



滚动轴承 振动与噪声研究

Research on Vibration and
Noise of Rolling Bearing

夏新涛 刘红彬 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

本书相关内容得到国家自然科学基金(51475144,51075123 和 U1404517)的资助

滚动轴承振动与噪声研究

Research on Vibration and Noise of Rolling Bearing

夏新涛 刘红彬 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

这是一本论述滚动轴承振动与噪声原理、谐波控制与实验评估方法的学术专著。全书4篇14章,第1篇滚动轴承振动与噪声原理,论述轴承振动与噪声研究的发展过程、轴承振动与噪声的基本原理、轴承振动与噪声的关系、轴承噪声的谐波控制原理;第2篇滚动轴承磨削谐波分布理论,研究谐波分布理论的基本概念、谐波生成原理、谐波控制方法、振动与噪声的综合控制问题、谐波与圆度的评估方法;第3篇滚动轴承无心磨削与超精研过程的动态性能,研究无心磨削工艺系统的动态性能与无心超精研过程的动态性能;第4篇滚动轴承振动性能的实验评估与预测,研究轴承振动的影响因素与品质聚类、轴承振动品质实现可靠性、轴承振动性能不确定性的静态评估与动态预测、轴承振动时间序列变异的泊松过程。

本书可供从事滚动轴承设计、制造、测试、应用的理论研究与生产实践的科技人员阅读,也可作为高等学校机械类教师、研究生与本科生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

滚动轴承振动与噪声研究/夏新涛,刘红彬著. —北京:
国防工业出版社,2015.9
ISBN 978-7-118-10356-4

I. ①滚… II. ①夏… ②刘… III. ①滚动轴承—轴
承振动—研究 ②滚动轴承—噪声—研究 IV. ①TH133.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第218412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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张23¼ 字数450千字

2015年9月第1版第1次印刷 印数1—3000册 定价89.00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

滚动轴承是应用广泛的关键机械基础部件,在国防安全、国家基础建设与经济运行中具有重要的关节作用,其振动与噪声性能直接影响且警示工作主机的运行势态。轴承振动与噪声主要来自轴承制造与装配过程中形成的质量因素与轴承服役期间内部零件出现的故障。对于前者,目前国产轴承振动与噪声普遍存在很大的不稳定性,原因是仅仅关注质量的外在表现,尚未有效控制制造质量的内涵要素;对于后者,现有研究仅仅关注轴承零件的故障诊断问题,尚未有效实施故障萌生与演变过程的评估与预测。

关于有效控制制造质量的内涵要素问题,轴承企业为了提高轴承振动与噪声品质,单纯提高质量指标,例如过度地降低圆度误差,不仅解决不了轴承振动与噪声的不稳定问题,还导致成本上升。原因在于对质量内涵缺乏认识。圆度是一个综合质量指标,不能正确反映误差的幅值、频率与相位3个内涵要素,其中幅值和频率属于谐波范畴。谐波是影响轴承振动与噪声的本质误差因素。

关于有效实施故障萌生与演变的动态预测问题,应关注如何预测异常振动与噪声的演变,而无需关注轴承内部哪一个零件出现了故障。轴承内部出现故障,可以表现为振动与噪声异常,据此进行诊断以发现轴承的哪个零件有故障。这对正服役的轴承意义不大,因为此时不会且不能去更换有故障的零件(通常轴承是不可拆解的一个整体,若有问题应更换整套轴承)。在轴承服役期间,通过对轴承振动与噪声的实时评估,有效实施故障萌生与演变的动态预测,可以提前发现失效隐患,及时采取措施,避免重大事故发生。

本书从设计、制造与检测等方面,重点研究滚动轴承振动与噪声的形成与谐波控制问题,还从轴承振动与噪声的实时评估、有效实施故障萌生与演变的动态预测方面探讨滚动轴承性能失效与可靠性预测问题。

本书在滚动轴承振动与噪声机理与控制理论方面,提出了谐波生成与控制理论和无心磨削准动力学成圆理论,揭示出滚动轴承振动与噪声的内在谐波分布机制并提出了有实用价值的谐波控制方法;在滚动轴承振动性能静态评估方面,提出了轴承振动品质实现可靠性的新概念,将可靠性概念引入到企业产品品质保证体系,对轴承企业控制与提升产品振动品质水平有重要的理论意义与应用价值;在滚动轴承振动性能动态评估方面,提出了轴承振动变异强度的新概念和轴承振动性能可靠性的灰自助泊松预测方法,揭示出轴承振动性能变异的新特性。

本书是作者多年以来在滚动轴承振动与噪声研究中,对有效控制制造质量的内涵要素问题以及有效实施故障萌生与演变的动态预测问题的已经出版与发表的部分工作总结,而滚动轴承振动与噪声研究,在理论上的突破仍然需要一个十分漫长的过程。为此,作者希望将本书献给关注和致力于滚动轴承振动与噪声研究的人们。

本书相关内容得到了国家自然科学基金(51475144,51075123 和 U1404517)的资助。

本书由河南科技大学夏新涛(负责第2篇、第4篇与附录)和刘红彬(负责第1篇和第3篇)撰写,夏新涛通稿。河南科技大学的研究生尚艳涛、孟艳艳、秦园园、白阳、史永生、陈士忠、董淑静、朱文换与叶亮等参与了本书的部分辅助工作。

作者
2015 年春

目 录

第 1 篇 滚动轴承振动与噪声原理

第 1 章 绪论	3
1.1 滚动轴承振动与噪声问题的提出	3
1.1.1 从滚动轴承性能谈起	3
1.1.2 滚动轴承性能研究的现状	3
1.1.3 滚动轴承振动与噪声研究中的问题	4
1.2 滚动轴承振动与噪声研究的发展过程	5
1.3 滚动轴承振动与噪声研究的发展趋势	7
1.4 本章小结	8
第 2 章 滚动轴承噪声的基本原理	9
2.1 假设条件	9
2.2 振动模型	9
2.2.1 球轴承的几何模型	9
2.2.2 球轴承物理模型	10
2.2.3 振动方程的建立	14
2.3 噪声模型	15
2.3.1 基本假设	15
2.3.2 噪声的数学模型	15
2.4 典型声源结构在滚动轴承噪声模型中的应用	20
2.4.1 轴承结构引起固有振动所产生的声压	20
2.4.2 轴承套圈振动引起的声压	23
2.4.3 球振动引起的声压	24
2.5 滚动轴承声压级的计算	25
2.6 实验与仿真	25

2.6.1	实验条件	25
2.6.2	实验与仿真结果	26
2.6.3	实验结果和仿真结果的对比分析	28
2.7	基于模型仿真的滚动轴承声压级分析	30
2.7.1	谐波分布参数对声压级的影响	30
2.7.2	轴承结构参数对声压级的影响	31
2.8	滚动轴承结构参数	33
2.9	本章小结与建议	33
第3章	滚动轴承振动与噪声的关系	36
3.1	概述	36
3.2	实验安排与噪声的实验数据	37
3.2.1	实验安排	37
3.2.2	噪声的实验数据	38
3.3	滚动轴承振动与噪声关系的统计分析	39
3.3.1	加速度和声压级之间的统计关系	39
3.3.2	速度和声压级之间的统计关系	40
3.3.3	速度峰值和声压级之间的统计关系	46
3.3.4	统计结果的综合分析	51
3.4	滚动轴承振动与噪声关系的灰分析	52
3.4.1	灰关联度分析	52
3.4.2	灰绝对关联度分析	57
3.5	本章小结	59
第4章	滚动轴承噪声的谐波控制原理	60
4.1	实验数据	60
4.2	表面谐波分布参数与声压级的关系	61
4.2.1	表面谐波分布模型	61
4.2.2	谐波分布参数对声压级的影响	63
4.3	谐波分布参数与声压级的优化	64
4.3.1	谐波分布控制线的优化模型	64
4.3.2	最优滚动轴承声压级函数	65
4.3.3	分析与讨论	69
4.4	本章小结	70

第 2 篇 滚动轴承磨削谐波分布理论

第 5 章 滚动轴承磨削谐波生成原理	73
5.1 概述	73
5.2 谐波的类型与性质	73
5.2.1 谐波类型	73
5.2.2 谐波性质	75
5.3 准动力学谐波生成理论	77
5.3.1 无心磨削成圆理论概述	77
5.3.2 谐波的传递与构成	78
5.3.3 磨削表面的谐波分布	80
5.4 准动力学谐波生成理论的实践	82
5.4.1 实践原理	82
5.4.2 效果分析	82
5.5 轴承表面谐波的 FFT 仿真源程序	86
5.6 本章小结	89
第 6 章 滚动轴承磨削谐波控制理论及应用	90
6.1 滚动轴承磨削表面谐波的控制原理	90
6.1.1 轴承表面谐波分布的统计特征	90
6.1.2 轴承磨削表面谐波的计算机控制	92
6.2 谐波控制系统的软件设计	94
6.2.1 数据处理原理	94
6.2.2 软件功能模块	97
6.3 系统控制误差的分析与改善	98
6.3.1 实验方案安排	99
6.3.2 系统控制误差	100
6.4 谐波控制的实验方法	103
6.4.1 谐波控制的实验安排	103
6.4.2 不同方案的谐波实验结果分析	104
6.4.3 对疏波圆度误差的控制	110
6.5 轴承磨削表面谐波的工艺过程诊断理论与计算机系统	112

6.5.1	诊断系统功能模块	112
6.5.2	工艺诊断的信息编码	113
6.5.3	工艺过程的薄弱环节问题	115
6.5.4	轴承表面谐波工艺过程诊断与控制的系统性实验	117
6.6	本章小结	122
第7章	滚动轴承振动与噪声的综合控制问题	123
7.1	概述	123
7.2	轴承振动与噪声的频率	123
7.3	轴承的品质要求	124
7.3.1	轴承零件	124
7.3.2	轴承装配	128
7.3.3	润滑剂与润滑	129
7.4	纳米材料润滑技术简介	131
7.4.1	问题的提出	131
7.4.2	纳米材料的结构特性与减摩擦抗磨损原理	132
7.4.3	应用分析	135
7.5	低噪声轴承制造工艺过程	136
7.6	本章小结	138
第8章	谐波与圆度的范数评估方法	139
8.1	谐波分布参数评估方法与实验研究	139
8.1.1	谐波分布参数评估方法	139
8.1.2	实验研究	140
8.2	谐波分布参数数值计算的计算机程序	142
8.3	谐波与圆度测量的误差理论	145
8.3.1	问题的提出	145
8.3.2	人为偏心与1次谐波	145
8.3.3	谐波与圆度测量的误差	146
8.4	谐波与圆度评价理论及其计算机仿真	148
8.4.1	圆度评价的最大模范数最小法	148
8.4.2	计算机仿真实验研究	149
8.5	计算机仿真源程序	151
8.6	本章小结	156

第3篇 滚动轴承无心磨削与超精研过程的动态性能

第9章 无心磨削工艺系统的动态性能	159
9.1 无心磨削工艺系统的动态特性	159
9.1.1 无心磨削工艺系统的振动模型	159
9.1.2 无心磨削工艺系统的运动方程与固有频率	161
9.1.3 无心磨削工艺系统的动态特性	164
9.1.4 无心磨削工艺系统动态特性的控制	166
9.2 无心磨削工艺系统的动态稳定性	171
9.2.1 动态稳定性的基本概念	171
9.2.2 支承式无心磨削再生振动的产生	172
9.2.3 支承式无心磨削的稳定条件	173
9.2.4 磨削稳定性的计算方法	177
9.2.5 支承式无心磨削动态稳定性的实验研究	178
9.2.6 外圆无心磨削的动态稳定性	180
9.3 无心磨削的动态尺寸精度	180
9.3.1 动态尺寸精度的概念	181
9.3.2 动态尺寸精度的数学模型	187
9.3.3 变值系统误差规律的确定	189
9.3.4 无心磨削尺寸精度的评价与工艺控制	191
9.3.5 动态尺寸精度评价的实验研究	194
9.4 导轮的修整	195
9.4.1 概述	195
9.4.2 导轮的理想曲面	196
9.4.3 导轮理想曲面的近似修整	200
9.5 无心磨削的运动特性	203
9.5.1 概述	203
9.5.2 工艺系统与工件运动的关系	205
9.5.3 工件运动学	206
9.5.4 工件受力状态	208
9.5.5 运动特性分析	210
9.5.6 运动特性的实验验证与应用	213

9.6	无心磨削工艺系统综合评价	215
9.6.1	加工精度综合评价概述	215
9.6.2	加工精度的构成和评价规则	215
9.6.3	加工精度的实验安排与综合评价计算	216
9.6.4	无心磨削系统加工精度综合评价的实验	218
9.7	本章小结	220
第10章	无心超精研过程的动态问题	222
10.1	无心超精研方法概述	222
10.2	无心超精研螺旋导辊的理论廓形及其简化	222
10.2.1	工作原理	222
10.2.2	导辊廓形方程	223
10.2.3	有关参数的确定	225
10.2.4	导辊廓形的简化	227
10.2.5	计算实例	228
10.3	加工螺旋导辊的砂轮截形设计	229
10.3.1	砂轮理论截形	229
10.3.2	边界条件	232
10.3.3	砂轮简化截形	233
10.3.4	导辊误差	234
10.3.5	计算实例	236
10.4	无心超精研的运动特性	237
10.4.1	运动学	238
10.4.2	动力学	242
10.4.3	接触角对转动特性的影响	246
10.5	本章小结	248

第4篇 滚动轴承振动性能的实验评估与预测

第11章	滚动轴承振动性能的因素分析与品质聚类	251
11.1	因素分析与品质聚类概述	251
11.1.1	因素分析问题	251
11.1.2	品质聚类问题	251

11.2	加工质量和滚动轴承振动的灰关联分析	252
11.2.1	实验数据	252
11.2.2	灰关联度分析	254
11.3	滚动轴承振动性能影响因素的灰色定性融合分析	256
11.3.1	轴承性能影响因素分析的定性融合模型	256
11.3.2	解集获取的灰方法	257
11.3.3	圆锥滚子轴承振动加速度影响因素的实验研究	259
11.4	滚动轴承振动性能的灰类评估	263
11.4.1	灰类评估原理	263
11.4.2	灰类评估的实验研究	265
11.4.3	细分灰类评估方法	268
11.5	最优工艺方案的灰类评估	271
11.5.1	数学模型	271
11.5.2	应用案例	272
11.6	本章小结	277
第 12 章	滚动轴承振动品质实现可靠性评估	278
12.1	产品品质的实现可靠性概述	278
12.2	滚动轴承振动品质实现可靠性模型	278
12.2.1	滚动轴承振动品质分级	278
12.2.2	品质实现可靠性计算	281
12.2.3	品质影响因素权重的确定	281
12.3	品质实现可靠性的真值及其区间估计	284
12.4	实验研究	286
12.4.1	现场实验研究	286
12.4.2	模拟实验研究	296
12.5	本章小结	301
第 13 章	滚动轴承振动性能不确定性的静态评估与动态预测	302
13.1	实验方案与实验数据	302
13.2	滚动轴承振动性能不确定性的静态评估	303
13.2.1	滚动轴承振动性能不确定性的模糊范数法评估模型	303
13.2.2	静态评估的步骤	307
13.2.3	静态评估的实验结果分析	307

13.3	滚动轴承振动性能不确定性的动态预测	309
13.3.1	滚动轴承振动性能不确定性的灰自助预测数学模型	309
13.3.2	动态预测的实验结果分析	311
13.4	静态评估与动态预测结果的对比分析	314
13.5	本章小结	315
第14章	滚动轴承振动时间序列变异的泊松过程	316
14.1	基本原理	316
14.1.1	问题的提出	316
14.1.2	滚动轴承性能的变异强度	317
14.2	数学模型	317
14.2.1	变异强度的原始信息向量	317
14.2.2	变异强度的估计	318
14.2.3	基于泊松过程的可靠性函数	319
14.3	案例研究	320
14.3.1	轴承性能可靠性预测案例	320
14.3.2	轴承性能变异状态监控案例	324
14.4	本章小结	325
附录		327
附录 A	基于区间映射的牛顿迭代法源程序	327
附录 B	滚动轴承零件参数测量仪主要技术参数	335
附录 C	30204 型圆锥滚子轴承的实验数据	336
附录 D	基于谐波分布的轴承噪声优化系统	339
参考文献		355

第1篇 滚动轴承振动与噪声原理

本篇由第1章~第4章构成,主要涉及滚动轴承振动与噪声研究中的问题,滚动轴承噪声的基本原理,滚动轴承振动与噪声的关系,以及滚动轴承噪声的谐波控制原理等内容。

第1章从滚动轴承性能谈起,论述滚动轴承振动与噪声研究中存在的问题、发展过程与发展状态,还引出了本书的主要内容,即从设计、制造与检测等方面重点研究滚动轴承振动与噪声的形成与控制问题,以及从轴承振动与噪声的实时评估、有效实施故障萌生与演变的动态预测方面探讨滚动轴承性能失效与可靠性预测问题。第2章构建滚动轴承振动与噪声的数学模型,并进行基于模型仿真的滚动轴承声压级分析。第3章研究滚动轴承振动与噪声的统计关系与灰关系问题。第4章建立滚动轴承声压级与谐波分布参数之间的函数关系,并对谐波分布与声压级进行优化设计。

第1章 绪 论

本章从滚动轴承性能谈起,论述滚动轴承振动与噪声研究中存在的问题,并引出本书的主要内容,即从设计、制造与检测等方面重点研究滚动轴承振动与噪声的形成与控制问题,以及从轴承振动与噪声的实时评估、有效实施故障萌生与演变的动态预测方面探讨滚动轴承性能失效与可靠性预测问题;还对滚动轴承振动与噪声研究的发展过程与发展状态进行评述。

1.1 滚动轴承振动与噪声问题的提出

1.1.1 从滚动轴承性能谈起

滚动轴承是广泛使用的关键机械基础部件,在国家基础建设与国民经济运行中具有重要关节作用。滚动轴承的服役性能可靠性直接影响工作主机的运行状态与势态。随着航空航天、高速客车与新能源等领域的快速发展,对许多滚动轴承,如航空航天轴承、舰艇轴承、核反应堆轴承、高速铁路轴承以及风力发电机轴承等,工程界与学术界日益重视其性能寿命与可靠性研究,以确保工作主机安全可靠运行^[1-4]。在轴承正常运行且性能满足要求的服役期间,迫切需求及时预测未来时间的性能寿命与可靠性信息,以发现失效隐患,尽早采取措施,避免恶性事故发生^[4-7]。

长期以来,滚动轴承可靠性理论主要涉及疲劳失效与静态可靠性问题,并假设寿命服从 Weibull 分布或对数正态分布。但是,滚动轴承有很多性能指标要求,用途不同,考核的主要性能不同^[1,4,5,7]。在轴承服役期间,有些性能退化与失效概率分布信息被认为是已知的,也有很多性能退化与失效概率分布信息是未知或未确知的。例如,振动与噪声、摩擦力矩、零件断裂、密封性、粘结与烧伤等趋势规律和失效概率分布,至今仍然是未知或未确知的^[5,8-11]。即使是同一性能,在新轴承研发与已有轴承改进时,新轴承性能退化规律和失效概率分布均可能与原始的不同。

尤其是,滚动轴承性能退化属于非平稳过程,具有非线性动力学特征,通常经历初期退化、渐进退化、快速退化与急剧退化等阶段,性能趋势、性能失效轨迹与概率分布、性能可靠性函数等信息随之变化。

1.1.2 滚动轴承性能研究的现状

近年来,滚动轴承可靠性研究,在寿命设计与实验评估、失效分析与故障诊断、

性能退化评估等方面效果显著。

1. 寿命设计与实验评估

王黎钦^[4]基于润滑与热行为,提出了陶瓷轴承失效模式和设计准则。楼洪梁^[8]和 Shimizu^[9]分别考虑贝叶斯无信息先验分布与多疲劳联动作用,建立了轴承 Weibull 寿命新模型。Gao^[11]考虑接触载荷、几何参数与可靠性参数,建立了转盘轴承滚动接触疲劳寿命模型。Sinha^[12]研究了微型球轴承磨损寿命的影响因素。Morales - Espejel^[13]考虑表面微观几何形貌,推荐了标准轴承表面参数的微观弹性流体动力润滑评估方法。Ju^[14]考虑高温效应建立了轴承寿命 - 载荷加速无失效实验模型。

2. 失效分析与故障诊断

Mukhopadhyay^[6]和 Jiang^[7]基于材料学,分别研究了轴承零件断裂的焊接因素与磨损失效的温升原因。Siegel^[15]和 Soylemezoglu^[16]分别用健康评估与马田法,对轴承失效进行了曲线拟合估计。Arakere^[17]用交叉检验法,分析了碳化硅球轴承表面裂纹失效概率的不确定性。Xia^[18]和朱德馨^[19]分别用乏信息与贝叶斯理论探讨了无失效数据的累积失效概率。Nadabaica^[20]用状态光谱法检测出轴承损伤失效原因。Ma^[21]提出了大参数随机共振轴承失效特征提取方法。陈渭^[22]阐明了不同涡动条件下轴承打滑机理。沈长青^[23]基于分析形态学滤波原理的结构元素选择法,提取出轴承振动信号中的冲击响应特征。鲁文波^[24]和彭畅^[25]分别用近场声全息技术与快速峭度图法诊断出轴承故障。胥永刚^[26]和杨宇^[27]分别提出了双树复小波包变换与支持向量机、局部特征尺度分解与核最近邻凸包分类的轴承故障诊断方法。

3. 性能退化分析

Wang^[28]和丛华^[29]分别用改进的经验模式分解与特征参量遗传优化方法,实施了轴承多状态智能诊断及性能退化程度评估。潘玉娜^[30]和肖文斌^[31]基于频谱熵、小波包变换、隐马尔可夫概念,建立了性能退化评估模型。申中杰^[32]、Zhang^[33]和王英^[34]分别基于集成学习、多变量支持向量机和随机滤波法,预测了轴承剩余寿命。Cong^[35]基于柯尔莫哥罗夫 - 斯米尔诺夫检验法,检测出轴承初期微弱缺陷的异常表现。Pasariibu^[36]用黏度相似的多种润滑油进行寿命实验,发现了影响轴承性能的化学反应机制。崔立^[37]考虑空间 Euler - Bernoulli 杆单元,分析了柔性转子轴承系统的混沌行为。Kostek^[10]模拟出深沟球轴承从周期到混沌的振动演变。Bhattacharyya^[2]探讨了滚动接触导致轴承钢表面塑性区演变问题。

1.1.3 滚动轴承振动与噪声研究中的问题

振动与噪声是滚动轴承的重要性能之一,直接影响且警示工作主机的运行态势。

滚动轴承振动与噪声主要来自轴承制造过程中形成的质量与轴承服役期间内