

装备智能故障 诊断与预测

Intelligent Fault Diagnosis
and Prognosis for Equipment

张金玉 张炜 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

装备智能故障诊断与预测

Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Equipment

张金玉 张炜 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书将智能诊断与智能预测两类研究课题有机地结合起来,从智能故障诊断和预测的一般理论与方法的简要介绍出发,深入系统地论述智能故障诊断与预测的基本理论、概念和方法,重点阐述智能诊断与预测的新理论、新方法和新应用实例。既包括已经做过大量研究的诊断与预测知识获取与表示、模糊智能诊断与预测、通用预测模型、神经网络和支持向量机、故障诊断与预测专家系统,也包括一些近年来新发展的模拟进化、人工免疫、集群智能、智能综合的故障诊断与预测方法,以及系统开发与应用等。

本书既有系统性理论与方法,也给出了很多工程应用实例,内容新颖,实用性强,理论紧密联系实际,能反映智能诊断与预测思想和理论的最新进展,具有很好的针对性。本书不仅可作为高等院校相关专业的研究生和高年级本科生的教材,也可供从事机械装备状态监测与故障诊断、装备管理与维护工作的广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

装备智能故障诊断与预测/张金玉,张炜著. —北京:国防工业出版社,2013.4

ISBN 978-7-118-08601-0

I. ①装... II. ①张... ②张... III. ①人工智能-故障诊断 IV. ①TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 037788 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 23 $\frac{1}{4}$ 字数 526 千字

2013 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

装备故障诊断与预测是装备管理中非常重要的研究课题,是现代武器装备作战运用与管理的重要支撑技术。诊断和预测的智能化是装备管理的新的研究方向,是装备管理和维修领域的热点研究内容,深受世界各国学术界、科学界和工程界的重视,在美英等国得到了深入研究和应用。该项技术作为实现大型复杂装备基于状态的预知维修和可靠性工程等新思想的关键和瓶颈技术,正在成为西方新一代的飞机、舰船和车辆等系统设计和使用中的一个重要组成部分。在我们国家,该项技术一直是机械工程领域的一个主要方向,已被国家高技术研究发展计划(“863 计划”)列入优先发展的专题,同时也是我国“十二五”科研规划和国家自然科学基金中的重要研究课题。

所谓的智能故障诊断与预测,事实上就是对传统的状态监测的进一步拓展,对故障诊断系统的升级换代,是状态监控向健康管理的一次重大转变。其显著特点是在故障诊断基本理论基础上引入了预测能力和智能计算的思想方法,借助这种先进的智能结构和方法识别和管理故障的发展,确定装备的残余寿命,科学规划维修保障计划。目的是显著降低使用保障费用,提高装备安全性、可靠性、可利用率和任务成功性,实现真正的预知维修和自主式保障。其重点是研究利用各种先进的智能算法和智能模型来诊断、预测、监控和管理装备的健康状态。

目前,国外这方面的著作主要有 2006 年乔治·瓦奇斯威诺等著的“Intelligent Fault Diagnosis and Prognosis for Engineering Systems”,2011 年 Chee Khiang Pang 等著的《工业网络系统的智能诊断与预测》和 2011 年派克·迈克尔的“Prognostics and Health Management of Electronics”等。国内已出版的主要针对智能故障诊断、专门论述装备智能诊断与预测的著作还没有。总体来说,国外出版的相对比较新,内容比较丰富;国内出版的则都是六七年以前编著的,内容相对老旧,且已出版的智能诊断书籍均侧重于传统的智能诊断方法,如专家系统、模糊诊断、神经网络、遗传算法,而对近年来快速发展的计算智能方法论述较少,特别是对智能故障预测理论和方法,还未见相关著作出版。本书针对这些问题,基于多年来作者在这两个领域丰富的研究工作,将智能诊断与智能预测两类不同的研究课题有机地结合起来,从智能故障诊断和预测的一般理论与方法的介绍出发,系统论述智能故障诊断与预测的基本理论、概念和方法,重点深入阐述智能诊断与预测的新理论、新方法和新的应用。

全书共分为 12 章,其逻辑结构如图 1 所示。第 1 章绪论,概述智能诊断与预测的基本概念、基本方法、系统结构以及研究意义、发展状况;第 2 章智能诊断与预测知识的获取及表示,从知识的基本概念开始,论述诊断与预测系统知识的分类、获取、表示、学习及其应用等问题;第 3 章模糊智能诊断与预测方法,重点论述模糊诊断与预测信息的获取、模

糊综合诊断与预测方法、基于模糊相似度的范例检索方法及其应用实例;第4章故障预测模型及其应用,主要讨论预测模型法、统计回归法、时间序列法、灰色预测法等几种常用的故障预测方法及其在装备中的应用实例。第5章基于神经网络的故障诊断与预测,主要论述BP神经网络、RBF神经网络、Elman神经网络以及集成神经网络等几种经典的神经网络模型在故障诊断与预测理论中运用及其在装备中的应用实例;第6章基于支持向量机的诊断与预测方法,专门讨论支持向量机在装备故障诊断和预测中的运用及相关理论和方法;第7章故障诊断与预测专家系统,重点讨论诊断与预测专家系统基本原理、组成结构、推理方法以及多专家系统理论;第8章基于模拟进化的智能诊断与预测,主要讨论遗传算法、模拟退火、差分进化等三种模拟进化算法在智能诊断与预测中的应用原理、算法及其应用实例;第9章基于人工免疫的智能诊断与预测,重点论述否定选择原理和克隆选择原理在故障检测、诊断、预测和仿真中的应用研究;第10章基于集群智能的故障诊断与预测,主要讨论蚁群算法和粒子群算法在故障诊断与预测算法中的应用原理、算法实现和应用实例;第11章智能综合诊断与预测方法,从综合诊断与预测的基本理论出发,系统论述基于概率理论、证据理论和模糊理论的智能综合方法及其应用实例;第12章智能诊断与预测系统的应用与开发,主要研究智能诊断与预测系统的典型架构方法,探讨其应用与开发技术。

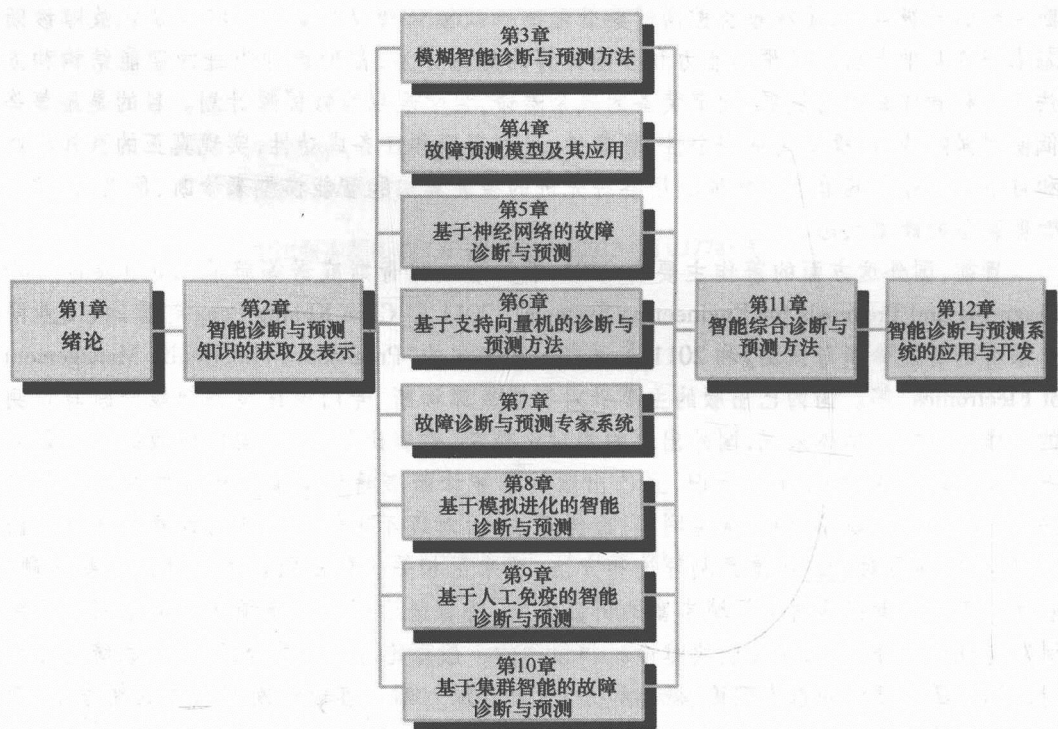


图1 全书各章逻辑关系图

全书也可分为五个部分:第一部分是概述;第二部分是知识获取与表示;第三部分是智能诊断与预测方法,包括模糊理论、基本模型、神经网络、支持向量机、专家系统、模拟进

化、人工免疫和集群智能八类方法;第四部分是综合诊断与预测方法;第五部分是系统的应用与开发。

本书主要内容均为作者在博士后、访问学者和博士工作期间研究工作的总结。本书的第1、2、3、4、7、10、11、12章由张金玉完成,第5、6、8、9章由张炜和张金玉完成。

衷心感谢国家重点学科兵器科学与技术建设基金和国家自然科学基金(51275518, 51075390)方面的多项资助。感谢黄先祥院士、谢友柏院士和张优云教授等的指导与鼓励。感谢第二炮兵工程大学郭晓松教授、谢健教授等的支持与帮助。

由于作者水平有限,再加上时间仓促,错误与不当之处在所难免。我们诚恳地欢迎广大读者批评指正。

作者

2012年9月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 智能故障诊断与预测的意义及现状	1
1.1.1 装备故障诊断与预测的意义	1
1.1.2 故障诊断与预测的历史、现状及发展	2
1.1.3 智能科学与智能故障诊断及预测	4
1.2 智能故障诊断与预测基础	6
1.2.1 故障诊断基础	6
1.2.2 故障预测基础	9
1.3 智能故障诊断与预测系统的一般结构和特点	11
1.3.1 智能故障诊断与预测系统的一般结构	11
1.3.2 智能故障诊断与预测系统的特点	12
1.4 智能故障诊断的基本方法	13
1.4.1 基于案例的推理方法	13
1.4.2 基于模型的方法	13
1.4.3 基于专家系统的方法	14
1.4.4 基于模糊推理的方法	14
1.4.5 基于神经网络的方法	14
1.4.6 基于模式识别的方法	15
1.4.7 基于智能计算的方法	15
1.4.8 混合方法	16
1.5 故障预测的模型和方法	16
1.5.1 统计模型预测法	16
1.5.2 数学预测方法	17
1.5.3 智能预测法	18
1.5.4 综合预测法	19
1.6 智能故障诊断与预测的发展趋势	19
参考文献	21
第2章 智能诊断与预测知识的获取及表示	22
2.1 知识的分类	22
2.1.1 知识的一般类别	22

2.1.2	装备故障诊断与预测中知识的分类	23
2.2	智能诊断与预测系统中知识的获取方法	24
2.2.1	知识获取的基本概念	24
2.2.2	知识获取的一般方法	25
2.3	智能故障诊断系统知识的表示方法	26
2.3.1	知识表示的概念和基本要求	26
2.3.2	诊断与预测知识的一般表示模型和方法	26
2.3.3	面向对象的范例知识表示模型	30
2.4	基于故障树的知识获取与表示方法	31
2.4.1	故障树基本概念	31
2.4.2	故障树的表示和构建方法	32
2.4.3	基于故障树的知识获取与表示	34
2.5	基于故障字典的知识获取与表示	35
2.5.1	故障字典的概念	35
2.5.2	故障字典的构建及应用方法	35
2.5.3	故障字典知识的表示和管理	36
2.6	机器学习与知识获取	37
2.6.1	机器学习原理	37
2.6.2	机器学习与知识获取方法	38
2.7	基于 TFMFCA 的范例知识获取方法实例	42
2.7.1	基于 TFMFCA 的综合范例知识的分析方法	42
2.7.2	基于 TFMFCA 的综合范例知识分析的具体内容	43
2.7.3	故障综合范例知识实例	49
2.7.4	基于 TFMFCA 的范例知识的计算机辅助分析和获取	50
	参考文献	52
第3章	模糊智能诊断与预测方法	54
3.1	概述	54
3.2	模糊集合的基本理论	55
3.2.1	普通集合与模糊集合	55
3.2.2	模糊集合上的基本运算及定理	59
3.2.3	模糊关系与模糊等价关系	62
3.3	模糊诊断与预测信息的获取	64
3.3.1	确定隶属函数的一般方法	64
3.3.2	常用隶属函数及其模糊分布	65
3.3.3	机械信号特征的模糊处理	68
3.3.4	模糊算子	70

3.4 模糊模式识别方法	72
3.4.1 模糊模式识别的一般方法	72
3.4.2 模糊模式识别的间接方法	73
3.5 模糊诊断与预测的聚类分析方法	77
3.5.1 模糊聚类分析原理	77
3.5.2 基于目标函数的模糊聚类	80
3.6 模糊综合诊断与预测方法	81
3.6.1 模糊综合评判的数学原理	81
3.6.2 模糊综合评判的五种模型	85
3.6.3 模糊理论在大型回转机械智能诊断中的应用	87
3.7 基于模糊相似度的范例检索方法	91
3.7.1 相似度的模糊化改进	91
3.7.2 基于模糊相似关系的范例检索模型	93
3.7.3 基于模糊相似关系的范例检索策略	94
3.7.4 基于范例的模糊相似度检索方法	94
3.7.5 基于范例模糊相似度诊断应用实例	95
参考文献	96
第4章 故障预测模型及其应用	98
4.1 预测模型方法	98
4.1.1 水平趋势的平滑预测	98
4.1.2 线性趋势的外推预测	99
4.1.3 二次曲线趋势的外推预测	100
4.2 基于回归模型的预测方法	101
4.2.1 一元回归预测计算模型	101
4.2.2 多元回归预测计算模型	103
4.3 基于时间序列模型的预测方法	106
4.3.1 时间序列分析	106
4.3.2 工程应用实例	112
4.4 基于灰色模型的预测方法	113
4.4.1 灰色预测理论	113
4.4.2 改进 GM(1,1)模型的预测	115
4.4.3 工程应用实例	116
4.5 组合预测模型方法	116
4.5.1 普通组合预测模型	117
4.5.2 基于预测误差的最优组合预测模型	117
4.5.3 基于预测精度的最优组合预测模型	119

4.5.4 组合预测的应用实例	121
参考文献	121
第5章 基于神经网络的故障诊断与预测	123
5.1 神经网络理论概述	123
5.2 基于BP网络的故障诊断与预测	124
5.2.1 BP网络及其改进算法	124
5.2.2 基于BP网络的故障诊断	127
5.2.3 基于BP网络的导弹动力参数多步预测方法	129
5.3 基于RBF网络的故障诊断与预测	133
5.3.1 RBF网络结构和算法	133
5.3.2 基于RBF网络的故障诊断	136
5.3.3 基于RBF网络的时间序列预测	139
5.4 基于Elman网络的故障诊断与预测	141
5.4.1 Elman型人工神经网络	141
5.4.2 基于Elman神经网络的故障诊断	143
5.4.3 基于Elman型神经网络的故障预测	146
5.5 集成神经网络故障诊断方法	150
5.5.1 复杂装备系统故障诊断的层次特点	150
5.5.2 集成神经网络诊断模型	151
5.5.3 应用实例	152
参考文献	154
第6章 基于支持向量机的诊断与预测方法	156
6.1 概述	156
6.2 统计学习理论与支持向量机	157
6.2.1 统计学习理论	157
6.2.2 支持向量机	158
6.2.3 SVM与ANN的性能比较	161
6.3 支持向量机在液体火箭发动机故障诊断中的应用	162
6.3.1 液体火箭发动机稳态故障数学模型的建立	162
6.3.2 液体火箭发动机稳态故障仿真及故障诊断	164
6.3.3 基于GA-SVM的液体火箭发动机故障诊断	168
6.4 基于支持向量机的回归估计	169
6.4.1 基于支持向量机的线性回归估计	170
6.4.2 基于支持向量机的非线性回归估计	171
6.4.3 最小二乘支持向量机的回归估计(LS-SVR)	172
6.5 基于支持向量机的故障预测	174

6.5.1	时间序列数据预处理	174
6.5.2	时间序列预测流程	175
6.5.3	预测模型评价标准	175
6.5.4	基于 SVM 的导弹动力系统故障预测实例	175
	参考文献	179
第 7 章	故障诊断与预测专家系统	181
7.1	故障诊断与预测专家系统的基本概念	181
7.2	诊断与预测专家系统的一般结构与功能	184
7.3	基于规则的诊断与预测专家系统	187
7.3.1	不确定性知识及推理方法	187
7.3.2	概率推理模型	188
7.3.3	证据推理模型	189
7.3.4	模糊推理模型	190
7.3.5	模糊故障预测专家系统的实现	192
7.4	基于范例的诊断与预测专家系统	192
7.4.1	范例诊断与预测系统的一般工作过程	193
7.4.2	基于范例检索的智能诊断与预测原理	194
7.4.3	基于面向对象的关系型数据库的范例知识库的设计	196
7.4.4	基于径向基函数网络的检索方法	199
7.5	基于神经网络的诊断与预测专家系统	206
7.5.1	专家系统与神经网络的特点	206
7.5.2	专家系统与神经网络结合的途径和方法	207
7.5.3	专家系统与神经网络的集成结构	208
7.6	多专家诊断与预测系统	209
7.6.1	多专家诊断与预测的综合算法	210
7.6.2	综合诊断与预测的机制和冲突协调方法	212
7.6.3	多智能体协同诊断与预测系统	214
	参考文献	216
第 8 章	基于模拟进化的智能诊断与预测	218
8.1	概述	218
8.2	遗传算法	219
8.2.1	基本遗传算法及其实现	219
8.2.2	遗传算法原理	221
8.2.3	遗传算法的改进与参数控制	223
8.2.4	遗传算法在故障诊断与预测中的应用	224
8.3	模拟退火算法	226

8.3.1	模拟退火算法的基本原理	227
8.3.2	模拟退火算法的实现	228
8.3.3	模拟退火算法参数选择原则	228
8.3.4	算法的改进及其在故障诊断上的应用	230
8.4	差分进化算法	231
8.4.1	差分进化的基本原理	231
8.4.2	差分进化算法特点与参数选择	234
8.4.3	算法的改进与应用	235
8.4.4	基于差分进化的无损检测图像序列的拟合	236
8.5	模拟进化在无损检测图像处理中的应用	240
8.5.1	基于遗传算法的热波图像分割	240
8.5.2	基于改进遗传算法的二维最大类间方差热图像分割	243
8.5.3	基于改进遗传算法的热波图像配准方法	246
	参考文献	253
第9章	基于人工免疫的智能诊断与预测	255
9.1	概述	255
9.2	人工免疫算法	256
9.2.1	人工免疫算法的基本概念	256
9.2.2	人工免疫原理	258
9.2.3	人工免疫算法的实现	261
9.2.4	人工免疫算法在智能诊断与预测中的应用	264
9.3	否定选择原理在 LRE 故障检测与诊断中的应用	266
9.3.1	否定选择算法	266
9.3.2	LRE 发动机稳态数学模型的建立与故障模式获取	267
9.3.3	稳态故障检测与诊断结果	270
9.4	克隆选择原理在 LRE 启动过程仿真中的应用	273
9.4.1	克隆选择原理与算法	273
9.4.2	LRE 相关参数的选择与建模	275
9.4.3	仿真计算结果与分析	276
	参考文献	280
第10章	基于集群智能的故障诊断与预测	282
10.1	集群智能概述	282
10.2	蚁群优化算法	283
10.2.1	蚁群觅食原理	283
10.2.2	蚁群优化算法的实现	284
10.2.3	蚁群算法的参数设置	286

10.2.4	蚁群算法的特点及改进	287
10.3	基于蚁群算法的故障诊断与预测方法	289
10.3.1	基于蚁群优化的神经网络的训练	289
10.3.2	基于蚁群算法的故障识别方法	291
10.4	粒子群优化算法	292
10.4.1	粒子群优化算法的基本原理	292
10.4.2	粒子群优化算法的实现	293
10.4.3	粒子群优化算法的参数选择	294
10.4.4	粒子群优化算法的改进	295
10.5	基于粒子群的故障诊断与预测方法及其应用	297
10.5.1	基于粒子群优化的神经网络的训练	297
10.5.2	基于粒子群优化的组合预测方法及应用	298
	参考文献	300
第 11 章	智能综合诊断与预测方法	302
11.1	引言	302
11.2	综合诊断与预测的基本原理与方法	303
11.2.1	综合诊断与预测的基本原理	303
11.2.2	综合诊断与预测的基本方法	304
11.3	网上综合诊断与预测的机制和冲突协调方法	306
11.3.1	综合诊断与预测的机制和方法	306
11.3.2	综合诊断与预测中的冲突协调方法	307
11.4	基于 Bayes 的综合诊断与预测	308
11.4.1	Bayes 推断的基本理论	309
11.4.2	主观 Bayes 概率综合	310
11.4.3	应用实例	311
11.5	基于证据理论的综合诊断与预测	313
11.5.1	证据理论的基本原理	314
11.5.2	单重故障的综合诊断与预测	315
11.5.3	多重故障的综合诊断与预测	317
11.5.4	综合诊断与预测的策略	318
11.5.5	综合诊断与预测算法及其实现	319
11.5.6	综合诊断的应用实例	320
11.6	基于知识的模糊综合诊断与预测	321
11.6.1	复杂装备的综合诊断与预测模型及算法	322
11.6.2	基于知识的群专家模糊综合诊断与预测方法	324
11.6.3	应用实例	326

11.7 总结	328
参考文献	328
第 12 章 智能诊断与预测系统的应用与开发	330
12.1 普通故障诊断与预测系统的原理和架构	330
12.2 诊断与预测支持系统的原理与结构	332
12.2.1 诊断与预测支持系统的原理	332
12.2.2 一般诊断与预测决策支持系统	334
12.2.3 智能诊断与预测支持系统	334
12.3 基于网络的异地诊断与预测支持系统	335
12.3.1 异地诊断与预测支持系统的概念	335
12.3.2 异地诊断与预测支持系统的基本原理	336
12.3.3 DDPSS 的一般结构	337
12.4 远程诊断和维修支持系统的典型形式	338
12.4.1 远程诊断专家系统	338
12.4.2 远程诊断与维护系统	340
12.4.3 协作诊断服务系统	340
12.4.4 分布式智能诊断系统	341
12.4.5 远程诊断的智能代理体系	342
12.4.6 远程智能维修系统	343
12.5 大型回转机械 RDPSC 的总体构架与智能诊断模型	344
12.5.1 RDPSC 的总体架构	345
12.5.2 多层并行智能诊断模型	346
12.6 复杂武器装备故障预测与健康管理的体系结构	347
12.6.1 典型的 PHM 系统体系结构分析	347
12.6.2 PHM 系统体系结构应具备的基本特征	349
12.6.3 复杂武器系统的 PHM 体系结构	349
12.7 基于无线网络的复杂武器系统在线监测网络与方案设计	351
12.7.1 装备特点及系统技术方案	351
12.7.2 混合无线网络系统的设计	353
12.7.3 在线监测与诊断系统的设计	354
12.7.4 综合诊断与预测平台的设计	355
12.8 总结	355
参考文献	356

第 1 章 绪 论

1.1 智能故障诊断与预测的意义及现状

1.1.1 装备故障诊断与预测的意义

现代科学技术的进步和生产的发展,推动着机械装备和生产系统日益向大型化、连续化、高速化、高效化、精密化和自动化的方向发展。装备的生产效率和价值有了极大的提高,其发展主要有四个基本特点:一是装备与系统的功能日益增多,各工作单元间的关系日趋复杂,导致影响装备安全和工作性能的因素越来越多;二是装备与系统的结构越来越复杂,规模越来越大,装备的造价越来越高;三是现代装备日益向系统极限效率与速度方向发展,安全隐患增多,机械的直接故障、连锁影响等造成的损失十分惊人;四是现代装备与系统在国民经济的发展和社会物质财富的生产中,扮演着越来越重要的角色,其影响面也越来越大。

这些进展一方面的确满足了提高生产效率、降低生产成本、节约能源等现代大工业发展的客观要求,取得了巨大的社会效益和经济效益;但另一方面,对大型装备的设计、制造、安装、使用、维修和安全可靠运行提出了更高的要求。装备和系统一旦发生故障,就会影响到整个生产系统安全稳定的运行,轻则降低系统的生产效率,重则导致系统停机、生产停顿,造成重大经济损失,甚至出现装备毁坏、危及人员生命、财产安全的恶性事故,造成灾难性后果。

据国内石化行业统计,1976年至1985年的10年间,化肥五大机组由于事故停车造成的直接经济损失达4亿5000多万元。1985年大同电厂、1988年秦岭电厂、1999年阜新电厂各有一台200MW机组发生毁机事故,损失均在亿元以上,严重影响地区电网的供电;1998年铁道部隧道局的一台TBM掘进机仅齿轮箱故障造成的直接损失达2000万元,还延误了工期。在国外,这种事故也屡见不鲜。1971年美国的三里岛300MW机组的损毁、1972年日本关西电力公司海南电站3号机断轴、1973年联邦德国600MW机组联轴器变形等重大事故,都造成了巨大的经济损失。

针对这种情况,世界各国都十分重视,普遍对大型重要装备及系统开展了故障诊断工作,并积极开展故障诊断技术的研究和开发工作。进入20世纪70年代以来,国外装备故障诊断技术已进入实用化阶段,获得了显著的经济效益^[1-3],故障诊断理论与方法进入了全面发展和繁荣时期^[4-8]。进入21世纪后,故障诊断研究的内涵有了新的进展,开始更加重视故障预测技术研究^[9]。

故障预测作为故障诊断技术的进一步延伸和拓展,比故障诊断有更高的要求。它以当前装备的使用状态为起点,结合已知预测对象的结构特性、参数、环境条件及历史数据,对装备未来的故障进行预测、分析和判断,确定故障性质、类别、程度、原因及部位,指出故

障发展趋势及后果,以便预先做好规划,消除潜在的故障,保证装备生产和训练任务的顺利完成。

我国的故障诊断与预测技术经过 30 余年的努力,也取得了很大发展。从简易诊断到精密诊断,从一般诊断到智能诊断,从单机诊断到网络诊断,从侧重故障诊断到故障诊断与预测并重,逐步走出了一条适合我国国情的发展道路。我国的故障诊断与预测科学不论在理论和方法上,还是在工程实践及监测诊断产品的研发中,都已有了较为深厚的基础。

尽管如此,随着我国国民经济的迅速发展,如何确保装备的安全可靠运行,迅速地诊断与预测不断出现的新老故障,仍然是故障诊断与预测学科必须深入研究和亟待解决的重大课题。近年来,随着我国信息高速公路的稳步拓展和智能科学的飞速发展,故障诊断与预测理论及技术的发展面临着新的机遇和挑战。一方面,遍布世界的国际互联网打破了地域上的限制,为异地的信息、知识、方法、服务等各种资源的有效沟通和集成,提供了非常方便的联系途径。另一方面,诊断与预测技术的研究开始向能沟通研究、设计、制造、管理、使用和维修等部门,为现场提供更高水平的诊断服务的智能综合诊断及预测方向发展。专家系统、模糊理论、神经网络、计算智能与故障诊断及预测理论相互融合,共同发展,逐步成为智能诊断与预测发展的主旋律。开发研制能具备强大通信和互连能力的专业化的分布式智能综合诊断与预测系统,是非常有现实意义和发展前景的课题。

1.1.2 故障诊断与预测的历史、现状及发展

所谓故障诊断就是寻找故障原因的过程,狭义地讲主要包括状态监测、状态识别、故障定位等,广义地讲还包括故障原因分析、维修处理对策及趋势预测等内容。装备的故障诊断可以说自有工业生产以来就已经存在,但故障诊断作为一门学科是 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四个阶段。

1. 原始诊断阶段

原始诊断始于 19 世纪末至 20 世纪中期,这个时期由于机器装备比较简单,故障诊断主要依靠装备使用专家或维修人员通过感官、经验和简单仪表,对故障进行诊断,并排除故障。

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故障诊断始于 20 世纪 60 年代的美国。在这一阶段,由于传感器技术和动态测试技术的发展,使得对各种诊断信号和数据的测量变得容易和快捷;计算机和信号处理技术的快速发展,弥补了人类在数据处理和图像显示上的低效率和不足,从而出现了各种状态监测和故障诊断方法,涌现了状态空间分析诊断、时域诊断、频域诊断、时频诊断、动态过程诊断和自动化诊断等方法。机械信号检测、数据处理与信号分析的各种手段和方法,构成了这一阶段装备故障诊断技术的主要研究和发展内容。

3. 智能化诊断阶段

智能化诊断技术始于 20 世纪 90 年代初期。这一阶段,由于机器装备日趋复杂化、智能化及光机电一体化,传统的诊断技术已经难以满足工程发展的需要。随着微型计算机技术和智能信息处理技术的发展,将智能信息处理技术的研究成果应用到故障诊断领

域中,以常规信号处理和诊断方法为基础,以智能信息处理技术为核心,构建智能化故障诊断模型和系统。故障诊断技术进入了新的发展阶段,传统的以信号检测和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取代。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。

4. 健康管理阶段

20 世纪 90 年代中期,随着计算机网络技术的发展,出现了智能维修系统(Intelligent Maintenance System, IMS)和远程诊断、远程维修技术,开始强调基于装备性能劣化监测、故障预测和智能维修研究。进入 21 世纪以来,故障诊断的思想和内涵进一步发展,出现了故障预测与健康监测(Prognostic and Health Monitoring, PHM)技术,该技术作为大型复杂装备基于状态的维修和可靠性工程等新思想的关键技术,受到美英等国的高度重视。所谓故障预测与健康监测事实上是传统的机内测试(BIT)和状态监控能力的进一步拓展。其显著特点是引入了预测能力,借助这种能力识别和管理故障的发展与变化,确定部件的残余寿命或正常工作时间长度,规划维修保障。目的是降低使用与保障费用,提高装备系统安全性、可靠性、战备完好性和任务成功性,实现真正的预知维修和自主式保障。PHM 重点是利用先进的传感器及其网络,并借助各种算法和智能模型来诊断、预测、监控与管理装备的状态^[9]。

至此,传统的故障诊断已经发展到了诊断与预测并重阶段,我们称为故障诊断与预测(Diagnosis and Prognosis, DP)阶段。为了叙述方便,本书中将故障诊断与故障预测并称为故障诊断与预测。

故障诊断的发展在世界各国的情况不尽相同,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,成立了美国机械故障预防小组,开始有计划地对故障诊断技术分专题进行研究。由于故障诊断技术应用巨大的经济和军事效益,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,取得了丰富的成果,故障诊断的思想和方法不断取得进展,出现了像基于网络的本特利远程监控与诊断专家系统、大型飞机的飞行器数据综合系统、航天飞机健康监控系统等具有代表性的产品和思想。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。

西欧国家对故障诊断技术的研究始于 20 世纪 60 年代末至 70 年代初,受美国故障诊断技术发展的带动和影响,发展也很快。1971 年英国成立了机器保健中心,有力地促进了英国故障诊断技术研究和推广工作,取得了不少突破,在机器摩擦磨损,特别是飞机发动机监测和诊断方面具有领先优势。西欧的其他国家也取得了许多进展,如瑞典 SPM 仪器公司的轴承监测技术、丹麦 B&K 公司传感器技术、德国西门子公司监测系统等都很有特色。

日本的诊断技术研究始于 20 世纪 70 年代中期,其做法是密切注视世界各国的发展动向,特别注意研究和引进美国故障诊断技术的进展,发展出自己的特色。如开发了机器寿命诊断的专家系统、汽轮机组寿命诊断方法等,注重研制监控与诊断仪器。

故障诊断技术的研究在我国则更晚一些,开始于 20 世纪 80 年代初期,也是通过学习国外先进经验和自己艰苦创业一点一滴地做起来的。经历了从无到有、稳步发展和全面繁荣三个不同阶段。刚开始时,只有一些简单仪器仪表和从国外学来的先进思想,通过大