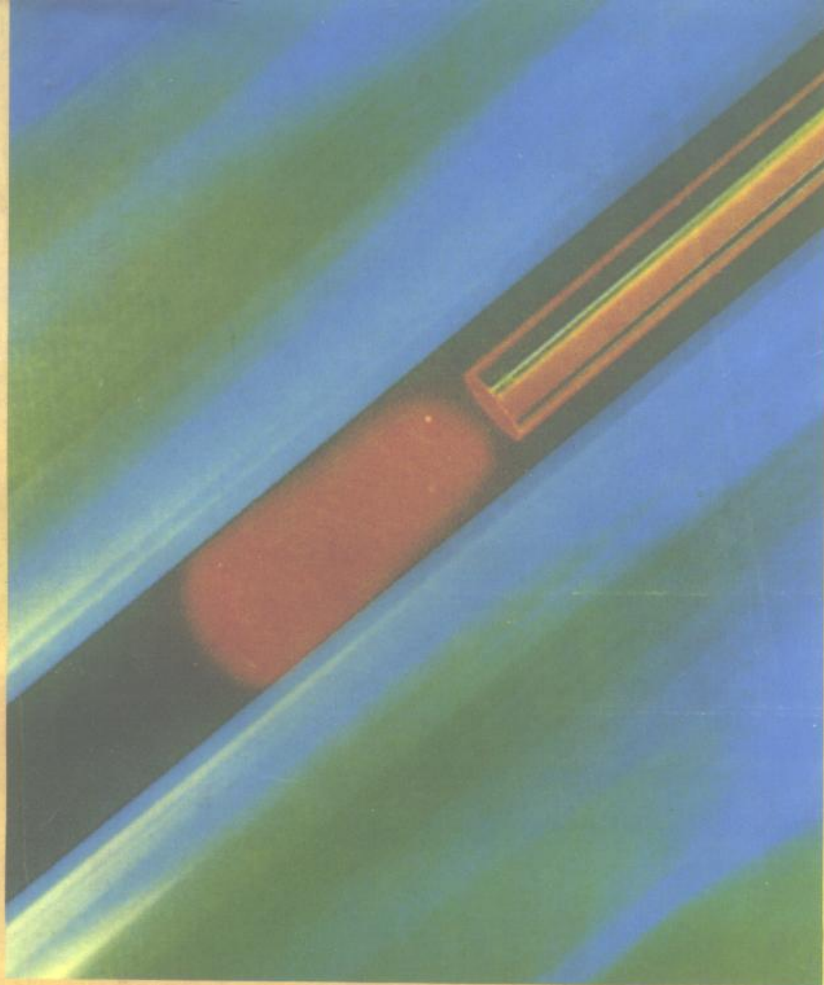


故障诊断学 及其在电工中的应用

科学出版社

姜建国等著



故障诊断学及其 在电工中的应用

姜建国 等

科学出版社

1995

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书简单介绍了故障诊断的内容和发展,详细分析了多种故障诊断的方法及其在电工中的应用。

全书在阐明理论的同时,着重介绍其应用,便于读者学习与应用。本书可供电工、电子和机械类的科技人员参考,亦可作相关专业的大学师生的参考书。

故障诊断学及其 在电工中的应用

姜建国 著

责任编辑 万 钧

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

顺成公司激光照排中心 排版

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

*

1995年6月第一版 开本:787×1092 1/16

1995年6月第一次印刷 印张:9 5/8

印数:1 1800 字数:230 000

ISBN 7-03-004501-7/TN·169

定价:21.00 元

前 言

故障诊断技术经过 20 多年的发展,已在许多领域得到了广泛应用.被监测和诊断的对象虽然千差万别,但从故障诊断技术的角度来看,都是利用各种传感器(包括电磁、机械、光学、声学、热学乃至辐射和化学的传感器),先收集反映被监测和诊断的对象运行状态的各种信号,然后进行处理和分析,并对它们的运行状态正常与否进行判断;如有故障,则根据所提供的信息,通过诊断系统进行确诊,确定其故障的部位与严重程度,并对它们是否继续运行,是否维修作出决策.因此,故障诊断是一门研究故障机理、故障特征提取以及故障诊断推理的学科.它也是一门综合性边缘学科,涉及被监测和诊断的对象的故障机理、传感技术、信号传输、特征提取、计算机技术与人工智能等多方面的知识.

纵观故障诊断技术发展的历史可见,相关技术的发展促进了故障诊断技术的发展,而故障诊断产生的巨大经济效益,则是它受到各国产业部门重视的直接原因.例如,美国每年花在设备维修方面的费用高达几千亿美元;我国电力生产的成本中,各种电力设备的维修费用也占很大比例.这样巨大的设备维修费用,既存在巨大的浪费,又不能完全杜绝恶性事故的发生.采用状态监测与故障诊断技术,不仅可对设备故障实行早期预报,避免恶性事故造成的巨大经济损失;而且可增强维修的针对性,实现预知维修,提高设备的有效利用率,减少维修费用.

设备与系统的故障诊断是和它们的可靠性、剩余寿命密切相关的.近年来,人们开始探讨用马尔柯夫过程来描述电气设备绝缘的老化过程,因此本书的前二章介绍了设备与系统的故障诊断的基本概念,包括可靠性的一些基本概念、剩余寿命的数学描述等.

本书的第二大部分是介绍故障特征的提取方法,包括信号处理的一些方法、模式识别的方法、参数模型的方法,以及从振动与噪声来监测故障的方法.尽管被监测和诊断对象的故障的机理与表征是进行故障诊断的前提(本书将不予专门的讨论),但上述各种特征的提取方法,无疑是故障诊断能否成功的关键.例如,鼠笼异步电机转子断条故障特征的提取就离不开定子电流谱分析与时间-频率表示.在设备故障诊断中,许多传统方法无法解决的问题,采用上述方法往往可以迎刃而解.

由于故障诊断是从被监测和诊断的对象表征去寻找故障的成因、部位,并确定故障的严重程度的,因此,如果把已知故障去分析系统或设备的运行特性与表征叫做正问题,那么故障诊断就是逆问题了.此类逆问题的求解明显不同于正问题的求解,而人工智能技术中的专家系统正是解这种逆问题的有力工具.为此本书最后一章介绍了故障诊断的专家系统.

本书结合电工技术应用领域的要求来论述故障诊断问题,介绍了许多应用实例.当然,其中有些处理方法也还有不够完善之处,但通过这些实例可以看出如何使用这些方法,并启发读者不只局限于传统的比较熟悉的方法,而是在必要时去寻求其它更新更好的方法.

在本书编写过程中,高景德院士、李发海教授给予了热情指导与帮助,在此表示忱挚的谢意.

杨福生教授审阅了第1章至第6章,石纯一教授审阅了第7章,并提出了许多宝贵的意见,谨致以衷心的感谢.此外,本书吸收了朱德恒教授、王伯翰教授、谈克雄教授等及他们的研究生的部分成果,亦在此表示感谢.

本书第1,2,3章由姜建国撰写,第4,5章由苏鹏声撰写,第6,7章由邱阿瑞撰写.由于故障诊断是一门迅速发展的技术,故障诊断方法的收集与整理自然不会十分成熟,加之著者水平有限,本书的取材与叙述可能存在不少缺点与错误,殷切希望读者批评指正.

目 录

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 发展中的故障诊断学	(1)
1.3 故障诊断与可靠性、维修策略的关系	(5)
参考文献	(10)
第 2 章 老化过程的数学描述	(11)
2.1 概述	(11)
2.2 离散时间的马尔柯夫链	(11)
2.3 连续时间的马尔柯夫链	(17)
2.4 电机绝缘老化过程的马尔柯夫模型	(21)
2.5 错误诊断概率与可靠性、维修决策的关系	(23)
参考文献	(25)
第 3 章 故障诊断中的谱分析方法	(26)
3.1 概述	(26)
3.2 用 FFT 作谱分析时的几个实际问题	(27)
3.3 谱分析的应用举例——用定子绕组电流频谱诊断鼠笼异步机转子有无断条	(33)
3.4 噪声的最优抵消及其在电机故障诊断中的应用	(34)
3.5 信号的时间-频率分析方法之一：维格纳分布(WD)	(39)
3.6 信号的时间-频率分析方法之二：短时傅里叶变换(STFT)	(50)
3.7 相关分析及其在电气设备故障诊断中的应用举例	(53)
3.8 自适应滤波的基本原理及其在局部放电监测中的应用	(56)
参考文献	(62)
第 4 章 参数模型与故障诊断	(64)
4.1 基于数学模型的故障诊断原理	(64)
4.2 故障诊断中的参数辨识法	(65)
4.3 最小二乘参数辨识法	(67)
4.4 利用参数辨识法诊断鼠笼异步电机转子断条故障	(72)
4.5 连续时间系统参数辨识	(75)
4.6 直流电动机拖动系统的故障诊断	(77)
4.7 故障诊断中的状态估计法	(81)
4.8 利用故障观测器诊断直流调速系统的故障	(85)
参考文献	(87)
第 5 章 模式识别在故障诊断中的应用	(89)
5.1 模式识别的基本概念	(89)
5.2 故障诊断与模式识别	(90)
5.3 最小距离分类法	(92)
5.4 贝叶斯分类方法	(93)
5.5 费希尔判别法	(96)

5.6	从参数模型求特征	(100)
5.7	用 K-L 变换提取特征	(102)
5.8	电动机转子质量偏心的诊断	(104)
	参考文献	(106)
第 6 章	振动和声学分析与故障诊断	(107)
6.1	概述	(107)
6.2	电机的振动监测与故障诊断	(107)
6.3	声发射诊断技术	(111)
6.4	倒谱分析	(112)
6.5	细化分析技术	(115)
	参考文献	(119)
第 7 章	专家系统	(121)
7.1	什么是专家系统	(121)
7.2	专家系统的一般结构	(122)
7.3	专家系统的分类	(123)
7.4	专家系统与传统程序的区别	(124)
7.5	知识与知识表示	(125)
7.6	推理与搜索	(130)
7.7	专家系统的建造	(139)
7.8	诊断专家系统的实例——汽轮发电机在线诊断专家系统	(143)
	参考文献	(147)

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

设备与系统的状态监测及故障诊断的研究始于 60 年代航天部门对机械设备与系统的故障预防^[1]. 30 年后, 故障诊断理论与技术在许多领域也得到了相应的发展. 例如, 模拟电路的故障诊断已成为网络理论的一个主要分支^[2]; 电气设备的故障诊断是电工技术中十分活跃的方向^[3,4]; 动态系统的故障诊断运用系统理论、信号处理、模式识别、决策理论、人工智能等理论已取得了长足的进步^[5]. 旋转机械的故障诊断和数字电路的故障诊断, 经过多年的发展已经比较成熟, 开发出许多实用的监测与诊断系统, 并取得了可观的经济效益.

监测一词的含义^[6]是为了特殊的目的而进行的注视、观察与校核. 设备与系统的状态监测是利用各种传感器对反映设备与系统的运行状态的物理、化学量进行检测, 从而判断设备与系统是否处于正常状态. 经过多年的发展, 状态监测所用的传感器已有多钟多样, 包括电、热、机械、光、声乃至辐射和化学的传感器. 它们所检测的量, 有的是设备与系统的状态变量, 有的是设备与系统所产生的二次效应(如故障时产生的分解物等). 尽管传感器所检测的物理量与化学成分各式各样, 但大多数都转化成电量输出(如测量振动的加速度传感器、速度传感器与位移传感器的输出都是电压信号), 因为这样便于构成以计算机为中心的监测与诊断系统.

在线监测系统所用的传感器一般都是所谓非侵入式的, 即监测与诊断系统所用的传感器并不干扰被监测与诊断对象的正常运行.

“诊断”一词原是一医学名词. 从智能理论的观点来看, 诊断是医生的大脑对收集到的病人症状(包括医生的感观所感觉到的, 病人本身主观陈述及各种化验检测所得的结果)进行分析处理, 寻求患者的病因、了解疾病的严重程度及采取的治疗措施与方案的过程.

故障使设备与系统丧失了预定的功能, 它反映了设备与系统所处的状态. 设备与系统的故障诊断, 是专家根据状态监测所得到的反映设备与系统的状态的各测量值及其运算处理结果所提供的信息, 用所掌握的被诊断的设备与系统的知识及经验进行推理判断, 找出设备与系统的故障的原因、部位及严重程度, 从而提出对设备与系统的处理意见. 因此故障诊断也是专家大脑的思维活动, 是人的智能的体现.

简言之, 状态监测是对被监测对象的健康检查, 而故障诊断则是对被诊断对象的病的确诊. 应该说, 状态监测与故障诊断是相互联系而含义又有所不同的, 不过通常所说的故障诊断包含了状态监测的内容.

1.2 发展中的故障诊断学

不同的设备与系统运行的原理及遵循的基本规律可能是不同的, 因而故障的机理与发

展过程,监测用的传感器与方法也可能有较大的差别,但是它们的状态监测与故障诊断又有许多共同之处,这些共同之处构成了故障诊断学的重要内容。

1.2.1 研究设备与系统的早期故障的征兆是发展故障诊断技术的前提

对设备与系统进行状态监测的目的在于及时发现早期故障的征兆,以便运行维修人员在事故萌芽状态时,就能通过检修等手段及早消灭隐患,从而避免恶性事故的发生。如果监测用的传感器与系统愈能够灵敏可靠地发现早期故障的微弱征兆,这个监测系统就愈灵敏可靠。通常设备与系统的一种故障都产生多种征兆,各种征兆有的表现比较明显,有的不明显;有的传感器及测量系统较易制造而且便宜,有的则较难制造而又昂贵。但究竟选用哪种征兆做为监测系统的检测量,只有对早期故障的各种征兆比较清楚才能做出合适的选择。

设备与系统的不同故障所产生的征兆有可能是相同的,从某一传感器测得的征兆判断故障的原因、部位与严重程度,就有可能不是唯一的。因此解决这一问题也需要对设备与系统故障发生的原因,故障发展各个阶段征兆(特性的变化与伴随的产物)的变化规律比较清楚,即比较清楚故障的机理,才有可能从别的监测用的传感器检测的结果或别的征兆判断出故障的真正原因。

综上所述,故障的机理的研究是发展状态监测与故障诊断技术的前提。如果故障的机理不清楚,或者没有合适的传感器来检测相应设备与系统的状态,对设备与系统进行状态监测与故障诊断就是不可能的。

例如,发电机的早期的热故障会产生烃类气体,这些热分解物的分子量比发电机用的冷却气体(空气或氢气)的分子量要大。这些烃类气体在射线的照射下带电,其荷质比不同于冷却气体带电后粒子的荷质比,这两类粒子在平板电场中的运动速度也就不同,因此形成的回路电流有差别,根据这一原理构成的辐射传感器已用于监测发电机的早期的故障^[7]。只有研究清楚绝缘的热故障会产生烃类气体分解物这一事实,才有可能利用上述辐射传感器来监测绝缘系统的热故障。

还应指出,有许多设备与系统的故障成因和故障发展各阶段的征兆至今并不十分清楚,不足以找出相应的物理量有效地监测这些设备与系统的状态,或还没有足够灵敏可靠的传感器来反映这些物理量,这有待人们去研究解决。

1.2.2 设备与系统老化过程的数学描述

老化的含义是指设备与系统(或是某一元件,或是某一子系统)的质量与性能指标的下降,它和设备与系统的故障的含义是有联系的。例如,高压电机的定子绝缘因过热或随着使用时间的增长而使绝缘性能指标下降的过程是绝缘老化的过程。绝缘性能下降到一定程度后,发生击穿,造成发电机的短路故障。故障反映了设备与系统处于无法完成设备与系统预定功能的状态。显然,绝缘性能下降,但未失去隔离高低电位导体的功能时,并没有引起故障。故老化的含义比故障的含义更广一些,但有的时候“故障”与“老化”二词又不加以区别。

设备与系统的老化过程是一个相当复杂的过程,受环境与错误操作的影响比较大,同一类设备(即使是同一型号的产品)老化过程也不尽相同,随机因素影响较大。通常视设备的老化过程为一随机过程,如马尔柯夫过程、泊松过程等。

前述发电机的绝缘老化是一渐变的过程,而一旦发生短路事故,事故扩展得很快,故绕组短路事故是一个突变的过程.应该说,许多设备与系统从老化到故障的过程都是一由渐变到突变的过程,对这种突变过程的描述已经受到人们的重视,在动态系统的故障分析中就有应用^[8].

这些描述不是去详细研究设备老化的物理化学过程,而是从数学上描述它们的统计规律.虽然这些描述方法能够解决一些问题,但都还没有达到满意的程度,还有很多工作要做.

1.2.3 故障特征的提取是故障诊断的关键

设备与系统的故障征兆是通过传感器的输出信号反映出来的.这些信号,特别是反映早期故障征兆的信号常常比较弱,而相应的背景噪声却比较强,有时背景噪声会湮没那些反映早期的故障征兆的信号.这些信号有的直接反映设备与系统的故障,有的需要经过加工处理后,得到的新量(如模型参数等)才能反映设备与系统的故障.所谓的故障特征是指那些反映故障征兆的信号及经过加工处理后所得的反映设备与系统的故障种类、部位与程度的量的总称.

特征抽取原本是模式识别的一个术语,这里所说的“故障特征的抽取”就是把那些传感器所得到信号经过加工处理除去噪声,或产生新的直接反映设备与系统的故障特征量的过程.不同领域故障的机理可能不同,但许多特征的抽取方法却可以相同,如谱分析就在许多领域都有应用.即便不同领域抽取特征的方法不同,但也可相互借鉴.

常用的方法可分成如下几类.

(1) 采用信号处理方法提取故障的特征.经传感器所得到的设备与系统故障特征信号,不少情况下会受到噪声的污染.噪声有的是和故障特征同时产生的,有的是在信号传输过程中混入的.抑制噪声一方面有赖于提高传感器与监测系统硬件的抗干扰能力,另一方面也有赖于计算机利用各种信号处理软件来消除噪声,提取故障特征.有时,故障特征的时域波形不一定能清楚地反映设备与系统的故障,变换域里的故障特征却能清楚地反映故障特征.在故障诊断里比较常用的信号处理方法是谱分析(包括时间-频率表示、倒谱等)、滤波方法及相关分析等.

(2) 采用模式识别的方法提取故障特征.设备与系统的故障模式是对设备与系统的故障特征定量或者结构的描述.故障的模式识别,是从那些纷繁复杂的反映设备与系统的信息(一般以数据的形式出现)中抽取能反映设备与系统的故障特征,并根据这些特征的不同属性,对故障进行分类,从而对设备与系统进行故障诊断.

模式识别是信号处理的后处理,它可以压缩数据,使得设备与系统的故障诊断更简捷方便.

(3) 用参数辨识的方法提取故障特征.用参数辨识方法来抽取设备与系统的故障特征,必须将故障数学模型化.由于实际的设备与系统可能发生多种形式的故障,故同一设备与系统的不同故障,其数学模型也可不同.有了这些模型就可以其某一个或几个参数发生的不期望的显著变化来表征某一类故障,因此,设备与系统的故障特征就是对应参数的变化.显然,一旦建立了故障模型,该模型的状态量也可能反映出故障的特征.

这种方法的主要问题是模型误差会给反映故障特征参数估计带来误差,从而影响故障诊断结论的准确性,这也是设备与系统的故障诊断系统误报警的根源之一.动态系统的故障诊断对此问题做了不少的研究,提出了一些对模型误差的干扰有一定的抑制作用算法^[9].

谱分析方法是侧重从物理上的特征来判断有无故障的,统计模式识别则是从数学上的特征来判断有无故障的,至于参数估计的方法是一种基于模型的故障诊断方法,模型参数有的有明显的物理意义,有的则不一定有明确的物理意义.

以上只是为了叙述的方便,将故障特征的提取方法作一大致的分类,实际上,有的时候是几类方法交替地使用,有的时候还会用到一些上述方法的变形.故障特征的提取方法可以借用信号处理技术、模式识别与系统理论的成果,但还不能完全满足故障诊断的需要.设备与系统的故障诊断技术的发展,反过来也会促进这些相关学科的发展.

1.2.4 故障诊断的推理

如前所述,设备与系统的故障诊断是根据其征兆去确定故障的原因、部位、严重程度等.如果把根据设备和系统的已知故障去分析确定它们的征兆称为“正问题”,那么,根据征兆去推断故障的成因、部位、严重程度则是“逆问题”.这类逆问题有可能是多解的,即多种故障都可能产生同一征兆.这是故障诊断推理的一个特点.

另一方面,由于故障的发展过程往往很复杂,人们至今并不清楚或并不十分清楚其变化的规律.基于规律或模型的逻辑推理不一定能用上,在推理过程中人们的经验,甚至包括直觉常常起着很重要的作用,尽管凭经验判断难免出错,但仍是一种常用方法.这是故障诊断推理的第二个特点.

医生诊断病人的疾病,某些领域的专家对相应的设备与系统进行故障诊断,都是人类智能的体现.由计算机的硬件与软件构成的系统,执行与人的智能有关的复杂功能,即由机器来复制人的智能,称为人工智能.针对某些专门领域的人工智能系统则构成了专家系统,用来诊断某些设备与系统的故障的人工智能系统就是故障诊断的专家系统.故障诊断专家系统具有某领域的专家的知识与推理能力,能根据监测系统所获得的设备与系统的状态信息,加上专家系统的知识,进行推理判断,确定设备与系统的故障.而且可以根据不完全、不精确(模糊的或随机的)信息,进行推理诊断.此外,专家系统还具有继续获取知识的功能.专家系统的知识,可以是某些规律、算法、准则,也可以是某些经验.这种人工智能系统在故障诊断中得到了相当广泛的应用,并有了一批成功的例子^[10].

从人工智能的观点来看,上述专家系统是基于知识的专家系统,它的推理总是根据所谓的“规则”来进行的.它也并非十全十美,还有许多问题有待解决^[11].

近年来基于对人的大脑的研究而提出的人工神经网络,另辟蹊径,成为一个有巨大潜力而又十分活跃的领域.由人工神经网络构成的专家系统有某些突出的优点,近年来在设备与故障诊断领域里,也有不少人在进行这方面的研究^[12,13].

综上所述,故障的机理的研究、老化过程的数学描述、故障特征的抽取与故障诊断的推理是故障诊断的几个共同问题,不妨把它说成是故障诊断理论的“框架”.“框架”的各个部分都还有许多问题,有待进一步的研究.因此,故障诊断学是一门尚在发展中的学科.

1.3 故障诊断与可靠性、维修策略的关系

如前所述,故障是设备与系统的一种状态,在此状态下设备与系统不能完成预定的功能.设备与系统要么处于正常状态,要么处于故障状态.可修复的设备与系统可以通过维修而恢复正常状态.对连续运行的设备与系统,总希望能在预定的时间内可靠地运行,即有所谓可靠性的要求.因此,设备与系统的故障诊断、可靠性及其维修策略与方法是相互关连着的.

可靠性理论源于第二次世界大战时期,经过 50 年的发展已成为一门独立的学科,并在许多技术领域都有广泛的应用.设备与系统采用什么样的维修方针以达到投资最小、停止运行的时间最短和利用率最大是现在工程技术界的一个热门课题.

为了今后叙述方便起见,这里首先介绍几个有关的基本概念.

1.3.1 几个基本概念

1. 不可靠度与可靠度

在正常运行情况下,某一类设备能可靠无误地完成规定的功能的时间 T 称为该类设备的工作寿命.设 t 是一规定阈值,如果工作寿命 $T > t$,则称该设备工作可靠,反之,如 $T \leq t$,则称该设备工作不可靠.为此定义从设备开始使用到 t 时刻发生故障的概率

$$F(t) = P(T \leq t) \quad t \geq 0 \quad (1.3.1)$$

为设备不可靠度(故障函数).当 t 为变量时,不可靠度实际上是此类设备的寿命的分布函数,或故障分布函数.而可靠度(或称可靠函数)的定义则为从设备开始使用到 t 时刻仍然在工作的概率,简言之,即可靠度是设备的寿命 T 大于 t 的概率,即

$$R(t) = P(T > t) \quad t \geq 0 \quad (1.3.2)$$

显然,某类设备的可靠函数与故障函数之间有如下关系:

$$R(t) + F(t) = 1 \quad (1.3.3)$$

根据概率分布函数的性质, $R(t)$ 的值应在 0 到 1 之间,即 $R(0) = 1$ 与 $R(\infty) = 0$. $R(\infty) = 0$ 表明没有一台设备的工作寿命是无穷长的,即当 t 为 ∞ 时,所有的同类设备必已损坏.

对式(1.3.3)求导则有

$$dR(t)/dt = -dF(t)/dt \quad (1.3.4)$$

$$dF(t)/dt = f(t) \quad (1.3.5)$$

则 $f(t)$ 是设备寿命的概率密度函数.它是描述其寿命特性的又一重要指标,它表示设备的寿命 T 落在时间间隔 $[t, t + \Delta t]$, $\Delta t \rightarrow 0$ 时的概率值,即

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t) \quad (1.3.6)$$

或

$$f(t)\Delta t \approx P(t < T \leq t + \Delta t) \quad (1.3.7)$$

显然

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (1.3.8)$$

$$dR(t)/dt = -f(t) \quad (1.3.9)$$

2. 故障率

故障率 $\lambda(t)$ 的定义是设备在 t 时刻以前正常工作, t 时刻后单位时间发生故障的条件概率密度, 即

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) \quad (1.3.10)$$

上式与式(1.3.6)相比较, 不难发现 $f(t)$ 是设备的故障概率密度函数, 而故障率则是一条件概率密度函数. 前者的大小反映了一类设备的故障累计概率随时间变化的快慢, 而 $\lambda(t)$ 则表示设备在 $(t, t + \Delta t)$ 内发生故障的概率的大小. $\lambda(t)$ 小, 则设备的可靠性高, 反之设备的可靠性差. 因此, 故障率 $\lambda(t)$ 可做为衡量设备可靠性的指标之一. 还应指出, $\lambda(t)$ 总是非负的数.

利用条件概率的公式

$$P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) = P(t < T \leq t + \Delta t, T > t) / P(T > t) \quad (1.3.11)$$

由于 $t < T \leq t + \Delta t$, 包含着 $T > t$, 故

$$P(t < T \leq t + \Delta t, T > t) = P(t < T \leq t + \Delta t)$$

考虑式(1.3.7), 则式(1.3.11)可写成

$$\begin{aligned} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t) &= P(t < T \leq t + \Delta t) / P(T > t) \\ &= f(t) \Delta t / R(t) \end{aligned}$$

由上式与式(1.3.10), 可得

$$\lambda(t) = f(t) / R(t) = - \frac{dR(t)/dt}{R(t)} \quad (1.3.12)$$

因此可以解得

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right] \quad (1.3.13)$$

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \lambda(\tau) d\tau \right] \quad (1.3.14)$$

实际的统计结果表明, 多数的不可修复设备(或元件)的故障率与时间的关系如图 1.1 所示, 起始呈下降的趋势, 而后保持基本恒定, 最后呈上升的趋势, 即所谓浴盆曲线. 在 I 阶段为

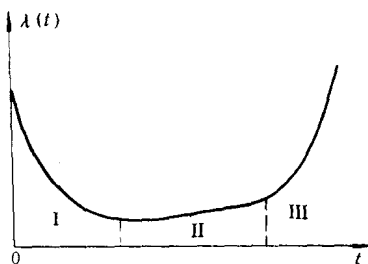


图 1.1 不可修复的设备的故障率与时间的关系

早期故障期,反映了设计制造工艺上的缺陷,经过一段时间运行后,进入Ⅱ阶段,即所谓偶发故障期,故障率低且近乎一常数.到Ⅲ阶段设备进入老化阶段,故障呈上升趋势,称之为耗损故障期.

3. 寿命的指数分布

从上可知,不可修复设备在其偶发故障期,其故障率 $\lambda(t)$ 近似为常数,由式(1.3.13)与(1.3.14)得

$$\begin{cases} R(t) = e^{-\lambda t} \\ F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \\ f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \end{cases} \quad (t \geq 0) \quad (1.3.15)$$

可见,当设备的故障率 λ 为常数时,设备的寿命为指数分布.

由于 $f(t)$ 是设备的寿命 $T > t$ 的概率密度函数,则设备的寿命的数学期望(均值) $E(T)$ 为

$$E(T) = \int_0^{\infty} t f(t) dt$$

当 λ 为常数时,则

$$E(T) = \int_0^{\infty} t \lambda \exp(-\lambda t) dt = 1/\lambda \quad (1.3.16)$$

即设备的故障率为常数 λ 时,设备的平均无故障工作时间 MTTF 为

$$\text{MTTF} = 1/\lambda \quad (1.3.17)$$

4. 修复率

前面讨论了不可修复设备的故障率及寿命等问题,实际上许多设备都是可修复的.修复可使有故障的设备恢复原来规定的功能.如果修复的质量很好,修复后的设备的寿命与前述不可修复后的设备的寿命相当.可修复的设备损坏以后还可多次修复,其每次修复后的故障率不尽相同,因此其故障率曲线如图 1.2 所示,不同于图 1.1 所示的不可修复的设备的故障率曲线.

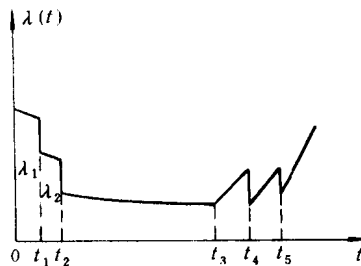


图 1.2 可修复设备的故障率与时间的关系

在设备工作时间 $0 \sim t_1$ 间隔内,其故障率为 λ_1 .在 $t_1 \sim t_2$ 间隔内故障率因调整和维修而有所下降(错误的维修与调整可使故障率上升).在 $t_2 \sim t_3$ 阶段为正常稳定工作期. t_3 以后,设备进入老化损耗期,故障率迅速上升,反复维修,运行期愈来愈短.且维修的难度愈来愈

大, 维修费用越来越高, 直至不再修复. 通常引入一修复率 μ 来表示可修复设备故障后, 修复的难易程度及效果. 以 T_D 表示设备的修复时间, 它因设备不同和故障的不同而不同, 受一些随机因素的影响, 故 T_D 是一随机变量. 设备的修复率是在 t 时刻以前未被修复, 而在 t 时刻以后单位时间被修复的条件概率密度, 即

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$$

若记 $F_D(t)$, $f_D(t)$ 分别为修复时间 T_D 的概率分布函数和概率密度函数, 当 $\mu(t) = \mu = \text{常数}$ 时,

$$\begin{aligned} F_D(t) &= 1 - e^{-\mu t} \\ f_D(t) &= df_D(t)/dt \\ &= \mu e^{-\mu t} \end{aligned} \quad (1.3.18)$$

此时设备的平均修复时间 MTTR 为

$$\begin{aligned} \text{MTTR} &= \int_0^{\infty} t f_D(t) dt \\ &= \int_0^{\infty} t \mu e^{-\mu t} dt \\ &= 1/\mu \end{aligned} \quad (1.3.19)$$

依照前面对不可靠度(寿命)与故障率的类似的分析, $F_D(t)$ 又可称之为维修度, 通常记为 $M(t)$, 它表示可修复的设备在规定的时间内完成维修的概率.

不可修复的设备从工作状态一旦转向故障状态, 则设备将永远失去工作能力, 可靠度 $R(t)$ 就可以描述该类设备的寿命. 可修复的设备可以多次修复, 重新投入运行, 可靠度不能完全反映此类设备可工作时间的长短, 为此引入可用度来描述设备可以利用的程度, 最常用的可用度的定义为

$$A = \frac{\text{MTTF}}{\text{MTTF} + \text{MTTR}} \quad (1.3.20)$$

在设备的可靠度和维修度均服从指数分布的条件下

$$A = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + 1/\mu} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (1.3.21)$$

式(1.3.20)中的分母是平均无故障时间与平均维修时间之和, 实际上, 它是相邻两次故障时间间隔的平均值, 记为 MTBF, 则

$$\text{MTBF} = \text{MTTF} + \text{MTTR} \quad (1.3.22)$$

1.3.2 故障诊断系统的误诊

监测系统与诊断系统共同构成一个完整的技术系统, 它将监测系统所获得的信息加以处理, 提取出相应的故障特征, 经过分析和判断推理, 确定被监测的设备与系统是否有故障. 如有故障并能判断故障的种类、部位、严重程度与提出处理意见. 显然, 对于诊断系统而言, 人们总希望它能准确无误地对故障确诊. 实际的诊断系统由于种种原因, 总会产生误诊. 对诊断系统的误诊又可细分以下几种情形:

(1) 被诊断的设备与系统实际存在 A 类故障, 而误诊为 B 类故障;

(2)设备与系统有故障,由于监测系统的灵敏度不够,或噪声湮没了故障特征信号而诊断为无故障;

(3)被诊断的设备与系统本来没有故障而诊断为有故障,形成所谓虚报警。

错误的诊断会导致错误的维修决策。上述(1)类误诊断有可能造成故障修理不当,不是“头痛医头”,而是“头痛医脚”。上述(2)类误诊,就会谎报平安无事,有可能延误维修,形成大的事故。(3)类误诊断,则会造成“好马当病马医”的后果。

任何一给定时间,设备与系统处于下述四种情形之一:

s_1 ——正常无故障状态;

s_2 ——正常无故障状态,但被不正确的停机维修((3)类误诊);

s_3 ——故障状态,维修决策错误((1)类与(2)误诊);

s_4 ——故障状态,维正确。

相应的 $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$ 分别为 t 时刻设备处于 s_1, s_2, s_3, s_4 四种状态的概率。人们总希望起始时,设备与系统处于正常的条件下,即 $p_1(0) = p_2(0) = p_3(0) = p_4(0) = 0$, 错误的维修决策的全概率 J 为最小。

如果不存在(2)类误诊,则故障状态 s_3 的维修决策仅包含头痛医脚的情况,则 $J = \min$ 时,设备与系统有最大的利用率(见第2章2.5节)。

1.3.4 故障诊断与维修策略的经济效益

有关统计资料表明,设备与系统的维修费是一笔相当大的开支。如美国惠普杂志载文^[14]所称,1980年美国在设备维修方面耗资约2000多亿美元,将近同年税收总额的1/3。再如我国80年代中期,电力生产的成本中大约1/3是维修费用。如何减少这一部分费用是一巨大的经济技术课题。

设备的维修有三种方式,一是完全损坏了再更换备件的方式;二是定期检修方式;三是基于状态监测的预知维修方式。方式一需要有大量的备件,有时某些设备的损坏会造成十分严重的后果。这种方式比较适宜于那些不可修复的设备,且它的损坏不会造成设备与系统的更大的事故与损失。方式二是多年来为许多产业部门所采用的方式,实践证明这种维修方式仍然带有较大的盲目性,不能完全避免在两次定期检修之间的突然事故。我国电力部门一直采用定期检修的方式,但恶性突发事件仍在两次检修之间时有发生,如国产20万千瓦的发电机的定子绝缘的事故时有发生,造成巨大的经济损失。此外,定期检修中,检修人员的技术水平不高与工作态度的不认真,造成了许多不该发生的事故。方式三基于对设备的状态监测故障诊断的结果,决定是否维修、何时维修与维修什么等。维修目的性明确,既不存在多余的检修,也不存在检修不够的情况。但这要求有较完善的状态监测系统与准确的诊断结果。

虽然,现在状态监测与故障诊断技术从总体来说还远不够完善与成熟,不能完全实现预知维修,但它在许多部门能检测出较早期的故障,防止了事故进一步扩大而造成恶性事故,取得了可观的经济效益。如美国匹兹堡大学为德克萨斯州的七个电站研制的监测与诊断系统,就使该七个电站的强迫停机率从1.4%下降到0.2%^[15]。

良好的状态监测与诊断系统可以提供设备与系统的故障发生发展的变化规律和趋势。向设备与系统的制造厂提供有用的资料,使之改进产品的设计与制造,进一步提高产品的

可靠性。

正因为状态监测与故障诊断技术能直接给产业部门带来巨大的经济效益,尽管此项技术还不够成熟,但发展是十分迅速的。

综上,可以画出状态监测与故障诊断系统与制造、运行和维修的“大闭环”框图,如图 1.3 所示。

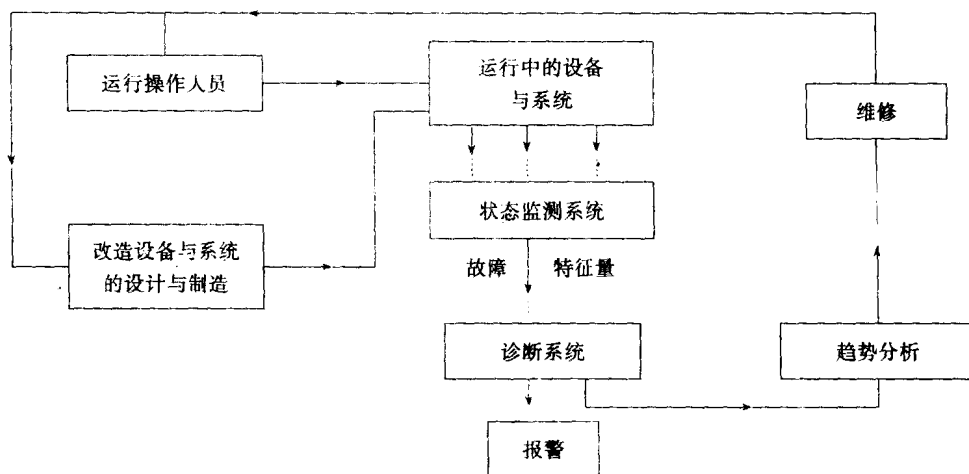


图 1.3 运行监测、诊断维修和设计制造的“大闭环”框图

参 考 文 献

- [1] 邝朴生等, 现代机器故障诊断学, 农业出版社, 1991
- [2] 唐人亨, 模拟电子系统的自动故障诊断, 高等教育出版社, 1991
- [3] 小特集, 最近の電力設備診断技術の開発動向, 電気学会雑誌, 105 卷 1 期, pp. 1-26, 昭和 60
- [4] P. Vas, Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines, Clarendon Press. Oxford, 1993
- [5] F. M. Frank, Fault Diagnosis in Dynamic System Using Analytical and Knowledge-Based Redundancy-A Survey and Some New Results, Automatica, Vol. 26, No. 3, pp. 459-474, 1990
- [6] Webster's Ninth New Collegiate Dictionary, Merriam-Webster, Inc., 1983
- [7] P. J. Tavner et al., Condition Monitoring of Electrical Machines, John Wiley & Sons Inc., 1987 (中译本: 姜建国等译, 电机的状态监测, 水利电力出版社, 1991)
- [8] A. S. Willsky et al., A Generalized Likelihood Ratio Approach to State Estimation in Linear Systems Subject to Abrupt Changes, Proc. of 1974 IEEE Conf. on Decision and Control, Nov. 1974
- [9] BO. Wahlberg et al., Robust Frequency Domain Fault Detection/Diagnosis, Preprints 11th IFAC World Congress, Tallin, Aug. 1990
- [10] A. J. Gonzalez et al., On-line Diagnosis of Turbine-generator Using Artificial Intelligence, IEEE Trans EC, Vol. 1, No. 2, pp. 68-74, June 1986
- [11] 钟义信等, 智能理论与技术——人工智能与神经网络, 人民邮电出版社, 1992
- [12] Mo Yuen Chow et al., On the Application and Design of Artificial Neural Networks for Motor Fault Detection - Part I & Part II, IEEE Trans., IE Vol. 40 No. 2, pp. 181-196, April 1993
- [13] I. E. Alguindigue et al., Monitoring and Diagnosis of Rolling Element Bearing Using Artificial Neural Networks, IEEE Trans IE, Vol. 40, No. 2, pp. 209-217, April 1993
- [14] J. L. Malin et al., HP, A New Approach to Software Customer Solutions, Hewlett-Packard Journal, March 1985