

学习钱学森先生技术科学思想的体会

郑哲敏

(中国科学院力学研究所,北京 100080)

摘要 以个人体会从以下几个方面介绍钱学森先生的技术科学思想:什么是技术科学;技术科学的重要性;技术科学如何为应用服务;技术科学工作者应具有的基础知识;钱学森先生技术科学思想在建立力学研究所中的实践。最后谈一谈关于力学要继续走技术科学道路的一些想法。

关键词 技术科学,应用力学,钱学森

技术科学思想是钱学森先生科学思想的重要组成部分。他的技术科学思想是 F. Klein 和 L. Prandtl 开创的德国哥廷根应用力学学派思想的继承和发展,也来源于钱先生本人长期的科学研究与教学实践和对 20 世纪中叶前的应用科学,特别是第二次世界大战发展核武器、雷达等经验的概括和总结,其内涵十分丰富,至今仍对科技工作者及负责科技政策制定和管理的各级领导人有重要的现实意义。钱学森先生的技术科学思想在他分别于 1948 年和 1957 年发表的“Engineering and Engineering Sciences”和“论技术科学”两文^[1,2]中有全面而系统的论述。这些思想还体现在他创办中国科学院力学研究所、中国科学院力学研究所与清华大学力学系合办的力学研究班和中国科技大学近代力学系的指导思想和其他一些论述中。现就我的粗浅认识,谈几点体会。

1 什么是技术科学

钱学森先生认为,技术科学和自然科学^①都是科学。自然科学属于基础科学层次,技术科学属于应用科学层次。技术科学的目标首先是为工程技术(广义上泛指一切应用和技术领域,下同)服务,为工程技术提供有科学基础的工程理论,进而带动和领导产业的发展,而自然科学的核心是为了理解和认识客观世界的规律。这是技术科学不同于自然科学即基础科学的另一个方面。两者也有广泛的共同点,那就是发展科学。

为了暴露事物的本质,自然科学可以乃至必须把研究对象置于最单纯的条件下。这在技术科学中一般是难以做到的,因为在多数情况下,它的研究对象处于复杂、受多种因素影响和约束的环境中,过分地简化就失去了真实。技术科学解决复杂问题的方法是强调对问题物理本质,即通常所说的机理的理解和认识,强调抓主要矛盾,忽略次要矛盾,在计算方面,追求复杂条件下工程精度所允许的近似答案。这是技术科学不同于基础科学的另一个方面。

只有当自然科学成熟到一定程度,其成果才有可能得到应用。因此,技术科学建立于 20 世纪上半叶是历史发展的必然结果。首先敏锐地觉察到这一点,把它准确地、完整地勾画出

^① 现在称为基础科学,因此本文将自然科学作为基础科学的同义语。

来,指出这是一个新的科学领域,是钱学森先生的巨大功绩。

技术科学首先在基础科学和各类应用之间起着桥梁的作用。由于经典力学相对而言成熟得比较早,所以应用力学成为技术科学最早的成员和发展技术科学的典范。今天,技术科学的领域已经有了极大的扩展,将世界带入信息科学技术、纳米科学技术、生物科学技术的时代。

然而,技术科学又不限于是自然科学与工程技术间的桥梁,它同时也是人类认识的源泉。自 20 世纪 40 年代 V. Bush 有广泛影响的报告 *Science—the Endless Frontier* 发表以来,人们往往认为自然科学是人类认识的唯一源泉。20 世纪 90 年代,在重新研究之后,美国的一份权威性报告认为这一认识并不全面,因为在科学、技术和应用之间实际上存在着复杂的反馈关系,因而技术和应用也同样是科学认识的源泉。其实这一种观点,钱学森先生早已在 1957 年“论技术科学”的论文中已经明确提出。他写道“我们前面已经提到自然科学、技术科学和工程技术之间的相互影响和相互提携,这也就是说,我们不能只看到自然科学作为工程技术基础这一方面,而忽略了反过来的一面,也就是技术科学对自然科学的贡献”。他以工程控制论和运筹学(当时称为运用学)为例,指出在自然科学领域里没有它们的祖先,而由技术科学所发现的规律也可以为生物科学和社会科学做出非常重要的贡献。起源于通信领域的信息论也是一个非常突出的例子,它把人类的知识领域从传统的物质和能量一下子扩大到物质、能量和信息。

2 技术科学的重要性

在“Engineering and Engineering Sciences”一文中,钱学森先生开宗明义就鲜明地指出,在国际竞争日益激烈的当今社会,自然科学的成果与应用间的距离日益缩小,技术科学应运而生,包括技术科学在内的科学成为富国强民之本,国家已经如同对待经济和外交那样把关心和发展科学当作自己的职责。第二次世界大战,原子武器的研制成功和雷达等技术的发展大大加强了公众对科学的支持和科技界对自身作用的认识,加速了技术科学和技术科学教育发展的进程。

这一认识对百余年饱受苦难的中国人民,特别是当时的科技人员,具有特殊的意义,因此在 1947 年回国访问时,钱先生就专门以“工程和工程科学(即后来的技术科学)”为题,向当时的浙江大学、上海交通大学和清华大学师生做报告,阐述他的技术科学观点,意在引起国内科技教育界对技术科学这个正在兴起的新领域的重视。

3 技术科学如何为应用服务

技术科学为工程技术或其他应用服务,但是并不会也不能代替后者。它从工程技术或其他应用所需解决的问题中提炼科学问题,通过研究并解决这些科学问题来促成实际问题的解决。概括地说就是从应用中来又回到应用中去。只有从科学的高度上完成了这个循环,才能说技术科学工作者为应用做出了贡献,才有望推动甚至带动工程技术和产业的进步。技术科学工作者在不断完成一个个这样的循环中,在不断以更高的科学水平解决实际问题的过程中,同时也促进了技术科学本身和科学总体的发展。

技术科学工作者应深入到应用中去,运用自己的科学知识,去发现和提炼解决实际问题所

需研究的关键科学问题。技术科学工作者必须致力于创新,努力有所发现,用新概念、新途径、新方法、新工具去推动产业的发展。技术科学工作者的最高目标是用理论和技术上的创新和科学的预见,去领导产业的发展与创新。上世纪的航空、航天产业和信息产业就是很典型的例子。

4 技术科学工作者应具有的基础知识

在 1948 年的论文里,钱学森先生提出,技术科学工作者应掌握三个方面的工具。现分述如下。

(1) 工程分析的数学方法

技术科学工作者应具有坚实的数学基础,能将其熟练地运用于工程技术中科学问题的分析和计算。钱学森先生认为,与自然科学工作者相比,技术科学工作者需要更多地从事计算,因为提供给工程师的结果必须有定量的表达。因此他始终十分重视计算,并且一向关心和支持电子计算机和计算技术的发展以及电子计算机的应用。他认为,计算技术发展到今天,已经使科学的研究的面貌发生了根本的变化,力学研究应当抓住机遇,适应这个形势。所以,他特别在 1978 年的全国力学规划会上,用力学进入了“现代力学”^[3]阶段来强调这一变化。另一方面,他又指出数学对技术科学工作者来说毕竟只是工具,数学能使我们的分析和论证更加严密,研究结果得以量化,但不能替代对问题的真正认识。对于一个复杂的问题,应该做哪些计算,计算结果反映了什么本质的、规律性的东西等等,往往也是深刻的理论课题,其正确解决才具有真正重要的认识意义和实用价值。同时,不能把数学看做一成不变的工具,应该在应用中发展数学工具,创造好的算法。例如,运算微积分、摄动法、能量法、有限元法、差分法等都是在技术科学的研究中创造出来的。

(2) 工程问题的科学基础

钱学森先生还强调要打好自然科学的基础,以适应科学技术和工业不断发展的需要。在担任加州理工学院教授期间,他仍坚持旁听数学、物理、化学、生物方面的课程,参加各种专业举办的研讨会。这使他能从更深的层次上解决航空和火箭技术面临的难题,比别人更早地预见到有必要在微观与宏观结合的层次上开展研究,因而提出了物理力学这个新的学科方向。他认为在一些极端条件下,直接通过实验获得数据越来越困难,有时甚至是不可能的,因此强调用量子力学和统计力学的理论,辅以少量必须的实验,通过模拟计算来求得问题的解答。在这个过程中,为了得出实用的结果,也不排除采用某些经验规律。他认为这是一条经济有效的道路。实际上,钱学森先生当年提出物理力学还有更深层的意思,那就是力学工作者既要有深厚的自然科学基础,又要充分利用计算机和发展计算技术。

(3) 工程设计的原理和实践

钱学森先生十分强调技术科学工作者要对工程技术有足够的认识与理解,要学习有关的工程技术知识,要与工程师交朋友、参与他们的活动,要与他们有共同的语言,要有工程观点,对工程问题要有数量的概念和一定的判断能力。这些能力都要从学习领会工程设计原理和实践的过程中逐步获得。当然最重要的是首先要有为工程技术服务的强烈愿望。这样做的目的是为了熟悉他们的领域,了解他们的问题、他们的需要、他们的见解,听取他们的评价和意见,以便切实地为他们和他们所代表的产业服务。

5 钱学森先生技术科学思想在建立中国科学院力学研究所中的实践

(1) 力学研究所要以应用力学研究为主,要立足国际力学学科的前沿,努力为推动我国经济和国防建设服务,力争在科学上起到带头和领导的作用。这就是力学所的建所思想。这种考虑必然是长远的、战略性的、全局性的、前瞻性的。钱先生要求我们,不论做什么,都要有特色,敢于走新路,争第一。这些基本考虑突出地表现在新建力学所的分支学科布局上。

全所当时的主要方向是火箭和航天技术。为此,他在分支学科布局方面做了全面的安排,这方面吴承康先生有专门报告,这里不做重复。我认为各分支学科的共同特点是服务目标明确,在手段上强调科学,强调创新。这里我举几个例子,从几个侧面说明钱先生是怎样做的。

- 1954年我离开美国时,他要我带话给钱伟长先生,他说运筹学对于一个有计划、按比例发展的社会主义国家特别重要,希望引起国内的重视。1955年在回国的轮船上他就结识了许国志先生,随后在新建的中国科学院力学研究所成立了我国第一个运筹学研究室。

- 1955年回国后第一次找我谈话,要求弹性力学组调整方向,以动力学观点研究建筑物抗地震问题,因为中国是一个地震多发区国家。

- 1956年初建所,随即在原弹性力学、塑性力学、流体力学以外,成立了物理力学、化学流体力学、控制论等研究组。它们的目标并不仅限于为航天科技服务,化学流体力学目标之一就是为发展我国的化工和冶金工业服务。为此,钱学森先生不仅安排研究人员同科学院化工冶金研究所合作,而且与叶渚沛所长、郭慕荪先生保持着密切的个人联系,亲自研究转炉顶吹氧和流态化床的问题。

- 考虑到我国是一个多山和水资源短缺的国家,他十分重视爆破开山和定向爆破筑坝的科学技术问题,亲自参阅有关资料,邀请国内专家来所做报告,派人去参观国内当时最大的矿山爆破,并进而在力学所建立了爆破组;为了利用风能,亲自计算并设计了一台可用于多风山口的风车,继而又建立了风车研究组;为研究低水头水能利用建立了低水头发电组;积极安排三峡水利枢纽科研项目,倡导并开展百万千瓦水轮机的研究。

(2) 在明确研究方向的前提下,他要求全面掌握有关资料,开展文献调研和学术报告活动,提倡自由讨论和争辩;树立计划的观点;提倡协作和边干边学的精神;积极创造实验条件,筹建实验室。在研究工作上,他主张抓对问题实质的深入理解,抓主要矛盾;热情鼓励有创新的见解和发现,哪怕它们尚处于萌芽或初级的阶段;要勇于超过前人,不怕困难,肯做“要出汗”的工作;鲜明地反对研究工作上的华而不实;强调理论研究工作要有验证。他也十分重视研究工作的表达,主张问题与概念的表述必须准确简练,前提假设的交代必须完整、清晰,数学推导必须严谨,结论必须明确且便于读者理解和使用,一般情况下应该伴有算例或实验例证。他对论文中汉字的规范化和有效数字也有严格的要求。

(3) 在强调全面掌握资料和打好基础的同时,他主张有了一定基础后,应当边干边学。他认为干与学是统一的,学好才能干好,干中才能学得深。1957年发表的那篇文章里,关于如何做研究的一段话,我认为特别深刻,现转录在这里。

“我们在前面已经说过:数学方法只是技术科学研究中的工具,不是真正关键的部分。那末,关键是什么呢?技术科学中最主要一点是对所研究问题的认识。只有对一个问题认识了以后才能开始分析,才能开始计算。但是什么是对问题的认识呢?这里包含确定问题的要点在哪里,什么是问题中现象的主要因素,什么是次要因素;哪些因素虽然也存在,可是它们对问

题本身不起多大作用,因而这些因素就可以略而不计。要能做到这一点,我们必须首先做一些预备工作,收集有关研究工作的资料,特别是实验数据和现场观测的数据,把这些资料印入脑中,记住它,为下一阶段工作做准备,下一阶段就是真正创造的工作了。创造的过程是:运用自然科学的规律为摸索道路的指南针,在资料的森林里,找出一条道路来。这条道路代表了我们对所研究问题的认识,对现象机理的了解。也正如在密林中找道路一样,道路决难顺利地一找就找到,中间很可能要被不对头的踪迹所误,引入迷途,常常要走回头路。因为这个工作是最紧张的,需要集中全部思考力,所以最好不要为了查资料而打断了思考过程,最好把全部有关资料记在脑中。当然,也可能在艰苦工作之后,发现资料不够完全,缺少某一方面的数据。那么为了解决问题,我们就暂时把理论工作停下来,把力量转移到实验工作上去,或现场观察上去,收集必需的数据资料。所以一个困难的研究课题,往往要理论和实验交错好几次,才能找出解决的途径”。

“把问题认识清楚以后,下一步就是建立模型。模型是什么呢?模型就是通过我们对问题现象的了解,利用我们考究得来的机理,吸收一切主要因素,略去一切不主要因素所制造出来的‘一幅图画’,一个思想上的结构物。这是一个模型,不是现象本身。因为这是根据我们的认识,把现象简单化了的东西;它只是形象化了的自然现象。模型的选择也因此与现象的内容有密切关系。同是一个对象,在一个问题中,我们着重了它本质的一方面,制造出一个模型。在另一个问题中,因为我们着重了它本质的另一方面,也可以制造出另一个完全不同的模型。这两个不同的模型,看来是矛盾的,但这个矛盾通过现象的全面性质而统一起来”。

6 力学要继续走技术科学的道路

力学既是作为基础科学的自然科学,又属于技术科学,在这个问题上国内力学界已有共识。然而力学的发展必须有所侧重。我认为我国的力学当前应当主要沿着技术科学的道路发展,就是说,重点应当是发展应用力学。这样说是因为,力学作为自然科学中最早趋于成熟的学科,其作为基础学科发展的空间,相对地说已经比较小了(当然,这决不表明其不重要,更不表明不应在全面规划中重点安排),而它在解决工程技术乃至其他学科中的问题的作用却不断在扩大。另外,沿着应用力学的方向,也一定会因有原创性的发现而进一步丰富自然科学。所以我认为,钱学森先生提倡的技术科学思想在今天仍然能指导我们的力学前进。

1978年在全国力学规划会议上,钱学森先生认为,进入20世纪70年代,应用力学发展到了一个新的阶段,他称之为“现代力学”,其特点是要将近代计算技术与力学密切结合起来,全面提高力学理论分析、计算和实验的水平,一方面增强力学解决问题的能力,另一方面扩大力学的研究领域。他特别提到要用细观力学和物理力学的方法,研究材料和介质的物性并进而按需要设计材料,要注意“近几年对于耦合非线性振荡的研究,发现了在这种体系中有时会出现类似湍流现象的杂乱运动”,用以更好地研究湍流问题。这些无疑都仍然是值得我们十分重视的意见。

21世纪,我国面临的困难不可低估。世界已进入了知识经济时代。五十年来,我国在国民经济和国防建设方面取得了空前巨大的成就,然而由于历史的原因,我们仍然是个发展中的国家,在科学技术方面总体上落后于国际先进水平,近代工业革命的进程也尚待完成。在高技术方面我们虽也有骄人成就,但在核心科学技术的环节上,基础依然薄弱,所以在激烈的国际竞争中,仍然处于脆弱的地位。要在本世纪中期达到国际上中等发达国家水平,实现科教兴国

和可持续发展的战略目标确实是任重而道远。这种情况下,挑战与机遇并存,所以我国的力学应当如何发展是我们面临的重大课题。我认为:

(1) 在坚持以应用力学为主的前提下,对力学的发展要有全面的安排。应用力学本身也有不同的层次,同样也要有全面安排。要鼓励不同风格、不同学派的发展,提倡它们之间的交流。在一些重要的领域里,传统的连续介质力学不够用了,急需在概念与方法上有新的突破。要加强与扩大力学与其他自然科学领域的交叉与合作,把力学的基础打得更深厚,向应用数学,天文,物理(特别是凝聚态物理,等离子物理),地学,生物学等学习。钱先生所倡导的物理力学思想要进一步加以发扬。现在,从所谓“第一原理”出发或者用分子动力学出发,计算介质的某些基本力学性质,已经有了很大的进展,我们无疑应当掌握并加以发展。我们应当高举物理力学这面本来属于我们的旗帜。

(2) 要加强和扩大与高技术、其他技术科学和广大工程技术领域的交叉与合作,要发展交叉学科,充分发挥力学的开拓创新与服务功能。例如,航空航天科学技术,材料科学与冶金及化学工程,能源科学与工程,生物医学工程,环境科学与工程,农业工程,微机电系统,纳米技术等。力学要打开大门,走进并长入更多的行业,努力争取在发展高技术,实现传统工业现代化和可持续发展方面发挥重要作用。在我们这样一个人口众多,资源相对短缺的国家里,还需要重点发展环境友好的力学。

(3) 力学界的优势是长于建立数学模型和分析计算,这些优势无疑需要继续发扬。电子计算机的发展,更使力学研究如虎添翼。我们应当十分重视计算机的应用,大力发展计算方法。现在,计算机也使力学计算成为工程师手中的日常工具,一些问题的解决不再需要请教力学家了。这就要求力学家着力解决新的或更为困难的问题。实现可持续发展需要节能和发展新能源,需要更好地利用材料,发展新的工艺和流程等,所以力学研究要开拓新领域,要在更深的层次上解决工程技术问题。力学研究的对象也应当从单一部件、单一因素扩大到整个系统,从以分析为主扩大到分析与综合并重,从解决正问题扩大到解决包括优化问题在内的反问题。我们的服务对象也要从设计部门扩大到制造、运行乃至产品报废的部门。

(4) 力学界要着力培养一批新生力量,他们有自然科学和工程技术方面的基础,对技术科学思想有深刻理解,富有开拓精神,有志于推动工程技术的发展,勇于承担困难的工程技术任务,愿意深入到工程领域中去学习和提炼科学问题,具有合作精神和团队精神,有愿望和能力研究解决这些问题,不怕把解决方案返回到工程技术中去接受检验,直到实际问题得到满意的解决。对于我们力学学会来说,我认为我们应当进一步张开大门,我们的会员中有更多的人同时也是别的学会的成员,有更多别的学会会员参加到我们的学会来。

(5) 无庸讳言,一个时期以来,我国科技界存在着一种急于求成的浮躁情绪。这是我们应当力求避免的。我们应当重温钱先生提倡的科学精神。做工作要首先实实在在地掌握有关领域的当前水平,把它彻底消化并将其当作自己工作的起点,致力于有所发现,有所创新。有了成绩,也要把它放到国际水平上去衡量,客观地看看这个成绩究竟有多少分量。如果有应用目的,那就还要看看是否真的得到应用或者在什么意义上得到应用。只有通过这种踏踏实实的、“出汗”的工作,我们才能谈得上真正推动力学的发展。

总之,我认为钱学森先生的技术科学具有丰富而且深刻的内容,学习它并把它体现在我们的工作中,一定会对推动新世纪我国力学科研和教学的健康发展起巨大的作用。我们已经从一支笔一张纸的时代走到大规模并行计算的时代,我们的思想和行动上都应有相应的变化。我相信在新的世纪里,作为基础科学和技术科学的力学一定会迎来另一个春天。

由于对钱先生的思想理解欠深，文中不妥之处，希批评指正。

参 考 文 献

- 1 Hsue-Shen Tsien. Engineering and Engineering Sciences, C. I. E. Forum. Journal of Chinese Institute of Engineers, 1948. 1~14;
又见《钱学森文集，1938~1956》，北京：科学教育出版社，1991. 550~563
- 2 钱学森. 论技术科学. 科学通报, 1957, 4, 97~104
- 3 钱学森. 现代力学. 力学与实践, 1979, 1:4~9