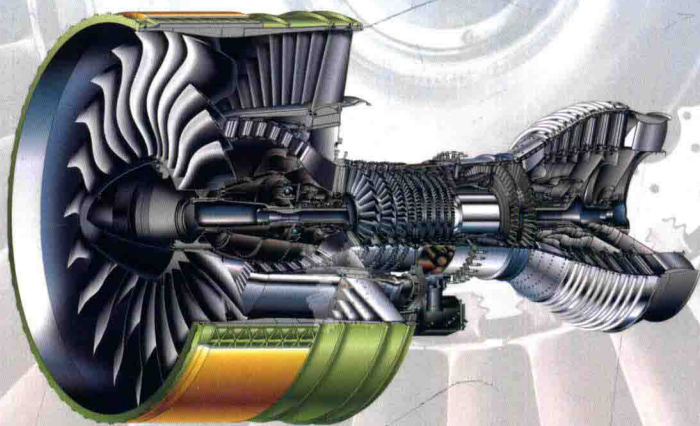


国家自然科学基金等项目资助

旋转叶片-机匣系统 碰摩动力学

马 辉 闻邦椿 太兴宇 韩清凯 著

**Dynamics of Rotating Blade-Casing
Systems with Rubbing**



科学出版社

国家自然科学基金等项目资助

旋转叶片-机匣系统碰摩动力学

马 辉 闻邦椿 太兴宇 韩清凯 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

针对航空发动机叶片-机匣碰摩和叶冠之间的碰撞现象,本书介绍了叶片、转子-叶片、转轴-盘片系统的动力学建模方法,叶片-机匣碰摩力模型,以及碰摩激发的叶片、机匣和转子复杂的非线性振动现象等最新的理论研究成果。

主要包括:建立了描述旋转叶片振动的梁、板、壳解析和有限元模型,转子-叶片系统动力学模型,分析了系统的耦合振动响应;开发了叶片-弹性机匣碰摩力模型,并通过实验验证了模型的有效性;建立带冠叶片碰撞模型,分析了叶冠碰撞导致的叶片复杂非线性振动响应;考虑榫槽-榫头界面接触影响,建立了盘片系统有限元模型,分析碰摩对榫连接触特性的影响;考虑转子涡动影响,建立了转子-叶片-机匣系统和转轴-盘片-机匣系统碰摩动力学模型,分析了碰摩条件下叶片、机匣和转子系统的振动响应。

本书可为高等学校机械、动力、航空、力学等专业的研究生提供学习参考,也可为机械动力学、故障诊断,特别是转子动力学等领域的科技和工程技术人员提供学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

旋转叶片-机匣系统碰摩动力学/马辉等著. —北京:科学出版社,2017.2
ISBN 978-7-03-051856-9

I. ①旋… II. ①马… III. ①叶片-壳体(结构)-动力学-研究
IV. ①TK05

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第033534号

责任编辑:任彦斌 张 震/责任校对:王 瑞

责任印制:徐晓晨/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年2月第 一 版 开本:720×1000 1/16

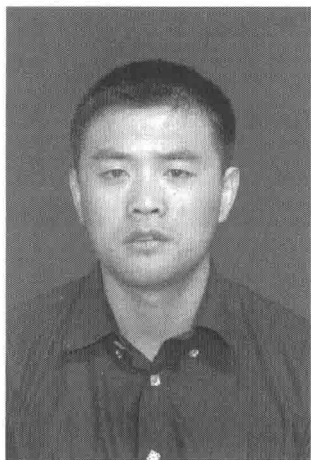
2017年2月第一次印刷 印张:15 3/4 插页:3

字数:309 000

定价:86.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



马辉教授

马辉，东北大学机械工程与自动化学院教授，博士生导师，本书第一作者。1978年9月生于河北省安平县，2007年获机械设计及理论博士学位，留校任讲师，2015年晋升为教授。2008年8月~2011年3月，在沈阳鼓风机集团有限公司从事博士后研究工作；2014年11月~2015年10月，在英国谢菲尔德大学做访问学者，合作导师郎自强教授；2010年获辽宁省优秀博士后，2011年入选“教育部新世纪人才支持计划”，2013年入选东北大学首批高层次人才培养计划“曙光学者”。应邀担任《声学 & 振动》杂志编委、*International Journal of Rotating Machinery* 特邀编辑、机械工程学会和振动工程学会高级会员，并担任 *Journal of Sound and Vibration*、*Mechanical Systems and Signal Processing*、

《机械工程学报》、《振动工程学报》等 32 个国内外学术期刊的审稿人。

主要从事旋转机械动力学方面研究，为东北大学闻邦椿院士课题组核心成员之一、“航空动力装备振动及控制”教育部重点实验室（B 类）主要成员之一。近几年主持国家自然科学基金 [大型离心压缩机转子系统的耦合碰摩故障机理若干关键问题的研究 (50805019)、航空发动机旋转叶片-涂层机匣碰摩机理及动力学特性研究 (U1433109)]、教育部博士点基金、中国博士后基金、教育部基本科研项目和机械传动国家重点实验室、机械结构强度与振动国家重点实验室开放基金等纵向科研项目 11 项；同时参加了多个国家自然科学基金重点项目、973 计划和 863 计划项目。参与撰写著作 1 部，获国家发明专利 4 项，计算机软件著作权 6 项；获得辽宁省科技进步奖一等奖 1 项，中国冶金科学技术奖二等奖和中国机械工业科学技术奖二等奖各 1 项。

以第一作者和通信作者身份在 *Nonlinear Dynamics*、*Mechanical Systems and Signal Processing*、*Journal of Sound and Vibration*、《机械工程学报》等杂志发表论文 100 余篇，其中 SCI 检索论文 39 篇、EI 检索论文 50 余篇。论著被他引 500 余次，其中 SCI 他引 170 余次，EI 检索 50 余次。



闻邦椿院士

闻邦椿，东北大学教授，博士研究生导师，1930年9月生于浙江杭州。1955年毕业于东北工学院，1957年研究生毕业后留校任教。现为东北大学机械设计及理论研究所名誉所长、辽宁省创意产业协会会长，曾任东北大学机械设计及理论985工程首席教授。

1991年当选为中国科学院院士。现任国际转子动力学技术委员会委员、国际机器理论与机构学联合会中国委员会委员。先后曾任东北工学院机械二系主任，国务院学位委员会第二、三、四届学科评议组成员，国家自然科学奖、技术发明奖、科学技术进步奖评审委员会委员，国家“长江学者”奖励委员会评审组成员，国家自然科学基金评审组成员，第六、七、八、九届全国政协委员，中国振动工程学会理事长，

《振动工程学报》主编，《机械工程学报》等多种杂志编委，上海交通大学“振动、冲击、噪声”国家重点实验室学术委员会主任，北京吉利大学校长等。

他长期从事教学工作，讲授“机械振动学”等课程。除培养本科生外，截至2015年末，已培养122名硕士研究生、90名博士研究生和16名博士后，指导国外访问学者2名，为我国人才培养做出了重要贡献。

在科研方面，他完成了国家自然科学基金重大项目、重点项目和973计划、863计划项目等国家纵向和横向科研项目数十项。开辟了几个重要学术方向，撰写出版了《振动利用工程》、《工程非线性振动》，均为国际上该领域第一部专著。

他和课题组同事先后发表学术论文800余篇，署名第一作者的论文180多篇，被SCI、EI和ISTP检索的近260篇，被引用3000余次。他完成了诸多理论和技术创新，取得了重大的经济和社会效益。

他撰写及参与的著作、教材及手册共有70部，作为第一作者的有55部。两部著作获全国优秀科技图书二等奖，主编的《机械设计手册》获中国出版政府奖提名奖。

他获国际奖2项，国家奖5项，省、部级一、二等奖20余项，获国家专利20余项。2012年被授予全国振动利用工程研究领域的“终身成就奖”。

他曾访问36个国家，多次应邀去德国、日本等国讲学，参加在美国、英国等20余个国家召开的国际学术会议，宣读论文70余篇，多次应邀做大会报告，4次主持国际学术会议，担任会议主席。

他曾是中共东北工学院和东北大学三届党委委员，多次获辽宁省劳动模范、沈阳市特等劳动模范和优秀共产党员称号，是我国第一批享受国务院特殊津贴的专家。他的简历及科研成果已载入《世界名人录》和国内的多种名人辞典中。

前 言

《中国制造 2025》战略规划中对发展航空装备有明确规定：“加快大型飞机研制，适时启动宽体客机研制，鼓励国际合作研制重型直升机；推进干线飞机、直升机、无人机和通用飞机产业化。突破高推重比、先进涡桨（轴）发动机及大涵道比涡扇发动机技术，建立发动机自主发展工业体系。开发先进机载设备及系统，形成自主完整的航空产业链。”现代航空发动机设计中，为了提高发动机性能、增加推重比，采取的主要措施之一就是减小旋转机械转定子之间的间隙，从而致使转定子碰摩的可能性急剧增大，与碰摩相关的整机振动问题也日益增多，另外，也可能导致严重事故、造成重大经济损失。例如，美国运输部报道：在 1962~1976 年的 417 百万飞行小时中，10.2% 的发动机转子事故是由转定子碰摩引起的；1994~1996 年，发动机碰摩故障导致 4 架 F-16 战斗机失事，另有多架直升机直接或间接因发动机碰摩故障而被迫停飞。

航空发动机碰摩主要出现在叶片和机匣以及鼓筒和静子叶片之间，其中叶片-机匣碰摩更为危险。这是因为叶尖处有更高的线速度，碰摩能量大，对叶片振动的影响也大。叶片-机匣碰摩涉及更加复杂的冲击过程，主要体现在：碰撞发生在柔性体与柔性体间，碰撞力将主要取决于碰撞柔性体本身的整体变形，而非局部变形；由于叶尖与线速度方向有一定的夹角，叶片碰撞为斜碰撞，容易诱发叶片的弯扭耦合变形；叶片在碰摩过程中，自身位置有明显的移动，所以冲击不能看成是瞬时的。叶片-涂层/未涂层机匣碰摩激振机理及涂层磨损机理，目前已成为重要的研究热点之一。

叶片-机匣碰摩研究主要包括：①开发新的叶片-弹性机匣及叶片-涂层机匣碰摩模型；②将叶片简化为悬臂梁、悬臂板及采用真实叶片几何尺寸建立的壳和实体有限元模型等，研究悬臂叶片-机匣碰摩导致的叶片振动响应，考虑盘片耦合、转子-叶片耦合的影响（转子主要指转轴及轴上的刚性轮盘），研究碰摩激发的叶片、机匣振动和转子涡动之间的耦合特性；③考虑机匣封严涂层的影响，研究叶片-涂层碰摩对叶片振动和涂层磨损的影响规律；④基于机匣、转子和叶片振动响应，对叶片-机匣碰摩位置、碰摩程度以及碰摩形式进行故障诊断；⑤在满足一定的结构和动力学相似的情况下，开展叶片-机匣碰摩实验研究，为验证和修订仿真动力学模型提供参考。

本书针对叶片、盘片和转子-叶片 3 种结构形式，重点介绍以下几个方面的内容：①采用解析和有限元方法，通过梁、等厚度直板、等厚度扭板、变厚度壳模

型来模拟单叶片振动；②考虑榫槽-榫头接触，建立盘片有限元模型，分析叶尖局部碰摩对叶片振动和榫连接触特性的影响；③将叶片简化为梁，忽略轮盘的柔性影响，采用解析和有限元组合方法，建立转子-叶片耦合系统动力学模型，考虑轮盘的柔性影响，基于有限元方法建立转轴-盘片耦合系统动力学模型；④考虑叶冠质量对旋转带冠叶片固有特性的影响，采用旋转悬臂梁理论，建立带有叶尖质量的旋转叶片动力学模型，并分析相关参数对旋转带冠叶片碰撞振动响应的影响；⑤考虑机匣刚度对碰摩的影响，开发叶片-弹性机匣碰摩模型，采用悬臂梁、悬臂板、变厚度壳、转子-叶片和转轴-盘片模型，揭示碰摩对叶片、转子和机匣耦合振动的激发机理。

本书部分研究内容得到了国家自然科学基金委员会与中国民用航空局联合资助项目(U1433109)、中央高校基本科研业务费专项资金(N140301001, N150305001)、西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室开放基金(SV2015-KF-08)、上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室开放基金(MSV201707)和“国家安全重大基础研究计划”(国防 973)等项目的支持。

本书由马辉教授、闻邦椿院士、太兴宇博士和韩清凯教授共同撰写完成。在撰写过程中，孙帆、孙祺、谢方涛、路阳、张文胜等硕士研究生参与了本书有关内容的研究和整理工作，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，本书若存在不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2016 年 7 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 目的及意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 叶片-机匣碰摩模型研究	3
1.2.2 悬臂叶片碰摩动力学特性研究	11
1.2.3 旋转带冠叶片碰撞动力学特性研究	12
1.2.4 盘片及转子-盘片系统叶尖碰摩动力学特性研究	12
1.2.5 叶片-机匣碰摩实验研究现状	14
1.3 本书的主要内容	16
参考文献	17
第 2 章 旋转叶片动力学建模	22
2.1 概述	22
2.2 旋转悬臂梁动力学模型	22
2.2.1 旋转叶片运动微分方程	22
2.2.2 旋转叶片连续系统离散动力学方程	25
2.3 旋转悬臂板动力学模型	28
参考文献	33
第 3 章 转子-叶片耦合系统动力学建模及模型验证	34
3.1 概述	34
3.2 转子-叶片耦合系统动力学模型	34
3.2.1 转子-叶片耦合系统运动微分方程	34
3.2.2 转子-叶片耦合系统矩阵组集	43
3.3 基于固有特性的模型验证	49
3.4 本章小结	61
参考文献	61
第 4 章 旋转叶片-弹性机匣碰摩模型及模型验证	62
4.1 概述	62
4.2 叶片-机匣碰摩模型	63

4.2.1 叶片-机匣碰摩模型推导	63
4.2.2 不同参数对碰摩力的影响	66
4.3 叶片-机匣碰摩实验	69
4.3.1 实验设备	69
4.3.2 实验结果	70
4.4 基于准静态碰摩力的仿真及实验结果对比	73
4.4.1 不同尺寸叶片碰摩力结果分析	73
4.4.2 不同转速下碰摩力结果分析	74
4.4.3 本章模型与现有模型的比较	75
4.5 动态碰摩力仿真	76
4.5.1 机匣动力学模型	76
4.5.2 旋转叶片的动态法向碰摩力	77
4.6 本章小结	79
参考文献	80
第5章 基于悬臂梁理论的叶片-机匣碰摩动力学	81
5.1 概述	81
5.2 旋转叶片模型建立与验证	81
5.2.1 旋转叶片动力学模型	81
5.2.2 基于固有特性及响应的模型验证	82
5.3 考虑叶尖碰摩的旋转叶片动力学模型	83
5.4 考虑叶尖碰摩的旋转叶片振动响应分析	85
5.4.1 静态不对中的影响	85
5.4.2 机匣刚度的影响	88
5.4.3 机匣变形的影响	90
5.5 本章小结	92
第6章 旋转带冠叶片碰撞动力学	93
6.1 概述	93
6.2 旋转带冠叶片模型建立与验证	93
6.2.1 旋转带冠叶片动力学模型	94
6.2.2 考虑碰撞带冠叶片动力学模型	98
6.2.3 基于固有特性及响应的模型验证	98
6.3 不同参数对碰撞振动响应的影响	100
6.3.1 冠间间隙对系统响应的影响	100
6.3.2 叶片转速对系统响应的影响	105

6.3.3 气动力幅值对系统响应的影响	107
6.4 本章小结	109
参考文献	109
第7章 基于悬臂板理论的叶片-机匣碰摩动力学	110
7.1 概述	110
7.2 基于固有特性的悬臂板叶片模型验证	110
7.3 含不对中的叶片-机匣碰摩模型	112
7.4 叶片-机匣碰摩导致的振动响应分析	113
7.4.1 机匣刚度的影响	114
7.4.2 不对中的影响	118
7.4.3 叶片-机匣最小间隙的影响	119
7.5 本章小结	120
第8章 基于变厚度壳的叶片-机匣碰摩动力学	122
8.1 概述	122
8.2 基于变厚度壳的叶片有限元模型	122
8.3 叶片固有特性分析	124
8.4 叶片-机匣碰摩模型	126
8.5 叶片-机匣碰摩动力学特性分析	129
8.5.1 气动力幅值的影响	131
8.5.2 静态不对中的影响	135
8.5.3 机匣刚度的影响	138
8.5.4 叶片气动力频率的影响	141
8.6 本章小结	143
第9章 不同叶片模型对叶尖碰摩动力学特性的影响	144
9.1 概述	144
9.2 叶片有限元模型及叶片-机匣碰摩模型	144
9.2.1 叶片的有限元模型	144
9.2.2 考虑叶片和机匣宽度的叶片-机匣碰摩模型	145
9.3 无碰摩情况下4种叶片模型动力学特性分析	146
9.4 4种叶片模型叶尖碰摩动力学特性分析	152
9.4.1 基于梁模型的碰摩响应分析	153
9.4.2 基于等厚度直板模型的碰摩响应分析	154
9.4.3 基于等厚度扭板模型的碰摩响应分析	155
9.4.4 基于变厚度壳模型的碰摩响应分析	158

9.5 本章小结	161
参考文献	161
第 10 章 榫连盘片结构叶尖-机匣碰摩动力学	162
10.1 概述	162
10.2 盘片有限元模型及简化的叶尖碰摩力模型	162
10.2.1 盘片有限元模型	162
10.2.2 模拟叶尖局部碰摩的脉冲力模型	164
10.3 考虑叶尖碰摩的叶片动力学及榫连接触特性分析	165
10.3.1 转速的影响	165
10.3.2 侵入量的影响	173
10.4 本章小结	177
参考文献	178
第 11 章 转子-叶片-机匣系统碰摩动力学	179
11.1 概述	179
11.2 转子-叶片-机匣系统碰摩动力学模型	179
11.3 不同碰摩力模型对系统碰摩响应的影响	183
11.4 不同参数对单叶片碰摩响应的影响	185
11.4.1 机匣质量对系统碰摩响应的影响	185
11.4.2 机匣刚度对系统碰摩响应的影响	187
11.5 不同参数对多叶片碰摩响应的影响	189
11.5.1 转速对碰摩的影响	189
11.5.2 不同叶片数对碰摩的影响	192
11.6 仿真与实验结果对比分析	193
11.7 本章小结	202
参考文献	202
第 12 章 转轴-盘片-机匣系统叶尖碰摩动力学	203
12.1 概述	203
12.2 考虑叶尖碰摩的转轴-盘片系统动力学模型	203
12.2.1 转轴-盘片系统有限元模型	203
12.2.2 含叶尖碰摩的转轴-盘片-机匣系统有限元模型	205
12.2.3 基于固有特性的模型验证	207
12.3 转轴-盘片-机匣系统碰摩振动响应分析	212
12.3.1 转速的影响	214
12.3.2 安装角的影响	217

12.3.3 机匣刚度的影响	219
12.4 本章小结	224
参考文献	225
附录 A 悬臂板相关矩阵附录	226
附录 B 转子-叶片相关矩阵附录	231
附录 B.1 叶片矩阵元素表达式	231
附录 B.2 叶片-转子耦合矩阵元素表达式	232
附录 B.3 叶片-转子附加矩阵元素表达式	234
附录 B.4 叶片-转子非线性力向量元素表达式	237

彩图

第1章 绪 论

本章首先介绍叶片-机匣碰摩研究的目的及意义, 然后对叶片-机匣碰摩模型、悬臂叶片碰摩动力学、旋转带冠叶片碰撞动力学、盘片及转子-盘片系统叶尖碰摩动力学和叶片-机匣碰摩实验这 5 个方面国内外研究现状进行了评述, 最后简要介绍了本书的主要内容。

1.1 目的及意义

在航空发动机中, 叶尖的间隙是指旋转叶片叶尖和机匣间的径向距离(图 1.1), 它是影响叶尖泄漏的一个重要参数。为了提高航空发动机的工作性能, 目前普遍采用的改进措施是减小叶片-机匣间隙^[1, 2]。然而, 随着间隙的减小, 叶片-机匣碰摩的可能性会随之增加, 从而可能影响航空发动机的安全运行。叶片-机匣碰摩会导致复杂的整机振动, 降低系统性能, 缩短叶片和机匣的工作寿命。1973 年, 美国国家运输安全委员会 (NTSB) 报道了一起飞机飞行过程中由叶片与机匣的接触碰摩导致的发动机风扇部件碎裂事故^[3]; 2014 年 6 月 23 日 F-35A

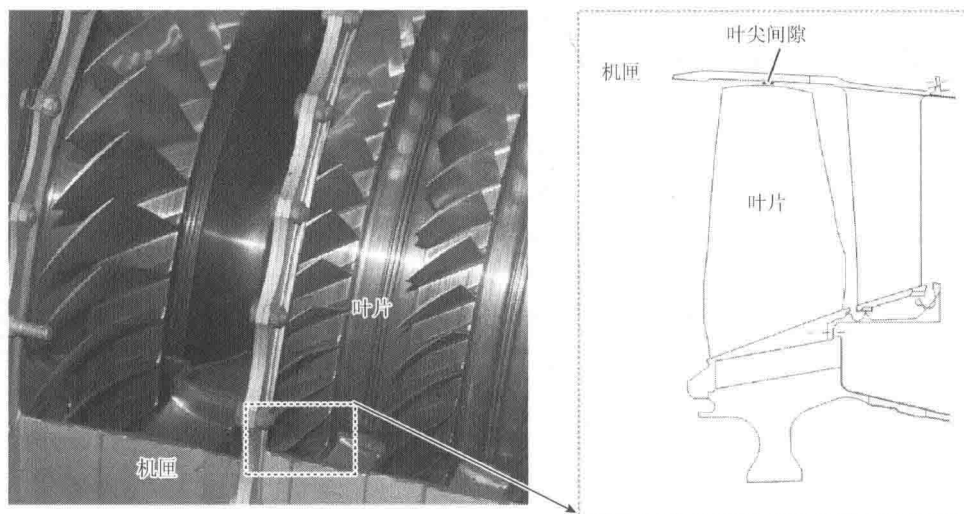


图 1.1 叶片-机匣间隙示意图

起火是由 F135 发动机第三级整体叶盘风扇叶片与机匣摩擦所致^[4]。这些叶片-机匣碰摩问题已经引起了国内外研究学者的广泛关注^[1, 2]。

对于转定子碰摩、叶片-机匣碰摩所导致的复杂振动响应,许多学者进行了大量的研究,也取得了丰硕的研究成果^[5-13]。Muszynska^[8]对旋转机械中碰摩相关的现象进行了总结,她指出在碰摩过程中会出现摩擦引起的磨损和发热、重复的周期性冲击、转轴刚化和随着法向接触力变化的耦合效应等。Ahmad^[9]探讨了不平衡、库仑摩擦、刚度硬化、外阻尼、旋转加速度、外激励频率、反向涡动、扭转载荷、盘的弹性和热效应对碰摩转子系统动力学特性的影响。陈予恕和张华彪^[10]指出目前国内外对于碰摩故障的研究主要集中在碰摩系统的复杂动力学、碰摩与其他故障的耦合动力学等方面。江俊和陈艳华^[11]从动力学与控制的角度对过去半个世纪有关转定子碰摩的研究成果进行了归纳和总结,并将现有的转定子碰摩模型分成两类,即碰摩局部模型和碰摩系统模型;并以典型碰摩非线性响应为主线,分别介绍了有关同频碰摩响应、谐波周期碰摩响应、准周期局部碰摩响应、干摩擦自激反向全周涡动响应、碰摩的全局响应行为以及碰摩响应的分岔与混沌方面的研究成果。Jacquet-Richardet 等^[12]指出碰摩故障本质上是高度非线性问题,涉及多物理场和多尺度耦合行为。

Muszynska 指出碰摩通常发生在密封处,叶片-机匣碰摩很少出现,一旦出现则十分危险^[8]。文献[11]则对叶片-机匣碰摩给出了如下描述:“众所周知,碰摩经常发生在密封件上,而叶片-机匣的碰摩发生较少,但此种碰摩一旦发生更为危险。这是因为叶片尖端处有更高的线速度,碰摩能量大,对转子动力学的影响也大。叶片-机匣的碰摩是更加复杂的冲击过程:①碰撞发生在柔性体与致密弹性体间,或柔性体与柔性体间(机箱为薄壳时),碰撞力将主要取决于碰撞柔性体本身的整体变形,而非局部变形;②由于叶尖与线速度方向有一定的夹角,叶片碰撞为斜碰撞,容易诱发叶片的弯扭耦合变形;③叶片在碰摩过程中,自身位置有明显的移动,所以,冲击不能看成是瞬时的。”从这些描述可知,叶片-机匣碰摩具有较大的危险性,且相对于转定子碰摩更为复杂。

由上述文献可知,现阶段的研究多集中于转子与定子之间的碰摩故障研究,而对于叶片-机匣碰摩的研究还很少。相对于转定子碰摩,叶片-机匣碰摩涉及更多的动力学特性,如旋转导致的离心刚化、旋转软化和科氏力等。此外,碰摩激励对航空发动机整机振动也会产生一定的影响。因此,建立准确的叶片-机匣碰摩模型,掌握叶片和机匣碰摩过程中存在的振动、摩擦和冲击的耦合规律,预估叶片在典型工况下的振动响应,掌握其复杂非线性动力学行为,对于叶片的结构设计以及提高航空发动机整机性能具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 叶片-机匣碰摩模型研究

根据不同的碰撞和摩擦假设,针对未涂层机匣,叶片-机匣碰摩模型可分为以下7种类型:①基于准静态假设,考虑碰撞能量守恒,文献[14]~文献[16]分别开发了3种法向碰摩力模型(NRFMCCEC)。这些模型能考虑叶片的几何尺寸,如叶片的长度、截面惯性矩和叶片-机匣的摩擦系数。此外,文献[15]和文献[16]所提碰摩模型还考虑盘的半径以及转速的影响,而文献[16]则进一步考虑了机匣刚度的影响。②当金属叶片刮研金属机匣时,叶尖可能熔化,并在冷却的金属表面沉积下来,在这种情况下切向和法向碰摩力类似于挤压油膜轴承力。基于这个类比,文献[17]开发了熔化黏着模型(SRM)。③假定法向碰摩与侵入深度成比例或非比例关系,线性或非线性弹簧模型(LSM或NLMS)被开发出来^[18-25],这些模型广泛用于传统转定子碰摩模拟。④对于点碰摩或者局部碰摩这种特殊的碰摩形式,法向碰摩力类似于周期性脉冲载荷,针对这种特殊的碰摩工况,许多学者采用多种脉冲力形式如半正弦波、矩形脉冲和锯齿脉冲来模拟叶片-机匣局部碰摩^[26-31]。⑤考虑叶片-机匣碰摩导致的附加约束影响,文献[32]和文献[33]开发了一个约束碰摩模型(CMMFR)。⑥考虑弹性叶片和机匣的结构刚度、叶尖和机匣涂层的局部刚度以及碰摩过程中的能量损耗影响,文献[34]提出了一个滞回接触力模型(HCFM)。⑦采用解析或有限元方法,叶片-机匣碰摩可以简化为带有冲击、摩擦和初始间隙的动接触问题^[35-51],这些碰摩模拟方法统称为基于接触动力学的碰摩模型(RMBOCD)。

1. 基于碰撞能量守恒的法向碰摩力模型

假定未涂层机匣为刚性,Padovan等^[14]将叶片简化为一个悬臂梁(图1.2),在单叶片碰摩情况下,推导了法向碰摩力 F_n 和侵入量 δ 之间的关系。

$$F_n = \frac{\pi^2 EI}{4 L^2} \frac{\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\delta}{L}}}{\mu + \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\delta}{L}}} \quad (1.1)$$

式中, E 、 I 、 L 、 δ 和 μ 分别为杨氏模量、叶片截面惯性矩、叶片长度、侵入深度和摩擦系数。

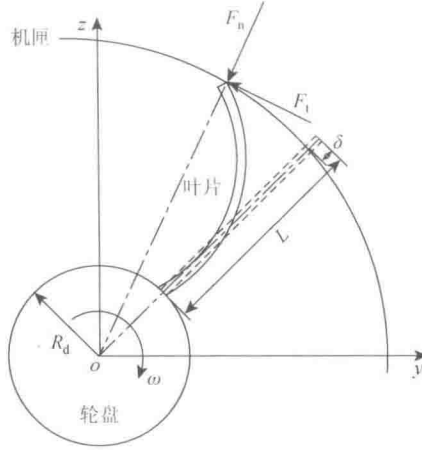


图 1.2 叶片-机匣碰摩示意图

F_n -法向碰摩力； F_t -切向碰摩力； δ -侵入深度； ω -旋转角速度； R_d -轮盘半径； L -叶片长度

考虑叶片旋转导致的离心刚化影响，基于 Padovan 模型，Jiang 等^[15]推导了一个修订的法向碰摩力模型。

$$F_n = 2.5 \frac{EI}{L^2} \frac{1.549 \sqrt{\frac{\delta}{L}}}{\mu + 1.549 \sqrt{\frac{\delta}{L}}} + \frac{11}{56} \rho A L \omega^2 \left(\frac{5}{22} L + \frac{35}{22} R_d \right) \frac{1.549 \sqrt{\frac{\delta}{L}}}{\mu + 1.549 \sqrt{\frac{\delta}{L}}} \quad (1.2)$$

式中， ρ 为材料密度； A 为叶片截面面积； ω 为旋转角速度； R_d 为轮盘半径；其余参数同式 (1.1)。考虑机匣刚度的影响，基于 Jiang 等推导的模型，Ma 等^[16]提出了一个改进的叶片-机匣法向碰摩力模型，并通过模型实验，验证了所提模型的有效性。

2. 熔化黏着模型

叶片-机匣碰摩过程中，考虑叶尖熔化并沉积在冷的金属表面（图 1.3）。在这种碰摩情况下，叶尖切向力可以通过在黏性介质内的移动速度 u 来评估；法向碰摩力通过叶尖和机匣之间的相对径向速度来确定。类比在挤压油膜器的切向和法向碰摩力，在大叶片宽厚比（ b/a ，叶片宽度与厚度比值）情况下，Kascak 等^[17]提出了熔化黏着模型。该模型的法向和切向碰摩力为

$$\begin{cases} F_n = cvb \left(\frac{a}{h} \right)^3, & F_n \leq F_s \\ F_n = k_c (r - C), & F_n > F_s \\ F_t = \frac{cuab}{h} \end{cases} \quad (1.3)$$

式中， c 为熔化金属的黏度； F_s 为封严基体的支承力； k_c 为机匣刚度； r 为叶尖径

向位移; C 为叶尖-机匣径向间隙; 其余参数详见图 1.3。

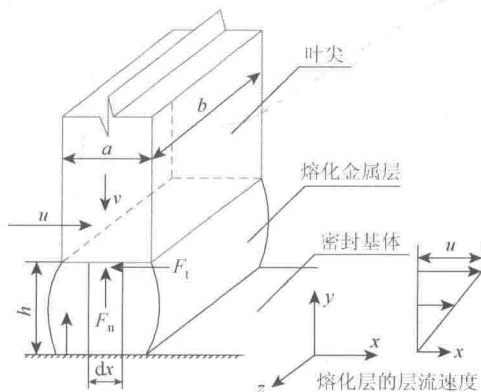


图 1.3 熔化黏着模型示意图

a -叶尖厚度; b -叶尖宽度; h -熔化金属的厚度; v -径向叶尖侵入速度; u -切向叶尖速度; F_n -法向碰摩力;
 F_t -切向碰摩力

3. 线性或非线性弹簧模型

一个广泛应用于转定子碰摩的线性弹簧模型, 假定法向碰摩力与侵入深度成正比。很多学者采用这个模型来模拟叶片-机匣碰摩, 该模型简单, 且在一些情况下是有效的^[18-25]。通过确定间隙函数(图 1.4), Parent 等^[18]采用线性弹簧来确定叶片-机匣法向碰摩力。

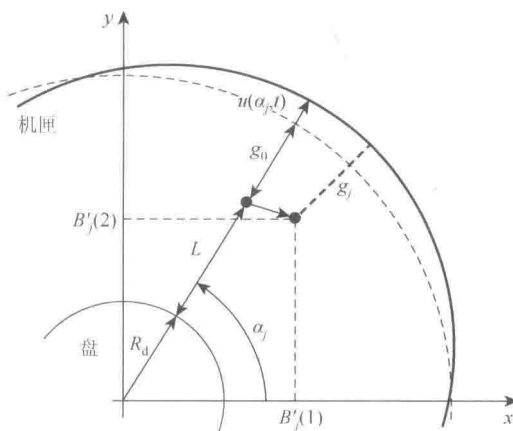


图 1.4 间隙定义示意图

R_d -轮盘的半径; L -叶片长度; g_0 -初始叶尖间隙; $u(\alpha_j, t)$ -法向机匣变形; g_j -第 j 个叶片间隙函数;
 $B'_j(1)$, $B'_j(2)$ -第 j 个叶尖位置