工程体制理论 (I)

方永绥 姜遵富 陈远星 卢国铭

(中国科学院电子学研究所)

本文分析了生产实践、科学研究、技术革新、自然现象中普遍存在的一类现象,引入“工程体制”这样一个概念来概括之。文章讨论了对“体制现象”及其规律进行全面、系统地研究的必要性,提出了一种称为“关键作用环节法”的“体制分析”方法,能确定一个给定工程的所有可能体制的集合。体制集合不仅能反映出已知的体制,也能预测或探索新的可能体制。文中提出了一种“体制评审”技术,以实现对已知体制进行定量比较,并确定一定条件下的最优体制元素。国外用于科学管理的“关联树木”法和 Pattern 技术*有某些类似于“关键作用环节法”的地方。

一、引言

“工程”和“体制”这两个概念广为人们所熟悉,在本文中赋予它们更广泛的含义,即凡人们在生产斗争和科学实验中所要完成的某种特定的任务,达到某种目的,将对象(物质、能量、信息)进行某种改造或变换统称为工程。工程所涉及的内容很广泛。其范围可大可小,可以比较笼统,也可以十分具体,视所讨论的内容而定。例如,输送电能——输电工程,传递信息——通讯工程,构造建筑物——建筑工程,金属冶炼——冶金工程,物质分解与合成——化学工程,资源勘察——勘察工程,疾病治疗——医疗工程,以及遗传工程等等。比较具体的工程如:“太阳光能收集”、“电视信号放大与显示”、“癌症抑制”、“临震预报”、“货运调度”等等。

为完成某种特定工程所组织起来的互有关联的物质构成、人力、能量、信息的综合体称为“工程的系统”。如“电视信号的接收、放大、显示工程”由天线、电视接收机、电源、操作者四部分组成它的工程系统。

完成某种特定工程所能采用的各种方式、方法、手段、途径、方案或制式都用“工程的体制”这一概念加以概括。如通信体制、彩色电视体制等等。“工程的体制”实质上也就是工程系统实体内容的不同组织形式。“工程的体制”简称为“工程体制”或“体制”。同一工程能用多种彼此不同的体制来实现,这一现象称为“体制现象”。

二、一个普遍存在的现象——体制现象

在我们周围的客观事物中,体制现象几乎无处不有。

* 关联树木法及 Pattern 技术见文献 [3, 4, 5]。

人们在收听广播时,可用电子管收音机,也可用晶体管收音机。无论是海底电缆还是通讯卫星都可以传送电视节目。钢可以用平炉冶炼,也可用转炉冶炼。石油可用专用油车,也可通过输油管送到炼油厂。民用供电方式有的采用 110V、60HZ 制,而有的则采用 220V、50HZ 制。如果你要进行一次北京到上海的旅行,可乘坐火车也可以乘飞机。当你要向某地的一个人通告某个消息的时候,可以写信,也可以打电话。数学家在证明一个数学定理时,往往采用几种不同的方法。人类之间的信息交换工具——语言和文字大约有百十种。联合国讲坛上的发言同时被翻译成几种语言送到听众席上,虽则仅表达同一个内容。这是语言学中的体制现象。

在自然界,如果用工程的观点来考察一些生物系统,同样可以看到许多“体制现象”:自然构造的飞行系统(鸟类及其它飞行动物)约有几十种体制,由于自然选择的结果,每一种飞行动物的飞行结构相对于它的生理条件及生活条件来说,大都是最佳的或接近最佳的;如果把牛和羊理解为用草类植物作原料生产动物蛋白和脂肪的“化工厂”,那么它们就是这类“化工厂”中的两种具体的体制;如果把稻和麦理解为用土壤、阳光、水份和空气做原料生产植物淀粉、蛋白、脂肪和纤维的“化工厂”,它们同样也是这类“化工厂”中的两种体制。

考察一下科学和技术发展的历史可以发现,人类的创造发明活动中,有相当一部分可以归结为寻求和探索更新、更好的“工程体制”,即归结为体制的更新。例如,用效率更高的电气机车、内燃机车代替蒸汽机车,用很少产生大气污染的三角活塞来代替往返式活塞,用轻小的晶体管代替电子管,用高密度集成电路代替分散装配的传统电路。往往一些重大的关键性的体制革新会引起工业部门革命性的变化。电子工业中晶体管的出现就是如此。

总而言之,“体制现象”无论在人类的生产斗争、科学实验和日常生活中,还是在自然界,都是大量地、普遍地存在着的。可以说,人们几乎天天要遇到、要解决各种各样的、大大小小的“体制问题”。显然,对于“体制现象”及其规律有着专门地、系统地、全面地加以研究的必要。

三、运筹学、系统学与工程体制;对体制研究的期望

为了避免将体制研究与运筹学或系统学混淆,有必要对它们进行一些比较。

运筹学及优化理论是近代数学的一个分支,它给出了某些类型的最佳对策问题、最佳方案问题的数学理论。典型的运筹问题,如货运调度,下料、工序安排,人力工具分配,还有对策论、排队论等等。显然,上述这些问题也可以用“工程体制”问题予以归纳,只要把这些问题理解为“工程”,那么每一种解决该问题的方案就意味着一种体制,每一种对策就会形成一类体制。但是,这类运筹问题起码有两个特点:一个是,有一个比较直接的、明确的数学表达;另一个是,在这些问题中,方案的不同或体制的不同,归结为一个具体数学结构中参数的不同。方案的比较,归结为参数的选择,举例来说,从几个货站到几个客户的运输调度方案问题是一个典型的运筹问题,如果我们把每一个调度方案都看成具体的运输工程中的一个“调度体制”,那么它也就是一个体制问题。这时,各种体制的不同可以立即被表达为一组参数(从 i 站到 j 户的运输量 A_{ij})的不同。因而这类体制问题很明显地归结为一个数学问题,最佳体制问题则变为某个条件极值问题。

从前面第二节的讨论中可以看出,实际上提出的体制问题其范围是很广泛的,许多问题尚没有合适的数学表达,某些要求也没有明确的数学计量。用电子学方面的事例来说,例如要决定在某些给定的技术要求下,通讯发射机的末级放大器究竟用速调管还是用行波管或者用正

交场放大器? 大洋通讯究竟用海底电缆还是用通讯卫星? 激光大屏幕电视和油阀大屏幕电视谁更优越? 气体放电平板显示器和发光二极管平板显示器谁更优越? 对于这些经常遇到的体制比较问题,目前的运筹学难以给出回答。从事总体设计的人员依靠经验和某些比较分析,大约也只好列一比较表给出“各有优劣”、“折衷的结果”这样一些没有数学计量的回答。我们期望对于体制现象的深入研究能对大部分体制比较问题都给出适当的数学定义及表达。这样,作为一种关于对事物进行“比较”与“决策”的科学,可以设想体制研究将是对运筹学的某种引伸,而运筹学则可为体制研究提供数学工具。质的判定如何表现为量的判定,优劣比较如何数量化,这是体制研究的一个方面。

体制研究还有另外一个可能是更重要的方面,即如何确定既是工程的各种可能体制,包括探索和寻求人们还不了解的更新更好的体制。这类问题在客观上亦是经常发生的,它更超出了运筹学的范围。对这类问题的回答要求合理地运用人们的专业知识和分析能力而较少依靠演绎数学。例如,我们问:除了传统的“一层层往上砌”的建筑工程施工体制外,还有那些可能是更好更合理的施工体制? 我们会马上注意到已被创造并应用了的“预构件积木式”施工便是一种更先进的施工体制,可能还有另外的一些合理的施工体制。本文将表明,对于这类问题,依据体制分析方法,仔细地分析各种体制的可能性,将可以提示或启发我们探索新的体制。

至于“系统学”或“系统工程”,涉及的内容主要是系统之间的信息关系,对信息的加工、处理、运算和判决。应用的范围主要是自动化系统、控制系统,研究的重点主要是系统的数学模型。已表达为同一模型的不同物理构成在这些研究中不再被区分和关心。但体制研究所涉及的系统不单与信息有关,其范围更广些。并且,用不同的物质构成及组织形式来实现同样功能的系统,则正是体制研究的重点内容。

从以上这些分析比较中,我们看到“运筹学”及“系统学”还没有解决“体制现象”中所提出的大部分问题,因而需要期待通过对体制问题的专门研究,并与“运筹学”和“系统学”的大量成果相结合,使人们对广泛意义上具有各种功能的“工程系统”的分析、综合及体制寻求、比较、抉择、评价等方面构成完整的认识。

四、体制分析——关键作用环节法

为确定给定工程的可能体制,这里给出一些必要的定义并提出体制分析方法,即关键作用环节法。

1. 定 义

工程的对象:被工程系统所作用(加工、处理、改造、变换、……)的物质材料、能量及信息,如建筑工程的对象是建筑材料,输电工程的对象是电能等等。对具体的工程而言,其对象是具体的。

工程对象的态:在工程系统对对象作用的全过程中,对象的各种状态。未经作用时的状态称为初态。全部作用终了后的状态称为终态。其他状态则称为中间态,可根据需要分为态 I、态 II、……等。终态即为工程的目标。根据对工程的种种具体要求确定目标的具体细节。工程系统的功能就在于将对象从初态变为终态。

工程系统的体制集:工程系统所有的互有区别的体制的集合。每一种体制都是体制集中

的一个元素。反之,体制集中的一个元素就是一种体制。下面将可以看到,体制集的构造是树状的、有层次的。体制集中的元素数(即体制数)可以分层(逐级)进行计算,视体制分析进行的层次而定。

体制元素的级: 依据体制集树状延伸的程度的不同,而对体制元素进行的分类定级。对体制元素的归纳与比较在同一级上进行。级的不同反映了对体制元素的描述的具体程度,也反映了体制元素间差异的大小。例如,电讯放大系统依据采用晶体管或电子管作有源元件而形成的两种不同体制可称为一级体制元素。进一步考虑供电方式的不同,又可将上述两个一级体制元素分解为“有电源变压器”及“无电源变压器”共四个二级体制元素。显然,这种分级是根据分析的需要视讨论的重点而定的。

关键作用环节: 将工程对象由初态变成终态时,所必需经历的若干个主要的作用环节,称为关键作用环节。

2. 逻辑符号

为给出体制分析程序,引入下列逻辑符号或称逻辑开关(图1):

(1) “利用或根据……机制”(图 1 a)。

(2) “甲”由“乙”得,或者由“丙”得。指向圆圈的箭头也可不是两个,此时意义类推。箭头均反置时,意义亦类推(图 1 b)。

(3) 实现“甲”需条件“乙”及“丙”。指向圆圈的箭头也可不是两个,此时意义类推。箭头均反置时,意义亦类推(图 1 c)。

(4) “甲”或由“乙”得,或由“丙”得,或由“乙”及“丙”同时得。指向圆圈的箭头多于两个时,意义类推。箭头均反置时,意义亦类推(图 1 d)。

(5) “等于”(图 1 e)。

(6) “若不清楚则询问或学习”(图 1 f)。

图 1 逻辑符号

3. 体制分析

体制分析的依据是对象在系统中状态变化的过程及有关的、必要的专业知识。体制分析的目的在于确定体制集,即使人们对某一特定工程的各种可能体制有一个全面的认识和数量计算,以便进一步作出比较和选择。步骤是:首先确定对象的初态和终态,再由初态和终态的比较确定关键作用环节、确定各中间态,随后从有关的基本原理出发,按完备性概念*找出实现

* 如传导、对流、辐射三种方式,对热交换是完备的,反射、折射、衍射对于光线改变行进方向是完备的,等等。

关键作用环节的各种可能的机制,及确定每一种机制的充要条件。再进一步对构成这些条件的全部可能形式一一加以列举。根据需要还可对条件的细节内容加以分析列举,逐步延伸。这里特别要注意机制的完备性和条件的充要性,以防遗漏。在上述步骤中若遇有要求不明确或知识不足时,随时询问及学习,包括进行某些调研或实验。由此得到的体制分析图既可理解为反映了各种可能体制的系统的构成“树”,也可理解为一种分析思考的程序图。图2给出各关键作用环彼此独立无关时的体制分析图。为简明起见,图上仅画了两个关键作用环,一般情况可类推而得。继续考虑更细节的因素时,图2可向下延伸。复杂情况另行讨论。

图2 体制分析图

图2中,机制V及R满足

$$V \cup R = 1; \quad (1)$$

机制H及J满足

$$H \cup J = 1, \quad (2)$$

条件A、B、C满足

$$A \cap B \cap C = V,$$

以及

$$\begin{aligned} D \cap E &= R, \\ F \cap 1 &= H, \\ G \cap M &= J. \end{aligned} \quad (3)$$

此外,要求

$$\begin{aligned} A_{K_1} &\subset A, \quad K_1 = 1, 2, \dots, i \\ B_{K_2} &\subset B, \quad K_2 = 1, 2, \dots, j \\ C_{K_3} &\subset C, \quad K_3 = 1, 2, \dots, n \\ &\dots\dots\dots \end{aligned}$$

$$M_{K_i} \subset M, \quad K_i = 1, 2, \dots, z \quad (4)$$

及

$$\begin{aligned} A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_i &= A, \\ B_1 \cup B_2 \cup \dots \cup B_j &= B, \\ C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_n &= C, \\ &\dots\dots\dots \\ M_1 \cup M_2 \cup \dots \cup M_z &= M. \end{aligned} \quad (5)$$

式(1)——(5)称为完备及充要原则。

由图 2 中各逻辑开关的状态不同求得实现环节 W_1 的可能形式有 P_{W_1} 种

$$P_{W_1} = i \cdot j \cdot n + l \cdot q; \quad (6)$$

实现环节 W_2 的可能形式有 P_{W_2} 种

$$P_{W_2} = x + y \cdot z. \quad (7)$$

体制集元素总数 P_{W_1, W_2} 为

$$P_{W_1, W_2} = P_{W_1} \cdot P_{W_2} = (i \cdot j \cdot n + l \cdot q)(x + y \cdot z). \quad (8)$$

如分级计算的话,则由图 2 可知

$$\begin{aligned} P_{W_1^{[1]}} &= 2, \quad P_{W_2^{[1]}} = 2, \\ P_{W_1^{[2]}} &= i \cdot j \cdot n + l \cdot q, \quad P_{W_2^{[2]}} = x + y \cdot z, \\ P_{W_1, W_2^{[1]}} &= 4, \quad P_{W_1, W_2^{[2]}} = (i \cdot j \cdot n + l \cdot q)(x + y \cdot z), \end{aligned}$$

上标 [1] 代表一级体制, [2] 代表二级体制。

为了说明图 2 所表示的体制分析方法,我们举一个最简单的具体例子。

假定我们要构思太阳光能捕集装置,按本文的定义,把这个任务称为“太阳光能捕集工程”。

首先,分析此工程的对象、目标、对象的初态及终态:

- (1) 工程的对象: 太阳光。
- (2) 工程的目标: 将太阳光聚焦在一定的面积上。
- (3) 对象的初态: 在某个截面上平行入射的太阳光及部分漫散太阳光。
- (4) 对象的终态: 射向某个小截面的太阳光。

其次,分析与实现目标有关的工程对象的主要物理特性及关键作用环节:

(5) 与实现目标有关的工程对象的主要物理特性是: 太阳光是包含一定频谱的合成光波。在这里,问题所关心的是它的光能而不必考虑信息。它在大气中直线传播,遇到其它介质时被反射、折射或衍射,同时损失小部分能量。

(6) 关键作用环节: 使太阳光按一定规则改变行进方向并射向一个缩小的截面。

由上述 (3)、(4)、(5)、(6) 等分析得图 3。

(7) 实现关键作用环节可利用的机制: 由分析 (5) 可知不外乎反射或折射。衍射造成光线的分散,不合 (6) 的要求。

(8) 实现反射或折射的条件是:

对反射器,要求条件:

- a. 光滑的、反射效率高的反射表面。
- b. 反射表面应有合适的几何形状,以使阳光被反射后能聚集。

对折射器,要求条件:

- a. 一定折射率的透明立体介质.
- b. 立体介质应有合适的几何形状,以使阳光被折射后能聚集.

由(7)和(8),将图3延伸而得图4.

图3 关键作用环

图4 环节—机制—条件

(9)根据有关物理及几何知识(或通过必要的资料学习和调查研究),找出满足(8)要求条件的各种形式.

对反射器:

对折射器:

至此,我们将图4进一步延伸为图5.

(10)从图5我们可获得实现本工程的各种体制(在一定意义上完备的).图5上每一条沿着箭头能通过各逻辑开关最终到达作用环的“途径线”便给出一种体制,或图5中各逻辑开关状态的每一种组合便给出一种体制.这一表达给出了体制数的数学定义.就图5而言,仅以物理机制的不同来区分的体制元素数是2.以物理机制、材料、几何形状三个因素中一个因素的不同来区分的体制元素数是21.写成 $P_{W[1]} = 2$, $P_{W[2]} = 21$.

图5 “太阳光能捕集工程”体制分析

上列体制分析的结果表明,对太阳光能捕集装置,仅从工作机制、反射或折射器的材料和形状等三方面来考虑起码有21种可能的形式。用体制的概念来说,也即有21种体制(为简单起见,先抛弃其他的考虑如自动对光等)。

可以看到,迄今为止流行的装置都已系统地在图5中得到,其中包括较早应用的反射镜面,玻璃透镜,以及在几年前提出的光漏斗*(曾被誉为核心上有重要突破)。另外,最近刚刚提出的成本极低从而引起人们很大兴趣的梅本?塑料透镜**也从本分析中自然地得到它的雏型。有意思的是:分析的结果还提示,可以用充水透镜来收集太阳光。这种办法也许值得通过实验去进一步研究,因为太阳光通过透镜时损失的部分光能可以通过水的循环来利用,还有

* 1966年芝加哥大学温斯顿为了某种用途设计了一种锥形采光器(漏斗状)类似于蜜蜂的复眼结构,此设计被认为是太阳能研究中的一项突破,于1972年建议用于采集太阳光。改进的形状是组合漏槽,两壁呈抛物线形。所得光强为发电所需的十倍,在2~3小时内能提供几千度高温。并有全天候性方面的优点,能收集漫散光,一个季度才调整一次,比传统的反射镜装置有极大的优点(见1974年3月20日美“基督教科学箴言报”)。

** 1977年5月太阳能国际会议上,日本梅本介绍了一种塑料制平面条形透镜,将太阳光合成线状,成本只及传统反射镜的十分之一,引起会议关注。太阳能捕集装置的演变约经历了几十年的时间。但如由体制分析所得的一揽子结果出发进行研究,这一演变过程是可以缩短的。

图6 “波场的纪录与读出”体制分析

成本低廉,搬动方便的优点。

总之,由上述这一简单例子,不难看出,这样一张程序化的体制分析图对设计人员全面地系统地分析思考问题有着相当的好处.对于比较成熟的问题,它可以帮助我们确定已有的办法在所有可能的办法中的地位,并指出某些为人们忽视了的、可能具有革新意义的办法.对于一个全新的工程问题,则它一揽子地把人们认识水平上所可能获得的大多数解决办法摆在我们面前.按体制的概念,就叫做通过体制分析确定工程系统的体制集. 在上面的讨论中并没有任何根据事后的结果进行的人为的安排,而是周密地、按照反映事物内在联系的逻辑关系,合理地利用人们已有的知识来尽可能多地获得关于解决问题的新的信息. 无疑,推广这样一种方法将便于我们寻找创新的体制、发现遗漏、填补空白,加速体制革新的进程.

附录中给出一个体制分析的例题. 这是利用体制分析方法根据我们对这些问题很有限的专业知识得到的,而不是对有关资料归纳的结果. 从事这些专业工作的同志如采用同样的分析方法则可以获得更完整而详尽的结果.

〔待续〕