



“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

故障诊断的不确定性与知识获取

· 黄文涛 著 ·



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21 世纪先进制造技术丛书

故障诊断的不确定性与知识获取

黄文涛 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书首先在介绍故障诊断概念体系的基础上,阐述了故障诊断的信息模型及其不确定性度量,并具体研究了包含不完备信息、不一致信息的不确定故障诊断系统的知识获取技术;然后以此为基础,研究了基于共振稀疏分解法的滚动轴承早期故障微弱信号检测技术、基于小波包技术的齿轮故障特征提取技术、基于流向图的齿轮故障诊断知识获取技术。

本书可供工程技术领域从事故障诊断及其相关研究的科技人员参考,也可为广大教师和学生提供有关故障诊断不确定性与知识获取方面深入学习的素材,对开展故障诊断的工程实践具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

故障诊断的不确定性与知识获取/黄文涛著. —北京:科学出版社, 2018.4
(“十二五”国家重点图书出版规划项目: 21 世纪先进制造技术丛书)

ISBN 978-7-03-056626-3

I. ①故… II. ①黄… III. ①故障诊断系统-研究 IV. ①TP277

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 035278 号

责任编辑: 裴 育 纪四稳 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 4 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 4 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 287 000

定价: 85.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编：熊有伦（华中科技大学）

编 委：（按姓氏笔画排序）

- | | |
|--------------------|-----------------|
| 丁 汉（上海交通大学/华中科技大学） | 张宪民（华南理工大学） |
| 王 煜（香港中文大学） | 周仲荣（西南交通大学） |
| 王田苗（北京航空航天大学） | 赵淳生（南京航空航天大学） |
| 王立鼎（大连理工大学） | 查建中（北京交通大学） |
| 王国彪（国家自然科学基金委员会） | 柳百成（清华大学） |
| 王越超（中科院沈阳自动化所） | 钟志华（湖南大学） |
| 冯 刚（香港城市大学） | 顾佩华（汕头大学） |
| 冯培恩（浙江大学） | 徐滨士（解放军装甲兵工程学院） |
| 任露泉（吉林大学） | 黄 田（天津大学） |
| 刘洪海（朴次茅斯大学） | 黄 真（燕山大学） |
| 江平宇（西安交通大学） | 黄 强（北京理工大学） |
| 孙立宁（哈尔滨工业大学） | 管晓宏（西安交通大学） |
| 李泽湘（香港科技大学） | 雒建斌（清华大学） |
| 李涤尘（西安交通大学） | 谭 民（中科院自动化研究所） |
| 李涵雄（香港城市大学/中南大学） | 谭建荣（浙江大学） |
| 宋玉泉（吉林大学） | 熊蔡华（华中科技大学） |
| 张玉茹（北京航空航天大学） | 翟婉明（西南交通大学） |

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪,先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点,同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展,为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术,出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合,产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战,要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展,激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际间的学术交流与合作,提升制造学科的学术水平。我们相信,有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,本丛书将为发展制造科学,推广先进制造技术,增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物,在制造业中的应用范围很广,从喷漆、焊接到装配、抛光和修理,成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科,已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一,并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展,因此,本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后,我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008年4月

前 言

现代故障诊断技术是一门涉及机械、信息、计算机、人工智能等多学科，并在其交叉点上生长出来的新兴学科。随着检测技术和存储能力的不断提高，人们经常面对大量乃至海量的诊断数据，然而对诊断决策有价值的知识却非常匮乏。“数据丰富、知识贫乏”是当前故障诊断面临的难题，同时也是建造智能诊断系统的瓶颈。现代机械设备的工况复杂、运行环境恶劣，使得设备本身状态信息表露不完全；同时，人类实践总是受到客观环境和条件的限制，所获得的描述故障模式的诊断信息常有某种程度的不确定性，这些在时间、空间上都可能不确定的诊断信息包含大量反映设备运行特征的信息。目前，广泛应用的各种基于数据驱动的故障诊断知识获取方法，如神经网络、专家系统、多变量统计方法等，大多是针对诊断信息确定的故障诊断问题，从而导致在知识获取中无法充分利用不确定诊断信息，以至于故障诊断结果的正确性难以保证，限制了诊断技术的推广和应用。因此，故障诊断的不确定性与知识获取技术，是一个需要进一步深入研究的科学问题，该问题的解决对提高重大装备和复杂系统的可靠性、安全性和服役寿命具有重要的意义。

本书是作者近年来在故障诊断不确定性与知识获取等方面主要研究成果的总结，书中主要以粗糙集等不确定性分析方法为工具，系统阐述故障诊断信息系统中不确定性的表示、度量与计算，并对包含不完备信息、不一致信息的故障诊断知识获取技术进行研究，反映了当前该领域的最新研究进展和成果。全书共 6 章，第 1 章为故障诊断的不确定性分析方法，在介绍故障诊断概念体系的基础上，综述概率论、证据理论、模糊集理论、灰色关联度、可拓理论及粗糙集理论在故障诊断中的应用。第 2 章为故障诊断的信息模型及其不确定性度量，分析故障诊断不确定性的含义和具体类型；基于代数的观点和信息论的观点，分别研究故障诊断决策系统的不确定性度量。第 3、4 章具体研究包含不完备信息、不一致信息的不确定故障诊断系统的知识获取技术。第 5 章研究基于共振稀疏分解法的滚动轴承早期故障微弱信号检测技术。第 6 章研究基于小波包技术的齿轮故障特征提取技术和基于流向图的齿轮故障诊断知识获取技术。

本书的出版得到了国家自然科学基金(51175102)、高等学校博士学科点专项科研基金(200802131078)、中国博士后科学基金(20070410888)、国家科学技术学术著作出版基金等多个项目的支持。

本书由黄文涛撰写，作者所在课题组的研究生刘引峰、牛培路、孙宏健、姜允川、孔繁朝、罗嘉宁等都参与了书稿的整理和校对工作。特别感谢导师赵学增教授，是他多年悉心的指导和培养，引导作者走上了科学研究的道路。

由于作者水平有限，而且部分内容是课题组的阶段性研究成果，书中难免存在疏漏与不足之处，恳请广大读者批评指正。

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 故障诊断的不确定性分析方法	1
1.1 故障诊断的概念体系	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 故障诊断的基本概念	2
1.1.3 故障的基本特征	4
1.1.4 故障诊断的基本过程	6
1.2 不确定性分析方法在故障诊断中的应用	7
1.2.1 基于概率论的方法	7
1.2.2 基于证据理论的方法	8
1.2.3 基于模糊集理论的方法	9
1.2.4 基于灰色关联度的方法	9
1.2.5 基于可拓理论的方法	10
1.3 基于粗糙集理论的不确定性分析方法	10
1.3.1 粗糙集理论的产生和发展	11
1.3.2 基于粗糙集理论的不确定性分析研究进展	11
1.3.3 粗糙集理论在故障诊断领域中的应用	13
1.4 本书的选题背景	14
参考文献	14
第 2 章 故障诊断的信息模型及其不确定性度量	20
2.1 引言	20
2.2 故障诊断的信息解释及其不确定性	21
2.2.1 故障诊断的信息解释	21
2.2.2 故障诊断不确定性的含义	23
2.3 故障诊断不完备信息的产生原因及语义解释	25
2.3.1 故障诊断不完备信息的产生原因	25
2.3.2 不完备诊断信息的语义解释	27
2.4 故障诊断的信息模型	28

2.4.1 故障诊断信息的分类	28
2.4.2 故障诊断的信息模型	29
2.5 故障诊断信息系统	30
2.6 不完备故障诊断信息系统的关系模型	31
2.6.1 不完备故障诊断信息系统的定义	31
2.6.2 容差关系	33
2.6.3 非对称相似关系	33
2.6.4 限制容差关系	35
2.6.5 约束非对称相似关系	36
2.6.6 改进限制相容关系	37
2.7 基于代数观点的故障诊断决策系统的不确定性度量	38
2.7.1 故障诊断决策系统的不一致性及其度量	38
2.7.2 故障诊断决策系统的不完备性及其度量	40
2.7.3 故障诊断决策系统的不确定性度量	44
2.8 基于信息论观点的故障诊断决策系统的不确定性度量	44
2.8.1 故障熵的定义	45
2.8.2 基于故障熵的故障诊断决策系统的不确定性度量	46
2.9 本章小结	48
参考文献	48
第3章 基于不完备信息的故障诊断知识获取	51
3.1 引言	51
3.2 粗糙集理论及流向图的基本概念	52
3.2.1 概述	52
3.2.2 信息系统和决策系统	53
3.2.3 粗糙集及其数字特征	55
3.2.4 知识约简	57
3.2.5 极大相容块及其性质	59
3.2.6 流向图的基本概念	63
3.3 不完备故障诊断决策表的广义决策规则	67
3.4 不完备故障诊断决策系统的约简	70
3.4.1 分辨矩阵基元的定义	71
3.4.2 面向对象的分辨矩阵	72
3.4.3 面向对象-极大相容块的分辨矩阵	73
3.4.4 面向极大相容块的分辨矩阵	74

3.5 不完备故障诊断决策系统的规则获取	75
3.6 基于不完备故障诊断决策流向图的诊断知识表示	79
3.6.1 故障诊断领域知识表示面临的问题	80
3.6.2 不完备故障诊断决策流向图	80
3.7 基于不完备故障诊断决策流向图的知识获取	90
3.8 本章小结	96
参考文献	97
第4章 基于不一致信息的故障诊断知识获取	100
4.1 引言	100
4.2 故障诊断信息不一致的原因及实例集的规律性	101
4.3 基于不一致信息的故障诊断知识获取模型	102
4.3.1 心理学、机器学习中的“规则+例外”模型	103
4.3.2 改进的“规则+例外”故障诊断知识获取模型	105
4.4 诊断实例	107
4.4.1 诊断问题的描述	107
4.4.2 故障诊断决策表的建立	108
4.4.3 故障诊断规则、例外子表的形成	109
4.4.4 故障征兆属性约简	110
4.4.5 故障征兆属性值约简及评价指标	112
4.4.6 例外的形成及其评价	114
4.4.7 诊断问题的求解	114
4.4.8 与其他方法的比较	115
4.5 故障诊断知识获取模型结构	117
4.6 本章小结	118
参考文献	118
第5章 滚动轴承早期故障微弱信号检测	121
5.1 引言	121
5.1.1 滚动轴承故障诊断技术发展	121
5.1.2 常用的滚动轴承故障信息提取方法	122
5.1.3 滚动轴承早期故障信息提取面临的问题	124
5.2 滚动轴承故障信号特性分析	126
5.2.1 滚动轴承各元件的常见故障	126
5.2.2 滚动轴承疲劳剥落动力学模型	127
5.2.3 滚动轴承疲劳剥落振动信号特征	131

5.2.4 滚动轴承故障信号成分分析	134
5.3 共振稀疏分解及其仿真分析	135
5.3.1 共振稀疏分解的理论基础	135
5.3.2 共振稀疏分解的参数影响分析	141
5.3.3 基于共振稀疏分解的滚动轴承模拟故障信号分析	143
5.4 共振稀疏分解在滚动轴承微弱故障信息提取中的研究	146
5.4.1 滚动轴承故障信号共振稀疏分解的参数确定	146
5.4.2 故障信息提取方法	149
5.4.3 高、低共振分量在故障信息提取上的对比分析	149
5.5 实验验证及结果分析	154
5.5.1 实验平台和实验对象	154
5.5.2 实验方案设计	155
5.5.3 实例分析	156
5.5.4 对比分析	173
5.6 本章小结	177
参考文献	177
第 6 章 齿轮故障诊断的特征提取与知识获取	181
6.1 引言	181
6.1.1 齿轮的啮合振动分析	181
6.1.2 齿轮故障信号特征	185
6.1.3 齿轮的故障特征参数	187
6.2 基于小波包分析的齿轮故障特征提取	189
6.2.1 小波包及其时频分析特性	189
6.2.2 基于小波变换的噪声消除	195
6.2.3 基于小波包的故障特征提取	199
6.3 齿轮故障诊断的实验研究	201
6.3.1 齿轮故障诊断实验设计	201
6.3.2 齿轮振动信号的特征提取	202
6.3.3 基于流向图的齿轮故障知识获取	206
6.4 本章小结	214
参考文献	214

第 1 章 故障诊断的不确定性分析方法

1.1 故障诊断的概念体系

1.1.1 概述

随着现代工业及科学技术的迅速发展,生产设备日益向大型化、复杂化及自动化方向发展。大型的设备系统往往由大量的工作部件组成,不仅同一设备的不同部分之间相互关联、紧密耦合,而且不同设备之间也存在着紧密的关系,并在生产过程中形成了一个整体。这种体系的建立,一方面提高了系统的自动化水平,为生产带来了可观的经济效益,另一方面,影响系统运行的因素骤增,使其产生故障的概率越来越大。其中任何一个子设备或零件的故障都可能引起链式反应,导致整个设备甚至整个生产系统无法正常运行,轻则造成巨大的经济损失,重则还会产生严重的灾难性伤亡和社会影响。一直以来,因关键设备故障引起的灾难性故障时有发生,例如,1986 年美国“挑战者”号航天飞机发生空中爆炸,7 名宇航员全部遇难,总计损失达 12 亿美元。1986 年苏联切尔诺贝利核电站大量放射性元素外泄,2000 余人遇难,几万居民撤离,损失达 30 亿美元,并且污染波及周边各国。我国因设备发生故障引起的损失也是十分惊人的,2003~2004 年,在浙赣线、京沪线等处,多次发生因车轴和车轮疲劳断裂造成的货物列车脱轨重大事故,直接与间接经济损失超过 20 亿元。

2003 年 2 月 1 日,“哥伦比亚”号航天飞机失事,7 名宇航员遇难。消息传来,举世震惊,这不仅是美国的巨大损失,也是人类探索宇宙事业的重大挫折。据报道,“哥伦比亚”号航天飞机失事造成的全部损失,除了高达 4 亿美元的调查费用,还包括价值 20 亿美元的“哥伦比亚”号航天飞机以及超过 40 亿美元的航天飞机运作成本。2003 年 8 月 14 日,美国、加拿大大停电是历史上最大的停电事故,事故期间上百台机组跳机,5000 万人失电,由此引发的工厂停工和其他经济活动的停止使美国公司遭受了 40 亿~100 亿美元的巨额损失。受停电事故的影响,加拿大 2003 年 8 月的国内生产总值下降了 0.7 个百分点,安大略湖地区的制造业损失高达 23 亿美元。2005 年 8 月,由于转向器左侧横拉杆内球头与球头座严重磨损而分离脱落所导致的山西“8·27”特大交通事故,造成 11 人死亡,12 人受伤。俄罗斯波音 737 客机、法国 A330 客机分别在 2008 年、2009

年发生了由机械故障导致的坠毁事件，机上人员无一生还。2011年，上海地铁10号线因信号设备故障造成271人受伤。2016年7月19日，我国台湾发生一起由车门故障引发的游览车重大事故，24名游客和2名司导人员遇难。这些严重的灾难性事故提醒人们，现代设备系统运行的安全性和可靠性已成为人类必须解决的刻不容缓的问题。近几十年来，现代设备的状态监测和故障诊断技术日益受到各国政府和科研机构的高度重视，得到了迅速发展，并在机械工程、电力系统、航空航天、自动控制等各个领域取得了大量的应用成果^[1-4]。

1.1.2 故障诊断的基本概念

故障诊断技术是有关设备运行、维护的一项新兴技术。设备故障诊断技术涉及机械、信息、计算机、人工智能等许多学科知识，是一门综合性的学科。在过去的几十年中，很多前沿学科的成果引入故障诊断领域，使故障诊断从方法到手段都有了很大的发展，完全改变了过去凭直觉的耳听、眼看、手摸的落后状态，尤其是计算机技术的突飞猛进，使诊断技术具有前所未有的应用价值和可推广性。故障诊断技术有很强的工程背景，具有重要的实用价值，并且以深厚的理论为基础。系统论、信息论、控制论、非线性科学等最新的技术在其中都有广泛的应用，现有的故障诊断技术是一门涉及多种学科，并在其交叉点上生长出来的新兴学科^[5]。并且随着前沿科学的发展，故障诊断技术将会对国民经济的发展起到越来越重大的作用。从科学的角度出发，深入研究设备故障诊断的基本概念与基本体系；用系统论的观点，深入阐明机械设备的系统特点以及故障、征兆与特征信号的基本概念；解释故障诊断的基本过程与故障特性，如层次性、相关性、延时性和不确定性等问题，建立比较广泛而统一的诊断问题的概念体系，将使故障诊断技术的研究更加系统性和理论化，这将对发展设备故障诊断学科体系起到指导和催化作用。

为了深入研究机械设备的诊断问题，有必要深入了解与掌握机械设备及其故障的特性。从系统论的观点出发，机械设备也是一个系统，同其他系统一样，也是元素按照一定的规律聚合而成的，也就是说，是由“元素”加上元素之间的“联系”而构成的。当然，“元素”也可以是子系统，子系统的“元素”还可以是更深层次的子系统。以此类推，直至最底层的“元素”是物理元件^[6,7]。

1. 系统

系统是元素按照一定的规律聚合而成的有机联结体，也就是说，系统是由“元素”加上元素之间的“联系”而构成的。

2. 系统的输出

系统的输出是指系统的所有行为，即系统的所有表现形式。

3. 系统的功能

系统的功能是指在系统设计时，要求系统所要实现的一些行为。

4. 系统的约束条件

系统的约束条件是指在系统工作时，所应满足规定技术要求的某些行为。

5. 诊断对象

根据系统论的观点，诊断对象可以是一个比较复杂的大系统（甚至是巨系统），也可以是一个简单的元件或部件（子系统）。严格地说，从不同的层次观察可对诊断对象有不同的划分。在本书如无特别说明，诊断对象都被视为系统，其诊断也就可以看成系统诊断。

6. 故障

故障是指系统的结构处于不正常状态（劣化状态），即偏离了预期的状态，从而导致系统不能在规定的时间内和工作条件下完成预期的功能，或不能满足预期的约束条件。

7. 特征信号

特征信号是指系统的某部分输出，它与系统的有关状态密切相关，包含丰富的系统有关状态的信息，可以有效地识别出系统的有关状态以及相应元素和联系的有关状态。显然，特征信号中必然包含系统中相应的元素、联系的相关状态信息。因此，如何选取包含状态信息量最多的特征信号，成为机械设备诊断学的重要研究内容之一。

8. 征兆

征兆是指对特征信号加以处理而提取出的、直接用于故障诊断的信息。显然，特征信号本身有时也可以直接作为征兆。征兆是对系统运行时表现出的特征信号的描述，信号的特征只有被反映出来，才成为征兆。征兆在更高的抽象层次上反映系统的状态，一个特征信号可能提取出多个征兆，它们从不同的侧面和不同的角度反映系统的有关状态。因此，如何提取最有效的用于诊断的征兆，也是机械设备诊断学中的重要研究内容之一。

9. 故障诊断

故障诊断是指根据系统的特征信号（包括正常的和异常的）和其他诊断信息，查明导致系统发生故障的指定层次的子系统或联系，并找出引起这些子系统或联系发生故障的初始原因。

故障诊断的基本思想一般可以表述为^[2]：设被检测对象全部可能发生的状态（正常状态和故障状态）组成状态空间 S ，它的可观测量特征的取值范围的全体构成特征空间 Y 。当系统处于某一状态 s 时，系统具有确定的特征 y ，即存在映射 $g: S \rightarrow Y$ ；反之，一定的特征也对应确定的状态，即存在映射 $f: Y \rightarrow S$ 。

状态空间与特征空间的关系可用图 1.1 表示。

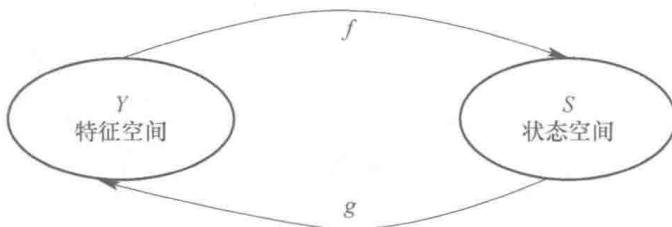


图 1.1 故障诊断表述

故障诊断的目的在于根据可测量的特征向量来判断系统处于何种状态，也就是找出映射 f 。若系统可能发生的状态是有限的，如可能发生 n 种故障，这里假设系统正常状态为 s_0 ，各个故障状态为 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 。当系统处于状态 s_i 时，对应的可测量特征向量为 $Y_i = (y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{im})$ 。故障诊断就是由特征向量 $y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ ，求出它所对应的状态 s 的过程，这样，故障诊断过程就变成按特征向量对被测系统进行状态分类的模式识别问题。

1.1.3 故障的基本特征

根据上述对系统的定义，系统可以分为三类：简单系统、复合系统、复杂系统。因此，诊断问题也可以被划分为三类：简单诊断问题、复合诊断问题、复杂诊断问题。显然，凡是适合复杂系统诊断问题的诊断策略与方法也一定适合复合诊断问题和简单诊断问题。一般来说，复杂系统的故障具有如下几个基本特性^[7]。

1. 复杂性

复杂性是复杂设备系统故障的最基本特性。由于构成设备的各部件之间相互联系、紧密耦合，故障原因与故障征兆之间表现出极其错综复杂的关系，即同一种故障征兆往往对应着几种故障原因，同一种故障原因又会引起多种故障征兆，

这种原因与征兆之间不明确的对应关系,使得故障诊断具有很大的复杂性。

2. 层次性

层次性是系统故障的最基本特性,是由系统结构的层次性决定的,是故障的“纵向性”。任何故障都是同系统的某一层次相联系的,高层次的故障可以由低层次的故障引起,而低层次的故障必定引起高层次的故障。故障的层次性为制定故障诊断的策略和模型提供了方便,使复杂系统诊断问题的求解效率更高。

3. 相关性

相关性是系统故障的“横向性”,是由系统各元素间的联系决定的。系统的某一层次某个元素或联系发生故障后,势必导致与它相关的元素或联系的状态也发生变化,进而导致这些元素或联系的输出发生变化,致使该层次产生新的故障,这就带来了系统中同一层次有多个故障同时存在的现实。任何一个原发故障都存在多条潜在的故障传播途径,因而可能引起多个故障并存,这就是系统故障的相关性。因此,多故障并存是复杂系统故障的重要特征,而多故障诊断是复杂系统诊断问题中的一个关键问题。

4. 延时性

故障的传播机理表明,从原发性故障到系统级故障的发生、发展与形成是一个由量变到质变的过程,这表明故障具有“时间性”。这一特性为故障的早期诊断与预测提供了机会,从而达到“防患于未然”的目的。故障的延时性是实现故障的预测与早期诊断的基础。

5. 不确定性

不确定性是复杂系统故障的一个重要特征,也是目前智能故障诊断理论与方法的一个重要研究内容。不确定性产生的原因复杂,涉及主观因素和客观因素,给实际的诊断工作带来了很大的困难,是目前诊断理论与实践中的一个研究热点。引起系统故障不确定性的因素有以下几个方面。

1) 系统的元素特性和联系特性的不确定性

复杂系统中,在不同的时间、不同的工作环境下,各层次的元素特性与各元素间的联系特性是不可能完全确定的,从而导致系统、元素与联系的状态和行为也不可能是完全确定的。

2) 故障检测与分析装置特性的不确定性

故障检测与分析装置一般也属于复杂系统,因此其特性也不可能完全确定,这就决定了故障检测与分析结果的不确定性。这种不确定性是由“主观”因素造