家前辈共同讨论问题,很了不起。顾诵芬回忆,这个高级别专家组是真正研究问题的,一些标志性问题都提交给专家组进行讨论^[16]。同时,顾诵芬和管德等设计和制造一线科技人员,都在设计和技术上对振动问题想办法、出主意。为取得改进经验,总设计师顾诵芬还曾亲自坐米格19教练机上天近距离观察歼8飞行尾翼振动状态。经过艰难努力,歼8实现首飞(1969年7月5日),到1971年试飞51架次,最大马赫数2.25,最大高度达到20 800 m。1980年初定型,后形成多款歼8系列飞机。在此过程中,管德院士还特别针对当时风洞条件限制研究建立了“高速风洞颤振试验”半相似模型,成功进行了歼8飞机机翼动相似模型的高速颤振试验,也成为可承载其他机型试验的航空工程科学成就。

此后总结中,两位专家都认为是前期“预研不够”,实际应指航空工程科学部分研究不够。我国航空工业和科研事业领导人之一徐昌裕曾在退休后一次会议上,也强调“预研”问题^[18],他通过复合材料、涡轮叶片^①、计算机辅助(设计和制造)技术、主动控制技术(ACT)四个例子,说明关键航空技术,哪一件都要二三十年的努力,不提前布局 and 参与,到时候上型号要用就拿不出来,“型号出来才去搞研究,是太没有远见了”。表现了航空科技所需要的科技进步机制问题,如果前期打下航空科学方面的工程科学基础,可能前景就会好得多。

三、典型卓越工程史话的重要启示

(一)对工程科学发展及工程卓越化的启示

本文通过对早期西方科技发达国家和新中国建国初期工程科学与卓越化相辅相成发展的例子,希望强调下列有关工程科学内涵和发展特征的观点。

1. 工程科学是独立成体系的科学,不能单纯比作通常理解的“科学”

工程科学是独立成体系的科学,不能单纯比作通常理解的“科学”(或基础科学、自然科学),更不是所谓科学在工程上的应用,而是一种出于工程问题的知识再创造,如果把科学认作是发现和探索自然界发展规律的认识,那么卓越工程(当时当地前所未有)所对应的工程科学发展,则应视作针对特定工程问题通过理解自然科学原理(不排除为其创造目的做出新的理解和创建新理论),而对既定知识的新组合或新知识的创造,从而形成解决工程问题的新方案,再而创造出新的人造物体,并可能创造出新的工程技术,从而形成新的知识体系,这样的认知和创造过程与探索自然界的自然科学是完全不同的认知体系。

2. 工程科学发展具有本土性,其内涵和智慧伴随本土卓越工程(或卓越化)发展而进步

工程科学的发展内涵和智慧应是伴随着本土卓越工程(或卓越化)的发展而进步,包括了本土范围从无到有、也包括本土造物从相对低质量到高质量的跃迁,这样的卓越化的本地发生发展,必然要求本地工程科学人才对既有工程科学的新理解、新创造,因此构成了以本土卓越工程人承载的工程科学发展与卓越工程建设的相辅相成,这就好似一种积极的共生相济规律,没有或缺失对于相关工程科学的学习和创造可能会带来低效率的工程或工程失败,同时,工程科学的发展也需要新的卓越工程提出科学问题,创造新的工程科学认识,提出新的解决方案。

^① 讲话中提到,刘多朴,曾任航空工业部科技委副主任,航空材料专家,对该涡轮发动机的解释:“你们不要看到现在这个东西很好,要知道我们干了多少年,干了二十年!”

(二)对卓越工程师培养和教育改革的启示

工程科学知识作为可积累和可传承的类型,可通过一般教育途径获得,但卓越工程或者工程的卓越化,必须依靠新的知识创造以便克服以往因没有认识到(没有相应的人为动机、环境构造等等)的科学规律或者没有适当组合、集成的科学规律而带来的困难和错误。因此,卓越工程师的培养十分必要,而其培养和教育过程中,必须要有类似“卓越之难”的挑战,借以挑战和训练其工程科学认知的科学观、创造欲和能力培养,本文希望提炼上述中外卓越工程发展典型史话中可称为规律性的要点,对我国卓越工程师培养的教育改革提出建议。

基于以上中外史实分析,本文认为,应重视培养卓越工程师的两种基本能力,作为卓越工程人所需要的关键能力素质,核心是具有本土创新意识,勇于和善于解决工程难题,一靠结合本土实际的工程科学理论构造的学习能力和再创造能力,二靠对工程关键环节和节点(元素)关键品质的把握,两大关键能力的培养和教育贯穿工程师所以为“卓越”的职业生涯。

1. 应重视培养工程师的工程科学理论创造力

卓越工程师应是善于学习和创造工程理论的工程专家,他们学习基础科学(特别是掌握数学这门关键技术^⑮),学习工程科学典型理论发展历史,结合本土实际学习工程科学理论的创造意识和方法,具有发现、提炼、定义工程难题背后的科学问题的能力,并有设法创造相应的工程结构理论和实践的能力,因而,学习往往是和创造相联系。为此,卓越工程师培养应有这样的环节:一是识别、提炼和定义工程难题背后的工程科学问题训练;二是从工程科学知识财富中继承和创造新知识,形成新工程科学智慧的训练;三是从基础科学(自然科学)中寻找新工程科学创造支点

的初始训练。

2. 应重视培养工程师的工程科学新方案的实践领悟和实验、试验能力

发展工程科学第二个特点是必须把握对于工程设计元素关键物理性质和性能的认识和领悟能力,为此,识别和有效检验重要结构元素关键性质(临界性质)成为卓越工程师重要能力衡量,尤其当这一工程结构和设计属于开创型的时候更是如此。其中,实验能力包含了对关键元素、元件的识别,以及对其性质和性能测度的有效科学设计、度量关系、重要边界定义及结果分析,同时,所谓关键性能的测度及其试验能力也包含对工业测试资本的经济承担能力等,也在考虑之内。

3. 应重视培养工程师的团队协作意识和能力

面对日新月异的科技时代,所谓卓越工程师培养,特别离不开跨学科群体和团队意识,由此要求卓越工程师必须以团队形式出现,有领军者和骨干成员,但都应具有独立理论和实践开创能力、同时又有团队精神的工程师,在多种国际性工程师教育认证标准,典型如法国的 CTI(2005)、美国的 ABET 标准(1997)、我国的卓越工程师教育认证标准(2025),都有团队合作能力的表述和强制要求。

4. 应重视培养卓越工程师应对创新性挑战的能力

综合本文所述,卓越工程师教育必须包含工程科学理论和实践的挑战性环节,具有“初试锋芒”的应对训练,这也是本文强调工程科学具有与本土工程卓越化过程共生相济特性在教育环节的表现。

四、结语

为着国家民族富强和福祉,不断提升社会文明的智慧创造是人类永远的追求,更是我国工程

^⑮ 数学是一门关键技术的提法,源出于德国政府经济与教育部门曾于 1993—2007 年连续推出一项旨在推动基础科学解决工程科技问题的政策项目,并出版专题文集,提出“数学是一种面向未来的关键技术”,促进数学等基础学科的前沿成果解决工程实践问题,参见 Krebs H J, Jäger W. Mathematics-Key Technology for the Future: Joint Projects between Universities and Industry[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2007

科技人员的追求!新时代赋予我们更多新一代卓越工程师和卓越工程师教育者以新的历史使命,推进中国特色社会主义现代化发展过程中的工程科学,就是这一使命的关键组成部分。

本文强调工程科学的理念和概念与自然科学有区别,更强调工程科学发展与本土卓越工程实践的相辅相成、共生相济,并认为这种共生相济是一种推进卓越工程和人才发展的规律,其相互支撑的本土规律应当不断总结、发扬光大,其间卓越工程师的培训和教育改革也应加入这样的规律认识之中。

工程科学的发展是联系自然科学和卓越工程创造的转换器、启动机,但其联系方式本身不是单纯地转述、简化、借鉴,而是围绕着解决本国本土工程卓越化问题而开展的工程创造,意味着工程科学发展的内涵更多是根据现实的工程难题而开展的科学理论推演、组合、构造和再创造,其思想、方法和工程实践具有独特意义,既有继承中外卓越工程的卓越理论和实践部分,也有发挥本地本土工程人的工程创造的智慧部分,并不能等同于认识自然的科学活动,而是一种改造自然的创造性科学活动,需要今天的工程科学家主动积极参与。

基于以上特点,未来卓越工程的发展,将更多依托本国本土工程卓越化的理论和实践创新,这就要求卓越工程师教育实现更大作为。

参考文献:

- [1]李伯聪. 格物致知与格器致知:对自然科学与工程科学的哲学分析[J]. 社会科学文摘,2026(4):33-35.
- [2]郑丽娜,韩钰,吴瑞林. 从工程和技术科学视角认知新时代卓越工程师及其培养[J]. 清华大学教育研究,2025,46(5):125-135.
- [3]CHANNEL D F. The rise of engineering science: how technology became scientific[M]. Cham: Springer International Publishing, 2019.
- [4]CHANNEL D F. Technological thinking in science[M]//in HANSSON S O (ed.). The role of technology in science: Philosophical perspectives. Dordrecht: Springer, 2015:36-37.
- [5]CHANNEL D F. History of technoscience-erasing boundary of science and technology[M]. London: Routledge, 2017.
- [6]“中国学科及前沿领域发展战略研究(2021—2035)”项目组. 中国工程科学 2035 发展战略[M]. 北京:科学出版社,2023:1-2.
- [7]TIMMOSHENKO S. History of strength of materials [M]. New York: McGraw-Hill, 1953: 54-57.
- [8]GILMOR C S. Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth century France [M]. Princeton: Princeton University Press, 1971:107-115.
- [9]CARDWELL D S L. The Norton history of technology[M]. New York: W. W. Norton, 1995:196-197.
- [10]VINCENTI W G. What engineers know and how they know it[M]. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1990: 146-151.
- [11]CARDWELL D F. From Watt to Clausius, the rise of thermodynamics in the early industrial age [M]. Ithaca: Cornell University Press, 1971:79-81.
- [12]CARDWELL D F. Science and steam engine, 1790—1825 [M]// MATHIAS P. Science and Society, 1600—1900. Cambridge: Cambridge University Press, 1972: 90-96.
- [13]茅海建. 天朝的崩溃:鸦片战争再研究(修订本)[M]. 北京:生活、读书、新知三联书店, 1995: 37-38.
- [14]MANEGOLD K H. Technological academised: education and training of engineers in the 19th century[M]//in KOHL W, LAYTON E T Jr, WEINGART P (eds.). The dynamics of science and technology. Dordrecht: D. Reidel, 1978: 137-138.
- [15]FOX R, GUAGNINI A. Laboratories, workshops, and sites: concepts and practices of research in industrial Europe, 1800-1914[M]. Berkeley: Office for History of Science and Technology, University of California, 1999:204.
- [16]师元光. 中国工程院院士传记:管德传[M]. 北京:航空工业出版社,2014:76-77.
- [17]许珊. 中国工程院院士传记:陆孝彭传[M]. 北京:航空工业出版社,2014:123.
- [18]徐昌裕. 航空科研的历史回顾与体会(在航空科研大事记审定会上的讲话摘要)[J]. 航空材料,1986(12):3-6.