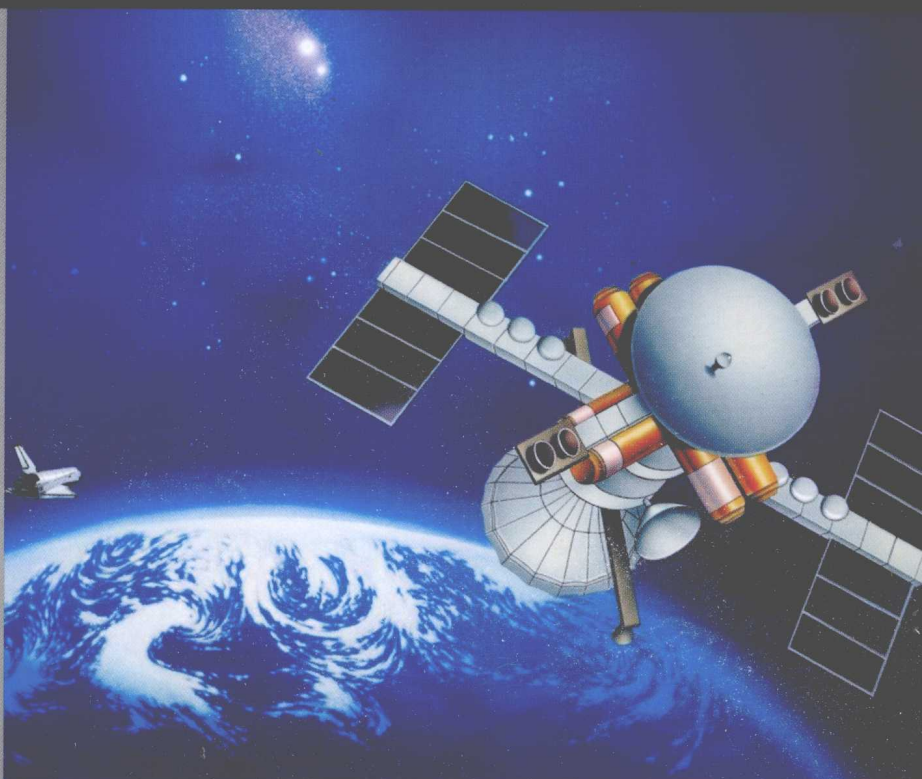




夏新涛 朱坚民 吕陶梅 著

滚动轴承摩擦力矩乏信息推断



科学出版社
www.sciencep.com

滚动轴承摩擦力矩乏信息推断

夏新涛 朱坚民 吕陶梅 著

国家自然科学基金资助项目 (50375011, 50675011)

上海市第三期本科教育高地“机械设计制造及其自动化”建设项目

江苏省工业装备数字制造及控制技术重点实验室开放研究基金(DM2009003)

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是论述滚动轴承摩擦力矩时间序列的乏信息推断新方法及其应用技术的学术专著。主要涉及的内容包括:滚动轴承摩擦力矩研究进展,乏信息系统理论的进展、特征及理论基础,滚动轴承摩擦力矩的区间数和模糊范数法评估,滚动轴承摩擦力矩的灰预测方法,滚动轴承摩擦力矩的最大熵自助和灰自助评估方法,滚动轴承摩擦力矩的灰混沌动态评估与预测方法,滚动轴承摩擦力矩的不确定性与非线性评估方法,以及滚动轴承润滑脂摩擦学性能的改进与参数估计等。

本书可供高等院校相关专业的师生和从事滚动轴承性能研究、实验数据分析等工作的研究人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

滚动轴承摩擦力矩乏信息推断/夏新涛,朱坚民,吕陶梅著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-028348-1

I. 滚… II. ①夏… ②朱… ③吕… III. 滚动轴承-摩擦力-力矩-研究 IV. TH133.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 138876 号

责任编辑:耿建业 装 育 / 责任校对:李奕莹

责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 7 月第一次印刷 印张:17 3/4

印数:1—2 500 字数:339 000

定价:55.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

实验是科学探索的必要环节,实验数据分析是获取研究对象特征信息的重要方法。近年来,信息理论已取得重大进展,并出现两个极端的研究方向:海量信息分析和乏信息分析。

乏信息又称贫信息,指研究对象呈现的特征信息不完备与不充分,且缺乏先验知识。乏信息的典型表现有:数据少(小样本);实验样本多,但样本含量少(也称小样本);概率分布未知;趋势未知等。

滚动轴承是工作主机的关键部件,是国家基础建设和国民经济运行的重要环节,其新产品研制涉及许多乏信息系统。直升机轴承、大飞机轴承、歼击机轴承、核反应堆轴承、航天器轴承、新型主战坦克轴承、高速铁路轴承、新型风力发电轴承,以及极端工况新型轴承等,几乎没有相关性能的概率分布与变化趋势的先验资料。

在滚动轴承摩擦力矩的实验分析中有大量的乏信息问题亟待解决。长期以来,轴承性能实验主要进行疲劳寿命及其可靠度的统计分析,并以威布尔分布为基本假设。航天、航空、新能源、新材料等领域的快速发展,对轴承摩擦力矩及其寿命与可靠度提出新要求,使传统的轴承性能评估理论面临新挑战。其原因是这些性能的概率分布未知,特征数据很少,特别是轴承内部零件之间的非线性动态接触与碰撞,以及密封与润滑介质的非线性黏温特性和黏压特性等,且精度/质量损失呈现出不确定和多变的非线性动态特征,导致轴承摩擦力矩及其演化趋势随时间和工况发生改变,很难建立全面、合理且有效的纯理论模型。

本书总结了作者近年来在滚动轴承摩擦力矩乏信息推断方面的主要研究成果,共分为9章。基本内容包括:乏信息系统理论的起源及其特征、滚动轴承摩擦力矩的测量与计算方法、滚动轴承摩擦力矩的区间数和模糊范数法评估方法、滚动轴承摩擦力矩的灰预测方法、滚动轴承摩擦力矩的最大熵自助和灰自助评估方法、滚动轴承摩擦力矩的灰混沌动态评估与预测方法、滚动轴承摩擦力矩的不确定性与非线性评估方法,以及滚动轴承润滑脂摩擦学性能的改进与参数估计等。

作者在研究中发现,滚动轴承摩擦力矩时间序列属于混沌系统,因为其最大Lyapunov指数大于零。这是一个很有意义的发现,为深入探讨滚动轴承摩擦力矩的非线性动力学特征及其演变奠定了基础。

本书的研究工作得到国家自然科学基金(50375011, 50675011)、上海市第三期本科教育高地“机械设计制造及其自动化”建设项目、国防科工委项目子项(MKPT-2004-51ZD/7)、河南省教育厅自然科学研究计划项目(2010B460008)、江

苏省工业装备数字制造及控制技术重点实验室开放研究基金(DM2009003)、郑州铁路局科研基金(200419)和河南科技大学博士科研启动基金(09001318)等多项基金与项目的资助。

本书的部分成果获得国家教育部自然科学二等奖(2008)和北京市科学技术进步三等奖(2009),并在 *Measurement Science and Technology*、*Measurement*、*The Journal of Grey System*、*Journal of Testing and Evaluation*、*Advanced Materials Research*、*Applied Mechanics and Materials*、*Chinese Journal of Mechanical Engineering*、《机械工程学报》、《航空动力学报》、《兵工学报》、《宇航学报》、《农业机械学报》、《轴承》、《吉林大学学报(工学版)》、《四川大学学报(工程科学版)》、《河南科技大学学报(自然科学版)》等国内外学术期刊,以及 IEEE 和 SPIE 等国际学术会议上发表。

本书由夏新涛(河南科技大学教授,博士)、朱坚民(上海理工大学教授,博士)和吕陶梅(河南质量工程职业学院教师,硕士)撰写,并由夏新涛统稿。参与部分写作的还有张永、王长兴、陈士超、张林和孟凡念。

洛阳轴研科技股份有限公司的李建华、朱孔敏与汤洁等高级工程师,上海大学的陈晓阳教授,北京航空航天大学的王中宇教授,南京工业大学的黄筱调教授,河南科技大学的张永振、任小中教授和陈龙讲师等对作者的研究工作提供了很多帮助与支持;河南科技大学、上海理工大学和河南质量工程职业学院的领导与主管部门,以及科学出版社的编辑为本书的顺利出版付出了大量的心血。借本书出版之际,谨向他们表示衷心的感谢!

感谢作者的家人在作者的学术研究和成书过程中所给予的理解与支持!

由于作者水平所限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

目前,滚动轴承摩擦力矩的理论研究和实验评估尚处于初期的发展阶段,尤其在乏信息推断方面仍存在大量问题亟待解决,希望通过作者和读者的努力,能使之不断完善与进步!

作 者

2010 年 4 月于洛阳

目 录

前言

第 1 章 滚动轴承性能及其研究方法	1
1.1 滚动轴承的性能	1
1.1.1 滚动轴承的基本性能	1
1.1.2 滚动轴承的基本失效方式	2
1.1.3 滚动轴承的摩擦磨损特征	3
1.2 滚动轴承摩擦力矩的研究现状	4
1.2.1 滚动轴承摩擦力矩的地位与作用	4
1.2.2 滚动轴承摩擦力矩的研究进展	6
1.2.3 滚动轴承摩擦力矩的研究意义	7
1.2.4 滚动轴承摩擦力矩数据序列的基本特征	7
1.3 滚动轴承摩擦力矩研究的基本方法	8
1.3.1 理论分析方法的基础	8
1.3.2 性能实验方法的一般措施	8
1.3.3 统计分析方法的困难	8
1.3.4 乏信息实验与评估方法	8
1.4 滚动轴承摩擦力矩乏信息推断的基本内容	9
1.5 本章小结	10
参考文献	10
第 2 章 乏信息系统理论的起源及其特征	12
2.1 乏信息系统理论的起源与构成	12
2.1.1 乏信息系统理论的起源	12
2.1.2 乏信息系统理论的特征	14
2.1.3 乏信息系统理论的构成	15
2.2 混沌理论的起源及其特征	16
2.2.1 混沌理论的起源	16
2.2.2 混沌理论的基本特征	17
2.3 灰色系统理论的起源及其特征	17
2.3.1 灰色系统理论的起源	17
2.3.2 灰色系统理论的基本特征	18

2.4 信息熵理论的起源及其特征	18
2.4.1 信息熵理论的起源	18
2.4.2 信息熵理论的基本特征	18
2.5 模糊集合理论的起源及其特征	19
2.5.1 模糊集合理论的起源	19
2.5.2 模糊集合理论的基本特征	19
2.6 本章小结	20
参考文献	20
第3章 滚动轴承摩擦力矩的测量与计算方法	23
3.1 滚动轴承摩擦力矩的基本概念	23
3.2 滚动轴承摩擦力矩的分类及影响因素	23
3.2.1 滚动轴承摩擦力矩的分类	23
3.2.2 滚动轴承摩擦力矩的影响因素	24
3.3 滚动轴承摩擦力矩的计算方法	25
3.3.1 滚动轴承摩擦力矩的近似计算	25
3.3.2 国内滚动轴承摩擦力矩计算方法	26
3.3.3 国外滚动轴承摩擦力矩计算方法	27
3.4 滚动轴承摩擦力矩的测量方法及仪器	31
3.4.1 滚动轴承摩擦力矩的测量方法	31
3.4.2 国内典型轴承摩擦力矩测量仪	34
3.4.3 国外典型轴承摩擦力矩测量仪	39
3.5 本章小结	40
参考文献	40
第4章 滚动轴承摩擦力矩的区间数和模糊范数法评估方法	41
4.1 静态评估问题	41
4.2 基于区间数的模糊范数方法	42
4.2.1 随机信息和尺度信息的提取	42
4.2.2 随机信息区间和尺度信息区间的融合	42
4.3 模糊范数方法	43
4.3.1 隶属函数的建立	43
4.3.2 区间估计与预报	45
4.3.3 概率密度函数与置信水平	45
4.4 计算步骤	46
4.4.1 模糊范数法的计算步骤	46
4.4.2 基于区间数的模糊范数法的计算步骤	46

4.5 计算机仿真实验研究	46
4.5.1 计算机仿真的基本概念	46
4.5.2 模糊范数法的仿真实验以及与统计法的效果对比分析	48
4.5.3 基于区间数的模糊范数法仿真实验以及与统计法的效果对比分析	52
4.5.4 仿真实验结果讨论	56
4.6 滚动轴承摩擦力矩的实验研究	56
4.7 本章小结	60
参考文献	60
第5章 滚动轴承摩擦力矩的灰预测方法	62
5.1 多种灰预测模型	62
5.1.1 预测模型的种类	62
5.1.2 灰预测的基础模型	63
5.1.3 修正基值的灰色离散预测模型	67
5.1.4 灰离散动态预测模型	69
5.1.5 新初值灰离散动态预测模型	69
5.1.6 远期预报模型	71
5.2 航天轴承摩擦力矩寿命实验	72
5.2.1 实验方案	72
5.2.2 实验设备	74
5.3 个体识别的近期动态评估方案	75
5.3.1 近期动态预测模型的对比分析	75
5.3.2 近期动态建模区段的取值大小研究	87
5.3.3 滞后与超前差问题	89
5.3.4 区间近期动态预测	91
5.3.5 确定个体识别的近期动态评估方案	94
5.4 个体识别的远期动态评估方案	94
5.4.1 远期动态预测方法的对比分析	95
5.4.2 远期动态建模区段的取值大小研究	98
5.4.3 区间远期动态预测研究	100
5.4.4 远期预测的可靠度估计	104
5.4.5 确定个体识别的远期动态评估方案	104
5.5 软件的开发及其应用	105
5.5.1 开发环境介绍	105
5.5.2 总体设计方案	105
5.5.3 软件功能和操作说明	106

5.6	总体推断方法	110
5.6.1	灰自助预测模型 GBM(1,1)	110
5.6.2	数据融合模型	113
5.6.3	寿命综合评估的 GBM(1,1)灰自助模型运行步骤	116
5.6.4	总体可靠度融合模型运行框图	118
5.7	从个体识别到总体推断的工程应用	119
5.7.1	研究方案	119
5.7.2	个体识别结果	119
5.7.3	总体推断结果	122
5.7.4	讨论	123
5.8	本章小结	124
	参考文献	124
第6章	滚动轴承摩擦力矩的最大熵自助和灰自助评估方法	126
6.1	大型滚动轴承摩擦力矩实验	126
6.1.1	实验方案	126
6.1.2	实验设备	127
6.2	滚动轴承摩擦力矩静态评估与预测	130
6.2.1	基于最大熵的自助估计与预测模型 EBM	130
6.2.2	工程应用	132
6.3	滚动轴承摩擦力矩动态评估与预测	138
6.3.1	动态问题	138
6.3.2	基于灰自助融合的动态参数估计与预测	139
6.4	对比分析和讨论	147
6.5	本章小结	147
	参考文献	148
第7章	滚动轴承摩擦力矩的灰混沌动态评估与预测方法	149
7.1	问题的提出	149
7.2	混沌理论基础	150
7.2.1	相空间重构理论	150
7.2.2	混沌识别	150
7.2.3	混沌预测理论	152
7.3	滚动轴承摩擦力矩实验数据采集	156
7.4	实验数据降噪处理方法的选定	157
7.4.1	小波降噪原理	158
7.4.2	降噪方法的选定	158

7.5 滚动轴承摩擦力矩的混沌特性研究	158
7.5.1 重构参数选取的方法	159
7.5.2 混沌特征量	164
7.5.3 轴承摩擦力矩相空间的重构	166
7.5.4 轴承摩擦力矩系统混沌识别	168
7.6 滚动轴承摩擦力矩的灰混沌评估和预测	170
7.6.1 灰混沌评估模型 GCEM	171
7.6.2 基于 GCEM 模型的滚动轴承摩擦力矩预测	172
7.6.3 灰混沌评估和预测的讨论	176
7.7 滚动轴承摩擦力矩的多种混沌预报方法研究	177
7.7.1 混沌动态融合预测模型 CGBM	177
7.7.2 基于 CGBM 模型的滚动轴承摩擦力矩预测	178
7.7.3 多种混沌预报方法的讨论	184
7.8 本章小结	186
参考文献	186
第 8 章 滚动轴承摩擦力矩的不确定性与非线性评估方法	189
8.1 不确定性和非线性问题	189
8.2 不确定性和非线性的乏信息分析基础	189
8.2.1 关联维数原理	189
8.2.2 盒维数原理	191
8.3 滚动轴承摩擦力矩不确定性和非线性的实验研究	192
8.3.1 实验数据	192
8.3.2 不确定性分析	194
8.3.3 非线性动力学特征分析	200
8.4 滚动轴承摩擦力矩的不确定性和非线性特征的灰关系	204
8.5 本章小结	208
参考文献	208
第 9 章 滚动轴承润滑脂摩擦学性能的改进与参数估计	210
9.1 滚动轴承的常用润滑脂及添加剂	210
9.1.1 润滑脂的种类及性能	210
9.1.2 纳米粒子添加剂的种类及性能	211
9.1.3 纳米粒子添加剂的选择及制备	212
9.2 纳米粒子添加剂润滑脂的摩擦学性能	214
9.2.1 四球机的工作原理	214
9.2.2 磨斑直径和摩擦因数测试	217

9.2.3 磨损程度分析	218
9.2.4 摩擦因数分析	219
9.3 纳米粒子添加剂的减摩抗磨机理	220
9.4 纳米粒子添加剂润滑脂的摩擦实验数据的参数估计	226
9.4.1 基于真值融合技术的真值估计	226
9.4.2 基于模糊范数法的区间估计	228
9.4.3 基于灰自助方法的区间估计	229
9.5 本章小结	237
参考文献	237
附录 A 滚动轴承摩擦力矩测量仪器的主要技术参数	239
附录 B 滚动轴承摩擦力矩的部分试验数据	240
附录 C 最大熵原理和熵值的计算	260
附录 D 纳米粒子添加剂润滑脂的防腐蚀性能改进	264
后记	269

第 1 章 滚动轴承性能及其研究方法

作为精密的机械元件,滚动轴承的工作性能直接影响到主机的工作性能,甚至某些装在主机关键部位的轴承的工作性能几乎决定了该主机的工作性能。本章详细介绍滚动轴承的一项重要使用性能——摩擦力矩,进而揭示轴承摩擦力矩数据序列的基本特征。关于如何对摩擦力矩进行研究,目前存在几种常用的方法,主要有理论分析方法、性能实验方法、统计实验方法和乏信息实验与评估方法。鉴于摩擦力矩具有不确定的强烈波动和趋势变化,属于概率分布与趋势规律都未知的乏信息系统,运用理论分析方法、性能实验方法和统计实验方法存在弊端,故提出采用乏信息实验与评估方法对轴承摩擦力矩数据序列进行研究分析。

1.1 滚动轴承的性能

1.1.1 滚动轴承的基本性能

(1) 振动和噪声。

滚动轴承的振动和噪声水平是滚动轴承动态性能的重要指标,可以综合、全面反映轴承产品质量水平。

(2) 刚度。

一般情况下,轴承受径向、轴向和力矩联合载荷的作用,内外套圈将产生径向、轴向相对位移量和相对倾角。这种弹性的相对位移量的大小对主机性能有重要的影响,反映了滚动轴承的一种使用性能。通常,用刚度作为衡量此使用性能的指标。滚动轴承的刚度定义为轴承内外套圈产生单位的相对弹性位移量所需的外加载荷。

不同类型的主机对滚动轴承的刚度可以有不同的要求。例如,要求机床主轴轴承有较高的刚度,以保证所制造的工件有高的加工精度;要求高速旋转轴轴承有合适的刚度,以使旋转轴的临界转速远离轴的工作转速,减少振动;要求陀螺仪马达的轴承具有径向和轴向相等的刚度,以使陀螺仪减少加速度平方项误差等。

(3) 摩擦力矩。

摩擦力矩是滚动轴承的一项重要使用性能,直接影响到能量的耗损。为追求尽可能低的摩擦损失,有人提出要发展“节能轴承”。摩擦力矩也涉及轴承运转过程中温度的上升,过分的温度上升将使润滑剂劣化、磨损加剧,甚至导致滚动表

面烧伤、轴承损坏。摩擦力矩还关联着精密机械仪表动作和信息传递的准确性。例如,陀螺仪轴承摩擦力矩的数值及其平稳性是影响惯性导航漂移率的一项重要因素。一些特殊用途的轴承需逐个检查测量摩擦力矩,以确保符合主机要求。

1.1.2 滚动轴承的基本失效方式

轴承在运转一定时间后,由于制造、安装、使用、维护等原因使其丧失(或局部丧失)功能的现象称为失效。影响滚动轴承失效的因素很多,包括设计、材料、制造、安装条件、环境条件和维护保养等。

滚动轴承的基本失效方式有以下几种。

(1) 疲劳剥落。

滚动轴承套圈和滚动体表面在接触应力反复作用下,其滚动表面金属从金属基体呈点状或片状剥落下来的现象称为疲劳剥落。疲劳剥落形状特征一般具有一定的深度和面积,使滚动表面呈凹凸不平的鳞状,有尖锐的沟角,通常呈现疲劳扩展特征的海滩状纹路。疲劳剥落产生的部位主要出现在套圈和滚动体的滚动表面。

(2) 表面塑性变形。

表面塑性变形主要是指零件表面由于压力作用形成的机械损伤。在接触表面上,当滑动速度比滚动速度小得多的时候会产生表面塑性变形。表面塑性变形分为一般表面塑性变形和局部表面塑性变形。

(3) 磨损。

在力的作用下,两个相互接触的金属表面相对运动产生摩擦,形成摩擦副。摩擦引起金属消耗或产生残余变形,使金属表面的形状、尺寸、组织或性能发生改变的现象称为磨损。

(4) 腐蚀。

金属与其所处环境中的物质发生化学变化或电化学反应变化所引起的消耗称为腐蚀。在轴承零件的各个表面都会产生腐蚀。按照腐蚀损伤的程度会产生腐蚀斑点或腐蚀坑(洞),斑点和坑(洞)一般呈零星或密集分布,形状不规则,深度不定,颜色有浅灰色、红褐色、灰褐色和黑色等。

(5) 蠕动。

受旋转载荷的轴承套圈,如果选用间隙配合,在配合表面上会发生圆周方向的相对运动,使配合面上产生摩擦、磨损、发热和变形,造成轴承不正常损坏。这种配合面周向的微小滑动称为蠕动或爬行。

(6) 烧伤。

轴承零件在使用中受到异常高温的影响,又得不到及时冷却,使零件表面组织产生高温回火或二次淬火的现象称为烧伤。烧伤产生的主要原因有润滑不良、预

载荷过大、游隙选择不当、轴承配置不当、滚道表面接触不良和应力过大等。烧伤形貌特征可以根据零件表面的颜色不同来判断。轴承在使用中由于润滑剂、温度、腐蚀等原因,零件表面会发生变化,颜色主要有淡黄色、黄色、棕红色、紫蓝色及蓝黑色等,其中淡黄色、黄色、棕红色属于变色,若出现紫蓝色或蓝黑色的为烧伤。烧伤主要发生在零件的各接触表面上,如圆锥滚子轴承的挡边工作面、滚子端面、应力集中的滚动表面等。

(7) 电蚀。

电蚀是由电流放电引起,致使轴承零件表面出现电击的伤痕。受到电蚀的零件,其金属表面被局部加热和熔化,在放大镜下观察损伤区域,一般呈斑点、凹坑、密集的小坑,有金属熔融现象,电蚀坑呈现火山喷口状。

(8) 裂纹。

当轴承零件所承受的应力超出材料的断裂极限应力时,其内部或表面便发生断裂和局部断裂,这种使材料出现不连续或断裂的现象称为裂纹。裂纹一般呈线状,方向不定,有一定长度和深(宽)度,有尖锐的根部和边缘。裂纹有内部裂纹和表面裂纹之分,也有肉眼可见和不可见两种形式,对于肉眼不可见裂纹需要采用无损检测的方法进行观察。

(9) 保持架损坏。

当滚动体进入或离开承载区域时,保持架将受到带有一定冲击性质的拉(压)应力作用,尤其是滚子轴承的滚子产生倾斜时所受到的应力会更大。在这种应力的反复作用下,保持架的兜孔、过梁、铆钉会出现变形、磨损、疲劳甚至断裂现象。另外,不正确的安装方式也会损坏保持架。

(10) 尺寸变化。

(11) 使用不当引起的损坏。

(12) 其他损伤。

1.1.3 滚动轴承的摩擦磨损特征

摩擦必然引起磨损,磨损是滚动轴承主要的失效形式之一。磨损使得轴承零件滚动表面的质量发生恶化、轴承的旋转精度降低、游隙增加、振动噪声增大等,最终导致轴承丧失正常的工作性能。

磨损的基本形式有疲劳磨损、黏着磨损、磨料(粒)磨损、腐蚀磨损和微动磨损等。

(1) 疲劳磨损。

疲劳磨损即接触疲劳。

(2) 黏着磨损。

黏着磨损是摩擦副在相对运动时,接触点表面材料产生塑性变形、焊合、剪断,部分材料由一个表面转移到另一个表面或流失的一种现象。

黏着磨损的主要影响因素是作用力的大小、材料的性能、加工表面的精度状态和润滑状态。

(3) 磨料(粒)磨损。

摩擦副在相对运动时,因较硬的磨料颗粒或突出物摩擦金属表面,引起材料表面损伤或脱落的现象称为磨料(粒)磨损。

由磨料(粒)所形成的划伤、沟槽、压痕等作为疲劳源极易在交变应力作用下使金属表面形成微裂纹,而微裂纹进一步扩展将出现金属的疲劳剥落。

(4) 腐蚀磨损。

腐蚀磨损是在腐蚀和机械磨损(如黏着磨损)的共同作用下形成的。在摩擦过程中,摩擦表面也会同时与周围介质发生化学反应并产生腐蚀,这种现象称为腐蚀磨损。

(5) 微动磨损。

微动磨损是由两个金属零件在外载荷作用下相互接触,同时两接触表面又受到低(微)振幅振动的作用而产生相对滑动引起的,这种由微振幅振动作用并伴有相对滑动所形成的磨损称为微动磨损。

微动磨损是一种综合性磨损,其中包含了两种以上磨损形式,如黏着磨损、磨料(粒)磨损和氧化磨损等。几种磨损形式的综合作用,使接触表面局部产生深层脱落,形成应力集中,严重时会引起疲劳断裂。

1.2 滚动轴承摩擦力矩的研究现状

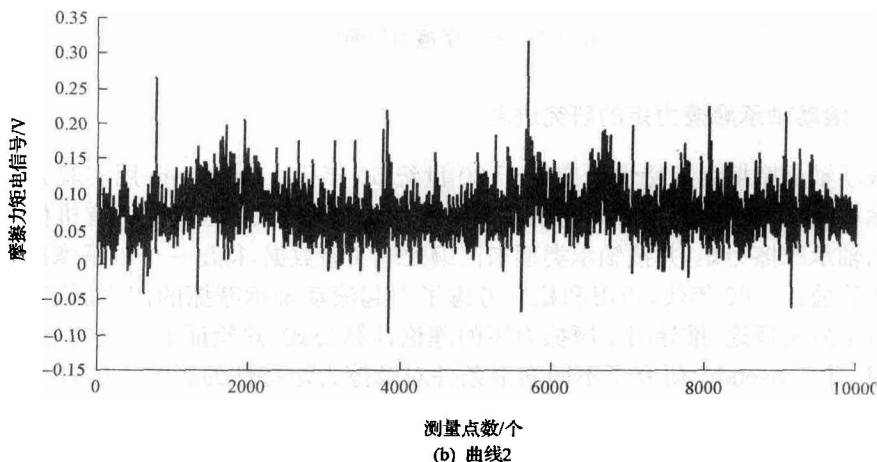
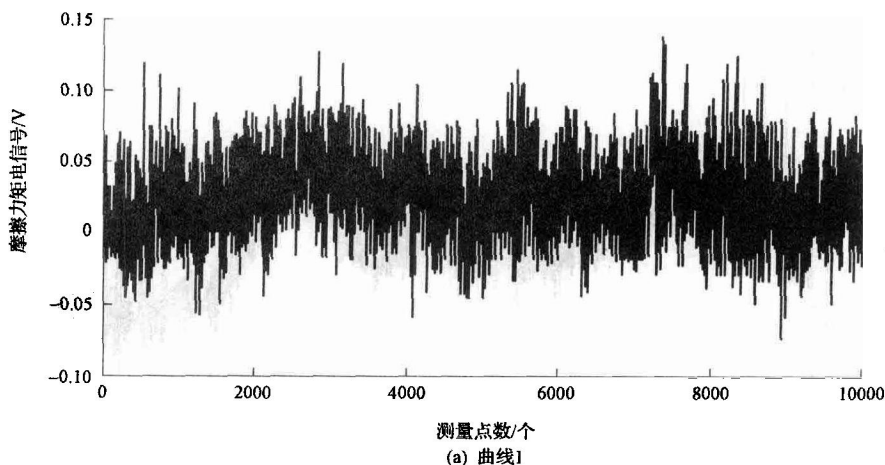
1.2.1 滚动轴承摩擦力矩的地位与作用

轴承摩擦力矩是指各种摩擦因素对轴承旋转构成的阻力矩,是评价轴承运转灵活性及寿命的重要指标^[1]。对于很多轴承来说,当摩擦力矩过大时,就会引起轴承表面温度升高,过分的升温会使润滑剂劣化,造成磨损加剧,甚至滚动表面的烧伤和轴承的损坏。对于航天轴承而言,其运转灵活性直接影响到系统信号传递的准确性及系统工作的稳定性与可靠性^[2,3]。摩擦力矩是用来评价轴承运转灵活性的重要指标,同时能够描述轴承在运转时的润滑状态。当润滑不良时,摩擦力矩就会明显增大。因此,轴承摩擦力矩的研究备受相关工程界与学术界的重视。

当主机类别和性能不同时,对摩擦力矩的要求也不相同。例如,高精度的稳定平台要求其框架球轴承具有足够大的刚度、小而稳定的启动力矩;用于伺服电机和仪表齿轮传动系统的轴承,要求平均摩擦力矩越小越好;而用于精密电位计、同步接收机中的轴承,则要求具有小而稳定的最大摩擦力矩^[4]。

滚动轴承摩擦力矩不仅与轴承本身的结构尺寸、几何精度、材料及热处理性能等内部条件有关,而且与工作载荷、装配精度、润滑条件及环境参数等外部条件也

有关,是一个非平稳过程(见图 1-1),这就决定了轴承摩擦力矩的研究是一个非常复杂的问题。首先,由于受诸多因素的影响,无法推导出摩擦力矩的精确计算公式。虽然在有的文献中已经给出一些摩擦力矩的计算公式,如徐跃进^[5]给出了高速脂润滑滚动轴承的摩擦力矩计算公式,但对于不同的文献来说,摩擦力矩的计算公式也不相同,实验值和理论计算值有显著差异。而且由这些近似计算公式得到的力矩值,对同一型号的轴承来说是个定值,难以区分静态力矩和动态力矩,同时也无法描述力矩峰值的变化情况,因此无法实现摩擦力矩的精确定量计算。其次,由于摩擦力矩具有不确定的强烈波动和趋势变化,属于概率分布与趋势规律都未知的乏信息系统^[6,7],直接使用传统的统计理论进行实验分析是很困难的。最后,轴承摩擦力矩的研究属于动力学方程未知的非线性问题,难以找出确定的非线性模型。因此,如何对这种复杂的摩擦力矩特性进行有效的数据分析成为亟待解决的问题。



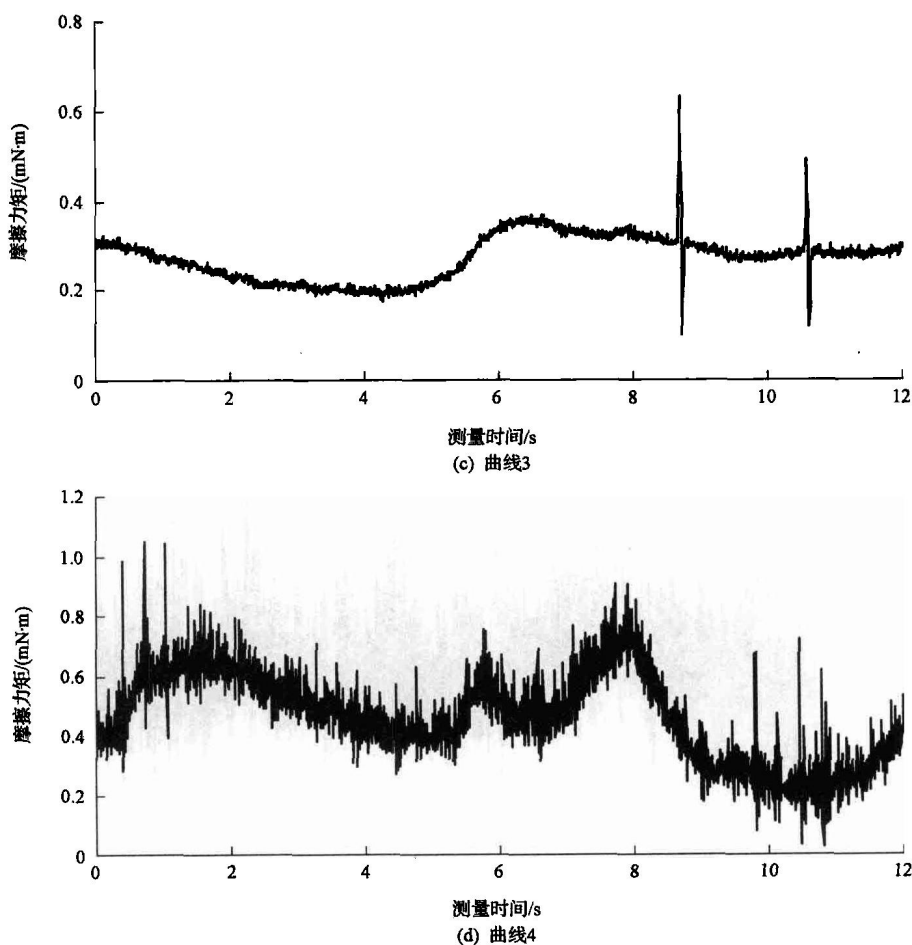


图 1-1 轴承摩擦力矩曲线

1.2.2 滚动轴承摩擦力矩的研究进展

滚动轴承摩擦力矩特性研究始于 20 世纪 50 年代。Palmgren 用实验方法求出了除填充在轴承内部空腔内的润滑剂引起的流体摩擦之外,其他所有机械摩擦引起的轴承摩擦力矩,并按轴承类型来汇编处理实验数据,得出一个轴承摩擦力矩回归计算公式。60 年代,角田和雄^[8]考虑了引起滚动轴承摩擦的四大因素,基于拟静力学分析理论,推导出了摩擦力矩的理论计算公式,并验证了公式的可靠性。1973 年, Townsend^[9]研究了不同润滑条件对摩擦力矩特性的影响。1984 年, Kitahara 等^[10]基于精密轴承的实验研究,推导出了联合载荷作用下的球轴承的经验公式。近年来, SKF 推出了一种轴承总摩擦力矩的计算模型,该模型对于低速和