



国家出版基金资助项目



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

湖北省学术著作
出版专项资金

数字制造科学与技术前沿研究丛书

压气机叶片阻尼 减振机理与数值仿真方法

Damping Mechanism and Numerical Simulation Method
of Compressor Blade

王 娇 张曰浩 于 涛 韩清凯 著



武汉理工大学出版社
WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目



数字制造科学与技术前沿研究丛书

压气机叶片阻尼减振机理 与数值仿真方法

王 娇 张曰浩 于 涛 韩清凯 著



武汉理工大学出版社

· 武 汉 ·

内 容 提 要

本书针对叶片阻尼结构的振动抑制问题,采用叶片叶根处榫头-榫槽的榫连接触和摩擦阻尼、叶根处施加黏弹性阻尼材料、在叶身上施加新型阻尼硬涂层等三类阻尼减振机理,研究其对叶片振动特性的影响和减振效果。

本书适合数字制造科学与技术相关领域的学生、工程技术人员等参考。

图书在版编目(CIP)数据

压气机叶片阻尼减振机理与数值仿真方法/王娇等著. —武汉:武汉理工大学出版社, 2019.5
ISBN 978-7-5629-5959-5

I. ①压… II. ①王… III. ①压缩机-叶片-阻尼减振-计算机仿真-研究 IV. ①TH45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 046145 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:张 晨

责任校对:夏冬琴

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:11

字 数:190 千字

版 次:2019 年 5 月第 1 版

印 次:2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

· 版权所有,盗版必究 ·

数字制造科学与技术前沿研究丛书

编审委员会

顾问：闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员：周祖德 丁 汉

副主任委员：黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员：田 高

委员（按姓氏笔画排列）：

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书：王汉熙

总责任编辑：王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,兴起了全球新一轮的数字化制造的浪潮。发达国家(特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家)面对近年来制造业竞争力的下降,大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)跟制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制

造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成提供了宝贵的经验和知识,付出了辛勤的劳动,在此谨表示最衷心的感谢!对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等制造领域资深专家及编委会成员讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇三个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术在制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

叶片是航空发动机、燃气轮机、高端轴流压缩机等叶轮机械的重要部件。近年来,叶轮机的性能不断提高,向高转速、高效率、高精度、高可靠性方向发展。在结构轻量化的要求下,为确保叶轮机的安全及长寿命工作,叶片的性能就显得十分重要。但是,由于设计不周、试验不足、材料瑕疵、工艺缺陷,以及使用条件和环境条件的限制等因素,特别是在多场耦合复杂条件下,叶片承受相对严酷的流体和热机耦合激励,并且由于其本身的密集固有频率和复杂形式的模态振型等因素,不可避免地产生共振。在工程实际中,即使满足了静强度要求和抗低周疲劳设计要求,但由于高整体应力水平和可能的高频共振,叶片仍然容易发生高周疲劳损伤故障。为此,叶片在现有结构形式无法进一步优化的情况下,迫切需要采取增加阻尼的方法以实现叶片的减振,提高其抗振动疲劳能力。

人们在叶片的阻尼减振机理与数值仿真方面开展了大量卓有成效的研究工作,取得了许多重要的成果,并在工程实际中加以应用,取得了较好的经济效益和社会效益。随着科学技术的快速发展,由于叶片的振动问题十分复杂,其理论研究和工程实际都对现有叶片的理论分析方法提出了越来越高的要求,特别是叶片阻尼减振机理,需要不断地进行深入研究。

本书共分为 10 章。第 1 章为绪论,介绍了研究目的与意义以及叶片摩擦阻尼、黏弹性阻尼和硬涂层阻尼的国内外研究现状、研究方法;第 2 章介绍了叶根摩擦阻尼的叶片振动分析方法;第 3 章介绍了带有樵连摩擦阻尼的叶片振动特性的有限元分析方法与实验;第 4 章介绍了叶根摩擦阻尼对盘片组合结构固有特性的影响及其接触状态仿真;第 5 章介绍了基于复模量本构关系的叶片-黏弹性阻尼块的动力学特性分析方法;第 6 章介绍了基于实验测试的黏弹性材料复合结构的有限元方法的确认,为第 7 章的研究做铺垫;第 7 章介绍了叶根带有黏弹性阻尼块的叶片的有限元分析方法;第 8 章介绍了基于改进的 Oberst 复合层梁弯曲理论的叶片-硬涂层阻尼减振的有效性分析;第 9 章介绍了基于实验测试的直板叶片-硬涂层振动分析的有限元方法的确认,为第 10 章的研究做铺垫;第 10 章介绍了叶片-硬涂层振动有限元分析及其减振有效性分析,详细研究了硬涂层材料特性(如弹性模量、损耗因子、厚度和涂覆位置)对叶片固有频率和振动响应的影响。

本书得到了国家自然科学基金项目(编号:11502227)的支持。本书由王娇副教授、张曰浩实验师、于涛教授和韩清凯教授共同完成。此外,作者所在课题组高培鑫博士、袁超等也参加了部分内容的整理工作。由于笔者水平有限,书中难免存在一些疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

著 者

2018 年 10 月 17 日

目 录

1 绪论	(1)
1.1 研究目的	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.2.1 榫连接触干摩擦阻尼的研究现状	(2)
1.2.2 叶根黏弹性阻尼的研究现状	(7)
1.2.3 硬涂层阻尼的研究现状	(9)
1.3 本书主要研究内容	(12)
2 考虑叶根摩擦阻尼的叶片振动分析	(15)
2.1 考虑叶根摩擦阻尼的叶片简化力学模型	(15)
2.2 考虑叶根摩擦阻尼的叶片运动方程	(18)
2.2.1 叶片运动方程	(18)
2.2.2 求解方法	(20)
2.3 算例分析	(23)
2.3.1 系统响应特性	(25)
2.3.2 接触参数对系统响应特性的影响	(27)
2.3.3 转速对系统固有频率的影响	(30)
3 带有榫连摩擦阻尼的叶片振动特性的有限元分析与实验	(31)
3.1 叶片榫连结构特征	(31)
3.2 接触问题有限元分析的基本原理	(32)
3.2.1 弹性接触问题的力学特性	(32)
3.2.2 利用 ANSYS 软件进行接触分析的单元特性	(37)
3.3 带有榫连摩擦阻尼的叶片振动分析模型的确认	(38)
3.4 考虑榫连摩擦状态不同时的叶片固有特性计算与实验对比	(40)
3.5 带有榫连摩擦阻尼的叶片谐响应分析	(43)
3.5.1 共振频率激振	(45)
3.5.2 非共振频率激振	(46)
3.5.3 相同预紧力矩下不同激振力的实验测试	(47)
4 叶根摩擦阻尼对盘片组合结构固有特性的影响及其接触状态仿真	(50)
4.1 带有榫连摩擦阻尼的盘片组合结构的有限元建模	(50)
4.1.1 建模方法	(51)

4.1.2	边界条件	(51)
4.1.3	加载及求解	(52)
4.2	带有樵连摩擦阻尼的盘片组合结构的固有特性分析	(52)
4.3	带有樵连摩擦阻尼的盘片组合结构的共振特性分析	(60)
4.4	带有樵连摩擦阻尼的盘片组合结构的接触分析	(61)
4.4.1	摩擦系数对接触压力的影响	(61)
4.4.2	摩擦系数对滑动距离的影响	(63)
4.4.3	转速对接触压力的影响	(64)
4.4.4	转速对滑动距离的影响	(64)
5	基于复模量本构关系的叶片-黏弹性阻尼块的动力学特性分析	(66)
5.1	叶片-黏弹性阻尼块的简化力学模型	(66)
5.2	叶片-黏弹性阻尼块的动力学方程	(68)
5.3	叶片-黏弹性阻尼块动力学方程的求解方法	(71)
5.3.1	Galerkin 离散	(71)
5.3.2	固有特性的求解	(73)
5.3.3	频域响应的求解	(74)
5.4	数值计算与讨论	(76)
5.4.1	叶片-黏弹性阻尼块的材料和几何参数	(76)
5.4.2	共振特性	(78)
5.4.3	响应特性	(80)
5.5	黏弹性阻尼块参数对固有特性的影响	(81)
5.5.1	黏弹性阻尼块厚度的影响	(82)
5.5.2	黏弹性阻尼块储能模量的影响	(83)
5.5.3	黏弹性阻尼块损耗因子的影响	(84)
5.5.4	转速的影响	(85)
6	基于实验测试的黏弹性材料复合结构的有限元方法的确认	(87)
6.1	黏弹性材料的本构关系	(87)
6.1.1	积分型标准力学模型	(88)
6.1.2	广义 Maxwell 模型	(88)
6.1.3	应力松弛函数的 Prony 级数	(89)
6.1.4	复常数模量模型	(90)
6.1.5	频变复模量模型	(90)
6.1.6	分数导数模型	(91)
6.1.7	指数模型	(92)
6.2	黏弹性材料复合结构的求解方法	(93)

6.2.1 固有频率的求解	(93)
6.2.2 结构阻尼比(损耗因子)的求解	(93)
6.3 黏弹性复合层梁的计算	(95)
6.3.1 黏弹性复合层梁的有限元建模	(95)
6.3.2 黏弹性复合层梁的求解	(96)
6.4 基于实验测试的黏弹性复合层梁的有限元方法确认	(102)
7 叶根带有黏弹性阻尼块的叶片的有限元分析	(104)
7.1 叶根带有黏弹性阻尼块的叶片的有限元模型	(104)
7.1.1 单元的选取与网格划分	(104)
7.1.2 材料属性	(105)
7.1.3 边界条件	(106)
7.2 叶根带有黏弹性阻尼块的叶片的求解方法	(106)
7.3 叶根带有黏弹性阻尼块的叶片的求解结果	(106)
7.3.1 固有频率求解结果	(107)
7.3.2 谐响应求解结果	(108)
8 基于改进的 Oberst 复合层梁弯曲理论的叶片-硬涂层阻尼减振的有效性分析	(114)
8.1 复合层梁的建模	(114)
8.1.1 Oberst 复合层梁的弯曲振动方程	(115)
8.1.2 复合层梁的复弯曲刚度求解	(116)
8.1.3 复合层梁等效力学参数	(118)
8.2 复合层梁的动力学方程的求解方法	(119)
8.3 复合层梁等效参数正确性验证	(121)
8.3.1 有限元建模	(121)
8.3.2 结果分析	(122)
8.4 复合层梁的固有频率计算	(123)
8.5 基于实验测试的复合层梁的基础激励响应求解方法的验证	(124)
9 基于实验测试的直板叶片-硬涂层振动分析的有限元方法的确认	(126)
9.1 涂覆涂层前后直板叶片动力学特性测试	(126)
9.1.1 实验对象	(126)
9.1.2 实验方法	(127)
9.1.3 实验结果	(128)
9.2 涂覆涂层前后直板叶片的有限元分析	(132)
9.2.1 叶片-硬涂层复合结构的有限元建模方法	(132)
9.2.2 叶片-硬涂层复合结构的有限元计算	(132)
9.2.3 叶片-硬涂层复合结构的求解结果	(133)

9.3 叶片-硬涂层复合结构有限元建模方法的验证	(135)
10 叶片-硬涂层振动有限元分析及其减振有效性分析	(137)
10.1 叶片-硬涂层复合结构的有限元建模方法	(137)
10.2 叶片-硬涂层的减振分析与参数影响	(139)
10.2.1 硬涂层弹性模量对叶片动力学特性的影响	(139)
10.2.2 硬涂层损耗因子对叶片动力学特性的影响	(142)
10.2.3 硬涂层厚度对叶片动力学特性的影响	(146)
10.2.4 硬涂层涂覆位置对叶片动力学特性的影响	(149)
10.3 叶片-硬涂层的实验验证	(153)
参考文献	(155)

1

绪 论

1.1 研究目的

叶片是燃气轮机等重要叶轮机械的关键部件。目前,叶片的设计制造已经达到较高的水平,低阶共振所导致的低周疲劳失效或可能的颤振失效基本可以避免。但是,在很多情况下,由多种复杂原因所导致的叶片振动还是不可避免的,在高振动应力水平下的叶片高周疲劳破坏是目前最常发生因而是最迫切的现实问题^[1]。因此,如何减小叶片在工作过程中的振动,提高叶片抗高周疲劳能力,是目前重要的研究课题。

针对叶片的减振问题,目前通常采用的方法主要有叶片的叶根缘板阻尼、榫头-轮盘榫槽的榫连部位接触和摩擦阻尼,以及叶片凸肩或叶冠摩擦冲击阻尼等类型^[2]。其中第一类,对于采用叶根缘板阻尼的叶片,由于缘板金属摩擦阻尼的作用,可以有效地减小叶片的振动,应力下降明显,在工程上得到了很好的应用。对于第二类和第三类,榫头-轮盘榫槽的榫连部位接触和摩擦阻尼、叶片凸肩或叶冠摩擦冲击阻尼,是公认的叶片阻尼机制,在设计制造合理,具有合理的接触、摩擦或冲击参数时,可以实现叶片整体阻尼的提高,达到减振的目的。

近年来,人们还研究并提出了多种叶片的阻尼减振技术。主要有:叶根添加黏弹性阻尼块,以有效地抑制叶片振动,改善榫连部位抗振动疲劳的能力;在叶身上施加阻尼涂层,在提高抗冲刷能力的同时,该涂层还有较好的阻尼能力,进而增加叶片整体的阻尼系数。这些新技术已经在工程中得到了初步的应用^[3]。

因此,本书针对叶片减振的工程需求,研究叶片主要的三类阻尼减振机理,即叶片叶根处榫头-榫槽的榫连接触和摩擦阻尼机理对叶片振动特性的影响,叶根处

施加黏弹性阻尼材料对叶片振动特性的影响和减振效果,在叶身上施加新型阻尼硬涂层对叶片振动特性的影响和减振效果。这三类阻尼的创新性机理研究,将为叶片阻尼的工程设计提供理论与方法的支持,对解决叶片较宽频带范围内的抗高周疲劳问题具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 榫连接触干摩擦阻尼的研究现状

利用接触面间的干摩擦增加叶片系统结构阻尼是降低叶片振动水平、减小叶片高周疲劳损伤的一种有效途径,因此设计具有较好减振能力的干摩擦阻尼新结构,建立干摩擦力的力学和数学模型以及进行相关的动力学分析,是叶片开发和研究中的一项重要工作^[4]。

目前,高速叶轮机机械叶片采用干摩擦减振阻尼结构的主要有叶根摩擦阻尼^[5]、叶根缘板阻尼^[6,7]、叶身凸肩(凸台)阻尼^[8]、叶身叶冠阻尼^[9,10]等,如图 1.1 所示。这几种阻尼形式的基本原理是相似的,即在叶片振动过程中上述阻尼结构接触面一般都存在摩擦阻尼,通过摩擦作用,使振动的机械能转换为热能散发于周围介质中,以耗散机械能产生阻尼,从而达到避免共振、抑制颤振、减小振动的目的。大展弦比长叶片为了避开颤振和共振,通常采用部分凸肩(常用于压气机叶片)和叶冠(常用于涡轮叶片)。

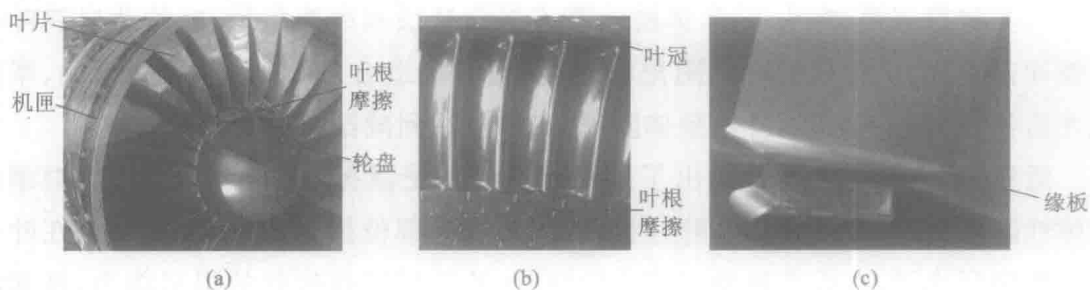


图 1.1 叶轮机盘片组合结构中不同摩擦接触类型

(a)叶根摩擦阻尼(榫连结构);(b)叶冠结构;(c)叶根缘板结构

叶片的叶根与轮缘的接触部分也可以为叶片提供相互滑动的摩擦面。研究表明,叶根处的摩擦在轮盘转速比较低的时候对叶片的阻尼贡献比较大,而在轮盘转速比较高的时候,叶根处的摩擦对叶片的阻尼贡献就比较小。这是因为,当轮盘转速比较低的时候,叶片的离心力比较小,叶根与轮缘之间的接触压力也就比较小。叶片在振动时,叶根与轮缘之间比较容易产生相互摩擦滑动,对叶片振动起到比较大的阻尼作用。而当发动机转速逐渐上升时,叶片的离心力也逐渐变大,叶根与轮缘之间的接触力也变大,叶根与轮缘之间的滑动就比较困难。这时,叶根处的摩擦就变得比较薄弱。

Rao J S^[5]通过实验研究了自由叶片的阻尼比与汽轮机转速之间的定量关系。研究结果表明,各阶模态曲线中,随着转速的上升,叶片的阻尼比呈减小的趋势,特别是在转速为 400r/min 时,叶片的阻尼比有一个突降,书中称其为阈值。这个阈值就是叶根与轮缘之间的锁定值,即由于较大的离心力,叶根与轮缘之间的滑动摩擦被“制动”的速度。剩余的阻尼主要是叶片材料阻尼,而在阈值之前,叶片的阻尼主要是叶根与轮缘之间的摩擦阻尼。

为了准确地描述干摩擦阻尼结构摩擦接触面的力学特征,很多学者开展了关于干摩擦阻尼模型的研究。用来描述接触面上作用的干摩擦力的数学模型主要有两种:库仑摩擦模型和滞后弹簧摩擦模型。国内外学者很早就开展了对库仑摩擦模型的研究,其中,Denhartog 最早采用库仑摩擦模型研究结构动力学行为,获得了单自由度振荡器稳态运动的精确解^[11]。文献[12,13]采用上述方法研究两自由度系统,文献[14,15]研究多自由度系统,在这些文献中,采用宏观滑动模型来描述接触面。宏观滑动模型是一种单点接触模型,它假设接触面上所有点的变形及压力都是均匀的,接触面内所有接触点同时滑动或黏滞,所有点的运动状况可以通过一个点来描述。在法向压力较小或者接触面积较小的情况下,应用这种模型对接触面进行简化往往可以得到较好的结果,模型比较简单,计算量小,因此被许多人所采用。库仑摩擦模型是建立在一种理想的干摩擦情况下的模型。考虑到实际情况中干摩擦接触面两端的变形不是突然发生的,当外力小于干摩擦力时,接触面的两端仍然有变形,即有较大的相对位移,因为接触点本身具有一定的弹性,所以接触面上的干摩擦力仍然不是常数,它是随着振幅的加大而缓慢上升的。因此,人们提出了滞后弹簧摩擦模型以计入这种在接触面产生相对滑动之前的变形。

对于干摩擦接触面滑动状态的表征,目前有整体滑动与部分滑动两种数学模

型,它们是根据接触面内变形分布特点来描述接触面摩擦机理。整体滑动模型又称宏观滑动模型,它假定接触区内各点在各方向上的受力和变形是均匀分布的,即各接触点的法向压力、接触刚度相同,在相同切向力的作用下将产生相同的弹性变形,同时达到摩擦力的临界值而产生滑动。因此,在这种模型条件下,整个接触面可以用一个接触点的状态来描述。这种模型相对简单和理想化,不能准确地描述真实的摩擦过程。它与实际情况存在着以下差异:法向压力在接触区内一般来说是不均匀分布的,不同接触位置的法向压力存在着较大的区别;接触区各点的切向力并不相同;法向压力很大的情况下,整体滑动模型认为不存在摩擦阻尼,而实际上接触区边缘存在滑动区,这部分滑动也将产生阻尼;整体滑动模型将整个摩擦面的受力简化为单个接触点的摩擦力,因此忽略了摩擦力矩。但是,整体滑动模型计算方便,在结构动力响应的求解中被广泛采用。

众多学者基于宏观滑动模型对带干摩擦阻尼结构进行研究。Yang 等人采用库仑摩擦定律和宏观滑动模型研究了楔形阻尼器干摩擦接触界面相互间的黏滞、滑移等状态之间的过渡和转换,及干摩擦力的数学描述^[6]。Chen 等人采用宏观滑动三维围带接触模型研究了带围带叶片的周期响应,指出由于干摩擦力非线性的影响,叶片的周期响应呈现跳跃现象^[16]。徐自力等人采用考虑静摩擦力、动摩擦力差别的宏观滑动迟滞模型对 5 片成组叶片的振动响应进行了计算^[17]。丁干和谭海波将滞后摩擦力分为四个线性阶段,得到各阶段上的线性振动系统,给出了求解干摩擦阻尼叶片周期响应的解析公式^[18]。

干摩擦阻尼属于接触动力学分析,与几何非线性问题和材料非线性问题不同,它属于复杂的边界状态非线性问题。接触状态取决于叶片的振动,而叶片的振动轨迹事先无法确定,必须在响应计算过程中迭代求解接触非线性力。干摩擦阻尼系统振动响应的求解有解析法和数值解法,数值解法主要包括时域法和频域法两大类。

由于非线性力的存在,只有极个别的简单模型可求得解析解。文献[17]研究了一个描述干摩擦阻尼器叶片振动的质量-弹簧-阻尼器振动系统,结果表明,阻尼端压力取适当值时,阻尼器会处于最优的摩擦接触状态,获得较好的减振效果,同时引进的阻尼器还改变了叶片整体等效刚度,对叶片不但起到了调谐的作用,也起到了使激振频率避开共振频率,减小振动幅值的作用。

对于需要进行细致分析的情况,由于在复杂的非线性接触运动的一个振动周期内接触面可能存在黏滞、滑动甚至分离的各种接触状态,解析法无法应用于包

含复杂接触运动的摩擦结构。此时,干摩擦阻尼系统振动响应的求解只能依赖于数值解法。

时域法是通过对方微分方程进行时间数值积分确定系统响应的一种方法。常用的方法包括 Newmark 法、wilson- θ 法及 Runge-Kutta 法,该方法可以跟踪系统响应时间历程。为了能够准确反映摩擦面黏滞状态与滑动状态之间的转换,需要在状态转换点附近采用较小的时间步长以保证计算的准确性。时域法的优点是只要时间步长选择合适,总可以保证计算结果达到较高的精度,且对问题所涉及的非线性程度没有限制。该方法的主要缺点是需要大量的计算时间,因此该方法一般只用于检验其他算法的准确性^[19,20]。钟万勰提出了精细积分法,针对系统传递矩阵的具体特点,建立了一套指数矩阵的计算方法,理论上已经证明这种算法具有精度高、计算过程稳定等优点。

对于强非线性系统来说,谐波平衡法是一种常用的求解响应的方法,用谐波平衡法列出方程后一般采用牛顿迭代法求解,对于干摩擦阻尼系统来说,谐波平衡法的方程阶数过大,不利于牛顿迭代法的进一步求解,而采用精确积分法可降低方程的阶数,使计算变得简便。范天宇采用宏观滑动迟滞模型描述干摩擦力,建立了带干摩擦阻尼器系统单自由度及两自由度力学模型;分别运用 Fourier 级数展开法、增量谐波平衡法和精细积分法对模型进行求解,比较了其各自的优缺点:与 Fourier 级数展开法相比,增量谐波平衡法结果略小但收敛性更强,计算过程对初值的依赖性更小;而精细积分法结果基本吻合但工作量要大幅减少^[21]。文献[22]使用增量谐波平衡法和精细积分法对单自由度干摩擦阻尼系统模型进行了响应求解,与使用四阶 Runge-Kutta 数值积分法结果比较,吻合良好。文献[23]采用频域和时域混合方法求解带环形阻尼的失谐叶盘的动力学方程,使用黏滞滑移模型去表征接触面。文献[24]使用谐波平衡法研究摩擦系数和法向力对盘片结构的振动响应的影响,并且通过实验验证结果的正确性。

翼体到叶片榫连部位的接触摩擦分析,由于处于动态接触和复杂的热、气以及振动环境中,其接触状态受许多因素的影响,接触部位的应力应变情况十分复杂。国内外学者对榫连部位的接触状态和边界条件的研究已经比较深入。Boddington 等进行了二维榫连部位的弹性分析,主要研究了有限元法应用于 Amonton 摩擦定律的可行性,并提出了解决此问题的方法^[25]。Kenny 等应用有限元法研究了二维榫连部位的接触应力,并将光弹性结果和有限元结果进行了对比^[26]。Papanikos^[27]、Meguid^[28]等也采用有限元法进行了二维榫连部位的接触分

析。对于三维榫连部位的接触分析,部分学者考虑接触面网格密度对接触分析的影响进行了大量的研究。Papanikos 等进行了三维榫连部位的弹性分析,只是考虑了几何参数(接触区长度、接触面倾角、榫头圆角半径等)和摩擦系数对接触应力的影响趋势,没有考虑网格密度对接触区边缘存在高应力梯度的影响^[29]。为了解决此问题,Beisheim 等采用子模型法求解三维榫连部位,得到了接触面上的接触应力^[30]。Sinclair 等研究榫连部位由于接触边存在高应力梯度和摩擦引起非线性等特点,需要在接触边区域采用细网格。他们提出了采用子模型解决由于接触区域网格的细化而导致的计算效率低的难点,并指出不同模型接触应力计算结果之间的误差在 5% 以下时,即认为计算收敛^[31]。魏大盛等对燕尾形榫连部位的接触应力进行了深入分析,准确计算了高应力梯度位置的接触应力分布,并探讨了网格密度对计算结果的影响,改善了以往针对榫连部位分析时计算结果精度较低的情况^[32]。魏大盛等针对燕尾形榫连部位的接触应力分布进行了研究,探讨了接触面角度、长度、接触区边缘圆角半径以及接触面的几何形式,重点研究了圆弧/直线几何形式下的接触应力分布,并讨论了其几何参数对接触区应力改善的作用^[33]。除了研究几何参数和摩擦系数对接触分析的影响外,Anandavel 等研究了载荷和榫槽倾斜角对榫连部位接触分析的影响。研究表明,为了加深对接触面微动磨损的理解,榫连部位的接触分析应考虑斜榫槽的倾斜角和载荷的作用^[34]。文献[35]采用有限元法求解弹性体的接触问题,此方法不受特殊几何形状和各向异性材料的影响。文献[36]采用数值方法研究缘板摩擦阻尼器对叶片共振幅值的影响,结果表明,存在能够有效降低叶片的振动幅值的最优摩擦系数。文献[37]采用数值方法研究接触摩擦对盘片结构非线性响应的影响。

然而,目前对于榫连部位接触特性对叶片的振动特性影响的实验研究很少,实验多为榫连部位的疲劳实验,原因在于实验中很难看到接触区域,想得到接触面上有效的实验值是非常困难的。Papanikos 等对榫连部位进行了实验分析,主要采用光弹性实验技术有效地得到了榫连部位接触边区域的应力结果,并与仿真结果进行了验证。研究表明,此种技术可以有效地观察大多数的结构区域^[27]。Rajasekaran、Nowell 对榫连部位进行了疲劳实验,采用半解析法分析榫连部位,准确估算粗糙网格有限元模型的表面外力和内部应力;并且将此方法应用于分析二轴疲劳实验,准确模拟了榫连部位承受的离心载荷、盘扩展力和叶片振动的边界条件。研究结果表明,高摩擦系数更可能导致故障的发生,预测与实验得到了一致的结果^[38]。Nowell 等利用实验研究了复杂的接触载荷对微动损伤,特别是