

电子系统的物理设计

第四卷

系统设计过程

(一)

美国贝尔电话实验室

邮电部邮电工业标准化研究所

邮电部邮电工业产品结构设计情报网

一九八二年三月

前 言

电子系统的物理设计目前所处的背景和技术状态，当执笔试图编写时，对其内容会感到困难。这套四卷文章的素材特别选用了从物理学中总结出来，实现这些系统的基础技术的重要性。但是，在审查本文的计划以前，对电子系统中正在发生的趋势及其对物理设计的影响，先回顾一下是有好处的。电子系统发展历程可分为三个阶段：第一阶段，固态电子时代以前时期；第二阶段，六十年代前期的固态电子时期；最后，就是目前我们面临的有明显发展的阶段。

如果，把观点放在固态电子时代以前，情况的特征是：设计人员要应付的是低速到中速操作而比较庞大的元件。因此，速率对空间并不构成一种限制，设备受到电气干扰的影响较小，热量集中并不是严重问题，结构设计大于工程需要，其损失也不太大。

当技术转入到固态电子时代，发生了一些新情况。在系统设计领域的大部分，速率要以毫秒区进入微秒区，需要较小元件和高密度结构；从而，热耗散问题，噪音干扰和紧密而高效结构等就变得更为重要。除这些设计问题以外，还出现一大堆设计人员必须熟悉的新材料和新器件。利用计算机作为物理设计和设计记录的工具已发展到在某些领域里会造成重大的冲击。

很明显现在电子系统所用的技术正在进入另一个新阶段。这一新技术将对物理设计具有重大意义，也是同样明显的。电路操作速率不断增加——设计人员经常要应付的是毫微秒而不是微秒。这种电路对元件的最大间隔提出了基本限制，而且，同时扩大了对电气干扰的敏

感程度。微型化已发展到这样一种程度，在新的一代系统里正在大量使用薄膜电路和半导体集成电路器件。这种速率和新器件对于材料、器件和连接方法等的理解增添了新的重要性。需要结构密度的提高将引起新的散热问题，电气干扰问题以及结构问题。最后，在设计和制造知识的积累中计算机的辅助作用，和制造自动化程度的不断提高，现在已发展到足以对设计和设计手续造成重大冲击。

本文的目的是要对物理设计人员提供一些基础知识使他们能跟上不断发展和变化的技术。卷一讨论关于由于系统基本部件之间相互关系的物理设计技术的四个部份：结构的静态和动态，热力设计，电气的相互关系和人的因素。卷二对物理设计人员所工作的基本组成部份的工程资料加以说明。在材料技术方面所包括的几个主题是要对设计人员提供关于设计中经常会遇到的各种材料的结构和特性的充补知识。卷三包含新器件（薄膜和半导体集成电路）以及接点和插接设备。这里重点放在新器件上，如已经指出的那样，它们正在开始对下一代的电子系统进行冲击。当在微型设备中采用新设计和插接器件的大量增加，接点和连接器件的重要性就不断增加。

本卷是这套书中的最后一卷，它的目的是要提高系统设计过程的效率并对系统的具体实现提出一个途径。其中第一部份“设计和逻辑的基本手段”讨论有关决策和优选的各种方法，而将重点放于数量和方法技术上。第二部分“计算机对设计的作用”讨论设计过程中用作辅助工具的计算机的基础知识及其用途。第三部分“系统可靠性”，解决系统与电子部件的可靠性分配以及预测问题。第四部分“物理设计的方法，”讨论系统组织与划分，包括物理设计的组成及其相互连接。第四部分的最后段落以一个例题研讨作为结尾。从卷一至卷四所包括的许多原则和概念，在此例题中都进行说明。

此四卷本物理设计，在贝尔电话研究所培训中心，为通信系统物理设计技术人员举办的四学期制的内部训练中，已被采用作为教材。每学期的内容大致相当于其中的一卷。如将各卷分开，可以作为（实际上已作为）较小目标的技术人员短训班（一学期制）的培训教材。因为物理设计的相互制约性，这套教材尽量先介绍每一方面技术的基础，然后应用这些基础知识于特定的实体设计问题。相信这样处理会使本书作为大学和工科学校教材或作为实习工程师自学材料，可能会受到欢迎。

序 言

本书是由邮电部邮电工业标准化研究所情报研究室翻译的。原文《电子系统的物理设计》全集是组织在1971年至1972年由美国贝尔研究所(Bell Laboratories)编著的。它是该所为造就通信设备结构设计人才而编写的一套课程。全集共分四卷，每卷约600页。对于结构设计这门学科是通过对本物理现象的研究来解决的，并且要求大学毕业后的研究生半年学完一本，两年学完。因此内容极为丰富，而且涉及的知识也较深，全集的内容大致可归纳为十二方面，即力学、热设计、声学、材料技术、元器件技术、接触与连接技术、人的因素及外形、可靠性与维护、加工方法、经济性、计算机和系统设计概念。本书译自全集的第四卷(第四卷共分四篇，在出版上每篇为一册；四篇共四册)为使读者对其它三卷有全面的了解，书末的附录将列出各篇的目录以供参考。

《电子系统的物理设计》三卷的内容是有连贯性的，也是有先后顺序的，全集四卷的内容是按循序渐进，即首先是复习各种技术的基础知识，然后再运用这些知识去解决具体的设计问题，这里所以要先翻译第四卷，其出发点就是要解决具体的设计问题。因此，阅读本书时应具备有必要的基础知识。

必须指出，由于原文是1971年至1972年的著作。在当时来看，这些内容是比较先进的，然而，从十年后的今天来看，个别地方就显得有些不先进，况且，本书又是美国贝尔系统科学研究机构的教程，有些地方与我国国情也不尽一致，因此，在阅读时，读者在这

方面要密切注意的。

本书由邮电部邮电工业标准化研究所工程师罗连台、翻译陈文彪、利艳霞同志，重庆通信设备厂工程师虞哲谅、李建林同志，西安微波通信设备厂工程师成人琦等同志翻译。由邮电部邮电工业标准化研究所高级工程师李国梁同志校对。在此过程中还得到北京邮电学院付教授李家越同志的支持和帮助，对此我们表示感谢。

由于时间仓促和水平的限制，书中定有不少错误，诚恳希望读者批评指正。

邮电部工业标准化研究所

一九八二年三月

第一章 决策理论

W. B. Cotttingham and P. W. McFadden

科学技术的高速发展有必要在设计过程采用高效率的方法。现代系统的复杂性和计算机的出现非常有利于采用更有效的设计组织方法。目前，如果设计人员想要保持经济上和技术上的竞争能力，那么就要求设计人员采用新的高级技术。

工程设计中有若干新的极其明显的趋势证实了这一观点。首先，过去的工程分析经常是采用非常简化的模型来描述问题，着重于求得这些模型的精确分析。然而，应用计算机及功能性逻辑设计方法的结果，进一步认识到有必要精密地集中注意力于目前的问题。现在和未来的重点应该集中目标在于求得更精确的模型的最优良近似解。

计算机在分析、设计最优化和模拟模型中的应用还迫使设计人员提出描述问题和约束条件的公式。公式描述和方法的必要性不只是用于工程分析的许多领域，而且用于设计过程的其它方面，例如决策和优选技术。

最后，设计系统方法和公式化与方法论也是由大量比较方案和相互影响的结果。管理记录问题已经变得很重要。设计问题，就自然地变成跨学科问题。目前设备和系统开展中，对热和电、材料技术的依赖程度就是很好的例子。

本卷第一部分前四章的目的在于考察产品设备阶段共同问题的若干解决方法。前几卷中已经讨论分析过，这里着重讨论设计方法，例如决策方法，优选方法，公差和方差，设计进度计划。所采用的方法

是数学方法，且着重于组织方法。

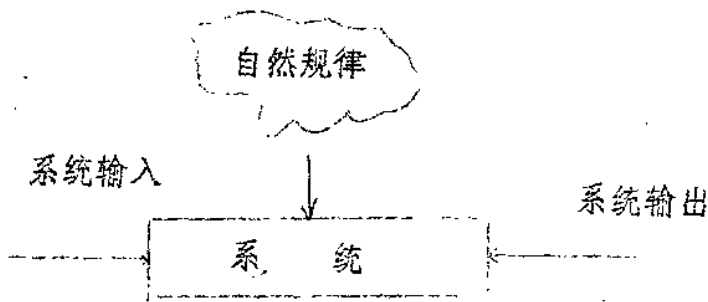
虽然，在设计问题的求解过程中有着许多直接的用途，但在本章所概括的方法并不能代替正确的工程判断。对许多其它问题，这些方法可能还不足，或者不是很必要的工具，方法中概念往往证明所提出的比公式方法更有价值。因此，这些学科的引用趋于促进有关设计问题的思想，要有数据才能证明公式方法是正确的。

§ 1.1 设计过程中的决策

优良系统设计归结为，在一组约束条件的界限内满足一组规定目标的计划。设计作为一个过程来考虑，意指一个公认的结构，能有助于区分和组织广泛的设计活动主要组成部分。

可以采用简单的“黑盒”方法来检验四类广泛的技术问题。图 1.1 就是用图表形式表示一个系统来回答自然规律和完成输入和输出的变换。第一类问题，直接分析是一律最常见的演算问题。第二类问题，反演算问题是一个比较困难的问题，特别是讨论非线性系统，对规定输出来说，其输入可能不是唯一的。虽然，分析问题是设计的重要组成部分。归纳问题往往面向科学多于设计工程师。综合问题是设计工作的中心问题，但象分析一样，综合只是设计过程所必须的若干活动之一。

系统设计中所包括的逻辑检验步骤提出设计工作的理想程序或流程图，表示构造设计过程的途径，在设计中阐明基本步骤的这种结构形态的许多途径之一，我们用简化方式表示如图 1-2。应该着重指出，得出这种理想的设计回路程序，往往是不严格的。例如，经常在两个方向从一个活动跳跃到另一个活动，往往存在着，这里没表示出来的附加反馈回路。但是，作为本章的基础部分，它便于以简单方



	给 出	求	问题类型
1	系统 输入 自然定律	输 出	分 析
2	输出 系统 自然定律	输 入	
3	输入 输出 系统	自然定律	归 纳
4	输入 输出 自然定律	系 统	综 合

图 1—1 技术问题的分类

式讨论这种基本设计回路。

首先，必须明确肯定需要完成的要求，然后，仔细确定必须满足的目标和约束条件。综合起来，这些就构成详细开发时系统所必须满

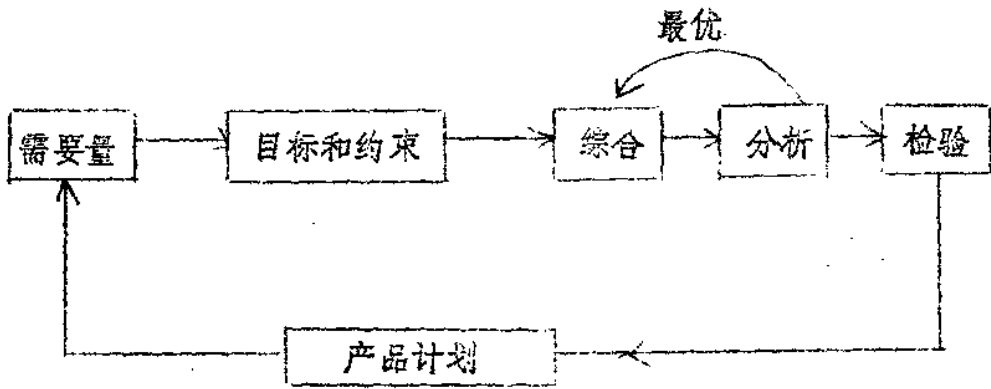


图 1—2 系统设计回路 (环路)

足的一些技术要求。将某类值分配给系统每个技术要求和设计因素问题就是直接和这些因素有关。例如，可靠性，经济性，安全性，重量，尺寸和动力消耗量重要性如何？最好能对这些因素的大多数确定一个定量的值，或至少是一个相对值的排列次序。但是在决定这些值的分配后，往往出现许多明显的矛盾。解决这些矛盾的方法，正好是决策在设计中应用之一例。

综合阶段是设计过程形成可能设计解的中心点。往往认为综合就是依赖独创性的主要方法。许多著名的例子证明这点的的确是真理。然而还有许多工程设计领域，已经达到成熟程度，以致可以将过去的知识用于以系统科学和数学方法为依据的综合。最好的例子是电路网络理论，实质上它是线性系统理论，并由此在许多领域中都可应用。

在得出设计问题的一个尝试解以后，就用分析来确定。这个解尽量满足规定目标和约束条件。

优选法的主要目的在于实现系统设计尽可能接近对应于所建立的目标和约束条件的最大效用。优选法包括从直观、试验和尝试法到较新的精确的数学方法。应用后，这一方法的基本要求是求解问题和约束条件的描述简化或数学公式。如果问题能简化成一个独立变量的函

数，则可以用简单的微分计算求出最小值，或最大值。在比较复杂的情况下，为了正确地反映约束条件对问题的作用，其它数学方法，例如拉格朗日乘数法和变分计算法可能是确定最优化的有效方法。但是，设计的约束条件经常为不等式形式。在这种情况下，数学规划，例如线性规划，可能是有用的方法。随着计算机的广泛应用，决定最优解的数学寻优法已经变得实际了。但是还应该承认，一个绝对最优值往往是不可能求出的，在其它情况下，在决定绝对最优值以前，可能发生报酬递减点。因此，近似最优值或相对最优值可能是最合理的解。

分析综合最优化子回路后，下一步骤在于验证合理的最优化设计确定满足了要求。重要的问题是检查设计以不依赖于原有分析的方式进行。实现这一点的方法往往是构造模型并在实验室里和在实际使用条件下试验这些模型。设计验证用的任何方法的基本问题要能确定参数变化、公差和误差对产品性能的影响。这些干扰的性质暗示，统计和统计推断法可能是一种有效的方法。整个设计验证问题的特征暗示为实验设计方法。

环路中的最后步骤是生产计划。尽管它是一个独立阶段，但它渗透整个设计活动的研究和决策。这种设计活动，在制造、分配、销售、安装和早期使用期内还要继续进行，目的在于接近最优地满足全部要求的最优值。这种讨论虽则理想，但应对解决设计问题提出合理组织方法基础。

应该知道，决策是设计所有步骤的一个重要循环问题。经常许多技术决策是在无意识中进行的。但因为问题变得复杂，出现大量备选方案，目标变得很关键，开始出现矛盾或折衷，所以也增加对决策行动的注意。因此，需要有组织的方法有效地找出通过更大迷惑的途径。

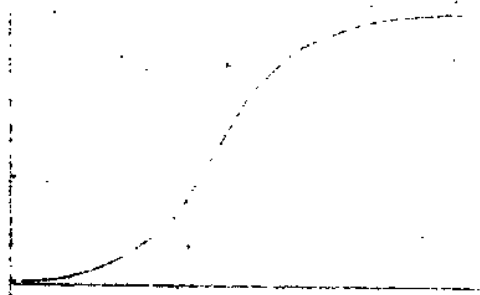
决策的科学逻辑一般称为决策理论的术语。决策论包括价值或效

用概念，就是一个问题的界限，研究要求明显的准则以及找出实际解答的数学公式。还包括各种子类决策，例如肯定型决策，非肯定型决策，风险决策和竞争决策。决策论是一个广泛的科学领域，这里我们只作简单的介绍。

§ 1—2 效用理论

决策过程早期阶段的一个重要问题是赋予效用和价值量，例如一组数据或一个设计参数。效用这一概念的基础是采用若干类资源（例如，货币、时间、机器、材料或其它工具）提供产品效用这一事实。效用对资源的关系曲线通常可以用图形描述，其逻辑曲线如图 1—3 所示，为了便于叙述起见，表示为一条光滑的曲线，尽管这条曲线的实际情形往往不是光滑的，也不一定是连续的。

效用



资源分配

图 1—3 一般效用曲线

应该强调指出，这种特殊类型的效用曲线有三个显著的特征。第一，经常是这种情形，分配资源所得效用也小。我们讨论一下在设备单元中构件的强度对该构件材料的成本。显然，构件事先规定很低的容许强度限，材料费用就最小。第二，效用变得饱和，且报酬递减律发生在资源分配很大的地方。如果选择材料对规定用途的构件具

有要求的屈服强度，则采用具有两倍屈服强度的高贵材料不会进一步提高该设备单元作这一用途的价值。第三，这类效用曲线有一区间，追加资源分配就显著地增加价值。资源分配的这一范围，即效用曲线的最大斜率区域往往就是最有利的区域。

效用对资源分配曲线上经常出现的一种变异称为升级。在接近饱和后，追加资源分配可能有新的技术因素要研究，这种因素致使曲线过渡到追加资源显著地增加效用的另一区域。在使电子元件冷却就是一例。为了提供冷却，往往备有带自由对流散热片的热传导管路。因为添加散热片（元件成本增加），提高了冷却效率，但是达到报酬递减点。在这一点能够应用强制对流冷却，由于添加风扇，导致成本更高，但却显著的增加了冷却效率。显然，在典型设计问题中可能出现几次这样升级。

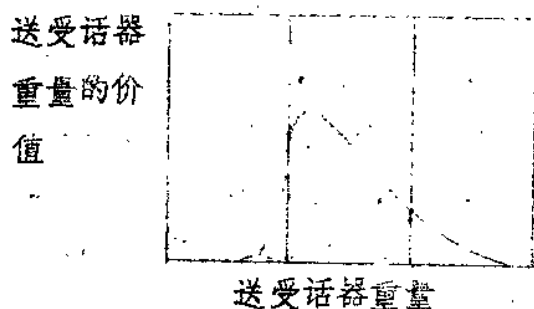


图 1—4 电话送受话器重量的可能效用曲线

设计人员通常感兴趣的是一种特殊设计特征的效用随同说明其特征的某参数变化，而不是成本。图 1—4 表示电话送受话器的重量效用曲线。很轻的送受话器，当挂机时，不能可靠地切断话路开关。另一方面，非常重的送受话器对用户太笨，比较严重的甚至影响传输质量，因此，送受话器的效果随同相对重量的增加而下降。送受话器重

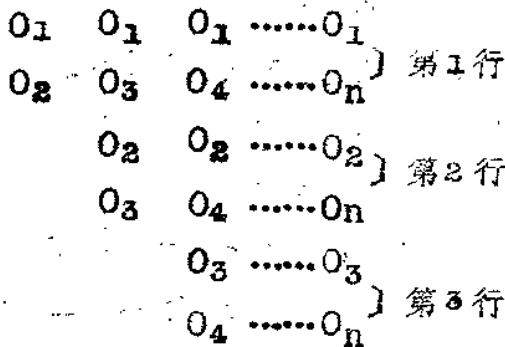
量范围，如图1—4所示。在这范围内送受话器能满足上述要求，甚至有一个最优重量。我们可以说，这种专用送受话器应该在其最大重量效用点进行设计。也不一定是后种情形，因为其它许多因素和资源分配可能影响设计，还必须考虑其它因素，以便找到总效用。

如图1—3和1—4所示效用曲线很少是现成的，往往须设计人员自己去定。往往难以赋予某类效用以定量值，例如外观和安全性。如果要遵循有组织的决策方法，就必须作到这一点。本节将讨论能以赋予这些价值的某些方法。在定量的规定效用曲线方面，以及在决定单个设计中各种设计因素的比较效用方面，这些方法是有用的。

对偶价值度量的三角形法

如果决策人员没有价值或效用作为规定其优先的尺度，我们讨论下列情形面向决策人员的问题，是没有价值或效用来建立其优先尺度的。假定必须讨论 n 个不同结局，至少，必须决定 n 个结果中每一个结果的优先地位或比较价值。如果结局能按优先次序排列，那就给出优先地位，但若问题复杂，且 n 很大，即使这点也是不可能的。对偶三角形法是一个简单图表，能用来优先次序排列结局。

n 个结局定名为 $O_1, O_2, O_3, \dots, O_n$ 。然后，将结局按 $n-1$ 列和 $n-1$ 行的对偶三角形排列，如图1—5。



O_{n-2} O_{n-2}
 O_{n-1} O_n) 第 $(n-2)$ 行

 O_{n-1}
 O_n) 第 n 行

在每个 $n-1$ 行列中 (实际上是总结的两行), 将每对结论进行比较, 并在优先的结论上加一个圈。例如从第一开始, 要判断 O_1 是否优于 O_2 , 或者相反, 就在较优的一个加上圈。这一过程, 一直进行到 O_1 与 O_n 的比较为止。这样在每一行作到 O_{n-1} 与 O_n 的比较并与 $n(n-1)/2$ 的比较。这就是在 n 项中每次采用两项的组合数。

当所有优选率都已标明以后, 可以列成下表:

结论	加圈次数
O_1	a
O_2	b
O_3	c
⋮	⋮
⋮	⋮
O_n	⋮

在结论上加圈最多的是最优的, 一直类推到最次的。如果有两个或更多结论具有相同圈数, 则它们的优选率是相等的。

这种简单方法可对各结论提供一个确切的近似相对优选率或价值的方法。将各结论按其质量次序排列, 最优的列为 n 级, 其次列为 $n-1$ 级, 其余类推, 而将最次的列为一级。这样每个结论的价值就能简略地排列成 n 个注意的标度。当两个结论具有相同的优选率时, 例如, 如果将两个第二优选率合并起来, 它们的价值位置将成为:

$$\{(n-1)+(n+2)\}/2$$

对于其它排列位置的相同优选率者可采用同样方式。

正规化的优选率可将 $n(n+1)/2$ 除排列位置数来取得。它是 1, 2, 3, …… n 各级的和。因此最优结论的优选率为 $2n/n(n+1)$, 第二最优结论为 $2(n-1)/n(n+1)$; 其余可类推直到优选率最低的那个结论。它将表示为 $2/n(n+1)$, 当没有任何合并时。在结论中有优选率相同的情况下, 优选率的确定仍以 $(n+1)n/2$ 除排列位置的数值来取得。这种方法只能得出近似价值数, 因为价值是按排列次序线性分配的, 只有在最偶然情况下, 才是正确的。可是, 这还是有用的, 因为在没有其它更好办法时, 它可以提供一个有用的排列次序。

例题 1. 1, 在某一特殊设备的六个因素中, 主要按其物理设计确定其相对优选率。假定这些因素如下:

O_1 = 小尺寸

O_2 = 重量轻

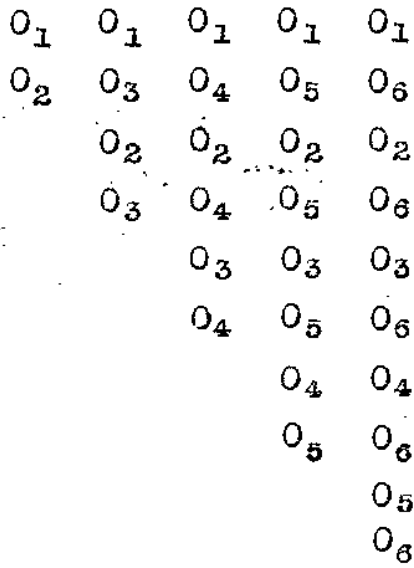
O_3 = 便于安装和维修

O_4 = 设备年度总费用较低

O_5 = 对于热传导, 连接接点数冲击和振动的可靠性高。

O_6 = 美丽的实用外观

具有每对加圈的优选结论的成对三角形, 可列成如图 1-6 所示, 其中还概括了每一结论加圈的次数, 它的排列次序和优选值。



设计因素	加圈的次数	顺序值	优选值(标准值)
O_5 =高可靠性	5	6	0.29
O_4 =低的总年度费用	4	5	0.24
O_3 =便于安装与维护	3	4	0.19
O_1 =小尺寸	2	3	0.14
O_2 =低重量	1	2	0.09
O_6 =美丽的功能外观	0	1	0.05

图 1-6 有 6 个因素的设备单元对偶三角形法的结果
(例题 1.1)

虽然对偶三角形法可以为若干个因素的每一个因素用做比较优选率的原始标记，但是往往需要有较好的定量的量度。这样的方法如下：

Churchman-Ackoff 价值量度

我们讨论优先顺序排列的结局 $O_1, O_2, O_3 \dots O_n$ ，使得 O_1 优于 O_2 ， O_2 优于 O_3 ，等等。将比较值分配给结局的

Churchman-Ackoff 法，主要是回答各结局或组合的优选率的简