

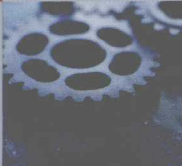
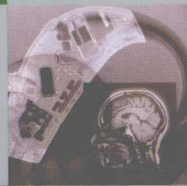


国防特色教材 · 机械工程

设备故障诊断技术

夏虹 刘永阔 谢春丽 编著

The Fault Diagnosis
Technology of Equipment



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



国防特色教材·机械工程

设备故障诊断技术

夏 虹 刘永阔 谢春丽 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书共分9章,介绍了故障诊断技术涉及的概念、内容、诊断的任务、故障诊断技术中涉及的动态随机数据的处理及分析方法。本书主要是从设备故障诊断的基本原理加以阐述,书中着重介绍基于统计理论的故障诊断方法,基于模糊理论的故障诊断方法,基于故障树分析的故障诊断方法,基于专家系统原理的故障诊断方法,基于神经网络的故障诊断方法,基于数据融合的故障诊断方法,以及基于相关技术集成的故障诊断方法。

本书既可作为高等学校机械、能源、运输、航空航天等领域相关专业研究生教材,也可供从事设备故障诊断工作的专业人员、工程技术人员阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

设备故障诊断技术/夏虹等编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.11

ISBN 978-7-5603-2960-4

I. 设… II. 夏… III. 设备-故障诊断 IV. TB4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 194709 号

设备故障诊断技术

夏虹 刘永阔 谢春丽 编著
责任编辑 王桂芝 孙连嵩

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006) 发行部电话:0451-86418760 传真:0451-86414749

<http://hitpress.hit.edu.cn>

哈尔滨市节能印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:18.25 字数:400千字

2010年3月第1版 2010年3月第1次印刷 印数:3 000册

ISBN 978-7-5603-2960-4 定价:35.00元

前 言

设备故障诊断技术作为多学科交叉融合形成的技术,它的发展是伴随其他技术的进步而不断发展完善的。随着工业领域生产过程规模的不断扩大,机组、设备的装机容量越来越大,对自动化水平的要求也越来越高,机组设备运行的安全可靠性和要求越来越高,这对设备的状态监测、故障诊断技术的实施提出了更高的要求。随着计算机技术的普遍应用,人工智能、信号处理及特征提取技术的发展,设备故障诊断的智能化水平越来越高,功能也越来越丰富,已成为支持系统运行的一个重要组成部分。

本书参考了大量近年来相关的文献资料及论著,并在有关章节中加进了作者近年来研究所取得的部分成果。作为教材,本书主要介绍设备故障诊断技术涉及的基本原理、方法,并从信号分析原理、处理方法及智能诊断原理、方法和技术等角度进行系统的介绍,使学习者建立起设备故障诊断技术的整体概念,为其今后从事相关工作奠定基础。

本书为研究生教材,共分9章:第1章介绍了故障诊断技术涉及的概念、内容、诊断的任务,诊断的一般过程,诊断系统的评价指标,诊断方法的研究现状及诊断技术的发展趋势;第2章介绍了故障诊断技术中涉及的动态随机数据的处理方法,包括数据的获取、检验、分析流程及统计参量的数值分析方法、时频分析离散傅里叶变换及小波分析原理等;第3章介绍了基于统计理论的时序分析诊断方法、贝叶斯决策分类诊断方法、主分量分析诊断方法、灰色关联度分析诊断方法及支持向量机诊断方法等;第4章介绍了基于模糊理论的直接诊断方法和间接诊断方法,模糊综合诊断及模糊聚类诊断方法等;第5章介绍了故障树分析的基本原理、分析方法及诊断实例;第6章介绍了基于专家系统原理的故障诊断方法,故障诊断的专家知识构成、知识的表示、获取方法及应用实例等;第7章介绍了基于神经网络故障诊断的网络结构,如用于模式识别的故障诊断神经网络及用于知识处理的故障诊断神经网络等网络结构,诊断的方法及应用;第8章介绍了数据

融合诊断方法,包括数据融合的原理、故障诊断的数据融合模型、基于统计的融合诊断方法、基于D-S理论的融合诊断方法、基于参数估计的融合诊断方法、基于人工智能的融合诊断方法、基于模糊逻辑的融合诊断方法等;第9章介绍了基于相关技术集成的故障诊断方法,包括神经网络与模糊逻辑集成诊断方法、神经网络与专家系统集成诊断方法、神经网络与小波分析结合的集成诊断方法等。全书由哈尔滨工程大学夏虹教授统稿,第1、2、3、5章由夏虹编写,第4、6、7章由刘永阔编写,第8章由谢春丽编写,第9章由谢春丽、刘永阔共同编写。在本书的编写过程中,博士研究生慕昱,硕士研究生黄华、罗端、张亚男等做了大量的文字校对和制图等工作。

鉴于作者水平有限,书中难免有欠缺、疏漏之处,恳请广大读者不吝赐教,在此,谨表谢意!

作 者

2009年10月

目 录

第 1 章 设备故障诊断概述	1
1.1 设备故障诊断的基本概念和特点	1
1.1.1 设备故障的基本概念	1
1.1.2 设备故障诊断的内容及特点	2
1.2 故障诊断的基本问题	4
1.2.1 故障分类	4
1.2.2 故障诊断的任务	4
1.2.3 评价故障诊断系统的性能指标	5
1.3 设备故障诊断的知识构成和求解过程	6
1.3.1 设备故障诊断的知识构成	6
1.3.2 设备故障诊断的求解过程	7
1.4 设备故障诊断的基本方法及研究现状	7
1.4.1 基于解析模型的故障诊断方法	8
1.4.2 基于知识的故障诊断方法	9
1.4.3 基于信号处理的故障诊断方法	11
1.4.4 其他故障诊断方法	11
1.4.5 设备故障诊断技术研究的热点	12
1.5 设备故障诊断技术的发展趋势	13
复习思考题	14
第 2 章 故障诊断中的数据处理	15
2.1 数据处理的有关知识	15
2.1.1 动态测试数据的分类	15
2.1.2 随机过程的基本概念	20
2.1.3 测试数据处理方法	37
2.1.4 数据检验	38
2.1.5 数据分析流程	39
2.2 随机数据统计参量的数值分析	40

2.2.1 估计理论的基本概念	40
2.2.2 均值和方差的计算	41
2.3 离散傅里叶变换(DFT)	42
2.3.1 采样与混叠	42
2.3.2 截断与泄漏	45
2.3.3 频率采样(延拓)	45
2.4 小波分析的基本原理	47
2.4.1 小波变换	47
2.4.2 小波变换的直观理解及其工程解释	50
2.4.3 小波包分析	52
2.4.4 适合故障信号分析的小波函数选择	55
复习思考题	57
第3章 基于统计理论的诊断方法	58
3.1 Bayes 决策诊断方法	58
3.1.1 概 述	58
3.1.2 基于最大后验概率的 Bayes 诊断	59
3.1.3 基于最小风险的 Bayes 诊断	61
3.2 时序模型诊断法	63
3.2.1 ARMA, AR 和 MA 模型	64
3.2.2 故障诊断时序方法的步骤	65
3.2.3 故障诊断时序方法的内容	66
3.2.4 ARMA 模型的建模	67
3.2.5 根据模型参数进行故障诊断	69
3.2.6 距离判别函数故障诊断法	70
3.3 序贯模式分类故障诊断法	75
3.3.1 概 述	75
3.3.2 序贯分类原理及步骤	75
3.3.3 Bayes 序贯判别步骤	76
3.4 主分量分析法	77
3.4.1 引 言	77
3.4.2 主分量分析	77
3.5 线性判别函数法	79
3.5.1 引 言	79

3.5.2 Fisher 判别式分析(FDA)	80
3.6 灰色系统的关联分析诊断方法	81
3.6.1 概 述	81
3.6.2 关联度分析法在故障诊断模式识别中的应用	82
3.6.3 灰色预测在设备状态趋势预报中的应用	86
3.7 基于支持向量机的故障诊断方法	89
3.7.1 支持向量机的基本原理	89
3.7.2 多类支持向量机	92
3.7.3 支持向量机的故障诊断方法	93
3.7.4 实 例	94
复习思考题	97
第4章 基于模糊理论的诊断方法	98
4.1 模糊集合理论基础	98
4.1.1 模糊集与隶属函数	98
4.1.2 隶属函数的确定	99
4.1.3 常用的隶属函数图表	102
4.1.4 模糊集表示方法及其运算	105
4.2 基于模糊模式的故障诊断方法	107
4.2.1 模糊模式识别的直接方法	107
4.2.2 模糊模式识别的间接方法	109
4.3 故障诊断的模糊综合评判原则	111
4.3.1 综合评判的数学原理	111
4.3.2 模糊综合评判的五种具体模型	113
4.3.3 综合评判模型的故障诊断应用实例	115
4.3.4 几种综合评判模型的适用范围	117
4.3.5 故障诊断的多级模糊综合评判方法	118
4.4 故障诊断的模糊聚类分析方法	121
复习思考题	125
第5章 故障树分析诊断方法	126
5.1 故障树分析概述	126
5.1.1 故障树分析及其特点	126
5.1.2 故障树分析使用的符号	127

5.2 故障树分析的一般步骤及表述	128
5.2.1 故障树分析的步骤	128
5.2.2 故障树建造的一般方法	129
5.2.3 故障树的结构函数	132
5.3 故障树的分析	134
5.3.1 故障树的定性分析	135
5.3.2 故障树的定量分析	136
5.4 诊断实例	139
复习思考题	141
第6章 专家系统故障诊断方法	142
6.1 专家系统概述	142
6.1.1 专家系统的基本概念	142
6.1.2 专家系统的结构	143
6.1.3 专家系统的特点	145
6.2 专家系统的知识表示	146
6.2.1 知识的层次结构	147
6.2.2 公共知识和私有知识	148
6.2.3 陈述性知识与过程性知识	148
6.2.4 对知识表示的要求	149
6.3 知识的产生式表示	150
6.3.1 产生式规则的形式	150
6.3.2 产生式系统	151
6.3.3 产生式表示的优缺点	152
6.4 知识的框架表示	153
6.4.1 框架表示的形式	153
6.4.2 框架表示下的推理	155
6.5 故障诊断专家系统的推理方式与控制策略	157
6.5.1 基于规则的诊断推理	157
6.5.2 基于模型的诊断推理	159
6.5.3 基于案例的诊断推理	160
6.5.4 不精确推理	164
6.6 故障诊断专家系统知识的获取	168
6.6.1 间接获取方式	168

6.6.2 直接获取方式	169
6.7 故障诊断专家系统的开发工具	170
6.7.1 骨架型开发工具	170
6.7.2 语言型开发工具	171
6.7.3 构造辅助工具	171
6.7.4 支撑环境	171
6.8 故障诊断专家系统应用实例	172
6.8.1 核电站常见的故障模式	173
6.8.2 核电站故障诊断专家系统	175
复习思考题	179
第7章 神经网络故障诊断方法	180
7.1 概 述	180
7.1.1 神经网络故障诊断的优越性及其存在的问题	180
7.1.2 神经网络故障诊断研究现状及其发展	181
7.2 神经网络基础	182
7.2.1 神经元模型	182
7.2.2 神经网络的拓扑结构	184
7.2.3 神经网络的学习规则	185
7.3 典型结构的神经网络及故障诊断方法	188
7.3.1 反向传播(BP)网络	189
7.3.2 径向基函数(RBF)网络	191
7.3.3 Hopfield 网络	192
7.3.4 自组织特征映射网络	194
7.3.5 递归神经网络	195
7.3.6 模式识别故障诊断方法	196
7.3.7 知识处理故障诊断方法	197
7.4 神经网络故障诊断的方式和结构	199
7.4.1 神经网络用于故障诊断的方式	199
7.4.2 神经网络用于故障诊断的结构	199
7.4.3 神经网络用于机械设备故障诊断的一般方法	201
7.5 神经网络故障诊断实例	202
复习思考题	203

第 8 章 数据融合故障诊断方法	205
8.1 数据融合的原理	205
8.1.1 数据融合的定义	206
8.1.2 数据融合的过程	206
8.1.3 数据融合的时间性与空间性	206
8.2 数据融合的结构	208
8.2.1 数据融合的结构形式	208
8.2.2 数据融合的功能模型	209
8.2.3 数据融合的级别	210
8.3 数据融合在故障诊断中的优势	212
8.3.1 数据融合在故障诊断中应用的实际背景	212
8.3.2 数据融合在故障诊断中应用的理论基础	214
8.4 数据融合故障诊断模型	215
8.4.1 数据融合诊断级别	216
8.4.2 数据融合故障诊断过程	217
8.4.3 数据融合故障诊断系统	218
8.5 数据融合故障诊断方法	219
8.5.1 基于统计的融合诊断方法	219
8.5.2 D-S 证据理论的融合诊断方法	221
8.5.3 基于认识模型的融合诊断方法	224
8.5.4 基于参数估计的融合诊断方法	224
8.5.5 基于滤波技术的融合诊断方法	225
8.5.6 基于人工智能的融合诊断方法	225
8.5.7 基于模糊逻辑的融合诊断方法	227
8.5.8 神经网络与 D-S 证据理论相结合的融合诊断方法	227
8.6 数据融合故障诊断实例	228
8.6.1 数据融合诊断系统结构	228
8.6.2 基于数据融合的汽轮机转子故障诊断系统	230
复习思考题	233
第 9 章 集成技术的故障诊断方法	234
9.1 集成的概念	234
9.1.1 诊断信息集成	234

9.1.2 诊断知识集成	235
9.1.3 诊断方法集成	236
9.2 集成化故障诊断体系结构	236
9.2.1 集成化故障诊断模型	236
9.2.2 集成化故障诊断系统结构	237
9.2.3 集成化故障诊断系统功能及其实现	239
9.3 集成化推理和诊断策略	239
9.3.1 集成化推理机制	240
9.3.2 集成化诊断策略	240
9.4 神经网络与模糊逻辑集成故障诊断	241
9.4.1 模糊逻辑系统与神经网络	241
9.4.2 神经网络-模糊推理协作系统	243
9.4.3 神经网络与模糊逻辑系统结合的基本方式	244
9.4.4 模糊神经网络模型	245
9.4.5 模糊神经网络(FNN)学习方法	247
9.5 基于神经网络的故障诊断专家系统	249
9.5.1 专家系统与神经网络的特点	249
9.5.2 专家系统与神经网络结合的途径和方法	250
9.5.3 基于神经网络的故障诊断专家系统	253
9.6 基于小波神经网络的故障诊断	255
9.6.1 小波分析和神经网络的结合途径	255
9.6.2 小波分析和神经网络的松散型结合	256
9.6.3 从函数逼近到小波神经网络	262
9.6.4 小波神经网络的训练	264
9.6.5 小波神经网络函数逼近特性分析	266
9.6.6 多维小波神经网络	267
复习思考题	268
参考文献	269

第 1 章 设备故障诊断概述

随着现代科学技术水平的日益提高,尤其是计算机科学和控制科学的飞速发展,一方面一些装备系统(以下简称为系统)的规模和复杂程度迅速增加;另一方面系统中出现的某些微小故障若不能及时检测并排除,就有可能造成整个系统的失效、瘫痪,甚至导致巨大的灾难性后果,这与系统庞大的规模和高度的复杂性形成了尖锐的矛盾。因此,如何提高系统的安全性和可靠性,防止或杜绝影响系统正常运行的故障的发生和发展就成为一个重要的有待解决的问题,也使得故障诊断技术成为一个十分活跃的研究领域。

设备状态监测和故障诊断技术最早起源于美国,1967 年,在美国国家宇航局(NASA)的倡导下,由美国海军研究室(ONR)主持成立了美国“机械故障预防小组”(Mechanical Fault Prevention Group, MFPG)。在英国,60 年代末至 70 年代初,以科拉科特(R. A. Collacott)为首的“英国机器保健中心”(U. K. Mechanical Health Monitoring Center)率先开展设备故障诊断技术研究工作,在宣传、培训、咨询、制订计划、故障分析以及诊断技术开发等多方面取得了很好的成效。欧洲其他国家的设备诊断技术研究也有不同程度的进展,在某些方面占据领先地位,如瑞典的 SPM 轴承监测技术,挪威的船舶诊断技术,丹麦的振动、噪声分析和声发射技术等。在日本,设备诊断技术在民用工业(如钢铁、化工和铁路等)部门发展迅速,并占有一定的优势。新日铁于 1971 年率先开展了设备故障诊断技术的开发研究工作,1976 年基本上进入实用阶段,开发完成了商品化的专用诊断仪器。我国自 20 世纪 80 年代中期开始设备故障诊断技术的研究,从整体上看,尚属于跟随性发展研究阶段,但在一些领域也取得了丰硕的成果,并已形成高校、研究所及工厂的梯队式研究、开发和应用模式。

1.1 设备故障诊断的基本概念和特点

1.1.1 设备故障的基本概念

1. 故障的定义

一般来说,设备出现故障的原因大致有以下几种情况:设备结构的破损(如设备零件的磨损、腐蚀)、材料的变质(如材料的老化等)、运行失效(如设备的松动引起的气、液介质堵塞、渗漏等)、运行环境变化(如工作温度、压力及各种射线等)。故障可以理解为设备或系统中至少一个重要变量或特性偏离了正常范围。广义地讲,故障可以理解为设备出现的任何异常现象,

表现出所不期望的特性。

2. 设备故障的基本特性

根据上述故障的定义,一旦故障出现,系统中至少有一个参量或特性偏离正常范围。因此故障诊断的目的是弄清产生故障的原因,以便消除故障,使系统恢复正常的工作。

由于产生故障的原因不同,各种故障的特性也不同,归纳起来,大致有以下几点:

(1)故障的层次性。设备有不同的层次,层次不同功能也不同,因而产生故障也有不同的层次。对复杂的设备,其结构可划分为系统、子系统、部件、零件等,因此故障也可能发生在系统、子系统、部件、零件等不同层次上,反映出故障的层次性。

(2)故障的传播性。故障沿一定方向传播,例如,由于某一层次中零件的失效产生故障,这一故障可以沿着零件—部件—子系统—系统纵向传播,逐级地呈现异常,也可能在各子系统之间甚至各系统零件与零件之间横向传播,反映出故障的传播性。

(3)故障的辐射性。故障的传播还可以在间接相连的同类零部件间传播,例如,转子轴系的某一轴承产生故障,有时会引起其他轴承的振动增大,而该轴承本身的振动变化反而不明显,反映出故障的辐射性。

(4)故障的延时性。故障的发生、发展和传播是一个过程,需要一定的时间,据此可以判断故障的性质和发生的位置,反映出故障的延时性。

(5)故障的相关性。一种故障可能对应着若干个异常现象(征兆),而某一种征兆也可能对应着若干故障,故障与征兆并非一一对应,它们之间存在着复杂的关系,反映出故障的相关性。

(6)故障的随机性。故障的发生一般为随机的,反映出故障的随机性。

1.1.2 设备故障诊断的内容及特点

1. 设备故障诊断技术的内容

设备故障诊断技术是模式识别理论在机械工程领域中的拓展,其实质是解决工程系统、运行设备的状态识别(即状态分类)问题。故障诊断技术主要包含三方面的内容:故障检测、故障隔离和故障辨识。所谓故障检测是判断系统中是否发生了故障及检测出故障发生的时刻;故障隔离就是在检测出故障后确定故障的位置和类型;故障辨识是指在分离出故障后确定故障的大小和时变特性。近几十年来,人们对故障诊断技术进行了深入广泛的研究,提出了众多可行的方法。

如果把设备的运行状态分为正常和异常两类,而异常的信号样本究竟又属于哪种故障,这是一个模式识别的问题。因此,故障诊断是利用被诊断设备运行中的各种状态信息和已有的各种知识进行信息的综合处理,最终得出关于设备运行状态和故障状况的综合评价过程。从

本质上讲,故障诊断是一个模式分类与识别的问题。设备诊断技术的内容可用图 1.1 来表示。

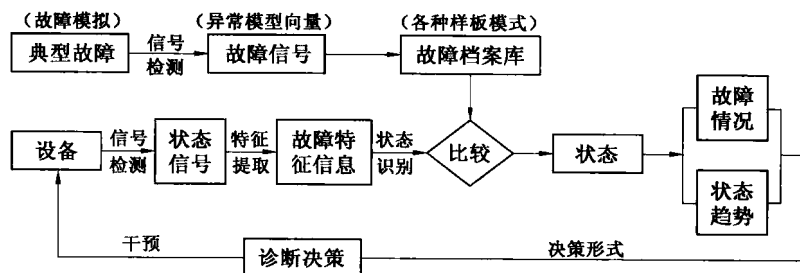


图 1.1 设备诊断技术的内容

2. 设备故障诊断的层次表示

从系统论的观点来看,设备是由有限个“元素”通过各种“联系”构成的多层次系统。因此,设备故障诊断的特点是基于系统的层次性的诊断过程,如图 1.2 所示。这一层次诊断网络分别由故障类层次子网络、结构类层次子网络、功能类层次子网络和传感器点阵层次子网络组成,对大型复杂设备,也可有设备级、子系统级、部件级、元件级等层次。这一层次网络图显示了设备各层次的结构、功能、故障和状态信息间的错综复杂的关系。

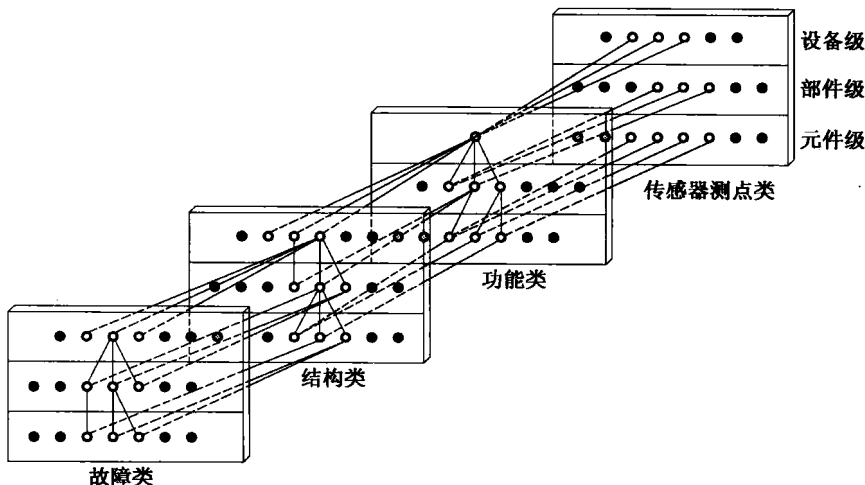


图 1.2 多维层次诊断网络模型

1.2 故障诊断的基本问题

1.2.1 故障分类

1. 按照故障存在的程度进行分类

(1)暂时性故障。这类故障带有间断性,是指在一定条件下系统所产生的功能上的故障,通过调整系统参数或运行参数、不需更换零部件即可恢复系统的正常功能。

(2)永久性故障。这类故障是由某些零部件损坏而引起的,必须经过更换或修复后才能消除故障。这类故障还可分为完全丧失其应有功能的完全性故障及导致某些局部功能丧失的局部性故障。

2. 按照时间特性的不同进行分类

(1)突变故障。突变故障指参数值突然出现很大偏差,事先不可监测和预测的故障。

(2)缓变故障。缓变故障又称为软故障,指参数随时间的推移和环境的变化而缓慢变化的故障。

(3)间隙故障。间隙故障指由于老化、容差不足或接触不良引起的时隐时现的故障。

3. 按照发生形式的不同进行分类

(1)加性故障。加性故障指作用在系统上的未知输入,在系统正常运行时为零,它的出现会导致系统输出发生独立于已知输入的改变。

(2)乘性故障。乘性故障指系统的某些参数的变化,它们能引起系统输出的变化,这些变化同时也受已知输入的影响。

1.2.2 故障诊断的任务

故障诊断的任务包括以下几个方面:

(1)故障建模。按照先验信息和输入输出关系,建立系统故障的数学模型,作为故障诊断的依据。

(2)故障检测。从可测量或不可测量变量的估计中,判断被诊断系统是否发生了故障。

(3)故障分离。在检测出故障后,给出故障源的位置,区别出故障原因是元件、部件、设备

还是它们之间的联系。

(4)故障辨识。在分离出故障后,确定故障的大小、发生时刻及其时变特性。

(5)故障评价与决策。判断故障的严重程度及其对诊断对象的影响和发展趋势,针对不同的工况采取不同的措施。

1.2.3 评价故障诊断系统的性能指标

1. 检测性能指标

检测性能指标包括早期检测的灵敏度、故障检测的及时性、故障的误报率和漏报率。

2. 诊断性能指标

(1)故障的分离能力。是指诊断系统对不同故障的区分能力。这种能力的强弱取决于对象的物理特性、故障大小、噪声、干扰、建模误差以及所设计的诊断算法。故障的分离能力越强,表明诊断系统对于不同故障的区分能力越强,那么对故障的定位也就越准确。

(2)故障辨识的准确性。是指诊断系统对故障的大小及其时变特性的估计的准确程度。故障辨识的准确性越高,表明诊断系统对故障的估计就越准确,也就越有利于故障的评价与决策。

3. 综合性能指标

(1)鲁棒性。鲁棒性是指故障诊断系统在存在噪声、干扰、建模误差的情况下正确完成故障诊断任务,同时保持满意的误报率和漏报率的能力。一个故障诊断系统的鲁棒性越强,表明它受噪声、干扰、建模误差的影响越小,其可靠性也就越高。

(2)自适应能力。自适应能力是指故障诊断系统对于变化的被诊断对象具有自适应能力,并且能够充分利用由于变化产生的新的信息来改善自身。引起这些变化的原因可以是被诊断对象的外部输入的变化、结构的变化,或由诸如生产数量、原材料质量等问题引起的工作条件的变化。

上述性能指标分别从检测性能、诊断性能以及综合性能三个不同的方面给出了评判一个故障诊断系统性能的标准。在实际的工程设计中,首先要正确分析工况条件以及最终的性能要求,明晰哪些性能是主要的,哪些性能是次要的,然后对众多的故障诊断方法进行分析,经过适当的权衡和取舍,最终选定最佳的解决方案。