



对钱学森技术科学思想的再认识

方岱宁^{1*}, 刘彬², 裴永茂³, 陈明继¹, 张一慧², 陈浩森¹, 高汝鑫¹

1. 北京理工大学先进结构技术研究院, 北京 100081;

2. 清华大学航天航空学院工程力学系, 北京 100084;

3. 北京大学工学院力学与空天技术系, 北京 100871

* 联系人, E-mail: fangdn@bit.edu.cn

钱学森先生的技术科学思想, 是“钱学森思想”最重要的瑰宝。早在1947年, 钱先生回国探亲和交流期间, 在清华大学、上海交通大学和浙江大学的演讲中就曾指出, 技术科学家主要致力于工程技术的基础研究, 为纯科学和工程之间的桥梁, 起到纽带作用。1957年, 钱先生在《科学通报》正式发表了著名的《论技术科学》一文^[1], 文中明确阐述: “如果我们要把自然科学的理论应用到工程技术上去, ……需要有高度创造性的工作。……这个工作内容本身也成为人们知识的一个新部门: 技术科学。”在技术科学思想的指导下, 新中国在经济和科学研究水平相对落后的历史时期, 取得了以“两弹一星”为代表的一系列重大工程技术突破。在纪念钱学森先生百年诞辰之际, 郑哲敏院士^[2]和童秉纲院士^[3]等著名科学家撰文论述了技术科学的定位及技术科学对力学学科发展的指导意义。沈珠江院士^[4]撰文讨论了技术科学与“工程科学”“应用科学”等用词之间的区别与联系。

2021年5月, 习近平总书记在两院院士大会和中国科学技术协会第十次全国代表大会的讲话中明确指出: “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。要大力加强多学科融合的现代工程和技术科学研究, 带动基础科学和工程技术发展, 形成完整的现代科学技术体系。”^[5]由此, 十分有必要对技术科学的内涵与发展过程重新学习和再认识。最近, 一些学者^[6-8]探讨了技术科学思想对国家科学与技术发展规划和政策制定的影响, 对基础科学新发现和应用、工程技术进步、国民经济发展等方面的带动作用。

本文从技术、科学、工程的定义及其发展过程出发, 试图厘清技术科学在整个技术、科学和工程体系中的定位, 澄清一些容易混淆的概念。然后, 从技术科学发展现状、不同学科与技术科学的关系、高新技术与技术科学的关系、技术科学人才的培养与评价等多个方面进行论述。最后, 笔者总结了重新学习和认识钱学森技术科学思想的一些体会。



方岱宁 中国科学院院士、美国工程院外籍院士, 北京理工大学教授。现任国际应用力学学会主席, 中国力学学会理事长。主要从事先进材料与结构力学理论、计算与实验方法研究, 在多场耦合作用下的电磁固体材料变形与断裂、轻量化多功能结构设计、超高温材料与结构力学性能测试评价等方面取得了有影响力的学术成果。

1 技术、科学、工程的定义与特征及发展过程

技术科学是在人们将科学理论和方法用以指导技术研发的过程中产生的。因此, 想要准确把握技术科学的概念和定位, 必须了解技术、科学、工程的定义与特征及发展过程。

技术的定义可表述为^[9]: “人类改变或控制其周围环境的手段或活动。泛指根据生产实践经验和科学原理而发展形成的各种工艺操作过程、方法、器具和技能。”技术的主要特征包括目的性和进步性、可移植性、保密性等。目的性和进步性, 是指技术以发明革新为核心, 对工程应用起直接支撑作用。可移植性或共性, 是指技术一般适用于若干工程应用中的同类问题。技术的保密性, 是指技术往往采用知识产权的方式予以保护, 正如习近平总书记在2018年的两院院士大会上所指出: “关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的。”技术与人类的诞生一样古老^[9,10], 最初产生于人们改造自然的生产实践活动, 如图1所示; 直到19世纪后期, 科学理论和科学实验才在技术的发明过程中发挥了比较重要的作用。因



图 1 技术的发展过程

Figure 1 The development of technology

此,技术的诞生远早于科学,技术并不隶属于科学。

科学的定义可表述为^[9]:“运用范畴、定理、定律等形式反映现实世界各种现象的本质、特性、关系和规律的知识体系。”科学的主要特征包括普遍性和公理性、自由探索性、公开性等。普遍性和公理性,是指注重自然科学底层和共性原理的探索。科学的自由探索性与技术的目的性,两者是有差异的,表明科学研究是认识客观世界的探索活动,一般没有功利性,也不易组织实施。科学的公开性与技术的保密性,两者是不同的,是指科学成果一般公开发表,为全人类所共有。人类的科学活动开始于约公元前5世纪,而近现代科学则起源于16~17世纪^[10],科学的发展过程展示于图2。

关于工程的定义,《中国大百科全书(第二版)》的表述为^[9]:“应用科学知识使自然资源转化为结构、机械、产品、系统和过程以造福人类的专门技术”,而笔者则更倾向于周光召院士给出的表述:“人类有组织地综合运用多门科学技术进行的大规模改造世界的活动”(https://www.sohu.com/a/438969812_120051517)。工程的主要特征包括规模性、专用性、综合性等。规模性,是指工程的规模较大,相对于技术,其价值更直接,作用效果更规模化。专用性,是指综合运用多项技术解决一些个性化的问题,完成特定的工程任务。综合性,是指工程中除了要考虑技术的先进性和可行性,还要考虑成本和质量,做到经济、实用、美观、环保等。英文“Engineering”一词最早出现于18世纪的欧洲,当时主要是与军事相关的建造活动,并逐步发展为包括土木工程、机械工程、电气工程等在内的现代意义上的工程,如图3所示,其起源晚于技术和科学。

综上所述,技术、科学、工程三者虽然存在一定联系,但从其定义、特征和发展过程来看,是三个不同的范畴。技术与科学两者没有必然的单向依赖关系,而它们都对工程的发展起到了推动作用。

2 技术、科学、工程的相互关系及技术科学的思想起源

2.1 技术、科学、工程的相互关系

关于技术、科学和工程的相互关系,上海交通大学的江晓原教授^[11]批判地指出:“大家都习惯同意这样的观点,不重视科学研究,我们的技术就会是无源之水、无本之木。于是科学和技术的关系图就形成了,科学是基础、技术是手段。这个容易引起混淆的观点是在二战结束后出自美国范内瓦·布什提交给杜鲁门总统关于战后科学研究计划的报告《科学:无尽的前沿》。”该报告指出^[12]:“今天,基础研究已成为技术进步的带路人,这比以往任何时候都更加明确了。”但江晓原教授^[11]认为:“科学与技术是两个平行系统。”所以,技术是技术,科学是科学,工程是工程,三者之间有重叠但比例不高。

从技术、科学、工程的定义、特征与发展过程来看,这三者是不同类型的创造性活动,有不同的发展规律和价值。(1)技术的“源泉”不只是科学,其另一个“源泉”是生产实践,技术的历史远长于科学,技术有独立的使命和贡献。(2)技术向着知识化、科学化、系统化发展,但技术的发展并不一定都依赖于自然科学的新突破。(3)技术发展造就先进的实验手段和仪器,助力进行新的科学探索 and 发现,推动科学理论的突破。比如,蒸汽机的发明催生了热力学。(4)技术是工程和科学之间不可或缺的关键桥梁,先进技术必然促进工程发展。例如,盾构技术推进了交通运输工程,可重复运载火箭技术推进了航天工程,等等。技术、科学和工程三者经历了一段平行发展的时期,而后技术与科学的融合产生了技术科学^[1],技术与工程的结合产生了工程技术。因此,笔者认为技术、科学、工程、技术科学、工程技术等概念之间的关系可以用图4所示的五线关系来表述。



图 2 科学的发展过程

Figure 2 The development of science

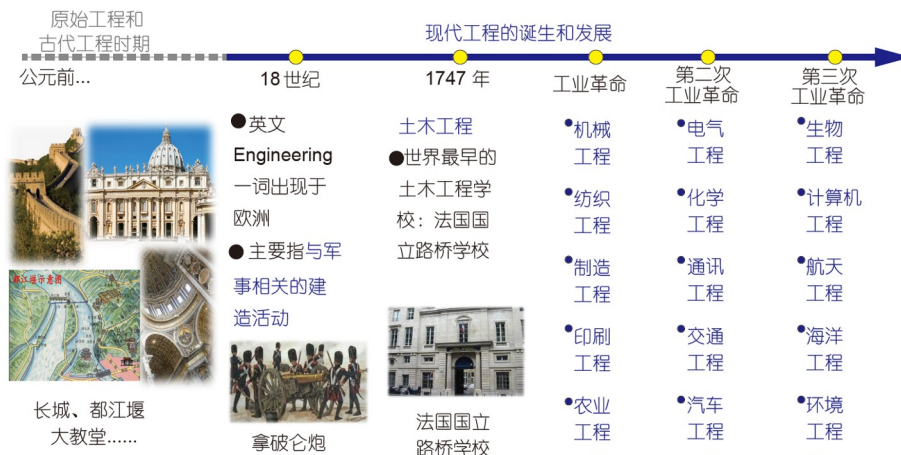


图 3 工程的发展过程

Figure 3 The development of engineering

2.2 技术科学思想的起源

关于钱学森先生技术科学思想的起源，可以从其求学和工作经历中管窥一斑。技术科学萌芽于20世纪初的德国哥廷根大学。德国数学家克莱因开创了应用数学方向，现代空气动力学奠基人普朗特开创了应用力学方向，形成了享誉世界的哥廷根学派。这一学派产生了冯·卡门和铁木辛柯这样卓越的技术科学家。20世纪30年代，钱先生在加州理工学院师从冯·卡门教授，1939年获博士学位留校工作，从事火箭喷气推进、燃料和结构变形等研究。他发现这类研究工作既不属于纯科学范畴也不属于纯技术范畴，而是两者之间的融合。1947年，钱先生总结了应用力学和相关领域研究活动的实践，从中提炼出完整的技术科学思想，并开始在中国的科教界传播^[1,13~15]。

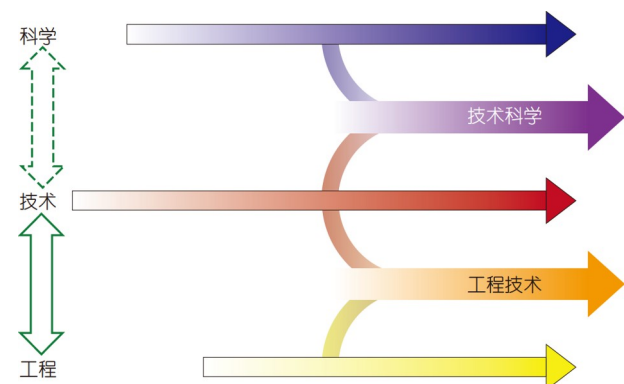


图 4 技术、科学、工程、技术科学和工程技术的相互关系图

Figure 4 Diagram of the interrelationships among technology, science, engineering, technological science and engineering technology

根大学。德国数学家克莱因开创了应用数学方向，现代空气动力学奠基人普朗特开创了应用力学方向，形成了享誉世界的哥廷根学派。这一学派产生了冯·卡门和铁木辛柯这样卓越的技术科学家。20世纪30年代，钱先生在加州理工学院师从冯·卡门教授，1939年获博士学位留校工作，从事火箭喷气推进、燃料和结构变形等研究。他发现这类研究工作既不属于纯科学范畴也不属于纯技术范畴，而是两者之间的融合。1947年，钱先生总结了应用力学和相关领域研究活动的实践，从中提炼出完整的技术科学思想，并开始在中国的科教界传播^[1,13~15]。

2.3 技术科学思想的内涵与特征

关于技术科学思想的内涵与特征，钱学森先生^[1]指出：“要使工程技术活动克服经验的局限，建立有科学基础的工程理论，就需要进行自然科学和工程技术的综合，建立一个新的知识部门：技术科学；技术科学以自然科学的理论为基础，针对工程技术中带普遍性的问题，既不是自然科学本身，

也不是工程技术本身。”沈珠江院士^[4]针对技术科学思想的论述指出：“技术科学就是应用科学，是运用还原论方法从工程中抽象出共性问题进行研究的科学。技术科学的命名原则是原科学名称加‘应用’或‘工程’等限制词，如应用数学、工程力学等。……也有人把应用的领域加在前面，如建筑力学、船舶力学。……有的在应用领域后面加上‘科学’两字，如材料科学、信息科学、环境科学等。”刘则渊^[15]和李春成^[6]等学者针对技术科学思想的论述指出：“技术科学具有四个双重性的基本特征(即中介性和独立性、基础性和应用性、纵深性和广谱性、多科性和融合性)；技术科学是创新驱动发展战略的中心环节……大国博弈中发达国家创新对策的背后体现的是技术科学之争。”

为了更好地阐明技术科学，本文梳理探讨关于技术科学中英文名称的不同表述。英文中能够与“技术科学”相对应的词汇主要有两个：第一，钱学森先生^[13]1948年发表的第一篇技术科学论文，名称是*Engineering and Engineering Sciences*。有一次，钱令希先生去参加国际会议前请教钱学森先生关于技术科学的译名，钱学森先生的答复也是“*Engineering Science*”^[16]。对应于这一英文名称，有些学者也将技术科学称为工程科学^[14]。第二，技术科学的另一翻译是“*Technological Science*”，如《中国大百科全书(第二版)》^[9]及中国科学院与国家自然科学基金委员会联合主办的《中国科学：技术科学》期刊采用的都是“*Technological Science*”这一译名。澳大利亚技术科学与工程院(Australian Academy of Technological Sciences and Engineering)和挪威技术科学院(Norwegian Academy of Technological Sciences)也都采用了“*Technological Science*”这一表述。习近平总书记在两院院士大会和中国科学技术协会第十次全国代表大会的讲话中明确提到了“现代工程、技术科学和工程技术”，并没有采用“工程科学”的表述。上述两种英文译名，从其内涵而言是互通的，但所对应的准确的中文表述还是“技术科学”。

2.4 钱学森技术科学思想历程

回顾钱学森先生的技术科学思想历程，大致可以分为三个阶段。第一阶段是技术科学思想的起源：在加州理工学院开展火箭喷气推进等研究，发现这类研究是技术和科学的融合。第二阶段是技术科学思想的正式提出：1947年总结了应用力学和相关领域研究活动的实践，正式提出技术科学的概念与思想。第三阶段是技术科学思想的发展完善：钱学森先生结合中国国防事业，进一步完善形成有中国特色的技术科学思想，推动了以“两弹一星”为代表的一系列重大工程技术突破。

3 从两个视角审视自然科学和技术科学近年来的发展

在本节中，一方面通过对比各国科研投入比例的差别，

分析国家整体科技实力发展的政策倾向因素。另一方面，研究解读了21世纪以来以诺贝尔奖为代表的重大科学与技术突破，认识到技术与技术科学的发展是自然科学突破的重要支撑这一新时期的发展特征。

3.1 各国的科研投入反映的情况

前文提到的范内瓦·布什提交给杜鲁门总统的关于战后科学研究计划的报告，在欧洲和中国产生了相当大的影响，江晓原教授^[11]将其称为“战略欺骗行动”。实际上，在1960~2015年的美国年度科技研发经费总盘子中，自然科学基础研究经费占比15%左右，技术与技术科学的研究经费比例则要高很多；而NSF(National Science Foundation)拨款只占美国年度科技研发总经费的1.5%，在NSF经费投入中对自然科学的资助占20%左右，技术与技术科学的研究经费约80%。这表明美国在自然科学研究的投入远低于技术科学基础研究和关键技术的研究投入。2020年8月，美国确定了5大研发预算优先事项，包括公共安全与创新、国家安全、能源和环境领域以及太空领域，以确保全球领先；这些优先事项也都更加偏重技术与技术科学。2021年6月，美国国会参议院通过了《美国创新与竞争法案》，将在5年内提供1000亿美元用于提升全球竞争力的10个关键技术领域；提议将NSF更名为美国科学与技术基金会，增设一个技术局，并大幅增加资金投入。投入方向的偏倚反映了美国的真实意图：持续重视技术和技术科学，并加大投入以确保美国未来核心技术的持续强大。

与美国相比，其他西方国家自然科学研究经费在科技研发总经费中的占比则要高得多。例如，2002年澳大利亚自然科学研究经费比例为24.9%，2004年瑞士自然科学研究经费比例高达28.7%；直到2015年，法国的自然科学研究经费仍然占比达到24.3%。可以说，其他西方发达国家几乎都比美国更重视自然科学研究。然而，从结果来看，自然科学研究投入的增多并不一定带来整体科技实力的显著提升。令人欣慰的是，中国在快速追赶世界先进水平的二三十年间，尽管科研经费总额从四百多亿快速增长到两万多亿，但其中大部分经费支持的是技术和技术科学研究。可以说，坚持对技术与技术科学的投入，是中国科技崛起的重要原因。尤其是我国的国防工业，始终聚焦于技术与技术科学，促使武器装备快速发展，催生了从两弹一星到歼20、航空母舰在内的高端国防装备，奠定了我国国防安全的基石^[17,18]，这一现象值得大家思考。(本节经费占比数据源自文汇报新闻文章《美国是因为重视基础科学而强大的吗？》，详见<http://www.whb.cn/zhuzhan/jtxw/20211109/433395.html>)

3.2 技术与技术科学的发展支撑了科学突破

21世纪以来，自然科学的突破也越来越倚重于技术与技术科学的发展。例如，2017年诺贝尔物理学奖和化学奖分别

授予引力波探测和冷冻电镜技术, 2018年中国FAST首次发现毫秒脉冲星, 2022年韦布空间望远镜捕捉首批光子; 在这些重大科学突破中, 技术与技术科学的发展均起到了关键支撑作用. 从自然科学和技术科学的角度重新审视21世纪以来的诺贝尔奖, 杨中楷等人^[19]认为, 2000~2014年的诺贝尔奖物理学领域呈现出自然科学和技术科学平分秋色的局面, 而化学、生理学或医学领域明显地出现了趋向技术科学一边倒的局面. 笔者将2015年之后的诺贝尔奖也加入统计, 并对每项获奖成果的属性重新进行研判, 以相对保守的方式估计: 在2000~2021年的32项诺贝尔物理学奖(含同年授予多项成果的情况)中, 约10项成果以技术科学属性为主, 约4项是技术科学与自然科学属性并重, 技术科学属性超过1/3; 25项诺贝尔化学奖(含同年授予多项成果的情况)中, 约15项成果以技术科学属性为主, 约1项是技术科学与自然科学属性并重, 技术科学属性超过半数; 24项诺贝尔生理学或医学奖(含同年授予多项成果的情况)中, 约9项成果以技术科学属性为主, 约4项是技术科学与自然科学属性并重, 技术科学属性接近半数. 从上述实质性成果的类型分析中可以看到, 技术与技术科学的发展是自然科学突破的重要支撑, 特别是核心实验技术和制备技术的发展与突破, 往往起到关键作用.

4 不同学科与技术科学的关系

4.1 自然科学学科与技术科学的关系

钱学森先生^[1]认为, 自然科学与技术科学之间存在紧密的反馈关系: 一方面, 要看到自然科学作为技术科学的基础的一面; 另一方面, 也要看到技术科学对自然科学的贡献. 从很多学科的发展历史可以看出, 自然科学学科向应用方向的拓展是产生技术科学知识的重要方式之一. 例如, 数学、力学、物理学、化学等自然科学学科逐渐发展形成了应用数学、应用力学、应用物理学、应用化学等分支方向, 这些分支也构成了技术科学知识体系的重要组成部分.

在众多学科中, 力学由于其自身的发展历程和学科特点, 是自然科学与技术科学结合的典型代表. 力学是关于力、运动及其关系的科学, 主要研究介质运动、变形、流动的宏观行为, 并揭示力学过程及其与物理学、化学、生物学等过程的相互作用规律^[20]. 钱学森先生在2007年对中国力学学会成立五十周年之际的贺词中曾提到: “力学有两方面的服务对象: 一是为工程技术服务, 另一是为发展自然科学服务, 两者是相辅相成, 相互促进的.”^[21] 从力学的发展历程来看, 力学的基础和应用属性的体现程度有所不同^[22]. 在力学发展的早期, 其基础属性占主导, 先后经历亚里士多德、托勒密、哥白尼、开普勒、伽利略、牛顿等人的发展, 最终统一于牛顿三定律和万有引力定律, 这时期前后长达两千年, 被称为牛顿力学时期^[22]. 力学是自然科学形成的第一门学科, 也形成了影响至今的现代自然科学研究范式. 到了拉格朗日-哈密

顿力学时期, 分析力学间接促进了数学变分法等自然科学基础研究的发展, 并对牛顿动力学体系进行了重塑, 在承接牛顿力学体系的同时也深刻启发并影响着现代物理学的诞生与进一步发展. 进入19世纪末20世纪初, 着眼于发展工程技术的应用力学分支逐渐从力学中被分离出来, 其中最具代表性的学派是哥廷根应用力学学派, 代表人物是普朗特, 其学术思想后来经过普朗特的弟子冯·卡门和铁木辛柯等传至美国, 为美国航空航天技术的发展起到了关键性作用, 之后经冯·卡门的弟子钱学森、郭永怀和钱伟长等传入中国^[22]. 这一时期的力学发展不仅促进了航空航天等高新技术的大发展, 而且也促进了自然科学的繁荣; 总体而言, 力学的学科属性在这一阶段开始逐渐侧重于应用. 20世纪至今, 力学开始向诸门工程和科学学科辐射, 逐渐建立了以力学为引导的技术科学群^[22], 衍生出了诸如飞行器力学、机器人动力学、微纳力学、生命力学、信息力学等力学分支.

力学是技术科学这一概念最早来源于钱学森先生^[1], 他曾指出: “力学对航空技术的贡献是有决定性的, 是技术科学与工程技术相互作用的典型. 力学本身也就成为技术科学的一个范例, 也是我们现在对技术科学这一概念的来源.” 目前, 西方国家的部分高校仍采用“Engineering Science and Mechanics”作为系名或研究生招生方向, 其中的“Engineering Science”和“Mechanics”即“技术科学”和“力学”. 例如, 美国宾州州立大学和弗吉尼亚理工大学均分别于1974和1972年将“工程力学系”更名为“技术科学与力学系”, 日本芝浦工业大学建立有“技术科学与力学系”, 美国佐治亚理工大学设立了技术科学与力学的招生方向, 这也从侧面说明了力学与技术科学的深刻渊源.

4.2 众多工科学科与技术科学的关系

关于工科学科与技术科学的关系, 钱学森先生^[1]曾指出: “技术科学是从实践的经验出发, 通过科学的分析和精炼, 创造出工程技术的理论. 所以技术科学是从实际中来, 也是向实际中去的. 技术科学的主要的作用是从工程技术的实践, 提取具有一般性的研究对象, 它研究的成果就对那些工程技术问题有普遍的应用.” 由此可见, 技术科学知识的另一个重要产生方式是研究工程技术中概念性、关键性、共同性的规律, 给出一些工程上解决类似问题的共同方案^[23]. 对于系统科学与工程、仪器科学与技术、电气工程等众多工科学科而言, 其强调基础共性的内容也构成了技术科学知识体系的重要组成部分.

以系统科学与工程这一学科为例, 进一步探讨工科学科与技术科学的关系. 系统科学与工程主要研究系统的结构与功能关系、演化和调控规律, 以不同领域的复杂系统为研究对象, 从系统和整体的角度, 探讨复杂系统的性质和演化规律, 发展优化和调控系统的方法. 从起源与发展方面来看, 我国系统科学与工程学科的萌生主要源于钱学森先生在从事

中国航天事业的研究与管理工作中广泛的实践积累。钱学森先生于1955年回国后,先后担任了中国科学院力学研究所所长、国防部第五研究院院长等重要领导职务,积累了丰富的科研和生产组织管理经验。1978年9月,钱学森先生在《文汇报》发表了《组织管理的技术——系统工程》,对系统工程的概念、内涵、应用前景等作了分析,该文章成为系统工程中国学派形成的重要标志,是系统工程在中国发展的重要里程碑。关于系统科学与工程学科的属性,沈珠江院士^[4]曾指出:“工程系统学应当是一门技术科学,它所研究的内容是‘系统技术’,现在常称为‘系统工程’。”同时他也主张:“系统科学可划分为理论系统学和工程系统学两部分,后者是一门技术科学。”因此可以认为,系统科学与工程学科中基础性、共同性的研究内容应隶属于技术科学的范畴。

5 高新技术与技术科学的关系

创新的科学成果是催生高新技术的强大力量之一,但这并不意味着高新技术的发展必须依赖于自然科学领域的最新突破。实际上,很多时候是技术科学对高新技术发展起到重要支撑作用。以我国的高铁技术为例,起步基础是很薄弱的,中国铁路在改革开放的初期,甚至到90年代,与发达国家,如欧洲、北美的铁路相比,起码落后30年以上^[24]。从2004年前后开始,经过资源归集与整合重组、技术引进与消化吸收、自主创新形成核心能力、产业延伸确立国际竞争优势等四个阶段^[24],基本形成了核心技术的自主创新能力和全球产业竞争力。在这一过程中,主要是以关键技术的引进、消化、吸收、再创新为发展脉络,属于技术科学支撑下的核心技术突破。另一个例子是我国5G技术和市场的迅猛发展,其关键在于天线小型化技术、微基站技术、毫米波技术、大规模MIMO技术、D2D技术等,基本没有自然科学层面的新突破,而是依赖技术科学与核心技术的创新。再如近年来开始引发关注的“元宇宙”,它不是一个自然科学层面的新概念,而是扩展现实、人工智能、云计算、数字孪生、区块链等新技术的集成升华,是整合多种新技术而产生的虚实相融的互联网应用和社会形态,其发展同样是基于技术科学与核心技术的突破。埃隆·马斯克(Elon Reeve Musk)是产业技术创新的典型代表,无论是可回收的运载火箭、新能源汽车,还是星链计划、脑机接口计划等,多是创新性地集成利用已有科研成果来进一步发展各种高新技术,这为技术科学的发展提供了一条新思路。

我们重新审视2018年《科技日报》列出的制约我国工业发展的35项“卡脖子”关键技术^[25],诸如光刻机、芯片、航空发动机短舱、重型燃气轮机等,无一不是国外已经存在却对我国实施封锁的技术,自然科学层面的知识为人类共享,早已没有什么秘密,所需要的是以技术科学为基础来攻克这些关键技术。2020年9月,时任中国科学院院长的白春礼院士就明确指出:“将‘卡脖子’的问题和国外出口管制的清单转化

为我们的任务清单”(https://www.chinanews.com.cn/gn/2020/09-16/9292342.shtml),其中,技术科学研究将发挥举足轻重的作用。

6 技术科学人才的培养与评价

6.1 人才评价体系的现状与要求

以技术科学思想为指导,思考中国人才培养与评价体系的现状,具有非常重要和现实的意义。在“五唯”评价体系中,技术科学与技术型人才面临尴尬的境地:与从事自然科学研究的人才比,由于技术本身的保密特征,技术科学与技术型人才在论文质量、影响因子、高被引等评价体系中处于劣势。美国对于技术科学成果与技术科学人才的评价,也许能带来启发。《麻省理工技术评论》(MIT Technology Review)从2001年开始每年都会评出当年的“十大突破性技术”,极大促进了全球对于新兴关键技术突破的关注。另一个例子是前文提到的埃隆·马斯克,以本科学历当选美国工程院院士,其核心技术贡献均未以论文形式发表。上述案例充分说明了美国对技术科学成果与技术型人才的重视。

令人欣慰的是,2018年11月,教育部发布了关于开展清理“唯论文、唯帽子、唯职称、唯学历、唯奖项”专项行动的通知^[26],期望深化高校体制改革,健全立德树人落实机制,扭转不科学的人才评价导向。“破五唯”更加突显出了“分类、分赛道”评价的重要性:针对自然科学、技术科学、技术、工程技术等不同类型的研究人才和成果,应该分不同“赛道”,设置不同的评价指标。这方面,我国国防系统的人才培养与评价标准体系尤其值得借鉴:在国防科技领域,不以“五唯”为评价标准,对国防科技人才(如军事科技领域青年托举人才、国防科技领域青年拔尖人才与国防科技卓越青年人才等)的成长起到极大推动作用。

6.2 人才培养的教育架构

如何革新当前我国人才培养与评价体系架构,以适应社会层面技术科学的发展,是当前需要思考的重要问题。德国在应用科学与技术科学人才培养方面的“他山之石”值得学习与借鉴。在大学门类方面,德国综合研究型大学约110所,艺术、音乐、体育类等专门院校约58所,而技术科学大学则多达约232所,占比超过50%。德国技术科学大学的普及正是德国工业崛起的核心^[27]。在人才培养方面,德国研究与创新活动的成功,最重要的因素就是特别重视培养各类高水平专业技术人才,其中二元制职业教育是培养应用技术型人才的重要途径。在二元制的培养体系中,学校与企业共同承担培养任务,理论和实际紧密结合、教学与实践无缝对接是核心理念。德国二元制职业教育的成功,从人才培养源头提升了制造业技术水平,对德国的技术生产力具有特殊意义,是德国制造业产品优良质量以及技术科学创新驱动发展的关

键保障。

7 一些思考与建议

通过对钱学森先生技术科学思想的重新学习与再认识,笔者有如下一些思考和建议:

(1) 技术、科学、工程三者虽然存在一定联系,但从其定义、特征和发展过程来看,是三个不同的范畴。技术的诞生远早于科学,工程的形成晚于科学的诞生。科学与技术两者没有必然的单向依赖关系,它们都对工程的发展起到了推动作用。

(2) 技术、科学和工程经历了一段平行发展的时期,而技术与科学的融合产生了技术科学。钱学森先生在中国最早提出了系统的技术科学思想,澄清了各类科技工作的属性层次及相互关系,其后我国科技界践行他的理念,推动产生了两弹一星等重大成果。钱学森先生认为Engineering Science就是技术科学,而从Engineering Science直译中文为工程科学来看,技术科学与工程科学是互通的。

(3) 20世纪40年代,美国学者范内瓦·布什提出了《科学:无尽的前沿》的报告,强调科学研究的重要性,造就了美国自然科学基金NSF。现在美国国会通过了《美国创新与竞争法案》“无尽的前沿”法案,强调了技术研究的重要性,这里的“技术”实际上指的是技术科学和技术,这促成了美国NSF新增技术局。该法案的执笔人之一查尔斯·舒默提出将NSF更名为NSTF(National Science and Technology Foundation),这说明基础研究应该包括自然科学基础研究和工程科学基础研究。

(4) 二战后,重视技术与技术科学是美国科技领先世界的主要原因之一。今天,美国为保持自身科技全面领先地位进行封锁,而中国在攻克诸多“卡脖子”技术问题过程中,起最直接支撑作用的是技术科学。核心技术手段对自然科学突破

起到关键作用,2000年以来的诺贝尔奖(物理学、化学、生理学或医学),具有技术科学属性的接近半数。

(5) 自然科学学科中强调应用性的内容和工科学科中强调基础性的内容,都构成技术科学知识体系重要组成部分。科学的基础研究是由自然科学基础研究和工程科学基础研究组成的,技术科学是联系自然科学与应用之间的桥梁。

(6) 虽然我国在自然科学领域与美国仍有差距,但依然在高铁路、5G技术等方面实现了国际领先水平的高新技术突破和应用。目前,我国的自然科学研究进步显著,正逐步追赶世界领先水平;“中国制造”在某些工程能力上已达到国际领先;最大的短板是关键技术落后于发达国家。因此,需要重视技术科学,实现关键技术的自主替代与源头创新。

(7) 在人才培养过程中,要重视技术科学中的基础性和应用性并重特征,学习德国应用科学(技术科学)大学的成功经验,人才培养要与企业紧密结合。在人才评价体系中,避免“五唯”评价,要充分重视技术科学与技术人才特征,需要分赛道、分标准,我国国防系统的人才培养与评价标准体系尤其值得借鉴。

(8) 以钱学森先生为代表的战略科学家厘清了中国科技的门类与布局,对中国科技的起步、腾飞发挥了关键作用。习近平总书记指出:“大力加强多学科融合的现代工程和技术科学研究,带动基础科学和工程技术发展,形成完整的现代科学技术体系。”^[5]因此,如何结合新时代科技发展特点,重新梳理和优化现代科学技术体系,是当前这个重大历史时期中国科技发展的重中之重。

(9) 科学研究应当以国家重大工程和重点装备发展需求为牵引,建立优势学科带动、多学科交叉融合的平台建设新模式,打造技术科学国家“创新平台+”,依托国家级创新平台组建“技术科学创新国家队”。

推荐阅读文献

- 1 Tsien H-S. On technological science (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 1957, 8: 97–104 [钱学森. 论技术科学. 科学通报, 1957, 8: 97–104]
- 2 Cheng C-M. Thoughts of Hsue-Shen Tsien on engineering sciences—In memory of Hsue-Shen Tsien's 100th anniversary (in Chinese). *Chin J Theor Appl Mech*, 2011, 43: 973–977 [郑哲敏. 学习钱学森先生技术科学思想的体会——纪念钱学森先生百年诞辰. 力学学报, 2011, 43: 973–977]
- 3 Tong B G, Yu Y L, Bao L. Engineering science research requires founding of new theories for specific problems in engineering and technology: In honor of 100th birthday of Qian Xuesen (in Chinese). *J Eng Stud*, 2011, 3: 1–7 [童秉纲, 余永亮, 鲍麟. 技术科学要求创造工程技术的理论——纪念钱学森先生百年诞辰. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2011, 3: 1–7]
- 4 Shen Z J. On the applied sciences and engineering sciences (in Chinese). *Eng Sci*, 2006, 8: 18–21 [沈珠江. 论技术科学与工程科学. 中国工程科学, 2006, 8: 18–21]
- 5 Xi J P. Accelerate the construction of a strong country in science and technology, and achieve a high level of scientific and technological self-reliance and self-improvement (in Chinese). *Qiushi*, 2022, 9, http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-04/30/c_1128607366.htm [习近平. 加快建设科技强国 实现高水平科技自立自强. 求是, 2022, 9, http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2022-04/30/c_1128607366.htm]
- 6 Li C C. Review of technological science development, planning concepts and policy outlook (in Chinese). *Innov Sci Technol*, 2021, 21: 1–10 [李春成. 技术科学发展回顾、规划理念与政策展望. 创新科技, 2021, 21: 1–10]
- 7 Sun H Y. Modern engineering and technological sciences drive the development of new discoveries and applications in basic sciences (in Chinese).

- Viewpoint, 2022, (1): 23–27 [孙海鹰. 现代工程和技术科学带动基础科学新发现和应用发展. 科技中国, 2022, (1): 23–27]
- 8 Sun H Y. Modern engineering and technological science drive the progress of engineering technology and guide economic development (in Chinese). Viewpoint, 2022, (2): 35–38 [孙海鹰. 现代工程和技术科学带动工程技术进步并引导经济发展. 科技中国, 2022, (2): 35–38]
 - 9 General Editorial Board of Encyclopedia of China. The Encyclopedia of China. 2nd ed. (in Chinese). Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 2009 [《中国大百科全书》总编委会. 中国大百科全书. 第二版. 北京: 中国大百科全书出版社, 2009]
 - 10 Jiang X Y. History of Science and Technology (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2001 [江晓原. 简明科学技术史. 上海: 上海交通大学出版, 2001]
 - 11 Jiang X Y. Reexamine: Technology and science are two parallel systems (in Chinese). Wenhui Daily, 2021-08-05 [江晓原. 重新审视: 技术与科学是两个平行系统. 文汇报, 2021-08-05]
 - 12 Bush V, Holt R D. Science, the Endless Frontier. Princeton: Princeton University Press, 2021
 - 13 Tsien H-S. Engineering and Engineering Sciences. J Chin Inst Eng, 1948, (6): 1–14
 - 14 Tsien H-S. Tan Q M, trans. Engineering and Engineering Sciences (in Chinese). Adv Mech, 2009, 39: 643–649 [钱学森, 著. 谈庆明, 译. 工程和工程科学. 力学进展, 2009, 39: 643–649]
 - 15 Liu Z Y. On Hsue-Shen Tsien's thoughts of the science of science (in Chinese). Stud Sci Sci, 2012, 30: 5–13 [刘则渊. 论钱学森的科学学思想. 科学学研究, 2012, 30: 5–13]
 - 16 Qian L X. Hsue-Shen Tsien and Computational Mechanics (in Chinese). In: Symposium on Hsue-shen Tsien's Scientific Contribution and Academic Thoughts, 2001. 140–146 [钱令希. 钱学森先生与计算力学. 见: 钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集, 2001. 140–146]
 - 17 Du P. Strengthening technical science is the key to realizing the self-reliance of high level science and technology (in Chinese). Pop Trib, 2021, (8): 4–7 [杜鹏. 加强技术科学是实现高水平科技自立自强的关键. 群言, 2021, (8): 4–7]
 - 18 Jiang Y P. Hsue-Shen Tsien and Applied Sciences (in Chinese). Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2015 [姜玉平. 钱学森与技术科学. 上海: 上海人民出版社, 2015]
 - 19 Yang Z K, Liu Z Y, Liang Y X. The technological sciences trend of the achievements' nature of the Nobel Prize for natural science awards: Since the 21st century (in Chinese). Stud Sci Sci, 2016, 34: 4–12 [杨中楷, 刘则渊, 梁永霞. 21世纪以来诺贝尔科学奖成果性质的技术科学趋向. 科学学研究, 2016, 34: 4–12]
 - 20 Bai K C, Zhan S G, Zhang P F, et al. Mechanics 2006-2015: Situation and prospect (in Chinese). Adv Mech, 2019, 49: 599–621 [白坤朝, 詹世革, 张攀峰, 等. 力学十年: 现状与展望. 力学进展, 2019, 49: 599–621]
 - 21 Xie X L. The roles of “to radically reform & to thoroughly overhaul” in the setup of the fundamental mathematical and mechanical knowledge systems of the mechanics (in Chinese). Chin Quart Mech, 2012, 33: 544–557 [谢锡麟. “正本清源”在力学之数学及专业基础知识体系建立中的作用. 力学季刊, 2012, 33: 544–557]
 - 22 Yang W, Zhao P, Wang H T. An Overview of Mechanics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [杨卫, 赵沛, 王宏涛. 力学导论. 北京: 科学出版社, 2020]
 - 23 Cheng C-M. Start from Hsue-Shen Tsien's thoughts of engineering sciences (in Chinese). Study Times, 2017-12-27 [郑哲敏. 从钱学森的技术科学思想谈起. 学习时报, 2017-12-27]
 - 24 Chen J, Mei L, Zhao C. The mystery of breakthrough of core technology capability of high-speed railway—Evolution of CRRC's key strategy (in Chinese). Tsinghua Bus Rev, 2018, (6): 36–42 [陈劲, 梅亮, 赵闯. 高铁核心技术能力突破之谜——中车“核”战略的演进. 清华管理评论, 2018, (6): 36–42]
 - 25 Liu Y D. What Takes Our Fate by the Throat (in Chinese). Beijing: China Workers Publishing House, 2019 [刘亚东. 是什么卡住了我们的脖子. 北京: 中国工人出版社, 2019]
 - 26 Ministry of Education. Notice of the General Office of the Ministry of Education on the Special Action of “Only papers, only titles, only professional titles, only academic degrees, only awards” (Letter of the Office of Education and Technology [2018] No. 110) (in Chinese). 2018 [教育部. 教育部办公厅关于开展清理“唯论文、唯帽子、唯职称、唯学历、唯奖项”专项行动的通知(教技厅函[2018]110号). 2018]
 - 27 Li M L. Historical institutionalism analysis of engineering education system—Paradigms in America and Germany (in Chinese). Res High Ed Eng, 2009, (2): 12–22 [李曼丽. 工程教育体系的历史制度主义分析——美国与德国的范例. 高等工程教育研究, 2009, (2): 12–22]

Summary for “对钱学森技术科学思想的再认识”

Re-understanding Hsue-shen Tsien's thoughts on technological sciences

Daining Fang^{1*}, Bin Liu², Yongmao Pei³, Mingji Chen¹, Yihui Zhang², Haosen Chen¹ & Ruxin Gao¹

¹ Institute of Advanced Structure Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

² Department of Engineering Mechanics, School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³ Department of Mechanics and Engineering Science, College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China

* Corresponding author, E-mail: fangdn@bit.edu.cn

Hsue-shen Tsien's thoughts on technological sciences represent the most important treasure among various aspects of Hsue-shen Tsien's thoughts. His thoughts on technological sciences not only played a pivotal role in the development of atomic and hydrogen bombs as well as man-made satellites, but also are of significant implications under the current international circumstances, in which the competition of national core technologies among different countries becomes increasingly intensive. To clarify the role of Hsue-shen Tsien's thoughts on technological sciences in the layout and planning of science and technology in our country, this paper discusses and clarifies the attributes and correlations among technology, science, engineering, technological sciences and engineering technology. This paper reviews the ideological origins of technological sciences, and analyzes the recent developments of natural sciences and technological sciences. Then, it illustrates the foundational roles that technological sciences play in the development of emerging technology. The relationship between technological sciences and various relevant disciplines is also analyzed. Furthermore, this paper discusses the influence and enlightenment of Hsue-shen Tsien's thoughts on technological sciences on the training and evaluation of relevant talents, aiming to provide some references for implementing the strategy of science and technology in the new era.

technology, science, engineering, technological sciences, engineering technology

doi: [10.1360/TB-2022-0693](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0693)