

工程设计的 系统工程

程不时 编著



航空工业出版社

工程设计的系统工程

程不时 编著



航空工业出版社

1997

内 容 提 要

本书概括地论述了工程设计和系统工程的基本概念。介绍了有关工程设计的综合分析、设计选型、参数优化、简化试验、方案论证及定型决策等多种提高工程设计和生产工效的方法,对从事工程设计、科研、生产管理人员及大专院校有关专业师生有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

工程设计的系统工程/程不时编著. —北京:航空工业出版社,1996.12

ISBN 7-80134-104-X

I.工… II.程… III.工程—设计—系统工程 IV.TB21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24078 号

航空工业出版社出版发行

(北京市安外小关东里 14 号 100029)

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

1997 年 3 月第 1 版

1997 年 3 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/32

印张:7.25 字数:161 千字

印数:1—2000

定价:9.80 元

目 录

序 言	(1)
第一章 系统概念及应用	(6)
一、系统的概念	(6)
二、系统分析与系统综合	(11)
三、工程设计中对系统概念的应用	(13)
四、设计要求的论证	(16)
第二章 工程设计的概念	(19)
一、工程	(19)
二、设计	(20)
三、功能转换的概念	(22)
四、功能措施的多选择性和分析的不可逆性	(24)
五、设计的基本思路	(26)
第三章 概念的分辨与联系	(31)
一、批判性思维与创造性思维	(33)
二、抽象与概念	(33)
三、工程设计中的概念	(35)
四、科学与技术	(36)
五、理论与经验	(37)
六、知识与技能	(39)
七、定性与定量	(39)
八、需要与可能	(44)
九、过程和结果	(47)
第四章 工程设计中解决的问题	(49)

一、问题和意图·····	(49)
二、目标的制定·····	(50)
三、解决问题的“非唯一性”特点·····	(52)
四、找出问题关键的“诊断”·····	(55)
五、解决问题的阶段和步骤·····	(56)
第五章 设计决策 ·····	(62)
一、决策问题的三要素·····	(63)
二、确定型决策·····	(65)
三、不确定型决策·····	(66)
四、最大期望值原则·····	(70)
第六章 型式选择 ·····	(73)
一、型式选择是工程设计的重大步骤·····	(73)
二、型式选择的准则·····	(75)
三、型式选择中需要的知识·····	(78)
四、原理设计·····	(79)
五、原理设计中的创造性·····	(82)
六、型式的收集、分析和综合·····	(84)
七、型式选择的案例·····	(85)
八、新型式的开发·····	(89)
九、妨碍创造性的典型思维障碍·····	(90)
十、有助于排除思维障碍的几种方法·····	(92)
第七章 产品改进和改型设计 ·····	(96)
一、从民用飞机的适航看改型和新机·····	(97)
二、改型设计的目的·····	(97)
三、改型设计的优点和局限·····	(99)
四、改型设计中的更改项目·····	(101)
五、新产品设计中的系列化考虑·····	(103)

六、改进改型经验的启迪	(103)
第八章 试验	(105)
一、模型	(106)
二、相似律	(108)
三、开发性试验	(111)
四、试验的简化	(112)
五、试验设计	(115)
第九章 计算机辅助设计	(119)
一、从设计角度看计算机的吸引力	(119)
二、计算机的模拟功能	(124)
三、采用计算机对设计的影响	(127)
四、计算机辅助设计需要继续研究的问题	(130)
第十章 参数优化	(134)
一、参数设计的案例	(136)
二、优化问题的数学表达	(142)
三、设计变量的规格化处理	(144)
四、参数优化流程	(145)
五、分析模型	(147)
六、方案评价方法	(148)
七、优化方法	(154)
八、优化过程的起始与结束	(155)
九、参数敏感性分析	(156)
十、参数优化程序的功能	(158)
十一、加速收敛的方法	(159)
第十一章 优化方法	(167)
一、概述	(167)
二、一维探索方法	(171)

三、多维探索优化	(176)
四、多维问题的随机方法	(184)
五、使用优化方法的几个问题	(189)
第十二章 回归分析	(194)
一、单因素线性回归	(195)
二、单因素自动拟合	(204)
三、多元逐次回归	(206)
第十三章 人员与机构	(209)
一、工程总体设计人员的培养	(209)
二、几个有启发的学科	(212)
三、技能训练	(215)
四、科学态度与协作精神	(218)
五、协调	(219)
六、生产和设计的不同性质	(221)
七、机构设置的体制	(222)

序 言

本世纪 80 年代末,美国一家著名的航空宇航刊物曾对美国几家飞机公司进行调查,了解对美国一些大学培养出的学生素质的意见。得到的反映是:工业公司对大学毕业生的专业能力一般表示满意,但普遍认为缺乏“系统工程”的训练。这不仅指缺少在大型工程中抓纲挂帅的人,而是泛指具有开拓能力的人。各个专业领域需要扩大和深入,在市场竞争中开发新产品,更必须解决很多并非常规工程操作的问题。这些都需要掌握系统工程的思路和方法。

系统工程是将工程界的事物,当作一个“系统”来看待。考察系统所共有的特性,分析系统产生、发展、消亡的过程,研究建立新系统的方法。这种探究,并不是出自一种单纯学术性的理论兴趣。人类改造客观世界的规模越来越大,特别是本世纪的下半叶,从第二次世界大战中实现了喷气技术、核能技术、电子技术三大突破之后,人们开始建立从投入和收益来看都极大的工程。在这样大规模的活动中,人们开始感到仅仅使用传统的工程思维是不够的,而应该从宏观的角度加强全局性的总体思考。为此,在总结过去工程活动的基础上,提出了“系统工程”。

可能会有人提出怀疑:“系统工程”不研究具体的电力系统、通信系统、运输系统、排水系统等,而着眼于“一般的”系统,这种研究是否有实际意义。经过几十年的发展,回过头来观察这样做的效果,发现人对客观世界的改造能力,传统的学科知识只奠定了一层基础。它的贡献固然是随着不断进步而

逐渐上升的,但在第二次世界大战中出现的“运筹学”在这层基础上垒了一层覆盖层,使人改造客观世界的能力上升梯度得到明显的增加,而战后发展的“系统工程”,则再加上了一层冠盖,使人类能力如驼峰般凸起,获得了前所未有的增长梯度。

1945 年生物学家贝塔朗菲(Bertalanffy)出版了《一般系统论》一书,首次提出了在不同领域中的系统在结构上具有相似性或同构性,并且将系统的普遍性质总结为系统的整体性、关联性、动态性、有序性、预决性,从此开始了人们对系统的研究。经过半个世纪的发展,今天专门研究人类科学发展宏观现象的“科学学”,已经将“系统论”与“信息论”、“突变论”一起,并列为“三大横断学科”。人类社会的发展需要建立许多复杂的大系统。对这类复杂的大系统,单纯依靠狭隘的经验已经很难正确认识和处理。将系统论应用于工程技术,形成了“系统工程”。最早在 40 年代,美国贝尔电话公司用一套新的系统方法,筹建全国无线电微波电讯系统,并用“系统工程”命名了这套方法。迄今最引人注目的是美国“阿波罗”登月计划对系统工程的应用。该项计划从 1961 年开始历时 11 年,总耗资 300 亿美元,参加研制的企业有 2 万多家,大学与研究机构 120 所。参加研制的共 400 万人员,其中高级工程师技术人员有 42 万人。使用大型计算机 600 台。这项庞大的工程得以圆满成功,被认为是系统工程的范例。

工程设计,好比是人类对自然的一场战争,是人的认识能动性表现得最突出的活动之一。人类在战争中,不仅懂得了使用具体兵器的知识,还逐渐形成了战术和战略的学问,出现了许多研究兵法的兵书。“系统工程”是一种方法论,而且不只是“论方法”。就是说,它不仅仅是一些具体方法的总汇,而

带有工程哲学的性质。哲学的根本问题是人对客观世界正确认识和能动改造的问题。人类社会发展到 20 世纪 80 年代,工程的最大挑战是设计大型系统,及功能优异的设备。在这类设计中需要使用技巧和方法的综合、需要全局性的考虑,而不仅是考虑个别的局部。过去的传统设计课程强调分析工具的学习,这些内容对已经形成的系统的改进是有用的,但是对创立一个新系统就显得不够。

设计是新产品的根本,是一个创造性过程。近年来美国警觉到美国许多产品受到其他国家严重的挑战,促使美国三十多个工程学术团体组成的“科学技术评审委员会”越来越重视设计课程。这个委员会认为设计课程应该强调非预定结果的设计作业、多解问题(或多途径得到一个解的问题)、应讲授基本技术因素以外其他学科的基本知识,使学习者了解成本、美学、社会学上的要求,关于集体性工作的要求、以及其他扩展工科学生创造力的其他内容。

但是,这个委员会提出的设计应包括的知识内容中,还没有涉及一种关于设计的统一理论和方法学。直到 1984 年美国科学基金会在广泛征求美国学术界、企业界、政府领导人、以及国家工程院一个专门委员会的意见以后,对科学基金会的工程董事会进行了彻底改组,成立了一个“设计、制造、计算机科学部”。该部开展一个新课题,就是集中研究设计理论及方法学。

从许多大学系主任及研究中心主任收到的反馈意见中,得知当时的工程教育现状是:大学的设计课程很少涉及设计的创新,而将注意力集中在对已经形成的最终设计的数学优化方法、量化方法、决策论、结构优化等方面。压倒多数的意见认为设计的理论研究及传授具有根本性意义并应大为加

强。关于设计是一种“系统综合”的观点在机械行业(包括飞机、船舶、车辆设计)中得到强烈的反响。

从不同的行业都提出需要解决六个方面的问题:需要弄清设计程序、应特别注意早期的设计构想阶段、应该探讨设计中使用的各种模型、各种界面,应该研究经验和知识对设计的反馈,并且应该改进设计教学。

这样就形成了一门新学科——设计学。这门学科具有其他工程学科的某些共同的特征,但是也具有创造学的一些特性。

设计学是一个跨行业的学科。为此,美国航空宇航学会、美国化学工程师协会、美国机械工程学会、美国电气电子学会、美国仪表协会、系统控制学会等六个主要工程学会,已经在 80 年代末期成立了一个跨行业的设计学会。

“系统论”、“系统工程”、“设计学”至今都还是处在发展中的学科,内容在继续丰富和深入。在工程设计中的应用,至今主要涉及到三个大的方面,即概念、方法和组织。

系统工程的理论思路是从系统宏观的角度,剖析工程领域中经常出现的因素间的联系与矛盾。其中既包括对客观事物的正确辨明,如系统的一般特性、需要与可能、历史与未来,也包括对人自身认识能力的分析,如理论与经验、继承与创新、抽象与具体、预见与风险、分析与综合、演绎与归纳,等等。这些对立而有联系的概念的思辨,是经常使用的思维方式。

在系统工程的理论思路下,系统工程发展了一系列的方法,也吸取了其他途径所发展的方法,如运筹学、优化技术、回归分析、试验设计、系统模拟、人机联系(人素工程)、可靠性分析、决策论、定量评定技术、计划评审技术等,形成系统工程丰富的方法库。许多方法,在使用计算机后得到更大的发展和

运用。这些个别的方法,虽然单个都有它本身的作用,但在系统工程总的思路下,才发挥出更大的总体效能。

在人类的工程活动中,人是改造客观世界的主体。工程归根到底是人的创造能力的显现。因此工程队伍的组织、管理、制度、人的素质的训练、人的创造性的激励等对人的研究,成为第三部分主要内容。

作者本人从事工程设计 45 年,早期曾参与新中国首批飞机和航空发动机工厂的建厂设计,中期在工厂劳动期间也进行过一些机械设备的“技术革新”设计。从 1956 年新中国首次设计飞机开始,参与或主持了若干型号飞机的设计工作,及更多新飞机型号的论证,主要从事飞机总体设计工作 40 年。由于工作的需要,并出于对理论与技术史的兴趣,曾对“系统工程”及“设计学”等新学科的发展给予一定的关注,尝试在实际工程设计及论证中予以应用,先后在科技刊物上发表与此有关的文章数十篇,并就这些问题在理工科大学给教师及研究生举办讲座。本书是个人学习和应用的一些初步体会,不成熟或错误之处请读者给予指正。

1996.3.10.

第一章 系统概念及应用

一、系统的概念

系统是指存在于一定环境中的一组有联系的事物,具有独立的功能或特性,系统与环境有交换。一盘散沙算不上一个系统,因为它的内部缺乏联系;一筐螃蟹虽然互相的脚缠绕在一起,但是没有体现总体的功能,所以很难算作一个系统。系统的简图如图 1.1 所示。

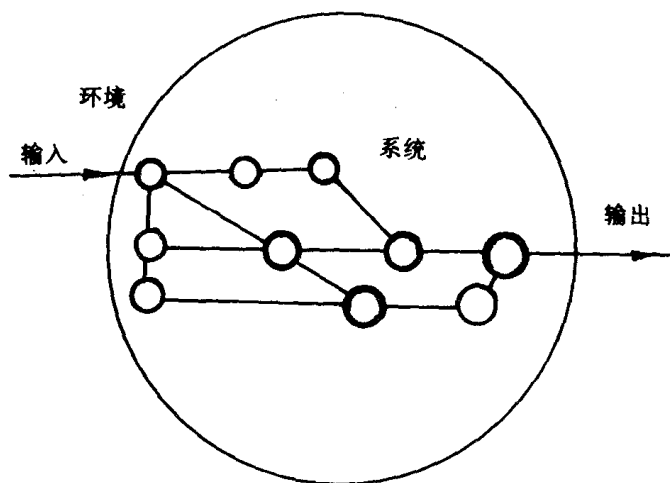


图 1.1 系统简图

系统概念引出以下几点认识:

1. 系统的“嵌套”性

任何系统都是一个更大系统的分系统。譬如地球本身是一个系统,但它属于太阳系,而太阳系又属银河系。一种民用飞机属于民用航空系统,而民用航空系统属于运输系统,运输系统又属于国民经济系统。若向下细分,飞机本身又有几个分系统,每个系统又有许多组成的器件,也都可以视为一个系统。

系统所处的更大的系统,就是系统的环境。

2. 系统间及系统内的联系

系统与环境的交换,一般有三种形态,即物质、能量和信息。例如一台发动机的输出是功率(能量),而它向环境要求的输入是燃料(物质)和控制(信息)。一台航空喷气发动机内部的涡轮与压气机之间,则有功率及气流的传递,即有物质和能量的交换。

“信息”就是通常所说的信号、指令、代码、消息等。它可以用来表达一种结构、状态、特征,传递一种命令。信息能提供情况、帮助了解、供给知识和指导行动。

信息总是与物质或能量的传递联系在一起的。例如邮政局传递信息的载体是“信”这个物质,而电信局则由传送电脉冲能量来传递信息,烽火台用光波传递信息,汽笛用声波传递信息,等等。

信息虽然是以物质和能量作为载体,但又不是物质或能量的本身,而是一种可以作用于人类、为人类所感知的信号。

人接收到信息,还需要将其检测出来,以供作出某种判断或用于控制才能发挥信息的作用,体现信息的价值,也才有意

义。人通过自身的感觉,包括视觉、听觉、嗅觉、味觉、触觉等来感受外界各式各样的刺激,并加以接受和加工。要获得一定的认识,一个重要的环节就是对信息的解码和编码。例如,一个不懂外语的人,虽然他可以接受外国语言和文字的声音或图形的刺激,但是既不能解码也不能编码,也就无法了解所传递的意义。同样,在阅读比较艰深的书籍时,我们可能认识每个单字,但并不一定懂得其中内容的含义,也就是不能接受这些著作传递的信息。

一个系统与另一个系统之间,只要有物质和能量的交换,就总有信息交换。在规划、设计或管理中,对系统与外界以及系统内部间的联系,可以主要作为信息流动来对待。这样,虽然实际是物质流或能量流,但不失原意。

3. “输入-输出”和“黑匣子”概念

环境向系统提供的是系统的“输入”,系统向环境提供的是系统的“输出”。“系统工程”强调系统的输入和输出概念,有时忽略系统内部的具体细节,而对系统的总体功能作出评价或规划。这就是科学技术上广泛使用的“黑匣子方法”。

从认识的角度,对一未知系统,想要掌握它的功能,有两种不同的方法。

一种是了解它内部各部分的关系、工作机理等,从而了解它如何从输入转化成输出的过程,这就是解剖、分析的方法。另一种是对内部结构和机理尚不清楚的系统,可以使用黑匣子方法来研究。“黑匣子”是从电器或无线电黑盒子演变而来的概念,指不去细究内部过程。黑匣子办法是把系统当作一个不能打开的密封机匣,人们通过它的外部表现来对它进行研究。

譬如一个装在机匣里的复杂机构,机构的输入端是一个手柄,输出端是一个刀架,输入端摇动手柄,刀架就会向某个方向移动。当人们对这个机构的性能缺乏了解时,如何才能知道刀架的移动方向呢?

一种方法是把机匣拆开,观察它的内部构造,看看它内部的齿轮、齿条、涡轮、涡轮是如何配合的;另一种方法是不打开机匣,而是通过一系列的试验。如将手柄向左摇一摇,向右摇一摇,观察它在输出端刀架的移动方向,从它的外部表现中也能找出它的输入端和输出端之间的关系,从中学会如何掌握使用它。在日常生活中,人们经常会用到黑匣子方法。如会开汽车的人并不一定都清楚汽车的详细构造,学弹钢琴的人也不都是必须弄清钢琴内部复杂结构再学习弹奏,他们可以通过一系列的练习学会开汽车、弹钢琴。内科医生在看病诊断时,经常使用的也是黑匣子方法。

简单地说,黑匣子方法就是不管黑匣子内部的机理,仅从外部的输入、输出关系来掌握这个方法。

当人们对一件事情不可能、不允许或不值得深入了解它的内部细节时,都可以把它看成一个黑匣子。《控制论导论》一书中说:“所有的事物,事实上都是黑匣子。我们从小到大,一辈子都在和黑匣子打交道。”1945年,控制论的创始人维那写道:“所有的科学问题都是从黑匣子问题开始的”。

美国通用电器公司提出一种设计的思路,它将所设计的装置设想为一个“黑匣子”,通过它的“输入”和“输出”的分析,寻找能将“输入”转换成“输出”的内部功能结构。据认为这样的方法可以避免设计者从开始就陷入对产品“物化”细节的考虑,而忽略各种可以实现的功能转换的途径。

4. 反馈

反馈原理是对人脑活动的一种模拟。人不仅能控制自己,还能控制环境,因为人本身是一种自我调节系统。自动控制是远比程序控制更高级的一种控制系统。

1679年,顿勒斯·帕潘发明一种蒸汽锅(即现在人们所知的高压锅)。他在盖子上放了一个重物,重量适中,当锅内蒸汽压力升高到一定程度时,锅盖就会被掀开,以免汽锅爆炸。这体现了反馈系统的一般原理,即使用系统输出端的信息来控制输入端。

蒸汽机是近代技术发展中一个具有世界性意义的重要发明。初期的蒸汽机结构很简单,需要一个操作者牵动一根绳索,使蒸汽充入气缸。等活塞移动到顶端后,操作者再牵动一根绳索,停止充汽。气缸内的蒸汽冷却凝结,活塞再次下落,如此循环,它的工作需要人工不断干预。

以后人们发现打开或关闭汽阀所需的力是很小的,蒸汽机既然已能转动机器,完全可以提供牵动绳索的力。至于操纵阀门的时机,只需要活塞到达两个顶端时撞击某个机件就可以完成。经过这样的改进以后,蒸汽机成为一种可以自行运转的动力装置,工作效率大为提高。

在反馈控制中,人们仅仅使用实际情况与预先设定的标准状态之间的误差来作为控制信号。人们只需考虑结果,去寻找产生误差的原因,所以十分简单有效。例如,自动调节室温,如果不采用反馈控制,就必须考虑室外温度、风速风向、门窗开启情况、日照条件、室内供热情况等因素,并分别一一检测出它们的数据,然后才能确定温度调节的控制量。但是,在反馈控制中,人们可以不管这些具体因素,只从调温系