

钱学森与系统工程

苗东升

(中国人民大学哲学系, 北京 100872)

[摘要] 考察了钱学森系统工程思想的孕育、发展过程, 概述了他所提出的有中国特色系统工程理论的要点, 分析了他如何走出系统工程、扩大视野。

[关键词] 钱学森; 系统思想; 系统工程; 系统科学

[中图分类号] N945 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)03-0016-05

系统工程理论、控制论、开放的复杂巨系统理论是钱学森在系统科学领域诸多贡献中最重要的三大块。在庆祝钱老九十华诞之际, 考察一下钱老在系统工程方面的活动足迹和成就, 从中发掘对于我们搞好科学技术的研究、开发和应用的宝贵启示。

1 从思想孕育到大规模实践

一般认为, 作为一种现代工程技术, 系统工程诞生于20世纪40年代。实际时间要稍早一些。如钱学森等所说, 1939年, 英国雷达研究部门“建立了世界上第一个有组织地、自觉地按照系统的观点、用系统工程方法分析和研究作战使用问题的小组”^[1]。笔者认为, 这应是现代系统工程的起点。

十分巧合的是, 钱学森于1939年获得博士学位后, 在从事力学理论研究的同时, 正式参与了美国喷气推进技术、火箭和导弹的研究, 并很快置身于核心部位, 获得美国空军的如此评价: “钱学森自1939年9月至1945年9月期间, 在加州理工学院喷射推进实验室担任高级顾问时成绩卓越。”^[2]火箭、导弹是当时最尖端的高新技术, 是今天举世瞩目的航天系统研究的雏形, 属于大科学、高技术范畴, 是萌发现代系统工程思想的沃土。这个时期的钱学森完全是个自然科学家, 从事的是航空、航天这种“硬”工程技术和“硬”科学研究, 而系统工程属于“软”技术, 即社会技术, 两者之间尚有性质上的差异, 但毕竟具有工程技术的共性, 即强调

实践。直接置身于航天系统工程迅速形成前夕的大环境, 过人的工程技术直觉, 为钱学森接受开始形成中的系统工程思想提供了极为有利的条件。

这个时期钱学森的系统工程思想是如何萌发的, 由于缺乏直接的材料, 无法做出明确的判断。不过, 他的恩师冯·卡门为我们提供了有用的线索, 他说: 在此期间“钱曾提出, 火箭导弹技术同操作其它类型的武器所要求的技术完全不同, 必须委托给军事部门的一个新团体, 要用新的军事思想和思想方法进行研究”^[2]。对照近20年来钱学森有关系统工程的大量论述, 他当时所说的这种新的思想方法包含了系统思想和系统方法, 他所说的新团体的组织管理技术就是系统工程。由此可以推断, 钱学森的系统工程思想在这个时期已经开始孕育。

以上看法绝不仅仅是一种推断。许国志院士提供了两个重要佐证。1949年, 钱学森由麻省理工学院重返加州理工学院, 担任著名喷气推进技术中心(JPC)的第一任Goddard讲座教授。这里是美国航天系统工程的发源地。60年代, JPC第二任Goddard讲座教授、后成为JPC主任的匹克林曾著文阐述JPC的系统工程发展史^[3]。文中提到JPC开始研究和应用系统工程的时期, 恰是钱学森主持古根海姆实验室工作的时期, 他无疑是这个研究集体发展系统工程思想的重要参与者。另一件是回国前的钱学森曾同一位系统工程学者通信讨论装配线这个系统工程的重要问题^[4]。这些事实表明, 那

时的钱学森已经走出系统工程思想的孕育期，直接参与了美国航天系统工程形成和发展的早期工作。

50年代初，钱学森被迫离开他所参与开创的高新技术领域，失去进一步实践并在实践中理解和发展的系统工程的社会条件。但是，祸兮福所伏。关于工程控制问题的研究，使他从一个独特的角度走到当时系统科学的前沿，获得对系统思想的深刻理解。这个时期的钱学森还密切注视另一门与系统工程关系更直接的系统理论——运筹学的发展。1954年，在嘱咐即将回国的学生郑哲敏要在国内“极力宣传”运筹学时，钱学森说：“我想，一个社会主义国家，在如何进行科学管理，加强计划性方面，运筹学起着重要作用。”^[2]这表明他对运筹学的理论和实际意义已有极为深刻的认识，超过了当时的许多运筹学家。通过这些学术活动，钱学森深入把握了当时最前沿的系统思想和理论，从而使他在回国后应用系统工程去组织管理中国的航天事业，特别是后来对系统工程进行理论总结时，比一般人站得更高些，看得更远些。

40年代，由于钱学森的杰出才能和重要贡献，他在美国航空和火箭导弹研制中担任重要角色，获得了形成和发展系统工程思想的有利条件。但像曼哈顿计划那样的工程项目是不可能交给钱学森这样的外国人来主持的，因而他无法得到应用系统工程这种崭新方法的百年难逢的机遇，不具备在创建这一崭新工程技术中做出一流成绩的客观条件。

相反，回到祖国后的钱学森受到党和国家的高度重视，担负航天事业技术方面的主要指挥大任长达20多年。这期间他始终处于中国航天科技发展的矛盾中心，各种科研信息的汇集处，各种科学技术思想交锋的战场。这使他获得最充分地领悟、应用、发展系统工程思想和技术的实践经验，能够集中我国航天系统工程的集体经验以形成理论。这是他继续留在美国不可能得到的机遇。

按照系统原理，一个系统的功能由要素（组分）、结构、环境三方面共同决定，在要素和环境既定的情况下，结构（对于社会系统就是组织管理方式）是决定因素。20世纪60—70年代的中国航天技术研制队伍作为一个规模庞大的系统，正是处于这种情况：要素（元件、设备和人才）是既定的，短期内无法有明显的提高；国际环境是既定的，西方和苏联联手封锁我们的局面短期内也不会改变。在这种情况下，中国要自力更生搞出火箭导

弹，决定性的环节在于设计好这个系统的结构，即从组织管理上下功夫。这就为中国航天人学习、应用、发展系统工程思想和方法提供了绝好的机会。美国人把阿波罗登月的成功首先归功于应用系统工程，中国航天人所以能够在比美英和苏联更短的时间内获得成功，更加倚重于应用系统工程来组织管理。钱学森作为中国发展航天科技的首席科学家，拥有长期的、大规模的、系统的领导航天系统工程的实践经验，回国后坚持学习辩证唯物主义，加上自幼积累的中国传统文化的底蕴，使他获得了从更高层次理解和把握系统工程的绝好条件。

2 建立有中国特色的系统工程理论

在师从冯·卡门期间以及自己的科学探索中，钱学森不仅学会如何从理论高度观照工程实际，把理论原理变为工程设计思想，而且学会如何从工程实践中提炼理论观点，把实践经验上升为理论。无论40年代他关于航空、航天科学和喷气推进技术的研究，还是50年代初关于控制问题的研究，我们都可以从中清楚地看到这一点。这种科研作风和思维方式也必然在他领导中国导弹火箭事业中体现出来，只是没有时间做系统的总结，很少能够形诸文字罢了。由于保密的关系，我们无法接触他当年谈论航天系统工程的材料，但从两篇公开发表的文章中仍可找到一些很有价值的线索。一是1957年发表的“论技术科学”^[5]，明确区分了工程技术和技术科学，分析了两者的特点和相互关系，勾勒出他在二十多年后提出的学科体系结构的核心思想。如果说此篇的立论还主要建立在他在美国时掌握的原始材料之上，那么，1963年发表的“科学技术的组织管理工作”^[6]一文就主要是在思考中国的国情、总结中国发展航天事业的实践经验。用他后来提出的概念来表述，这是一篇研究科研系统工程的论文，中心是论述科研系统的组织管理技术，许多现在流行的提法可以从这里找到思想的幼芽。

1978年，卸去国防科技一线领导重任的钱学森，终于有了充足的时间对中国导弹和航天事业的丰富实践进行理论总结。而系统工程正是他这个时期理论探讨的突破口。以文汇报的那篇著名文章为起点，钱学森发表了一系列文章、讲演，主要观点集中展现于《论系统工程》一书中。这是中国系统科学的经典著作。据笔者多年来的学习和思索，钱学森等人提出的有中国特色的系统工程理论的主要

内容(不涉及技术方面)可以归纳为以下几点:

1) 系统工程的历史沿革和产生背景 西方学者由于不懂得历史唯物主义,常常把系统看做是20世纪40年代独创的崭新概念,使系统工程蒙上某些神秘色彩。为清除由此引起的混乱,钱学森以马克思主义哲学为指导,考察了系统思想所经历的从经验到哲学再到科学的历史发展。只要唯物辩证地思考问题就会看到,在人类历史上,凡是人们成功地从事比较复杂的工程建设时,就已不自觉地运用了系统工程方法。不论西方还是东方,古代人类都已提出朴素的系统概念,用来解决实际问题,创造了简单的系统工程方法。近代科学由于受形而上学思维方式的支配,科学技术工作不注意应用系统概念,致使随近代科学兴起的那些工程技术没有发展到自觉运用系统思想的水平。现代系统思想的复兴始于19世纪中叶,马克思恩格斯总结一系列重大科学发现,哲学地阐明了系统思想的精髓。而系统思想要从哲学发展成科学技术,还有赖于强烈的社会需要的推动以及科学自身的知识积累和方法工具准备。作为一门现代工程技术,系统工程是适应日益大型化、复杂化的社会实践活动的组织管理的需要而产生的。最强大的推动力来自三个方面:战争实践的需要推动军事系统工程问世,大型复杂工程技术研制的需要推动工程系统工程诞生,大型企业经营管理的需要推动企业管理系统工程产生。社会实践活动的大型化和复杂化,要求系统思想不仅能定性,而且能定量。这就需要提出一套具有数学理论、能够定量描述系统各组成部分联系关系的科学方法,创造一种为量化方法的实际应用服务的强有力计算工具。这两方面在40年代同时具备,使工程系统的产生成为历史的必然。概括地说:“这就是系统工程的历史:马克思主义先进思想所总结出的系统概念孕育了近六十年的时间,到本世纪中叶才终于具备了条件,开出了一批花朵。”^[1]

2) 系统工程概念的内涵 40年代以来的近30年里,西方系统研究领域在学科划分和命名上存在很大混乱,不同学者从不同侧面应用系统思想解决问题,总结自己的经验,选择各自认为适当的名称,形成系统工程、系统分析、系统研究、运筹学、管理科学、费用效果分析等名称并用的局面。钱学森对工程系统的理论总结,不少精力用于清除这种混乱。按照他提出的学科体系结构观点,“最根本的是要区别科学理论和工程技术”^[1]。国外同

行由于认识不够深刻,混淆了工程技术与技术科学。“分析”、“研究”、“科学”这些用语的本义同时包含理论和应用,用它们命名学科必然混淆学科层次。“××学”或“××论”是理论学说,而工程是要实干的。所以,钱学森在上述学科名称中只保留了系统工程和运筹学,并重新加以界定。国外学者讲的系统工程包含数学理论,而运筹学又包含工程内容,相互重叠,导致混乱。工程的本义指的是执行服务于一定目的的实践活动,功能只在于改造客观世界,特点是着眼于取得实际成果,追求全局优化,要考虑经济因素,须有可行措施。这是一切工程的共性。所以,钱学森主张把数学理论都划归运筹学,把工程内容都划归系统工程,从而给二者以准确的定位。系统工程不同于传统的工程技术。“系统工程的精华”是强调系统观点^[1],把工程对象看做系统,从总体着眼构思,从局部着手实现,从全局出发合理使用局部,从全过程出发观照好各个阶段。所以,系统工程是“处理系统的工程技术”^[1],亦即用系统观点处理问题的工程技术。这就抓住了工程学的本质特点和创新之处。

3) 系统工程的学科归属 国外学术界对系统工程的学科归属长期没有明确的概念,这是他们至今存在混乱的一个认识根源。传统的土木、水利等工程技术建立在自然科学理论基础之上,不涉及人的因素,理应归属于自然科学体系,作为它的直接为实践服务的工程技术层次。鉴于工程系统工程是早期系统工程的主要内容之一,需要自然科学的理论指导,国内外都有人主张把整个系统工程归于自然科学体系。由于系统工程要求使用数学工具,也有人把它作为数学的一部分来研究。这也是造成混乱的原因。从现代科学技术体系看,钱学森认定系统工程不属于自然科学、社会科学,也不属于数学。通过多方面探讨,他得出结论:“我们应该回到系统这一根本概念,把整个部门的多种学科概括为一个新的现代科学技术部门,叫做‘系统科学’。”^[1]在现代科学技术体系中,系统工程应该属于系统科学,是系统科学大知识部门的工程技术。

4) 系统工程的理论基础 系统工程是通过总结传统组织管理工作而形成的。传统组织管理也包含系统思想,但算不上一种技术,因为它立足于经验之上,没有理论指导,不运用数学方法,不追求量化。系统工程则强调应用数学方法,重视利用现代信息技术,力求定量地解决问题。系统工程专

家面对一个工程问题，在定性把握之后，关键的一步是把这些与系统有关的数量关系归纳成反映系统机制和性能的数学模型，在约束条件下求解，经过计算机模拟仿真试验的检验，找出定量答案。一切系统工程共同理论基础，是技术科学层次的系统理论，首先是运筹学。钱学森讲的运筹学是一种数学理论，即系统工程的方法论。在用系统工程解决问题时，如何建立数学模型，求解和分析模型，都离不开运筹学的指导。技术科学层次的系统理论不限于运筹学。控制思想建立在系统概念上，控制论也是系统工程的主要理论基础，它的系统思想甚至更深刻。但实际应用中总感到以控制论指导系统工程远不如运筹学那样直接和自然，这使许多人感到困惑。钱学森指出，系统工程一般总要有人干预，但把人包括在系统中的控制现在还形不成通用的理论。所以，“控制论作为工程学的共同主要理论基础恐怕还有待于将来”^[1]。这就清楚地回答了学术界的疑问，并指明系统工程的一个发展方向。“在组织一个大系统的过程中，系统内部的信息传递是个非常重要的问题”^[1]。由于信息论强烈的通信技术背景，至今很少有人谈论它对工程学的指导作用。钱学森把它作为工程学的理论基础，虽然没有一般地讨论信息论如何起指导作用，但对信息概念和信息技术在系统工程中的应用有很多论述。系统工程不是一门工程技术，而是包括众多分支的一大类工程技术，涉及社会实践的所有领域。因此，除了上述共同理论基础外，不同系统工程还需要各自的特殊专业理论指导，它们不属于系统科学，而是该对象系统所属学科体系中的技术科学，如教育工程学的特殊理论基础是教育学。

5) 应用系统工程的前提 系统工程既然是社会技术，它的实施必然同方针政策密切联系。但它本身不是方针政策，而是在方针政策决定后组织实施的方法，其成败优劣依赖于方针政策的正确与否。从更高的视角看，“系统工程是技术，它只能在适当的社会制度和国家组织体制下发挥作用。建立这种制度和体制是生产关系和上层建筑的问题，是系统工程的前提”^[1]。作为一种现代技术，系统工程只能在劳动社会化的历史条件下出现，只有把对具体实践工作的认识建立在社会化的基点上才能用好这一武器。小生产的经营体制和经营思想，条块分割，各自为政，把学术自由绝对化，都妨碍系统工程的有效应用。钱学森还特别强调民主集中制

对系统工程的重要性。民主与集中相结合是现代社会的产物，学术界通行的 seminar 就是充分发挥学术民主的良好方式。但只有在社会主义制度下才能做到高度的民主和高度的集中相结合，最大程度地发挥系统工程的作用。

6) 实施工程学的组织形式 把总体设计部作为实施工程学的组织形式，是钱学森系统工程理论颇具特色的一个重要方面。

3 从系统工程走出去

80年代初，在总结和推广系统工程的过程中，钱学森发现“系统工程所带动的科学发展是一条很广泛的战线”，提出“从工程学的范围中走出来，在更大的视野中去考察”^[1]。要全面理解钱学森对工程学的思想、方法和技术的贡献，还需要考察他如何走出系统工程、从系统工程走向何处。

1) 从系统工程走向系统科学 在系统研究的早期开创者中，维纳、艾什比等未能从控制论走向系统科学，申农、韦弗等未能从信息论走向系统科学，旦捷格、莫尔斯等未能从运筹学走向系统科学，古德、霍尔等未能从系统工程走向系统科学。只有贝塔朗非与钱学森例外，前者是从一般系统论走向系统科学的，后者主要是在明确工程学的学科归属、寻找其指导理论的过程中走向系统科学的。在深入考察系统工程现有的指导理论运筹学等学科之后，他发现这些理论都是技术科学，不是基础科学，理论层次不够高。由此开始寻找指导系统研究的基础理论的工作。研读贝塔朗非、普利高津、哈肯、艾根、托姆等人的系统理论名著，使他极大地开阔了眼界，看到几十年来的系统研究已成为一个十分广阔的领域。再用他提出的“三个层次一座桥梁”的学科结构观点考察，认识到在系统科学这个新的科学部门中，工程技术层次已有系统工程，技术科学层次已有运筹学、控制论、信息论，但基础科学层次的系统理论即系统学还是个空白。系统科学通向哲学的桥梁，他称之为系统论，也未建立。钱老由此提出“大力发展系统工程尽早建立系统科学体系”的号召^[1]，在国内掀起一场成绩卓著的系统运动，至今还在向纵深发展。

2) 从系统工程走向现代科学技术体系 作为技术科学大家，钱学森强烈关注应用理论解决实际问题。从70年代末起，他花费很大精力于推广系统工程，从航天科技到科研、教育、农业、环境、

法治以及其他领域,从工厂、企业等社会系统的“微观”组分到国家规模的宏观管理,几乎触及现代科学技术发展的所有领域。这使他认识到系统工程是适用于一切系统的组织管理技术,全部现代科学技术已经发展为一个紧密联系的整体,一个开放的复杂巨系统。从事系统工程的研究和推广有力地促进钱学森形成他关于现代科学技术体系的思想,运用这一思想考察系统工程,分析各种部门工程学的特殊专业理论,又促使钱学森认识到系统工程不仅涉及所有科学技术部门,还牵涉到整个社会,代表一次新的技术革命,其发展势必将引起社会的深刻变革,从而加深了对系统的理解。

3) 从系统工程走向科学论 钱学森在不久前答记者问时声明:“我是从搞工程技术走向科学论的。”^[7]在各种工程技术中,对他形成自己的科学论影响最大的可能是系统工程。从钱学森 70 年代末以来有关系统工程的论著、讲演和书信中,可以读到他对科学的性质、特点、方法、社会功能、发展规律、科学精神、科学家风范、科学与哲学以及科学与艺术的关系等大量论述,贡献出精深的见解。其中最重要的成果是他关于整个现代科学技术体系的独特认识,如新的科学分类标准,11 大科学技术部门的划分,“学科‘系统’观点”等^[8]。这些见解分散于他的大量文章和讲话中,有些提法尚须推敲,不少观点他本人也在不断修正,并非“句句是真理”。但这些论述内容丰富,观点独到,富有创见,是一笔大有益于中华民族科学文化发展的精神财富,很值得系统总结和阐述。

4) 从系统工程走向大成智慧 在推广系统工程过程中,西方学者已经从小系统走向大系统,钱学森则进一步从大系统走向巨系统,再走向复杂巨系统,提出复杂巨系统的概念,使系统工程的应用涵盖了全部可能的系统类型。在此过程中,钱

学森的思想不断升华,最终凝聚为“大成智慧”概念,提出建立大成智慧工程和大成智慧学的设想。“‘大成智慧’的核心是科学与哲学的结合”^[9]。由于地球人类日益系统化和日益信息化,人们从事的实践活动日益大型化、复杂化,主要依靠领域专家去解决问题越来越行不通。必须以辩证唯物主义为指导,立足于对现代科学技术体系的整体把握,使用以信息技术为核心的高新技术,通过从定性到定量综合集成研讨厅体系的组织形式,集信息与知识、理论与经验、定性知识与定量知识、人脑智能与电脑智能之大成,获得解决现实生活中复杂问题所需的智慧,即大成智慧。今天,这个曾被不少人误解为髦耄老人“思想糊涂”的新概念,正逐步显示出它的科学性和前瞻性。

参考文献

- [1] 钱学森等. 论系统工程(增订本)[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,1988. 41, 43, 79, 173, 176, 179, 185, 196, 239, 266, 542
- [2] 祁淑英,魏根发. 钱学森[M]. 保定:花山文艺出版社,1998. 111, 122, 224
- [3] 许国志等答记者问. 面向 21 世纪的系统科学与工程[N]. 文汇报(上海),2001-03-21(11)
- [4] 许国志. 对钱老的学术思想的几点体会[J]. 系统工程理论与实践,1992,(9):4
- [5] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报,1957,(4):97~104
- [6] 钱学森. 科学技术的组织管理工作[J]. 红旗,1963,(22):19~27
- [7] 钱学森. 以人为主发展大成智慧工程[N]. 文汇报(上海),2001-03-20(2)
- [8] 钱学森. 致许国志的信[J]. 系统工程理论与实践,1993,(3):1
- [9] 钱学敏. 钱学森与“大成智慧”[N]. 人民日报(海外版),2001-02-24(2)

Qian Xuesen and System Engineering

Miao Dongsheng

(Department of Philosophy, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

[Abstract] This paper have looked back the formation of Qian Xuesen's system engineering idea, given a brief account of the main points of the system engineering theory with Chinese characteristics, and analysed how Qian went beyond system engineering.

[Key words] Qian Xuesen; system idea; system engineering; system science