

目 录

第一章 可靠性与安全性	1
第一节 可靠性、安全性、经济性	1
第二节 可靠性的数量指标(特征量)	8
第二章 常见分布函数	20
第一节 随机变量	20
第二节 随机变量分布特征量	23
第三节 常见的失效密度函数	26
第三章 系统可靠性模型及可靠度计算	35
第一节 系统和框图	35
第二节 串联系统可靠度计算	36
第三节 并联系统可靠度计算	39
第四节 混联系统可靠度计算	41
第五节 表决系统可靠度计算	43
第六节 复杂系统的可靠度计算	44
第四章 可靠性的分配和预测	48
第一节 可靠性的分配	49
第二节 可靠性的预测	61
第五章 失效模式和效应分析(FMEA)	78
第一节 失效	79
第二节 失效模式与机理	82
第三节 失效分析	87
第四节 失效模式效应分析及致命度分析(FMEA 和 FMECA 的 应用)	95
第六章 故障树分析(FTA 法)	109

第一节	FTA 的名词术语和符号	111
第二节	故障树的建造	114
第三节	故障树的数学模型	118
第四节	割集和路集	123
第五节	最小割集的求法	125
第六节	用最小割集表示的故障树结构函数	132
第七节	故障树的定量化计算	135
第八节	事故树分析在安全生产中的应用	143
第七章	可靠性工程设计	147
第一节	可靠性工程设计理论	147
第二节	应用实例	160
第八章	人的可靠性	171
第一节	人的操作可靠性	171
第二节	人机界面	176
第三节	显示-控制系统	182
第九章	可靠性管理	199
第一节	可靠性数据的收集和分析	199
第二节	可靠性管理	212
第三节	风险管理	218
附表 1	由 z 求 R 表	223
附表 2	由 R 求 z 表	224
附表 3	标准正态分布表 z $F(z)$	225
附表 4	标准正态分布表 z R 表	233
附表 5	中位秩表	235
参考文献		236

第一章 可靠性与安全性

第一节 可靠性、安全性、经济性

一、可靠性工程的发展

无论在生活中,还是在生产中,任何一个产品,人们都希望性能好,不易出毛病,出了毛病好修,经久耐用,这就是所谓质量好的产品。产品质量是用户要求的集中体现。产品不易出毛病(故障),出现毛病能很快修好再用,产品使用寿命长,这些都是可靠性工程要研究的问题。不易出毛病就是“无故障工作时间”长,出毛病能很快修复就是“维修性”好,经久耐用就是“寿命”长。再加上性能好就是高质量的产品。所谓可靠性就是产品在规定的条件下,在规定的时间内,能够完成规定的功能的能力。产品是指可以单独研究,分别试验的任何元件、器件、设备或系统。

规定的条件是指产品使用时的应力条件(载荷条件)、环境条件以及贮存条件等。规定的条件不同,产品的可靠性也不同,例如一台起重机承受不同的负荷,那么它的可靠性肯定是不同的。又如某台设备在实验室内使用和野外现场使用其可靠性也是不同的。又如温度、湿度、腐蚀介质等不同的环境条件,对产品的可靠性都有很大的影响。此外,还有操作技术,维护保养条件等都对产品的可靠性产生影响。

规定的时间是指产品的工作时间,任何一种产品经过一段

时间的稳定性工作之后,随着时间的延长,可靠性就会下降,就会愈来愈频繁的出现故障,最后报废,例如某种型号的家电设备,规定 90% 设备无故障工作时间为 15000 小时,那么在 15000 小时之内,这一批产品绝大部分不会发生故障,但超过 15000 小时,则不能保证完好工作的百分比。规定时间的单位可用分、秒、小时、月、年、周期、次数、里程等。

规定的功能,是指产品应具有的技术指标。这个指标要明确、清晰,只有这样才能判断产品是否正常工作还是处于故障状态。产品丧失规定功能称为失效。首先要明确产品的失效模式、失效机理和失效判据。失效判据有些产品很容易确定,有些产品就比较难确定。比如“灯泡”就很容易判断它正常还是失效,不亮就是失效。又如电视机的失效就比较复杂,它可以从几个方面来鉴别,如光栅检查、图像质量检查、伴音质量、灵敏度、选择性、稳定性、白纯度与会聚检查、白平衡检查、消色能力、接受彩色能力等方面的具体数据,来判断其是否失效。判断其是否失效还要由生产技术和用户的经济条件来决定。

可靠性有很多数量指标,如寿命、失效率、可靠度等。其中常用的特征量为可靠度,可靠度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,一般用 R (Reliability) 表示。可靠性的概念人们早就有了,作为可靠性科学或可靠性的定量指标的研究是从第二次世界大战才迅速发展起来的。二次大战中美国运往远东的机载电子设备 60% 失效,70% 的舰艇电子设备处于故障状态,二战中美国飞行事故损失的飞机架数为被击落飞机架数的 1.5 倍。促使人们必须重视研究可靠性问题。性能再先进的装备,不能保证可靠度也不能发挥作用。

特别是在冷战期间,在航天技术上展开激烈的竞争,技术愈来愈复杂。以飞机和飞船为例,1940 年生产的飞机上有上千个

电子元件,发展到1960年有九万多个电子元件,1969年7月发射的阿波罗(Appolo)宇宙飞船由710万个零件构成,这么复杂的系统,价值达数百万美元,为了实现规定的任务,必须保证系统中每个零件都保持一定的可靠度。否则,常常因为一个价值几美元的小零件失效导致整个飞船失效。1975年发射的先锋号卫星,由于一个价值2美元的零件失效,造成发射失败,损失220万美元。1986年1月28日导致穿梭机“挑战者”号爆炸的竟是一个助推器的密封圈失效,助推器由许多节连接在一起组成,节间加以密封,如果一个连接点的密封失效,则将引起火箭助推器外壳破裂,从而招致外燃料罐爆炸。最后导致造价12亿美元的“挑战者”号爆炸,七名宇航员全部遇难的重大事故。

美国三哩岛核电站1979年3月28日发生放射性物质泄漏事故长达2小时45分钟,事故轰动全球,事故原因有人的操作问题,也有设备本身的问题(反应堆的安全壳隔离、事故给水泵、泄压泵等问题)。此后,美国63家核工业公司联合组成可靠性专家组,提出一项研究计划,对核电站进行概率风险评价(又称PSA技术)。

人们总结了本世纪从1907年魁北克大桥坠垮使19000吨钢材和86名工人坠入水中。1912年英国提坦号客轮遇难导致1513人丧生。1937年德国兴登堡气球爆炸。1963年美国“长尾鲨”号核潜艇遇难。1963年意大利维昂特水坝冲毁,造成4000人丧生。1974年土耳其的DC-10飞机失事,造成355名乘客和11名机组人员丧生。1979年美国宾夕法尼亚反应堆事故。1981年美国堪萨斯城饭店倒塌造成113人丧生,200人受重伤。1984年12月印度博帕尔农药厂中毒事件约有3000人丧生,10万人不同程度中毒。1986年苏联切尔诺贝利核电站事故,4号反应堆发生猛烈爆炸,反应堆内放射性物质大量外泄,大火经过7天才

得以扑灭。其原因是石墨燃烧造成反应堆内热量不能散发,导致原子堆芯融化,酿成核能开发历史上最严重的一次悲剧。上述十件事称为本世纪十大技术失误。使人们又一次认识到可靠性技术的重要性。

第二次世界大战末期德国火箭专家卢瑟首先将可靠性理论用于 V—I 型火箭研究,得出 V—I 型火箭的可靠度为 0.75。

1952 年美国成立了电子设备可靠性顾问组——AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment)。

1954 年美国召开全国第一届可靠性与质量管理学术会议。

1958 年美国国防部成立了导弹可靠性委员会。

1962 年美国召开可靠性与维修性学术会议。

1958 年日本成立可靠性研究委员会。

1971 年日本召开第一届可靠性与维修性学术会议。

1964 年苏联召开第一届可靠性学术会议。

1965 年国际电子技术委员会设立可靠性技术委员会。

我国 60 年代开始着手可靠性的研究工作,80 年代初在电子学会,机械工程学会,航天航空学会成立了可靠性专业委员会,并制定一批国家标准。在一些高校设立硕士和博士点。

目前,不仅在航空航天技术上广泛应用可靠性技术。在冶金、化工、机械、建筑各行各业也都逐步的采用可靠性设计理论和管理方法。在机电产品中提出可靠度的要求,特别是与安全有关的产品,如力矩限制器,要求可靠度为 $R=0.9$ (GB 7950—87)。建筑设计标准提出的“安全度指标”就是可靠度系数。

二、可靠性、安全性、经济性

1. 可靠性

可靠性的定义是:产品或系统(设备)在规定的条件下,在规

定的时间内,完成规定功能的能力。

随着科学技术的飞速发展,生产的自动化水平不断提高,生产设备结构复杂,高速大型化,如核电站工业系统、大型冶金企业、大型化工企业、航天飞机、高速铁路等都实现自动化生产。系统中的任何一个环节,一个零部件突然失灵,都会给系统带来不可估量的损失。所以不仅要研究零部件的可靠性,还要研究系统的可靠性。

一个设备或系统本身不出故障的概率称为“结构可靠性”;满足精度要求的概率称为“性能可靠性”,“结构可靠性”和“性能可靠性”合称为狭义可靠性。对于可修复的产品,出现故障是可以维修的,所以又有一个维修性定义,维修性是指在规定条件下使用的产品在规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复到能完成规定功能的能力。考虑狭义可靠性和维修性便有一个有效性的定义,是指可以维修的产品在某时刻具有或维持规定功能的能力。

当按着规定的程序和方法进行维修时,产品在规定的使用 and 维修条件下,达到某种技术或经济指标极限时,完成规定功能的能力称为耐久性、考虑产品的狭义可靠性、维修性、有效性、耐久性则可得到产品的广义可靠性。

图 1-1 是可靠性与产品其他性能的关系图。

2. 安全性

安全性的定义为:人们在生活与工作环境中感受到的危害或危险的概率是已知的,并且控制在可接受的水平上。为了达到这一目标,就要知道人们生活与工作环境内各种设备(产品)发生失效和人员失误的概率以及由于失效可能导致的人身伤亡和重大经济损失。

安全的反义词是危险或风险。安全性通常用风险值来定量

的描述,风险值就是事故发生的概率与事故后损失的乘积。

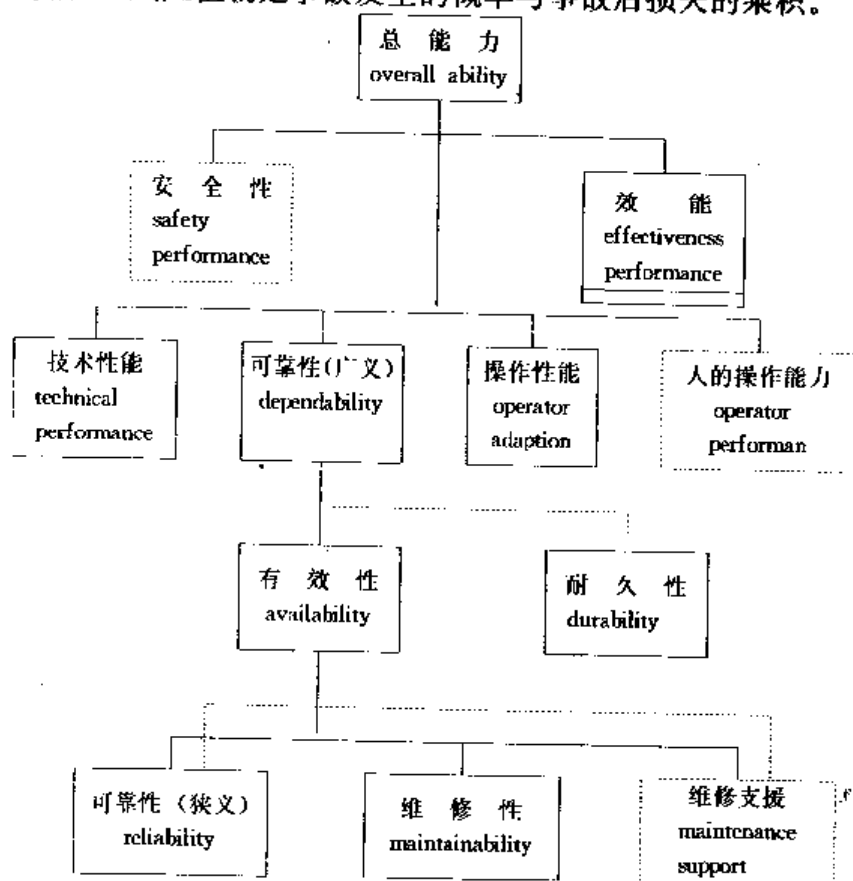


图 1-1 可靠性与产品其他性能关系图

安全是一个相对的概念,“危险控制在可以接受的水平”,可接受的“水平”与社会技术的发展有关,也与人们的利害关系分不开。安全是人们生活与工作环境的一种状态,这包括人与人的影响,设备、设施与人的关系,自然环境对设备对人的影响等因素。从劳动安全的角度看,主要是生产设备与工具对劳动者的影响,所以要想安全,必须首先要求生产设备和工具具有可接受的可靠性。故障或失效不一定引起伤亡和重大物质损失,但是劳

动生产中的重大伤亡事故,是由于生产设备故障和人的失误引起的,所以可靠性是安全性的前提。

3. 经济性

一个产品的费用不仅仅是购置费用,还要考虑使用费、维修费。如家电产品是否节电,故障率和修理费用。有些产品使用费和维修费会超过购置费。

例如某设备购置费为 2.60 万元,设备寿命为 10 年,每年的使用维修费用折算到年底为 1.00 万元,平均利率为 12%,10 年若残值为 0.2 万元。分析该设备总的使用维修费的现在价值和设备周期总费用。

设使用维修费 $A=1.00$ 万元,寿命 $n=10$ 年、年利率 $i=12\%$ 。

按复利计算使用维修费的现在价值:

$$\begin{aligned} P &= A \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right] \\ &= 1.00 \times \left[\frac{(1+0.12)^{10} - 1}{0.12 \times (1+0.12)^{10}} \right] \\ &= 1.00 \times 5.65025 \\ &= 5.6503 \text{ 万元} \end{aligned}$$

设备周期总费用

$$\begin{aligned} P_s &= P_0 + P - S/(1+i)^{10} \\ &= 2.60 + 5.6503 - 0.2/(1+0.12)^{10} \\ &= 2.6 + 5.6503 - 0.0644 \\ &= 8.1859 \text{ 万元} \end{aligned}$$

从计算中可以看出,使用维修费是购置费的 2.1 倍。如果通过可靠性设计,也就是说无故障工作时间比较长,那么维修费用就可以降低。

据有人推算 80 年代初,电视机年产约 200 万台,并以 15% 的速度增长,平均无故障工作时间为 500 小时,每修理一次平均费用为 10 元,那么从 1980~1990 年 10 年间付出维修费高达 19.6 亿元。但如果通过可靠性设计,把无故障工作时间提高到 1 万小时,同样时间内,所付维修费为 2.27 亿元,二者相差 17 亿元。可见产品的可靠性与经济性关系是一致的。

美国人预言,今后只有那些生产高可靠性产品的企业,在激烈国际竞争中才能幸存下来。

日本人认为可靠性就是信誉,今后产品竞争的焦点是可靠性。

所以必须加强可靠性的管理工作,生产出高可靠性的产品,提高企业的竞争力,获得大的经济效益和社会效益。

由于产品不可靠,每年发生的人身事故是不少的。据统计,美国每年为此受伤者达 2000 万人。1967~1973 年间的统计,产品责任事故中有 37% 是产品不合格,其余如安装不符合规范、试验检查不够、说明书指导书错误等等。这些都是厂家的责任。有的国家从法律上规定制造厂和经销商要对产品可靠性负责。不仅对产品本身负责任,还要对由此而造成的巨大的人身伤亡的经济损失负责任,所以有了可靠性就有经济效益。

第二节 可靠性的数量指标(特征量)

一、可靠度

可靠度(Reliability)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。

概率是表示随机事件发生的可能性大小的一个量。必然发生的事件的概率为 1,不可能发生的事件的概率为 0,所以一般

随机事件的概率介于 0 与 1 之间的一个数。也称为几率,或“或然率”。

可靠度是时间的函数,一批新产品投入使用,随着使用时间的延续,产品会一个个的发生故障或失效。观察的时间越长,失效的产品越多,最后全部失效。例如用 100 支白炽灯作试验,记录每支灯泡使用的时间就会发现,有的使用 300 小时,有的使用 800 小时,有的 1000 小时,超过 1000 小时很快就全部失效(不亮)了。

设有 N_0 个产品,在规定的条件下工作到规定的时间,有 r 个产品失效,还有 $N_s = (N_0 - r)$ 个产品继续工作。

那么这批产品完成规定功能的概率,也就是可靠度是多少。根据定义可靠度为:

$$R(t) = \frac{N_0 - r(t)}{N_0} = \frac{N_s(t)}{N_0}$$

式中 $R(t)$ ——可靠度,是时间的函数;

N_0 ——参加试验的产品总数;

$N_s(t)$ ——到时刻 t ,尚能完成规定功能的产品个数。

例如有 100 个产品参加试验,观测结果如表 1-1 所记录的数据。

表 1-1 100 个产品试验结果表

寿命, h	0~2000	2001~4000	4001~6000	6001~8000	8001~10000	>10000
失效数 $r(t)$	2	8	38	40	10	2
尚存数 $N_s(t)$	98	90	52	12	2	0
可靠度 $R(t)$	0.98	0.90	0.52	0.12	0.002	0
不可靠度 $F(t)$	0.02	0.1	0.48	0.88	0.998	1

若计算 $t=6000$ 小时的可靠度:

$$R(6000) = \frac{N_s(6000)}{N_0} = \frac{52}{100} = 0.52$$

同理可以算出 2000, 4000, 8000, 10000 小时的可靠度。如表 1-1 中所示。

二、不可靠度

不可靠度(cumulative failure probability)就是产品在规定的条件下,在规定的时间内未完成规定功能的概率,也称累积失效概率。用 $F(t)$ 表示。

根据概率的互补定理,可靠度加上不可靠度等于 1。即:

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

或

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

根据定义

$$F(t) = \frac{r(t)}{N_0} = \int_0^t \frac{1}{N_0} dr(t) = \int_0^t \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt} dt$$

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

其中

$$f(t) = \frac{1}{N_0} \frac{dr(t)}{dt}$$

式中 $f(t)$ ——失效密度函数,表示在时刻 t 后的一个单位时间内产品失效数与产品总数的比。

例如上例有 100 个产品观测试验在 6000 小时,累积失效数为 48 个,那么累积失效概率为:

$$F(6000) = \frac{2+8+38}{100} = \frac{48}{100} = 0.48$$

同理可以算出 2000, 4000, 6000, 8000, 10000 小时的累积失效概率或不可靠度如表 1-1 中所示。不可靠度在 2000 小时为 $F=0.02$; 4000 小时 $F=0.1$; 6000 小时, $F=0.48$; 8000 小时, $F=0.88$; 10000 小时, $F=0.998$; >10000 小时 $F=1$, 全部失效。

三、失 效 率

失效率(failure rate)为工作到某时刻尚未失效的产品,在该时刻后单位时间内发生失效的概率。

根据定义,设有 N_0 个产品参加试验,工作到时刻 t 后,尚存(或未失效的)的产品为 $[N_0 - r(t)]$ 。在时刻 t 后单位时间内失效数为 $[r(t + \Delta t) - r(t)]/\Delta t$ 所以失效率 $\lambda(t)$ 为:

$$\lambda(t) = \frac{[r(t + \Delta t) - r(t)]/\Delta t}{N_0 - r(t)} = \frac{\Delta r(t)}{N_s(t)\Delta t}$$

式中 $\Delta r(t)$ ——在时间 Δt 内的失效数;

$\Delta(t)$ ——时间间隔;

$N_s(t)$ ——到时刻 t 为止,尚未失效的产品。

当时间间隔取得很小, $\Delta t \rightarrow 0$ 时:

$$\lambda(t) = \frac{dr(t)}{N_s dt}$$

失效率的单位是 $1/h$, 或者为 $10^{-5}/h = \%/10^3 h$, 对高可靠度的产品可用 $10^{-9}/h$, 也称菲特(Fit)。

例: 有 10 万个产品在 18 年内失效数据列在表 1-2 中, 计算这批产品在工作 1, 2, …… 17 年的失效率, 失效率用 $\%/年$ 和 $\%/10^3 \cdot h$ 表示。

解: 根据失效率定义

$$\lambda(t) = \frac{\Delta r(t)}{N_s(t)\Delta t}$$

$$\text{第一年 } \lambda(1) = \frac{10^3}{100 \times 10^3 \times 1} = 1.00\%/年$$

$$\text{第二年 } \lambda(2) = \frac{10^3}{(100 - 1) \times 10^3 \times 1} = 1.01\%/年$$

$$\text{第三年 } \lambda(3) = \frac{10^3}{(100-2) \times 10^3 \times 1} = 1.02\%/\text{年}$$

$$\text{第四年 } \lambda(4) = \frac{10^3}{(100-3) \times 10^3 \times 1} = 1.03\%/\text{年}$$

$$\text{第五年 } \lambda(5) = \frac{3 \times 10^3}{(100-4) \times 10^3 \times 1} = 3.125\%/\text{年}$$

$$\text{第六年 } \lambda(6) = \frac{6 \times 10^3}{(100-7) \times 10^3 \times 1} = 6.452\%/\text{年}$$

同理可以计算 7~18 年间, 每年的失效率列入表 1-2 中。

表 1-2 10 万个产品失效观测数据表

t 年	t 时刻累积失效数 $r(t), 10^3$ 个	一年时间内失效数 $\Delta r(t), 10^3$ 个	失效率 $\lambda(t)$	
			%年	%/10 ³ 小时
0		0	0	0
1	0	1	1.00	0.114
2	1	1	1.01	0.115
3	2	1	1.02	0.116
4	3	1	1.03	0.118
5	4	3	3.12	0.356
6	7	6	6.45	0.736
7	13	10	11.49	1.312
8	23	14	18.18	2.075
9	37	15	23.81	2.718
10	52	16	33.33	3.805
11	68	14	43.75	4.994
12	82	8	44.44	5.073
13	90	4	40.00	4.566

续表

t 年	t时刻累积失效数 $r(t), 10^3$ 个	一年时间内失效数 $\Delta r(t), 10^3$ 个	失效率 $\lambda(t)$	
			%年	%/10 ³ 小时
14	94	3	50.00	5.708
15	97	1	33.33	3.805
16	98	1	51.00	5.708
17	99	1	100.00	11.416
18	100			
19				

同理可以算出第7~17年的失效率。

如果要以“%/10³小时”为计算单位,计算失效率时,则可将%/年为单位的效率除以8.76即可。因1年为8760小时。

$$\text{例: } \lambda(1) = \frac{10^3}{100 \times 10^3 \times 8.76} = 0.114\% / 10^3 \cdot h$$

$$\lambda(2) = \frac{10^3}{(100-1) \times 10^3 \times 8.76} = 0.115\% / 10^3 \cdot h$$

$$\lambda(3) = \frac{10^3}{(100-2) \times 10^3 \times 8.76} = 0.116\% / 10^3 \cdot h$$

$$\lambda(4) = \frac{10^3}{(100-3) \times 10^3 \times 8.76} = 0.118\% / 10^3 \cdot h$$

$$\lambda(5) = \frac{3 \times 10^3}{(100-4) \times 10^3 \times 8.76} = 0.356\% / 10^3 \cdot h$$

$$\lambda(6) = \frac{6 \times 10^3}{(100-7) \times 10^3 \times 8.76} = 0.736\% / 10^3 \cdot h$$

同理可以计算7~18年间的失效率,列入表1-2中。

表1-3是各部件的典型失效率表。该表资料取至WASH-1400报告,是关于反应堆安全的研究报告。由美国原子能委员会总部的科学和工程师小组进行的,耗资400万美元,历时3年。

表 1-3 各种部件的典型失效率(取自 WASH-1400)

部 件	失 效 方 式	中 间 估 计 值	下 限 ~ 上 限
电 离 合 器	操作失效	$3 \times 10^{-4}/d$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
	过早断开	$1 \times 10^{-6}/h$	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$
机 械 离 合 器	断开失效	$3 \times 10^{-7}/h$	$3 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-6}$
	操作失效	$3 \times 10^{-4}/d$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
安 全 棒	插入失效(信号棒)	$1 \times 10^{-4}/d$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
电 动 机	起初失效	$3 \times 10^{-4}/d$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
	运行失效	$1 \times 10^{-5}/h$	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$
	运行失效(极端环境)	$1 \times 10^{-3}/h$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$
继 电 器	激磁失效	$1 \times 10^{-4}/d$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
	常开触点闭合失效	$3 \times 10^{-7}/h$	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$
	短时通过常开/常闭触点	$1 \times 10^{-8}/h$	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7}$
	断开常闭触点	$1 \times 10^{-7}/h$	$3 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-7}$
开 关	极限值:操作失效	$3 \times 10^{-4}/d$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
	转矩:操作失效	$1 \times 10^{-4}/d$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
	压力:操作失效	$1 \times 10^{-4}/d$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
	手控:转换失效	$1 \times 10^{-5}/d$	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$
	接点短路	$1 \times 10^{-8}/h$	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7}$
电 路 断 路 器	操作失效	$1 \times 10^{-3}/d$	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$
	过早转换	$1 \times 10^{-6}/h$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$
保 险 器	过早断开	$1 \times 10^{-5}/h$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-5}$
	断开失效	$1 \times 10^{-5}/h$	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$
导 线	断开	$3 \times 10^{-6}/h$	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-3}$
	接地短路	$3 \times 10^{-7}/h$	$3 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-6}$
	峰压运行短路	$1 \times 10^{-8}/h$	$1 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-7}$

续表

部 件	失 效 方 式	中 间 估 计 值	下 限 ~ 上 限
变 压 器	开路	$1 \times 10^{-6}/\text{h}$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$
	短路	$1 \times 10^{-6}/\text{h}$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$
固 态 装 置	功能故障	$3 \times 10^{-6}/\text{h}$	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-5}$
	高功率输出短路	$1 \times 10^{-6}/\text{h}$	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$
	功能故障	$1 \times 10^{-6}/\text{h}$	$1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-5}$
	低功率输出短路	$1 \times 10^{-7}/\text{h}$	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-6}$
泵(电磁控制)	短路失效	$1 \times 10^{-3}/\text{d}$	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$
	正常运行失效	$3 \times 10^{-5}/\text{h}$	$3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-4}$
	运行失效(极端环境)	$1 \times 10^{-3}/\text{h}$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7}$
阀(机械控制)	操作故障	$1 \times 10^{-3}/\text{d}$	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$
	(栓)连续打开失效	$1 \times 10^{-4}/\text{d}$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
	外部泄漏破裂	$1 \times 10^{-6}/\text{h}$	$1 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$
阀(电磁控制)	操作失效	$1 \times 10^{-3}/\text{d}$	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$
阀(自动控制)	操作故障	$3 \times 10^{-4}/\text{d}$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-3}$
	(栓)连续打开失效	$1 \times 10^{-4}/\text{d}$	$3 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$
	外部泄漏破裂	$1 \times 10^{-8}/\text{h}$	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7}$
阀(检验)	打开故障	$1 \times 10^{-4}/\text{d}$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
	反转泄漏	$3 \times 10^{-7}/\text{h}$	$3 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-7}$
	外部泄漏-破裂	$1 \times 10^{-8}/\text{h}$	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-6}$
阀(真空)	操作故障	$3 \times 10^{-5}/\text{d}$	$1 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-4}$
	破裂	$1 \times 10^{-8}/\text{h}$	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7}$
阀:流口,流量仪 材料(试验)	破裂	$1 \times 10^{-8}/\text{h}$	$1 \times 10^{-9} \sim 1 \times 10^{-7}$
阀(手控)	连续打开失效	$1 \times 10^{-4}/\text{h}$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$