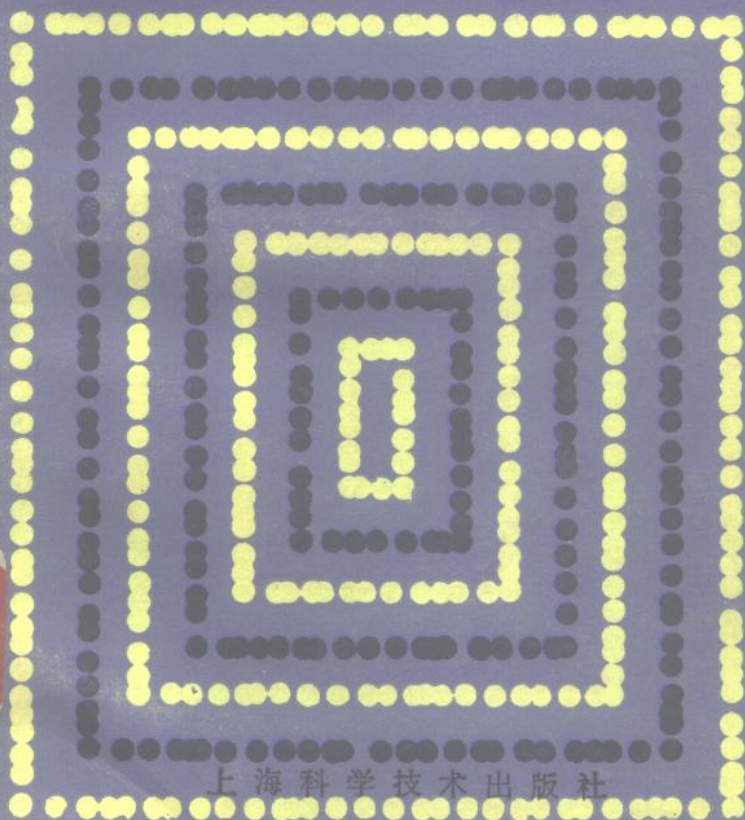


系统工程基础

—概念、目的和方法—

方永绥 徐永超编



上海科学技术出版社

13.825
115
B22

系统工程基础

——概念、目的和方法——

方永绥 徐永超 编



上海科学技术出版社

1110278

系统工程基础

——概念、目的和方法——

方永綏 徐永超 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏扬中印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张11.125 字数242,000

1980年9月第1版 1982年4月第2次印刷

印数10,500—20,800

统一书号: 13119·849 定价: (科三) 0.89元

序

站在永恒的宇宙之中，看一看我们这个星球的过去、现在和将来，也许是很有意思的。若干亿万年前太阳系中的一团火球，随着时间的飞逝，渐而烟消云散，有了形状，有了外壳。又随着时间的推移，外壳上有了水分，有了空气和土壤。而后，在至今还尚未完全知晓的神奇力量的支配下，孕育着生命的细胞，滋生起草木森林、飞鸟走兽，整个星球表面郁郁葱葱，洋溢着生命的活力。

不知从何年到何年，被称为“人”的这样一种生命物在地球上繁殖起来了。这个奇妙的进化过程的产物，有一个重量还不到两千克的大脑和十个灵活的手指。他们用人类独有的语言彼此间叽哩咕噜地交换着信息。这是在生命与环境的搏斗中，被自然力量所创造出来的高等生物。他们俨然变成了主宰这个星球的真正的上帝。于是，展现了新的奇迹。星球上的种种物质和其他生物被重新安排和组合，以符合这位上帝的需要。地表上先有了田野、房屋，又出现了工厂，大楼，再就是火车、坦克、飞机、大炮……。现今是高速公路横空出世、摩天大楼高耸入云，人工世界正取代着自然世界，一切大为改观。

最令人惊异不过的，仍是这一切只是在宇宙时刻表中，被称为人类文明历史的、短暂片刻间（几千年，尤其是近一、二百年间）突然发生的。燧人氏的第一支火炬俄顷之间点燃了文明的烈焰。而在这一突变中起着关键作用的，却是那在宇宙

万物中十分微不足道的，脆弱又娇嫩的大脑。通过它的功能，周围的一切有了秩序，有了含义，无意识的行为变成了有意义的劳动，而劳动的结果，不仅创造了新的世界，也改进着这最精致奥妙的大脑物质和它的运动。

冬去暑来，老死新生，在与环境的奋斗中，人类前仆后继。在为文明而献身的英雄行列中，我们看到亚里士多德、阿基米德，看到毕昇、祖冲之，看到伽利略、牛顿、瓦特、达尔文……。最近的那一位乃是一头银丝、用小提琴奏着莫扎特乐曲的可尊敬的爱因斯坦。他们将亿万同类在沧海桑田的变迁中得来的智慧，加工成曲里拐弯的公式和符号，从而解释太阳的升起与落下，解释周围的世界和宇宙。于是，地球上的一切似乎变得更和谐了，更有秩序了，更可预料了。

骤然，一支巨大的火箭在这个星球上的某处腾空而起，愈飞愈高，离开地球，奔向宇宙，盘旋于众星之间。这一切真正使得造化之神感到震惊而恐惧，却又是无可奈何。再过一万年又是如何呢？下一个目标将是何处？一切还将拭目以待……。

从解释物质世界的种种现象到重新安排物质世界；从认识客观规律到利用这些规律来构造人们所需的目的地，在这种世代延续着的规模愈来愈大的努力中，产生了一种既新而又古老的经验。这就是现今被人奉为“科学的科学”、“技术的技术”、“工程的工程”的系统工程。更透澈一点的说法，可以叫它做“办事的科学”或“事理科学”。自有人类以来，人们天天就在办事、在奋斗。开始是伐木、烧炭、种地、放牧、织布、裁缝，……，后来是造飞机、放卫星、登月球。经过失败、成功、无数周折，终于闯出了一条路子，理出了个头绪，总结了一套方法，给它起个科学名词叫“系统工程”。尽管在目前，它

还不是那么完整、那么成熟；还没有形成象“物理科学”那样严格的逻辑体系。但是它已经被证明是极有力的，极有用的，它可能帮助你更出色地完成你的工作，不论你是工人还是经理，是售货员还是军队干部，是工程师还是教师，是医生还是科学家，是交通民警还是生产队长，是管理人员还是领导干部，……。它甚至可以影响几十亿、几百亿元价值的得失，如果人们懂得了很好地驾驭它的话。

关于系统工程的重要意义，钱学森同志作过深刻阐述：“……系统工程可以解决的问题涉及到改造自然、改造提高社会生产力、改造提高国防力量、改造各种社会活动，直到改造我们国家的行政、法治等等；一句话，系统工程涉及到整个社会。所以我们面临由于系统工程而引起的社会变革决不亚于大约一百二十多年前的那一次：那是因为自然科学的发展壮大，从而创立了科学的工程技术，即把千百年来人类改造自然的手艺上升到有理论的科学，由此爆发了一场大变革。系统工程是一项伟大的创新，整个社会面貌将会有一个大改变。

当然，我们现在仅仅在这一过程的开端，象我们以前已经提到的那样，我们现在能够看到的只是很小的一部分，……”是的，我们目前看到的只是这一巨大变革的开端。但仅仅从这一开端，我们却可预见到，系统科学和系统工程是人类认识和改造客观世界漫长过程中的又一质的飞跃。

自然，了解系统工程绝不象看电影那样轻松，也不象吃维他命丸那样便利，需要一点耐心和决心，需要在夜深人静之际费点精神去想一想。

本书是编著者作为探讨“系统工程”的初步归纳和体会，或者说是作为入门基础性的读书笔记而奉献给有兴趣于此领域的广大读者的。出于对四个现代化伟大事业的关切，有很

多同志想了解“系统工程”的内容，而国内又十分缺乏这方面的资料。限于编著者的水平，书中会有不少欠缺不周之处，好在这是抛砖引玉，尚有待各方面的专门家与非专门家指正。

——想学习系统工程的同志，可以用本书作教学参考书，在没有教材的情况下，也可以暂充教材。有工科大学程度的读者，可用于自学。

——有高中以上文化程度的读者，只要有足够的耐心，对于了解书中的大部分内容也没有太大的困难。

——作者很想表达得更通俗些，但难以如愿。原因之一是许多内容，不用基本的数学难以说清。另外，许多电气方面的专业名词也难以避免。

——假若你因为费解而跳过一些不明白的内容，但弄懂了什么是系统，你天天接触的与处理的是一个什么样的系统，弄懂了什么叫系统思考，怎样根据系统思考的精神去处理问题，那么你就已获得了最重要的信息。

编著者对中国科学院电子学研究所及四机部电子技术推广应用研究所的领导对我们写作本书的支持深为感谢。对前任电子学研究所所长顾德欢同志、电子学研究所研究员沈光铭先生，以及陈远星等同志的支持和关切表示感谢。尤其对上海科技出版社的责任编辑同志的促进和在出版中所作的辛勤努力表示感谢。

编 者

1979. 3. 25. 北京

目 录

序

第一章 概述1

1.1 系统工程——一门与现代化密切相关的基础学科.....1

1.1.1 一门活跃的新学科(1) 1.1.2 什么是系统工程?(1) 1.1.3 一个历史小故事的启示(2) 1.1.4 小事情中的大道理(3) 1.1.5 可靠和节省(5) 1.1.6 不可缺少的工具(6) 1.1.7 与四化关系密切(7)

1.2 系统工程是怎样发展起来的?9

1.2.1 简单的回顾(9) 1.2.2 认识论上的背景(12) 1.2.3 系统工程树(13) 1.2.4 小结(13)

第二章 系统与系统工程的基本概念.....15

2.1 关于系统15

2.1.1 系统的定义(15) 2.1.2 构成系统的条件(18) 2.1.3 系统的特征(20) 2.1.4 系统的分类(23) 2.1.5 系统的三要素——材料、能量、信息(23) 2.1.6 系统功能的构造(27) 2.1.7 系统的行为(28)

2.2 关于系统工程30

2.2.1 工程学的本质(30) 2.2.2 系统工程的定义(32) 2.2.3 系统工程中引入的新方法(33) 2.2.4 系统工程师——当代科学技术中的战略家(38)

2.3 系统中的“人-机”关系——“人-机”系统40

2.3.1 人-机的功能分配(41) 2.3.2 人-机接口(41)

第三章 系统理论中的数学准备.....43

3.1 状态变量和行为变量43

3.2	向量和向量空间	44
3.3	行列式	47
3.4	矩阵	50
3.5	线性变换	53
3.6	微商和积分	54
3.7	随机事件与概率	56
3.7.1	复杂事件的概率(58)	
3.7.2	随机变数(60)	
3.7.3	数学期望(61)	
3.8	集合论	61
3.8.1	集合(61)	
3.8.2	集合的并与交(64)	
3.8.3	集合的差与对称差(66)	
3.8.4	文氏图(68)	
3.8.5	谓词(69)	
3.9	模糊集	72
第四章	系统模型和模拟	75
4.1	前言	75
4.2	系统模型	76
4.2.1	模型的定义、系统分析与辨识(77)	
4.2.2	模型的分类(80)	
4.2.3	由物理规律导出的模型(83)	
4.2.4	自动机模型(88)	
4.2.5	概率模型(90)	
4.3	系统模拟	92
4.3.1	实验法与模拟法的比较(94)	
4.3.2	模拟程序(95)	
4.3.3	举例(96)	
4.4	模拟技术在大规模系统方面的应用	103
第五章	系统问题的运筹与最佳化	107
5.1	问题的类型和解析方法	107
5.1.1	问题的类型(107)	
5.1.2	常用的几种解析方法(116)	
5.2	线性规划法(LP)	118
5.2.1	什么是线性规划?(118)	
5.2.2	线性规划的实	

例(120) 5.2.3 用作图方法求解(122) 5.2.4 单纯形法的原理(123) 5.2.5 留给读者的习题(125) 5.2.6 线性规划问题的对偶性(126) 5.2.7 利用计算机处理LP问题(130)	
5.3 对策论	130
5.3.1 你胜即我负——二人零和对策(131) 5.3.2 怎样考虑最优策略(132) 5.3.3 混合策略(134) 5.3.4 由混合策略求最优策略(136)	
5.4 动态规划 DP	138
5.4.1 从一个例题开始(138) 5.4.2 动态规划的顺序(140) 5.4.3 最佳性原理(141) 5.4.4 计算次数的比较(142) 5.4.5 投资问题的规划(142) 5.4.6 装货问题的规划(144) 5.4.7 应用范围(146) 5.4.8 习题(146)	
5.5 网络和流通理论(图论)	147
5.5.1 介绍一些拓扑术语(151) 5.5.2 关联矩阵(154) 5.5.3 图上所表示(定义)的量(156) 5.5.4 图上处理的问题(157) 5.5.5 用线性规划求解(158) 5.5.6 利用算法求解图上问题(159)	
5.6 搜索论	170
5.6.1 概述(171) 5.6.2 搜索的运动学(172) 5.6.3 探测理论(174) 5.6.4 搜索力量的最佳分配(176)	
5.7 替换理论	177
5.7.1 经济寿命(178) 5.7.2 替换策略(180)	
5.8 预测方法	182
5.8.1 经济预测方法(183) 5.8.2 技术预测(186)	
5.9 决策论	190
5.9.1 基本的决策问题(190) 5.9.2 统计决策论(192) 5.9.3 风险函数(192) 5.9.4 作为决策综合体的经营组织(195)	

第六章 系统的设计、评价与可靠性	196
6.1 系统设计的阶段划分.....	196
6.2 设计程序.....	198
6.3 系统设计中计算机的利用.....	202
6.4 系统功能的构筑.....	203
6.5 系统评价.....	206
6.5.1 系统的有效度(206) 6.5.2 个别评价(208)	
6.5.3 评价方法(208) 6.5.4 系统评价中计算机的利用(230)	
6.6 系统可靠性.....	233
6.6.1 概述(233) 6.6.2 系统可靠性的含义(234)	
6.6.3 故障及其分布(237) 6.6.4 维护性和可用性(239)	
6.6.5 各种寿命分布(239) 6.6.6 系统的可靠性的数学表示(241)	
6.6.7 可靠性设计(245) 6.6.8 质量管理(247)	
第七章 系统管理技术	252
7.1 系统研制阶段的管理.....	252
7.2 计划管理.....	256
7.2.1 计划管理的必要性(256) 7.2.2 计划与分计划(257)	
7.2.3 计划管理体系(257) 7.2.4 计划管理中的一些注意事项(259)	
7.2.5 计划的形式(260) 7.2.6 任务分解构造和组织(261)	
7.2.7 WBS和网络(266) 7.2.8 日程管理(267) 7.2.9 费用管理和预算管理(268)	
7.2.10 情报资料管理(270)	
7.3 计划评审技术(PERT)	272
7.3.1 概述(272) 7.3.2 PERT/人力管理(303)	
7.3.3 关键路径法(CPM) (306) 7.3.4 PERT/费用(308)	
7.3.5 PERT和计算机(310) 7.3.6 习题(310)	

7.4 网络评审技术(GERT)	312
7.4.1 随机网络的特点(312)	
7.4.2 用 GERT 方法解决问题的步骤(313)	
7.4.3 随机网络的元素(313)	
7.4.4 问题的形式表述及数据收集(实现 GERT 的步骤 1 及 2)(315)	
7.4.5 随机网络分析(实现 GERT 的步骤 3 及 4)(317)	
7.4.6 网络评审(实现 GERT 的步骤 5)(325)	
7.4.7 GERT 的应用简例(326)	
[附录] 系统开发的新动向	333

第一章 概 述

1.1 系统工程——一门与现代化 密切相关的基础学科

1.1.1 一门活跃的新学科

近十年来,在国际上系统工程已成为一门非常热门的学科。在自动化、宇航、控制论、生物、环境保护等多种国际会议上,它是讨论得最多的课题之一。国际性的系统工程会议多次召开。有关的论文、专著和杂志陆续出版发行。许多大学、研究所纷纷设置相应的专业。许多原来从事电气、电路、自动控制的科学家和工程师转行从事系统工程的研究。国外许多现代化的大工程、大企业往往喜欢说,自己的成就是系统工程师的杰作。美国北极星导弹的研制,原定计划六年完成,结果提前二年就完成了。组织研制的单位把提前完成的原因,首先归之于采用了系统工程的结果。更有许多人评论说:“阿波罗-11号登月成功是美国系统工程的胜利”。被作为系统工程的成果而加以宣传的,还有巴西河流规划、墨西哥的绿色革命、印度的城市规划等等。

1.1.2 什么是系统工程?

系统工程究竟是研究什么的?为什么这样受人们的重视呢?系统工程(System Engineering)就是用近代的数学方法和工具来研究和讨论一般系统的分析、规划、设计、组织、管理、评价等问题的一门基础学科。什么是系统呢?一只手表、一

台收音机、一架电视机都是一个系统；一个人、一个足球队、一个商店、一个医院、一个港口、一个发电厂也都是一个系统；一个国家的工业、农业也都是一个系统，甚至一个国家或整个世界都可以认为是一个大系统。由于系统的概念适用的对象如此广泛，我们就不难理解系统工程的重要意义和高度实用价值了。

1.1.3 一个历史小故事的启示

德国大数学家高斯在小学的时候，数学老师在课堂上给学生出了出一道算术题，求 $1+2+3+4+\cdots+100=?$ 绝大部分学生都是逐个相加求和。这种算法，不但费的时间多，而且很容易出错。因此，没有几个学生能得到正确的答案。而幼小的高斯，竟然在老师刚抄完题不久，就举手站起来说出正确的答案，这使老师和同学们都大为惊讶。原来，他见到题后，没有立即动手逐个相加，而是冷静地分析了这一百个加数的特点，发现可以把一百个加数分成 50 对，每对加数之和都是 101，如 $2+99=101$ ， $3+98=101$ ，等等。因此立即算出答案 $50 \times 101=5050$ 。高斯高明之处，首先在于在他的头脑中有这样的意识：

1. 意识到求解这道题的方法不是唯一的，就是说，除了一般习惯的按次序逐个相加之外，还可以有别的方法。

2. 意识到这些不同的解法中可能有一种或几种是十分简捷的。

3. 意识到应该找出一种最省时间、最不易算错的方法来进行计算。

正是在这样的意识的指引下，高斯找出了简捷的算法。

把上面故事的意义引伸一下，可以说，存在着这样一个普遍公认的命题或公理：“做任意一件事，解决任意一个问题，达

到任意一个目的,完成任意一个任务,一般总有不只一种互不相同的方法、途径、办法。而这些方法、途径、办法中又总会有一种或几种是最好的或较好的。”这样一个找寻最佳途径的观点和思想,可以说正是系统工程的最基本的精神。而上述问题可以叫做最佳化问题。

1.1.4 小事情中的大道理

下班回家做饭,总希望早一点吃上饭。把吃上饭看成目标的话,为实现这个目标有四件事要做:①淘米,②洗菜、切菜,③烧饭,④炒菜。假如只有一个人动手,那么对于这四件事怎么来安排先后次序才能最快地吃上饭呢?我们来分析一下。首先,这些事情在时间上有顺序性,淘米应放在烧饭之前,洗菜应放在炒菜之前,也就是:①→③;②→④。

那么应该先淘米还是先洗菜呢?假定淘米要费去两分钟,洗菜切菜要费去7分钟,烧饭要20分钟,炒菜要12分钟。自然,我们从经验之中早就知道,应该先用2分钟淘米,接着就下锅开始烧饭。锅里下了米你就可以开始洗菜切菜,7分钟后,即第9分钟就开始炒菜,同时照顾饭锅。12分钟之后,到21分钟,菜已炒好,同时饭也烧了19分钟。再过1分钟,饭菜齐全,就可以吃饭了,全程历时22分钟。其程序如图1.1所示。

如果换一下次序,先洗菜切菜,再淘米,而后炒菜、烧饭,那又怎么样呢?即按如图1.2所示程序。那么,不难算出,我们要在29分钟以后才能吃饭。仅仅着手把次序换一下,就要多费30%的时间!

这样一个十分平凡的例子中包含的道理,经过科学抽象、概括、数量化、严密化的加工,就能在非常复杂的大规模工程的组织管理中发挥巨大的作用。使北极星导弹研制提前二年完成的著名的PERT方法,就是按类似的精神得来的,被誉

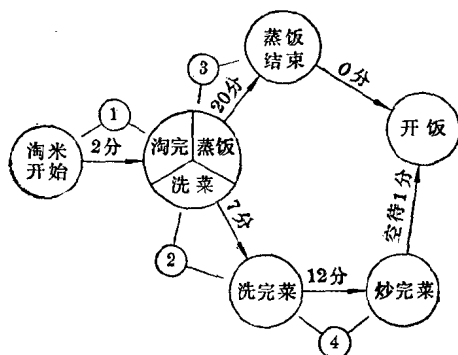


图 1.1

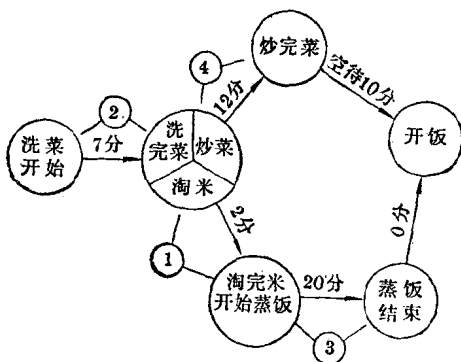


图 1.2

为管理的“万灵丹”。这样一类工序规划问题是系统工程的重要内容之一。人类在简单的、小型的改造世界的活动中，只要凭经验就能找出实现目标的较好途径，而且往往只要达到目的就行，不必去关心其他问题。但随着改造世界的活动的规模愈来愈大，目标愈来愈高级，为实现目标所历经的步骤愈来愈繁复，涉及的人力、物力、工具、器材也愈来愈多，就使组织协调工作变得十分复杂。例如四十年代，美国研制原子弹的

曼哈顿计划,参加者有一万五千多人;六十年代,美国阿波罗载人登月计划,参加研制的机构有120多个,承包企业2万多个,涉及40万人,研制的零件有七百万件。在这类巨大规模的、为一个目标而进行的复杂社会劳动中,每一部分之间的配合和协调变成决定整个工程的成败的关键。如果没有一套科学的组织管理的方法,则必然大量窝工、返工,人力物力积压浪费,各部分互不衔接,缺东少西,丢三拉四,甚至互相阻塞,整个工作系统开不动。而美国宇航局(NASA)用系统工程的分级综合计划管理,先分解后协调,作到有条不紊,秩序井然。

系统工程要求用科学的方法来回答下列问题:

1. 怎样把一个大的总目标,分解成一些小的目的?
2. 如何根据系统的总指标来确定各个分系统的指标?
3. 如何来协调系统中各元素的关系,从而保证总体的性能水平?
4. 如何根据总的进展要求来合理安排各环节的轻重缓急,确定最优工序,确定各项工序的进展要求?

1.1.5 可靠和节省

除了最佳化和系统思考外,系统工程中还强调可靠性问题和效果费用分析。

可靠性与稳定性是决定一个系统能否运用的关键指标。大一点的系统如果分解成最基本的元件的话,可能有几千、几万,甚至几十万个元件。某些元件性能发生变化或出了毛病,系统的性能就可能降低,甚至完全失灵。这就是提出了系统的可靠性与稳定性的问题。以串联关系相连接的元件,总的可靠性是各元件的可靠性的乘积,例如十个可靠性为99%的元件串联起来,它总的可靠性就是 $(0.99\%)^{10} \approx 0.904$, 100个可靠性为99%的元件串联起来,它的总的可靠性就降为