

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十五”国家重点出版规划

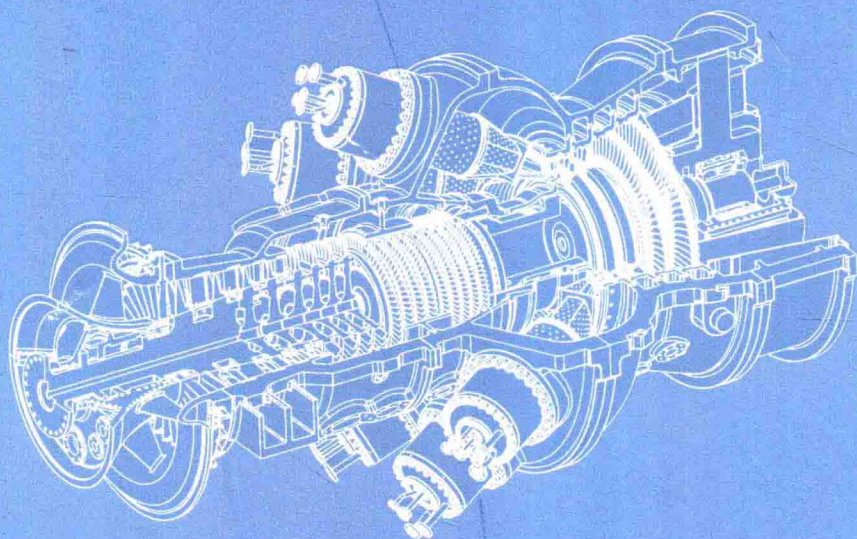
先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

轴承转子系统动力学 ——应用篇

(下册)

虞烈 刘恒 王为民 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

“十二五”国家重点出版规划

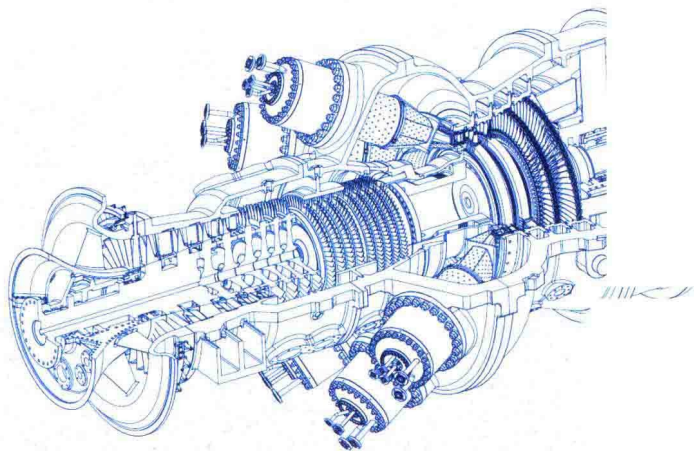


先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

轴承转子系统动力学 ——应用篇 (下册)

虞烈 刘恒 王为民 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书较为系统地介绍了轴承转子系统动力学的基础理论、分析方法及其在工程中的应用案例,分为基础篇和应用篇上、下两册。基础篇主要内容是关于轴承转子系统动力学基础理论与分析方法的介绍;应用篇则主要涵盖了对于三大类机组亦即多平行轴压缩机机组、大型汽轮发电机组以及重型燃气轮机组合转子系统动力学的研究进展。

本书可作为高等院校机械、力学类教材使用,也可供从事轴承转子系统动力学研究的专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

轴承转子系统动力学. 下册,应用篇/虞烈,刘恒,王为民著. —西安:
西安交通大学出版社,2016.12
(先进燃气轮机设计制造基础专著系列/王铁军主编)
ISBN 978-7-5605-9432-3

I. ①轴… II. ①虞… ②刘… ③王… III. ①燃气轮机—轴承—
转子动力学 IV. ①TK474.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 034807 号

书 名 轴承转子系统动力学——应用篇(下册)
著 者 虞 烈 刘 恒 王为民
责任编辑 任振国 季苏平

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 中煤地西安地图制印有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 22.25 彩页 4 字数 465千字
版次印次 2016 年 12 月第 1 版 2016 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-9432-3
定 价 200.00 元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82669097 QQ:8377981

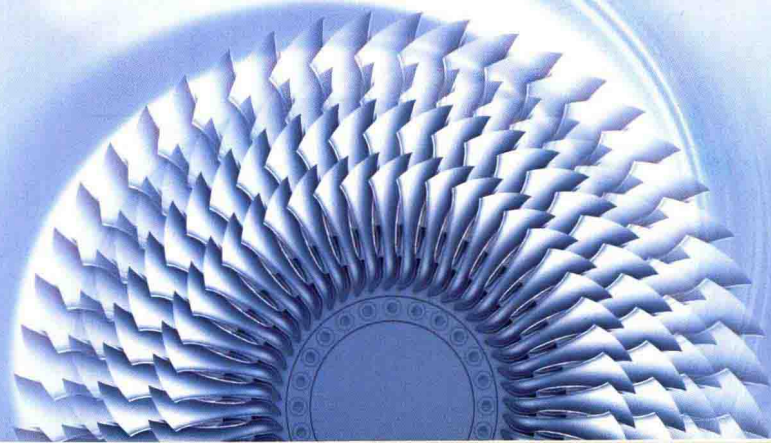
读者信箱:lg_book@163.com

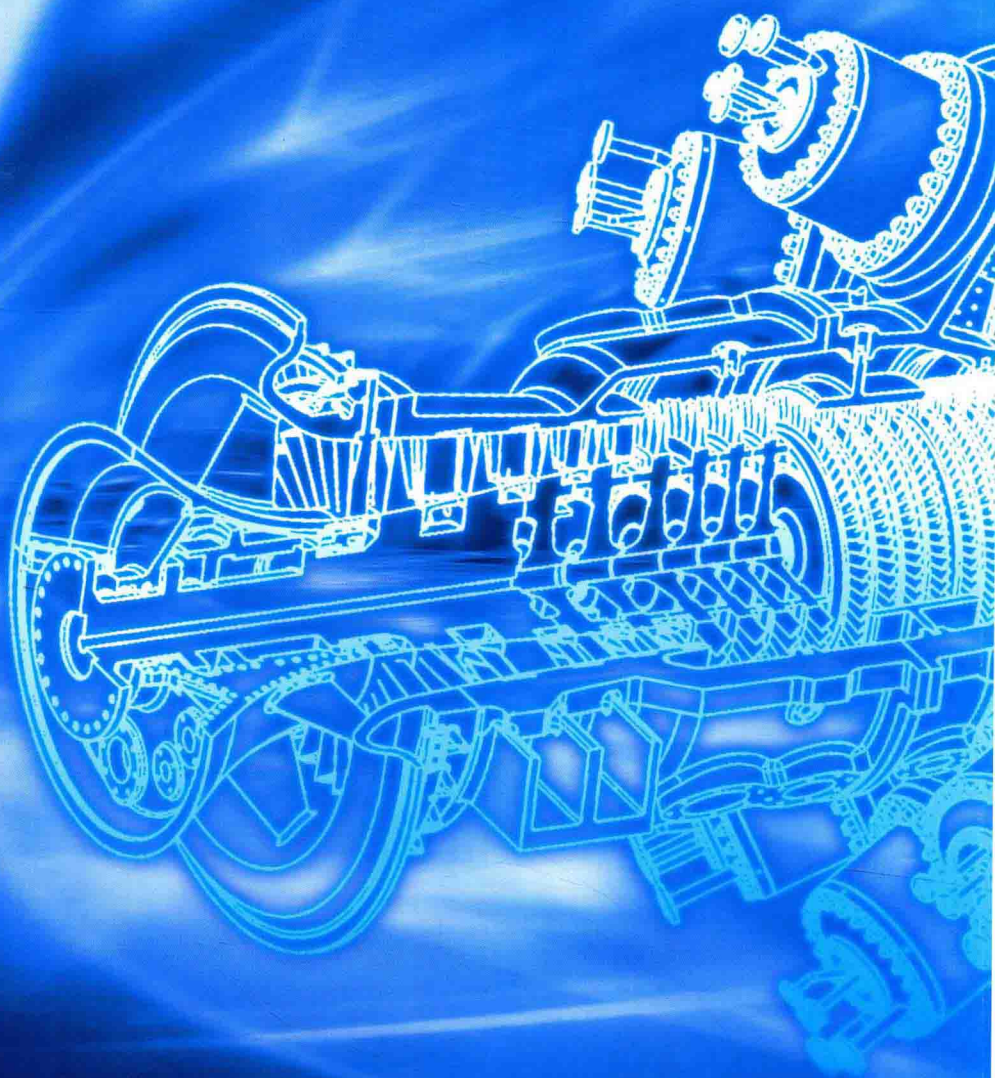
版权所有 侵权必究



“十二五”国家重点出版规划

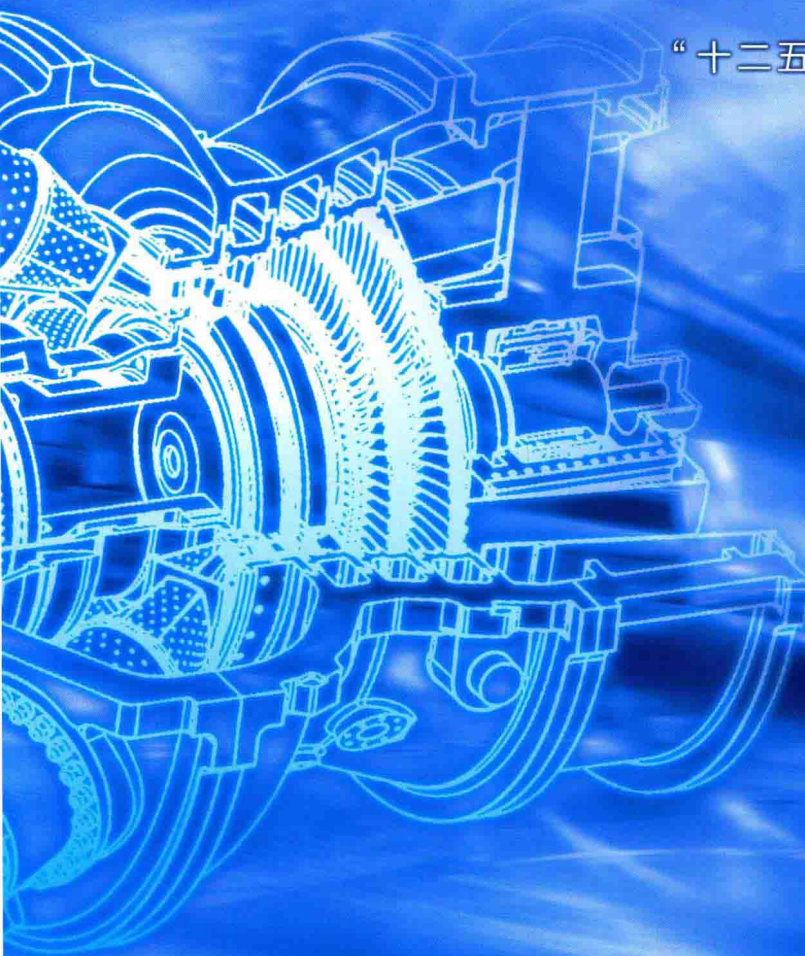
先进燃气轮机设计制造基础专著系列







“十二五”国家重点出版规划







国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版规划

先进燃气轮机设计制造基础专著系列

编委会

顾问

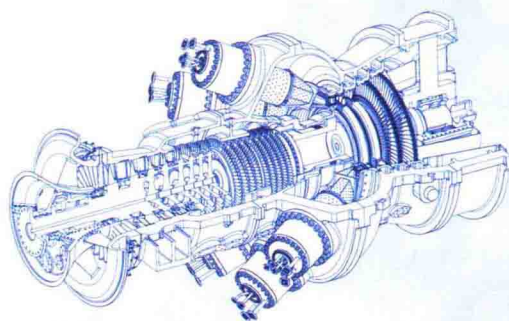
- 钟 掘 中南大学教授、中国工程院院士
程耿东 大连理工大学教授、中国科学院院士
熊有伦 华中科技大学教授、中国科学院院士
卢秉恒 西安交通大学教授、中国工程院院士
方岱宁 北京理工大学教授、中国科学院院士
雒建斌 清华大学教授、中国科学院院士
温熙森 国防科技大学教授
雷源忠 国家自然科学基金委员会研究员
姜澄宇 西北工业大学教授
虞 烈 西安交通大学教授
魏悦广 北京大学教授
王为民 东方电气集团中央研究院研究员

主编

- 王铁军 西安交通大学教授

编委

- 虞 烈 西安交通大学教授
朱惠人 西北工业大学教授
李涤尘 西安交通大学教授
王建录 东方电气集团东方汽轮机有限公司高级工程师
徐自力 西安交通大学教授
李 军 西安交通大学教授



总序

20 世纪中叶以来,燃气轮机为现代航空动力奠定了基础。随后,燃气轮机也被世界发达国家广泛用于舰船、坦克等运载工具的先进动力装置。燃气轮机在石油、化工、冶金等领域也得到了重要应用,并逐步进入发电领域,现已成为清洁高效火电能源系统的核心动力装备之一。

发电用燃气轮机占世界燃气轮机市场的绝大部分。燃气轮机电站的特点是,供电效率远远超过传统燃煤电站,清洁、占地少、用水少,启动迅速,比投资小,建设周期短,是未来火电系统的重要发展方向之一,是国家电力系统安全的重要保证。对远海油气开发、分布式供电等,燃气轮机发电可大有作为。

燃气轮机是需要多学科推动的国家战略高技术,是国家重大装备制造水平的标志,被誉为制造业王冠上的明珠。长期以来,世界发达国家均投巨资,在国家层面设立各类计划,研究燃气轮机基础理论,发展燃气轮机新技术,不断提高燃气轮机的性能和效率。目前,世界重型燃气轮机技术已发展到很高水平,其先进性主要体现在以下三个方面:一是单机功率达到 30 万千瓦至 45 万千瓦,二是透平前燃气温度达到 $1600\sim 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$,三是联合循环效率超过 60%。

从燃气轮机的发展历程来看,透平前燃气温度代表了燃气轮机的技术水平,人们一直在不断追求燃气温度的提高,这对高温透平叶片的强度、设计和制造提出了严峻挑战。目前,有以下几个途径:一是开发更高承温能力的高温合金叶片材料,但成本高、周期长;二是发展先

进热障涂层技术,相比较而言,成本低,效果好;三是制备单晶或定向晶叶片,但难度大,成品率低;四是发展先进冷却技术,这会增加叶片结构的复杂性,从而大大提高制造成本。

整体而言,重型燃气轮机研发需要着重解决以下几个核心技术问题:先进冷却技术、先进热障涂层技术、定(单)向晶高温叶片精密制造技术、高温高负荷高效透平技术、高温低 NO_x 排放燃烧室技术、高压高效先进压气机技术。前四个核心技术属于高温透平部分,占了先进重型燃气轮机设计制造核心技术的三分之二,其中高温叶片的高效冷却与热障是先进重型燃气轮机研发所必须解决的瓶颈问题,大型复杂高温叶片的精确成型制造属于世界难题,这三个核心技术是先进重型燃气轮机自主研发的基础。高温燃烧室技术主要包括燃烧室冷却与设计、低 NO_x 排放与高效燃烧理论、燃烧室自激热声振荡及控制等。高压高效先进压气机技术的突破点在于大流量、高压比、宽工况运行条件的压气机设计。重型燃气轮机制造之所以被誉为制造业皇冠上的明珠,不仅仅由于其高新技术密集,而且在于其每一项技术的突破与创新都必须经历“基础理论→单元技术→零部件试验→系统集成→样机综合验证→产品应用”全过程,可见试验验证能力也是重型燃气轮机自主能力的重要标志。

我国燃气轮机研发始于上世纪 50 年代,与国际先进水平相比尚有较大差距。改革开放以来,我国重型燃气轮机研发有了长足发展,逐步走上了自主创新之路。“十五”期间,通过国家高技术研究发展计划,支持了 E 级燃气轮机重大专项,并形成了 F 级重型燃气轮机制造能力。“十一五”以来,国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020 年),将重型燃气轮机等清洁高效能源装备的研发列入优先主题,并通过国家重点基础研究发展计划,支持了重型燃气轮机制造基础和热功转换研究。

2006 年以来,我们承担了“大型动力装备制造基础研究”,这是我国重型燃气轮机制造基础研究的第一个国家重点基础研究发展计划

项目,本人有幸担任了项目首席科学家。以 F 级重型燃气轮机制造为背景,重点研究高温透平叶片的气膜冷却机理、热障涂层技术、定向晶叶片成型技术、叶片冷却孔及榫头的精密加工技术、大型盘式拉杆转子系统动力学与实验系统等问题,2011 年项目结题优秀。2012 年,“先进重型燃气轮机制造基础研究”项目得到了国家重点基础研究发展计划的持续支持,以国际先进的 J 级重型燃气轮机制造为背景,研究面向更严酷服役环境的大型高温叶片设计制造基础和实验系统、大型拉杆组合转子的设计与性能退化规律。

这两个国家重点基础研究发展计划项目实施十年来,得到了二十多位国家重点基础研究发展计划顾问专家组专家、领域咨询专家组专家和项目专家组专家的大力支持、指导和无私帮助。项目组共同努力,校企协同创新,将基础理论研究融入企业实践,在重型燃气轮机高温透平叶片的冷却机理与冷却结构设计、热障涂层制备与强度理论、大型复杂高温叶片精确成型与精密加工、透平密封技术、大型盘式拉杆转子系统动力学、重型燃气轮机实验系统建设等方面取得了可喜进展。我们拟通过本套专著来总结十余年来的研究成果。

第 1 卷:高温透平叶片的传热与冷却。主要包括:高温透平叶片的传热及冷却原理,内部冷却结构与流动换热,表面流动传热与气膜冷却,叶片冷却结构与热分析,相关的计算方法与实验技术等。

第 2 卷:热障涂层强度理论与检测技术。主要包括:热障涂层中的热应力和生长应力,表面与界面裂纹及其竞争,层级热障涂层系统中的裂纹,外来物和陶瓷层烧结诱发的热障涂层失效,涂层强度评价与无损检测方法。

第 3 卷:高温透平叶片增材制造技术。重点介绍高温透平叶片制造的 3D 打印方法,主要包括:基于光固化原型的空心叶片内外结构一体化铸型制造方法和激光直接成型方法。

第 4 卷:高温透平叶片精密加工与检测技术。主要包括:空

心透平叶片多工序精密加工的精确定位原理及夹具设计,冷却孔激光复合加工方法,切削液与加工质量,叶片型面与装配精度检测方法等。

第5卷:热力透平密封技术。主要包括:热力透平非接触式迷宫密封和蜂窝/孔形/袋形阻尼密封技术,接触式刷式密封技术相关的流动,传热和转子动力特性理论分析,数值模拟和实验方法。

第6卷:轴承转子系统动力学(上、下册)。上册为基础篇,主要包括经典转子动力学及一些新进展。下册为应用篇,主要包括大型发电机组轴系动力学,重型燃气轮机组转子中的接触界面,预紧饱和状态下的基本解系和动力学分析方法,结构强度与设计准则等。

第7卷:叶片结构强度与振动。主要包括:重型燃气轮机压气机叶片和高温透平叶片的强度与振动分析方法及实例,减振技术,静动频测量方法及试验模态分析。

希望本套专著能为我国燃气轮机的发展提供借鉴,能为从事重型燃气轮机和航空发动机领域的技术人员、专家学者等提供参考。本套专著也可供相关专业人员及高等院校研究生参考。

本套专著得到了国家出版基金和国家重点基础研究发展计划的支持,在撰写、编辑及出版过程中,得到许多专家学者的无私帮助,在此表示感谢。特别感谢西安交通大学出版社给予的重视和支持,以及相关人员付出的辛勤劳动。

鉴于作者水平有限,缺点和错误在所难免。敬请广大读者不吝赐教。

《先进燃气轮机设计制造基础》专著系列主编
机械结构强度与振动国家重点实验室主任

王铁军

2016年9月6日于西安交通大学

序 言

旋转机械在能源电力、交通、石油化工、军工生产及空间技术中占有极其重要的地位,也是国民经济支柱产业的关键高端装备。

有别于其他工程机械的最大特点是:在旋转机械中,转子与其他不动件之间是依赖小间隙约束而构成完整系统的。机组的失效也总是最先表现在这类小间隙约束的破坏与失效方面,而机组振动则是导致小间隙约束破坏的直接原因。因此在旋转机械发展的整个历史进程中,如何保证转子系统在小间隙约束条件下具有优良的动力学品质这一命题始终是学术界和工程界关注的焦点。轴承转子系统动力学就是这样一门研究在各种小间隙激励因素作用下转子系统动力学行为的科学。

本书是在参阅了国内外大量研究文献,以及总结我和我的同事们在本领域内数十年科学研究成果的基础上完成的。全书内容一部分是在 2001 年出版的同名研究生教材基础上修改而成的;增加和扩展部分则总结了作者在本领域内十余年来新的研究成果。与 2001 年出版的同名教材相比,在内容深度和广度上都大为拓展了。

全书共 16 章,分为基础篇(上册)和应用篇(下册)。基础篇主要内容是关于轴承转子系统动力学基础理论、分析方法的介绍;应用篇则主要涵盖了对于三大类机组亦即多平行轴压缩机机组、大型汽轮发电机组以及重型燃气轮机组合转子系统动力学的研究进展。书中第 6、第 16 章由刘恒教授撰写;第 3、第 12~14 章由王为民博士撰写;第 4、第 10、第 15 章分别取材于贾妍博士、李明博士和张明书博士的博士论文;其余章节以及全书的定稿由虞烈完成。

贯穿本书的主导思想是:与单一零部件相比,旋转机械的动力学行为在更大程度上取决于系统,这里所说的系统是指包括转子、支承、密封等在内的集成;另外一个需要充分关注的是关于系统的复杂性研究和非线性研究,随着现代机电系统的日趋复杂化,它们将成为二十一世纪科学研究的重要

内容。

自然界的规律是客观存在的。同样,知识也是有生命的——人类在认识自然规律过程中以往所获得的正确认知,岁月的更替令它们常新不再,但并不消亡。这些知识作为人类文明的一部分被传承下去,并随着科学技术的进步不断地深化、丰富与发展,永无穷尽。这也许正是广大科学工作者愿意为之奉献毕生的真正动力与原因。

特别感谢国家重点基础研究发展计划和国家自然科学基金历年来所给予的资助。特别感谢国家科学技术学术著作出版基金委员会对本书出版的资助。

特别感谢景敏卿教授、周健高级工程师、孙岩桦副教授、耿海鹏博士、戚社苗博士、李辉光博士、杨利花副教授和研究所同仁在工作中所给予的长期支持和帮助。

感谢所有曾经与我共同工作过的硕士和博士们,他们的聪明才智和卓有成效的工作令我受益良多。

感谢所有的朋友与亲人们!

因学识有限,谬误难免,尚望大家不吝赐教。

虞 烈

西安交通大学机械电子及信息系统研究所

机械结构强度与振动国家重点实验室

2016年6月9日于西安

目 录

第 9 章 复杂转子系统的固有振动和强迫振动响应/1

9.1 轴承转子系统的固有振动分析/1

9.1.1 邓柯莱法/1

9.1.2 经典瑞利法/3

9.1.3 复模态分析及广义瑞利法/3

9.1.4 广义逆迭代法/6

9.2 转子系统的灵敏度分析/9

9.3 转子系统强迫振动响应求解方法/12

9.3.1 振型叠加法/12

9.3.2 直接求解法/13

9.3.3 传递矩阵法/13

9.4 可倾瓦轴承支承的单跨多质量转子系统/22

9.4.1 系统稳定性分析/22

9.4.2 系统灵敏度分析/25

参考文献/33

第 10 章 齿轮传动的多平行轴转子系统/35

10.1 齿轮传动的平行轴系统的一般处理方法/35

10.1.1 齿轮耦合模型/35

10.1.2 多圆盘转子的扭转振动/40

10.1.3 转子的弯扭复合振动/41

10.2 齿轮耦合的两平行轴转子系统/43

10.2.1 小扰动下的齿轮耦合几何关系/43

10.2.2 齿轮啮合过程中的力、力矩增量/44

- 10.2.3 两平行轴转子系统的动力学方程/56
- 10.3 齿轮耦合的多平行轴系统动力学分析/62
 - 10.3.1 多平行轴系统的模态分析/63
 - 10.3.2 多平行轴系统的强迫振动响应/71
- 参考文献/77

第 11 章 大型汽轮发电机组轴系动力学分析/80

- 11.1 大型汽轮发电机组轴系结构/81
- 11.2 多支承轴系动力学分析/88
 - 11.2.1 多支承轴系的负荷分配/89
 - 11.2.2 油膜刚度和阻尼对转子临界转速的影响/92
 - 11.2.3 单跨转子系统的稳定性/94
 - 11.2.4 多跨转子间的耦合效应/101
- 11.3 联轴器的耦合效应/106
 - 11.3.1 联轴器结构与力学模型/106
 - 11.3.2 刚性联轴器的耦合效应/107
 - 11.3.3 联轴器连接刚度的影响/109
- 11.4 径向滑动轴承对于轴系稳定性的贡献评估/112
- 11.5 不同轴承对于轴系稳定性的影响/115
- 参考文献/131

第 12 章 重型燃气轮机组组合转子中接触界面的力传递机制/132

- 12.1 引言/132
 - 12.1.1 重型燃气轮机发展概况/132
 - 12.1.2 重型燃气轮机轴承转子系统研究的相关问题/148
- 12.2 接触界面力传递模型评述/152
- 12.3 组合转子预紧饱和状态下力传递特性的精确表达/167
- 参考文献/169

第 13 章 组合转子预紧饱和状态下的基本解系和普适性动力学分析方法/175

- 13.1 预紧组合转子研究评述/175
- 13.2 分段预紧组合转子的挠曲变形方程/177
- 13.3 分段预紧组合转子中的力传递机制与基本解系/182