

机械电子工业

# 工业工程 与综合治理

机械电子工业部科学技术司 组编  
机械电子工业部科技咨询委员会

机械工业出版社

# 第一章 工业工程概述

## 1.1 什么是工业工程

工业工程(Industrial Engineering, IE)是一门技术与管理相结合的工程学科。美国工业工程师学会(AIIE)1955年所给的定义为:“工业工程(IE)涉及把人员、物质和设备组成综合系统的设计、改进和实施。它使用数学、物理和社会科学的专门知识和技能,并且运用工程分析、设计的原理和方法,对该系统可能获得的成果予以确定、预测和评价”。

《美国大百科全书》(1982年版)解释为:“工业工程是对一个组织中人、物料和设备的使用及其费用作详细分析研究。这种工作由工业工程师完成,目的是使组织能够提高生产率、利润和效率”。

从上述定义可以看出,IE是以生产为对象,以提高生产率和降低成本为目的,并以保证人的安全和健康为前提,研究生产过程实现最优化的技术。

从IE的实践和发展来看,IE有以下基本特征:

- 统筹规划、综合治理。现代IE的理论基础是系统科学和运筹学。IE把工业生产看成是庞大而复杂的系统,用系统的、综合的观点和方法,统筹规划、综合平衡,充分发挥整体效益。

现代IE运用系统工程(SE)、运筹学(OR)、计算机和其他现代科技方法与手段,成为一门系统优化的技术。

IE所强调的优化是系统整体的优化,不单是某个生产要素或某个局部的优化,后者是以前者为前提的优化,并为前者服务,最终追求的是系统整体效益最佳(少投入、多产出)。所以,IE从这一总目标出发,对各种生产资源和环节作具体的研究,统筹分析、合理配置;对各种方案作定量化的分析比较,寻求最佳的设计和改善方案,从而充分发挥各要素和各子系统的功能,协调有效地运行。

- 技术与管理密切结合。IE是从技术的角度研究和解决生产组织、管理中的问题。例如通过工艺流程的优化、工序分析、作业研究等技术手段,达到稳定和提高产品质量,提高劳动生产率和经济效益的目的。另一方面,IE也为管理职能的实施提供技术依据。

- 综合性地应用知识和技术。IE是一个包括多种学科知识和技术的庞大体系。IE的本质在于综合地运用这些知识和技术,而且特别体现在应用的整体性上。即各种知识和方法都是有选择地协调配合使用,而不是孤立的应用。如果不注意综合性和整体性,就失去了IE的根本意义。

- IE是一门不断发展的学科。IE的出发点和最终目标是提高生产率。生产率是衡量生产过程中资源有效利用程度的指标,即投入产出比,实际就是经济效益概念。它集中反映了系统的功能和运行效果。所以,它成为一切生产组织(一个企业、一种行业、一个地区乃至一个国家)最为关心的一个指标。追求不断提高生产率,即提高经济效益,成为发展社会生产的一个无止境的目标。而IE为适应这种要求,就要随着科学技术发展和社会进步的需要而不断地发展。

因此,IE 是一个不断发展的领域,是现代工程学科中发展最快的领域之一。

从 IE 的上述特征已经可以清楚地看出,IE 与系统科学有着密切的内在联系。这种联系一方面体现在 IE 的实质内容里和独特的综合作用上。如果从 IE 中抽掉系统科学思想和系统工程的分析方法,那么剩下的将是由一些互不相关、孤立的技术汇集而成的躯壳,IE 将失去灵魂、丧失它的综合能力[1][2]。另一方面,体现在 IE 学科的发展史中,我们在下面将要作完整的介绍。

要使 IE 具有综合治理的作用,端赖于人们首先树立系统的观念,并善于结合具体问题运用系统科学思想和系统工程的方法步骤去观察问题和解剖问题,然后求诸于 IE 中的某些具体技术去解决问题。实际上,现代 IE 的许多具体技术已融合有系统科学和系统工程的思想与方法,但是它们还不能代替人们头脑中的系统观念。当人们学习和运用 IE 技术的时候,是否已具有系统观念的素养,产生的效果将截然不同[1][2]。

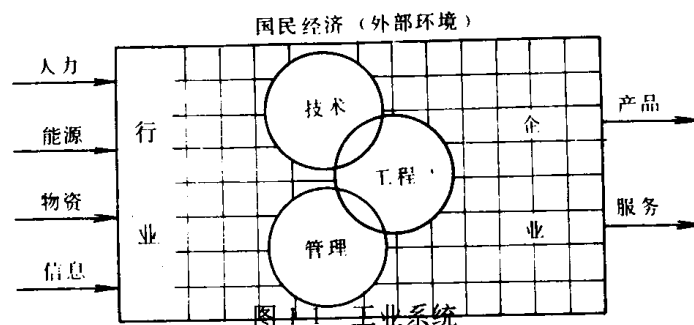
因此,本节在论述工业工程的定义、概念及其发展的同时简要介绍系统科学以及系统工程的基本概念。

### 1.1.1 工业工程(IE)

#### (1)工业:技术·工程·管理

工业是国民经济中的一个庞大而又复杂的社会-科技-经济的综合系统。它要从外部环境取得人力、能源、物资和信息等资源的投入,通过工业的系统功能转换为社会需求的各种产品和服务。组成工业系统的要素,从组织结构来说,是它的各个行业及其所属的许多企业单位;从发挥系统功能来说,则是技术、工程和管理(见图 1-1)[1]。

• 技术(technology)——是工业生产必需的手段,是科学知识、劳动技能和劳动经验的总和。狭义的技术常指生产工艺方法、工具、机器及其他技术装备。工业中的技术种类繁多,组成用途不同的各种技术系统(切削、切割、压力加工、铸、锻、焊等)。



• 工程(Engineering)——是人们根据某种生产目的,有判断地运用科学知识,设计开发能经济有效地利用各种技术和资源的某些系统,去达到该目的的专业活动。

工业中的工程活动有两类:

①专业工程(Specialized Engineering)——例如机械工程、电气工程、化学工程、土木工程等,它们运用机械、电气、化学、建筑等专业科学知识,设计开发工业用的单项技术装备和产品。

②工业工程(Industrial Engineering, IE)——它是综合运用工业专门知识和系统的概念与方法,为把人力、能源、物资、信息技术与装备组成更加有效和更富于生产力的综合系统,所从事的规划、设计、评价和创新活动。

• 管理(Management)——是人们运用行政、组织、人事、财政、金融、贸易等权力手段,来支持和保证生产、技术开发和各种工程活动得以顺利实现,从而保证工业系统功能得以充分发挥和顺利运行的职能。它不仅执行上述职能的日常管理工作,而且高层管理握有技术开发和工程活动的决策权。



示,带领一班劳工艰苦地工作。工作方法的改良主要是由劳工自己为了减轻劳动强度、少受皮肉之苦而摸索出来的一些小技巧;小作坊的业主为了赚钱也会想出一些有效的管理办法来。劳资双方这种改进工作的意旨虽然与 IE 是一致的,但他们的工作方法都谈不上科学性和系统性,因而也谈不上有 IE 的概念。

科学管理年代——从 18 世纪初期蒸汽机开始促进机械化生产起至 20 世纪 30 年代中期的这段时期,被称为科学管理年代,是 IE 的前身。在这段时期中发生了两件大事:一是第一次产业革命;二是泰勒(F. W. Taylor)的科学管理运动(1900 年前后)。产业革命促进了大批的技术革新项目,制造企业的规模和复杂性也大幅度增大了。这时在英国兴起的(1)零件可互换性和(2)劳动专业化分工,被认为是促使大量生产成为可能的两个重要的 IE 观念。劳动专业化分工是苏格兰亚当斯密(Adam Smith)于 1776 年在其《原富》(《The Wealth of the Nations》)一文中提出来的。与此同时在德国兴起的标准化同样也是促进大量生产和工业化的重要 IE 成就。1832 年英国查理·巴贝奇(Charles Babbage)发表《机械制造业经济论》(《On the Economy of Machinery Manufactures》)一书,提出时间研究的重要概念。

然而,美国人把 IE 的开端归功于 20 世纪初期的泰勒,奉泰勒为 IE 之父。泰勒的功绩不仅在于系统地总结了前人(包括当时的英国和欧洲大陆)的经验、对提高工作和生产设施的效率发展了一些科学方法和原理来取代纯经验的作法,而且还在于他的卓越的活动能力,把他的这些原理和方法广泛地宣传和传授,对当时的工业界产生过重大的影响。他的《科学管理的原理》一书的内容广泛涉及制造工艺过程、劳动组织、专业化分工、标准化、工作方法、作业测量、工资激励制度、以及生产规划和控制等问题的改进,其科学性和系统性导致了人们研究更富于系统思想的管理科学的兴趣,为 IE 开创了通向今天的道路。例如:1910 年左右弗兰克(Frank)和吉尔布雷思(Lillian Gilbreth)夫妇从事的动作研究和工业心理学研究;1914 年左右甘特(Harry L. Gantt)从事的作业进度规划研究(发明了甘特图)和按技能高低与工时付酬的计件工资制的研究;1913 年福特汽车厂发明的移动装配线;1917 年哈里思(F. W. Harris)研究应用经济批量控制库存量的理论;1931 年休哈特(Walter Shewhart)等人研究质量控制的抽样检验法和统计质量管理原理;1927~1933 年哈佛大学的霍桑研究(Howthorne Studies),提出发挥工人积极性的新见解和有关劳动组织的研究等等都是受到泰勒思想的影响。

这个年代的特点是:

- 生产的机械化程度还不高,还存在着大量的手工劳动,因而提高工人的劳动效率就成为当时的最重要的研究课题,研究的主题就集中在人的问题上,而人的问题被看作是管理。
- 当时所谓的管理科学原理主要产生于经验的总结,还缺少科学试验和定量分析,各项工作没有形成独立于管理的工程意识和实践。但是这种总结毕竟把零散的先进的经验归纳起来,形成了比较有系统的学科体系,不仅对当时的工业界的管理产生过有益的效果,而且也对后来的 IE 发展产生了深远的影响。

工业工程年代——工业工程年代是开始于 20 世纪 20 年代后期延展到现在还在延伸的年代。这个年代又分为三个阶段:第一阶段是从 20 年代后期<sup>①</sup>至 40 年代中期;在这个阶段发展的 IE 内容称为传统的或经典的工业工程(traditional or classical IE);第二个阶段是从 40 年代中期至 70 年代中期,是 IE 与运筹学(OR)结合的时期;第三个阶段是从 70 年代中后期直至现在,

<sup>①</sup> 下面省去“20 世纪”字样,时间均为 20 世纪的年代。

是 IE 与系统工程(SE)结合并共同发展的年代,也被称作工业与系统工程年代。在第二和第三阶段内发展的 IE 内容称为现代工业工程。现分述这三个阶段的特点如下:

1) 传统的 IE(20 年代后期~40 年代中期)——它是泰勒科学管理原理的继承与发展,但有三个重大的变化〔1〕:

①正式出现了 IE 的概念、名词、学系、研究机构、专业人员和学会。早在与泰勒的同时代,英、美两国就有人提出 IE 的概念和名词,主张把当时从事提高劳动工效的各种研究工作,包括零件标准化、劳动专业分工、时间研究、按劳计酬工资制度等,由懂得工程技术的专业人员去进行,从管理职能中分离出来,像其他专业工程那样独立发展,以利于这些工作更切合实际地深入发展。1911 年美国珀杜大学(Bethune University)机械工程系首先开设了一门工业工程选修课;1918 年美国宾夕法尼亚州立大学建立了一个独立的工业工程系;1920 年美国成立了工业工程师协会。这些都体现了上述的主张。但在这个时期,泰勒管理学派势力甚强,IE 学派的主张尚不得势,工业工程师学会又于 1934 年与泰勒学社合并为管理促进学会。然而随着机械化程度的提高和大量生产的发展,与工程技术结合得比较密切的 IE 概念越来越被更多的人所接受。到了 30 年代美国有更多的大学机械系开设 IE 课程和建立 IE 专业,成立 IE 研究所,培养 IE 专业人才(称为工业工程师),从事 IE 的研究工作。1948 年美国又成立了美国工业工程师学会(AIIE),同时在 11 所主要大学设立了 IE 研究分会,并于 1949 年创办了《工业工程》会刊,1969 年出版了《美国工业工程学会学报》。

②统计、概率等数理分析方法进入 IE 领域,不仅改造了从科学管理年代继承下来的各种方法的内容,使之具有定量分析的能力和更高的理论基础,而且还发展了一些新的方法,更适应于机械化、自动化的大量生产的需要。例如 1931 年 Walter Shewhart 提出的统计质量管理原理。利用概率原理的排队论对发展生产计划、日程安排等的新方法起了重大作用。第一批数学模型、存贮模型也在这个阶段诞生和应用。这些方法的发展使管理开始真正有了科学的依据,而不再是一种艺术和经验。

③重视与工程技术相结合,使 IE 本身具有独立的专业工程性质。一方面要求 IE 工程师具有相关的专业(例如机械工程)基础知识,例如大学的 IE 专业必须设有相关的专业课程,AIIE 的会员要求具有一定的专业知识(而当时的泰勒学会和管理促进协会则无此要求),把专业基础知识作为 IE 学科的一个核心部分;另一方面又要求 IE 的工作从技术设施改进和技术发展方面去研究提高生产效率的途径,而不单纯地研究提高工人劳动效率问题。于是在这个阶段发展了工厂布置、设施设计、工具设计、人-机关系、物料搬运等富于工程技术内容的 IE 理论和方法。对于一些老的方法,例如时间和动作研究,也赋予了一些新的技术内容,使之不再单纯对工人提出苛刻要求,而要从技术装备设计和工作环境条件设计方面运用心理学、美学和生理学的原理去改进,以提高工人的劳动效率。

由于以上三大变化,使 IE 不同于管理的概念和职能得到了确立,使之成为一种在技术与管理之间起着桥梁作用的新型工程技术。

2) IE 与 OR 结合(40 年代中期~70 年代中期)——IE 早期的发展虽然取得了很多的成就,但在 IE 的统一名称之下其内容却是一个个孤立、分散的理论、方法和技术。与其他工程专业相比,IE 一直苦于缺少一种统一的科学理论基础。传统 IE 的各种方法还只能处理工业企业中的单个工位、单个车间或生产线这样较小系统的问题,很难在较大系统中发挥综合效益。IE 采用统计和概率的数理分析也只能提高各种方法的定量分析能力,也不能起到综合作用。

40年代中期,英、美两国发表了在第二次世界大战时期研究出来的运筹学(OR)成果的保密资料,立刻受到许多IE工作者的注意,试图把它应用到IE中来。OR是包括几种数学规划、优化理论、排队论、存贮论、博弈论等理论和方法的总称,有比较系统的学科体系,可以用来描绘、分析和设计多种不同类型的运行系统。OR在IE中经过一段时期的改进研究和试用,取得了进展。人们普遍认为可以把OR作为IE的理论基础,不仅是因为可以用OR的原理来改进IE的传统方法,使之提高到一个新的水平,而且还因为OR的系统性可以把IE的各种方法综合起来应用于解决较大的系统问题。例如:对于设施设计(facility design),传统的IE主要凭工业的专门知识和经验设计车间、仓库的最佳布置和最优位置,使用的传统方法不外乎是流程图、模型板、规范清单等。而现在则可用OR的排队分析和数学规划,更系统、更方便、更精确地进行各种设施的设计,而且把IE的设施设计范围扩展到其他更复杂、更庞大的设施系统,例如邮电、交通运输、机场的设施及其他服务设施。当然OR方法也要与相关的专业技术知识和经验相结合。

由于这种新发展,1955年美国工业工程师学会为IE制订定义时,就有人建议在定义中明确OR在IE中作为理论基础的地位,但考虑到OR在当时还在不断发展之中,所以没有完全采纳这个建议,而只在定义中使用了“数学……的专门知识和技能”的说法来表达这个发展趋势。

1955年美国工业工程师学会(AIIE)制定的IE定义为:工业工程(IE)涉及把人员、物资和设备组成综合系统的设计、改进和实施。它使用数学、物理和社会科学的专门知识和技能、并且运用工程分析、设计的原理和方法,对该系统可能获得的成果予以确定、预测和评价。

50年代的十年是IE与OR结合试验最活跃的年代,美国和其他国家的一些大学的IE学系把OR定为必修课程;有些原有的IE学系和研究单位改名为工业工程与运筹学系或研究所;美国工业工程师学会成立了美国运筹学学会(ORSA)的分会机构;IE的书籍增添了OR的篇章。

3) IE与SE结合(70年代中后期~现在)——IE与OR结合确实是一大进步。但OR的各种方法虽具有较强的系统性,但方法与方法之间,以及OR方法与IE传统方法之间仍然缺少自然的联系,因而常被局部地、孤立地应用,而难以取得综合的效果。此外,OR虽然扩大了IE的应用范围,但OR毕竟只分析事理,还只能使IE限于处理一定范围内的工程问题,即企业内部或工程项目等微观系统问题,而现代的工业企业的事务越来越复杂,微观宏观问题交织在一起,只探讨微观问题已嫌不足。因而寻求一种能把IE和OR各种方法统帅起来,使之更好地综合运用理论基础,就很迫切。

恰在50、60年代,系统科学(SS)也有了长足进展。一种承袭了SS的科学思想和包含自然科学社会科学知识的、并声称也以OR为理论基础但很注重工程应用的系统工程(SE)脱颖而出,并受到人们广泛的重视。许多IE学者认为:SE重视系统哲学思想的培养和系统分析方法的训练,又包含有较丰富的自然科学和社会科学的知识,正是IE所需要的一种“统帅”学科,可以把SE的方法论、OR的数理分析、IE的传统技术与工业专门知识有机地结合起来,形成一个比较完备的学术体系。使IE既可对小至一个劳动岗位进行分析,也可对整个生产线、整个企业、大至整个工业系统进行分析和设计,正像机械工程作为一门完整体系的学科一样,既可以设计一个小零件,也可以设计一整套机器系统。但这些分析和设计都要在一定的整体系统思想指导下进行[1]、[8]。

从70年代以来,IE就是沿着这条思路不断发展着、完善着。现代的IE学科体系可以比拟

为图 1-3 所示的一条“连续光谱”(continuum spectrum)。在这条“光谱”的中央部分排列着工业专门知识(相当于霍尔的 SE 三维结构中的专业知识维),既是 IE 解决实际问题所需用到的专门知识,也代表 IE 所要研究和处理的一些实际问题,其中有微观的也有宏观的。“光谱”的左端排列着 SE 的各种基本理论和方法,是 IE 的理论基础。“光谱”的右端则排列着 IE 的基本的传统方法(经过改进了的),是 IE 的工艺学[1]。

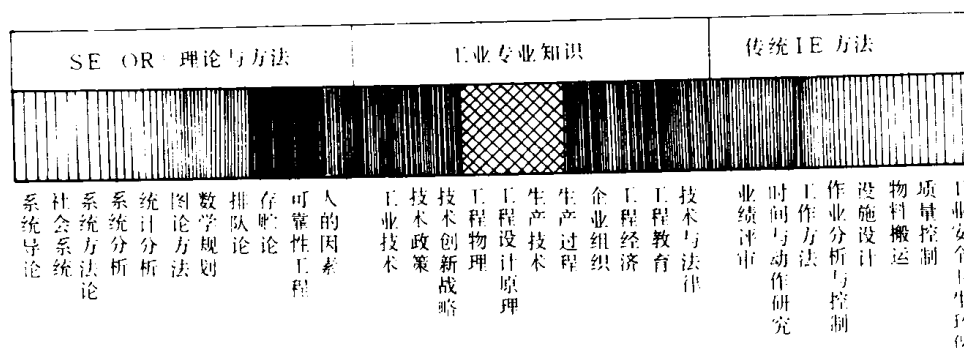


图 1-3 现代工业工程的学科体系(IE“光谱”)

近年来,一些 IE 学者为 IE 下了一些新的定义,用以反映现代 IE 的内容和职能。其中一种定义为:工业工程是综合运用工业专业知识和系统工程的概念与方法,为把人力、物资、装备、技术和信息组成更加有效和更富于生产力的综合系统,所从事的规划、设计、评价和创新的活动。它也为管理提供科学依据[1]。

现代的 IE,无论其所处的环境、还是它本身的内容、职能和用途,都已今非昔比,下面分别加以阐述:

- 它所处的环境是一个高度现代化的竞争激烈的信息社会。生产技术系统从 17、18 世纪的简单机械化,经历了 19、20 世纪的自动化大量生产的概念,演进到多品种小批量柔性化和计算机综合生产的系统生产技术系统。

- 它的内容要适应环境不平衡变化所产生的客观条件的广泛差异,让传统 IE 方法与复杂的数理理论并行不悖。但总的要求是要更加注重科学和技术的成份。例如,人的因素在过去和现在都是 IE 研究的第一重要课题,过去利用时间和动作研究向工人提出苛刻的要求来达到提高劳动生产率的目的,而现在则更侧重于运用人-机工程学的科学原理改进劳动设施来达到同一目的,时间和动作研究却成为设计全自动生产线提供合拍参数数据的重要手段。

- IE 的职能和用途已从 50 年代以前的分析和设计微观小系统的单一功能,发展到现在的微观和宏观系统双重分析和设计的能力,这是符合客观实际需要的,因为微观和宏观同处于一个系统之中,不强调宏观的改善,就不可能获得微观的改善。1950 年以前,IE 的用途几乎集中在机械制造企业,处理一些小的系统问题。而今天,IE 活动虽仍以机械工业为主要领域,但已扩及其他制造业和服务行业以及政府部门,为它们采用现代化设施系统的规划、设计、改进和实施而服务。IE 在政府部门中的应用主要为工业技术发展规划和政策提供科学的决策依据。现代 IE 之所以具有这样广泛的服务能力,与 IE 和 SE 的结合是分不开的。

### 1.1.2 系统的概念

系统(System)是一种普遍存在的自然现象,也是人类谋求生存和繁荣发展、从事各种生产活动和社会活动所要探索的自然法则。

系统的概念就是反映这种自然现象和法则的思维形式。系统的概念通常用系统的含义、系

统的分类和系统的整体性质来表达。它们综合起来可以反映系统的本质和规律。

### (1) 系统的含义

长期以来有许多哲学家和科学家为系统作过许多种科学的定义和分类[1]、[4]。此处从本书的需要出发,仅取其中简明而又概括性强的两种定义和一种分类法,分述如下:

L. V. 贝特朗非(L. V. Bertalanffy)提出的定义[4]:系统是处于相互关系中的诸要素的集合

$$S = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$$

钱学森提出的定义为:把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(要素)结合而成的具有特定功能的有机体,而且这个系统本身又是它所从属的一个更大系统的组成部分[5]。

### (2) 系统的分类

宇宙间的各种具体系统可分为自然系统和人工系统两大类型[1][4]:

1) 人工系统——人工系统是由人类的劳动和其他活动(包括思维活动)创造出来的各种系统。它包括:

- 社会系统——文化、政治、行政、教育、经济(工、农业,服务业)、科学、法律、军事等。
- 工程技术系统——建筑物、交通/通信网络、农场、工厂、机器、电子计算机……等。
- 概念系统——以各种哲学、史学、科学、经济学的知识和概念作为要素而构成的抽象系统,例如哲学体系、科学体系、经济指标体系等。

2) 自然系统——自然系统是天然产生和存在的各种系统。它包括:

- 生物(生命)系统——动物、植物、微生物、生理系统等;
- 物理系统——物理、化学、天文学、地学。

自然系统中有非人类能力所能影响和控制的天然系统,例如太阳系、银河系等天体系统;也有可以受人类影响、控制和改造的自然系统,例如地球的自然条件、生物物种、能量转换、物质改性等。

### (3) 系统的性质

凡属上述定义内的系统都具有下列的一般基本性质[1][4]:

1) 相对性——系统是一个相对于其内部结构和系统的环境而言的概念。同一个研究对象在不同行为作用中可以被当作系统、要素(单元)或环境看待。例如,研究机械工业时,相对于其内部的行业和企业结构或生产技术结构而言,机械工业就自成一个特定的系统(体系),其所属的各个行业和企业或各种机械生产技术是它的组成要素,而相对于其环境而言,机械工业则是组成国民经济大系统的一个要素(子系统)。同理,一部机器可以看成是由一些机械零部件(要素或单元)组成的一个系统,而在一个车间里或一条生产线上(环境),这台机器则成了车间或生产线的组成要素了。

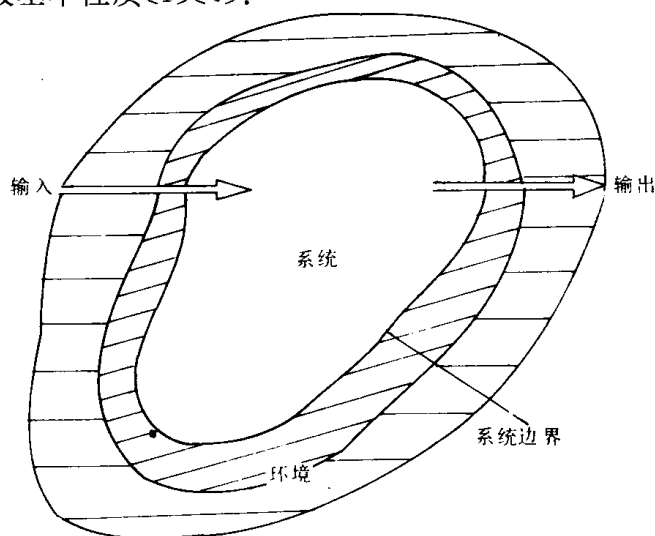


图 1-4 系统与环境

但当研究问题的行为作用一旦确定之后,就应在系统与环境之间划定一条可循的明确界线,称为系统边界(System boundary),它既可以是实物性的,也可以是概念性的边界,把所论系统的全部要素包含在内,并把该系统与系统的环境有效地隔离开来。通过边界只允许有输入和输出通道使系统与环境相连(参见图 1-4)。

此外,根据实际需要,人们还可以把一个系统内部的诸要素,按系统结构的层次及(或)功能的行为作用,组成若干结构子系统及(或)功能分系统:

- 子系统——它是按系统中诸要素的不同组织层次划分的,可形成多级子系统,每一级至少有两个并列的子系统(图 1-5a)。

- 分系统——它是按系统中诸要素的不同功能划分的。分系统虽然也可形成多级结构,但除非在冗余储备结构中,每一级分系统很少有并列的结构(图 1-5b)。

在同一(总)系统中,结构子系统与功能分系统常形成矩阵的关系(图 1-5c)。

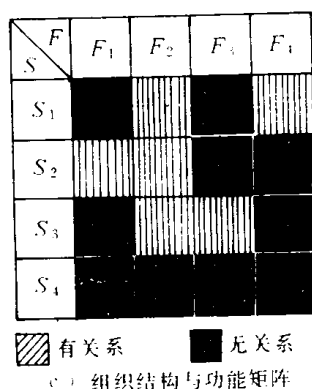
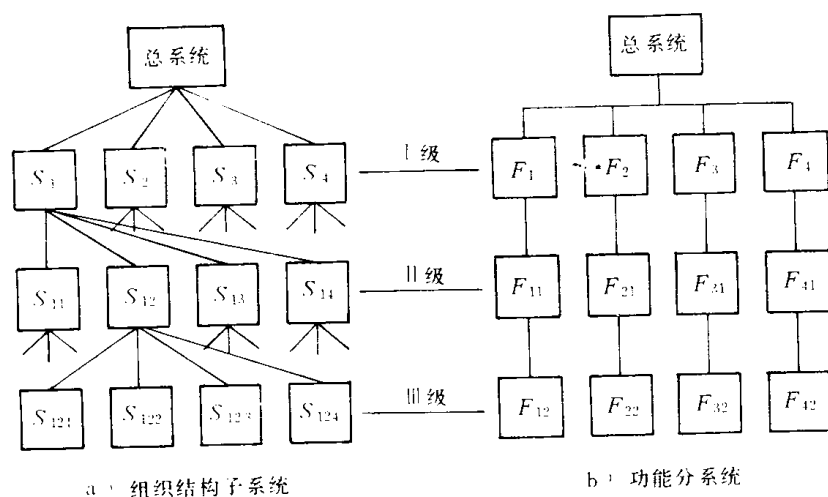


图 1-5 系统的子系统和分系统

注: S—组织结构; F—功能

2) 相关性——系统的定义强调要素、系统和环境之间的相关性。如果没有这种相关性,就不能称为合理的系统。一个要素与某一系统不相关,它就不属于这个系统。系统的相关性是由存在于要素-系统-环境之间的能量及(或)物质(原材料、资金、设备)及(或)信息(消息、知识、技术)流组成的作用场维系的,每一个系统或要素要从作用场中取得某种形式和数量的能量( $E_{in}$ )、物质( $M_{in}$ )或信息( $I_{in}$ )的输入,通过系统或要素本身的特定功能(职能)将之转换为另一种形式和数量的能量( $E_{out}$ )、物质( $M_{out}$ )或信息( $I_{out}$ ),输出到作用场中去,对其他的系统或要

素产生影响,与它们形成  $E/M/I$  的交换,从而发生相互作用和相互依赖的关系。

研究一个特定的系统时,应设法用明确的方式(例如概念模型或数学模型)描述上述的关系。将通常用以描述系统的基本方程概述如下:

$$g(e, c) \equiv \Delta e / \Delta c$$

$$\text{或 } \Delta e = g(e, c) \Delta c$$

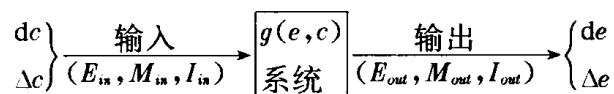
式中  $\Delta c$  是作用于该系统的某种输入(例如上述的  $E_{in}$ ,  $M_{in}$ , 或  $I_{in}$ )的变化增量。因为各种输入( $c$ )均来自系统之外的作用场,并要对系统的功能产生影响,故又称外部激励(external stimuli)。

$\Delta e$  是系统对输入变化增量  $\Delta c$  作出反应而产生某种输出( $e$ )(例如上述的  $E_{out}$ ,  $M_{out}$  或  $I_{out}$ )的变化增量。

$g(e, c)$  称为系统反应函数核(system kernel),反映系统的特定功能和性质。设若已知  $g(e, c)$  的定量数学关系,人们就可为在系统反应函数核定义范围内的任一定量输入确定其定量的输出。设若  $g(e, c)$  是连续的输入和输出变量的函数,则系统的基本方程是:

$$de = g(e, c)dc$$

系统的基本方程可用下列的概念模型来表达:



3) 目的性——系统的目的性是系统输出所表现的特定性质。除少数天然系统(例如天体系统)的目的性不够明确外,系统(特别是人工系统)的目的常常是奉献性的,并要与环境条件和要求相适应。

另一方面,要达成特定的目的,系统本身必须具有与此目的相符的特定功能,即把特定的输入项目转换为一定的输出项目。而系统的功能则是由系统内部的诸要素形成的特定组织结构和特定的作用(活动)来产生和决定的。这种组织结构和作用,既体现诸要素的和谐协同性,又体现诸要素之间的严密制约关系。

系统的目的是系统与环境发生连系的外延特性,而系统的功能则是系统为达成目的产生的内涵特性,目的和功能是系统的一体两面,是统一的特性。

4) 进化性/创新性——任何系统的功能及其相关的其他性质,都会随着时间的推移而变化。这种变化成因于系统内部诸要素的结构在环境的负作用下发生损耗、时效老化、相变或分歧等形式的质变。其结果要么使系统趋向于不稳定、无序、僵化乃至消亡;要么使系统发生自组织(auto-organization),从旧态转变为新态,形成有序性更好的高级新结构。这种演变,对天然系统而言,称为进化;对人工系统而言,称为创新。凡属封闭系统因与环境隔绝且具有较强的统一性,在时间长河中容易走向僵化和无序;而开放系统因具有多样性和较强的环境适应能力与自维持能力,则增大了生长、发展和进化/创新的可能性。

5) 整体性——系统的各种基本性质并不是互相孤立的,而是一体多面的表现。它们的综合构成了系统的整体性,是系统的最基本的性质。概括言之,系统的整体性表现为:

① 系统与环境的协调——不仅系统的目的/功能要与环境条件和要求相协调,而且系统内部诸要素也要具有适应环境各种正、负影响因素的能力。

② 结构与功能的统一——系统的结构和功能是互为前提、互为因果的统一体。系统发挥

功能的效率和可靠性取决于结构中每一要素各自发挥功能的效率和可靠性,而且大多数服从于乘法律:

$$\eta_s = \prod_{i=1}^n \eta_i = \eta_1 \times \eta_2 \times \cdots \times \eta_n$$

$$R_s = \prod_{i=1}^n r_i = r_1 \times r_2 \times \cdots \times r_n$$

$\eta_s, R_s$  = 系统发挥功能的效率,可靠性  $\leq 1$ ,

$\eta_i, r_i$  =  $i$  要素发挥功能的效率,可靠性  $\leq 1$

理想的系统结构是它的诸要素具有相同的效率和可靠性。在一定的系统目的条件下,任一要素发生  $\eta$  和  $r$  的过大变化,都会使整个系统失衡,甚至产生振荡,以至失效。

③ 现状与发展的延续——系统的一切性质无不处在时间的变化之中。系统的现状是过去变化的终结状态,同时又是未来变化的初始状态,时间不应仅被视为描述系统及其各种性质而引入的参量,而应看作是决定系统变化的自变量。系统的动态性导致的结果若不是系统的衰亡,就必然是系统的进化或创新。进化/创新是系统得以继往开来的延续关键。因此,人们要使某种系统继续存在与发展,就不能只满足于系统的现状,而应经常不懈地致力于系统现状的改进与创新。

#### (4) 系统观念

从系统概念得到的启示是:人们从事的一切工作,不论其规模大小和复杂程度如何,都可以看作是一种系统。因而人们在日常生活和日常工作中应当养成一种习惯,经常用系统概念所揭示的哲理和观点去看待问题、观察问题和处理问题。这就叫做树立系统观念。系统观念是工作的指导思想,规范着人们的工作行为。人们树立了系统观念,才会自觉地谋求运用科学的系统理论和方法去分析问题和解决问题。如果缺乏系统观念,不仅难以改变旧的工作习惯,即使学会一些系统分析方法,也难以正确地应用它们,容易犯误用或滥用的错误,特别是难以从全局出发加以运用以取得系统的整体效果。

然而,系统观念的普遍树立,决非轻而易举,一蹴而就;需要通过长期不懈的教育推广,灌输系统科学的基本思想和理论、培养系统工程的基本方法和技能,并建立一套新的工作制度,保证系统思想和方法体现在日常工作中,逐渐改变旧有的工作习惯,才能使系统观念得到普遍树立,形成风气,收到实效。

#### 1.1.3 系统科学

系统科学(System Science, SS)[1][4]是从系统这个统一的概念出发,把用其他各种科学从各自的不同角度研究各种系统的特征和规律所获得的基本理论加以总结归纳,进而研究普遍适用的一般系统原理的一门科学,为各种系统的研究工作提供理论指导。系统科学与自然科学、社会科学、数学、思维科学被认为是认识客观世界规律的五大基础科学。由于 SS 是其他各种科学基本理论的总结归纳,因而又是连系其他科学之间的桥梁。

SS 是一门方兴未艾的科学。关于它的学科体系,科学家们见仁见智,还没有统一的定论,下面列举贝塔朗菲和日本市川惇信分别提出的两种系统科学体系(图 1-6),可以窥见系统科学的梗概。

- 系统哲学与系统概念——认识系统的本质和普遍规律,成为一切系统工作的主导思想。
- 一般系统论——它是系统的通论,着眼于系统的整体性,用数学描述系统环境、结构、功

能以及能量、物质、信息的传递、存贮和转换等关系;从分析和综合的统一性出发,研究影响和改变系统结构和功能的一般途径。

• 系统方法论——研究进行系统分析、规划、设计和运行时所需采用的各种具体的系统方法和技术(例如运筹学方法),以及思维程序、工作步骤等。包括系统分析学、系统工程学、系统动力学等。

如图 1-6 所示,SS 包含两大部分:

- 抽象部分——培养系统思想;
- 具体部分——训练系统方法。

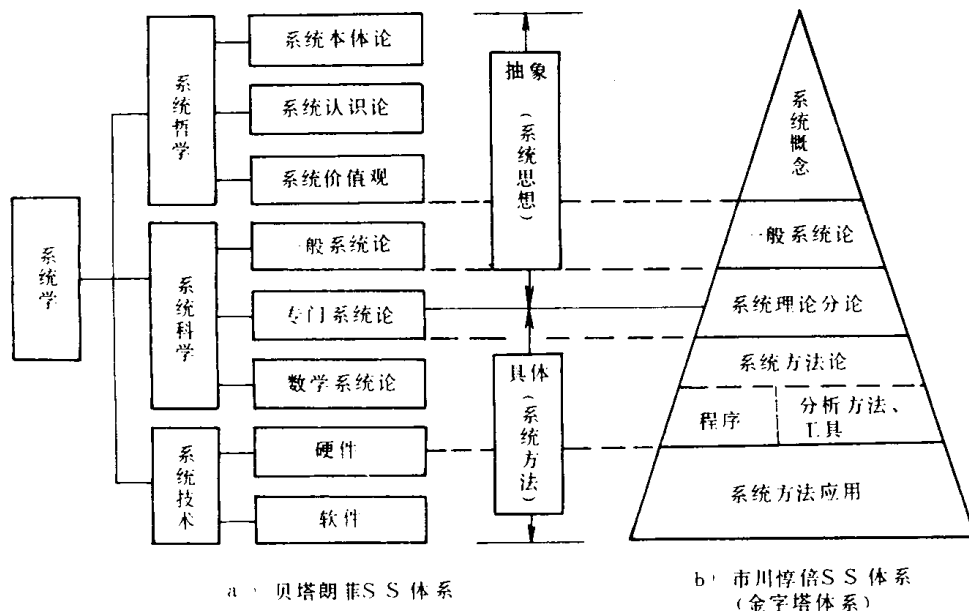


图 1-6 系统科学体系

这些都有助于人们树立系统观念。近年来《系统科学导论》及其一些分支学科(例如社会系统、工业系统、人-机系统学等)已成为培训工业工程师的重要的必修基础课程,其目的即在于此。此外,SS的内容涉及广泛的自然科学和社会科学的知识 and 哲理,对于扩展需要知识面广、思想开阔的工业工程师的眼界和胸襟也是很有裨益的。

古代的人类早就有了朴素的系统概念,自觉或不自觉地应用了它们去观察各种现象和从事各种生产、社会活动,并也产生了一些辩证唯物论的哲学思想,推动着人类文明的进步。然而古代的朴素系统思想对事物的细节缺乏分析和综合能力,常常要用纯粹的想像和臆断来解释事物,虽然出现过一些天才的预见和创造,但也产生过不少荒唐的迷信和失误。SS是随着近代的自然科学重视和运用了分析与综合的技术并取得一些重大的科学突破(例如19世纪上半叶出现的能量转化、细胞和进化论等伟大科学发现)之后才逐渐发展起来的。1937年贝塔朗菲(生物学家)正式提出一般系统论(General System Theory),从此SS步入蓬勃发展的局面,对推动其他科学和技术的发展起着推波助澜的作用。到了50年代数字电子计算机的出现,既是SS促成的一项重大成果,又是推动SS向更大规模和更复杂领域发展的有力工具,现在二者正在互为因果地不断促进和提高,进而促进了现代工业、农业的变革和信息社会的发展。

#### 1.1.4 系统工程(SE)

系统工程(Systems Engineering, SE)是把系统科学(SS)的知识应用于实际的技术科学,为涉及社会-科技-经济的综合系统的规划、设计、建造、实施和革新的各种工程技术提供理论和方

法[1][6]。

### (1) SE 的理论基础

从理论上讲,SE 的理论基础是系统科学的原理。然而,作为一种实用的技术科学,SE 必须把抽象的纯理论具体化、实用化,甚至通俗化,才能为非从事系统科学研究的广大工程技术人员所掌握。SE 必须具有本身的实用化的理论基础,有下列三个方面[1][6]:

1) 系统思想基础——这就是以系统概念(见 1.1.1)为基础的指导思想。把一切研究对象都看成系统,强调从系统的整体性出发,去分析系统各个相关要素相互之间的作用和每一要素对系统功能的独立作用。通过这些认识,加深对系统整体的综合研究。而且分析与综合的运用常需采取多次的迭代过程。这种系统思想与我国倡导的“统筹规划、综合治理”的哲学思想是一致的。

2) 数理基础——这就是导源于系统科学思想的运筹学(Operations Research, OR)。钱学森和国外的一些科学家都认为:当前所谓的运筹学,包括线性规划、非线性规划、博弈论、排队论、存贮论等,以及现代管理决策科学、系统分析、系统方法,费用效果分析等等的数学原理和算法,都能体现 SS 的思想,都可以统一地看成是此处所谓的《运筹学》,而这些学科的工程应用内容,均可以用系统的概念,统一纳入系统工程[5]。这些数理方法可以用来定量描述、分析、优化和综合研究系统。

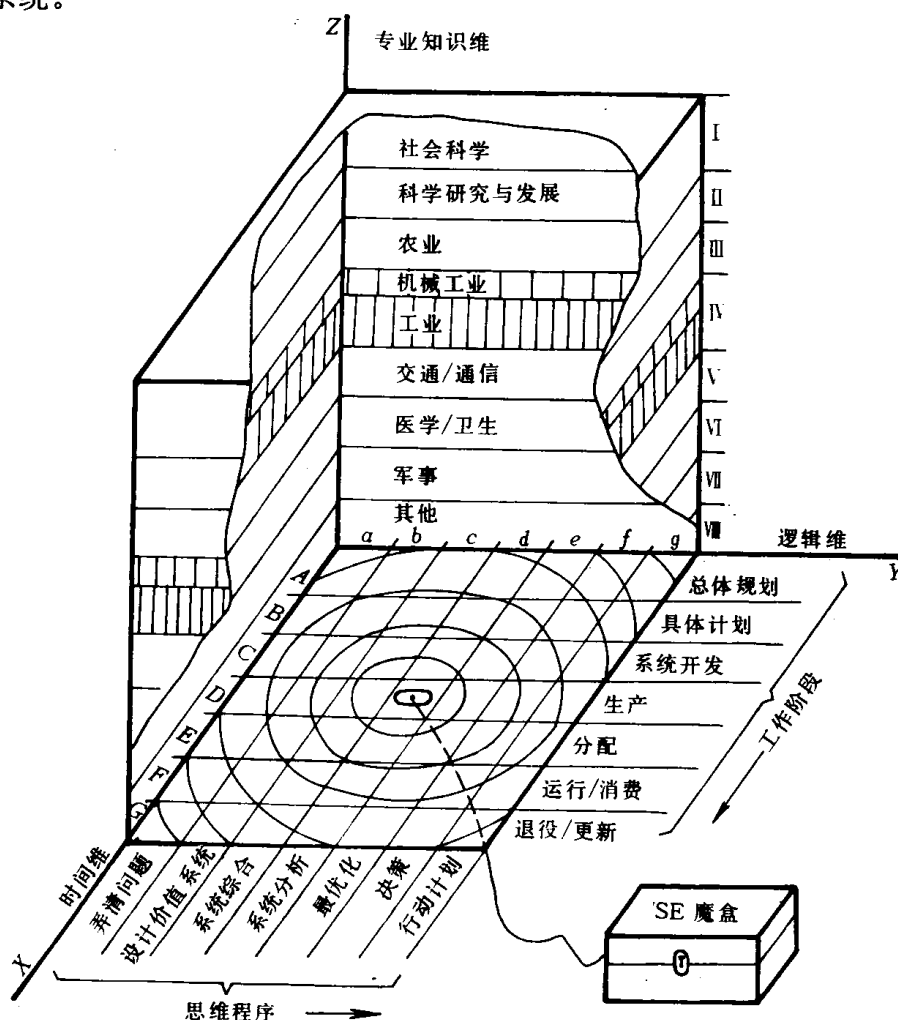


图 1-7 霍尔 SE 方法论的三维结构

3) SE 的方法论——是系统思想的具体化,是实施 SE 的行为规范。霍尔(A. P. Hall)提出的 SE 三维结构已成为广泛应用的典型 SE 方法论,认为完整的、富有实际意义的 SE 活动必须遵循七个工作阶段(时间维)、七个思维程序(逻辑维)和与专业知识(知识维)结合而构成的三维矩阵,并要从 SE 魔盒中选用适当的系统分析方法(图 1-7)。SE 魔盒是指各种 SE 系统分析方法储备汇总的形象术语。本书第二章将详细介绍霍尔的 SE 三维结构及若干重要的系统分析方法。

### (2) SE 与其他专业学科的结合

SE 方法论的三维结构已经表明:SE 的应用必须与专业知识结合,否则,SE 将形同无的之矢,失去任何意义。

70 年代中期以前,SE 是一门比较独立的学科和专业。有专门学习和从事 SE 工作的系统工程师。当要开展某种工程项目的 SE 活动时,系统工程师要与其他有关的专业工程师合作。这种实践方式是十分必要的,而且也还是当前经常采用的方式。但也存在一个明显的缺点,那就是系统工程师与专业工程师之间经常发生互不理解和意见分歧,影响了 SE 的实施效果。

有鉴于此,人们逐渐主张让各种专业人员普遍接受 SE 的培训。于是各种专业学系,特别是工业工程系,纷纷开设 SE 及 OR 课程,到 70 年代后期 SE 已成为工业工程系和其他专业学系的必修课程。这股潮流,逐渐使 SE 与一些专业领域的专门知识结合而产生了一些新的专业性系统工程专业,如:生物系统工程、农业系统工程等〔1〕,〔5〕。当然在此处,我们关心的只是 SE 与工业工程的结合,这二者的结合确实使工业工程发生了许多实质性的变化。

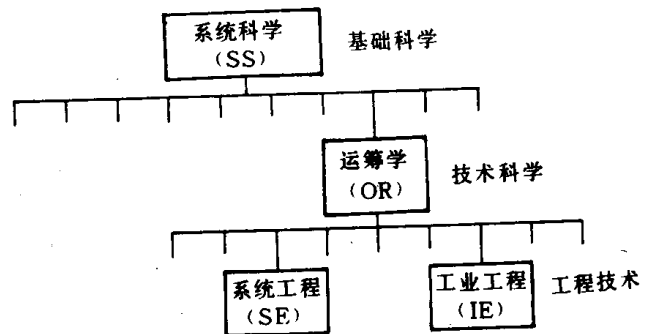


图 1-8 SS、SE、IE 的学科体系

现代的科学技术体系可分为下列三个层次〔1〕:

- 1) 工程技术——直接改造客观世界;
- 2) 技术科学——为工程技术提供实用的理论和方法;
- 3) 基础科学——认识客观世界的规律,为技术科学提供基本理论。

按照这种学科体系来说明工业工程(IE)、系统工程(SE)和系统科学(SS)之间的关系,那么 IE 是这个学科体系中的一种工程技术,SE 是这个体系中的一种技术科学,而 SS 则是这个体系中的基础科学。

## 1.2 工业工程与工业管理

IE 与工业管理无疑有着密切的关系。从其发展历程来说,IE 的前身是泰勒的科学管理,与之一脉相承,渊源流长。从其职能来说,IE 是沟通技术与管理的桥梁,IE 的各种工作成果一直是企业管理的重要决策依据,从 70 年代以来,IE 向工业宏观系统的研究方向发展,IE 与政府部门的工业管理也发生了服务的关系。然而,西方国家的工业界把 IE 列为工程中的一个专门领域,而工程与管理在理论上和职能上却是两个不同的概念。现从下面几个方面作初步的论述,可供了解 IE 与工业管理的关系。

### 1.2.1 工业工程与工业管理的职能

#### (1) IE 的基本职能

正如 IE 的定义所述,IE 的基本职能是为把人力、物资、装备、技术和信息组成更加有效和更富于生产力的综合系统所从事的规划、设计、评价和创新的活动。它也为管理提供科学依据。现按此分述如下〔1〕:

1) 规划——规划是确定一个组织在未来一定时期内从事生产或服务所应采取的特定行动的预备活动,包括总体目标、政策、战略和战术的制定,也包括分期(长期、中期、短期)实施计划的制定。规划是协调营利与资源利用的一种重要的工具,但规划包含十分丰富的技术内容,规划的制订是一种工程。IE 从事的规划侧重于技术发展规划。

2) 设计——设计是一种为实现某一既定目标而创建具体实施系统的前期工作。包括技术准则、规范、标准的拟订,最优选择和蓝图绘制。IE 的设计有别于一般单个机器设备的设计,而侧重于工程系统的总体设计,包括系统的概念设计和具体工程项目设计。IE 的设计含有丰富的工程技术内容,而显示其工程的本色,有别于管理的职能,但 IE 的设计也常常是管理中资源分配和日常作业的依据。

3) 评价——评价是对现存的各种系统、各种规划和计划方案以及个人和组织的业绩,作出是否符合既定目标或准则的评审与评定的活动。包括各种评价指标和规程的制订和评价工作的实施。IE 的评价是高层管理者的重要决策依据,是避免决策失误的重要手段。

4) 创新——创新是对现存各种系统的改进和提出崭新的、富于创造性和建设性见解的活动。创新(innovation)是任何系统的一个重要属性。如果没有创新,一个系统不论其为一种产品、一台机器、一条生产线、一个企业,还是一个产业部门,都将随着时间而耗损、老化、无序、僵化、乃至失效衰亡。创新应当是管理者的意志,但它的实施则是一种特殊的工程。IE 的创新要从系统的整体目标和效益出发,把各种相关的广泛条件加以考虑,进行综合权衡后,求得最优选择,来确定创新的目的和策略,选出创新的项目和内容。

图 1-9 列出 IE 通常履行的规划、设计、评价和创新职能的一些典型内容。关于 IE 进行规划、设计、评价和创新所要用的一些方法我们将在第二章中详细介绍。

关于 IE 的基本职能,人们还有从其他一些观点和角度予以组合分类,型式甚多。其中一种能较好反映现代 IE 职能内容的分类法是把 IE 的工作分为下列三项:

1) 管理作业研究(Operations Research for Management)——直接为管理部门提供决策依据的 IE 工作和方法。包括各种规划、经济分析、作业测定、工作方法、绩效评价、工资激励等。

2) 生产工程(Production Engineering)——直接与生产相关的 IE 工作和方法。包括制造工艺过程、物料搬运、质量控制、库存控制等。

3) 设施设计(Facility Design)——直接与工程项目总体设计相关的 IE 工作和方法。包括工厂选址、工厂布置。然而设施一词有着广泛的含义,不限于机器设备和工厂车间,可以包含计算机系统、信息系统、运输系统以及各种大型工程系统。

不难看出,由于 IE 学科体系的完整性,任何一种有关 IE 职能的分类法都难以把 IE 全部职能截然划分为若干完全独立的部分。不论从何种观点、角度来划分,所划分的各个部分都有互相关联或重叠的成分。特别是 IE 的各种方法大多数可通用于各个部分的工作,是各个部分的各项工作都要用到的方法,无法划归到任何特定的部分中去。此外,上述分类法的管理作业研究、生产工程、设施设计三项职能中每一项也都包含有规划、设计、评价和创新的职能内容,

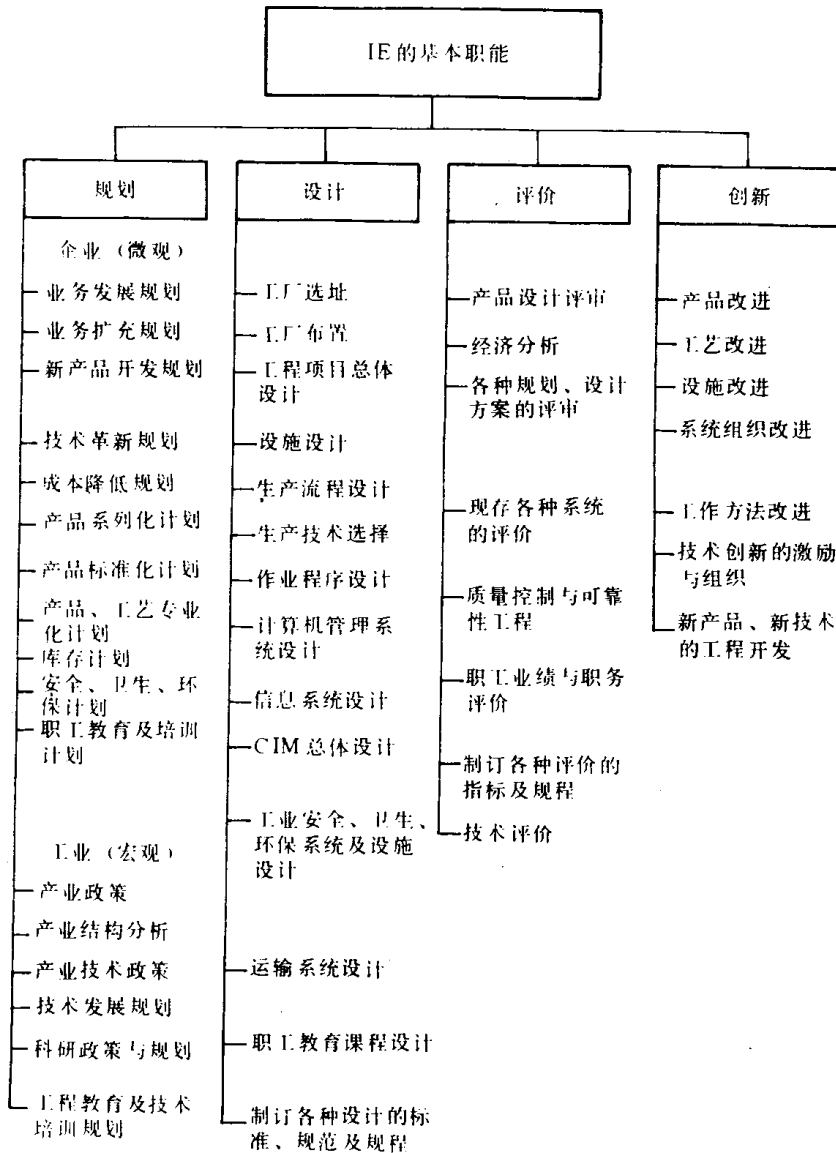


图 1-9 IE 的基本职能及其典型内容

形成矩阵式的职能结构。总之，人们要用系统的观念来看待 IE 的各项职能、并从整体性出发去运用它们。

## (2) 工业管理的职能

工业管理的目的与 IE 的“为把人力、物资、装备、技术和信息组成更加有效和更富于生产力的综合系统”的目的是完全一致的。但工业管理为达到此目的的职能是运用行政、组织、人事、财政、金融、贸易、法律等手段来保证生产、技术开发和各种工程活动得以顺利进行和实现，从而保证工业系统功能得以充分发挥和顺利运行。管理职能，包括决策、组织、领导、协调、控制等行为〔1〕〔8〕：

1) 决策(Decisionmaking)——是要从多种可供选择的行动方案中抉择其中最优的一种去达到预定的目的的行为。

2) 组织(Organizing)——是要把应做的工作分成若干可掌握的任务，并分配各种资源，特别是人力的分配，以达成预期效果的管理行为。