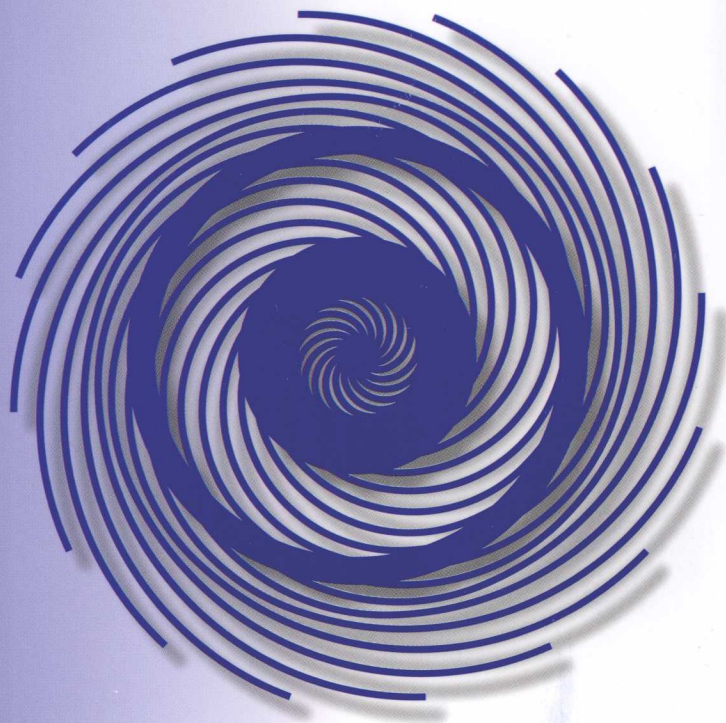


吕琛 主编
栾家辉 王立梅 刘红梅 编著



高等学校研究生教材

故障诊断与预测

——原理、技术及应用



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

高等学校研究生教材

故障诊断与预测

——原理、技术及应用

吕 琛 主编

栾家辉 王立梅 刘红梅 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书系统介绍了故障诊断的基本理论、方法及其应用,同时结合当前故障预测技术研究的进展,对故障预测技术及其应用案例做了详细阐述。主要内容包括:故障诊断相关概念及基本原理、故障诊断中的信号处理技术、智能故障诊断方法以及故障预测技术。

本书内容取材广泛,结构合理,注重理论联系实际,可以作为机械、自动化等相关专业大学研究生的教材或参考书,也可供高年级本科生、教师及科研人员自学和参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

故障诊断与预测:原理、技术及应用/吕琛主编

. --北京:北京航空航天大学出版社,2012. 12

ISBN 978-7-5124-1033-6

I. ①故… II. ①吕… III. ①电机—故障诊断②电机—故障修复 IV. ①TM307

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 295901 号

版权所有,侵权必究。

故障诊断与预测——原理、技术及应用

吕 琛 主 编

栾家辉 王立梅 刘红梅 编著

责任编辑 张 辉 韩英宏 郭凯园

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:20 字数:512 千字

2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1033-6 定价:45.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

随着现代科学技术的进步与发展,系统的规模日益扩大,结构日趋复杂,功能也越来越多。随之而来的问题是,系统一旦发生故障,不仅会造成巨大的经济损失,而且可能危及人身安全,产生重大的社会影响。因此,人们对系统安全、稳定、长周期、满负荷运行的要求越来越迫切,希望能及时了解系统的运行状态,预防故障,杜绝事故,延长系统运行周期,缩短维修时间,提高系统的可靠性、可维护性和有效性。因而,对系统故障诊断和故障预测技术的研究具有重要意义。

本书编者及其研究团队在故障诊断和故障预测领域开展了多年的研究工作,所取得的成果已应用于故障诊断和故障预测的教学和科研中。本书主要内容及章节安排如下:

第1章绪论,介绍故障诊断技术的研究意义、相关研究进展、研究现状和发展趋势。

第2章介绍故障诊断的相关概念和基本原理,讨论故障诊断信息的获取和检测方法、故障维修策略及故障诊断工作程序。

第3章介绍测量、传感器和信号处理的基础知识,并分析和讨论故障诊断中的信号处理方法。

第4章分析和讨论智能故障诊断方法,深入阐述基于案例推理的故障诊断、模糊故障诊断、专家系统故障诊断、神经网络故障诊断、信息融合故障诊断、BIT故障诊断以及基于混沌理论的故障诊断等方法。

第5章综述预测技术中存在的 key 问题,分析和讨论基于传统可靠性的预测、基于失效物理的预测、基于统计的预测以及基于数据驱动的预测方法,并给出了相应方法的应用案例。

本书由吕琛、栾家辉、王立梅和刘红梅负责执笔,最后由主编吕琛整理定稿。本书在编写过程中得到了北京航空航天大学可靠性与系统工程学院故障预测与健康实验室王志鹏、马剑、陶来发、孙倩、樊焕贞、单添敏、陶小创、刘大伟的大力支持和帮助;同时,本书还参考或引用了许多学者的资料。在此一并表示衷心的感谢。

本书得到了北京航空航天大学教材建设项目的资助。对北京航空航天大学研究生院、教材科和北京航空航天大学出版社对本书出版的关心和支持,在此深表谢意!

鉴于编者水平有限,加之故障诊断和故障预测技术发展较快,尚有许多问题有待深入分析和研究,书中难免有错误或不妥之处,敬请读者批评指正。

吕 琛

2012 年 11 月

于北京航空航天大学

目 录

1 绪 论	1
1.1 故障诊断技术的目的和意义	1
1.2 故障诊断的任务	3
1.3 故障诊断技术发展概况	5
1.3.1 故障诊断技术的历史、现状与发展	5
1.3.2 故障诊断基本方法	6
1.3.3 人工智能发展历程	11
1.3.4 发展方向	13
习 题	14
参考文献	14
2 故障诊断的基本原理和技术基础	16
2.1 故障诊断的基本概念	16
2.1.1 故障的定义	16
2.1.2 故障的分类	17
2.1.3 故障诊断流程	20
2.1.4 故障诊断技术的分类	21
2.2 故障诊断基础	24
2.2.1 系统的构成	24
2.2.2 故障的基本特性	24
2.2.3 故障诊断的多维层次模型	25
2.3 故障诊断信息的获取和检测方法	26
2.3.1 故障诊断的知识构成	26
2.3.2 故障信息的获取方法	27
2.3.3 故障的检测方法	28
2.3.4 故障特征识别	29
2.4 诊断技术与维修方式	38
2.4.1 故障诊断技术在设备管理现代化中的地位和作用	38
2.4.2 五种维修体制的特点和运用范围	39
2.4.3 故障维修决策	41
2.4.4 现场故障诊断技术的技术框架和工作程序	46
习 题	47
参考文献	48

3 故障诊断中的信号处理	49
3.1 测试的基础知识.....	49
3.1.1 测量、计量和测试	49
3.1.2 测试方法的分类.....	49
3.1.3 测试系统的组成.....	50
3.1.4 各组成部分的特点.....	50
3.2 传感器的基本概念.....	51
3.2.1 传感器的定义及基本组成.....	51
3.2.2 传感器的分类.....	51
3.2.3 传感器的性能参数及要求.....	52
3.2.4 传感器的标定与校准.....	53
3.2.5 几种常用传感器的介绍.....	53
3.3 检测系统的误差合成.....	55
3.3.1 测量误差的基本概念.....	56
3.3.2 系统误差的处理.....	59
3.3.3 测量粗大误差的存在判定准则与消除方法.....	60
3.3.4 随机误差的处理.....	60
3.4 信号处理方法.....	61
3.4.1 信号处理的基础知识.....	61
3.4.2 离散傅里叶变换(DFT)	65
3.4.3 小波变换.....	71
习 题	78
参考文献	79
4 智能故障诊断方法	80
4.1 基于案例推理的故障诊断方法.....	80
4.1.1 故障案例的表示方法.....	81
4.1.2 故障案例的组织 and 索引.....	87
4.1.3 基于案例的诊断模型.....	89
4.1.4 诊断实例分析.....	92
4.2 模糊故障诊断技术.....	93
4.2.1 模糊故障诊断原理.....	93
4.2.2 模糊故障诊断方法.....	95
4.2.3 模糊诊断的几个关键问题	100
4.2.4 小 结	103
4.3 专家系统故障诊断技术	103
4.3.1 专家系统概述	103
4.3.2 专家系统故障诊断原理	114
4.3.3 专家系统故障诊断方法	121

4.3.4 风洞运行过程故障诊断	123
4.3.5 小 结	124
4.4 神经网络故障诊断技术	125
4.4.1 神经网络简介	125
4.4.2 神经网络故障诊断原理	127
4.4.3 神经网络故障诊断方法	132
4.4.4 大型复杂机电设备多故障神经网络诊断	134
4.4.5 小 结	137
4.5 信息融合故障诊断技术	137
4.5.1 信息融合的概念	137
4.5.2 信息融合故障诊断原理	142
4.5.3 信息融合故障诊断方法	145
4.5.4 飞行器信息融合故障诊断专家系统	150
4.5.5 小 结	152
4.6 智能体故障诊断技术	153
4.6.1 智能体概述	153
4.6.2 智能体故障诊断原理	159
4.6.3 智能体故障诊断方法	168
4.6.4 基于 Agent 的飞行器智能故障诊断	176
4.6.5 小 结	180
4.7 智能结构故障诊断技术	180
4.7.1 智能结构的概念	180
4.7.2 智能结构故障诊断系统的组成	184
4.7.3 智能结构故障诊断的关键技术	186
4.7.4 小 结	189
4.8 BIT 故障诊断技术	189
4.8.1 BIT 概述	189
4.8.2 BIT 故障诊断原理	193
4.8.3 无人机 BIT 故障诊断	195
4.8.4 小 结	198
4.9 集成化故障诊断技术	198
4.9.1 集成的概念	199
4.9.2 集成化故障诊断体系结构	200
4.9.3 集成化推理和诊断策略	203
4.9.4 神经网络与模糊逻辑集成故障诊断	204
4.9.5 专家系统与神经网络集成故障诊断	205
4.9.6 神经网络与案例集成故障诊断	207
4.9.7 小 结	207
4.10 网络化故障诊断技术	208

4.10.1	网络化故障概述	208
4.10.2	网络化故障诊断的结构模式	211
4.10.3	网络化故障诊断的实现方案	216
4.10.4	网络化故障诊断的关键技术	218
4.10.5	网络化故障诊断的评价指标	219
4.10.6	飞行器网络化远程诊断与故障防护	220
4.10.7	小 结	223
4.11	基于混沌理论的故障诊断技术	224
4.11.1	混沌的概念	224
4.11.2	相空间重构	227
4.11.3	混沌识别	233
4.11.4	混沌理论在故障检测中的应用	239
4.11.5	小 结	251
	习 题	251
	参考文献	252
5	故障预测技术	262
5.1	预测技术概述	262
5.1.1	故障预测:存在的难题	262
5.1.2	预测问题:概念框架	263
5.1.3	预测方法	263
5.2	基于传统可靠性的预测方法介绍	265
5.2.1	基于寿命分布模型的故障预测方法	265
5.2.2	基于故障树分析的故障预测方法	267
5.2.3	基于传统可靠性的预测方法的不足	268
5.3	基于失效物理模型的预测方法	268
5.3.1	帕里斯法则裂纹扩展建模	271
5.3.2	基于 Forman 规律的裂纹扩展建模	272
5.3.3	疲劳剥落扩展模型	273
5.3.4	基于刚度的损伤规律模型	275
5.3.5	电子产品失效物理模型	276
5.3.6	应用案例	277
5.4	基于统计的预测方法	279
5.4.1	贝叶斯技术	279
5.4.2	隐马尔可夫和隐半马尔可夫模型	280
5.4.3	回归分析方法	282
5.4.4	威布尔分布的稳定区与退化区间隔表示的预测方法	286
5.4.5	比例风险模型的预测方法	288
5.4.6	智能乘积极限估计器	289
5.4.7	应用案例	290

5.5 基于数据驱动的预测方法	292
5.5.1 时间序列的预测方法	293
5.5.2 人工神经网络(ANN)的预测方法	295
5.5.3 基于滤波器的预测方法	299
5.5.4 应用案例	301
5.6 本章小结	303
习 题	303
参考文献	304

1 绪 论

1.1 故障诊断技术的目的和意义

随着现代化大生产的发展和科学技术的进步,系统的规模日益扩大,复杂程度越来越高,同时系统的投资也越来越大。由于受到许多无法避免的因素影响,系统会出现各种各样的故障,从而降低或丧失其预定的功能,甚至造成严重的损失乃至灾难性事故。国内外曾发生的各种空难、海难、爆炸、断裂、倒塌、毁坏以及泄露等恶性事故,不但造成了人员伤亡,还产生了严重的社会影响;即使是日常生产中的事故,也因生产过程不能正常运行或机器设备损坏而造成巨大的经济损失。因此,如何提高系统的可靠性、可维护性和有效性,从而保证系统的安全运行并消除事故,是十分迫切的问题。

故障检测与诊断技术为提高系统的可靠性、可维护性和有效性开辟了一条新的途径。对于工业生产过程来说,为了避免某些生产过程发生故障而引起整个生产过程瘫痪,必须在故障发生伊始迅速进行有效处理,维持系统的功能基本正常,从而提高设备的利用效率和使用安全性,保证生产过程安全可靠地进行。用计算机监控系统检测生产过程中的故障并分离出故障源已成为生产过程控制的重要任务之一。世界范围内客观存在着两种发展趋势,必须引起我们注意。以武器装备为例,早在40年前,人们已从局部战争中认识到武器装备仅有优良的性能是远远不够的,由于可靠性、维修性差发生故障而影响武器装备的战备完好率和任务成功率,最终导致装备作战效能过低的教训至今仍令人记忆犹新。从单纯追求性能到重视综合效能观念的变革经历了几十年的时间,这是问题的一个方面;另一方面,几十年来,在世界范围内,在部分高科技产品采购价格大幅度增长的同时,维修使用费用竟上升至约占投资费用的 $\frac{1}{4}$,甚至 $\frac{1}{3}$ 。众所周知,由于可靠性、维修性不佳导致系统发生故障,已成为维修使用费用剧增的重要因素。我国是发展中国家,必须使用有限的资金大力发展民用产品和军事装备,对于武器系统来说,引入故障检测与诊断技术是提高武器有效度、更好发挥现有装备效能的重要途径。面对两种发展趋势,迎接挑战是我们面临的刻不容缓的实际问题。而防止故障发生与发展故障诊断技术是十分重要的,二者有着不可分割的关系。

故障诊断技术是指在系统运行状态或工作状态下,通过各种监测手段判别其工作是否正常。如果不正常,经过分析与判断指出发生了什么故障,便于管理人员维修;或者在故障未发生之前提出可能发生故障的预报,便于管理人员尽早采取措施,避免发生故障(或避免发生重大故障)造成停机停产,给工程带来重大经济损失。这是故障诊断技术的任务,也是发展故障诊断技术的目的。

故障诊断是排除故障的基础。它可以做到以下几点:①能及时、正确地对各种异常状态做出诊断,预防或消除故障,对系统的运行进行必要的指导,提高系统运行的可靠性、安全性和有效性,从而把故障损失降低到最低水平。②保证系统发挥最大的设计能力,制定合理的检测维

修制度,以便在允许的条件下充分挖掘系统潜力,延长服役期限和使用寿命,降低全寿命周期费用。③通过检测监视、故障分析和性能评估等为系统结构修改、优化设计、合理制造以及生产过程提供数据和信息。总之,故障诊断既要保证系统的安全可靠运行,又要获得更大的经济效益和社会效益^[1-3]。

发展故障诊断技术的重要意义体现在以下几个方面。

(1) 提高设备管理水平

“管好、用好、修好”设备,不仅是保证简单再生产的必不可少的条件,而且对提高企业经济效益,推动国民经济持续、稳定、协调发展都有极其重要的意义。而设备的状态监测和故障诊断是提高设备管理水平的一个重要组成部分。

(2) 保证产品质量,提高系统的可靠性与维修性

现代高科技产品是一个复杂的技术综合体,要保证产品研制成功并能有效地应用,研制过程中就必须在可靠性、维修性、安全性、经济性、可生产性和质量控制等方面加以保证。在工业界,产品的可靠性问题已经被提高到产品生命线的高度(而不是单纯的追求产品性能指标)。解决可靠性问题,需要动员各个职能部门的力量,运用各种手段和各种技术,协同作战;需要应用系统工程观点和优化观点,对产品(设备也是产品)从开发、设计、制造、安装调试到维修使用实施全过程管理;并需要有长期的技术更新、数据存储和经验的积累,包括对某些传统观念的更新,从而提高企业的自身素质来加以综合保证。通过开展故障诊断工作,可以有效地延缓系统可靠性的下降速度,并对维修决策提供有力的支持。

(3) 避免重大事故的发生,减少事故危害性

现代化工业生产中重大事故的发生不仅会造成巨大的损失,而且会给人们带来严重的灾难。近些年来,国际上曾先后发生过几起引起全球很大震动的严重事故,例如:

① 1986年1月28日,美国“挑战者”号航天飞机由于右侧固体火箭发动机装配接头和密封件失效,造成航天飞机爆炸,7名宇航员遇难身亡;

② 1986年4月,前苏联乌克兰切尔诺贝利核电站爆炸,造成2000多人死亡,几万名居民撤离原居住区,溢出的放射性物质污染了西欧上空,带来近30亿美元的巨额损失,影响了国际政治关系;

③ 1986年10月与1988年2月,我国山西和陕西先后发生两起20万千瓦电站机组由于运行失稳导致机组烈振、轴系断裂、零件飞出毁坏厂房的恶性电站事故;

④ 1987年,日本一架飞机机身结构疲劳断裂,导致飞机坠毁,造成整机400多名人员死亡,无一生还;

⑤ 2003年2月1日,美国“哥伦比亚”号航天飞机在着陆前发生意外,航天飞机解体坠毁,7名宇航员全部罹难;

⑥ 2003年8月23日,巴西运载火箭在发射台爆炸,导致至少16人死亡,20人受伤,发射平台被毁,伤亡人员中许多是巴西的火箭技术专家;

⑦ 2003年11月29日,日本H2A火箭从日本鹿儿岛县种子岛宇宙中心发射升空,中途出现故障,未能将两颗间谍卫星送入预定轨道,由地面控制引爆。

故障的发生是不可避免的,但是开展有效的故障诊断工作,在故障发生之前对可能发生的故障进行预警,及早采取相应的措施,可以降低故障发生率和故障严酷度,从而避免重大事故的发生,减少事故危害性。

(4) 可以获得潜在的巨大经济效益和社会效益

现代工业生产的特点是:设备大型化、生产连续化、高度自动化和高度经济化。这在提高生产率、降低成本、节约能源和人力、减少废品率以及保证产品质量等方面具有巨大的优势。但是,一旦生产过程发生故障,哪怕是一个零件或组件,也会迫使生产中断,整个生产线停止运行,从而带来生产损失。根据生产规模的大小,以小时计,这种损失可达几万或几十万之巨。故障诊断技术是研究系统在运行状态下是否存在故障、工作是否正常;如果有故障,要求能够给予早期预报,并为设备管理提供技术支持,从而尽最大可能减少非计划性停机时间,以实现生产高效率、高经济性的目的。

为最大限度地提高生产经济性,即要“充分发挥设备的效能,取得良好的投资效益”,现代设备管理以追求最大限度降低寿命周期费用(LCC)为目标。寿命周期费用(LCC)是指系统从规划设计到报废所消耗费用的总和。如果以公式来表示,即

$$\text{寿命周期费用(LCC)} = \text{研制费用} + \text{生产费用} + \text{使用、维修费用} = \text{购置费用} + \text{使用维修费用} \quad (1-1)$$

购置费用是一次性投资,又称非再现性费用,是寿命周期费用中的重要成分。使用、维修费用,又称可再现性费用或维持费用。由于没有采用现代化管理和现代维修技术,再现性费用可以几倍或几十倍高于非再现性费用。减少再现性费用对故障诊断技术起到十分重要的作用^[4,5]。

1.2 故障诊断的任务

故障诊断技术是一门综合性技术,它不但与诊断对象的性能和运行规律密切相关,还涉及多门学科,如现代控制理论、可靠性理论、数理统计、模糊集理论、信号处理、模式识别和人工智能等。故障诊断的任务是监视系统的状态,判断其是否正常;预测和诊断系统故障并消除故障;指导管理和维修。

1. 状态监测

状态监测的任务是了解和掌握系统的运行状态,包括采用各种检测、测量、监视、分析和判别方法,结合系统的历史和现状并考虑环境因素,对系统运行状态进行评估,判断其处于正常或非正常状态,并对状态进行显示和记录,对异常状态做出报警,以便运行人员及时处理,并为故障分析、性能评估、合理使用和安全生产工作提供信息和准备基础数据。

通常系统的状态可分为正常状态、异常状态和故障状态三种情况。正常状态指系统的整体或其局部没有缺陷,或虽有缺陷但其性能仍在允许的限度以内。异常状态指缺陷已有一定程度的扩展,使系统状态信号发生一定程度的变化,性能已劣化,但仍能维持工作,此时应注意性能的发展趋势,即系统应在监护下运行。故障状态则是指系统性能指标已有大的下降,不能维持正常工作。系统的故障状态还有严重程度之分,包括已有故障萌生并有进一步发展趋势的早期故障;程度尚不严重,系统尚可勉强“带病”运行的一般功能性故障;已发展到系统不能运行必须停机的严重故障;已导致灾难性事故的破坏性故障;以及由于某种原因瞬间发生的突发性紧急故障等。对应不同的故障应有不同的报警信号,一般用指示灯的颜色表示:绿灯表示正常,黄灯表示预警,红灯表示报警。对系统状态演变的过程均应有记录,包括对灾难性破坏

事故的状态信号的存储、记忆功能,俗称“黑匣子”记录,以方便事后分析事故原因^[6,7]。

2. 故障诊断

故障诊断的任务是根据状态监测所获得的信息,结合已知的结构特性、参数、环境条件以及该系统的运行历史(包括运行记录和曾发生过的故障及维修记录等),对可能要发生的或已经发生的故障进行预报、分析和判断,确定故障的性质、类别、程度、原因和部位,指出故障发生和发展的趋势及其后果,提出控制故障继续发展和消除故障的调整、维修、治理的对策措施,并加以实施,最终使系统复原到正常状态。故障诊断包括4个方面的内容。

① 故障建模。按照故障相关的先验信息和故障与信号之间的输入输出关系建立系统故障的数学模型,作为故障检测与诊断的依据。

② 故障检测。从可测或不可测的估计变量中判断运行的系统是否发生故障,一旦系统发生意外变化应发出报警。

③ 故障分离与估计。如果系统发生了故障,给出故障源的位置,区别出故障原因是执行器、传感器、被控对象还是特大扰动等。故障估计是在弄清故障性质的同时,计算故障的程度、大小及故障发生的时间等参数。

④ 故障分类、评价与决策。判断故障的严重程度以及故障对系统的影响和发展趋势,针对不同的工况采取不同的措施,其中包括保护系统的启动。

系统不同部位、不同类型的故障引起功能的不同变化,导致系统整体及各部位状态和运行参数的不同变化。故障诊断的任务就是当系统某一部位出现某种故障时,要从这些状态及其参数的变化推断出导致这些变化的故障及其所在部位。由于状态参数的数量浩大,必须找出其中的特征信息,提取特征量,才便于对故障进行诊断。由某一故障引起的状态的变化称为故障的征兆(Sympton)。故障诊断的过程就是从已知征兆判定存在的故障的类型及其所在部位的过程。因此故障诊断的方法实质上是一种状态识别方法。

故障诊断的困难在于故障和征兆之间不存在简单的一一对应的关系,一种故障可能对应多种征兆,而一种征兆也可能对应多种故障。例如旋转机械转子的不平衡故障引起振动增大,其中相应于转速的工频分量占主要成分,是其主要征兆,同时还存在一系列其他征兆;反过来工频分量占主要成分这一征兆不只是不平衡的独特征兆,还有许多其他故障也都对应这一征兆。这就为故障诊断增加了难度。因此通常故障诊断是一个反复试验的过程:先按已知信息提取征兆进行诊断,得出初步结论,提出处理对策,对系统进行调整和试验,甚至停机维修,再启机进行验证,检查系统是否已恢复正常。如尚未恢复,则需补充新的信息,进行新一轮的诊断并提出处理对策,直至状态恢复正常。

3. 指导设备的管理维修

第二章将要讲到,设备管理和维修方式的发展经历了三个阶段,即从早期的事后维修方式(Run - to - Breakdown Maintenance)发展到定期预防维修方式(Time - based Preventive Maintenance),现在正向视情维修^[8](on - condition Maintenance)方式发展。定期维修可以预防事故的发生,但可能出现过剩维修或不足维修的弊病。视情维修是一种更科学、更合理的维修方式。但要能做到视情维修,必须依赖于完善的状态监测和故障诊断技术的发展和实施,这也是国内外近年来对故障诊断技术如此重视的一个原因。随着我国故障诊断技术的进一步发展和实施,我国的设备管理、维修工作将上升到一个新的水平,工业生产的设备完好率将会进

一步提高,恶性事故将会进一步得到控制,经济建设将会得到更健康的发展。

1.3 故障诊断技术发展概况

1.3.1 故障诊断技术的历史、现状与发展

所谓故障诊断是指系统在一定工作环境下查明导致系统某种功能失调的原因或性质,判断劣化状态发生的部位或部件以及预测状态劣化的发展趋势等,它包括故障检测、故障定位和故障预测。

故障诊断自有工业生产以来就存在,但故障诊断技术作为一门学科是 20 世纪 60 年代以后发展起来的,它是适应工程实际需要而形成和发展起来的一门综合学科。纵观其发展过程,故障诊断可依据其技术特点分为以下几个阶段:

1. 原始阶段

原始诊断始于 19 世纪末 20 世纪初,由于机器设备比较简单,故障诊断主要依靠个体专家或维修人员通过感官、经验和简单仪表进行。

2. 基于传感器与计算机技术的诊断阶段

基于传感器与计算机技术的诊断始于 20 世纪 60 年代的美国。1961 年美国在开始执行“阿波罗计划”以后出现了一系列由故障酿成的悲剧,导致在 1967 年成立了美国机械故障预防小组(MFPG),同时也揭开了现代故障诊断技术的进程。在这一阶段,诊断技术融合吸收了大量的现代科技成果;由于传感器技术的发展,使得对各种诊断信号和数据的测量变得容易;计算机的使用弥补了人类在数据处理上的低效率和不足,从而使各种诊断方法应运而生,涌现了状态空间分析诊断、对比诊断、函数诊断、逻辑诊断、统计诊断和模糊诊断等诊断方法。信号检测、数据处理与信号分析的手段和方法构成了这一阶段诊断技术的主要研究和发展内容^[9]。然而,不论是诊断技术本身还是从其发展出的诊断系统,几乎在诊断的每一个阶段都需要专家和专业人员的参与,以提供诊断过程所必需的领域知识和处理问题的策略及最终决策。因此,这一阶段的诊断技术缺乏智能性。

3. 智能化诊断阶段

智能化诊断技术始于 20 世纪 80 年代初期。这一阶段的特点是将人工智能的研究成果应用到故障诊断领域中,以常规诊断技术为基础,以人工智能技术^[10]为核心。人工智能技术的发展为故障诊断的智能化提供了可能性,使诊断技术进入了新的发展阶段,以数值计算和信号处理为核心的诊断过程被以知识处理为核心的诊断过程所代替,对诊断技术开始从知识的角度出发来系统地加以研究。虽然智能诊断技术还远远没有达到成熟阶段,但智能诊断的开展大大提高了诊断的效率和可靠性。

就世界范围来看,美国是最早研究故障诊断技术的国家。1967 年,在美国宇航局和海军研究所的倡导和组织下成立了美国机械预防小组,开始有计划地对故障诊断技术分专题进行研究。很多学术机构、政府部门以及高等院校和企业公司都参与或进行了与本企业有关的故障诊断技术研究,并取得了大量的成果。目前,美国的故障诊断技术在航空航天、军事以及核

能等尖端技术领域仍处于领先地位。

英国对故障诊断技术的研究始于 20 世纪 60 年代末、70 年代初,以 R. A. Collacott 博士为首的英国机器保健中心在宣传、培训、咨询以及诊断技术的开发方面做了大量的工作,并取得了很好的效果。目前,英国在摩擦磨损、汽车、飞机发动机监测和诊断方面具有领先优势。

日本的诊断技术研究始于 20 世纪 70 年代中期,1971 年新日铁以丰田利夫教授为首率先开展对故障诊断技术的研究,到 1976 年已达到实用的阶段。尽管日本的起步较晚,但发展很快,其做法是密切注视世界各国的发展动向,特别注意研究美国故障诊断技术的发展,积极引进消化最新技术。目前,日本在钢铁、化工、铁路等民用工业的诊断技术方面处于领先地位。

我国故障诊断技术的研究起步较晚,在 20 世纪 70 年代末期开始,广泛的研究则从 20 世纪 80 年代开始发展起来,随后在各领域分别确定了故障诊断的目标、方向和试点单位。特别应指出,尽管我国的故障诊断技术研究起步较晚,但发展还是比较快的。目前,故障诊断技术在我国化工、冶金、电力和铁路等行业得到了广泛的应用,取得了可喜的成果。

目前,故障诊断领域中的几大研究课题为故障机理研究、信号处理与模式识别的诊断方法研究、故障诊断专家系统的研究和现代监测与诊断系统的应用开发研究等。故障诊断技术的发展呈现出以下 3 方面的趋势:

① 诊断系统智能化。专家系统、模型推理、神经网络、故障树、模式识别和模糊诊断等方法及不确定性理论正走向成熟,并将在故障诊断系统中得到广泛的应用。

② 诊断系统集成化。诊断系统的开发转向现有技术的组合和集成,软件更加规范化、模块化,硬件更加标准化、专业化。

③ 诊断系统综合化。由过去单纯的监测和诊断向今后的集监测、诊断、管理、咨询和训练于一体的综合方向发展。

1.3.2 故障诊断基本方法

故障诊断技术发展至今,人们已提出了许多故障诊断方法。按照国际故障诊断权威德国 Frank 教授的观点,将故障诊断方法划分为基于数学模型的方法、基于知识的方法和基于信号处理的方法三大类^[11,12]。然而近年来随着理论研究的深入和相关领域的发展,各种新的诊断方法层出不穷,传统的分类方法已经不再适用。周东华教授^[13]从一个全新的角度对现有的故障诊断方法重新进行了分类,将其整体上分为定性分析方法和定量分析方法两大类,如图 1-1 所示。其中,定量分析方法又分为基于解析模型的方法和数据驱动的方法,后者又进一步包括机器学习类方法、多元统计分析类方法、信号处理类方法、信息融合类方法和粗糙集方法等。随着故障诊断技术的不断发展,各种新的诊断方法不断涌现,诊断技术的分类规则也将随之改变。

1. 定性分析方法

定性分析方法是指借助一些定性分析工具和行业专家的直觉、经验,凭分析对象过去和现在的延续状况及最新的信息资料,对分析对象的性质、特点和发展变化规律作出判断的一种方法。该方法利用的是专家的经验 and 事物之间的因果关系,适用于故障逻辑关系比较明确的系统。

(1) 图论方法

基于图论的故障诊断方法主要包括符号有向图(Signed Directed Graph, SDG)方法和故障树(Fault Tree)方法。

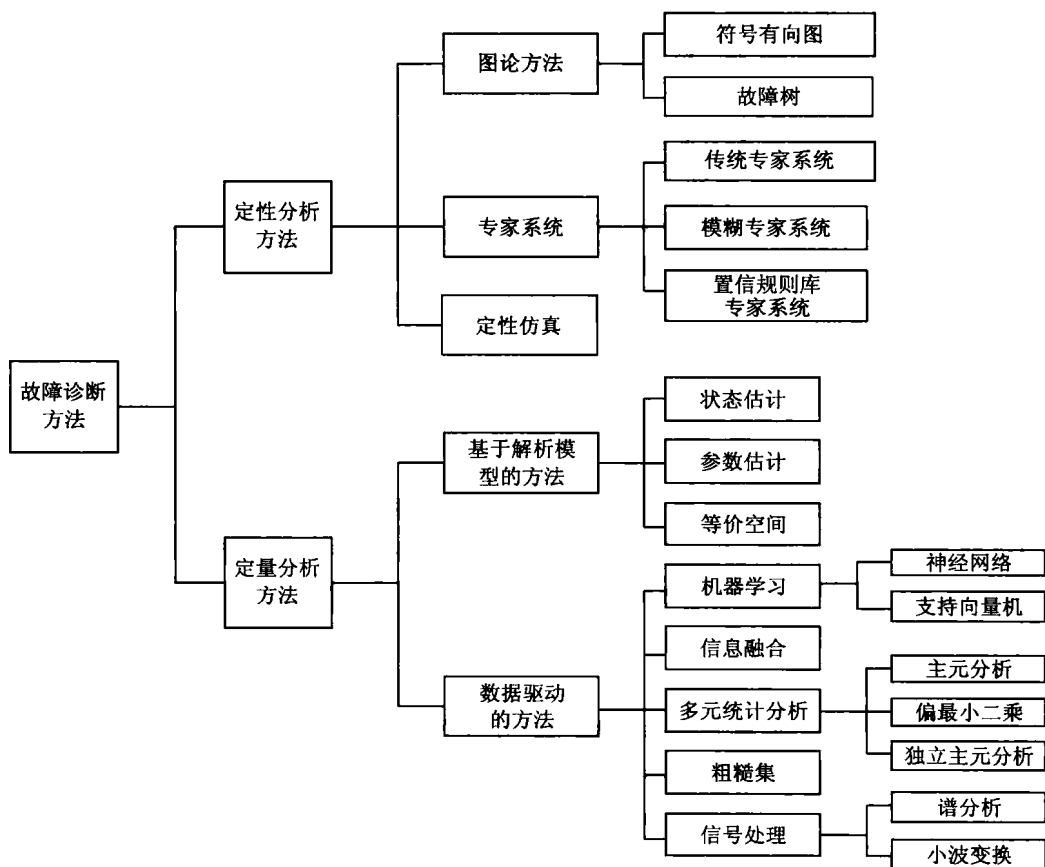


图 1-1 故障诊断方法分类示意图

SDG 是一种被广泛采用的描述系统因果关系的图形化模型。在 SDG 中,事件或者变量用节点表示,变量之间的因果关系用从原因节点指向结果节点的有方向的边表示。在系统正常时,SDG 中的节点都处于正常状态,发生故障时故障节点的状态将会偏离正常值并发生报警。根据 SDG 给出的节点变化间的因果关系,并结合一定的搜索策略就可以分析出故障所有可能的传播路径,判明故障发生的原因,并且得到故障在过程内部的发展演变过程。

故障树是一种特殊的逻辑图。基于故障树的诊断方法是一种由果到因的分析过程,它从系统的故障状态出发,逐级进行推理分析,最终确定故障发生的基本原因、影响程度和发生概率^[14]。

基于图论的故障诊断方法具有建模简单、结果易于理解和应用范围广等特点。但是当系统比较复杂时,这类方法的搜索过程会变得非常复杂,而且诊断正确率不高,可能给出无效的故障诊断结果。

(2) 专家系统^[15]

基于专家系统(Expert System)的故障诊断方法利用领域专家在长期实践中积累起来的经验建立知识库,并设计一套计算机程序模拟人类专家的推理和决策过程进行故障诊断。专家系统主要由知识库、推理机、综合数据库、人机接口及解释模块等部分构成。

知识库和推理机是专家系统的核心,传统专家系统中,专家知识常用确定性的 IF - THEN 规则表示。通常专家知识不可避免地具有不确定性。模糊专家系统在专家知识的表