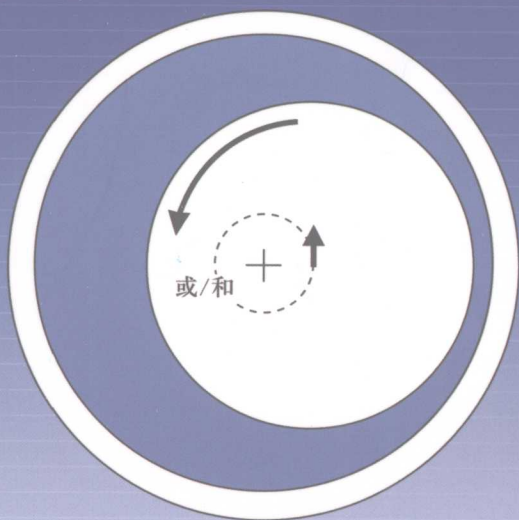


航空燃气轮机摩擦学

Tribology for Aero-Gas Turbine Engines

沈心敏 刘雨川 马 纲 著



北京航空航天大学出版社

内容简介

航空燃气轮机摩擦学

Tribology for Aero-Gas Turbine Engines

沈心敏 刘雨川 马 纲 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书既结合了航空燃气轮机的工作特点,又结合了有关科学研究和教学实践;既注意到典型应用的前沿进展,又注意到理论基础的传承延伸。理论基础部分(第1~5章),着重介绍了现代摩擦学中的流体膜润滑力学的建立雷诺方程这一技术科学;典型应用部分(第6~12章),介绍了转子系统的典型摩擦学零组件的设计分析,特别是其流体动密封的设计分析。

本书主要为有关的设计研究人员、硕士及博士研究生和高校教师提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空燃气轮机摩擦学/沈心敏,刘雨川,马纲著. —北京:北京航空航天大学出版社,2008.10

ISBN 978-7-81124-284-3

I. 航… II. ①沈…②刘…③马… III. 航空发动机:燃气轮机—摩擦—理论 IV. V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 142516 号

航空燃气轮机摩擦学

沈心敏 刘雨川 马 纲 著

责任编辑 蔡 喆

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpess@263.net

北京市松源印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:850×1168 1/32 印张:11.25 字数:302千字

2008年10月第1版 2008年10月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-81124-284-3 定价:28.00元

Brief introduction of contents

This book is Combined with both the working features of aero-gas turbine engines and the achievements of the concerned scientific researches and teaching studies.

This book pays close attentions to the frontier advances in typical applications as well as the developing uses of theoretical fundamentals. As to the theoretical fundamentals(Chapters 1~5), one kind of technology-sciences, id est the fluid film lubrication mechanics in modern tribology which are the establishment and the solving process of the theory of Reynolds lubrication, are emphatically introduced. As to typical applications (Chapters 6~12), the design analysis of typical tribology parts and packages of rotor system, especially those fluid dynamic sealings which affect notably the work performances of the entire engine, are introduced.

This book is offered to the related designers, researchers, teachers and students for reference.

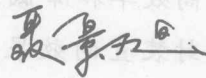
序

航空燃气涡轮发动机结构的最大特征是内部有高速旋转的转子,一般为两个转子,使高速流过的气流增压、喷油燃烧、做功。因此在转子与静子之间必须有气流密封装置以防漏气;还要有支承转子的轴承以防磨损,有传动齿轮以传动力并耐磨损,而且因要润滑冷却它们必然有滑油的密封装置;在叶片、转子等的减振措施中,一般采用摩擦阻尼技术。由此可见,在航空燃气涡轮发动机的结构中,存在着大量的属于摩擦学的组件和装置。

气流密封装置在航空燃气涡轮发动机中显得越来越重要,因为漏气就意味着损失。在提高发动机效率的研究中,十分重视提高气流密封效果。在当前技术水平下,气动设计和计算已达到相当完善的程度,要进一步改善以提高效率和降低发动机耗油率则相当困难,而提高气动密封装置的效果,来降低耗油率则存在着巨大潜力。因此,近年来对气动密封技术开展了一系列的研究,由接触式到非接触式的方案改进,并取得到了明显的效果。当然这不是容易做到的,因为摩擦组件间相对速度很大,压差大,环境温度高,当工作状态变化或有振动时摩擦组件间的配合性质就发生改变,会出现过度磨损或碰磨,因

而会引发故障;滑油密封装置也是在苛刻的环境下工作的,要求在各种状态的长期工作中不会漏油,否则将影响到使用安全;阻尼减振器,不仅有摩擦的问题,还与振动特性以及材料工艺技术密切相关。因此可以看出,在航空燃气涡轮发动机的结构中,有一系列的典型的摩擦组件,对提高航空发动机性能和可靠性,都起着重要作用;由于航空发动机的工作条件和要求的特点,在对其研究中不仅需要引入新技术,而且还迫切需要有这方面的研究总结和理论指导的书籍。

《航空燃气轮机摩擦学》正是适应这个要求,献给读者的一本好书,并填补了目前的空缺。该书从摩擦学的基础理论到典型的摩擦组件以及当前研究的前沿性问题等均做了较详细论述,很多内容均属作者的科研成果,是一本内容丰富,系统性强的专著。相信对航空发动机研究、设计、生产、维修和使用的科技人员以及相关专业的教师和研究生等都是很有帮助的。



2006.12.26

前 言

在航空燃气轮机转子系统中,集结了诸多的典型摩擦学零组件。它们的摩擦副既有低副又有高副,既有动压流体膜又有静压流体膜,既有不可压缩流又有可压缩流,既有完全流体膜又有部分流体膜及干摩擦的润滑状态。而它们除要经受“三高”工况条件,还要应对转子系统的剧烈振动和热力变形,这使其有关轴承和密封等摩擦副的润滑、摩擦和磨损问题常常成为了保持和提高整机性能的一个“瓶颈”。

这里的摩擦学挑战问题,既有来自摩擦副外部摩擦学系统的运转工况条件的宏观特殊性,又有来自摩擦副内部润滑、摩擦、磨损、材质乃至有关微观摩擦学的适应性。即有“系统宏观”和“副内微观”因素共同作用的宏微交错、宏微交织的宏微结合问题。诸如表现在航空燃气轮机转子系统的主轴滚动轴承和流体动密封等摩擦学零组件中。而且,面临挑战,攻克这类问题的竞争非常激烈,新的方案层出不穷。

由此可见,在航空燃气轮机转子系统中,现代摩擦学的理论和实践问题的内容十分丰富,挑战非常艰巨,又在与时俱进;同时,对于旨在通过有关摩擦学零组件的改进

设计以提高它的整机性能来说,也存在着巨大的潜力和机遇。例如,我国发动机气动专家意识到,“在当前技术水平下,在发动机设计上花很大力气作改进才可使发动的耗油率降低 $0.1\%\sim 0.2\%$;但是如果改进气封的设计,提高密封的效果,则不难使耗油率降低 $1\%\sim 2\%$ ”。那么,这将鼓励人们大力有效改进有关摩擦学零组件的挑战性设计问题。

这样,拟编著一本既有典型应用前沿的和前瞻性的设计研发问题的,又能为此提供应对的宽厚理论基础和现代设计方法的,且拟对实践中频繁遇到并千方百计追求的流体膜润滑力学这一技术科学作为主要内容的有关航空燃气轮机摩擦学专著,以供有关设计研究人员参考。现在所编著这本《航空燃气轮机摩擦学》,就是一本应运而生的献给有关设计研究人员以及硕士生、博士生、教师参考的这方面的专著;并借机诚恳盼望他们能提出宝贵的修改意见,以进一步改进,使它的内容也能与时俱进。

在本书中,刘雨川博士著写了第6章,并参著了第1、第2、第5章;马纲在职博士著写了第7章,并参著了第1、第2章;沈心敏除了主笔第1、第2、第5章以外,还著写了其余各章。

这里,我特别要感谢我的老师和同事陈燕生教授曾诲人不倦,多次给予的讨论和启益;感谢聂景旭教授欣然为本书作序;感谢陈光教授热情认真地对本书一些章节

所提出的宝贵修改意见；感谢王洪星教授、晏砺堂教授、毛谦德教授、鲁明山教授及李其汉教授曾经给予的热情帮助与支持。其次，还应该说的是，我之所以能够主持编著本书，不能忘记以往的一些同事和朋友所给予的有关讨论、帮助和支持；不能忘记长期以来所形成的以下三个理念及其实践的锤炼的主导作用——面向应用前沿，注重理论基础，勤恳求真敬业。

对本书可能出现的失误，由我负主要责任，并诚恳欢迎读者批评指正。

沈心敏

2006.12.20

主要符号

A	振幅, 功	N	牛(力的单位), 法向力
a	赫兹接触区短半轴	n	转速
B	阻尼器轴承参数	O_b	轴承中心
b	赫兹接触区长半轴	O_j	轴颈中心
C	可压缩性	P	单位宽度上载荷
c	比热, 轴承半径间隙, 常数	P	泊
D	轴承直径	p	压力(压强)
d	轴颈直径, 阻尼系数	p_a, p_0	环境压力, 大气压力
E	弹性模量	p_c	气穴压力
E'	综合弹性模量	p_m	平均压力
e	轴颈偏心距	p_s	供油压力
e_m	质量偏心距	Q	流量
F	力	q	单位宽度体积流量
f	摩擦系数	R	气体常数
g	重力加速度	R_b	轴承半径
h	润滑膜厚	Re	雷诺数
J	泛函, 热功当量	R_j	轴颈半径
k	刚度系数	r	轴颈半径, 半径
L	轴承宽度	S	轴承特性系数, 应力
L/D	径向轴承宽径比	s	秒
l	平均自由行程, 轴承宽度	T	温度
M	质量, 力矩	t	时间
m	质量	U	表面 x 向切向速度
N	法向力	u	流体 x 向局部速度

V	表面 y 向即法向速度	η	动力黏度系数, 坐标轴
v	流体 y 向局部速度, 比容	ϑ	温度
W	表面 z 向的切向速度, 轴上作用力	θ	角向坐标
ω	流体 z 向局部速度	λ	膜厚比
X	坐标轴, 单位质量外场力	ν	运动黏度, 泊松比
x	坐标轴	ξ	坐标轴
Y	坐标轴, 单位质量外场力	ρ	密度
y	坐标轴	σ	表面组合粗糙度标准差
Z	坐标轴, 单位质量外场力	σ_H	接触应力
z	坐标轴	σ_K	接触应力
α	压黏系数	σ_u	弯曲应力
β	温黏系数	τ	切应力
γ	角应变, 空气含量率	ϕ	偏位角
Δ	增量	ψ	轴承相对间隙
δ	转子无量纲转速	Ω	进动角速度
ϵ	轴颈偏心率, 小量	ω	轴的旋转角速度
ζ	坐标轴	ω_b	轴承角速度

目 录

上篇 理论基础

第1章 导 论	2
1.1 现代摩擦学的定义及其挑战问题	2
1.2 航空燃气轮机摩擦学概要	7
1.3 现代摩擦学的三个层次与本书内容	16
参考文献	19
第2章 雷诺方程的建立	21
2.1 雷诺方程的理论导出	21
2.1.1 流体膜滑块支承雷诺方程	23
2.1.2 流体膜曲面支承雷诺方程	25
2.1.3 挤压膜支承雷诺方程	26
2.2 不可压流雷诺方程及其实验验证	26
2.2.1 不可压流雷诺方程	26
2.2.2 有关实验验证	27
2.3 带有圆进动的雷诺方程	29
2.4 本章的研讨	32
参考文献	33
附录 2.1 流体的物理特性	35
附录 2.2 通过有效法向速度导出雷诺方程	42
附录 2.3 简化 N-S 方程和流速方程	48

附录 2.4 三点研讨拙见	52
第3章 流体膜润滑的典型解法	61
3.1 动压润滑性能的一维分析	61
3.1.1 无限短径向轴承稳(静)态性能	61
3.1.2 短轴承油膜刚度和阻尼系数	74
3.2 动压润滑性能二维计算	78
3.2.1 二维有限差分法	78
3.2.2 二维有限元素法	82
3.2.3 非圆轴承的间隙函数和雷诺方程	85
3.2.4 有限长轴承稳态性能	87
3.2.5 有限长轴承油膜刚度和阻尼系数计算	91
3.2.6 多油楔径向轴承刚度和阻尼系数	96
3.3 径向轴承稳定性分析的一个典型例子	98
参考文献	103
附录 3.1 几种解法的比较	103
附录 3.2 轴承无量纲性能图线和算例	106
附录 3.3 短轴承无量纲刚度和阻尼系数	112
第4章 特殊效应下的雷诺润滑理论	114
4.1 原雷诺方程物理简化假定	114
4.2 特殊效应下的雷诺润滑理论	115
4.3 特殊效应雷诺润滑理论的验证	121
参考文献	126
附录 4.1 线、点接触 EHL 膜厚方程	128
第5章 边界润滑、混合润滑与磨损	130
5.1 边界润滑	130
5.2 混合润滑的分析模型	137

5.3 边界润滑、混合润滑中的磨损	143
参考文献	145

下篇 典型应用

第6章 端面气膜密封特性设计分析	149
6.1 概 述	149
6.2 端面气膜密封的高性能端面结构	150
6.3 端面气膜密封动力特性系数的计算	156
6.4 气膜端面密封角向摆动自振稳定性	165
6.5 本章小结和研究预测	176
参考文献	178
附录 6.1 端面气膜密封修正准一维可压流分析	181
附录 6.2 端面流体膜密封角向摆动自振及其半频 特性的力学阐释	189
参考文献	193
第7章 柱面气膜密封特性设计分析	194
7.1 性能需求、工况特点和本章内容	194
7.2 研究进展和挑战问题	198
7.3 大柔性支承浮环柱面气膜密封的设计构想	208
7.4 设计分析和试验研究	210
参考文献	211
附录 7.1 第二流动(道)密封的涵义	213
参考文献	214
附录 7.2 柱面气膜密封系统的设计分析要点	214
第8章 刷密封设计分析	217
8.1 结构、应用和模型	217

8.2 轴对称纵轴面的设计分析	219
8.3 三维近完整模型的设计分析	225
参考文献	227
第9章 流体膜的阻尼与消振	229
9.1 概 述	229
9.2 流体膜的密封和阻尼器的雷诺方程	231
9.3 挤压油膜阻尼器的不平衡响应 设计分析	233
9.4 阻尼器的稳定性和瞬态响应分析	240
9.5 流体膜的消振	243
参考文献	251
附录 9.1 多孔质短轴承油膜环挤压膜雷诺方程	252
附录 9.2 油气二相流挤压膜雷诺方程	255
附录 9.3 二维压力分布的无量纲等效刚度和等效 阻尼系数	259
第10章 主轴滚动轴承的摩擦学设计	262
10.1 主轴滚动轴承的有关摩擦学设计概况	262
10.2 主轴滚动轴承的接触疲劳寿命计算	265
10.3 主轴滚动轴承的准动态分析	267
10.4 主轴滚动轴承的稳态热分析	272
10.5 主轴滚动轴承的结构设计研究集锦	274
参考文献	283
附录 10.1 FAG 航空轴承寿命算法的有关系数	284
附录 10.2 高速轴承寿命算法的有关系数	288
附录 10.3 对高速球轴承准动态分析结果的讨论	291

第11章 齿轮承载能力的摩擦学设计	294
11.1 齿轮失效形式和计算准则的概述	294
11.2 渐开线圆柱齿轮轮齿承载能力设计计算	297
11.3 航空齿轮的一些摩擦学设计对策	298
参考文献	299
附录 11.1 航空标准的圆柱齿轮轮齿承载能力的校核 计算	300
附录 11.2 航空发动机体内减速器传动齿轮轮齿 承载能力验算实例	301
附录 11.3 某航空发动机体内减速器的热 (温度物)分析	314
附录 11.4 高速重载薄盘齿轮节径型共振断裂	317
第12章 转子系统的干摩擦设计问题	319
12.1 干摩擦的基本特征	319
12.2 转、静件之间“环面碰摩”的干摩擦自振问题	324
12.3 干接触微动摩擦阻尼器	328
12.4 干摩擦下的磨损防护	329
参考文献	332
后 记	335

Contents

Upper part Fundamentals of Theory

Chapter 1 Introduction

- 1.1 Definition and challenges of modern tribology
 - 1.2 Outline of tribology for aero-gas turbine engines
 - 1.3 Three levels of modern tribology and contents of this book
- References

Chapter 2 Establishment of Reynolds Equations

- 2.1 Theoretical derivation for Reynolds equations
 - 2.1.1 Reynolds equation for fluid film slider supports
 - 2.1.2 Reynolds equation for fluid film curved surface supports
 - 2.1.3 Reynolds equation for squeeze film supports
- 2.2 Reynolds equations for incompressible fluid and experimental verifications
 - 2.2.1 Reynolds equation for incompressible fluid
 - 2.2.2 Related experimental verifications
- 2.3 Reynolds equations with circular precession
- 2.4 Discussions of this chapter

References

Appendix 2.1 Physical properties of fluid

Appendix 2.2 Derivation of Reynold equation using the ef-