

高等学校教材

故障诊断与监控

周青龙 编著

兵器工业出版社

故障诊断与监控

周青龙 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

兵器工业出版社

(京)新登字049号

内 容 简 介

本书从技术和管理两方面来研究产品故障先兆诊断、故障预防及故障后果监控等的理论与方法。全书共十五章，前三章介绍故障特性、故障过程模型和故障分析方法概述。接下去的四章介绍了工程上实用的故障分析方法和故障预防方法。从第八章起主要介绍产品故障诊断的理论和各种实用方法，给出了产品自主故障诊断系统的微机方案，还分析了该方案对产品维修保障的影响。

本书适合于兵器维修工程、可靠性工程、运用工程以及故障检测与控制等专业的本科生使用，亦可作为从事元、器件和系统可靠性、维修性工程设计人员参考。

故障诊断与监控

周青龙 编著

*

兵器工业出版社 出版

(北京市海淀区车道沟10号)

新华书店总店科技发行所发行

各地新华书店经销

吴海印刷厂印装

*

开本：787×1092 1/16 印张：15.375 字数：375.96 千字

1992年8月第1版 1992年8月第1次印刷

印数：1—1400 定价：4.00 元

ISBN 7-80038-400-4/TP.30(课)

前 言

可靠性工程和维修性工程作为现代新兴的学科,目前国内已逐渐得到应有的重视。然而,提到“可靠性”、“维修性”,必然离不开“故障”。因为有“故障”,才有“可靠性”和“维修性”。随着产品现代化程度的不断提高,其结构将日趋复杂,执行的任务也将更加多变和重要,这样由于故障而造成的后果就会愈加不能容忍,而且维修费用将高得惊人。为此,迫切需要研究“故障与可靠”、“故障与维修”之间的辩证关系,以及故障的预防、诊断和监控的理论与方法。本书收集了近期国内、外这方面的资料和编著者从1984年以来在故障诊断与监控方面的研究成果,从技术和管理两个方面对故障的先兆诊断、预防以及故障后果监控的理论与方法作了较为全面的系统的阐述,并给出了若干经过验证的实例。本书立足于工程应用,力求理论与实践相结合,技术与管理相结合。编著者的希望是:一能看懂;二能应用;三在本书基础上能进一步阅读国内、外有关资料。

本书分十五章。第一、二、三章主要叙述故障特性、故障过程模型及故障研究方法概述。这部分是研究故障的基础。第四章至第七章主要叙述故障模式与后果分析、故障树分析、故障机理分析以及预防维修决策等,这部分是故障分析与故障后果预防的基本内容。它不仅能为产品的可靠性和维修性设计提供有效数据,而且能为产品的良好运行提供费-效比好的管理策略。第八章至第十五章主要叙述故障先兆检测和故障模式(或部位)诊断的基本原理、方法及实际应用,该部分是故障诊断学的基本内容。由于涉及的内容较新、面广,虽然目前已有不少研究成果,但还不具备一门新学科所需的系统理论基础,尚需大力开展这方面的研究工作。

本书可作为设备维修工程、可靠性工程、运用工程以及故障检测与控制专业本科生的教材,亦可供有关工程技术人员的参考。

在编写和出版本书的过程中,得到张玉柱教授、甘茂治教授、宫占贵和张守中副教授的指导、支持和帮助。北京理工大学于庆魁教授在百忙中认真审阅了全书,提出了许多宝贵意见,在此一并致谢。

王宏济教授和傅光甫副教授曾审阅过本书1985年的油印版,趁此机会也表示感谢。另外对本书所引用的参考文献的作者也表示感谢。

限于水平,书中难免有缺点,甚至错误,热诚希望批评指正。

编著者

目 录

第一章 故障特性	(1)
1.1 术语	(1)
1.2 故障特性	(3)
1.3 故障与可靠	(4)
1.4 故障与维修	(4)
第二章 故障过程模型	(6)
2.1 应力-强度模型.....	(6)
2.2 反应速率模型	(9)
2.3 最弱环模型	(12)
第三章 故障研究方法概述	(14)
3.1 系统方法	(14)
3.2 理化方法	(14)
第四章 故障模式与后果分析	(19)
4.1 故障模式与后果分析概述	(19)
4.2 故障模式与后果分析的基本步骤	(19)
4.3 FMEA应用举例	(23)
第五章 故障树分析	(27)
5.1 故障树分析法概述	(27)
5.2 建造故障树的方法	(32)
5.3 故障树的结构函数及其简化方法	(36)
5.4 故障树的定性分析	(40)
5.5 故障树的定量分析	(47)
第六章 故障机理分析	(62)
6.1 故障机理分析概述	(62)
6.2 故障模式、故障机理和应力	(65)
6.3 故障机理分析举例	(70)
6.4 一般环境条件下对产品的各种影响	(71)
6.5 故障报告、分析和纠正措施系统	(73)
第七章 预防维修决策	(75)
7.1 故障预防的思想演变	(75)
7.2 以可靠性为中心的维修决策逻辑	(75)
7.3 维修间隔的确定方法	(86)
7.4 维修大纲的制定与优化	(102)

7.5	现役产品预防维修大纲的修改	(110)
第八章	故障诊断概述	(111)
8.1	研究故障诊断的必要性	(111)
8.2	故障诊断的定义	(111)
8.3	对自动故障诊断设备的要求	(112)
8.4	故障诊断的基本原理	(114)
8.5	故障诊断的分类	(115)
8.6	故障诊断技术的发展趋势	(116)
第九章	查找故障的概率法	(118)
9.1	基本原理	(118)
9.2	应用	(120)
第十章	最大信息量诊断法	(126)
10.1	基本原理	(126)
10.2	确定最佳查找程序的方法	(130)
第十一章	故障的模糊识别和逻辑识别方法	(134)
11.1	模糊识别的基本原理	(134)
11.2	计算机算法	(136)
11.3	模糊识别在某雷达接收系统故障诊断中的应用	(137)
11.4	逻辑识别的基本原理和应用	(146)
第十二章	微机诊断故障的方案	(149)
12.1	诊断门限确定的一般方法	(149)
12.2	故障信息的数字化方法	(155)
12.3	微机诊断故障方案的一些考虑	(160)
12.4	故障自动诊断对产品维修保障的影响	(164)
第十三章	机械系统故障识别方法	(166)
13.1	无损探伤	(166)
13.2	振动监测分析	(173)
13.3	振动信号处理技术	(175)
13.4	声音监测分析	(187)
13.5	从随机信号中识别周期分量的技术	(190)
第十四章	模型、参数诊断方法	(193)
14.1	参数诊断方法	(193)
14.2	模型诊断的基本原理	(197)
14.3	脉冲响应和传递函数	(198)
14.4	相关辨识法	(199)
14.5	时序模型和现代谱分析	(207)
14.6	自适应除噪技术	(225)
14.7	模型诊断中的实际问题分析	(229)
第十五章	模式识别方法简介	(233)

15.1	模式识别与人工智能.....	(233)
15.2	模式识别的基本原理.....	(233)
15.3	模式识别在故障诊断中的应用.....	(236)
参考文献		(238)

第一章 故障特性

1.1 术 语

1.1.1 故障

故障是指产品或产品的一部分不能或将不能完成预定功能的事件或状态。对某些产品（例如电子器件、弹药等）称失效。●

故障是对其原始状态（或叫全新状态）的任何一种可识别的偏离，而这种偏离对特定用户来说是不合格的。状态不合格的确定，取决于某种使用范围中的故障后果。

故障与正常界限的确定，可能随使用范畴、分析层次等有所不同。但是对同一用户和同种型号的产品来说，必须把握每个要研究单元或部件故障与正常的界线，以准确的术语定义清楚。

1.1.2 功能故障

功能故障是指被考察对象不能达到规定的性能指标。它有两个方面的含义：其一是丧失了某种功能；其二是不能满足规定的使用性能和技术参数。

要对故障下一个明确的定义，必须首先详细了解被考察对象的各种功能。例如汽车上的刹车系统，它除了制动的功能外，还具有在行进和转弯时调节行驶速度的功能，以及调节制动快慢的功能等，所以一个刹车系统可能会发生许多不同的功能故障。又如，对于雷达的接收机来说，它除了具有放大信号的能力外，还有分辨信号、自动调节增益、自动调节频率等各种功能，雷达接收机也会发生许多不同的功能故障。显然，如果一种功能具有明确的定义（例如有一个可以度量或可以观测的参数，则其对应的故障就可以被识别和度量，这是研究分析故障的基础。

1.1.3 故障先兆

故障先兆（亦称故障苗头）是一种预示功能故障即将发生的、可以鉴别的实际状态或事件。

通过鉴别和排除故障先兆，就可能预防功能故障引起的后果。一般说来，等到功能故障发生后再加以排除和修复所花的代价，总是要比在出现故障先兆时就主动加以处理高得多。因此，正确地定义故障先兆并及时处理故障先兆，会使每个部件在不产生功能故障后果的情况下，得到最大限度的利用。

对于某些部件，定义故障先兆是直接与定义功能故障的性能标准有关的。例如，轮胎的胎面胶的功能之一是提供一个可以翻新的表层。这个功能不是很明显的，在列举轮胎的各种功能时，可能被忽略掉。但是从经济观点来看，这是很重要的。轮胎在使用时，如果胎面磨损到了使胎身不能翻新的程度，相应的功能故障就发生了。为预防起见，必须把故障先兆定

●GJB451，可靠性维修性术语。

义为某个不会危及胎身的磨损点。

由此可见，不但必须给故障下定义，而且必须同时规定能借以识别故障的一些特征。只要有可能，就应同时定义故障先兆以及识别故障先兆的一些特征。这不只是诊断故障的基础，也是预防故障的基础。

1.1.4 故障模式与故障特征

故障模式（亦称故障原因）是故障发生时的具体表现形式。如：短路、断路、断裂、过度耗损等。一般说来，某种功能故障发生往往是由许多种故障模式中的一种或数种（数种的可能性很小）造成的。例如，放大器无输出的故障，可能对应于两种故障模式，即断路和短路中的一种。但是，断路或短路的位置（即故障部位），却可以是输入端，输出端或者放大器本身。因此，确定了故障模式，并不等于找到了故障部位。要证实故障的实际部位，还应进行故障的查找与分离。

故障模式是由测试来判别的，而测试所显示的是故障特征（亦称故障现象）。对于简单的故障，模式与特征之间可能具有一一对应的关系。例如，用三用表的欧姆挡判断“短路”与“断路”两种故障模式时，呈现的故障特征分别对应于电阻值为零和电阻值为无穷大。但是在许多情况下，特征和模式之间往往具有一定的模糊性。即一种特征可能为不同模式所共有，而同一故障模式也可能具有多个故障特征。研究故障模式及其特征之间的对应关系，尤其是寻找一一对应的关系，是设计故障自动检测设备很重要的一步。

1.1.5 故障后果

故障后果是对故障损失的评价。根据分析问题的不同，故障后果可有多种表述方法（详见第四、七章），一般说来，有如下四种：

1. 安全性后果（亦称危险性后果）

某一故障或一串故障发生后，影响到人员、机器或环境的安全，可能造成巨大损失的后果叫做安全性后果。

2. 使用性后果（亦称任务性后果）

某一故障发生后，使系统或设备的某一主要性能（或功能）丧失，从而不能完成任务，叫做使用性后果。

3. 非使用性后果（亦称经济性后果）

某一故障发生后，并不直接影响系统的主要性能，而是使系统处于能工作但不是良好的状态，或某一有冗余系统的冗余部分发生故障后，可能并不影响系统完成任务，但却增加了系统的维修次数。以上二者，都可以认为是非使用性后果。

4. 隐患性后果（亦称隐蔽性后果）

隐患性后果是指某一故障发生后，对操作人员或故障观察者是不明显的，但对于该故障若不及时检查、发现并加以排除，可能会造成系统多重故障，甚至发生安全性后果。

故障后果取决于系统的设计，是系统可靠性的固有属性之一。

1.1.6 故障机理

在应力和时间的条件下，导致发生故障的物理、化学、生物或机械等过程，称为故障机理。故障模式并不揭示故障的实质原因，通过故障机理研究，才有可能找到从根本上提高元件、组件可靠性的有效方法。有关故障机理的分析方法详见第六章。

顺便提一下，在一些书籍中还有许多不同的故障名称（或叫故障分类）。例如，永久性

故障（硬故障），间歇性故障（软故障）；局部故障，致命故障；突发性故障，渐发性故障（漂移故障）；原始故障（独立故障），次生（从属）故障或多重故障（指一个原始故障发生后，如不及时加以排除，可能会引起一个或多个其它故障发生）等。它们都是从不同的研究角度，引申出不同的概念。

还需要指出的是，有些书上还出现“缺陷”、“失效”等概念。一般说来，这两个概念是不能与“故障”概念等同的。“缺陷”通常是指材料或工艺本身不符合规定的标准而言，而“失效”指的是不修产品的自然损失。“故障”却是指系统在使用过程中，出现的不合格状态，是可以加以排除或修复的。故障可以由元件的失效引起，也可能由使用和维护不当引起，有更加广泛的含义。

1.2 故障特性

故障意味着系统丧失规定的功能。它是系统运动过程中的普遍现象，在特定条件下必然发生。故障对于系统来说，不仅会造成人力与物力的浪费，而且严重影响系统执行任务，所以，对于系统或设备的使用和维护管理人员来说，其面临的任务是：如何有效地避免灾难性的故障发生，及早发现和预报危险性故障，进而把故障的危害限制在最小或允许的范围内。运用近代科学的有关新理论、新思想，揭示故障的内在机理，研究其表现模式和特征，从而掌握故障发生、发展与变化的规律，找出发现、预防和排除故障的有效途径，才能使系统或设备的维修工作由被动转为主动。

从预防故障的角度分析，可把故障分为两类，如表1-1所示。

表1-1 故障特性分类表

故障	随机故障	故障先兆可观测
		故障先兆不可观测
	可预知故障	故障先兆可观测
		故障先兆不可观测

1.2.1 随机故障

产品由于偶然因素引起的故障，叫做随机故障。例如，照明灯泡的灯丝突然烧断的故障，电路中某个二极管突然击穿损坏的故障等，都属于随机故障。引起随机故障发生的因素主要在外部，并且是随机的。例如，一次电流浪涌，使某个二极管击穿，一次机器内部打火，使某个微波晶体烧坏等。人们无法精确预测“电流浪涌”和“机器内部打火”这些随机因素的发生时刻，因而很难控制这类故障的发生。但是，在传感器和单片微处理器迅速发展的今天，有可能通过连续监测引起随机故障发生的那些随机因素，并作出及时反应，做到避免随机故障的发生。

1.2.2 可预知故障

通过事前的检测或监测可以预测（或者统计可预测）到的故障称作可预知故障。例如，

电视机使用久了,图像显得不清晰;收录机用久了,出现抹音不净,录音出现高频失真等故障;刹车装置用久了,由于磨损出现刹车不灵的故障等,都属于可预知的故障。可预知故障具有磨损的性质,与使用时间有关。造成可预知故障发生的因素,主要在内部。例如,电视机用久了,图像不清晰,可能是由于显像管老化造成;收录机录音高频失真,可能是由于磁头磨损所致;刹车装置刹车不灵,可能是由于刹车装置严重磨损引起等。对于这类故障,如果定义了某个故障判别标准(亦称故障判据),特别是故障先兆的判别标准,并且在故障判据可被观测的情况下,便真正变成可预知的故障了。例如,可以定义:扫描线低于300线为图像不清晰;录音的高频成分低于6000Hz为高频失真;刹车装置磨损量超过5mm为刹车不灵等。如果对故障先兆判据实行连续监测,一发现故障先兆发生,便立即用新品去更换,那么相应的故障后果(例如,喜欢的电视节目收看不满意,优美的乐曲录音失真;刹车不灵引起交通事故等)就可完全避免。当进行定期(间断)检查时,由于故障先兆出现时间的统计规律性,可能仍有一部分故障发生在两次检查间隔之中,但毕竟是减少了故障发生的次数。

1.3 故障与可靠

可靠性是表示系统、设备或元件等的功能在时间上的稳定性,它是产品质量按时间度量的抽象化。研究产品可靠性的目的之一在于延长系统的寿命,而故障对系统的影响正好相反,它缩短系统的寿命。在系统运行中,当故障运动上升为矛盾的主要方面时,研究故障发生的机理,探索故障规律,往往比可靠性工程实施要先行。在正常运转的系统中,故障预报和先兆诊断有时比可靠性计划更重要。因此,研究系统的故障机理和故障症状的早期检测技术等,是可靠性设计和可靠性管理的基础。

对系统故障机理的研究,除了应力、环境、时间等因素外,其内因则往往涉及到材料的微观结构。通常总是先观测故障模式(即病症),记录故障判据特征值的变化以及故障发生的时间等,进而观测记录故障的诱因(工作应力、环境应力和时间等),从中找出故障发生的真实过程,即故障机理(病理)。一旦查明故障机理,就可进行质量反馈,为元件、材料的改进,系统的可靠性设计,维修工作的优化等提供依据。国外把这种研究方法称作DDP,即检测(Detection)、诊断(Diagnosis)、预防(Prevention)。通过对失效元件、部件的检测,找出导致其失效的物理、化学、生物原因(诊断),采取相应措施(选材、工艺),预防故障发生。从根本上提高产品的固有可靠性(产品在设计、制造过程中“固化”的可靠性)。

1.4 故障与维修

系统发生故障后加以修复,使系统回到可用状态。这种事后维修(亦称排除故障维修或修复性维修)工作,虽然可能恢复系统的正常性能,但不能避免故障的后果,而且在故障发生后加以修复的费用可能比故障发生前就加以检测的费用高得多。为了避免系统或设备发生故障,或者减少其发生故障的次数,必须对系统进行预防性维修。预防性维修工作的基本目的在于:以尽可能少的维修费用,根据系统的故障特性(亦称维修特性),安排适用且有效的预防维修工作,通过连续或定期的监测,发现故障先兆便及时加以排除,避免功能故障后

果,从而使系统处在能够完成任务(即工作正常或良好备用)状态的时间尽可能长。显然,对于随机故障,当故障先兆不可观测时,进行预防维修是无效的。只有当故障先兆可观测或故障发生期可预知时,进行预防性维修才可能是有效的。关于这方面的讨论详见第七章。

一般说来,系统故障有下列主要特性:

1. 普遍性。存在于一切系统中,存在于同一系统的各要素中。
2. 复杂性。造成故障的因素一般是多方面的,其故障模式往往比较复杂,大系统尤其是这样。
3. 随机性。在稳定系统中,故障往往是偶然发生的。即使可以检测到故障先兆或可预知故障发生期,也具有统计特征。
4. 相关性。分系统的故障一般会影响别的分系统,也会影响全系统。
5. 破坏性。系统故障使系统运行包含着危机,其作用一般是消极的、破坏性的。

对故障的分析、检测与控制,要用到近代科学的许多新观点、新技术,如:信息论,统计信号检测、处理技术,系统控制论和方法论,离散数学,模糊数学等。随着微型计算机技术的高速发展,一定会把人类对于故障的认识与控制推进到一个更新的阶段。

第二章 故障过程模型

2.1 应力-强度模型

故障发生的过程、既是原子、分子微观变化的过程，又是整体宏观变化的过程。为了研究这一过程，抽象出以下一些主要模型。

2.1.1 应力-强度模型

当施加于元件、材料上的应力^①，超过某耐受强度时，故障即发生。这种模型称作应力-强度模型，如图2-1所示。

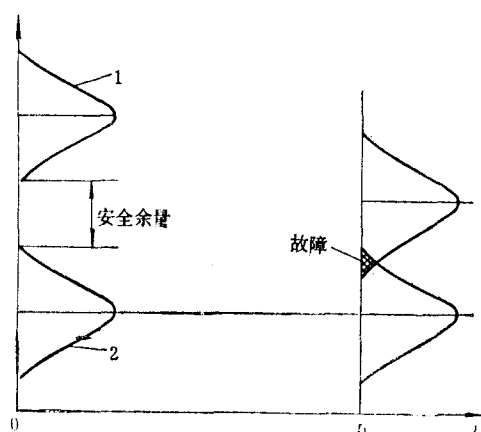


图2-1 应力-强度模型

1—强度分布；2—应力分布。

应力-强度模型是一种材料力学模型。但是，如果把“强度”理解为材料、元件或系统的抗故障能力，则图2-1的模型具有更加广泛的含义。

设强度为 x_s ，应力为 x_l ，则安全系数 S_F 为

$$S_F = x_s / x_l \quad (2-1)$$

安全概率或可靠度 R 可表示成

$$\begin{aligned} R &= P(x_s \geq x_l) \\ &= 1 - P(x_l \geq x_s) \end{aligned}$$

$$\text{或} \quad R = P\{(1 - x_l/x_s) \geq 0\}$$

(2-2)

相应的不安全概率或故障概率（亦称累积故障

概率）则为

$$F = P(x_l \geq x_s) = 1 - P(x_s \geq x_l)$$

或

$$F = P\{(1 - x_s/x_l) \geq 0\} \quad (2-3)$$

若设强度的概率密度为 f_s ，应力的概率密度为 f_l ，且强度和应力是相互独立的随机变量，则有

在区间 dx_l ，应力 x_l 发生的概率为

$$f_l(x_l)dx_l$$

$x_s \leq x_l$ 的故障概率为

$$F_s(x_l) = \int_0^{x_l} f_s(x_s)dx_s$$

则，某一时刻 t 的故障概率为

①由环境条件、工作条件等退化的诱因，所引起的系统内部能量积蓄，一般称为应力。

$$F(t) = \int_0^{\infty} F_1(x_1) f_1(x_1) dx_1 = 1 - \int_0^{\infty} F_1(x_s) f_s(x_s) dx_s, \quad (2-4)$$

其中 $F_1(x_s) = \int_0^{x_s} f_1(x_1) dx_1$

同理, 可靠度 $R(t)$ 为

$$R(t) = \int_0^{\infty} F_1(x_s) f_s(x_s) dx_s, \quad (2-5)$$

假设, 强度和应力均遵从正态分布, 即

$$x_s \sim N(\mu_s, \sigma_s^2); \quad x_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$$

则随机变量 $x = x_s - x_1$ 也遵从正态分布, 即

$$x \sim N[(\mu_s - \mu_1), (\sigma_s^2 + \sigma_1^2)]$$

此时的概率密度函数为

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\sigma_s^2 + \sigma_1^2)}} \exp \left\{ -\frac{[x - (\mu_s - \mu_1)]^2}{2(\sigma_s^2 + \sigma_1^2)} \right\} \quad (2-6)$$

于是, 故障概率 $F(t)$ 为

$$\begin{aligned} F(t) &= P(x \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f(x, t) dx \\ &= \Phi \left(-\frac{\mu_s - \mu_1}{\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_1^2}} \right) \end{aligned} \quad (2-7)$$

根据 (2-7) 式, 查标准正态分布表, 即可求出 $F(t)$ 和 $R(t)$ 。

由以上分析可知, 如要减少故障, 延长使用寿命, 则必须:

1 提高强度, 且使 $\sqrt{\sigma_s^2 + \sigma_1^2}$ 尽量小。

2 降低应力或消除应力。

提高强度的措施是采用复合材料、强化工艺、系统的高可靠性设计等。降低应力的措施有: 采用防震材料或安全帽等对应力实施隔离、缓冲, 或者有意安排某一弱点, 如镀锌对铁的防锈作用; 在电路设计上采用出小故障防止出大故障的办法等。

2.1.2 应用举例

以轮胎不能翻新的故障为例。当胎身帘布层露出, 而使胎身不再适宜翻新时, 功能故障就发生了。未磨去的胎面胶就是轮胎在任一时刻的抗故障能力。抗故障能力随着使用循环次数 (或者刹车次数) 的增大而下降。这种抗故障能力的下降是可识别的, 易于测量的。可规定某个刚好的故障点之前的磨损水平为故障先兆, 并使出现故障先兆到发生功能故障之间, 有一个合理的间隔, 以便在此间隔内探测出故障先兆并加以排除。但是, 这个间隔又不能定得太宽, 否则会把仍有较长使用寿命的轮胎换掉。一旦确定了最优的故障先兆水平, 则相应的预防维修间隔时间也可确定, 发生故障先兆便加以排除 (取掉旧轮胎, 换上新轮胎), 就恢复了原有的胎面 (即原有的抗故障能力), 从而开始新的使用循环, 如图2-2所示。

这里所指的抗故障能力, 是指设计强度 (即安全系数乘以应力) 与施加载荷之差。表示抗故障能力的参数, 还可以用滑油量或润滑膜厚, 涡轮叶片的松弛, 配合件的磨损量, 电子管阴极表面等, 只不过有些抗故障能力的下降是可识别的, 而有些是不可识别的。从预防性维修的观点看, 重要的不是预测何时可能发生故障, 而是在不解体的情况下, 寻找可识别的

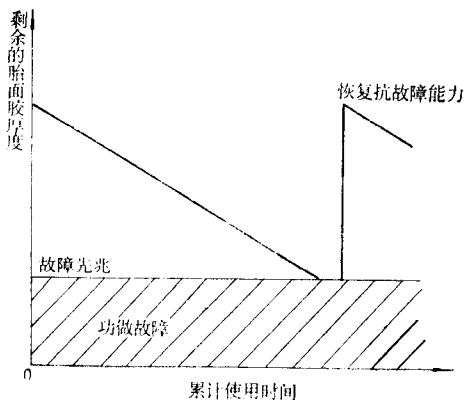


图2-2 有故障先兆便排除避免功能故障后果

事实上，型号完全相同的零件，会由于制造时的误差使起始抗力和抗力下降的速率不同。从而在相同应力的作用下，其发生故障的时间（即应力曲线与抗力曲线的交点）也不同，而且在使用过程中，应力也在不停地变化，有时会变化得很厉害。这样就使得在同样的系统中，同型的零件，也会有不同的应力图。有时，即便是应力和抗力的变化可能都不大，但它们的相互作用，会使零件发生故障的时间（或者是无故障工作的时间）有很大差别。因此，不加区别地把一种模型应用到同样系统中的同型零件上，有可能产生较大的偏差。

2.1.4 复杂故障模式

复杂的组件或系统可能有许多种故障

模式。每种故障模式可能都对应有一种应力-抗力曲线。要是把所有故障模式的应力-抗力曲线都画在一张图上，那会是很复杂的。但是，其基本的故障过程仍可归结为应力与抗力之间的相互作用。抗力的降低，随机发生的峰值应力，或者两者的任何一种组合，都会使在某一时刻应力超过抗力而发生故障。

如果有一种特定的故障模式（如由种种原因引起的轴承卡死），在系统（如发电机系统）的所有故障中占有很大比例，则称这样的故障模式叫支配性故障模式。具有支配性故障模式的系统，可以象单一故障模式那样建立其应力-抗力模型，以便寻找最佳的预防维修周期。从提高系统可靠性的角度看，对于具有支配性故障模式的部件（本例为轴承），进行设计上的改进是适宜的。

由于系统可能在各种应力的环境中使用，具体的应力大小、持续时间和频率都是变化很大的。在许多情况下，由环境产生的真实应力谱是不知道的，承受应力的能力也是可变的。

参数或状况，用以监控抗故障能力的下降。

2.1.3 单一故障模式

仅有单一故障模式的材料、元件、部件或简单组件，其应力、抗力（抗故障能力）随时间变化的情况，大致有如图2-3所示的几种。

在图2-3(a)中，抗故障能力在整个使用时间内保持不变，一个突然的应力峰值使故障发生了；图2-3(b)中，应力曲线与抗力曲线不相交，应力的峰值永远低于剩余的抗故障能力；图2-3(c)中，由峰值应力所造成的抗力下降是暂时的；图2-3(d)中，峰值应力加速了剩余抗力随使用时间下降的速率。

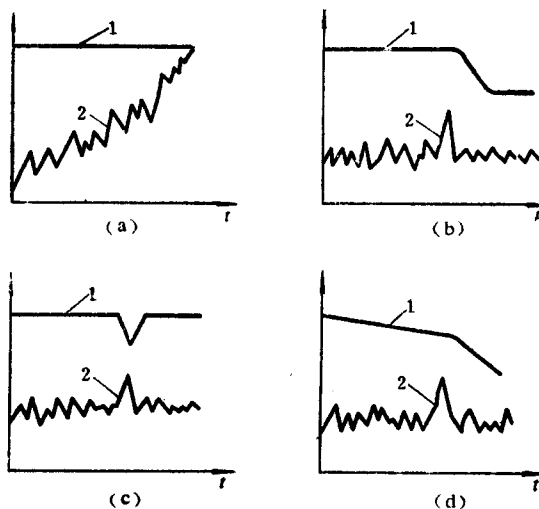


图2-3 单一故障模式的应力-抗力模型

1—抗力；2—应力。

又由于材料的差异, 制造过程中的误差等, 会使完全相同的各个新系统的抗力有所差别, 承受应力的能力随系统的使用时间的变化也有所不同。

单一故障模式的无故障工作时间, 趋向于集中在该故障模式的平均无故障工作时间的周围, 但是因不同的故障模式有不同的无故障工作时间, 所以具有复杂故障模式的系统的无故障工作时间, 不会集中在某一个故障模式的平均无故障工作时间的周围, 这是具有复杂故障模式的系统或组件的一个独特的特性。

2.2 反应速率模型

应力-强度模型中, 没有给出强度下降速率的理论根据, 反应速率模型解决了这一问题。

2.2.1 反应速率模型

从微观上看, 零件或材料的损坏或退化起源于原子、分子的变化。例如, 由于电、热、生物、机械诸应力引起物质内部的平衡状态发生变化, 组分变化、晶体结构变化以及结合力变化等, 都可能成为故障发生的原因。这时, 支配着故障发生过程的是氧化、析出、电解、扩散、蒸发、磨损和疲劳等故障机理。因氧化、腐蚀使金属生锈的情况, 正是氧原子、金属离子、电子等的扩散支配着锈蚀的速度, 从而影响金属的寿命。

一般说来, 当对材料, 零件有害的反应持续到一定限度, 出现了不可逆变化, 故障随之发生。这样的模型就是反应速率模型。它不仅指化学反应, 而且象蒸发、凝聚、形变、裂纹扩展之类具有一定速度的物理变化, 以及反映热、电、质量之类的扩散、传导现象等, 在广义上说, 也都是属于反应速率模型, 如图2-4所示。

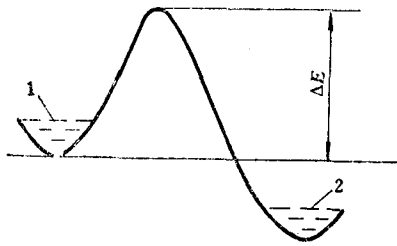


图2-4 反应速率模型

1—正常状态（反应前）；

2—故障状态（反应后）。

根据反应速率理论, 从反应前的正常状态（原系）出发, 演变成被认为是故障或不期望状态（生成系），必须越过某个能量势垒, 这个能量叫激活能, 用 ΔE 表示, 如图2-4所示。从原系演变成生成系之前, 必须达到激活状态。即能量要增加到某一个峰值之上。

能量 ΔE 由应力提供, 且越过此能量势垒进行反应的频数, 是按一定概率发生的, 即遵从所谓玻耳兹曼分布 $\exp(\Delta E/KT)$ 。

在由温度引起的应力情况下, 这一反应速度 K 与温度 T 的关系, 是19世纪阿列尼乌斯从经验中总结得出的, 因而被称为阿列尼乌斯方程, 即

$$\frac{\partial x}{\partial t} = K = Ae^{-\Delta E/RT} = Ae^{-B/T} \quad (2-8)$$

式中 x ——退化的特征值（亦称退化量）；

K ——反应速度, 即退化速度；

A ——频数因子；

ΔE ——每毫升体积的激活能；

k ——玻耳兹曼气体分子常数, 等于 $1.380662 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

对于除温度应力以外还包含其它应力 S 的普遍情况,当温度变化范围很窄时,(2-8)式可表示成

$$K = Ae^{-\Delta E/kT} S^a \quad (2-9)$$

式中 S ——应力;

a ——某个常数。

如果温度恒定,即只考虑温度以外的应力 S ,则反应速度 K 和 S 间存在 a 次幂的关系,即

$$K = AS^a \quad (2-10)$$

通常,退化反应在达到故障状态前要跨越几个能量势垒。也就是说,整个退化反应往往由几个过程连续组成。这完全类似于人类寿命的情况。一般可分为串联型反应(律速过程)和并联型反应两类。前者的退化速度由最慢的反应过程支配,而后者则由最快的反应过程支配。

假设由于某种反应,使退化特征值 x (应能被观测)发生变化,当达到规定的临界值 x_p 时,便认为是故障。那么,在这一时刻之前的时间,便是所谓的寿命。为求得寿命 L 与 K 的关系,可对(2-8)式两端积分,得

$$x = Kt + x_0$$

或

$$x - x_0 = Kt \quad (2-11)$$

用 x_p 代替(2-11)式中的 x ,则寿命 L 为

$$L = \frac{x_p - x_0}{K} = \frac{\Delta x_p}{K} \quad (2-12)$$

将(2-8)式代入(2-12)式并取对数得

$$\ln L = \ln \Delta x_p - \ln A + \frac{B}{T} = A + \frac{B}{T} \quad (2-13)$$

将(2-10)式代入(2-12)式并取对数得

$$\ln L = A - a \ln S \quad (2-14)$$

寿命与应力的关系如图2-5所示。

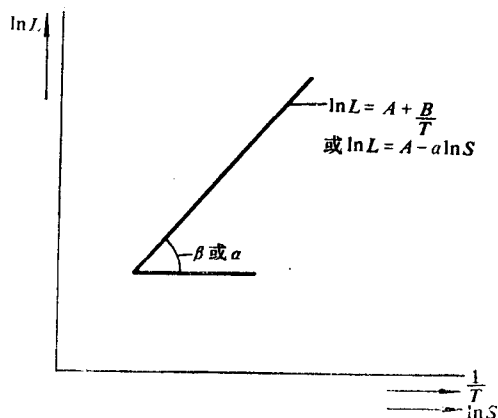


图2-5 寿命与应力的关系

值得指出的是,以上模型的正确性,仍需结合具体问题,经过实验来验证。验证时的关键问题,是确定以什么参数来测量 x ,以及参数以何种形式出现,才恰好与退化量吻合。

对于实际的材料、零件、元件,必须选取对退化量较为敏感并与故障机理密切相关的参数,变换各种应力,观测其随时间的变化情况。然后,应用反应速率模型将这种退化现象数学模型化,以便预测材料、元件的使用寿命。

由(2-11)式可知,退化量 x 与时间 t 呈线性关系,但也可能是非线性关系,例如 $x^2 = Kt$

的抛物线关系。更一般地会有 $x = (Kt)^\beta$,也会有 $x = \beta(\ln Kt)$ 等的形式,视具体情况而定。