

工程与数学完美结合, 系统科学思想的实践 ——纪念《工程控制论》发表60周年

包为民[†]

(中国航天科技集团公司, 北京 100048)

美国数学家N·维纳于1948年对动物体内自动调节和控制过程的研究, 并把动物和机器中的信息传递和控制过程视为具有相同机制的现象加以研究, 建立了一门新的学科, 称为控制论(cybernetics). 钱学森先生蛰伏五年, 把控制论发展为一门技术科学, 潜心撰写了《工程控制论》, 并于1954年在美国正式出版. 这本书以系统为对象, 以火箭为应用背景讨论自动控制, 系统地揭示了控制论对自动化、航空、航天、电子通讯等科学技术的意义和影响, 充分体现并拓展了维纳《控制论》的思想, 是对控制与制导方面进行创造性论述的典专著. 《工程控制论》迅速引起了美国科学界乃至世界科学界的关注, 相继被译为俄文、德文、中文等多种文字, 赢得了国际声誉, 吸引了大批数学家和工程技术专家从事控制论的研究, 形成了控制科学在20世纪50年代和60年代的研究高潮. 60年来, 正是钱老享誉国际学术界的《工程控制论》以及他的系统科学思想和方法, 特别是他在领导中国“两弹一星”的成功实践中, 运用、发展了这一思想和方法, 继而把系统科学理论和系统工程实践推广到社会、经济、管理等各个领域, 产生了深远的影响.

一位美国专栏作家这样评论《工程控制论》: “工程师偏重于实践, 解决具体问题, 不善于上升到理论高度; 数学家则擅长理论分析, 却不善于从一般到个别去解决实际问题. 钱学森则集两个优势于一身, 高超地将两只轮子装到一辆战车上, 碾出了工程控制论研究的一条新途径……”. 导师冯·卡门教授评价钱学森说: “我为你感到骄傲, 你创立的工程控制论学说, 对现代科学事业发展是巨大的贡献. 你在学术上已经超过了我.” 斯人已逝, 音容犹存, 亘古的科学成就正泽被后人, 作为一名航天科技工作者, 仰望钱老的卓越成就, 难望其项背. 回首多年的科研经历和实践, 钱老开创和推进的系统工程思想和理论使我们受益匪浅, 也日益成为国防科技工作者们实现航天梦、践行中华民族伟大复兴事业的利器和法宝.

工程控制论发源于纯技术领域, 工程控制论进入社会科学领域是当代重大科学技术成就之一. 由于信息科学和信息技术的巨大进步, “工程”一词的含义在不断扩展. 关于《工程控制论》与工程科学的关系, 钱学森先生这样论述: “《工程控制论》是一门工程科学, ……而工程科学的目标在于, 将用于工程实践的设计原则组成某一学科, 从而揭示不同工程实践领域间的相似性, 并强调基本原理和基本思想的推动力. 简言之, 工程科学以理论分析为主导, 并常常使用先进的数学. 只要浏览一下《工程控制论》这本书, 就会发现这一点是非常明显的.”

《工程控制论》是自动控制理论的思想基础和方法学基础, 自动控制理论皆由《工程控制论》衍生而来, 《工程控制论》是自动化学科或“控制科学与工程”学科的基础和核心. 工程控制论的研究对象和理论范畴在不断扩大, 近20年来该学科各个方面都有了很大的发展. 到目前为止, 它所包含的主要理论和方法有下列6个方面:

系统辨识和信息处理 用滤波、预测、相关处理、逼近等方法从噪声中分离出具有本质意义的信息以及寻求各变量之间的相互关系;

模型抽象 根据实验数据用数学工具去抽象受控工程对象, 精细地描述受控客体的静态和动态特性, 深刻地、集中地和准确地定量反映受控系统的本质特征;

最优控制 以最小的代价达到控制的目的的最优控制理论, 寻求以最短时间达到控制目的的最快速控制理论, 解决最优控制的工程实现问题的最优化技术等;

自我进化 适应控制系统、专家系统、自组织系统、基于自动决策能力的智能系统等;

容错系统 冗余技术以及自诊断理论、检错纠错理论、最优备份切换理论和功能自恢复理论等;

仿真技术 物理仿真、数学仿真、验证性试验等.

钱老的早期研究主要是针对阻碍当时航空、航天技术发展一些关键力学问题, 回国前夕, 钱老以坚定的信念和非凡的才华, 在人身自由受限制的情况下, 把辩证唯物主义的思维方法, 开创性地应用于火箭技术领域, 解决了一批喷气技术中的理论科学和工程技术问题。他敏锐地感觉到, 不仅在火箭技术领域, 而且在整个工程技术的范围内, 都存在着被控制或被操纵的系统, 因此很有必要用一种统观全局的方法, 来充分了解和发挥控制技术的潜在力量, 以更广阔的视野、更系统的方法来观察有关问题。工程控制论的发表以及系统科学思想的建立, 使得他的着眼点已不限于个别问题, 而是开辟新的学科前沿领域, 以推动航空、航天技术整体与长远的发展。他的学科领域也已不限于应用力学, 而是他所倡导的更为广阔的技术科学领域。

钱老由此发展了系统学和开放的复杂巨系统的方法论, 他赋予这一方法论更广泛的含义: 处理复杂行为系统的定量方法学, 是半经验半理论的, 提出经验性假设(猜想和判断), 是建立复杂行为系统数学模型的出发点。他特别指出, 当人们寻求用定量方法处理复杂行为系统时, 容易注重数学模型的逻辑处理, 这样的数学模型看起来“理论性”很强, 其实不免牵强附会、脱离实际。与其如此, 倒不如从建模开始就老老实实承认理论的不足, 而求援于经验判断, 让定性的方法与定量的方法结合起来, 最后定量。

钱老这一思想强有力地指导我们开展运载火箭设计, 尤其是地面验证所用到的对象建模分析、设计结果校核、天地一致性验证等一系列实际工作。既不盲目地否定研究对象的复杂特性, 又要充分利用自己的智慧敢于假设、判断甚至猜想, 实事求是、有理有据地开展科学探索和对象认知, 在实践中丰富自己的经验, 在定性和定量的交叠中实现对象和过程本质的逼近。

在技术管理领域, 钱老认为, 更需要从辩证唯物主义哲学的高度来看待方法与工具。他说: “计划管理工作要运用科学的计算, 使用电子计算机, 提高计划的科学性、准确性, 这包括引用博弈论。在这个方法中, 我们的对方是: 自然条件的变化、技术上的未知因素、阶级敌人的可能干扰、我们自己可能犯的错误, 这些都是随机性的东西。

系统论是研究系统的一般模式, 结构和规律的学问, 它研究各种系统的共同特征, 用数学方法定量地描述其功能, 寻求并确立适用于一切系统的原理、原则和数学模型, 是具有逻辑和数学性质的一门科学。其核心思想是系统的整体观念。系统论的基本思想方法, 就是把所研究和处理的对象, 当作一个系统, 分析系统的结构和功能, 研究系统、要素、环境三者的相互关系和变动的规律性, 并优化系统观点看问题, 世界上任何事物都可以看成是一个系统, 系统是普遍存在

的。系统论的任务不仅在于认识系统的特点和规律, 更重要地还在于利用这些特点和规律去控制、管理、改造或创造系统, 使它的存在与发展合乎人的需要。也就是说, 研究系统的目的在于调整系统结构, 协调各要素关系, 使系统达到优化目标。

钱老首先强调要抓总体, 抓大总体, 然后按系统分层次, 把各个环节严密地组织起来, 他大力倡导开展《运筹学》在国防工业管理中的应用, 并具体指出下列4个方面的应用内容:

- 计划的平衡技术, 包括投入产出法和电子计算机的应用;
- 计划的协调技术, 包括统筹学和电子计算机的应用;
- 生产统计数据, 包括统计工作和电子计算机的应用;
- 质量及可靠性控制技术。

载人航天、探月工程等一系列重大科技专项的有效组织和显著推进都在实践着钱老这一观点, 并一次次以完美和成功佐证了其有效性和适用性。指挥线和技术线的“两总”系统、技术和管理的“双五条归零”标准、技术创新性和技术经济性的综合评价、“探索一代、预研一代、研制一代、装备一代”的格局和节奏等航天系统工程管理举措, 都是对辩证思想和博弈论知识的典型实践。

比如, 钱老在《工程控制论》的第18章阐述了一个很重要的观点——“通过工程控制协调的方法, 即使使用不太可靠的元器件(甚至部分参数无法完全确切知道)也可以组成一个可靠的系统”, 这对于当前航天工程的技术经济性分析工作给出了战略前瞻, 也是钱老科学智慧和哲学思想的鲜明写照。

又如, 钱老主张在研制体制上是研究、规划、设计、试制、生产和试验一体化; 在组织管理上是总体设计部和两条指挥线的系统工程管理方式。实践证明, 这套组织管理方法是十分有效的。从今天的角度来看, 就是在当时的条件下, 把科学技术创新、组织管理创新与体制机制创新有机结合起来, 实现了系统集成创新, 从而走出了一条发展我国航天事业的自主创新道路。”

钱老认为, 简单巨系统与复杂巨系统的区别在于: 简单巨系统是系统的成员大致相同, 可以用100多年前发展起来的统计力学方法, 像不均匀气体理论那样来处理即可; 而复杂巨系统则不然, 其每个成员既参与整个系统的行为, 它又受整个环境的影响, 形成复杂的相互作用, 高度非线性, 这就是复杂性巨系统。简单巨系统可以用控制论和计算机解决; 而复杂巨系统只有用从定性到定量的系统集成方法。

从东风二号导弹飞行的失败, 钱老提出了设计综

合的概念,重视设计综合,就是从系统的角度来理解事物,从局部和整体的关系来把握技术问题.钱老在1992年提出了从定性到定量的系统集成法的应用形式,就是把还原论思想和整体论思想结合起来的系统论思想.而把系统理论和系统技术应用到改造客观世界实践中,这就是系统集成工程.其实质是把专家、数据和信息体系以及计算机体系有机结合起来,构成一个高度智能化的人/机、人/网结合的系统,这样就能充分发挥人的思维、人的经验、人的知识、人的智慧,并把各种情报、资料和信息统统集成起来,在网络和计算机技术的辅助下,使定性的认识上升到定量的认识.

当前,军事斗争的国际化态势日益复杂,新军事变革的科技内涵日益提升,新技术成果的不断涌现、颠覆性技术的应用、军民融合技术的深化发展,我们认知的科研领域更复杂.从深空探测、开发太空到走向深蓝、空天一体、临近空间打造航空和航天有机结合形成新的技术增长点,航天控制与信息技术的发展,需要我们用一种统观全局的方法,来充分了解和发挥导航技术和控制技术等新技术的潜在力量,运用工程控制论的知识成果和系统论思维,以更宽阔、更缜密的眼光去观察所遇到的问题,为解决新问题开辟意想不到的新前景.

进入新世纪以后,钱老的系统科学思想仍有重要的现实意义.系统集成方法和总体设计部,从知识创新角度来看,实际上是知识创新主体,通过对知识资源和智慧的综合集成,既可以进行科学创新形成系统集成理论,也可以进行技术创新形成系统集成技术,

还可以通过应用创新用于系统集成工程.

钱老构建出来的系统科学体系结构认为:在系统科学中,工程技术包括各门系统工程、自动化技术和通信技术;技术科学包括运筹学、控制论和信息论;基础科学是系统学;系统观将充实技术科学的方法论,并使马克思主义哲学随着系统科学的发展而发展,这是一个清晰的体系结构.现代的创新活动要把科学技术创新、体制机制创新和组织管理创新有机结合起来才能实现真正的创新,这也是个系统问题.

钱老从一位卓越的工程科学家、国防科技领军人物,成为我国系统科学的开拓者和奠基人,成为哲学家和思想家.无论其工程理论学术成果还是方法论层面的哲学思想,都是中华文明和智慧宝库的瑰宝,他是一位人民的科学家,是中国人民的骄傲.

如何形成一个具有综合优势和整体功能并充满创新活力的体系,去推动国家和社会发展,这正是国家创新体系所面临的主要问题.抚今追昔,重温钱学森先生的《工程控制论》和系统科学思想,应该会得到新的启迪.

作者简介:

包为民 (1960—),男,1982年8月毕业于西北电讯工程学院(现西安电子科技大学)电子工程系信息处理专业,2005年当选为中国科学院院士,现任中国航天科技集团科技委主任.作为中国航天运载器总体及控制系统领域的学术带头人,他将理论知识和实践工作相结合,为中国国防现代化建设解决了一系列技术难题,先后获得国家科技进步特等奖等多项殊荣,是国防科技工业有突出贡献中青年专家, E-mail: baoweimin@cashq.ac.cn.