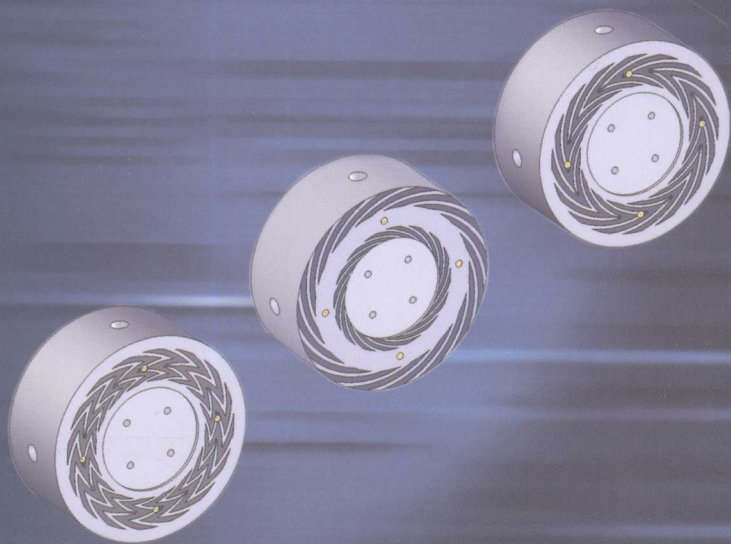


气体复合润滑技术

Gas Complex Lubrication Technique

姚绍明 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

气体复合润滑技术

Gas Complex Lubrication Technique

姚绍明 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

气体复合润滑技术 / 姚绍明著. —北京: 国防工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-118-05287-9

I. 气... II. 姚... III. 气体-润滑-技术 IV. TH117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 108505 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 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 $\frac{7}{8}$ 字数 197 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡镛

委员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

(按姓氏笔画排序) 李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 刘世参

前 言

气体润滑轴承是一种以气体作为润滑剂的滑动轴承。自 20 世纪 60 年代以来,随着核技术、航天技术、微电子、信息技术以及生物工程等新兴科学技术而发展起来,加工、检测精度从毫米、微米到亚微米,目前已经发展到纳米水平,并向着原子晶格尺寸(亚纳米)水平迈进,所有这些进步都依赖于超精密加工和超精密检测技术水平的不断提升,现阶段科学技术的发展对超精密加工和超精密检测技术提出了更高的要求,如:高精度、大载荷、高刚度、低流量、高分辨率、高稳定性、低振动、低爬行、低成本等。

在超精密加工和超精密检测领域,气体润滑技术以其巨大的优势得到了广泛的应用。

本书总结了近年来在气体复合润滑领域的研究成果,旨在建立气体复合润滑基础理论,并构建不同结构形式的气体复合润滑轴承,全面提高气体润滑轴承性能,拓宽气体润滑轴承的应用领域,发挥气体润滑轴承优势,解决高技术产业的瓶颈技术,即运动基准技术(回转运动基准和直线运动基准)。

本书提出了动静压复合润滑理论,该复合润滑理论认为:动压效应与静压节流之间存在着显著的耦合作用,这种耦合表现在压力耦合和结构耦合以及压力与结构的交叉耦合;动静压之间的耦合作用能够显著改变气体润滑轴承的性能。

合理地构建气体复合润滑轴承(或导轨)的结构形式能够成倍地提高气体润滑轴承的承载能力和刚度;同时,采用泵入式结构还能够大幅度降低气体润滑轴承耗气量、提高气体压缩机的总体效率,尤其是特种气体压缩机(如低温氦压缩机)。

本书在一维气体润滑研究的基础上,根据复合润滑理论构建

了泵入式螺旋槽动静压气体复合润滑圆柱轴承、泵出式动静压气体复合润滑圆柱轴承、分立式人字槽动静压气体复合润滑圆柱轴承、泵入式螺旋槽动静压气体复合润滑止推轴承、泵出式动静压气体复合润滑止推轴承、分立式人字槽动静压气体复合润滑止推轴承等六种典型结构的动静压气体复合润滑轴承结构形式;建立了相应的承载能力、刚度和流量的解析模型,在不同条件下对结构参数进行了优化,并给出了详尽的优化结果;对六种结构形式的动静压气体复合润滑轴承的解析模型进行了分析和对比,给出了动静压气体复合润滑轴承的统一解析模型,奠定了动静压气体复合润滑轴承的理论基础;通过性能综合对比,给出了六种结构轴承的各自特点;由于资金和精力所限,仅对三种典型结构的止推轴承进行了静态试验验证,但这已经足以验证动静压气体复合润滑理论的静态部分,即结构耦合部分。

本书在动静压气体复合润滑理论基础上,根据六种结构形式的复合轴承解析模型,演绎出复合节流静压气体润滑轴承的解析模型,为静压轴承表面特征设计提供了理论依据。同时成倍地提高了静压气体润滑轴承的承载能力和刚度。本书是在不可压缩条件下建立的复合润滑轴承的解析模型。编写本书的目的在于将目前气体复合润滑的研究成果介绍给从事气体润滑研究的科研工作者、工程技术人员以及在校学生,希望能够对气体润滑的研究和工程实施有一定的帮助。

姚绍明

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 气体润滑技术的特点	1
1.2 气体润滑技术的现状	2
1.2.1 动压气体润滑轴承	3
1.2.2 静压气体润滑轴承	6
1.2.3 轴颈混合气体润滑轴承	7
1.3 气体复合润滑技术	8
第 2 章 无限宽阶形平板动压气体润滑	11
2.1 引言	11
2.2 动压效应解析模型及最佳动压截面参数	11
2.2.1 一维流动的雷诺方程	12
2.2.2 无限宽阶形平板的承载能力	14
2.2.3 无限宽阶形平板的刚度	17
2.3 有限元仿真	19
2.3.1 有限元仿真计算	20
2.3.2 数据规划	21
2.3.3 仿真结果	22
2.4 优化结果的对比	26
2.5 可压缩条件下的动压台阶截面形状优化	27
2.5.1 结构模型	28

2.5.2	参数规划	29
2.5.3	有限元仿真	29
2.5.4	结构优化	30
2.6	小结	32
第3章	动静压气体复合润滑圆柱轴承	33
3.1	引言	33
3.2	泵入式螺旋槽动静压气体复合润滑圆柱轴承	34
3.2.1	泵入式平面平行槽几何模型及气体润滑 模型	34
3.2.2	泵入式平面平行槽平板的承载能力 与压比	44
3.2.3	泵入式平面平行槽平板的刚度	45
3.2.4	泵入式螺旋槽圆柱轴承的承载能力	51
3.2.5	泵入式螺旋槽圆柱轴承的刚度	53
3.2.6	泵入式螺旋槽圆柱轴承的姿态角	53
3.2.7	泵入式螺旋槽圆柱轴承的流量	53
3.2.8	结构优化	54
3.2.9	复合润滑轴承数表示法	63
3.2.10	小结	65
3.3	泵出式螺旋槽动静压气体复合润滑圆柱轴承	66
3.3.1	泵出式平面平行槽几何模型及气体 润滑模型	66
3.3.2	泵出式平面平行槽平板的承载能力	70
3.3.3	泵出式平面平行槽平板的刚度	71
3.3.4	泵出式平面平行槽平板的流量	74
3.3.5	泵出式螺旋槽圆柱轴承的承载能力	75
3.3.6	结构优化	75

3.3.7	小结	84
3.4	人字槽动静压气体复合润滑圆柱轴承	85
3.4.1	人字槽平板几何模型及气体润滑模型	85
3.4.2	人字槽平板的承载能力	93
3.4.3	人字槽平板的刚度	93
3.4.4	人字槽平板的流量	97
3.4.5	分立式人字槽圆柱轴承的承载能力	98
3.4.6	结构优化及模型分析	99
3.4.7	小结	108
第4章	动静压气体复合润滑止推轴承	110
4.1	引言	110
4.2	泵入式动静压气体复合润滑止推轴承	111
4.2.1	泵入式止推轴承几何模型及流体润滑解析解	111
4.2.2	泵入式止推轴承的承载能力	126
4.2.3	泵入式止推轴承的刚度	134
4.2.4	泵入式止推轴承的流量	142
4.2.5	结构优化	143
4.2.6	泵入式动静压气体复合润滑止推轴承仿真研究	151
4.2.7	小结	156
4.3	泵出式动静压气体复合润滑止推轴承	159
4.3.1	泵出式止推轴承几何模型及流体润滑解析解	159
4.3.2	泵出式止推轴承的承载能力	162
4.3.3	泵出式止推轴承的刚度	165
4.3.4	泵出式止推轴承的流量	167

4.3.5	结构优化	167
4.3.6	泵出式动静压气体复合润滑止推轴承的 动态仿真	174
4.3.7	小结	178
4.4	人字槽型动静压气体复合润滑止推轴承.....	182
4.4.1	人字槽止推轴承的几何模型及流体润 滑解析解	182
4.4.2	人字槽止推轴承的承载能力	186
4.4.3	人字槽型止推轴承的刚度	191
4.4.4	人字槽止推轴承的流量	194
4.4.5	结构优化	195
4.4.6	人字槽型动静压气体复合润滑止推 轴承仿真	203
4.4.7	小结	206
第5章	统一的归一化解析模型.....	211
5.1	动静压气体复合润滑轴承统一归一化解析模型.....	211
5.1.1	统一的承载能力和刚度解析模型	211
5.1.2	统一的归一化流量模型	211
5.2	性能对比.....	212
5.3	统一的临界曲线描述.....	213
5.4	小结.....	214
第6章	复合节流静压气体润滑轴承.....	215
6.1	复合节流静压气体润滑圆柱轴承.....	215
6.1.1	无限长复合节流静压气体润滑平板 几何模型	215
6.1.2	无限长复合节流静压气体润滑平板的承	

载能力	218
6.1.3 无限长复合节流静压气体润滑平板	
的刚度	219
6.1.4 无限长复合节流静压气体润滑平板	
的流量	220
6.2 复合节流静压气体润滑止推轴承的	
承载能力	221
6.2.1 复合节流静压气体润滑止推轴承几何模型及	
流体润滑解析解	222
6.2.2 复合节流静压气体润滑止推轴承的	
承载能力	224
6.2.3 复合节流静压气体润滑止推轴承的刚度 ..	226
6.2.4 复合节流气体润滑止推轴承的流量	228
6.3 小结	229
符号表	230
参考文献	233

CONTENTS

Chapter 1 Prolegomenon	1
1.1 Characteristics of Gas Lubrication	1
1.2 Current Techniques	2
1.2.1 Aerodynamic Bearings	3
1.2.2 Aerostatic Bearings	6
1.2.3 Hybrid Air Bearings	7
1.3 Gas Complex Lubrication Technique	8
Chapter 2 Infinite Long Step-Shaped Flat Bearings	11
2.1 Introduction	11
2.2 Analytic Model and Optimal Parameters	11
2.2.1 1D Reynolds Equation	12
2.2.2 Load Carrying Capacity	14
2.2.3 Stiffness	17
2.3 Simulation by Finite Element Method	19
2.3.1 Simulation	20
2.3.2 Parameter Programming	21
2.3.3 Results	22
2.4 Comparison	26
2.5 Section Shape Compressible Optimization	27
2.5.1 Model	28

2. 5. 2	Parameter Programming	29
2. 5. 3	Simulation	29
2. 5. 4	Structure Optimization	30
2. 6	Summary	32
Chapter 3	Complex Journal Gas Bearings	33
3. 1	Introduction	33
3. 2	In-Pump Type Complex Journal Gas Bearings	34
3. 2. 1	Models of In-Pump Type Flat Bearings	34
3. 2. 2	Load of In-Pump Type Flat Bearings	44
3. 2. 3	Stiffness of In-Pump Type Flat Bearings	45
3. 2. 4	Load of In-Pump Type Journal Gas Bearings	51
3. 2. 5	Stiffness of In-Pump Type Journal Gas Bearings	53
3. 2. 6	Operating Angle of In-Pump Type Journal Gas Bearings	53
3. 2. 7	Flow of In-Pump Type Journal Gas Bearings	53
3. 2. 8	Optimization	54
3. 2. 9	Representation Using Complex Bearing Number	63
3. 2. 10	Summary	65
3. 3	Out-Pump Type Complex Journal Gas Bearings	66
3. 3. 1	Models of Out-Pump Type Flat Bearings	66
3. 3. 2	Load of Out-Pump Type Flat Bearings	70

3.3.3	Stiffness of Out-Pump Type Flat Bearings	71
3.3.4	Flow of Out-Pump Type Flat Bearings	74
3.3.5	Load of Out-Pump Type Journal Gas Bearings	75
3.3.6	Optimization	75
3.3.7	Summary	84
3.4	Herringbone Type Complex Journal Gas Bearings	85
3.4.1	Models of Herringbone Type Flat Bearings	85
3.4.2	Load of Herringbone Type Flat Bearings	93
3.4.3	Stiffness of Herringbone Type Flat Bearings	93
3.4.4	Flow of Herringbone Type Flat Bearings	97
3.4.5	Load of Herringbone Type Journal Gas Bearings	98
3.4.6	Optimization and Analyse	99
3.4.7	Summary	108
Chapter 4	Complex Thrust Gas Bearings	110
4.1	Introduction	110
4.2	In-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	111
4.2.1	Models of In-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	111
4.2.2	Load of In-Pump Type Complex Thrust	

	Gas Bearings	126
4. 2. 3	Stiffness of In-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	134
4. 2. 4	Flow of In-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	142
4. 2. 5	Optimization	143
4. 2. 6	Simulation of In-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	151
4. 2. 7	Summary	156
4. 3	Out-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	159
4. 3. 1	Models and Analytic Solution of Out-Pump Type Complex Thrust Gas Bearing	159
4. 3. 2	Load of Out-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	162
4. 3. 3	Stiffness of Out-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	165
4. 3. 4	Flow of Out-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	167
4. 3. 5	Optimization	167
4. 3. 6	Simulation of Out-Pump Type Complex Thrust Gas Bearings	174
4. 3. 7	Summary	178
4. 4	Herringbone Type Complex Thrust Gas Bearings	182
4. 4. 1	Models and Analytic Solution of Herringbone Type Complex Thrust Gas Bearing	182