

压裂系统工程

王新纯 李彤 王秀臣 编著
李磊 主审



石油工业出版社

压裂系统工程

王新纯 李 彤 王秀臣 编著
李 磊 主审

石油工业出版社

内 容 提 要

本书运用系统工程理论、方法,来研究油气压裂技术和压裂管理等问题,把压裂管理系统看做一个整体,结合压裂工艺及压裂管理特点,以便对系统进行最优规划、最优管理、最优控制、选择最优经营方式。基于上述思路,本书主要内容包括系统工程基本原理,压裂系统分析及系统设计,压裂系统预测,压裂系统优化,压裂系统评价,压裂系统决策。

本书对油气压裂技术及压裂管理工作有一定借鉴和指导意义,可供从事油气田开发工作的技术人员、管理人员及有关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

压裂系统工程/王新纯等编著.

北京:石油工业出版社,2002.4

ISBN 7-5021-3730-0

I. 压…

II. 王…

III. 二次采油

IV. TE357

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 019422 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

石油工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 20 印张 510 千字 印 1—1000

2002 年 5 月北京第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3730-0/TE·2728

定价:39.00 元

前 言

系统工程自产生、发展至今已经半个多世纪了。它是一门新兴的交叉学科,系统工程是按照系统科学的思想,运用信息论、控制论、运筹学及管理科学并以此为基础发展起来的,它以电子计算机为工具,对于系统的规则、研究、设计、制造、试验和使用进行组织和管理。概括地说,系统工程是组织与管理的技术,是对各类系统都适用的科学方法。

从系统工程开展的科研和社会实践来看,其领域相当宽阔,从社会领域、经济领域、生态领域、资源领域、军事领域、科技领域及各种规划领域,如城市规划、农林规划、工业规划、交通规划等等,系统工程的应用几乎无所不在。

国际上对系统工程的未来设想及计划之一是:加强系统工程师、系统分析人员与各个专业领域的专家合作,将系统工程与各种专业知识相结合,开展许多“共享知识领域”的边缘性研究。编者长期在石油部门工作,主要从事油层压裂技术和压裂管理工作,在此期间运用系统工程的理论、方法和手段,去研究压裂技术和压裂管理的问题,把压裂管理系统看做一个整体,结合压裂工艺和管理的特点,以便对系统进行最优规划、最优管理、最优控制,选择最优经营方式。基于上述工作,经过归纳整理,编写出本书。

本书共分六章。第一章,系统工程的基本原理。第二章,压裂系统分析及系统设计。第三章,压裂系统预测。第四章,压裂系统优化。第五章,压裂系统评价。第六章,压裂系统决策。第一、二章由王新纯编写;第三、四章由王秀臣编写;第五、六章由李彤编写。全书由王新纯、王秀臣统稿。李磊副教授担任主审,对全书及各个章节提出了宝贵意见。

本书可作为石油部门的科研人员和管理人员的参考书,也可作为石油专业研究生、本科生的教学参考书。

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,希望广大读者提出宝贵意见。

编 者
2001年10月

目 录

第一章 系统工程的基本原理	(1)
第一节 系统科学的一般描述.....	(1)
第二节 系统工程的基本概念.....	(15)
第二章 压裂系统分析及系统设计	(34)
第一节 压裂系统分析.....	(34)
第二节 压裂系统设计.....	(41)
第三章 压裂系统预测	(66)
第一节 引言.....	(66)
第二节 定性预测技术:代尔菲法.....	(70)
第三节 线性回归预测技术.....	(74)
第四节 非线性回归预测技术.....	(84)
第五节 时间序列预测技术.....	(91)
第六节 压裂预测技术.....	(105)
第七节 不同区块压裂井单井月增油量预测.....	(122)
第四章 压裂系统优化	(137)
第一节 线性规划的单纯形法.....	(137)
第二节 非线性规划.....	(144)
第三节 关于全局优化问题.....	(187)
第四节 多目标规划.....	(210)
第五节 油田开发压裂方案优化.....	(235)
第五章 压裂系统评价	(244)
第一节 引言.....	(244)
第二节 指标评分法.....	(246)
第三节 指标综合的基本方法.....	(251)
第四节 模糊评价方法.....	(255)
第五节 层次分析法.....	(266)
第六节 压裂系统评价.....	(276)
第六章 压裂系统决策	(284)
第一节 引言.....	(284)
第二节 效用理论.....	(286)
第三节 随机型决策.....	(292)
第四节 不确定型决策.....	(302)
第五节 决策支持系统.....	(305)
参考文献	(316)

第一章 系统工程的基本原理

作为人类知识总体系的一部分,系统工程不是理论,不是学术,而是一种工程技术。直接应用于改造客观世界的实践活动,应用于解决实际问题,强调的是实用性。与传统的土木工程、冶金技术等“物理”工程技术不同,系统工程是“事理”工程技术,即人们办事的技术。传统工程是硬技术,即关于设计、制造、操作使用物质工具和机器的技术;系统工程是软技术,即组织管理各种社会活动的方法、步骤、程序的总和。建设一个新系统,改造一个既有系统,经营一个已建成的系统,都需要组织管理的技术,即系统工程。如钱学森所说:“‘系统工程’是组织‘系统’的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法。”即使简单的小系统,如处理个人日常事务,系统工程的思想方法也是有用的,但只有涉及多人多因素的大型复杂事务的组织管理问题,才能充分体现系统工程方法的必要性和优越性。越是大型复杂的组织管理活动,越能体现系统工程的科学性和重要性。

系统工程有别于传统工程的另一特点是强调用系统观点处理工程问题,属于系统科学的工程技术。系统工程要求它的使用者自觉地把工程对象看做系统。从共时性角度看,要把对象看做由部分组成的整体,注重了解各部分之间的相互联系,从系统整体出发处理问题。从历时性角度看,要把工程问题看做由许多相互关联的阶段、步骤、工序等组成的过程,注重把握全过程,从全过程出发关照好各阶段的衔接。系统工程工作者关心的主要不是用什么材料和模具、如何加工、如何组装等硬技术问题,而是事理系统的构成要素、结构方式、整体目标、约束条件、系统与环境的关系等组织管理问题,是总体协调、目标优化之类问题。系统观点不仅表现在强调对象的系统性,还在于强调所用方法的系统性,系统概念被置于这种工程技术的中心位置。因此,从前者出发,应把系统工程定义为处理系统问题的工程技术;从后者出发,应把系统工程定义为用系统观点和方法处理工程问题的技术。

第一节 系统科学的一般描述

一、系统思想与系统方法的演变

因为人类从来都是处于一定的自然系统和一定的社会系统之中的,系统的存在决定了人类关于系统的意识。在人类历史上,凡是人们在成功地从事比较复杂的工程建设和其他社会活动时,就已经不自觉地运用了系统思想和系统方法。下面我们首先作一些古例分析来阐明这一点。

(一) 古例分析

1. 大禹治水

传说在 4000 多年以前,神州大地洪水泛滥。舜先派鲧治水。鲧采用“湮”的方法,治了九年,什么效验也没有,受了处分,被充军到羽山。舜又派鲧的儿子禹治水。禹经过调查研究,知道他父亲鲧的办法“湮”是错误的,决定改用“导”的办法。他率众挖了九条大川,放田水入川,放川水入海。他把全国分成十二州五大区,分派五人管理。在治水过程中,他还注意调运物

资,救济灾荒,让大家有饭吃,不断改善生活,调动广大群众的积极性。经过十三年艰苦奋斗,终于治理了洪水。

这个故事中体现了系统思想:把处理的问题看做一个大系统,不仅包括“治水”的工程问题,而且包括“治人”的社会问题;采用的方法是优的(“导”),系统的总体效果是优的(治理了洪水)。即:实现了“一个系统,两个最优”。

2. 都江堰工程

地处我国四川省灌县境内的都江堰工程是举世闻名的,这是公元前 250 年由蜀郡太守李冰父子带领当地人民修建的一项防洪灌溉工程。据考证,四川的美称——天府之国的得名,来源于都江堰工程。在这项工程修建之前,四川的情况可用这样三句话来概括:“洪水泛滥”、“土地龟裂”、“民不聊生”,完全不是什么天府之国。李冰等人通过分析,认识到“洪水”意味着水太多了,“龟裂”说明水太少了,那么能否将多余的水送到缺水的地方去?这就是修建都江堰的系统思想。为了达到这个目的,工程分三个部分:分水工程,这是将岷江分流为内江和外江的鱼嘴工程。通过分流,使多余的水流入内江,不仅能用于灌溉,而且达到防洪目的;引水工程,它将玉垒山劈开,将进入内江的水引进灌溉渠道,即有名的宝瓶口工程。通过引水的渠道工程,解决了“多水”与“缺水”的调节问题;分洪排沙工程,它处于分流后的内江与外江之间,由飞沙堰和人字体工程组成。这两级溢洪道,控制了内江的水位。它们前后呼应,略高于两江水面,而内江水面又高于外江水面,因而,水小为岸,水大为口,流石沉堰,洪去砂收。这项工程解决了进入渠道的水量问题:多则为害,少则不足以溉田,又解决了河道的疏通问题。不搞排沙,则整个工程将无法进行。三个部分构成了一个整体。因为它的设计体现了系统思想,应用的知是综合性的,解决的问题带有全局优化性质。

3. 皇宫修复工程

宋真宗祥符年间,由于皇城失火,宫殿被全部烧光。皇帝命一个叫丁渭的大臣全权负责皇宫的修复工程。这样的工程怎样才能修得又快又好呢?经过反复考虑,他提出了一套完整的施工方案:首先是挖沟,把皇宫前面原有的一条大街挖成沟渠,用挖出的土烧砖,从而就地就近解决了部分建筑材料问题;其次是引水,即把已挖好的这条沟渠同开封附近的汴水接通,形成航道,运进砂石木材等,使用了当时最经济有效的运输方式——水运,节省了大量人力、物力和时间;最后是填沟,在皇宫修复后撤水,并用废弃物填沟,修复了原大街,第三次利用了这条沟渠,利用了废物,又节约了运输。这是一个杰出的方案。它把皇宫修复全过程看成一个系统,划分成许多并行的与交叉的作业,从而加速与节省地完成这项工程。

以上三个案例,说明早在古代,人们已运用系统思想去进行工程施工和建设了。

(二) 系统思想的演变

朴素的系统思想,不仅表现在古代人类的实践中,而且在古中国和古希腊的哲学思想中得到了反映。古代杰出的思想家都从承认统一的物质本原出发,把自然界当作一个统一体。古希腊唯物主义者德谟克利特(约公元前 540~480 年)的一本没有流传下来的著作名为《宇宙大系统》。古希腊辩证法奠基人之一的赫拉克利特(约公元前 460~370 年)在《论自然界》一书中说过:“世界是包括一切的整体。”我国春秋末期思想家老子(公元前六世纪至五世纪之间)强调自然界的统一性。南宋陈亮(公元 1143~1194 年)提出“理一分殊”思想,称“理一”为天地万物之总体,“分殊”是这个整体中每一事物的功能,试图从总体角度说明部分与总体的关系。

古代朴素唯物主义哲学思想虽然强调对自然界总体性、统一性的认识,却缺乏对这一总体各个细节的认识能力;因而对总体和统一性的认识也是不完全的。对自然界这个统一体各个

细节的认识,这是近代自然科学的任务。

15世纪下半叶,近代科学开始兴起,力学、天文学、物理学、化学、生物学等科目逐渐从浑为一体的哲学中分离出来,获得日益迅速的发展。近代自然科学发展了研究自然界的分析方法,包括实验、解剖和观察,把自然界的细节从总的自然联系中抽出来,分门别类地加以研究。这种考察自然界的方法移植到哲学中,就成为形而上学的思维。形而上学的出现是有历史根据的,是时代的需要,在深入、细节的考察方面它比古代哲学是一个进步。但是,形而上学撇开总体的联系来考察事物和过程,因而它就堵塞了自己从了解部分到了解总体、洞察普遍联系的道路。

19世纪上半期,自然科学已取得了伟大的成就。特别是能量转化、细胞和进化论的发现,使人类对自然过程的相互联系的认识,有了很大提高。恩格斯说:“由于这三大发现和自然科学的其他巨大进步,我们现在不仅能够指出自然界中各个领域内的过程之间的联系,而且总的说来也能指出各个领域之间的联系了,这样,我们就能够依靠经验自然科学本身所提供的事实,以近乎系统的形式描绘出一幅自然界联系的清晰图画。”(《路德维希·费尔巴哈和德国古典哲学的终结》,《马克思恩格斯选集》,第四卷第241页。)19世纪的自然科学“本质上是整理材料的科学,关于过程、关于这些事物的发生和发展以及关于把这些自然过程结合为一个伟大整体的联系的科学”(引文同上),这样的自然科学,为唯物主义自然观建立了坚实的基础。马克思、恩格斯的辩证唯物主义认为,物质世界是由无数相互联系、相互依赖、相互制约、相互作用的事物和过程所形成的统一体。辩证唯物主义体现的物质世界普遍联系及其统一性的思想,就是系统思想。

20世纪30年代,冯·贝塔朗非(L. Von. Bertalanffy)开始理论生物学的研究,他把生物的整体、生物体及其环境作为系统来研究,并且研究更广泛的问题,例如人的生理、人的心理以及社会现象等。贝塔朗非的理论可以归纳为以下四点:整体性原则,动态结构原则,能动性原则,有序性原则。首先,在他看来,生物体是一个开放系统,生命的本质不仅要从生物体各个组成部分的相互作用去认识,而且要从生物体和环境的相互作用中去说明。生物体是在有限的时空中具有复杂结构的一种自然整体,从中分割出来的某一部分截然不同于在生物体中发挥作用的那一部分,生物体的各个部分是不能离开整体独立存在的;就人而言,精神同肉体有着不可分割的联系。一般地,分立部分的行为不同于整体的行为。其次,生物体是一种动态结构,以其组成物质的不断变化为自身的存在条件。代谢作用是每一机体的基本特征,而由于代谢,机体的组成要素每时每刻都在变化,所以生物体与其说是存在的,不如说是发生与发展的。第三,生物体是一个能动系统,具有自身目的性和自动调节性,例如心跳、呼吸等生理机能主要地不是对外界刺激的反应,而是维持自身生存的内在要求的实现。相反,被动系统,例如机器,只有被动的更换性。第四,生命问题本质上是个组织问题,而生物体组织是有序的。所以,对生命现象必须在物体组织的所有层次上加以研究:“物理化学层次,基因层次,细胞层次,器官组织层次,个体层次以及群体层次。每一层次的存在,总是以其次级层次的生长、衰老和死亡为前提的。这正是生命的表现形式,正是生物的繁衍途径。贝塔朗非非常肯定马克思和恩格斯对于系统理论的光辉作用,他明确指出:“虽然起源有所不同,一般系统论的原理和辩证唯物主义的类同,是显而易见的。”

贝塔朗非是公认的一般系统论的奠基者。

(三)近代科学的最新发展对系统科学的贡献

生物生命系统中结构稳定性代表着有序性,给出这方面线索的是普里高津(J. Prigogine)和

由他率领的所谓比利时布鲁塞尔学派,他们发现了远离平衡态的稳定结构,也就是所谓“耗散结构”。并认为耗散结构就是一般系统论中要找的具有有序性的系统稳定结构。开放系统熵输出大于输入,系统保留的熵在减少,所以走向有序。

耗散结构理论成功地引用到某些系统。例如,一座城市可看作是一个耗散结构,每天输入食品、燃料、日用品等,同时输出产品和废品,才能生存下去,保持稳定有序状态,否则将处于混乱。现代经济系统也是一个非平衡的开放系统,系统内部各部门的联系是非线性的,存在有规律的经济波动和无规律的随机扰动,因此也是一个耗散结构。

系统工程所研究的系统一般都是非平衡的开放系统,它的整体化、有组织化、多因素、多过程的相互作用是非加法的,因而不能用一般的分析方法解决,必须引入耗散结构理论。

德国物理学家哈肯(Hermann Haken)在 20 世纪 60 年代由研究激光发射机理过程开始,而最终提出他的协同学(Synergetics)理论。该理论认为有序结构的出现并不是非远离平衡态不可,系统可在热力学平衡态下,从无序状态产生有序结构。实际上系统的相空间中存在一个目的环。系统有序状态的点是随时间作往返的振荡的,那就在相空间有一个封闭的环,这个环就是系统的目的环,若考虑随机涨落,那就是说在相空间的这种点或环不那么清晰,有些模糊了。系统只有在目的点或目的环上才是稳定的,离开了就不稳定,系统自己要拖到点或环上才罢休,这就是系统的自组织。哈肯的贡献在于具体解释上述相空间的“目的点”与“目的环”是怎么出现的。哈肯打破了热力学封闭与开放的隔阂,甩开了经典热力学概念的牵制,指出一个系统从无序转变为有序的关键并不在此系统是平衡和非平衡,也不在于离平衡态有多远,而是由组成系统的各个子系统,在一定条件下,通过它们之间的非线性作用,相互协调和合作,自发产生稳定的有序结构,这就是自组织结构。这样,在不违背热力学第二定律条件下,上述理论沟通了生命系统与非生命系统之间的内在联系,指出了两类系统之间并没有真正严格的界限,表现上的鸿沟是由相同的系统规律所支配。现代科学的这一成就正是通过系统规律把过去断开的链条开始联结起来进行研究,虽然在简单巨系统层次上进行,但其意义是重大的。

M. Eigen P. Schuster 的“超循环”(Hypercycle)理论是直接建立生命现象的数学模型。他们观察到生命现象都是由包含许多由酶的催化作用所推动的各种循环所组成的,而基层的循环又组成更高层次的环,即“超循环”,也可以出现再高层次的超循环。达尔文的进化论研究的对象是生物或生命系统,它的进化选择机理的基本条件是生命体的新陈代谢、繁殖(自复制)和遗传变异(突变性)。而 Eigen 的超循环理论揭示了在分子层次上,同样亦出现了对于生命现象所据为特征的代谢、自复制和突变性,这就导致了分子层次的进化过程。因此,超循环理论既是一种生命起源的理论,又是一般进化论的机理研究,而且它本身亦是自组织理论的最有力支持。

日本《触发器》月刊文章题:混沌理论与相对论和量子力学并列为“20 世纪的三大发现”。认为混沌理论是继相对论、量子力学之后,发生的一次新的科学革命。混沌的英语为 chaos,日本《国语辞典》中对混沌一词的注解是“宇宙形成初期没有天地之别,模糊一团的状态”,“势均力敌者针锋相对,无法预料形势将如何变化的状态”,总之,我们暂且认为,混沌是模糊一团的状态,十分模糊而又无规则的状态,或者说是“半途中间”的状态。混沌理论在数学和物理方面深受重视,如今甚至被列为生物现象的课题。

混沌作为一个科学术语,指的是以常微分、偏微分或叠代方程描述的确定性动力系统在没有任何外部随机源的情况下,演示出的貌似随机的动力学行为。它不像通常的确定性运动具有的我们熟悉的三种状态:平衡、周期运动和准周期运动,而是一种始终限于有限区域且轨

道永不重复的局部无序而整体有序的复杂运动,它又被描述为具有无穷大周期运动或貌似随机的运动等。有人认为其实质是动力学系统对初始条件的敏感依赖性引起的。

然而,随着混沌理论的发展,人们越来越认识到,这种看上去“不可思议”的无序状态实际上并非什么令人吃惊的现象,而是自然界普遍存在的现象,只不过迄今被人忽视了而已。这样一来,人们就开始从混沌理论的角度广泛地重新看待科学和技术,范围从所有的自然科学现象到社会现象,人的心理状态等社会科学和人文科学领域。有的学者发表研究结果说,实际上,人的神经细胞在某种条件下会出现混沌状态。

除了上述近代科学的发展,运筹学、控制论、信息论、大系统理论的迅速发展也促进了系统科学的形成和发展。

现代科学的最新发展,都酝酿着一个新的学科的诞生、成长,一个与自然科学、社会科学平行的科学,这就是系统科学。

(四) 量化系统方法与电子计算机

现代科学技术对于系统方法具有重大贡献。第一个贡献在于使系统思想方法量化,成为一套具有数学理论、能够定量处理系统各组成部分联系的科学方法;第二个贡献在于为量化系统方法的实际应用提供了强有力的物质工具——电子计算机。这两大贡献都是在 20 世纪中期实现的。

社会实践活动大型化和复杂化,要求系统方法不仅能定性,而且能定量。解决现代社会种种复杂的系统问题,对材料的定量要求越来越强烈,这尤其表现在军事活动中,因为战争中决策的成败关系到国家的生死存亡。第二次世界大战是量化系统方法发展的里程碑。各交战国把一大批有才干的科学工作者吸引到拟订与评价战争计划、改进作战技术与军事装备使用方法的研究工作中,其结果就是量化系统方法及强有力的计算工具——电子计算机的出现。

量化系统方法主要包括运筹学、控制论和信息论。1946 年,美国科学家莫尔斯(P. M. Morse)和基姆伯尔(G. E. Kimball)出版了 *Methods of Operations Research* 即《运筹学的方法》一书。1948 年,美国科学家维纳(N. Wiener)出版了 *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine* 即《控制论,或关于在动物和机器中控制和通讯的科学》一书;申农(C. E. Shannon)出版了 *Mathematical Theory of Communication* 即《通讯的数学理论》一书;它们分别标志了运筹学、控制论和信息论学科的诞生。

1945 年,世界上第一台电子计算机诞生:美国宾夕法尼亚大学的艾克特(J. P. Eckert)和毛希利(J. W. Mauchly)研制的 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Computer,电子数字积分计算机)。著名科学家冯·诺依曼(J. Von. Neumann)对电子计算机的发展做出了巨大贡献。此后,电子计算机的硬件和软件日新月异地发展着。五十多年来,电子计算机经历了电子管、晶体管、集成电路和超大规模集成电路的发展道路,现在又经历了人工智能的电脑阶段。现在电子计算机的运算速度越来越快,存储量越来越大,功能越来越多,体积越来越小,成为解决复杂系统问题的重要手段和工具。

(五) 系统科学产生的深远意义

系统科学不仅引起一场科学革命,同时还引起一场技术革命。在系统科学领域中,系统工程就是直接用来改造世界的工程技术。现在的社会实践具有很强的综合性、复杂性和动态性,它不允许我们孤立地和静止地处理问题。例如,长期以来,人类对自然界采取了征服和索取的态度,以至严重到向大自然宣战的地步。但科学理论和实践的发展,终于使人们明白了,人类与自然之间应该是协调发展关系,不是一味索取,只顾今天,不顾明天和后天,否则人类的生存

都将受到威胁,更谈不上发展了。正是这个原因,1992年在巴西召开的联合国环境与发展大会上,提出了全球可持续发展的行动纲领,得到了与会各国的大力支持。我国已将可持续发展作为21世纪发展战略之一确定了下来。

实践作为一个过程,包括实践前形成的思想、设想、规划、计划、方案、可行性等,都应进行科学论证,以使实践目的性建立在科学基础上,而不是建立在经验基础上,更不能建立在感情和意志的基础上;也包括在实践过程中,要有科学的组织管理和协调,以保证实践的有效性(效益和效率);还包括实践后的评估和总结,检验实践的科学性和合理性,以便发现新问题,发展新理论。所有这些都需要利用已有的科学理论和技术去研究和解决,而且还要处理有可能至今我们尚未遇到和认识到的新问题。面对现代社会实践的复杂性、综合性、动态性以及实践过程中的科学性、合理性和有效性等问题,如何组织、协调和管理好社会实践活动,以取得实践的成功,就成为一个十分突出和迫切的问题了。如何综合运用人类知识体系(哲学的、科学的、经验的)去组织、协调和管理好社会实践的全过程,以保证实践成功,并取得最好的效果,这就是系统工程技术的任务。

二、系统科学一般理论概述

(一)系统科学的体系结构

用马克思主义的观点,对现代科学技术体系结构做如下概括,可以把一大部门科学技术体系分成四个台阶:工程技术、技术科学、基础科学和哲学。工程技术,是指指导各个领域实践的直接创造财富的技术。技术科学,是指直接为工程技术服务的一般理论,是工程技术实践的理论总结,如力学、电子学、运筹学等。基础科学,是指发现和表述自然界与社会界基本的现象和规律的理论,是工程技术和技术科学的基础理论,如数学、物理学、生物学等。哲学,是指人们对于整个世界(自然界、社会和思维)的根本观念的体系,是自然知识和社会知识的概括和总结,如自然辩证法、历史唯物主义、认识论等。

用上述四个台阶构筑一大部门科学技术体系,到目前为止,已经形成了三个大部门科学体系:数学科学、自然科学和社会科学。现在还有新的正在形成的三个大部门科学体系:系统科学、思维科学和人体科学。我们用钱学森教授提出的现代科学技术体系的结构,把已经形成和正在形成的科学做一总结和展望,如图1-1-1所示。

(二)系统的定义

在美国的韦氏(Webster)大辞典中,“系统”一词被解释为“有组织的或被组织化的整体;结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合;由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合;等等。”在日本的JIS标准中,“系统”被定义为“许多组成要素保持有机的秩序,向同一目的行动的集合体。”一般系统论的创始人冯·贝塔朗菲把“系统”定义为“相互作用的诸要素的综合体”。《中国大百科全书·自动控制与系统工程》卷解释系统是由相互制约、相互作用的一些部分组成的具有某种功能的有机整体。美国著名学者阿柯夫(Ackoff R. L)认为:系统是由两个或两个以上相互联系的任何种类的要素所构成的集合。钱学森教授对系统所下的定义是:“把一个极其复杂的研究对象称为系统。即由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合而成的具有特定功能的有机整体,而这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分。”综合以上的论述,我们给“系统”定义如下:

系统是由若干个可以相互区别、相互联系而又相互作用的要素所组成,在一定的阶层结构形式中分布,在给定的环境约束下,为达到整体的目的而存在的有机集合体。

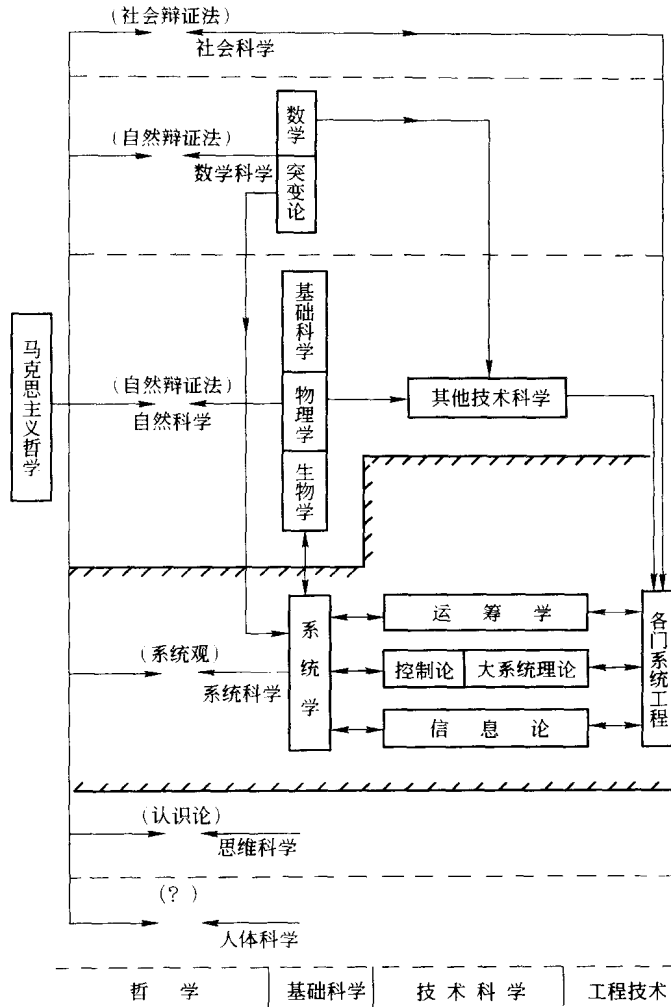


图 1-1-1 科学技术的体系结构

由以上定义,可概括出系统中的若干概念

(1)系统与要素的关系:系统由诸要素(组成部分)组成的整体。

(2)系统的结构:诸要素相互作用、相互依赖所构成的组织形式,这就是系统的结构。

(3)系统的层次:系统可以划分为不同层次,层次的划分具有相对性。任何所研究的系统是更高级系统的组成要素,但任何所研究的系统的要素又是更低一级系统,即所谓“向上无限大,系统变要素;向下无限小,要素变系统。”

(4)系统的功能:系统具有目的性或功能性。这是系统与环境的相互作用的表现形式。

(5)系统的环境和边界:一个系统以外的又与系统有关联的所有其他部分叫做环境。环境与系统的分界叫做系统边界。

(三)系统的特征

明确系统的特征,是我们正确认识系统的关键。作为一个系统,它应具备六大特征。

1. 目的性

人造系统皆具有目的性。建造系统而无明确的目的,这种系统就不应该存在,这是系统设

计的一个重要问题。但是明确的目的并非易事。在许多情况下,似乎已经明确的目的,或口头上的说法,往往都经不起推敲。明确系统的目的必须经过严格的论证,并要求提出科学的书面报告。

系统的目的决定着系统基本作用和功能。系统功能一般是通过同时或顺次完成一系列任务来达到,这样的任务可能有若干个,而这些任务的完成构成了系统及其分系统的功能的完成。这些任务完成的结果就达到系统中间的或最终的目的。

系统的目的一般用更具体的目标来体现。对于比较复杂的社会经济系统都具有不止一个的目标,因此,需要一个指标体系来描述系统的目标。比如,衡量一个工业企业的经营实绩,不仅要考核它的产量、产值指标,而且要考核它的成本、利润和质量指标的完成情况。在指标体系中各个指标之间有时是相互矛盾的,有时是互为消长的。为此,要从整体出发,力求获得全局最优的经营效果,这就要求在矛盾的目标之间做好协调工作,寻求平衡和折衷方案。目的性可通过总目标来表达:

$$G = \{g_i \mid g_i \in G, i = 1, 2, \dots, p\} \quad (1-1-1)$$

式中 G ——系统的总目标;

g_i ——系统的分目标。

当系统的总目标和分目标达到具体化时,我们将得到系统的目标树。

2. 集合性

系统的集合性又称系统的组合性。它是指:系统必须由二个或二个以上的有关联的要素组成。最小的系统由两个元素组成,称为二元素系统。一般系统均由多个元素组成,称为多元素系统。很多系统包含无穷多元素,称为无限系统。大量系统可以按实体划分元素。但也有许多系统难以这样做,须凭借科学抽象力寻找最小组分,称为要素更适宜。教练员把球队看作由技术、战术、体能、士气、心理素质等要素构成的系统。力学中的质点被视为没有实体组分的对象,以质量、速度、位置为要素,叫做质点系统。

系统的集合性用数学式可表达为:

$$X = \{x_i \mid x_i \in X, i = 1, 2, \dots, n, n \geq 2\} \quad (1-1-2)$$

式中 X ——系统;

x_i ——系统的组成要素或组成单元。

比如,一个最简单的钻井操作系统可表达为:

简单的钻井操作系统 $X = \{ \text{钻机 } x_1, \text{操作者 } x_2, \text{钻井液 } x_3, \text{进度计划 } x_4, \text{操作规程 } x_5, \text{工具 } x_6 \}$

或者 $X = \{x_i \mid x_i \in X, i = 1, \dots, 6\}$

显然,此时系统的要素 $n > 2$,而且这些要素是相互区别的。

再看一个采油厂的例子。采油厂通常包含大量的各种设备、各种原材料和备品、生产出的天然气和石油、使用的电力和其他能源。为使采油厂正常生产、还需配备厂长、工长和采油工人,还必须安排各类技术人员,如地质师、工程师、会计师等各类人员。上述设备、产品、各类人员等就是采油厂系统的要素,采油厂是由上述要素组成的系统。

3. 相关性

同一系统的不同元素之间按一定方式相互联系、相互作用,不存在与其他元素无任何联系

的孤立元,不可能把系统划分为若干彼此孤立的部分。所谓“一定方式的联系”,意在要求元素之间的联系有某种确定性,人们能够据以辨认该系统,并与其他系统区分开来。元素之间只有偶然联系的多元集不是系统,人类无法把握他们。具有统计性的偶然联系的多元集是系统,元素之间的联系具有统计确定性,可用概率方法描述。

元素或组分之间的相互联系,撇开与组分基质有关的特性(如机械的、生物的或社会的),其方式仍然是多种多样的。有空间的联系和时间的联系,持续的联系和瞬间的联系,确定性联系和不确定性联系,等等。广义地讲,元素之间一切联系方式的总和,叫做系统的结构。但不同联系方式对系统的形成、运行、存续的影响不同,有时相去甚远。把结构看做元素之间相对稳定的、有一定规则的联系方式的总和。没有按一定结构框架组织起来的多元集是一种非系统。结构不能离开元素而单独存在,只有通过元素间相互作用才能体现其客观实在性。

这里以二元关系作为相关性讨论的基础,因为任何多元关系都是从二元关系基础上发展的。设 $x_i \in X_i \subset X$, 而 $x_j \in X_j \subset X$, 则其相关关系 R 可以表示为

$$x_i R x_j, x_j R x_i$$

或
$$x_i = R(x_j), x_j = R(x_i) \quad (1-1-3)$$

具有这种关系的 x_i, x_j 顺序对是系统相关性的认识对象。这意味着要研究和确定 x_i 和 x_j 的对应关系。这种对应称做映象。如果对应于任一 x_i 总有一个 x_j 存在,反之有一个 x_j 也有确定的 x_i 存在,这时 x_j 是 x_i 的映象, x_i 是 x_j 的原像。 X_i 是 x_i 的原像集, X_j 是 x_i 映象集,这种 R 关系就是 X_i 和 X_j 的顺序对关系

$$\begin{aligned} R &= X_i \times X_j = \{(x_i, x_j) \mid x_i \in X_i, x_j \in X_j, x_i = R(x_j), x_j \\ &= R(x_i), i, j = 1, \dots, n, i \neq j\} \end{aligned} \quad (1-1-4)$$

$X_i \times X_j$ 是集合 X_i 和 X_j 的直积集合, (x_i, x_j) 表示要素的序偶。式(1-1-4)是作为条件表现系统的,即系统 S 以

$$S = \{X \mid R\} \quad (1-1-5)$$

来定义,指系统是以具有 R 关系的集合 X 表征的。

4. 阶层性(层次性)

知道系统包含哪些子系统及其关联方式,还不能全面了解复杂系统的结构。在复杂系统中常可看到较低级的系统质与较高级的系统质的差别,对系统结构有重要影响。刻画这类系统现象需要层次的概念。

例如某油田井下作业公司,行政、技术管理机构、就是分为五个阶层的管理体系,如图 1-1-2 所示。

子系统和层次是刻画结构的两个主要工具。在多层次系统中,子系统是按层次划分的。人们的许多认识错误起源于混淆不同层次的子系统。

有些文献用部分来定义层次,常见“层次是系统中具有某某性质的部分”之类的说法,实为不妥。严格意义上的层次不是系统的某一部分,层次划分与部分划分不是一回事。不同部分是相互独立的,除去某个层次,其他层次也无法存在。自然科学中公认的层次划分,如宇宙中有基本粒子层次、原子层次、分子层次等,它们不是宇宙的不同部分,除去原子层次物质,也

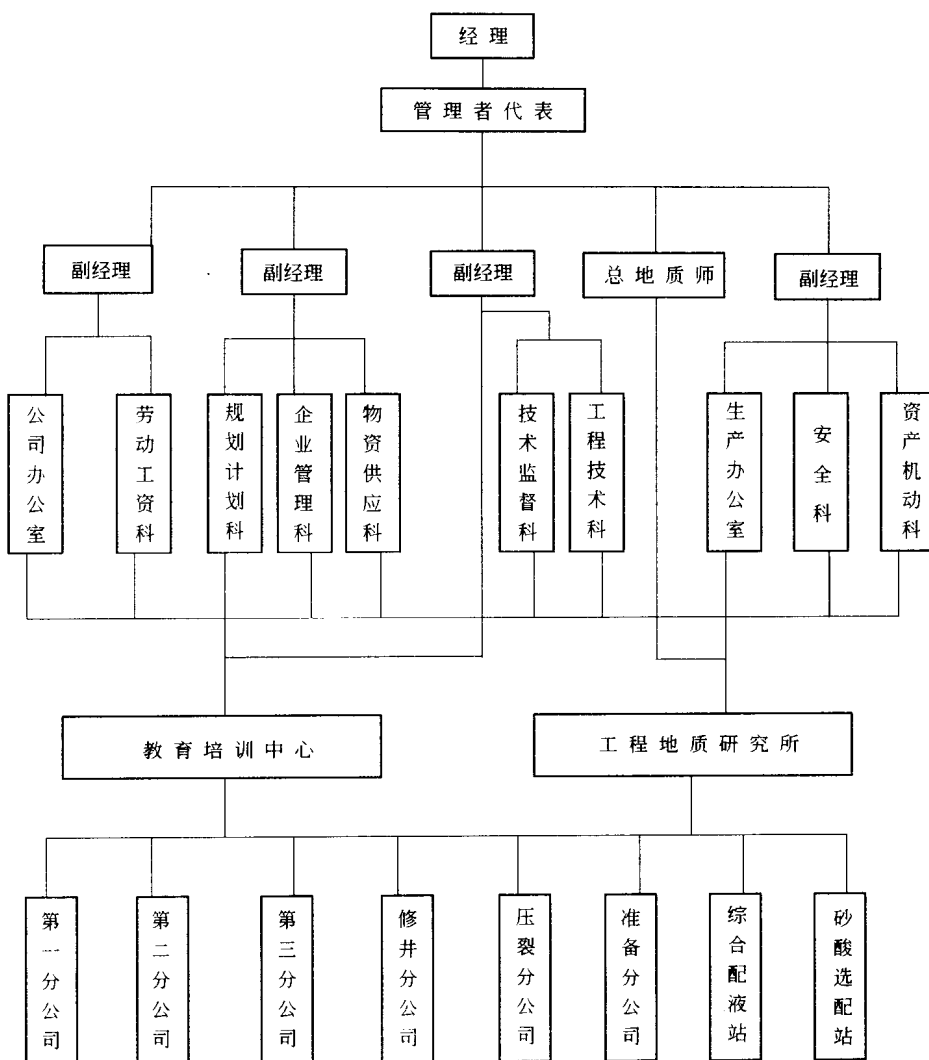


图 1-1-2 某井下作业公司管理结构体系

就不存在所谓分子,因为分子是由原子构成的;除掉原子,也谈不上基本粒子层次,因为宇宙中未被组织到原子中的基本粒子是很少的。

不同层次之间有高低、上下、深浅、内外、里表的区别。高层次包含低层次,低层次隶属于高层次;或者高层次支配低层次,低层次服从、支撑高层次。宇宙物质系统的不同层次,生命系统的不同层次,都是这样的。了解不同层次之间这种不对称关系,对于把握系统结构是重要的。

在非典型的情况下,系统的不同层次也可能同时是它的不同部分。对于这种系统,按某个标准划分出来的不同子系统,同时又有高低、上下、深浅、里外之分,因而也被当作不同的层次。如地球分为地核、地幔、地壳三个层次,彼此在空间上有包含与被包含的关系,同时也是三个子系统。许多系统呈现这种壳层结构。还有些系统具有塔层结构,或圈层结构,等等。

自然界演化出来的系统,人类社会作为系统,许多人造系统,以及语言符号系统、思维系统等,都具有等级层次结构。系统论断言:无论是系统的形成和保持,还是系统的运行和演化,等

级层次结构都是复杂系统最合理的或最优的组织方式:或最少的空间占有,或最有效的资源利用,或最大的可靠性,或最好的发展模式,等等。

5. 整体性(整体突现性)

系统整体与其元素或部分的总和之间的差别,是普遍存在且具有重大意义的现象。一堆自行车零件对行人没有用处,组装成自行车就具有交通工具的功能,无生命的原子和分子组织为细胞、就具有生命这种全新的性质。系统论由此得出一个基本结论:若干事物按某种方式相互联系而形成一个系统,就会产生出它的组分和组分的总和所没有的新性质,这种性质只能在系统整体中表现出来,一旦把系统分解为它的组成部分,便不复存在。这就是系统的整体突现性原理,又称非加和性原理或非还原性原理。通俗地讲,整体多于部分之和。

整体突现性,即整体具有部分或部分总和没有的性质,或高层次具有低层次没有的性质,是系统最重要的特性。所谓用系统观点看问题,中心之点是考察系统的整体突现性;即不能还原为部分去认识,而只能从整体上加以把握的性质。

系统的整体特性既包括定性方面,即系统质,又包括定量方面,即系统量。系统量是系统在整体上表现出来的量,它们在组分层次上是完全不能理解的,甚至不能被发现。例如,单个物质分子无温度、压强可言,一旦聚集成热力学系统,便产生了温度、压强等系统量,用它们可以描述热力学系统的整体质,即宏观物理性质。

如果部分与整体之间存在某种可比较的同质特性,如个人智慧与集体智慧、个人力量与集体力量等,则非加和原理可用公式表示如下

$$W \neq \sum p_i \quad (1-1-6)$$

其中, W 代表整体, p_i 代表部分, \sum 为数学求和符号,表示把所有部分 p_1, p_2, \dots 加起来。(1-1-6)式表示在系统事物中,整体不等于部分之和。这里又分以下两种情形。

1) 整体大于部分之和

$$W > \sum p_i \quad (1-1-7)$$

俗语“三个臭皮匠,赛过一个诸葛亮”,说的就是这种情形。

2) 整体小于部分之和

$$W < \sum p_i \quad (1-1-8)$$

俗语“一个和尚挑水吃,两个和尚抬水吃,三个和尚没水吃”,说的就是这种情况。

非系统群体的基本特性是加和性,整体等于部分之和。可用公式表示为

$$W = \sum p_i \quad (1-1-9)$$

同样一群元素按不同方式相互作用,激发出来的系统效应也不同。取定某个价值标准,将看到系统效应有正、负之分。(1-1-7)式表示正效应,(1-1-8)式表示负效应,(1-1-9)式表示零效应,即无系统效应。所以,把非加和性原理简单表述为“整体大于部分之和”是不适当的。

组分之间的相互作用也产生相互制约的效应,导致系统体对组分的约束和限制,使组分自身的某些性质被屏蔽起来。整体对组分的屏蔽作用是产生整体突现性的必要代价。有所屏蔽,才能有所突现。一旦系统整体被打破,那些被屏蔽起来的因素就会冒出来,在形成新的整

体中发挥作用。水分子的形成屏蔽了氢的可燃性和氧的助燃性,其聚集体产生了不可压缩性等水的特性。

系统的整体性应保证在给定的目标下,使系统要素集、要素的关系集及其层次结构的整体结合效果最大

$$E^* = \max P(X, R, C) \quad (1-1-10)$$

式中 E^* ——在对应于目标集的条件下所获得的最大整体结合效果;

$P(X, R, C)$ ——整体结合效果函数,即系统要素集 X ,系统要素关系集 R 和系统层次结构 C 的结合效果函数。

系统的整体性要求:

(1)在研究事物中,不要从系统的单独部分得出有关整体的结论。

(2)分系统的目标必须纳入系统的整体目标,否则将导致力量分散,造成无效或低效运行,乃至产生效益下降。

(3)系统的各项局部指标和标准必须具有整体性,没有构成整体输出的高指标和局部的高指标,只能造成浪费和危害。

因此,只有系统的各个组成部分和联系服从系统整体的目的和要求,服从系统的整体功能,在整体功能的基础上展开各要素及其相互间的活动,这些活动的总和才能形成系统的有机行动。这就是系统功能的整体性。

6. 环境适应性

每个具体的系统都是从普遍联系的客观事物之网中相对地划分出来的,与外部事物有千丝万缕的联系,有元素或子系统与外部的直接联系,更有系统作为整体与外部的联系。这种联系对于形成系统特有的规定性是必要而且重要的。外部的变化或多或少会影响到系统,改变系统与外部事物的联系方式,甚至会改变组分本身。市场变化导致企业调整结构,改变经营方式,以至人员变动、更换经理。

广义地讲,一个系统之外的一切事物或系统的总和,称为该系统的环境。令 U 记为宇宙全系统, S 记为要考察的系统, S' 记为它的广义环境,则

$$S' = U - S \quad (1-1-11)$$

实际上,不可能也无必要列举 S 与 S' 中一切事物的联系。狭义地讲, S 的环境,记作 E ,是指 U 中一切与 S 有不可忽略的联系的事物的总和,即

$$E_S = \{x \mid x \in U \text{ 且与 } S \text{ 有不可忽略的联系}\} \quad (1-1-12)$$

一架飞机正在飞行,周围的空气、山水、其他飞行器等是它的环境。一个采油厂的环境包括周围的自然环境(山、河流、气候等)及社会环境(周围的采油厂、附近的村镇、城市、人口等等)。总之,把握一个系统,必须了解它处于什么环境,环境对它有何影响,它如何回应这种影响。

环境具有系统性,常被称为环境超系统。环境分析必须运用系统观点,了解环境的组分,组分之间的关系,环境超系统的整体特性和行为。

环境既有定常性,又有变动性。有些系统的环境在很长时期内基本不变,但完全不变的环境不存在,有些系统的环境处于显著变化中,但仍有相对不变的一面。环境的定常性与变动性、确定性与不确定性,对系统的存续运行都既是有利因素,又是不利因素。系统与环境相互作用,相互联系是通过交换物资、能量、信息实现的。系统能够与环境进行交换的特性,叫做开