

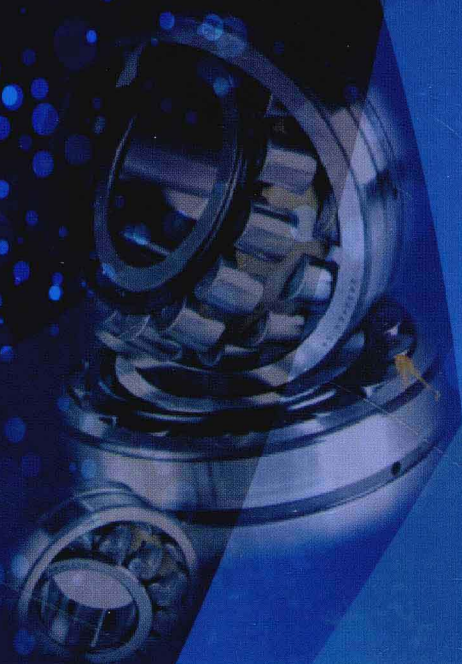


国防科技图书出版基金

Bearing Tribology Principles and Applications

轴承摩擦学 原理及应用

邱明 陈龙 李迎春 编著



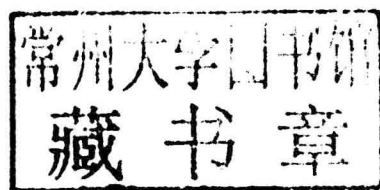
国防工业出版社

National Defense Industry Press

轴承摩擦学原理及应用

Bearing Tribology Principles and
Applications

邱明 陈龙 李迎春 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

轴承摩擦学原理及应用 / 邱明, 陈龙, 李迎春编著. —北京: 国防工业出版社, 2012. 10

ISBN 978-7-118-08127-5

I. ①轴... II. ①邱... ②陈... ③李... III. 轴承-动摩擦-研究 IV. ①TH133.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 187547 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)

嘉恒彩色印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 17¼ 字数 293 千字

2012 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1-3000 册 定价 69.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举

势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟 甘茂治
(按姓氏笔画排序)

甘晓华 卢秉恒 邬江兴 刘世参 芮筱亭

李言荣 李德仁 李德毅 杨 伟 肖志力

吴有生 吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

前 言

摩擦学是研究相对运动的相互作用表面间的摩擦、磨损和润滑以及三者间相互关系的基础理论和实践的一门边缘学科,它涉及数学、物理、化学、力学、热力学、冶金、材料、机械工程、石油化工等多学科领域。而轴承被称为机器的“关节”,广泛应用于各类机械、仪器仪表、家用电器、计算机、车辆、航空航天器等产品中,其质量直接影响着装备的整体性能。随着我国装备技术水平的发展,越来越多的摩擦、磨损与润滑问题出现在轴承上。随着理论和应用研究的深入开展,人们认识到摩擦学在轴承上的正确应用将会有效提升轴承的工作性能,并将最终提升整体装备的技术水平。

编者长期从事轴承的摩擦学理论与应用技术的研究工作。本书部分内容为编者课题组长期研究积累的结果。本书编写以轴承的摩擦、磨损和润滑为主线,比较系统地介绍了轴承的摩擦学理论,并试图反映轴承摩擦学的全貌,尽可能地介绍新的研究领域和发展趋势。

全书共分为 10 章,其中第 1 章、第 2 章、第 9 章由陈龙撰写;第 3 章、第 4 章、第 7 章由李迎春撰写;第 5 章、第 6 章、第 8 章、第 10 章由邱明撰写。全书由邱明统稿。

本书的编写过程中,引用了国内外许多学者的研究成果以及轴承公司的技术资料,编者对这些作者和单位表示感谢!同时,编者向提供热情支持与帮助的同事们和研究生们,表示最真诚的感谢。

本书的研究成果得益于国家自然科学基金、河南省杰出青年科学基金、河南省高校科技创新人才支持计划项目的支持,并获河南科技大学学术著作出版基金资助,编者对此表示感谢。

由于轴承的结构和品种繁多,篇幅有限,有些知识未编入。再加上编者水平有限,因而本书必有不妥和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2011 年 12 月

目 录

第 1 章 轴承运行中的摩擦、磨损与润滑	1
1.1 轴承摩擦学的基本概念	1
1.1.1 轴承摩擦学的基本定义	1
1.1.2 轴承摩擦学的研究对象与任务	2
1.1.3 轴承摩擦学的学科特点	3
1.2 轴承的摩擦与磨损	3
1.2.1 滑动摩擦与滚动摩擦	4
1.2.2 轴承的结构类型	4
1.2.3 轴承中的摩擦与磨损	5
1.3 轴承的润滑	5
1.3.1 滑动轴承润滑	6
1.3.2 滚动轴承润滑	6
参考文献	6
第 2 章 轴承的表面接触	7
2.1 表层结构与表面性质	7
2.1.1 表层结构	7
2.1.2 表面性质	8
2.2 表面形貌参数	11
2.2.1 固体表面的几何形状	11
2.2.2 表面形貌参数	12
2.2.3 表面形貌的统计参数	14
2.3 赫兹弹性接触	15
2.3.1 两圆柱体的接触	15
2.3.2 两个球接触	17
2.3.3 粗糙表面的接触	17

2.3.4	塑性指数	22
2.4	表面接触的热效应	22
2.4.1	静热源	23
2.4.2	动热源	23
2.4.3	滑动热	24
2.4.4	滚动热	25
2.5	轴承中的接触问题	26
2.5.1	滚动轴承的接触类型	26
2.5.2	滑动轴承的接触	28
2.5.3	滚动体与滚道的接触应力	29
2.5.4	滚动体与挡边的接触应力	29
	参考文献	30
第3章	轴承摩擦磨损机理	31
3.1	滑动摩擦机理	31
3.1.1	滑动摩擦的特征	31
3.1.2	简单的摩擦理论	33
3.1.3	粘着摩擦理论	34
3.1.4	摩擦二项式定律	39
3.2	滚动摩擦机理	40
3.2.1	微观滑移效应	41
3.2.2	弹性滞后	41
3.2.3	塑性变形	41
3.2.4	粘着效应	41
3.2.5	滚动摩擦阻力的计算	42
3.2.6	滚动摩擦定律	43
3.3	磨损机理	43
3.3.1	磨损的分类	44
3.3.2	磨损机理	45
3.4	磨损的计算	52
3.4.1	磨损的表示法	52
3.4.2	磨粒磨损的计算方法	53
3.4.3	粘着磨损的计算方法	54
3.4.4	IBM 磨损计算方法	55

3.5 磨损规律在设计中的应用	56
3.5.1 摩擦副材料选择原则	56
3.5.2 保护层原理与耐磨层设计基本准则	58
参考文献	60
第4章 轴承的摩擦副材料	61
4.1 滑动轴承材料	61
4.1.1 巴氏合金材料	62
4.1.2 铜合金材料	63
4.1.3 铝合金材料	64
4.1.4 灰铸铁、耐磨铸铁、球墨铸铁材料	66
4.1.5 多孔质金属材料	66
4.1.6 非金属材料	66
4.1.7 石墨—金属合金材料	67
4.2 滚动轴承材料	68
4.2.1 滚动轴承套圈与滚动体的钢材料	68
4.2.2 滚动轴承的其他材料	73
4.2.3 滚动轴承钢材料的选择原则	76
参考文献	76
第5章 滑动轴承的润滑理论	78
5.1 润滑状态	78
5.2 流体动压润滑	79
5.2.1 流体润滑理论的基本方程	79
5.2.2 雷诺方程	80
5.2.3 流量和剪切应力方程	85
5.3 流体动压滑动轴承的设计计算	86
5.3.1 斜面推力轴承	87
5.3.2 阶梯轴承	88
5.3.3 径向轴承	90
5.4 流体动力不稳定性	97
5.4.1 油膜不稳定性	97
5.4.2 半频涡动	98
5.4.3 油膜振荡	98
5.4.4 油膜不稳定性的抑制	99

5.5	流体静压润滑	100
5.5.1	工作原理	100
5.5.2	毛细管节流径向静压轴承计算	102
5.6	特殊的滑动轴承	106
5.6.1	气体轴承的润滑理论	107
5.6.2	磁悬浮轴承的原理	108
	参考文献	109
第6章	滚动轴承的润滑理论	111
6.1	刚性接触润滑理论	111
6.1.1	几何模拟与间隙方程	111
6.1.2	Martin 线接触润滑理论	113
6.2	弹性流体动压润滑理论	114
6.2.1	线接触弹流润滑的近似解	115
6.2.2	线接触弹流的数值解	118
6.2.3	影响弹流润滑的压力分布和油膜形状的主要因素	122
6.2.4	线接触润滑计算公式及润滑状态图	122
6.2.5	点接触润滑计算公式及润滑状态图	123
6.3	弹性流体动压润滑理论在轴承中的应用	126
6.3.1	弹性流体动压润滑理论用途	126
6.3.2	滚动轴承的弹性流体动压润滑计算	127
6.4	边界润滑理论	129
6.4.1	边界润滑机理	129
6.4.2	边界膜的种类及特点	130
6.4.3	影响边界润滑膜性能的因素	131
6.5	滚动轴承润滑机理的研究进展	132
6.5.1	粗糙表面弹流模拟研究	132
6.5.2	脂润滑滚动轴承润滑机理	133
6.5.3	脂润滑轴承润滑剂迁移机理	135
6.6	遗传算法在圆柱滚子轴承热弹流数值分析中的应用	137
	参考文献	140
第7章	轴承润滑的应用	141
7.1	润滑材料	141
7.1.1	润滑油	141

7.1.2	润滑脂	145
7.1.3	固体润滑剂和气体润滑剂	146
7.2	滑动轴承的润滑	146
7.2.1	边界润滑状态的滑动轴承	146
7.2.2	动压润滑的滑动轴承	147
7.2.3	润滑方式	147
7.2.4	润滑剂的选择	148
7.2.5	滑动轴承的润滑系统	148
7.3	滚动轴承的润滑	149
7.3.1	滚动轴承润滑方式	149
7.3.2	润滑剂的选择	150
7.3.3	润滑剂用量的确定	153
7.4	典型设备的轴承润滑	155
7.4.1	汽车轴承的润滑	155
7.4.2	轧钢机轴承的润滑	157
7.4.3	大型电机轴承的润滑	160
	参考文献	161
第8章	轴承的摩擦磨损测试技术	162
8.1	轴承摩擦力矩的测量方法	162
8.1.1	扭轴法	162
8.1.2	平衡力矩法	163
8.1.3	能量转换法	163
8.2	轴承磨损量的测量方法	163
8.2.1	称重法	164
8.2.2	测长法	164
8.2.3	放射性同位素法	164
8.2.4	沉淀法或化学分析法	165
8.2.5	轮廓仪法	165
8.2.6	位移传感器法	166
8.3	轴承摩擦温度测量方法	166
8.3.1	热电偶法	166
8.3.2	薄膜传感器法	166
8.3.3	红外测温法	167

8.3.4	热电阻测温法	167
8.3.5	光纤测温法	168
8.4	轴承拖动力的测量方法	168
8.4.1	线接触弹流拖动力测试方法	169
8.4.2	点接触弹流拖动力测试方法	171
8.5	轴承摩擦磨损实验机	171
8.5.1	高速摩擦磨损实验机	172
8.5.2	重载滑动摩擦实验机	173
8.5.3	关节轴承摩擦磨损实验机	174
8.5.4	轴承寿命实验机	176
8.5.5	轴承摩擦力矩实验机	177
8.5.6	径向滑动轴承摩擦磨损实验机	179
	参考文献	180
第9章	轴承的故障诊断与状态监测	182
9.1	概述	182
9.2	工况监测的基本理论	183
9.2.1	状态信号与特征参数	183
9.2.2	信号处理与分析	188
9.2.3	状态识别	189
9.3	油液分析	190
9.3.1	油液分析方法	190
9.3.2	铁谱分析法	192
9.3.3	磁塞检查法	195
9.4	振动诊断	197
9.4.1	概述	197
9.4.2	振动判别标准	201
9.4.3	振动信号分析方法	202
9.5	滑动轴承工况监测	205
9.5.1	滑动轴承失效的基本形式	205
9.5.2	滑动轴承的诊断方法	213
9.5.3	滑动轴承故障诊断实例	216
9.6	滚动轴承工况监测	218
9.6.1	滚动轴承的故障诊断技术	218

9.6.2	滚动轴承故障诊断的基本环节和方法	222
9.6.3	滚动轴承故障诊断的振动分析法	223
9.6.4	滚动轴承故障信号处理技术	224
9.6.5	滚动轴承的故障振动分析	225
9.6.6	滚动轴承振动监测诊断技术	228
参考文献		232
第 10 章 摩擦学在轴承中的应用		233
10.1	铁路轴承摩擦学应用	233
10.1.1	材料对轴承摩擦学性能的影响	233
10.1.2	加工质量对轴承摩擦学性能的影响	234
10.1.3	润滑与密封对轴承摩擦学性能的影响	235
10.1.4	结构设计对轴承摩擦学性能的影响	235
10.2	汽车轴承摩擦学应用	236
10.2.1	发动机轴承摩擦学应用	236
10.2.2	差速器轴承和变速器轴承摩擦学应用	239
10.2.3	离合器轴承摩擦学应用	239
10.2.4	转向器轴承摩擦学应用	240
10.2.5	轮毂轴承摩擦学应用	240
10.2.6	等速万向节摩擦学应用	240
10.3	机床轴承摩擦学应用	241
10.3.1	机床轴承的磨损研究	241
10.3.2	机床轴承的润滑研究	242
10.4	轧机轴承摩擦学应用	242
10.4.1	轧机用滚动轴承摩擦学应用	243
10.4.2	轧机用滑动轴承摩擦学应用	244
10.5	航空航天轴承摩擦学应用	245
10.5.1	航空用滚动轴承摩擦学应用	245
10.5.2	航空用滑动轴承摩擦学应用	247
10.6	精密仪器轴承摩擦学应用	249
10.7	重型机械轴承摩擦学应用	250
10.7.1	重型机械用滚动轴承摩擦学应用	250
10.7.2	重型机械用滑动轴承摩擦学应用	251
参考文献		252

CONTENTS

Chapter 1 Friction, wear and lubrication in the bearing

application	1
1.1 Basic concepts of the bearing tribology	1
1.1.1 Basic definition of the bearing tribology	1
1.1.2 Objects and tasks of the bearing tribology	2
1.1.3 Subject characteristics of the bearing tribology	3
1.2 Bearing friction and wear	3
1.2.1 Sliding friction and rolling friction	4
1.2.2 Types of the bearings	4
1.2.3 Friction and wear in the bearing application	5
1.3 Bearing lubrication	5
1.3.1 Plain bearing lubrication	6
1.3.2 Rolling bearing lubrication	6
References	6

Chapter 2 Bearing surface contact

2.1 Surface structure and property	7
2.1.1 Surface structure	7
2.1.2 Surface property	8
2.2 Surface morphology parameters	11
2.2.1 Surface geometry	11
2.2.2 Surface morphology parameters	12
2.2.3 Surface morphology statistical parameters	14
2.3 Hertz elastic contact	15
2.3.1 Contact between two cylinders	15
2.3.2 Contact between two balls	17
2.3.3 Rough surface contact	17
2.3.4 Plasticity index	22

2.4	Heating effect of the surface contact	22
2.4.1	Static heat source	23
2.4.2	Dynamic heat source	23
2.4.3	Sliding heat	24
2.4.4	Rolling heat	25
2.5	Contact problems in the bearings	26
2.5.1	Rolling bearing contact	26
2.5.2	Plain bearing contact	28
2.5.3	Contact stress between rolling element and raceway	29
2.5.4	Contact stress between rolling element and rib	29
	References	30
Chapter 3	Bearing friction and wear mechanism	31
3.1	Sliding friction mechanism	31
3.1.1	Sliding friction characteristics	31
3.1.2	Basic friction theory	33
3.1.3	Adhesion friction theory	34
3.1.4	Friction binomial law	39
3.2	Rolling friction mechanism	40
3.2.1	Microscopic slipping effect	41
3.2.2	Elastic hysteresis	41
3.2.3	Plastic deformation	41
3.2.4	Adhesion effect	41
3.2.5	Rolling friction calculation	42
3.2.6	Rolling friction law	43
3.3	Wear mechanism	43
3.3.1	Wear types	44
3.3.2	Wear mechanism	45
3.4	Wear calculation	52
3.4.1	Wear representation	52
3.4.2	Abrasive wear calculation	53
3.4.3	Adhesive wear calculation	54
3.4.4	IBM wear calculation	55
3.5	Wear law in the design process	56

3. 5. 1	Friction pairs material selection rules	56
3. 5. 2	Protective layer principle and wear-resisting layer design criteria	58
References		60
Chapter 4	Materials for bearing frictional pairs	61
4. 1	Sliding bearing material	61
4. 1. 1	Babbitt alloy	62
4. 1. 2	Copper alloy	63
4. 1. 3	Aluminium alloy	64
4. 1. 4	Gray cast iron, wear resisting cast iron and spheroidal graphite iron	66
4. 1. 5	Porous metal	66
4. 1. 6	Nonmetal material	66
4. 1. 7	Graphite-metal alloy	67
4. 2	Rolling bearing material	68
4. 2. 1	Steels for rings and rolling elements	68
4. 2. 2	Other materials of the rolling bearings	73
4. 2. 3	Bearing steel selection principle	76
References		76
Chapter 5	Plain bearing lubrication theory	78
5. 1	Lubrication condition	78
5. 2	Hydrodynamic lubrication	79
5. 2. 1	Fluid lubrication basic equation	79
5. 2. 2	Reynolds equation	80
5. 2. 3	Flow equation and shearing stress equation	85
5. 3	Hydrodynamic plain bearing design	86
5. 3. 1	Tapered-land thrust bearing	87
5. 3. 2	Ladder bearing	88
5. 3. 3	Journal bearing	90
5. 4	Fluid dynamic instability	97
5. 4. 1	Oil film instability	97
5. 4. 2	Half frequency vortex motion	98
5. 4. 3	Oil oscillation	98
5. 4. 4	Oil film instability restraint	99
5. 5	Hydrostatic lubrication	100