



国际机械工程先进技术译丛

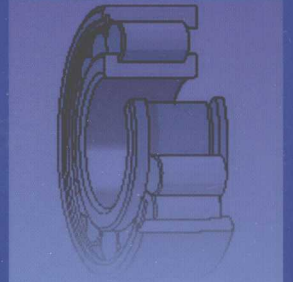
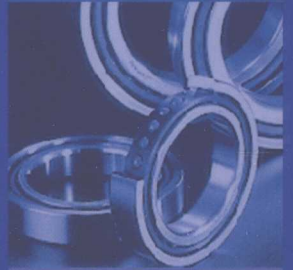
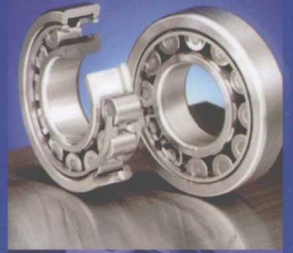
滚动轴承分析

(原书第5版)：第2卷

轴承技术的高等概念

Advanced Concepts of Bearing Technology

(美) T.A.Harris, M.N.Kotzalas 著
罗继伟 等译



光盘内容均为
英文原版
包含大量例题和
多个数据表格

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

滚动轴承分析(原书第5版)

第2卷

轴承技术的高等概念

(美)T. A. Harris M. N. Kotzalas 著
罗继伟 李济顺 杨咸启 罗天宇 译



机械工业出版社

滚动轴承分析第2卷在第1卷的基础上引入高等概念,包括:载荷联合作用的分析计算及位移、变形等;零件的滚动、滑动及自旋、公转、陀螺运动;高速运转时的载荷分析;动压与弹流润滑的油膜、压力及高压、温度、接触表面形貌效应;摩擦及其效应;发热分析;寿命系数分析;刚性与非刚性轴系统分析;失效分析。

本书供从事机械设备设计、制造、研究、使用、维护的工程技术人员、相关院校师生阅读。

Rolling Bearing Analysis FIFTH EDITION: Advanced Concepts of Bearing Technology/by Tedric A. Harris Michael N. Kotzalas/ISBN: 978-0-8493-7182-0

Copyright© 2007 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All right reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese(Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2008-2957

图书在版编目(CIP)数据

滚动轴承分析(原书第5版):第2卷 轴承技术的高等概念/
(美)哈里斯(Harris,T. A.), (美)科兹拉斯(Kotzalas, M. N.)
著;罗继伟等译. —2版. —北京:机械工业出版社,2009.9
(国际机械工程先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-28164-1

I. 滚… II. ①哈…②科…③罗… III. 滚动轴承—计算—
分析 IV. TH133.33

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第152492号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孔劲 责任编辑:郑铤 版式设计:霍永明
责任校对:刘志文 封面设计:鞠杨 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2010年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·18.75印张·462千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-28164-1

ISBN 978-7-89451-193-5(光盘)

定价:68.00元(含1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者服务部:(010)68993821

封面无防伪标均为盗版

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面，制造技术具有共性，又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械装备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术比、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验，提高自主创新能力，形成自己

的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史,可以追溯到唐朝甚至更远一些,唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流载体,早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段,但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性,看书总比在计算机上看资料更方便,不同层次的要求可以参考不同层次的图书,不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书,同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然,技术图书的交流具有时间上的滞后性,不够及时,翻译的质量也是个关键问题,需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献,为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源,翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作,从而能够提升我国制造业的自主创新能力,引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书,在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量,力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担,充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书,组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性,应能代表相关专业的技术前沿,对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业,例如机械、材料、能源等,既包括对传统技术的改进,又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员,高等院校的教师和学生,可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者,积极推荐国外相关优秀图书,仔细评审外文原版书,推荐评审和翻译的知名专家,特别要感谢承担翻译工作的译者,对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意,同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助,欢迎广大读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

前 言

本书第1卷的主要目的是为读者提供普通的和相对简单应用条件下的球和滚子轴承使用、设计和性能方面的信息。这样的应用条件一般包括：轴或轴承外圈以低-中速旋转；静止作用的简单径向或推力载荷；轴承安装不引起轴与轴承外圈轴线的倾斜；润滑适当。这些应用条件一般都包含在轴承制造商提供的样本中。样本中的信息对使用制造商的产品来说是足够的，但它们始终带有经验性质，很少提供所使用的计算公式的几何和物理证据。第1卷中不仅包含了很多样本中所用公式的相关数学推导，而且提供了对不同制造商生产的不同类型的滚动轴承进行工程比较的方法。

然而，在很多现代轴承的应用中包含高速机械运转；径向、轴向和力矩联合作用的重载荷；高温或低温以及其他的极端环境。要使滚动轴承在这样的环境下正常运行并保证适当的寿命，就必须对轴承性能进行比本书第1卷提供的方法和公式更为复杂的工程分析，而这就是本卷的目的。

与早先的版本相比，第5版介绍了最新的、更精确的关于计算滚动接触摩擦切应力以及它们对性能和寿命影响的信息，还包括与轴承滚动和滑动相关的所有应力对疲劳寿命影响的计算方法。这些应力包含由作用载荷、轴承安装、套圈速度、材料处理和颗粒污染引起的应力。

坦率地说，本书题材的广度仅靠两个作者的专长是难以达到的。所以，在本书的准备过程中采用了球和滚子轴承技术领域很多专家提供的信息。在此，我们要特别感谢以下人士所做的贡献：

Neal DesRuisseaux	轴承振动与噪声
John I. McCool	轴承统计分析
Frank R. Morrison	轴承实验
Joseph M. Perez	润滑剂
John R. Rumierz	润滑剂与材料
Donald R. Wensing	轴承材料

最后，《滚动轴承分析》自1967年首次出版以来，到现在已经发展到第5版。我们努力保持所介绍的内容是最新的和有用的。我们希望读者将会发现第5版与早先的版本同样实用。

Tedric A. Harris
Michael N. Kotzalas

作者简介

Tedric A. Harris 毕业于宾夕法尼亚州立大学机械工程专业，1953 年获理学学士学位，1954 年获理学硕士学位，毕业之后进入联合飞机公司汉弥尔顿标准部担任实验开发工程师，后来进入威斯丁豪斯电子公司贝迪原子能实验室担任分析设计工程师。1960 年加入位于宾夕法尼亚州费城的 SKF 工业公司，担任主管工程师。在 SKF 期间，在几个关键的管理岗位上任过职：分析服务经理；公用数据系统主任；特种轴承部总经理；产品技术与质量副总裁；SKF 摩擦学网站总裁；MRC 轴承(全美)工程与研究副总裁；位于瑞典哥得堡 SKF 总部的集团信息系统主任以及位于荷兰的工程与研究中心执行主任等。1991 年从 SKF 退休后特聘为宾夕法尼亚州立大学机械工程教授，在大学里讲授机械设计与摩擦学课程，并从事滚动接触摩擦学领域的研究，直到 2001 年再次退休。近年来，还担任工程应用顾问和机械工程兼职教授，在大学的继续教育活动中为工程师们讲授轴承技术课程。

发表过 67 部技术著作，其中大部分是关于滚动轴承的。1965 年和 1968 年，获摩擦与润滑工程师协会的杰出技术论文奖，2001 年获美国机械工程师协会(ASME)摩擦学分会杰出技术论文奖，2002 年获 ASME 的杰出研究奖。

积极参与许多技术组织的活动，包括抗摩擦轴承制造商协会(即现在的 ABMA)，ASME 摩擦学分会和 ASME 润滑研究委员会，1973 年被选为 ASME 的资深会员，还担任过 ASME 摩擦学分会以及摩擦学分会提名和监督委员会的主席，拥有三项美国专利。

Michael N. Kotzalas 毕业于宾夕法尼亚州立大学，1994 年获得理学学士学位，1997 年获理学硕士学位，1999 年获得哲学博士学位，三个学位都是机械工程专业。这期间，学习和研究的重点是滚动轴承性能分析，包括高加速度条件下球和圆柱滚子轴承的动力学模拟，以及保养条件下轴承的剥落过程实验与模拟算法。

毕业后进入 Timken 公司从事研究与开发，最近在工业轴承部门工作，现在负责为工业轴承客户提供先进产品设计与应用方面的支持，更重要的是从事新产品和分析算法开发。为了写这本书，获得了两项圆柱滚子轴承设计专利。

工作之外，还参与工业协会的活动，作为美国机械工程师协会(ASME)会员，现在担任出版委员会主席，滚动轴承技术委员会委员；同时担任摩擦与润滑工程师协会(STLE)奖励委员会委员。已在专业权威杂志和一次会议论文集中发表过 10 篇论文，为此，2001 年获 ASME 摩擦学分会最佳论文奖；2003 年和 2006 年获 STLE 的霍德森奖。此外，还参与美国轴承制造商协会(ABMA)的工作，是短期讲座“轴承技术的高等概念”的讲课教师。

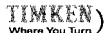
译者序

新中国成立后，特别是改革开放以来，中国轴承工业取得了令世人瞩目的飞速发展，滚动轴承技术领域已经形成了设计、应用、材料、工艺和实验的完整的研究开发体系，从事滚动轴承技术开发的人员也越来越多。为了满足应用领域日新月异的多元化要求以及更好地应对国际、国内日趋激烈的市场竞争，广大技术人员越来越迫切地感到需要掌握更多、更全面的滚动轴承理论和技术方面的知识，出版《滚动轴承分析》中文版是一件很有意义的事情。

在过去的四十多年中，T. A. Harris 的《滚动轴承分析》已被公认为是滚动轴承技术领域的经典著作之一。该书涵盖了滚动轴承技术的各个方面，既有理论的深度，又有应用技术的广度。在 20 世纪 90 年代，洛阳轴承研究所曾将《滚动轴承分析》第 3 版作为对工程师进行培训的内部教材，取得了很好的效果。最新出版的该书第 5 版，不仅在内容上反映了滚动轴承理论和技术的最新发展，而且在篇幅上也增加较多，由过去的一卷变成了现在的两卷，即第 1 卷：“轴承技术的基本概念”和第 2 卷：“轴承技术的高等概念”。这样能更好地满足技术人员不同层次的需求。为了压缩篇幅，原书所有的例题和有关图表被放进了随书附带的光盘之中，为了方便读者，我们将它放进了译著中。

经作者的授权和机械工业出版社的委托，我有幸能够组织《滚动轴承分析》第 5 版的翻译工作。参加本书第 2 卷翻译的人员有：罗继伟（第 1 章、第 3 章），杨咸启（第 7 章、第 8 章），李济顺（第 2 章、第 4 章、第 10 章、第 11 章），罗天宇（第 9 章），马小梅（第 5 章、第 6 章）。原书光盘中例题的翻译大部分由罗天宇完成（第 3 章、第 4 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、第 11 章），其余由孙北奇（第 5 章）完成。光盘中图表的文字翻译全部由罗天宇完成。全书由罗继伟校对、统稿。

特别要提到的是，江苏通用钢球滚子有限公司总经理施祥贵先生和山东东阿钢球集团有限公司董事长申长印先生对本书的翻译工作给予了大力支持，并资助了部分经费。此外，刘耀中、葛世东、吴素琴和古文辉等同志也给予了热心帮助。在此，谨向他们表示衷心的感谢！

特别感谢美国 Timken 公司对本书中文版出版的大力资助(The Chinese edition is courtesy of The Timken Company )。

由于时间仓促以及译者的水平所限，译文中存在不当之处在所难免，欢迎广大读者批评指正，并与我们联系，以便在今后加以改进。

罗继伟

目 录

译丛序言

前言

作者简介

译者序

第1章 静载荷作用下轴承内部载荷分布：径向、轴向和力矩载荷

联合作用及轴承套圈的柔性支承 1

符号表 1

1.1 概述 2

1.2 径向、轴向和力矩载荷联合作用下的球轴承 3

1.3 不同轴的向心滚子轴承 6

1.3.1 变形分量 6

1.3.2 滚子-滚道接触切片上的载荷 8

1.3.3 静力平衡方程 9

1.3.4 位移方程 10

1.4 向心圆柱滚子轴承的推力载荷 12

1.4.1 平衡方程 12

1.4.2 位移方程 13

1.4.3 由于歪斜引起的滚子-滚道变形 14

1.5 向心滚子轴承的径向、推力和力矩载荷 16

1.5.1 圆柱滚子轴承 16

1.5.2 圆锥滚子轴承 16

1.5.3 球面滚子轴承 17

1.6 滚子-滚道非理想线接触的应力 17

1.7 柔性支承的滚动轴承 18

1.7.1 套圈变形 18

1.7.2 滚动体对套圈的相对径向趋近量 22

1.7.3 滚动体载荷的确定 22

1.7.4 有限元法 24

1.8 结束语 25

参考文献 25

第2章 轴承零件的运动和速度 27

符号表 27

2.1 概述 28

2.2 滚动和滑动 28

2.2.1 几何关系	28
2.2.2 滑动和变形	30
2.3 球轴承的公转、枢轴运动和自旋运动	31
2.3.1 一般运动	31
2.3.2 无陀螺枢轴运动	34
2.3.3 旋滚比	35
2.3.4 滚动和自旋速度计算	35
2.3.5 陀螺运动	37
2.4 滚子轴承中滚子端面与挡边的滑动	37
2.4.1 滚子端面与挡边接触	37
2.4.2 滚子端面与挡边几何形状	38
2.4.3 滑动速度	40
2.5 结束语	41
参考文献	41
第3章 高速运转：球和滚子动力载荷与轴承内部载荷分布	42
符号表	42
3.1 概述	43
3.2 滚动体的动力载荷	44
3.2.1 滚动体转动的体力	44
3.2.2 离心力	46
3.2.3 陀螺力矩	50
3.3 高速球轴承	51
3.3.1 球的漂移	55
3.3.2 轻质球	56
3.4 高速向心圆柱滚子轴承	57
3.4.1 空心滚子	60
3.5 高速圆锥和球面滚子轴承	61
3.6 五自由度载荷	62
3.7 结束语	63
例题	63
参考文献	66
第4章 滚动体与滚道接触时的润滑膜	68
符号表	68
4.1 概述	70
4.2 流体动压润滑	70
4.2.1 Reynolds 方程	70
4.2.2 油膜厚度	72
4.2.3 油膜载荷	72
4.3 等温弹流润滑	72

4.3.1 粘压关系	72
4.3.2 接触表面变形	75
4.3.3 压力和应力分布	77
4.3.4 油膜厚度	79
4.4 高压效应	80
4.5 入口处润滑剂的摩擦热效应	81
4.6 乏油	82
4.7 表面形貌的影响	83
4.8 脂润滑	86
4.9 润滑机制	87
4.10 结束语	88
例题	89
参考文献	90
第5章 滚动体—滚道接触产生的摩擦	93
符号表	93
5.1 概述	94
5.2 滚动摩擦	95
5.2.1 变形	95
5.2.2 弹性滞后	95
5.3 滑动摩擦	96
5.3.1 微观滑动	96
5.3.2 滚动产生的滑动: 固体膜或边界润滑	97
5.3.3 滚动产生的滑动: 全油膜润滑	99
5.3.4 滚动产生的滑动: 部分油膜润滑	101
5.4 真实表面、微观几何形貌和微接触	102
5.4.1 真实表面	102
5.4.2 GW 模型	103
5.4.3 塑性接触	105
5.4.4 GW 模型的应用	106
5.4.5 粗糙峰和流体承受的载荷	107
5.4.6 滚动产生的滑动: 滚子轴承	107
5.4.7 自旋和陀螺运动产生的滑动	108
5.4.8 倾斜滚子与滚道接触时的滑动	110
5.5 结束语	110
例题	111
参考文献	113
第6章 滚动轴承的摩擦效应	115
符号表	115
6.1 概述	117

6.2 轴承摩擦起因	117
6.2.1 滚动体与滚道接触产生的滑动	117
6.2.2 滚动体上的粘性摩擦力	117
6.2.3 保持架与套圈间的滑动	117
6.2.4 滚动体和保持架兜孔之间的滑动	118
6.2.5 滚子端面与套圈挡边间的滑动	118
6.2.6 密封产生的滑动	119
6.3 固体润滑轴承: 摩擦力及摩擦力矩的影响	120
6.3.1 球轴承	120
6.3.2 滚子轴承	123
6.4 流体润滑轴承: 摩擦力和摩擦力矩的影响	125
6.4.1 球轴承	125
6.4.2 圆柱滚子轴承	130
6.5 保持架运动和受力	134
6.5.1 速度的影响	134
6.5.2 作用在保持架上的力	134
6.5.3 稳态条件	135
6.5.4 动力学条件	136
6.6 滚子歪斜	138
6.6.1 滚子平衡歪斜角	139
6.7 结束语	141
参考文献	141
第7章 滚动轴承温度	143
符号表	143
7.1 概述	144
7.2 摩擦发热	145
7.2.1 球轴承	145
7.2.2 滚子轴承	146
7.3 热量传递	147
7.3.1 热量传递模型	147
7.3.2 热传导	147
7.3.3 热对流	148
7.3.4 热辐射	149
7.4 热流分析	150
7.4.1 系统方程	150
7.4.2 方程组求解	151
7.4.3 温度节点系统	151
7.5 高温考虑	153
7.5.1 特殊润滑剂与密封	153

7.5.2 散热	154
7.6 滚动-滑动接触时的热传导	155
7.7 结束语	156
例题	156
参考文献	164
第8章 作用载荷与寿命系数	165
符号表	165
8.1 概述	167
8.2 轴承内部载荷分布对疲劳寿命的影响	167
8.2.1 球轴承寿命	167
8.2.2 滚子轴承寿命	169
8.2.3 游隙	169
8.2.4 柔性支承轴承	170
8.2.5 高速运转	171
8.2.6 轴承倾斜	172
8.3 润滑对疲劳寿命的影响	173
8.4 材料及材料处理对疲劳寿命的影响	175
8.5 污染对疲劳寿命的影响	176
8.6 疲劳寿命综合影响系数	180
8.7 Lundberg-Palmgren 理论的局限性	181
8.8 Ioannides-Harris 理论	183
8.9 应力-寿命系数	184
8.9.1 寿命公式	184
8.9.2 初始疲劳应力	185
8.9.3 接触表面法向应力引起的次表面应力	185
8.9.4 接触表面摩擦切应力引起的次表面应力	186
8.9.5 表面摩擦切应力引起的应力集中	188
8.9.6 颗粒污染引起的应力	188
8.9.7 润滑与污染引起的组合应力集中系数	193
8.9.8 润滑添加剂对轴承疲劳寿命的影响	193
8.9.9 周向应力	193
8.9.10 残余应力	194
8.9.11 寿命积分	196
8.9.12 疲劳极限应力	197
8.9.13 ISO 标准	198
8.10 结束语	199
例题	200
图	203
参考文献	210

第 9 章 超静定轴与轴承系统	213
符号表	213
9.1 概述	214
9.2 二轴承系统	214
9.2.1 刚性轴系统	214
9.2.2 柔性轴系统	215
9.3 三轴承系统	218
9.3.1 刚性轴系统	218
9.3.2 非刚性轴系统	218
9.4 多轴承系统	221
9.5 结束语	223
例题	223
参考文献	229
第 10 章 滚动轴承失效和破坏形式	230
10.1 概述	230
10.2 润滑失误引起的轴承失效	231
10.2.1 轴承供油中断	231
10.2.2 热不平衡	231
10.3 微振磨损造成的轴承套圈破坏	234
10.4 过大的推力载荷造成的轴承失效	235
10.5 保持架断裂造成的轴承失效	236
10.6 滚动接触表面点蚀或压痕造成的早期失效	237
10.6.1 点蚀	237
10.6.2 击蚀	237
10.6.3 轴承滚道的摩擦腐蚀	238
10.6.4 电流通过轴承造成的腐蚀	239
10.6.5 硬颗粒杂质造成的压痕	239
10.6.6 点蚀和压痕对轴承性能和耐久性的影响	240
10.7 磨损	242
10.7.1 磨损定义	242
10.7.2 磨损类型	243
10.8 微剥蚀	244
10.9 表面初始疲劳	244
10.10 次表面初始疲劳	246
10.11 结束语	247
参考文献	247
第 11 章 轴承和滚动体的寿命试验与分析	248
符号表	248
11.1 概述	249

11.2 寿命试验的问题和局限	250
11.2.1 寿命加速试验	250
11.2.2 加大载荷的寿命加速试验	250
11.2.3 避免试验中的塑性变形状态	251
11.2.4 滚子轴承的载荷-寿命关系	251
11.2.5 提高速度的寿命加速试验	251
11.2.6 边界润滑状态试验	252
11.3 实际试验的注意事项	252
11.3.1 润滑剂颗粒污染	252
11.3.2 润滑剂中的水分	253
11.3.3 润滑剂的化学成分	253
11.3.4 试验条件的一致性	253
11.4 试验样品	254
11.4.1 统计要求	254
11.4.2 试验轴承数量	255
11.4.3 试验方案	255
11.4.4 试样的加工精度	255
11.5 试验装置设计	256
11.6 寿命试验数据的统计分析	259
11.6.1 统计数据分布	259
11.6.2 两参数威布尔分布	260
11.6.3 单样本估计	262
11.6.4 威布尔数据组的估计	267
11.7 零件试验	268
11.7.1 滚动零件寿命试验机	268
11.7.2 滚-滑摩擦试验机	270
11.8 结束语	273
例题	274
表	277
参考文献	281
附录 部分轴承钢号对照表	283

第 1 章 静载荷作用下轴承内部载荷分布：径向、轴向和力矩载荷联合作用及轴承套圈的柔性支承

符号表

符 号	定 义	单 位
A	滚道沟曲率中心之间的距离	mm
B	$f_i + f_o - 1$, 总曲率	
c	滚子端部的凸度量, 或滚道有效长度, 或其他位置的凸度间隙	mm
C	影响系数	mm/N
D	球或滚子直径	mm
D_{ij}	计算非理想滚子与滚道接触变形的影响系数	
d_m	轴承节圆直径	mm
e	载荷偏心距	mm
E	弹性模量	MPa
f	r/D	
F	作用载荷	N
F_a	滚子端部与套圈挡边之间的滑动所产生的摩擦力	N
h	滚子推力力矩的力臂	mm
I	套圈横截面的惯性矩	mm ⁴
k	薄片数目	
K	载荷-位移系数; 轴向载荷-位移系数	N/mm ⁿ
l	滚子长度	mm
M	力矩	N · mm
n	载荷-位移指数	
P_d	径向游隙	mm
q	单位长度上的载荷	N/mm
Q	球或滚子-滚道法向载荷	N
Q_a	圆柱滚子轴承滚子端部与套圈挡边之间的载荷	N
Q_f	圆锥滚子轴承滚子端部与套圈挡边之间的载荷	N
r	滚道沟曲率半径	mm
r	圆锥滚子轴承滚道接触半径	mm
r_f	圆锥滚子轴承内圈轴线至滚子端面与挡边接触处的半径	mm
R_f	圆锥滚子轴承轴线至滚子端面与挡边接触处的半径	mm
\mathfrak{R}	套圈中性轴半径	mm

\mathfrak{R}	滚道沟曲率中心轨迹半径	mm
s	内、外滚道沟曲率中心轨迹之间的距离	mm
u	套圈径向位移	mm
U	应变能	N · mm
Z	滚动体数目	
α	安装接触角	rad, (°)
α°	自由接触角	rad, (°)
β	$\arctan \frac{l}{d_m - D}$	rad, (°)
γ	$(D \cos \alpha) / d_m$	
δ	位移或接触变形	mm
δ_1	内、外圈之间的距离	mm
Δ	理想法向载荷产生的接触变形	mm
$\Delta\psi$	滚动体之间的角间距	rad, (°)
ζ	滚子倾斜角	rad, (°)
η	$\arctan(l/D)$	rad, (°)
θ	轴承倾斜角	rad, (°)
λ	薄片位置	
μ	滚子端面与套圈挡边之间的滑动摩擦系数	
σ	法向接触应力或压力	MPa
ξ	泊松比	
ξ	滚子歪斜角	rad, (°)

1.1 概述

在大多数轴承应用中,可以仅仅考虑径向载荷,轴向载荷或是径向与轴向联合载荷。然而,当有很重的载荷作用或是为了使质量最小化而采用空心轴时,安装在轴承上的轴就会发生弯曲,从而在轴承上产生一个不容忽视的力矩载荷。此外,出于尺寸和质量最小化的设计目标,轴承箱可能是非刚性的,它也会产生弯曲并伴随力矩载荷。在这样的径向、轴向和力矩载荷联合作用下,轴承中滚动体的载荷分布将发生改变。与本书第1卷第7章中考虑的由简单载荷分布产生的运转参数相比,它们会引起轴承位移、接触应力和疲劳寿命的显著改变。

在圆柱和圆锥滚子轴承中,由于轴的弯曲而引起的力矩载荷将导致沿滚子与滚道单位接触长度上的非均匀载荷。轴承内圈与轴或是外圈与轴承座之间的不同轴也会在轴承中产生力矩载荷,并引起滚子与滚道单位接触长度上的非均匀载荷。这样滚子与滚道的最大接触应力将大于沿滚子长度均匀分布的接触应力。另外,当轴承套圈不同轴时,将在滚子上引起推力载荷并使滚子产生倾斜,这将进一步放大滚子与滚道接触应力的非均匀性。在本书第1卷第11章中会看到,疲劳寿命大约与接触应力的9次方成反比,因此滚子与滚道的非均匀接触载荷将大大降低轴承的耐久性。