第1章 汽车的耐久性和可靠性

产品可靠性与产品的失效、寿命、安全性、维修性等密切相关,在可靠性的概念被明确提出之前人们已经在很多场合应用耐久性、寿命、稳定性、安全性、维修性等概念来表征产品的质量。

汽车的耐久性(durability 或 endurance)和可靠性(reliability)与汽车及其零部件的失效、寿命、安全性、维修性等密切相关。在历史上,汽车行业常常把汽车及其零部件能够行驶一定里程而不发生失效作为其耐久性的评价指标。但是,汽车及其零部件的失效寿命是个随机变量。现在在美国,轿车的设计寿命一般是行驶 16 万 km。很多汽车零部件(例如转向器)的设计寿命就是 16 万 km,但是这个设计寿命是所谓的 B_{10} 寿命,即要求汽车零部件达到这个寿命时发生失效的概率为 10%,或者说可靠度为 90%。也可以这样理解,在一大批汽车零部件中,达到设计寿命(B_{10} 寿命)时要求有 90%的产品还能够正常工作。所以,现代可靠性的概念已经包含了汽车耐久性的概念。由于历史的原因,目前在汽车行业仍然广泛使用耐久性这个术语。

1.1 可靠性工程的发展概况

可靠性的研究始于第二次世界大战,并首先在电子领域开展起来,因为当时的军用电子设备故障率比较高。

在 20 世纪 50 年代,可靠性工程开始形成一门独立的工程学科。到了 20 世纪 50 年代,军用电子系统(主要是雷达系统)的复杂性已经大大增加,含有大量的元器件。电子技术的发展意味着采用越来越多的新型元器件,采用新的过程制造这些元器件,这些都导致当时的军用电子设备的可靠性问题表现得很突出。有报道说,当时美国军用雷达因故障不能工作的时间占 84%,美国陆军的电子设备在规定的时间内有 65%~75%因故障不能使用。这些设备的使用者还发现,由于这些设备的故障很难诊断和修理,明显降低了它们的可用度。就是在这样的背景下,美国国防部和电子工业在 1952 年联合建立了“电子设备可靠性咨询小组(AGREE)”。在 1957 年,这个小组发表了著名的名为“军用电子设备的可靠性”的报告,提出了在研制、制造过程中对产品进行可靠性试验、验证、鉴定的方法,以及对包装、储存、运输过程的可靠性要求。这个报告被认为是电子产品可靠性工作的奠基性文件,它确定了可靠性工程的基本研究方向。从此以后,可靠性的理论和方法研究得到普遍重视,迅速开展起

来。并举行了各种可靠性学术会议,交流研究成果。可靠性工程开始成为一门独立的工程学科。

美国国防部发表了一些重要的可靠性标准,例如美国军事标准(MIL-STD)781“可靠性鉴定和生产认可试验(reliability qualification and production approval tests)”,它实际上是AGREE报告的试验部分。这个标准要求在足够高的环境应力水平(包括高、低温,振动,开-关等)下对产品进行可靠性试验,以便在足够早的阶段发现设计中的主要薄弱区域,在生产正式开始以前对其进行纠正。在1965年,美国国防部发表了MIL-STD-785“系统和设备可靠性大纲(reliability programs for systems and equipments)”。这个文件强制性地要求把可靠性工程方法与在设计、开发和生产中传统的工程方法整合在一起。那时已经认识到,只有这样做才能确保在尽可能早的开发阶段,也是成本最低的阶段,找出并且消除潜在的可靠性问题。采用可靠性工程方法的一个成功范例是阿波罗11号宇宙飞船在月球上的成功登陆和返回(1969年)。美国国家航空与宇航局(NASA)在总结这个计划的经验时说,可靠性工程技术是其三大技术成就之一。

从1960年开始,可靠性工程开始从电子工业迅速向其他工业部门推广。威布尔概率纸开始得到广泛应用。在1962年,当时的美国总统肯尼迪提出了消费者保护政策,给予消费者四项权利——①要求安全;②产品要交底;③产品要有选择性;④要听取用户意见。由此引发了消费主义的高潮。在消费主义思想的影响下,人们提出了大量的产品责任诉讼,要求产品制造者对消费者因产品缺陷而蒙受的损失进行赔偿。每年请求的赔偿金额高达几百亿美元。这些产品缺陷一般导致产品在使用不长时间以后发生失效,是典型的可靠性问题。这促使企业高度重视产品责任预防,而采用可靠性技术是实现产品责任预防的最重要手段之一。人们已经认识到产品的可靠性是产品质量的一个关键内容,是使用时间$t>0$时的一个质量指标,它集中反映了产品的设计、制造质量。

进入20世纪70年代,可靠性工作已经成为企业质量保证工作的一个重要环节。在此期间,日本的可靠性工作取得了很大的成就,日本产品(例如汽车、家电产品、照相机等)因可靠性高开始在竞争中处于有利地位。

在20世纪60年代,我国在航天、雷达、通信机、电子计算机的技术领域也提出了可靠性问题,开始开展可靠性工作。

在20世纪70年代,我国重点工程的需要(元器件的可靠性问题)和消费者对解决国产电视机质量问题的强烈要求,对国内有关行业开展可靠性研究起到了巨大推动作用。我国有关方面经过10年的努力,使军用元器件的可靠性提高了两个数量级,保证了运载火箭、通信卫星的连续发射成功和海底通信电缆的长期正常运行。国家有关部门对电视机等产品提出了明确的可靠性、安全性的要求和指标,组织全国整机及元器件生产厂家开展了以可靠性为重点的全面质量管理。在5年的时间里,使电视机的平均故障间隔时间提高了一个数量级,配套元器件使用可靠性提高了一至二个数量级。为占领国内市场和打入国际市场作出了重要贡献。

尽管我国在可靠性工程方面已经作出很大努力,取得了不小的成就,但是与发达国家相比还有很大的差距。例如,我国的电子控制系统的可靠性水平就普遍比较低。我国生产的数控机床多采用进口的控制系统。我国自行研制的汽车电子控制系统的实用化也都遇到了可靠性问题。为改变这种局面,需要做很多工作。其中之一是要改变观念,即应该把产品的

可靠性与产品的性能同等看待，这对于有效推动可靠性工程是很关键的。同时应该推动可靠性理论研究，把理论研究成果和可靠性工程技术有效地应用于工程实践之中。由于产品的可靠性与产品的研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及保养维修等各个环节都有密切关系，所以，为了保证产品具有足够高的可靠性就需要在上述各个环节中有效地应用可靠性技术。

1.2　可靠性的定义

汽车工业市场调研的结果表明，汽车用户都希望自己的汽车具有良好的性能和高可靠性。用户眼里的高可靠性一般包括如下内容：汽车经久耐用，不容易出故障，随时可以使用，维修费用低等。在保修期内，虽然顾客在维修车辆中负担的费用少，但他们还是不乐意接受由于汽车容易出故障而造成的无法正常使用的情况。

以上是用户眼里的可靠性内容。

目前世界上公认的可靠性定义是：产品在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力。

上述可靠性定义中包含 4 个要素：

(1) 产品——汽车、汽车部件、汽车零件、通信设备、电冰箱、洗衣机、电视机、空调机、计算机等都是产品，它们是可靠性研究的对象。

(2) 规定的条件——指产品工作的条件，例如承受的机械载荷、电压、电流、工作温度、湿度、腐蚀、维修、保养、操作者的特性等。产品的工作条件对其可靠性影响很大，只有规定了产品的工作条件，才能进行可靠性分析和比较。

(3) 规定的时间——在可靠性工程中，“时间”泛指广义的时间，包括次数(产品承受一定载荷的次数，开关的开-闭次数)、距离(汽车行驶的里程数)、时间(汽车发动机在规定条件下工作的时数)等反映产品寿命的量。规定使用时间的长短，对可靠性是有影响的。对同一批产品，规定的使用时间(寿命)越长，到寿命后发生故障的产品比例就越高，即可靠性越低。

(4) 规定的功能——在产品(汽车或其零部件、计算机、电冰箱、洗衣机、通信设备等)设计任务书、使用说明书、订货合同以及国家标准中规定的各种功能与性能要求。

产品不能实现规定的功能被定义为失效。所以，失效的定义与规定功能的定义直接相关。例如，如果把发动机能够运转定义为规定的功能，则发动机停止运转就是失效；如果把发动机能够提供一定转矩作为规定功能，则当发动机不能提供这样的转矩时就是失效，即使发动机能够运转也是失效。

一个产品为什么会失效呢？对于承受机械载荷的零件，当它们承受的载荷超过其承受能力时便发生失效。例如，一个拉杆，当它承受的应力超过材料的强度极限时便会断裂。对于电子元器件，当通过它们的电负荷超过其承受能力时也会失效。例如，一个晶体管，当流过它的电流超过其承受能力时会因过热而失效。在可靠性工程中，把施加给产品的负荷(力、应力、加速度、压力、电压、电流、温度、湿度等)通称为应力，把产品能够承受这些应力的极限能力通称为强度。所以可以说，当一个产品所承受的应力超过其强度时便会失效。在可靠性工程中，研究应力与强度的相互关系占有重要地位。

如图1-1所示,如果一个产品具有恒定的强度 r,受到一个恒定的应力 s,而且应力小于强度,即 $s<r$,则产品不会失效。

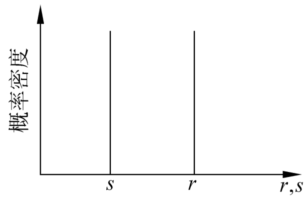


图1-1 恒定应力和强度

如果考虑一批实际产品,它们中没有两件是完全一样的。所以,它们的强度 r 是个随机变量。例如,一种拉杆,其抗拉强度(承受拉力的极限能力)由其横截面积和材料强度所决定。由于在制造过程中不可避免地存在的变差(机器变差、人的变差、操作规程的差别、原材料的差别、环境的差别等),每个拉杆的横截面积和材料强度都与其他的拉杆不同,所以它们的强度也有差别。对一批产品的强度进行统计分析可以确定其分布规律,设其概率密度为 $f(r)$,强度的均值为 $\bar{r}$。在实际工作中,不同产品上承受的应力 s 也往往不同,是个随机变量,设其概率密度为 $g(s)$,应力的均值为 $\bar{s}$。把它们画在一起,得到图1-2。在图1-2(a)中,产品强度和应力的概率密度没有重叠,强度 r 总是大于应力 s,所以不会发生失效。在图1-2(b)中,产品强度和应力的概率密度有重叠,虽然强度的均值 $\bar{r}$ 大于应力的均值 $\bar{s}$,但是有可能出现应力 s 大于强度 r 的情况,在这种情况下就会发生失效。这种现象称为应力-强度干涉。

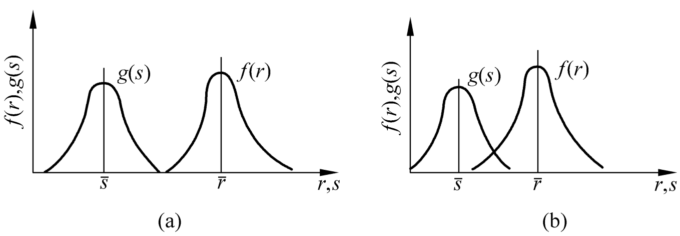


图1-2 应力和强度的分布

应该指出,产品强度的分布规律并不总是不变的。例如,在产品承受疲劳载荷或腐蚀情况下,其强度的分布规律随着时间或载荷循环将发生变化。

由于产品特征(例如汽车零件的几何形状、尺寸、强度、……)、工作条件(载荷、温度、腐蚀、维修、保养、……)、时间(工作寿命、……)都是随机变量,所以可靠性分析是借助于统计学来进行的。可以说,可靠性工程属于统计技术范畴。

值得注意的是,可靠性分析、设计的基础是可靠性数据,也就是产品从开发、制造、使用直至失效全过程的有关产品特征(例如零件几何形状、尺寸、强度、……)、工作条件(载荷、温度、腐蚀、维修、保养、……)、时间(工作寿命、……)等的数据,没有它们就无法进行可靠性分析和设计。所以,必须十分注意这些数据的搜集和保存。

由此可见,为保证产品具有足够高的可靠性,需要在产品的研制、设计、制造、试验、使用、运输、保管及保养维修等各个环节应用可靠性技术。

1.3 产品可靠性的度量

1.3.1 不可修产品与可修产品

在可靠性工程中,把产品分为可修产品和不可修产品两种类型。

不可修产品——在使用中发生失效,其寿命即告终结的产品。例如,汽车灯泡、皮带、板

簧片、齿轮、油封、轴承，火箭发动机，人造卫星，电子微处理器等。它们或者没有修理价值或者修理以后也不能完全恢复功能。

可修产品——在使用中发生故障后，可以通过维修的方法恢复其功能的产品。一般较复杂、昂贵的产品设计为可维修的（飞机、飞机发动机、汽车、汽车发动机、计算机、电冰箱、洗衣机、电视机等），可以通过更换其中的个别零部件、重新调整等方法，恢复其原有功能。

有些产品在一些情况下是可修的，在另外一些情况下是不可修的。例如，导弹在储存过程中可以进行检测，发现故障可以修理，是可修的。而一旦发射，它就不可修了。

可修产品和不可修产品在可靠性评价上存在一定的差别。对于不可修产品，一般是通过对其寿命数据的统计分析来评价其可靠性。这种方法原则上也适用于可修产品首次故障的评价。例如，汽车变速器一般是可修的，但在台架试验中，一般进行到发生首次故障即停止，对于其台架试验可以用不可修产品的评价方法进行可靠性评价。而对于可修产品，一般还用两次故障之间的间隔时间的随机变化情况，以及维修过程的统计量对其可靠性进行评价。

1.3.2　可靠度 $R(t)$ 与不可靠度 $F(t)$

可靠度的定义：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。也就是说，可靠度是可靠性的一种概率量度。

例如，某种产品的可靠度为 95%，这意味着在一大批这种产品中，有 95%的产品可以在规定的寿命（时间 t）完成规定的功能，而有 5%的产品则未达到规定的寿命就失效了。应该注意，可靠度是与规定的寿命 t 相关的，一般表示为 $R(t)$。

从概率论的角度来说，若令 E 表示“产品在规定条件下和规定时间 t 内完成规定功能”的事件，则出现该事件的概率 $P(E)$ 即为产品的可靠度，即

$$R(t) = P(E) = P(\tau \geqslant t) \quad (0 \leqslant t < \infty) \tag{1-1}$$

所以，可靠度 $R(t)$ 也可理解为产品寿命 $\tau \geqslant t$ 的概率 $P(\tau \geqslant t)$。

若令 $\bar{E}$ 表示事件 E 的对立事件，则概率 $P(\bar{E})$ 表示“产品在规定的条件下和规定的时间内不能完成规定功能的概率”，称为不可靠度、累积失效概率，或简称为失效概率，用 $F(t)$ 表示

$$F(t) = P(\bar{E}) = P(\tau < t) \quad (0 \leqslant t < \infty) \tag{1-2}$$

显然，可靠度 $R(t)$ 与不可靠度 $F(t)$ 之间满足如下关系：

$$R(t) + F(t) = 1 \tag{1-3}$$

图 1-3 定性示出 $R(t)$ 和 $F(t)$ 随工作时间 t 的变化情况：在产品刚开始工作时（$t=0$），所有产品都是完好的，$R(0)=1$，$F(0)=0$；随着工作时间 t 的增加，产品的失效数也在增加，可靠度 $R(t)$ 相应降低，而不可靠度 $F(t)$ 相应增大；若产品一直使用下去，当 t 接近无穷大时，$R(\infty)=0$，而 $F(\infty)=1$。因此，在时间 t 的区间$[0,\infty)$内 $R(t)$ 为非增函数，且 $0 \leqslant R(t) \leqslant 1$，$0 \leqslant t < \infty$；而 $F(t)$ 为非减函数，且 $0 \leqslant F(t) \leqslant 1$，$0 \leqslant t < \infty$。

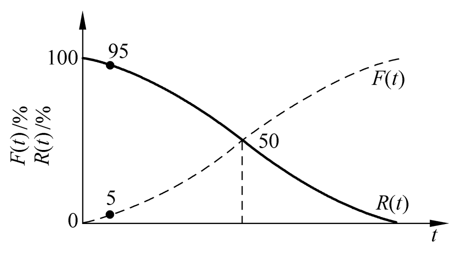


图 1-3　$R(t)$ 和 $F(t)$ 随工作时间 t 的变化情况

1.3.3 失效概率密度 $f(t)$

失效概率密度 $f(t)$就是产品寿命 t 这个随机变量的概率密度。在实际工作中,一般通过对一组可靠性数据进行分析来求出 $f(t)$以及 $R(t)$和 $F(t)$。

下面通过一个实例来说明分析过程。

表1-1示出总数 $N=100$ 个产品在15年内逐年失效的数据及相应的处理结果。

平均失效概率密度$\bar{f}(t)$定义为

$$\bar{f}(t)=\frac{\Delta N_{\mathrm{f}}}{N\Delta t} \tag{1-4}$$

其中,Δt——研究的时间间隔;

ΔN_{f}——在 Δt 内增加的失效产品数量。

图1-4示出平均失效概率密度$\bar{f}(t)$直方图,其横坐标是时间 t(a),纵坐标是在 Δt(1 a)内的平均失效概率密度$\bar{f}(t)$,用%/a表示;每个小矩形条的面积即代表 Δt 内的失效频率 ΔW_i,即

$$\Delta W_i=\frac{\Delta N_{\mathrm{f}i}}{N} \tag{1-5}$$

其中,ΔW_i——在第 i 个 Δt 内的失效频率;

$\Delta N_{\mathrm{f}i}$——在第 i 个 Δt 内发生的失效数量。

表1-1 $N=100$ 个产品的失效数据统计与分析

序号	时间间隔 $\Delta t=1$ a 时间区间 /a	时间区间内发生的失效数 ΔN_{f}	累积失效数 N_{f}	未失效数 $N_{\mathrm{s}}=N-N_{\mathrm{f}}$	平均失效概率密度 $\bar{f}=\frac{\Delta N_{\mathrm{f}}}{N\Delta t}$	累积失效频率 $\bar{F}=\frac{N_{\mathrm{f}}}{N}$	存活频率 $\bar{R}=\frac{N_{\mathrm{s}}}{N}$	平均失效率 $\bar{\lambda}=\frac{\Delta N_{\mathrm{f}}}{N_{\mathrm{s}}\Delta t}$ (N_{s} 为前一区间的)
1	0～1	1	1	99	0.01	0.01	0.99	0.01
2	1～2	2	3	97	0.02	0.03	0.97	0.0202
3	2～3	3	6	94	0.03	0.06	0.94	0.031
4	3～4	5	11	89	0.05	0.11	0.89	0.053
5	4～5	7	18	82	0.07	0.18	0.82	0.079
6	5～6	9	27	73	0.09	0.27	0.73	0.11
7	6～7	12	39	61	0.12	0.39	0.61	0.164
8	7～8	15	54	46	0.15	0.54	0.46	0.246
9	8～9	13	67	33	0.13	0.67	0.33	0.283
10	9～10	10	77	23	0.10	0.77	0.23	0.303
11	10～11	8	85	15	0.08	0.85	0.15	0.348
12	11～12	7	92	8	0.07	0.92	0.08	0.467
13	12～13	4	96	4	0.04	0.96	0.04	0.500
14	13～14	3	99	1	0.03	0.99	0.01	0.750
15	14～15	1	100	0	0.01	1.00	0.00	1.00

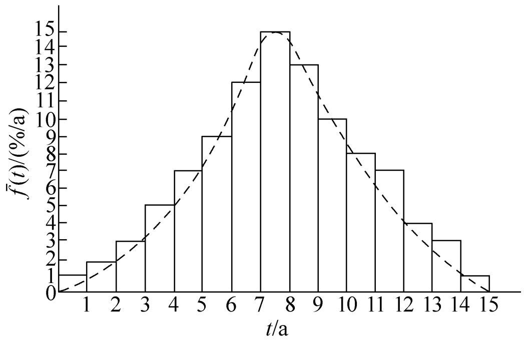


图 1-4　平均失效概率密度$\bar{f}(t)$直方图

如果把试样(产品)总数 N 逐渐增大，时间区间划分得更多更细，则在 Δt 内的平均失效概率密度$\bar{f}(t)$将稳定在某一固定值。这种情况反映在直方图上，就是随着 N(观察次数，即试样数量)的增加，区间间隔 Δt 的缩短，各矩形条上沿的边长也随之缩短。当 $N\rightarrow\infty$，$\Delta t\rightarrow 0$ 时，直方图就趋于一条曲线(图 1-4 中的虚线)，称为“概率密度分布曲线”，也就是失效概率密度 $f(t)$，即

$$f(t)=\lim_{\substack{N\rightarrow\infty\\ \Delta t\rightarrow 0}}\bar{f}(t)=\lim_{\substack{N\rightarrow\infty\\ \Delta t\rightarrow 0}}\frac{\Delta N_{\mathrm{f}}}{N\Delta t} \tag{1-6}$$

根据可靠性的定义，可靠度 $R(t)$可表达为产品工作到时间 t 时未失效数 $N_{\mathrm{s}}(t)$与试件总数 N 的比值，即

$$N_{\mathrm{s}}(t)=NR(t) \tag{1-7}$$

再经过 Δt 时间，到时间 $t+\Delta t$ 时的未失效数为

$$N_{\mathrm{s}}(t+\Delta t)=NR(t+\Delta t) \tag{1-8}$$

因此，在 Δt 时间内的失效数

$$\begin{aligned}\Delta N_{\mathrm{f}}(\Delta t)&=N_{\mathrm{s}}(t)-N_{\mathrm{s}}(t+\Delta t)=NR(t)-NR(t+\Delta t)\\&=N[R(t)-R(t+\Delta t)]\end{aligned} \tag{1-9}$$

所以

$$\bar{f}(t)=\frac{\Delta N_{\mathrm{f}}(\Delta t)}{N\Delta t}=\frac{R(t)-R(t+\Delta t)}{\Delta t} \tag{1-10}$$

把式(1-10)代入式(1-6)，得

$$f(t)=\lim_{\substack{N\rightarrow\infty\\ \Delta t\rightarrow 0}}\bar{f}(t)=\lim_{\substack{N\rightarrow\infty\\ \Delta t\rightarrow 0}}\left[-\frac{R(t+\Delta t)-R(t)}{\Delta t}\right]=-\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1-11}$$

从式(1-3)，得

$$F(t)=1-R(t)$$

所以

$$\frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t}=-\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1-12}$$

把式(1-12)代入式(1-11)，得

$$f(t)=\frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1-13}$$

即概率密度函数 $f(t)$是在时刻 t 时,单位时间的失效概率 $F(t)$的变化。

图 1-5 示出一个一般的失效概率密度 $f(t)$,$f(t)$曲线下的阴影面积就是寿命 t 低于某个时间 T_a 的概率 $P(0\leqslant t\leqslant T_a)$,也就是失效概率 $F(T_a)$,即

$$F(T_a) = P(0 \leqslant t \leqslant T_a) = \int_0^{T_a} f(t)\mathrm{d}t \tag{1-14}$$

而可靠度 $R(T_a)$为

$$\begin{aligned} R(T_a) &= P(T_a \leqslant t < \infty) = \int_{T_a}^{\infty} f(t)\mathrm{d}t \\ &= 1 - F(t) = 1 - \int_0^{T_a} f(t)\mathrm{d}t \end{aligned} \tag{1-15}$$

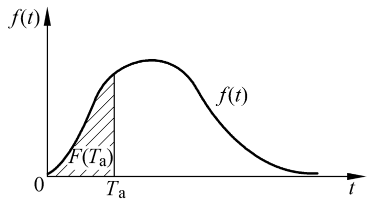


图 1-5 失效概率密度函数 $f(t)$ 与失效概率 $F(T_a)$

应该指出,在式(1-14)和式(1-15)中,由于 T_a是任意的,可以用随机变量 t 来代替。

以上就是 $f(t)$、$F(t)$和 $R(t)$之间的关系。

1.3.4 失效率$\lambda(t)$

设一批总数为 N 的产品工作到时间 t 尚有 $N_s(t)$个未失效,这些未失效的产品再继续工作 Δt 以后,又发生了 $\Delta N_f(\Delta t)$个失效,则平均失效率 $\bar{\lambda}(t)$定义为

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_f(\Delta t)}{N_s(t)\Delta t} \tag{1-16}$$

而

$$N_s(t) = N - N_f(t) = N - NF(t) \tag{1-17}$$

其中,$N_f(t)$——到 t 时刻发生失效的总数;

$N_s(t)$——到 t 时刻所剩余的未失效的数量。

把式(1-17)代入式(1-16)得

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_f(\Delta t)}{[N - N_f(t)]\Delta t} = \frac{\Delta N_f(\Delta t)}{N\Delta t}\frac{1}{\left[1 - \dfrac{N_f(t)}{N}\right]} \tag{1-18}$$

当 $N\to\infty$,$\Delta t\to 0$ 时,瞬时失效率(简称为失效率)$\lambda(t)$为

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \lim_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}} \bar{\lambda}(t) = \lim_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}} \left[\frac{\Delta N_f(\Delta t)}{N\Delta t}\frac{1}{\left[1 - \dfrac{N_f(t)}{N}\right]}\right] \\ &= \lim_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}} \left[\frac{\Delta N_f(\Delta t)}{N\Delta t}\right] \frac{1}{\lim\limits_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}}\left[1 - \dfrac{N_f(t)}{N}\right]} \\ &= f(t)\frac{1}{1 - \dfrac{N_f(t)}{N}} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \end{aligned} \tag{1-19}$$

其中,$N_f(t)/N$——在时刻 t,已经失效的产品数 $N_f(t)$与产品总数 N 之比,也就是失效概率 $F(t)$。

把式(1-12)和式(1-13)代入式(1-19),得

$$\lambda(t) = \frac{-\mathrm{d}R(t)/\mathrm{d}t}{R(t)} \tag{1-20}$$

整理，得

$$\frac{\mathrm{d}R(t)}{R(t)} = -\lambda(t)\mathrm{d}t \tag{1-21}$$

所以

$$\mathrm{d}[\ln R(t)] = -\lambda(t)\mathrm{d}t \tag{1-22}$$

$$\ln R(t) = \int_0^t -\lambda(t')\mathrm{d}t' \tag{1-23}$$

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t')\mathrm{d}t'} \tag{1-24}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t')\mathrm{d}t'} \tag{1-25}$$

由式(1-19)，得

$$f(t) = \lambda(t)R(t) \tag{1-26}$$

把式(1-24)代入式(1-26)，得

$$f(t) = \lambda(t)\mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t')\mathrm{d}t'} \tag{1-27}$$

从前面的分析可以看出，失效率 $\lambda(t)$ 可以理解为：工作到时刻 t 尚未失效的产品，在该时刻后单位时间内失效概率的变化。

而失效概率密度 $f(t)$ 可以理解为：开始工作(时刻 $t=0$)时的产品(所有产品)，在时刻 t 时单位时间内失效概率的变化。

从定义式可以更清楚地看出失效概率密度 $f(t)$ 与失效率 $\lambda(t)$ 的差异。平均失效概率密度定义式为式(1-4)，即

$$\bar{f}(t) = \frac{\Delta N_{\mathrm{f}}(\Delta t)}{N\Delta t}$$

而平均失效率 $\bar{\lambda}(t)$ 定义式为式(1-16)，即

$$\bar{\lambda}(t) = \frac{\Delta N_{\mathrm{f}}(\Delta t)}{N_{\mathrm{s}}(t)\Delta t}$$

$$f(t) = \lim_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}} \bar{f}(t) = \lim_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}} \frac{\Delta N_{\mathrm{f}}(\Delta t)}{N\Delta t}$$

$$\lambda(t) = \lim_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}} \bar{\lambda}(t) = \lim_{\substack{N\to\infty \\ \Delta t\to 0}} \frac{\Delta N_{\mathrm{f}}(\Delta t)}{N_{\mathrm{s}}(t)\Delta t}$$

所以，$f(t)$ 与 $\lambda(t)$ 的不同在于 N 与 $N_{\mathrm{s}}(t)$ 一般不同，但是当 $t=0$ 时，$N=N_{\mathrm{s}}(0)$。因此

$$\lambda(0) = f(0) \tag{1-28}$$

利用表 1-1 中的数据计算各个时刻的平均失效率 $\bar{\lambda}(t)$，并画在图 1-6 中，其纵坐标为平均失效率 $\bar{\lambda}(t)$，用%/a 表示；横坐标是时间 t/a。该产品的失效率随着时间逐渐增大。

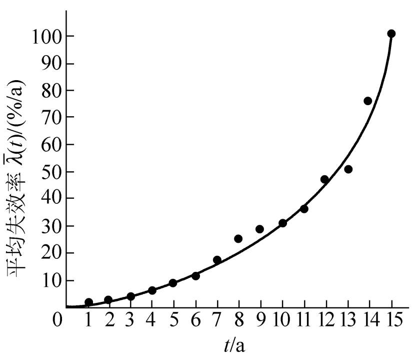


图 1-6　各个时刻的平均失效率 $\bar{\lambda}(t)$

下面把反映可靠性的各个参量之间的关系集中列出：

$$F(t) = 1 - R(t)$$

$$f(t) = \frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t}$$

$$\frac{\mathrm{d}F(t)}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

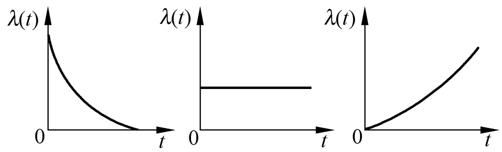
$$f(t) = \lambda(t)\mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t')\mathrm{d}t'}$$

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t')\mathrm{d}t'}$$

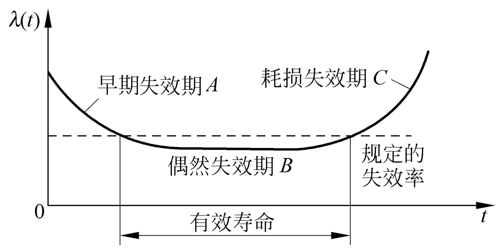
$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - \mathrm{e}^{-\int_0^t \lambda(t')\mathrm{d}t'}$$

可以看出,只要知道其中一个参量,便可以应用上述关系式推导出其余所有的参量。

失效率 $\lambda(t)$描述产品的失效规律。如图 1-7 所示,失效率曲线有 3 种类型,即失效率随着时间不断减小;失效率保持不变;失效率随着时间不断增大。失效率曲线的 3 种类型反映产品工作过程的 3 个不同阶段或时期。将这 3 个时期绘成连续曲线,则得到所谓的“浴盆曲线”——由于其形状与浴盆的剖面相似而得名。



(a) 典型失效率曲线



(b) 浴盆曲线

图 1-7 典型失效率曲线和浴盆曲线

在浴盆曲线上可将失效分为 3 个时期:

(1) 早期失效期(失效率递减型)——其特征是开始时失效率较高,随着时间延长失效率逐渐减小。这往往是因为产品中混有不合格品、带缺陷的产品,它们经过比较短时间的使用便发生失效,使得最初的失效率高。但随着时间推移,不合格品、缺陷品逐渐被淘汰(发生失效),在剩下的未失效产品中所含的不合格品、缺陷品越来越少,从中再发生失效的越来越少,失效率逐渐下降。

为提高产品的早期可靠性,可以采用的措施包括:改进产品设计和生产质量控制,减少产品变差,减少不合格品、缺陷品,防止不合格品、缺陷品提交给顾客。

电子产品一般都有早期失效期。为提高电子产品的早期可靠性(使用初期的可靠性),