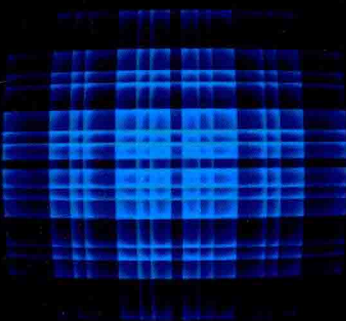


杨咸启◎著

接触力学理论 与滚动轴承设计分析

JIECHU LIXUE LILUN YU GUNDONG ZHOUCHEG SHEJI FENXI



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

接触力学理论 与滚动轴承设计分析

杨咸启 著



华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 提 要

本书介绍接触力学理论与滚动轴承设计分析、计算方面的专业知识。主要内容包括:弹性接触力学理论、弹塑性接触力学有限元分析方法、滚动接触应力强度与安定性理论、滚动轴承载荷与寿命计算理论、滚动轴承运动与动力学分析、滚动轴承振动与噪声分析、轴承系统热问题数值分析、滚动轴承产品设计与仿真工程以及关节轴承载荷与磨损寿命计算方法等。

本书力图从工程实际出发,介绍理论基础和工程应用实例,内容精练,可供从事机械设计的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

接触力学理论与滚动轴承设计分析/杨咸启著. —武汉:华中科技大学出版社,2018.4
ISBN 978-7-5680-3510-1

I. ①接… II. ①杨… III. ①接触应力 ②滚动轴承-设计 IV. ①O343.3 ②TH133.33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 096386 号

接触力学理论与滚动轴承设计分析

杨咸启 著

Jiechu Lixue Lilun yu Gundong Zhoucheng Sheji Fenxi

策划编辑:万亚军

责任编辑:程青 姚同梅

封面设计:原色设计

责任校对:张会军

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉) 电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园 邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:30.5 插页:4

字 数:656千字

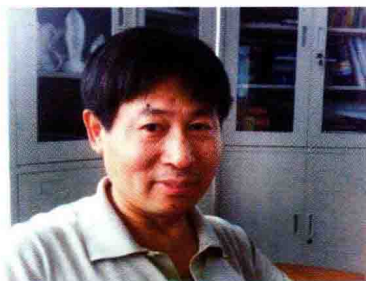
版 次:2018年4月第1版第1次印刷

定 价:79.80元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



作者简介

杨威启，男，1957年9月出生。1982年1月毕业于合肥工业大学力学专业，获得工学学士学位；1987年6月毕业于西安交通大学机械学专业，获工学硕士学位。1982—1998年历任洛阳轴承研究所工程师、高级工程师，1998—2008年任中国海洋大学高级工程师、教授，2008—2018年任黄山学院教授。任《轴承》杂志编委、《黄山学院学报》编委，全国滚动轴承标准化技术委员会关节轴承分技术委员会委员。主要研究方向：机械产品可靠性分析、摩擦学与轴承理论应用。

先后完成国家级科技攻关项目6项，获奖4项。“通用轴承CAD研究：滚动轴承弹塑性接触问题理论与实验研究”获机械工业部（现工业和信息化部）科技进步二等奖；“关节轴承额定静负荷、额定动负荷的计算方法研究”获机械工业部科技进步三等奖；“关节轴承寿命与额定载荷计算方法”获教育部科技进步三等奖；“提高航空发动机主轴轴承寿命与可靠性研究：高速圆柱滚子轴承分析与设计”获机械工业部科技进步一等奖。完成国家自然科学基金项目2项，国家“863”项目1项。负责制定关节轴承机械行业标准2项：《关节轴承 额

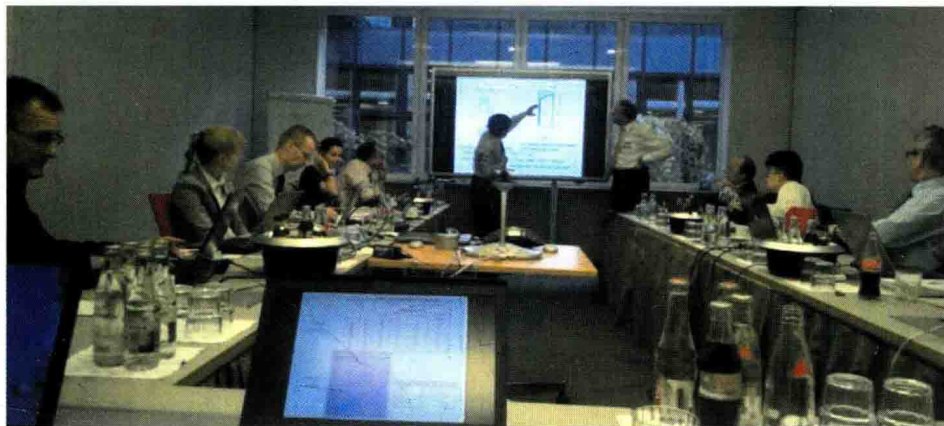
定静载荷》《关节轴承 额定动载荷与寿命》；取得实用新型专利 2 项；出版专著和主编教材共 11 部；在国内外科技刊物上发表科技论文 50 余篇。作为关节轴承额定载荷计算方法国际标准的技术负责人，多次参与国际标准(ISO/TC 4)的研讨会议。

承担“画法几何与机械制图”“材料力学”“机械 CAD”“三维设计及软件”“控制工程基础”“机械优化设计”等多门本科生课程的主讲工作以及课程设计、毕业设计、生产实习等实践环节的教学工作。主讲“数值分析方法”“有限单元法”等研究生课程。指导学生参加大学生机械创新设计大赛，作品获教育部三等奖 1 项，获山东省教育厅一等奖 1 项、二等奖 1 项，指导学生参加大学生工程训练综合能力竞赛，获安徽省教育厅二等奖 3 项。

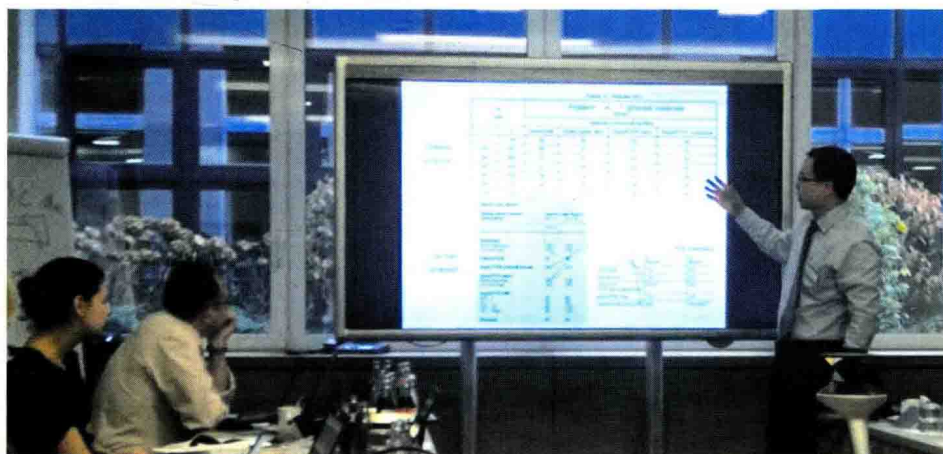
从 2013 年开始，国际标准化委员会轴承分会 (ISO/TC 4) 接受中国滚动轴承标准化技术委员会的建议，将关节轴承的额定载荷计算方法作为新的 ISO 标准开展研究。在额定载荷和寿命分技术委员会下，专门成立工作组 (ISO/TC 4/SC 8/WG 8)。在中国滚动轴承标准化技术委员会、洛阳轴研科技股份有限公司和福建龙溪轴承 (集团) 股份有限公司的大力支持下，特别是在杨晓蔚总工程师、陈志雄总工程师、郭宝霞秘书长、李飞雪高级工程师等的直接参与和推动下，作者多次参加 ISO 工作组会议，作为项目技术负责人，与项目组的中外专家一起，开展了深入的研究工作。

2013 年 5 月，中国上海 ISO/TC 4 年会提出“关节轴承的额定载荷”标准工作项目；2014 年 11 月，德国柏林 ISO/TC 4/SC 8/WG 8 工作组会议讨论“关节轴承的额定载荷”标准草案；2015 年 5 月，英国伦敦 ISO/TC 4 年会确定中国专家杨咸启作为“关节轴承的静态和动态额定载荷系数推导”的技术报告项目负责人；2016 年 5 月奥地利维也纳 ISO/TC 4/SC 8/WG 8 工作组会议，讨论“关节轴承的静态和动态额定载荷系数推导”项目中的技术细节；2017 年 5 月，美国亚特兰大 ISO/TC 4 年会讨论“关节轴承的额定载荷”计算方法草案改进；2018 年 5 月法国巴黎工作组会议，讨论方案细节。在这些会议上，作者与中国滚动轴承标准化技术委员会的专家们参与国际标准 (ISO) 讨论，制定关节轴承额定载荷计算方法国际标准。

下面几幅图为 ISO/TC 4 中国工作组成员参加各次会议的场景（作者联系方式：邮箱，yang_xianqi@163.com;QQ,707901990）。



2014 年 11 月柏林 ISO/TC 4/SC 8/WG 8 工作组会议，
中国专家杨咸启发言，阐述中方的技术观点



2014 年 11 月柏林 ISO/TC 4/SC 8/WG 8 工作组会议，
中国专家陈志雄发言，阐述中方的技术观点



2015年5月伦敦ISO/TC4年会，中国专家杨咸启发言，介绍标准的计算方法



2015年5月伦敦第27届ISO/TC4年会，中国专家代表
(左起：杨咸启、赵联春、陈志雄、李飞雪、郭宝霞、康乃正、李彬、杨彦)



2016年5月维也纳ISO/TC 4/SC 8/WG 8会议中国专家组
(左起: 陈志雄、赵联春、康乃正、杨咸启)



2017年5月亚特兰大ISO/TC 4年会中国专家组
(左起: 赵联春、杨彦、杨咸启、李祎文、Hermann Koch、Walter Verhaert、康乃正、李兴林、陈志雄)

前 言

科学技术的发展,特别是计算机技术的进步,大大促进了计算力学在滚动轴承分析理论中的应用。自1982年起,作者在洛阳轴承研究所从事接触力学和滚动轴承理论方面的研究,开发轴承分析计算软件,包括轴承接触有限元计算软件和轴承性能分析软件。1998—2008年及2008年至今,作者先后在中国海洋大学和黄山学院从事教学工作,并对轴承的理论和应用进行了比较深入的研究,采用有限元计算方法和数值分析方法对轴承的性能进行了深入探讨。本书总结了这些年作者及其所带领的团队的研究成果。这里,要特别感谢导师马家驹教授、谢友柏院士的谆谆教导,使得作者在接触力学和轴承理论方面有了坚实的理论基础;还要感谢丁仲明高级工程师、崔幼筠高级工程师和洛阳轴承研究所有关同仁的大力支持。

本书内容包括三部分。第一部分是弹性与弹塑性接触力学理论基础与计算方法,这部分主要包括经典的接触力学理论和作者所开展的弹塑性接触力学研究项目——无摩擦弹塑性接触及其安定性研究、通用轴承CAD研究项目——滚动轴承弹塑性接触问题理论与实验研究的研究成果。

第二部分是滚动轴承理论分析与设计,主要来源于研究团队和作者指导的研究生开展的轴承分析研究项目,包括:滚动轴承额定载荷与寿命分析、高速轴承运动与动力学分析、轴承振动与噪声分析、密封轴承摩擦特性研究、轴承系统的热特性分析,以及轴承可靠性设计与仿真。

第三部分包括第13章和附录,第13章“关节轴承额定载荷与寿命计算方法研究”源于作者发表的研究论文和技术报告以及制定的相关标准。

本书在编写过程中力图体现以下特色:①理论叙述简练,循序渐进,采用简明的数学理论,推导接触理论和建立有限元模型;②在结构体系安排上,先介绍一般的基础理论,再介绍轴承分析中的典型问题和计算结果;③注重对轴承新的理论知识、国内外的轴承技术的发展和介绍,以及对工程应用实例的讲解。

书中包含了作者在中国海洋大学指导的研究生取得的一些研究成果,特别是研究生刘文秀、李照成、陈贵、张蕾、宋雪静、马艳杰、孙杰、姜维、曹一等为本书贡献了很多有益的内容。书中也引用了参考文献中的部分资料,在此一并表示感谢。

在本书出版过程中得到了黄山学院和华中科技大学出版社的支持,在此表示谢意。由于作者水平所限,书中难免存在不足和错误之处,敬请读者批评指正。

杨咸启

2017年5月于黄山

目 录

第 1 章 基础知识简介	(1)
1.1 接触力学发展概述	(1)
1.2 弹性力学基础简介	(2)
1.2.1 弹性力学的基本方程	(3)
1.2.2 弹性力学问题的函数解法	(4)
1.2.3 弹性力学的矩阵方程	(7)
1.3 滚动轴承学基础简介	(9)
1.3.1 轴承基本结构类型和代号	(11)
1.3.2 轴承结构主要几何关系	(13)
1.3.3 轴承零件的基本运动关系	(20)
1.3.4 轴承中的润滑	(21)
1.3.5 轴承的使用性能——摩擦力矩及预紧刚度	(24)
参考文献	(27)
第 2 章 弹性接触力学理论	(28)
2.1 弹性体波西涅斯克问题分析	(28)
2.1.1 一般空间物体受力问题的解	(28)
2.1.2 半空间物体受集中力问题的波西涅斯克解	(32)
2.1.3 半空间弹性体受分布力作用的解	(33)
2.1.4 几个典型问题的解	(34)
2.2 弹性体赫兹型点接触问题分析	(36)
2.2.1 球面体赫兹型点接触问题解	(37)
2.2.2 任意曲面体赫兹型点接触问题解	(41)
2.3 二维弹性体线接触问题分析	(44)
2.3.1 二维线接触应力分布	(45)
2.3.2 线接触变形计算	(45)
2.4 赫兹型接触参数的工程计算方法	(47)
2.4.1 球面体点接触	(47)
2.4.2 二次曲面体点接触	(48)
2.4.3 点接触参数近似计算方法	(50)
2.4.4 线接触参数近似计算方法	(52)

2.4.5	工程接触问题算例	(55)
2.5	弹性体接触表面下的应力	(62)
2.5.1	接触表面下的应力状态	(62)
2.5.2	接触应力强度计算	(66)
2.6	非赫兹型接触问题分析	(69)
2.6.1	有限长线接触	(70)
2.6.2	曲面非对中接触与非主曲率平面接触	(72)
2.6.3	粗糙表面接触	(74)
2.6.4	有限大面接触	(75)
	参考文献	(78)
第3章	弹性接触有限元分析方法	(80)
3.1	弹性力学有限元原理	(80)
3.1.1	位能原理	(80)
3.1.2	单元插值	(81)
3.1.3	有限元方程	(82)
3.2	有限元方程计算技术	(82)
3.2.1	单元插值函数的微积分计算	(82)
3.2.2	整体刚度矩阵合成	(85)
3.2.3	总体边界条件的处理方法	(86)
3.2.4	有限元方程组求解方法	(88)
3.2.5	有限元法的程序设计	(90)
3.3	弹性力学平面问题有限元方法	(91)
3.3.1	三角形三节点单元有限元格式	(92)
3.3.2	平面问题三节点程序与示例	(97)
3.3.3	平面四边形四节点单元有限元格式	(98)
3.4	弹性力学轴对称问题有限元方法	(102)
3.4.1	轴对称问题的弹性力学方程	(102)
3.4.2	轴对称问题的有限元格式	(104)
3.4.3	非轴对称载荷处理	(107)
3.5	弹性力学三维问题的有限元方法	(109)
3.5.1	四面体有限元格式	(109)
3.5.2	五面体有限元格式	(112)
3.5.3	六面体有限元格式	(113)
3.6	弹性接触问题有限元方法	(114)
3.6.1	增量接触边界条件	(115)
3.6.2	刚度解法	(116)

3.6.3	柔度解法	(118)
3.6.4	间隙单元法	(119)
3.7	弹性接触问题其他数值分析方法	(120)
3.7.1	边界元分析法	(120)
3.7.2	无单元分析法	(122)
3.8	弹性接触有限元分析实例	(125)
3.8.1	点接触模型有限元分析	(125)
3.8.2	线接触模型有限元分析	(127)
3.8.3	轴承模型弹性接触有限元分析	(130)
	参考文献	(133)
第 4 章	弹塑性接触及安定性问题分析	(135)
4.1	弹塑性增量有限元方法	(135)
4.1.1	弹塑性增量理论	(135)
4.1.2	增量形式有限元方程	(138)
4.1.3	屈服应力修正	(138)
4.2	弹塑性接触问题分析	(140)
4.2.1	弹塑性点接触有限元分析实例	(140)
4.2.2	弹塑性线接触有限元分析实例	(142)
4.2.3	弹塑性接触残余变形试验	(144)
4.2.4	弹性接触极限载荷	(147)
4.2.5	弹塑性接触中心趋近量	(147)
4.3	弹塑性滚动接触及安定性分析	(148)
4.3.1	弹塑性变形安定性基本理论	(148)
4.3.2	安定性分析判定准则	(150)
4.3.3	点接触安定极限载荷	(152)
4.3.4	线接触安定极限载荷	(155)
4.4	弹塑性接触安定性分析程序	(157)
	参考文献	(166)
第 5 章	弹性大变形理论与轴承密封圈接触问题分析	(167)
5.1	大变形应变与应力理论	(167)
5.1.1	大变形的应变度量	(167)
5.1.2	大变形的应力度量	(169)
5.1.3	运动平衡方程	(170)
5.2	大变形有限元方程	(171)
5.2.1	完全格式的有限元方程	(172)
5.2.2	更新格式的有限元方程	(174)

5.3	橡胶接触大变形分析模型	(176)
5.3.1	橡胶材料本构模型	(176)
5.3.2	轴对称超弹性模型	(176)
5.3.3	大变形接触有限元模型	(177)
5.4	轴承密封圈的接触变形分析	(178)
5.4.1	密封圈结构类型及特点	(178)
5.4.2	密封圈安装部位接触及结构变化影响	(180)
5.4.3	密封圈唇部接触及结构变化影响	(184)
5.5	轴承密封动态分析模型	(191)
5.5.1	动态密封压力分析模型	(191)
5.5.2	密封泄漏分析模型	(193)
	参考文献	(193)
第6章	滚动轴承中的载荷与额定静载荷分析	(196)
6.1	轴承中的载荷分布	(196)
6.1.1	径向载荷作用	(196)
6.1.2	轴向载荷作用	(200)
6.1.3	联合载荷作用	(202)
6.2	球轴承受力与接触角的变化	(205)
6.2.1	低速及纯轴向载荷作用情况	(206)
6.2.2	低速及轴向与径向联合载荷作用情况	(206)
6.2.3	高速及轴向与径向联合载荷作用情况	(208)
6.3	轴承额定静载荷理论	(208)
6.3.1	永久变形极限依据	(209)
6.3.2	接触应力极限依据	(210)
6.3.3	滚动接触安定极限应力依据	(212)
6.3.4	材料硬度对额定静载荷的影响	(212)
6.4	轴承基本额定静载荷计算公式	(213)
	参考文献	(215)
第7章	滚动轴承寿命与额定动载荷分析	(216)
7.1	滚动接触疲劳寿命与额定动载荷	(216)
7.1.1	点接触类型疲劳寿命	(217)
7.1.2	线接触类型疲劳寿命	(218)
7.2	轴承额定动载荷理论	(219)
7.2.1	单个滚动体与套圈接触点的额定动载荷	(219)
7.2.2	套圈整体的接触额定动载荷	(220)
7.2.3	全轴承的额定动载荷	(222)

7.3 轴承基本额定动载荷计算公式	(223)
7.4 轴承寿命理论的发展	(228)
7.4.1 轴承基本额定疲劳寿命理论	(228)
7.4.2 轴承疲劳寿命修正估计	(230)
7.4.3 轴承润滑脂寿命估计	(232)
7.4.4 轴承磨损寿命估计	(233)
7.4.5 轴承动力学寿命概念	(235)
参考文献	(236)
第 8 章 滚动轴承外载荷与当量载荷分析	(237)
8.1 轴承外载荷与当量载荷概念	(237)
8.2 轴承当量动载荷的理论基础	(237)
8.3 轴承当量动载荷简化计算方法	(239)
8.3.1 向心轴承的径向当量动载荷简化模型	(239)
8.3.2 推力轴承的轴向当量动载荷简化模型	(241)
8.3.3 几类轴承的动载荷系数	(241)
8.4 轴承当量静载荷理论基础	(246)
8.5 轴承当量静载荷简化计算方法	(247)
参考文献	(249)
第 9 章 滚动轴承运动与动力学分析	(250)
9.1 概述	(250)
9.2 高速球轴承的球动力学模型	(251)
9.2.1 球的受力运动微分方程	(251)
9.2.2 球与滚道间的接触力和摩擦力	(254)
9.2.3 球与滚道接触入口区的摩擦力	(257)
9.2.4 球与保持架间的作用力	(259)
9.2.5 油气对球的阻力	(260)
9.2.6 球的加速度	(260)
9.3 高速滚子轴承的滚子动力学模型	(261)
9.3.1 滚子受力运动微分方程	(262)
9.3.2 滚子与滚道间的接触法向力	(263)
9.3.3 滚子与滚道间的接触摩擦力	(264)
9.3.4 滚子与滚道接触入口区摩擦力	(265)
9.3.5 滚子搅动阻力	(267)
9.3.6 滚子与挡边间的作用力	(268)
9.3.7 滚子与保持架间的作用力	(269)
9.3.8 滚子的加速度	(270)

9.4	高速轴承保持架动力学模型	(271)
9.4.1	球轴承保持架受力特点	(271)
9.4.2	滚子轴承保持架受力特点	(272)
9.4.3	轴承保持架运动微分方程	(272)
9.4.4	保持架与滚动体之间的作用力	(273)
9.4.5	套圈引导面对保持架的作用力	(275)
9.4.6	保持架的搅动阻力矩	(275)
9.5	轴承套圈受力平衡模型	(276)
9.5.1	球轴承套圈平衡方程	(276)
9.5.2	滚子轴承套圈平衡方程	(276)
9.5.3	轴承内部载荷分布的影响因素	(277)
9.6	动力学控制方程组求解方法	(280)
9.6.1	套圈平衡方程特点及解法	(280)
9.6.2	滚动体运动微分方程特点及解法	(281)
9.6.3	保持架运动微分方程特点及解法	(282)
9.7	轴承动力学数值分析实例	(282)
9.7.1	高速角接触球轴承计算结果	(282)
9.7.2	高速圆柱滚子轴承计算分析结果	(295)
9.7.3	保持架动力学模型试验结果	(301)
9.8	保持架动力学分析程序	(302)
	参考文献	(308)
第 10 章	滚动轴承振动与噪声分析	(311)
10.1	概述	(311)
10.2	轴承振动时域分析	(314)
10.2.1	轴承接触刚度与阻尼	(315)
10.2.2	轴承零件损伤引起的激振力	(316)
10.2.3	表面波纹引起的激振力	(317)
10.2.4	典型轴承缺陷振动信号时域仿真	(318)
10.3	轴承振动频率近似计算	(319)
10.3.1	套圈弹性振动固有频率	(319)
10.3.2	表面波纹的激振频率	(320)
10.3.3	表面划伤缺陷激振频率	(320)
10.4	轴承振动信号分析方法	(321)
10.4.1	轴承振动信号测量	(321)
10.4.2	振动信号傅里叶分析方法	(322)
10.4.3	振动信号小波分析方法	(324)

10.4.4 故障诊断的小波包分析	(328)
10.4.5 小波包自回归谱分析实例	(330)
10.5 轴承振动频率谱变化规律	(333)
10.5.1 轴承异音振动波形特征	(333)
10.5.2 轴承频谱特征规律	(336)
10.6 轴承振动与噪声控制	(339)
参考文献	(340)
第 11 章 轴承系统热问题分析	(344)
11.1 热传导理论基础	(344)
11.2 导热问题的有限元分析法	(345)
11.2.1 导热有限元方程	(345)
11.2.2 稳态导热问题求解	(346)
11.2.3 瞬态导热问题求解	(347)
11.2.4 轴承套圈轴对称导热问题的有限元方程	(349)
11.3 轴承导热问题的边界元分析	(351)
11.3.1 导热边界元方程	(351)
11.3.2 轴承套圈轴对称导热问题边界元解法	(353)
11.3.3 滚动轴承系统导热边界元模拟	(356)
11.4 滚动轴承系统的热流网络分析法	(358)
11.4.1 有限热流网络原理	(358)
11.4.2 多种传热的计算模型	(359)
11.4.3 工程系统热流网络模拟	(361)
11.5 热流函数的有限元分析法	(363)
11.5.1 热流函数有限元方程	(364)
11.5.2 工程系统的热流函数有限元模拟	(364)
11.5.3 热流函数有限元模拟程序	(366)
参考文献	(375)
第 12 章 滚动轴承产品可靠性设计与仿真工程	(376)
12.1 概述	(376)
12.2 深沟球轴承产品可靠性设计	(376)
12.2.1 轴承结构主参数优化设计原理	(376)
12.2.2 轴承参数优化设计软件	(378)
12.2.3 轴承零件参数化三维设计	(383)
12.2.5 轴承零件装配	(393)
12.2.6 二维工程图	(397)
12.3 球轴承运动可靠性仿真	(397)

12.3.1	轴承零件装配干涉检查	(397)
12.3.2	滚动体运动仿真	(397)
12.3.3	钢球打滑分析	(399)
12.4	圆锥滚子轴承可靠性设计	(402)
12.4.1	轴承结构参数	(402)
12.4.2	轴承参数优化设计软件	(402)
12.4.3	轴承零件参数化三维设计	(404)
12.4.4	轴承零件装配	(411)
12.4.5	二维工程图	(413)
12.5	圆锥轴承运动可靠性仿真	(414)
12.5.1	滚动体运动仿真	(414)
12.5.2	滚子打滑分析	(414)
12.5.3	轴承产品信息化软件介绍	(416)
	参考文献	(420)
第 13 章	关节轴承额定载荷与寿命计算方法研究	(421)
13.1	概述	(421)
13.2	关节轴承额定静载荷计算方法	(422)
13.2.1	本方法的适用范围	(422)
13.2.2	引用标准	(422)
13.2.3	相关概念定义	(422)
13.2.4	向心关节轴承静载荷计算方法	(423)
13.2.5	角接触关节轴承静载荷计算方法	(424)
13.2.6	推力关节轴承静载荷计算方法	(424)
13.2.7	杆端关节轴承静载荷计算方法	(425)
13.3	关节轴承额定动载荷计算方法	(425)
13.3.1	本方法适用范围	(425)
13.3.2	引用标准	(426)
13.3.3	相关概念定义	(426)
13.3.4	关节轴承额定动载荷	(426)
13.3.5	当量动载荷计算方法	(428)
13.4	关节轴承在正常润滑状态下的寿命估算方法	(429)
13.4.1	关节轴承初润滑寿命估算	(429)
13.4.2	复用轴承的寿命估算方法	(432)
13.4.3	应用实例	(433)
13.5	关节轴承的边界润滑模型与寿命简化计算方法研究	(434)
13.5.1	边界润滑理论	(434)