

# 复杂性工程技术问题研究实践与科学方法论思考\*

李世辉

(总参工程兵第四设计研究院, 北京 100850)

**[摘要]** 简介了在复杂性工程技术问题研究中典型信息法的若干成功应用, 并以天文、地质、生物学等以复杂系统为研究对象的学科中典型信息法的应用实例, 说明其应用的广泛性; 阐述了典型信息法的概念, 并简述了对有关科学方法论问题的几点思考。

**[关键词]** 复杂性工程技术问题; 实践; 科学方法论; 还原论与整体论结合; 典型信息法

**[中图分类号]** N03; N3; N941 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)11-0071-11

## 1 前言

在地球表层岩石圈内开挖与支护, 构成地下工程——如隧道工程, 相应的学科是地学与力学交叉的岩石力学和工程地质力学。本文讨论的复杂性问题的, 大多基于这个专业背景, 并有所扩展。

隧道围岩—支护系统是一个开放的复杂巨系统<sup>[1]</sup> (简称复杂系统)。地下工程周围的岩石 (通称围岩) 经历过多次地质构造运动, 通常是非均质的、不连续的、各向异性的、非线性的和流变性的介质, 每一点力学参数各异, 均属未知, 以复杂多变为本特征。工程区域的地质条件, 千百年很少变化, 但是, 在隧道开挖爆破等人为因素触发下, 岩体固有的、难以定量描述的复杂因素, 与未知的地应力、地下水等环境因素动态相互作用, 力学性态突发剧烈变化, 随后渐趋新的稳定或失稳。这种多因素间耦合作用的研究刚开始不久, 尚未取得有实用价值的成果<sup>[2]</sup>。国际岩石力学学会首任主席 L. Müller 指出: 岩体是技术学科中最复杂、最难理解的一种材料<sup>①</sup>。中国岩石力学与工程学会创始

人陈宗基写道: “岩石既然是一种十分复杂的地球介质, 无论怎样仔细地研究, 也不可能把所有的问题都搞清楚,”<sup>[3]</sup>—语道破岩石力学研究对象的复杂性本质。

为便于具体了解, 下面引用 3 个简图: 图 1 示出岩石中不连续性等多种因素的、难以预测的、随机变化的特点; 图 2 示出不连续面的 3 种典型情况, 与相应的应力状态剧烈改变<sup>[2]</sup>; 图 3 示出软弱围岩隧道地质、力学参数在横断面上的逐点变化特征<sup>②</sup>。

几十年来, 基于还原论的岩石力学理论分析预测往往与实际情况相差很远。如小浪底水利枢纽地下厂房设计, 清华大学与河海大学分析预测结果相反, 且均不符实际<sup>③</sup>。各国地下工程技术规范, 均以经验性工程类比法为主, 理论分析置于末位。现代科学技术在地下工程的这种处境, 令人尴尬。

钱学森指出: 凡现在不能用还原论方法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<sup>[4]</sup>。围岩稳定性分析预测属于复杂性工程技术问题应无疑

**[收稿日期]** 2002-06-25; **[修回日期]** 2002-07-22

**[作者简介]** 李世辉 (1932-), 男, 北京市人, 总参工程兵第四设计研究院高级工程师

\* 中国科学院工程地质力学开放研究实验室资助课题

① 缪勒教授来华学术报告集. 中国地质学会工程地质专业委员会等, 1981

② 南岭隧道进口试验段第四、五段现场试验总结. 铁道部科学研究院铁道建筑研究所, 1984

③ 小浪底水利枢纽地下厂房支护设计报告. 黄河水利委员会勘测规划设计研究院, 1994

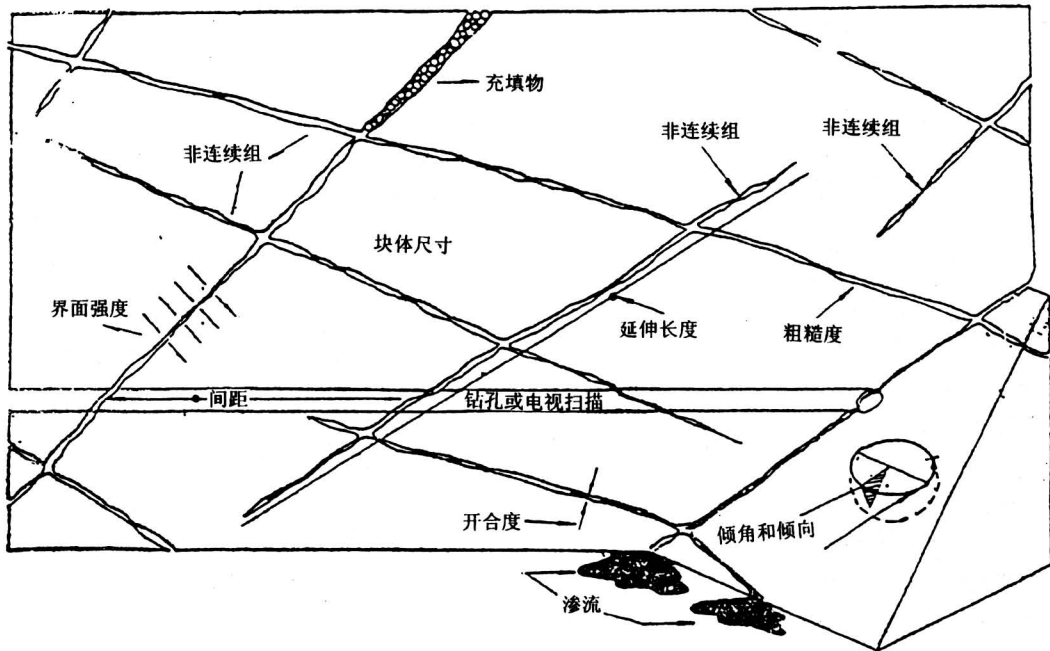


图1 与不连续性有关的10种岩石特性

Fig.1 Ten properties associated with discontinuity (ISRM)

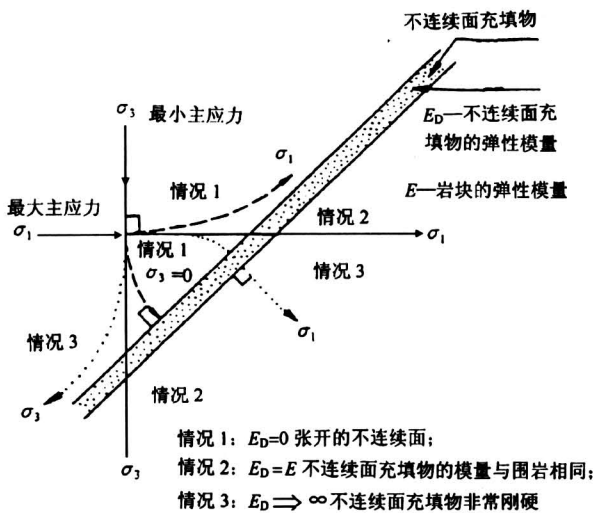


图2 不连续面对应力状态的影响

Fig.2 Effect of a discontinuity on the stress state

义<sup>[1,5]</sup>, 复杂性工程技术问题是客观存在的事实。

## 2 典型信息法初次实践探索 (1981—1991)

### 2.1 科学技术条件

20世纪40年代诞生的三项科学技术——系统科学、电子计算机和新奥法 (new Austrian tunnelling method, 中译: 隧道工程奥地利新方法,

简称“新奥法”), 发展到80年代初, 为突破还原论思维的藩篱, 解决“岩石力学理论分析预测”的技术难题, 准备了必要条件<sup>[6]</sup>。

新奥法的历史性贡献在于: 首次提出并实施量测洞室周边两点间距离的变化, 作为观察和控制围岩整体稳定性的依据。围岩变形是在开挖、支护的触发下, 围岩内各点产生的应变增量在洞周点对空间域与时间域的积分。从系统科学角度观察, 围岩变形是将整个系统的信息, 集中起来提供人们的高层次的、可观和可控的宏观量; 这是在大量难以定量描述的状态变量的动态相互作用下形成的序参量<sup>[7]</sup>。新奥法是朴素的系统、控制、信息观点的一种成功应用<sup>[6]</sup>。对于从整体上认识与有效处理复杂系统问题, 对于系统科学、信息科学研究, 新奥法均具有典型意义<sup>[6,8]</sup>。

20世纪70—80年代, 中国曾在地下工程中大规模推广应用新奥法, 提高了工程的安全性和经济性, 并在某些软弱围岩中出现了典型性的新奥法地下工程——原位测试工作量比国外多几倍甚至几十倍, 特征信息相对充分, 成功经验为同行公认, 成为在同类围岩中代表性好的典型工程。如果从还原论与整体论结合的角度观察, 在复杂性问题研究中, 典型信息源的涌现, 是中国特有的一种信息资源优势。新奥法的局限性在于: 只对已量测围岩变

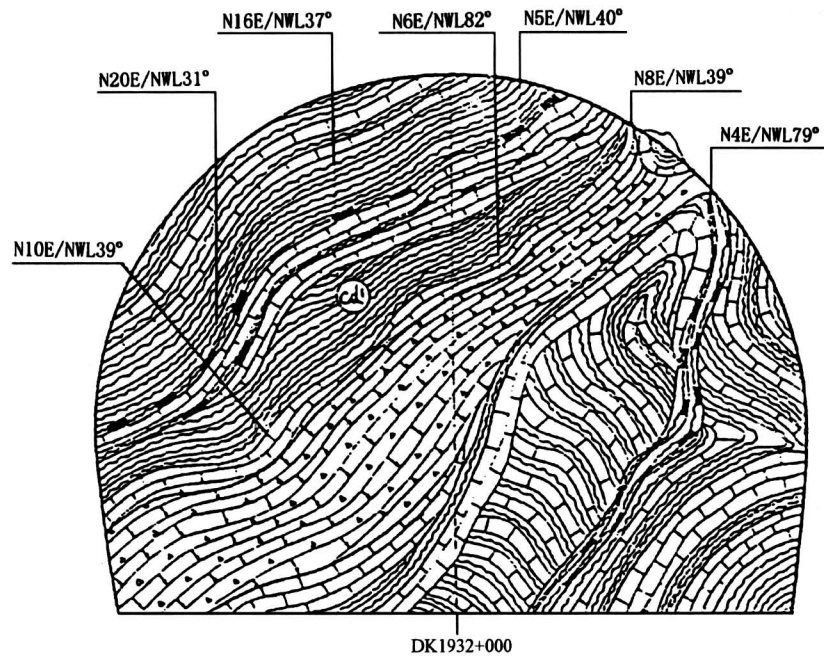


图 3 南岭隧道横断面围岩特征图

Fig.3 Geological features sketch of surrounding rock cross section of Nanling Tunnel

形的特定隧道有效，开挖前或其他隧道均不适用。这是本研究试图初步解决的难题。

## 2.2 解决问题的途径——典型类比分析法

这是笔者提出的在隧道设计阶段，有效预测施工中围岩稳定性的一种原则和方法。

大幅度提高岩石力学理论分析的可靠性，必须解决岩体力学输入参数与本构模型两大前沿课题。这一点在岩石力学与工程界早已成为共识，是一个主要矛盾<sup>[9]</sup>。

传统观念认为，这一主要问题未能解决的主要原因是物质技术条件不足。只有对围岩中大量因素之间的耦合相互作用，用还原论方法逐一试验、研究，精确地、定量地查明本构关系，并得出各点参数值的统计规律之后，才能解决分析预测的可靠性问题。然而，这是遥遥无期的。

按照辩证唯物论的观点，承认总的历史发展中是物质的东西决定精神的东西，但是同时又承认而且必须承认精神的东西的反作用<sup>[10]</sup>。矛盾的主要方面不在于地质条件及施工因素如何复杂，而在于研究者的认识是否符合实际，是否能总揽全局，综合地、充分地利用一切可能利用的有利条件，分析预测的精度能否满足工程实用要求。实现还原论与整体论的结合，是一种开拓创新；风险虽大，但实为科学技术进步所必须。

笔者基于参与围岩分类的实践经验与工程地质力学理论<sup>[11]</sup>，类比国内外新奥法工程类比法支护设计成功经验，1981年提出经验性假说1：按照围岩类别（不是岩石力学介质模型）的不同，为岩石力学围岩稳定数值分析提供概略的（不是精确的）工程地质条件，其有效性应与工程类比法相近。

总结笔者（与邢念信课题组）从事新奥法典型工程围岩变形监测的实践经验，在力学与地学结合的基础上，引入社会科学的典型方法、控制论灰箱方法和系统分析方法，1982年进一步提出经验性假说2：用典型工程原位测试资料的典型（典型断面与典型时刻——初期支护的末期）信息，为同类围岩中的一般隧道工程提供典型化的、概略定量的地质条件。用这样的典型信息拟合理论分析模型（岩石力学二维线性弹性分析程序），用于同类围岩一般工程时，则该典型时刻围岩稳定性的分析结果应该也是接近实际的。

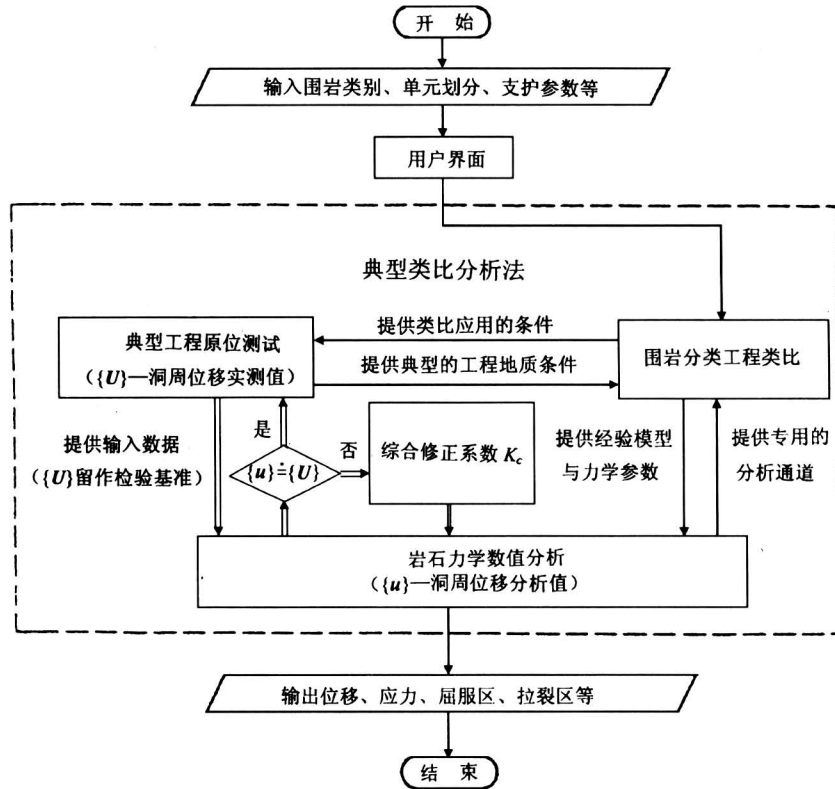
典型类比分析法是典型信息、分类与类比、理论分析三个子系统的有机结合，其应用形式是BMP程序系统<sup>[6,8]</sup>，参见图4<sup>[8]</sup>。典型类比分析法是典型信息法的一种常见形式。

## 2.3 演绎证明

1985年BMP84程序研制初步完成，经工程实测资料验证与局部修正，再经笔者在重点工程中的

应用验证，扩充修改完成 BMP84A 程序，并查明典型类比分析法的理论依据之后，1989—1991 年在总参工程兵第四设计研究院举办 3 期“典型类比分析法 BMP 程序”讲习班，共有 119 个单位自带 116 个隧道工程实例参加。经应用验证与修正，用户满意率平均 93.6%，满足工程实用精度要求。

1994 年总参兵种部对“典型类比分析法与 BMP 程序系统”组织的技术鉴定认为：总体上达到国际先进水平，在五个特点方面居国际领先地位。随后此项成果两次发表于国际影响较大的期刊<sup>[12,13]</sup>，1998 年列入国家军用使用标准<sup>[8]</sup>。下面是一个国际知名的典型工程应用实例。



⇒ 表示用典型工程资料建模的通道；→ 表示同类围岩隧道工程专用分析通道；

综合修正系数  $K_c$  用于修正围岩 - 支护间接触应力， $K_c$  与围岩类别、侧压系数  $\lambda$  和洞室高跨比 ( $H/L$ ) 有关，通常呈非线性分布

图 4 典型类比分析法及其三个组成部分的相互关系

Fig.4 Precedent type analysis and the interrelation between its three components

二滩水电站导流隧洞施工中设计复核。该隧洞是当时世界最大的导流隧洞。施工中软岩坍塌与硬岩岩爆同时存在，地质条件复杂。1991 年 9 月 27 日德国承包商提出，该导流洞软弱围岩区段的原设计初期支护条件下围岩不稳定，建议增设预应力锚索，限 11 月 1 日执行。设计院收到通知只有四周时间，按常规方法已不能完成设计复核，当时估计增加造价数以千万计。该院工程师童建文使用典型类比分析法 BMP84A 程序，两天内将有关分析计算复核完毕。结果表明，德商的经验性岩体力学参数不符合二滩实际，支持原设计。据此，二滩水电开发公司否定了承包商的建议。导流隧洞按原设

计施工，1993 年 12 月建成通水，至今运行正常<sup>[8]</sup>。

### 3 典型信息法的进一步实践探索

在典型信息法实践探索初步成功的启发下，20 世纪 80 年代中期至 90 年代末，笔者在面临新的复杂性工程技术问题研究课题时加以试用，而且主动用以探索本专业多年未能解决的几个技术难题。尽管研究对象特点不同，典型信息的获取方法与具体形式各异，但是，均已获得超出预料的成效，现逐一简介。

#### 3.1 某地下工程生存概率研究 (1986—1988)

##### 3.1.1 科学技术条件 防护工程生存概率的理论

计算模型：生存概率 = 1.0 - 发现概率 × 命中概率 × 毁伤概率，这是一个系统分析与数理统计问题。在现代科学技术条件下，对方尖端武器的命中概率与毁伤概率，均不难获取资料进行可靠的计算，但是，分析确定对方对我方目标的可信的发现概率，却是一大科学技术难题。笔者接受任务后，首先试图以还原论方法研究解决：查明各地下工程的伪装条件，掌握对方每一颗侦察卫星通过我方工程区域的时间、高度、角度等并不很难；查明每颗卫星的镜头焦距、胶卷性能等数据，并估计对方的判读能力已有相当难度；真正的难点在于查明各区域相应每一时刻的气象条件与能见度。实践表明，还原论方法无力解决这一难题。

3.1.2 解决问题的途径 在新的条件下试用典型信息法：首先集中全力查明各地下工程的典型特征（即概括出可能暴露征候的、规律性的典型特点及相应的伪装条件），然后请空间侦察、情报、指挥、通信、工程、学术研究等有关专家群体，结合当时空间侦察的技术条件，根据专家个人经验判断，分别以评分的方式定量估计各地下工程被发现的可能性，然后据以统计发现概率估计值，得出较为可信的生存概率。

3.1.3 评审结果 经有关权威机构专家评审，认为“此项工作是首创性的，方法比较完善科学，得出的结论可信，可作为上级决策时依据”。

3.2 隧道位移反分析智能系统研究 (1989—1991)

3.2.1 科学技术条件 利用新奥法隧道围岩变形量测成果，在假定理论分析模型的条件，反求两大设计输入参数——初始地应力侧压系数  $\lambda$ （水平地应力与铅垂地应力的比值）和围岩等效弹性模量  $E$ ，这就是颇受国内外隧道工程界欢迎的“位移反分析法”。在复杂多变的地质和施工条件下，这是以最小的代价获取接近实际的设计参数的有效途径。

以常规的岩石力学数值分析程序为工具，依靠专家经验以试凑法进行位移反分析，耗时长，受到岩石力学分析可靠性低的局限，因此，国外迄今还没有位移反分析智能化程序。

考虑到 BMP84A 程序经工程实践检验，在满足隧道工程实用精度要求的条件下，较常规岩石力学方法提高效率已达百倍，以 BMP84A 程序为基础，是位移反分析智能系统研究的有利技术条件。

3.2.2 解决问题的途径 首先总揽全局，系统分

析所有可能出现的情况，划分反分析问题类别。在每一类别中，找出典型工程实例，由笔者（代表位移反分析专家，作为典型信息源）逐次修改输入参数，探索得出符合要求的分析结果的途径，并加以形式化，进而扩充修改典型实例，分别考虑相应的极端情况。以 BMP84A 程序为基础，研制 BMP90 智能化位移反分析程序。研制初步完成后，搜集工程实例加以反复验证与局部修正，然后在大量工程应用中进一步验证与修正。BMP90 程序概念框图见图 5。

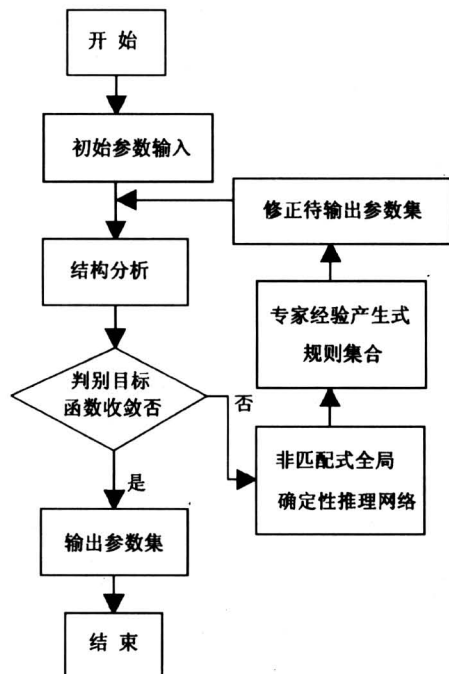


图 5 BMP90 程序概念框图

Fig.5 The flow chart of BMP90 program

3.3.3 演绎证明 1989—1999 年 5 期讲习班，参加单位带来的工程实例中有 44 个位移反分析实例，工程验证经验性统计可信度大于 0.9，凡有现场地应力实测值者，反分析值均接近实际。如张家洼矿区小官庄铁矿巷道支护破坏严重，曾委托长沙矿冶研究院攻关 4 年，查明原因在于“水平地应力大，侧压系数  $\lambda = 1.30$ ”。为验证这一结论，1991 年 5 月该矿区工程师张文哲携带远离采场的两个代表性断面的量测资料，用 BMP90 程序做位移反分析，包括数据准备在内只用几小时即得出反分析结果：侧压系数分别为 1.32 和 1.28，与攻关结果不谋而合，互为验证<sup>[8]</sup>。研究成果经 1994 年总参兵种部的技术鉴定，属于居国际领先地位的五个特点之一。

### 3.3 变形速率比值判据——施工初期即时判别围岩稳定性的方法 (1983—1999)

在隧道施工中即时地、定量地判别围岩稳定性与支护效果,是新奥法问世后尚未解决的技术难题。笔者总结亲身参与的典型工程围岩变形监测中,以经验方法多次判别围岩稳定性与支护效果的实践经验,并对典型断面中典型时刻的量测资料做统计分析,得出稳定性判据的定量阈值。1999年猫山隧道施工中,对此判据做了正反两方面的严格验证<sup>[14]</sup>。

### 3.4 大跨度洞群围岩稳定分析预测 (1994—2000)

3.4.1 科学技术条件 水电地下厂房等大跨度洞室群,其地质、施工条件与工程结构条件都很复杂,围岩收敛量测困难,难以获取围岩变形量测典型资料,据以进行理论分析模型的反馈修正,分析预测可信度低。据此,该项研究之初曾将水电地下厂房等排除在研究对象之外<sup>[6]</sup>。

3.4.2 解决问题的途径 20世纪90年代笔者深入水利水电工程现场,在做无偿技术服务和调研的过程中,得知89002部队顾英才承担的模式试验对二滩水电站和小浪底水利枢纽地下厂房的设计,均曾起过重要的指导作用。由此,笔者发现了不见诸文字记载的、确有实效的、大跨度洞群的典型信息来源。用这两个典型性模型试验资料拟合BMP程序,相应地加以扩充修改,然后应用其他工程的模型试验资料,加以多次验证和局部修正,并结合当前水电地下厂房实际情况加以发展,解决对新的支护条件的模拟、各围岩类别及其亚类的岩体力学参数的自动生成,以及支护参数的自动生成等问题,从而在国内外首次研制出可以作为模型试验的补充和替代(当不具备做模型试验的条件时)的、可信度较高( $\leq 0.7$ )的BMP98地下工程洞室群模型试验计算机仿真程序。

3.4.3 演绎证明 总参工程兵第四设计研究院2000年10月举办了以推广应用BMP98程序为主的第5期讲习班,参加单位29个,带来工程实例26个,满意率92.3%。典型工程实例:根据小浪底水利枢纽地下厂房设计总结的需要,按照各洞室开挖进度、支护条件、实测岩体力学参数、实测围岩变形值等,以BMP98程序做大跨度洞群的位移反分析。反分析结果侧压系数 $\lambda = 0.41 \sim 0.70$ ,与实测地应力值 $\lambda = 0.31 \sim 0.81$ 相比充分接近,可互为验证,并偏于安全。设计单位认为:BMP程

序位移反分析结果“对小浪底厂房洞群设计的合理性提供了新的证明,对地下厂房围岩稳定性与支护设计有重要的实用价值”<sup>①</sup>。

### 3.5 典型信息法在其他重大工程研究中的应用

在学术交流中先后得知:某核效应工程防护研究课题负责人王承树、我国首批太平洋火箭试验总体设计负责人赵少奎,均曾应用与典型信息法相近的研究思路方法,取得成功。

20世纪70年代初,在我国研制第一代洲际火箭的过程中,受国内有限射程靶场的制约,火箭试验考核遇到了一系列技术难题。首先是寻求立足国内特殊弹道试验,基本上实现洲际火箭设计方案考核的试验途径问题;紧接着是远洋靶场试验验证方案的制定和海上试验区正确划定问题。在听取试验方案汇报时,钱学森明确指出:太平洋火箭试验是我国建国以来最大规模的科学试验,具有重大科学、军事和政治意义。你那个试验方案中海上试验区的划定,一定要比美苏初期试验水平高;试验区封锁时间一定要比他们短……<sup>[15]</sup>。在国内短程特殊弹道试验仍然不够充分的条件下,从太平洋火箭试验的全局需要出发,钱学森提出了严格、在当时几乎是苛刻的要求,指出了工作的方向。为解决这一技术难题,赵少奎等就是利用与“典型信息法”相似的思路,奋斗五年,成功地解决了钱学森交办的重大课题。1980年5月9日,人民日报宣布了这一引起世界媒体和军界广泛关注的试验公告,公告试验禁区面积仅为前苏联首次公开宣布的禁区面积的三分之一左右。

最近赵少奎从理论上总结“典型信息法”的实践经验时指出:对于前无古人、创新性的复杂研究课题,首先遇到的难题通常是原始信息不足。如何充分利用原型课题的有限信息,综合已有的、相关课题可靠的、吃透了的典型信息,实施从定性到定量的综合集成,是解决复杂性工程系统问题的有效途径,是系统科学中一个具有普遍意义的问题,可以称其为“典型信息法”。

## 4 自然科学基础研究中典型信息法应用实例

在学术交流与查阅资料中得知,典型信息法的

① 水利部黄河水利委员会勘察规划设计研究院应用证明. 总参工程兵第四设计研究院, 1999

应用并不限于复杂性工程技术问题。纵观近、现代自然科学史，在以复杂系统为研究对象的基础研究学科——天文学、地质学、生物学中，典型信息法往往也是一种必要的、科学合理的研究方法。虽然此前似尚未从科学方法论的高度做出这一概括。

#### 4.1 恒星内部结构与演化研究

罗先汉指出：恒星内部结构与演化理论研究是现代天文学的前沿之一，是个开放的复杂巨系统问题。由于除太阳以外，其他恒星都非常遥远，只能以“点源”看待，很难取得丰富的观测资料，而太阳是离地球最近的一颗恒星，在对恒星内部结构和演化的研究中，理所当然地把太阳选作典型。已知太阳质量与半径，以太阳的可观测量（主要是光度与表面温度）为边界条件，提出“把太阳看作球对称的平衡气体球”的合理假说，根据有关的科学定律（引力定律、核物理定律、能量守恒定律等）导出太阳内部结构的数学模型，并用数值方法近似求解。分析结果表明，太阳内部大致可分为核反应区、辐射区和对流区。太阳结构模型经可观测量的检验，通过反复调整有关内部参量后所导出的光度和表面温度，与实际观测值误差已在 1/1 000 以下。这就是可用于研究与太阳同类恒星的类太阳模型。

用类太阳模型，通过改变核心区参量，必要时加以补充假说，可依次导出红巨星、白矮星、中子星的有关模型。20 世纪 60 年代发现的脉冲星，就是对这种科学研究方法和预言的生动检验<sup>①</sup>。

#### 4.2 地质历史研究

地质学研究中典型方法常见。例如，地质历史研究中的相对地质年表，就是根据存在典型化石地层的对比拟定的。20 世纪中叶起，放射性年龄测定法提供的绝对年龄数据，证明了相对地质年表的科学性。

#### 4.3 遗传定律和基因理论研究

对于生物学这样更复杂系统的研究，G. Mendel 开创了选择典型材料进行生物学试验的基本方法。他选取豌豆作为植物杂交的典型试验材料，设计了严密构思的植物杂交实验程序，在大量实验的基础上引入数理统计方法，1865 年 Mendel 总结试验结果提出遗传定律，创立了遗传学。

T. H. Morgan 沿着 Mendel 开创的实验生物学研究途径，选择果蝇作为遗传试验的典型材料。果蝇的典型性很突出，生活周期只有 10~14 天，易

饲养，更重要的是其每个细胞只有 4 对染色体，使定量分析大为简化。通过以果蝇为典型信息源的研究，Morgan 建立了遗传基因理论，使生物学研究从过去着重形态的描述，转向现代实验的定量研究<sup>②</sup>。

## 5 典型信息法概念与复杂性研究科学方法论有关问题的初步思考

20 年前，笔者在隧道围岩稳定性分析预测研究中，提出典型信息法假说，当时认为只是一种实用途径，并未想到有什么科学价值<sup>③</sup>。后来一再取得实效，特别是得知典型信息法在现代天文学中的应用实例，以及赵少奎等的研究思路方法与典型信息法不谋而合之后，促使笔者不能不从科学方法论的角度，做点反思。

从认识论的角度总结从事复杂性工程技术问题的实践经验，探讨典型信息法在复杂性研究中有关的科学方法论问题，这是本文的主旨。关于辩证唯物论认识论在研究实践中的指导作用，已散见文内有关部分，或多或少已有机结合、融为一体；篇幅所限，未列专题论述。

### 5.1 典型信息法的概念

人类面对着一个无限广阔和无限丰富的客观世界，其中能够通过观察实验研究的客体只占少数，大多数对象需要采用间接研究的方法，借助既有客观依据又带有主观想象的模型来开展研究，逐步推进认识<sup>④</sup>。当代信息科学技术主要是通过探测、传感电磁辐射的方法，获得研究对象的信息。这是原型信息法。当研究对象是某种复杂系统时，如信息获取与处理仍局限于当前对象，往往难以对其行为做出有效的分析预测。有效的信息获取与处理，往往需要原型信息法与典型信息法的综合应用。

典型信息法 (typical information method, TIM) 概念：某些复杂系统 (群体) 的研究，通常具有机理不大清楚、关键性数据匮乏的特点，其个体 (系统) 的特征信息不完全、不确定和不一致，不能有效应用还原论分析方法对系统的行为进行预测和控制。如果在该类复杂系统中能够发现典型个

① 罗先汉. 对《隧道支护设计新论——典型类比分析法应用和理论》的评审意见. 总参工程兵第四设计研究院, 1999

② 转引自参考文献[24].551, 原文参见华罗庚, 宋健. 模型与实体, A·罗森勃吕特, N·维纳. 模型在科学中的作用

体(系统)——特点是:具有以现代科学方法观测的,控制系统行为某一关键性典型时刻的,相对地完全、确定和一致的特征信息,则可应用这种典型信息拟合尚不完善的、简化的理论分析模型。经过多次演绎证明,用本质分类与因果类比为媒介,即可结合应用某个同类一般个体的原型信息,对该个体在典型时刻的行为进行有效的、概略的(有较大可能的与粗略的,而非确定的和精细的)预测与控制。在复杂系统研究中,典型信息法是一种有效的信息获取方法和模型方法,是一种初步的综合集成技术。

由于研究对象的复杂性,作为一种假说-演绎方法,典型信息法虽经多次演绎证明,仍非确定性真理,只能统计得出类似于置信概率区间的经验性的可信度。

## 5.2 以系统科学为中介才能抓住复杂性问题主要矛盾的主要方面

“事物的性质,主要地是由取得支配地位的矛盾的主要方面所规定的”<sup>[10]</sup>。岩石力学界受“机理、参数”两大难题困扰多年,未能解决分析预测可信度问题。正如毛泽东指出的:“万千的学问家和实行家,不懂得这种方法,结果如堕烟海,找不到中心,也就找不到解决矛盾的方法。”<sup>[10]</sup>

从历史上看,中国人历来长于整体观察,拙于还原分析。研究与解决复杂性问题,科学技术基础必须宽广坚实。为此,师从西方学习还原论方法,必须勤恳老实,充分掌握当代一切可能应用的理论、方法,知其然、知其所以然,方能以我为主、灵活应用。研究指导思想必须从整体上把握,以系统科学为中介,用系统方法处理<sup>[19,20]</sup>,中西互补融合,方才可能另辟蹊径,后来居上。

20世纪80年代中期,笔者推广应用BMP84程序曾寸步难行,深感为了在岩石力学与工程中突破还原论思维定势,没有坚实的理论依据是不行的。为此,曾经广泛搜集与学习系统论、控制论、信息论有关论著,逐渐发现在围岩稳定分析的三个基本环节(建模、输入、输出)上,常规的岩石力学方法确有不合理性,并阐明了相应的三条指导原则:**a.** 围岩稳定分析的机理和参数都不大清楚,应属复杂系统与灰箱,因此,合理的建模原则不是传统的、对应于白箱的理论分析,而是经验分析与理论分析结合。**b.** 对于复杂系统的控制原则,不是集中控制,而是分层控制,因此,合理的输入方

式不是集中控制的、平等的多参数输入,而是分层控制的模式输入与多参数输入结合。**c.** 根据复杂系统与精确描述不相容原理,对于输出结果的合理要求,不是传统的可供精确定量使用,而是定性规律符合实际,可供概略定量使用。

以系统科学为中介,阐明围岩稳定分析的三条基本原则,典型类比分析法方才有了坚实的理论基础。由此典型信息法摆脱了“实用方法、经验层次”的局限,增强了用户在工程中试用和验证的信心,终成一家之言,得以平等地位交流于国内外学术界<sup>[1,6,8,12-14]</sup>。

## 5.3 典型信息法与一般典型方法的联系和区别

开放的复杂巨系统的本质特征似应为钱学森指出的“从可观测的整体系统到子系统,层次很多,中间的层次又不认识;甚至连有几个层次也不清楚”<sup>[5]</sup>。既然连有几个层次也不清楚,以细分、单向因果关系试验与分析为特点的还原论方法,单纯的逻辑思维与间接经验均已无能为力,“只有在亲身参加变革现实的实践的斗争中,才能暴露那种或那些事物的本质而理解它们”<sup>[21]</sup>。从“亲身实践”到“理解本质”,从而实现还原论与整体论的结合,这是形成假说与演绎证明的过程。因此,对复杂性研究来说,否认实践与直接经验,一切都无从谈起。

典型信息法与通常的典型方法都必须以专家亲身实践的体验为基础,都具有专家意见、宏观方法的性质,二者有共性。但二者的性质也有明显区别。首先,典型信息法是科学观测、理论分析与专家经验结合的一个整体(系统),是一种假说-演绎方法,是一种科学研究方法,是从定性到定量综合集成法的一种初步应用。而一般典型方法通常只是宏观的、定性的专家意见,常见于文学艺术创作与社会调查。此前在科学方法论论著中,似尚未将典型方法列入。再者,典型信息的作用在于拟合理论分析模型,提出假说,并需经过多次演绎证明与反复修正。而通常的典型方法不属于科学假说,一般没有理论模型,认识过程不一定反复,至少不需多次反复。但是归根到底,典型信息法是一种不确定性推理,它所提供的分析预测,具有类似于有经验的专家的咨询意见的性质。二者在深层次的共性是不容忽视的。

钱学森给笔者来信明确指出:“总之,对开放的复杂巨系统而言,‘典型’有重要意义,应该重



视，是专家意见；但又不能死抱着不放，否则，那就一定会犯错误！”<sup>[22]</sup>这与笔者在推广应用中从一开始就坚持“典型类比分析法只是一种专家咨询意见，绝不能代替用户作决策”<sup>[6,8]</sup>，二者是一致的。钱学森来信指明了复杂性研究中一个根本性问题，对于以谨慎态度从事典型信息法研究，具有指导作用。

以典型信息拟合的理论分析模型，通常是确定性数学模型，因此，经典型信息拟合后，仍然具有确定性的形式。对于不确定性问题，《美国空军防护结构设计手册》的作法是：对确定性数学分析公式的计算结果，乘以（并除以）试验统计得出的某一经验性的不确定度（如 $\pm 1.6 \sim \pm 5.0$ 倍）<sup>①</sup>，给出一个范围值。这种处理方法，概念清楚，使用方便，贯通了确定性分析与不确定性分析两大领域，把看似对立的科学与经验统一起来，对于复杂性问题的研究具有很高的实用价值，值得重视与参考应用。

#### 5.4 复杂性问题的研究中模型方法的一个新形式

模型方法是科学研究方法的核心，而功能模拟则是现代模型方法的前沿领域。建立模型的方法论原则，首要的是相似性与简单性的统一<sup>[23]</sup>。但是，用还原论方法进行的复杂系统研究，往往是一个“两难问题”：模型与原型愈相似，则其结构愈复杂，提供高可信度输入参数的实际可能性则愈小；模型愈简单，则分析结果离实际情况愈远<sup>[6]</sup>。复杂性问题的研究中的模型，通常是半经验半理论的计算机仿真模型<sup>[23,24]</sup>。

研究与处理不确定性很大的复杂系统问题的半经验半理论模型，经历了若干发展阶段。以隧道工程为例，最初的作法是，把用于确定性事物的理论公式加以专家个人经验修正。这种方法的有效性随该专家个人水平而定，没有普适性。目前国内外常用的半经验半理论模型是“位移反分析法”，并以反分析结果作为输入参数，进行较为接近实际的围岩稳定性分析预测。这种方法依赖于围岩变形量测资料，也没有普适性。

典型信息法作为一种新型的半经验半理论模型，其相似性与简单性的统一，源于以下 6 点的综合应用：**a.** 典型信息法的应用，以本学科（专业）公认的科学分类为前提。**b.** 典型信息源的选定，必须有现代科学方法观测的、反映系统（对象）整体运动状态的、本质特征的、充分的信息，其代表

性应为同行所公认。**c.** 典型信息对理论分析模型的拟合，是前者对同类个体特定的本质特征方面的高度相似性，与后者在高度简化条件下，从宏观整体上反映对象本质特征的简单性二者的对立统一。**d.** 应用于同类一般个体（系统）的必要条件是因果类比，即典型与一般个体进行类比的行为是同因同果的。**e.** 典型信息法假说必须经过多次演绎证明，统计得出的经验性的可信度如可满足实用要求，则假说成立。**f.** 事物的复杂性没有穷尽，而典型信息法的功能是有限的，它只能给用户供类似于有经验的专家的咨询意见，而不能代替用户做决策。

综上所述，典型信息法模型用于某些复杂性问题的研究，在较好地满足了相似性与简单性的统一原则的同时，满足了可验证性原则与多种知识和方法的综合运用原则<sup>[23,24]</sup>。因此似可认为，典型信息法是模型方法在复杂性研究中的一个新的、比较有效的形式，因为它更侧重于对功能模拟方法的丰富与深化。

#### 5.5 验证原则：阶段性 彻底性 随时修正错误

典型信息法实质是一种经验性假说，是一种不确定性推理。典型信息总是特定条件下的产物，既有特定的代表性，又必有局限性；再者，任何复杂系统都是一个动态发展过程，而典型信息法，或者是特定时刻的产物（如典型类比分析法），或者是特定阶段的产物（如变形速率比值判别法），在应用中必须谨慎从事，如果误认为是确定性真理，一成不变盲目套用，必然会失败。

笔者从事典型信息法研究 20 年，如临深渊，如履薄冰，深感由于对象复杂多变，演绎证明必须坚持以下原则：**a.** 阶段性——由浅入深多次反复进行，大体有三个阶段：既往工程实测资料验证，重点工程试用验证，用户广泛性工程应用验证。**b.** 彻底性——为了经得起时间和历史的检验，必须放手发动群众，用象征性收费或馈赠的方式，把程序和方法交给隧道工程界广大工程技术人员，由他们自主地应用和验证。这样做的前提是：研究者不谋私利。**c.** 随时修正错误——在工程应用验证中，可能发现典型性的工程实例，也必然会发现前所未料的失误或问题。对于后者必须公开承认，随时修

<sup>①</sup> The air force manual for design and analysis of hardened structures (AFWL-TR-74 102). Civil Nuclear Systems Corporation Albuquerque, New Mexico 87102 Oct 1974, 9th printing, Feb 1980

正错误,并在用户监督帮助下逐步加以解决。复杂性不可穷尽,随时准备面对层出不穷的新的问题,这是复杂性研究中应有之义。

### 5.6 整体论与还原论结合的可操作形式之一

典型是群体中具有充分代表性的个体<sup>①</sup>。复杂性研究中发现典型信息的过程,就是外源信息与内源信息结合的过程<sup>[25]</sup>,并在这一过程中逐渐集中到典型信息点有所突破。这正是研究者认识能力、综合素质的激发和体现。

典型信息法的应用,是形象思维与逻辑思维相结合,从感性到理性的认识过程。在这里,“去粗取精”表现在:在信息不完全、不确定的系统群体之中,发现出在给定方面信息相对完全、确定的典型个体的过程。“去伪存真”表现在:从群体信息不一致(有错觉的表面现象)之中,发现出典型个体在给定方面相对一致的典型信息的过程。“由此及彼”表现在:掌握了典型个体的典型信息,即可集中反映尚处于模糊状态的、此类群体的本质特征。“由表及里”表现在:发现某一个体具备典型形象的条件,也就是对同类事物相似的形象特征做出概括,属于形象思维的高级阶段<sup>[26]</sup>。同时也表明:掌握了典型信息,就有了用以拟合适当的理论分析模型(与逻辑思维结合)的条件,即可由此深入认识与反映同类系统在给定方面的全体、本质和内部联系。

正如钱学森指出的:“创造性的思维,在开始时是模糊的,到处搜索,但在思维的网络中,总有一点突然变得清晰了,模糊的概率分布突然变得很集中了,这就是创造,就是智慧,就是智能。”<sup>[27]</sup>他又指出:“从事物整体关系的‘形象’上抓事物的机理,这是科学研究中创新的老道理。”<sup>[28]</sup>典型信息法的认识过程,从一个侧面对此做了具体而微的说明。

典型信息法的认识过程与实践表明,典型信息法可能是让计算机“感受”与模拟人的形象思维的一种可操作的和比较有效的形式。这种形象思维具有可概略量化、计算机可操作、可重复验证的特点<sup>[29]</sup>。复杂性研究中,在一定条件下典型信息的涌现,是否可以认为是形象思维与逻辑思维相结合的创造性思维的一种形式,值得研究。

某项复杂性研究如果具备“发现典型信息,藉以拟合理论分析模型”的条件,在认识上即如高屋建瓴,总揽全局;在实践上即如执牛耳,纲举目

张。本文涉及的、困扰国内外数十年的若干科技难题在中国的初步解决都是如此,应非偶然。

综上所述似可认为,典型信息法是还原论与整体论结合的可操作的形式之一。典型信息法在科学方法论研究中的意义如何,值得进一步深入研究。

**致谢** 在复杂性工程技术问题研究中,笔者从事典型信息法实践研究始于1981年。笔者自觉涉足复杂性研究,始于1991年底参加钱学森先生创建的系统学讨论班,并得到钱老两次来函指导帮助;得益于参加北京大学现代科学与哲学研究中心与“天地生人学术讲座”组织的多次学术活动;认识论、方法论反思,始于十年前冯国瑞先生在系统学讨论班的启发引导与热忱帮助。典型信息法概念与方法的认识,先后曾与张弥、孙钧、周思孟、王承树、冯国瑞、罗先汉、钱学敏、苗东升、孙小礼、顾金才、卢明森、赵光武、于景元、徐道一、宋正海、刘长林、任振球、褚德莹、钱七虎、马蔼乃、赵少奎等先生的学术交流中得到启发和帮助;在笔者所在与兼职单位,得到邢念信、徐复安、赵玉绂、陈正威、吴向阳、潘人俊、孙广忠、王思敬、杨志法、尚彦军、黄黔、潘立宙、袁志刚等先生的支持帮助,谨此一并致谢。此项研究历时20年,于艰难踽踽之中,小有所成,实赖师长教导与学者、专家、同行多方支持帮助,本文难以列举,敬请参阅参考文献6、8后记。

### 参考文献

- [1] 李世辉,吴向阳,尚彦军. 地下工程半经验半理论设计方法的理论基础——围岩-支护系统是一种开放的复杂巨系统[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(3):299~304
- [2] Hudson J A. 岩石力学原理[J]. 王可钧译. 岩石力学与工程学报,1989,8(3):252~268
- [3] 陈宗基. 发刊词[J]. 岩石力学与工程学报,1982,1(1):4
- [4] 于景元. 开放的复杂巨系统及其方法论[A]. 王寿云,于景元,戴汝为等. 开放的复杂巨系统[M]. 杭州:浙江教育出版社,1996.31~75
- [5] 钱学森. 再谈开放的复杂巨系统[A]. 钱学森,黄秉维,竺可桢,等. 论地理科学[M]. 杭州:浙江教育出版社,1994.164~171
- [6] 李世辉. 隧道围岩稳定系统分析[M]. 北京:中国铁

① 苗东升. 2001年4月9日致李世辉的信

- 道出版社, 1991. 11~18
- [7] 姜 璐. 系统的自组织[A]. 许国志主编. 系统科学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000. 173~202
- [8] 李世辉, 赵玉斌, 徐复安, 等. 隧道支护设计新论——典型类比分析法应用和理论[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [9] 孙 钧. 世纪之交的岩石力学研究[A]. 中国岩石力学与工程学会第五次学术大会论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 1998. 1~16
- [10] 毛泽东. 矛盾论[A]. 毛泽东选集(第一卷)[M]. 北京: 人民出版社, 1991. 299~340
- [11] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979
- [12] Li S. Application of rock mechanics principles to tunnelling in China[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1994, 31(6): 749~754
- [13] Li S, Wu X, Ma F. Application of precedent type analysis (PTA) in the construction of Ertan hydroelectric station, China[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1998, 35(6): 787~795
- [14] 李世辉, 宋 军. 变形速率比值判据与猫山隧道工程验证[J]. 中国工程科学, 2002, 4(6): 85~91
- [15] 赵少奎. 钱学森与中国航天科技[A]. 北京大学现代科学与哲学研究中心编. 钱学森与现代科学技术[M]. 北京: 人民出版社, 2001. 77~106
- [16] 罗先汉. 天体演化[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2000
- [17] 郑积源. 科学技术简史[M]. 上海: 上海人民出版社, 1987
- [18] 李世辉. 地下工程中普及数值分析的实用途径[J]. 煤炭学报, 1986, (1): 41~48
- [19] 冯国瑞. 系统论、信息论、控制论与马克思主义认识论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1991
- [20] 苗东升. 系统科学精要[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1998
- [21] 毛泽东. 实践论[A]. 毛泽东选集(第一卷)[M]. 北京: 人民出版社, 1991. 282~298
- [22] 钱学森. 1995年1月25日致李世辉的信[A]. 钱学森. 创建系统学[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2001. 514~515
- [23] 孙小礼. 自然辩证法通论(第二卷)·方法论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993. 53~218
- [24] 孙小礼. 模型——现代科学方法的核心[A]. 赵光武主编. 思维科学研究[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1999. 550~563
- [25] 冯国瑞. 思维信息加工与认识发展过程[A]. 赵光武主编. 思维科学研究[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1999. 564~580
- [26] 卢明森. 思维奥秘探索——思维学导引[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1994
- [27] 汪成为. 春雨润物细无声——记钱学森在信息领域方面对我的指导[A]. 宋 健主编. 钱学森科学贡献暨学术思想研讨会论文集[C]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. 59~64
- [28] 钱学森. 系统科学、思维科学与人体科学[A]. 钱学森. 科学的艺术与艺术的科学[M]. 北京: 人民文学出版社, 1994. 1~22
- [29] 李世辉. 典型类比分析法的应用和理论[A]. 赵光武主编. 思维科学研究[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1999. 522~550

## Some Research Practice of Complex Engineering and Technology Problems and Considerations on the Scientific Methodology Concerned

Li Shihui

(The 4th Design and Research Institute of the Engineer Corps,  
H. Qs of the General Staff of PLA, Beijing 100850, China)

**[Abstract]** This paper briefly introduces the proposition of typical information method (TIM) and some successful applications in the research of complex engineering and technology problems, explains the extensive use of TIM through some typical examples in astronomy, geology and biology, which are with some complex systems as their research objects, expounds the concept of TIM, and discusses some thinking about the scientific methodology concerned.

**[Key words]** complex engineering and technology problem; practice; scientific methodology; combination of reductionism and holism; typical information method