

# 失效物理基础

〔日〕盐见 弘 著

杨家铨 关成勋 译  
江擎宇

## 内 容 简 介

本书全面地阐述了失效物理的重要性、基本概念及其研究内容与方法,并且介绍了国际上在这一科学领域中所取得的新成就。该书在日本可靠性工程学界有较大的影响,已再版多次。是有关失效物理的一本较好的著作。

本书主要包括:失效物理与可靠性的关系;材料性质与失效的关系;失效物理中的物理、化学模型和统计模型;可靠性物理技术与典型的失效分析方法;电子元器件的加速寿命试验方法和筛选方法;失效物理在各个领域的应用实例;失效物理展望;有关的数据资料等。

本书适合于电子行业中的工程技术人员、工人和技术管理干部阅读,也可供高等院校及中等专业学校企业管理专业师生阅读参考。

塩見 弘

## 故 障 物 理 入 門

日科技連出版社, 1976

## 失 效 物 理 基 础

〔日〕盐见弘 著

杨家奎 关成勋 译  
江擎孚

责任编辑 魏玲

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1982 年 11 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1982 年 11 月第一次印刷 印张: 9 1/4

印数: 0001—5,400 字数: 239,000

统一书号: 15031·444

本社书号: 2794·15—7

定 价: 1.75 元

## 原 序

1969年,人类飞离自己的发祥地——地球而首次到达了另一星球。这一年,无疑将以其发生的这一具有划时代意义的事件而载入人类史册。阿波罗登月飞船的伟业,诚然显示了可靠性技术的卓越成果,但是,在当今的地球上,在我们生活的周围,却还有许多不可靠及不安全的因素。随着系统、设备的越来越复杂,功能的不断提高,以及人类生活步步向更高阶段发展的同时,在另一方面,也带来了许多新的问题。

可靠性工程(reliability engineering),以及对其起支撑作用的可靠性管理(reliability management),就是立足于系统工程方法,并权衡经济得失,将系统、设备的不可靠性减低到令人满意的程度,从而进行合理设计和管理的一门科学。本书所述的失效物理或可靠性物理(physics of failure, reliability physics)在可靠性技术领域中还是比较新的东西,在某种意义上,可以说它是决定产品最终可靠性的一门技术。可靠性问题既要围绕系统作综合性的考虑,又要扎根于固有技术,不断积累这方面的工作经验。如果说,以系统、设备整体的可靠度预测为其最终体现的系统工程方法,包括了整个可靠性技术,制约着各方面的努力,那么,反之,通过一只烧焦了的元件、一颗折损了的螺钉去追查其失效原因这样一种精心细致的工作,则是体现了典型的可靠性技术的方向。

然而,失效物理分析,决非一种轻巧的工作。要以有限的时间和有限的费用来生产预期无缺陷的产品,以及想通过某些蛛丝马迹去追究产品的失效原因,都必须作出异乎寻常的努力。往往会遇到这种状况:花了很多时间,也花了很多钱,但以现有的观测手段却是一事无成。如同功夫费尽而最后却堕入迷宫一样,这种失效物理分析工作往往会弄得技术人员束手无策而沮丧。但是,如

果放松了这种努力,那么,生产的产品越多,退回的失效品也将越多,索赔者将蜂涌而至。这就势必危及企业本身的生存;即非如此,至少也会使企业的收入减少。对于一个企业来说,一截断折了的电线往往就是一种挑战:必须设法去改进它。当然,若连这一截断了的电线也没有,即在任何线索的情况下想去追查失效的原因,这自然是根本不可能的。况且,失效物理本身又如同一棵不断发芽滋长的树苗一样,它还会产生出新的技术,启示人们去研制新的元件和材料。

如上所述,本书所述的失效物理,无论其理论及方法都尚未臻于完善,还有待于今后继续研究和改进。此外,笔者本人也决非失效物理方面的专家。我只是通过某些亲身的体会以及各方面的所见所闻才认识到:当投身于可靠性工作时,就必然会面临着失效物理或可靠性物理的问题;想绕道走是不行的。而且,失效物理或可靠性物理也决非是一件用简单方法可以解决的事——这也就是笔者在著述本书的过程中感到力不从心及犹豫不决的原因。我曾与美国的 IEEE 可靠性物理技术委员会主席 C. M. 赖尔森先生、罗姆航空研制中心及依利诺斯工艺研究所的研究人员会过面,大家感到,与其把失效物理看作是一种单纯的固有技术,还不如把它看作是针对整个系统的可靠性物理。由这点出发,我想:将自己手头的一些文献加以整理,以供读者参考,将不无裨益。

在美国,关于失效物理方面的文献、研究报告(如美国罗姆中心及宇航局根据合同研究的成果),包括会议论文集,为数颇多。赖尔森领导下的上述技术委员会(笔者也是该委员会的会员)已决定出版 *IEEE Transaction on Rel.* 特刊(见 vol. R-17, No.1, 1968 或 ED-16, No.4, 1969)。此外,还准备编写出版关于可靠性物理入门的书(初学者的学习教材),并且连内容和写作班子都定了。不过,本人于 1969 年 1 月与赖尔森先生会面时,听他说还未有进展。此外,关于电子学范畴里的可靠性物理,亦有一些整理得很好的资料,如 J. 瓦卡罗和 H.C. 戈顿两人合编的“RADCR Reliability Physics Notebook”(《罗姆中心可靠性物理笔记》),1965 (AD-624769)等,

不过似乎还没有单行本出来。

日本国土狭小却拥有稠密的人口和高度发展的工业技术，即使从最近的公害来看，就环境污染的严重程度及条件之恶劣而言，日本亦堪称世界上工业发达的国家。在可靠性方面，当前我们也正面临着一个这样的时期：一方面是要采取措施去消除系统、装置以及元件、材料的故障（失效），另一方面则要努力探求日本独自の可靠性发展道路。我写这本书的目的也就是要唤起大家的关心，以大力推动这方面工作的发展。当然，本人研究肤浅之处书中明显可见，期望读者通过自己的研究来加以补足。

与失效物理或者可靠性物理有关的部门很多，如电器、电子、机械、化学等工业部门。此外，它不仅与元件、材料，而且还与设备、系统的制造厂及用户的研究、设计、试验检查、制造工艺、采购、保管、运输、使用、维修服务及情报收集等各部门的工作密切相关。换言之，对研究、试验、制造和实际使用时所出现的故障（失效）进行分析和制定相应的解决办法，这步工作关系到系统、设备的整个寿命期。失效物理分析毋宁说是一种在失效发生之前即应切实运用的技术。特别，随着今后新材料、新元件的不断出现，它将经常性地作为一种古老而新颖的技术而提出来。为了适应这方面的工作，今后当需要很多从事失效分析和评价的专门技术人员、材料管理人员以及能最有效地运用可靠性物理方法的系统工程技术人员和管理技术人员。

本书叙述的主要内容是：

- (1) 可靠性和失效物理的关系、失效物理的意义及其基本内容(第一、二章)；
- (2) 关于材料物理性质方面的基础知识(第三章)；
- (3) 失效物理所用的物理、化学模型和统计模型(第四章)；
- (4) 失效物理方法、失效分析方法、加速寿命试验方法、筛选方法(第五、六章)；
- (5) 失效物理方法在各个领域及部门中的应用例子，包括可靠性设计、可靠性预测、工艺管理、规范制定、采购、维修、

使用环境、数据中心等(第七章);

(6) 失效物理的未来(第八章);

(7) 数据(第九章)。

关于可靠性的常用术语及失效物理方面的术语,如“失效模式”、“失效率”等等,在日本工业标准的名词术语草案中已有收录,故本书不予特别罗列引用。另外,还可参看本人所著《可靠性入门》(日科技连出版社)或《可靠性工程基础》\*(丸善出版社)等书。

本书中多处引用的文献,均采用下列缩写:

- 1) *Proc. 1st ASPFE, vol.1, 1962*  
: *Proceedings of the 1st Annual Symp. on the Physics of Failure in Electronics, vol.1, 1962.*
- 2) *Proc. 6th ARPS, 1967*  
: *6th Annual Rel. Physics Symp. Proceedings, 1967.*
- 3) *Proc. 11th NSRQC, 1965*  
: *Proceedings of 11th National Symp. on Rel. and QC, 1965.*
- 4) *Proc. 1966 ASR*  
: *Proceedings of 1966 Annual Symp. on Rel.*
- 5) *Proc. 7th R/M Conf., 1968*  
: *Proceedings of 7th Rel. and Maintainability Conference, 1968.*

上列的 4)、5) 已统一使用如下名称: *1968 Annual of Assurance Sciences, vol.1, No.1* 和 *No.2*, 不过在本书里是分别列出的。此外,参考文献虽在各章里都有引用,但要一一列出殊为不可能,况且还有些文献是散在个人手中,不易得到,在此特作说明。

最后,对于在本书出版过程中给予热心支持和帮助的日科技连出版社的新井胜治和古岡诚一两位先生,特表谢忱!

盐见 弘

1969年10月

---

\* 该书已由科学出版社于1982年翻译出版。——译注

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 译者序.....                  | iv |
| 原序.....                   | v  |
| 第一章 何谓失效物理.....           | 1  |
| 1.1 可靠性工程和失效物理的关系 .....   | 1  |
| 1.1.1 可靠性工程的起源 .....      | 1  |
| 1.1.2 设备的故障率曲线和故障频率 ..... | 3  |
| 1.1.3 高可靠的方法与失效物理 .....   | 5  |
| 1.2 失效物理学术讨论会的诞生 .....    | 10 |
| 1.3 失效物理展望及其探讨 .....      | 20 |
| 1.4 不断扩大的可靠性物理的应用面 .....  | 23 |
| 参考文献 .....                | 27 |
| 第二章 失效物理的基本概念.....        | 29 |
| 2.1 失效 .....              | 29 |
| 2.2 失效模式、机理和应力 .....      | 34 |
| 2.3 特性值和失效时间的分布.....      | 38 |
| 2.4 可靠性物理分析方法 .....       | 39 |
| 参考文献 .....                | 41 |
| 第三章 材料性质与失效 .....         | 42 |
| 3.1 结构敏感性 .....           | 42 |
| 3.2 能与熵 .....             | 43 |
| 3.3 物质的结构与结合.....         | 47 |
| 3.4 相变化 .....             | 53 |
| 3.5 材料的形变与破坏.....         | 56 |
| 3.6 缺陷.....               | 60 |
| 3.7 氧化与腐蚀.....            | 63 |
| 3.8 扩散.....               | 66 |
| 3.9 湿度.....               | 68 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 参考文献 .....               | 70  |
| 第四章 失效物理模型.....          | 72  |
| 4.1 界限模型与耐久模型 .....      | 72  |
| 4.2 应力-强度模型 .....        | 73  |
| 4.3 反应论模型 .....          | 76  |
| 4.4 失效率模型 .....          | 82  |
| 4.5 最弱环模型与串联模型 .....     | 85  |
| 4.6 指数分布与正态分布 .....      | 89  |
| 4.7 极值分布和威布尔分布 .....     | 92  |
| 4.7.1 极值分布 .....         | 92  |
| 4.7.2 威布尔分布 .....        | 93  |
| 4.8 绳子模型与伽玛分布 .....      | 95  |
| 4.9 比例效应模型与对数正态分布 .....  | 96  |
| 4.10 退化模型或损伤累积模型 .....   | 96  |
| 参考文献 .....               | 101 |
| 第五章 可靠性物理技术.....         | 105 |
| 5.1 可靠性物理与可靠性技术 .....    | 105 |
| 5.2 有关失效的基本事项 .....      | 108 |
| 5.3 统计分析 .....           | 112 |
| 5.4 失效分析法 .....          | 118 |
| 5.5 失效分析示例 .....         | 126 |
| 参考文献 .....               | 139 |
| 第六章 加速寿命试验与筛选.....       | 143 |
| 6.1 可靠性试验 .....          | 143 |
| 6.2 加速寿命的应用 .....        | 151 |
| 6.3 加速性 .....            | 153 |
| 6.4 加速系数 .....           | 160 |
| 6.5 序进应力法和步进应力法 .....    | 164 |
| 6.6 寿命加速的严密性和实用性 .....   | 174 |
| 6.7 筛选 .....             | 179 |
| 6.8 有关寿命加速和筛选方面的实例 ..... | 180 |
| 参考文献 .....               | 194 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第七章 可靠性物理的应用 .....          | 199 |
| 7.1 在可靠性设计中的应用 .....        | 199 |
| 7.1.1 设备、系统的故障率预计 .....     | 200 |
| 7.1.2 预计模型 .....            | 207 |
| 7.1.3 环境适用系数( $K$ 因子) ..... | 214 |
| 7.1.4 失效模式的影响效果与安全性分析 ..... | 224 |
| 7.2 制造工艺与失效物理 .....         | 228 |
| 7.3 出厂规范与购入验收 .....         | 230 |
| 7.4 维修与失效物理 .....           | 236 |
| 7.5 环境与失效 .....             | 237 |
| 7.6 失效分析中心与数据中心 .....       | 242 |
| 参考文献 .....                  | 244 |
| 第八章 实现高可靠的途径 .....          | 247 |
| 第九章 数据 .....                | 251 |
| 9.1 单位与常数 .....             | 251 |
| 9.2 结合与结合能 .....            | 254 |
| 9.3 氧化与扩散 .....             | 259 |
| 9.4 材料的分类与特性 .....          | 267 |
| 9.5 电子元件的失效机理 .....         | 271 |
| 9.6 放射性损伤与同位素 .....         | 275 |
| 索引 .....                    | 279 |

# 第一章 何谓失效物理

所谓“失效物理”或“可靠性物理”，简单地说来，就是从原理上，即从原子和分子的角度出发，来解释元件、材料的失效现象，以便为元件、材料的改良、评价、分类、使用以及设备(系统)的可靠性设计、维护修理等提供依据，它是一种“物理+工程学”的基础性技术。可靠性工程最近也称作“保证科学”(assurance science)，可以说，失效物理就是对可靠性工程起支柱作用的最基础的技术。本章将叙述失效物理学形成之前可靠性技术的发展过程及其背景，谈谈失效物理学诞生的意义和目前存在的问题。

## 1.1 可靠性工程和失效物理的关系

### 1.1.1 可靠性工程的起源

在第二次世界大战中，美国在远东使用的电子设备，有许多在运输和保管中即已损坏，半数以上无法使用，或者在使用中很容易出故障。可靠性工程的研究就是由此开始的。1943年至1950年间，美国对设备中失效频数最高、被视为设备故障祸根的电子管，曾倾注了很大的努力去追查它的失效原因和寻求改善的方法，从而制造出了“高可靠电子管”。但是，结果发现，对于提高设备的可靠性来说，仅仅改进其中部分元器件是无济于事的，人们逐渐认识到，为了确保设备(系统)的可靠性，还必须对整个系统作全面的考察，必须从研制之初就进行可靠性的设计，把可靠性指标“纳入”产品之中。

在这一认识的基础上，美国进行了许多研究工作，其中最有权威性的综合研究，就是美国国防部“电子设备可靠性顾问团”(AG

REE) 于 1952 年开始进行的研究工作。该顾问团分成九个小组来研究可靠性工程中的基本问题,并于 1957 年 6 月出版了它的研究报告。在这份研究报告中,叙述了设备(系统)的可靠度与构成该设备(系统)的元部件的可靠度之间的关系,设备(系统)可靠度的时间量度 MTBF (即平均故障间隔,诸故障间的平均间隔就是无故障的平均时间。而对于随机故障来说,如后所述,MTBF 的倒数即等于失效率)的测量方法和保证方法等的基本方法,从而为以后的美国可靠性工程学的发展指明了方向,这一研究成果已具体反映在美国军用标准中。

可靠性,就是表示“系统、设备、元件等,其功能在时间上的稳定性的程度或性质”,它是产品的时间质量的抽象化;而进一步地对系统或硬件的可靠性作定量的描述,就成为可靠度(英语中叫做 reliability)<sup>1,2)</sup>。

可靠度的定义是:“系统、设备、元部件等在规定的条件下和所要求的期间内完成规定功能的概率”。也就是说,可靠度就是产品在规定的使用条件、环境条件下和所要求的时间内(包括距离、动作次数等)处于无故障地正常工作的概率。这里,所谓“故障”,就是指“失去规定的功能”。然而,对于复杂的系统来说,硬件的故障并不会马上造成系统的故障,而是由于一定程度的人为差错、管理差错及软件故障才引起系统的故障的。要提高系统和硬件的可靠度,简言之,就是要在规定的使用、环境条件下和规定的时间内使其“不发生故障”。

但是,随着近年来对系统、硬件的性能要求越来越高,越来越复杂,要想象过去那样把安全系数设计得超出必要的限度是不允许的了,而应该从经济和技术角度都作出合理的设计。像飞机、铁路新干线以及高层建筑等,若要求安全系数做得绰绰有余,便不能以合理的成本费用来实现所要求的功能。构成系统、硬件的元件数正越来越多、越来越复杂;技术又是日新月异的向前发展,使得过去的数数据不能照搬使用。此外,在使用和环境条件方面,加在产品上的应力也更加严酷,更加多样化。比如我们身边的电子用

品,由十多年前的收音机到现在的立体声设备,从黑白电视机到彩色电视机,这当中,元件数已从  $10^2$  的数量级剧增到  $10^3$ ,而汽车、喷气式飞机、阿波罗宇宙飞船、电子计算机等使用的电子元件数,则分别跃升到  $10^4$ 、 $10^5$ 、 $10^6$  及  $10^5$ — $10^6$  的数量级。在环境条件方面,电子产品往往要在宇宙空间、火箭飞行等的高温、低温、高真空等极端条件下使用。此外,所要求的寿命保证时间也越来越长,如五年、十年等。因为系统的故障数是随元件数、应力、使用时间而增加的,因此,这就给可靠性的提高带来了困难。

### 1.1.2 设备的故障率曲线和故障频率

如上所述,随着系统的复杂化,也就增大了发生故障的可能性,从而成为提高可靠性的障碍所在。下面试以一些数字来加以阐述。为了便于说明,我们先导入故障(失效)率  $\lambda$  这一概念。

故障(失效)率  $\lambda$  就是单位时间里发生故障(失效)的比率[例如,在单位时间  $\Delta t$  里,  $n$  个产品中有  $r$  个发生故障(失效),则其故障(失效)率用  $r/(n\Delta t)$  表示],其单位为时间(或距离、次数等)的倒数,也就是说,它是每时刻(距离、次数)的故障(失效)发生率。然而,在设备、元件、材料等的整个寿命期中,它们的故障率(失效率)决不是恒定的。图 1.1 示出在不施行预防性维修的情况下装置、元

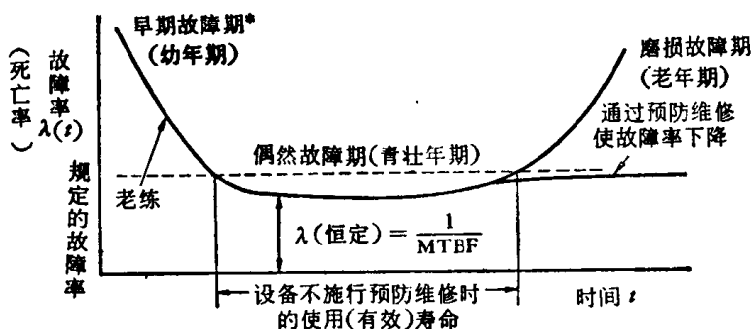


图 1.1 设备不施行预防维修时的典型故障率曲线

\* 对于设备为“故障”,对于元器件则为“失效”。——译注

件等的典型故障率(失效率)曲线。因为这种曲线的形状与浴盆相似,故称为“浴盆曲线”。如图所示,失效率大致可分为三个时期。

出厂后的产品,使用初期即容易暴露出那些由设计和制造上的缺陷而诱发的故障(失效)。这一时期叫做早期故障(失效)期;对于人来说,即相当于幼年期。假如产品在出厂之前,即进行旨在剔除这类缺陷的老练过程(debugging),那么,以后产品在使用时,从一开始便可使故障率(失效率)大体保持恒定,使设备的使用状态稳定下来。这一时期是最佳工作时期,称之为偶然故障(失效)期。

偶然故障(失效),英语叫做“chance failure”或“random failure”。在理想情况下,产品在发生磨损或老化(表示设备的固有可靠度)以前,它应是无故障的,只是由于环境条件的偶然变化、操作时的人为差错,或者管理不善的工艺缺陷等才导致设备内部的构成元件发生失效。因此,在开始进行产品设计时,就应考虑避免让产品在明显地易于发生故障的状态下工作,以及避免元件寿命提早终止而令大量故障集中在预定的使用寿命期中发生。不仅是设备,即使是其固有寿命以磨损而告终的结构元件,在使用寿命期完结以前,照理也是不会出现失效的。但是,尽管如此,有时由于在一批产品中混入了短寿命的即有缺陷的元件,或者因为使用方法不当等等,也仍会造成偶然故障(失效)。在这一意义上说,元件发生偶然失效(后面将要谈到,它在时间上是服从指数分布的)的概率是非常小的。在很长的工作时间里,每 $10^5$ — $10^9$ 小时才出现一次左右的失效。待经过这么长的一段时间后,设备中的元件也到了寿命终止期,于是失效率开始急剧增加。对于人来说,就相当于到了老年期,死亡率(比如由于癌、脑溢血等病症)急剧上升。这个时期就叫做磨损故障(失效)期。反之,该设备在固有寿命结束以前,就是使用寿命期。

图 1.1 的浴盆曲线是产品进入磨损故障期以后,并不实施预防维修(如替换等),而听任故障发生下去的曲线图。然而,实际上,对会发生磨损故障的产品,往往是要进行事前维修的,以尽量

减缓故障率的上升趋势。此外,也不是所有的产品都显示出图 1.1 的变化趋势。如电子元件、材料的失效率,在达到磨损点之前,却是一直在减小的,而机械零部件的失效率却往往随着寿命期的推移而急剧增大。但是,对于稍许复杂一些的产品,其内部元件往往是每当失效就替换的,且元部件的年龄是混杂着随机性的。这种情况下的失效率,毋宁说就是替换率(renewal rate)。但是,它仍然是趋近于恒定值的(偶然故障状态)。又因为偶然故障期中的故障率 $\lambda$ ,是系统、设备或元件处于最佳工作阶段下的故障(失效)率,这阶段其值最小,所以,可以把这个值的大小看作是衡量可靠性的典型尺度。前面提到的 MTBF,在通常情况下,即相当于该偶然故障(失效)期中的 $\lambda$ 的倒数。

现在,设系统(设备)的故障率为 $\lambda$ ,该系统由 $n$ 个元件构成;各元件的失效率 $\lambda_i$ 参差不一,为简单起见,不妨以平均失效率 $\bar{\lambda}$ 代之。这时, $\bar{\lambda}$ 为对应于元件的使用和环境条件的应力的函数。一般说,应力 $S$ 越大, $\bar{\lambda}$ 也越大。这样一来,该系统的故障率 $\lambda$ 便等于每个元件的平均失效频数(偶然事件) $\bar{\lambda}$ 的 $n$ 倍,即 $\lambda = n\bar{\lambda}$ 。假如要求系统的工作时间为 $t$ ,那么, $t$ 时间内发生故障的期望值则为 $\lambda t = n\bar{\lambda}t$ 。也就是说,系统的故障数是随着元件数 $n$ 、应力 $S$ 和时间 $t$ 的增大而增大的。

设法解决可靠性评价试验中的元件数量、应力及试验时间问题,这便是可靠性工程学所研究的范畴。而要合理地解决这些问题,单从元件方面下功夫是不够的,此外还必须具备系统方面的综合性技术及相应的管理措施。

### 1.1.3 高可靠的方法与失效物理

既要与设备、系统的复杂化、高性能化相适应,又要以有限的费用和时间来满足对可靠性的要求,为此究竟应采取什么方法呢?

从系统(设备)制造到成品最后报废(其经验又必定为下一代改型产品提供借鉴)的整个寿命周期,它的所有技术和数据资料都应综合地反映到系统(设备)的可靠性计划中去。必须明确对产品

的可靠性要求,并在产品的研究、设计、制造、试验、使用和维护等各个阶段,有组织、有系统地推进可靠性计划的实施。对于在使用和试验等阶段中所得到的数据资料,必须从技术以及统计角度出发进行分析,并进一步加以整理综合,然后尽快地和有效地反馈到产品的研究、设计、制造、维护、试验等方面去。这项工作是在折衷考虑成本费用和其它质量的基础上实现产品可靠性的唯一方法。可靠性技术本身是综合性的,属于系统工程的范畴。所以,必然地要求可靠性机构应能维持经常性的活动。

下面,我们进一步把问题集中到具体方面。大家知道,系统的故障是随采用的元件数、所受的应力和时间而增加的,那么如何去实现系统的高可靠化呢?

### (1) 提高元件(部件)的可靠性

要提高设备、系统内元件、材料本身的可靠性。用图 1.1 来说,就是要设法降低这些元件、材料的失效率,延长它们的固有寿命,研究保证固有寿命的方法。

劣化机理、缺陷(这是导致产品失效的原因)的检测和剔除技术、寿命预计、旨在减小应力影响的设计等等就是通过失效物理方法来提高产品可靠性的途径。在电子工业方面,前面说到的提高电子管可靠性的措施(其结果就是制造出高可靠电子管)就是对现成产品进行改进的例子,而对其后的晶体管、集成电路的劣化机理开展研究,就是设法提高新品的可靠性、并进而为新的物理学和新技术打开新局面的具体例子。

### (2) 系统的高可靠设计

从系统整体来看,若只是在提高元件的可靠性上下功夫未必一定有效。如 1.1.2 节所述,对于失效率已达  $10^{-9}$ /小时和  $10^{-10}$ /小时的高可靠元件来说,想进一步提高它们的可靠性决非易事。而且,对于系统的故障来说,有时元件本身的质量虽然符合规定要求,但设计上规定的使用方法却不合理;有时虽然设备是完好的,但配置不当,容易被人损坏,或操作时容易产生差错。由于这类人为因素而导致软件产生故障的情况,往往多得出人意料。

因此,为提高系统的可靠性,与其从改善元件、材料的质量上入手,还不如在设备、系统的使用环境上、结构上和系统设计上多下功夫,设法减少系统的故障,延长系统的寿命。

例如,可以在设计时多考虑一下系统结构的安全余量,设法减轻系统使用时所受的应力,或者在减额状态下使用元件(电子元件在低于额定的条件下使用就叫做减额。减额工作的效果请参阅表 7.2 及第 7.3 节);对于容易出故障的地方,可以采用贮备设计(贮备设计的效果,请参阅图 4.5 中最大寿命系统的并联模型;另外,还可以在“人-机工程”方面下功夫采取一些合理措施,等等。以上这些方法都是较为有效的。即使元件本身未被改进,但如果知道它的失效原因,并掌握它的退化程度,那么就可以在系统的设计阶段预测出环境因素和时间,对失效率  $\lambda(S)$  及退化量的影响,从而设法减轻应力或采取贮备设计等方法。为此,必须了解在使用条件和环境应力不变时元件性能随时间变化的情况,并以此作系统设计的依据。而如何获得这种信息,便是可靠性物理的重要范畴。

### (3) 系统的维修性设计和工作有效度

上面(1)、(2)两项是考虑尽量使系统、设备“无故障”的方法。但是,通常比较复杂的、要求长期使用的系统或设备,并不是发生故障后就马上抛弃的。多数情况都是在故障发生前即实行预防性维修,而在故障发生以后,则采取更换故障品的事后维修办法,从而使系统、设备一面工作,一面修理。对于一面使用,一面更换故障品的系统、装置,也不单纯是采用更换故障品这种事后维修的方式,而且还要通过预防性维修,减缓故障率(更换率)的增长,尽量设法延长产品的耐用(有效)寿命,努力使失效率在预定的使用寿命期内维持在较低的水平上。

对于广义的可靠性来说,除了单纯的“使产品无故障”这种狭义的可靠性内容之外,还包括“出现故障或工作不正常时即行修理”这样一种维修性(maintainability)的内容。也就是说,可靠度和维修度这两者结合起来,就能“使整个系统或设备处于满意的状态”(图 1.2)。用概率来表示广义的可靠性,就叫做有效度(available-

bility); 用概率来表示维修性, 就叫做维修度. 维修度的定义是: “可以修复的系统、设备或元件, 在规定的条件下和规定的时间内完成维修的概率.” 换句话说, 它是表示产品从发生故障的时间算起到某一时间止, 其可能修复的比率.

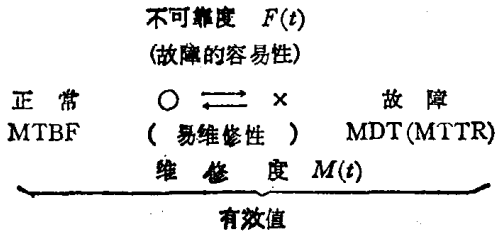


图 1.2 可靠度和维修度

可修复和更换的系统或设备, 其可靠性的时间量度就是平均故障间隔 (或平均无故障工作时间) MTBF 以及它的倒数——故障率  $\lambda$ ; 而对于事后维修来说, 维修度的时间量度就是平均修复时间 MTTR 及系统整体的平均不能工作时间 MDT. MTTR 的倒数就是维修率 (修复率).

通过维修来提高系统可靠性这项工作,乍一看来好像与失效物理无关,但是实际决非如此.由于故障发生的部位及其模式不同,其解决措施 (如故障检测方法、修理、贮备设计等) 也各不相同.如果没有这方面的知识,就不可能进行合理的维修.比如,对于其失效率随时间而减少的元件 (称其失效率为减少型失效率 DFR) 和失效率随时间而保持恒定的元件 (称其失效率为恒定失效率 CFR), 预防性维修是无意义的; 只是对于其失效率随时间而上升的元件 (称其失效率为增加型失效率 IFR), 这种预防性维修才是有效的 (图 1.1 中的早期失效期、偶然失效期及磨损失效期, 分别与 DFR、CFR 及 IFR 相对应). 此外, 随着系统的复杂化, 不断研究新的故障 (失效) 检测装置、显示装置等, 也属于失效物理的范畴. 有时, 为了要特别强调维修性, 也有“维修性物理” (physics of maintainability) 这一提法<sup>3)</sup>.

综上所述, 提高系统整体可靠性的方法有两个方面: