

电子系统的物理设计

第 四 卷

物理设计的探讨

(四)

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

目 录

第四卷 系统设计过程

第四篇 物理设计的探讨

第十章 系统的组合与划分.....	1
§ 10—1 确立系统要求.....	2
§ 10—2 系统划分问题的特徵.....	25
§ 10—3 系统划分与性能.....	33
§ 10—4 系统划分与可靠性.....	35
§ 10—5 系统划分与成本.....	42
第十一章 组件和连线的设计.....	60
§ 11—1 集成电路的组装.....	61
§ 11—2 印制线路板技术.....	68
§ 11—3 连接技术.....	95
§ 11—4 设备结构.....	115
第十二章 对问题的分析; 高级数据处理系统.....	125
§ 12—1 设备机构和设计要求.....	126
§ 12—2 设备的分隔和结构设计.....	132
§ 12—3 传热设计.....	161

§ 1 2—4	电的限制条件和内部连接设计.....	1 7 5
§ 1 2—5	用计算机辅助设计.....	1 9 8
§ 1 2—6	将来的展望.....	2 1 1

第十章

系统的组合与划分

这一卷前面已经叙述过的所有内容为电子设备的物理设计者提供了必要的基础技术知识。剩下的最后几章要讨论这些内容在物理设计问题上的应用。这一章论述的系统要求的确立以及如何编排和划分系统来满足这些要求。第十一章论述构成系统分级结构的模件的物理设计及其连接技术。第十二章探讨一些基本理论的实际应用并研究一些实际问题。这些实际问题在相当复杂、具体的电子系统的物理设计过程中往往有可能出现。

进行任何系统的物理设计，第一步就是要确立系统的要求和系统将要实现的目标。系统要求的基本轮廓常常是通过对所需系统的不断评论和根据现有技术水平而确定下来的。不论是初次提出的系统要求，还是后继详细制定的系统要求，它们都需要规定出系统的性能、可靠性、成本等方面的基本参数。影响系统性能和可靠性的因素在前面的章节里已经作了讨论，这里不多重复了。有一些特别需要强调成本的，将在后面的内容中予以叙述。

系统基本参数确立以后，就可以根据这些参数对系统进行组合与划分，以便提供系统所期望的特性。确立各基本参数所对应的系统的要求是本章首先要讨论的问题，之后，还要扼要地介绍每一种参数对物理结构划分所产生的重大影响。

§ 10—1 确立系统要求

在相应规模的任何系统研制中，起初就要对它提出完美无缺的系统要求是困难的。在工业领域内，由于不断提供新的服务形式和降低产品成本而出现的竞争局面常常迫使人们在原有基础上进行新的发展，一旦这种新发展所得利益明显地超过了实际这一目标所消耗的各种费用时，那么就马上要进行这一发展工作，并且在一定程度上要使新发展的产品在同类市场上优于其它竞争对象。因此，对设备的初始要求必须作全面而广泛的考虑，要使得它随着发展进程便于进行特殊的扩充和更改。尽管这是一个十分重要的要求，但是也应该注意，系统要求的各细节和最新提法不能超越客观可能，无论什么时候都应该是切实可行的，这一点仍然是最重要的。只有这样，方能为确定设计方案建立坚固的基础并提供可行的测试方法。系统所要求的不断发展特性使得研究工作变得更为困难，当然，也增加了各类设计人员间互相协调的重要性。

我们会看到，下面的讨论将引伸出许多重要的问题，这些问题都要影响到对应于系统性能、可靠性、成本等基本参数的系统要求的确立。

性能要求

任何电子系统的核心问题是电子功能部份——包括逻辑电路、存储电路、放大电路、调制——解调电路等的电性能。特殊设计满足性能要求的能力既取决于各单独的电路元素，也取决于它们在各种组装级的分隔结构中的排列方式和连接方法。这些因素除影响性能以外，在很大程度上也同样影响系统的可靠性及成本。

由于可供选择的材料、加工方法、结构形式、原理电路和连接方法非常之多，要求一个系统在每一个方面都具有最佳品质是不大可能

~2~

的。尽管如此，我们应用第一、二章所阐明的技术还是可以找到较好的解决办法，至少可以使部分参数实现最优化。

系统的性能不仅与电路和物理设计有关，而且也与下面谈到的许多外部因素有关。这些外部因素在确立系统要求时必须予以考虑。

环境

系统的良好运转取决于物理设计所具备的承受，系统周围环境的能力。一般来讲，设计人员应该了解系统将要遇到的温度，湿度和环境震动的极限及最坏的冲击幅度。系统在加工、运输、储存期间和使用的过程中所遇到的环境条件往往是大不相同的，最恶劣的环境条件常常在运输和储存期间出现。一般的要求是当设备经过合适包装以后要能够经受得起这种环境的考验而只允许设备有很少损坏危险的可能性。系统故障的原因是多方面的，它可能由于敏感元器件电性能退化引起，也可能由于机械原因所致。温度和湿度的影响可能导致机件有较高的机械应力，连续不断的振动可能引起疲劳性破裂，强烈的冲击可能产生塑性变形或破碎。有时，故障是由上述各因素的联合作用而引起的，例如，在海运期间经常会遇到低于零下 40°C 的气温，这种气候使得设备的某些材料（如设备结构上普遍使用的低碳钢材料）发脆，这就大大增加了卸货时处理不当而造成机件破碎的可能性。所有这些因素，在确立系统要求时都必须予以重视。

如果系统需要在非常应力时期保持良好的运转，那么一定要考虑到周围环境所造成的各种附加故障形式。例如，突发性的电性能衰变；辐射或伴随冲击、振动出现颤噪效应而诱发的噪声干扰；开关或继电器接触不良引起的干扰等等。当然，除了要估计到周围环境对运转设备的影响以外，运转设备对周围环境的影响也是不可忽视的。在这方面高温的影响应特别注意，有时还存在辐射影响、噪声干扰、和烟雾

等。

兼容性

电路及物理结构与现有设备相互兼容，物理结构与现有的空间排列相互兼容往往是必要的。对于电路方面则要求设备的输入端和输出端不需要再经过精心设计和细致的考虑就能够使新老设备很方便地衔接起来。从物理结构方面来看，适合安装在飞机或潜艇拐角处异状空间的设备结构形式就是考虑物理结构具有兼容性的一个大家熟悉的例子。

考虑兼容性的时候，缺乏了解的也许是各种不同建筑物安装需要设备时所受到的限制。在某些场合，例如在中心电话局，安装设备的空间已经标准化，设备的物理结构与空间排列的兼容性容易实现。但是，在一般的商业区和住宿区，其空间的大小通常不是很有规划的，而且总是希望在现有设备和家具，作最小调整的情况下，能够容纳任何一种所需要的设备。在这些场合，往往要求设备小型化，并且要限制检修时所需要的空间，有时还要求设备的外形要有利于与室内的设施相匹配（参看第一卷第十二章第4节）。这些情况在确立系统要求时都要考虑进去。

人的因素

系统性能的好坏在相当大的程度上取决于人们对系统的设计、装配、测试、运输、操作和维修的能力。因此，在设计、制造、使用的所有阶段，与人的关系的考虑是十分重要的。有时，认为系统制造、装配等方面的人的因素要求可能会受到成本要求的一定限制。但是，由于人的因素在很大程度上也影响到质量和工作进度即影响到成本，因此，它们两者一般是不矛盾的。关于人机系统的所有问题——包括操作、装配、维修、外貌等方面的人机设计（参看第一卷第十二章）

都应该很好进行考虑。

变化的灵活性

如果在系统研制的初期所有的各项系统要求都是明确的，而且所做的设计是完善的，那么系统适应于变化的灵活性就可以小一些。但是，对于许多系统来讲，具有可变化的灵活性是它们生存的必由之路。如果所需要的变化不能很方便地引入有模式的设备中，那么系统发展和设计所需要的时间将大大地加长。特别在高速电路中，由于系统的物理排列的各细节至关重要，生产的样式必须和原型机完全一致，如果不具灵活性，更会使发展和研制时间延长。不论从技术人力的使用上，还是从满足工业领内的竞争要求上来讲，缩短系统研制所需要的时间是如此的宝贵，可以认为为了缩短系统的研制周期而提供灵活性所化费的代价十分值得的。

在系统的服务期限内，为了能够在系统上引入新的特征，从而延长系统的使用期，灵活性也是十分重要的。最仔细的可靠性估计有时也会有数误差，这样就要求能够置换失效器件，甚至置换全部不可靠的器件，如果系统没有灵活性，要作到这一点就比较困难。为了适应这一要求，最近代的设计都是对系统进行分割，采用大小适度，各有插拔方便的连接器和可变互连线路的可更换的组件结构，以便各类器件容易接近。采用这种结构形式对于正常的维修活动也是有益的，因此，它具有双重的目的。

在系统发展期间或使用的过程中，对于变化没有灵活性的集成电路向我们提出了一个十分值得注意的问题。虽然集成电路由于它成本低，性能好而使它得到广泛的使用，但是我们要尽很大的努力来防止集成电路因改变设计而延误时间。如果要更换集成电路，它的更换成本将大大高于大多数分立元件。

可靠性要求

系统可靠性目标的确定主要与两方面的因素有关，一是失效时会产生什么样的后果，二是达到预定可靠性指标所需要的成本。例如，海底电缆装置，由于它修理困难并且修理费用很高，一个故障会严重丧失通信能力，因此必须要有极高的可靠性。而在另外一些系统中，如某些容易接近而且停机又无多大影响的设备，其可靠性要求可以不必太高。

系统的可靠性目标也与系统的功用紧密相关。例如，数字计算器，只有当它对某些专门问题进行运算时能正确工作，它才有用处，也就是说运算时要有高可靠性，但可以不允许它有20%的停机维修时间。另一方面，对于电话系统，如果每星期1000个电话内出现电话不正常的用户不多于5~10个，那么通常认为系统是相当可靠的。对于这种整体不停机而提供连续服务的系统而言，一定程度的操作不正常，是允许的。很明显，对于这两种类型的系统，所采用的可靠性设计原则是不相同的。

对于可以维修的系统，用户对系统的有效率常常比对系统的可靠性更感兴趣，因为有效率是当需要时系统可运转的概率。在某些情况下，系统只能在一定时间内进行修理，对这类系统既需要确立可靠性目标，又需要确立有效率目标。有效率是系统维修性、分系统可靠性和备用率的函数。备用率和有效的维护、修理方法相结合既能减少系统的故障概率，又能使恢复系统继续工作所需要的时间减至最少。一个系统维护和修理的能力与许多系统因素有关，如设备的可接近性和修理的难易程度、故障定位与检测、维护细则的制定与人员的培养、置换的逻辑性等等。在系统性能方面可靠性、有效率是受环境和人的因素的重要函数，可参看第四卷第七~九章和第一卷第十二章2~3

节)。

成本要求

几乎任何发展工作都有成本目标，而且是一个非常重要的系统目标。成本的最高限额必须经常严格遵守。有些发展工作纯粹是以降低成本为目的的，如果我们提供一种新的服务性能，那么只有当用户愿意花钱来买时，这种产品才是有价值的，因此就必须不断地降低成本。至少，用这个成本提供的服务形式对于用其它方法所提供的同类服务形式必须具有竞争能力，并且要标明它独特的成本优点。一般讲，价值是最有效的公共比较标准，用它可以对竞争的系统要求和目标进行比较和评价，尽管这种做法有时是困难的。

设计方案所包含的各项费用应当仔细地进行估算，以便建立起恰当的方案预算和进度。对于产品的制造费用也要进行估算，而且这种估算要周期性地予以修正，然后再放到现有市场上进行研究。这种周期性的费用估算将大大有助于各种设计问题找到更好的解决办法。如果各项费用都保持在估算的范围内而且方案又按照所确立的程序实施，那么出现一个成功的设计和有利可图的产品的可能性将大大地增加。

在讨论成本时，我们首先讨论影响成本的各个方面和它们以时间为基础的互相关系，然后再讨论货币的时间价值——即与时间有关的货币成本，最后讨论产品或系统成本的各个组成部份。

按设计—生产—销售时序货币的流通

对于一种新产品，从初始研究阶段到设计、生产、销售，整个过程的货币流通顺序概要地表示于图(10-1)。

(图见下页)

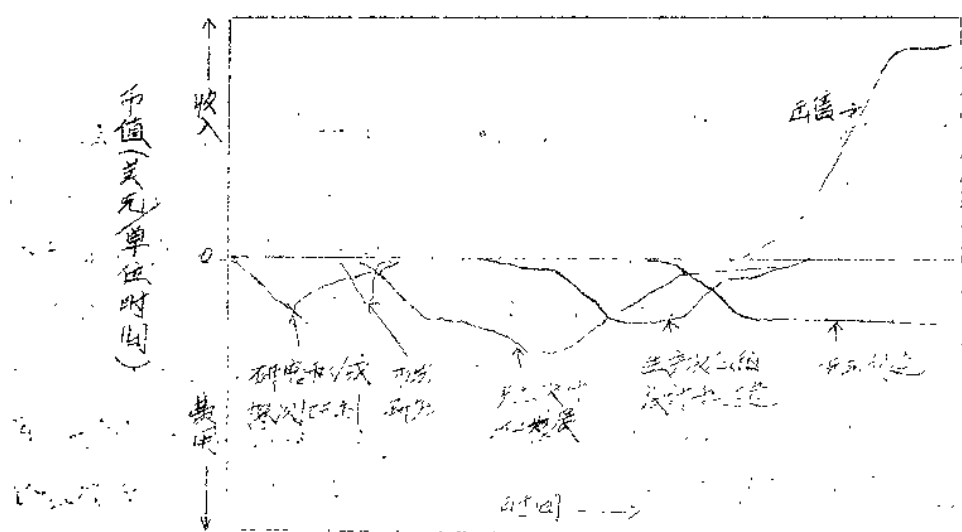


图1.0-1 典型产品按设计—生产—销售时序的货币流通示意图

各阶段消费和收入的货币流通率表示为时间的函数。图中横座标与它下面各曲线面积之和表示货币的总消费量。曲线的形状和量值意味着各不同时序阶段的消费量和收入间的一般关系。

最初经费用于图中表示的研究或探测研制阶段。市场研究也是一种重要的早期活动，用于它的经费常常在其它费用之前。预期的市场规模将形成以后的设计、发展、生产相关的许多经济决策。这里所指的设计和发展包括关于系统工程、总体系统设计、器件设计、电路设计和物理设计的全部活动。

从某种程度上讲，在设计阶段就要作准备生产的计划和支付生产设备设计所需要的费用。当生产开始的时候，对于实际产品制造还有各种附加费用，这类费用包括劳动费用、材料费用、管理费用、存贮费用、销售费用、交货费用、推销费用等，有时也包括装配费用。随着生产的增长，这些附加费用的增长率常常会达到一个相对稳定的数~8~

值。

从图中可以看出，产品的第一次收入是通过销售而获得的，如果预期设想的市场需求量可以达到，那么通过出售产品而得到的总收入将可补偿总的消耗费用，总收入超出总消耗费用则获得利润。从最初使用经费起到开始出售得到收入为止，这是一个重要的时间周期。这个时间周期内，由于市场潜在的竞争力和货币的时间价值，可能会产生各种不同的严重经济效果。

货币的时间价值

我们联系货币的真实价值来考察一下图10—1，如果图上表示收入（出售）的曲线所围面积比表示消耗费用曲线所围的总面积大，就简单地认为这些消耗费用就完全合理这是不对的，因为时间也是一个决定真实价值的一个重要因素，也就是说，货币的价值会随着时间而变化。

利润是大家所熟悉的一种概念，一般讲，利润率是随着两个因素而变化的，一是风险，这是由于投资于某一企业或活动的货币存在着不能回收的可能性而引起的。二是机会损失，这是由于投资于某一目的的货币不能再投资于另一更有经济价值的目的而引起的。现在我们来考虑一笔资金，如果这笔资金在某一周期内，例如一年，没有赢利，那么它的真值（忽略通货膨胀），在这段时间会有什么变化呢？由于这笔资金在这段时间内至少可以获得标准的银行利息，因此它的答案是很明确的。当这笔资金空闲着的时候，赢利的机会便丧失了（机会损失），因此，这项资金在这一年的年终的潜在价值也不能实现。

为了确定给定货币数在某一特定时间内的真实价值，设 P 表示这项货币的当时总额， i 表示每时间周期内的利率， n 表示时间周期的数目。经过 n 个时间周期以后，与当时货币 P 有相同价值的将来货币

的总额 S 是

$$S = P(1+i)^n \dots\dots\dots (10-1)$$

式中 $(1+i)^n$ 称为复利率。

同理，把公式 (10-1) 移项，将来货币总额 S 的现在价值即可得出：

$$P = \frac{S}{(1+i)^n} \dots\dots\dots (10-2)$$

式中 $1/(1+i)^n$ 通常称为折扣率

由于货币确实存在着时间价值，因此，前面提到图 10-1 中横坐标上，下曲线内面积的相对大小的概念应该是清楚了。从货币的现在价值来讲，将来的收入和消费都必须按公式 (10-2) 打折扣，以排除时间因素的影响。如果 i 值很大，并且时间间隔很长，以致开始投资后隔了相当长的一段时间才开始出售，那么为了要使前后平衡，则要求图中横坐标上面收入曲线的面积必须远远大于横坐标下面各曲线面积总和。

除了上面谈到的两个公式外，还有两个涉及到系列支付的重要公式。这些系列支付中首先涉及到的就是分期付款基金积累，这是一种周期性的资金支付，它累积起来便构成将来货币的总额。以利润为主，经过 n 个周期以后能满足将来货币总额 S ，那么每周期末应支付的分期款额 R 为

$$R = S \left(\frac{i}{(1+i)^n - 1} \right)$$

式中括号内的项目称之为分期付款系数，

把此式移项整理则得到

$$S = R \left\{ \frac{(1+i)^n - 1}{i} \right\} \dots\dots\dots (10-3)$$

式中 S 表示利息为 i 、 n 个周期后、相等的分期付款 R 将来的总额。

根据公式 (10-2) 把将来总额 S 换算成现在价值 P ，并且代入公式 (10-3)，则得到一系列分期付款 R 的将来总额 S 的现在价值，即：

$$P = R \left\{ \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right\} \dots\dots\dots (10-4)$$

我们把公式 (10-4) 移项、整理，则得到利息为 i 、周期为 n 的需要归还最初投资 P 的分期回收额 R

$$R = P \left\{ \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right\} \dots\dots\dots (10-5)$$

式中括号内的项目称之为资本归还系数，它等于分期投资基金系数被除于折扣系数。

随着货币时间价值概念的建立，就能比较容易地把各项费用的当量值推算出来。因为当量概念把将来各项费用和现在价值连系起来，奠定了作为比较的标准，因此用它进行方案的比较和判决是真实的。

下面举例来描述当量概念的应用

例 10.1. 有两种不同的设计规划，每一种程序都导致相同的设计，并且估计用 5 年时间完成。假设资金筹集如下：

方案 A：除每年支付年度费用 \$70,000 以外在第一年、第二年、第三年各年终需要经费 \$50,000。

方案 B：除每年年度费用 50,000 以外，在第三年后需要经费

\$100,000，并在第四年年终需要经费\$175,000。

可以看出，在5年中用于方案A的经费总额达\$500,000，而用于方案B的经费的总额是\$525,000。如果利率都是10%，那么按照所需要的经费来看，哪一种方案是可取的？

解：

应用公式(10-3)和(10-4)，求出每一种方案总经费的现在价值P(在5年周期的起始日)分别为

$$P_A = \frac{\$50,000}{(1.1)} + \frac{\$50,000}{(1.1)^2} + \frac{\$50,000}{(1.1)^3} + \$70,000 \left[\frac{(1.1)^5 - 1}{0.1(1.1)^5} \right]$$
$$\approx \$390,000$$

$$P_B = \frac{\$100,000}{(1.1)^3} + \frac{\$175,000}{(1.1)^4} + \$50,000 \left[\frac{(1.1)^5 - 1}{0.1(1.1)^5} \right]$$
$$\approx \$385,000$$

通过用当量货值比较以后，到底应选用哪一种方案已经很清楚了，从经济的观点出发，尽管程序B 5年内所支付的数目较大，但用现在价值衡量可节省\$5,000，因此，应选用此设计方案。

关心利息和由此而产生的货币的时间价值是十分必要的，即使基金已在连续预算的基础上进行了分配也不能忽略这一点。这是因为资本的作用中包含着用它去完成其它事情而产生的机会作用。在确定i的目标价值时，必须把现在和可以预计到的将来的通货膨胀、税金考虑进去。尽可能精确地把将来货币估计为现在价值。当然，若是收入和费用以相同的速率发生通货膨胀，当方案变动时，通货膨胀的影响则不是那么重要了。

很明显，将来的收入和费用必须根据上面所供定的时间价值公式打折扣，这就是当量值的概念。利用当量货值不仅可以为给定设计规划的经济估算奠定坚实基础，而且也为实现给定设计的不同程序的选择和确定应采取的规划提供了有根据的判别方法。

初次费用

一个系统或一个产品的销售价格必须反映出它达到用户手上之前全部所花的费用，另外再加上适当的利润。这些费用包括研究、设计、发展、市场调查、生产设备及工具、制造、销售、运输等方面分摊的费用，有时也包括安装费用。每单位系统或每单位产品总的原始费用通常称之为初次费用。它的产生是涉及到销售数量和上述各种费用的复杂的综合过程。

从初次费用的定义出发，可以很清楚地看出图10-1中横坐标下面各曲线面积的大小对初次费用是有影响的。我们把这些面积所表明的费用分为两类：一是总的设计和发晨费用（包括技术准备和市场研究），用 G_D 表示。二是每系统总时制造费用，它包括若干项，有按产量分配的生产设备和工具费用、材料费用、劳动费用、运输费用、装配费用等。这些费用大部份是按件计算的。每个系统的总制造费用以 G_M 表示。若系统的生产数量为 N ，则每系统的初次费用为

$$G_F = \frac{G_D}{N} + G_M \dots\dots\dots (10-6)$$

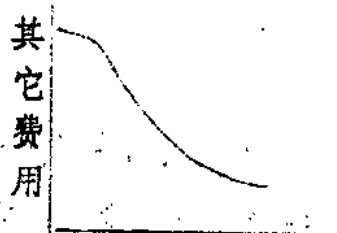


图10-2 其它费用（包括劳动费用、工具费用等）与发展费用的关系

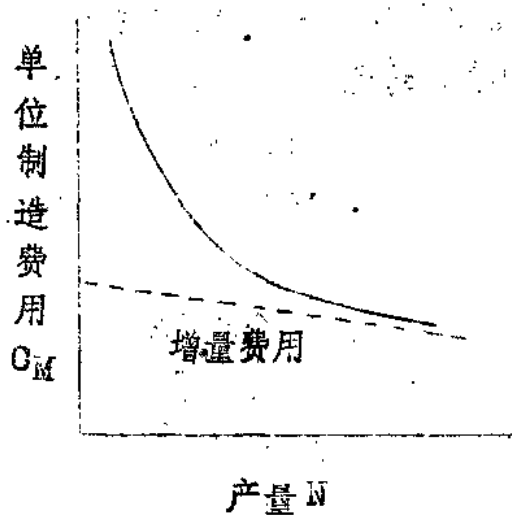


图10-3 经验对增量费用的影响

其它各费用部分是随发展费用的变化而变化的，变化的数量关系如图10-2所示。这是一条典型曲线，从孕育期开始，随后有一段费用非常迅速减少的区间，最后费用的降低速率减小或者达到饱和状态。所减少的费用实际上是后续费用部分，即材料费用、装配费用、维修费用等。尽管它们的价值和比例会有变化，但是曲线的形状是相同的。然而，当曲线的斜率在数量上大于1时（这个斜率通常忽略），所增加的发展费用将大于由其它费用所节省数值。

在公式（10-6）中，在计算系统初次费用时，有关的设计和发展费用 C_D 由总的生产数量 N 分摊，而大多数各种后续费用 C_M 则是按件计量的。可以看出，最佳的发展费用是随生产数量的增加而增加的。如果生产数量很大，那么在发展过程中深入细致地下一番功夫是值得的，采用一些特殊的设计也是合理的。反过来，如果只为单一