

第 10 篇 可 靠 性 基 础

主编单位

上海机械学院

合稿人

秦永烈

编写人

黄海滨 秦永烈

特约编辑

许 康

常用符号表

AQL——合格质量水平

$A(t)$ ——有效度

$F(t)$ ——不可靠度

$f(t)$ ——故障分布密度函数

LFR——批允许失效率

LTPD——批允许次品率

MTBF——平均无故障时间

MTTF——失效前平均时间

MTTR——平均维修时间

$M(t)$ ——维修度

$R(t)$ ——可靠度

$\lambda(t)$ ——入效率

第1章 概 论

1 可靠性基本概念

一个产品（可以是系统、设备、部件或元件，下同）的可靠性通常定义为：在规定条件和规定时间或动作次数内，完成规定功能的能力。它涉及四个方面，即：条件、时间、功能和能力。这里的条件是指产品所处的工作条件（如电压、负载等）、环境（如温度、湿度、大气压力、振动、冲击、电磁干扰等）和维护条件（如备品、备件数量和操作人员的技术水平等）。规定条件不同，产品的可靠性也不同。规定时间的长短视具体产品及其使用要求而异，一般说，产品工作的时间愈久，其可靠性就愈低。功能系指产品的技术性能指标。当完不成功能时就叫做故障或失效。故障通常是针对可修复产品而言；而失效是针对不可修复的产品。完成功能的能力的大小通常以可能性或概率来表示，概率需从大量数据中统计而得。

产品质量与可靠性的关系一般可以图10.1-1表示。图中固有可靠性是指产品在设计、制造时内在的可靠性，它又可分为结构可靠性和性能可靠性。前者指在内外因素作用下，产品的线路、元器件、焊点、屏蔽状态、材料强度、机械结构以及制造工艺等结构方面的可靠程度；后者指在内外因素作用下，产品的精确度、线性度等性能指标不超出规定容许范围的可靠程度。

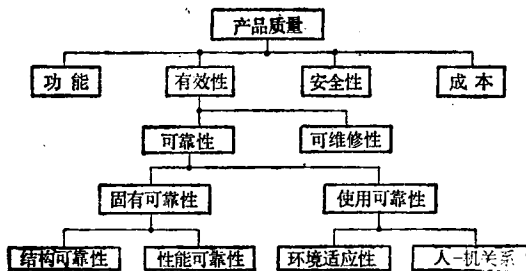


图10.1-1 产品质量与可靠性的关系

使用可靠性，是指使用和维护、周围环境以及人为因素等对产品可靠性的影响。

环境适应性，是指产品对环境条件影响的适应

能力。有时把可靠性与可维修性总称为有效性，它表示产品在规定时间内维持其功能的可能性，它决定于产品出故障可能性的大小，发现、排除故障的快慢以及平时的保养、检修、更新、备件是否足够等。

可靠性是产品质量的一个重要组成部分，它是衡量产品是否经久耐用的一种综合性质量指标。产品的全面质量指标应是：性能优良、运行安全可靠、结构简单轻巧、使用维护方便和价格便宜。

有时狭义的质量仅指产品的功能，这是产品的基本指标。如果一个产品连基本功能都达不到，其可靠性当然也就无从谈起；但若一个产品的可靠性很差，经不起时间的考验，那么，即便是最好的功能也不能充分发挥作用。

产品的可靠性十分重要，自动化仪表的可靠性尤为突出。高度可靠的仪表不仅能确保生产过程长期稳定可靠地运行，还将有效地缩短系统的研制或投产周期，减少投资、维修费用，扩大市场竞争能力。此外，随着科学技术的发展，一些现代化仪表及系统愈益庞大、复杂，所用零部件数日益增多，使用条件更加恶劣多变，安装密度也在不断上升，加上新技术、新器件的涌现，使以往的经验越来越不能适应等等，要求人们必须重视和研究仪表产品的可靠性和环境适应性，使之不断得到改进和提高。当然，产品可靠性愈高，成本费用也愈大，因此，不能追求过高的可靠性，否则，如图10.1-2所示，超过最佳点A后，总费用又将明显增加。可靠性工程设计的根本任务就在于，以最合理的投资费用，在规定的交货期间和保证安全生产的条件下通过定量控制失效或故障的发生来计划并实现产品的预期可靠性设计指标。

2 可靠性工作的基本内容

产品的可靠性与其原始设计以及制造、使用与维护、直到报废为止整个寿命期间的活动密切相关。从图10.1-3可以看出，可靠性是一门范围广泛的综合性技术，其工作内容大致可以分为以下三方面：

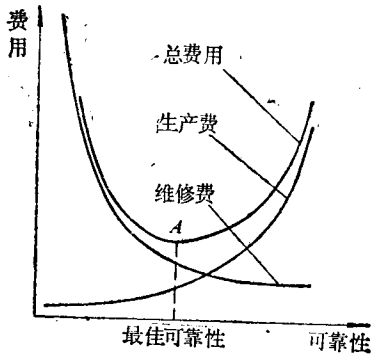


图10.1-2 可靠性与费用

生产费包括：起始投资、工程设计费、生产费、零部件采购费、研制费、试验分析费等
 维修费包括：维修费、备件和测试设备费、维护人员及其培训费、仓库费、重新安装费等

1) 可靠性工程 包括产品的可靠性和可维修性设计及其审评、合同承包者的验收选定、元部件的选购和筛选、失效模式效应分析、可靠性预计和分配、可靠性增长和验证、质量控制和验收试验、失效分析、对生产和现场使用的退化因子评定，以及现场数据收集和反馈等；

2) 可靠性物理 主要包括通过正常的、

特别是加速应力条件下产品的失效分析，弄清产品的主要失效模式和失效机理及其与应力、时间的关系，以及旨在预计、评估、控制或消除产品失效的数学、物理模型，有关的纠正措施建议等；

3) 可靠性数学 研究有关可靠性的数学理论和数据处理的方法。

此外，还应包括建立国家级和企业级可靠性管理体系，以从事有关可靠性的政策研究、人员和经费审定、可靠性规划、有关规范标准制定、QC（质量控制）小组建立和无缺陷运动、可靠性认证、数据收集和交换、技术交流与国际协作、以及可靠性宣传、教育、出版等可靠性管理事宜。

产品可靠性的高低，由计划、研究、设计、采购、试制、生产、检验、保管、运输、使用和维护等各个阶段所决定（见图10.1-3），因此，部门之间的平衡和协调非常重要。另外，有些重大决策，特别是有关投资、人员、物资的调配等，必须由高一级的领导来决定。所以，要做好可靠性工作，保证产品质量，各级管理人员都应十分重视，以各级可靠性管理组织为中心，广泛发动群众，抓住可靠性计划的制订和贯彻。只有这样才能收到事半功倍的效果。

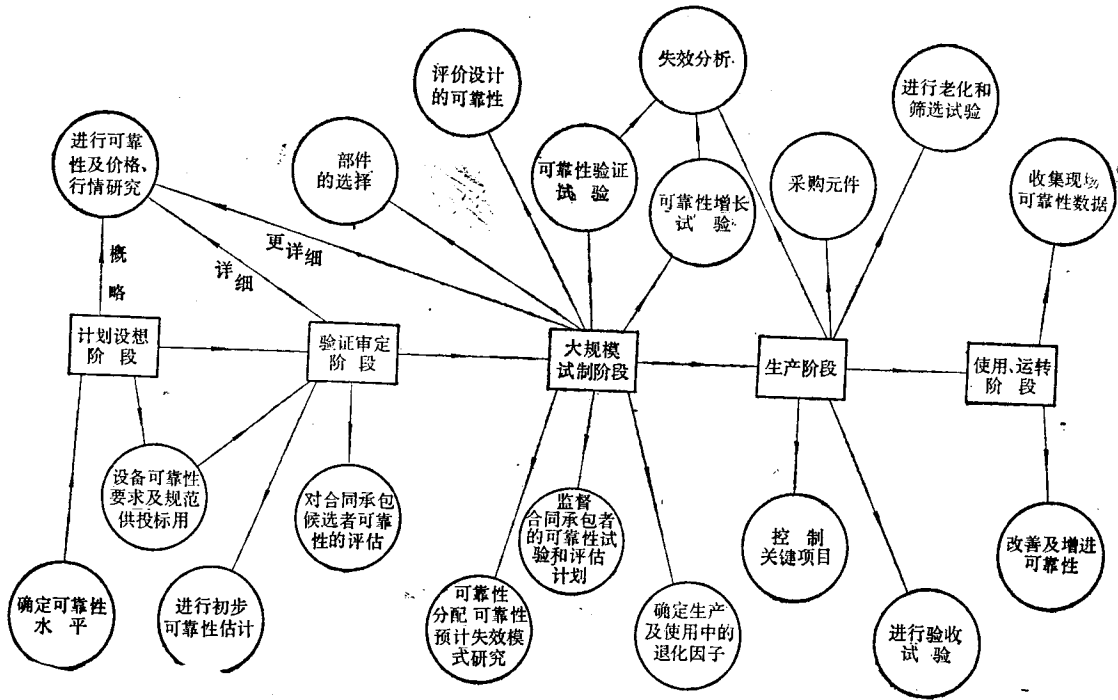


图10.1-3 可靠性工作内容

第2章 可靠性原理

本章介绍可靠性原理中有关概率分布、可靠性特征量，可靠性分配、可靠性预计、失效模式与效应分析等。有关可靠性基础理论之一的概率统计知识在第5篇中介绍。

1 常用概率分布

在可靠性工作中常用的概率分布、失效分布密度函数、可靠度函数、失效率函数和特点见表10.2-1。

在可靠性技术中指数分布应用最广，它常用来计算元器件、部件或系统的可靠度。

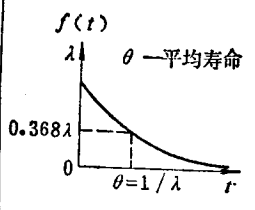
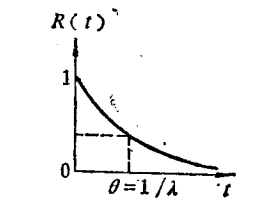
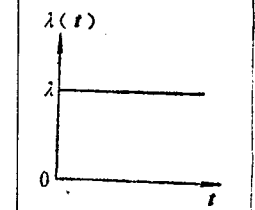
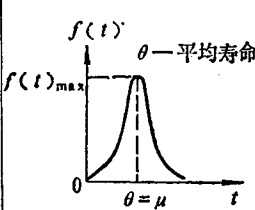
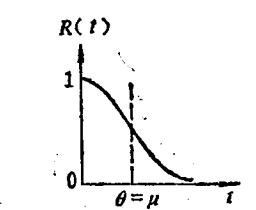
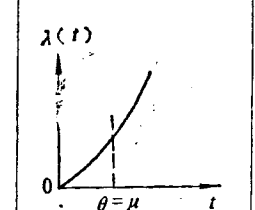
指数分布的累积失效分布函数

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10.2-1)$$

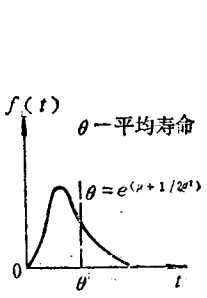
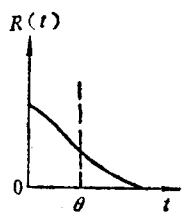
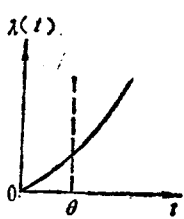
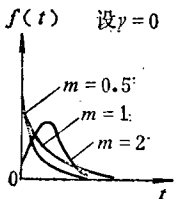
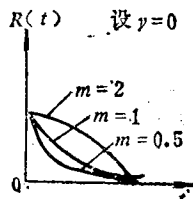
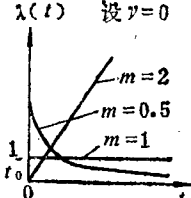
其失效分布密度函数 $f(t)$ 及可靠度函数 $R(t)$ 见表10.2-1。

指数分布的失效率 λ 是一个常数。对于电子电路和元器件，其偶然失效期（使用寿命）较长；而对于复杂的系统，从总的来看，其故障也是随机发生的，所以指数分布很适合于这一实际情况。对于机械零件或机械系统，如能做到按时更换易损零部

表10.2-1 几种常用概率分布表

项目 分布形式	失效分布密度函数 $f(t)$	可靠度函数 $R(t)$	失效率函数 $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	特点
指数分布	$\lambda e^{-\lambda t}$ 	$e^{-\lambda t}$ 	λ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 失效率等于常数λ，只要给定一个参数λ，函数$f(t)$便完全确定 2. 表达式简单，计算方便 3. 特别适用于计算电子元器件或系统的可靠度
正态分布	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ 	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$ 	$\frac{e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt}$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需要两个参数：均值μ和标准偏差σ，函数$f(t)$才能完全确定 2. 当$\mu=0, \sigma=1$时的正态分布称为标准正态分布 3. 因为元件或设备达到晚期时，失效的分布近似正态分布，所以常用正态分布来预测或估计可靠度 4. 计算时可采用正态概率纸

(续)

项目 分布形式	失效分布密度函数 $f(t)$	可靠度函数 $R(t)$	失效率函数 $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$	特 点
对数正态分布	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ 	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^\infty \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt$ 	$\frac{1}{t} \cdot \frac{e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^\infty \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt}$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需要两个参数：对数均值μ和对数标准偏差σ，才能完全确定函数$f(t)$ 2. 适用于半导体器件寿命试验的数据处理 3. 计算时可采用对数正态概率纸
威布尔分布	$\frac{m(t-\gamma)^{m-1}}{t_0} e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0^m}}$ 	$e^{-\frac{(t-\gamma)^m}{t_0^m}}$ 	$\frac{m}{t_0} (t-\gamma)^{m-1}$ 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 需要三个参数：形状参数m，尺寸参数t_0和位置参数γ，才能完全确定函数$f(t)$ 2. 当$m=1$时的威布尔分布就是指数分布 3. $m < 1, m = 1, m > 1$时的失效率分别代表失效率浴盆曲线的三个时期 4. 多用于分析半导体器件的寿命分布 5. 计算时采用威布尔概率纸

件，亦可以指数分布近似。

2 衡量可靠性的特征量

1) 可靠度 $R(t)$

产品能在规定的条件和规定的时间或动作次数内完成规定功能的概率，称为产品的可靠度，常以 $R(t)$ 表示。

设产品的寿命(时间) T 超过某时间 t 的概率为 $P(T > t)$ ，则

$$R(t) = P(T > t) \quad (10.2-2)$$

$R(t)$ 也可称为可靠性函数。它可用指数分布、正态或对数正态分布和威布尔分布等表示。

2) 不可靠度 $F(t)$

产品在规定条件和规定时间内不能完成规定功能——即失效(对可修复产品称为“故障”)——的概率，称为不可靠度或累积失效概率。

根据对立事件的概率之和为1，应有

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (10.2-3)$$

在实际数据统计中，如果产品总数 n 较大时， $R(t)$ 的近似值为

$$R(t) = \frac{n(t)}{n} \quad (10.2-4)$$

即在 t 时刻仍未失效的产品数 $n(t)$ 与 $t=0$ 时的产品总数 n 之比；而 $F(t)$ 的近似值则为

$$F(t) = \frac{n - n(t)}{n} \quad (10.2-5)$$

即在 t 时刻前已失效的产品数 $n-n(t)$ 与 $t=0$ 时的产品总数 n 之比。

3) 失效密度 $f(t)$

失效密度是指产品失效发生在 t 时刻的单位时间内的概率。它描述产品在从0到 $+\infty$ 的整个时间轴上的失效可能性的分布情况，它与累积失效概率 $F(t)$ 的关系有

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (10.2-6)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (10.2-7)$$

在实际数据统计中，它的近似值为

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)}{n \Delta t} \quad (10.2-8)$$

式中 $\Delta n(t)$ 为 t 时刻附近的 Δt 时间间隔内失效的产品数。

4) 瞬时失效率(简称失效率或故障率) $\lambda(t)$

瞬时失效率是指在 t 时刻尚未失效的产品在其后单位时间内失效的概率。它表示在各个时刻仍在正常工作的产品发生失效的可能性，以符号 $\lambda(t)$ 表示。它与上述其它指标的关系为

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (10.2-9)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (10.2-10)$$

在实际数据统计中它的近似值为

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)}{n(t) \Delta t} \quad (10.2-11)$$

失效率是比较常用的可靠性指标。它的单位为： h^{-1} 、 $\%/10^3h$ 或 $10^{-6}/h$ ；对于失效率特别小的产品，采用“菲特”(Fit)作单位，1菲特= $10^{-9}/h$ 。

5) 平均寿命 $E(t)$

产品的无故障工作时间，又称寿命，也是一个随机变量。寿命的均值叫平均寿命，以 $E(t)$ 表示

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (10.2-12)$$

对不可修复的产品而言，平均寿命可用失效前

平均时间MTTF表示；对可修复的产品，平均寿命用平均无故障时间MTBF表示。二者均为总工作时间除以总失效数所得的值。

当产品的寿命近似服从指数分布时，其平均寿命是失效率的倒数，即

$$MTBF \text{ (或 MTTF)} = \frac{1}{\lambda} \quad (10.2-13)$$

上述用于衡量可靠性诸指标或特征量之间的相互关系也可用图10.2-1表示。图中带双方框的 λ

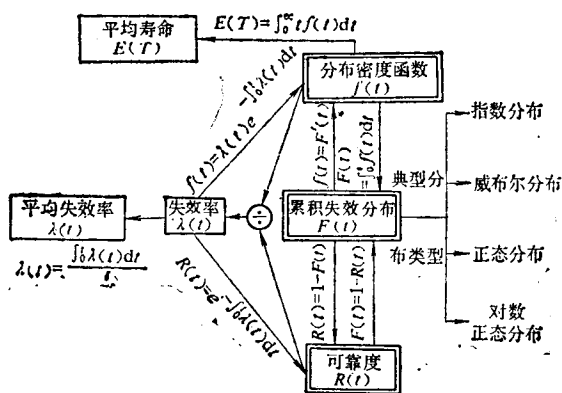


图10.2-1 可靠性各特征量的相互关系

(t) 、 $f(t)$ 、 $F(t)$ 和 $R(t)$ 是衡量可靠性的四个特征量，只要知道其中的任一个，即可顺着箭头方向及其所标公式求出其余的特征量。

此外，对于可修复产品尚有下列可靠性指标：

1) 可维修度 $M(t)$

从产品出现故障到某个时间 t 完成维修的概率，称为可维修度，以 $M(t)$ 表示，有

$$M(t) = \int_0^t m(t) dt \quad (10.2-14)$$

或

$$M(t) = 1 - e^{-\psi(t)t} \quad (\text{指数分布}) \quad (10.2-15)$$

式中 $m(t)$ 、 $\psi(t)$ 为(对应于 $f(t)$ 、 $\lambda(t)$)可维修密度函数和可修复率。

若可靠度看作是表征产品不易发生失效或故障的参数，则可维修度即为表征产品可修复难易程度的参数。常以每次故障后所需维修时间的平均值——平均修复时间MTTR来表征。同理，对近似服

从指数分布的产品

$$MTTR = \frac{1}{\psi} \quad (10.2-16)$$

2) 有效度 A

可修复的产品在某时刻 t 维持其功能的概率称为有效度 A 。若 $R(t)$ 及 $M(t)$ 均用指数分布近似，则与 A 之关系为

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\psi}{\lambda + \psi} \quad (10.2-17)$$

显然，增大 MTBF 或减小 MTTR 的值，可使产品有效度增大。

3) 经济尺度

为使产品可靠性与成本相平衡，常引入一些经济尺度，例如：

$$\frac{\text{全年维修费}}{\text{购置费}}; \frac{\text{劳动工资费用}}{\text{物资费用}};$$

$$\frac{\text{维修费} + \text{操作费}}{\text{动作时间}}; \frac{\text{MTBF}}{\text{成本}} \text{ 等}$$

必须指出，在进行产品的可靠性设计时，对有关技术指标、成本、可靠性、可维修性及可生产性等各因素应作全面权衡或折衷考虑。

3 表征产品寿命特征的浴盆曲线

产品在整个寿命期间的失效率随时间的变化通常具有如图 10.2-2 所示的浴盆曲线形，并明显可分为以 $m < 1$ 、 $m = 1$ 、 $m > 1$ 的威布尔分布描述的 I、II、III 三期。

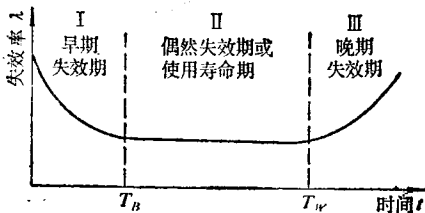


图 10.2-2 浴盆曲线

3.1 早期失效期

刚制造出来的产品其失效率一般较高，接着迅

速下降直到 T_B 为止，这段时间叫做早期失效期。早期失效多数起因于工艺制造缺陷（不符合设计要求）以及运输保管不当或安装差错等。例如：焊接及密封欠佳；连接不良；材料表面存在污垢或杂质；金属或绝缘物中的化学杂质；镀层或保护层的斑点、破损；部件的定位不正确、螺丝松动等等。

早期失效可在制造过程中加以避免或改进，有时也需改进设计或改用材料，以增大制造中的允差，但主要应在制造过程中采取以下措施使失效不发生或少发生：（1）设计及生产过程的仔细审定；（2）加强原材料及工艺过程以及最终质量的检测与监控；（3）开展“无缺陷运动”；（4）试运转。此外也可通过合理筛选与时效或老化处理，将缺陷尽可能消除在正式交付使用之前。使其失效率达到或接近偶然失效期的较低水平。

3.2 偶然失效期（使用寿命期）

上述早期失效期结束便进入失效率近似为常数的阶段，这时多数失效起因于若干随机因素，故常称偶然失效期（ T_B 与 T_w 之间）。一般可以指数分布近似。这段时间是硬件可供使用的最佳时期，也是可靠性预计、可靠性分配计算的依据。因此非常重要。

图 10.2-3 表示应力及强度相对于图 10.2-2 所示时间的相互影响，其中图 a) 为应力/强度密度曲线，二者相互交叠的阴影部分较大，表示应力超过强度的机会较多，因之经常引起失效或故障。这也相当于图 c) 中起始和末端的瞬时应力经常超过平均强度，从而造成较高的失效率。相反，图 10.2-3b) 表示应力/强度相互交叠较少，因而应力经常低于强度，表明设计合理，有高的安全系数和可靠性，因此，仅当瞬时应力偶而超过平均强度时，才会引起失效（图 10.2-3c) 中部偶然失效期）。对于电子设备来说，过高的温度及电压，不管是稳态或瞬变的，都是最有害的应力。湿度、振动、冲击及海拔高度也会导致装置的失效。

3.3 晚期失效期

寿命周期的后期，由于材料、元器件老化、磨损等因素，从 T_w 点起失效率又开始显著增加，它表示使用寿命趋于结束，晚期或磨损期开始。硬件设计者应尽量延迟 T_w 的到来。而使用者若发现磨损，

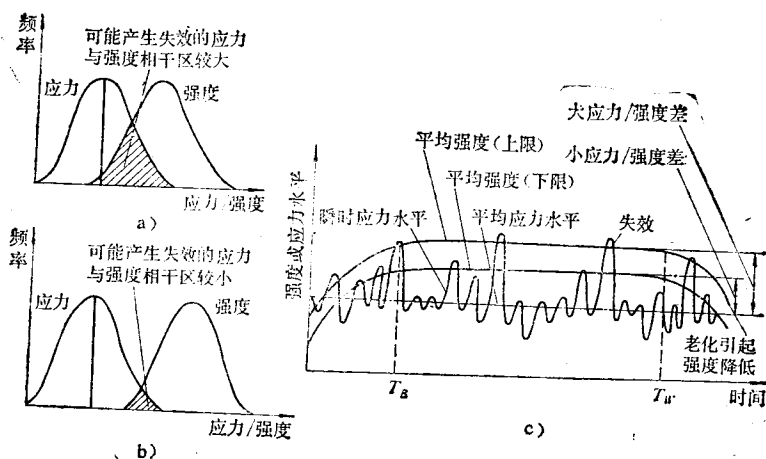


图10.2-3 应力—强度比分布图

a) .b) 应力/强度密度曲线 c) 应力-强度时间图

到来，则应及时修理，更换将要失效的部分。

3.4 改善可靠性及优化可靠性

改善和优化可靠性应从考虑上述三个寿命时期着手。早期失效（故障）可用加强工艺质量控制和合理筛选加以改善。应力引起的失效可藉改进设计使之最小。晚期失效则用及时更换短寿命元件及进行维修加以防止。对于所有影响系统工作可靠性的主要因素，应考虑使之处于最优状态。

产品的优化判据有：（1）技术参数 X ，如精度、量程、快速性、重量等；（2）使用条件 U ，它包括气候因素（如温湿度）、环境因素（如盐雾、腐蚀气氛等）；（3）可靠度 R ，它用无故障性、可维修性、贮藏性、寿命等表征；（4）工作时间 t 。

若把可靠度看作长期保持及适应其余三者优化的综合判据，即作为可靠性优化设计的准则，于是有

$$R(t) = f(X, U, t) \quad (10.2-18)$$

4 可靠性预计

4.1 概述

在产品的设计研制阶段，根据相应的（偶然失效期的）失效率数据计算出部件、整机或系统可能达到的可靠性指标；或对实际应用的产品，计算它能满足性能和可靠性要求的概率。这一过程称之为

可靠性预计。

可靠性预计的目的是发现薄弱环节、提出改进措施、选择最佳方案，它是合理进行可靠性分配的基础，是新产品设计研制的关键，通常要反复进行多次。

一般可按下述步骤进行可靠性预计。

1) 根据基本功能编制方框图。一个方框可以是一个零部件、组件，也可以是子系统或设备等较复杂的装置。

2) 把方框图按可靠性的观点组成可靠性逻辑框图。图10.2-4是自动平衡显示仪表的方框图，它的任一方框发生故障，都会影响仪表的正常工作。因此，它的可靠性逻辑框图中每一方框应是串联的，即是可靠性串联系统，见图10.2-5。

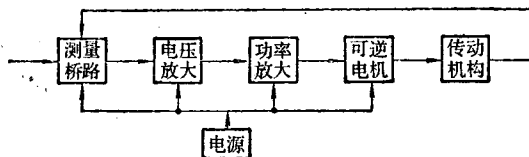


图10.2-4 自动平衡显示仪表原理方框图

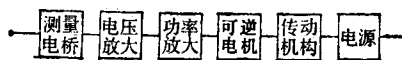


图10.2-5 自动平衡显示仪表可靠性逻辑框图

3) 根据逻辑框图中每个方框包括的元、部件失效率数据, 推算各方框的可靠度。如果可靠性逻辑框图中各方框的失效率已知, 则预计的误差将会减小。

4) 根据逻辑框图及有关理论公式, 计算整机或系统的可靠度。

可见, 可靠性预计是否合理, 取决于(1)可靠性逻辑框图是否正确, (2)零部件的失效率数据是否正确。

4.2 元部件可靠性预计

元部件可靠性预计一般利用指数分布, 即假设它的失效率近似为常数。在进行可靠性预计时, 必须考虑其应用场合的实际应力情况, 如电压及环境温度等, 因为它们对元部件的失效率和寿命影响很大。

下面以分立元器件为例加以简要说明。

基于失效物理研究, 对与应力有关的元器件失效率预计模型(即应力分析法)示于图10.2-6, 其一般表示式为

$$\lambda_p = \lambda_0 \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A \cdot \pi_n \quad (10.2-19)$$

式中 λ_p 为预计失效率; λ_0 为实验室条件下的基本失效率, 通常可由大量长期现场数据统计而得, 也可经加速试验求得, 由图可见, 它与温度及应力水平有关, 并有

$$\lambda_0 = K_1 e^{-C_A/T} \quad (\text{Arrhenius模型}) \quad (10.2-20)$$

$$\text{或 } \lambda_0 = K_2 T e^{-C_B/T} \quad (\text{Eyring模型}) \quad (10.2-21)$$

式中 K_1, K_2 为常数, C_A, C_B 为反映不同失效机理激活能大小的常数; T 为绝对温度。二者均为近似值, 仅在某些假设条件下适用; π_E, π_Q, π_A 分别为环境因子、质量因子和应用调节因子; π_n 表示其它一些附加修正因子。

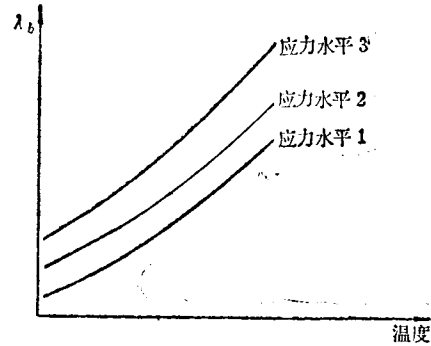


图10.2-6 元部件失效率预计模型

注: 应力水平1, 2, 3代表元器件上所加的恒定应力(如电压、功率等)

美国军用手册217B对此作了详细介绍。表10.2-2列出包括IC(集成电路)在内的若干典型元部件的失效率预计公式。

为了计算方便, 217B已把上述各表中有关的因子 $\pi_E, \pi_Q, \pi_A, \pi_n, \dots$ 等按不同温度、应力比或门数等分别列表备查, 甚为方便, 读者可查该手册。

4.3 系统的可靠性预计

对系统的可靠性预计, 首先应做到: (1)了解组成该系统的各子系统及元部件的功能及其相

表10.2-2 不同元部件的失效率预计公式

元部件种类	$\lambda_p, \times 10^{-6}h$	备注
固定电阻器	$\lambda_0 \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_R$	π_R 为阻值影响修正因子
固定电容器	$\lambda_0 \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_{C_V} \cdot \pi_{SR}$	π_{C_V} 为容量与外壳尺寸关系修正因子 π_{SR} 为某些电解电容器的串联电阻对电路应用影响的修正因子
晶体管	$\lambda_0 \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A \cdot \pi_{S_2} \cdot \pi_C$	π_{S_2}, π_C 分别为电压应力和复杂性因子
IC器件	$\pi_L \cdot \pi_Q (C_1 \pi_T + C_2 \pi_E)$	π_L 为成熟因子; C_1, C_2 为复杂性因子; π_T 为温度加速因子

互关系；(2)掌握各元部件在不同工作阶段的可靠性预计值；(3)画出以元部件为基础的系统可靠性逻辑框图。

系统可靠性预计方法一般有以下几种：数学模型法、蒙特卡洛法、边值法和元器件计数法等。

4.3.1 数学模型法

数学模型法要求首先建立部件或分系统的逻辑框图，再用概率加法定理和乘法定理求取系统的可靠度。由于计算繁琐，该方法只适用于简单系统。下面分串联、并联和混联三种情况进行讨论。

1.) 串联系统的可靠度

图10.2-7为可靠性串联系统逻辑框图。设各元部件的可靠度为 R_1, R_2, \dots, R_n ，各元部件的故障相互无关，则串联系统的可靠度 R_s 可由下式求得：

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n = \prod_{i=1}^n R_i \quad (10.2-22)$$

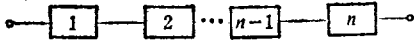


图10.2-7 可靠性串联系统框图

对于指数分布，应有

$$R_s(t) = \exp[-\lambda_s t] = \exp\left[-\frac{t}{Q_s}\right] \quad (10.2-23)$$

而系统的MTBF即 Q_s 或 M_s 则为

$$M_s = Q_s = \frac{1}{\lambda_s} \quad (10.2-24)$$

以上诸式中，
$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (10.2-25)$$

t 为工作时间； λ_i 为元部件的失效率； n 为元部件数目。

又按系统的不可靠度 $F_s = 1 - R_s = 1 - e^{-\lambda_s t}$ ，当 $\lambda_s t < 0.1$ 时， $e^{-\lambda_s t} \approx 1 - \lambda_s t$ ，故

$$F_s \approx \lambda_s t = \sum_{i=1}^n \lambda_i t = \sum_{i=1}^n F_i(t) \quad (10.2-26)$$

该式表示串联系统的不可靠度近似等于各元部件的不可靠度之和，而 $\lambda t = Q$ 又称为任务失效率。

2) 并联系统的可靠度

可靠性并联系统的逻辑框图如图10.2-8所示。设各元部件的可靠度为 R_1, R_2, \dots, R_n ，则并联系统的可靠度 R_s 为：

$$R_s = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \dots (1 - R_n)] \\ = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (10.2-27)$$

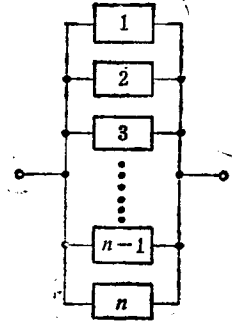


图10.2-8 可靠性并联系统逻辑框图

若 $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$ ，则

$$R_s = 1 - (1 - R)^n \quad (10.2-28)$$

$$M_s = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} + \dots + \frac{1}{n\lambda} \quad (10.2-29)$$

显然，并联元部件数 n 愈大，系统的可靠度愈高，但成本将相应增加。

实际上大多数情况取 $n = 2$ ，则 $R_s = 1 - (1 - R)^2 = 2R - R^2$ 。如 $R = e^{-\lambda t}$ ，则

$$R_s(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} \quad (10.2-30)$$

因此， $n = 2$ 的并联系统的失效率 $\lambda_s(t)$ 为

$$\lambda_s(t) = \frac{-R'_s(t)}{R_s(t)} = 2\lambda \frac{1 - e^{-\lambda t}}{2 - e^{-\lambda t}} \quad (10.2-31)$$

$$M_s = \frac{1}{\lambda} + \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2\lambda} \quad (10.2-32)$$

由上式可见：当 $t = 0$ 时， $\lambda_s(0) = 0$ ；当 $t \rightarrow \infty$ 时， $\lambda_s(\infty) = \lambda_s$ 。系统的失效率对时间 t 呈单调增加，如图10.2-9所示。

3) 混联系统的可靠度

混联系统由串联部分和并联部分组成而成，如图10.2-10。首先对串联部分 R_1, R_2, R_3 求出可靠度 $R_{s1} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$ 。再求出 R_4, R_5 的可靠度

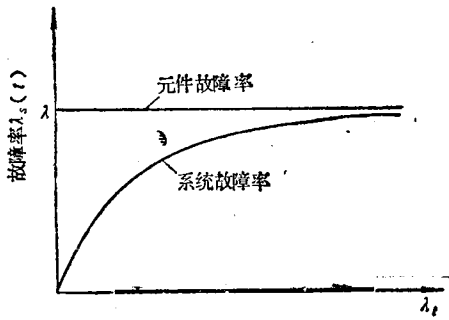


图 10.2-9 并联系统的失效率

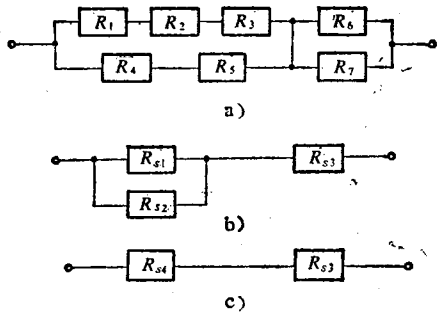


图 10.2-10 混联系统方框图

$R_{s2} = R_1 \cdot R_2$ 。然后求出并联部分 R_6, R_7 的可靠度 $R_{s3} = R_6 + R_7 - R_6 \cdot R_7$ 。这样图 10.2-10a) 简化成 b) 图。

同理可求出 $R_{s4} = R_{s1} + R_{s2} - R_{s1} \cdot R_{s2}$ 。

最后图 10.2-10b) 又可简化成 c) 图。得混联系统的可靠度 R_s 为

$$R_s = R_{s4} \cdot R_{s5} \\ = (R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) \\ (R_6 + R_7 - R_6 R_7) \quad (10.2-33)$$

4.3.2 蒙特卡洛法及边值法简介

当一个系统复杂到难于建立数学模型时，可采用蒙特卡洛法作可靠性预计。

这种方法是通过确定系统各单元参数的分布，根据其可靠性的统计规律，在数字计算机上产生具有相同统计规律的伪随机变量加以模拟。按照组成部分可靠度与系统可靠度间的关系，由一组组成部分的模拟量，得到系统的一个可能状态，而电子计算机可以在不长的时间内模拟得到系统的上千万个可能状态，从而得到系统可靠性的统计规律，估计出系统的可靠度。

蒙特卡洛法在实际编制计算机程序时会遇到许多困难，从而限制了其应用。

边值法在进行复杂系统可靠性预计的一个有力工具。它用简单的成功和失败的概率，根据系统的可靠性框图，先考虑最简化的情况，再逐步复杂化，逐次计算出预计值的上限和下限值，然后再求出这两个极限值的算术平均值，即为预计值。这种处理方法误差较大。比较精确的方法是，在分别求得系统可靠性预计值的上限值 R_{um} 和下限值 R_{dm} 后，再用下式求出系统的可靠性预计值

$$R_T = 1 - \sqrt{(1 - R_{um})(1 - R_{dm})} \quad (10.2-34)$$

式中 $(1 - R_{um})$ 和 $(1 - R_{dm})$ 分别表示系统的上限不可靠度和下限不可靠度。关于这些方法的更详细介绍，可查阅参考资料。

4.3.3 元部件计数法

它是一种比较简略的预计方法，无需大量的详细数据。对一个由若干元部件组成的系统（设备），只要已知所用元部件类型、数量、质量等级和使用环境，便可按下式预计其失效率，即

$$\lambda_o = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_{Gi} \pi_{oi}) \quad (10.2-35)$$

式中 λ_o ——系统总失效率； λ_{Gi} ——第 i 种元部件的失效率； π_{oi} ——第 i 种元部件的质量因子； N_i ——第 i 种元部件的数量； n ——不同的元部件类别数。

式 (10.2-35) 适宜于整合设备（或系统）在单一的环境下使用。如某台设备包含若干在不同环境下工作的单元，则应对每种环境下工作的单元应用上式计算，再把这些“环境——设备”失效率相加，推导出总的设备失效率。

各种元部件的 π_{oi} 、 λ_{Gi} 的值及其与使用环境的关系可参阅有关资料。

元部件计数法适用于设计初期。其特点是迅速但较粗糙。随着设计研制的深入，应逐步采用前述基于失效物理研究的数学模型法、蒙特卡洛法与边值法等更为精确的预计。

5 可靠性分配

5.1 目的、要求

把系统可靠性指标合理地分配给分系统或部件

以至元件的过程称为可靠性分配。

可靠性分配的目的有：(1)落实系统的可靠性指标；(2)明确对各子系统或部件的合理的可靠性要求；(3)暴露系统的薄弱环节，为改进设计提供数据。

通常根据各子系统或部件的不可靠度或任务失效率按比例地分配系统的不可靠度或允许失效率，而不是平均分配。

进行分配时要做到：1)知道系统的可靠性指标要求或允许失效率；2)知道各子系统或部件的可靠性预计值或任务失效率预计值；3)了解各部件的重要性和可维修性等；4)弄清系统和部件之间的功能关系，画出以子系统或部件为基础的系统可靠性逻辑框图。

可靠性预计按元件→部件→子系统→系统，自下而上进行；可靠性分配则由系统到元件自上而下进行，两者构成一个自下而上，又自上而下

的反复过程，使客观现实和主观要求相适应。

5.2 串联系统的可靠性分配

4.3.1节已谈到串联系统的不可靠度近似地为各元部件不可靠度之和。据此，其分配步骤如下

1)用式 $F_i(t)=1-R_i(t)$ 求出各元部件的预计不可靠度；

2)将系统的允许不可靠度与所有元部件的预计不可靠度之和相比；

3)把2)所得比例因子与各元部件的预计不可靠度相乘，得各部件的允许不可靠度；

4)用公式 $R_i(t)=1-F_i(t)$ 求出对各部件要求的可靠性指标。

现以由四个部件组成的串联系统为例，系统要求的可靠度为0.90，允许的不可靠度为0.10，其最后分配数据列于表10.2-3中。

由表可见，各部件所分得 $R_i(t)$ 的乘积，比要

表 10.2-3 四个部件组成的串联系统的可靠性指标分配

部件号	预计 $R_i(t)$	预计 $F_i(t)$	允许 $F_i(t)$	要求 $R_i(t)$
1	0.960	0.040	0.020	0.980
2	0.920	0.080	0.040	0.960
3	0.980	0.020	0.010	0.990
4	0.940	0.060	0.030	0.970
		和: 0.200	和: 0.100	积: 0.9035 差: 0.0035

求值大0.0035，通常，这一点多余量就不再分了。

如果要分得准确，可用 $R=e^{-Q}$ 式来计算。按预计任务失效率 $\lambda t=Q$ 值，照上述同样方法进行。

5.3 冗余系统的可靠性分配

冗余或并联系统的可靠性分配步骤如下：

1)把系统中具有冗余的部分，按前述可靠性计算公式化简为单元而成为串联系统；

2)对该简化的串联系统按上述串联系统的分配原则进行可靠性分配；

3)用这些分配值，按原冗余系统进行可靠性

再预计，并与所要求的可靠度值比较而得出差值；

4)对这些差值进行修正性的再分配，如此重复3)、4)两步骤，直到满意为止。

例如，图10.2-11 a)所示逻辑框图的系统，其中P、Q、R的预计可靠度均为0.99，S、T的可靠度为0.90，它们的预计不可靠度分别为0.01和0.10。

首先把系统简化成图10.2-11 b)所示的串联系统，图中U为S和T的并联，其可靠度按式(10.2-27)为 $1.00-(0.10 \times 0.10) = 0.99$ 。这样图b)中四个方框的可靠度均为0.99。按串联系统可靠性分

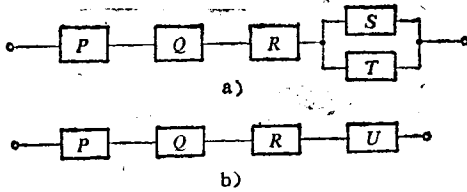


图10.2-11 冗余系统逻辑框图

配原则，每个方框的可靠度各为1/4，故若总的允许不可靠度为0.02，则每个方框的允许不可靠度为0.005，即可靠度为0.995。而原来预计每个串联方框的不可靠度为0.01，因此允许和预计的不可靠度之比为0.005/0.01=0.50。所以，S、T的允许不

可靠度应为 $0.50 \times 0.10 = 0.05$ ，比原假设的应予减小。当用这个数值再去预计方框U的可靠度时，得 $1.0000 - (0.05 \times 0.05) = 0.9975$ ，即 $F(t) = 0.0025$ ，而不是开始所分得的0.005。这样系统的不可靠度为 $0.005 + 0.005 + 0.005 + 0.0025 = 0.0175$ 而不是原来的0.02，其差为0.0025。

这个差值可按第一次分配的值，再比例分配给各个方框，因为0.0025是0.0175的1/7，所以各方框的附加分配为第一次分配值的1/7，这样再预计、再分配、直到满意为止。该例的分配计算过程见表10.2-4。

除上述代数分配法以外，尚有条件极值法、数学规划法等^[17]。

表 10.2-4 冗余系统的可靠性分配计算表

单 元	最初分配	附加分配	小 计	最后校正	最后总分配
P	0.005	0.0007	0.0057	-0.0001	0.0056
Q	0.005	0.0007	0.0057	-0.0001	0.0056
R	0.005	0.0007	0.0057	-0.0001	0.0056
S	0.050	0.0071	0.0571	-0.0011	0.0560
T	0.050	0.0071	0.0571	-0.0011	0.0560
系统总额(计算的)	0.0175		0.0204		0.01994 ≈ 0.02
差 额	0.0025		-0.0004		0.00
差额与系统总额之比	1/7		-1/51		0

5.4 其它重要考虑

以上所讨论的分配，只考虑了部件的任务失效率一个因素。除此之外，还必须考虑以下三个重要方面：

1) 部件的重要性 部件失效率对系统工作影响的程度，一般可以根据各部件所担负职能重要性的不同而给予它们承担不同的权。例如：关键的(出了故障，很可能使人死亡)部件，设权为100；主要的(出了故障，使任务不能完成)部件，设权为10；次要的(出了故障，并不影响人的安全和任务完成，而仅使功能受到损失，或导致非计划维修)部件，设权为1。

也可以有其它种权的分配比例，如10:5:1或5:3:1。权的具体分配一般根据用户的要求，结合失效模式效应分析所确定的致命度而定，或以数字表明，或另用说明。

部件失效模式及所处条件不同，其在系统中体现的重要性也不同。例如一个阀门失效在一种情况下可能是“关键的”，但在另一种情况下却可能是“次要的”。一般用 M_1 表示重要性因子。分配之后部件的失效率则与 M_1 成反比。

2) 产品的可改进性 对一个产品进行可靠性分配时，不单要看到现在的失效率水平，还要考虑到从设计、加工到装配这段时间内产品质量可能提高的潜力，即可靠性增长情况。

例如可根据产品可靠性增长的快慢分为立即改进、可能改进以及改进可能性很小等三级，并将其预计失效率分别乘以不同因子值(例如 $\frac{1}{3}$ ， $\frac{1}{2}$ 和

1)，通常以 M_2 表示产品可改进性因子。部件失效率的分配与 M_2 成正比。

3) 产品的可维修性

通常，允许维修的产品，其可靠性可比不允许维修的产品高。由于维修作用而影响可靠度分配的重要因素有：

(1) 维修所处的失效期 当产品处于早期失效期，则早期失效的维修将有效地提高产品的可靠性。当产品处于晚期失效期时，故障的提前维修或更换元器件，将大大增长产品的寿命及其可靠性。若产品处在偶然失效期，维修工作只能使产品保持原有的可靠性水平。在执行任务前对设备进行检修，可提高完成任务的可靠性。提高可靠性的维修措施将影响分配，并允许失效率减小，减小的数量取决于维修的次数。

(2) 冗余的程度和类别 如果能及时更换失效的冗余部分，则该单元的可靠度将大大提高，可基本上为1。在冷贮备的冗余系统中，具有失效检查器和切换开关，以便对故障进行隔离，便于进行修理或更换元器件。在热贮备系统中由于没有固定的失效检查系统，故维修比较困难。

(3) 部件失效或系统停机影响 有些部件或系统不许停机，这样维修只能在运行中进行，或者无法进行。但也有的设备无需在整个任务期间都工作，因此可以在停工时进行维修。

设用 M_i 表示维修因子，分配给部件的任务失

效率与 M_i 成正比。

在考虑了部件的重要性、产品的可改进性和可维修性这三个因素后，各部件真正分配的任务失效率 Q_r 应为

$$Q_r = Q \times \frac{1}{M_i} \times M_2 \times M_3 \quad (10.2-36)$$

式中 Q 是部件预计任务失效率。

6 失效模式及效应分析

通常有：(1) 失效模式效应致命分析 (FMECA)；(2) 故障树分析 (FTA) 两种。前者由下而上，后者由上而下。两者均为确定失效后果的分析方法。

6.1 失效模式效应致命分析 (FMECA)

这是用以识别元部件一级的基本故障，并确定其对高一級组件影响而进行的一种反复考证系统特性的过程。它可利用从现场数据得到的真实失效模式；或从设计分析、可靠性预计以及同元部件失效形态有关的经验中所推断出的假想失效模式由下而上地一步步进行。

图10.2-12以一驱动放大器电路为例，分析其中每个元器件可能发生的失效模式及其对放大器、整机和整个系统的影响。根据较低一级(如元器

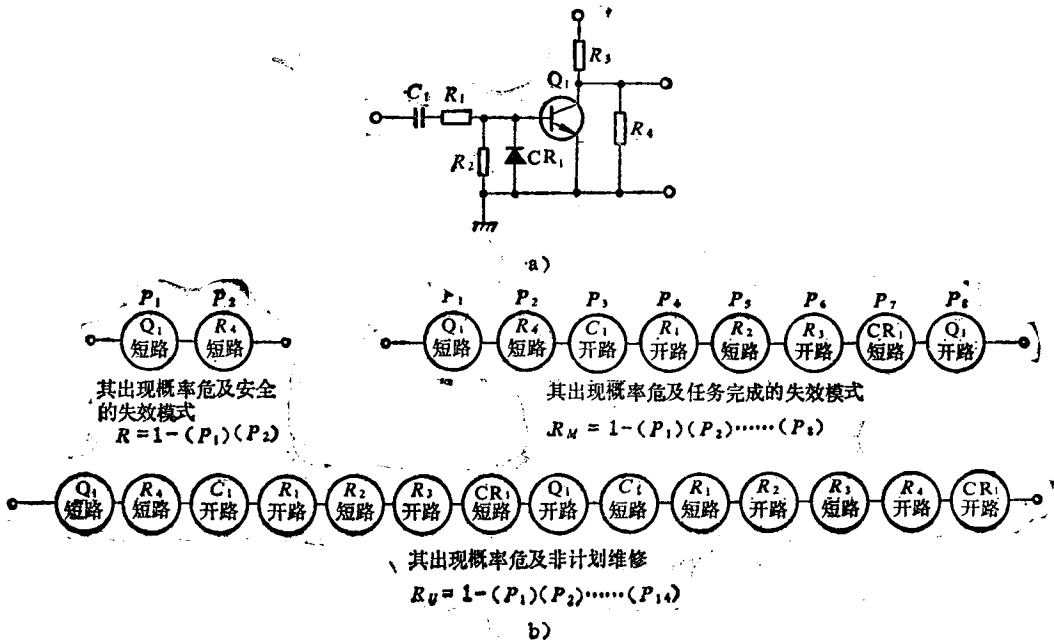


图10.2-12 失效模式效应致命分析举例

a) 驱动放大电路 b) 失效模式效应及发生概率

