

工程系统开发复杂性的讨论

赵少奎

(第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

[摘要] 在讨论了现代复杂武器装备系统的发展研究、开发性科研工程和特殊复杂环境工程开发过程复杂性的基础上, 进一步提出了研究、处理复杂性问题的系统论方法的总体思路。

[关键词] 工程系统; 复杂性; 还原论; 系统论

[中图分类号] N949 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)02-0001-08

李世焯先生几年前提出“工程系统开发的复杂性”命题^[1,2], 笔者经长时间思考, 结合对以往工作的分析研究, 认为至少有三类工程问题应纳入复杂性科学问题的范畴来讨论: 一是现代复杂武器装备系统的发展研究; 二是复杂的开发性科研工程, 特别是前无古人的开发性科研工程; 三是特殊复杂环境工程。但是, 不仅限于此范畴。

1 现代复杂武器装备系统的发展研究

在与自然界斗争的历史长河中, 人类不断思考、探索、创新, 产生了认识客观世界的科学理论与改造客观世界的工程技术, 使人类对社会、自然的认识不断深化, 改造社会与自然的能力不断增强, 一步一步地走向现代文明。

在人类社会发展的进程中, 科学技术的最新成果, 几乎无不首先应用于军事, 并推动军事工程技术迅猛发展。纵观世界军事工程技术的发展史(参见笔者在本刊2001年第1期上发表的“对我国工程科学技术发展的思考”一文图1)^[3-6], 当今世界军事工程技术的发展已经进入现代机电、能量、信息三元素一体化的武器装备系统发展的新时代。

军队重点发展什么武器装备, 采取怎样的技术途径、步骤与对策, 已成为军队乃至国家领导人谋求国家安全的指导方略。为此, 对武器装备的发展

战略、武器装备体系及其发展规划提出了更高的要求。现代高新技术复杂武器装备系统的开发与建设, 呈现出长周期、全局性战略谋划、综合应用各相关领域科技新成果的特征。从国防现代化建设的整体目标出发, 探索现代高新技术复杂武器装备系统的决策与建设的技术和管理工作, 已经成为当今世界工程科学技术发展和工程系统建设的重要课题。

现代战争已由传统的单一兵种或几个兵种的对抗, 演变为海、陆、空、天、电五维空间多兵种协同、交叉对抗, 及敌对双方以武器装备为物质基础的作战体系的较量。所谓敌对双方作战体系, 系指针对具体作战单元, 由武器装备体系、作战指挥系统、政治工作系统、后勤保障系统、后方支援系统和作战部队等组成的作战力量整体^[6], 见图1。

现代战争条件下, 所谓武器装备体系, 系指为完成一定的作战任务, 由功能上相互联系、相互作用的多种武器装备系统, 通过信息技术组成的更高层次的系统(system of systems), 形成敌对双方作战对抗的物质基础, 见图2。从未来作战要求与武器装备开发的角度看, 武器装备体系可分为战斗装备系统和保障装备系统。前者又可划分为主战武器装备与电子信息装备系统; 后者又可划分为专用保障装备、通用保障装备和作战阵地设施三大系统。

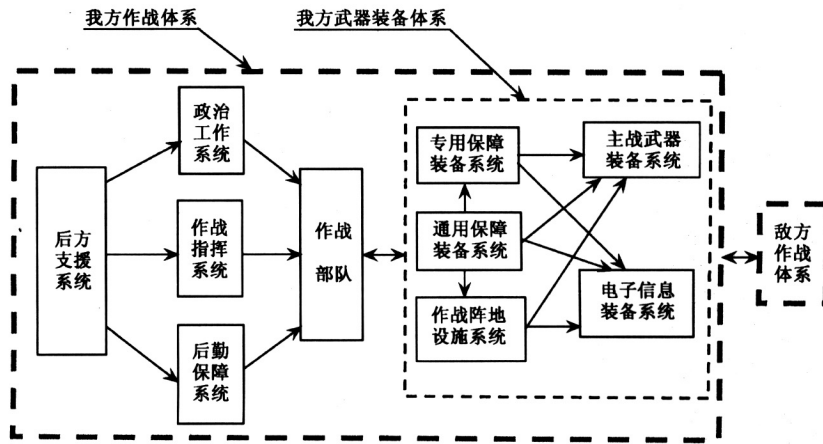


图 1 敌对双方作战体系组成框图

Fig.1 The composite framework of combating system of opposed sides

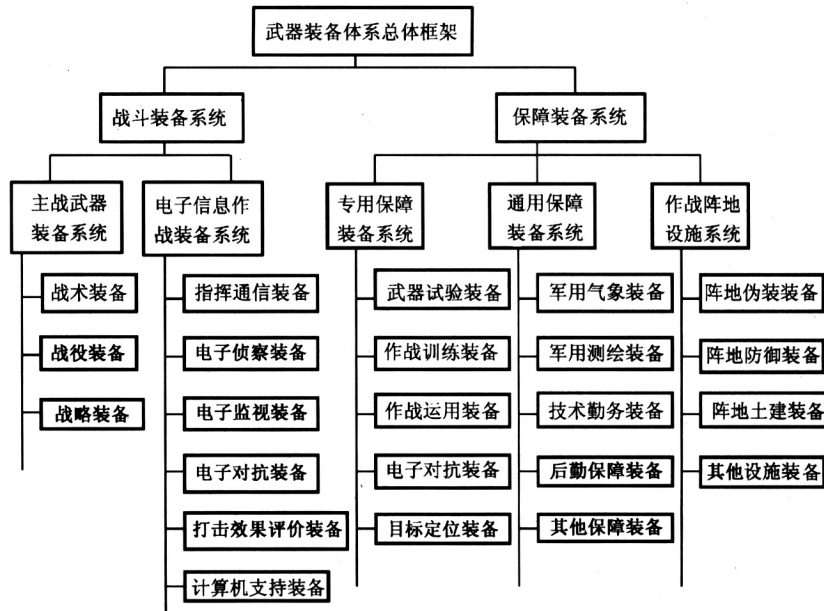


图 2 武器装备体系总体框架

Fig.2 The total framework of weapon system

当今世界已进入以复杂工程系统开发、组织和运行管理为重要特征的时代，面对复杂的现代工程系统，工程科学技术的发展不能继续停留在传统工程理论与实践画定的工程研制过程的狭小范围内。对现代高新技术复杂工程系统的开发与建设，特别是现代高新技术复杂武器装备系统的开发与建设，在需求确定的过程中，必须面对复杂的发展环境预测与中长期规划（见图 3）。这里讨论的发展环境预测与中长期规划，不是指 5 年、10 年，而是 20、30 年或更长时间。显然，这种对社会需求环境、

科技发展环境、经济制约条件及其他相关环境因素的科学预测是一个长期的、非线性的动态发展过程，不确定性很大，远远超出传统工程科学研究的范畴。20 世纪 60 年代以来，西方发达国家通常是组织跨行业的国家最高水平的科学家、工程系统专家、相关领域的工程技术专家，按照严格的工作程序^[5~8]，共同进行较长时间的碰撞与滚动式的研究来完成。为适应当代科学技术的发展，利用信息科学与计算机技术的最新成果，发达国家建立了一系列“武器装备体系发展论证（或作战）实验室”，

把现代武器装备系统建设推向新的发展阶段。

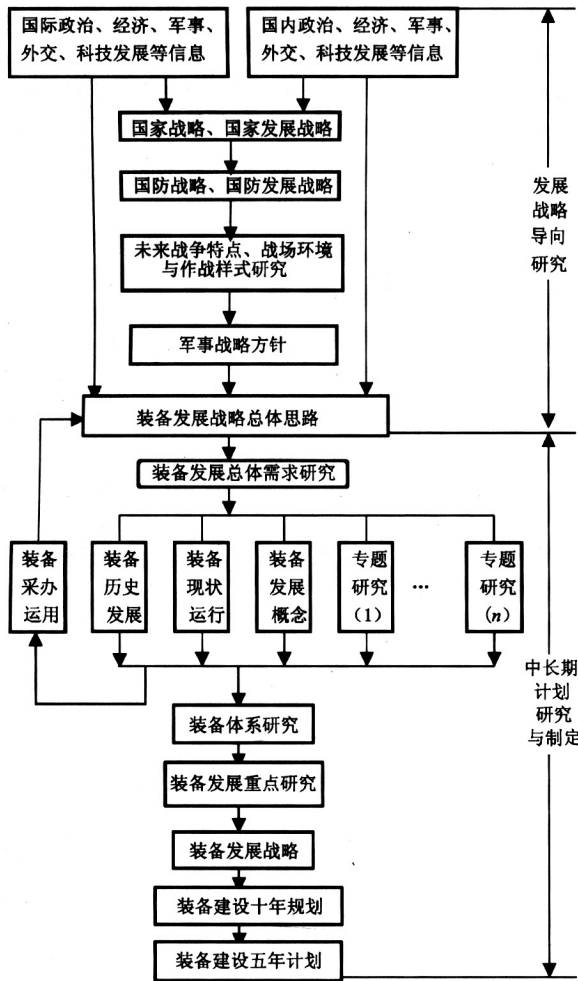


图 3 武器装备发展战略与中长期规划研究、制定的程序

Fig.3 Program of research and enacting about stratagem of weapon development and long-range programming

在现代工程系统的物化过程中，工程系统的社会化、系统化、综合化和复杂化已成为发展趋势，必须面对多学科、多工程专业的综合与信息一体化问题，首先解决工程系统开发过程经常遇到的复杂发展环境预测与发展决策问题。这些问题与工程实施过程中的具体技术相比，如同数学运算中的整数与小数的关系；若疏忽了工程发展环境的系统性、社会性，犹如算错了整数位，即使小数位再精确，也与事无补。解决现代工程系统开发问题，需要借助于系统（复杂性）科学、现代管理科学和工程系统工程理论与实践的创新^[1,5,7,9]。

武器装备发展中长期规划的制定是一个复杂的研究与决策过程，既要考虑国家发展、国防战略目标与国家科技、工业水平和资源的支持能力，又要研究可行的技术途径与对策。能力与需求之间总是有很大差距，任何国家都要冒一定的风险，关键在于谁能更科学地预测未来，更充分、更有效地利用有限的资源，对策、谋略更高一筹。说到底，是潜在对手之间智慧与综合国力的较量^[5,6,8]。

现代条件下，任何个人和单一职能部门都无法全面掌握制定战略所涉及问题的全部细节，难以准确地制定武器装备的发展战略。借鉴世界各国武器装备发展研究的成功经验，结合我国实际，笔者提出发展研究的基本程序与组织体制如图 3、图 4。

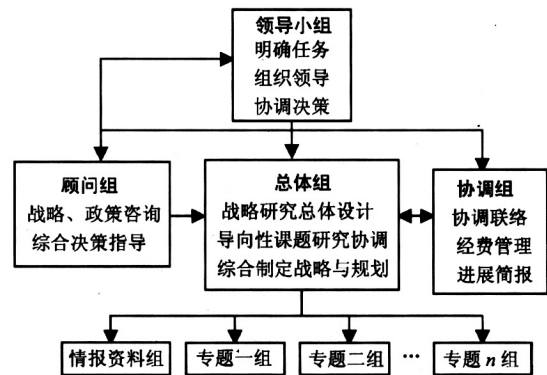


图 4 武器装备发展研究与论证的组织体制

Fig.4 The organic system of weapon development research and argumentation

利用当代信息技术革命的最新成果和体系对抗形成的战场环境模型，建立人机交互、以人为主的装备体系论证决策支持系统，研究制定武器装备发展战略、武器装备体系与发展规划，是对武器装备发展研究进行变革的必然结果。武器装备体系发展论证（作战）实验室计划应运而生，成为当今世界军事强国推进武器装备现代化建设的重要手段。

总结我国航天事业发展和社会主义建设管理的经验教训，20 世纪 80 年代初，钱学森院士明确提出：“凡现在不能用还原论处理的，或不宜用还原论方法处理的问题，而要用或宜用新的科学方法处理的问题，都是复杂性问题。”^[1]复杂性问题研究不仅要定性分析，还要定量研究。钱学森进一步提出“把科学理论、经验知识和专家的判断力相结合，通过半理论、半经验的方法处理复杂系统的决策问题”的基本思路。在创建系统学的过程中，钱

学森 1989 年提出研究开放的复杂巨系统的方法论“从定性到定量综合集成法”，又称为“综合集成技术”或“综合集成工程”^[1]，其实质就是把专家体系、数据与信息体系以及计算机体系相结合，构成一个高度智能化的人机结合系统，研究、解决复杂系统，包括武器装备发展战略、体制、规划和计划研究与制定的科学决策问题。这种“系统论”方法，把人的思维、思维的成果，人的经验、知识、智慧，以及各种情报、资料和信息加以集成，用结构化的方法逐步逼近非结构化的复杂系统决策问题，从多方面的定性认识逐步上升到能够实施决策的定量认识^[1,5]。

1992 年以来，钱学森进一步提出“从定性到定量综合集成研讨厅体系”的构思^[1]，是解决复杂系统决策问题运行机制的创新，开创了人机结合、人网结合的新途径。“综合集成研讨厅体系”，实际上是“综合集成方法”的实践形式。在武器装备发展战略、体制、规划和计划研究与制定过程

中，运用这套方法，建立新的运行机制，将为我国未来武器装备发展的宏观谋划增添新的活力^[5,6]。借鉴国外武器装备发展计划管理的新经验，运用“综合集成方法”与“综合集成研讨厅体系”的理论与实践创新，大力推进我军武器装备体系论证重点实验室的建设，是我军在新时期的重大课题。

2 关于开发性科研工程

笔者以我国首批太平洋火箭试验准备工作中海上试验区与试验禁区的划定为例进行讨论。

2.1 问题的提出

1975 年 9 月，笔者向军委 718 工程和国防科委领导汇报我国洲际火箭太平洋试验方案时，钱学森副主任高瞻远瞩，指明了我国洲际火箭太平洋试验准备工作的方向。任务是非常艰巨的。试验区与试验禁区参见图 5、图 6。钱老明确指出：力争在新中国成立 30 年大庆前后进行我国洲际火箭全程试验，目前的试验方案基本可行，但是，火箭海上试验

我国在 1980 年 5 月 18 日上午发射的第一枚运载火箭，准确地命中目标海域



图 5 我国洲际火箭试验禁区（《人民日报》1980 年 5 月 9 日）

Fig.5 The test forbidden zone of the People's Daily bulletin on 1980-05-09

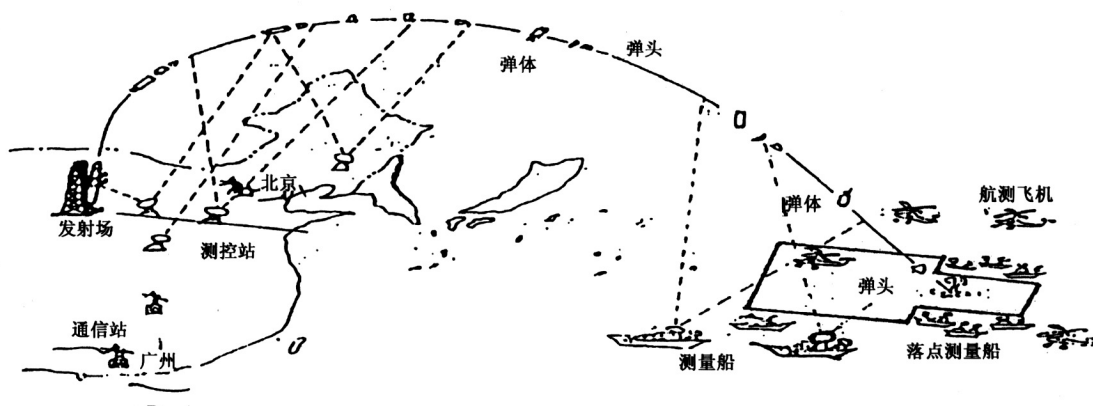


图 6 我国太平洋火箭试验区与测控系统布置

Fig.6 The test zone of rocket and distribution of survey and control system of our country

区，一定要比美苏初期试验水平高，试验区要小，封锁时间要短^[10]。

2.2 外国人的做法及对我们的挑战

对于远程、洲际导弹的试验考核与鉴定，美苏都立足于在公海上进行全程试验。太平洋、大西洋

几乎是美国的“内海”，美国选择与划定试验区几乎没有任何约束；而前苏联进行第一次太平洋火箭试验时，事先不宣布。前苏联随后各批次海上试验区如表 1 所示^[11]。

我国当时不具备在公海上进行全程试验的条件，

表 1 前苏联太平洋火箭试验各批次海上禁区

Table 1 The forbidden zone on the sea of the Soviet Union

批次	通告时间	结束时间	型号	射程/km	发数	范围/km	说明
0			东方号	12 500	1~2		1959 年发射，发射前未公告
1	1960-01-08	1960-02-02	东方号	12 500	2	500×300	首次公开导弹试验，弹头落入试验区
2	1960-06-29	1960-07-08	新型多级	13 000	2	320×190	美国人两架巡逻机跟踪，未看清弹头再入时是否损坏
3	1961-09-11	1961-10-30	改进型多级	>12 000	8	290×320	10 月 7 日发射的火箭装有新型制导系统，可能是“环球火箭”
4	1962-10-16	1962-10-18	新方案多级	>12 000	2 以上	210×210 600×300	首次使用两个试验区
5	1963-05-12	1963-07-11	改进型多级	>12 000	4 以上	320×260	
6	1963-11-29	1964-01-24	改进型多级		1 以上	330×310	
7	1964-08-01	1964-12-30	新型多级		1 以上	半径 120	首次使用圆形试验禁区
8	1965-01-10	1965-02-02	新型多级	13 000	1 以上	半径 120	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31		1975-06-07	SS-18	9 200	2	半径 240	美国范登堡号测量船跟踪侦察，弹片落到范登堡号测量船上
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
37	1977-12		潜地导弹	7 400	4 以上	~半径 90	从白海的潜艇上发射的潜地导弹

按照试验计划，到 1979 年底，可以进行 6~8 发洲际导弹国内特殊弹道的短程飞行试验。如何通过短程飞行试验信息确定我国首次太平洋火箭试验区与试验禁区，既要保障试验船队安全，又不伤及试验禁区外的外国船只和人员，还要比美苏初期试验水平高，对我国科技人员提出了挑战。

2.3 还原论方法的困惑

导弹射击总误差包括制导误差和非制导误差。我国当时的洲际导弹，非制导误差很小，主要是制导误差，其中又以制导工具误差为主，包括系统测速（加速表）误差与基准（陀螺）误差，见图 7。

制导误差可以通过导弹飞行试验遥测、外测数据进行数学处理获取：

$$\Delta W = W_{yc} - W_{wc}$$

式中 W_{yc} 为导弹飞行的遥测数据； W_{wc} 为导弹飞行的外测数据。

略去遥测的系统误差，事先扣除外测的系统误差或作为误差项进行分离，可以得到

$$\Delta W = \Delta W_{cs} + \Delta W_{jz} + \eta = \Delta W_{gj} + \eta$$

式中 η 为遥测、外测系统的剩余随机误差； ΔW_{cs} 为测速误差； ΔW_{jz} 为基准误差； ΔW_{gj} 为工具误差。

从理论上得到上述结果并不难，但解决这一问题却遇到了重重困难：

- 1) 我国测量系统研制滞后，测量系统测得的数据，其可靠性与精度都难以满足精度分析的要求。
- 2) 导弹制导误差分析方法有待试验验证，虽然当时提出了诸如贝叶斯法、岭估值法、超椭圆法、主成分法、改进主成分法和特征根估计法等，但是，可靠性不能令人满意，特别是难以得到试验的进一步验证。
- 3) 特殊试验弹道获得的制导误差转换到正常武器弹道上，也存在转换方法与可靠性问题。
- 4) 在全程飞行试验前，即使默认所有飞行试验的测量数据都可靠，最多也只能获得 6~8 发特

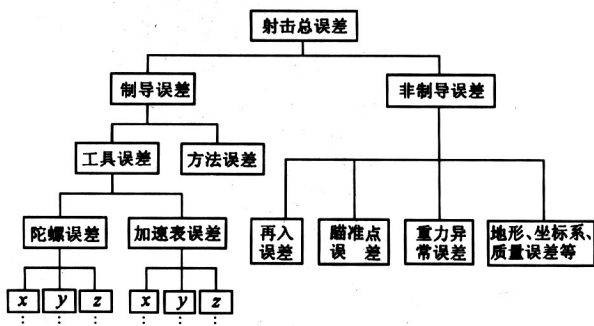


图 7 导弹射击总误差分解图

Fig.7 Resolution of total error about launch a missile

殊弹道数据,供精度分析用的信息仍然很有限。

因此,采用在还原论指导下的精度分析方法解决这一工程问题遇到了难以克服的困难。

2.4 从定性判断到定量综合分析决策

对于开发性、特别是前无古人的开发性科研工程,常常遇到研究对象原始信息十分不足的难题,用还原论指导下的现代科学技术方法遇到难以克服的困难。为此,我们采取了扩大研究对象母体的办法,把相关的研究对象都作为原始信息源,在广泛收集、分析相关原始信息的基础上,走一条从定性判断到定量综合决策的道路。

首先,收集我国所有弹道导弹型号正常武器弹道飞行试验的实测数据进行统计分析,得出东风型号横向射击误差很小,而且多远弹的统计规律。考虑到我国东风型号导弹控制系统研制的继承性和设计方法的一致性,对我国洲际火箭命中精度的理论设计做出了定性估计,对洲际火箭的弹头试验区做出了定性判断。然后,通过理论分析与统计预测相结合的办法,确定了导弹弹头与弹体落点的中心点距离 L ,并且通过对洲际火箭国内特殊弹道试验区的实际勘测,初步确定了洲际火箭的弹体残骸散布区(图8)。在此基础上进行综合集成,形成我国首批洲际火箭太平洋试验弹着点试验区与试验禁区的决策支持意见,给出了半径为 $65 \sim 70$ n mile 的试验禁区(参见图5),被采纳付诸实施。

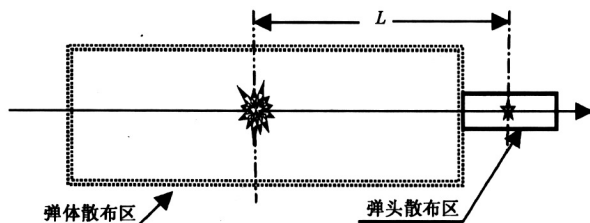


图8 导弹头体散布区示意图

Fig.8 The schematic diagram of diffused area of missile

3 关于特殊复杂环境工程的开发

这里以隧道围岩-支护系统为例进行讨论。

隧道围岩-支护系统(地下工程),其周边环境通常是不连续、非均质、各向异性、非线性和流变性的介质,每一点上的力学参数不同,复杂多变,通常均属未知。以往的地下工程设计与施工,应用基于还原论的岩石力学理论分析预测,结果往往与实际情况相差甚远。隧道围岩-支护系统设计

中的周边环境稳定性分析预测,属于工程系统开发中的复杂性问题,用现代科学技术方法遇到了难以克服的困难。为了解决隧道围岩-支护系统稳定性分析预测问题,李世焯先生提出了“典型信息法”,很好地解决了这一工程系统开发的难题,为开发特殊环境工程系统的理论与实践做出了贡献^[2]。

3.1 当代岩石力学的困惑

岩石力学属于技术科学,在传统上被认为是固体力学的一个分支,因此,通常沿用力学方法,即“实验室力学试验”加“数学分析”的方法进行研究。岩石力学的研究对象——岩体是地质体的一部分,是经历长期地质构造运动形成的极其复杂的介质,这种复杂性因施工扰动而更趋复杂。力学的简化和岩体的复杂构成了岩石力学的主要矛盾,因此,面临岩石力学研究的两大前沿课题:岩体的机理模型与力学参数难以确定^[2]。几十年来,虽经许多科技工作者努力攻关,并多有进展,但始终未能从根本上予以解决。

在两大前沿课题的困扰下,至今岩石力学理论分析结果与实际情况往往相差甚远。例如,1994年对小浪底水利枢纽地下厂房围岩稳定性的岩石力学分析,国内某知名大学的研究报告称“稳定性非常好,大部分处于弹性状态”;另一重点大学的研究结果则是“稳定性很差,大部处于塑性状态”,二者结论完全相反^[2]。几十年来,世界各国的地下工程技术规范、指南都把理论分析置于辅助地位,而把工程类比的经验方法放在首要地位^[2]。在这一领域里,以还原论为基础的现代科学技术方法处于尴尬境地,看不到根本解决问题的希望。

3.2 典型信息法的工程实践

为了有效地解决坑道工程围岩稳定性分析预测的难题,李世焯先生曾试用各种理论方法、经验方法与监控量测技术,均以失败告终。在山重水复疑无路的困境中,李世焯偶然想到毛泽东倡导的调查研究方法——“从研究典型着手”和“一般与个别相结合”。既然这种方法能有效地解决复杂的社会问题与战争问题,为什么不能用于解决复杂的科学技术问题?于是决心尝试引入人文科学和社会科学的“从典型到一般的方法”,并与半经验半理论方法有机结合,提出了“典型信息法假说”^[2]。

典型类比分析法是典型信息法实践的第一步。1985年李世焯初步研制完成BMP84程序,是常用的一种应用形式。1988~1989年,李世焯受小浪

底水利枢纽设计单位委托，应用试验洞实测资料进行位移反分析，与实测资料符合较好，首次完成了工程验证，进一步修改了 BMP84A 程序。此后，经过数以百计的工程应用证明，典型信息法坑（隧）道围岩稳定性分析预测可信度的统计值不低于 90%，有关论文两次发表于有较大影响的国际岩石力学学会刊物《国际岩石力学与矿业科学学报》^[2]。

变形速率比值判别法是典型信息法的又一种应用形式^[2]。在广东西部沿海高速公路猫山隧道地质勘探中，少量钻孔都打在坚硬完整的部位，而施工中发现软弱围岩居多，曾三次发生险情。第一、二次险情中，施工单位应用变形速率比值判据，及

时预报险情，采取相应的加强支护措施，使工程化险为夷。第三次险情中，由于施工主管单位不接受根据典型信息法做出的险情预测，1999 年 7 月 9 日 20 时发生了 720 m³ 大塌方，耗时 2 月余，耗资 100 余万元才予以排除。猫山隧道工程实践对于变形速率比值判据的科学性和实用性从正反两方面做出了严格的检验^[2]。

4 从还原论到系统论方法的发展

我们这些从院校门走出来的科技人员，基本上都是被还原论洗过脑筋的，遇到科学技术难题时，很自然地会选择图 9 所示的解决问题的思路。

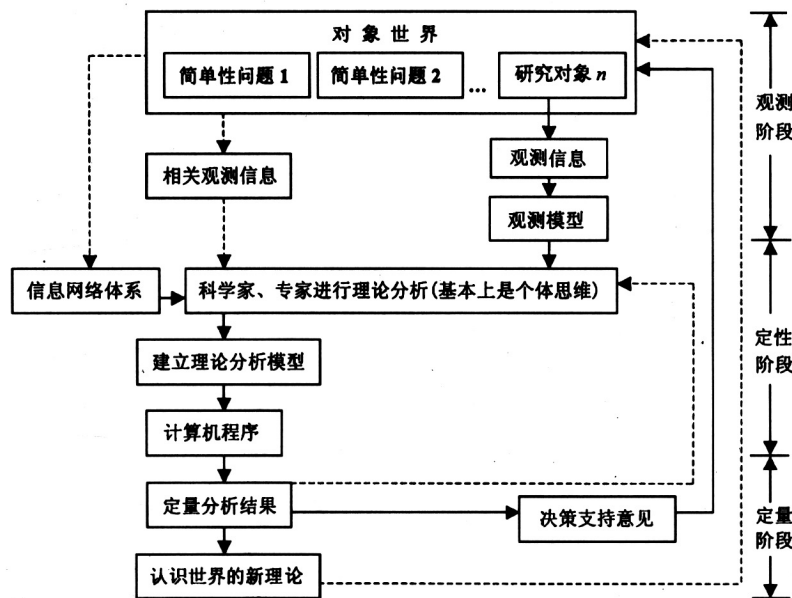


图 9 还原论研究、处理问题的基本思路

Fig.9 Basic train of thought of reductionism

如前所述，当遇到复杂性问题而走投无路时，我们会学习、思考并探索新的攻克难题的办法。结合过去的工作经验，研究钱学森在《创建系统学》中提出的“从定性到定量综合集成法”，形成了图 10 所示的处理复杂性问题的理论、方法总体框架：

基本理论是“复杂巨系统及其方法论”，具体讲，凡是不能或不宜用还原论方法处理的问题，都是复杂性问题，复杂性问题可以采用“系统论”原理，从定性到定量综合集成的方法去处理。

基本方法是复杂性问题通常均属于非结构化问题，这类问题采用组织相关领域专家进行群体思维的方式，在充分利用一切可以利用的相关信息条

件下，通过定性判断，对复杂性问题可以进行结构化近似处理，进而采用人机结合，以人为主的方式，通过多层次人机对话的“自组织过程”，实现认知的涌现。

工程应用的基本思路是针对各学科、专业的具体复杂性问题，采用总体部的组织形式，建立总体部体系指导下的“从定性到定量综合集成研讨厅”的运行机制，组织相关领域专家，利用一切可以利用的相关信息、知识、经验，进行分析、综合、集成，形成专家群体思维定性判断指导下、计算机仿真支持下的认知涌现过程。采用上述基本思路，面对复杂性问题，将不会束手无策，往往能够迎刃而

解或容易找到解决问题的方向或基本思路。

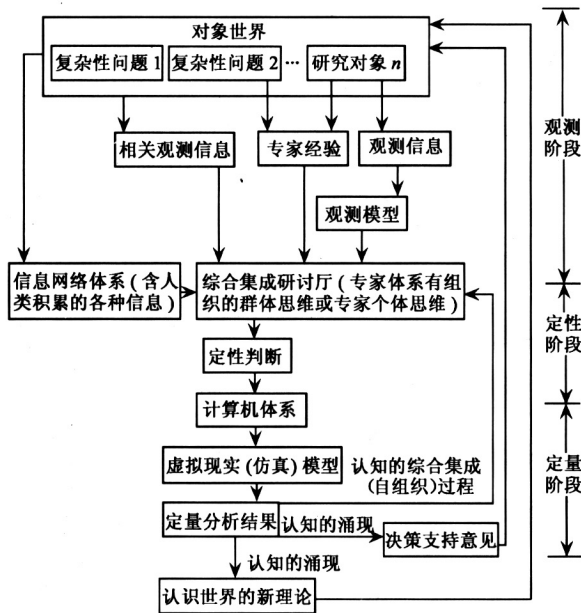


图 10 系统论研究、处理问题的总体思路

Fig.10 Basic train of thought of systematicism (systematics)

5 结语

从图 10 中可以看出,应用系统论的方法对复杂性问题进行研究,信息采集不仅仅针对研究和管理对象本身,而是与研究和管理对象相关的整个客观世界,极大地扩充了珍贵的原始信息源;对复杂巨系统研究和管理的方法通常采用人机结合、以人为主的方式,以结构化的分析方法为基础,通过从定性到定量多层次、多循环的分析、综合、集成,逐步实现对复杂性问题的认知涌现,在此基础上提出以定量研究结果为基础的决策支持意见,进而实现认识世界理论的升华;复杂巨系统研究的管理运行机制,通常是在“从定性到定量综合集成研讨

厅”的技术环境中进行,实施总体(论证)部指导下的学科专业研究与系统综合集成相结合的运行机制,实现对复杂性问题研究、管理体制与运行机制的创新。可以说,系统论是采用“以人为主、人机结合、仿真支持下的人机交互方式”进行复杂性问题研究的理论、方法总体框架。系统论是在研究对象总体、认识客观世界方法,以及认识与改造世界的运行机制上对还原论与整体论的发展和创新,系统论方法含盖了还原论与整体论方法的精华,还原论、整体论方法实质上是系统论方法的一种形式。

参考文献

- [1] 钱学森. 创建系统学[M]. 太原:山西科学技术出版社,2001
- [2] 李世辉. 复杂性工程技术问题研究实践与科学方法论思考[J]. 中国工程科学, 2002, 4(11):71~81
- [3] 霍绍周. 系统论[M]. 北京:科学技术出版社,1988
- [4] 潘永祥,李 慎,阮慎康,等. 自然科学概论[M]. 北京:北京大学出版社,1986
- [5] 赵少奎,杨永太. 工程系统工程导论[M]. 北京:国防工业出版社,2000
- [6] 杨永太,赵少奎. 国防科技[M]. 北京:军事科学出版社,2003
- [7] (美)弗雷蒙·E·卡斯特,詹姆士·E·罗森茨威格. 科学、技术与管理[M]. 柴本良,华 棣,李盛昌,等译. 北京:国防工业出版社,1979
- [8] 郑开昭,王 东,兰鲁闽,等. 无形的杠杆[M]. 北京:解放军出版社,1988
- [9] (美)米歇尔·沃尔德罗普. 复杂—诞生于秩序与混沌边缘的科学[M]. 北京:生活·读书·新知三联书店,1997
- [10] 赵少奎. 飞向太平洋的洲际火箭[J]. 航天杂志, 1999(增刊):44~46
- [11] 赵少奎. 苏联在太平洋上的火箭与导弹试验[J]. 靶场与试验技术,1979,(2):21~43

Discussion on the Complex Nature of Modern Engineering Systems Development

Zhao Shaokui

(Weaponry Research Institute of the Second Artillery, Beijing 100085, China)

[Abstract] The paper discussed the complex nature of development research on modern complex weaponry systems, scientific research engineering and specific complex environment engineering, and put forward general thinking to use method of systematicism (systematics) to research and deal with problems of complex nature.

[Key words] engineering system; complex nature; reductionism; systematicism (systematics)