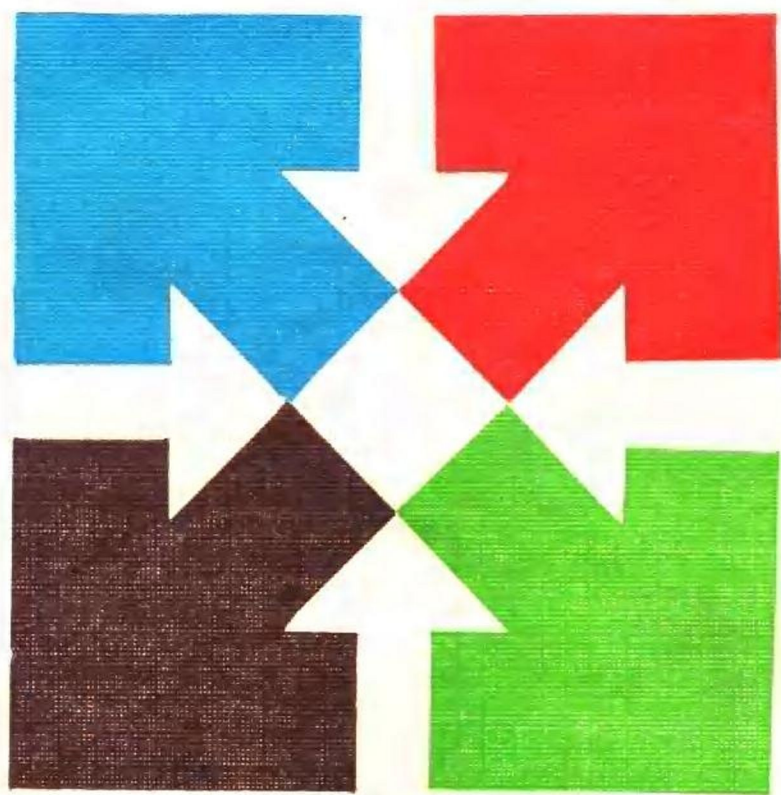


系统工程与数学方法

苏 松 基 编著



机械工业出版社

系统工程与数学方法

苏 松 基 编著



机 械 工 业 出 版 社

本书全面地阐述了系统工程的研究领域，主要内容包括系统分析、系统设计和系统的实施程序；模型的建立和模拟，可靠性评价；同时也详尽地介绍了系统工程采用的数学方法和技术方法。本书具有较强的工程实用性，是一本综合性的理论与实践并重的工具书。书中以一定的篇幅介绍了众多的工程实例，对读者掌握和应用系统工程很有助益。

本书可供从事系统工作的工程技术人员参考，也可以作为大专院校自控、管理及系统工程专业的教学参考书。

系统工程与数学方法

苏松基 编著

★

责任编辑：邓子静

封面设计：田淑文

★

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

★

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $13^{3/8}$ · 字数 352 千字

1988 年 7 月北京第一版·1988 年 7 月北京第一次印刷

印数 -0,001—5,500 · 定价：4.40 元

★

ISBN 7-111-00574-0/TP·37

序

目前社会经济的发展对系统提出了新的要求。“七五”期间，我国的科技和社会主义建设将有更大的发展，系统工作者的任务十分艰巨。如何运用新的理论知识指导工作，进行系统设计、系统分析、系统评价、系统实施，以寻求最优方案，是系统工作者要致力解决的一个问题。为此，我谨向读者推荐“系统工程与数学方法”一书供工作中参考。

本书结构上分为五章：

第一章阐述了系统工程的产生和发展过程，介绍了系统工程的工具与技术内容，并以一例作总结；

第二章阐述了系统工程的设计方法和步骤，内容包括决策、分解、协调和优化等；

第三章介绍了系统工程的数学方法，重点是概率与数理统计；

第四章介绍了运筹学与最优化技术，内容包括数学规划、对策论、排队论、最优化控制及动态规划等；

第五章是系统工程的技术方法，包括网络分析、模型建立、模拟方法和可靠性评价。

此书内容丰富，全面系统，概念清晰明确，文笔深入浅出，通俗易懂，适于中高级技术人员参阅。作者在选材上注意了实用性，较为全面地收集了系统工程的技术方法和数学方法，并通过简单实例展开，对实际工作者颇有指导意义，是系统工作者必需的工具书。

重庆工业自动化仪表研究所所长 江建中

1986.5.1

3F52/08

前 言

系统工程是一门新发展起来的学科,是科学组织管理的科学,常被称为科学的科学。它的主要任务是:用科学的组织方法,采用先进的技术手段——电子计算机(电脑)并考虑人-机因素,计划、设计和管理复杂的大规模系统。也就是从系统的整体要求出发(包括系统的适应性和最优化),为了最合理、最经济、最有效地达到预期目标,并实现整体的最优设计、控制和管理所采用的决策、计划、方案和程序,最后组成合理的控制(管理)系统。很明显,采用不同的方法,所得到系统的结论和效果是截然不同的。因此,如何用系统工程的方法来指导系统工作,是一个很值得重视和研究的问题。

为此,本书力求从工程实用性出发,综合地介绍了系统设计的各个步骤,系统工程所用的数学方法和技术决策,使读者对系统工程有一个完整的概念和掌握实施的工具,并结合工程实例对系统进行分析,为从事系统设计或实施打下良好基础。

本书初稿完成后,承蒙大连工学院王众托教授,天津大学刘豹教授,机械工业部仪器仪表局总工程师王良楣,机械工业部机械工业自动化研究所总工程师严筱钧,机械工业部重庆工业自动化仪表研究所江建中所长等均作了全面的审阅并提出了很多宝贵意见和建议。机械工业部重庆工业自动化仪表研究所陈春雷工程师参与了部分书稿的整理工作。在此,谨向上述诸同志表示衷心的感谢。

由于本人水平所限,书中存在的缺点或错误,欢迎读者批评指正。

苏松基

一九八五年十二月于深圳

目 录

序

前言

第一章 总论	1
1-1 系统工程的产生和发展	1
1. 社会实践活动的大型化和复杂化	2
2. 大范围内情报流的形成	2
3. 最优化技术的出现	3
4. 现代化设备、仪器仪表的大量出现	3
1-2 系统	3
1. 系统的数学表示	4
2. 系统的结构	5
3. 人-机系统	7
4. 系统的评价	8
1-3 系统工程学	10
1. 系统工程的定义	11
2. 系统工程学的应用范围	12
3. 系统工程学的工具与技术内容	14
1-4 引例	15
1. 问题的提出	15
2. 系统工程的实践	17
3. 结论	20
第二章 系统工程设计的方法和步骤	22
2-1 系统分析	22
1. 系统分析的准则	24
2. 系统分析的指标	24
3. 系统分析的工具	25
4. 系统分析的步骤	28
5. 系统分析的方法	31
6. 决策方法	36

2-2 系统设计	40
1. 系统设计过程	41
2. 系统设计的方法	44
3. 系统的分解方法	56
4. 系统的协调问题	60
5. 系统的优化	63
6. 系统的稳定性问题	68
7. 其他问题	70
第三章 系统工程的数学方法	74
3-1 概率论	74
1. 概率概型	74
2. 概率的公理化体系和主要性质	76
3. 条件概率与全概率公式	77
4. 随机变量及其分布	78
5. 随机变量函数及其分布	88
6. 随机变量的数字特征	92
7. 极限定理	98
8. 马尔可夫过程	102
9. 平稳过程	104
3-2 数理统计学	104
1. 参数估计	105
2. 求估计量的方法	106
3. 估计量的好坏标准	115
4. 假设检验	117
5. 区间估计	122
6. 方差分析	126
7. 回归分析	129
第四章 运筹学与最优化技术	133
4-1 线性规划	133
1. 几种情况	135
2. 图解法	138
3. 单纯形方法	139

VI

4. 对偶规划	148
5. 灵敏度分析	152
6. 实例	156
7. 程序	160
4-2 非线性规划	167
1. 无约束极值问题的解法	168
2. 一维搜索	171
3. 多变量函数求极值的解析法	177
4. 求多变量极值的直接搜索法	180
5. 非线性规划的计算方法	183
6. 用线性规划来逐步逼近非线性规划	186
7. 将非线性规划转换成无约束极值问题求解	188
4-3 整数规划	191
1. 分枝与定界法	193
2. 割平面法	198
4-4 对策论	200
1. 最优策略	200
2. 混合策略与混合扩充	201
3. 矩阵对策与线性规划的关系	202
4. 二人无限零和对策	204
4-5 排队论	208
1. 随机服务系统的组成	208
2. 输入过程的形式	209
3. 排队规则	210
4. 服务机构	211
5. 随机服务系统的分类及记号	212
6. 随机服务系统几个主要性能指标	213
7. 实例	213
4-6 最优化技术	221
1. 最优控制	222
2. 变分法	226
3. 最大(小)值原理	234
4. 动态规划	244

5. 可控性·····	262
6. 可观测性·····	272
7. 最优控制系统的设计·····	289
第五章 系统工程的技术方法 ·····	295
5-1 网络分析·····	295
1. 最短路径问题·····	295
2. 最大流问题·····	300
3. 最小费用最大流问题·····	306
4. 计划评审技术 (PERT) 和关键路径法 (CPM) ·····	308
5. GERT 网络及其特性 ·····	323
6. PERT 的计算机网络分析 ·····	326
5-2 模拟·····	333
1. 系统模拟·····	333
2. 随机数的产生·····	339
3. 随机数的检验·····	345
4. 一个存货系统的模拟·····	345
5. 计算机模拟·····	350
5-3 数学模型·····	351
1. 模型的结构·····	352
2. 模型的建造·····	357
3. 模型的化简·····	368
5-4 可靠性评价·····	371
1. 可靠度·····	372
2. 维修与马尔可夫过程·····	382
3. 有效度·····	386
4. 有维修系统的可靠度·····	389
5. 可靠性与费用·····	394
附录 ·····	403
附录 I 泊松分布的数值表 ·····	403
附录 II 正态分布密度函数的数值表 ·····	405
附录 III χ^2 -分布的数值表 ·····	406
附录 IV t -分布的数值表·····	407

VI

附录 V	F -分布信度 5 % 的 $F = s_1^2/s_2^2$ 的置信限	408
附录 VI	F -分布信度 1 % 的 $F = s_1^2/s_2^2$ 的置信限	412
附录 VII	F -分布信度 0.1 % 的 $F = s_1^2/s_2^2$ 的置信限	416
附录 VIII	哥尔莫哥洛夫检验法中函数的数值表	417
参考文献		418

第一章 总 论

1-1 系统工程的产生和发展

系统是由若干部件（也称要素、子系统）在相互之间有机地结合起来可以完成某一功能的综合体。现代生产技术、经营管理系统、宇航系统等，日益向着大型化和复杂化发展，成为规模庞大，结构复杂的各种控制与信息系统。这就促使人们对自然界和人类社会错综复杂、相互交织的事物及其内在联系给以新的认识，从而把人类带进一个新的时代，也就是人类开始用系统的方法去思考问题和解决问题的时代。例如大型钢铁企业的控制和管理系统，就需要把炼铁、炼钢、轧制、运输、存贮、销售、发电、污染控制等系统当作一个整体来全面考虑，实现管理和控制的综合最优化。这种系统常常具有如下特点：

- 是多输入、多输出的系统；
- 系统的数学模型比较复杂，一个参数的变化将引起诸多参数的变化；
- 系统具有多项功能；
- 输入信息通常是随机的，或者是按时域分布的；
- 系统通常都是人-机系统，运行情况取决于人和机器的共同作用；
- 系统具有“竞争”和“对抗”的特性；
- 系统处于干扰（噪声）的作用下；
- 因技术和使用要求的不断发展，系统总是处于不断地修改，补充和更换状态。

由于现代科学技术活动规模的扩展以及工程技术装置复杂程度的不断提高、各学科之间的相互渗透，一个自动化系统不但从整体要求有明确的目标集和性能指标，而且各子系统亦具有一定

的要求,自动控制和自动管理也逐渐结合起来。对于这样大规模、复杂的大系统的技术评价、设计、控制和管理,如何用最短的时间,以最少的人力、物力和设备,最有效地利用科学技术的最新成就来完成科研、建设任务。显然,它不能单纯应用经典的控制理论和常规的控制工具来解决,而必须应用系统工程学的方法和使用先进的技术手段——电子计算机来进行设计、控制和管理。

系统工程学又名筹划工程学。首先起源于大型军事系统的研究,在五十年代中期才形成一门学科,而六十年代得到迅速发展。它不仅牵涉到技术问题,而且还与经济、经营、管理、社会、生理等问题有关。是一门涉及基础科学、技术科学、社会科学综合性学科,是一门综合性很强的应用科学,具有高度的概括性和抽象性。由此可见,系统工程学的产生和发展经历了一定的过程:

1. 社会实践活动的大型化和复杂化

在自然界、社会、政治、经济、科学研究、经营管理以及国家关系等各个方面,出现了组织上日趋大型化和复杂化、要求综合性很高的既相互制约又相互联系的系统性关系。打破了区域性、行业性和学科的界限,成为一类具有独特性的关系。每个部门为了达到各自的目标,都必须从总体的立场出发,综合地、系统地掌握它与外界的联系,而各个部门又有一个从整体来考虑自己行动的问题。因此,过去使用的比较狭隘的孤立的方法已经不能满足这些要求,而要求有一种新的可以从系统的角度去观察、思索、分析、解决问题的方法,这是系统工程产生的客观基础。

2. 大范围内情报流的形成

近年来,由于通讯技术和信息科学的发展,使社会生产和经营过程的各个环节得以迅速地有机地联系起来;而电子计算机的高度发展,使得信息的收集、存贮、加工、传送的能力大幅度地增加,大大缩小了空间和时间的界限,使得人们有可能较全面地掌握、处理和传送大量的情报。同时也迫使人们在较短的时间内对综合性很大的系统性问题做出判断和决策。这就促进了系统

工程学的急速发展。

3. 最优化技术的出现

随着现代数学、计算技术、计算方法的发展，现代化的最优化技术体系已经形成，这对于解决大型复杂的问题，提供了合理的、可供选择的最优化决策，使得系统的思考方法和最优化管理成为可能。

4. 现代化设备、仪器仪表的大量出现

科学技术和工业生产的高度发展，使得各种仪器设备高功能化、多功能化、小型化、自动化、智能化，为自动控制和自动检测提供了可靠的手段。同时，设备和系统的稳定性、可靠性、精确性也不断提高，使得系统地研究问题和处理问题具备了先进的物质基础。

1-2 系 统

在自然界和人类社会中普遍存在着由若干个环节组成的链，这种链就是通常所说的系统。系统是由若干可以相互区别而又相互作用和相互依赖的要素（或称子系统，例如组件、单机、或者有一定独立作用的结构或机构）组成的一个有机整体，它们集中起来处在一定的环境之中，实现某些特定的功能。作为系统，它还应该具有各种属性，诸如连续性、复杂性、综合性、可测性、可控性和可靠性等。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。

另外，在自然界和人类社会中还有许多没有被人们所注意或未被发现的系统（常称为潜在系统），例如森林、草地和耕地之间的关系，它们必须保持一定的比例，如果把森林、草地全部砍伐光，其结果不仅耕地不能增加，而且还会导致耕地变成沙漠。因此，系统的任何一个要素不可能离开整体去研究，要素间的联系和作用也不能脱离整体的协调去考虑，脱离了整体，要素的机能和要素间的作用就失去了意义。所以，作为一个系统，它应具备四个属性：

- **集合性** 系统起码是由两个或两个以上可以相互区别的元素所组成。

- **相关性** 系统内各要素是相互联系又相互作用的。

- **目的性** 系统都具有明确的目的（目标），而且大部分是多目的性的。要达到一定的目的，系统就要拥有一定的手段和方法。

- **环境适应性** 任何系统都存在于一定的环境之中，它必须适应环境条件的变化。能经常与外界环境保持最优适应状态的系统是我们所希望的系统。

概括地说，系统包括两个方面：一是系统本身，一是系统所处的环境。后者实质上就是系统工作的约束条件。环境对系统的作用表现在对系统的输入方面（或干扰）。系统在特定环境下对输入进行工作，就会产生输出，把输入变成输出这就是系统的功能和目的，从这个意义来看，系统也可以看成是个转换机构，如图1-1。

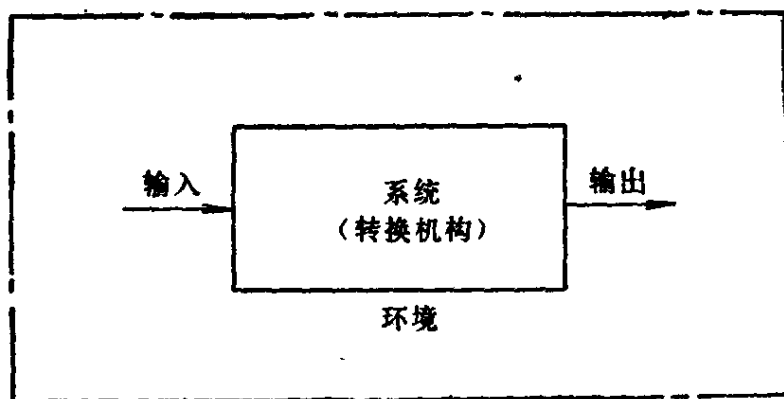


图1-1 系统与环境

1. 系统的数学表示

如上所述，一个系统是由若干个可以相互区别的“要素”所组成，要素之间有着某种相互依存的特定的关系，从而构成了具有有机关联性的结合整体。因此，我们完全可以应用“集合”的概念来表示系统，即系统 X 是由可以相互区别的若干要素所组成的集合：

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

当然，上式并没有考虑到系统各要素的性质以及要素间的相互关系和内部构造的形态，而仅仅用数学的形式反映出系统的共性；而系统如何构成则往往取决于系统的设计者和观察者。

利用映象的概念，当 $x_i \in X_I$ 和 $x_j \in X_J$ 之间存在着——对应关系时，关系 R 就是 X_I 和 X_J 的顺序对关系，表示为

$$\begin{aligned} R &= X_I X_J \\ &= \{(x_i, x_j) \mid x_i \in X_I, x_j \in X_J, x_j = R(x_i), x_i = R(x_j)\} \\ &\quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中 $X_I X_J$ 是集合 X_I 和 X_J 的直积集合，亦即是作为条件来实现系统的。所以一个系统 Y 可以用下式来定义

$$Y = \{X \mid R\} \quad (1-3)$$

即系统 Y 以具有 R 关系的集合 X 来表征。

2. 系统的结构

为实现综合自动化，目前在系统中逐渐形成一定的层次，见图1-2。这种层次可以按功能或工质流的情况及信息进行逐级分解。在考虑系统时，要注意到系统这样的层次，上级系统与下级系统在构造上的关联。

而从功能来划分，一个系统可分为信息获取、信息传输、信息处理、处理结果输出以及人-机系统等部分，见图1-3。

信息获取的作用是将系统所需的信息采集并变成数据形式，通过传输线路（也有不用的）送给信息处理装置。

信息传输的目的是在各子系统之间进行相互协调、相互传送数据，它由通信子系统来实现。通信系统是由各种类型的信道组成的信道网。

信息处理就是从信息获取设备传送来的原始信息以一定的设备、手段按一定的目的和步骤给以加工，它是系统的关键环节。它的目的是：

- 把原始的信息变换成便于观察、传送、分析或便于进一步处理的形式；

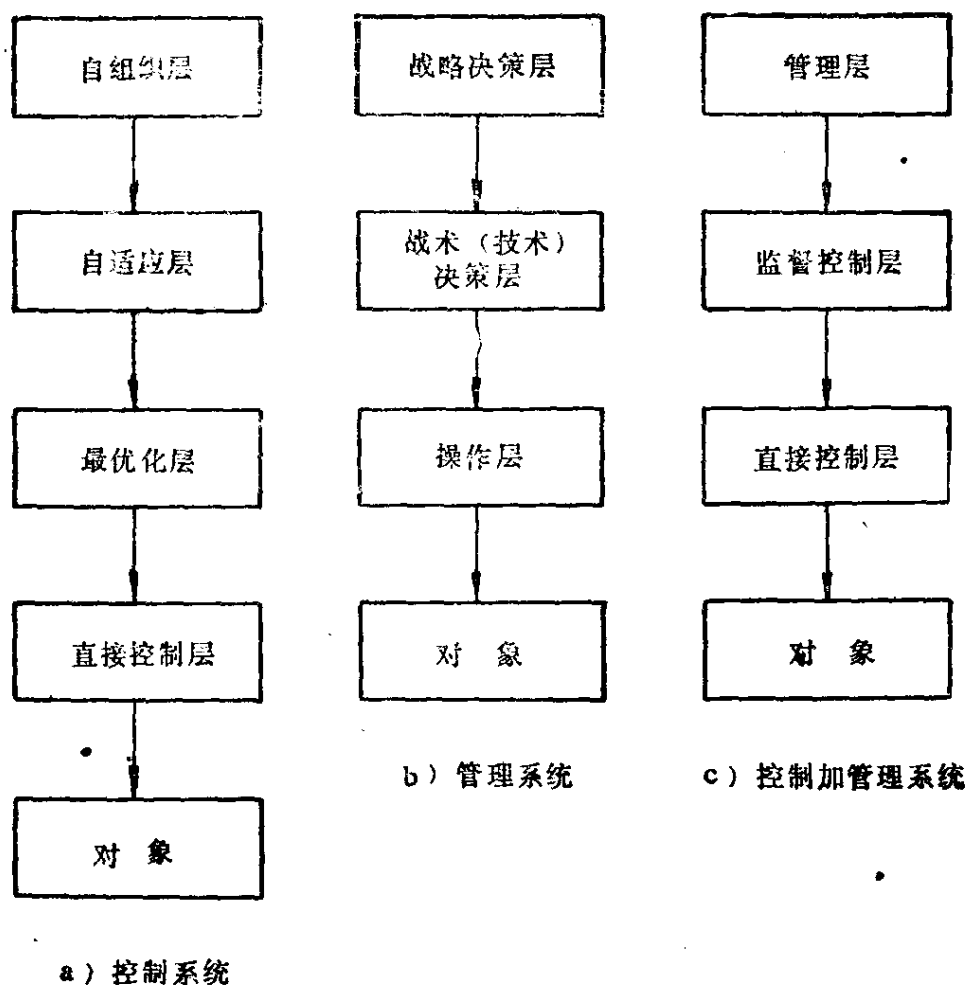


图1-2 系统的层次

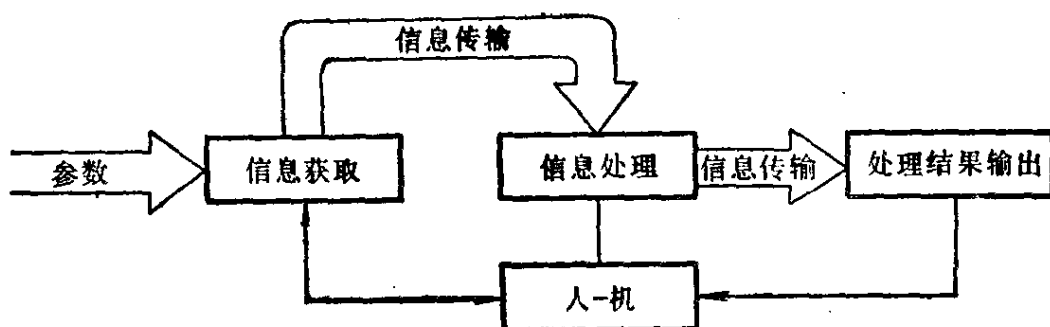


图1-3 系统的组成

- 筛选分类，提取主要和有用的，滤掉无用的；
- 编辑加工，压缩数量，提高质量；
- 分析计算，或为执行器提供控制信号，或为操作人员提供一定数量、质量和类型的信息，作为了解系统运行状态和干预

系统运行的判断依据；

- 把一些难以再现或因系统参数不可控导致变化范围很大的信息集中并存贮起来，作为事后分析的依据。

处理结果输出是根据需要对获取的信息进行各种方式的加工处理后，将处理的结果再以必要的形式进行输出。由于需要输出的信息的性质及应用目的不同，采用的技术手段对不同的系统是不尽相同的。例如在有人参与的各种实时控制系统中，为协调人与机器的关系，便于人对机器的干预，输出信息（包括未经处理的信息）常以数字、文字、图形符号的形式显示或指示出来，以便操作人员及时了解、分析、判断系统的情况；并根据需要采取必需的措施；在系统运行过程发生异常情况时能发出各种报警信号；有时为了存档和进一步的分析处理，也可以采用记录设备（如磁带、磁卡、磁盘、微缩胶卷等）作为输出的手段。

3. 人-机系统

系统除了某些环节可以是完全自动化之外，整个系统总是在有人参与下工作的，而且系统也是由人来管理的，这就构成人-机系统。在进行系统设计时应充分考虑到人、机的分工和人体工程学。可以把人看作是一种单通道、传输容量受到某种限制的信息处理环节。

在人-机系统中，必须配备适当的显示设备以供操作人员观察和监视系统的工作，同时还必须配备人对机器进行干预和控制所需的输入输出设备以便进行人-机对话。

可见，系统是人、设备和过程（信息）有秩序的组合，以完成一个统一的目标，它是物理的或抽象对象的有秩序的排列，它们都要满足一定的约束条件。我们的目的就是求取在这种约束条件下使系统获得最优的运转。系统的主要工作是获取各种信息，进行判断与计算加工，然后输出必要的信息，显示给操作管理人员作为判断情况的依据或直接完成对有关设备的控制。图 1-4 就是一个系统模型。

系统从环境（外界）接收能量、信息和材料，并通过系统内