



信息科学技术专著丛书

随机共振势模型的旋转机械 微弱故障诊断方法研究与应用

李志星 著

SUIJI GONGZHEN SHIMOXING DE XUANZHUAN JIXIE
WEIRUO GUZHANG ZHENDUAN FANGFA YANJIU YU YINGYONG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com



信息科学技术专著丛书

随机共振势模型的旋转机械 微弱故障诊断方法研究与应用

李志星 著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

传统的故障信号提取方法大多数是对较强的噪声信号进行抑制。随机共振与传统降噪方法相比,反其道而行之,利用噪声能量向微弱信号转移,在增强微弱故障特征的同时削弱部分噪声,对于强噪声中振动信号的提取能够起到良好作用,尤其是当噪声和信号的频率较为接近时,该方法对故障信号的提取作用更为明显。因此,研究随机共振并将其应用于强噪声背景下的微弱故障诊断具有重要的实用价值。

本书是在作者多年研究成果的基础上整理而成的,希望能够为从事机械故障诊断、设备维护与管理的科学研究人员、工程技术人员和研究生提供更多的借鉴和参考。

图书在版编目(CIP)数据

随机共振势模型的旋转机械微弱故障诊断方法研究与应用 / 李志星著. -- 北京 : 北京邮电大学出版社, 2021. 7

ISBN 978-7-5635-6412-5

I. ①随… II. ①李… III. ①振动—信号分析—故障诊断 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021)第 140060 号

策划编辑: 彭楠 责任编辑: 孙宏颖 陶恒 封面设计: 七星博纳

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码: 100876

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本: 720 mm×1 000 mm 1/16

印 张: 10.5

字 数: 193 千字

版 次: 2021 年 7 月第 1 版

印 次: 2021 年 7 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-6412-5

定价: 52.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

随着工业技术的发展和科技的进步,机械设备不断向大功率、高转速以及持续工作方向发展。但随着对设备的工作要求逐步提高,在实际工作中,由于人为操作误差、装配误差、零部件老化等不确定因素的影响,机械设备在运行中出现故障不可避免。一旦发生故障,机械设备停机导致的财产损失严重,甚至由于零部件的损坏造成人员伤亡等无法挽回的损失;另外,由于工业设备大多在强噪声背景下工作,早期的微弱故障难以辨别,甚至当设备出现严重故障时仍无法人为识别。因此,本书的研究目的旨在保证机械设备的健康监测以及进行强噪声背景条件下的微弱故障诊断,确保机械设备实现早期的故障识别,做到“早知道早预防”,使事故发生的概率有效降低,并完善设备的早期维护,避免出现机械设备的系统性崩溃,从而提高生产效益。

本书主要研究基于强噪声背景下随机共振的微弱故障诊断方法,虽然众多学者也提出了利用随机共振进行机械微弱故障诊断的方法,但这些方法都有不足及可改进与完善之处。本书针对传统随机共振方法的不足,提出相应的解决方法,最后将所提方法应用于机械设备的微弱故障信号诊断。本书的研究内容主要包括以下几个方面。(1)针对传统算法噪声过滤不足,微弱信号难以提取的问题,提出多分量总体平均随机共振的微弱故障诊断方法,通过选取有效奇异值和有效集合经验模态分解分量,以达到降低噪声的目的,而后将选取的有效分量输入随机共振系统并对各有效分量进行总体平均计算,从而提取微弱故障特征。(2)针对经典随机共振系统势参数优化极易陷入局部寻优的问题,根据混沌运动的遍历性、随机性等特点,在蚁群算法的基础上,利用混沌算法对解的邻域进行混沌优化,以实现参数匹配的全局寻优。(3)针对经典随机共振系统势模型的势壁宽度和势垒高度可同时调节的特性,研究约束势随机共振模型对微弱信号检测的影响,提出一种自适应约束势双稳随机共振方法,分析约束势随机共振系统模型,并将其应用于轴承的微弱故障诊断和行星齿轮箱的实验验证。(4)针对经典双稳随机共振势模型参数匹配寻优的问题,研究分段非线性势函数随机共振对微弱信号提取的影响,提出一种

分段非线性单参数优化的随机共振势模型,将该模型与传统经典随机共振模型进行比较,并将其应用于轴承的微弱故障实验验证。(5)针对经典双稳随机共振的饱和特性,即随着输入信号的增大输出信号趋于稳定的特点,研究分段线性随机共振对微弱信号提取的影响,提出一种新的分段线性非饱和随机共振势模型,以期提高微弱信号的增强效果。(6)针对传统随机共振势模型具有对称性,势模型形状无法实现结构最优的问题,研究非对称势随机共振模型对微弱信号提取的影响,提出一种非对称势随机共振模型,以实现结构最优,将该模型与传统经典随机共振模型进行比较,并将其应用于轴承的微弱故障实验验证。(7)针对当前传统的欠阻尼随机共振故障诊断方法势模型结构单一,参数匹配容易陷入局部寻优的问题,提出一种新的多参数约束势欠阻尼随机共振故障诊断方法。首先,构建多参数约束势随机共振模型,确定影响信噪比输出的影响因素;其次,根据混沌运动的遍历性、随机性等特点,在蚁群算法的基础上,利用混沌算法对解的邻域进行混沌优化,以实现参数匹配的全局寻优,同时使系统参数与阻尼因子协同响应,使其与复杂工程信号实现最佳匹配,将其应用于轴承的微弱故障诊断和轧机齿轮箱的实验验证,通过多个轴承实验样本验证所提方法的优越性,并将所提方法应用于轧机齿轮箱的实验验证。(8)针对复杂工程中噪声强度较大,且势函数优化参数过多,造成非线性系统不稳定且响应时间过长的问題,提出了一种周期势欠阻尼随机共振系统微弱故障诊断方法。通过构建周期势欠阻尼随机共振模型,不仅实现了势垒高度、势阱深度和势壁宽度的调节,而且可以实现势结构、周期信号和噪声的协同匹配,同时,周期性势函数能够消耗过大的噪声能量,从而降低噪声干扰,提高系统的稳定性和微弱故障信号的信噪比输出。通过仿真齿轮磨损、裂纹、缺齿及断齿实验验证了所提方法的有效性,与传统欠阻尼随机共振方法相比,所提方法的信号识别度明显增加。

近年来,作者有幸获得了国家自然科学基金项目(项目编号:51805275)、北京建筑大学城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室开放课题(项目编号:06080921008)、北京建筑大学青年教师科研能力提升计划(项目编号:X21053)的资助。作者结合这些项目,对基于强噪声背景的随机共振微弱故障诊断方法开展研究。由衷感谢国家自然科学基金委员会、北京建筑大学的资助,同时感谢学术界同仁的一贯支持与帮助。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中不妥之处在所难免,诚恳地欢迎广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外文献综述	2
1.2.1 微弱信号检测的特点和方法	2
1.2.2 国外信号处理故障诊断方法	5
1.2.3 国内信号处理故障诊断方法	7
1.2.4 随机共振国内外研究现状	9
1.3 本书研究的主要内容	13
1.4 本书研究的创新点	14
第 2 章 基于随机共振的噪声增强微弱信号检测理论	16
2.1 引言	16
2.2 经典双稳态随机共振模型	16
2.3 经典随机共振的输出信噪比	18
2.4 双稳态随机共振的朗之万方程	18
2.5 小结	19
第 3 章 自适应多分量总体平均随机共振研究	20
3.1 自适应 SVD 的总体平均随机共振	20
3.1.1 SVD 降噪原理	21
3.1.2 构建互信息差分谱	21
3.1.3 自适应 SVD 的总体平均随机共振	22
3.2 仿真验证	23

3.3	轴承实验验证	27
3.4	自适应 EEMD 的多分量总体平均随机共振研究	32
3.4.1	有效 IMF _s 选择	32
3.4.2	自适应 EEMD 的总体平均随机共振	34
3.5	仿真验证	35
3.6	轴承实验验证	41
3.7	小结	45
第 4 章	混沌蚁群随机共振的研究	46
4.1	引言	46
4.2	混沌蚁群随机共振	46
4.3	行星齿轮箱实验平台	49
4.4	行星齿轮箱实验验证	50
4.5	小结	53
第 5 章	双稳约束势函数随机共振研究	55
5.1	引言	55
5.2	约束势随机共振模型	56
5.2.1	约束势理论模型	56
5.2.2	双稳约束势的微弱信号检测策略	59
5.3	双稳约束势随机共振的仿真	60
5.4	实验验证	63
5.4.1	轴承实验验证	63
5.4.2	行星齿轮箱实验验证	65
5.5	小结	67
第 6 章	分段非线性随机共振研究	69
6.1	引言	69
6.2	分段非线性随机共振方法	69
6.2.1	分段非线性随机共振模型	69
6.2.2	分段非线性随机共振系统信噪比	71
6.2.3	分段非线性随机共振的微弱故障特征提取方法	74

6.3	仿真验证	74
6.4	轴承实验验证	76
6.5	小结	78
第7章	非饱和分段线性随机共振的研究	79
7.1	引言	79
7.2	双稳随机共振系统及其饱和特性	79
7.3	分段线性随机共振方法	81
7.3.1	分段线性随机共振模型	81
7.3.2	分段线性随机共振微弱故障特征提取方法	85
7.4	仿真验证	85
7.5	轴承实验验证	87
7.6	轧机齿轮箱轴承实验验证	89
7.6.1	工程实验背景	89
7.6.2	测试系统搭建与数据分析	90
7.7	小结	94
第8章	非对称势随机共振研究	95
8.1	引言	95
8.2	非对称势随机共振模型	95
8.3	非对称势随机共振微弱信号提取方法	97
8.4	仿真验证	98
8.5	轴承实验验证	100
8.6	小结	101
第9章	多参数约束势欠阻尼随机共振故障诊断方法及应用	102
9.1	引言	102
9.2	约束势随机共振模型	103
9.3	多参数约束势随机共振模型信噪比	105
9.4	加权蚁群算法的参数优化策略	108
9.5	CPUSR 方法的微弱故障诊断仿真	110
9.6	实验验证	113

9.6.1	轴承实验验证	113
9.6.2	轧机齿轮箱轴承故障检测	119
9.7	小结	121
第 10 章	周期势欠阻尼随机共振微弱故障诊断方法及应用	122
10.1	引言	122
10.2	周期势欠阻尼随机共振理论	122
10.3	周期势模型的信噪比	124
10.4	周期势欠阻尼随机共振微弱故障诊断策略	128
10.5	周期势随机共振微弱故障诊断仿真验证	129
10.6	实验验证	131
10.6.1	齿轮实验验证	131
10.6.2	轧机齿轮箱齿轮故障验证	137
10.7	小结	141
第 11 章	结论与展望	142
11.1	结论	142
11.2	展望	145
参考文献	148

第1章 引言

1.1 研究背景

随着我国科技的快速发展,机械设备已应用到国民经济的各行各业,有力地体现了我国的制造水平和工程创新能力。滚动轴承和齿轮等零部件几乎在所有类型的旋转机械中发挥着极其重要的作用,也是最常见的机械元件,由于其相对较低的价格和便利的操作性在工业中被长期使用。旋转机械的运行完全取决于滚动轴承或齿轮的健康状况,由于轴的不对中,零部件表面粗糙度、高度的波动等种种原因,经常出现轴承或者齿轮的故障,例如磨损、剥落、点蚀、疲劳等。旋转零部件的故障导致系统的灾难性崩溃,从而降低设备的可靠性和可用性,反过来又增加了停机时间,导致大量的财务损失,同时每一次零部件失效都对工人的安全构成威胁,因此,旋转机械的健康状况监测是确保工业过程可靠性的关键任务。然而,众多故障特征往往在强噪声背景中难以提取,或为了延长设备寿命周期,需要提取早期的微弱故障信号,因此,机械设备故障特征提取需要更加先进的微弱故障特征提取技术,通过对机械设备的早期故障或强噪声背景下的微弱故障进行诊断,使机械故障造成的损失达到最小。

微弱信号提取技术是信号处理的重要技术分支,它利用物理学、电子学和信号处理理论等方法,研究目标信号的特征频率、噪声的变化规律及特点等,从而提取被强噪声淹没的微弱目标特征。在提取微弱故障特征时,受测量仪器及传感器自身噪声的影响,往往使所要提取的目标信号幅值更加微弱,从而使得微弱信号无法提取。微弱信号的提取重点是提取强噪声背景下的微弱特征频率或者机械设备的早期微弱故障,从而使机械故障防患于未然,众多研究学者一直将新方法和新技术作为微弱故障特征提取的探索重点,随着科技的发展,微弱故障特征的提取与检测

技术广泛应用于航空、冶金、风电、地质勘测、船舶、石化以及建筑等工业生产的各个领域,因此,微弱故障特征提取技术成为我国工业发展的支撑基础。

1.2 国内外文献综述

1.2.1 微弱信号检测的特点和方法

在实际测量中,被测信号常常会被强噪声或干扰所淹没,为了检测淹没在强噪声中的小信号(因相对于噪声显得很微弱也称弱信号),发展出了微弱信号检测学。微弱信号检测是一门综合技术,涉及电子学、信息理论、非线性科学、信号处理以及计算机技术等学科,是研究如何从强噪声中把有用信号提取出来的一种新技术。所谓的微弱信号可以从两个方面理解:其一,是指有用信号的幅度相对于噪声或干扰来说十分微弱;其二,是指有用信号的幅度绝对值极小。这两种情况既有联系又有区别,本书讨论的主要是前一种情况,即如何从强噪声背景中检测有用信号,增强微弱信号的传输。微弱信号检测的一个特点是:要求在较低的信噪比中检测微弱信号。造成信噪比低的原因,一方面是信号本身十分微弱,另一方面是强噪声干扰使得信噪比降低,这种干扰有时甚至是人为的。微弱信号检测的另一个特点是常常要求具有快速性,能够应用于实时工况。短数据集条件下实时应用场合的微弱信号检测,在诸如通讯、雷达、声呐、医学成像、地震、工业测量等领域都有着广泛的需求,微弱信号检测技术应用的广泛性和迫切性使之成为一个热点,并促使人们不断探索与研究微弱信号检测的新理论、新方法,以期更快速、更准确地从强噪声背景中检测微弱信号。传统弱信号检测理论主要有时域平均法(同步积累法)、相关检测技术和滤波技术等。

(1) 时域平均法

时域平均法是利用待测信号的重复性和背景噪声的随机性特点,对重复的周期信号取样并累计平均,平均次数越多,输出信噪比也就越高。当待测信号是周期重复的信号,而噪声是无规律的随机信号时,时域平均法对受到干扰的信号多次重复测量,互相对照取平均值,从而有效地剔除噪声,获得有用信号。信号重复次数越多,恢复的信号就越接近真实值,可见该方法存在检测时间过长、效率低下等问题。

(2) 相关检测技术

相关检测技术是采用自相关(待测信号频率未知)和互相关(可以产生与待测信号频率同频的信号)的计算方法去除噪声的。对于自相关处理,理论上噪声在时间轴前后可以被认为是不相关的,噪声和待测信号也是不相关的,由于具有周期性的待测信号将会保留频率值,因而能有效过滤噪声;对于互相关处理,具有相同基波频率的两个周期性信号,它们的互相关函数将会保留基波频率及两者共有的谐波,互相关函数的基波和谐波为两个信号的相位差,而与信号不相关的噪声可以被有效地滤除。

(3) 滤波技术

滤波技术是利用待测信号频率的固定性,通过滤波器限制测量系统的带宽,把带宽外的噪声信号排除在外,得到信噪比较高的输出信号。滤波器是一种最为常见的多频信号处理设备,通过特定的传递函数参数的设置,它将信号中的无用频率分量衰减掉,而让特定的待测信号所在的频率分量通过。然而,实际应用中,由于信号与噪声通常均具有连续的功率谱和较大的带宽,制造频带极窄且有比较高的稳定性的滤波器很困难,且价格昂贵。随着计算机技术和信息技术的高速发展,各种微弱特征信号检测方法大量涌现,其不再局限于传统理想状态,而是考虑各种实际因素做出统计特性描述,因此一些基于计算机技术的现代检测方法成为弱信号检测研究的重点。

现代弱信号检测技术虽然是基于传统的检测技术发展起来的,但在理论基础和数学方法上却有着巨大的差异,以下为几种典型的现代弱信号检测理论和方法。

(1) 小波分析

小波分析是迅速发展起来的一种信号时频分析理论,它具有对信号按不同的尺度进行分层分析的功能,从而可以提取淹没于较强噪声中的微弱特征信号,克服了传统的傅里叶变换不能时域局部化的缺点^[12-14]。傅里叶变换反映的是整个信号全部时间内的整体频域特征,无法解决信号奇异性的位置问题,无法表述信号的时频局域性质,而这种性质恰恰是实际应用过程中非平稳信号最根本和关键的性质,利用小波分析可以很好地解决这些问题。小波变换的局限性主要体现在小波基函数的选取上,目前还未有一个标准或成熟的选择方法,同样,应在怎样的尺度范围内对信号进行小波分解也没有基本的方法,影响小波变换分辨率的信号采样频率和长度也是人们不得不考虑的问题。

(2) 神经网络

神经网络是模仿人脑细胞结构和功能的新型信息处理系统,是由大量的处理

单元组成的非线性智能自适应动力系统^[15-16]。由于神经网络具有复杂的动力学特性,并行处理机制及学习、联想和记忆功能,以及高度的自适应能力等,并且对先验知识没有太多要求,引起了研究人员的广泛关注,但神经网络的训练学习需要大量的样本,这在一定程度上限制了神经网络方法在微弱特征信号检测中的应用。

(3) 混沌理论

混沌是非线性动力系统的固有特性,是非线性系统普遍存在的现象。混沌理论是一种非线性微弱信号检测方法^[17-20],基本思路是将待检测信号作为混沌周期策动力的驱动。由于混沌振子的相变对于噪声具有免疫力,即使在强噪声背景下也不会影响振子状态的改变,微弱周期信号非常敏感,即使信号强度较小也能使系统发生非平衡相变,可以通过辨识混沌振子是否发生相变,来确定微弱特征周期信号的精确分离。但混沌理论需要预先知道待测信号的确切频率以构造周期策动力,在一定程度上限制了这种方法的使用范围。

(4) 高阶统计量理论

高阶统计量理论是在功率谱和相关函数等二阶统计量的基础上发展起来的,它解决了二阶统计量因缺少相位信息而无法直接处理非最小相位系统的问题,在一定程度上克服了功率谱不包含相位信息的缺陷,并且能够较好地抑制噪声,因此在机电系统的状态监测与故障诊断领域中得到广泛应用,但计算量大、计算时间长无疑是高阶统计量理论最重大的问题^[21-22]。

除了常规的方法以外,近年来各种微弱信号检测方法如雨后春笋般涌现,比如差分振子法、独立分量分析法、经验模态分解法、随机共振法等,其中随机共振法是随着非线性动力学和统计物理理论的突飞猛进而出现的一种用于微弱信号检测的新方法。随机共振法与传统故障诊断方法相比具有以下显著特点^[23-27]。

(1) 微弱信号检测机制不同

当前的微弱信号检测方法,不管是用硬件实现还是用软件实现,都立足于抑制噪声,采用各种办法尽量抑制噪声,然后把信号提取出来。随机共振法则不同,它通过将噪声的部分能量转化为信号能量的机制来检测微弱信号。噪声本身也是一种信号和能量,长期以来人们都认为噪声是“讨厌”的东西,它破坏了系统的有序行为,降低了系统的性能,是微弱信号检测的最大障碍。但研究发现,在某些非线性系统中,噪声的增加不仅没有使得输出信号更加恶化,反而使得输出局部信噪比大幅增加,增强了信号的显现。

(2) 检测更低信噪比的信号

随机共振现象出现以前,常用的线性系统技术,如线性放大和线性滤波,以及

最佳滤波检测技术等方法,虽然从信号处理的理论方法到硬件设计已形成了相当完整的微弱信号处理学科体系,但这些方法正如前文所述,其共同点都集中在抑制噪声这一点上,对于不同频段上的干扰信号的抑制,常常按其在频域上的差异,用不同的滤波方式予以解决。事实上,当有用信号的频率与噪声频带重叠时,仅用滤波器就无能为力,因为在噪声得到抑制的同时,往往有用信号也不可避免地受到损害,这极大地影响了微弱信号检测的性能,成为微弱信号检测的瓶颈问题。另外,当噪声很强时,微弱信号几乎被“淹没”,在短数据集条件下,采用一般的线性系统技术可能已无能为力,但借助于非线性系统的随机共振技术,可以获得比最佳线性滤波器更高的信噪比。因此,传统线性分析方法不能解决的微弱信号检测问题,利用随机共振技术就有可能解决。

(3) 快速且实时应用

前述方法如相关分析法、时域平均法一般要求信号有足够的长度,有的理论本身决定了分析过程耗时较长,如高阶统计量理论受理论限制计算量大,速度相对较慢。微弱信号检测器的性能直接与观测时间成正比,常规的一些检测方法对于被较强噪声淹没的微弱信号检测具有一定的局限性。随机共振的实现方式有多种,可以通过添加噪声、调节系统参数等方式实现,在微弱信号检测中具有很强的灵活性及可操作性,同时随机共振模型算法可以便捷地实现硬件化嵌入。

1.2.2 国外信号处理故障诊断方法

故障诊断技术是现代化生产的产物,早在20世纪60年代末,美国国家宇航局就创立了美国机械故障技术小组MFPC。同时期英国也成立了英国机器保健中心,展开了近代机械故障诊断技术的研究,诊断技术由于应用所产生的巨大经济效益而得到迅速的发展。

从20世纪70年代初始,许多发达国家开始在现场安装使用状态监测与诊断系统,例如美国中心发电部的透平监测设备(Turbine Supervisory Equipment)、日本三菱公司的机器健康监测系统(Machine Health Monitoring System)和振动健康监测系统(Vibration Health Monitoring System)、美国西屋公司(Westinghouse Electric Corporation, WHEC)的可移动诊断中心等。由于当时科技水平有限,早期监测系统具有规模小、测点数少、自动化程度低、数据处理速度慢、存储容量小的特点。到了20世纪80年代中期,以计算机为手段的现代机械故障诊断技术得到了快速发展,出现了许多商业化的故障诊断系统。例如:美国的西屋公司早期就致

力于建立故障诊断规则库,然后升级为故障诊断专家系统;IRD (International Research Development Mechanalysis)公司的 IQ2000 系统具有状态分析、实时监控、故障预报与诊断、维修计划与方案确定等一系列功能;此外,还有 Bently Naveda 公司的汽轮机监测仪表系统 Tsl, Ailanta 公司的在线实时诊断系统 M6000,英国中心发电部的 Equipment Monitoring 系统等。到了 20 世纪 90 年代,随着电子技术、计算机技术、信号处理技术、现代测试技术以及相关学科的快速发展,监测与诊断系统的性能也在不断升级。许多发达国家相继研制成功一些比较先进的“系统”,故障诊断技术逐渐进入了实用系统化的时代。例如:美国西屋公司的 GEN-AID 系统,本特利内华达公司研制的瞬态数据管理系统(TDM),德国西门子公司的 Siemens/KMU 系统等^[28]。特别是 Siemens/KMU 系统,它可以对汽轮机、汽轮发电机及辅助设备进行全方位的监测,能够综合进行运行状态分析、振动分析、热力分析、效率分析和寿命估计,对汽轮机叶片、机组轴系、止推轴承、滑动轴承、机架、主控制阀、排气与冷凝部件、导体和绝缘体、发电机冷却系统、励磁系统等进行故障的识别和诊断,该系统将汽轮机、汽轮发电机及相关部件综合起来进行分析和诊断,代表了汽轮发电机组监测与诊断技术领域的先进水平和发展方向^[29-31]。该系统目前已经开始现场应用,并取得了可观的经济效益。

近年来,国外研究机构对设备监测与诊断的理论研究与实际应用都得到了快速发展,其特点是系统越来越庞大、越来越复杂,分布并行的系统代替了集中式的系统,系统性能得到很大提高,单纯的监测与诊断向着监测、诊断、控制、管理、调度的集成化过渡:监测范围从机械振动等简单参数发展到温度、压力、扭振、流量、电磁参量及其他各种参数;监测对象从单一的机组发展成为多区域多机组的网络;诊断内容从机械故障的简单诊断向全方位多层次的机械、电气、电子、热力的综合诊断扩展。在滚动轴承已有的各种诊断方法中,振动分析由于自身显著的优势得到广泛应用^[32]。20 世纪 60 年代中期,随着快速傅里叶变换(FFT)技术的出现和发展,振动信号的频谱分析得到了快速发展。几年后,瑞典 SPM 仪器公司首先开发出冲击脉冲计,它能够根据冲击脉冲的最大幅值来诊断轴承故障,这种方法可以有效地检测出轴承的早期损伤类故障。1974 年,美国波音公司的 Harris 发明了一项叫作“共振解调分析系统”的专利^[33],与冲击脉冲技术相比,共振解调技术对检测轴承早期损伤类故障更有效,这种方法不但能诊断出轴承是否有故障,而且能够判断出故障发生在哪个轴承元件上以及故障发生的大致严重程度。20 世纪 90 年代以来,随着计算机技术的快速发展,开发以计算机为中心的滚动轴承故障诊断系统得到了国内外研究者的重视。计算机信号分析和故障诊断系统不但具有易于维护

和升级的优点,而且还易于推广和应用。通过计算滚动轴承元件损伤时产生的振动信号特征频率,并将其与频谱分析仪得到的结果进行比较,来判断滚动轴承是否有故障。随着旋转机械设备的日益复杂化、高速化,对大型旋转机械在线状态监测系统的可靠性要求也越来越高。随着微电子技术、传感技术、计算机技术、测试技术、转子动力学、网络技术等技术的发展,在线监测与故障分析系统不断趋于完善^[34]。在故障诊断理论发展的同时,工程实践应用也朝着集成化、网络化、开放化、智能化、高度可靠以及与设备、控制系统融合等方面发展。将计算机网络技术与企业的设备监测与故障诊断工作结合起来,推动企业设备管理技术的进步,已经成为机械状态监测和故障诊断发展的一个方向。

1.2.3 国内信号处理故障诊断方法

国内对滚动轴承的工况监测与故障诊断的广泛研究基本开始于20世纪80年代^[35]。自1985年以来,由中国设备管理协会设备诊断委员会、中国振动工程学会机械故障诊断分会和中国机械工程学会设备维修分会分别组织的全国性故障诊断学术会议先后多次召开,极大地推动了我国故障诊断技术的发展。成果比较集中的是大型旋转机械故障诊断系统,已经开发了20种以上的机组故障诊断系统和10余种可用来做现场简易故障诊断的便携式现场数据采集器。在故障诊断方法研究方面,孟庆丰和屈梁生^[36]在国内较早地将时频分布应用于轴承故障诊断。赵纪元等^[37]采用小波包自回归谱技术对大型矿山设备齿轮箱的滚动轴承微弱振动信号进行分析,得到了特征故障频率,从而在小波包分解的弱信号中诊断出该轴承的早期运行缺陷。祝海龙和屈梁生^[38]提出了基于神经网络的自组织包络解调(SOED)算法。张中民等^[39]提出了基于正交小波变换诊断滚动轴承故障的新方法。何晓霞等^[40]采用连续小波分析的方法对滚动轴承振动加速度信号进行处理,提取了滚动轴承在正常、内圈剥落、外圈剥落及滚动体剥落状态下的故障特征。唐英和孙巧^[41]以滚动轴承振动信号为分析对象,基于小波奇异性分析原理进行滚动轴承故障检测新方法的研究。徐玉秀等^[42]针对滚动轴承运行状态,采用极大熵谱法建立了AR模型,并计算出轴承正常及故障状态下的时序模型。朱利民等^[43]研究了低信噪比情况下提取周期性冲击故障信号特征的短时分析方法。徐刚等^[44]为解决传统故障方法难以对变工况运行时的机械进行诊断的困难,提出应用瞬时功率谱和遗传基因方法对在变工况下的运行机械测得的振动信号进行处理,生成能够用于故障识别的优良特征参数,并用于滚动轴承的故障诊断。林京和屈梁

生^[45]指出连续小波变换具有很强的弱信号检测能力,并利用连续小波变换建立了小波熵,将其应用于滚动轴承滚道缺陷识别中。傅勤毅等^[46]采用一种无频带错位的小波包算法进行滚动轴承的故障特征信号提取,清晰地刻画出了滚动轴承故障冲击的特征函数。冯志鹏等^[47-49]针对行星齿轮箱采用傅里叶频谱对齿轮分布式及局部故障进行了研究,同时采用幅值和频率解调分析对行星齿轮箱提取了故障特征。赵学智等^[50-51]利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)从背景噪声强烈的振动信号中提取了周期性冲击信息,同时利用 SVD 从铣削力信号中提取了铣床加工状态信息, SVD 的正交化特性在对小波和小波包变换结果的后续处理中也得到了有效的应用,同时也实现了盲源信号分离^[52-55]。蒋明峰等^[56]利用 SVD 对小波包分解后的肌电信号进行了正交化处理,以获得代表肢体运动模式的最优特征,进而对肌电信号进行分类,用于对假肢的控制。另外,经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)适用于处理非平稳、非线性信号,因此它在各领域得到了比较广泛的应用。西安交通大学雷亚国等^[57]将 EMD 和神经网络相结合,提出了一种新的机械故障诊断模型,并采用轴承试验进行了验证。盖强等^[58]给出了 Hilbert 谱的最高频率分辨率,提出了自适应多分辨率分析原理和方法。沈国际等^[59]给出了 EMD 分解中多频信号分析的一个必要条件,并将其用于齿轮箱故障振动信号的分离。胡劲松等^[60-61]把经验模态分解方法引入旋转机械振动信号滤波,并提出了自相关预处理的 EMD 方法。局部均值分解(Local Mean Decomposition, LMD)是在经验模态分解理论的基础上发展起来的一种较新的时频分析方法,该方法同样具有自适应性,它可以将一个复杂的多分量复合信号分解成多个乘积函数(Product Function, PF)分量和一个余量,得到的 PF 分量能真实地反映原信号的信息。LMD 方法自提出后首先在脑电图信号等生物医学信号的处理与分析方面得到了应用,随后部分学者将其应用到了旋转机械故障诊断领域^[62-67],而在智能故障诊断领域,其优点主要体现在能有效地获取、传递、处理、再生和利用诊断信息,具有对给定环境下的诊断对象进行正确的状态识别、诊断和预测的能力。智能故障诊断方法主要包括专家系统和神经网络诊断方法。近年来越来越多的国内外学者提出了基于智能法的电机故障诊断技术,主要包括专家系统、支持向量机等。专家系统是一种智能的计算机程序,包含该领域内大量专家的经验与知识,它通过模拟专家的推理过程,去解决那些需要专家的知识才能求解的复杂问题。基于专家系统的故障诊断方法在智能诊断领域中研究早、应用广泛且研究成果较多,其主要诊断方法是依据以往专家们的经验,将他们对故障信息的分析总结归纳成规则,建立知识库。当有故障发生时,把故障信息输入推理机,利用知