



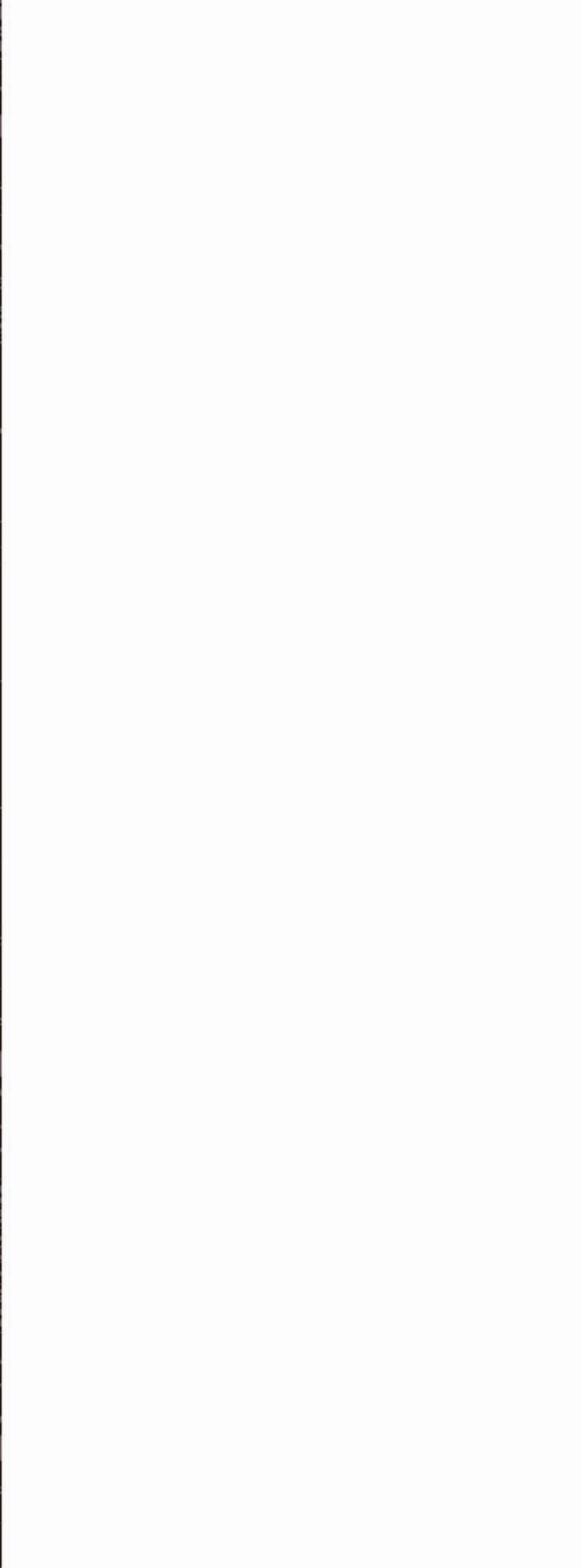
旋转机械的 智能诊断方法研究

谢长贵 著



电子科技大学出版社







责任编辑 谭炜麟

封面设计 品文社



旋转机械的 智能诊断方法研究



ISBN 978-7-5667-4452-6



9 787564 744526 >

定价: 28.00元

图书在版编目 (CIP) 数据

旋转机械的智能诊断方法研究 / 谢长贵著. — 成都 :
电子科技大学出版社, 2017. 5
ISBN 978-7-5647-4452-6

I. ①旋… II. ①谢… III. ①旋转机构—故障诊断—
研究 IV. ①TH210.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 109807 号

旋转机械的智能诊断方法研究

谢长贵 著

出 版： 电子科技大学出版社（成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编：610051）
策划编辑： 谭炜麟
责任编辑： 谭炜麟
主 页： www.uestcp.com.cn
电子邮箱： uestcp@uestcp.com.cn
发 行： 新华书店经销
印 刷： 成都市天金浩印务有限公司
成品尺寸： 185mm×260mm 印张 10 字数 172 千字
版 次： 2017 年 5 月第一版
印 次： 2017 年 5 月第一次印刷
书 号： ISBN 978-7-5647-4452-6
定 价： 28.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

- ◆ 本社发行部电话：028-83202463；本社邮购电话：028-83201495。
- ◆ 本书如有缺页、破损、装订错误，请寄回印刷厂调换。

作者简介

谢长贵，男，1984年11月出生，湖南省双峰县人，中共党员，研究生学历，工学博士学位，重庆工程职业技术学院讲师。研究方向：设备故障诊断、信号处理及自动化控制。现任重庆工程职业技术学院机械工程学院专任教师，主要从事机电一体化方面的教学科研工作。近年来，主持两项校级科研课题《基于线间相关度互校验法的重轨表面缺陷识别研究》《基于脉冲神经网络的矿用通风机故障诊断系统研究》，参加一项院级教改课题《CDIO工程教育模式在高职矿山机电专业人才培养中的应用》及主持市级科研课题《大数据环境下的车况分析关键技术研究》等。在《Advances in Mechanical Engineering》《计量学报》《云南大学学报》等国内外著名刊物发表学术论文十余篇。

前 言

旋转机械指主要依靠旋转动作完成特定功能的机械，典型的旋转机械有汽轮机、燃气轮机、离心式和轴流式压缩机、风机、泵、水轮机、发电机和等，广泛应用于电力、石化、冶金等部门。对其进行智能诊断是当前设备诊断的一个前沿课题。本书在旋转机械的基础上，提出了具有很高的理论价值和应用潜力的各类智能诊断方法。在理论方面，分析了旋转机械的特点，并重点研究了各种智能诊断算法。在实践方面，针对某钢铁企业的旋转机械开发了具有实用价值的基于 FSNN 的旋转机械在线故障诊断网络化系统。

本书的主要研究内容有以下五个方面。

(1) 概述了本课题研究的目的与意义，对几种常见旋转机械的故障特点以及神经网络理论的发展及几种典型人工神经网络（如 BP 网络、SOFM 网络）在故障诊断中的应用效果进行了全面的综述。

(2) 对神经元及神经元行为机理进行了系统介绍，论述了脉冲神经元的模型，并从数学角度重点介绍了累积放电模型，分析了三种在脉冲编码信息的方式：速率编码、时间编码及数量编码。然后从理论上分析了模糊脉冲神经网络模型，并分析了其模糊聚类分析的数学模型。

(3) 在故障诊断方面，研究了模糊脉冲神经网络模型在旋转机械故障诊断中的应用：①针对传统人工神经网络在旋转机械故障诊断方面的诊断速度与精度的不足，提出了模糊控制与脉冲神经网络内结合的模糊脉冲神经网络模型。通过对 FSNN 与 SOFM 及 BP 网络两种传统神经网络的诊断结果分析和比较，可以认为在旋转机械故障诊断中，基于模糊脉冲神经网络的诊断算法比起传统的人工神经网络诊断算法速度更快，诊断结果更准确。②通过与 FCM 的诊断仿真比较表明，FSNN 通过脉冲序列的种群编码方法迭代搜寻最优解，因而其较 FCM 有更高的分类准确率。

(4) 在分析了专家系统在故障诊断中的特点基础上,提出了一种基于FSNN与专家系统的融合诊断模型。该模型中FSNN与专家系统能相互独立地完成各自的任务,FSNN具有更适合感知信息的功能,而专家系统擅长推理解释工作,两者在功能上互补,可以更快速地进行故障诊断。仿真实验证明,该系统具备应用于旋转机械故障诊断的可行性及应用价值。

(5) 在故障诊断的实践方面,根据课题要求,开发了基于FSNN的旋转机械在线故障诊断网络化系统,将现场在线监测诊断、远程诊断中心有机结合起来。系统采用FSNN诊断算法对某钢铁企业煤化工厂的旋转机械进行在线诊断。针对旋转机械的振动故障特点,系统提供了比较完善的信号分析法和故障种类比较齐全的自动诊断,为企业设备的安全、经济运行提供了有力支持。

本书编写时,按照理论与实践相结合的原则,围绕旋转机械设备,对其各种智能诊断方法做了全面、系统的介绍。在本书编写过程中,常与博士期间导师、本校同事及机械行业相关人士切磋讨论,得到了他们的大力支持;感谢我现工作单位重庆工程职业技术学院的大力支持。

丰富的理论知识,庞大而全面的创新,需要高度集中精力和时间,更需要非凡而丰富的知识技巧去建模与仿真。限于我的经验、学识和创新能力,书中错、谬、浅、漏在所难免。敬请各行各业人士不吝赐教,多方研讨评点,帮助推入教学并应用于实际工程。

作者
2017年2月

CONTENT

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 课题的背景和研究的意义	(1)
1.2 设备状态监测与故障诊断概述	(4)
1.3 旋转机械故障诊断国内外研究现状	(6)
1.3.1 国内研究现状	(6)
1.3.2 国外研究现状	(8)
1.4 本课题的研究内容	(9)
1.5 本章小结	(10)
2 旋转机械故障的特点及诊断方法	(11)
2.1 旋转机械典型故障的特点	(11)
2.2 旋转机械故障诊断方法综述	(12)
2.3 基于模式识别的诊断方法	(14)
2.4 神经网络方法	(17)
2.4.1 神经网络概述	(17)
2.4.2 神经网络的拓扑结构	(18)
2.4.3 神经网络的学习规则	(19)
2.5 BP 网络故障诊断	(21)
2.5.1 BP 网络发展	(21)
2.5.2 BP 网络的设计	(23)
2.5.3 BP 网络诊断结果	(24)

2.6	专家系统	(25)
2.7	自组织特征映射神经网络故障诊断	(27)
2.7.1	自组织特征映射神经网络模型	(27)
2.7.2	SOFM 诊断结果分析	(28)
3	模糊脉冲神经网络模型	(30)
3.1	脉冲神经元模型	(30)
3.1.1	神经元及其行为机理	(30)
3.1.2	脉冲神经元模型	(32)
3.1.3	编码方式	(34)
3.2	模糊脉冲神经网络模型	(36)
3.3	模糊聚类分析	(40)
3.3.1	模糊聚类分析数学模型	(40)
3.3.2	模糊 C 均值聚类算法	(41)
3.4	脉冲神经网络与专家系统融合诊断模型	(43)
4	模糊脉冲神经网络在旋转机械故障诊断中的应用	(45)
4.1	故障特征提取	(45)
4.2	基于模糊脉冲神经网络的故障诊断	(50)
4.2.1	FSNN 诊断算法	(50)
4.2.2	FSNN 诊断结果	(50)
4.3	FSNN 聚类有效性分析	(55)
4.4	本章小结	(58)
5	基于 FSNN 与专家系统的融合诊断模型	(59)
5.1	基于专家系统的故障诊断方法	(59)
5.2	人工神经网络与专家系统的融合方式	(63)
5.3	FSNN 与专家系统融合诊断模型	(65)
5.4	实例分析	(67)
6	基于 FSNN 的旋转机械在线诊断网络化系统	(71)
6.1	引言	(71)
6.2	网络化系统总体结构	(72)
6.2.1	结构体系概述	(72)
6.2.2	系统的总体结构	(73)
6.2.3	网络化系统结构	(76)

6.3	系统的软件实现	(77)
6.3.1	系统功能模块	(77)
6.3.2	FSNN 诊断算法实现	(80)
6.4	网络化系统的通信及实现	(83)
6.4.1	Socket 套接字	(83)
6.4.2	FTP	(84)
6.5	本章小结	(85)
7	遗传算法及其应用	(86)
7.1	遗传算法的概述	(86)
7.2	遗传算法的思想	(87)
7.3	遗传算法的设计与实现	(87)
7.3.1	遗传算法的三个基本操作	(87)
7.3.2	遗传算法的实现	(88)
7.4	遗传算法的优点	(95)
8	遗传神经网络在旋转机械中的应用建模	(97)
8.1	基本思想	(97)
8.2	建模工具箱简介	(99)
8.3	BP 网络算法建模	(103)
8.4	遗传神经网络建模	(107)
8.5	仿真结论	(111)
9	基于遗传算法的烧结抽烟机故障诊断系统	(113)
9.1	系统硬件实现	(113)
9.1.1	传感器选型及安装	(113)
9.1.2	数据采集仪	(115)
9.1.3	系统硬件布线图	(115)
9.2	系统软件开发的关键技术	(117)
9.2.1	软件功能设计	(117)
9.2.2	软件平台的选择	(119)
9.2.3	数据存储和管理	(119)
9.2.4	多线程技术的应用	(120)
9.2.5	用户主界面设计	(120)
9.2.6	智能诊断模块	(122)

10	模糊聚类算法研究	(127)
10.1	经典模糊理论	(127)
10.2	模糊聚类分析	(128)
10.2.1	数据集的 C 划分	(129)
10.2.2	聚类目标函数	(129)
10.3	模糊 C 均值聚类算法 (FCM)	(130)
10.3.1	算法概述	(130)
10.3.2	FCM 缺陷和不足	(131)
10.4	粒子群优化模糊聚类算法	(132)
10.4.1	粒子群优化算法	(132)
10.4.2	基于 PSO 的加权模糊聚类算法 (PSO-WFCM) ...	
	(133)
10.5	PSO WFCM 在故障诊断中的应用	(134)
11	结论与展望	(137)
11.1	结 论	(137)
11.2	创新点	(138)
11.3	展 望	(138)
	致 谢	(140)
	附 录	(141)
	参考文献	(142)

1 绪 论

1.1 课题的背景和研究的意义

随着科技的迅速发展及其在旋转机械上的广泛应用，现代机械设备的自动化水平越来越高，机械自动化作业的优点也凸显出机械设备安全运行的重要性。机械设备在运行过程中发生的任何故障，都可能造成巨大的经济损失，甚至导致人员的伤亡或恶劣的社会影响。

国内外曾发生的因机械设备产生故障而导致巨大经济损失及人员伤亡的许多案例让人触目惊心^[1,2]。

在国外，1979年，美国宾夕法尼亚州某核电站，由于工作人员的误操作和判断，导致核反应堆堆芯被严重破坏，放射性物质泄漏，造成了几十亿美元的经济损失。且该核泄漏事故后产生的公害引起全美民众的强烈抗议，致使美国国会不得不出面调查。1986年，美国“挑战者”号航天飞机在卡纳维拉尔角航天基地发射升空后由于火箭助推器出现故障，导致飞机爆炸失事，其直接经济损失达12亿多美元。1986年4月，苏联切尔诺贝利核电站发生爆炸，北欧、东欧许多地区被大量放射性尘埃污，造成约9万人死亡，27万人无家可归，经济损失高达150亿美元。2011年3月日本发生8级地震，地震引发的海啸造成福岛核电站产生核泄漏事故，造成了重大的人员伤亡及经济的损失，且该核污染威胁至今尚存。

在国内，20世纪80年代大同发电厂与一秦岭发电厂的发电机组先后发生事故，直接经济损失高达1亿元人民币，其中秦岭发电厂一台发电机组的转子系统断为7段。1985年，镇海石化总厂机组转子出现严重毁坏，造成重大人员伤亡，其经济损失达1000余万元。另据我国11个化肥厂提供的不完全资料统计，1976年到1985年由于大机组事故停车损失近100万吨尿素，折合人民币47000万元。从1984年到1991年间我国

50MW 以上的汽轮发电机组转子严重破坏等重大事故就达 6 起之多。以上仅是事故造成的直接经济损失, 而由事故带来的间接经济损失和社会影响, 更是难以估量。这一系列灾难性的机械设备事故的发生, 迫使人们在机械设备故障诊断方面进行大量的研究, 形成了机械设备、工程结构与工艺过程故障诊断的新研究领域。开展机械故障诊断的目的在于, 通过各种监测方法和手段, 判断设备的运行状态是否正常; 若设备发生故障, 则经过分析, 判断故障原因, 以便维修; 或者在故障还未发生之前, 预计可能会发生的故障, 以便提前采取补救措施, 避免发生重大事故, 还可以从根本上解决目前定期维修当中维修过剩和维修不足的问题。

一系列严重或灾难性事故的发生, 使人们越来越意识到对机械设备进行故障诊断的迫切性和重要性。

机械设备故障诊断的内容大致可分为三部分^[3-6]。第一部分内容首先采用各种类型传感器或监测仪表来获取机械设备运行状态信息, 即信号采集。采集后的信号有时还需要进行信号分析和处理, 去除无用信息, 提取反映设备运行状态的有用信息, 并从这些信息中发现主要部位和零部件的性能是否处于故障状态, 此部分内容称为“状态监测”, 它包含了信号采集和信号处理。故障诊断的第二部分内容为, 若发现机械设备存在故障或其工作状态异常, 则需要对能反映故障状态的特征参数与信息进行识别, 利用专家的知识 and 经验, 像医生诊断疾病那样, 诊断出设备存在的故障部位、故障类型、故障程度及发生故障的原因, 这部分内容称为“故障诊断”。第三部分内容为, 根据前面诊断出的结论, 采取控制治理和预防措施的决策, 这部分内容称为“诊断决策”。在故障的预防措施中还包括某些关键零部件的剩余寿命估计和可靠性分析。对于结构复杂、影响因素众多的某些机械设备, 也可从预防和治理措施的有效性来证明诊断结论正确与否。由此可见, 机械设备故障诊断技术包含的内容较为广泛, 如设备状态参数(位移、力、噪声、振动、裂纹、磨损、腐蚀、温度等)的监测, 机器发生振动和机械损伤时的原因分析, 机械零部件的可靠性分析, 故障的控制和防治等, 均属于机械设备故障诊断的范畴。

机械设备故障诊断的前期主要使用各种直接手段, 然后依靠经验积累进行诊断, 最后发展到现在的基于知识的智能化机械设备故障诊断。目前的故障诊断方法概括起来主要分为以下三种: 基于信号处理的故障诊断方法^[7]、基于解析模型的故障诊断方法和基于知识的故障诊断方法。基于信号处理的诊断方法, 通常是利用信号模型, 如相关函数、频谱、小波变换、自回归滑动平均等, 直接分析可测信号, 提取诸如幅值、频率、方差等特征量, 从而检测出故障类型。基于解析模型的方法是在了解诊断对象数学模型的基础上, 按照某种数学方法对被测信号进行分析和处理, 其主要分析方法包括等价关系法、状态观测法与参数估计法。目前基于解析模型的诊断方法已取得了深入研究; 但在实际诊断中, 常常难以获得诊断对象的精确数学模型, 这样使得基于解析模型诊断方法的使用范围和效果受到了很大限制。近年来, 计算机技术及人工智

能的迅猛发展，为机械设备故障诊断技术提供了新的理论基础，产生了基于知识的设备故障诊断方法。该方法由于不需要诊断对象的精确数学模型，且具有某些“智能”特性，使得它的应用比较广泛。基于知识的故障诊断方法主要包括^[8-10]：模糊故障诊断方法、专家系统故障诊断方法、故障树诊断方法、人工神经网络故障诊断及数据融合故障诊断方法等。

因为神经网络具有容错、联想、推测、记忆、自学习、自适应和并行运算处理等独特优势，因此可以用来对系统设备由于故障而引起的状态变化进行识别和诊断，从而为故障诊断与状态监控提供新的技术手段，在故障诊断中得到了广泛的应用。近几年来，人工神经网络的研究重点逐渐转向更具生物真实性的脉冲神经网络。随着神经科学研究和技术的快速发展，许多研究者认为基于脉冲定时的大规模神经网络是脑进行信息处理的基础。而将模糊理论与脉冲神经网络相结合，对旋转机械进行故障诊断，是神经网络发展的一个新应用。

旋转机械是指依靠转子旋转运动进行工作的机器，其大部分属于动力机械，在工业上应用最为广泛。化工过程装备中大量使用的各类离心泵、轴流泵、离心式和轴流式风机、压缩机、汽轮机、涡轮发动机、电动机、离心机等均为典型的旋转机械设备。监测此类机械设备运行状态，保障设备安全可靠运行，及时对发生故障的机械设备进行停机并检查故障源，准确诊断出旋转机械的具体故障，进而实施有效容错控制及预防措施，为企业设备的安全可靠运行提供重要的保障。旋转机械设备运行状态信息中最重要一个载体是振动信号，它包含了丰富的机械设备故障或异常的信息，设备的振动量是衡量机械设备运行状态好坏的重要标志，振动超标将直接影响设备的可靠运行、工人的健康及工作的效率等。据不完全统计，因设备发生大振动而产生的故障约占总故障数的90%，如1985年大同第二发电厂2号机与1990年新乡电厂2号机发生的飞车毁坏等事故都与机组的强烈振动有直接关系。因此，对机械设备进行振动测试是设备状态信号采集的基本测试手段，对振动信号的分析与处理是设备故障诊断领域里一种较为广泛的方法。

综上所述，对旋转机械设备的故障诊断方法进行研究，尤其对基于人工智能的诊断方法及其在设备故障诊断中的应用进行研究，是一个具有理论和现实意义的课题。本书研究的目的是针对旋转机械设备故障具有的多样性、层次性和不确定性的特点，以脉冲人工神经网络理论方法为基础^[11,12]，深入研究基于模糊控制的模糊脉冲神经网络及其在旋转机械振动故障诊断中的应用，以期进一步提高旋转机械设备监测与故障诊断的理论水平和实际应用价值。

1.2 设备状态监测与故障诊断概述

现在工业的特点是生产设备大型化、连续化、高速化和自动化。它在提高生产率,降低成本,节约能源和人力,减少废品率,保证产品质量等方面有很大的优势。但从另一方面来看,由于机械设备发生故障而停工造成的损失却成反比例的增加,维修费用也大幅度地上升。现代化的大生产,如石油、石化、化工、电力、钢铁等都采用单机、满负荷、连续性的生产操作方式,一些大型机械成了现代化大规模生产装置中的关键设备,一旦出现停机故障,将导致全厂停产,由此造成的经济损失将是十分巨大的。例如,一个年加工原油 500 万吨的炼油厂,停产一天的经济损失达近两千万。另据我国 11 个化肥厂提供的不完全资料统计,1976 年到 1985 年由于大机组事故停车损失近 100 万吨尿素,折合人民币 47 000 万元。1985 年山西大同电厂 2#机组联轴器断裂事故,1988 年秦岭电厂 5#机组主轴断裂,这两次事故的直接经济损失达亿元。因此保证设备的正常运行,消除事故,是十分必要和迫切的问题。设备故障诊断技术已经成为设备管理现代化,保证设备安全可靠运行的重要手段。

设备监测诊断技术是有关设备运行和维护的一项新兴技术。设备状态监测与故障诊断既有区别又有联系,在生产实际中,有时又将二者统称为设备故障诊断。实际上,没有监测就没有诊断,诊断是目的,监测是手段;监测是诊断的基础和前提,诊断是监测的最终结果。监测其根本目的是获得设备运行状态的真实信息,从而保证设备的正常运行和对维修做出正确的指导,减少或消除事故。设备故障诊断技术包括状态监测、故障诊断和诊断决策三个基本环节。由于信息的多样性,诊断技术的理论非常广泛,它涉及数学、物理、化学、机械、电气、传感、计算机及数字信号处理、模式识别与人工智能等学科与技术,是一门实用性强、多学科交叉的技术。

设备诊断技术产生于 20 世纪 60 年代初,是由航空航天、军事等方面的迫切需要而发展起来的,以后逐渐推广到核能设备、动力设备和其他一些大型成套设备中,它的历史和人类对设备的维修方式紧密相连。自十八九世纪以蒸汽机和电动机为代表的二次工业革命以来,机械设备的维修制度经历了三个阶段,即事后维修 (Breakdown maintenance),定期维修 (Periodic maintenance) 以及现代化的预知性维修 (Condition maintenance or predictive maintenance)^[6]。

①事后维修

早期工业设备技术水平和复杂程度低,生产规模小,设备的利用率和维修费用的问题没有引起人们的注意和重视,对机械设备的故障也缺乏认识,故只在设备坏了以后再行修理,因此称为事后维修。缺点是:如果要产生废品则废品已经产生;如果要引发事故,则事故已成为现实;坏了之后才考虑维修所需的各种器件,势必延长停

机时间，增加生产损失；坏了才修，机器可能受到过度损伤，也会增加维修费用，所以这种维修方式被称为不足维修。

②定期维修

我国的定期维修体制是20世纪50年代中期从苏联大量引进设备和技术的同时引进的维修方式。以时间为依据，实现定期小修、中修、大修，在很大程度上防止了事故的发生。但在实践中常常出现两种情况，其一是维修时间尚未到达，设备已经出现了故障，这实质上 and 事后维修没有区别，也称为维修不足。其二是维修时间虽已到达，但设备还完好无损，于是也只好依据维修制度进行维修。这样一来，不该停机停下来了，不该拆换的拆换了，甚至在维修中造成人为的新的故障。显然这种情况下的维修是多余的，称为过剩维修。维修不足和过剩维修都会造成很大的经济损失，严重影响生产安全。为了避免这两种情况，出现了预知性维修。

③预知性维修

随着电子技术和计算机的发展，设备也变得更加复杂，对设备安全可靠运行的要求更高。利用计算机连续或定期监测设备状态，判断设备的劣化程度、发展趋势，确定机械设备的维修时间和内容，使维修人员能在维修之前做好有关准备，做到该修才修，如果要修，也是有针对性地维修。预知性维修以机械设备的实际情况为依据，以机械故障诊断技术为基础，减少了设备的过剩维修，设备的利用率显著提高。

用于诊断的方法大致可分为两大类。一类是以数据处理为核心的常规诊断技术。其突出的特点是，诊断是完全基于各种检测方法和信号处理手段。从现代设备诊断技术产生至今，涌现了大量的常规诊断技术，如铁谱、光谱、振动、噪声、声发射、红外成像、性能分析等监测技术；状态空间法、对比法、统计分析法、故障树法、模糊判断法、灰色关联度法、时序分析等多种信号处理手段；传统的傅立叶分析也发展到短时傅立叶谱分析、Wigner谱分析、小波变换等多种信号分析形式。

虽然计算机技术、现代测试技术和信号处理技术的迅速发展大大弥补了传统分析方法的不足，但这种诊断技术本身还存在很大的局限性。由于现场条件的限制、机械设备本身的复杂性以及故障与征兆之间没有确定一一对应等因素的影响，相对来说，现有的一些常规诊断技术的诊断能力仍然比较弱。因此，要想有效地实现设备的故障诊断，几乎在诊断的每一阶段都需要专家和技术人员的直接参与。也就是说，系统缺少一些“智能性”。这就迫使人们考虑在故障诊断中如何利用专家长期积累的经验知识。随着模糊集理论、专家系统、神经网络技术和小波分析理论的发展以及测试技术、计算机技术和电子通信技术等相关领域学科的进一步深入，设备故障诊断技术正朝智能化方向发展。

人工智能技术，特别是诊断专家系统的出现和发展是故障诊断技术领域最为显著的成就之一。人们习惯称以人工智能为核心的设备诊断为智能诊断。智能诊断技术的研究内容和实现方法都较常规诊断发生了根本性的变化，在这里，以数据处理为核心