

◎ 李娟莉 著

基于本体的矿井提升机 故障诊断理论与方法

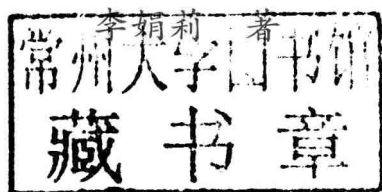
Theory and Method of Mine Hoist Fault
Diagnosis Based on Ontology



國防工業出版社
National Defense Industry Press

基于本体的矿井提升机 故障诊断理论与方法

Theory and Method of Mine Hoist Fault
Diagnosis Based on Ontology



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书对故障诊断过程中的三大关键技术即知识获取、知识表示和知识推理技术进行了深入系统的研究。重点研究了基于本体的提升机故障诊断方法的实现方式,包括基于改进属性重要度的故障诊断规则知识获取方法、基于 OWL DL 的故障诊断本体知识表示方法和基于贝叶斯和本体的故障诊断知识融合推理方法。探索了一种具有较好的故障识别效果,且处理所得的诊断结果具有较高可信度的智能故障诊断方法。

基于以上理论与方法,本书开发了本体环境下的矿井提升机故障监测与诊断系统,并对上述理论研究成果加以试验验证。实验表明,该研究成果能为故障诊断决策人员提供可靠的诊断依据及合理的故障处理建议,具有重要的应用价值。

本书可作为普通高等院校故障诊断方向的教学用书,也可作为相关工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

基于本体的矿井提升机故障诊断理论与方法/李娟莉著.

—北京:国防工业出版社,2015.12

ISBN 978-7-118-10571-1

I. ①基… II. ①李… III. ①矿井提升机—故障
诊断—研究 IV. ①TD534

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 296837 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10 字数 164 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 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

PREFACE

矿井提升机是煤矿开采过程中的关键运输设备,是沟通矿井上下的纽带。开展对矿井提升机故障诊断方法的研究,对煤矿安全生产具有重要的现实意义。

矿井提升机故障诊断是一个十分复杂的故障知识分析与推理的过程。迄今为止其实现仍主要依赖传统的故障诊断专家系统和现场技术人员的经验进行,诊断结果的稳定性和正确性仅仅建立在成功的诊断实例和经验基础之上,致使诊断的决策缺乏科学的理论依据,并且存在诊断效率低、知识管理落后等弊端。如何运用现代智能技术获取有用的故障诊断知识和经验,并将其形式化表示,从而实现知识的共享与互通,以及对其进行合理的推理,进而实现诊断的自动化与智能化,是现代矿井提升机故障诊断方法研究的重要内容。

本书针对现有故障诊断方法研究中存在的问题,将本体技术引入到矿井提升机的故障诊断领域中,并进行了深入研究。

第一,提出了基于本体的矿井提升机故障诊断方法。该方法详细分析了提升机故障诊断的处理过程,给出了提升机故障诊断过程中的三大关键技术即知识获取、知识表示和知识推理技术的理论依据和技术路线,建立了提升机故障本体诊断方法的体系框架。

第二,提出了基于改进的属性重要度的故障诊断规则知识获取方法。该方法详细分析了两种经典的粗糙集约简方法——基于差别矩阵的属性约简算法和基于属性重要度的约简算法,指出算法中存在的不足,提出了基于改进的属性重要度的启发式约简算法。该算法首先对差别矩阵进行了修正,利用修正后的差别矩阵计算属性重要度中的核,并构造加权函数进行属性重要度的计算,完成属性的约简。经实例验证,该方法能够有效提取矿井提升机中的故障诊断规则知识,提高了知识获取的自我学习和自我完善的能力。

第三,构建了矿井提升机故障诊断本体知识库。该部分分析了提升机的系统结构和故障机理,研究了矿井提升机故障诊断所需要的知识体系,对

提升机故障本体进行了形式化的定义;提取故障诊断过程中的重要概念,构建了提升机故障诊断本体知识库;在此基础上,将描述逻辑方法与提升机故障诊断知识相结合,提出了基于 OWL DL 的故障诊断本体知识表示方法和基于 SWRL 的故障诊断规则知识表示方法,对提升机系统单元及其故障知识进行了语义描述,为进一步研究故障诊断的逻辑推理奠定了基础。

第四,提出了基于贝叶斯网络的矿井提升机故障诊断本体知识推理方法。该方法分析了本体模型和贝叶斯网络模型的基本结构和原理,并以贝叶斯网络为概率模型,对本体语言 OWL 的概率扩展进行了深入研究,利用一系列的翻译规则,实现了矿井提升机故障本体模型到贝叶斯网络模型的转换;在此基础上建立了基于本体的贝叶斯网络推理模型,对本体推理和贝叶斯网络推理的方法进行了深入的研究,提出了二者结合的故障诊断融合推理模式,针对矿井提升机故障诊断推理的要求,给出了基于启发式故障搜索树的推理策略;借助贝叶斯网络可视化推理平台进行推理,通过实例验证了基于本体的贝叶斯网络方法对于解决矿井提升机故障诊断领域中不确定性知识推理问题的可行性和可靠性。

第五,基于以上理论与方法,对矿井提升机故障本体诊断方法进行了试验研究,开发了基于本体的矿井提升机故障监测与诊断系统。目前系统已在企业得到了成功应用,验证了理论研究结果的正确性,表明该研究成果具有良好的应用前景。

本书的目的是介绍作者在基于知识的矿井提升机故障诊断理论与方法研究中的一些经验,总结了作者在该领域研究中所取得的最新研究成果,期望为从事该理论研究的学者及研究生进行这一领域的研究提供帮助。

借本书出版之际,作者要特别感谢我的博士生导师太原理工大学杨兆建教授在本书撰写和出版过程中给予的悉心指导。同时感谢王义亮、任芳、王学文、丁华、张耀成和庞新宇等老师在课题研究期间提供的无私帮助,感谢同一课题组马金山博士、石瑞敏博士,吴海青、娄玉华、王新乐、魏志诚、李亮等硕士在作者课题研究期间所给予的大力支持!

本书相关研究及出版得到了山西省留学基金项目(2004-19)和山西省科技重大专项(20111101040)的资助,在此表示感谢。

由于作者的知识水平所限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

李娟莉

2015 年 6 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究目的与意义	2
1.3 国内外研究现状	4
1.3.1 提升机故障诊断方法	4
1.3.2 基于本体的智能故障诊断	9
1.4 主要研究内容	12
1.5 小结	14
第 2 章 基于本体的提升机故障诊断体系	15
2.1 引言	15
2.2 本体技术	16
2.2.1 本体概念	16
2.2.2 本体构建	16
2.2.3 本体推理	19
2.3 提升机系统结构组成及其故障分析	19
2.3.1 提升机系统结构	19
2.3.2 提升机故障分类	21
2.3.3 提升机故障特点	22
2.4 基于本体的提升机故障诊断方法	23
2.4.1 基于本体的提升机故障诊断处理过程	23
2.4.2 基于粗糙集的提升机故障诊断知识获取方法	23
2.4.3 基于描述逻辑的提升机故障 诊断本体知识表示方法	25
2.4.4 基于贝叶斯网络的故障诊断 本体不确定性推理方法	29

2.5	提升机故障本体诊断体系框架	29
2.5.1	基于专家系统的提升机故障诊断体系框架	29
2.5.2	基于本体的提升机故障诊断体系框架	30
2.6	小结	31
第3章	提升机故障诊断知识获取方法	32
3.1	引言	32
3.2	提升机故障诊断知识构成	33
3.2.1	提升机系统知识构成	33
3.2.2	运行过程中监测参数	33
3.2.3	故障诊断实例及规则知识	34
3.3	基于粗糙集的故障诊断规则知识获取	34
3.3.1	粗糙集理论概述	34
3.3.2	粗糙集理论相关概念	35
3.3.3	基于粗糙集的故障诊断知识获取方法	39
3.4	基于粗糙集模型的属性约简	39
3.4.1	基于差别矩阵的属性约简方法	40
3.4.2	基于属性重要性的启发式约简算法	42
3.4.3	基于改进的属性重要度的启发式约简算法	44
3.5	基于粗糙集的提升机故障诊断知识获取	48
3.5.1	提升机故障诊断知识获取模型	48
3.5.2	故障诊断规则知识的数据选取	50
3.5.3	决策表构建	50
3.5.4	属性约简	51
3.6	提升机故障诊断知识提取实例	51
3.7	小结	58
第4章	提升机故障本体知识库的构建及表示	59
4.1	引言	59
4.2	基于本体的提升机故障分类模型	60
4.2.1	提升机故障现象及故障原因分层结构	60
4.2.2	提升机故障本体的形式化定义	63
4.3	提升机故障本体知识库的建立	65
4.3.1	利用 Protégé 构建故障本体知识库	66

4.3.2	数据库与本体知识库的动态转换	73
4.4	提升机故障知识的表示	74
4.4.1	OWL DL 与 SWRL	74
4.4.2	基于 OWL DL 的提升机故障本体知识表示	79
4.4.3	基于 SWRL 的提升机故障诊断 规则本体知识表示	83
4.5	提升机故障诊断本体知识的共享及复用	84
4.6	小结	85
第 5 章	提升机故障诊断知识本体结构转换	87
5.1	引言	87
5.2	本体模型与贝叶斯网络模型	87
5.2.1	贝叶斯网络概述	87
5.2.2	本体贝叶斯网络形式化定义	88
5.2.3	本体模型的概率扩展	89
5.3	本体模型到贝叶斯网络模型的转换	90
5.3.1	概念与概念节点之间的转换	90
5.3.2	关系到边的转换	91
5.3.3	属性值、实例、公理和本体模型的转换	92
5.4	条件概率表的构建	93
5.4.1	概率的计算	93
5.4.2	条件概率表	94
5.5	提升机故障诊断本体结构的转换	97
5.6	小结	100
第 6 章	提升机故障诊断不确定性推理方法	101
6.1	引言	101
6.2	提升机故障诊断不确定性推理机制的建立	101
6.2.1	不确定性推理概述	101
6.2.2	不确定性推理方法	102
6.2.3	提升机故障诊断不确定性推理机制	104
6.3	基于贝叶斯网络的本体知识推理方法	105
6.3.1	基于本体的贝叶斯网络模型构建	105
6.3.2	本体推理	106

6.3.3	贝叶斯推理	110
6.4	故障诊断搜索树的建立	111
6.4.1	故障诊断搜索树相关概念	112
6.4.2	启发式搜索树	112
6.4.3	最大后验概率估计	116
6.5	提升机故障诊断推理实例	117
6.6	小结	122
第7章	提升机故障本体诊断方法试验研究	123
7.1	引言	123
7.2	试验系统构建	123
7.2.1	试验设备选择	123
7.2.2	试验系统设计	124
7.3	试验方案设计	126
7.3.1	整体方案	127
7.3.2	监测系统方案	128
7.3.3	诊断系统方案	129
7.4	本体诊断方法试验	129
7.4.1	提升机故障诊断知识获取试验	129
7.4.2	提升机故障诊断本体知识库构建及表示试验	134
7.4.3	提升机故障诊断不确定性推理试验	135
7.4.4	本体诊断方法应用	140
7.5	小结	142
	参考文献	144

1.1 引 言

矿井提升机担负着升降人员和设备,下放材料,提升煤炭、矸石的任务,是矿山竖井开采中连接井上、井下的唯一通道^[1],在煤矿生产中占有十分重要的地位。

近年来,我国煤矿生产安全不断得到加强,煤矿事故死亡人数、百万吨死亡率大幅度下降,但由于受管理水平、技术手段、运行环境等诸多主客观因素的影响,我国煤矿事故总量仍然过大,重特大事故时有发生,安全形势依然严峻。根据煤矿安全监察局政府网站所提供的数据,仅在 2005—2008 年三年期间,一次死亡 3 人以上的事故中,因提升运输问题引发的事故就有 30 起,死亡人数达到了 115 人,仅次于瓦斯(事故发生 1195 起、死亡 5352 人)、水害(事故发生 117 起、死亡 1003 人)和顶板事故(事故发生 121 起、死亡 474 人),是目前煤炭系统的第四大灾难事故。由此可见,提升系统各类事故的防治,是事关煤矿生产安全的大事。

矿井提升机主要包括机械系统、液压系统和电气系统三大部分,每一组成部分又有各自复杂的内部结构,系统中的任何一个部位发生故障,都会影响正常生产,造成不可估量的损失。为了确保提升设备的安全可靠运行,对其进行实时的工况监测和故障诊断是唯一途径,及时发现故障现象,分析产生该故障的原因,准确定位发生故障的部位,并给出相应的诊断处理措施,以防患于未然。

机械故障检测与诊断系统所采取的故障诊断方案,是由系统的功能需求和诊断对象的性质决定的^[2]。矿井提升机作为矿山生产的一种大型关键设备,其故障诊断系统的功能包括两个方面:其一,必须首先要能够对常见的故障做出及时而准确的诊断,并给出故障处理方案;其二,对可能发生

的其他故障也要具有一定的预测和处理能力。提升机系统的故障现象多种多样,故障原因更是不同,开展对矿井提升机故障诊断方法的研究,对煤矿的生产及人员安全具有重要的意义。

1.2 研究目的与意义

我国是世界上第一煤炭生产大国,仅国有重点煤矿就有一万五千多个,一直以来我国对煤矿开采的安全问题都极为重视,对矿井提升设备的安全性也提出了非常严格的要求,制定了相关的法律法规,特别是《煤矿安全规程》和《煤矿安全生产规定》,对正常运转使用中的提升机定期检测的要求作了明确的规定^[3],以保证其安全可靠地运行。这种定期检测的办法,到现在还广泛应用于各大小煤矿。实践证明,这种定期检测的方法一定程度上对事故的发生起到了预防作用,但也存在另一种隐患,即在定期检测的过程中,提升机会因高频率的拆装而出现更多的故障。分解检查的方法不可能鉴定零件可靠性的下降程度,复杂设备的偶然故障依然不可避免,出现了过度维修或者欠维修现象。因此,如何确保提升设备处于安全可靠的运行状态,除了在设计计算时合理选择参数外,最主要的是对其进行实时的状态监测和设备故障的合理诊断。对矿井提升机运行的主要参数进行实时的在线监测,并在超限时做出故障报警,依据故障征兆推测其可能的故障原因,给出处理意见,避免了维修的盲目性,既可以控制因过剩维修而造成的经济损失,也能防止因欠维修而导致事故于未然,并能科学地安排维修计划,有效地提高设备的综合经济效益。

目前,在矿井提升机故障诊断方面,国内外研究人员主要利用振动法、噪声法、专家系统、人工智能等技术开展了一些有效的诊断,为本课题的研究提供了有益的借鉴和参考。但提升机是一个异常复杂的系统,且由于其运行条件的特殊性,导致提升机故障知识具有数据量大、时变性、层次性、耦合性和一定的冗余度等特点^[4],而目前,提升机的故障诊断主要是依赖诊断专家的诊断经验及现场技术工作人员的人工判断与传统的故障诊断专家系统相结合的方式,其诊断结果的稳定性仅仅建立在成功的诊断经验基础之上,不能完全满足提升机故障诊断任务的要求,主要体现在以下几个方面。

(1) 由于矿井提升机系统结构知识、技术报告、维修手册、数据报表等资料分散,大都采用书籍或文档的形式保存,没有实现有效的管理与利用。知识管理的落后导致了矿井提升机知识的分裂,造成了技术易流失和知识

共享困难等问题。

(2) 采用传统的故障诊断方法,主要是依据专家的诊断经验来进行诊断,由于专家个体的差异,导致领域专家知识具有很强的随机性;另外,由于是主观的知识整理,不可避免地带有偏见和错误,再加上与领域专家交流的复杂性和困难性,导致获取的知识往往具有不完整的特性,进一步造成了诊断知识库的不完备。

传统的故障诊断专家系统对矿井提升机故障诊断过程中在相关概念、诊断问题的表达和故障诊断知识的处理等方面没有完整的描述,在知识的获取、表示和更新方面没有形成统一的认识和规范,因而存在表达能力弱,无法呈现完整的知识等缺陷,致使诊断决策缺乏科学的理论依据,不能完全适应系统智能诊断推理的需求。

(3) 现实中,提升机的故障现象和故障原因并非一一对应,再加上提升机自身结构复杂,致使对其进行故障诊断时不确定因素充斥其中,所以需要对其进行不确定性的推理。现有故障诊断系统的推理方法简单、推理策略不灵活、推理速度慢且效率低,最主要的是系统缺乏自我学习和自我完善的能力,因此,一旦发生推理出错,很难判断故障发生的准确原因和位置。

所以研究矿井提升机故障诊断所需要的知识体系,对故障现象、故障原因及两者之间的对应关系进行深入分析,以及在此基础上通过对故障诊断知识和诊断规则知识的分类和推理来定位故障发生的部位等,是提升机故障准确诊断的技术关键。鉴于此,作者提出了基于本体的矿井提升机故障诊断方法,从提升机的系统结构和逻辑组成出发,研究提升机故障现象和原因的传播机理,利用粗糙集理论、本体论和贝叶斯模糊推理等现代智能技术,对提升机的故障领域知识进行建模,以及对故障诊断知识和诊断规则知识进行语义描述,构建矿井提升机的不确定性推理系统,从而解决提升机故障知识的获取、表示、转换和推理等关键问题,提高矿井提升机故障诊断系统的效率和能力。

该研究是适应于提升机复杂技术特点的有效的故障诊断方法,是在多种现代新型技术的支持下对传统的故障诊断方法的一种根本性改进,具有重要的现实意义。

(1) 探索了矿井提升机智能故障诊断的实现方法。本研究建立了完善的矿井提升机故障诊断知识体系,对诊断知识进行了有效的组织、管理,建立了科学的知识获取机制,并进行了形式化的描述,经过知识推理实现了专家知识在矿井提升机故障诊断中的有效应用,为建立智能化的自动诊断系统提供了基础。

(2) 有助于矿井提升机故障诊断知识的共享和复用。本体为共享概念模型提供了形式化的规范说明,能够以一种明确的、形式化的方式来表示领域相关知识,矿井提升机故障本体诊断方法将专家的诊断经验和知识融入故障诊断中,建立了统一的本体知识库和模型,避免了表示的多样性,实现了跨平台的操作,有利于诊断知识的共享和重用,有广阔的应用前景。

(3) 提高了故障诊断结果的正确性和可靠性。本课题针对矿井提升机故障的若干不确定性问题,研究了故障诊断的不确定性推理机制,通过故障征兆推理其产生的故障原因,推理过程规范合理,推理结果全面、正确,为决策人员提供了可靠的诊断依据及建议。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 提升机故障诊断方法

机械故障诊断是一门集机械工程、数学、物理、计算机、信号与信息处理、物理电子、人工智能等技术为一体的交叉学科^[5]。它研究的是机械设备运行状态的变化在诊断信息中的反映,其研究内容包括三个方面,即对机器运行过程的状态监测、对其运行故障的识别诊断和对其运行发展趋势的预测。国外对故障诊断的研究从 20 世纪 60 年代末美国宇航局(NASA)成立了美国机械故障预防小组开展故障诊断技术的研究开始,至今已有 40 多年的历史,前期的研究主要集中在理论研究和专家系统的开发上,诊断的依据以专家经验为主。随着人工智能技术的发展,特别是专家系统、知识工程和人工神经网络等技术的应用,使故障诊断技术进入了一个新的智能化发展阶段。相关研究机构和学者对大型机械设备的诊断进行了深入研究,其中最著名的是美国西屋公司(WESTINGHOUSE, WHEC),它主要对旋转机械的故障诊断进行研究,特别是在振动监测方面做得比较深入。1981 年西屋公司开发了电站人工智能专家故障诊断系统,并于 1984 年将其应用于现场,该系统经过不断的研究、扩展和完善,对美国的电厂信息进行联网,后来发展成了大型电站在线监测诊断系统,并同时建立了沃伦多故障运行中心 DOC,通过该中心,管理者可以看到分布在全美 20 多个电厂的运行数据信息(其中包括 2 个核电站)^[6];随后,于 1990 年开发的基于网络化的汽轮发电机组智能化故障诊断专家系统^[7],能够对发电机组进行合理的预测和准确诊断,该系统的运行对西屋公司所产机组的安全运行发挥了巨大的作用。美国从事故障诊断系统工作的大公司还有 Bently 公司、BEI 公司和 IRD 公

司。Bently 公司^[8]的优势在转子动力学分析方面,该公司开发的旋转机械故障诊断系统 ADRE 在美国电站领域的应用取得了很大的成功。IRD 公司在故障预防性维修技术方面处于国际领先地位,近年来开发了 Mpulse 联网机械状态监测和 Pmpower 旋转机械振动诊断等系统,这些系统在美国多个电站得到了成功应用。国际上还有许多著名的研究机械故障诊断和开发诊断软件及仪器的公司,如丹麦主要研究振动诊断的 B&K 公司、德国生产用于多种设备诊断分析仪器的申克公司及日本开发机械故障诊断软件的武田理研公司等。在故障诊断技术方面,欧洲的一些国家也在某一方面具有特色或处于领先地位,如英国的核发电、钢铁和电力工业诊断技术,挪威的船舶诊断技术,瑞典的轴承监测技术,丹麦的振动诊断及日本的模糊逻辑分析诊断技术,等等。

提升机是由许多机电零部件组成的庞大固定设备,除在钢丝绳故障诊断方面做了一些研究外,国外针对提升机故障诊断技术研究的资料和报道比较少。一旦发现故障,国外技术发达的国家会成立专门的工作小组进行处理,而且要对从设计、制造到操作和维护管理的技术标准都进行修订,以杜绝类似事故再次发生。我国是煤炭大国,在矿井设备自动化发展的过程中,国家把矿井提升机故障诊断列为重要的研究课题之一,不少国内相关学者对其故障诊断的方法与技术做了大量的研究工作,基于模型的方法、基于数据的方法及基于知识的方法被认为是矿井提升机故障诊断常用的三种方法。

1. 基于模型的方法

该方法需要建立被诊断对象的较为精确的数学模型,它可分为状态估计方法、参数估计方法、等价空间方法等,该方法最大的优点是诊断准确率高,适用于对象模型已知的领域。但是对于大型复杂设备来说,其完整的数学动态模型一般很难建立,因而使该方法的使用受到很大限制。

在提升机故障诊断方面,比较典型的研究有:文献[9]对变载荷齿轮减速箱的故障机理进行了研究,建立了提升机齿轮箱动力学模型;文献[10]通过对提升机电控系统的速度环、电流环、励磁环中的给定环和反馈环中的电量监测及曲线分析、液压系统的油压、电液比例阀的控制电流、储能器氮气压力参数、主轴振动信号及电控系统的故障机理的分析,来判断提升机的工作状态,并预测其历史变化趋势;文献[11]中应用机械振动、故障树、人工智能等技术和理论,对提升机运行系统的常见故障如断绳、过卷、滑动、制动失效等故障建立了故障分析模型,采用深度优先搜索、正反向混合推理策略,逐层推理,直到找到故障源,该方法满足了提升机运行分布式诊断的要

求,提高了推理速度,实现了故障源的快速准确定位;文献[12]通过分析矿井提升机的运行曲线,建立了S型速度曲线模型,通过控制器调整变频器的给定频率,实现调节提升中电动机转速的功能,改善了矿井提升机的传统运行方式,大大减小了在传动系统产生的冲击力,提高了有关设备的使用寿命;文献[13]运用多项式逼近与数理分析方法将大量试验数据进行非线性拟合,得到了摩擦因数的数学模型,为提升机系统安全分析提供评判依据;文献[14]对某矿井提升机主轴的断裂事故进行了详细的分析,从断裂力学的角度探讨了矿井提升机的断裂条件,给出了裂纹极限尺寸公式,建立了主轴表面裂纹的力学模型,从而查找出事故发生的真正原因;文献[15]融合有限元模态计算与分析,基于ANSYS软件对提升机主轴装置进行模态分析,得出了主轴前15阶固有频率和对应的模态振型,为详细的动力学分析提供了理论基础。

2. 基于数据的方法

该方法不是以系统的数学模型作为诊断依据,而是从监测系统所得到的数据中提取诊断依据的故障诊断方法,它主要包括信号分析处理和统计方法两大类。

信号分析处理方法是利用合适的方法对所采集的信号进行加工处理以得到能反映故障特征信息的一种故障诊断方法。在提升机故障诊断中,常用的信号处理方法有小波分析法、时频分析法、希尔伯特法、EMD能量熵法等,还有一些特殊的分析方法如倒频谱分析法、自适应消噪技术、同态解调技术、时域平均法等。本书作者在前期的研究中,针对矿井提升机运行过程中的数据特点和故障诊断系统网络化的要求,设计建立了基于XML数据库技术之上的远程故障诊断系统,该系统能使提升机故障诊断更加科学化、合理化,提高了诊断的效率和准确率^[16-17];针对提升机加减速度的齿轮箱振动信号进行EMD分解,并求出各IMF分量的能量占总能量的百分比,由EMD能量熵的定义求出熵值,在不同的状态下,根据代表能量分布的EMD不同的能量熵值实现对齿轮箱故障的判别^[18];针对矿井提升机齿轮箱振动信号中包含多种调制源的特点,使用同态解调技术对齿轮箱振动信号进行了分析处理,提取了齿轮箱振动故障特征并做出正确诊断^[19]。此外,作者还做了如下工作:利用小波对模拟量进行去噪,并探讨了小波对特征参数中制动正压力智能判别问题^[9];开发了基于虚拟仪器技术的煤矿提升机故障诊断系统^[20],该系统通过对提升机振动加速度信号的频谱分析,能够对齿轮减速箱进行精密诊断。

统计方法是研究如何利用有效的方法去收集和使用带随机性信息的数

据,对含有噪声高维测量的数据进行分析,将高维信息压缩到低维子空间,并在此过程中去除噪声信息,从而发现数据间的关联关系,同时对所考虑的问题做出推理和预测的一种诊断方法。常用的统计分析方法包括回归分析、相关分析、主成分分析等方法。文献[21]针对故障检测技术中存在的非线性和信息遗漏问题,利用小波包提取由包含时域和频域特征参数构成的特征向量,建立核主元模型,再应用 KPCA 进行故障检测,对液压泵进行了故障检测和故障诊断;文献[22]对齿轮箱输出轴的扭振信号进行自相关分析,采用粗糙集理论对输入征兆进行约简,并对约简后的结果进行主成分分析,从而减少干扰量的影响,并有效地进行特征量的提取;文献[23-25]提出一种 PCA 和 D-S 证据理论相结合的故障诊断方法,该方法深入分析了故障检测的完备性,利用 PCA 的数据降维特性,解决了故障诊断中故障分离不唯一的问题,基于证据理论对于模糊信息的表示和推理能力进行故障诊断推理,提高了提升机故障的检测和分离的能力。

3. 基于知识的方法

该方法是利用诊断对象的诸多信息,与专家的诊断知识相结合进行诊断的方法,该方法也是在系统数学模型难以建立的情况下产生的,主要有专家系统、故障树、模糊理论及神经网络、支持向量机等人工智能方法。

2002 年中国矿业大学何凤友教授在文献[26]中通过故障现象分析,对提升机故障进行了详细的分类,建立了矿井提升机专家系统的结构、知识库及相应的推理机制,开发了矿井提升机故障诊断专家系统,并在永城煤电集团车集矿投入使用,且运行良好;山东科技大学的刘志海等人融合专家系统、故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)和快速匹配算法(Rete)等技术,建立了提升机制动系统故障诊断专家系统^[27],经验证,该系统很好地解决了传统专家系统知识获取、知识表示困难和推理效率低的难题,能够对制动系统故障进行快速准确的诊断;文献[28]对传统专家系统的异构性问题进行了探讨,构建了提升机故障诊断本体知识库,解决了知识共享和重用的问题。故障树方法是对复杂系统故障进行诊断分析的有效方法之一,目前已开发的专家系统很多都是利用故障树的方法来建立知识库,该方法在解决故障诊断专家系统中知识难以获取方面具有很大的优势。文献[29]详细论述了专家系统的知识库构成及诊断所采取的推理机制,设计并实现了基于故障树分析法的提升机制动系统故障诊断专家系统。文献[30]基于故障树分析法建立了矿井主提升机故障诊断专家系统的体系结构,并对数据库、知识库和推理机进行了深入的研究;文献[31]对提升机的液压站故障进行了分析,建立了液压站的故障诊断知识库,提出了基于计算机逻辑推

理的故障诊断方法;文献[32]针对矿井提升机高可靠性的要求,设计了基于故障树分析法的故障诊断系统,解决了知识获取的瓶颈问题。在模糊理论方面,文献[10]利用模糊推理方法,有效地处理了提升机故障诊断系统中由于诊断知识的模糊性所引起的不确定性推理问题,实现了提升设备的状态检测和故障诊断;文献[33]运用模糊故障树分析方法对摩擦式提升机的滑动故障进行了定量分析,得到了摩擦式提升机滑动故障的模糊概率及导致滑动故障各底事件的模糊重要度,并进一步找出产生滑动的主要原因。在人工智能领域,文献[34]结合领域专家的经验知识,利用 SOM 网络对制动系统的 7 种故障进行了自动分类,然后利用 BP 网络、BP 网络状态分类器和 Elman 网络对液压站故障进行了诊断,确定了故障原因;文献[35]用三层神经网络对提升机故障进行分类,并应用于提升机的液压制动系统的诊断上,诊断结果具有较高的可靠性;文献[36]利用神经元的自组织聚类网络(ART)完成直流提升机故障模式的在线识别和诊断;文献[37]将支持向量机分类算法应用到提升机制动系统的故障分类中,实现了智能诊断。

事实上,在进行故障诊断时,由于机械设备运行状态受多种因素影响且变化趋势复杂,难以用单一的方法进行有效的预测及诊断,因此,基于混合智能的故障诊断成为近年来该领域的研究热点。文献[38]结合浅知识诊断速度快和深知识诊断准确等特点,着重研究和解决复杂系统基于深浅知识集成的故障诊断问题:分析诊断知识的概念、类别和关系,并在此基础上研究和提出复杂系统深浅诊断知识的集成获取、表示、组织方式和模型,以及复杂系统基于深浅知识集成(包括浅层的规则知识和深层的模型知识及反映工作过程的动态知识和描述不确定性信息的模糊知识)的故障诊断策略。文献[39]提出一种基于模糊 C 均值聚类(FCM)、隐马尔可夫模型(HMM)和支持向量机(SVM)相结合的电力电子故障诊断方法。采用 FCM 方法对故障信号进行模糊聚类,提取故障特征;根据隐马尔可夫模型进行动态过程建模,根据支持向量机进行模式分类,利用该模型实现了对机车变流器电路中晶闸管断路故障的诊断。文献[40]提出了一种基于 SVM-ANN 混合模型的故障诊断方法,该方法利用支持向量机进行模式分解,并用神经网络进行故障的分类识别与诊断;文献[41]首先对机械信号进行小波包分析并提取频域能量特征向量,训练基于二叉树的多级 SVM 分类器,找到样本中的支持向量,建立超平面,然后选择最优分类平面,并对该平面上的测试集样本进行诊断;文献[42]采用高斯混合模型(GMM)与小波包分析相结合的方法,对汽轮机振动故障进行了诊断研究;文献[43]提出了基于经验模式分解、支持向量机和自适应线性神经网络的混合智能预测模型:首先利用经验