

高等学校教材

电子机械可靠性与维修性

庄 夔 王世萍 赵悼旻 周尔萍 编

黑龙江科学技术出版社

前 言

《电子机械可靠性与维修性》一书，系按原电子工业部的工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划，由电子机械教材编审委员会“电子机械可靠性与维修性”编审小组征稿、推荐出版的。1988年1月在上海召开了电子机械教材编审小组招标会，参加会议的有上海科技大学、西安电子科技大学、上海工业大学、桂林电子工业学院、杭州电子工业学院等高等院校的有关教师，根据各校近几年的教学经验和科研实践，共同拟定了该书的编写大纲。本教材是根据这次会议审定的要求编写的。

《电子机械可靠性与维修性》由何国伟担任主审。

本教材是精密机械、电子设备结构设计、机械设计、工业自动化、机械制造工艺等电子、机械类专业本科生和研究生选修课的统编教材，亦可作为本科生专业主干课程。还可作为工厂、研究所有关工程技术人员的参考书。

本书编写的指导思想是为电子机械的可靠性研究与设计提供理论依据，将可靠性理论、数学基础与工程实际揉为一体，系统地论述电子机械与维修性的各个方面。为了巩固和加深对教材内容的理解，选择了与内容密切结合的必要的例题。

本课程参考学时数为60学时。

本书由西安电子科技大学和上海科技大学合编，编者分工如下：

庄燮：第一、二、八、十章；王世萍：第三、四、五、七章；赵惇爻：第九章；周尔萍：第六章。

在编写过程中曾得到有关厂、所的热情支持，特别是王锡吉、李能贵、史定华、洪伦耀、王公宇等同志提供了许多宝贵的资料和建设性的意见，在此一并致谢。

限于编者水平，难免有错误，不足之处希望广大读者批评指正。

编 者

1989年4月

符 号 表

A	有效度; 屏蔽效果; 面积; 水平调整参数
B	二项分布; 余项; 磁通密度
C	致命度; 漂移系数; 费用; 阻尼; 电容; 比热; 复杂程度系数; 调整系数
D	子样方差; 扩散系数
d	分度圆直径; 轴径
E	数学期望; 电源电压; 输出电压; 空间激活能; 弹性模量; 辐射力; 电场强度
F	累积失效概率; 外载荷; 故障状态
f	概率密度函数; 频率; 振动频率 (Hz); 摩擦系数; 应力概率密度
G	网络; 花费函数; 维修度; 剪切弹性模量
g	维修分布密度函数; 强度概率密度; 统计量
H	更新函数
h	修正系数; 安全系数的概率密度; 更新密度
I	惯性矩; 电流
i	秩; 单元; 下标
J	考尔本数
j	下标
K	系数; 倍数; 加权因子; 反应速度; 弹簧刚度
k	玻耳兹曼分子气体常数
L	接收概率; 力臂长度
l	长度
M	力矩; 系统或单元的MTTR (简记)
MTBF	平均无故障时间
MTTF	失效前平均工作时间
MTTR	平均维修时间
m	威布尔分布的形状参数; 增长率
N	正态分布; 元器件总数; 试验循环数; N_r ——形状参数
n	累积失效数; 元件数; 安全系数
P	泊松分布; 概率; 功耗; 圆周力; 形状参数
p	概率值; 分布密度函数; 外激圆频率
Q	载荷; 热量
q	概率值; 系统不可靠度; 均布载荷
R	可靠度; 电阻; 热阻; 磁阻; 气体常数
r	强度; 距离
S	应力水平; S_M ——安全密度
s	应力; 子样的标准偏差; 截面积; 系统; 正常状态; 位移振幅
T	寿命; 绝对温度; 扭转力矩

t ——时间；威布尔分布的尺度参数； t 分布
 U ——磨损量
 u ——无效度；变量
 V ——方差；振动速度；变差系数
 W ——相对复杂系数；威布尔分布
 X ——随机变量；漂移量；随机过程
 y ——随机过程
 Z ——阻抗；自相关函数
 α ——显著性水平；失效模式的概率；维修系数；对流换热系数
 β ——元部件损伤的概率；形状参数；体积膨胀系数
 γ ——应力比；位置参数；频率比
 δ ——导热路径长度；强度
 ε ——相对变形量；黑度；误差
 η ——真尺度参数；隔振系数；贮备寿命；维修时间
 θ ——平均寿命；夹角；单位长度转角
 λ ——导热系数；失效率
 μ ——修复率；动力粘度；贮备失效率；均值
 ν ——运动粘度；自由度
 μ_r ——相对磁导率
 ξ ——寿命；随机变量
 π ——系数
 ρ ——相关系数
 σ ——标准偏差；应力； σ_r ——相对导电率
 τ ——加速系数；脉冲持续时间；剪切应力
 Λ ——频数因子
 φ ——结构函数；角系数
 χ^2 —— χ^2 分布
 ψ ——减振器变形
 Φ ——标准正态累积分布函数
 ω ——速度；固有频率；重要度；故障流参数
 N_u ——努谢尔特数
 P_r ——普朗特数
 G_r ——格拉晓夫数

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 可靠性的基本概念	(1)
第二节 电子机械可靠性的特点	(4)
第三节 电子机械可靠性与维修性的基本内容	(4)
第四节 电子系统和机械系统	(6)
第二章 可靠性的主要数量特征	(7)
第一节 可靠性与累积失效概率	(1)
第二节 失效(故障)密度函数与失效率函数	(11)
第三节 产品的寿命特征	(14)
第四节 产品可靠性指标之间的关系	(17)
第五节 电子机械常见的失效分布	(18)
第六节 可靠性计算中常用的概率分布	(34)
第三章 不可修复系统的可靠性	(40)
第一节 可靠性框图	(40)
第二节 串联系统	(42)
第三节 并联系统	(44)
第四节 非工作贮备系统	(52)
第五节 网络系统	(54)
第六节 关联系统	(26)
第四章 可靠性预计与分配	(67)
第一节 可靠性预计的目的及分类	(67)
第二节 可靠性预计方法	(67)
第三节 耗损失效的预计	(75)
第四节 维修性预计	(78)
第五节 可靠性分配	(80)
第五章 维修系统的可靠性	(92)
第一节 维修性的基本概念	(93)
第二节 马尔可夫型维修系统	(99)
第三节 串联维修系统	(105)
第四节 并联维修系统	(108)
第五节 维修系统指标的分配	(112)
第六章 维修策略与可维修性	(120)
第一节 概述	(120)
第二节 电子机械的可维修性	(120)

第三节 更新过程与更新理论·····	(121)
第四节 维修方式·····	(127)
第五节 最佳维修周期及最大可用度·····	(128)
第七章 机械零部件的可靠性设计·····	(135)
第一节 概述·····	(135)
第二节 安全系数与可靠度·····	(135)
第三节 静态应力——强度干涉模型·····	(141)
第四节 机械零件的可靠性设计·····	(152)
第八章 故障模式、影响及危害度分析与失效分析技术·····	(167)
第一节 概述·····	(167)
第二节 FMEA 的列表分析法·····	(168)
第三节 FMEA 的矩阵分析法·····	(174)
第四节 故障树分析·····	(177)
第五节 电子机械的失效分析·····	(182)
第六节 电子机械中常见的失效模式和失效机理·····	(183)
第七节 失效分析技术简介·····	(188)
第八节 设备的故障诊断技术与运行状态监测简介·····	(189)
第九章 可靠性设计技术·····	(194)
第一节 可靠性热设计·····	(194)
第二节 机械防护设计·····	(207)
第三节 电磁防护设计·····	(213)
第四节 其它可靠性设计技术·····	(220)
第十章 可靠性试验及数据处理·····	(226)
第一节 概述·····	(226)
第二节 抽样检验的原理及方案设计·····	(226)
第三节 寿命试验·····	(230)
第四节 贝叶斯抽样试验原理及方法·····	(234)
第五节 加速寿命试验·····	(236)
第六节 可靠性增长试验·····	(239)
第七节 环境试验与可靠性筛选试验·····	(240)
附表·····	(246)
参考文献·····	(251)

第一章 概 论

第一节 可靠性的基本概念

一、可靠性的定义和学习本课程的目的

“可靠性”并不是新的概念，实际上人们早已在关心各种产品（包括电视机一类的日常用品）的可靠性，例如说这件东西比那件要耐用些，或说这个产品老出毛病等。虽然没有用这个术语，但指的就是这个意思。随着科学技术的发展，特别是尖端技术的发展，需要把产品的可靠性由定性表示逐渐提高到定量表示，因而就能对产品的可靠性程度的比较、估价、选择作出科学的结论。

“可靠”，也是精密机械设备（包括电子机械等）总体设计的重要原则之一。一台设备，无论在原理上如何先进，在功能上如何全面，在精度上如何高级，假若可靠性差，故障频繁，不能在规定时间内稳定地工作，那么，它的使用价值就低，经济效果就差。

所谓“可靠性”，就是指“产品在规定的条件下和规定的时间内，完成规定功能的能力”。

产品的可靠性首先与“规定的条件”密切相关的，所谓规定的条件就是指产品在使用时的环境条件、使用条件、维护条件、承载条件及它的工作方式等。环境条件包括气候环境，如：温度、湿度、气压、风、砂、工业气体等；地域环境，如：高山、海上、空中、室内、野外等；机械环境，如：冲击、振动等；承载条件，包括力学的、电学的、光学的等，如：切削力、重力等，所加电压、电流的大小，它所处的电磁场条件等；工作方式又分为连续工作或间断工作等。同一产品在不同条件下，它的可靠性是不一样的。例如：某种电子机械在特别恶劣的条件下工作，湿度大、有强辐射和电磁干扰，那么它的可靠性比在恒温室中工作要低。如果需要在恶劣条件下可靠工作，则必须研究特种条件对策，采取有效措施。

产品的可靠性是时间的函数，一般说来，元器件经过筛选和整机跑合后，产品的可靠性水平将有一个较长时间的稳定使用或贮存阶段，在此之后，便随着时间的增长而降低。

“规定的时间”是指产品工作的期限，可以用时间或相应的指标来表示。例如：滚动轴承用小时或百万转，车轮用公里。

产品的可靠性与“规定的功能”有密切关系，所谓产品规定的功能，就是指产品的性能指标。它是指产品若干功能的全体，而不是指其中的一部分。例如电阻器的阻值、功率、温度系数、精度；电容器的容量、损耗角正切、绝缘电阻、耐压、精度；晶体管的放大倍数、反向漏电流等；电子计算机的运算速度、字长、容量、指令数；雷达的距离、分辨力、测角测速精度、频率范围、脉冲峰值、功率、跟踪速度；通讯机的频率范围、输出功率、通讯距离、调制度、信道、工种、失真度、保密性、兼容性、机动性等。

产品丧失规定的功能称为“失效”，对可修复的产品，也可称为“故障”。“失效判

据”是失效的判别标准，也即是判断失效的功能界限值。例如，可以规定 CB14 型精密聚苯乙烯薄膜电容器出现击穿、短路、引线断等致命失效，及其容量、损耗角正切、绝缘电阻超过某一规定值作为此电容器的失效标准。在讨论某一具体产品的可靠性以前，首先必须对产品在哪种情况下叫做不可靠，在什么情况下叫做失效加以规定。也就是说，一定要对产品出故障的失效判据标准加以规定。

我们所说的产品是相当广泛的，是指各种系统、机器、设备、精密机械、部件、零件等，有电子设备及其元器件、光学仪器、精密机床、精密仪器仪表、汽车、飞机、卫星、火箭、导航系统等。所谓“精密机械”是指高精度的，机、光、电子、液、气、磁等结合的系统、装置、设备，有陀螺仪、大规模集成电路光刻机、衍射光栅划片机、精密机床、精密仪器等。我们着重研究电子机械和元器件的可靠性，使读者熟悉这些间接经验和在实践中的直接经验，设计和生产出较可靠的产品来。

学习本课程目的：(1) 了解可靠性技术的概况，(2) 初步掌握概率法设计和可靠性分析，(3) 培养独立工作和思考能力。

二、可靠性技术的发展简史

可靠性问题的研究是从第二次世界大战开始的。当时雷达系统发展很快，但它的电子设备却屡出故障，根据有关统计表明，它仅有30%的时间能有效地工作，这种教训迫使人们开展可靠性的正规的研究。

以后逐渐渗透到冶金、机械、航天等其他行业和各个技术领域，形成了可靠性技术这样一门新兴的学科。

美国从1940年开始了电子设备的可靠性问题的研究，1957年以后为了推行航天计划，大力进行了用通过试验和数学方法评定设备可靠度的研究。随后日本、法国、加拿大、苏联、中国等也相继开展了这方面的研究工作。

可靠性技术从50年代打下基础后（1957年美国电子设备可靠性咨询组发表的“电子设备可靠性”的报告是一个开端），就沿着几个方向发展，至今它已经包含了三个相互有关的分支：(1) 可靠性工程：它是产品全过程（规划、设计、制造、使用、维修等）的可靠性技术活动和管理活动的总称，包括零部件和系统的可靠性分析，可靠性设计等；(2) 可靠性物理：又称故障物理学，它研究零部件、元器件的失效的物理原因，以及拟定提高可靠性的措施；(3) 可靠性数学：研究可靠性的定量方法及规律，它的基础是概率论和数理统计等。

三、产品质量与可靠性的关系

可靠性问题，说到底还是个质量问题。产品质量是产品的适用性，它包括产品的性能、寿命、可靠性、安全性、价格、交货期、服务等。因此，可靠性也是产品的一个质量指标，而且只有在引进了可靠性指标后，才能和其他质量指标一起，对产品质量作全面评定。

可靠性与其他质量指标（技术性能指标）既有联系又有区别，可靠性是“用时间尺度来描述的质量指标”，它反映在使用条件下产品质量的时间效应，也即是，对一批产品来说，使用到 t 小时可能有百分之几的产品不出故障，对一件产品来说，使用到 t 小时，有百分之几的可能性不出故障，产品的可靠性数据，需要对以往相同产品进行大量试验和现场调查，并进行统计估算，才能获得。而技术性能指标则是在产品出厂时的质量状态，它

可以通过仪器直接测量出来。若产品不可靠, 技术性能再优良, 也得不到发挥, 若产品的技术性能低劣, 它的可靠性也肯定很差。

产品的可靠性也直接影响经济效益, 由图 1-1 可看出, 在 A 点前, 提高产品可靠性能有效地减少维修费用, 虽然在设计和生产时需采取适当的提高可靠性的措施, 生产费用稍有增加, 但寿命周期延长, 总费用下降。提高了可靠性, 产品价廉物美经久耐用, 将更受用户欢迎。尤其是国防尖端产品, 更需安全可靠。1986 年 1 月 28 日, 美国的“挑战者”号航天飞机爆炸, 震惊世界, 就是由于燃料箱的小小密封元件失效所引起, 足以说明可靠性对人身安全的重要意义。民用交通及其他产品, 也同样要考虑安全, 汽缸阀门漏气可能引起严重的人身事故, 飞机上的发动机出了问题也会引起大祸, 1988 年 1 月 18 日, 中国民航伊尔-18 型 222 号客机, 由于发动机内起动机维修使用不当, 发生故障而遇难, 机毁人亡, 造成 108 人丧生。总之可靠性的重性, 愈来愈为人们重视和理解。

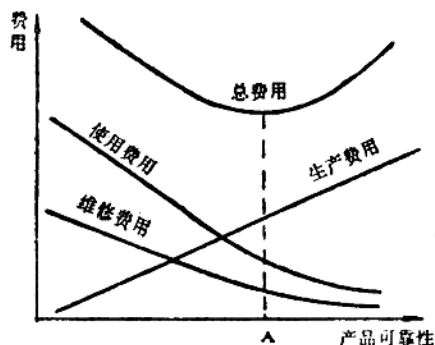


图 1-1 可靠性与费用的关系

四、可靠性工作的基本内容与特点

表 1-1 列出可靠性工作的基本内容。

表 1-1

可靠性工作项目实施表 (自 GJB450-88)

工 作 项 目	类 型	研 制 生 产 阶 段			
		战术技术指 标论证阶段	方案论证 及确认 阶段	工程研 制阶段	生 产 阶 段
制定可靠性工作计划	管 理	△	△	✓	✓
对转承制方和供应方的监督和控制	管 理	△	△	✓	✓
可靠性大纲评审	管 理	△	△ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾
建立故障报告、分析和纠正措施系统	工 程	×	△	✓	✓
故障审查及组织	管 理	×	△ ⁽¹⁾	✓	✓
建立可靠性模型	工 程	△	△ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	○ ⁽¹⁾
可靠性分配	计 算	△	✓	✓	○ ⁽¹⁾
可靠性预计	计 算	△	△ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	○ ⁽¹⁾
故障模式、影响及危害度分析	工 程	△	△ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	○ ⁽¹⁾
潜在电路分析	工 程	×	×	✓ ⁽¹⁾	○ ⁽¹⁾
电子元器件和电路的容差分析	工 程	×	×	✓	○
制定元器件大纲	工 程	△	△ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾

续上表

确定可靠性关键件和重要件	管 理	$\Delta^{(1)}$	$\Delta^{(1)}$	✓	✓
确定功能测试、包装、贮存、装卸、运输、维修对可靠性的影响	工 程	×	$\Delta^{(1)}$	✓	○
环境应力筛选	工 程	×	Δ	✓	✓
可靠性增长试验	工 程	×	$\Delta^{(1)}$	✓ ⁽¹⁾	×
可靠性鉴定试验	计 算	×	$\Delta^{(1)}$	✓ ⁽¹⁾	✓ ⁽¹⁾
可靠性验收试验	计 算	×	×	Δ	✓ ⁽¹⁾

符号说明：管理——可靠性管理；工程——可靠性工程；计算——可靠性计算；✓——适用；○——仅设计更改时适用； Δ ——根据需要选用；×——不适用

注：1)要综合考虑费用效益或其它标准要求后确定。

一种产品的可靠性高低，由它的研制、生产、检验、使用各阶段所决定。因此需要环环紧扣，处处把关。从纵的方面来看，生产部门与使用部门有矛盾又有统一，都需要提高产品的可靠性。在组织管理上，则需要各部门协同工作，大至国家一级部门，小至企业单位内部，都有专门的质量管理机构，可靠性工作则是质量管理工作的有机组成部分。

第二节 电子机械可靠性的特点

电子机械又称机电一体化设备，是电子与机械的有机结合体。机电一体化是国际上一个新的发展动向，也是我国振兴机械工业的必由之路。

电子机械设备的总体设计，是在具体设计以前，从总体角度出发，本着简单、实用、可靠、经济、安全美观等原则，进行全面的考虑、分析和估算，形成总体方案，所以可靠性设计是它的内容之一。这里所说的“电子机械”范围是比较广泛的，它是指电子、机械、光学等有机结合的电子设备、机电一体化产品、电子精密机械、各种系统、仪器、装置、数控机床等，例如：雷达天线及其伺服系统、大规模集成电路光刻机等。它们都有电子系统和机械系统，因而它的可靠性有其独特之处，需要综合电子和机械这两方面的技术，并且要着重考虑精度、刚度、磨损等问题，在设计阶段就需要考虑如何“保持精度”，随着使用时间的增大，电子机械的各个零件将逐渐磨损及腐蚀，材料的不稳定性和残留内应力将使零部件逐渐产生永久形变，因而与选材、热处理等都密切相关，这些因素都将使精度逐渐下降，超出一定范围，设备就不能正常工作。这也是可靠性工程内容之一。

电子机械是机、电、光结合的精密设备和仪器。当前，机电系统已有了较多的研究，光学设备或光学仪器的可靠性设计急待发展，一项尖端技术或民用设备，具有光学子系统的是很多的，因而，机电光等的综合系统的可靠性研究，仍是一个急待发展的重要课题。

第三节 电子机械可靠性与维修性的基本内容

电子机械产品的可靠性包括固有可靠性和使用可靠性，它们涉及设计、制造、使用和维护的全过程，并和管理工作、人员因素和环境状况密切相关。设计、制造决定固有可靠

性,使用维护保养使用可靠性,因此提高电子机械的可靠性需要采取综合性措施。可靠性工作应贯穿新产品研制的全过程,主要内容见表1-2。

表1-2 各阶段可靠性活动示例(MIL-STD-781C)

计划阶段划分	初步设计阶段	方案论证阶段	全面研制阶段		生产阶段
可靠性任务范围	确定要求	提供设计依据	提供研制依据	提供鉴定依据	提供生产依据
主要任务	• 确定寿命周期	• 确定计划准则	• 修正可靠性模型和生产模型	• 修正可靠性鉴定试验(设计定型、生产定型)	• 可靠性验收试验
有关任务	• 确定环境要求 • 获得类似系统和设备的现场使用可靠性	• 进行设计分析 — 热设计 — EMC — 失效模式效应和后果分析 • 规定对可靠性的定量要求 • 可靠性分配 • 准备可靠性预计 • 样机试验	• 修正失效模式、效应和后果分析 • 进行可靠性增长试验(试验分析和确定)	• 环境鉴定试验	• 环境验收试验
主要的辅助任务	• 系统效能分析 • 从类似系统和设备得到现场使用可靠性和环境数据	• 元部件鉴定应用和减额准则 • 鉴定和验收试验条件、程序和判别标准的确定	• 失效再现控制计划 • 趋向分析 • 文件审评	• 失效再现控制计划 • 趋向分析 • 元部件鉴定 • 文件及其更改审评 • 老练和筛选	• 失效再现控制计划 • 趋向分析 • 元部件鉴定 • 更改审评 • 储存监视 • 工序控制 • 老练和筛选

从设备故障原因的统计资料看出,设计占40%。也就是说,设计不良是导致可靠性不高的主要因素,因此开展产品的可靠性设计是必要的。另外,制造过程的质量控制及使用过程的失效分析,都是不容忽视的重要环节。而且还需要实行“全面质量管理”(T.Q.C),也就是把技术工作、管理工作和政治思想工作紧密结合起来,使质量管理和可靠性不只是少数专业人员的工作,而是有一套从上到下、各部门、各种人员紧密配合的全面质量管理体系,这样做才能更有效地提高产品质量和可靠性。

一、设计阶段的可靠性工作

可靠性设计是指在常规工程设计中,运用可靠性工程所提供的理论和方法,使设计方案在满足性能技术指标的同时,也满足预定的可靠性指标的要求。

设计阶段有如下工作:系统设计的分析,各种方案的比较,设计图纸和规范的评价,优选元件和材料表的编制,试验计划的编写与分析。还有一些特有的工作,如:分析失效模式和影响,各种可靠性保障技术的设计,编排设计评价对照表,可靠性估计,环境设计等。

设计决定产品的固有质量,同样,设计也决定产品的固有可靠性,所以在设计阶段,可靠性分析受到重视,通过反复的分析、试验、评审和反复修改设计,使之能在产品投入生产和使用之前,把产品的失败因素、功能退化因素减小到最低程度,来提高产品的固有可靠性。

二、制造阶段的可靠性工作

在产品制造过程中,我们通过严格的质量控制(QC),使产品达到所规定的各种性能及可靠性指标,还要进行“可靠性验证”试验。

三、使用阶段的可靠性工作

产品使用时，需要进行正确的操作、保养和维修。在零部件失效时，需及时修理、更换，还必须进行“失效分析”，也就是分析引起产品失效的原因，分析其失效模式、机理，并提出对策，以防止其再发生，并反馈到设计、工艺、检测，修订技术要求和改进设计、工艺等，提高产品的固有可靠性。

第四节 电子系统和机械系统

目前有关电子设备的一般的可靠性规范的制定，可靠性预测方法，可靠性试验方法，环境条件的规定，可靠性程序的计划和实施等，所有有关可靠性的技术方法大体上都已确立。

由于电子电路的特性和电子元件的故障一般遵循指数分布，利用用于同样环境及使用条件下的同样元件的故障数据，就可以进行可靠性分析和可靠性预测。处于预想的负荷及环境下的复杂的电子设备，由非常多的标准元件组成时，用这种方法可得到大体估计值。

而机械系统将长期体验的故障教训反映在设计上，根据各种机械的具体情况制定出设计标准。遵守这些设计标准设计出的机械系统，其可靠性可以得到间接的保证。所谓设计标准，是由材料的选择、结构形式、容许应力、安全系数等所决定的。

当新设计制造一种类似于已有的机械时，如能按照这个设计标准设计，一开始就能具有相当高的可靠性，至少也不会比过去同类设备大幅度降低可靠性。这里还要说明的是，过去的机械尽管没有有意识地直接采用可靠性理论进行设计，但因运用了过去的经验，也等于间接地获得了可靠性。

随着社会的发展，对机械系统也提出许多新的要求，因而对机械系统的可靠性设计在下列几个问题作了进一步的研究：

- (1) 关于材料方面的；
- (2) 关于强度（静疲劳、疲劳、热疲劳）方面的；
- (3) 关于刚度（颤动、振动）方面的；
- (4) 关于精度和机能（磨损、腐蚀）方面的；
- (5) 综合以上各方面的。

以上这些设计当中的可靠性问题，要靠专业技术来解决，但运用可靠性理论，可把问题中心提出来，对电子机械来说，着重关于精度和机能（磨损、腐蚀）方面的问题的研究和解决。

第二章 可靠性的主要数量特征

可靠性是一项重要的质量指标。由于使用场合的不同,它很难用一个量来完全代表,常用的可靠性特征量有:可靠性、失效概率、平均寿命、可用性等。它们的定义见GB3187-82“可靠性基本名词术语及定义”和SJ1044-76等标准。这些量都是随机量。“一个产品在规定的时间内不失效”是一个随机事件,也即是在一定条件下可能发生也可能不发生的事件。所以在讨论可靠性问题时,必然要用到概率论和数理统计方法,本教材以读者已具有这些基本理论知识为基础。

第一节 可靠性与累积失效概率

一、可靠性及可靠性函数的定义

根据国标和部标,可靠性是“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”。通常可靠性用 R 或 $R(t)$ 表示,其取值范围为: $0 \leq R \leq 1$,也可用百分比表示。

假设规定的时间为 t ,产品的寿命为 T (随机变量), N 个产品从开始工作到时刻 t 的累积失效数为 $n(t)$,则当 N 足够大时,根据定义,可靠性可以用下式表示:

$$R(t) = P(T > t) = \frac{N - n(t)}{N} \quad (2-1)$$

我们知道,概率是指在一定条件下,一个随机事件(A)发生的可能性大小,即试验 N 次(产品总数),当 N 足够大时, A 事件出现次数 n_A 与 N 之比。这里,可靠性中的 A 事件则是指“完成规定功能”(即“正常工作”或“ $T > t$ ”),因而 $n_A = N - n(t)$ 。

既然可靠性是时间 t (随机变量)的函数,所以又称为可靠性函数,用 $R(t)$ 来表示。

二、可靠性的允许值的选取

可靠性的允许值应根据故障的危险程度选取。航空技术中重要产品的可靠性允许值应达到 $R(t) = 0.9999$,甚至更高,可以说,实际上接近于1。如果故障所造成的经济损失不大,那么 $R(t)$ 的允许值可以低一些。必须注意的是,选取 $R(t)$ 值时,如果不指明产品的工作时间 $t = T$ 是没有意义的。

图2-1所示为产品的可靠性曲线 $R_1(t)$ 。在工作时间 $t = T_1$ 时,可靠性是非常高的, $R_1(t) \approx 1$;而在 $t = T_2$ 时, $R_1(t) = 0.8$;在 $t = T_3$ 时, $R_1(t) = 0.5$ 。每种产品都有各自的曲线 $R(t)$, $R_2(t)$ 相应于可靠性极高的产品,当然,无故障概率(可靠性)也很高,甚至在 $t = T_2$ 时,也有 $R_2(t) \approx 1$ 。

因为,只要选取合适的 T 值,对于任何

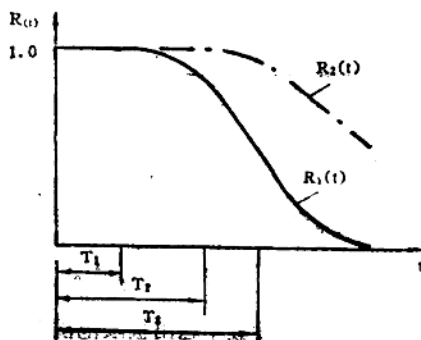


图2-1 产品的可靠性曲线

产品都可以保证所需的 $R(t)$ 。所以，可以用两种方法来选取可靠性指标：(1) 当产品可靠性要求很高时，应先给定允许值 $R(t) = \nu\%$ ，然后确定与 $R(t)$ 值相应的工作时间 $t = T$ 。 (T, ν) 值称为 ν 百分率寿命)，并用以判断产品无故障性的高低。(2) 当产品可靠性为一般要求时（故障不会引起严重后果），可先确定产品寿命 t （或使用期 $t = T_{\text{使用}}$ ）。例如，可根据修理计划来确定，然后，直接用 $R(t)$ 值来判断产品的无故障性。

虽然,一般说来,对应时间 $t = T$ 内的 $R(t)$ 值是无故障性的主要指标,但是有时采用 $\bar{R}(t)$ 值却不够直观,所以还需要一些补充指标(见表2-1)。

表2-1 产品工作无故障指标

在规定时间内间隔 $t = T$ 内的故障情况	$R(t)$ 值	无故障性主要指标
一般都有故障	$R(t) \rightarrow 0$	ω ——故障流参数
可能有或没有故障 (发生故障为稀有事件)	$0 < R(t) < 1$	$R(t)$ ——工作无故障概率
不允许有故障	$R(t) \rightarrow 1$	$K_{可靠}$ ——可靠性储备

表2-1内第一种情况是在 $t=T$ 内,产品一般都要发生故障,因而 $R(t) \rightarrow 0$ 。这些故障的特点是:容易排除,不会引起严重结果,例如,机床工作中需要更换磨损的切削刀具;传送带上零件被卡滞等。此时,工作无故障性的特征指标可以采用主导函数 $\Omega(t)$,即在时间 t 内的故障平均次数(故障次数的数学期望值),或采用故障流参数 ω :

$$\omega(t) = \frac{d\Omega(t)}{dt} \quad (2-2)$$

因而故障流参数 ω 是产品在单位时间内故障发生的平均次数。

另一种极端情况, 即当产品可靠性要求很高, $R(t)$ 值接近于 1, 有时不直接采用 $R(t)$ 值这个指标, 设计 $R(t) \approx 1$ 的可靠性要求很高的产品时, 要求有较大的裕度, 即要有可靠

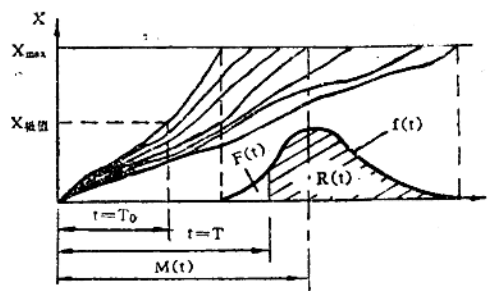


图2-2 产品参数图

在时间 $t = T_0$ 时，产品参数 X 可以是某一任意值（因 X 值是随机量），但 X 的极值 $X_{\text{极值}}$ 是可以确定的（见图 2-2）。例如，最恶劣的使用条件（最大工作规范，缺乏润滑等），可以根据对磨损速度的研究结果确定下来。如果发生故障时的参数值 $X_{\text{max}} > X_{\text{极值}}$ ，则可靠性储备系数 $K_{\text{可靠}}$ 可按下式计算：

$$K_{\text{可靠}} = \frac{X_{\text{max}}}{X_{\text{极值}}} > 1 \quad (2-3)$$

可靠性储备系数也可按 $X_{\max}$ 和 X_r 的比值计算出来, 即:

$$K_{\text{可靠}} = \frac{X_{\text{max}}}{X} \quad (2-4)$$

参数值 X_p 是参数不超出极限范围的概率为 p 时的值。

因为在工作过程中, 产品工作能力是变化的, 所以, 可靠性储备系数就成为时间的函数 $K_{\text{可靠}}(t)$ 。随着产品的使用, $K_{\text{可靠}}(t)$ 会逐渐减小, 所以, 可靠性储备系数的变化速度

实际上也是一种可靠性指标，即：

$$\nu_{\text{可靠}} = \frac{dK_{\text{可靠}}}{dt} \quad (2-5)$$

应该注意，在评价产品的无故障性时，我们所研究的是产品规定功能是否终止这件事，而并未考虑为了恢复产品已丧失的工作能力所需要的时间和措施。

按照故障可能造成的后果分类可见表2-2。

表2-2 产品按故障后果的分类

故障后果		工作无故障概率的允许值	机器的类别
灾难性的	失事， 事故， 完不成任务，	$R(t) \rightarrow 1$	飞行器 起重运输机械 军事装备 化工机械 医疗器械
经济性的		损失重大时： $R(t) \geq 0.99$	工艺设备 农业机械 农家生活器械

产品的无故障性是由最重要的部件和系统的工作情况所决定的，而另外的零部件，即使它们发生了故障，也不至于造成不可允许的后果。例如，飞机在飞行时，起落架发生了故障，其后果是极严重的；如果发动机效率降低，后果是经济损失；如果只是乘客座椅损坏，那实际上就没有什么了不起的后果。

三、累积失效概率、累积失效(故障)分布函数

到时刻 t 的累积失效概率是“产品在规定的条件下和规定的时间 t 内失效的概率”，(也称为累积失效分布函数)，我们用 $\hat{F}(t)$ 来表示。

如果以 t 表示规定的时间，以 T 表示产品的寿命(随机变量)， N 个产品从开始工作到 t 时刻的累积失效数为 $n(t)$ ，则当 N 足够大时， T 小于或等于给定时间 t 的概率，就是产品的累积失效概率，其估计值 $\hat{F}(t)$ 可用下式来估计：

$$\hat{F}(t) = \hat{P}(T \leq t) = \begin{cases} \frac{n(t)}{N}, & (\text{当 } N > 21 \text{ 时}) \\ \frac{n(t)}{N+1} = \frac{i}{N+1} \text{ (平均秩)}, & (\text{当 } N \leq 20 \text{ 时}). \end{cases} \quad (2-6)$$

式中 i 为产品失效的顺序数，亦称“秩”。这里，累积失效概率中的 A 事件是指“产品失效(故障)” (即“ $T \leq t$ ”)，因而 $n_A = n(t)$ 。

可靠与不可靠是对立事件， $F(t)$ 与 $R(t)$ 是这两个对立事件的概率。它们不能同时出现，也不可能都不出现，也即是它们的和事件为必然事件，所以它们的概率和等于 1。即

$$F(t) + R(t) = 1,$$

故

$$R(t) = 1 - F(t). \quad (2-7)$$

[例2-1] 有 110 支电子管，在开始工作的 500 小时内有 10 支失效，求这段时间内的可靠性的估计值？

$$\text{失效概率估计值 } \hat{F} = \frac{10}{110} = 0.0909 = 9.09\%,$$

所以 可靠性估计值 $\hat{R} = 1 - F = 90.91\%$

[例2-2]某零件（轴承）50个在恒定载荷条件下运行，记录的数据如表2-3所示。

表2- 某零件（轴承）运行记录

时间（小时）	10	25	50	100	150	250	350	400	500	600	700	1000	1200	1500	2000	3000
失效数（只）	4	2	3	7	5	3	2	2	0	0	0	0	1	1	0	1
累积失效数 N_f （只）	4	6	9	16	21	24	26	28	28	28	28	28	29	30	30	31
仍正常工作数 N_s （只）	46	44	41	34	29	26	24	22	22	22	22	22	21	20	20	19

根据表2-3，我们可以算出 $t = 100$ 小时的存活频率：

$$R_{(100)} = \frac{N_{s100}}{N_0} = \frac{34}{50} = 0.88;$$

$t = 400$ 小时的存活频率：

$$R_{(400)} = \frac{N_{s400}}{N_0} = \frac{22}{50} = 0.44。$$

根据表2-3， $t = 100$ 小时的累积失效频率为： $F_{(100)} = \frac{N_{f100}}{N_0} = \frac{16}{50} = 0.32$ ，

$t = 400$ 小时的累积失效频率为：

$$F_{(400)} = \frac{N_{f400}}{N_0} = \frac{28}{50} = 0.56。$$

四、故障分类

按故障的时间特性来分类有以下三种（见图2-3）：

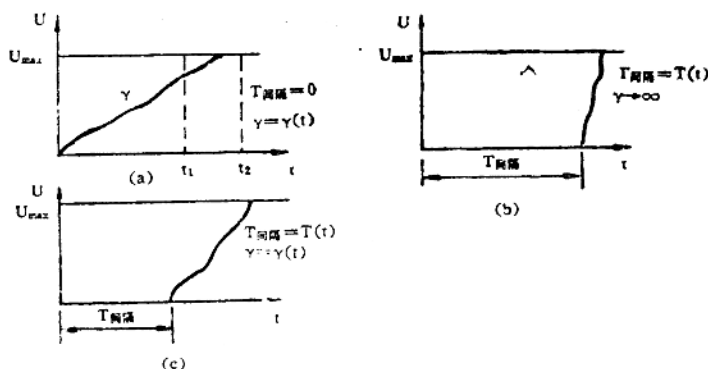


图2-3 几种主要故障的发生

(a)渐发性故障(磨损故障); (b)突发性故障; (c)复合型故障

1. 渐发性故障

渐发性故障是由于各种使产品初始参数劣化的老化过程发展而产生的，见图2-3(a)。

图中 U 为磨损量, $U_{\max}$ 为极限磨损量, γ 为磨损速度。渐发性故障的主要特征是, 在给定的时间段 t_1-t_2 内, 发生故障的概率 $F(t)$ 与产品已经工作过的时间 t_1 有关, 产品使用的时间越长, 发生故障的概率就越高。若 $t_2 > t_1$, 则 $F_2(\Delta t) > F_1(\Delta t)$, 式中 $F(\Delta t)$ 是在 t 到 $(t + \Delta t)$ 这一段时间内故障发生的概率。大部分机器的故障都属于这类故障。这类故障与材料的磨损、腐蚀、疲劳及蠕变等过程有密切关系。

2. 突发性故障

突发性故障产生的原因是各种不利因素及偶然的外界影响共同作用的结果, 这种作用已超出了产品所能承受的限度 (图 2-3(b))。故障往往经过某一时间段 T 间隔才发生, T 间隔是个随机量。突发性故障的主要特征是: 在给定的时间 t_1-t_2 内, 发生故障的概率 $F(t)$ 基本上与产品已使用时间 t_1 无关。这类故障的例子有: 因润滑油中断而使零件产生热变形裂纹; 因机器使用不当或出现超负荷现象而引起零件折断; 因各项参数都达到极端值 (载荷最大、而材料硬度低、温度较高等) 而引起的零件变形和断裂。突发性故障往往是突然发生的, 事先并无任何征兆。

在分析实际的故障原因时, 常会发现, 以上两种不同性质故障原因, 却有类似的故障后果。例如, 汽车轮胎发生故障的原因, 可能是由于长期使用而磨损, 也可能是由于突然被刺破而穿孔。旧轮胎因磨损而发生故障 (渐发性) 的概率, 要比新轮胎大得多。而轮胎被刺破穿孔 (突发性故障) 则与这件事发生前轮胎的使用时间长短完全无关。刺破穿孔这一突发性故障的概率仅仅与道路的状态 (外界条件) 有关, 不论是新旧轮胎, 都是一样的。可见, 判断两类故障的标准是: $F(t)$ 与产品已使用时间是否有关。

3. 复合型故障

是以上两种故障综合发生的结果, 见图 (2-3c)。

图 2-4 是一组摩擦副可能同时存在两种不同性质的故障的例子。一是摩擦表面的磨损过程引起渐发性故障; 二是由外面的磨料微粒或铸件中的夹砂等引起的突发性故障。改变环境清洁状况及铸件质量的状态, 则将改变故障的概率。

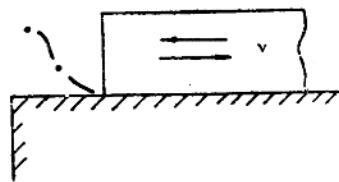


图2-4 摩擦副的故障

第二节 失效 (故障) 密度函数与失效率函数

一、概率密度的定义

概率密度函数 $f(t)$ (亦称失效密度函数或概率密度) 是“分布函数 $F(t)$ (亦称累积失效概率) 的导数”, 可用下式表示:

$$f(t) = \frac{d}{dt} F(t) = F'(t) \quad (2-8)$$

设 N 为受试产品总数, ΔN 是时刻 t 到 $t + \Delta t$ 时间间隔内产生的失效产品数, 则当 N 足够大, Δt 足够小时, 概率密度可用下式表示:

$$f(t) = \frac{\Delta N(t)}{N \cdot \Delta t} \quad \text{或} \quad f(t) = \frac{1}{N} \cdot \frac{dN}{dt} \quad (2-9)$$

它表示 t 时刻的单位时间的失效 (故障) 概率。