

无綫电电子設備的 可靠性与有效性的計算

[苏联] B. A. 魯茨基著



國防工業出版社

无綫电电子設備的
可靠性与有效性的計算



国防工业出版社

1966

內容簡介

本書討論了在設計開始階段無線電電子設備的可靠性的計算問題。全書共分四章。緒論和第一章說明了可靠性在新設備整個研制過程中的重要地位，並介紹了可靠性的基本概念及可靠性估算的一般關係式。第二、三兩章具體討論了兩種情況：故障密度為指數分布時設備可靠性的估算和漸變性故障的可靠性估算。第四章提出了有效性的概念，並用它來確定複雜設備的工作能力。書末有附錄、參考文獻可供參考。

本書可供從事無線電電子設備和自動裝置研制、使用的工程技術人員和對可靠性問題感興趣的人員閱讀。

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

[蘇聯] В. А. Луцкий

ИЗДАТЕЛЬСТВО АН УССР 1963

*

無線電電子設備的可靠性與有效性的計算

王泰楚譯

許偉文校

*

國防工業出版社出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第074號

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

國防工業出版社印刷廠印裝

*

787×1092 1/32 印張4³/₄ 100千字

1966年2月第一版 1966年2月第一次印刷 印數：0,001—4,000冊

統一書號：15034·1070 定價：(科六) 0.60元

目 录

緒論	5
第一章 可靠性估算的一般关系式	9
1. 可靠性的数量特征。复杂产品可靠性的确定	9
2. 电路储备	16
3. 可靠性理論中常用的几种基本分布	20
第二章 故障密度为指数分布时设备可靠性的估算	26
1. 一般关系式	26
2. 同使用条件有关的元件故障强度的确定	34
3. 根据实验结果计算可靠性特征量时的置信区间	44
第三章 渐变性故障的可靠性估算	50
1. 問題的提出。一般关系式	54
2. 以外部使用因素强度为变量的设备可靠性估算	60
3. 求正态分布随机变量各统计特征量时的置信概率和 置信区间	77
4. 部件可靠性估算的实例	81
第四章 确定复杂设备工作能力的特征量	94
1. 技术维护与适修性	95
2. 系统有效性的估算	107
3. 系统有效性的近似估算。“耐久性”的指标	115
4. 用平均损失的判据估算长期使用的系统的可靠性和 工作能力	127

附录 1	$\chi_m^2(2^n)$ 的数值表	146
附录 2	$L(q, n-1)$ 函数数值表	148
参考文献		150

无綫电电子設備的 可靠性与有效性的計算

[苏联]B. A. 魯茨基著

王泰楚譯

許偉文校



國防工業出版社

1966

內容簡介

本書討論了在設計開始階段無線電電子設備的可靠性的計算問題。全書共分四章。緒論和第一章說明了可靠性在新設備整個研製過程中的重要地位，並介紹了可靠性的基本概念及可靠性估算的一般關係式。第二、三兩章具體討論了兩種情況：故障密度為指數分布時設備可靠性的估算和漸變性故障的可靠性估算。第四章提出了有效性的概念，並用它來確定複雜設備的工作能力。書末有附錄、參考文獻可供參考。

本書可供從事無線電電子設備和自動裝置研製、使用的工程技術人員和對可靠性問題感興趣的人員閱讀。

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

〔蘇聯〕 В. А. Луцкий

ИЗДАТЕЛЬСТВО АН УССР 1963

*

無線電電子設備的可靠性與有效性的計算

王泰楚譯

許偉文校

*

國防工業出版社出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第074號

新華書店北京發行所發行 各地新華書店經售

國防工業出版社印刷廠印裝

*

787×1092 1/32 印張4 3/4 100千字

1966年2月第一版 1966年2月第一次印刷 印數：0,001—4,000冊

統一書號：15034·1070 定價：（科六）0.60元

目 录

緒論	5
第一章 可靠性估算的一般关系式	9
1. 可靠性的数量特征。复杂产品可靠性的确定	9
2. 电路储备	16
3. 可靠性理論中常用的几种基本分布	20
第二章 故障密度为指数分布时设备可靠性的估算	26
1. 一般关系式	26
2. 同使用条件有关的元件故障强度的确定	34
3. 根据实验结果计算可靠性特征量时的置信区间	44
第三章 渐变性故障的可靠性估算	50
1. 問題的提出。一般关系式	54
2. 以外部使用因素强度为变量的设备可靠性估算	60
3. 求正态分布随机变量各统计特征量时的置信概率和 置信区间	77
4. 部件可靠性估算的实例	81
第四章 确定复杂设备工作能力的特征量	94
1. 技术维护与适修性	95
2. 系统有效性的估算	107
3. 系统有效性的近似估算。“耐久性”的指标	115
4. 用平均损失的判据估算长期使用的系统的可靠性和 工作能力	127

附录 1	$\chi_m^2(2^n)$ 的数值表	146
附录 2	$L(q, n-1)$ 函数数值表	148
参考文献		150

緒 論

可靠性理論，是研究电子、电气、机械等系統在各种外部与內部物理化学作用下，其工作性能受影响的学科。这些作用包括气候因素、使用条件、貯存、老化、机械因素（振动、冲击等）。研究的目的是要对元件各种可能的状态作出估計，并对制造一个能保証可靠工作的系統提出建議^[1,2]。

可靠性問題是在五十年代初期提出的，这是由于当时复杂无綫电电子設備质量低劣的緣故。但技术发展总的趋势却要求采用更为复杂的电子設備，它必須更多地担負起操作人員的部分职能，因为人已不能以必需的速度和准确性来估計情况的变化，去进行計算并采取必要的决定。由于当时对設備的可靠性沒有給予特別的注意，所以可靠性就不能滿足所提出来的要求，也就是設備的质量非常差。例如，根据国外1949年的材料，无綫电通信設備大約有14%的时间是处在停机状态，而水声設備和雷达設備处于停机状态的时间分别为48%和84%^[3]。

在1950~1951年間，国外已非常明确地提出了可靠性的問題。十年来这一方面的工作，在保証設備的可靠性上，取得了一定的成績。例如，根据文献[6]，在1959年內，船舶无綫电发送設備、水声設備和雷达設備的停机時間，若不考慮檢修時間在內，分别为2.6%、2.8%及0.2%；若考慮檢修時間，則分别为7.7%、6.7%及2.9%。因此，在1949~

1959 年間，虽然設備是大大复杂化了，但設備因故障而停机的時間却平均縮短到原来的十分之一以下。

工业用各种自动化設備的可靠性要求更高。在研制这些設備时，由于对可靠性問題或者估計不足，或者根本不了解，往往对可靠性未提出明确的要求，結果制造出来的設備质量不够好，且由于在最后几个設計阶段的各种返工，設備研制費用很高。

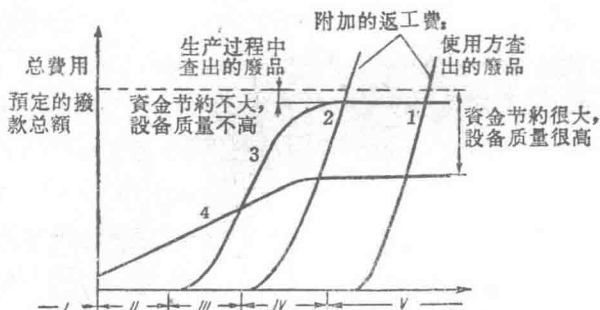


图 1 各不同設計阶段的費用分布

I—計劃；II—草圖設計；III—技術設計；

IV—交付生产；V—交付使用方。

图 1 所引用的几条曲綫^[10]，說明了研制費用与保証設備可靠性的組織工作状况的关系。曲綫 1 說明总費用增长得非常快，这是因为仅在最后阶段，在产品不符合技术要求而遭使用方报廢时才肯花这笔旨在保証可靠性的費用。这时由于产品屡次退回工厂，重新設計和返工更改，因此費用大大超过預定的撥款總額。

企图在交付生产阶段，利用产品质量控制来干預設備的

制造过程，結果也是无济于事（曲綫 2），因为质量的控制不能弥补因不好的結構而引起的可靠性方面的缺陷。在这种情况下，設備制造費用同样也超过預定的撥款总額，因为制成的产品不得不还要改变綫路和返工。

在技术設計阶段保証可靠性，可以大大改善費用指标（曲綫 3）。但是，只有在設計开始阶段就投資这笔必要的費用，問題才能得到最好的解决（曲綫 4）；制造出来的設備将是最完善的，費用也是最少的。

因此，为要达到高的可靠性，虽然在所有研制阶段，包括成批生产过程中設備的改进在內，必須坚持不懈地进行保証可靠性的工作，但在設計开始阶段进行的可靠性計算起着非常重要的作用。

我們可根据在規定条件下进行的元件抽样試驗的結果或使用經驗所得到的試驗数据，預測大量元件和部件损坏的規律性。这些規律同样也可以根据理論假設予以确定，因为故障通常都是在某些材料性能变化之后发生的，而后者的变化是可以統計計算的。例如，气候条件、供电电压或其他使用因素的变化会使組成設備的各个元件的工作参数也发生一定的变化，使用条件会以某种方式影响电工材料老化过程的速度。

当然，新設備在設計开始阶段，还没有在使用条件下該設備可靠性的必要試驗数据。設計人員所持有的原始数据非常有限，通常都是一些新部件在實驗室条件下短時間試驗的結果以及在某些使用条件下一些其他設備的可靠性統計数据，而这些使用条件又往往同正待研制的設備所預定的使用条件很不一样。

本书內所討論的各关系式，可以在理論上估算屬於工作参数漂移所引起故障的設備可靠性，也可用最少的原始統計数据計算屬於突变性故障的設備可靠性。在最后一章里，对于用某些指标来确定复杂系統有效性的問題也予以很大注意。这些指标同可靠性的指标相比，它們能更全面地評價多种用途的系統的工作能力。

第一章 可靠性估算的一般关系式

1. 可靠性的数量特征。复杂产品可靠性的确定

确定可靠性的主要统计特征量

系统或元件，在一定的使用条件下，保持其各个参数在规定范围内，并完成一切给定职能的物理性能，我们称为可靠性。可靠性 r 就是产品正常（无故障）工作的概率 $p(t)$ ，即 $r = p(t)$ [2]。今后谈到产品的可靠性时，所指的就是在给定的使用条件下产品正常工作的概率。

故障密度 $a(t)$ 和故障强度 $\lambda(t)$ 是确定产品可靠性的两个基本的统计特征量。

故障密度是单位时间内发生故障的产品数同受试产品的总数之比

$$a(t) = \frac{\Delta n(t)}{N\Delta t}, \quad (I.1)$$

式中， $\Delta n(t)$ 是在 t 到 $t + \Delta t$ 的时间间隔内发生故障的产品数； N 是受试产品的总数（在试验过程中，发生故障的产品不予掉换）。当 $N \rightarrow \infty$ 和 $\Delta t \rightarrow 0$ 时，我们就从统计的概念转为概率的概念，这时 $a(t)$ 也就成为产品故障时间的概率密度。产品的可靠性是时间的函数，它可用下式求得：

$$r(t) = 1 - \int_0^t a(t) dt. \quad (I.2)$$

因此，产品在 t_p 时间内发生故障的概率 $q(t_p) = 1 - r(t_p) = \int_0^{t_p} a(t) dt$ ，它的数值等于从 0 到 t_p 这一段曲线 $a(t)$ 和纵座标 $a(t_p)$ 所构成的面积。由曲线 $a(t)$ 和两个纵座标（它对应

于某两个时刻 t_1 和 t_2 构成的面积确定了在这段时间间隔内发生故障的概率。

故障强度等于在单位时间内发生故障的产品数同这段时间开始时正常工作的产品数之比，它可用下式示出^①：

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{(N-n)\Delta t}, \quad (\text{I.3})$$

式中， n 是在时刻 t 时已经发生故障的产品总数。

设备故障强度和可靠性都是时间的函数，它们之间有下列关系：

$$\lambda(t) = -\frac{r'(t)}{r(t)},$$

从而得到

$$r(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (\text{I.4})$$

特征量 $a(t)$ 和 $\lambda(t)$ 之间有下列关系：

$$a(t) = \lambda(t) \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]. \quad (\text{I.5})$$

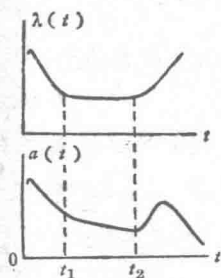


图2 典型的随时间变化的 $a(t)$ 和 $\lambda(t)$ 曲线

典型的 $a(t)$ 和 $\lambda(t)$ 的曲线示于图2。在曲线起始段 $0 \sim t_1$ ，故障密度和故障强度的值都很大。这是因为：第一，在大量生产时，有疵病的元件这时贻尽“烧坏”；第二，在研制或采用新产品的情况下，这时最容易发生结构设计上的、或使用人员的错误。通常称这一段为试运转时期。

时间 t_2 以后，故障密度和故障强度又都增大，这多半是因为元件老

① 当 $N \gg n$ 时。——校者

化。通常在給定的使用条件下， $t_1 \sim t_2$ 的故障强度差不多是不变的。

我們可将故障发生以前的产品平均工作時間 T_0 看成是工作時間的数学期望：

$$\begin{aligned} T_0 = M[T] &= \int_0^{\infty} t dQ(t) = \int_0^{\infty} t g'(t) dt \\ &= - \int_0^{\infty} t r'(t) dt = \int_0^{\infty} r(t) dt. \end{aligned} \quad (I.6)$$

因此， T_0 等于由可靠性曲綫和座标軸所构成的一块面积。

在沒有电路儲备的設備內，如果一个部件或一个元件发生故障，整个設備的工作就遭到破坏。一般說来，某一元件最初发生的故障（独立性故障）会引起其他元件也发生故障。但假如不考虑这类派生性故障，我們就可以认为，发生故障的事件是相互独立的。根据概率論关于独立事件同时发生的定理，設備的可靠性可以用乘积表示如下：

$$R(t) = \prod_{i=1}^{\alpha} r_i(t), \quad (I.7)$$

式中， $R(t)$ 是設備的可靠性； $r_i(t)$ 是第 i 个元件（或部件）的可靠性； α 是設備內的元件或部件的数量。

根据工作人員手头拥有的特征量是 $a(t)$ 还是 $\lambda(t)$ ，則可用下列关系式相应地求出設備的可靠性：

$$R(t) = \prod_{i=1}^{\alpha} \left[1 - \int_0^t a_i(t) dt \right], \quad (I.8)$$

或者

$$R(t) = \exp \left[- \sum_{i=1}^{\alpha} \int_0^t \lambda_i(t) dt \right] = \exp \left[- \int_0^t \Lambda(t) dt \right], \quad (I.9)$$

式中, $\Lambda(t)$ 是整个设备的故障强度, $\Lambda(t) = \sum_{i=1}^{\alpha} \lambda_i(t)$; $a_i(t)$

和 $\lambda_i(t)$ 分别是第 i 个元件的故障密度和故障强度。

考虑到使用条件时的可靠性计算的关系式

如果使用条件严格地加以规定, 并且同取得特征量 $a(t)$ 和 $\lambda(t)$ 时的条件一致, 那么计算元件可靠性所用的公式 (I.2)、(I.4) 以及计算整个设备可靠性的公式 (I.8)、(I.9) 都是正确的。如果使用条件改变了, 可靠性的实际值就不会同计算值相符。

通常, 使用条件可根据全部的外部作用强度来确定, 其中包括气候因素 (湿度、压力、外部温度); 机械负载 (振动、冲击、加速度); 使用因素 (工作时间、线路状态、供电电压偏差) 等。我们假设, 影响设备可靠性的外部因素的数目等于 g 。而这些因素的强度是 $t_1; \dots; t_g$ 。

设备的使用条件在多数情况下都不能给定得非常精确。通常, 它们是在某个范围内随机地变化, 因此在规定的使用条件下, 我们可以将各种外部作用强度看成是符合概率分布律的随机变量 (图 3) ^[14]。

设 $\varphi(t_1; \dots; t_g)$ 是规定的使用条件外部作用的多维概率分布密度。可靠性特征量, 即产品的故障密度和故障强度, 是外部因素强度 $t_1; \dots; t_g$ 的函数: $a(t) = a(t_1; \dots; t_g)$ 和 $\lambda(t) = \lambda(t_1; \dots; t_g)$ 。根据公式 (I.2)、(I.4)、(I.7)、