

WU XIAN DIAN DIAN ZI SHE BEI YUAN JIAN DE SHI YAN FANG FA

无线电电子设备 元件的试验方法

[苏] M. M. 涅克拉索夫等 著



电子工业出版社

无线电电子设备元件 的试验方法

〔苏〕M.M.涅克拉索夫 等著

傅家桢 王玉璉 刘恩昇 译

张 绪 礼 校

电子工业出版社

内 容 提 要

本书论述了可靠性物理的理论和技术问题。书中系统地综述了诊断产品失效的方法、设备和自动化技术以及通过非破坏性试验查明并剔除潜在不可靠器件的有关内容；叙述了根据物理预测和统计预测对产品可靠性进行工程计算以及提高产品可靠性及其测定精度的方法；列举了计算公式和具体计算实例；提出了提高产品质量的方法。

本书虽然是专为高等工科院校的师生所写，但是也可供从事无线电电子设备的设计、研制和使用的专业人员参考。

М.М. Некрасов и др
Испытания Элементов Радио-Электронной Аппаратуры
«Выща школа» 1981

无线电电子设备元件的试验方法

〔苏〕М.М. 涅克拉索夫 等著

傅家桢 王玉璠 刘恩丹 译

张绪礼 校

责任编辑 边 际

电子工业出版社出版（北京市万寿路）
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
山东电子工业印刷厂印刷

开本：850×1168毫米 1/32 印张：9.375 字数：210千字

1987年7月第1版 1987年7月第1次印刷

印数：1—6650册 定价：2.30元

统一书号：15290·344

序 言

我国十分重视无线电物理学和电子学领域内的理论和实验研究的发展，十分重视建立在广泛运用微电子学基础上的高可靠性无线电电子设备新型器件的研制和生产。

必须指出，世界上所有发达国家的科学和工业都面临着可靠性方面的许多共同任务：产品应用条件的研究和产品设计的最佳化；在考虑其工作条件的产品设计阶段估计可靠性的可置信的运算方法的研究；元件老化与失效机理的研究；防止失效方法的探讨；产品的非破坏性质量检查方法和可靠性评估方法的拟定与推广；用于无故障工作要求更苛刻的装置内的高可靠产品筛选方法的确定等。

提高产品可靠性的两种主要方法是：通过完善产品的设计，改进制造工艺及采用新材料、新电路方案等方法来消除失效的原因；以高置信度的有效检查方法查明潜在不可靠的试样。

当然，最有效的提高可靠性的方法是第一种。但是，在任何生产工艺条件下，即使是熟练掌握了的产品也可能发生失效。因此，各种成品的老练方法和各种发现潜在不可靠试样的方法也得到了广泛的应用。

采用统计方法来获取产品可靠性指标的信息会遇到很大困难。例如，为了求出子样容量为 10^3 个试样的失效率 $\lambda \approx 10^{-7}/h$ 的元件的可靠性，需进行长达10年左右的试验。因此，有必要探讨其他有效的预测可靠性的非破坏性试验方法，特别是以材料和装置的破坏过程的研究及产品在失效前的退化过程的预测为基础的方法。

在元件的现代制造工艺水平条件下，以深刻理解产品内发生

的物理过程为基础的非破坏性试验方法是最有前途的，这种方法是降低元件批量生产成本、减少元件生产损耗、提高元件质量和可靠性的根本手段之一。非破坏性试验可以稳定工艺过程和获取有效的信息。进一步完善这种方法之后，就能把可靠性标准写入产品说明书了。

作者对在审定手稿中提出宝贵意见的技术科学博士、教授 B. A. 伊格纳托夫和技术科学副博士、副教授 C. И. 波利什科致以深切的谢意。

作 者

译者序

随着电子设备和元器件日益广泛的应用，人们也越来越重视电子产品可靠性的提高。在这方面，我国科技人员也进行了广泛深入的研究，编著了许多著作，发表了许多文章。但其中多数只涉及可靠性数学方面的分析，而物理可靠性方面的研究较少，尤其是关于失效机理研究的专著更少。苏联M.M.涅克拉索夫教授等三人所著《无线电电子设备元件的试验方法》一书，专门论述了可靠性物理的理论与技术。该书系统综述了诊断电子产品失效以及通过非破坏性试验查明并剔除潜在不可靠器件的方法和设备；介绍了根据物理和统计预测对产品可靠性进行工程计算，以提高产品可靠性及其测定精度的方法；列举了计算公式和具体计算实例；提出了提高产品质量的方法。总之，理论与实践相结合，数学模型和失效机理相结合，是该书的特点，该书对我国广大的科技人员有较大的参考价值。因此，我们将该书译成了中文，以满足广大读者的需要。

本书虽然是专门为高等工科院校的师生所写，但是也可供从事无线电电子设备的设计、研制和使用的工程技术人员参考。

参加本书翻译的有：傅家祯(第一、二、五、六章)、王玉璠(第三、七章)、刘恩昇(第四章)。华中工学院张绪礼副教授校对了全部译稿，张永康和李本诗等同志审阅了译稿，就技术问题进行了订正。在此一并致以深切的谢意。

由于我们水平有限，译得不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者 1985.7.18

目 录

第一章 电子技术产品可靠性的基本概念和确定原则	1
§ 1.1 产品的可靠性和变化过程	1
§ 1.2 可靠性信息指标的分类	3
§ 1.3 元件可靠性的预测	11
§ 1.4 可靠性和互补性原理	15
§ 1.5 负荷作用因素与产品强度间的关系	16
§ 1.6 元件和系统不均匀性系数的确定	19
第二章 材料和元件的老化与损坏	27
§ 2.1 损坏的基本类型	27
§ 2.2 材料的击穿	30
§ 2.3 电迁移过程在破坏器件特性稳定性方面的作用	39
§ 2.4 有机材料的变质	46
§ 2.5 薄膜电阻元件损坏的规律性	50
§ 2.6 材料表面的破坏	56
§ 2.7 半导体的表面破坏和体破坏的特点	61
§ 2.8 疲劳现象在半导体器件损坏中的作用	66
§ 2.9 金属-介质-半导体复合结构的损坏机理	69
§ 2.10 材料机械破坏的规律性	74
第三章 电子技术产品中无源元件可靠性的预测方法和试验	80
§ 3.1 膜式电阻器的失效类型	80
§ 3.2 查明潜在不稳定的膜式电阻器的方法	84
§ 3.3 局部缺陷对非线绕电阻器质量的影响	88
§ 3.4 电容器结构对其可靠性的影响	93

§ 3.5	管形陶瓷电容器可靠性的估计	99
§ 3.6	薄膜电容器可靠性的预测	103
§ 3.7	用非破坏性方法确定薄膜电容器 的使用寿命和可靠性	113
§ 3.8	工作状态对薄膜电容器使用寿命 的影响及其计算	117
§ 3.9	电感质量的估计	120
第四章	半导体器件和电真空器件 的失效物理与可靠性试验	128
§ 4.1	电子技术产品的整体诊断与可靠性预测	128
§ 4.2	半导体二极管的质量检查和可靠性信息参数	135
§ 4.3	半导体二极管可靠性非破坏性检查的有效方法	140
§ 4.4	晶体管的失效机理及其可靠性的信息参数	144
§ 4.5	双极晶体管失效的特点	152
§ 4.6	利用 m 参数检查晶体管的质量	156
§ 4.7	锗功率晶体管制造过程中产生 的缺陷的非破坏性检测法	161
§ 4.8	电真空器件可靠性的预测	162
§ 4.9	测定直热式阴极不均匀性的方法	173
§ 4.10	炽热灯丝的可靠性预测	177
§ 4.11	电致发光器件可靠性的预测	181
第五章	微电路可靠性的预测	195
§ 5.1	微电路失效的类型	195
§ 5.2	集成电路失效的特点	198
§ 5.3	集成电路有源元件的失效机理	200
§ 5.4	金属化对集成电路失效的影响	204
§ 5.5	集成电路元件的参数失效	206
§ 5.6	金属化短路对集成电路失效的影响	215
§ 5.7	微电路管壳质量的估价	218

§ 5.8 金属化宽度对集成电路使用寿命的影响·····	220
§ 5.9 集成电路的试验·····	221
第六章 电子技术产品的非破坏性检查手段·····	224
§ 6.1 电绝缘结构和绝缘体通过吸收系数和 不均匀性系数的测定而进行的试验·····	224
§ 6.2 用外激电子发射法研究固体的表面·····	230
§ 6.3 电阻器低频噪声的频谱密度测量仪·····	232
§ 6.4 研究半导体表面解吸作用的受激接触电位差法·····	234
§ 6.5 晶体管通过噪声测定法进行的试验·····	236
§ 6.6 晶体管利用热阻测定法进行的试验·····	238
§ 6.7 根据对象的红外辐射测定结果评估其可靠性·····	241
§ 6.8 半导体器件 m 参数的测量·····	247
§ 6.9 通过 $\alpha = f(I\vartheta)$ 关系的示波法 来评定 p - n 结的表面状态·····	252
§ 6.10 利用扫描电子显微镜研究集成电路的元件·····	252
§ 6.11 半导体器件和集成电路的管壳 气密性检查方法和仪器·····	259
第七章 提高无线电电子设备元件和组件可靠性的方法·····	266
§ 7.1 保障可靠性的基本原则·····	266
§ 7.2 保障电阻器可靠性的方法·····	268
§ 7.3 陶瓷电容器的参数稳定化·····	270
§ 7.4 高压变压器电感组件可靠性的控制和保障·····	271
§ 7.5 保障晶体管可靠性的有效方法·····	273
§ 7.6 采用集成电路以提高无线电电子设备的可靠性·····	275
§ 7.7 采用多级金属化以保障集成电路的可靠性·····	279
参考文献·····	287

第一章 电子技术产品可靠性的 基本概念和确定原则

§ 1.1 产品的可靠性和变化过程

根据苏联国家标准 (ГОСТ 13377-75) 的规定, 所谓可靠性是指产品在相应于一定的使用、技术维护、修理、贮存与运输等条件所规定的范围内, 在额定的时间内, 完成规定功能的性质。

产品, 在保持其给定参数符合技术标准要求的条件下, 能够完成规定功能的状态, 叫作可工作状态。

产品的可工作状态遭到破坏的事件, 叫作失效。据以判定某产品失效的标准, 由该产品的技术标准文件规定。

可靠性的理论和实践是研究失效 (突然失效、退化失效、结构失效、从属失效、使用失效等) 发生的规律性、系统及其元件恢复工作能力的方法, 分析外部作用和内部作用对系统内发生的过程的影响, 建立可靠性计算和失效预测的基础, 确定系统及其元件在设计和制造过程中提高可靠性的方法, 以及在使用中保持可靠性的方法。

产品结构存在不均匀性, 会使其整体强度减弱。在作用力连续分布的情况下, 整体强度降低的区域同时也是单位负荷增大的部位。产品失效到来之前, 其结构中通常会出现一个负荷局域化的过程。

产品参数值的变化与产品的破坏过程有关。在退化失效的情况下, 产品的质量逐渐发生变化。各个质量变坏了的旧元件 (例

如，阴极失去发射能力）可用新元件替换。质量变化对参数值变化的速度有很大影响。反映在一定质量范围内破坏程度的参数变化过程，通常是导致局部缺陷区内能量（负荷）集中的过程。

破坏时发生的产品结构的变化是不可逆的。如果这一变化是导致产品失效的退化，则已损坏的元件不可能恢复到未损坏前的原始状态。人们一直在研究寻求消除引起产品失效变化的方法。例如，已发明几种磨损等于零的摩擦偶组件，正在研制具有“永恒”灯丝的白炽灯等。

结构的变化是在来自内部或外部的能量作用下发生的。但是，能量（物质）的不均匀分布也可能是为了使器件具有某种特定功能而事先设计的特殊结构。

科学院院士B.M.格鲁什可夫指出，能量在空间和时间上分布的不均匀性程度是一种信息。正象前面指出的，能量的不均匀分布可能是特意规定的，或者可能是工艺、结构、原材料等的不完善的结果。就是说，能量的不均匀分布是元件和系统失效的直接原因。并且，原则上如果能通过某种方式找出不均匀性的信息，就可以对系统的不均匀性作出定量的估计。为了能够根据变化系统的初始状态及其在变化过程中经受的作用来确定其后的各状态，就必须知道表征该系统最初时刻所处状态的各个量，以及表征该系统在给定条件下所处状态的各个量的变化规律。在没有变化过程的信息或者此信息不完全的情况下，通常采用概率法。对在负荷作用下其结构随时间而变的产品来说，变化速度是变化过程产生的能量的函数。这时可能有两种情况：与负荷相关的老化和与负荷无关的老化。第二种情况反映的趋势是：或者老化根本没有发生，或者老化不是由系统的工作负荷决定的，而是由环境的腐蚀性、系统材料和结构的不平衡状态引起的。

如果老化取决于负荷，则减小经受老化产品的负荷，就可使其寿命延长。允许负荷的大小不仅取决于产品的性能，而且决定于产品、环境和负荷组成的系统。

延长产品寿命的方法有四种：增大强度、减小负荷、减小结构内负荷分布的不均匀性(等强度原理)和降低产品的老化速度。前两种方法是解决问题的直接方法，但可能会受到产品技术特性的限制。第三种方法则取决于建立有效的测量不均匀性方法。第四种方法可成功地应用到工业上，如果已从保障可靠性的观点出发，研究过引起失效的物理过程并已制定出保护元件免受加速老化过程各因素影响的方法的话。

§ 1.2 可靠性信息指标的分类

ГОСТ 13377-75 规定的可靠性基本指标，是根据被研究产品是不可修复的还是可以修复的两种情况分别确定的。

对不可修复产品(那些在完成规定功能的过程中不允许修理，即一次使用的产品)，采用表1所列的可靠性指标。这些指标也可用于可修复的系统，即那些在完成其功能的过程中，在评价初次失效发生前的可靠性时容许对产品进行修理的系统。

对可修复的产品，采用表2所列的指标。

在评估所用装置或系统的某些使用参数时，要用到表示被评估参数的相对量的系数(表3)

人们用一定使用时期内的技术维护费用和损耗费用，制造、使用等总费用的最低准数，作为可靠性的经济估值。

对产品的贮存(运输)规定来说，采用下列指标：贮存(运输)时间内失效不发生的概率，失效前的贮存(运输)时间、失效前的平均贮存(运输)时间等。

可靠度、失效前平均工作时间、失效率、失效流参数(频数)、失效前工作时间等可靠性指标属于单值可靠性指标。单值可靠性指标还包括寿命指标(表4)、维修性指标(表5)和贮存性指标(表6)。

除了单值的可靠性指标外，还有综合的可靠性指标(表7、8)。

表 1

指 标	指 标 的 主 要 特 点	附 注
可靠度 $P(t)^*$: $P(t)=P(T>t)$, 其中, T 是产品自工作以来至初次失效的工作时间	1) $P(0)=1$ 2) $P(t)$ 是单调下降函数 3) $P(t)>0(t\rightarrow\infty)$ 4) 统计估计 $P(t)=\frac{N_0-n(t)}{N_0}$ 其中, N_0 是原有器件数, $n(t)$ 是在 t 时间内的失效器件数	认为器件在开始工作时正常 根据物理意义, $P(t)$ 只能随 t 的延长而减小 器件不可能无限久地工作下去
失效频率, 或设备自接通电源至失效期间的工作时间概率密度 $a(t)^{**}$	1) $1-P(t)=\int_0^t a(t)dt=Q(t)$ 2) Δt 时间内 $a(t)$ 的统计定义 $a(t)=\frac{n(t)}{N_0\Delta t}$ 3) $N_0\rightarrow n(t), \Delta t\rightarrow 0$ 时 $a(t)$ 的概率定义 $a(t)=-\lim_{\Delta t\rightarrow 0}\frac{P(t+\Delta t)-P(t)}{\Delta t}$ $=-P'(t)$ $a(t)=Q'(t)$	认为失效试样不可恢复也不能用正常的器件替换
失效率, 或器件失效(在 t 时刻前失效)前的条件时间概率密度 $\lambda(t)^{***}$	1) 统计定义 $\lambda(t)=\frac{n(t)}{N_{cp}\Delta t}$ 其中, N_{cp} 是 Δt 时间内正常工作的器件的平均数 2) 概率特性 $\lambda(t)=\lim_{\Delta t\rightarrow\infty}\frac{P(t+\Delta t)-P(t)}{P(t)\Delta t}$ $=-\frac{P'(t)}{P(t)}$ 或变换后 $P(t)=e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$	假定失效器件不可修复, 并且不用新的替换

续表

指 标	指 标 的 主 要 特 点	附 注
失效前平均工作时间 $T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n ti + T(N-n)}{n}$ 其中, ti 是第 i 个产品失效前的工作时间, N 和 n 分别为试验时间内的试验产品数和失效产品数, T 是试验时间		

* 人们往往不用可靠度, 而用失效率 $Q(t)$:

$$Q(t) = 1 - P(t)$$

$$Q(t) = P(T_1 \leq t)$$

** 利用 $a(t)$ 来估计被维护设备的可靠性是很困难的, 因为这样做需要有表征第一次故障 $a_1(t)$ 、一次和二次故障间隔 $a_2(t)$ 及二次和三次故障间隔 $a_3(t)$ 等分布的一组曲线。因此, 往往利用 $\lambda(t)$ 和 $P(t)$ 。

*** 不同分布规律情况下的失效率 $\lambda(t)$ 和可靠度 $P(t)$ 的表达式列于表 1。

表 2

指 标	指 标 的 统 计 估 计
故障时间 $\hat{T}_0$	$\hat{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^N ti}{N}$ 其中, ti 是第 i 个产品第 n 次故障的时刻
平均修复时间 T	$T = \frac{\sum_{i=1}^n \tau i}{n}$ 其中, τi 是修复的持续时间

表 3

指 标	指标的统计估计	附 注
可用率 K_T ,它决定了产品在 t 时刻处于正常状态的概率	$K_T = \frac{T}{T + T_B}$	K_T 决定了系统处于正常状态时的平均时间
被迫停歇系数,即在某个时刻不能工作的概率 K_{Π}	$K_{\Pi} = 1 - K_T = \frac{T_B}{T_B + T}$	在使用信息处理装置时,往往利用所谓停机系数,即维修所需时数与正常工作的时间之比: $K = \frac{\sum_{i=1}^n \tau_i}{\sum_{i=1}^n t_i}$ 其中, τ_i是第i次故障后的修复时间
由某类型元件引起的相对失效系数 K_0	$K_0 = \frac{n_i N}{n N_i}$ 其中, n_i是失效数, N_i和N分别为i类元件数和元件总数	该系数用来估计系统组成元件的可靠性

表 4

指 标	指标的基本特点	附 注
γ -百分数寿命,即产品未达具有给定 γ -百分数($\gamma/100$)概率的极限状态的工作时限	$\gamma/100 = 1 - F_p(t)$ 其中, $F_p(t)$是寿命分布函数	产品的给定百分数(γ)是规定概率, $\gamma=50\%$相当于中位寿命: $\hat{T}_{p=0.5} = \frac{t_{N+1}}{2}$ (N为奇数) $T_{p=0.5} = \frac{1}{2} \left(t_{\frac{N}{2}} + t_{\frac{N}{2}+1} \right)$ (N为偶数) $t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_N$是子样数为$x$的寿命有序取样

续 表

指 标	指 标 的 基 本 特 点	附 注
平均寿命, 或寿命的 数学估算值 $\hat{x}$	统计估计 $\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 其中, X_i 是产品寿命	寿命分布为指数分布时, 对截尾取样来说, 必须考虑寿命分布规律: $\hat{x} = \bar{x} + \frac{n-m}{m} x_s$ $\bar{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i$ 其中, m 是试验结束前寿命已终止产品的数量, x_s 是试验停止时的寿命值
产品的规定寿命或总工作时限, 达到此工作时间后, 不管产品状态如何, 均应停止使用。相邻中(大)修间的平均寿命		
报废前的平均寿命		从使用开始至极限状态引起报废止, 产品的平均寿命
中(大)修前的平均寿命		从使用开始起至第一次中(大)修止, 产品的平均寿命
γ -百分数使用寿命		进程使用寿命, 在此期限内产品不会以给定的 γ -百分数概率, 数量达到极限状态

续 表

指 标	指 标 的 基 本 特 点	附 注
平均使用寿命, 或使用寿命的数学期望 τ_{cp}	$\tau_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tau_i$ 其中, τ_i 是具有平均寿命的产品的使用寿命	在截尾取样的情况下, 估计 τ_{cp} 时, 正象平均寿命一样, 也需要考虑分布规律 τ_i
中(大)修间的平均使用寿命		
中(大)修前的平均使用寿命		从使用开始到第一次中(大)修止, 产品的平均使用寿命
报废前的平均使用寿命		从使用开始到因极限状态导致报废止, 产品的平均使用寿命

表 5

指 标	指 标 的 基 本 特 点	附 注
给定时间内的修复概率		产品恢复工作能力的时间不超过额定时间的概率。修复时间用于检测失效、查明原因以及消除其后果
平均修复时间, 或恢复工作能力的时间的数学期望 $\hat{T}_B$	在有 m 个产品的修复时间的统计数据 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ 时, $\hat{T}_B = \sum_{i=1}^m \frac{\tau_i}{m}$	