

电子仪器的可靠性

〔英〕 J. C. 克拉利 著

王振明 黄慧力 译

**ELECTRONIC EQUIPMENT
RELIABILITY**

By J. C. Cluley

The Macmillan Press Ltd., London

Printed in Hong Kong

Second edition 1981.

根据 The Macmillan Press Ltd., 1981年版译出

责任编辑：伊 岸

封面设计：费小渝

[英] J. C. 克拉利著 王振明 黄慧力译

电子仪器的可靠性

重 庆 出 版 社 出 版、发 行(重庆长江二路 205 号)

新 华 书 店 经 销 重 庆 印 制 一 厂 印 刷

*

开本 850×1168 1/32 印张5.625 插页2 字数135千

1987年4月第一版 1987年4月第一版第一次印刷

印数：1—3,780

*

ISBN 7-5386-0818-5

TN · 2

书号：15114 · 29 定价：1.40元

科技新书目 145—289

内 容 简 介

本书阐述了与电子仪器和设备的可靠性有关的一系列问题，包括：可靠性的定义、可靠性预测、影响可靠性的因素，以及如何设计具有高可靠性的电子仪器和系统。本书内容深度适合大学高年级学生，对从事电子仪器设备设计、制造、使用的广大科技人员、技术管理干部和有关专业的大学师生均有较高参考价值。

前 言

电子仪器设备可靠性最初的详细研究是用于改进军用通讯装置和导航系统。当时研究出来的技术后来被改进用于对高可靠性要求特别高的许多其它应用，例如民航电子系统。

过去二十年中，电子技术的发展增加了人们对可靠性的兴趣。例如数字电子计算机从稀有的、不可靠的设备发展成为大工业企业和商行的异常重要的管理设备，成为许多过程控制和工厂管理系统的中心单元。此外，固态器件和集成电路大大降低了电子仪器的价格，非常复杂的电子仪器也变得经济实用。由于电子仪器在工业和商业中应用越来越广泛，设备使用者们对其可靠性和可用性产生了很大兴趣，现在，人们已对这两个技术指标给予更多的注意。

因此，与设计、测试或使用电子仪器及构成仪器的元件有关的工程师们都需要懂得影响可靠性的因素，懂得测量和规定可靠性的方法，懂得在需要时如何提高可靠性。

本书内容的深度适合大学高年级学生。我们认为这种深度最适合介绍电子仪器可靠性这一课题，因为对这一题目的任何详细的研究都要求懂得电子工程的许多方面。其中包括模拟信号和数字信号的传输和处理、线路和系统设计、元件特性和公差。虽然本书的内容没有达到研究生学习的深度，但仍可把本书作为课题的引论，然后对专门的题目进行详尽的研究。

本书的许多计算包括概率论定律的简单应用和一些统计学的知识。因为所有的工程数学教程中没有包括这些数学知识，第二

它概括地进行了介绍。此外需要的数学只有初等代数和简单

书中提到的英国标准的副本可以从英国标准局销售部得到，

伦敦NI 9ND, Pentonville路107号。

从本书第一次出版以来，大规模集成电路的发展大大改变了电子仪器制造的方法，明显的趋势是使用数字系统、数字测数字传输的方法，以及使用微处理机。所有这些变化都影响可靠性的评价、对高可靠性的设计和有效地使用冗余度。

在准备本书第二版时，我新增加了几节来研究这些问题，以充与软件可靠性和测试有关的问题。

伯明翰大学J. C. 克拉利

目 录

第一章 序言	1
1.1 绪论.....	1
1.2 历史的回顾.....	1
1.3 可靠性的定义.....	3
1.4 什么是可靠性的效用?	4
1.5 平均故障间隔时间.....	7
1.6 平均失效时间.....	9
1.7 可用性.....	9
1.8 不可用性或停机率.....	11
1.9 环境条件的影响.....	12
1.10 故障率和平均故障间隔时间(MTBF)的一般定 义.....	14
第二章 数学基础	18
2.1 概率.....	18
2.2 概率的古典定义.....	18
2.3 用相对频率定义概率.....	20
2.4 对立事件.....	20
2.5 复合事件.....	21
2.6 相容事件的联合概率.....	24
2.7 一般加法定理.....	26
2.8 条件概率.....	28
2.9 贝叶斯定理.....	30

2.10	概率图表	33
2.11	二项式分布	35
2.12	二项式分布应用举例	40
2.13	最大可能出现的结果	43
2.14	泊松分布	44
2.15	泊松分布应用举例	47
2.16	指数失效定律	49
2.17	统计学	53
2.18	平均值	53
2.19	其它定位度量法	54
2.20	变率	55
2.21	正态分布	57
第三章	可靠性预测	62
3.1	系统划分	62
3.2	可靠性模型	62
3.3	串联系统的失效分析	64
3.4	串联系统应用举例	66
3.5	并联系统	68
3.6	其它并联结构	69
3.7	并联系统应用举例	70
3.8	混合系统的分析	72
3.9	冗余度的使用	73
3.10	时间冗余度	75
3.11	纠错编码	77
3.12	多通道冗余度	79
3.13	冗余级	82
3.14	双重开关装置的使用	86
3.15	三重冗余度	87

3.16	二重系统和三重系统的比较.....	89
3.17	四重逻辑.....	92
3.18	冗余系统的平均故障间隔时间.....	93
3.19	近似的方法.....	96
3.20	集成电路.....	97
3.21	设计故障.....	100
3.22	软件故障.....	101
3.23	失效方式对设计的影响.....	102
第四章	元件失效数据.....	105
4.1	失效率随时间变化.....	105
4.2	失效的类型.....	107
4.3	影响失效率的因素.....	109
4.4	温度的影响.....	110
4.5	温度和失效率.....	110
4.6	估计内部温升.....	113
4.7	电源电压的影响.....	115
4.8	环境因素.....	116
4.9	测量失效率的难点.....	117
4.10	失效率数据的来源.....	118
4.11	置信度极限和可信度.....	121
4.12	评价试验结果.....	122
4.13	序贯试验.....	125
4.14	仪器的环境试验.....	127
4.15	筛选和失效方式分析.....	130
4.16	筛选试验.....	131
4.17	对特别高的可靠性的需要.....	132
第五章	可靠性设计.....	136
5.1	可靠性设计的几个方面.....	136

5.2	元件公差的影响.....	137
5.3	最坏情况下设计开关线路.....	138
5.4	最坏情况下设计的困难.....	140
5.5	统计设计.....	141
5.6	元件选择.....	141
5.7	降额使用以提高可靠性.....	144
5.8	对元件质量的评价.....	145
5.9	机械设计.....	148
5.10	干扰和噪声的防护.....	149
5.11	冗余度的使用.....	152
5.12	需维修的和不需维修的系统.....	154
5.13	故障指示器的使用.....	155
5.14	数字故障指示器.....	156
5.15	模拟冗余度.....	157
5.16	并联冗余度.....	159
5.17	“失效—安全”线路.....	161
5.18	集成电路冗余度.....	164
5.19	今后发展的趋势.....	168

第一章 序 言

1.1 绪 论

在过去二十年中,由于电子仪器仪表越趋复杂,并用于承担各种重要的任务,人们便越来越重视电子仪器和设备的可靠性。尽管电子仪器和设备的可靠性对于从事实际工作的工程师们有普遍的兴趣,然而可靠系统的研究,设计及评价作为一项专业的工作只得到有限的认识。原因之一无疑是可靠性工程师们涉及的课题非常宽。它们包括概率论和统计学这样一类数学课题,包括电子元件和器件的特性以及电子仪器设备的设计和制造等实际问题,在研究失效和锈蚀时还涉及物理和化学的理论,也可能还要在很宽的条件范围内,对元件和仪器进行环境条件试验。于是关心仪器设备可靠性的电子工程师们除了他自己的工程领域里特有的问题外,还会遇到各种各样的数学问题和科学问题。

1.2 历史的回顾

对可靠性工程所作的大部分工作都是为了解决实际的问题,为了实际的应用。因此,着手详细研究之前,我们将简单地回顾一下这个课题简短的历史。在1939年至1945年的第二次世界大战前,对电子仪器设备的可靠性不够重视。当时大部分的仪器设备很简单,而且只用很少的元件,因此,满意的可靠性水平很容易达到。另外仪器设备只在没有过热、振动或潮湿的良好环境里使

用。

战时，情况发生了急剧变化；要求仪器设备经受沙漠的酷热、高寒、和高湿度，在技术上仪器变得更先进，更复杂。

所有这些因素增加了失效的机会。研究和改进可靠性，使军用设备能长期满意地使用成了一个重要的课题。美国人战时设备的记录说明了问题的严重性；他们指出大部分电子仪器设备只运转大约三分之一的时间，而维护修理电子仪器设备的平均费用大概是最初购买设备成本的十倍。

由于电子管特别脆弱，因此在1946年美国航空公司建立了电子管失效的研究小组，并且研究出一种特殊的、较可靠的电子管。对其它电子元件也进行了同样的工作，美国政府并于1952年成立了电子仪器设备可靠性咨询小组。五年以后该小组发表了一份由政府正式通过的仪器设备可靠性的技术标准及试验的报告。此后大部分为军用购买的仪器设备的技术要求中都有可靠性要求，以后民用航空公司也照同样方法执行。

后来人造卫星和其它运载火箭的发展，对电子仪器设备的可靠性提出了日益增加的要求，对这个课题重新投资开始了进一步的研究。

在英国曾有类似的为研究军用特种优质电子管的发展计划。要求这些电子管比一般民用产品更可靠，对它们的特性给予更全面的規定。后来，晶体管加入了特种质量器件的行列，它们的应用扩大到民用范围，例如可靠性特别高的，重要的电话设备。

在消费性电子设备方面，最近十年期间引人注目的发展是宁可大量增加电视接收机的出租而不是增加销售。出租设备的可靠性对出租公司特别重要，因为它决定了公司的利润。同一公司使用的大量接收机的使用情况详尽地记录了所有的故障，暴露了仪器设备的一些缺点。这些信息传送给制造厂商，用于改进仪器设备。

目前，需要高可靠性的大多数应用大概是海底电缆的水下增音器，为了使电话管理机构的投资得到合理的收益，在二十多年的时间里，增音器必须也具有很高的可靠性。

在这些条件下，管理机构必须准备为评价可靠性的程序、为购买元件而付出相当高的费用。

1.3 可靠性的定义

可靠性这个词除有普通定性的定义之外，当应用于工程器件或工程系统时，还有精确的含义。它定义为“在规定的环境条件下，系统能按规定的性能在规定的时间内正常工作的概率”。当环境温度为摄氏 25 度且无振动的条件下，在 200 小时以上的时间里，小型计算机的可靠性是 80%。为了更完全地定义条件，可能还必须规定电源电压的最大变化和相对湿度。

完整地规定环境条件是十分重要的，即电气的和电磁的环境情况、温度及其变化、气候条件。例如象浓雾、结冰、尘埃、湿度，以及力学条件，例如振动的频率和振幅。电气条件包括输入信号的范围，干扰，电源电压的变化，开关电源产生的瞬态变化的大小，如果可能的话，还有输出负荷的变化。电磁环境是很重要的，如果仪器工作场地附近的其它地方有产生很大电磁场的设备。对空间技术和核反应堆及核电站应用的电子仪器，我们必须规定幅射线的水平，或设备可暴露的总辐射量。

上面所给出的可靠性一般定义的意思是：对某个仪器设备确定的每个可靠性数值与运转的周期、规定的性能和工作条件都有关。通常，在许多情况下，用户不希望在这些特殊环境条件下使用仪器。需要的是必须能从已获得的数据估计在不同条件下仪器的性能。尽管可应用某些一般的法则，但环境条件变化对仪器设备可靠性的影响并不总是可预测，特别是当用外推法时更是如

此。

于是，如果我们能得到环境温度为 70°C 、集电极耗散功率为150毫瓦和300毫瓦的某种晶体管的可靠性，我们就能完全确定集电极耗散功率为200毫瓦的该种晶体管在同一时期内的可靠性。但是耗散功率为450毫瓦的可靠性会有较大的误差，因为它大大超出已给的最大耗散功率。

尽管以上可靠性的定义普遍被人们所公认，然而它省去了与仪器设备的使用年限可能有关的因素。为了在规定的时间内工作而没有故障，在开始观测的时期，仪器设备一定要正常地工作，但是该定义不能区分才开始它的寿命期的新仪器与已经运转了相当时间、出过毛病、修理过的仪器设备。新设备一般容易发生小毛病，要花时间寻找并修理它们，因此在仪器的最初使用期，仪器的故障率下降很快，以后故障率随着时间变化得就很慢了。大多数使用者只关心仪器的主要寿命期内的性能，而不关心开始运转的几百小时内的性能。在这种情况下，可在最初老化期后再确定仪器的可靠性，它说明了仪器在最初的不稳定时期后能够达到的性能。

1.4 什么是可靠性的效用？

可靠性不过是在一些设计方案中选择时必须考虑的电子器件或系统的一个特性。从用户的观点来看，决定哪种设计最好的最合理的准则是让总寿命成本最小。这种办法要估计购置设备和原始备件的成本，以及正常维修和替换部件的费用；还要估计在有些情况下设备没有预先告警就失效和必须将设备退出使用以进行修理的费用。

在仪器总寿命期内，上述成本估计的总数被用作价值的判据，用以给出最少的总寿命成本。因此，设备的可靠性成为一个很

重要的设计参数。当可靠性增大时，为在失效情况下备用而购买仪器的成本、购买备用替换零件的费用、维修人员的费用都减少了。但是为提高可靠性进行的研究与设计的费用，以及最初购价迅速地增加，因此，可靠性提高到一定程度后，再进一步提高可靠性不会得到任何经济上的益处。

图 1.1 给出了成本随着可靠性变化的大概情况。最初购价反映了为提高可靠性而额外支付的设计和研发费用，以及购买可靠性更高(更昂贵)的元件成本。这条曲线的斜率还取决于生产规模；因为制造的仪器越多，设计成本就可摊给更多数量的仪器，每台设备的总成本就减少了。

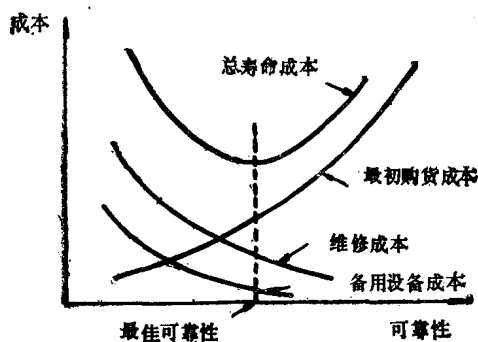


图 1.1 成本与可靠性的关系

在一整套设备中由几个仪器单元构成时，必须保持一些附加单元，以便替换出现故障和维修的单元。当设备的可靠性提高时，就不需要多少备用单元。

任何复杂而昂贵的电子设备的买主都想有一大批不同的方案以供挑选，正如图 1.1 所给的成本分析一样。因而他能估计每种方案的总寿命成本并挑选最低廉的方案。遗憾的是这种详细的资料很难得到，必须根据几个孤立的资料进行选择，而不能根据图 1.1 那样的完整曲线进行决策。

搜集资料的困难之一是精确预测维修费用。尽管设备的其他用户和设备的制造者可能有失效率和可能发生的故障种类的有用的统计资料，然而修理故障所花的时间和费用在很大程度上取决于用户修理机构的种类和工作人员的技能。于是，预测维修费用时，用户必须考虑所有这些因素，并预计到来若干年内需要的成本费用。

不管备件的数量有多少，必须专门安排备件，以保证在仪器的整个寿命期内都有备件。

然而，图 1.1 所需要的详细资料在某些情况下很容易得到，对选择不同的方案有足够的精度。首先，当用曲线进行的大多数设计是冗余系统时，就可得到图 1.1 所需的详细资料，冗余系统的高可靠性是利用备用设备来获得的。

当基本系统，即为完成指定任务需要的最少数量的仪器的可靠性比最佳值小时，可以使用冗余系统。把基本系统两重布局、三重布局等，就可组装成更可靠的系统。在每种情况下它们的成本与可靠性都与基本系统有关，图 1.1 的连续曲线变为离散的点，每个点对应于基本系统的一种重迭次数。

在设备已有很长的研究时间后，可得到曲线的最初部分的更详细的情况。不是根据同一设备的不同设计来作图 1.1 的曲线，而是根据同一种设计研究过程中的每一个成功的步骤来作图。一旦明显看出最优可靠性已达到，研究阶段就结束，但时间和经费不足时，也许必须在更早的阶段结束设计。为选择最佳可靠性，以达到总寿命成本最低的标准，就要求设备有非常高的可靠性并具有相当长的寿命，而修理故障的费用或收入的损失是很大的。这种设备的例子是电子电话交换机，水下电话增音器和通讯卫星。

另外，有些系统规定必须有非常高的可靠性，因为出故障可能危及人的生命。当能见度很差时飞机的自动着陆设备，或者在

故障事件时自动关闭原子反应堆的设备都属于这种情况。在这些情况下最小的容许可靠性是由法令规定的，设计者必须根据这些规定来使总寿命成本最低。

随着电子学领域的扩大，大功率设备的改善在技术上可行，大量高可靠性的主要设备应用越来越广。于是要求不断研究出有高可靠性的元件，要求用现有元件生产出更可靠的系统的系统设计方法。

1.5 平均故障间隔时间

虽然在 1.3 节对可靠性的定义很能说明系统或元件的性能，但它有一个缺点，因为它必须规定工作时间。如果同一个设备在不同的时间工作，它们的可靠性将不同。因此同一设备可以有很大变化范围的可靠性的值，这取决于它的工作时间。很明显，在规定不依赖于工作时间的条件之下，测量仪器设备的性能是非常有用的。这将便于比较在不同时间工作的不同系统。例如，我们如果要在工作时间 200 小时的可靠性为 67% 的一个系统和工作时间 100 小时的可靠性是 82% 的另一个系统之间选择，就不能仅选择两个数字中大的一个。

不包括观测时间的、对性能最有效的测量方法是用平均故障间隔时间(MTBF)。

一个系统的平均故障间隔时间 M 可以用总的试验时间 T 和故障出现的次数 N 来度量。仪器每次出现故障后都马上修理并返回试验，修理时间都从总试验时间 T 中扣除。观测到的平均故障间隔时间由如下公式得出：

$$M = \frac{T}{N}$$

这个观测值不一定是真实的平均故障间隔时间，因为设备通

常仅仅在它总的寿命中进行抽样观测。于是观测值包括随机抽样误差，而从试验数据进行演绎分析时必须允许这种误差。

仪器设备可靠性的另一个表达方式是故障率，即是每单位时间内故障的数目。许多电子系统的大部分工作寿命期内故障率近似为常数。在这种情况下，故障率 λ 是平均故障间隔时间的倒数。

$$\lambda = \frac{1}{M}$$

但是，当 λ 随时间变化时，需要不止一个参数，以把 λ 表示为时间的函数，并且平均故障间隔时间是 λ 的更复杂的函数。

M 通常用小时作单位， λ 的单位是每小时多少个故障。元件的 λ 非常小，可以改变它的单位以给出更简便的数字。于是故障率可以表示为每1000小时的百分比、每 10^6 小时的故障数、或者每 10^6 小时的故障数。例如，一个平均故障间隔时间为 2000 小时的系统的故障率为：

$$\frac{1}{2000} = 0.0005 \text{ 个故障/小时}$$

或 每1000小时50%

或 每 10^6 小时有500次故障

以上所定义的平均故障间隔时间的概念可应用于能用代换修理出故障的元件的任何类型的设备，而其它因素是均衡的，平均故障间隔时间最大的仪器最可靠，而不考虑观测的时间。因此，平均故障间隔时间是可靠性的最方便的指数。

另外必须考虑的只有修理故障需要的时间。假如在任何情况下修理时间都相同，平均故障间隔时间最大的仪器就最令人满意。但是，有些情况下短暂的修理时间比很长的平均故障间隔时间更重要，需要其它度量可靠性的方法，这将在 1.7 节中讨论。