第8篇

可靠性技术

第8篇

可靠性技术

主编单位 机械工业部北京电工综合技术经济研究所　中国电工技术学会电工产品可靠性专业委员会

编写单位 机械工业部北京电工综合技术经济研究所　清华大学

主　　编 胡必权

编 写 人 胡必权　郭永基　曾小玲　万家彬

主　　审 陆俭国

第1章 概 论

1 可靠性技术的基本概念

1·1 可靠性技术的形成和发展

可靠性技术是以概率论、数理统计为理论基础，以电子元器件为研究对象，以军事装备的应用为目的，于20世纪40年代在美国兴起并逐渐形成和发展起来的一门新兴学科。其形成和发展的历程大体可分为四个时期。

(1) 40年代为萌芽时期。由于第二次世界大战中电子设备在战场上经常失灵而提出了产品性能维持性的问题，并成立一个对真空管的可靠性进行研究和协调的专门小组。随后又创立了可靠性的学术组织。从而揭开了全面研究可靠性技术的序幕。

(2) 50年代为成长时期。设立了电子设备可靠性研究与管理的机构，提出了解决电子产品可靠性的一系列办法，制订出有关可靠性的军用标准，50年代里，可靠性技术在理论和实践上都趋于成熟而又自成体系，从而引起工业发达国家的普遍关注。

(3)60年代为普及时期。60年代是世界上技术、经济发展较快的时期，因而可靠性技术受到普遍的重视，各工业发达国家都相继建立了可靠性机构，从事研究和应用工作。1965年国际电工委员会成立了可靠性、维修性技术委员会(IEC/TC56)，主要从事电子产品可靠性的国际标准制订工作。IEC/TC56的成立及卓有成效的活动表明，60年代里，在国际贸易中已对电子产品普遍地提出了可靠性的要求，可靠性技术已走向世界。

(4) 70年代以来为发展期。70年代以来可靠性技术在深度和广度上都有很大的发展，其发展的趋势，可概括为以下四个方面。

1) 由硬件扩展到软件。1978年美国成立三军软件可靠性协调组，开展软件可靠性的研究与协调工作；1981年IEC/TC56在特拉维夫会议上提出了制订软件可靠性的方案，1982年组成了软件可靠性工作组(W10)，随后又组成了人为可靠性工作组。

2) 从电子产品扩展到电工产品乃至其他非电产品。美国70年代就在能源部设有供电可靠性处，负责推动电力可靠性工作，1981年提出了《美国全国电力可靠性研究技术报告》，还从1974年起每年组织一次国际电力工业可靠性、可用性、维修性会议。

美国1978年初将原来属三军联合后勤司令部领导下的电子系统可靠性联合技术协调组扩大到非电设备，改名为可靠性、可用性及维修性联合技术协调组。

国际大电网会议 (CIGRE) 从1971年开始对高压断路器的运行故障率进行国际调查。

3) 从事后分析扩展到了事前控制。由于重点工程或大型设备如电力系统等一旦发生故障，往往会造成比较严重的有时甚至是灾难性的后果，因而美、日等国在80年代里研究出对大型设备进行故障诊断的人工智能装置，并陆续投入实际使用，提高了系统的安全性和可用率；1988年英国也提出了分三个阶段研制故障诊断专家系统的长期规划。

4) 从单纯考虑可靠性扩展到可靠性与经济性并重，70年代起逐步产生了可靠性经济学，研究可靠性指标与系统投资间的最佳关系，确定合理的可靠性水平；设备的全寿命周期费用 (LCC) 问题成为1990年国际可靠性学术会议的热点；IEC/TC56在1990年奥斯陆会议上决议，将有关全寿命周期费用的标准列为优先制订的类型。

我国于70年代初开始从事军品及重大工程电子设备的可靠性研究工作。80年代开始在电子、电力、电工行业全面开展可靠性技术的研究与应用工作，取得了显著的进展。

1·2 可靠性技术的定义及特点

1·2·1 定义

可靠性是产品在规定的条件下，在规定的时间(或操作次数) 内，完成规定功能的能力。

“规定的条件”包括产品使用时的环境条件、电源条件、负载条件和贮存条件。

“规定功能”是产品标准中规定的各项技术性能。

“规定的时间”视产品的用途或所需完成的任务的不同而不同，一般是指产品的寿命期。

1·2·2 可靠性技术的特点

(1) 时间尺度。可靠性技术是研究产品功能在时间上的稳定性的科学，是以时间为尺度来度量产品的。它用以评估产品可靠性的各种特征量都是时间的函数，离开了时间就无可靠性可言。

(2) 定量化。可靠性技术提出的特征量体系，都能用一个确定的数值来定量地表示。从学术角度上看，没有定量的指标，就不是可靠性。

(3)技术与管理的结合。管理是可靠性技术的重要内容，而且贯穿在产品可靠性工作的始终。没有管理就没有可靠性。

1·2·3 固有可靠性和运行可靠性

固有可靠性是产品一经生产出来就具有的特性之一，它是由产品设计时所预计的、由制造过程中实现的、由制造厂在模拟实际工作条件的标准环境下进行测定并必须予以保证的可靠性。

运行可靠性是产品在用户实际使用中显现出来的可靠性。因受到运输、贮存、安装、操作、维修保养等环节的影响，产品的运行可靠性要低于其固有的可靠性。

2 可靠性技术的范畴

可靠性技术的任务是确定和赋予产品的可靠性性能，其所研究的问题要覆盖产品从设计、制造到使用、维修直至报废的整个寿命周期，其基本内容及相互间的关系示意图见图 8·1-1。其主要内容有五个方面。

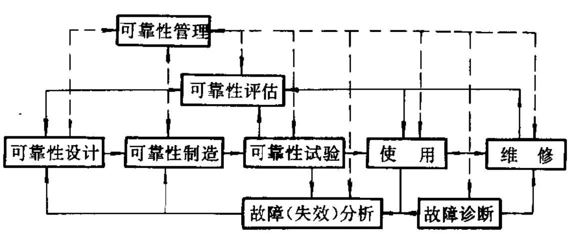


图 8·1-1 可靠性技术基本内容框图

2·1 可靠性评估

可靠性评估是运用数理统计方法，通过可靠性试验或现场使用的信息来估计，或通过结构数学模型来推断产品可靠性特征量的数值。它包括评估指标体系和评估方法。

2·2 可靠性试验

可靠性试验是为了测定或验证产品的可靠性水平，或为了研究产品的故障（失效）机理、故障（失效）分布，以及为了研究产品对各种应力的适应情况，并暴露其潜在的故障因素对有限样本的影响，通常采用截尾方式进行种种试验。

2·3 可靠性分析

可靠性分析是研究元器件与整机或系统间的相互关系的技术，它研究当某一个元器件失效时对整机或系统所造成的影响和后果，从而采取相应的纠正或改进措施，以确保和提高产品的可靠性水平。它包括故障模式的影响及后果分析、故障树分析等。

2·4 可靠性设计

可靠性设计是赋予产品可靠性的关键手段。它包括建立可靠性数学模型，进行可靠性指标分配、可靠性预计及耐环境设计、电磁兼容设计等。

2·5 可靠性管理

可靠性管理是为了保证对产品的可靠性要求的实现而进行的贯穿于产品整个寿命周期的活动，其内容包括组织制订可靠性计划、可靠性标准及可靠性程序，并组织贯彻和监督实施；建立故障案例库及故障报告、分析和改进系统；建立数据库及信息反馈渠道或交换网络；以及进行可靠性教育等。

3 可靠性与质量的关系

3·1 质量内涵的发展

随着科技进步以及人们对客观事物认识的不断深化，质量概念的内涵也在演变，早先质量概念曾由“符合性”演变到“适用性”，现在又有了发展，不少文献论述了产品质量是满足规定要求或需要的特征和特性的总和，包括适用性、安全性、可靠性、经济性及表面状况。近年来，人们趋向于把包括可靠性在内的质量概念称为近代质量，把不包括可靠性在内的质量概念称为传统的质量。

3·2 可靠性是产品重要的质量指标

近代社会用户对产品质量的追求不仅要性能好，而且要能长期使用，还要维护保养的费用低，即“长时

期保持良好的性能”和“最佳的全寿命费用”。这些要求称之为“效能”，产品质量的优劣就体现效能的高低。效能通常用下式表示：

$$E=ADC$$

式中　E——效能；

A——可用性；

D——可信性；

C——技术性能。

其中可用性和可信性都属于可靠性的内容，可见对产品来说，可靠性是质量属性中极为重要的部分。

4　可靠性技术的经济价值

4·1　可靠性的直接经济效益

可靠性高的产品，其可用时间就长，从而能创造更多的经济效益。国外某三个电厂的15台机组在使用了故障诊断专家系统后，可用率由94.9%增加到97.3%，即每台机组的可用时间平均每年增加了7天。如按每台机组600MW计算，则每年可多发电15.12亿kW·h。国内研究也表明，如我国现已投运的大型机组的可用率提高1%，则每年可多发电19.2720亿kW·h，如按每kW·h0.10元计，每年可多创产值1.9272亿元。

4·2　可靠性的间接经济效益

产品的可靠性越高，所需的维修保养费用就越低，从而可减少开支。例如：某中近程导航设备，原平均故障间隔时间为17h，维修费用为15560元/(台·年)，后经改进，提高了可靠性，其平均故障间隔时间为150h，维修费用只需1818元/(台·年)；又某部门对70年代的三种电子设备作了可靠性经济分析，其经济效益见表8·1-1。

表8·1-1　三种设备可靠性经济分析

（万美元）

设备类型	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
单台价格	24.27	3.5	24.33
安装台数	564（台）	325（台）	335（台）
可靠性投资	950	210	690
当年节省维修费	450	50	410
10年共节省费用	4470	540	2220

4·3　可靠性是产品在市场竞争中的重要手段

可靠性的价值不仅在于它能产生有形的经济效益，更重要的还在于它可以保证重大国防或经济建设工程顺利进行，能减少乃至避免因产品故障造成的经济损失（有时这类损失甚至是灾害性的）。因此，用户都要采购那些有可靠性指标或可靠性高的产品，当今国际市场上盛行的产品责任法、保用期、索赔期，都与产品的可靠性直接有关，所以在开放的市场上，只有具有可靠性的产品才有竞争能力。

第2章　可靠性特征量

1　无故障性特征量

1·1　可靠度

产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的概率称为产品的可靠度函数，简称可靠度，用$R(t)$表示。可靠度是时间t的函数。规定的时间越短，产品越容易完成规定的功能。反之，规定的时间越长，产品越难完成规定的功能。当时间趋于无穷时，全部的产品都会失效。若以T表示产品的寿命，可靠度函数可以看作事件（$T>t$）的概率，即

$$R(t)=\begin{cases}P(T\geqslant t) & t\geqslant 0\\ 1 & t<0\end{cases} \tag{8·2-1}$$

式中　t——规定的时间。

若产品寿命T的概率密度$f(t)$已知，当给定t值时，就可求出$R(t)$的数值，即

$$R(t)=\int_t^{\infty}f(t)\mathrm{d}t \tag{8·2-2}$$

可靠度函数$R(t)$是时间t的非增函数，其取值范围为0～1，即$0\leqslant R(t)\leqslant 1$。（概率密度$f(t)$未知时，可靠度的估算见表8·2-1。）

1·2 故障率

产品在 t 时刻以前一直正常工作的条件下，在时刻 t 以后单位时间内发生故障的概率称为该产品在时刻 t 的故障率函数，简称故障率（对于不可修复产品则称失效率）。用 $\lambda(t)$ 表示。若以 T 表示产品的寿命，故障率实质上是寿命的条件概率密度。由条件概率定义有

$$\lambda(t)=\lim_{\Delta t\to 0}\frac{P(t<T\leqslant t+\Delta t|T>t)}{\Delta t}=\frac{f(t)}{R(t)} \tag{8·2-3}$$

式中 Δt——从 t 时刻开始的时间间隔。

故障率函数 $\lambda(t)$ 是时间的函数，它反映了产品故障变化的速度。

1·3 误动率

误动率是用来表示保护类电器产品的平均故障率，用 λ_f 表示

$$\lambda_f=f/T \tag{8·2-4}$$

式中 f——误动次数；

T——试验工作总时间或累积元件动作总次数。

按时间计或按次数计，常用一小时等于 10 次互换，如 $\lambda=10^{-4}$/小时，可计为 10^{-5}/次。

1·4 拒动率

拒动率也是用来表示保护类电器产品的平均故障率，用 λ_R 表示。

$$\lambda_R=R/T \tag{8·2-5}$$

式中 R——拒动次数；

T——试验工作总时间或累积元件动作总次数。

1·5 强迫停机率

对于需要连续运行的大型电工设备，强迫停机（运）是指发生了与设备直接有关的危急状态，而要求装置立即退出运行的停机（运）或由于人为误操作和其他原因未能在给定时间内提前提出申请的停机（运）。强迫停机率常用强迫停机（运）时间与运行时间和强迫停机（运）时间之和的百分比表达。用 FOR 表示。

$$\mathrm{FOR}=\mathrm{FOH}\div(\mathrm{FOH}+\mathrm{SH})\times 100 \tag{8·2-6}$$

式中 FOH——强迫停机（运）小时；

SH——运行小时。

1·6 成功率

在测定受试产品或试验中把受试产品或试验分为成功或失败两种情况。产品在规定条件下完成规定功能的概率或在规定条件下试验成功的概率。称为成功率，用 S 表示。成功率常用以下公式估算：

$$S=n/M \tag{8·2-7}$$

式中 n——试验成功次数或成功产品数；

M——总试验次数或受试产品数。

无故障性可靠性特征量的计算往往由于概率密度函数不是预先给定而不可能有精确求法。实际上可靠性特征量数值是由试验或现场观测计算得到的。无故障性可靠性特征量观测值（或估计值）的计算见表 8·2-1。

表 8·2-1 无故障性可靠性特征量观测值计算式

特征量	观测值计算公式	备注
可靠度	$\hat{R}=\frac{n(t)}{N}$	$n(t)$—规定时间 $[0, t]$ 内一个或多个产品无故障工作时间达到或超过规定时间的次数或完成规定功能产品数 N—规定时间 $[0, t]$ 内产品无故障工作总次数或投入工作的产品总数 $\Delta r(t)$—$[t, t+\Delta t]$ 内故障次数或失效的产品数 f—误动次数 R—拒动次数 T—试验总时间或累积元件动作次数 FOH—强迫停机小时 SH—运行小时 n—试验成功次数或成功产品数 M—总试验次数或受试产品数
故障率	$\hat{\lambda}=\frac{\Delta r(t)}{\Delta t n(t)}$	
误动率	$\hat{\lambda}_f=\frac{f}{T}$	
拒动率	$\hat{\lambda}_R=\frac{R}{T}$	
强迫停机率	$\hat{\mathrm{FOR}}=\frac{\mathrm{FOH}}{\mathrm{FOH}+\mathrm{SH}}\times 100$	
成功率	$\hat{S}=\frac{n}{M}$	

2 耐久性特征量

2·1 可靠寿命

根据可靠度定义，可靠度函数是时间 t 的非增函数。随着时间的增加，可靠度是下降的。一种产品每一个时刻有一个可靠度，即每一个可靠度对应于一个时间。若给定可靠度为 r 的情况下所对应的时间称为可

靠寿命（见图 8•2-1），用 t_r 表示。

设产品的可靠度为 $R(t)$。并给定 $0<r<1$，若有

$$R(t_r)=P(T>t_r)=r \text{ 或 } F(t_r)=1-r \quad (8•2\text{-}8)$$

则称 t_r 为可靠寿命。其中 r 称为可靠水平。

产品的使用时间只要小于可靠寿命 t_r，那么这种产品的可靠度就不会小于 r。

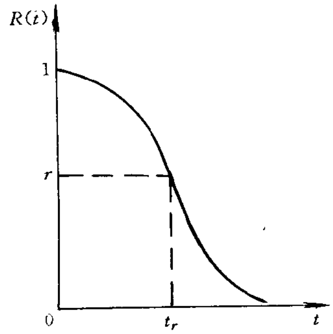


图 8•2-1 可靠寿命

2•2 中位寿命

当可靠水平 $r=0.5$ 时的可靠寿命称为中位寿命。若

$$R(t_{0.5})=P(T>t_{0.5})=0.5 \quad (8•2\text{-}9)$$

则 $t_{0.5}$ 称为中位寿命。

产品工作到中位寿命时，完成规定功能的概率和不能完成规定功能的概率各占一半。即 $R(t_{0.5})=F(t_{0.5})=50\%$。

2•3 平均寿命

平均寿命是产品寿命的数学期望。用 $E(T)$ 表示。由于可修复与不可修复产品寿命有不同的意义，故平均寿命也有不同的意义。对于可修复产品，平均寿命是“平均两次故障间的时间”，用 MTBF (Mean Time Between Failure) 表示。对于不可修复产品平均寿命为“平均失效前工作时间”，用 MTTF (Mean Time To Failure) 表示。

若寿命 T 的概率密度函数为 $f(t)$，$(t\geqslant 0)$ 则

$$E(T)=\int_0^\infty tf(t)\mathrm{d}t \text{ 或 } E(T)=\int_0^\infty R(t)\mathrm{d}t \quad (8•2\text{-}10)$$

当寿命密度函数未知时，平均寿命 $E(T)$ 的观测值用 μ 表示。

$$\mu=\left(\sum_{i=1}^{n}t_i\right)\Big/\left(\sum_{i=1}^{n}r_i\right)=T/r \quad (8•2\text{-}11)$$

式中 n——样品数；

t_i——产品在使用寿命期的某个观察期（试验期）内第 i 台产品工作时间；

r_i——产品在使用寿命期的某个观察期（试验期）内第 i 台产品发生故障次数；

T——累积时间；

r—累积故障次数（或失效数）。

2•4 平均首次故障前工作时间

可修复产品从开始工作到第一次故障前的工作时间为首次故障前工作时间。首次故障前工作时间的均值为平均首次故障前工作时间。用 MTTFF (Mean Time To First Failure) 表示。

$$\mathrm{MTTFF}=\frac{1}{r}\left[\sum_{i=1}^{r}t_i+(n-r)t\right] \quad (8•2\text{-}12)$$

式中 n——样品数；

r——发生故障台数；

t_i——第 i 台产品首次故障前工作时间（试验）时间；

t——工作（试验）截止时间。

2•5 平均大修间隔

产品在规定条件下使用，相邻两次大修（或维修）间的时间均值为平均大修间隔，用 MTBO (Mean Time Between Overhauls) 表示。有时也用平均维修间隔 MTBM (Mean Time Between Maintences) 表示。

$$\mathrm{MTBO}=\left(\sum_{i=1}^{n}t_{mi}\right)/n \quad (8•2\text{-}13)$$

式中 t_{mi}——第 i 台产品大修时间；

n——样品数。

3 维修性特征量

3•1 维修度

在规定条件下使用的产品，令 $t=0$ 时刻失效，在规定时间 t 内按照规定程序和方法进行维修时，保持或恢复到能完成规定功能状态的概率叫维修度。用 $M(t)$ 表示。维修度是时间 t 的函数。维修过程可对应地看成与产品工作过程相反的过程。与可靠度相反维修度是单调上升函数，即维修时间越短、或越容易修好，则维修度越低。反之，时间越长维修度越高。

定义 $M(t)$ 的一阶导数（如果它的导数存在）$m(t)$ 为修复密度函数，$m(t)=\mathrm{d}M(t)/\mathrm{d}t$。若产品的修复密度函数已知，维修度

$$M(t)=P(\tau\leqslant t)=\int_0^t m(\tau)\mathrm{d}\tau \quad (8\cdot2\text{-}14)$$

式中 τ——维修时间；

t——规定的时间。

3·2 修复率

产品在 $t=0$ 时刻开始一直到 t 时刻仍失效的条件下，在 t 时刻以后单位时间内修复的概率叫产品在 t 时刻的修复率，用 $r(t)$ 表示。

$$r(t)=m(t)/[1-M(t)] \quad (8\cdot2\text{-}15)$$

3·3 平均修复时间

产品在 $t=0$ 时失效到第一次修复之间的时间叫修复时间。修复时间的期望值叫平均修复时间，用 MTTR（Mean Time to Repair）表示。若修复密度函数已知，平均修复时间为

$$\mathrm{MTTR}=\int_0^\infty tm(t)\mathrm{d}t \quad (8\cdot2\text{-}16)$$

4 可用性特征量

4·1 固有可用度

在可用度中综合考虑了产品的可靠性和维修性两个方面，既研究产品发生故障前的可靠度，又考虑故障后的修理或更换。产品在某时刻具有或维持其规定功能的概率叫固有可用度，用 A 表示。根据更新过程的寿命分布和利用斯米特中心定理得到任意时刻 t 内产品处于正常状态的概率（固有可用度）为

$$A=P(T>0)=\frac{1}{T_1+T_2}\int_0^\infty R(t)\mathrm{d}t=\frac{T_1}{T_1+T_2} \quad (8\cdot2\text{-}17)$$

式中 T_1——MTBF；

T_2——MTTR。

4·2 使用可用度

在固有可用度中只考虑产品正常工作和故障两种状态。产品在使用过程中要经历运输、安装、调整和保养等各个阶段的各种状态。使用可用度则是考虑了产品在整个使用过程中各种状态的可用度，用 A_u 表示。

$$A_u=T_u/(T_u+T_d) \quad (8\cdot2\text{-}18)$$

式中 T_u——平均能工作时间；

T_d——平均不能工作时间。（根据产品的不同用途及各个阶段的重要程度不同，在计算 A_u 前，应对 T_u 及 T_d 给出明确的定义和分类）

4·3 等效可用度

考虑了产品（机组）降低出力（铭牌容量与可用容量之差）和计划及非计划停机时间因素时的使用可用度，用 A_e 表示。

$$A_e=(T_u-T_e)/(T_u+T_d) \quad (8\cdot2\text{-}19)$$

式中 T_e——等效降低出力时间。

5 可靠性特征量之间的关系

可靠性特征量之间的关系见表 8·2-2。

表 8·2-2 可靠性特征量之间的关系

$R(t)=\int_0^\infty f(t)\mathrm{d}t$			
$\lambda(t)=\frac{f(t)}{R(t)}$			
$\mathrm{MTBF}=\int_0^\infty tf(t)\mathrm{d}t=\int_0^\infty R(t)\mathrm{d}t$			
$M(t)=\int_0^\infty m(t)\mathrm{d}t$			
$r(t)=\frac{m(t)}{1-M(t)}$			
$\mathrm{MTTR}=\int_0^\infty tm(t)\mathrm{d}t$			
$A=\frac{\mathrm{MTBF}}{\mathrm{MTBF}+\mathrm{MTTR}}$			
指数分布	$R(t)=\exp(-\lambda t)$	威布尔分布	$R(t)=\exp[-(t/\eta)]$
	$\lambda(t)=\lambda$		$\lambda(t)=(\beta/\eta)(t/\eta)$
	$\mathrm{MTBF}=1/\lambda$		$\mathrm{MTBF}=\eta\Gamma(1/\beta+1)$

6 产品可靠性指标的确定

6·1 特征量的选定

选定可靠性特征量应最大限度地反映产品的可靠性水平。在充分地反映其可靠性特征的条件下，应使产品的可靠性特征量尽量少。同时可靠性特征量应反映使用要求和当前产品的可靠性薄弱环节。

对于元器件可靠性特征量常选择故障率或可靠寿命。对于整机可靠性特征量常选平均寿命、可靠度或可

靠寿命。而对于需要连续运行的设备常选强迫停机率和可用度等等。

6·2 指标值的确定

可靠性特征量的具体数值就是指标。可靠性的指标不是一成不变的，而是根据需要、可行性及可靠性要求进行定期评审和修订的。

产品的可靠性指标值定多高为好，是难以回答的问题。它不但取决于产品功能的复杂程度，而且也取决于现代元件、工艺、材料等的发展水平。如果产品可靠性指标定得过高，可能会因付出过高代价而失去市场。如果指标值定得过低，也许会使产品失去竞争能力。所以一般要综合考虑以下几个方面：使用者对产品可靠性的要求；国内现有产品可靠性水平；竞争产品（国外同类产品）已达到的水平和可靠性增长趋势；科研和试验工作能力；工业技术经济可行性等。综合这几个方面以后，以产品研制、制造、维修总费用最低和产生的效益最高为准则提出合理的可靠性指标值。

6·3 产品可靠性指标实例

表 8·2-3 几种电工产品可靠性指标实例

产品名称	可靠性特征量	指标值
继电器	λ	$10^{-6}\sim10^{-7}$ 1/次
	MTTF	$10^{3}\sim10^{5}$ 1/次
低压异步电动机	MTBF	20000～80000h
滚筒式电阻炉	MTBF	4900～7200h
低温井式电阻炉	MTBF	3900～4800h
电冰箱	R (4000h)	≥0.9
火力发电机组	FOR	5%～7%
	AF	80%～90%

表中 AF——可用系数；

AF=（可用小时/统计时间小时）×100。

第 3 章 常见的故障分布类型

1 产品故障的一般规律

零部件和元器件的故障率变化有递减型 DFR（decreasing failure rate）、恒定型 CFR（constant failure rate）、递增型 IFR（increasing failure rate）等三种基本类型。

对于实际产品，大多是由具有多种故障类型的零部件组成，因此不是用一种故障类型所能表示，而是由基本类型混合而成。最为典型的是由递减、恒定、递增三种基本类型组合而成的浴盆形故障率变化曲线，如图 8·3-1 所示。它基本上概括了产品在整个寿命期内故障率变化情况，通常称为浴盆曲线。

故障率 $\lambda(t)$ 递减的部分，称为产品的早期故障期，对应于产品的早期寿命阶段。在这段时间内，产品内寿命短的部分，不适应外部环境的薄弱环节以及设计、制造等缺陷而引起的故障频繁发生。通过排除早期故障或老练以后使故障率稳定下来。稳定下来以后的故障率 $\lambda(t)$ 基本上不随时间变化，即为恒定故障期。这段时期发生的故障是随机的或偶然的，故又称为偶然故障期。这段时期产品结构的故障率最低，最为稳定，是产品的有效使用寿命阶段。最后阶段是故障率上升期。因构成产品的零部件磨损、老化使故障频繁发生，称为耗损故障期。也是产品的损耗寿命阶段。

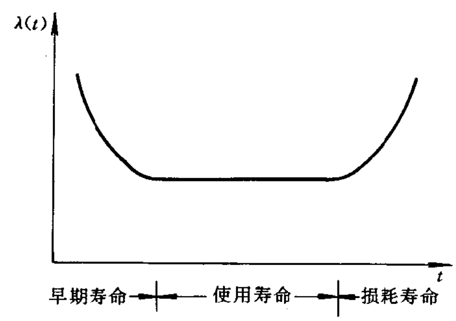


图 8·3-1 故障率变化曲线

提高产品可靠性水平的重要方面就是尽量使早期故障率水平降低，早期故障期缩短，耗损故障期推迟，偶然故障期延长，故障率水平下降。

由于故障机理不同，产品存在着若干不同的寿命分布，即寿命取值的概率规律，也称为统计故障模型。

2 单参数指数分布

2·1 单参数指数分布定义

设 T 为随机变量，若 T 的概率密度函数为

$$f(t)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda t} & \lambda>0,t\geqslant0\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{8·3-1}$$

则称随机变量 T 服从参数为 λ 的指数分布。

指数分布是唯一的故障率为常数的连续分布。故障率为常数的分布主要用于以下几种假设：

(1) 电子产品。

(2)由许多小部件组成的复杂系统，然而各个小部件是具有不同的故障率的产品。

(3) 数据异常缺乏以至无法进行精确地数学处理的情况。

2·2 单参数指数分布的参数

单参数指数分布的参数 λ 是故障率函数，而且为常数。

3 双参数指数分布

3·1 双参数指数分布定义

设随机变量 T 的概率密度函数为

$$f(t)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}, t\geqslant\gamma, \lambda>0 \\ 0 \qquad \text{其他}\end{cases} \tag{8·3-2}$$

则称 T 服从参数 λ 与 γ 的指数分布。

3·2 双参数指数分布的参数

双参数指数分布的参数 λ 与单参数指数分布相同。参数 γ 叫位置参数。如果 $\gamma=0$，双参数指数分布则变为单参数指数分布。

4 威布尔分布

4·1 威布尔分布定义

设随机变量 T 的概率密度函数为

$$f(t)=\begin{cases}\beta\eta^{-\beta}(t-\gamma)^{\beta-1}\exp\{-[(t-\gamma)/\eta]^{\beta}\}, \\ \qquad \eta、\beta>0, t\geqslant\gamma \\ 0 \qquad \text{其他}\end{cases} \tag{8·3-3}$$

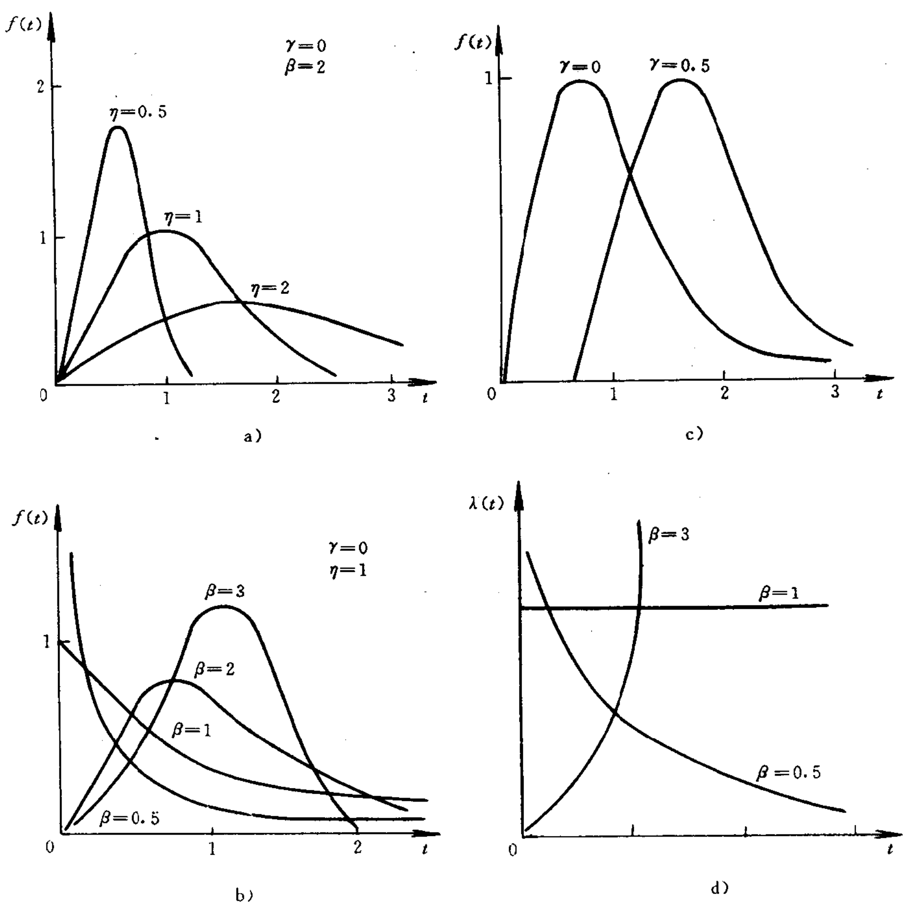


图 8·3-2 η、β、γ 取不同值的威布尔分布

则称随机变量 T 服从参数 β、η 与 γ 的威布尔分布。

威布尔分布可以通过调整它的参数满足产品寿命的各个阶段。适用范围相当宽。常用于可靠性研究中的比较复杂的分布。

4·2　威布尔分布的参数

威布尔分布是一种三参数分布。其中 η 是尺度参数，也是特征寿命。尺度参数起着放大与缩小比例常数作用。此参数往往与工作条件下的负载大小有关，负载大时相应 η 就小，反之则大。在参数 γ、β 不变的情况下，η 取不同值时，使密度函数曲线在时间轴上有所压缩或伸张。图 8·3-2a 给出了 γ、β 不变，η 取不同值时的威布尔曲线。

参数 β 是威尔布分布中具有重要意义的参数。改变 β 值的大小使威布尔分布具有各种不同的形状。β 也称为形状参数。形状参数 β 往往与失效机理相联系，不同的失效机理将有不同的 β。当 $\beta=1$ 时，威布尔分布简化为指数分布。故障率为常数，这时 $\eta=1/\lambda$（平均寿命）。相当于产品的使用寿命阶段。$\beta<1$ 时，为早期失效期。$\beta>1$ 时，为耗损（老化）失效期。$\beta=3.57$ 时，威布尔曲线近似于正态分布曲线。图 8·3-2b、d 给出了 γ、η 不变，而 β 取不同值时的威布尔曲线和故障率曲线。

参数 γ 是威布尔分布的位置参数。即产品在 $t=\gamma$（时间单位）以前不发生故障，$t=\gamma$ 时刻以后开始发生故障。位置参数 γ 也称为无故障时间，或称为最小寿命。在工程实际问题中 $\gamma=0$ 的情况较多。此时威布尔分布变为两参数的威布尔分布。图 8·3-2c 给出了 η、β 不变，γ 取不同值的威布尔曲线。其特点是初始零点不同。

5　正态分布

5·1　正态分布定义

设随机变量 T 的概率密度函数为

$$f(t)=[1/(\sqrt{(2\pi)}\sigma)]e^{-(1/2)[(t-\mu)/\sigma]^2}$$
$$-\infty<t<+\infty \qquad (8·3\text{-}4)$$

则称随机变量 T 服从正态分布。记作 $T\sim N(\mu,\sigma^2)$，其中 $\sigma>0$。

正态分布常用于描述产品的损耗寿命期。另外电力负荷预测、测量误差和许多（15 个以上）独立随机变量之和的分布等常用正态分布表示。许多统计分布如 χ^2 分布、t 分布和 F 分布等均由正态分布导出。二项分布当 $n\to\infty$ 时以正态分布为极限分布。

5·2　正态分布的参数

正态分布密度函数在（$-\infty$，$+\infty$）内均有定义。参数 μ 与 σ 为正态分布的对称位置及形状参数。同时参数 μ 与 σ 分别为正态分布的均值和标准差。正态分布曲线是以 $t=\mu$ 为对称轴以横轴为渐近线的钟形曲线。μ 是它的参数并在 $t=\mu$ 处取最大值，$f_{max}=1/[\sqrt{(2\pi)}\sigma]$。在 $t=\mu\pm\sigma$ 处有拐点（$\mu\pm\sigma$，$f_{max}e^{-1/2}$）。两个不同的正态分布的差别仅表现在参数 μ 和 σ 不同上。当 σ 不变而改变 μ 时，对称轴位置改变，而形状不变。当 μ 不变而 σ 改变时，对称轴位置不变而形状改变。参数 σ 决定了正态分布的形状，σ 越大，图形越宽；σ 越小，图形越窄。图 8·3-3 分别表示改变 μ 和 σ 时正态分布的曲线。

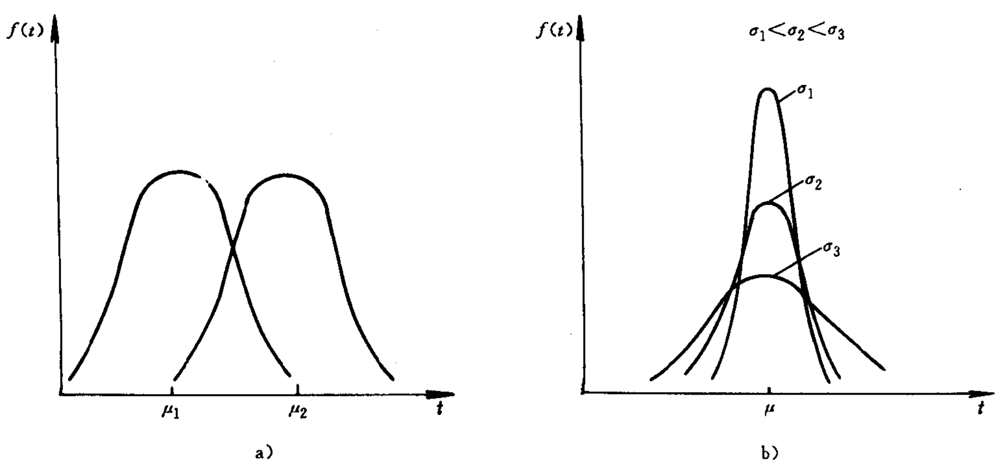


图 8·3-3　μ、σ 取不同值的正态分布曲线

由于正态分布的积分不能直接计算出来，列一张分布数值表又牵扯到 μ 和 σ 两个参数，不易列出。因此一般设法去掉这两个参数。令变量代换 $x=(t-\mu)/\sigma$，得到标准正态分布的概率密度函数

$$f(x)=[1/\sqrt{2\pi}]e^{-(1/2)x^2} \quad -\infty<x<+\infty \tag{8·3-5}$$

记为 $X\sim N(0,1)$。标准正态分布的图形对称于纵坐标轴。

6 对数正态分布

6·1 对数正态分布定义

设随机变量 T 的概率密度函数为

$$f(x)=\begin{cases}[1/(\sqrt{2\pi}\sigma t)]e^{-(1/2)[(\ln t-\mu)/\sigma]^2}, \\ t>0,\sigma>0, \qquad -\infty<\mu<+\infty \\ 0 \qquad\qquad 其他\end{cases} \tag{8·3-6}$$

则称随机变量服从对数正态分布。

对数正态分布常用来表示：

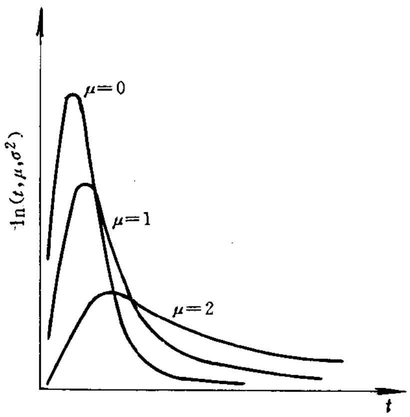
(1) 维修过程中故障停工时间的分布。

(2)由裂痕扩展而引起的疲劳、腐蚀等故障的分布等。

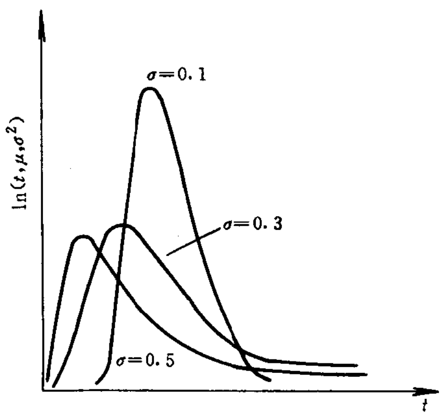
6·2 对数正态分布的参数

对数正态分布的参数 μ 与 σ 不是均值和标准差。μ 是位置参数，σ 是尺度参数。如果取时间 t 的对数，把 $\ln t$ 作为横坐标，这时对数正态分布转变为正态分布形式。在转变为正态分布形式时，μ 与 $\ln t$ 的平均值相对应，σ 与 $\ln t$ 的标准差相对应。所以有时也把对数正态分布的参数 μ 与 σ 叫做对数均值和对数标准差。

对数正态分布曲线呈不对称的单峰山包形。在 $t=e^\mu$ 或 $\ln t=\mu$ 处达到最大，即众数是 e^μ。在 μ 不变的情况下，随着 σ 的减小曲线逐渐趋于对称。图 8·3-4 表示 μ 与 σ 取不同值时的对数正态分布曲线。



a)



b)

图 8·3-4 μ 与 σ 取不同值的对数正态分布曲线

7 极值分布

7·1 极值分布定义

若随机变量 T 的概率密度函数为表 8·3-1 中的任意一种，则称随机变量 T 服从极值分布。

其中三种为极小值分布，二种为极大值分布。极小值分布与极大值分布统称为极值分布。极值分布的六种类型是相互关联的。如果把极大值分布的随机变量 T 置换成 $-T$，则变成对应类型的极小值分布。Ⅱ型与Ⅲ型极小值分布通过对数变量代换则将变成Ⅰ型极小值分布。Ⅰ型极值分布从形式上看又被称为二重指数分布。

表 8·3-1 极值分布函数

名称		表达式
极小值	Ⅰ型	$f(t)=\frac{1}{n}\exp\left(\frac{t-\gamma}{\eta}-\exp\frac{t-\gamma}{\eta}\right) \quad -\infty<t<+\infty,\ \eta>0$

（续）

名称		表达式
极小值	Ⅱ型	$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{-\beta-1}\exp\left[-\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{-\beta}\right]\quad -\infty<t\leqslant\gamma,\eta、\beta>0$
	Ⅲ型	$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]\quad \gamma\leqslant t<+\infty,\eta、\beta>0$
极大值	Ⅰ型	$f(t)=\frac{1}{\eta}\exp\left[-\frac{t-\gamma}{\eta}-\exp\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right]\quad -\infty<t<+\infty,\eta>0$
	Ⅱ型	$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{-\beta-1}\exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{-\beta}\right]\quad \gamma\leqslant t<+\infty,\eta、\beta>0$
	Ⅲ型	$f(t)=\frac{\beta}{\eta}\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}\exp\left[-\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]\quad -\infty<t\leqslant\gamma,\eta、\beta>0$

极值分布常用于考虑极小或极大特征构成要素的情况。如连环强度由作为构成要素的各环强度的最小值是关键因素。

极值分布是与威布尔分布有密切关系的一类分布，Ⅲ型极小值分布就是威布尔分布。

7·2 极值分布的参数

Ⅰ型极值分布是单偏峰曲线，极大值分布曲线向右斜弯如图 8·3-5a，故障率函数随 t 增加接近于单位1，极小值分布曲线向左斜弯，故障率随 t 增加而按指数型增加。参数 γ 和 η 分别是位置参数和尺度参数。尺度参数 η 越小曲线越集中，η 越大曲线越平坦。如图 8·3-5b所示。参数 γ、η 不是均值和方差，事实上 γ 是众数，极大值分布的均值为 $\gamma+0.577\eta$，极小值均值为 $\gamma-0.577\eta$，极大和极小值分布标准差为 1.283η。

Ⅱ型极值分布：如果随机变量的对数为极值分布，随机变量的分布可由Ⅰ型极值分布描述，它们的关系与正态分布和对数正态分布的关系相类似。

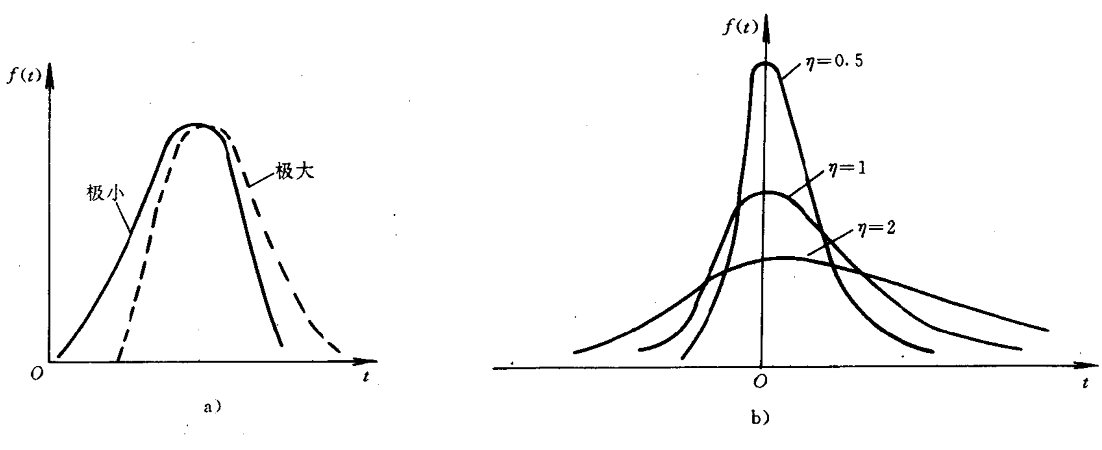


图 8·3-5 不同参数的极值分布曲线

Ⅲ型极值分布即为威布尔分布。

8 可靠性特征量与分布参数的关系

可靠性特征量与分布参数的关系见表 8·3-2。

几种常见分布函数的图形见表 8·3-3。

9 产品故障类型的判定方法

9·1 参数的检验

已知母体 X 的分布类型 $F(X;\theta)$，假设关于建立

表 8·3-2 可靠性特征量与分布参数的关系

特征量＼分布类型	单参数指数分布	双参数指数分布	威布尔分布	正态分布	对数正态分布	极值分布
密度函数	$f(t)=\lambda e^{-\lambda t}$	$f(t)=\lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}$	$f(t)=\frac{\beta}{\eta^{\beta}}(t-\gamma)^{\beta-1}$ $\times\left\{\exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]\right\}$	$f(t)=\frac{1}{\sqrt{(2\pi)}\sigma}$ $\times\left\{-\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^{2}\right]\right\}$	$f(t)=\frac{1}{\sqrt{(2\pi)}\sigma t}$ $\times\left\{-\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)^{2}\right]\right\}$	$f(t)=\frac{1}{\eta}\exp\left\{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right.$ $\left.\times\left[-\exp\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right]\right\}$ 极大 $f(t)=\frac{1}{\eta}\exp\left\{\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right.$ $\left.\times\left[-\exp\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right]\right\}$ 极小
可靠度	$R(t)=e^{-\lambda t}$	$R(t)=e^{-\lambda(t-\gamma)}$	$R(t)=$ $\exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}\right]$	$R(t)=\Phi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)$	$R(t)=\Phi\left(\frac{\mu-\ln t}{\sigma}\right)$	$R(t)=\exp\left[-\exp\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right]$ 极大 $R(t)=\exp\left[-\exp\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)\right]$ 极小
失效率	$\lambda(t)=\lambda$	$\lambda(t)=\lambda$	$\lambda(t)=\frac{\beta}{\eta^{\beta}}(t-\gamma)^{\beta-1}$	$\lambda(t)=$ $\dfrac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\left\{\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^{2}\right]\right\}}{\varphi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)}$	$\lambda(t)=$ $\dfrac{\frac{1}{\sqrt{(2\pi)}\sigma t}\left\{\exp\left[\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)^{2}\right]\right\}}{\varphi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)}$	$\lambda(t)=\frac{1}{\eta}\exp\left(-\frac{t-\gamma}{\eta}\right)$ 极大 $\lambda(t)=\frac{1}{\eta}\exp\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)$ 极小
可靠寿命	$t_{\gamma}=$ $\frac{-2.033}{\lambda}\lg\gamma$	$t_{\gamma}=$ $\frac{-2.033}{\lambda}\lg\gamma+\gamma$	$t_{\gamma}=$ $\eta(-0.2303\lg\gamma)^{\frac{1}{\beta}}+\gamma$	$t_{\gamma}=K_{1-\gamma}\sigma+\mu$	$t_{\gamma}=\exp\{K_{1-\gamma}\sigma+\mu\}$	$t_{\gamma}=\gamma+\eta\left[\ln\left(\ln\frac{1}{R}\right)\right]$ 极大 $t_{\gamma}=\gamma-\eta\left[\ln\left(\ln\frac{1}{R}\right)\right]$ 极小
中位寿命	$t_{0.5}=$ $\frac{0.693}{\lambda}$	$t_{0.5}=\frac{0.693}{\lambda}+\gamma$	$t_{0.5}=\eta(0.693)^{\frac{1}{\beta}}+\gamma$	$t_{0.5}=\mu$	$t_{0}=e^{\mu}$	$t_{0.5}=\gamma-0.3665\eta$ 极大 $t_{0.5}=\gamma+0.3665\eta$ 极小
平均寿命	$E(T)=\frac{1}{\lambda}$	$E(T)=\frac{1}{\lambda}+\gamma$	$E(T)=\eta\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)+\gamma$	$E(T)=\mu$	$E(T)=\exp\left(\mu+\frac{\sigma^{2}}{2}\right)$	$E(T)=\gamma+0.577\eta$ 极大 $E(T)=\gamma-0.577\eta$ 极小
参数意义	λ—产品故障率	λ—产品故障率 γ—位置参数	β—形状 η—比例参数，也是特征寿命 γ—位置参数，也称无故障时间	μ—均值 σ—标准差	μ—位置参数，也称对数均值 σ—尺度参数，也称对数标准差	γ—位置参数（众数） η—尺度参数
备注			$\Gamma\left(1+\frac{1}{\beta}\right)$—伽玛函数	$K_{1-\gamma}$—标准正态分布下侧分位数 $\Phi\left(\frac{\mu-t}{\sigma}\right)$—标准正态分布函数		

表 8・3-3　分布函数、可靠度函数、故障率函数图形表

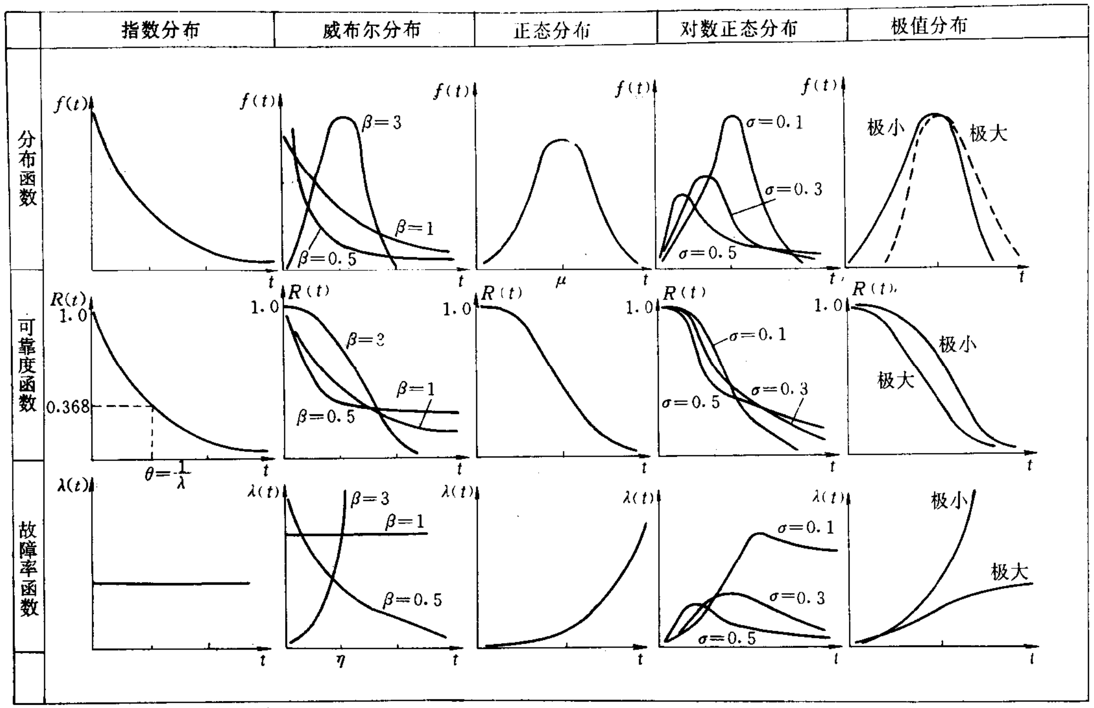


表 8・3-4　几种常见分布母体参数的假设检验

母体分布	H_0	H_1	检验统计量	取样分布	拒绝域	备注
$f(t)=\frac{1}{\theta}\exp\left[\frac{-t}{\theta}\right]$	$\theta=\theta_0$ $\theta=\theta_0$ $\theta=\theta_0$	$\theta>\theta_0$ $\theta<\theta_0$	$\chi^2=\frac{2\gamma\hat{\theta}}{\theta_0}$	$\chi^2(2\gamma)$	$\chi^2>\chi^2_\alpha(2\gamma)$ $\chi^2<\chi^2_{1-\alpha}(2\gamma)$ $\chi^2<\chi^2_{1-\alpha/2}(2\gamma)$或$\chi^2>\chi^2_{\alpha/2}(2\gamma)$	α 显著水平 $\hat{\theta}=$ $\frac{1}{\gamma}\left[\sum_{i=1}^{r}t_i+(n-\gamma)t_i\right]$
$f(t_1)=\frac{1}{\theta_1}\exp\left[\frac{-t_1}{\theta_1}\right]$ $f(t_2)=\frac{1}{\theta_2}\exp\left[\frac{-t_2}{\theta_2}\right]$	$\theta_1=\theta_2$ $\theta_1=\theta_2$ $\theta_1=\theta_2$	$\theta_1>\theta_2$ $\theta_1<\theta_2$	$F=\frac{\hat{\theta}_1}{\hat{\theta}_2}$	$F(2\gamma_1,2\gamma_2)$	$F>F_\alpha(2\gamma_1,2\gamma_2)$ $F<F_{1-\alpha}(2\gamma_1,2\gamma_2)$ $F<F_{1-\alpha/2}(2\gamma_1,2\gamma_2)$或$F>F_{\alpha/2}(2\gamma_1,2\gamma_2)$	定数结尾无替换试验 $\frac{1}{\gamma}nt_r$ 定数结尾有替换试验

(续)

母体分布	H_0	H_1	检验统计量	取样分布	拒绝域	备注
$f(t)=\frac{\beta}{\eta^{\beta}}t^{(\beta-1)}\exp\left(\frac{-t}{\eta}\right)^{\beta}$	$\sigma=\sigma_0$ $\sigma=\sigma_0$ $\sigma=\sigma_0$	$\sigma<\sigma_0$ $\sigma>\sigma_0$	$\chi^2=h\frac{\hat{\sigma}}{\sigma_0}$	$\chi^2(h)$	$\chi^2<\chi^2_{1-\alpha}(h)$ $\chi^2>\chi^2_{\alpha}(h)$ $\chi^2<\chi^2_{1-\alpha/2}(h)$或$\chi^2>\chi^2_{\alpha/2}(h)$	$\sigma=1/\beta$ $h=2/(l_{r,n})$ $l_{r,n}$:查参考文献[25]的表 $\hat{\sigma}$查参考文献[25]的表
$f(t_1)=\frac{\beta_1}{\eta_1^{\beta_1}}t_1^{\beta_1-1}\exp\left(\frac{-t_1}{\eta_1}\right)^{\beta_1}$ $f(t_2)=\frac{\beta_2}{\eta_2^{\beta_2}}t_2^{\beta_2-1}\exp\left(\frac{-t_2}{\eta_2}\right)^{\beta_2}$	$\sigma_1=\sigma_2$ $\sigma_1=\sigma_2$ $\sigma_1=\sigma_2$	$\sigma_1<\sigma_2$ $\sigma_1>\sigma_2$	$F=\frac{\hat{\sigma}_1}{\hat{\sigma}_2}$	$F(h_1,h_2)$	$F<F_{1-\alpha}(h_1,h_2)$ $F>F_{\alpha}(h_1,h_2)$ $F<F_{1-\alpha/2}(h_1,h_2)$或$F>F_{\alpha/2}(h_1,h_2)$	
$X\sim N(\mu,\sigma^2)$	$\mu=\mu_0$ $\mu=\mu_0$ $\mu=\mu_0$	$\mu>\mu_0$ $\mu<\mu_0$ $\mu\neq\mu_0$	$U=\frac{\overline{X}-\mu_0}{\sigma}\sqrt{n}$	$N(0,1)$	$U\geqslant U_{\alpha}$ $U\leqslant -U_{\alpha}$ $\|U\|\geqslant U_{\alpha/2}$	$\overline{X}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i$, σ^2 已知
	$\mu=\mu_0$ $\mu=\mu_0$ $\mu=\mu_0$	$\mu>\mu_0$ $\mu<\mu_0$ $\mu\neq\mu_0$	$t=\frac{\overline{X}-\mu_0}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}}\sqrt{n(n-1)}$	$t(n-1)$	$t\geqslant t_{\alpha}(n-1)$ $t\leqslant t_{1-\alpha}(n-1)$ $\|t\|\geqslant t_{\alpha/2}(n-1)$	σ^2 未知
	$\sigma^2=\sigma_0^2$ $\sigma^2=\sigma_0^2$ $\sigma^2=\sigma_0^2$	$\sigma^2>\sigma_0^2$ $\sigma^2<\sigma_0^2$ $\sigma^2\neq\sigma_0^2$	$\chi^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\mu)^2}{\sigma_0^2}$	$\chi^2(n)$	$\chi^2\geqslant\chi^2_{\alpha}(n)$ $\chi^2\leqslant\chi^2_{1-\alpha}(n)$ $\chi^2\leqslant\chi^2_{1-\alpha/2}(n)$或$\chi^2\geqslant\chi^2_{\alpha/2}(n)$	μ已知
	$\sigma^2=\sigma_0^2$ $\sigma^2=\sigma_0^2$ $\sigma^2=\sigma_0^2$	$\sigma^2>\sigma_0^2$ $\sigma^2<\sigma_0^2$ $\sigma^2\neq\sigma_0^2$	$\chi^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}{\sigma_0^2}$	$\chi^2(n-1)$	$\chi^2\geqslant\chi^2_{\alpha}(n-1)$ $\chi^2\leqslant\chi^2_{1-\alpha}(n-1)$ $\chi^2\leqslant\chi^2_{1-\alpha/2}(n-1)$或$\chi^2\geqslant\chi^2_{\alpha/2}(n-1)$	μ未知
$X_1\sim N(\mu_1,\sigma^2)$ $X_2\sim N(\mu_2,\sigma^2)$	$\mu_1=\mu_2$ $\mu_1=\mu_2$ $\mu_1=\mu_2$	$\mu_1>\mu_2$ $\mu_1<\mu_2$ $\mu_1\neq\mu_2$	$U=\frac{\overline{X}_1-\overline{X}_2}{\sqrt{\sigma_1^2/n_1+\sigma_2^2/n_2}}$	$N(0,1)$	$U\geqslant U_{\alpha}$ $U\leqslant -U_{\alpha}$ $\|U\|\geqslant U$	σ_1^2、σ_2^2已知
	$\mu_1=\mu_2$ $\mu_1=\mu_2$ $\mu_1=\mu_2$	$\mu_1>\mu_2$ $\mu_1<\mu_2$ $\mu_1\neq\mu_2$	$t=\frac{\overline{X}_1-\overline{X}_2}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n_1}(X_{1i}-\overline{X}_1)^2+\sum_{i=1}^{n_2}(X_{2i}-\overline{X}_2)^2}}\times\sqrt{\frac{(n_1+n_2-2)n_1n_2}{n_1+n_2}}$	$t(n_1+n_2-2)$	$t\geqslant t_{\alpha}(n_1+n_2-2)$ $t\leqslant t_{1-\alpha}(n_1+n_2-2)$ $\|t\|\geqslant t_{\alpha/2}(n_1+n_2-2)$	已知$\sigma_1^2=\sigma_2^2$但数值未知
	$\sigma_1^2=\sigma_2^2$ $\sigma_1^2=\sigma_2^2$ $\sigma_1^2=\sigma_2^2$	$\sigma_1^2>\sigma_2^2$ $\sigma_1^2<\sigma_2^2$ $\sigma_1^2\neq\sigma_2^2$	$F=\frac{\sum_{i=1}^{n_1}(X_{1i}-\overline{X}_1)^2(n_2-1)}{\sum_{i=1}^{n_2}(X_{2i}-\overline{X}_2)^2(n_1-1)}$	$F(n_1-1,n_2-1)$	$F\geqslant F_{\alpha}(n_1-1,n_2-1)$ $F\leqslant F_{1-\alpha}(n_1-1,n_2-1)$ $F\leqslant F_{1-\alpha/2}(n_1-1,n_2-1)$或$F\geqslant F_{\alpha/2}$ $\times(n_1-1,n_2-1)$	μ未知