机械可靠性设计

张智铁 编

中南工业大学教材科

一九九三年五月

目　录

第一章 绪 论

第一节 概 述

一、为什么要研究可靠性

可靠性问题最早是由美国军用航空部门提出的。他们首先认识到不可靠性的代价实在太大。第二次世界大战期间，美国空军由于飞行故障事故而损失的飞机为21000架，比被击落的数字多1.5倍；运往远东的作战飞机上的电子设备，经运输后有60%不能使用，在储存期间有50%失效，在使用中失效率高、难以维护，这些事实引起美国军方对可靠性问题的高度重视。

五十年代起，美国可靠性问题越来越突出。因此，在1952年11月成立了电子设备可靠性咨询委员会(AGREE)。1957年6月，AGREE发表了著名的“军用电子设备的可靠性”报告，提出了在研制及生产过程中对产品的可靠性指标进行试验、验证和鉴定的方法，提出了电子产品在生产、包装、储存和运输等方面要注意的问题及要求等。这个报告被公认为是电子产品可靠性理论和方法的奠基性文件。从此，可靠性工程发展成为一门独立的工程学科。

接着，美国设置了可靠性管理机构，制订可靠性管理计划，颁布军用可靠性标准及手册，建立全国性的可靠性数据交换中心。美国许多学会成立了可靠性委员会，出版专刊及论文集，举行一年一度的学术年会。最有代表性的是1962年开始的可靠性与维修性学术年会。在1958～1962年间，各发达国家都相继仿效，大力开展可靠性的研究工作。

对机械可靠性的研究始于六十年代初期。它的发展也与美国的航天计划有关。当时，机械故障和电子—机械故障是NASA(宇航局)主要关心的事。因为由于机械故障而引起的事故很多，

损失很大。例如，1963年同步通讯卫星SYNCOM Ⅰ号由于高压容器断裂引起的故障，在空中坠毁；1964年人造卫星水星Ⅱ号也因机械故障而损坏。因此，从1965年起，NASA开始进行以下几项机械可靠性研究：(1)用过载试验方法进行可靠性验证；(2)在随机动载荷下结构和零件的可靠性；(3)把规定的可靠度目标值，直接设计到应力分布和强度分布都随时间变化的机械零件中去。

从六十年代起，在工业发达的国家内，由于产品的复杂化和工作环境条件的严酷，对产品的可靠性要求越来越高。于是，除了航空、航天、尖端武器和电子等工业之外，可靠性工程技术和管理逐步推广应用到许多工业部门，包括原子能、机械、电气、冶金、化工、铁道、船舶、电站设备、建筑、食品加工、通讯、医药等。从最复杂的宇宙飞船，到日用的洗衣机、冰箱、复印机和汽车，到细小的可置于人体内的心脏起搏器，都应用了可靠性设计，有明确的可靠性指标。1969年7月登月成功的美国Apollo-11号飞船，有720万个零（元、器）件，共有120所大学、15000个单位的42万人参加研制，这样的零（元、器）件非具有高可靠性不可。有时，一个零件的失效可能导致整个系统的故障，造成灾难性的后果。为了预测价值数十亿美元的飞船是否能成功地完成任务，美国通用电气公司研制了“用仿真方法预测阿波罗飞船完成任务的概率”的计算机程序。在登月成功之后，美国航空和航天局(NASA)将可靠性工程技术列为三大技术成就之一。

可靠性工程能带来巨大的经济效益。例如日本从美国引进可靠性工程技术之后，在民用工业中应用和推广取得成功。日本的汽车、工程机械、发电设备、彩电、照相机等产品能够畅销全球，在于具有高可靠性。日本由此而获得巨额利润。美国人曾预言，今后只有那些具有高可靠性指标的产品及其企业，才能在日益激烈的国际贸易竞争中幸存下来。而日本人则断言，今后产品竞争的焦点是可靠性。事实上，随着国外公司经理们对可靠性作用的觉醒，可靠性越来越多地成为商品广告的内容。例如，

1959年国外小汽车的保用期为90天或4000英里，而到七十年代初提高到5年或50000英里。在国际市场上，可靠性指标不同的产品，其价格是不同的。

产品的可靠性影响到国家的安全与声誉。例如，1979年3月美国三理岛核电站发生的放射性物质泄漏事故，是由于冷凝器循环泵发生故障和人为因素等造成的。1984年12月美国联合碳化物公司设在印度中央邦首府博帕尔的农药厂，由于地下毒气罐阀门失灵造成了3000人死亡的严重事故。这些事故说明了对机械产品的可靠性进行研究的必要性和重要性。所以，对于重要的大型成套设备如电站、冶金、化工设备等都应进行可靠性、安全性设计及风险评估，并控制其故障率。

国外还把可靠性问题提高到节约资源和能源的高度来认识。因为可靠性设计可以得到体积小、重量轻的产品，降低材料消耗和加工工时。高可靠性产品可以以一顶二，甚至以一顶十。

目前，越来越多的工业部门认识到可靠性问题的重要意义，把产品的可靠性看得与产品的性能同样重要。有的部门甚至规定，没有可靠性指标、未进行可靠性设计的产品不得投产。

二、可靠性的范畴

自从可靠性的科学概念和理论、方法得到确认以来，它在下列几个领域中得到了发展。

1. 可靠性数学　主要是研究解决各种可靠性问题的数学模型和数学方法，它属于应用数学的范畴，涉及的面比较广，主要内容是概率论和数理统计、随机过程、运筹学等。

可靠性数学的代表人物及其著作有：(1)R. E. Barlow, F. Prochan和L. C. Hunter的«Mathematical Theory of Reliability»(1965)；(2)G. J. Hahn和S. S. Shapiro的«Statistical Models in Engineering» (1967)；(3)M. L. Shooman的«Probabilistic Reliability—An Engineering Approach»(1968)；(4)R. E. Barlow和E. M. Scheuer的Introduction of Reliability Theory(1969)；以及(5)N. R. Mann, R.

E. Schafer和N. D. Singpurwalla的«可靠性与寿命数据的统计分析方法»(1974)等。研究较多的领域有：相干结构理论，更新理论，可用性理论，极值分布理论，最佳维修方针，贝叶斯理论，冗余的最优化，多变量寿命分布，蒙特卡洛模拟，随机过程，失效树分析等。

2. 可靠性物理 是研究失效现象及其机理和检测方法的学科。美国Rome航空发展中心(RADC)于六十年代初首先进行失效物理的研究，发展失效分析方法及技术，研究各种元器件的失效机理及失效模式，建立各种器件及材料失效的数学及物理模型，发展了各种元器件的加速寿命试验及筛选试验的方法。1962年美国召开了第一届失效物理年会，1967年改名为可靠性物理年会。

3. 可靠性工程 是对产品（零件、元器件、设备或系统）的失效现象及发生概率进行分析、预测、试验、评定和控制的边缘性工程学科。它的发展与概率论和数理统计、运筹学、系统工程、环境工程、价值工程、人机工程、人素工程、质量管理、计算机技术、失效物理学、机械学、电子学等学科有着密切的联系。例如，可靠性工程追求的是系统的经济效益和运行中的安全可靠，因此，它不能就事论事地研究问题，不能头痛医头，脚痛医脚，而必须系统地、综合地、从长远的眼光来研究问题。不仅考虑到硬件，还要考虑到软件，考虑人的因素、人在系统中的地位和作用、环境条件对系统的影响等等。可靠性工程不仅重视技术，也重视管理。它和价值工程都是技术与经济相结合，以取得最大的经济效益为目的。它们之间的关系应当是，在达到可靠性目标的同时，用价值工程的方法来降低成本。

可靠性工程研究的对象包括电子和电气的、机械和结构的、零件和系统的、硬件和软件的可靠性设计、试验和验证。广义的可靠性包括维修性和有效性（可用性）。

三、可靠性工程部门的职责

发达国家的大中型工业企业内大都设置可靠性工程部，有的

单独设置，有的与质量管理部合并，其基本功能与职责是：

（1） 通过设计把可靠性直接设计到产品中去；

（2） 以合适的制造工艺来保证可靠性；

（3） 以完善的质量管理和检验来保证可靠性；

（4） 以周密设计的可靠性试验计划来证实和评定可靠性；

（5） 以适当的包装和运输作业来保持可靠性；

（6） 通过优良的现场服务、使用和维修手册来保证使用可靠性；

（7） 在整个可靠性计划中，通过可靠性数据和信息反馈，来改进产品的可靠性。

这些功能和职责的要点是：

（1） 使设计到产品中的可靠性和维修性指标达到最优；

（2） 规定所设计的可靠性和维修性目标；

（3） 在设计阶段预测可靠度和维修度；

（4） 进行失效模式、影响及致命度分析(FMECA)；

（5） 进行失效树分析(FTA)；

（6） 决定备件要求；

（7） 确定能够导致高可靠性和低修理时间的零件、材料和工艺过程；

（8） 进行设计评审，找出设计缺陷，并提出改进的建议；

（9） 拟定可靠性试验方案；

(10) 建立失效数据反馈和分析系统；

(11) 分析失效数据，以确定失效率、平均无故障工作时间(MTBF)和可靠度；

(12) 确定设计、材料和工艺过程需要做哪些修改，需要采取哪些改进措施，以达到可靠性和维修性目标；

(13) 确定整个产品或系统的有效性。

据估计，目前美国的可靠性工程技术人员有50余万。可靠性工程师的人数约占工程师总人数的 6 %左右。据美国质量管理学会(ASQC)的介绍，可靠性工程师的主要职责是：

（1） 在设计新产品时，帮助设计工程师选择材料、零件和最优的制造工艺，并考虑环境（如低温、振动等）对产品的影响。

（2） 制订可靠性试验方案，对产品进行试验，以评定其可靠性指标和预测其工作寿命。

（3） 研究产品在不同使用条件下满意地工作的概率。

（4） 开发可靠性信息，建立保用期制度，提出适当的操作及服务方法。

（5） 研究并确定产品的失效原因，提出防止其再发生的纠正方法和措施。

（6） 保证新的设计没有易于引起失效的缺陷。

（7） 用计算机模拟产品的使用，例如，用计算机模拟导弹的火箭或其它复杂产品的工作寿命。

顺便指出，可靠性与质量管理不是一回事。两者之间既有联系，又有区别。从历史发展来看，产品质量管理经历了统计质量管理(SQC)→质量保证(QA)→全面质量管理(TQC)→可靠性保证(RA)的过程。

可靠性工程在理论、方法和技术上都有新的内容，它不能由传统的质量管理所包含和代替。六十年代提出的“全面质量管理(TQC)”，实质上是从产品设计、研制、制造直到使用的各个阶段都要贯彻以可靠性为重点的质量管理。

可靠性与质量管理的第一个区别是时间因素与量度。可靠性关心的是$t>0$的质量，即“明天的质量”。它所使用的量度都与时间有关，例如可靠度、失效率、平均寿命等。而质量管理关心的是$t=0$的质量，即“今天的质量”，或出厂检验时的质量。第二个区别是，传统的质量管理是从制造阶段开始，而可靠性必须从设计阶段开始，并且贯串于从设计、研制一直到使用、报废的全过程。

四、可靠性管理

可靠性管理是在时间和费用允许的基础上，根据用户的要

求，为了生产出具有高可靠性的产品，在设计、研制、制造、使用和维修的整个寿命期内，所进行的一切组织、计划、协调和控制等综合性工作。

可靠性管理的核心内容是制订并贯彻执行一项可靠性计划(Reliability Program，也称可靠性大纲)。为此，需要建立一个对系统可靠性全面负责的可靠性管理机构。上面提到的可靠性工程部门只是这个管理机构的组成部分之一。管理机构应当制订计划进度表，明确规定计划的内容和完成的日期。还要研究可靠性设计的原则和程序，系统相互制约问题，人的因素，以及寿命期费用(LCC)分析。

除了可靠性计划与可靠性组织机构之外，可靠性管理的内容还有：设计评审、制造阶段的可靠性管理、可靠性教育与培训、可靠性标准与规范、可靠性数据反馈及交换中心、等等。

可靠性管理包括技术活动和管理活动两个方面。只有技术，没有管理，会大大浪费时间和金钱；只有管理，没有技术，不可能降低失效率和达到预期的可靠性目标。

实践经验告诉我们，当前我国在开展可靠性的工作中，最主要的问题是管理工作。

第二节　可靠性定义及尺度

一、可靠性定义

GB3187—82（可靠性基本名词术语及定义）规定的可靠性定义是："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。"当使用"概率"来量度这一"能力"时，就是可靠度。

可靠性定义的要点如下：

1. 首先要弄清可靠性问题的对象是什么，是零件、设备、还是系统，如果是系统，是否包括人的因素在内。要明确故障是由于什么原因而引起的，因为有时系统的故障不是由于设备而是由于人为因素而引起的。在这种情况下，需要从人—机系统的观

点出发去观察和分析问题。

2. 规定的条件　这些条件包括运输条件、储存条件和使用时的环境条件，如载荷、温度、压力、湿度、盐雾、辐射、振动、噪声、磨损、腐蚀等。此外，使用方法、维修方法、操作人员的技术水平等对设备或系统的可靠性也有很大影响，必须注意。任何产品如果误用或滥用都可能引起损坏。因此，在使用说明书中应当对使用条件加以规定，这是判断发生故障（失效）的责任在于用户还是在于生产厂家的关键。

3. 规定的时间　可靠度是时间性的质量指标，产品只能在一定的时间范围内达到目标可靠度，不可能永远保持目标可靠度而不降低。因此，对时间的规定一定要明确。时间可能是指区间$(0,t)$，也可能是指区间(t_1,t_2)。这里的时间是广义的，根据产品的不同，有时可能是应力循环次数、转数、或里程数等相当于时间的量。

4. 规定的功能　要弄清规定的功能是什么，因为根据GB 3187—82的规定，失效(故障)的概念是“产品丧失规定的功能。对可修复产品通常也称为故障。”因此，规定的功能与失效密切相关。为了正确判断产品是否失效，合理地确定失效判据非常重要。日本工业标准JIS Z8115—1970规定，失效判据是“判断是否构成失效的界限值”。

功能有主次之分，故障也有主次之分。次要的故障不影响主要功能，因而也不影响可靠性。但有时动作不稳或性能下降也构成故障，例如大型设备的保护装置，如果响应缓慢就会引起主体设备的损坏，所以是不能允许的。

失效的分类方法有许多种。通常，完全不能工作的失效有两种情况：(1)突变失效，这是一种事先不能预测的失效；(2)渐变失效，这是一种因功能逐渐衰退而产生的失效，一旦产生便很难修复。

5. 概率　概率是可以量度的，其值在0～1之间。作为可靠性量度的概率（即可靠度）是条件概率，而且是在一定的置信度

下的条件概率。所谓置信度，是指所求得的可靠度在多大程度上是可信的。

二、可靠性尺度

可靠度可以用来量度产品的可靠性，但并不是在任何情况下都采用可靠度作为可靠性指标。实际上，还有一些其它的可靠性指标。在不同的场合，应当根据不同的目的，采用不同的可靠性指标。目前有一种趋势，越来越多的人乐于使用时间指标。

常用的可靠性尺度有：

1. 可靠度$R(t)$

由于可靠度是时间的函数，所以表示为$R(t)$。又因可靠度用概率表示，可知$0 \leqslant R(t) \leqslant 1$。

产品失效与不失效是互逆事件，因此

$$R(t)=1-F(t)=1-P_f \qquad (1\text{-}1)$$

式中 $F(t)$——不可靠度；

P_f——失效概率，P_f等于$F(t)$。

通常所研究的是可靠度$R(t) \geqslant 0.90$的领域。

2. 失效率$\lambda(t)$

失效率是“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”。失效率的观测值为“在某时刻后单位时间内失效的产品数与工作到该时刻尚未失效的产品数之比”。

当产品的失效寿命为指数分布时，$\lambda(t)=\lambda=$常数。当为其它分布时，$\lambda(t)$是时间的函数。

失效率常用的单位有：次/10^3小时，次/10^6小时。对于可靠度很高、失效率很小的零件，采用菲特(Fit，是Failure Unit的缩写）作为单位，1菲特=次/10^9小时。

3. 平均寿命（平均无故障工作时间）

对于可以修复的产品，平均无故障工作时间(MTBF)是指一个或多个产品在它的使用寿命期内的某个观察期间累积工作时间与故障次数之比。

4. 维修度$M(t)$ 其定义将在第十章内说明。

5. 有效度$A(t)$

瞬时有效度是"产品在某时刻具有或维持其规定功能的概率"。当时间趋于无限时，瞬时有效度的极限值称为稳态有效度。在某个观察时期内，产品能工作的时间对能工作时间与不能工作时间之和的比，为有效度的观测值，表示为

$$A(t)=\frac{U}{U+D} \tag{1-2}$$

式中 U——产品能工作的时间；

D——产品不能工作的时间。

在某个规定的时间区间内，有效度的平均值称为平均有效度。

许多机械设备，如载重汽车、工程机械、发电设备等，习惯上把有效度称为可用率，意即设备或系统在任一时刻处于可用状态的概率。

有效性是可靠性与维修性的综合，因而是广义的可靠性。

当产品的失效寿命为指数分布时，由式(1-2)可得

$$A(t)=\frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF}+\text{MTTR}}=\frac{\mu}{\mu+\lambda} \tag{1-3}$$

式中 MTTR——平均修复时间(Mean Time To Repair)；

μ——修复率；

λ——失效率；

MTBF——平均无故障工作时间(Mean Time Between Failure)。

由式(1-3)可知，若要使有效度增大，应当增大MTBF值和减小MTTR值。

6. 重要度

重要度是系统中某一设备故障所引起的系统故障的次数与系统中所有设备发生故障的次数之比，表示为

$$\text{重要度}=\frac{\text{某一设备故障所引起的系统故障的次数}}{\text{系统中所有设备发生故障的次数}}$$

7. 可靠寿命

即与规定的可靠度相对应的时间。

8. 经济尺度

经济尺度有许多种，可以根据实际需要采用比较适合的一种或几种。常用的经济尺度有：

$$\text{费用比(CR)}=\frac{\text{全年维修费}}{\text{购置费}},\quad\frac{\text{维修费+操作费}}{\text{动作时间}},$$

$$\frac{\text{MTBF}}{\text{成本}}\text{等。}$$

第三节 影响机械设备和电子、电气设备可靠性的因素

可靠性工程的一般原理对于机、电两大类设备是相同的。但是同一种可靠性因素对两者的影响可能不同，如表1-1所示。从

表1-1 影响机械设备和电子、电气设备可靠性的主要因素[22]

序号	可靠性因素	电子、电气设备	机械设备
1	应用系统施加的载荷	载荷通常是既严格又受到控制（除短路外）。通常，保护是容易的	载荷很少能得到控制。防止过载的保护经常是困难的
2	由环境引起的载荷的变化	变化通常是由于温度、压力和湿度变化等而引起的	风、雪、冰雹等影响到室天设备。压力变化影响到发动机等装置。土壤的干湿程度影响挖掘和运输设备。振动影响应力水平
3	产品的固有能力	固有可靠性是下列因素的函数：(1)产品的复杂性；(2)产品革新的程度；(3)设计和生产的竞争能力；(4)质量管理的效果	
		(1) 通常更复杂，并含有更高级的革新技术。(2) 元件的过载能力相对较小。(3) 根据许多产品的使用经验通常可以建立元件可靠性数据库(4) 通常大多数元件的可达性较好，而且备件的成本较低	(1) 相对地较不复杂，并含有较低级的革新技术。(2) 零件的过载能力为中等。(3) 可靠性数据很难从一种产品转移到另一种产品的程度，是相对有限的。(4) 机械设备中的可达性常常较差，而且备件的成本往往很大

序号	可靠性因素	电子、电气设备	机械设备
4	由环境引起的能力的变化	(1)对潮湿很敏感，但由于保护技术的发展，目前只有很少由潮湿引起的失效。(2)大多数设计成在给定温度范围内工作，在此范围之外，能力将降低。如果受高温，可能会由于材料变形或套变而导致永久损坏。低温多半不会引起永久损坏。(3)在振动下可能引起连接部分断裂。(4)除开关外，对于灰尘和其它碎屑的累积并不特别敏感，除非是潮湿条件下的电气感应	(1)对灰尘很敏感，潮湿可能是一种危险。潮湿会影响表面粗糙度，而且在活动零件的表面，通常不能允许润滑和环境密封。(2)通常对温度变化较不敏感。例外的情况是内燃机和有紧密公差的零件。(3)许多机械设备受到严重的振动，主要危险是零件的疲劳。在没有得到控制和有大的振动零件的地方，可靠度是低的。(4)某些机械设备对于灰尘和碎屑是敏感的。它们堵塞了零件间隙，并引起了运动零件的磨损。可用过滤封加以保护，否则应加以封闭
		两者可能必须经得起周围辐射，这是一种缺乏的环境条件，其影响必须加以考虑	
5	由磨损引起的能力的变化	磨损的主要影响是开关的接触，或材料蒸发的场合（如灯泡中）	通常这是影响可靠性的一个关键因素
6	试验	通常比较容易，因为大多数电子、电气元件的失效寿命是指数分布，而且容易得到较大的样本容量。试验费用较小	往往难以进行。大多数零部件的失效寿命分布不是指数分布，失效率曲线不是典型的浴盆曲线。许多零部件不易得到较大的样本容量。试验费用较大
7	筛选	对提高早期失效期的可靠性常常是有效的	常常是无效的
8	装配	通常对设备的可靠性影响较小	影响较大，常会出现这种情况：可靠的零件装配成不可靠的产品

这些影响机电产品的可靠性的因素中，可以看出为什么电子、电气设备的可靠性研究和应用已经相当成熟，而机械设备的可靠性研究和发展却缓慢得多。

第四节　现行的几种机械可靠性设计方法

现行的机械可靠性设计方法主要有以下几种：

一、概率设计法

是本书介绍的主要内容，将在第三章至第九章内详细说明。

二、失效树分析法(FTA)

1. 概述

失效树分析(Fault Tree Analysis)是1961年美国贝尔电话研究所的H. A. Watson首先提出的，用于对"民兵"导弹的发射控制系统的可靠性分析。后来，波音飞机公司进一步将其用于飞机的可靠性和安全性分析。1965年，D. F. Haasl等在波音飞机公司的系统安全学术年会上首次提出了关于失效树分析的论文，引起产业界和学术界的重视。此后，失效树分析的理论和应用发展得很快。七十年代初，发展了计算机辅助建树和分析程序。1974年，美国原子能管理委员会(AEC)批准公布了"反应堆安全性研究"(WASH-1400)报告。这个长达3000页的报告是以N. Rusmussen教授为首的60名专家耗资300万美元、用两年时间对100所核反应堆进行安全性和风险分析的结果。报告被认为是失效树分析发展史上的重要里程碑。之后，FTA作为系统可靠性和安全性分析的有效方法不仅在许多工业领域内得到推广，而且也应用于社会经济管理问题。

失效树分析法是"在系统设计过程中，通过对可能造成系统失效的各种因素（包括硬件、软件、环境、人为因素）进行分析，画出逻辑框图（即失效树），从而确定系统失效原因的各种可能组合方式或其发生概率，以计算系统失效概率，采取相应的纠正措施，以提高系统可靠性的一种设计分析方法。"(GB3187—82)

失效树分析的特点是：

（1）失效树分析是一种图形演绎方法，是失效事件在一定条件下的逻辑推理方法。它可以围绕特定的失效状态作层层深入的分析，因而在清晰的失效树图形下，表达了系统的内在联系，并指出零部件失效与系统失效之间的逻辑关系，从而可找出系统的全部故障谱，找出系统的薄弱环节。

（2）它能考虑可能造成系统失效的各种因素，不仅可以分析某些零部件失效对系统的影响，还可考虑软件的、环境的和人的行为等因素。

（3）失效树建成后，对不曾参与系统设计的管理和维修人员来说相当于一个形象的管理、维修指南，因此可用于培训使用系统的人员和用于检查事故发生的原因。

（4）通过失效树分析，可以定量地计算复杂系统的失效概率和有关的可靠性参数，为改善和评估系统可靠性提供定量数据。

（5）失效树分析比较复杂，工作量大，必须使用计算机。

失效树分析的缺点是：建树时需要考虑的因素太多，耗费人力和时间，而且容易失察和出错；缺乏数据。

失效树分析的主要步骤如下：1)选择和确定顶事件；2)自上而下地建造失效树；3)失效树的定性分析；4)失效树的定量计算。

2. 失效树中使用的符号

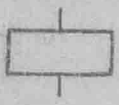
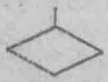
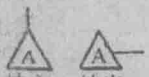
失效树中所用的符号有两类：事件符号与逻辑符号。其图形、名称与含义分别列于表1-2和表1-3。

3. 失效树的建造

建树的方法有以下几种：(1)演绎法；（2）合成法；(3)决策表法。第一种是靠人工来建树，后两种是用计算机辅助建树。这里只介绍第一种。

建树之前，应该对所分析的系统进行深入的了解。为此，需要广泛收集有关系统的设计、运行、流程图、设备技术规范等技

表1-2 失效树分析常用的事件符号及其含义

序号	符号	名称与含义
1		结果事件：来自那些通过逻辑门入口的失效事件的合成。它包括除底事件之外的所有中间事件及顶事件
2		基本的失效事件：不能再分解的失效事件。其失效参数（如失效率、不可靠度等）来自经验数据
3		省略事件：发生概率较小的事件。其原因没有得到充分追踪。由于缺少数据或兴趣，它没有得到发展。定性、定量分析中可忽略不计
4		失效事件的转移：同一失效事件常在不同的位置出现，为了简化和减少重复，用这两种符号，加上相应的标号（图中的A）分别表示从某处转入，和转到某处
6		触发事件：期待着发生的失效事件。可能发生，也可能不发生

术文件和资料，并进行仔细的分析研究。在建成之后，应当请设计、运行、维修等各方面有经验的技术人员讨论，找出失效树中错误、互相矛盾和遗漏之处，并进行修改。

建树主要是两步：

（1） 选择和确定顶事件。通常把最不希望发生的系统失效状态作为顶事件。它可是借鉴其它系统发生过的重大失效事件，也可是指定的事件。任何需要分析的失效事件都可作为顶事件。

应注意，顶事件的发生与否，必须有明确的定义。顶事件必