

文章编号: 1007-6735(2011)06-0594-04

钱学森的科学思想——从工程科学到系统科学

谈庆明

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

钱学森一生致力于工程科学和系统科学的研究,前半段研究工程科学,后半段研究系统科学,他的工程科学思想和系统科学思想的发展是一脉相承的. 本文从钱学森的研究实践进程来探索和领会他的科学思想及其重要意义.

1 工程科学的实践和理论^[1-2]

钱学森多次说过,他是从学习笨重的火车头转向研究轻巧的飞机的. 1934年,他以优异的成绩从交通大学机械工程系铁道机械工程专业毕业. 大学的学习大大拓宽了他的眼界,他的兴趣逐渐转向新一代的交通工具——飞机. 1932年1月28日,日本飞机轰炸上海,我英勇战士在空战中驾驶的却不是国产飞机. 钱学森深切觉悟到,为了能抵御列强侵略,中国必须建立自己的航空工业. 因此,他考取了清华学堂庚款留美,1935年去美国麻省理工学院留学,专业是飞机设计. 虽然学习了一年就取得了硕士学位,但是,美国飞机工厂不让中国学生实习,钱学森只好决定改学航空工程的基础理论,1936年西去加州理工学院,追随力学大师冯·卡门(von Kármán),学习空气动力学. 他开始钻研导师交给他研究解决高速飞行的难题——“声障”和“热障”问题. 就在此时,他师兄马林纳(Malina)和几个青年火箭迷正在进行的火箭试验吸引了他的兴趣,钱学森敏锐地觉察到研究火箭的重要性,一年后加入了马林纳的研究小组,参与试验,担任理论家的角色,分析试验失败的原因,并提出改进建议. 尽管火箭试验很危险,出过几次爆炸事故,学校师生戏称这个小组为“自杀俱乐部”. 可是他们乐此不疲,坚持研究,克服重重困难. 他们第一个成果便是由阿诺德(Arnold)将军建议将火箭用作飞机的助推器,用以加快飞机的起飞速度,缩短机场的跑道. 没有预料到,当年他们那个位于阿诺约塞科的简陋实验室,发展到今天,成为世界闻名的“喷气推进实验室(Jet

Propulsion Laboratory)”. 1950年开始,钱学森把控制论的思想运用于火箭技术,使火箭的行为可以通过反馈和控制达到预定的目的,从而使火箭升级为可以控制的导弹,1953年开设课程“工程控制论”,1954年发表《Engineering Cybernetics》(工程控制论)一书.

从上述钱学森的研究历程可以看出,他并不满足热门的成熟技术,总是敏锐地挑战崭新技术,从火车到飞机,到火箭,再到导弹,跳跃式地探索前进,领域越做越大,难度越来越高,勇于探索高新技术的科学难题,从而成为成果卓著的工程科学家.

这里,应当注意钱学森在第二次世界大战结束时,协助冯·卡门制定美国战后的航空科研发展规划这件事. 1944年,美国上将阿诺德(Arnold)请冯·卡门为第二次大战战后保持美国空中优势制定一个发展空军的科研规划——“Toward New Horizons(迈向新高度)”. 作为这份规划的主要作者,钱学森不仅总结了德国和美国有关科学和技术方面的经验和发展趋势,而且全面考虑了军事发展的需求和可能,撰写了规划中的主要篇章. 这项工作的研究对象不是单一物体的运动,而是涉及航空甚至航天的系统,而且适应现实的社会系统. 历史说明,这一规划确实为后来直至今日确保美国的空中优势奠定了基础. 所以,美国当局也公开承认:钱学森是他们的航空航天事业的奠基人之一.

1947年,钱学森探亲回国,在交通大学、浙江大学和清华大学发表了题为“工程和工程科学(Engineering and Engineering Sciences)”的报告,次年发表于《Journal of the Chinese Institution of Engineers》^[3]. “工程与工程科学”是他对20世纪前半叶科学和高技术发展的经验总结,代表钱先生的基本的科学思想. 他认为:

“人们回顾半个世纪以来人类社会的进步,无不对技术和科学研究作为国家和国际事务的一个决定性的因素的重要性,所受到重视程度的巨大提高有

收稿日期: 2011-10-26

作者简介: 谈庆明(1934-),男,教授. 研究方向:力学. E-mail:qmtan@hotmail.com

深刻的印象。很显然，虽然在早期，技术与科学研究是以未加计划的、个体的方式进行的，可是到了今天，在任何主要国家，这种研究都是受到认真调控的。……研究工作现在是现代工业整体中的一个组成部分，……既然工业是国家实力和福利的基础，技术与科学的研究就是国家富强的关键。”

“也许没有什么比把战时雷达和核能的发展作为更突出的例子了。雷达技术和核能的成功开发为盟方取得第二次世界大战的胜利做出了重要贡献是公认的事实。短短数年，紧张的研究工作把基础物理学的发现，通过实用的工程，变成了战争武器的成功应用。这样，纯科学的现实与工业的应用之间的距离现在很短了。换句话说，长头发科学家和短头发工程师的差别其实很小，为了使工业得到有成效的发展，他们之间的密切合作是不可少的。纯科学家与从事实用工作的工程师间密切合作的需要，产生了一个新的职业——工程研究者或工程科学家。他们形成纯科学和工程之间的桥梁。他们是将基础科学知识应用于工程问题的那些人。本文的目的是讨论工程科学家能够做什么，也就是他们能为工程发展做些什么工作，以及完成他们的任务需要接受什么样的教育和培训。”

他呼吁3个大学的师生关注这门新生的科学——工程科学。他认为工程科学对发展高技术、提升和改造传统工程技术、开辟新的工程科学领域具有十分重要的意义。在他的晚年著作中更是把工程科学列为人类科学技术知识体系中的有机组成部分。

在第二次世界大战结束前后的一段时间里，钱学森在火箭研究中已经发现，无论是最大射程、航向控制、燃烧稳定等问题，都需要解决优化规划和反馈控制的技术和理论问题。1948年，维纳(Wiener)发表了《Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine》(控制论)一书，开创了这样一门新学科，其研究对象是一个系统的各个不同部分之间的相互作用的定性性质及整个系统的运动状态。钱学森迅速认识到维纳开创的控制论的重要性，很快便应用控制论的原理解决了一批喷气技术中与系统的稳定性有关的制导系统的问题；并且意识到，不仅在火箭技术的领域内，而且在整个工程技术的范围内，几乎到处存在着被控制的系统。虽然有关的系统控制技术已经有了多方面的发展，但是很有必要用一种统管全局的方法，考察问题并有效地解决问题，揭示广阔发展的前景。于是，钱学森提出了一门新的工程科学——工程控制论，旨在讨论和研究，在工程中实现自动控制与自动调节的理

论以及控制调节系统的结构原理。1953年底在加州理工学院开设了“工程控制论”一课，接着于1954年出版了《Engineering Cybernetics》(工程控制论)^[4]一书。该书的出版在世界科技界引起广泛关注。

与此同时，钱学森敏锐地意识到，在火箭技术、核能技术等重要领域，人们迫切需要掌握超高温、超高压及放射线作用等条件下介质和材料的性质。如果完全依靠实验，会遇到很大困难。钱学森考虑到近代物理和化学的发展，对物质的微观结构已有相当的了解，有条件来建立一门新的工程科学，即物理力学。它的目的是通过对物质的微观系统的分析，把物质宏观性质的实验数据加以总结，找出规律，得到所需数据；而且可以进一步利用这些规律预见新物质材料的宏观性质，为发展新材料和新工艺服务。1953年，钱学森发表了“Physical Mechanics—A New Field in Engineering Science”^[5]一文，正式提出了物理力学这门新的工程科学。从他倡导物理力学的研究到今天已有半个多世纪了。近代科学的各个领域，包括自然科学和社会科学，研究和处理复杂的自然系统和社会系统，无不遵循宏观和微观相结合的途径。

2 系统科学的实践和理论^[6-8]

1955年9月，钱学森终于摆脱了美国政府的无理阻难，乘坐克里夫兰总统号轮船回国。

时隔近乎半个世纪后，当时受陈毅副总理派遣，代表中国科学院去深圳迎接钱学森回国的朱兆祥回忆说：“到了北京，中国科学院正式提出，请他和钱伟长一起创建力学研究所，并建议他到新中国的工业基地东北参观考察。在东北之行中，钱学森还应邀去大学和研究所作学术报告，讲演的主题大都是关于发展工程科学的问题。朱兆祥曾经把讲演内容和钱学森后来提出的建设力学研究所的方案作过比较，发现他回国时向往成立的研究所的内涵远比传统的应用力学要宽要深，实质上是希望办成一个足以领导工农业生产前进的‘工程科学研究所’。……经过东北的参观、访问、讲学、讨论、思考和酝酿，在1956年1月5日中国科学院院务会议上，钱学森把力学研究所的方案提了出来。这个研究所将成立弹性力学、塑性力学、流体力学、物理力学、化学流体力学、自动控制、运筹学等7个研究组。由于学科发展的紧迫需要，自动控制研究组在半年内升格成为自动化研究所，运筹学研究组则在后来演变为系统科学研究所。这也说明钱学森早年卓越的远见。”

通过回国一年来对国家经济建设、科学技术和

教育各部门的全面考察,钱学森对工程科学如何服务于百废待兴的新中国的建设有了切实的认识,发表了“论技术科学”一文^[9](“技术科学”就是工程科学,国内称之为“技术科学”)。该文向国人详细宣传讲解了什么是技术科学;什么是技术科学的研究方法;以及包含哪些方面的内容。该文详细开列技术科学的一些新的发展方向,及其研究内容和应用领域,这些方向是:化学流体力学、物理力学、电磁流体力学、流变学、土和岩石力学、核反应堆理论、工程控制论、计算技术、工程光谱学和运用学(即运筹学)等。在阐述运用学的部分,他说:“运用学专考究一个组织、一个系统的运用效果,和组织间与系统间的消长关系”;“这门技术科学是……研究最有效地使用人力、生产工具、武器、物资等的方法和安排”;“运用学对政治经济学会作出很大的贡献。把政治经济学精确化,也就是把社会科学从量的侧面来精确化”;“精确化了的政治经济学就能把国民经济的规划做得更好,更准确,……,可以把整个系统放到计算机里面去,直接把新的统计资料传入计算机,把计算机作为经济系统的动态模型,不断规划,不断校正,这样一定能把经济规划提到远超过于现在的水平。”这些论断在经过了半个世纪以后的今天,发达国家不是已经在成功地实践了吗!

1956年上半年,国务院组织了几百名专家学者,着手编制第一个十二年远景科学技术规划。钱学森和钱伟长分别担任综合组组长和副组长。钱学森向中央建议采取6条紧急措施,立刻被中央采纳执行,当即成立导弹、原子弹、电子计算机、自动化、电子学、半导体等研究机构。这时的钱学森所面对的是整个国家这样一个巨大的复杂系统,国家的工业和农业的现代化需要科学和技术的现代化的引领,而工程科学的发展布局又是发展科学和技术的重要关键和龙头。今天我们科学界的老人们回忆起那段历史,无不感慨钱学森科学思想的博大精深和规划布局的深谋远虑。如果从那时起,我们国家不是在一次次政治运动中瞎折腾,而是按照钱学森领衔制订的规划坚持科学实践的话,今天的中国还只是“世界加工厂”吗?

说到系统科学的来源,可以引用钱学森在1995年的一次与王寿云等人的讲话:“他(指许国志)呢,跟我有感情,我们是在船(指回国时搭乘的轮船)上碰到的。他原来是搞数学的,在美国听说有Operational Research(运筹学),他就跟我讲这个。我说,这个很重要。我没有搞过,但是听说了,在二次大战中,美国的参谋集体里有数学家,搞这个东西很起作用。我们两个商量,咱们回去,社会主义国家怎么建

设,恐怕这个东西很重要,咱们搞这个。我们回来成立了力学所。我特别安排设立了运筹学教研组。许国志就是组长。……道理很清楚,社会主义国家需要运筹。所以说,系统学的开端是在那个船上。……后来把马宾的一套东西系统化,跟现代科学技术结合起来考虑,才提出开放的复杂巨系统。……来源就是这么一个,很渺小的一个来源。说起来,四十多年了。”

力学所运筹组成立后,最早结合的两个实用领域是交通和经济,希望通过这两方面的研究,把运筹学发展到经济、企业、工程的管理中去,形成又一门新的工程科学。可是,反右、大跃进、反右倾等政治运动严重冲击科学研究。反右倾运动后,运筹学教研组被调整到数学研究所去了,而在文化大革命结束后又合并到系统科学研究所去,此是后话。

就在钱学森创建力学研究所的同时,1956年春的一天,彭德怀接见钱学森,开门见山地提出问题说,我很想知道,我们中国人,能不能自己造出导弹来?钱学森胸有成竹地介绍了导弹原理和国际情况。接着叶剑英和周恩来也接见了,希望他主持导弹研制事业,周恩来并要求他起草一份“建立我国国防航空工业的意见书”。这份意见书在1956年2月就交给了周恩来,是年10月中央决定成立国防部第五研究院,任命钱学森为院长。

那时,钱学森身兼两职,既是中国科学院力学研究所所长,又是国防部第五研究院院长。权衡轻重,钱学森把主要精力从领导和研究工程科学的工作,转移到组织和领导导弹研制的事业之中,工作的性质有了很大的变化,前者的身份是科学家,而后者则是领导一个规模庞大、任务艰巨的研制系统的总工程师。

一切从零开始。首先是组织一个基本队伍。钱学森在“建立我国国防航空工业的意见书”中,开列了21位高级专家的名单。意见书建议在国防部内设立领导机构,领导研究、设计和生产3类单位:a.基础研究单位,任务是探索新方向和进行机理研究,可以设在中国科学院内;b.设计研究单位;c.生产工厂。

接着就是培训技术人才。钱学森亲自给分配来五院的第一批156名大学生讲授“导弹概论”。同时,他在中国科学院发起成立中国科技大学,为国家发展工程科学和尖端技术培养人才,并亲自讲授“火箭技术导论”、“物理力学”等课。

从仿制到自行研制的过程中,钱学森一方面指导解决实验室以及现场的诸多棘手的科学技术问题,另一方面则是组建一个完善的组织管理系统,按照总体目标要求,把三类单位协调一致地投入研究、设计、试制、试验和生产中去,高效有序地完成任

我国航天事业取得举世瞩目的成就,证明了钱学森的贡献,也证明了钱学森成功地经历了一次重大的系统工程的实践,并从中取得了丰富的经验。

这里值得提出两件重要事情:一个是钱学森在组织和领导航天部门时,建立了总体部,任务是做到整体优化,实现他倡导“工程控制论”和“运筹学”研究的目标;另一个是指导他的助手王寿云在军队中进行“作战模拟”的示范性试验。这两件事当然有着内在的联系。正因为钱学森在组织和领导航天系统工程的实践过程中,采用建模和计算机模拟方法,成功地实现了整体协调和优化,他认为军队作战同样可以采用这种方法,于是让王寿云去某部队做了试点,针对不断变化的动态,设计多种模型进行计算机模拟推演,发现薄弱环节,运用专家经验,修正模型,选择人力和物力的优化配置,提供最佳决策。1979年7月,钱学森应邀在解放军总部的学习会上,作了题为“军事系统工程”的报告,对作战模拟方法在军内的推广产生了很好的作用。

1978年,钱学森、许国志和王寿云在《文汇报》上发表了题为“组织管理的技术——系统工程”^[8]一文,第一次全面地阐述钱学森的系统工程的思想。文章明确指出:“要在20世纪末将我国建成现代化强国,必须大大提高组织管理水平。我国虽然是一个社会主义国家,但是,小生产的经营思想还根深蒂固,我们不懂得用大生产经济规律去组织生产,这就妨碍了生产力的发展。所以,必须提高组织管理的水平,要使用一套组织管理的科学方法。”这就是钱学森提倡的系统工程的方法。文章把面对问题中的“对象称为‘系统’,即由相互依赖和作用的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体,而且这个‘系统’本身又是它所属的一个更大系统的组成部分。……例如,导弹武器系统是现代最复杂的工程系统之一,研制这样一种复杂系统所面临的基本问题是:怎样把比较笼统的初始研制要求,逐步地变为成千上万个研制任务参加者的具体工作,以及怎样把这些工作最终综合成一个技术上合理、经济上合算、研制周期短、能协调运转的实际系统,并使这个系统成为它所从属的更大系统的有效组成部分。这样复杂的总体协调任务不可能靠一个人来完成,而是需要一个专家集体进行协调指挥。”这就是钱学森曾经在导弹研制部门组织指挥过的总体部,实践证明了它的有效性。

上世纪80年代开始,钱学森辞去了领导职务,又回到了他最心爱的科学研究的园地。在1986~1992年期间,组织和指导了“系统科学讨论班”,研讨的内容主要是系统工程和系统科学。讨论班始终

密切关注国家经济建设的重大实际问题,注意国外的研究动态和先进经验,并从系统工程和系统科学的角度,提出解决问题的方法和途径。讨论班的一个重要的理论成果,就是提出了涉及多个层次的“开放的复杂巨系统”的概念,而且进一步明确了解决开放的复杂巨系统问题的方法是运用专家群体,对问题进行定性分析判断和综合,并与计算机相结合。与理论成果相联系的一个重要的实际结果,就是向中央领导多次建议,成立由有关的各类富有经验的专家组成总体设计部,在国家一级的层面上研究和解决社会系统问题。

2005年,钱学森发表了《智慧的钥匙——论系统科学》^[8]一书,汇总了钱学森后半生有关系统科学的重要思想和文献。

钱学森的一生对祖国和人民作出了巨大贡献,也为后人留下了精粹而宝贵的科学思想。他临终把萦绕心头的问题留给温家宝:“中国为什么培养不出大师?即网上热议的所谓“钱学森之问”。看来这个问题也是一个系统工程和系统科学的问题。有人认为这个问题的答案,钱学森心里是明白的,所以,是明知故问;也有不少人给出了许多不同的答案,却大都属于答非所问。难道我们面临的不正是一个开放复杂巨系统的问题吗?

参考文献:

- [1] 钱学森. 钱学森手稿[M]. 太原:山西教育出版社, 2000.
- [2] 钱学森. 钱学森文集[M]. 北京:科学出版社, 1991.
- [3] TSIEN H S. Engineering and engineering sciences[J]. Journal of the Chinese Institution of Engineers, 1948, 6, 1-14. 中译本:钱学森. 工程和工程科学[J]. 力学进展, 2010, 39(6): 1-7.
- [4] TSIEN H S. Engineering Cybernetics [M]. New York: McGraw Hill Book Company, 1954.
- [5] TSIEN H S. Physical mechanics—A new field in engineering science[J]. Journal of the American Rocket Society, 1953, 23(1): 14-17.
- [6] 北京大学现代科学与哲学研究中心. 钱学森与现代科学技术[M]. 北京:人民出版社, 2001.
- [7] 许国志, 顾基发, 车宏安. 系统科学[M]. 上海:上海科技教育出版社, 2000.
- [8] 钱学森. 智慧的钥匙——论系统科学[M]. 上海:上海交通大学出版社, 2005.
- [9] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报, 1957, 8(3): 97-105.

作者简介

- 郭雷**: 中科院院士, 中科院数学与系统科学研究院院长, 上海系统科学研究院院长, 国务院学位委员会委员。
- 许晓鸣**: 上海系统科学研究院院长, 中国系统工程学会副理事长, 上海理工大学校长、教授。
- 戴汝为**: 中科院院士, 中国自动化学会理事长, 上海系统科学研究院学术委员会主席, 中科院自动化所学术委员会主任。
- 于景元**: 国务院学位委员会原委员, 中国系统工程学会原副理事长, 中国航天科技集团公司 710 研究所学术委员会主任、研究员。
- 汪应洛**: 中国工程院院士, 上海系统科学研究院学术委员会主席, 西安交通大学管理学院名誉院长、教授。
- 方福康**: 国务院学位委员会原委员、系统科学评议组原召集人, 北京师范大学原校长、教授。
- 狄增如**: 国务院学位委员会系统科学评议组召集人, 北京师范大学系统科学系教授。
- 谈庆明**: 中科院力学研究所教授。
- 高岩**: 国务院学位委员会系统科学评议组成员, 上海理工大学管理学院常务副院长、教授。
- 车宏安**: 上海系统科学研究院执行院长, 上海理工大学复杂系统科学研究中心副主任、教授。
- 高小山**: 中科院系统科学研究所所长、研究员, 中国系统工程学会副理事长。
- 张纪峰**: 中科院系统科学研究所副所长、研究员, 中国系统工程学会副理事长, 国务院学位委员会系统科学评议组召集人。
- 顾基发**: 国际系统研究联合会主席, 中国系统工程学会原理事长, 国际系统与控制研究院院士, 中科院数学与系统科学研究院研究员。
- 陈光亚**: 中国系统工程学会原理事长, 国际系统与控制研究院院士, 中科院数学与系统科学研究院研究员。
- 汪寿阳**: 中国系统工程学会理事长, 国际系统与控制研究院院士, 中科院数学与系统科学研究院副院长、研究员。
- 王众托**: 中国工程院院士, 中国系统工程学会原副理事长, 大连理工大学知识科学与技术研究中心主任。
- 王澆尘**: 中国系统工程学会原副理事长, 上海交通大学系统工程研究所教授。
- 费奇**: 华中科技大学系统工程研究所原所长, 国务院学位委员会控制科学与工程学科评议组原成员。
- 王红卫**: 华中科技大学控制科学与工程系主任、系统工程研究所所长, 国务院学位委员会控制科学与工程学科评议组成员。
- 谭跃进**: 国防科技大学系统与管理学院院长、少将、研究员, 中国系统工程学会副理事长。
- 王先甲**: 中国系统工程学会副理事长、学术委员会主任, 武汉大学系统工程研究所所长、教授。
- 胡晓峰**: 国防大学信息作战与指挥训练教研部副主任、少将、教授。
- 陈剑**: 中国系统工程学会副理事长, 清华大学管理学院教授。
- 高自友**: 中国系统工程学会副理事长, 北京交通大学系统科学研究所所长、教授, 国务院学位委员会系统科学学科评议组成员。
- 徐玖平**: 中国系统工程学会副理事长、系统理论委员会主任, 国际系统与控制研究院院士, 四川大学管理学院副院长、教授。