

斛兵博士文丛

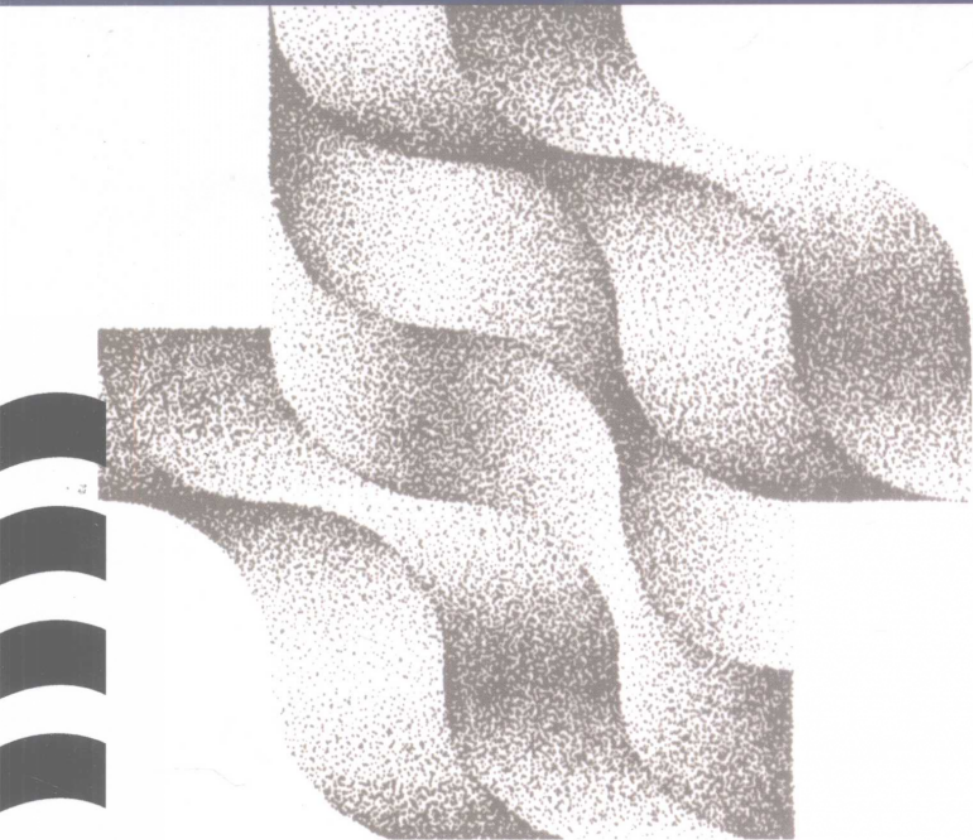
HUBING BOSHI WENCONG

合肥工业大学研究生科技创新基金资助出版

内燃机曲轴—轴承系统摩擦学、 刚度和强度的耦合分析

著 孙 军 ○ 导师 桂长林

合肥工业大学出版社



■ 策划编辑 马国锋
■ 责任编辑 章 建
■ 封面设计 陈新生

ISBN 978-7-81093-863-1



9 787810 938631 >

定价：28.00 元

合肥工业大学研究生科技创新基金资助出版

内燃机曲轴—轴承系统 摩擦学、刚度和强度的耦合分析

著 孙 军 导师 桂长林

合肥工业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

内燃机曲轴—轴承系统摩擦学、刚度和强度的耦合分析/孙军著. —合肥:
合肥工业大学出版社, 2008. 12

(斛兵博士文丛)

ISBN 978-7-81093-863-1

I. 内… II. 孙… III. ①内燃机—轴承—摩擦—理论 ②内燃机—
轴承—刚度—研究 ③内燃机—轴承—强度—研究 IV. TK403 TH117

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 195309 号

内燃机曲轴—轴承系统摩擦学、刚度和强度的耦合分析

孙 军 著 策划编辑 马国锋 责任编辑 章 建

| | | | |
|--------|------------------------|-----|---------------------|
| 出 版 | 合肥工业大学出版社 | 版 次 | 2008 年 12 月第 1 版 |
| 地 址 | 合肥市屯溪路 193 号 | 印 次 | 2008 年 12 月第 1 次印刷 |
| 邮 编 | 230009 | 开 本 | 710 毫米×1000 毫米 1/16 |
| 电 话 | 总编室:0551—2903038 | 印 张 | 11 |
| | 发行部:0551—2903198 | 字 数 | 168 千字 |
| 网 址 | www.hfutpress.com.cn | 印 刷 | 合肥现代印务有限公司 |
| E-mail | press@hfutpress.com.cn | 发 行 | 全国新华书店 |

ISBN 978-7-81093-863-1

定价: 28.00 元

如果有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行部联系调换。

《斛兵博士文丛》出版委员会学术委员会

主任委员：徐枏巍

副主任委员：陈心昭 赵 韩

委 员（按姓氏笔画为序）：

史铁钧 刘全坤 陈心昭

张崇巍 杨伯源 费业泰

赵 韩 钟玉海 徐枏巍

出版编辑委员会

主任委员：吴玉程 马国锋

委 员：朱 红 王其东 高 隼

孟宪余 王 磊 李军鹏

黄 飞 权 怡

出版说明

为贯彻教育部《关于实施研究生教育创新计划 加强研究生创新能力培养 进一步提高培养质量的若干意见》(教研〔2005〕1号)文件精神,培养研究生创新意识、创新能力,提高研究生培养质量,合肥工业大学设立了研究生科技创新基金,以支持和资助研究生的教育创新活动,为创新人才的成长创造条件。学校领导高度重视研究生教育创新,出版的《斛兵博士文丛》就是创新基金资助的项目之一。

《斛兵博士文丛》入选的博士学位论文是合肥工业大学2007年度部分优秀的博士学位论文。为提高学位论文的出版质量,《斛兵博士文丛》以注重创新为出版原则,充分展示我校博士研究生在基础与应用研究方面的成绩。

《斛兵博士文丛》的出版,得到了校学位委员会、学术委员会和有关专家的大力支持,也得到了研究生导师和研究生的热情支持,我们谨此表示感谢,希望今后能继续得到他们的支持与帮助。

我们力求把这项工作做好,但由于学识水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者给予批评指正。

合肥工业大学研究生学位论文出版编辑委员会

2008年12月

总 序

当今世界科学技术突飞猛进，知识经济飞速发展，以经济和科技为基础的综合国力的竞争日趋激烈。而科技的竞争、经济的竞争乃至综合国力的竞争，归根结底是人才的竞争。面对新的形势、新的要求，党中央先后作出了实施“科教兴国”、“人才强国”战略和走自主创新道路，建设创新型国家的重大决策。胡锦涛同志在党的十七大报告中又提出，建设人力资源强国和创新型国家是我国全面夺取建设小康社会新胜利的两大新目标。高等学校是国家创新体系的重要组成部分，肩负着培养自主创新型人才的历史使命。研究生教育处于高等教育的最高层次，是国家培养高层次创新型人才的主要渠道。研究生，特别是博士研究生的科研工作，一般处于本学科的前沿，具有一定的创造性。为鼓励广大研究生，特别是博士研究生选择具有重大意义的科技前沿课题进行研究，进一步提高研究生的创新意识、创新精神、创新能力，激励、调动我校博士研究生及其指导教师进一步重视提高博士学位论文质量和争创优秀博士学位论文的主动性和积极性，展示我校博士研究生的学术水平，为他们的尽快成才搭建平台，学校经过精心策划，编辑出版了《斛兵博士文丛》。

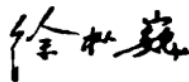
此次入选《斛兵博士文丛》的论著，均为2007年毕业并获得博士学位的博士研究生学位论文，是在广泛动员、严格把关的基础上，根据质量第一、公平公开、规范评审的原则认真遴选出来的。同时这些论著注重坚持基础研究与应用研究并举，是兼顾

理论价值与实践意义的最新研究成果。可以说，这套《斛兵博士文丛》（第二卷）虽然也可能有这样或那样的不足，但基本反映了我校博士研究生所具有的坚实的理论基础、系统的专门知识，以及较高的学术造诣和分析能力；体现了他们崇尚学术、追求真理、勇于创新的科学精神，实事求是、严谨认真的治学态度，不断进取、追求卓越的学术品格；展现了我校“勤奋、严谨、求实、创新”的校风学风。

建校 63 年来，学校充分发挥人才培养、科学研究和服务社会的功能，为国家和社会培养了一大批杰出人才，一代又一代的莘莘学子在这里勤奋耕耘、茁壮成长。出版《斛兵博士文丛》也是我校实施研究生教育创新工程、培养研究生创新精神、提高研究生创新能力的一个重要举措。合肥工业大学经过 63 年的建设和发展，逐步形成自身的办学特色，也取得许多令人瞩目的成就。我们正在不断改善办学条件，逐步完善相关政策，营造有利于高层次创新型人才尽快成长的良好环境，确保学校多出人才、快出人才、出好人才。

我衷心希望广大研究生特别是博士研究生，发扬我校优良的传统、校风、学风，在合肥工业大学自由宽松、开放和谐、充满生机和活力的学术环境中奋发努力、锐意进取、勇于创新，通过自己的辛勤劳动和刻苦钻研写出更好的论文，为进一步提高我校的学术水平、科研创新能力和综合实力作出更大的贡献，努力把学校建设成为国内先进、国际知名的创新型高水平大学。

合肥工业大学校长
教授、博士生导师



二〇〇八年十一月

致 谢

本书的研究工作得到了桂长林教授的悉心指导,在此向桂老师表示深深的感谢和敬意!

感谢李志远教授在试验工作等方面给予了具体指导和帮助!

感谢其他老师和同事给予的帮助和合作!

感谢国家自然科学基金委员会资助的项目“内燃机曲轴—轴承系统摩擦学、动力学和强度刚度耦合研究”(50175023)对本书研究工作的经费支持!

感谢全柴动力股份有限公司提供的相关资料!

谨以本书献给我的家人,谢谢你们的全力支持与鼓励!

孙 军

2008 年 11 月

内 容 简 介

本书首先针对各种机械装置使用最普遍、最基本的直轴—轴承系统开展了摩擦学、刚度和强度耦合的理论和试验研究。在此基础上,进行了内燃机曲轴—轴承系统摩擦学、刚度和强度的耦合研究。

在推导轴颈在轴承中倾斜时的油膜厚度方程和建立计算轴承孔表面弹性变形的变形矩阵的基础上,计算了轴颈倾斜时径向滑动轴承的油膜压力、油膜反力、端泄流量、摩擦力与摩擦系数和保持轴承稳定工作的力矩等特性参数,通过与不计轴颈倾斜情况的对比,分析了在不同轴承参数下轴颈倾斜对轴承性能的影响,探讨了径向滑动轴承计及轴颈倾斜影响在理论分析上的意义。

建立了轴受载变形导致轴颈在轴承中倾斜的倾斜角计算公式、Reynolds方程和分析方法,探讨了轴受载变形导致轴颈在轴承中倾斜对滑动轴承润滑性能的影响。根据轴承润滑分析结果,确定载荷边界条件,应用有限元方法研究了轴承油膜压力分布形态对轴应力的影响。

研制了研究直轴—轴承系统中轴承润滑性能的专用试验装置,对轴受大小恒定的旋转载荷作用产生变形导致轴颈在轴承中倾斜时滑动轴承的润滑性能进行了试验研究。比较了试验与理论计算结果,以验证理论分析中采用的基本方程、公式和方法的正确性。

分析讨论了多缸内燃机曲轴轴承负荷和曲轴变形的计算方法,提出了简单、省时、精度满足要求的整体曲轴梁单元有限元计算方法。根据整体曲轴梁单元有限元法计算的轴承负荷和曲轴变形,重点进行了计入曲轴受实际载荷作用产生变形导致轴颈倾斜的曲轴轴承润滑分析。

计算了几种不同形式载荷边界条件时的曲轴应力,分析了载荷边界条件的处理方法对曲轴强度计算结果的影响程度。

Q 内燃机曲轴—轴承系统摩擦学、刚度和强度的耦合分析

采用整体曲轴模型有限元分析方法,分别以计及和不计曲轴受载变形导致轴颈在轴承中倾斜时的轴承润滑分析得到的轴承油膜压力分布作为载荷边界条件,计算分析了轴承油膜压力的分布状态对曲轴应力分布和强度的影响。

创新点:针对国内外在内燃机曲轴—轴承系统设计分析计算方面的实际,根据学科交叉分析各种机械行为的理念,研究了内燃机曲轴强度、刚度与轴承摩擦学之间的相互作用与影响,使曲轴强度和轴承摩擦学性能的研究更加全面、系统,分析计算的结果更接近于实际。轴—轴承系统是各种机械装置中使用最普遍、最基本的支承—传动系统,因此本书提出的轴—轴承系统摩擦学、强度和刚度等机械行为的耦合效应,耦合分析方法具有普遍、深入研究的科学意义和工程应用价值。研制了直轴—轴承系统中轴承润滑性能研究的专用试验装置,进行了轴受载变形产生的轴颈倾斜对滑动轴承性能影响的试验研究。提出了计算多缸内燃机主轴承负荷和曲轴变形的整体曲轴梁单元有限元方法、内燃机曲轴—轴承系统中曲轴受载变形导致轴颈倾斜情况下的轴承润滑性能分析方法和轴承油膜压力的分布状态对曲轴强度影响的分析方法。

PREFACE

First, the coupling of tribology, stiffness and strength of shaft-bearing system which is one of the most general and essential parts of support-transmission system in various mechanical devices was studied theoretically and experimentally. Then, the coupling of tribology, stiffness and strength of crankshaft-bearing system for internal combustion engine was studied.

The film pressure, load-carrying capacity, leakage flow-rate, friction coefficient and misalignment moment of a misaligned journal bearing were calculated based on established film thickness expression of misaligned journal bearing and deformation matrix which is used to calculate elastic deformation of bearing surface. The effect of journal misalignment on the performance of bearing in different parameters was analyzed and the theoretical significance of considering the effect of journal misalignment in analyzing journal bearing was discussed by comparing with aligned journal bearing.

The calculating expression of misalignment angle, Reynolds equation and analytical method of misaligned journal bearing caused by shaft deformation under load were established, and the effect of journal misalignment on the performance of journal bearing was discussed. The effect of distribution status of film pressure of journal bearing on shaft stress was studied by finite element method on condition that the boundary condition of load is made by lubrication analysis of journal bearing.

A special test-bed was developed in order to study the lubrication performance of journal bearing in shaft-bearing system. The lubrication per-

formances of journal bearing when journal misalignment in bearing is resulted from bend deformation of shaft under constant rotational load were studied experimentally. The results of experiment were compared with those of theoretical calculation in order to validate the essential equations, expressions and method used in theoretical analysis.

The methods to calculate the load on crankshaft bearing and deformation of crankshaft for multi-cylinder internal combustion engine were discussed. A whole crankshaft beam element FE method was put forward, which can calculate the load on crankshaft bearing and deformation of crankshaft simply, quickly and accurately. The lubrication performances of crankshaft bearing considering journal misalignment caused by crankshaft deformation under actual load were analyzed emphatically according to the load on crankshaft bearing and deformation of crankshaft calculated by whole crankshaft beam element FE method.

The crankshaft stress under several different load boundary conditions was calculated. The effect of method dealing with load boundary condition on the calculating results of crankshaft strength was analyzed.

The effects of film pressure distribution of journal bearing on the stress distribution and strength of crankshaft were calculated by whole crankshaft model FE method when film pressure distributions of journal bearing which are obtained by lubrication analysis of bearing considering and not considering journal misalignment caused by crankshaft deformation under load were used as load boundary condition.

Innovative Points: On account of inland and outland fact in designing, analyzing and calculating crankshaft-bearing system of internal combustion engine, the interactions between strength and stiffness of crankshaft and bearing tribology for internal combustion engine were studied based on the thought of analyzing various mechanical behaviors by subject intercross, so the strength of crankshaft and the tribological performance of bearing can be studied more comprehensively and systematically and the analytical re-

sults are close to factual circumstances more. Shaft-bearing system is the most general and essential support-transmission system used in various mechanical devices, therefore the coupling effect and analyzing method about tribology, strength and stiffness etc mechanical behaviors of shaft-bearing system put forward by this book are of great scientific significance and engineering application value to study generally and deeply. The special tested to study lubrication performance of bearing in shaft-bearing system was developed, and the experimental researches on lubrication performance of journal bearing when journal misalignment in bearing is resulted from bend deformation of shaft on which load is acted were made. The whole crankshaft beam-element finite element method to calculate main bearing load and crankshaft deformation of multi-cylinder internal combustion engine, the analyzing method to calculate the lubrication performance of bearing when journal misalignment is resulted from the deformation of crankshaft in crankshaft-bearing system for internal combustion engine and the analyzing method to study the effect of distribution status of lubricant film pressure of bearing on crankshaft strength were put forward.

符号清单

| | |
|------------|--|
| B_{oil} | 主轴承油槽宽度 |
| E | 材料弹性模量 |
| F | 油膜反力 |
| F_j | 轴颈表面摩擦力 |
| J | 轴截面惯性矩 |
| L_{ij}^n | 作用在节点 $i j$ 处的单位油膜压力使节点 $r s$ 产生的径向变形量 |
| K_d | 连杆旋转质量产生的离心力 |
| L | 轴承宽度 |
| L_l | 连杆轴承宽度 |
| L_z | 主轴承宽度 |
| M | 作用在轴承上的力矩 |
| P | 轴载荷, 活塞组件和连杆小头的往复惯性力合力 |
| P_l | 连杆力 |
| P_p | 连杆轴承负荷 |
| P_q | 曲柄销负荷 |
| P_z | 主轴颈负荷 |
| Q | 轴承端泄流量 |
| Q_1, Q_2 | 轴承前端面和后端面的润滑油流量 |
| R | 轴承半径 |
| R_a | 轴瓦表面粗糙度 |
| R_j | 轴颈半径 |
| R_l | 连杆轴承半径 |
| R_z | 主轴承半径 |

Q 内燃机曲轴—轴承系统摩擦学、刚度和强度的耦合分析

| | |
|------------|------------------------|
| T_{ave} | 油膜平均温度 |
| U | 轴颈表面沿圆周切向的速度 |
| c | 轴承半径间隙 |
| d | 轴直径 |
| e | 偏心距 |
| e_0 | 轴承中央截面上的偏心距 |
| e' | 轴承两端面之间的轴颈轴线在轴承轴向的投影长度 |
| f_1 | 轴颈重叠度影响系数 |
| f_2 | 曲柄宽度影响系数 |
| f_3 | 轴颈空心度影响系数 |
| f_4 | 曲柄销减重孔偏心距影响系数 |
| f_5 | 减重孔边距影响系数 |
| h | 油膜厚度 |
| h_0 | 不计轴承孔表面变形的油膜厚度 |
| h_{min} | 轴承最小油膜厚度 |
| k_σ | 应力集中系数 |
| l | 轴长 |
| m_l | 连杆轴颈质量 |
| m_z | 主轴颈质量 |
| n | 转速 |
| p | 油膜压力 |
| p_0 | 进油压力 |
| p_{ij} | 作用在节点 i, j 处的油膜压力 |
| p_{max} | 最大油膜压力 |
| q_σ | 材料应力集中敏感系数 |
| u_b | 轴承表面的速度 |
| u_j | 轴颈表面的速度 |
| v | 轴颈表面沿轴向的速度 |
| y | 轴向坐标 |
| Φ | 油膜反力方向角 |

| | |
|----------------------|-------------------------------|
| Φ_M | 作用在轴承上的力矩方向角 |
| α | 曲轴转角,轴颈后端中心线投影与偏心距向量之间的夹角 |
| α_σ | 形状系数 |
| $\alpha_{\sigma(1)}$ | 标准曲轴的形状系数 |
| β | 表面工艺影响系数 |
| γ | 轴颈倾斜角 |
| δ | 油膜压力作用在轴承孔表面产生的弹性变形引起的油膜厚度变化量 |
| ε | 轴承偏心率,尺寸系数 |
| ε_0 | 轴承中央截面上的偏心率 |
| η | 润滑剂粘度 |
| θ | 角坐标 |
| θ_1, θ_2 | 压力油膜起始角和结束(破裂)角 |
| μ_j | 轴颈表面的摩擦系数 |
| σ_{-1} | 材料的对称循环疲劳极限 |
| σ_{da} | 当量应力循环的应力幅 |
| σ_{dm} | 当量应力循环的平均应力 |
| $\sigma_{d\max}$ | 当量应力的最大值 |
| $\sigma_{d\min}$ | 当量应力的最小值 |
| ψ | 相对间隙 |
| ψ_0 | 轴承中央截面上轴承与轴颈中心的连线与 z 轴之间的夹角 |
| ψ_σ | 平均应力影响系数 |
| ω_b | 轴承旋转角速度 |
| ω_j | 轴颈旋转角速度 |
| ω_L | 旋转载荷的角速度 |