

维修性设计

牟致忠 编著



上海科学技术文献出版社

维修性设计

牟致忠 编著

*

上海科学技术文献出版社出版发行

(上海市武康路2号)

总 经 销
上海科学技术文献出版社
昆 山 联 营 厂 印 刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 8.25 插页 1 字数 199,000

1990年2月第1版 1990年2月第1次印刷

印数: 1—2,800

ISBN 7-80513-464-2/T·143

定 价: 4.20 元

《科技新书目》166-282

前 言

可靠性工程作为一门边缘的工程学科受到重视,已有三十年了。在此期间,可靠性工程不仅在航空、航天、电子技术和尖端武器中的应用取得了很大发展(美国阿波罗飞船登月成功,是可靠性工程技术所取得的成就的生动例证),在其它工业部门也逐步得到了推广应用。

维修性问题的提出及其发展是与可靠性密切相关的。广义的可靠性概念包含维修性在内,所以,维修性工程也被认为是高等可靠性工程。美国正式确认维修性这一科学概念是在1954年。一般说来,对维修性的研究和应用,比可靠性大约晚了十年。广义的产品质量,包含可靠性、维修性、有效性和安全性在内。因此,对产品进行可靠性和维修性设计是势在必行,越来越多的产品被要求必须具有可靠性和维修性指标。可以肯定,只有可靠性、维修性高的产品,才能在国际的激烈竞争中取胜。因此,在工业领域内首先是在机械、电子、电气、冶金、化工、兵器工业大力推广和贯彻可靠性和维修性,实在是当务之急。

到目前为止,我国出版的关于维修性设计方面的论文和著作甚少。本书在介绍维修性设计的基本理论和方法的同时,注意介绍一些实例,希望能有助于维修性设计方法在我国的普及与推广。

本书可作为大学生和研究生教材,也可供工程技术人员参考。限于水平,也限于时间和篇幅,书中如有疏漏和不当之处,敬希读者批评指正。书中引用了 D. Kececioglu 教授和一些中

外学者的论文和著作, 谨在此深表谢意。本书承唐金松教授在百忙中仔细审阅, 谨在此深表谢意。

牟致忠
于上海工业大学

目 录

第一章 绪论

- 1.1 为什么要研究维修性.....1
- 1.2 维修性的历史与展望.....4
- 1.3 维修性定义与尺度.....9
- 1.4 维修的分类15
- 1.5 维修性设计与可靠性设计的关系21
- 1.6 维修性设计准则24

第二章 修复时间分布和维修度函数

- 2.1 修复时间分布25
- 2.2 维修度函数31
- 2.3 修复率37
- 2.4 平均修复时间40
- 2.5 在试验和修理设备内试验及修理时间分布的确定 ...46

第三章 维修方针

- 3.1 按时(按龄期)更换的预防维修方针85
- 3.2 按固定时间间隔更换的预防维修方针.....103
- 3.3 成组更换零件的预防维修.....109
- 3.4 通过维修保持设备价值的措施.....112
- 3.5 以希望的置信度(保险度)提供备件.....113
- 3.6 按时预防维修的零件可靠度.....115

第四章 有冗余的可维修系统的可靠度

- 4.1 概述.....125
- 4.2 确定可维修系统可靠度的步骤.....128
- 4.3 两单元并联系统的可靠度.....129

4.4	两相同单元可维修旁联系统的可靠度	138
4.5	两不同单元可维修旁联系统的可靠度	140
4.6	两不同单元负载分担并联系统的可靠度	145
4.7	三相同单元可维修并联系统的可靠度	147
第五章 可维修系统的有效度		
5.1	有效度的定义	154
5.2	可维修的单个部件的有效度	155
5.3	可维修的两单元并联系统的有效度	159
5.4	三相同单元的旁联系统的有效度	162
5.5	并联系统的有效度	166
5.6	串联系统的有效度	170
5.7	事前有效度与事后有效度	171
5.8	稳态有效度	172
5.9	发电机的有效度(可用率)	178
5.10	运行有效度和一般有效度	179
5.11	提高有效度的措施	180
第六章 维修性的标准规范		
6.1	美国军标 MIL-STD-471A	183
6.2	美国军标 MIL-HDBK-472 简介	205
6.3	英国标准 BS5760 第三部分(1982 年)中有关维修性的规定	206
第七章 维修性设计应用实例		
7.1	水泵的预防维修时间及维修费用的优化	208
7.2	钢板车间轧制生产线的可靠性与维修性	221
7.3	缸体加工自动线的可靠性与维修性	242
符号表		253
参考文献		255

第一章 绪 论

1.1 为什么要研究维修性

维修性问题的提出,最初是从军用航空电子设备开始的。在第二次世界大战期间,美国军用飞机上电子设备的主要问题是:失效率高,难以维护。到1949年,每只电子管需要9个备件。在朝鲜战争中,电子设备的三分之二需要事后维修。由于电子设备不可能达到100%的可靠,因此,在研究可靠性的同时也要研究维修性。美国正式确认维修性概念是在1954年。第一个关于维修性的技术文件是1959年6月颁布的美国军用标准 MIL-M-26512。第一次大型的可靠性与维修性学术年会是1962年春举行的。所以,维修性作为一门独立的工程学科出现,比可靠性大约晚了10年。广义的可靠性概念包含维修性在内。人们有时也把维修性工程叫做高等可靠性工程。

1. 维修性的重要性

(1) 机械化和自动化工厂要完成生产任务和提高劳动生产率,其设备必须有良好的可靠性和维修性;(2) 现代化社会的中心服务设施,如电力、电话和通讯设施等必须保证正常运行,否则工业和信息社会将无法正常运行;(3) 现代的耐用消费品如汽车、家用电器和电子娱乐产品等,在其寿命期内,维修费用占很大比重,例如一台彩电在寿命期内用于维修的费用占总费用的35%;(4) 新的军事设备所花的维修费用急剧增加,已达到令人吃惊的地步。例如,由美国罗姆航空发展中心(RADC)主办的

一项研究表明,地面电子设备每年的维修费用是其原价的 60% 到 500%。又一资料表明,军事系统的维修费用是整个运行费用的 1/3,更重要的是,有 1/3 的人力在为维修服务。如果把维修设备、备件、人工等都计算在内,这些费用的总和可以高达原价的 10 倍甚至数十倍。

2. 维修性的巨大经济效益

在五十年代中期,美国国防部平均每天花费 2500 万美元用于武器系统的维修,每年为 90 亿美元,约占当时国防预算的四分之一。六十年代美国在研制大力神 (Atlas) 导弹的导向系统时,由于提高了可靠性与维修性,而使费用大大降低,如表 1-1 所示。

表 1-1 提高大力神导弹导向系统的可靠性和维修性所得到的经济效益
(单位:百万美元)

费 用	高 可 靠 度	正常可靠度
研 制	59.3	50.0
生 产	10.2	9.4
维 修	30.5	99.0
总 计	100.0	158.4

根据 1967 年美国对 1200 家大企业的调查统计,结果发现这些大企业平均每停工 1 分钟的损失高达 2 万美元。又据 1976 年资料估计,美国的工厂设备每年维修费用为 1000 亿美元,由于设备故障和折旧造成的损失则为 3000 亿美元,合计为 4000 亿美元。1978 年间,十个最大的石油化工企业用于维修的费用为 26 亿美元。总而言之,维修是一项很大的事业。据仪表行业的统计,在维修性方面每投资 1 美元,可以得到 50 美元的效益。

又据资料表明,飞机维修费是其购置费的 5 倍,汽车维修费

是其购置费的 6 倍, 机床维修费是其购置费的 8 倍, 某些军事装备的维修费是其购置费的 10 倍, 甚至更高。

可靠性、维修性与寿命期总费用的关系如图 1.1 所示。由此可见, 在购置和引进设备时, 不仅要考虑一次付出的购置费, 还要考虑使用 and 维修费用。

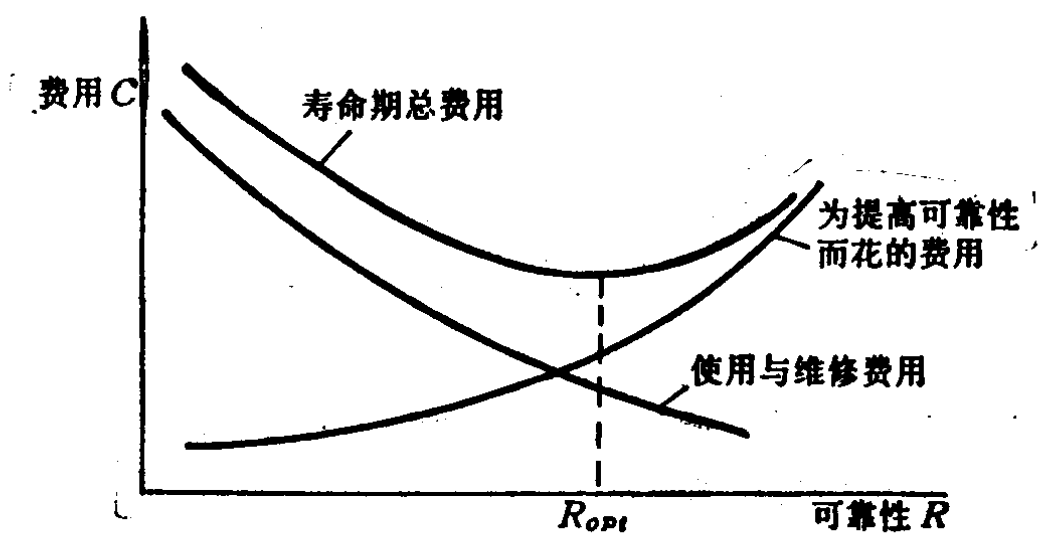


图 1.1 可靠性、维修性与寿命期总费用的关系

3. 国际贸易竞争的需要

在国际市场上, 不同可靠性和维修性指标的产品, 例如发电设备、工程机械等, 其价格是不同的。在订货和采购合同中, 尤其是与航天、航空、原子能发电站和军工等有关的合同中, 几乎都有可靠性与维修性条款。

4. 观念改变

从七十年代开始, 军事工业和民用工业都从主要追求产品的性能改变为强调产品的可靠性和维修性。这一变化的趋势是从武器系统开始的。七十年代初期以前, 美国的航空武器系统由于过分追求武器性能, 忽视了可靠性及维修性, 其结果是武器系统的战备完好率(可用率, 或有效度)低, 维修后勤支援费用猛增。例如, 1976 年美国国防预算的 70% 用于武器的使用与维

修。1972年投入服役的F-14A战斗机,三年后的战备完好率只有37%,平均无故障飞行时间只有0.6小时。为此,美国国防部改变技术发展政策,从片面追求武器性能转变为强调武器系统的可靠性与维修性。

在民用工业中,对维修性的研究和应用也取得了进展。例如,根据参考文献[3],一项“全面预防维修计划”可使工厂设备减少停工50%,提高设备的工作寿命20%,减少紧急抢修50%,和减少维修费用15%。

1.2 维修性的历史与展望

维修性的发展大致可以分为三个时期:

(1) 开始阶段(1966年以前) 这一时期的产品复杂程度在不断提高,雷达、声纳和通讯设备的元件数范围为1000到10万。其平均无故障工作时间(MTBF)为20~100小时。这种失效频率反映出在设计时缺乏可靠性和维修性考虑,因而带来了沉重的维修负担。很多早期的研究者在研究如何为这种维修负担的影响定量。开始时,人们以提出设计指南的形式来从事维修性问题研究,例如,莱特航空发展中心的J. D. Folley和J. W. Altman于1956年在《机械设计》(Machine Design)上发表了12篇文章来介绍维修性设计。后来,人们选择维修时间作为一种定量的尺度。维修时间与许多因素有关,如维修人员的技能与经验、维修环境和设备等。维修时间还与许多维修活动有关,如备件的准备、试验和保证、行政管理等。在选用维修时间作为维修性技术条件的主要参数时,弄清楚这些时间因素是很重要的。这些时间因素是在进行维修性设计时必须要考虑的。它们的定义都包含在MIL-STD-721B中。

这一时期内, 维修性技术的主要发展是制订了三个重要的技术文件, 即 ① MIL-STD-470 (《维修性大纲要求》); ② MIL-STD-471 (《维修性验证》); ③ MIL-HDBK-472 (《维修性预计》)。这三个文件都是 1966 年制订的。

(2) 发展阶段(1966~1978) 这一时期内维修性学科取得的主要进展有两方面, 即采用自动测试设备和应用以可靠性为中心的维修思想。

由于集成电路的出现, 引出了自测试、机内测试 (built-in test, BIT)、诊断测试的新概念, 并生产出了自动测试的设备。在飞机上安装自动测试设备后, 能使空勤人员在座舱内发现设备问题, 并帮助地勤人员隔离和分析故障, 从而使机载设备的维修性大为改善。七十年代服役的战斗机都装有自动检测设备。例如 F-18 战斗机 98% 的航空电子设备都装有完善的自动检测设备, 其中 90% 可自动进行检测, 在飞行中可检测设备的功能及性能、识别失效模式、检查战备完好性。大部分电子设备、液压、机械系统的故障都显示在座舱内的维修监控板上。

以可靠性为中心的维修思想 (ROM) 是“以预防为主”的维修思想的发展。1968 年和 1970 年, 美国联邦航空局颁布了第一个和第二个以可靠性为中心的维修大纲 MSG-1 和 MSG-2。后者根据每个设备的固有可靠性和每个可能发生的失效后果, 运用逻辑分析决断技术, 来确定机载设备需要什么就维修什么。MSG-2 大纲包括定时维修、视情维修和状态监测等三种维修方式。

在这一时期内, 对有关标准进行了修订。1973 年 3 月, MIL-STD-471 改为 MIL-STD-471A, 1975 年 1 月又增加了“注意事项 1”, 并更名为《维修性鉴定、验证和评估》。1978 年 12 月, 颁布了 MIL-STD-471A 的一项附录, 标题是“装备/系统的

验证和评估——机内检测/机外检测/故障隔离/可试验性的特征和要求”。标题反映出维修性在这一时期内的发展。

(3) 成熟阶段(1978 年至今) 到七十年代末, 维修性工程已发展成为成熟的工程学科, 提出了很多维修性分析、预测和试验方法, 并用于系统设计中。1979 年初, 出现了存储容量为 64 K 的超大规模集成电路, 1980 年开始研制超高速集成电路 (VHSIC), 它使能够进行自身功能测试并能进行故障诊断的电路和计算机软件融为一体, 因此可以用它来进行故障诊断和状态监测, 以确定是否需要进行事后或预防维修。

1980 年 7 月, 美国国防部正式颁发第一个关于可靠性和维修性的条令 5000.40。该条令规定了发展各种武器系统的可靠性和维修性政策, 以及有关部门对可靠性和维修性的职责。条令要求所有的武器系统从采购计划一开始就要考虑可靠性和维修性, 并通过设计、研制、生产及使用各阶段来保证所要求的可靠性和维修性。条令还规定系统的可靠性和维修性指标应当包括战备完好率、任务可靠度、维修人力及后勤支援等四个方面。

目前正在研究的是应用人工智能技术作为自动维修的工具。这一技术包括自然语言处理、数据检索、机器识别、专家咨询系统和机器人等。1983 年, 美国安全分析研究所和国防部长办公室下设的可靠性与维修性研究组 (IDA/OSD R & M) 提出了“人工智能用于维修技术工作组报告”。

这一时期对维修性标准的修订如下: 1983 年 1 月, 公布了修订的 MIL-STD-470A, 名称更改为“系统和设备的维修性大纲”, 在内容上有相当大的扩充, 主要有两点变化: 其一是强调把设备的可测试性作为维修性大纲的一个组成部分, 因为事实证明, 机内测试技术 (BIT) 影响到采购费用和寿命期总费用。其二是强调在所有三级维修中 (部队维修、中级维修、后方维修) 都

要考虑维修性大纲。1984年1月,发表了 MIL-HDBK-472 增加的“注意事项 1”,对初步设计和详细设计阶段使用的维修性预测方法增添了新的内容。

目前,维修性工程技术的发展方向是:

(1) 发展先进的机内自测试技术 统计资料表明,航空电子设备的机内自测试设备的误报率高达 25~45%,不必要的拆卸率为 19~31%,从而大大增加维修的人力和财力。这表明,问题不在于可靠性设计问题,而在于维修性设计问题。

(2) 发展新的维修性预测技术 一个系统的维修性设计存在的固有缺陷,只有在现场使用时才暴露出来,但那时再修改设计为时已晚,所以必须在投入生产之前就能预测维修性设计中存在的严重问题。

(3) 在维修性分析中应用矩阵 FMECA 技术 FMECA 即失效模式、影响及致命度分析,是一种对产品进行设计和分析的综合性技术。FMECA 可以用来确定与故障隔离与检测有关的维修性设计所必需的信息。在维修性设计中,应用 FMECA 可采用表格法和矩阵法。表格法不能有效地跟踪和计算复杂系统的每个零部件。矩阵法的优点是能用简单明了的图解法列出复杂系统的失效模式及影响信息。

(4) 发展后勤支援分析的模型 按不同要求进行维修及后勤支援分析,是维修性研究的重要课题。目前,对后勤支援分析已从定性要求转为定量要求,即发展一种分析方法(模型)来估算系统设计、支援计划及资源、战备完好率之间的关系。利用计算机模拟(仿真)的后勤支援分析模型是一种满足上述要求的分析工具。

(5) 发展软件的维修性研究 美国空军每年对硬件的投资为 4 亿美元,而对软件的投资为 15 亿美元。在软件的寿命期总

费用中,维修费占70%。在复杂的数字式电子系统中,软件的故障次数往往超过硬件,例如,F-18战斗机飞行控制系统在20000小时的试验中,软件发生309次故障,而硬件只有271次。

软件的维修性是指对一个软件产品进行修改来满足新的要求或改正错误的难易程度。目前尚无单个有效的方法来测量软件的维修性。一个计算机程序是可维修的,必须满足下列准则:①要以高概率来及时确定首次出现故障的原因;②要以高概率来修改程序而不导致该程序中其它部分出错。

(6) 试验新的维修技术 美国海军正在试验一种远距离性能监控维修技术,通过电话线或小功率无线电发射机把设在距飞机很远的中心维修监控室的监控设备与飞机上的多路传输总线连接起来,使中心监控室的维修人员能够监控几百英里外飞机上的电子设备的自动检测及故障隔离,决定哪台设备发生了故障,然后迅速地从近处调去设备进行更换。

(7) 综合利用各种新技术 经验表明,一架现代军用飞机的维修工作量中,电子设备占30%,结构占30%,发动机占22%,其它系统占18%。因此,关键在于运用各种新技术以改善前三项(电子设备、结构和发动机)的维修性。这些新技术包括:① 电缆连接技术 飞机电子设备中电缆及连接器的维修量占5~50%;② 光导纤维 军用飞机布线的故障占总故障的三分之一,光导纤维的应用将能消除上述问题;③ 电子封装及连接技术 其途径是通过采用超高速集成电路、提高标准化程度、采用CAD及CAM技术来改进电子封装技术;④ 电源技术 据统计,航空电子设备40%的维修量与电源有关,机载雷达的故障13%是由电源造成的,目前主要发展高功率密度的、标准化的电源;⑤ 超高速集成电路技术 它的采用将能减少电子设备

中元器件之间的连线与焊点,并具有容错、自检、故障隔离等能力。用1块或2块VHSIC插件板来代替一个黑盒子,可省去电子系统的中级维修,并使寿命期总费用减少一半;⑥自修理技术 正在发展一种自修理的飞行控制系统,即系统在飞行中发生故障或损坏后,计算机重新编程,转换到备用线路上,使系统立即恢复功能,继续正常运行。这一技术可使系统的MTBF提高10倍,维修工时降为1/5,寿命期总费用减少2/3;⑦测试技术 包括与航空武器系统有关的所有测试问题,例如各种测试设备、后勤支援、测试大纲的制订、测试设备本身的校准、机内自测试、战备完好率的监控及系统的自调整、容错技术、测试性设计技术、诊断与预测技术等;⑧复合材料 除了重量轻、强度及刚度特性好之外,还可减少机体结构的锈蚀,改善维修性。据统计,飞机机体的维修量的2%与锈蚀有关;⑨机械系统的状态监控技术 航空涡轮发动机的状态监控、发动机传动系统及其它机械系统的故障检测及预测技术是提高系统可靠性及维修性的重要途径。利用状态监控系统可以精确地预测故障,进行有的放矢的维修,减少定时维修中不必要的拆卸及翻修。此外,人工智能、无损测试、人员训练技术、CAD/CAM等技术也有助于改善维修性。

1.3 维修性定义与尺度

1. 维修性定义

国家标准局制订的GB3187-82(可靠性基本名词术语及定义)中对维修性的定义是:“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。”如果用概率来表示和量度这种能力,就是维

修度, 表示为 $M(t)$ 。

从上述定义可知, 维修性定义的几个要点是:

(1) 维修性是通过设计过程赋予系统的一种固有的属性。对维修性的量度是随机变量, 只具有统计上的意义, 因此要用概率表示。由概率的性质可知: $0 \leq M(t) \leq 1$ 。

(2) 规定条件。它包括维修人员的熟练程度、维修设备及工具、备件是否有保证, 甚至还包括技术数据是否齐全、操作及维修手册、维修后勤机构等。

(3) 规定的时间。维修性指标大多与时间有关。时间 t 越长, 则所得到的维修度 $M(t)$ 值也越大。可以认为, 维修度是一种快速性。只有这样, 才能及时地诊断和校正故障, 完成预防维修、和成功地调整好设备。

(4) 规定功能。要弄清规定的功能是什么, 因为故障(不可修复的故障为失效)意味着产品完成规定功能的能力的结束。功能有主次之分。故障也有主次之分。次要的故障不一定会影响设备或系统的可靠性。故障有下面几种情况: ① 完全不能工作, 包括两种情况: 一是突然发生后就使产品完全损坏的致命故障; 二是因功能逐渐衰退而产生的耗损失效, 这种失效很难检测出来, 也不易修复。上述的两种故障, 都能造成设备完全不能工作。② 漂移失效和间歇失效。这种失效在发生后, 不易修复而在限定时间内能够自行恢复功能, 如图 1.2 所示。③ 有时, 动作不稳或性能下降也被看作是故障, 例如在保护装置中, 缓慢的响应会引起主体设备的损坏, 所以是不能允许的。

(5) 规定的程序和方法。按照预定的程序和方法进行维修是必要的, 不仅可以提高维修度, 还可以降低维修费用、延长设备的工作寿命、和减少故障发生的频率。否则, 维修之后反而会使设备的可靠性降低。因此, 应当有维修手册, 并规定明确的维

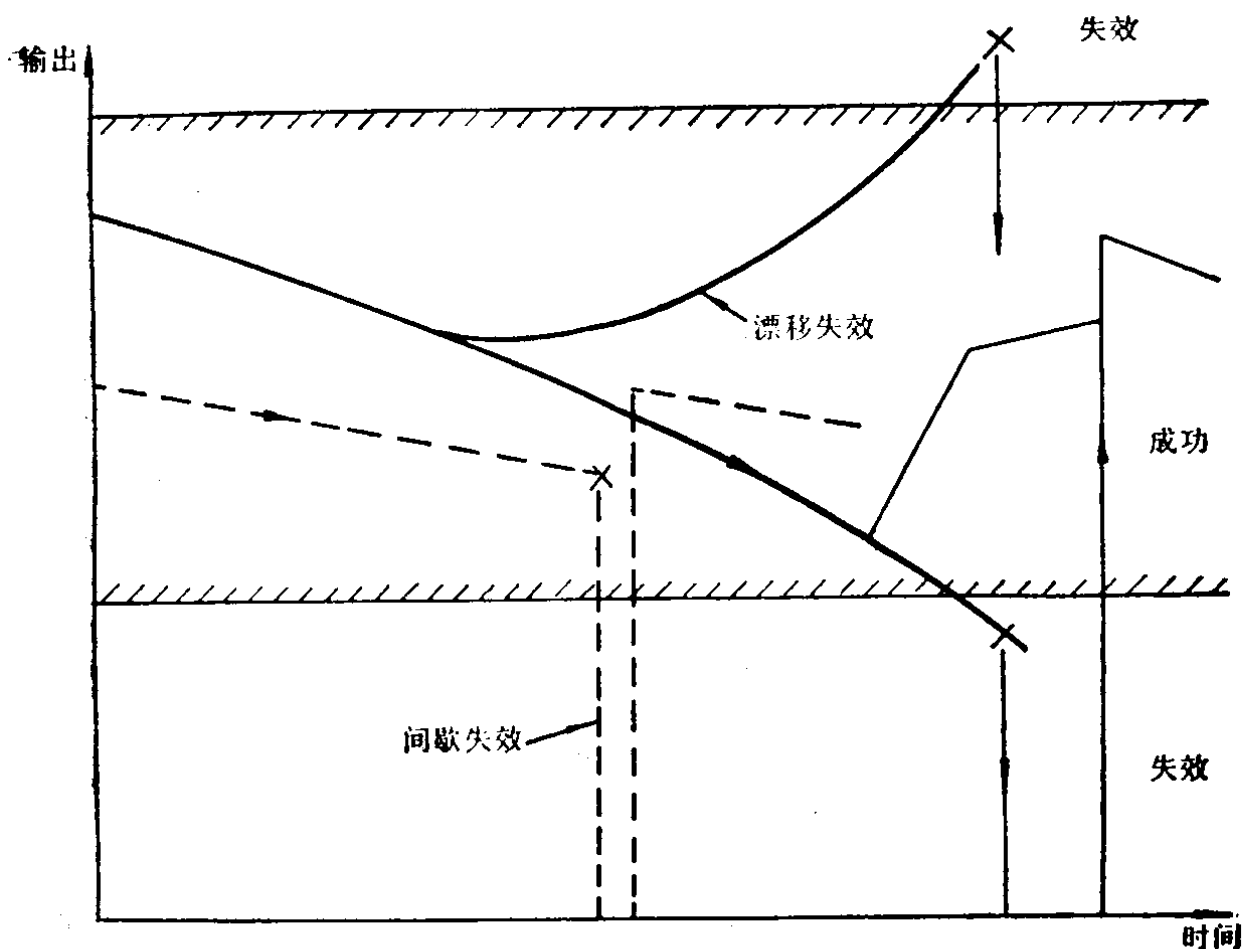


图 1.2 漂移失效和间歇失效

维修性技术要求。还要考虑使用故障检测装置, 设定检测点, 使检查程序标准化, 等等。

2. 维修性尺度

常用的维修性尺度有以下几种:

(1) 维修度 $M(t)$ 。

(2) 修复率 $\mu(t)$ ——修复时间已达到某个时刻但尚未修复的产品, 在该时刻后的单位时间内完成修理的概率。

(3) 平均修复时间 (MTTR)——修复时间的平均值。修复时间是“从发现失效到产品恢复规定功能所需的时间, 即失效诊断、修理准备及修理实施时间之和。”

(4) 有效度 $A(t)$