

可靠性是产品质量的一个重要方面,对产品的可用性具有很大的影响。可靠性工程的主要目的就是产品寿命周期的角度分析和研究可靠性,并给出在设计、制造、使用中实现和保证产品可靠性的技术。本章比较系统地介绍了可靠性工程与管理基本概念、理论和方法,包括可靠性工程基础、可靠性设计、故障模式及效应分析、故障树分析和可靠性管理等。

### 第一节 可靠性工程基础

#### 一、可靠性的基本概念

##### 1. 产品的可靠性

任何产品都是为了满足用户的使用要求而设计制造的。如前所述,这些满足用户要求的使用特性,我们把它称为产品的质量特性(不包括产品的基本功能)。对某种产品来讲,其质量特性是多种多样的,例如,电视机的图像清晰度、亮度、选择性、灵敏度等,这些特性都是电视机产品为了完成其规定功能所需要的,通常把这类质量特性称之为产品的性能。除此之外,产品还有另外一类重要的质量特性——可靠性。这类质量特性能反映出产品保持其性能的能力。通常我们说某种产品“经久、耐用”,就含有可靠性的意思。上述两类产品质量特性的差别主要体现在时间上,产品的性能是不涉及时间因素的特性,而产品的可靠性是与产品的使用寿命紧密相连的特性,也可以说它是时间的函数。

可靠性是产品的内在质量特性,它是在产品设计制造过程中体现的(包括选择原材料)。应该指出,现在人们常常混淆质量与可靠性这两个概念,它们在许多场合都被当作同义语来使用。但是事实上它们之间是有区别的,产品质量代表一个更大的概念,而可靠性只是产品质量特性的一个组成部分。国家标准 GB/T3187—94 对可靠性下了明确的定义:产品的可靠性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。从上述定义可知,我们度量和比较产品的可靠性有三个相关联的指标:规定的条件、规定的时间和规定的功能。

(1) 规定的条件 规定的条件包括产品所处的环境条件、维护条件和适用条件。规定的条件不同,产品设计制造的依据就不一样,因此,产品的可靠性也不同。如果都按最恶劣的条件进行设计,必然会造成浪费,导致产品



# 全国Mini-MBA职业经理双证班



精品课程 权威双证 全国招生 请速充电

你可能准备跳槽或者求职, 却为缺少行业经验和专业证书而被用人单位百般挑惕!

你可能目前衣食无忧, 但随着年龄的增长和社会竞争压力的增大, 因为得不到专业的全新培训而失去竞争的机会和面临被淘汰的危机。

美华教育携手中国经济管理大学面向全国举办迷你 MBA 职业经理双证书班, 毕业颁发双证书。

## 招生专业及其颁发证书

认证项目	颁发双证	学费
全国《职业经理》MBA 高等教育双证书班	高级职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《人力资源总监》MBA 双证书班	高级人力资源总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修证书	1280 元
全国《生产经理》MBA 高等教育双证班	高级生产管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《品质经理》MBA 高等教育双证班	高级品质管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《营销经理》MBA 高等教育双证班	高级营销经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《物流经理》MBA 高等教育双证班	高级物流管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《项目经理》MBA 高等教育双证班	高级项目管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《市场总监》MBA 高等教育双证书班	高级市场总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《酒店经理》MBA 高等教育双证班	高级酒店管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《企业培训师》MBA 高等教育双证班	企业培训师高级资格认证毕业证书+2 年制 MBA 高等教育研修证书	1280 元
全国《财务总监》MBA 高等教育双证班	高级财务总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《营销策划师》MBA 双证书班	高级营销策划师高级资格认证证书+2 年制 MBA 高等教育研修证书	1280 元
全国《企业总经理》MBA 高等教育双证班	全国企业总经理高级资格证书+2 年制 MBA 高等教育研修结业证书	1280 元
全国《行政总监》MBA 高等教育双证班	高级行政总监职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《采购经理》MBA 高等教育双证班	高级采购管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《医院管理》MBA 高等教育双证班	高级医院管理职业经理资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元
全国《企业管理咨询师》MBA 双证班	高级企业管理咨询师资格证书+2 年制 MBA 高等教育结业证书	1280 元



### 【授课方式】 全国招生、函授学习、权威双证

我校采用国际通用3结合的先进教育方式授课（远程函授+教学电子光盘自修+网络学院持续视频学习）



### 【颁发证书】 学员毕业后可以获取权威双证书与全套学员学籍档案

- 1、毕业后可以获取相应专业钢印《高级职业经理资格证书》；
- 2、毕业后可以获取2年制的《MBA研究生课程高等教育研修结业证书》；



### 【证书说明】

1. 证书加盖中国经济管理大学钢印和公章（学校官方网站电子注册查询、随证书带整套学籍档案）；
2. 毕业获取的证书与面授学员完全一致，无“函授”字样，与面授学员享有同等待遇，证书是学员求职、提干、晋级的有效证明；。



### 【学习期限】 3个月（允许有工作经验学员提前毕业，毕业获取证书后学校仍持续辅导2年）



### 【收费标准】 全部费用1280元（含教材光盘、认证辅导、注册证书、学籍注册等全部费用）

函授学习为你节省了大量的宝贵的学习时间以及昂贵的MBA导师的面授费用，是经理人首选的学习方式。



### 【招生对象】

- 1、对管理知识感兴趣，具有简单电脑操作能力（有2年以上相应工作经验者可以申请提前毕业）。
- 2、年龄在20—55岁之间的各界管理知识需求者均可报名学习。



### 【教程特点】

- 1、完全实战教材，注重企业实战管理方法与中国管理背景完美融合，关注学员实际执行能力的培养；
- 2、对学员采用1对1顾问式教学指导，确保学员顺利完成学业、胸有成竹的走向领导岗位；
- 3、互动学习（专家、顾问24小时接受在线咨询，第一时间回答学员的提问和咨询）



### 【考试说明】

1. 卷面考核：毕业试卷是一套完整的情景模拟试卷（与工作相关联的基础问卷）
2. 论文考核：毕业需要提交2000字的论文（学员不需要参加毕业论文答辩但论文中必修体现出5点独特的企业管理心得）
3. 综合心理测评等问卷。



### 【颁证单位】

中国经济管理大学经中华人民共和国香港特别行政区批准注册成立。目前中国经济管理大学课程涉及国际学位教育、国际职业教育等。学院教学方式灵活多样，注重人才的实际技能的培养，向学员传授先进的管理思想和实际工作技能，学院会永远遵循“科技兴国、严谨办学”的原则不断的向社会提供优秀的管理人才。



### 【承办单位】

美华管理人才学校是中国最早由教委批准成立的“工商管理MBA实战教育机构”之一，由资深MBA教育专家、教育协会常务理事徐传有教授担任学校理事长。迄今为止，已为社会培养各类“能力型”管理人才近10万余人，并为多家企业提供了整合策划和企业内训，连续13年被教委评选为《优秀成人教育学校》《甲级先进办学单位》。办学多年来，美华人独特的教学方法，先进的教学理念赢得了社会各界的高度赞誉和认可。



【咨询电话】13684609885 0451--88342620

【咨询教师】王海涛 郑毅

【学校网站】<http://www.mhjy.net>

【咨询邮箱】[xchy007@163.com](mailto:xchy007@163.com)



## 【报名须知】

- 1、报名登记表格下载后详细填写并发送邮件至 [xchy007@163.com](mailto:xchy007@163.com) (入学时不需要提交相片，毕业提交试卷同时邮寄4张2寸相片和一张身份证复印件即可)
- 2、交费后请及时电话通知招生办确认，以便于收费当日学校为你办理教材邮寄等入学手续。



## 【证书样本】(全国招生 函授学习 权威双证 请速充电)

(高级职业经理资格证书样本)

(两年制研究生课程高等教育结业证书样本)



## 【学费缴纳方式】可以选择以下任意一种方式缴纳学费

方式一	学校地址	邮寄地址：哈尔滨市道外区南马路 120 号职工大学 109 室 邮政编码：150020      收件人：王海涛
方式二	学校帐号	学校帐号：184080723702015 账号户名：哈尔滨市道外区美华管理人才学校 开户银行：哈尔滨银行龙江支行 支付系统行号：313261018018
方式三	交通银行 (太平洋卡)	帐号：40551220360141505      户名：王海涛 开户行：交通银行哈尔滨分行信用卡中心
方式四	邮政储蓄 (存折)	帐号：602610301201201234      户名：王海涛 开户行：哈尔滨道外储蓄中心
方式五	中国工商银行 (存折)	帐号：3500016701101298023      户名：王海涛 开户行：哈尔滨市道外区靖宇支行
方式六	建设银行帐户 (存折)	中国人民建设银行帐户 (存折)： 1141449980130106399 用户名：王海涛
方式七	农业银行帐户 (卡号)	农业银行帐户 (卡号)： 6228480170232416918 用户名：王海涛 农行卡开户银行：中国农业银行黑龙江分行营业部道外支行景阳支行

可以选择任意一种方式缴纳学费，建议使用第五种方式（中国工商银行，比较方便快捷）收到学费的当天，学校就会用邮政特快的方式为你邮寄教材和考试问卷。

<http://www.mhgy.net>





成本增加,也不是成功的设计。例如,工业用控制计算机与办公室用的计算机相比,前者要求的可靠性要高得多,因为它所处的工作环境要恶劣得多。

(2) 规定的时间 规定的时间一般是指产品的工作期限或使用寿命,也可以指产品的无故障工作时间。两者的单位多用时间来表示,也可以是其他物理单位,如动作次数、工作周期、运动距离等。例如,一辆汽车的“规定时间”就有好几种:可以是使用寿命15年,可以是报废里程数30万km,可以是无故障运行里程数5万km等。应该明确的是,可靠性设计除研究如何延长产品的寿命外,人们往往更追求“总体寿命的均衡”,即达到规定的工作期限,所有零件的寿命均告结束,如果能达到这样的效果,就可避免巨大的资源浪费。随着产品的种类和使用目的不同,“规定时间”是有很大区别的。

(3) 规定的功能 规定的功能是指产品应该具备的使用效果,例如,汽车的功能包括能够载人或物在公路上跑,能够刹车、变速、倒车,具有空调、音响、照明、行李箱和安全气囊等。性能则指实现功能的程度,例如,汽车跑起来要平稳、转弯半径小、噪音小、油耗少、空调制冷效果好、行李箱足够大等。

与产品可靠性密切相关的概念有:可信性、可用性、维修性、维修保证性等。

## 2. 产品的维修性

产品的维修性是指产品在规定的条件下和规定的内容上,按规定的程序和方法实施维修时,保持或恢复规定功能状态的能力。例如,汽车的轮胎应该是可以方便更换,轮胎更换后应该达到原来的功能和性能。产品的维修性和可靠性是产品的两个重要特性,两者都是可信性的重要内容。在故障条件下,产品的维修性好就意味着可以在较短的时间内,以最小的花费使产品恢复正常的工作能力。维修性是产品的一种设计和安装特性,它同可靠性一样是产品的一种固有特性,这种特性是由产品设计所赋予的。如果我们要求产品维修简便、迅速和经济,就必须拆装容易,换件迅速,并且不需要专用的工具。这就要求在产品的设计时,合理地设计产品的零部件形状、尺寸及其配置关系,并满足零部件的互换性要求等。在机械设计中常提到的“面向维修的设计”就是为了解决产品的可维修性问题。

这里需要指出的是,产品的维修性与产品维修是两个不同的概念,维修性是一种设计要求,它以总停机为基础,包括有效的修理时间、后勤时间和管理时间,这些要求是可以规定、测量和验证的。对某个具体产品而言,当设计完成后,其维修性水平就确定了。而维修则是设计结果的具体实施,维修活动只能保持其维修性水平,而不能提高其水平。

### 3. 产品的可用性

产品的可用性是指产品在要求的外部资源得到保证的前提下,产品在规定的条件下和规定的时间内处于可规定状态的能力。通俗地讲,可用性就是指产品在需要的时候其可用的程度。实际上任何产品都存在可用性问题,人们都希望自己购买的商品在需要的时候就能派上用场。产品的可用性取决于产品的可靠性、维修性及维修保障性,它是构成可信性的主要内容。可靠性、维修性和可用性从三个不同的方面反映了产品的可靠性问题,它们之间存在着内在的联系,这种联系反映在它们的特征量的关系中。

### 4. 可信性

在 ISO 9000 标准中,可靠性是包含在可信性这一概念中的。产品的可信性是“描述可用性及其影响因素:可靠性、维修性和维修保障性能的一个集合术语。可信性这一术语在 1990 年由 IEC 给出后,就被广泛使用,人们用它来表示产品的可用性及其影响因素。可信性是产品质量中与时间有关的一个方面,一般仅用于非定量描述的场合。从可信性的角度看,它的核心内容是可靠性工程。

### 5. 可靠性工程的必要性

(1) 科学技术的发展需要可靠性 随着科学技术的发展,产品结构与系统构成变得越来越庞大和复杂,零部件的数量明显增多,同时在产品寿命周期中大量采用尚不成熟的新材料和新工艺,使产品发生故障的机会也同时增多。因而需要采用可靠性设计和管理技术来减少产品的故障率。

(2) 社会和对产品的可靠性要求日益提高 随着产品工作效率的提高,因事故或故障引发的损失也随之增大。反之,如果产品的可靠性提高了,就会减少由此而引起的经济损失,从而显著增加企业效益。另外,对核发电机组、化工行业、大坝等涉及安全性和环境污染的领域,对产品可靠性的要求更为突出,这些产品一旦发生事故,会对社会、人类和环境造成灾难性的危害。

(3) 安全性的需要 只要因产品缺陷或故障对用户造成损失,企业除了要付出巨额赔偿金外,有时还要承担法律责任。由此可能会给企业的市场信誉带来毁灭性的打击。因此,迫使企业必须提高产品的可靠性和安全性。预防产品故障的思路:一是要防止产品在使用中发生故障;二是故障发生后要使其损失减少到最低程度。

(4) 产品竞争的需要 有些美国学者预言,今后能在竞争中取胜的只有那些能掌握自己产品可靠性的企业。日本学者也认为今后世界市场产品的竞



争焦点是可靠性。要打入国际市场,就必须提高产品的可靠性。我国国防工业、电子工业、核工业、电力工业、机械工业等也先后制定规划要求提高产品可靠性,国家技术监督局也于1995年发文要求开展机电产品的可靠性认证工作。

## 二、可靠性的特征量

对于产品的可靠性而言,常将产品分为不可修复与可修复两类。对于不可修复的产品常用可靠度、失效率、平均寿命等可靠性特征量来进行描述,而对可修复产品常用维修度、可用度、平均修复时间等指标进行描述。对于后者,请感兴趣的读者参考有关文献资料。

### 1. 可靠度

产品的可靠性水平高低常用可靠度来度量。可靠度是指产品在规定的运行条件下和规定的工作时间内,完成规定功能的概率,它是时间的函数,常用 $R(t)$ 表示。设 $T$ 为产品实际寿命的随机变量,则产品的可靠度定义为

$$R(t) = P(T > t) \quad (10-1)$$

式(10-1)表示产品的实际寿命 $T$ 超过规定时间的概率。从上述可靠度定义可知, $R(0) = 1$ ,  $R(\infty) = 0$ ,即产品开始使用时,都是好的,但只要时间充分大,产品都会失效,产品的可靠度与时间有关,它们的关系如图10-1所示。

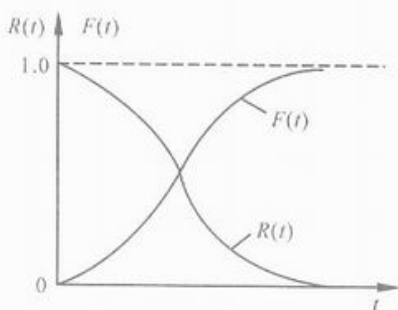


图10-1  $R(t)$ ,  $F(t)$  与时间的关系

**例10-1** 有 $N$ 个某种零件,已知在规定的工作条件和规定时间内,有 $r$ 个零件失效,其余 $N-r$ 个零件仍能正常工作,试求这种零件的可靠度。

解:这种零件的可靠度  $R(t) = \frac{N-r}{N}$

**例10-2** 有3只电灯泡,分别工作了6小时、12小时、20小时后失效,试求这种电灯泡工作5小时、10小时、25小时的可靠度。

解:a. 工作时间为5小时,3只电灯泡全部都能工作,其可靠度



$$R(5) = \frac{N-r}{N} = \frac{3-0}{3} = 100\%$$

b. 工作到第 10 小时, 3 只电灯泡中有 1 只失效, 其可靠度为

$$R(10) = \frac{N-r}{N} = \frac{3-1}{3} = 67\%$$

c. 工作到第 25 小时, 3 只电灯泡全部失效, 其可靠度为

$$R(25) = \frac{N-r}{N} = \frac{3-3}{3} = 0\%$$

## 2. 累积失效概率 $F(t)$

累积失效概率是指产品在规定条件和规定时间内失效的概率, 其值等于 1 减去可靠度。也可以说, 累积失效概率是产品在规定条件和规定时间内完不成规定功能的概率, 故也称为不可靠度, 它同样是时间的函数, 记作  $F(t)$ 。

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - P(T > t) = 1 - R(t) \quad (10-2)$$

从上述定义可以得出  $F(0) = 0$ ,  $F(\infty) = 1$ 。

由此可见,  $R(t)$  和  $F(t)$  是互为对立的事件, 累积失效概率  $F(t)$  与时间的关系曲线如图 10-1 所示。

**例 10-3** 有 110 只电子管, 工作 500 小时时有 10 只失效; 工作到 1000 小时时, 总共有 53 只电子管失效, 求该产品分别在 500 小时与 1000 小时的累积失效概率。

解: a. 工作到 500 小时, 有 10 只失效, 其累积失效概率为

$$F(500) = \frac{r}{N} = \frac{10}{110} = 9.909\%$$

b. 工作到 1000 小时, 有 53 只失效, 其累积失效概率为

$$F(1000) = \frac{r}{N} = \frac{53}{110} = 48.18\%$$

## 3. 失效概率密度函数 $f(t)$

失效概率密度是产品累积失效概率对时间的变化率, 记作  $f(t)$ 。它表示产品寿命落在单位时间内的概率, 即产品在单位时间内失效的概率, 其表达式为

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = F'(t) \quad (10-3)$$

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = \int_t^\infty f(t) dt$$

当产品的失效概率密度  $f(t)$  已确定时,  $f(t)$ ,  $F(t)$ ,  $R(t)$  之间的关系可用





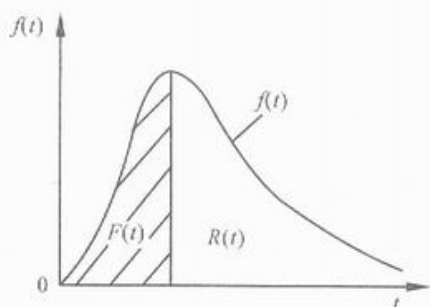
图 10-2  $R(t)$ 、 $F(t)$  与  $f(t)$  的关系

图 10-2 表示。

#### 4. 失效率 $\lambda(t)$

(1) 失效率的定义 失效率有时也称故障率或瞬时故障率，它是指产品工作到某个时刻尚未出现故障，在该时刻之后单位时间  $\Delta t$  内发生故障的概率，常用符号  $\lambda(t)$  表示。失效率也是测定可靠性的一个重要指标，并且是个条件概率，它实际上反映了产品在  $t$  时刻失效的速率，由条件概率可得

$$\begin{aligned}\lambda(t) &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T < t + \Delta t)}{P(T > t) \Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t) \Delta t} \\ &= \frac{dF(t)}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (10-4)\end{aligned}$$

失效率定义还可简化为：产品在  $t$  时刻的失效率等于产品工作到  $t$  时刻后，单位时间内发生失效的概率。即失效率的观察值等于产品在  $t$  时刻后的一个单位时间内的失效数  $\frac{\Delta r(t)}{\Delta t}$  与在时刻  $t$  尚在工作的产品（也称残存数） $N - r(t)$  的比，即

$$\lambda(t) = \frac{\Delta r(t) / \Delta t}{N - r(t)} = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{[N - r(t)] \Delta t} \quad (10-5)$$

**例 10-4** 设有  $N=1000$  个产品，从  $t=0$  时刻开始工作，在工作 20000 小时内无失效，在 20000 ~ 20005 小时内有 16 个失效，求该批产品在 20000 小时的失效率。

解： $N=1000$ ， $r(20000)=0$ ， $r(20005)=16$ ， $\Delta t=5$

由式 (10-5) 得

$$\lambda(t) = \frac{r(t + \Delta t) - r(t)}{[N - r(t)] \Delta t} = \frac{16 - 0}{(1000 - 0) \times 5} = 0.32\%$$

(2) 失效率曲线及其失效类型 大量的使用和试验结果表明，产品的失效率与时间的关系如图 10-3 所示。失效率曲线的特征是两端高、中间低，形状似浴盆，故一般又称为“浴盆曲线” (Bathtub Curve)，也称寿命特性



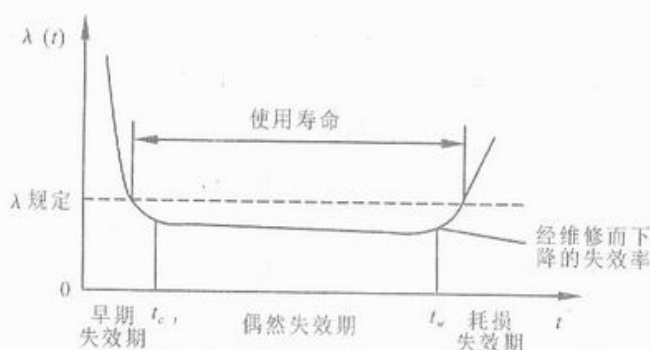


图 10-3 曲型失效率曲线

曲线。

由图 10-3 可以看出, 产品的失效过程分为以下三个阶段:

**早期失效期** 早期失效期发生在产品使用的初期, 特别是“磨合”阶段, 其特点是失效较快, 开始失效率高, 但随着工作时间增长, 失效率逐渐降低。这是由于产品设计、制造上存在的缺陷等原因而产生的失效。如新产品研究和试制阶段出现的失效, 制造中由于原材料或元件的质量不好, 或粗制滥造、检验不严等原因, 使一些有缺陷的产品出厂, 使用不久就出现失效。现代产品由于设计制造的精良或在制造企业经过“磨合”工序, 到达用户手中后已基本不会出现“早期失效期”了。

**偶然失效期** 偶然失效期是产品正常工作的时期, 其特点是失效率较低而稳定, 基本上是一常数。此时产品的失效是随机的, 也是不能预测的, 因此, 我们要想通过事前更换元件来降低失效率也是无效的。

**耗损失效期** 耗损失效是由于产品老化、磨损、损耗、疲劳等原因引起的失效, 其特点是失效迅速上升, 直至报废。这种失效出现在产品使用寿命的后期。改善耗损失效的方法是不断提高零、部件的工作寿命, 对寿命短的零、部件在整机设计时就制定一套预防性维修措施, 在它们到达耗损失效期前就及时予以检修或更换。这样, 就可以把上升的失效率拉下来 (图 10-3), 从而达到延长产品使用寿命的目的。

为了提高产品的可靠性, 掌握产品的失效规律是非常重要的, 只有对产品的失效规律有全面了解, 才能采取有效措施, 提高产品的可靠性。

## 5. 平均寿命 $E(t)$

产品的平均寿命表示产品从投入运行到发生失效的平均无故障工作时间, 常用符号  $E(t)$  表示。

$$E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (10-6)$$

对产品而言, 平均无故障工作时间是一个很重要的指标, 因为它是衡量



产品可用性比较直观的一个尺度。对于某些长寿命产品,如电视机、电冰箱、汽车等多用这一指标来规定其可靠性。需要指出的是,平均寿命是对一批产品而言的,对某一单个产品而言,其实际寿命往往不同于平均寿命。平均寿命有两种表达方式,一种称为 MTTF (Mean Time To Failure),它表示产品发生故障前正常运行时间的平均值(用于不可修复产品);另一种称为 MTBF (Mean Time Between Failure),它表示两次故障间隔的平均时间(用于可修复产品)。

**例 10-5** 测得 20 台某种电子产品从工作开始到初次失效的时间数据(单位:月),如下:126、149、159、198、260、680、740、890、910、1270、1280、1340、1410、1450、1520、1620、1800、2100、2200、2500。试求 20 台电子产品的平均寿命 MTBF。

$$MTBF = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{1}{20} (26 + 49 + \cdots + 2100) = 1130.1 (\text{月})$$

### 三、可靠性工程

#### 1. 可靠性工程的基本概念

可靠性工程是指为了达到产品可靠性要求而进行的有关设计、试验和生产等一系列工作,它是建立在概率统计理论基础上,以零件、产品或系统失效规律为基本研究内容的一门应用学科。它的任务是定性或定量地分析、控制、评估和改善产品或系统寿命周期各个阶段的可靠性,保证产品在设计、制造和运行的整个过程中满足用户的需求。可靠性工程作为可靠性学科的一个分支,主要研究内容包括:应用可靠性理论预测与评价产品;零件的可靠性预测或可靠性评价;应用于产品及零件设计中的可靠性设计;综合各方面的因素,考虑设计最佳效果的可靠性分配和可靠性优化;作为以上各分支基础的可靠性实验及其数据处理等。

#### 2. 可靠性工程的基本任务

可靠性工程贯穿于产品的设计、生产和使用各个阶段。可靠性工程的任务可归纳为以下三个方面:

- 根据可靠性定义内容,对产品可靠性提出明确的量化要求
- 寻找提高产品可靠性的途径
- 在满足产品规定的可靠性前提下,尽量降低产品的重量、体积和费用

### 四、可靠性工程中的几种失效分布函数

产品的失效分布函数是指其失效概率密度函数或累积失效概率函数,它



与产品可靠性特征量有着密切的关系。如果已知产品的失效分布函数,便可求出可靠度、失效率和寿命等特征量。即使不知道具体的分布函数,但如果已知分布的类型,也可以通过对分布的参数估计求出某些可靠性特征量的估计值。常见的失效分布函数有指数分布、正态分布、对数正态分布、威尔布分布等。

### 1. 指数分布

指数分布的可靠度函数  $R(t)$ 、累积失效概率分布函数  $F(t)$ 、失效概率密度函数  $f(t)$  分别是

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (10-7)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10-8)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda e^{-\lambda t} \quad (10-9)$$

式中  $\lambda$ ——失效率。

指数分布的性质为:

- 指数分布的失效率  $\lambda$  等于常数
- 指数分布的平均寿命  $\theta$  与失效率  $\lambda$  互为倒数, 即  $\theta = 1/\lambda$
- 指数分布具有“无记忆性”。无记忆性是指: 当产品使用了  $t_0$  时间后, 如仍正常, 则在  $t_0$  以后的剩余寿命与新寿命一样服从指数分布这是因为若  $R(t) = e^{-\lambda t}$ , 则

$$R(t_0 + \Delta t | t) = \frac{R(t_0 + \Delta t)}{R(t_0)} = \frac{e^{-(\lambda t_0 + \lambda \Delta t)}}{e^{-\lambda t_0}} = e^{-\lambda \Delta t}$$

在可靠性工程中, 指数分布是一种重要的分布, 适合于失效率  $\lambda(t)$  为常数的情况, 如许多电子元器件、机电产品等在偶然失效期内都属于这种情况。

**例 10-6** 某机电产品的失效率为  $\lambda$  (常数), 其平均寿命为 5000h, 试求其连续工作 1000h 和 3000h 的可靠度是多少? 要达到可靠度  $R = 0.9$  的可靠寿命是多少?

解: 因失效率为常数, 故产品寿命服从指数分布。从而可得

**失效率**  $\lambda = 1/\theta = 1/5000 \text{ (h)} = 2 \times 10^{-4} / \text{(h)}$

**1000h 的可靠度**  $R(1000) = e^{-2 \times 10^{-4} \times 1000} = 0.9802$

**3000h 的可靠度**  $R(3000) = e^{-2 \times 10^{-4} \times 3000} = 0.5488$

**可靠度为 0.9 的可靠寿命**  $t_{0.9} = 5000 \ln \frac{1}{0.9} = 526.8 \text{ (h)}$

### 2. 正态分布

正态分布常用于描述材料强度、疲劳和机器磨损等。由概率理论知, 只





要某个随机变量由大量相互独立、微小的随机因素的总和所构成,而且每一个随机因素对总和的影响都很微小,那么,就可断定这个随机变量近似服从正态分布。其失效概率密度函数 $f(t)$ 、失效概率函数 $F(t)$ 、可靠度函数 $R(t)$ 分别为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

$$F(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$$

$$R(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^{\infty} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt$$

式中  $\mu$ ——正态分布的均值;  $\sigma$ ——正态分布的标准差。

**例 10-7** 有 1000 个零件,已知其失效分布为正态分布,均值为 500h,标准差为 40h。求  $t=400h$  时的可靠度和失效概率各为多少?

解:根据题意,零件寿命服从  $N(500, 40^2)$

$$R(400) = P\left(z > \frac{400 - 500}{40}\right) = P(z > -2.5) = 1 - P(z \leq -2.5)$$

$$= 1 - \Phi(-2.5) = 1 - 0.0062 = 0.9938$$

$$F(400) = 1 - R(400) = 0.0062$$

### 3. 对数正态分布

有时随机变量  $X$  本身并不服从正态分布,而它的自然对数服从正态分布,这种分布用于由裂痕扩展而引起的失效分布,如疲劳、腐蚀失效等。此外,也用于恒应力加速寿命试验后对样品失效时间进行的统计分析。其失效概率密度函数为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

式中  $\mu$ ——对数正态分布的均值;  $\sigma$ ——对数正态分布的标准差。

### 4. 威布尔分布

威布尔分布在可靠性工程中是适用范围较广的一种分布,当它的参数不同时,可以蜕化为指数分布、瑞利分布或正态分布。实践表明,金属材料的疲劳寿命都服从威布尔分布。其失效概率密度函数 $f(t)$ 、失效概率函数 $F(t)$ 、可靠度函数 $R(t)$ 分别为

$$f(t) = \frac{m}{\eta} \left[ \frac{t - \delta}{\eta} \right]^{m-1} e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^m} \quad (\delta \leq t; m, \eta > 0)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^m} \quad (\delta \leq t; m, \eta > 0)$$



$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\delta}{\eta}\right)^m} \quad (\delta \leq t; m, \eta > 0)$$

式中  $m$ ——形状参数;  $\eta$ ——尺度参数;  $\delta$ ——位置参数。

**例 10-8** 某种特定的灯管其失效时间服从威布尔分布, 其  $m=2$ ,  $\eta=1000\text{h}$ , 试确定当任务时间为  $100\text{h}$ , 这些灯管中 1 支管子的可靠度。

$$\text{解: } R(100) = e^{-\left(\frac{100-0}{1000}\right)^2} = e^{-(0.1)^2} \approx 0.99$$

## 第二节 可靠性设计

所谓的可靠性设计就是以提高可靠性为主要目的的设计方法。产品的可靠性水平主要取决于可靠性设计的质量, 如果可靠性设计质量不佳, 必然导致产品可靠性的“先天不足”, 在后续的制造和使用阶段, 不管采用何种措施, 也无法提高产品的可靠性。因此可以说, 可靠性设计是提高产品可靠性的关键环节, 应给予足够的重视。

### 一、产品的可靠性模型

产品是由许多工作单元组合而成的能完成特定功能的有机整体, 产品的可靠性既依赖于每个工作单元的可靠性, 也依赖于工作单元之间的组合方式。在一个产品系统中, 工作台单元的组合方式可能是串联、并联或更复杂的连接方式, 可靠性设计时, 常需要根据产品系统的组合方式和各单元的可靠性来计算整体的可靠性。为了讨论方便, 假设产品系统的各组成单元间是相互独立、互不影响的, 并且产品系统和组成的工作单元只可能有正常和故障两个状态, 没有中间状态。

#### 1. 可靠性框图

评价产品系统可靠性的第一步就是建立系统的可靠性框图。可靠性框图就是用图形描述产品系统内各工作单元之间的逻辑关系, 是可靠性模型的一种表达方式。要建立系统的可靠性框图, 首先应对系统内各单元的功能有系统的了解才行。在建立可靠性框图时经常要忽略一些次要因素, 以达到抓住主要矛盾的目的。例如, 汽车可分解为下列五大子系统: 发动机、变速箱、制动器、转向器及轮轴子系统, 据此可画出汽车的可靠性框图 (图 10-4)。

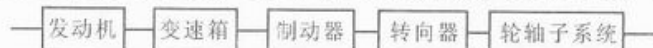


图 10-4 汽车系统的可靠性框图

图 10-4 中所示的可靠性框图并不代表这些子系统在汽车中的实际连接方式, 它只代表每个子系统都要正常工作, 才能确保汽车的正常运行。在可靠性框图中, 方框代表一个基本工作单元, 它可能是一部件, 也可能是一个



子系统,这取决于所建立的可靠性框图的用途。若需要更详细的分析,可进一步分解子系统。

建立了产品系统的可靠性框图后就可以计算其可靠性了。

## 2. 几种典型的可靠性模型

(1) 串联模型 串联系统的  $n$  个单元必须全部工作,产品系统才会正常工作,其中任一单元失效都会导致系统的失效。因此,产品系统寿命就等于第一个出现故障的单元的寿命。串联模型是最常用的系统可靠性模型,其如图 10-5 所示。



图 10-5 串联系统模型

根据串联系统的定义可知,产品系统的可靠性函数  $R_s(t)$  是等于所有单元可靠性函数  $R_i(t)$  的乘积,即

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (10-10)$$

式 (10-10) 说明,串联系统的单元越多,系统的可靠性就越低。因此,在设计系统时,应尽量减少单元的数目。若当各单元的失效都是偶然失效时且失效率  $\lambda_i(t) = \lambda_i$ ,这时系统的可靠度函数为

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n e^{-\lambda_i t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^n \lambda_i\right)t} = e^{-\lambda_s t} \quad (10-11)$$

式中  $\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ 。

(2) 并联模型 当构成产品系统的所有单元都失效时,系统才会失效的系统称为并联系统。在一个并联系统中,只要有任何一个单元能工作,系统就能正常工作,因此,并联系统可以有效提高系统可靠性,但有时会带来系统的冗余,其可靠性框图如图 10-6 所示。

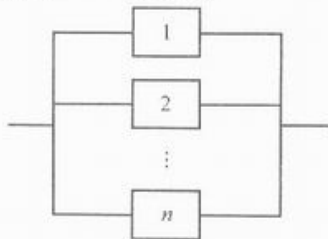


图 10-6 并联系统模型

根据并联系统的定义及其逻辑框图可知,系统的累积失效函数  $F_s(t)$  等于所有单元累积失效函数  $F_i(t)$  的乘积,这时系统的系统累积失效概率函数和可靠性函数分别为



$$F_s(t) = \prod_{i=1}^n F_i(t)$$

$$R_s(t) = 1 - F_s(t) = 1 - \prod_{i=1}^n F_i(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \quad (10-12)$$

设初始时刻  $t=0$ , 所有单元都是新的, 同时开始工作, 则并联系统的寿命等于最后失效的元件的寿命

$$T_s = \max\{T_1, T_2, \dots, T_n\} \quad (10-13)$$

(3) **串—并联模型** 若一个系统由  $m$  个子系统串联而成, 而每个子系统又由  $n$  个单元并联而成, 这种系统称串—并联系统, 其可靠性逻辑框图如图 10-7 所示。

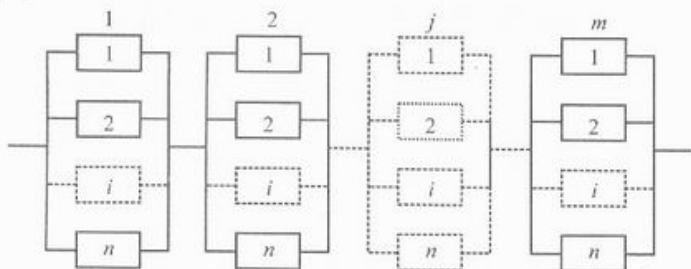


图 10-7 串—并联系统模型

假设每个单元都具有相同的累积失效分布函数  $F(t)$ , 则系统的可靠度函数为

$$R_s(t) = [1 - F^n(t)]^m \quad (10-14)$$

由于串—并联模型中具有功能冗余单元, 因此, 其系统的可靠性比单纯串联系统可靠性高 (因为各个单元的可靠性提高了), 但其系统成本也较高。

(4) **并—串联模型** 若一个系统由  $m$  个子系统并联而成, 而每个子系统又是由  $n$  个工作单元串联而成, 称这样的系统为并—串联系统, 其可靠性逻辑框图如图 10-8 所示。

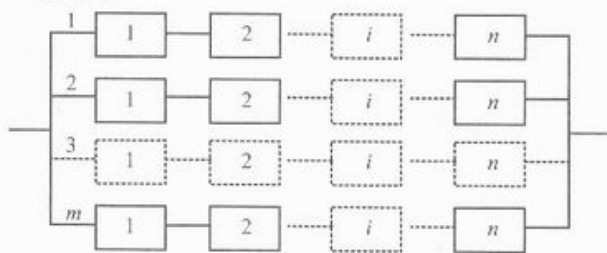


图 10-8 并—串联系统模型

同样, 假设每个单元具有相同的累积失效分布函数  $F(t)$ , 则系统的可靠度函数为

$$R_s(t) = 1 - [1 - R^n(t)]^m = 1 - \{1 - [1 - F(t)]^n\}^m \quad (10-15)$$





显然, 并—串联系统的可靠性高于任一子系统的可靠性, 其原因是使用了功能冗余单元。

(5) **串—并联混合模型** 在有些系统中, 工作单元间的关系既有串联也有并联, 这种系统称为串—并联混合系统。这类系统的可靠性逻辑框图如图 10-9 所示。

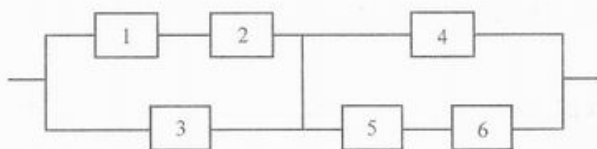


图 10-9 串—并联混合系统模型

对于图 10-9 所示模型, 假设各单元的可靠性函数均为  $R(t)$ , 则它的可靠性函数为

$$\begin{aligned} R_s(t) &= \{1 - [1 - R^2(t)][1 - R(t)]\} \times \{1 - [1 - R(t)][1 - R^2(t)]\} \\ &= \{1 - [1 - R(t)][1 - R^2(t)]\}^2 \end{aligned}$$

### 3. 冗余系统

如前所述, 并联模型利用它的功能冗余单元能提高系统整体的可靠性, 下面简单介绍冗余系统的概念。

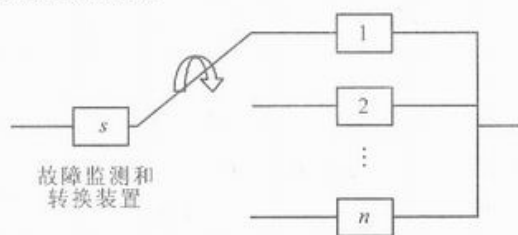


图 10-10 冗余系统模型

在一个由  $n$  个单元组成的冗余系统中, 通常只有一个单元在工作, 而其他单元则处于等待状态。当现行工作单元失效时, 可通过故障监测和转换装置使得另一个贮备单元来顶替它的工作, 这种系统称冗余系统。并联系统与冗余系统的区别在于: 并联系统的备用单元与工作单元都同时处于工作状态, 而贮备系统则是在当工作单元失效后, 才启动备用单元进行工作。冗余系统的可靠性框图如图 10-10 所示。

假设故障监测与转换装置的可靠性为 1, 单元  $i$  的寿命为  $T_i$ , 则该系统的寿命  $T_s$  为

$$T_s = T_1 + T_2 + \cdots + T_n \quad (10-16)$$

若进一步假设系统各单元具有相同的失效率函数  $\lambda(t)$  且  $\lambda(t) = \lambda$ , 则系统可靠性函数为



$$R_s(t) = e^{-\lambda t} \left[ 1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2} + \frac{(\lambda t)^3}{3} + \cdots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{n-1} \right] = \sum_{i=1}^n \frac{(\lambda t)^{i-1}}{i-1} e^{-\lambda t}$$

既然并联系统和冗余系统均使用了备用单元,那么,这两种系统的可靠性是否相同呢?现以具有一个备用单元的系统进行分析比较。假设各单元均是相同的,设单元的失效率为 $\lambda_0$ ,则两单元冗余系统的可靠度为

$$R_s(t) = (1 + \lambda_0 t) e^{-\lambda_0 t}$$

假设 $R_0 = e^{-\lambda_0 t}$ ,  $\lambda_0 t = -\ln R_0$ , 因此

$$R_s(t) = (1 - \ln R_0) R_0$$

而两并联系统的可靠度为

$$R_D(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^2 = 2e^{-\lambda_0 t} - (e^{-\lambda_0 t})^2 = 2R_0 - R_0^2$$

冗余系统的可靠度 $R_s(t)$ 、并联系统的可靠度 $R_D$ 与单元可靠度 $R_0$ 之间的关系如图10-11所示。

由图10-11可见, $R_s \geq R_0$ ,这是因为并联系统的备用单元与工作单元都同时处于工作状态,而冗余系统则是当某一工作单元失效后,才启用备用单元进行工作。

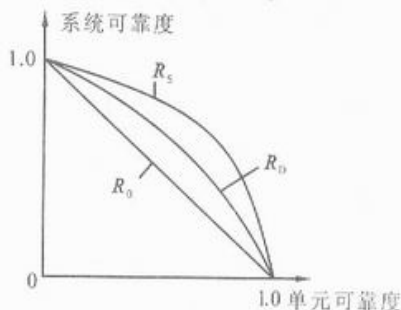


图10-11  $R_s, R_D, R_0$  的关系

#### 4. $k/n$ 模型

在组成产品系统的 $n$ 个工作单元中,如果至少有 $k$ 个单元失效,则系统失效,这样的系统称为 $k/n$ 系统。当 $k=1$ 时,得到前面所讲过的串联模型;而当 $k=n$ 时,得到并联模型。因此,串联模型和并联模型都是 $k/n$ 模型的特例。

$k/n$ 系统的可靠性就是系统有少于 $k$ 个失效单元的概率。因此,可以把系统有零个失效单元、一个失效单元、一直到 $k-1$ 个失效单元的概率加在一起而得到系统的可靠性,当 $n$ 个单元的累积失效分布相同时,系统可靠性为

$$R_s = \sum_{i=0}^{k-1} C_n^i [R(t)]^{n-i} [1 - R(t)]^i$$

**例10-9** 设有一装有4台发动机的飞机,只要有2台发动机工作就能正常飞行,已知每台发动机的可靠度为0.9,试预测发动机系统的可靠度。

解:已知, $n=4, k=3$

$$R_s = C_4^0 R^4 + C_4^1 R^3 (1 - R) + C_4^2 R^2 (1 - R)^2 = 0.996$$

## 二、可靠性预测

可靠性预测就是根据产品或系统、零部件的功能、工作环境及其有关资料,推测该产品或系统具有的可靠度,它是在产品设计方案初步确定之后的



方案论证阶段、产品尚未投产之前,还不可能进行各种可靠性试验时,根据一定的使用环境条件并考虑到产品(或系统)的设计功能结构,按组成产品的元器件或零部件的观察数据或外推的可靠性数据来预测产品可能达到的可靠性。这种对产品可靠性的初步预测,可向设计人员提供理论上可以实现的可靠性的估计值。因此,可靠性预测是可靠性设计工作的一个重要组成部分。可靠性预测的一般程序为:首先确定元器件、零部件的可靠性,进而根据结构模型预测组件(或单元)的可靠性,然后逐级进行预测,最后综合出产品(或系统)的可靠性。

### 三、可靠度分配

#### 1. 可靠度分配原则

产品系统是由若干个零部件或子系统构成,因此,在进行可靠性设计时,当产品系统的可靠度目标一旦确定之后,就应该把它分配给产品系统的各组成单元,这项工作称为可靠度分配。产品可靠度目标值的分配应考虑以下原则:

- 通过可靠度目标值的分配,要使产品系统的可靠度得到最大的提高与合理化
- 将可靠度目标分配给它的组成部分时,应满足下式要求

$$f(R_1, R_2, \dots, R_n) \geq R_s^* \quad (10-17)$$

式中  $R_1, R_2, R_n$ ——分配给各组成部分的可靠度分摊值;  $R_s^*$ ——产品系统的可靠度目标值

- 从整个产品系统看,重要度大(即发生失效后,对产品系统的影响大)的组成部分应分配高的可靠度;重要度小的组成部分应分配低的可靠度
- 从产品系统的整体看,对安全性有重要影响的组成部分,应加大可靠度分摊值
- 在同一产品系统中,不管是串联还是并联系统,只要构成部分的重要度、工作时间、安全要求等相同,就应分配给相同的可靠度

#### 2. 可靠度分配方法

(1) 等值分配法 又称平均分配法,它不考虑各个系统零件的重要度,而是把系统总的可靠度平均分摊给各个子系统(或零件)。等值分配法适合于串联系统的可靠度分配。在各个子系统的可靠度大致相同、复杂程度也相差不多的情况下,用此方法最为简单。设各子系统的可靠度为  $R_i$ , 则系统的可



靠度  $R_s$  为

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

因此, 组成系统的每个子系统的可靠度  $R_i$  为

$$R_i = R_s^{\frac{1}{n}} \quad (10-18)$$

(2) 代数分配法 又称 AGREE 法, 由于它综合考虑子系统的复杂性 (各系统的单元数目) 和重要度, 故比等值分配法更完善。

设串联系统由  $k$  个指数分布的分系统组成, 则系统可靠度  $R_s$  为

$$R_s = \prod_{i=1}^k R_i = \prod_{i=1}^k [1 - w_i(1 - e^{-\frac{t_i}{\theta_i}})] \quad (10-19)$$

式中  $t_i$ ——第  $i$  个子系统的工作时间;  $\theta_i$ ——第  $i$  个子分系统的平均寿命;  
 $w_i$ ——第  $i$  个子系统的重要度。

可以看出式 (10-19) 中小括号内为第  $i$  个子系统在工作时间  $t_i$  之前发生失效的概率 (不可靠度)。

设第  $i$  个子系统由  $n_i$  单元组成, 则整个系统共用  $N = \sum_{i=1}^k n_i$  单元, 并假设这些单元可靠度相同且  $t_i/\theta_i$  很小, 如小于 0.01 时可采用以下分配原则

$$R_i(t_i) = 1 - w_i(1 - e^{-\frac{t_i}{\theta_i}}) = R^{\frac{n_i}{N}} \quad (10-20)$$

解得

$$\theta_i = \frac{-t_i}{\ln [1 - \frac{1}{w_i} (1 - R^{\frac{n_i}{N}})]} \quad (10-21)$$

即

$$R_i(t_i) = e^{-\frac{t_i}{\theta_i}} = 1 - w_i(1 - R^{\frac{n_i}{N}}) \quad (10-22)$$

由式 (10-20) 和式 (10-22) 可近似得

$$\theta_i = \frac{Nw_it_i}{n_i(-\ln R)} \quad (10-23)$$

**例 10-10** 某电子设备由 5 个子系统串联而成, 各子系统的数据如表 10-1 所示, 若要求该电子设备工作 12h 的可靠度为 0.923, 试用代数分配法对各子系统进行可靠性分配。

表 10-1 某电子设备的各分系统数据

分系统名称	元件数	工作时间 ( $t_i$ )	权数 ( $w_i$ )
发射机	102	12h	1.0
接收机	91	12h	1.0
控制设备	242	12h	1.0
起飞自动装置	95	3h	0.3
电源	40	12h	1.0





解:

(1) 计算各子系统的平均寿命  $\theta_i$  该设备共用元件数

$$N = \sum_{i=1}^5 n_i = 570$$

将  $R_s = 0.923$ ,  $N = 570$  及表 10-1 中的数据代入式 (10-23), 可得各子系统的平均寿命

$$\theta_1 = \frac{N w_1 t_1}{n_1 (-\ln R)} = \frac{570 \times 1.0 \times 12}{102 \times (-\ln 0.923)} = 837 (\text{h})$$

同理可得  $\theta_2 = 938 (\text{h})$ ,  $\theta_3 = 353 (\text{h})$ ,  $\theta_4 = 67 (\text{h})$ ,  $\theta_5 = 2134 (\text{h})$

(2) 计算各子系统分配的可靠度 由式 (10-20) 得

$$R_1(12) = R^{\frac{n_1}{N}} = 0.923^{\frac{102}{570}} = 0.9858$$

同理可得  $R_2(12) = 0.9873$ ,  $R_3(12) = 0.9666$ ,  $R_4(12) = 0.9867$ ,  $R_5(12) = 0.9944$

(3) 检验可靠度的分配结果

$$R_s = \prod_{i=1}^5 R_i(12) = 0.9858 \times 0.9873 \times 0.9666 \times 0.9867 \times 0.9944 = 0.9231$$

### 3. 并联冗余系统的可靠度分配

实际工程系统多数是基本串联系统, 其中有的部件由于可靠性低, 采用并联冗余结构, 以下结合实例说明这种系统的可靠度分配方法。

**例 10-11** 某系统的可靠性逻辑框图如图 10-12 所示, 其中部件 A, B, C 的可靠度预测值均为 0.99, 部件 D, E 的预测可靠度均为 0.9, 试求该系统可靠度的预测值。若要求该系统可靠度  $R_s^* = 0.98$  时, 各部件可靠度为多少?

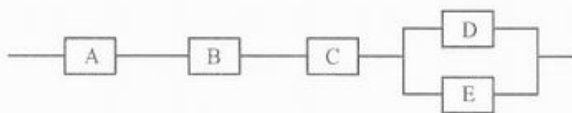


图 10-12 系统可靠性框图

解: a. 求系统的可靠性预测值。

$$\text{已知 } R_A = R_B = R_C = 0.99 \quad R_D = R_E = 0.9$$

$$\text{因此 } R_s = R_A R_B R_C [1 - (1 - R_D)(1 - R_E)] = 0.99^3 \times [1 - (1 - 0.9)^2] = 0.9606$$

b. 求系统可靠度目标为  $R_s^* = 0.98$  时, 各部件的可靠度。把 D, E 看作一个单元 U, 如图 10-13 所示, 先按串联系统可靠性分配方法, 选用等值分配法确定各部件的可靠度。



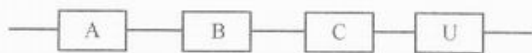


图 10-13 可靠性框图

$$R_A = R_B = R_C = R_U = (R_s^*)^{\frac{1}{4}} = 0.98^{\frac{1}{4}} = 0.995$$

由于  $R_U$  是  $R_D$  和  $R_E$  的并联系统, 因此

$$R_U = 1 - (1 - R_D)(1 - R_E)$$

由于  $F_D = 1 - R_D$ ,  $F_E = 1 - R_E$ , 由 D, E 部件的可靠度预计值大小, 可确定  $F_D = F_E = F$ ,

$$\text{故有, } R_U = 1 - F_D F_E = 1 - F^2$$

$$\text{所以 } F_D = F_E = F = \sqrt{1 - R_U} = \sqrt{1 - 0.995} = 0.0707$$

$$R_D = R_E = 1 - F = 1 - 0.0707 = 0.9293$$

上述分配计算结果为  $R_A = R_B = R_C = 0.995$   $R_D = R_E = 0.9293$

#### 四、可靠性设计方法

现代产品的结构非常复杂, 往往包括成千上万个零部件。其中有些零部件发生故障后, 会带来严重后果 (如刹车故障会导致安全事故), 但有些零部件的故障只会带来轻微的影响 (如汽车座椅损坏); 有些零部件发生故障后会直接影响产品的使用功能 (如汽车发动机故障会导致汽车无法行走), 而另一些零碎部件发生故障后并不影响产品的使用功能 (如车窗玻璃损坏)。因此, 在可靠性设计时, 应根据产品及其组成部分对故障的敏感程度采取不同的设计方法。

##### 1. 预防故障设计法

预防故障设计法是由经验积累产生的可靠性设计方法。它一般按下述原则进行: 有效利用过去的经验与实验数据, 如采用过去行之有效的结构设计、优化参数等; 尽量简化结构, 减少产品组成环节, 因为产品的结构越复杂, 零部件越多, 越容易引发故障; 多采用经过实践考验的标准化、通用化零件; 在设计中应力求使产品检修、调整、更换等作业方便易行; 应能防止误操作; 应力求高度优化所用材料与关键零部件的可靠性; 充分运用故障分析获得的可靠性数据, 并及早反馈给有关部门, 为可靠性设计和可靠性管理提供改进方向。

##### 2. 冗余设计

所谓的冗余设计, 是以功能的重复结构确保局部发生故障时整机不丧失功能的设计方法。也就是说, 在产品结构中, 采用并联结构, 额外附加具有相同功能的备用部分, 当主工作部分发生故障时, 用备用部分替换以继续维持整机功能的发挥。冗余设计可以提高产品的可靠性, 但也会带来消极的负





面影响,因为冗余措施会使产品的重量、体积和成本增加,维修性变差。因此,冗余设计常用于重要的场合。

### 3. 减荷设计

所谓的减荷设计是指为了改进可靠性,减轻产品内部应力的设计方法。具体方法是:在通过加速寿命试验掌握了载荷极限之后,以此极限值为界限,将使用应力分成若干级进行减荷,以确保产品或系统的可靠度要求。采用减荷设计时,应注意以下几点:要从体积、重量等方面,找到最适宜的负荷减少量或最佳减荷系数;要考虑冲击载荷的影响;不要把负荷减少到零部件的最低负荷下;一般的负荷减轻量宜取额定负荷的20%~30%。

### 4. 耐环境设计法

为保证产品规定的可靠性要求,应调查产品在寿命周期内的环境条件,从而做出对环境有充分耐力的设计,以免产品在未曾考虑的环境条件下工作时发生故障,这也是可靠性设计的重要内容之一。影响产品可靠性的环境条件是广泛的,下面以温度、湿度、振动三种环境条件说明环境设计的基本方法。

(1) 耐温设计 高温是使产品可靠度下降的主要原因之一,耐温设计的基本要求是保证产品的内部温度分布均匀并不超过正常工作环境温度,可以采取的具体方法有:对温度敏感的零件远离高温区;采用散热性好的结构和热稳定性好的零部件;采用热流路径的结构;采用冷却效果好的通风口和通风道等。

(2) 耐湿设计 湿度过大往往会使机械产品热氧化生锈,降低机械产品的工作精度,对电工产品则往往会破坏元件的绝缘性能,造成故障。因此,为保证产品系统的可靠性,应做耐湿设计,可考虑采取以下措施:采用表面经耐湿处理的材料;采用防锈、防霉材料;采用防蚀处理等。

(3) 耐振设计 振动往往是产品系统发生失效的主要原因之一。进行耐振设计可以考虑以下措施:放置产品的场所必须进行振动性评价;使用隔振结构;零件的布置要考虑耐振性;防止采用会出现共振的结构;采用人机工程设计法等。

### 5. 人机工程设计法

产品一般要由人来操纵,如果产品的结构和布局容易使人疲劳,产生判断失误,那就会使产品的可靠性降低。因此,要在可靠性设计中考虑人的因素,处理好人、机之间的关系,此即一般所说的人机工程设计。在人机工程设计中,要尽量减少人的疲劳,使人不发生判断失误,并且人的行动要无差

错且灵敏。因此,在设计时应做到:要开辟行动所必需的空间;要考虑照明、颜色、光亮的配合;注意温度、湿度、通风、灰尘等环境条件;保证能准确操作的结构;产品的大小、形状、高度要适宜。

## 6. 安全性设计法

安全性设计法是提高产品系统固有可靠性和固有安全性的设计方法。安全性设计的种类很多,常用的有异常警报装置设计、安全装置设计、故障检出或监测装置设计等。异常警报装置设计是一种附加异常显示装置的设计方法,在发生故障时自动发出警报;安全装置设计是指当产品及其组成部分发生故障时,由附加的安全装置执行安全作业,以阻止事故发生的设计方法;故障检出或监测装置设计是指在生产线上附加检测系统以检查出显在故障和潜在故障的设计方式。

## 7. 防错设计

产品是由人来操作的,而人会犯各种各样的错误,造成产品的故障和失效,因此,在产品设计时要进行防错设计。例如,汽车的刹车(尤其是手刹,新手往往会忘掉松开手刹)和油门互锁,如果刹车没放开,汽车则无法开动。又如,个人计算机的接口非常多,要将每个接口设计成不同的形状,以免误插,造成计算机的损坏(当然,这种设计往往会牺牲通用性)。

# 第三节 故障模式及效应分析

为保证产品的可靠性,设计时应对产品设计方案进行可靠性分析。产品可靠性分析的基本目的在于通过产品系统可靠性模型的建立,确定产品可靠性的实际情况及薄弱环节,并预测产品系统的可靠性大小。在可靠性分析的基础上可修改设计方案,从而提高产品系统的可靠性。可靠性分析的对象是故障或故障事件,最常用的可靠性分析方法有故障模式及效应分析(FMECA)和故障树分析(FTA)。本节介绍故障模式及效应分析,下节介绍故障树分析方法。

## 一、故障模式及效应分析的基本概念

故障模式及效应分析是一种系统化的可靠性分析方法,它由下而上,通过对系统各组成部分潜在的各种故障模式及其对系统功能的影响分析,提出可能采取的预防改进措施,以提高产品的可靠性,它在保证产品可靠性方面起着重要的作用。FMECA法是按照一定的程序、有步骤地分析每一个零部件可能出现的失效模式、失效模式对系统功能的影响及失效后果的严重程度,





它是一种失效因果分析方法。由于 FMECA 涉及的问题范围很广，一般只能由十分熟悉产品情况的设计人员经过充分的调查研究后做出分析，而由可靠性专业人员予以协助。

由于设计更改愈晚愈被动，因此，FMECA 应在设计初期尽早开始，以后随设计的变动而及时修改。实践证明，FMECA 能提供消除产品失效的线索，不用数据也可提示改进可靠性的方向。

## 二、故障模式及效应分析的工作内容

故障模式及其影响分析通常按系统、分系统、子系统的构成模式分级进行，其工作的内容包括：查明系统潜在的各种故障模式；查找故障产生的原因；分析故障对产品的影响后果；提出改进的对策或措施。

## 三、实施程序

FMECA 的实施一般可按下述程序进行。

- 作为 FMECA 的必要条件，应首先明确产品系统的功能目标，因此，实施的第一步是根据产品系统的功能，绘制产品系统的功能框图和可靠性框图
- 掌握产品或系统的使用条件与环境条件
- 明确失效的判定基准，劣化到何种程度才可判定为故障等
- 假设故障的项目，即找出可能发生故障的零部件
- 分析零件可能发生什么故障，即估计故障模式并分析故障机理
- 分析零部件失效后对总体或子系统的影响
- 分析零部件失效后对产品系统可能的影响
- 分析与预测产品故障的严重程度（失效严重度评价），这就是把故障的影响程度按严重性予以分级。具体评价某一故障模式的严重程度时可考虑以下三个因素：a. 该故障模式对系统的影响程度分级，如表 10-2 中第二列所示，记为  $E$ ；b. 该故障模式的发生频率（故障率）的评价  $P$ ；c. 该故障模式的预测或检出难易程度、修复时间、对策难易程度的评价  $T$ 。

表 10-2 失效影响严重度评价基准

分级	$E$	$P$	$T$
I (9~10)	灾难性重大问题	高（极易发生）	对策时间紧
II (6~8)	重要问题	易发生	对策时间短
III (3~5)	次要问题	有时发生	对策时间长
IV (1~2)	无足轻重的问题	不易发生	对策时间无限



最后, 综合上述 a, b, c 的评价分级, 用评分法做出严重性的综合评分  $C$

$$C = E \times P \times T$$

此评分值  $C$  可作为评价各种失效模式严重程度的尺度

- 采取对策, 即根据严重度的评价结果, 以  $C$  值较大的故障模式为主要对象, 确定个性方案或预测对策
- 写出分析报告, 总结设计上无法改正的问题, 并说明预防失效或控制失效的必要措施

**例 10-12** 某固体火箭发动机由推进剂药柱、内衬和发动机壳组成, 试绘制故障模式及效应分析表。

解: a. 绘制固体火箭发动机的可靠性框图, 如图 10-14 所示。



图 10-14 固体火箭发动机可靠性框图

b. 根据固体火箭发动机使用功能、结构特点和以往使用中出现的故障情况绘制故障模式影响分析表 (表 10-3)。

表 10-3 固体火箭发动机失效模式后果分析

项目	失效模式	失效原因	可能后果	发生概率	严重性	可能措施
发动机	破裂	工艺质量差	导弹毁坏	0.0006	严重	严格控制原材料
		材料缺陷				质量, 消除缺陷, 进
		运输中损坏				行耐压试验, 采用合
		搬运中损坏				理包装, 在运输中保
推进剂药柱	断裂 孔穴 黏接面分离	内压过高	燃烧速度过高 内压过高 机壳在工作过程中破裂	0.0001	严重	保护发动机
		固化残余应力				严格控制生产过程, 确保工艺质量
		温度过低				严格控制生产过程
		老化				程在温度极限之内储存和使用
内衬	与外壳分离 与药柱或隔热层分离	发动机壳成型后净化不够	燃烧速度过高 内压过高 机壳在工作过程中破裂	0.0001	严重	严格执行正常清洁程序, 机壳清洁后严格检验, 确保清除一切粘染物
		黏接剂不良				
		黏接过程控制不严				

后续工作内容略去。



### 一、故障树分析方法概述

失效树分析法与前节介绍的故障模式及效应分析相反,它面向产品全系统,由上而下,首先假设系统发生故障,然后分析其可能的原因。它以产品系统所不希望发生的某一故障事件(顶事件)作为分析目标,逐层向下追溯到所有可能的原因,并找出系统内可能存在的零件失效、环境影响、人为失误等硬、软件因素(各种底事件)与系统故障(顶事件)之间的逻辑关系,并用倒立树状图形表示出来。在建立好失效树后,再定性分析各底层事件对顶层事件发生影响的组合方式和传播途径,识别可能的系统故障模式,定量计算影响的轻重程度,并最终求出系统的失效概率。

故障树分析的主要步骤为:选择和确定顶事件;自上向下地建立故障树;故障树的定性分析;故障树的定量分析。

### 二、故障树的建立

建立故障树应遵循以下步骤。

#### 1. 选择和确定顶事件

把产品系统最不希望出现的故障称为故障树的顶事件(Top Event)。在系统分析中顶事件是已知的或者是设定的,故障树的分析就是通过演绎法找出导致顶事件发生的原因。当系统最不希望发生的故障状态不止一个时,可从产品功能进行分析,选定一个最关键的或几个故障作为顶事件,因此,顶事件有可能不是唯一的。

#### 2. 构建故障树

顶事件确定后,作为故障树的根,可以先画在最上面,然后找出导致顶事件的所有可能的直接原因,作为第一级中间事件(Intermediate Event),顶事件和紧接的中间事件之间,根据它们的逻辑关系用适当的逻辑门连接起来。接着再把造成第一级中间事件的各种直接原因找出来,也用适当的逻辑门把它们连接起来。如此一直进行下去,一直追溯到那些原始的或故障规律已掌握的原因为止,称为底事件(或基本事件 Basic Event)。这样就得到了一棵倒置的故障树。

故障树常用符号如表 10-4 所示。



表 10-4 故障树常用符号

序号	分类	名称	符号	含义
1	事件	结果事件		由其他事件或事件组合所导致的事件。它位于某逻辑门的输出端, 分为顶事件和中间事件
2		基本事件		无需探明其发生原因的底事件
3		未查明事件		原则上应进一步探明原因, 但暂时不必或暂时不能探明其原因的底事件
4	逻辑门	或门		<p>设 <math>X_1</math>、<math>X_2</math> 表示两个不同的事件, 如两事件中至少一个事件发生, 便能导致另一个事件 <math>X_3</math> 发生, 这种关系称逻辑“或”关系。代数表达式为</p> $X_3 = X_1 + X_2$
5		与门		<p>设 <math>X_1</math>、<math>X_2</math> 表示两个不同的事件, 如两事件中必须同时发生, 才能导致事件 <math>X_3</math> 发生, 这种关系称逻辑“与”关系。代数表达式为</p> $X_3 = X_1 \cdot X_2$
6		逻辑非门		<p>设 <math>X_1</math> 表示一事件, 如 <math>X_1</math> 事件不发生, 将导致另一个事件 <math>X_2</math> 发生, 这种关系为逻辑“非”关系。代数表达式为</p> $X_2 = \bar{X}_1 \text{ (} \bar{X}_1 \text{ 表示 } X_1 \text{ 事件不发生)}$
7	逻辑门	逻辑异或门		<p>设 <math>X_1</math>、<math>X_2</math> 表示两个不同的事件, 如两事件中任一个事件发生, 都将导致另一个事件 <math>X_3</math> 发生, 但它们同时发生时, <math>X_3</math> 却不发生, 这种关系为逻辑“异或”关系。代数表达式为</p> $X_3 = X_1 \bar{X}_2 + \bar{X}_1 X_2$

**例 10-13** 以某电机过热为顶事件来说明故障树的建立过程。

某电机的电路原理图如图 10-15 所示。

在导线、接点都正常, 而且无外力作用的条件下, 如果选取电机发热事件为顶事件, 则电机发热事件可能是由于被卡死或电机电流过大的事件所造成; 而电机电流过大, 只有在回路电流过大, 而

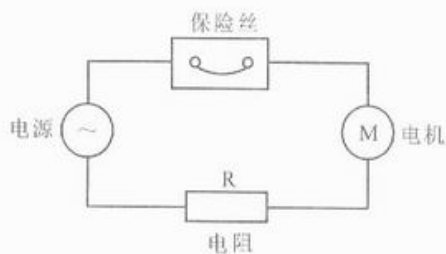


图 10-15 电机电路原理图



且在保险丝不起保护作用的情况下才会发生；回路电流过大又是由于电源电压过高或电阻短路才会出现，因而电机发热的故障树如图 10-16 所示。

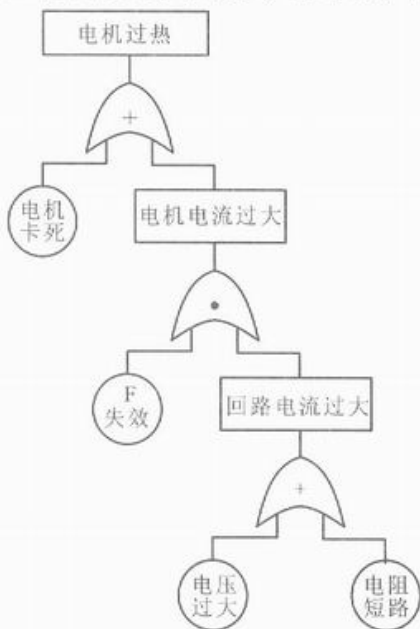


图 10-16 电机发热的故障树

### 三、故障树的定性分析

故障树的定性分析就是要找出导致顶事件发生的所有可能的故障模式，从数学上来讲，就是求出故障树所有的最小割集。人们根据已求出的最小割集，即使在基本故障事件的概率规律及原始数据不十分清楚的情况下，也能发现系统可靠性最薄弱的环节。

#### 1. 最小割集的概念

设故障树中有  $n$  个基本事件  $X_1, X_2, \dots, X_n$ ，又设  $C = \{X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in}\}$  为某些事件组成的集合，当这个集合中全部基本事件都发生时，顶端事件必然发生，则称  $C$  是该故障树的一个割集。若  $C$  是一个割集，而在  $C$  中任意去掉一个基本事件后就不是割集

的话，则称这个  $C$  是该故障树的一个最小割集。最小割集也是割集，即是其中所包含的基本事件若有一个不发生，顶端事件就不发生。可见，割集是顶端事件发生的充分条件，最小割集则是顶端事件发生的充分必要条件。例如，图 10-16 的故障树共有四个基本事件，它们分别是：电机卡死事件  $X_1$ ，熔断器失效事件  $X_2$ ，电源电压增高事件  $X_3$ ，回路电阻短路事件  $X_4$ 。在  $X_1, X_2, X_3, X_4$  这些元素中， $\{X_1\}$ ， $\{X_2, X_3\}$ ， $\{X_2, X_4\}$ ， $\{X_2, X_3, X_4\}$ ， $\{X_1, X_2, X_3, X_4\}$  等都是割集，但只有  $\{X_1\}$ ， $\{X_2, X_3\}$ ， $\{X_2, X_4\}$  是最小割集。

#### 2. 求最小割集的方法

寻找最小割集的方法有下行法和上行法两种。上行法是由下而上，按照故障树中的逻辑关系，逐步将顶事件用基本事件乘积的和来表示，如图 10-16 所示的故障树，就是先从最下面一排入手，并运用事件运算中的分配律及性质 ( $X_1 + X_2 = X_1$ ， $X_1 \times X_1 = X_1$ ) 得到。具体如下：

$$C_2 = X_3 + X_4$$

$$C_1 = X_2 \cdot C_2 = X_2 (X_3 + X_4)$$

$$TOP = X_1 + C_1 = X_1 + X_2 (X_3 + X_4) = X_1 + X_2 X_3 + X_2 X_4$$

即求出的最小割集为： $\{X_1\}$ ， $\{X_2, X_3\}$ ， $\{X_2, X_4\}$ 。





最后需指出的是,由于各基本事件的数据不全或不准,进行定量分析时往往会发生一些实际困难,但应用故障树的定性分析就可以找到改进系统可靠性的方向,这一点在可靠性工程中是很重要的。

#### 四、故障树的定量分析

系统顶事件发生的概率就是该系统故障的失效概率  $F(t)$ ,在基本事件发生的概率已知的条件下,求顶事件发生的概率可用故障树的最小割集表达式来计算,从而可对系统的可靠性作出评价。

在图 10-16 中,假定  $X_1, X_2, X_3, X_4$  出现的概率分别为 0.1, 0.2, 0.3 及 0.4,则由直接概率法可得到顶事件出现的概率。

$$\text{顶事件 } A = X_1 + X_2X_3 + X_2X_4$$

顶事件出现的概率

$$\begin{aligned} P(A) &= P(X_1) + P(X_2X_3) + P(X_2X_4) - P(X_1X_2X_3) - P \\ &\quad (X_1X_2X_4) - P(X_2X_3X_4) + P(X_1X_2X_3X_4) \\ &= 0.1 + 0.2 \times 0.3 + 0.2 \times 0.4 - 0.1 \times 0.2 \times 0.3 - 0.1 \times 0.2 \times 0.4 - \\ &\quad 0.2 \times 0.3 \times 0.4 + 0.1 \times 0.2 \times 0.3 \times 0.4 = 0.2044 \end{aligned}$$

综上所述, FMECA 法是由下向上的一种方法分析,从最基本的零部件故障到最终系统故障,从故障的原因到故障的后果;而 FTA 是由上向下的一种分析方法,从最终的故障事件分析到基本零部件的故障事件,从故障后果到故障原因。FMECA 分析方法不需要高深的数学理论和可靠性工程知识,对于工程人员只要掌握基本技巧就可以进行,该方法可以在工程研制的任何阶段应用,它的局限性是不能计算可靠性的特征量值。与 FMECA 法相比,故障树分析可以对人为故障和由多个原因造成的故障进行分析处理,且可以根据故障树计算系统的可靠性特征量值。故障树分析最大的局限性就是繁琐,不论是建树,还是计算,只有在方案比较成熟时才能使用。总之, FMECA 和 FTA 法各有优缺点,它们是相辅相成的。在可靠性工程中,常常将这两种方法综合应用。

#### 第五节 可靠性管理

可靠性是产品质量的一个重要特性,保障产品的可靠性就是要预防产品在预定的使用期限内发生随机故障。实践证明,要使随机故障发生的概率小到可以忽略的程度,除了进行可靠性分析和设计外,还要进行系统而周密的可靠性管理。可靠性管理就是应用系统工程的方法,将产品在整个寿命周期中的可靠性技术工作有效地组织并控制起来,调动各方面人员开展可靠性活





动。可靠性管理活动贯穿于产品寿命周期全过程，与产品形成过程中的各项专业管理，特别是质量管理有着密切的联系，可靠性管理本身就是质量管理的一个重要组成部分。

### 一、可靠性管理工作的内容

可靠性管理总的目标是使产品在设计时有可靠性指标及设计措施，在制造时有实现可靠性的保证措施，在使用时有维持可靠性水平的措施。可靠性管理涉及企业技术、生产和管理的方方面面，以及与产品寿命周期相关的各个部门和个人，其主要内容有以下几个方面：

- 宣传贯彻有关可靠性的方针、政策、法规、标准和规范
- 编制和实施可靠性工作的规则和计划
- 制定和实施可靠性保证大纲
- 开展可靠性工程技术的研究与推广应用
- 建立产品可靠性管理的规章制度
- 组织产品可靠性设计评审，对产品的可靠性进行鉴定与评价
- 对外购器材实施可靠性监控
- 建立故障报告分析和纠正措施系统
- 负责可靠性信息管理
- 开展可靠性工程教育、培训和咨询活动等

### 二、可靠性的标准化

#### 1. 可靠性标准

可靠性标准是可靠性工程与管理的基础之一。它是在严密的理论指导下，通过总结可靠性工程与管理的实践经验而制定的，并且要随着理论研究水平的提高、工程技术的发展以及经验的积累而不断地予以修订、补充和完善。可靠性标准可以使可靠性设计和管理工作更加规范化，为可靠性的最优化提供依据和保证。严格按照可靠性标准进行工作，可以提高可靠性管理的科学性，减少盲目性，并能以最少的人力、物力和时间实现既定的可靠性目标。因此，不论是管理者还是工程技术人员都应认真地学习和贯彻可靠性标准。

#### 2. 可靠性标准体系

可靠性标准体系分为三个层次：对可靠性工程与管理具有广泛指导意义的可靠性基础标准、某一大类产品共用的专业可靠性基础标准和各种有可靠性指标要求的具体产品标准。各种可靠性标准又可分类为：

**从级别上分** 可分为国家可靠性标准（GB）、国家军用可靠性标准（GJB）和行业可靠性标准；

**从内容上分** 可分为管理、采购、研制、生产、试验、分析、安装、储运、使用、维修等各个方面的可靠性标准；

**从形式上分** 则有以规范、标准、手册等方式表达的可靠性标准。

在实践中企业应尽量采用可靠性国际标准和国际先进标准，如国际标准 ISO、国际电工委员会标准 IEC、美国国家标准 ANSI、美国军用标准 MIL、日本工业标准 JIS 等，采用这些标准有利于迅速提高我国可靠性工程与管理的水平，是大幅度提高我国产品可靠性的重要途径，可对推动我国可靠性工程与管理的深入发展起着重要作用。

### 三、可靠性过程管理

要使规定的产品可靠性指标在产品设计、生产和使用过程中充分体现出来并维持下去，就必须进行全过程的可靠性管理。可靠性管理活动通常是按产品寿命周期阶段划分的，主要有开发设计、生产、销售、使用、维修等阶段，下面将分别介绍上述几个主要阶段可靠性管理的内容。

#### 1. 开发设计过程的可靠性管理

**(1) 对设计过程可靠性管理的要求** 开发设计过程可靠性管理的首要问题是明确产品的可靠性要求。在提出一种新的产品方案时，要全面分析用户的需求，从用户需求出发，提出产品的基本性能、主要特点、主要技术指标及应达到的可靠性指标，并进行可靠性论证。在论证的基础上提出正式的技术要求。技术要求应包含可靠性要求、方针和规范，这些是制定可靠性工作计划的依据。

**有关的可靠性要求** 规定产品的基本功能、特征和性能指标；规定可靠性、可维修性及安全性指标和要求；规定设计、生产过程中的元器件、原材料的控制方法；规定产品的维修方法；说明产品寿命周期全过程的环境条件；规定产品使用后可靠性数据的收集与分析要求；规定技术文件的管理制度及其他特殊要求。

**(2) 设计过程可靠性的工作内容** 产品设计过程是产品可靠性的奠基阶段，产品的可靠性在很大程度上取决于设计中所开展的可靠性保证工作。这些保证工作包括以下几个方面的内容。

① 产品可靠性的技术手段及有关设计措施。可靠性目标的实现，从本质上讲是在收集分析零部件可靠性数据的基础上，采取提高可靠性的设计措施来实现的。因此，在产品的设计过程中，应广泛采用故障模式及其影响分析、故障树分析等手段，通过进行冗余设计、容差设计、容错设计、防错设计、耐环境设计、人机工程设计及维修性设计来保证产品的可靠性。

② 产品可靠性的组织与管理。保证产品可靠性目标实现的重要条件是做



对工序质量进行严格控制；加强检验，排除制造缺陷，防止可靠性退化；通过试验筛选出可能发生故障的材料、零件，并排除可能导致各种故障的原因。

### 3. 销售服务过程的可靠性管理

销售和服务是直接面对用户的窗口，在生产和使用之间起桥梁作用。

**销售服务过程中主要的可靠性工作** 了解用户对产品质量要求、不满、故障等情报，并向有关部门反馈；掌握产品的可靠性状况，使用户了解产品正确的使用方法。

为了使用户易于理解，要站在用户的立场上考虑问题。操作使用说明书应详尽，规定的使用条件和环境要明确，对发生故障的责任范围以及如何处理等都要写明。

售后服务的责任是在产品故障发生之前就要对产品的状态经常进行检查，发生故障后能迅速处理。服务和销售是一体的，直接面对用户，能直接收集到有关的产品可靠性和维修性的第一手资料，在可靠性管理中占有重要的地位。它除了要及时向有关部门反馈质量信息和可靠性数据外，还要处理索赔、编写维修报告和各种故障调查报告，同时还要承担新产品现场试用跟踪检测等工作。

### 4. 使用维修过程的可靠性管理

如果说设计过程奠定了产品可靠性基础，制造过程保证了产品可靠性实现，使用维修过程则维持了产品可靠性水平，这是产品寿命周期可靠性工程的重要特点。由于各种因素的影响，在运输、使用、维修过程中会使设计和制造中赋予产品的可靠度发生退化，使产品的使用可靠性下降，因此，必须进行严格的管理，防止或减弱这种退化。任何机电产品都不可避免地存在随机故障与耗损故障，必须通过周到的维修服务恢复产品的正常工作状态，而周到的服务和详尽的指导可以防止和减少用户使用不当造成的故障，充分发挥产品的功能，并且还能提高企业和产品的信誉，扩大市场占有率。

产品使用阶段的可靠性与维修性和人机工程等多种因素有关，要保证产品使用的可靠性，应特别重视操作管理、维修管理以及使用可靠性数据的收集与反馈等工作。

## 四、可靠性数据的管理

可靠性数据是可靠性分析与设计的主要依据。在研究产品可靠性水平、制定可靠性目标、预测与计算可靠性的特征值以及进行可靠性改进设计时，都必须有相应的可靠性数据予以支持，否则就无法定量地进行可靠性研究和管理工作。







### 1. 可靠性数据的来源

企业内部的可靠性数据主要来自于企业的各个部门,凡是与产品可靠性有关的部门,如开发设计、工艺、质量、生产、销售、试验等部门都有责任收集并提供数据。这些数据有些可从作业现场的记录中得到,如进厂原材料的检验数据、质量检查记录等;有的则要通过可靠性试验来专门收集。企业内部的数据大多属于早期故障,主要是模拟试验的结果。但还有许多可靠性数据往往无法在企业内部取得,只有从企业外部来收集。

从企业外部或市场用户收集数据是可靠性数据收集的一大特点。企业生产的产品大量地在市场上流通,在用户现场使用。用户现场是产品的实际运行工况和使用条件的基地,许多产品只有在长期运行中才能产生大量的可靠性数据,因此,由用户提供的可靠性数据最真实、最能反映实际问题,可以较为真实地反映出产品的可靠性水平。

### 2. 可靠性数据的特点

可靠性数据多数情况下是用时间表示,但可靠性数据与其他时间数据相比要复杂得多,主要体现出以下两个特点。

(1) 可靠性数据是一种特殊类型的数据(特别是抽样数据) 需要在一定的理论指导下,采用一定的数学手段才能获得。

(2) 可靠性数据是一种高价数据 因为故障时间类的数据只有在产品发生故障后才能取得,有时还需要通过一批产品的试验获得的数据才有代表性。可靠性试验时间越长,耗费就越大,因而取得数据的代价就越大。

由于以上特点,要求可靠性数据收集工作开始之前,一定要制定严密的计划,考虑周到,避免遗漏和浪费。

### 3. 可靠性数据的分类

可靠性数据的分类没有固定的模式,总的原则是数据要齐全、准确。一般将可靠性数据分成七类:产品可靠性分析原始数据;产品可靠性分析基础数据;环境条件数据;使用条件数据;质量数据;产品故障数据;可靠性信息数据等。

### 4. 可靠性数据的管理和交换

综上所述,可靠性数据来源广泛,内容丰富。很显然,可靠性数据的有效性管理和利用能降低产品成本,缩短产品研制周期,提高系统可靠性,对产品的可靠性工程具有重大意义。怎样实现可靠性数据的有效管理和交换,是目前世界各工业发达国家都十分重视的工作。随着计算机技术的发展,为可靠性数据的管理和交换提供了良好的技术和物质基础,现在的可靠性数据



管理和交换工作是基于计算机网络和公用数据库进行的。人们通过计算机网络,能最大限度地利用现有技术知识和经验数据,减少或避免企业或社会的人力、财力和时间消耗,并且还可以不断地自动交换可靠性数据和其他技术信息。

例如,美国的“政府与工业界数据交换”(GIDEP)就是一个全国性的、公用数据交换网,该网设有5个专业数据库:工程数据库;失效数据库;失效经验数据库;可靠性、可维修性数据库和计量数据库。据资料介绍,1980年GIDEP直接节省的费用达2900万美元(大约是投资的14倍),而间接计算的节省额比这还要大得多。

### 思考与练习 10.

- 试述产品可靠性、可维修性、可用性和可信性的概念,以及它们之间的区别和联系。
- 设某产品的寿命  $T$  的失效密度函数为  $f(t) = te^{-\frac{t^2}{2}} (t \geq 0)$ , 试求该产品的可靠度  $R(t)$  与失效率  $\lambda(t)$ 。
- 一种设备  $T$  服从参数为  $\lambda$  的指数分布,假如其平均寿命为 200h, 试求其连续工作 200h, 20h, 10h 的可靠度各是多少?
- 简述故障模式及效应分析的步骤。
- 简述故障树分析的思想。
- 某系统由 5 个单元串、并联组成(图 10-17), 各单元工作是相互独立的, 其可靠度分别为  $R_1 = 0.9918$ ,  $R_2 = 0.9879$ ,  $R_3 = 0.9995$ ,  $R_4 = 0.9796$ ,  $R_5 = 0.9750$ 。求系统的可靠度。

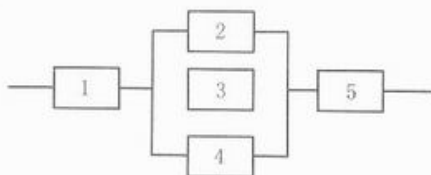


图 10-17 系统可靠性框图

- 某喷气式飞机有 3 台发动机,至少需 2 台发动机正常运行才能安全飞行和起落,假定飞机事故仅由发动机引起,并假定发动机失效率为常数 ( $MTBT = 2 \times 10^3 \text{h}$ ),求飞机飞行 10h 和 100h 的可靠度。
- 试述可靠性管理的意义和内容。
- 我国产品与国外产品的主要差距体现在外观造型、做工精细和可靠性上,其中可靠性差又是主要问题,试分析如何提高我国产品的可靠性。
- 提高产品可靠性的重点在设计阶段,试论述在设计阶段可采取哪些措施提高产品的可靠性。



- 根据你的生活经验，举几个日常使用产品的可靠性故障，以及这些故障带来的结果。
- 针对自行车或某种家用电器，对其进行全面研究，利用本章介绍的方法（故障模式分析及影响分析、故障树分析方法、可靠性预测、可靠性分配、可靠性设计）研究其可靠性及其设计方法。
- 有人认为可靠性就是质量，试从定义上分析两者的异同，并举例说明。
- 冗余系统和并联系统有什么区别？为什么两者的可靠性并不相同？分别举出几个冗余系统和并联系统的例子。

