

系统工程和管理指南

〔美〕 S.M. 辛诺斯 著

王连成 译

吴北生 校

国防工业出版社

内 容 简 介

现代系统日趋庞大和复杂。对现代系统工程和企业进行有效的管理,要求具备有多方面的知识和才能。

本书运用现代控制理论和计算机技术,较系统地介绍了作为系统工程的管理人员——系统工程师和计划管理人员应该了解和掌握的知识,其中包括:系统的性能和反馈特性;设计大型复杂系统的方法程序;系统的可靠性、可维修性和可用性;系统进度和成本的管理控制;系统模拟技术;作为系统环节之一的人的数学模型;系统试验和系统管理等。

本书可供大、中型企业的工程技术人员和计划管理人员阅读,也可作为高等院校系统工程专业师生的技术参考书。

A GUIDE TO SYSTEMS ENGINEERING AND MANAGEMENT

S M Shinnars

D. C. Heath and Company, 1979

*

系统工程和管理指南

〔美〕S M 辛诺斯 著

王连成 译

吴北生 校

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168 $1/32$ 印张 7 175 千字

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷 印数: 00,001—10,000册

统一书号: 15034·2362 定价: 0.90元

目 录

前言	VI
第一章 系统工程问题的内容和范围	1
§ 1.1 引言	1
§ 1.2 系统的总体指标	3
§ 1.3 系统问题的反馈特性	5
§ 1.4 系统问题的数学描述	8
§ 1.5 系统优化方法	14
§ 1.6 系统的工程研制步骤	15
第二章 性能	21
§ 2.1 引言	21
§ 2.2 系统的误差源	22
§ 2.3 辨识问题	24
§ 2.4 可预测和不可预测误差	26
§ 2.5 可预测误差	27
§ 2.6 不可预测误差的特性	32
§ 2.7 误差合成	36
§ 2.8 误差分配	39
§ 2.9 跟踪雷达系统的实例	40
第三章 系统的可靠性、可维修性和可用性	47
§ 3.1 引言	47
§ 3.2 定义	48
§ 3.3 可靠性计划的基础	51
§ 3.4 用半导体线路改善电子系统的可靠性	54
§ 3.5 冗余技术	57
§ 3.6 并列冗余的分组和故障探测技术	58
§ 3.7 分组冗余的概率分析	61
§ 3.8 对故障探测器的要求	63
§ 3.9 部分冗余技术	67

IV

§ 3.10	可维修性	69
§ 3.11	可靠性、可维修性和可用性	70
第四章	系统进度和成本的管理控制	73
§ 4.1	引言	73
§ 4.2	经济流程图	74
§ 4.3	计划项目管理	78
§ 4.4	时间模型——计划协调技术	79
§ 4.5	工程机构的数学模型	91
§ 4.6	计划运行特性的实例	96
§ 4.7	进度和成本的估计	98
§ 4.8	利用计算机对进度和成本进行控制	100
第五章	模拟	104
§ 5.1	引言	104
§ 5.2	模拟机模拟	105
§ 5.3	模拟计算机原理	106
§ 5.4	模拟计算机的模拟方法	111
§ 5.5	数字机模拟	114
§ 5.6	数字计算机的结构原理	116
§ 5.7	编程序	117
§ 5.8	混合计算机	123
§ 5.9	蒙特卡罗方法	126
§ 5.10	随机信号发生器	129
第六章	人-机控制系统: 人的模型	136
§ 6.1	引言	136
§ 6.2	人控制器的特有品质	137
§ 6.3	人控制器的线性、连续模型	138
§ 6.4	人控制器的线性、离散模型	142
§ 6.5	人控制器的自适应能力	145
§ 6.6	人控制器自适应性的表示法	151
§ 6.7	辅助人控制器的技术	153
§ 6.8	结论	156
第七章	试验方法	160

§ 7.1	引言	160
§ 7.2	系统试验基础	161
§ 7.3	用计算机控制的测试	162
§ 7.4	分析试验数据的计算机方法	164
§ 7.5	系统试验的概率问题	167
§ 7.6	对大型海军舰载系统进行试验的实例	168
第八章	系统管理	174
§ 8.1	引言	174
§ 8.2	工作分解结构图表	175
§ 8.3	管理信息系统	177
§ 8.4	系统管理要考虑的问题	182
§ 8.5	假设	183
§ 8.6	备选方案	183
§ 8.7	风险估计	184
§ 8.8	系统管理中的协调问题	191
	习题	193

第一章 系统工程问题的内容和范围

§ 1.1 引言

随着现代工业、军事、空间技术和商业等各方面要求的规模和复杂程度的日益增加，出现了许多大系统。这些现代大系统日趋庞大和复杂，并且呈现出继续发展的势头。当把大量的控制、计算机和通讯分系统联结起来形成一个复杂系统时，不仅需要注意研究这些分系统作为个体的特性，尤其需要注意研究它们之间的相互作用。

由控制、计算机和通讯系统构成的大型复杂系统，按高度综合和相互关联的方式进行工作，使其在总体上达到性能完善，满足可靠性、进度、成本、可维修性、能源消耗、重量和期望寿命诸方面的指标要求，人们把这样的问题称之为“系统工程问题”^[1,2]。虽然系统工程并不是一个完全新的课题，但它所包含的范围和所使用的工程手段近来已经获得了迅速而广泛的发展，尤其在诸如能源生产、治安和消防指挥控制系统、空间飞行器控制、空中交通管制、地面交通管理、高速铁路运输系统和军事武器系统这些不同的领域内更是如此。

由控制系统、计算机和通讯网络组成、并按高度综合和相互关联的方式进行工作，是现代大型复杂系统的特征。例如，设想一个大城市机场的现代空中交通管制系统，如图 1.1 所示。这个系统是一个闭环系统，它能根据提供给空中交通管理人员的信息，来管理空中交通环境，其工作过程如下：将雷达探测获得的信息，通过数传环节输入计算机进行数据处理后，再把处理的结果以适当的方式通知空中交通管理人员。空中交通管理人员则根据提供

给他的信息作出判断和决定，并向飞机驾驶员发出命令，从而把这个回路闭合起来，以实现对整个空中交通环境的控制。这个反馈回路继续不断地工作，直至空中交通环境使空中交通管理人员完全满意为止。

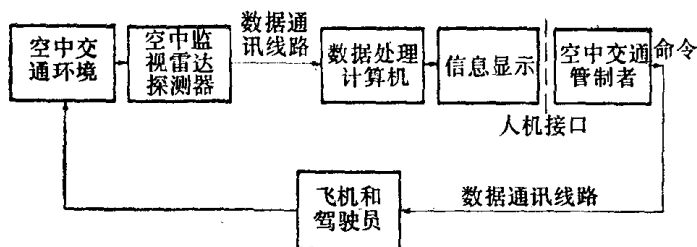


图 1.1 空中交通管制系统

由此例可知，除了控制、计算机和通讯环节之外，人作为一个环节也是这个系统的一个重要的组成部分。由于现代飞机交通量和速度的不断增加，要把所有变化着的动态数据都综合起来，作出能导致空中交通空间得到最安全利用的决策，仅仅依靠人的判断能力是不可能做到的。现代空中交通管制系统必然要最大程度地依靠计算机去做出对付偶然情况的各种备选方案的自动预测。为了做到这一点，必须迅速、准确而可靠地收集、校对、处理和组织大量的数据。

空中交通管制的例子表明，现代大型复杂系统实际上是人-机控制系统。虽然一般都把重点放在设计性能优良的设备上，但人-机控制系统的最终性能并不只取决于这种设备，而是取决于结合成一个整体、按照高度统一的方式进行工作的人与机器的相互作用。系统工程考虑的一个非常实际的问题是如何确定划分机器与人的决策环节的界限问题。今天，自组织机和自适应学习机已经有了很大的发展^[3,4]。这些发展使人们对人和机器的综合品质有了更好的了解，因而也是系统工程所考虑的一个非常重要的方面。

由于大多数现代的复杂系统都与反馈有关，所以本书对于以

反馈的概念讨论系统工程问题给予了特别的注意，并作为本书的讨论重点。虽然控制理论并不能解决全部系统工程问题，但却是一种非常重要的系统工程工具。由于控制工程师具有关于框图、反馈控制理论、计算机、模拟和建立模型方面的基本知识，所以他们有独具的有利条件可以成为系统工程师。但除此之外，系统工程师还必须懂得系统的总体性能、可靠性、经济学、优化方法、试验技术以及系统回路中人的因素的处理问题。只有这样，他才有可能对整个复杂系统进行综合并做出性能评价。

本书的目的是讨论合成系统的总体方面的问题，并且试图起一种“催化剂”的作用，以帮助那些对反馈系统基本概念有一定了解的读者，使他们能从事大型复杂的现代的系统工程工作。关于系统性能的基本概念将在第二章讨论；关于可靠性和可维修性问题在第三章讨论；进度和成本问题在第四章讨论；第五章介绍系统的模拟问题；第六章研究作为系统的一个环节的人的特性描述问题；第七章介绍系统试验技术；第八章介绍管理系统的方法。这些是系统工程过程的主要组成部分。在系统研制和发展过程中，系统工程师和工程计划管理人员对所有这些因素都必须加以考虑。

本章的目的是研究总的系统工程问题，以后各章将详细讨论它的各个组成部分。

§ 1.2 系统的总体指标

一个具体系统的总体指标是非常复杂的，变化范围很大，且与特定的要求有关。因此，仅仅用诸如性能、可靠性或成本等单独一句话来回答是不够的。事实上，在设计任何一个系统时，都必须兼顾所有这些因素。除上述者外，通常还要考虑的因素有：进度、可维修性、能源消耗、重量和期望寿命。

根据用途和用户的要求，有些系统可能把性能放在优先地位，而另外一些系统则可能把可靠性（或者进度、成本）放在优先地

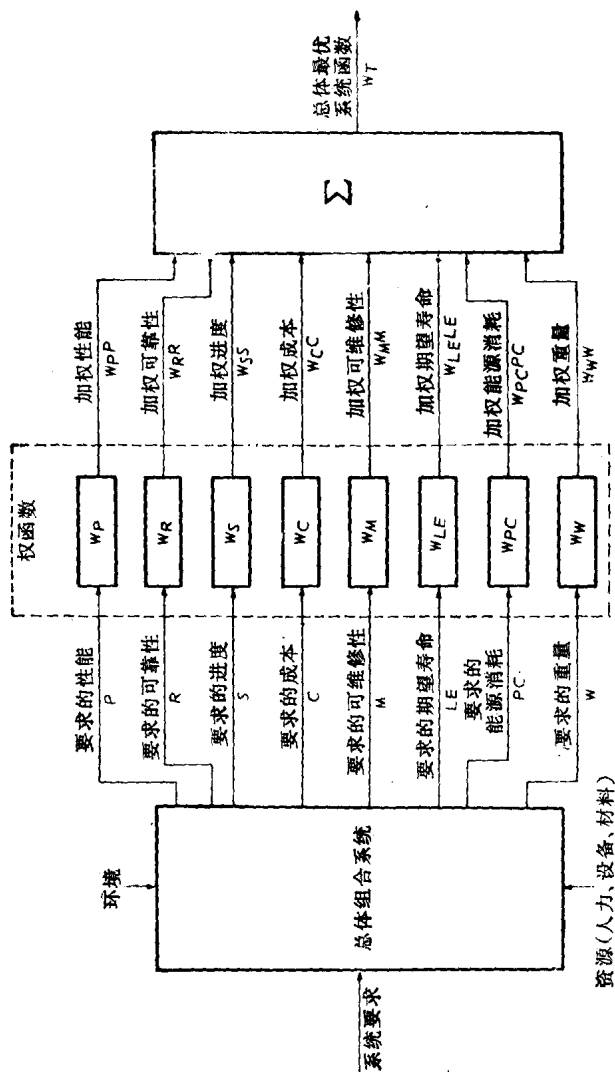


图1.2 系统优化方法框图

位。以一部对空间卫星进行通讯的地面跟踪雷达为例，如果要为它设计一个高性能的定位系统，则总是强调其性能和可靠性，而把成本和重量放在第二位。但是，在设计一个用于道路建筑并大量生产的商用液压定位系统时，就要强调成本指标，而把性能和可靠性降低到次要地位。正是由于不同系统在其总体指标上所存在的这种原则差别，所以有必要对每一个系统进行单独的考虑，从而判断各种指标在它们各自系统中的相对重要性。

图 1.2 是系统优化过程的通用框图，现代系统工程师可以通过它来考虑整个系统的优化问题。在图 1.2 中，系统的输入是：对于系统的指标要求；以人力、设备和材料形式表示的资源；系统的工作环境，其中包括可供使用的能源、工作温度、湿度和外部干扰等。如果我们给每一项要求的系统特性以一个适当的权函数，就得到了一组加权的系统函数，并且能用这组函数使系统的功能达到最佳。图中 W_P 、 W_R 、 W_S 、 W_C 、 W_{PC} 、 W_W 、 W_M 和 W_L 分别表示赋给性能、可靠性、进度、成本、能源消耗、重量、可维修性和期望寿命等各项指标的权函数。系统的性能指标可用图 1.2 所示过程的输出来描述，并表示为“总体最优系统函数” W_T 。

每个系统的具体应用不同，各权函数的取值也不相同。这些权函数的相对大小决定所得到的总系统的性质。我们可以使权函数具有时变的适应特性。举例来说，在要求的系统性能已经达到后，可以把权函数 W_P 的值减小，并通过增加 W_C 来提高成本指标的相对重要性。但是，考虑到另外一种有现实意义的情况，即一个系统的日程进度没有如期实现时，就不得不增加权函数 W_S 的值，并且还要把它的总影响以线性或非线性的方式分配给其它权函数。

§ 1.3 系统问题的反馈特性

系统的性能、可靠性、进度、成本、可维修性、能源消耗、重量和期望寿命等指标是相互关联的。例如，如果推迟进度和增加成本，

系统的性能通常就能得到改善，反之，以牺牲系统的性能和可靠性为代价，就能使系统的成本降低。系统指标的这种内在关系意味着可以从多路径反馈的观点来考虑整个系统的问题。在这种多路径反馈系统中，有几个系统特性处在多个反馈回路上时，为了实现某个系统指标而做出的决定，常常要影响其它系统指标。因此，系统工程师必须正确地观察和了解系统问题的这种反馈关系。

图1.3所示的框图是观察这种内在关系的一种重要方法^[6]。就性能反馈回路而言，其误差信号是要求的总的系统性能与预期的总的系统性能之差。这个闭合回路的主要环节是：规定的总的系统要求；规定的分系统的特性；确定总的系统性能方程和计算最后的总的系统性能。其中规定的总的系统要求和规定的分系统的特性两个环节也是进度和成本反馈回路的组成部分。而在进度和成本反馈回路中，其误差信号分别是要求的进度与预期的进度之差和要求的成本与预期的成本之差。为了改变规定的总的系统要求和分系统的特性，并且也为了确定它们对成本和进度的总影响，在这些闭环系统中应用了逻辑控制环节。同时由该图可见，在性能反馈回路中的确定总的系统性能方程和计算总的系统性能两个环节也是可靠性反馈回路的组成部分。在可靠性反馈回路中，用要求的系统可靠性与预期的系统可靠性进行比较，并且用根据分系统的特性变化计算总的系统性能关系的环节来考虑预期环境和材料的变化以及这种变化发生的概率。

由以上对于这个简化的框图的研究可知，其中有几个环节是多个反馈回路所共有的。因而，性能、成本、进度和可靠性各个方面发生的变化是相互关联的。当然，这种框图的反馈概念还可以推广，将可维修性、能源消耗、重量和期望寿命包括在内。

图1.3所示的反馈回路中的环节并不一定都是线性函数。一般情况下，它们可能是一些时变的、非线性的和离散的。此外，某些环节还可能具有统计性质。如果某个环节是非线性的，迭加原

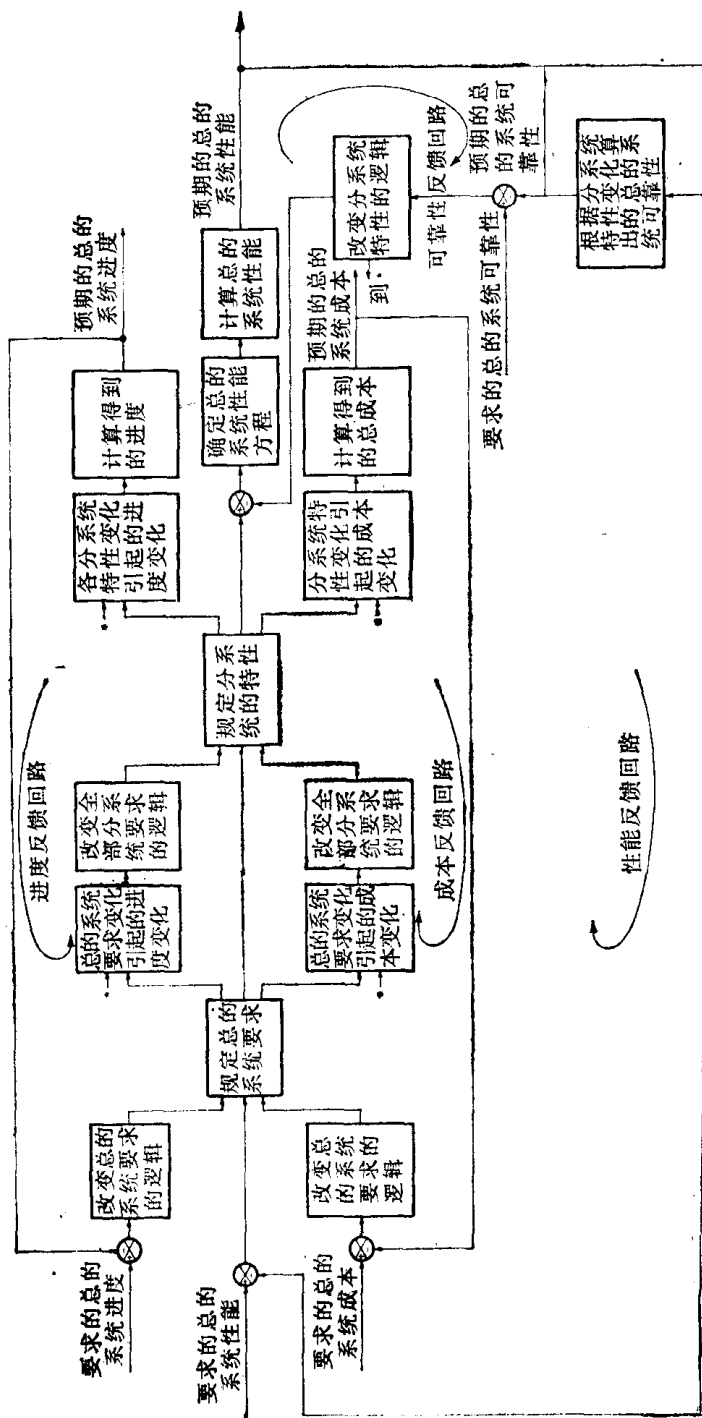


图 1.3 系统指标的反馈联系框图

理就不再适用，此时，这个环节对所有反馈回路的影响可能不再是相同的。

就其固有的性质来说，系统工程问题是一种反馈问题。一个在工程上已经实现了的系统是通过反馈方法在性能、可靠性、成本、进度、可维修性、能源消耗、重量和期望寿命诸因素间进行综合平衡的结果。在一个完整系统的研制发展过程中，近似法和估计法起着非常重要的作用。因而，最重要的问题是，一个负责工程计划的系统工程师应该是知识丰富的、有实践经验的，并且是客观的。此外，由于系统问题的复杂性，在对整个问题作出估价时，充分利用数字计算机是非常有益的。

随着系统研制工作的进展，可能有更可靠的补充数据提供给系统工程师使用。根据这些数据，无疑地会对最初的计划安排进行修改。所以，聪明的解决办法是把图 1.3 所表示的总的系统关系在一台计算机上编出程序，并且不断地用新的补充数据去校正工程计划模型。从长远的观点来看，与每次都用人工进行计算相比，这种方法既便宜又节省时间。不言而喻，就当时可供使用的的数据而言，最初设想的系统是最好的系统。但是，一个精明的系统工程师必然意识到要不断地根据补充的、更可靠的数据对他的初始模型进行校正。其结果是某些系统参数会发生变化。从主观愿望上讲，我们希望这种变化会使成本降低、进度加快，同时使性能和可靠性得到改善。显然，如果最初的估计和近似值过于缺乏根据，就会产生相反的结果。

§ 1.4 系统问题的数学描述

为了定量地说明系统问题的特性，现在让我们再来研究前面曾经讨论过的图 1.1 所示的空中交通管制系统。我们的要求是，根据具体系统对性能、可靠性、进度、成本、可维修性、能源消耗、重量和期望寿命等方面的要求，写出确定最优系统解的数学表达式。

不言而喻，系统应按照其具体的性能要求进行工程研制。举例来说，空中交通管制系统要能对规定数量的、按照规定的最大速度和最大加速度飞行的目标进行管制，必须按规定的精度确定出这些目标的位置和速度矢量。而且，还必须以规定的探测概率发现整个空中交通环境中出现的飞机。现将系统的重要性能参数规定为：

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \text{目标容量} \\
 P_2 &= \text{目标的最大速度} \\
 P_3 &= \text{目标的最大加速度} \\
 P_4 &= \text{位置矢量的精度} \\
 P_5 &= \text{速度矢量的精度} \\
 P_6 &= \text{探测概率}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

空中交通管制系统的可靠性是一项极为重要的设计指标。这项指标要求所设计的整个系统必须对每一架飞机从起点到终点实施安全管制。我们用 R 表示整个系统的可靠性，并把它定义为：

$$R = \text{平均故障间隔时间的小时数} \tag{1.2}$$

整个系统的设计、制造、调试和安装进度也是一项非常重要的系统指标。遵照这些进度指标办事，最终将使计划取得成功。有关进度的指标是：

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \text{设计进度} \\
 S_2 &= \text{制造进度} \\
 S_3 &= \text{调试进度} \\
 S_4 &= \text{安装进度}
 \end{aligned} \tag{1.3}$$

系统的成本指标可以分为设备的初始成本、维修成本和运行成本三类。系统在规定年限内的维修和运行成本是设计中要考虑的一个极为重要的因素。我们把成本指标表示为：

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \text{系统的初始成本} \\
 C_2 &= \text{十年期间内的维修费} \\
 C_3 &= \text{十年期间内的运行费}
 \end{aligned} \tag{1.4}$$

空中交通管制系统的可维修性是一个相当重要的因素，因为它表明了系统发生故障后的平均停工时间。由于所设计的系统是供大型民用机场持续不断地使用的，所以这个停工时间是一个非常小、然而却是有重大影响的数字。我们用

$$M = \text{故障后的停工分钟数} \quad (1.5)$$

来描述系统的可维修性。

虽然系统的能源消耗、重量和期望寿命是几个相对次要的指标，但仍须设法使系统设计满足这些方面的要求。我们分别用 PC 、 W 和 LE 来表示系统在能源消耗、重量和期望寿命方面的指标要求，并把它们定义为：

$$\begin{aligned} PC &= X \text{ 千瓦} \\ W &= Y \text{ 磅} \end{aligned} \quad (1.6)$$

$$LE = Z \text{ 年}$$

由式(1.1)到(1.6)所表示的因变的系统性能参数和其它因素是飞机监视雷达探测器、数据处理计算机、信息显示、空中交通管理人员、飞机驾驶员和数据通讯环节的函数。由天气、地面条件、云层高度和在系统中的人的精神状态所形成的不确定性也影响这些函数。我们把这些独立因数表示为：

$$\begin{aligned} A &= \text{飞机} \\ B &= \text{监视雷达探测器} \\ D &= \text{数据处理计算机} \\ E &= \text{信息显示} \\ F &= \text{空中交通管理人员} \\ G &= \text{驾驶员} \\ L &= \text{数据通讯网} \\ U &= \text{不确定性因素} \end{aligned} \quad (1.7)$$

这些因素可以用线性的、非线性的、定常的、时变的、离散的和(或)统计的函数来描述。

式(1.1)~(1.6)可以表示成式(1.7)所列诸因素的函数。

例如, 作为系统性能指标之一的目标容量就是式 (1.7) 中所有因素的函数, 因此, 我们可以把 P_1 写作:

$$P_1 = f_{P_1}(A, B, D, E, F, G, L, U) \quad (1.8)$$

有必要再次强调, 这种函数关系可能是线性的、非线性的、定常的、时变的、离散的和 (或) 统计的。按照类似的方法, 也可得到如下的表达式:

$$P_2 = f_{P_2}(A, B, D, E, F, G, L, U) \quad (1.9)$$

$$P_3 = f_{P_3}(A, B, D, E, F, G, L, U) \quad (1.10)$$

$$P_4 = f_{P_4}(B, D, E, F, L) \quad (1.11)$$

$$P_5 = f_{P_5}(B, D, E, F, L) \quad (1.12)$$

$$P_6 = f_{P_6}(B, D, E, F, L, U) \quad (1.13)$$

$$R = f_R(B, D, E, F, L, U) \quad (1.14)$$

$$S_1 = f_{S_1}(B, D, E, L) \quad (1.15)$$

$$S_2 = f_{S_2}(B, D, E, L) \quad (1.16)$$

$$S_3 = f_{S_3}(B, D, E, L) \quad (1.17)$$

$$S_4 = f_{S_4}(B, D, E, L) \quad (1.18)$$

$$C_1 = f_{C_1}(B, D, E, L) \quad (1.19)$$

$$C_2 = f_{C_2}(B, D, E, L, U) \quad (1.20)$$

$$C_3 = f_{C_3}(B, D, E, F, L, U) \quad (1.21)$$

$$M = f_M(B, D, E, F, L, U) \quad (1.22)$$

$$PC = f_{PC}(B, D, E, L, U) \quad (1.23)$$

$$W = f_W(B, D, E, L) \quad (1.24)$$

$$LE = f_{LE}(B, D, E, L, U) \quad (1.25)$$

可以根据函数系数把方程 (1.8)~(1.25) 加以改写。例如, 由方程 (1.8) 所给出的 P_1 可以是它的因子的下述线性函数:

$$\begin{aligned} P_1 = & N_{P_1A}A + N_{P_1B}B + N_{P_1D}D + N_{P_1E}E + N_{P_1F}F \\ & + N_{P_1G}G + N_{P_1L}L + N_{P_1U}U \end{aligned} \quad (1.26)$$

式中以 N_{xy} 表示的函数系数可能是时变的、非线性的、离散的和 (或) 统计的。同理, 也可以把方程 (1.9)~(1.25) 表示如下:

$$P_2 = N_{P_2A}A + N_{P_2B}B + N_{P_2D}D + N_{P_2E}E + N_{P_2F}F \\ + N_{P_2G}G + N_{P_2L}L + N_{P_2U}U \quad (1.27)$$

$$P_3 = N_{P_3A}A + N_{P_3B}B + N_{P_3D}D + N_{P_3E}E + N_{P_3F}F \\ + N_{P_3G}G + N_{P_3L}L + N_{P_3U}U \quad (1.28)$$

$$P_4 = N_{P_4B}B + N_{P_4D}D + N_{P_4E}E + N_{P_4F}F + N_{P_4L}L \quad (1.29)$$

$$P_5 = N_{P_5B}B + N_{P_5D}D + N_{P_5E}E + N_{P_5F}F + N_{P_5L}L \quad (1.30)$$

$$P_6 = N_{P_6B}B + N_{P_6D}D + N_{P_6E}E + N_{P_6F}F \\ + N_{P_6L}L + N_{P_6U}U \quad (1.31)$$

$$R = N_{RB}B + N_{RD}D + N_{RE}E + N_{RF}F + N_{RL}L \\ + N_{RU}U \quad (1.32)$$

$$S_1 = N_{S_1B}B + N_{S_1D}D + N_{S_1E}E + N_{S_1L}L \quad (1.33)$$

$$S_2 = N_{S_2B}B + N_{S_2D}D + N_{S_2E}E + N_{S_2L}L \quad (1.34)$$

$$S_3 = N_{S_3B}B + N_{S_3D}D + N_{S_3E}E + N_{S_3L}L \quad (1.35)$$

$$S_4 = N_{S_4B}B + N_{S_4D}D + N_{S_4E}E + N_{S_4L}L \quad (1.36)$$

$$C_1 = N_{C_1B}B + N_{C_1D}D + N_{C_1E}E + N_{C_1L}L \quad (1.37)$$

$$C_2 = N_{C_2B}B + N_{C_2D}D + N_{C_2E}E + N_{C_2L}L + N_{C_2U}U \quad (1.38)$$

$$C_3 = N_{C_3B}B + N_{C_3D}D + N_{C_3E}E + N_{C_3F}F + N_{C_3L}L \\ + N_{C_3U}U \quad (1.39)$$

$$M = N_{MB}B + N_{MD}D + N_{ME}E + N_{MF}F + N_{ML}L \\ + N_{MU}U \quad (1.40)$$

$$PC = N_{(PC)B}B + N_{(PC)D}D + N_{(PC)E}E + N_{(PC)L}L \\ + N_{(PC)U}U \quad (1.41)$$

$$W = N_{WB}B + N_{WD}D + N_{WE}E + N_{WL}L \quad (1.42)$$

$$LE = N_{(LE)B}B + N_{(LE)D}D + N_{(LE)E}E + N_{(LE)L}L \\ + N_{(LE)U}U \quad (1.43)$$

所得到的方程 (1.26)~(1.43) 通过函数系数 N_{xy} 把系统性能参数表示成了各自变数的线性组合。

总的最优系统函数 W_T 是所有系统指标的加权函数和。由图 1.2, 得到如下关系: