

**FAULT DIAGNOSIS FOR
RAILWAY ROLLING STOCK BEARING AND
VEHICLE SUSPENSION SYSTEM**

轨道交通列车

轴承与悬挂系统故障诊断

贾利民 魏秀琨 秦 勇 姚德臣 梁 瑜 著



人民交通出版社股份有限公司
China Communications Press Co., Ltd.

Fault Diagnosis for Railway Rolling Stock Bearing and Vehicle Suspension System

轨道交通列车轴承与悬挂系统故障诊断

贾利民 魏秀琨 秦 勇 著
姚德臣 梁 瑜



人民交通出版社股份有限公司

China Communications Press Co., Ltd.

图书在版编目(CIP)数据

轨道交通列车轴承与悬挂系统故障诊断 / 贾利民等
著. — 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.12
ISBN 978-7-114-12669-7

I. ①轨… II. ①贾… III. ①轨道交通—列车—轴承
—故障诊断 ②轨道交通—列车—车悬挂装置—故障诊断
IV. ①U279.3②U260.331

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 308341 号

书 名: 轨道交通列车轴承与悬挂系统故障诊断

著 作 者: 贾利民 魏秀琨 秦 勇 姚德臣 梁 瑜

责任编辑: 刘永超 贾秀珍 李 娜

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpress.com.cn>

销售电话: (010) 59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市密东印刷有限公司

开 本: 720 × 960 1/16

印 张: 17.25

字 数: 309 千

版 次: 2015 年 12 月 第 1 版

印 次: 2015 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-12669-7

定 价: 53.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书, 由本公司负责调换)

内 容 提 要

针对列车运行状态在途监测与安全预警这一主题,本书系统介绍了列车走行部轴承故障诊断和列车悬挂系统故障诊断的研究成果。本书共有 16 章,主要包括城轨列车走行部轴承结构和振动机理分析、城轨列车走行部轴承静动力学分析、常用的轴承故障诊断方法概述、基于动力学模型的轴承故障诊断方法、基于自适应傅里叶分解的轴承故障诊断、城轨列车走行部轴承寿命分析、城轨车辆悬挂系统建模、基于模型的悬挂系统故障诊断方法研究、数据驱动的悬挂系故障诊断方法研究、基于 D-S 证据理论的列车垂向悬挂系统故障分离算法研究、基于 DSmT 的列车横向悬挂系统故障分离算法研究、基于 SVM 的列车悬挂系统故障分离方法、城轨列车悬挂系统故障模拟实验平台等内容。

本书可作为轨道交通车辆检测、车辆安全保障、系统故障诊断领域研究生的教学参考用书,也可供轨道交通专业方向高年级本科生学习参考,对于广大的轨道交通行业的技术人员和从事故障诊断科研人员也具有一定的参考价值。

Synopsis

This book presents our research results on fault diagnosis for railway rolling stock bearing and vehicle suspension systems in the recent years. The book contains sixteen chapters in total. In the rolling stock bearing fault diagnosis part, the main topics include the physical model of the bearing, a survey of the conventinal fault detection methods, model based faut diagnosis for rolling stock bearings, adaptive FFT based fault diagnosis methods and the fatigue life analysis of the rolling stock bearing. In the second part, the fault diagnosis issues of the vehicle suspension are concerned in which the main topics include the first principle model of the vehicle suspension system, model based and data driven methods for the vehicle suspension system fault detection, D-S evidence theory and also the SVM techniques for the fault isolation of the vehicle suspension system.

This book is useful for the master students, reserchers and engineers in the field of railway engineering and mechanical engineering. It is also a reference book for the senior students in the engineering school.

前 言

轨道交通列车运行状态在途监测与安全预警是城市轨道交通安全保障体系的重要组成部分。目前,我国列车运行安全保障和运维仍主要依靠定期检修及事后故障修,列车运行安全状态的实时全面获取和在途预警体系化技术与装备的缺乏已成为我国轨道交通安全水平和运维效率提升的重大瓶颈。如何形成符合国情、先进、适用与经济的列车网络化在途故障监测与预警技术及装备体系,实现从被动安全向主动安全保障、故障修向状态修的技术转型,大大提升我国轨道交通安全保障水平和能力保持水平,为我国轨道交通的可持续发展提供基础性和全局性技术与装备支撑,是当前轨道交通领域的重大课题之一。如何保障轨道交通系统的运营安全,提升运营维护水平,降低全生命周期运营成本已成为我国轨道交通可持续健康发展的瓶颈问题,迫切需要研发适应国情和运营管理机制的包括列车走行部的在途检测、故障诊断和预警技术在内的轨道交通安全保障技术与装备体系。

针对列车运行状态在途监测与安全预警这一主题,本书系统总结了项目组在过去几年在列车走行部轴承故障诊断和列车悬挂系统故障诊断的研究成果。本书的第一部分(第1章到第7章),针对列车走行部轴承的故障诊断,本书深入研究了城轨列车走行部轴承结构、振动机理和故障形式及原因,提出了多因素(径向游隙、转速、载荷、波纹度等)综合作用下的城轨列车走行部轴承静、动力学模型;提出了基于自适应傅里叶分解的轴承故障诊断方法、基于新的非线性动力学模型的轴承故障诊断方法以及基于时频域特征参数融合的轴承故障在途诊断算法和轴承多智能算法融合的在途故障辨识方法;提出了基于获取的实时动载荷数据,并在轴承疲劳寿命分析理论的基础上,构建了时变工况下城轨列车走行部轴承的疲劳寿命评估模型。本书的第二部分(第8章到第16章),针对列车悬挂系统的故障问题,建立了列车悬挂系统的垂向和横向动力学模型,并基于专业车辆动力学软件 SIMPACK 和 Matlab&Simulink 搭建了仿真实验平台,提

出了基于 GLRT 和鲁棒观测器等算法和技术基于模型的故障检测方法,提出了基于 DPCA 和 CCA 等数据驱动的悬挂系统故障检测理论和方法,提出了基于 D-S 证据理论和 SVM 等算法的悬挂系统故障分离技术和方法。

本书的研究成果得到了一些国家科研项目的支持,其中特别感谢轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题“高速列车车辆主动安全控制模型和算法研究”(RCS2014ZT003)、国家“十二五”863 计划课题“基于传感网的列车关键设备在途故障诊断技术”(2011AA110503)、国家“十二五”科技支撑计划“城轨交通轨道安全状态移动检测系统研制”(2011BAG01B04)和“下一代地铁车辆技术研究及示范应用(2013BAG24B03)”,以及教育部博士点基金“一类空间互联复杂大系统的分布式故障诊断理论和方法研究(20110009120037)”等课题的资助。在本书的写作过程中,得到了北京交通大学柳海、郭淑萍、郭昆、闫冬、魏强、刘峰、陈军、程茗、吕又冉、张靖林、张晓中、王腾腾、朱明、李卓玥、贺延芳、尹贤贤、申丽等同学的支持,对他们在书稿编辑和纠错方面所做的工作表示感谢。

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者不吝指教。

作者

2015 年 10 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究意义	1
1.2 滚动轴承故障诊断研究现状	3
1.3 悬挂系统故障诊断研究现状	6
1.4 内容简介	7
本章参考文献	8
第2章 城轨列车走行部轴承结构和振动机理分析	12
2.1 城轨列车走行部轴承结构分析	12
2.2 城轨列车走行部轴承振动机理分析	13
2.3 城轨列车走行部轴承故障形式及原因	14
2.4 本章小结	16
本章参考文献	16
第3章 城轨列车走行部轴承静动力学分析	17
3.1 城轨列车走行部轴承静力学分析	17
3.2 城轨列车走行部轴承动力学分析	26
3.3 城轨列车走行部轴承监测参数	48
3.4 本章小结	48
本章参考文献	49
第4章 常用的轴承故障诊断方法概述	50
4.1 轴承故障的类型及成因	50
4.2 轴承故障监测技术	51
4.3 表征轴承运行状态的特征参数	54
4.4 轴承信号处理方法	57
4.5 基于轴承模型的故障诊断方法	65

4.6 本章小结	66
本章参考文献	67
第5章 基于动力学模型的轴承故障诊断方法	69
5.1 滚动轴承缺陷的非线性动力学机理分析	69
5.2 滚动轴承的非线性动力学模型	74
5.3 动力学仿真试验结果分析	82
5.4 轴承非线性动力学故障模型系统参数的估计	87
5.5 仿真信号特征分析	94
5.6 本章小结	96
本章参考文献	97
第6章 基于自适应傅里叶分解的轴承故障诊断	98
6.1 自适应傅里叶分解方法对轴承故障信息提取的意义	98
6.2 AFD 算法	101
6.3 基于 AFD 的轴承故障诊断算法	104
6.4 轴承振动实验及其结果分析	107
6.5 本章小结	118
本章参考文献	118
第7章 城轨列车走行部轴承寿命分析	120
7.1 球轴承基本额定寿命计算方法	120
7.2 滚动体轴承基本额定寿命计算方法	122
7.3 疲劳寿命影响因素分析	124
7.4 城轨列车走行部轴承载荷—时间历程统计分析	128
7.5 疲劳寿命动态分析	131
7.6 本章小结	132
本章参考文献	133
第8章 城轨车辆悬挂系统建模	134
8.1 车辆悬挂系统及车载故障诊断系统构架	134
8.2 城轨车辆垂向悬挂系统动力学建模	137

8.3	SIMPACK 车辆建模与悬挂系统故障仿真平台	147
8.4	本章小结	150
	本章参考文献	150
第 9 章	基于模型的悬挂系统故障诊断方法研究	151
9.1	Kalman 滤波器设计	151
9.2	GLRT 故障检测方法	152
9.3	基于 GLRT 的城轨车辆悬挂系统故障检测	155
9.4	分布式故障诊断方法研究	158
9.5	本章小结	162
	本章参考文献	163
第 10 章	数据驱动的悬挂系故障诊断方法研究	164
10.1	基于 DPCA 的故障检测方法	164
10.2	基于 DPCA 的城轨车辆悬挂系统故障检测	166
10.3	T-PLS 的算法思想与步骤	169
10.4	基于 T-PLS 的悬挂系统故障检测与诊断	173
10.5	本章小结	179
	本章参考文献	179
第 11 章	基于 D-S 证据理论的列车垂向悬挂系统故障分离算法研究	181
11.1	Dempster-Shafer 证据理论(DST)	181
11.2	特征提取法及距离相似性算法	183
11.3	城轨车辆垂向悬挂系统的故障分离	185
11.4	D-S 证据理论在轻型轨道交通车辆垂向悬挂故障 分离中的应用	192
11.5	本章小结	198
	本章参考文献	199
第 12 章	基于 DS_mT 的列车横向悬挂系统故障分离算法研究	200
12.1	DS _m T 理论	200
12.2	仿真应用	202

12.3 本章小结	206
本章参考文献	207
第 13 章 基于 SVM 的列车悬挂系统故障分离方法	208
13.1 SVM 概述	208
13.2 SVM 算法研究	210
13.3 在列车悬挂系统中应用 SVM 技术进行故障分离	213
13.4 本章小结	217
本章参考文献	218
第 14 章 城轨列车悬挂系统故障模拟试验平台的搭建	219
14.1 城轨列车悬挂系统	219
14.2 城轨列车悬挂系统故障试验平台	222
14.3 故障等级分类	226
14.4 试验平台数据采集与处理	228
14.5 本章小结	229
本章参考文献	229
第 15 章 悬挂系统故障检测模拟试验研究	230
15.1 基于 DPCA 方法的城轨列车悬挂系统故障检测	230
15.2 基于 PLS 方法的城轨列车悬挂系统故障检测	239
15.3 本章小结	248
本章参考文献	248
第 16 章 悬挂系统故障分离模拟试验研究	250
16.1 D-S 证据理论故障分离算法介绍	250
16.2 基于 D-S 证据理论进行故障分离的步骤	251
16.3 基于 D-S 的悬挂系统故障分离	253
16.4 本章小结	266
本章参考文献	266
索引	267

第1章 绪论

1.1 研究意义

国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)第1条指出“提高飞机、汽车、船舶、轨道交通装备等的自主创新能力”,第39条“交通运输安全与应急保障,重点开发交通事故预防预警、应急处理技术,开发运输工具主动与被动安全技术,交通事故再现技术,交通应急反应系统和快速搜救等技术”。地铁已经成为我国(特)大城市公共交通最重要的组成部分,地铁建设正处于高速建设和运营开通高峰期。截至2012年年底,全国累计共有53个城市规划了地铁线路,总规划里程超过14000km;累计29个城市82条线路在建,在建线路里程近1900km。截至2013年年底,全国累计批复36个地铁建设规划,批复里程约6000km;累计共17个城市已建成开通地铁线路78条,运营里程达2266km。到2016年,我国将新建地铁线路89条,总建设里程为2500km,在线运营的车辆总数大约20000辆。

保障车辆的安全运营、旅客的生命安全和机电设备的正常运转是城市轨道交通运营的三大目标,也是发挥其正常运输功能的前提条件。同时城市轨道交通具有快速运转大量乘客的优势,可以降低道路拥堵的成本,为经济的快速发展奠定基础。伴随着城市轨道交通的蓬勃发展,列车的在途安全已成了城市轨道交通发展的核心问题之一,车辆、线路、通信、信号和牵引供电系统故障时有发生,严重影响了城市轨道交通运营安全。一旦因为故障导致事故发生,将造成财产损失甚至人员伤亡,则一定会产生恶劣的社会影响。因此,在列车运营过程中监控包括列车走行部件的各种关键部件,及时挖掘隐患和发现各类故障,预防事故发生,已经成为当今城市轨道交通研究的重要方向。

根据《“十二五”国家战略性新兴产业发展规划》(国发[2012]28号),“十二五”时期是我国战略性新兴产业夯实发展基础、提升核心竞争力的关键时期。规划提出:“轨道交通装备产业作为高端装备制造业的重点培育对象,需大力发展技术先进、安全可靠、经济适用、节能环保的轨道交通装备”,“巩固和扩大国

内市场,大力开展国际合作,推动我国轨道交通装备全面达到世界先进水平”。随着城市轨道交通运营里程的迅速增加,运送客流规模的急剧增大,城市轨道交通列车作为城市轨道运输的载体,如何在快速运行条件下保障城市轨道交通列车的运营安全已经成为各城市共同面临的越来越严峻的考验,在这种情况下,迫切需要对城市轨道交通的核心关键装备进行实时故障监测,研制适合我国国情的以监控关键装备为核心的故障诊断系统,提升城市轨道交通列车运营的安全性和稳定性。

城市轨道交通列车作为城市轨道运输的载体,如何在这种快速交通方式下保障城市轨道交通列车的安全运营已经得到国内外许多专家学者的关注,而走行部是城市轨道列车的关键系统,其结构复杂,一旦出现故障,对列车运行影响较大。国内外地铁公司均注重对走行部进行监控,目前主要工作集中于地面设备和日常检修。地面设备主要监测轮对故障和轴承故障,其他设备监测都是靠人工日常检修和维护。目前,法国、德国和日本等国家也在研究走行部在线监测技术,我国从2007年以来也在开展这方面的研究工作,但对于城市轨道交通列车走行部在线监测诊断还没有相应成熟产品,更无统一标准。

走行部作为城轨车辆的关键设备之一,一般是由轮对、轴箱、悬挂系统、驱动装置、构架及制动装置等几部分组成。其中悬挂系统作为走行部的重要部分,分为一系(设置在转向架构架与轴箱之间)和二系(设置在车体底架与转向架底架之间)两种。采用两系悬挂可以减少整个车辆悬挂装置的总刚度,增大静挠度,改善车辆垂向运动平稳性,减小车辆与线路之间的作用力^[1]。因此,悬挂系统的安全性对整列轨道车辆的安全起着至关重要的作用。其一旦发生故障,直接影响车辆正常运行,严重时会造成车辆倾覆,危害旅客的生命财产安全。

滚动轴承是旋转机械中的重要基础元件,具有承受载荷的作用和相对运动的功能,也是旋转机械振动的主要激振源之一。从20世纪40年代开始,滚动轴承就在机械产品中占据重要地位;最早投入使用的带有保持架的滚动轴承是英国钟表匠 John 于1760年为制作H3计时计而发明的球轴承^[2];随着冶金及抛光技术的发展完善,第一次工业革命之后,滚动轴承作为一种机械基础部件,被更广泛地应用于各类机械产品中。轴承的运行状态直接关系到系统能否正常运行,在机械系统中因为轴承的故障,造成了许多严重的事故;滚动轴承故障在齿轮箱故障中占有较大比例,仅次于齿轮故障,约占19%^[3],而水泵和电动机的故障原因中,轴承故障是最主要因素^[4,5]。在地铁中,由于车辆运行区间短、停站时间短、速度变化频繁、行车密度大、运行线路环境条件变化小等因素,使得轴承成为列车上最容易发生故障的零部件之一,它工作状态的好坏不仅直接影响列

车的平稳性和舒适性,还会影响列车运行安全与否。

轨道列车轴承在途故障诊断的应用,能降低地铁列车的运行成本^[6]。铁路车辆滚动轴承引入设备的监测和诊断技术以后,在1979~1986年间,铁路系统共防止车辆燃轴事故291万件,事故减至原来的1/14(1986年和1976年相比),相当于增加运输投入2个亿,每年增加运输车辆43万次。广州铁路局自1989年以来,和未采用有关的诊断技术相比较,轴承平均延长架修3次以上,最多的达9次^[7]。地铁与铁路系统都属于轨道交通,虽然两者之间有其自身的运行特点,但在地铁开展列车滚动轴承故障诊断与预报的研究,因此获取的轴承实时运行状态,对于降低运营成本,提高经济效益也有同样的效果。

为保证车辆等设备正常运行,就必须定期对列车走行部的安全状态进行实时评估,找出薄弱部件,降低列车的故障率,保障乘客的人身安全,节约城轨运营成本,实现轨道交通运营主动安全。为发现具体的故障隐患,及时地对子系统薄弱部件进行状态监测及故障检测分离,增加了城市轨道交通车辆运营的可靠性,提高了运输能力,同时可以显著地减少因传统的定期维护所产生的一系列相关费用。目前,国内外几乎没有对悬挂系统故障分离的相关研究,因此,对列车走行系进行定期安全评估,并对关键设备悬挂系统进行实时的安全监测与故障分离是十分必要且有意义的。

从目前城市轨道交通列车诊断技术的研究和应用来看,现有的技术条件远远不能满足城市轨道交通快速、安全、舒适的乘车要求。为了适应城市轨道交通工程的飞速发展,改善轨道交通运营的安全现状,预防事故和降低事故损失,必须运用系统的观点,研究用于轨道交通列车走行部状态信息获取优化技术和智能故障诊断技术,研发具有我国自主知识产权的城市轨道交通安全保障系统与装备产业,提升我国自主相关系统和装备的竞争能力,提高我国城市轨道交通大规模建设和运营过程中与国际垄断企业的谈判能力,降低我国城市轨道交通运营成本。

综上所述,城市轨道交通列车走行部在途故障诊断系统具有迫切的现实需求和重要意义,城市轨道交通(以下简称城轨)列车走行部在途监测和预警是亟待解决的重大科学技术问题。本书正是为解决这一重大技术问题而开展的。

1.2 滚动轴承故障诊断研究现状

20世纪60年代中期,国外两位学者发明了快速傅里叶变换,大大提高了傅里叶变换和短时傅里叶变换^[8]算法的速度,使得频谱分析技术迅猛发展,频谱

分析的优势被迅速应用于轴承故障诊断,为轴承故障诊断由时域分析进入频域分析奠定了基础。滚动轴承元件表面有损伤时,其振动信号的实际频谱能量会相对集中在一个频率上,成为故障特征频率,计算出采集信号的故障特征频率并与振动信号的实际频谱进行比较,能较准确地判断轴承是否有故障。这种基于特征故障频率轴承故障诊断方法的缺点是传感器采集的信号含有大量的背景噪声^[9,10],信号的频谱非常复杂,特征频率通常被淹没在噪声频率之中,一般不通过合适的滤波器滤波很难找到故障特征频率。不同轴承的故障特征频率不尽相同,随着轴承故障诊断的发展,专家学者开始了对滚动轴承运动学和动力学的研究,研究轴承故障的机理,轴承零件的几何尺寸和缺陷类型对信号中的频率的影响,从而可以精确计算轴承的故障特征频率。H. L. Balderston^[11]给出了滚动轴承的滚动体在内外滚道上通过频率的计算公式、滚动体及保持架旋转频率的计算公式。Taylor^[12]对比了轴承多种故障的频谱特点,提出了故障尺寸的计算方法。Randall^[13]将信号变换到频域后,对倒频谱与功率谱诊断轴承故障做了对比,得出倒频谱效果优于功率谱。

20世纪80年代,Claasen和Mecklenbraju ker^[14]首次介绍了Wigner-Ville分布的离散算法,之后该方法被广泛应用于信号探测和故障诊断中。小波变换被誉为“数学显微镜”,在1974年被提出后,直到1986年数学家Meyer构造出一组真正的小波基,之后他与Mallat^[15]合作建立了构造小波基的方法,研究了多尺度分析,为小波的快速发展奠定了理论基础。小波分析因其具有可调的时频窗口,能够自适应处理信号而能被广泛应用于轴承的故障诊断中。

之后,轴承的故障诊断方法研究一直在进步,许多国外的学者致力于更精确、更快速、更普适地诊断轴承的故障。如2001年Kaewkongka等人研究了用小波变化和神经网络来做涡轮机状态监控的新方法。首先对采集的加速度信号做连续小波变换,然后提取变换后的图像作为各种机器状态唯一的特征,再利用反向传导神经网络(BPNN)评价前面所提方法的性能。试验研究了4种状态的机器操作状态:平衡轴、非平衡轴、未对齐的转动轴和一个有缺陷的轴。

国内虽然较国外起步较晚,但是对轴承故障监控研究的成果也很多,很多成果已经转换为产品。

余志红,王朝晖等^[16]研究了离心压缩机轴承的故障特征模式提取。选取于离心压缩机轴承信号的最大值、最小值、峰值、平均值、绝对值、方差值、波形因子、脉冲因子、峰值因子以及频谱因子作为原始特征模式,应用模糊聚类方法将轴承运行状态分为正常、油膜振荡、摩擦诱喘振和气隙激振4种,应用数据挖掘的方法提取了故障的特征模式。

张星辉,康建设等人^[17]针对隐 Markov 模型故障诊断和层次隐 Markov 模型故障预测过程中时间较长的问题,将层次隐 Markov 模型转化为动态 Bayes 网络,并应用交叉树推理算法,缩短了轴承故障诊断和故障预测过程的时间。

乔保栋,陈果等^[18]人提出了一种基于 Weka 软件数据挖掘平台的滚动轴承故障知识获取的方法。该方法运用滚动轴承均方根值、峰值、峰值因子、脉冲因子、裕度因子、波形因子、峭度和 3 层小波分解得到的各层细节信号包络谱的最大值作为特征参数,并选取正常、内圈故障、外圈故障、滚动体故障作为原始特征模式,借助 Weka 平台的 C4.5 决策树的故障知识自动获取方法应用于实际的轴承故障数据,识别轴承的故障模式。

清华大学的邱阿瑞、尹彤^[19]在轴承信号处理过程中,利用有限冲击响应数字滤波器对原始的轴承振动信号滤波,去除原始采集信号中存在的各种噪声与干扰,再用希尔伯特变换对滤波后的信号取包络,用 FFT 变换做频谱分析,提取轴承的故障特征频率,判断轴承是否发生故障。

何正嘉^[20]详细分析了小波分解及小波包分解在轴承故障诊断中的应用,引入自回归谱分析并与小波包分解结合起来,将小波包分解技术与滚动轴承各零部件故障信息的不同频带对应起来,诊断轴承的早期故障,为滚动轴承的去噪、特征提取和故障识别提供了一种新的方法;同时也阐述了谐波分析、小波分形技术在轴承故障诊断中的应用。

张中民、卢文样等^[21]提出了利用正交小波变化诊断轴承故障的方法,首先利用小波分析技术对滚动轴承故障振动信号在各小波空间进行分解,将滚动轴承故障振动信号变换到时间—尺度域,再对各小波空间的小波系数进行包络细化谱分析,最后观察分析各小波系数的包络细化谱图,诊断轴承故障是否存在,并识别轴承的故障模式。

缪荣松^[22]分析了滚动轴承非平稳信号的特征,提出了基于小波分解、滤波、重构和 Hilbert 变换包络分析的小波—包络分析方法,利用 db10 小波对非平稳轴承振动信号进行滤波重构,再利用 Hilbert 变换得到包络信号,最后对包络信号做细化谱分析,观察频谱图判断轴承是否发生故障。

于德介、程军圣和杨宇^[23]提出了基于 Hilbert 边际谱诊断滚动轴承故障的方法,首先利用 EMD 将滚动轴承的三种状态(正常、外圈故障和内圈故障)的样本信号分解成有限个 IMF,对各个 IMF 分量做 Hilbert 变换得到其边际谱,确定固有频率段并计算频率段内各分量的能量特征值作为三种状态的标准。然后用同样方法计算采集的轴承原始信号的能量特征值,利用 M—距离函数判别轴承的故障模式。

扈炳涛^[24]研究了小波去噪和小波包变换提取滚动轴承故障特征的方法,首先对轴承振动信号进行小波去噪,再应用小波包多层分解与重构提取滚动轴承各零部件的故障特征频率和各层最低点能量特征,进而诊断机车轴承是否发生故障。

北京化工大学的冯赫^[25]分析了滚动轴承的数学模型,并基于小波分析提出了轴承故障诊断的特征参数法和特征频率法。

近二十年来,设备运行状态在途监控和故障诊断在生产和生活中占据越来越重要的地位,随着大力发展电气控制和自动化技术,现代状态检测与故障诊断技术已经取得了长足的进步,地铁列车轴承的在途故障诊断系统也在逐渐加速发展,在途状态检测与诊断技术也逐渐趋于成熟。轴承作为列车“全状态”获取的重要零部件,其在途状态检测与故障诊断系统要达到如下目的^[26]:

(1)通过监测轴承的实时运行状态,能够及时、准确地对各种故障状态或异常状态做出诊断,通过诊断结果指导对设备的运行和维修,从而提高设备运行的安全性和可靠性,把故障可能导致的损失降低到最低水平。

(2)根据检测结果制订合理的维修制度,发挥轴承设计的最大能力,在保障安全和可靠的前提下适当延长滚动轴承的服役期限,提高轴承的利用率,降低运营成本。

(3)通过监测数据分析轴承的故障原因,评估轴承的设计指标,从应用的角度出发,为结构修改和制造工艺提供数据支持,优化轴承的设计。

1.3 悬挂系统故障诊断研究现状

关于城轨车辆悬挂系统状态监测的研究已有了诸多成果。在文献[27,28]中,交互式多模型方法(IMM)与参数估计的方法被成功地应用于车辆悬挂系统的状态监控。文献[29,30]提出了一种鲁棒故障检测观测器的设计方法,并对分布式观测器的设计进行了研究。另有[31~33]等文献也介绍了几种基于模型的悬挂系统故障检测方法。此外,作者在论文[34,35]中研究了基于广义概率比率检验的悬挂系统故障检测方法,并在论文[36]中利用多元时间序列的相似性匹配方法研究了悬挂系统的故障分离问题。

然而基于模型的故障检测方法都存在着一个共同的问题,那就是所使用的模型是否可靠。车辆悬挂系统的动力学特性在垂向与横向上具有耦合作用,悬挂系统部件的非线性,车体的柔性结构等诸多因素决定了我们难以获得一个准确的数学模型,从而限制了这些基于模型的故障诊断方法的应用。尽管文献

[37]在设计观测器时考虑了鲁棒性问题,但干扰矩阵的选取仍然具有不确定因素。此外,车辆建模过程复杂,模型阶数较高,计算负担较大,也成为其推广应用的制约因素。

数据驱动的故障诊断方法近年来得到了广泛的重视与研究,取得了长足的发展。基于多元统计分析的故障诊断方法就是其中最为重要的一种。这类方法利用过程变量的历史数据,利用多元投影方法将多变量的样本空间分解成由主元变量张成的较低维的投影子空间和一个相应的残差子空间,并分别在这两个空间中构造能够反映空间变化的统计量,然后将观测向量分别向这两个子空间投影,并计算相应的统计量指标用于过程监控。常用的多元投影方法包括主元分析(PCA)、偏最小二乘(PLS)、独立主元分析(ICA)及规范变量分析(CVA)等。在城轨车辆悬挂系统性能监控方面,数据驱动的故障诊断同样得到了应用,如文献[38]采用动态主元分析算法(DPCA)与动态规范变量分析算法(DCVA)实现了悬挂系统故障的在线检测,效果令人满意。更进一步,文献[39]以城轨车辆悬挂系统为应用对象,对基于模型的故障检测方法 with 数据驱动的故障检测方法做了深入而全面的比较研究。

此外,文献[40,41]提出了一种无模型的铁路车辆悬挂系统故障诊断方法,这种无模型的方法利用车辆在运行过程中各个自由度上运动之间的相互关系作为监控对象从而达到故障检测的目的。

上述文献的研究都局限于悬挂系统的故障检测问题,没有涉及故障分离。而且,上述研究大多停留在理论方法研究这一层面,鲜有实际应用成果。

1.4 内容简介

本书主要介绍城轨列车走行部滚动轴承和列车悬挂系统最新的研究成果。其中第2章阐述了轴承的结构和振动机理以及轴承的故障形式及产生原因;第3章建立了不同参数下轴承的动力学模型并对其进行了分析,找出了轴承内部结构和外部原因与征兆间的映射关系,并确定了轴承监测部位与监测参数;第4章则详细介绍了轴承故障成因及类型和轴承故障诊断方法;第5章建立了轴承的非线性动力学方程和非线性动力学模型,以含有内圈划伤缺陷的轴承为例对轴承进行故障诊断;第6章应用AFD方法对轴承进行故障诊断并介绍了AFD算法的使用情况;第7章分析了不同参数对轴承疲劳寿命的影响,构建并验证了时变工况下城轨列车走行部轴承的疲劳寿命评估模型的可靠性;第8章搭建并验证了城轨车辆垂向悬挂系统模型的可靠性,基于SIMPACK软件实现了城轨车