

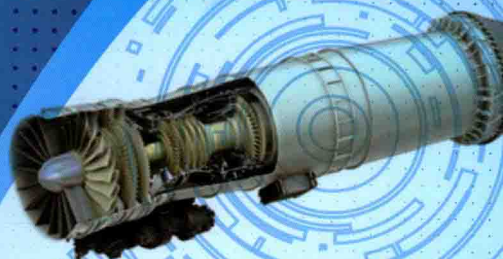


国防科技图书出版基金

Methods and Characteristics
of Fluid Excited Vibration
for Bladed Disk in Aero-Engine

航空发动机叶盘结构 流体激励耦合振动

王建军 李其汉 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

航空发动机叶盘结构 流体激励耦合振动

Methods and Characteristics of
Fluid Excited Vibration for Bladed Disk
in Aero - Engine

王建军 李其汉 等编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机叶盘结构流体激励耦合振动/王建军等编著.

—北京:国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-10784-5

I. ①航… II. ①王… III. ①航空发动机-结构-研究 IV. ①V232.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 221417 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 19½ 字数 362 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

航空发动机的叶盘转子是极其重要的关键性部件,叶盘振动问题一直是航空发动机和燃气轮机设计和使用中的关键问题之一。

长期以来,国内外对叶盘振动问题一般是将叶盘结构分为叶片和轮盘,在确定它们的固有模态后,基于避开共振原则进行振动设计。但是,随着先进航空发动机的发展,叶片和轮盘结构设计使得整体叶盘结构的耦合振动问题更为突出。此外,叶盘结构工作在复杂非定常流体环境中,其振动问题本质上是流体激励环境的耦合振动(共振和振动响应)问题。因此流体激励下叶盘结构耦合振动问题成为国内外学术界和工程界长期致力于解决的问题和研究工作的重点。

另外,叶盘结构的失谐导致振动局部化而严重影响其高周疲劳寿命。在流体激励的耦合振动环境中,不仅叶盘结构存在失谐,激励流场也同样存在失谐。因此,叶盘结构的流体激励耦合振动实际上是具有双重失谐的耦合振动。基于这样的概念,叶盘结构和叶片的振动问题将超出原有设计准则的规范范围,从而必须深入研究这方面的理论、方法和技术,为叶盘结构和叶片的振动分析与振动设计提供技术支持。

10 余年来,在国家自然科学基金、国家“863 计划”项目、国家安全重大基础研究项目、国家 AP 计划项目、国家 AA 计划项目、航空科学基金和国家博士后基金等的支持下,结合我国重要航空发动机型号的研制和排故,我们研究了叶盘结构在流体激励环境下的谐调和失谐状态的振动响应问题。本书是对这些研究工作和我们所指导的博士研究生(姚建尧、于长波和辛健强等)学位论文的归纳和总结,较为系统深入地介绍了流体激励叶盘结构双重失谐耦合振动问题的分析理论、计算方法和基于高保真有限元模拟的典型工程叶盘结构振动响应特性。

本书与作者已出版的《航空发动机失谐叶盘振动减缩模型与应用》(国防工业出版社,2009 年)一起,构成了叶盘结构振动分析的模拟技术、研究方法和基本特性的系统论述。《航空发动机失谐叶盘振动减缩模型与应用》的重点是叶盘结构振动分析的高保真有限元建模技术,而本书则是基于高保真模拟的典型工程叶盘结构流体激励耦合振动的共振激励原理和振动响应的分析方法、特点和基本规律的研究。

本书除第 1 章概述外,其他内容分为四部分展开。第一部分是第 2 章至第 5 章,系统介绍了进行叶盘结构振动响应计算的各种方法。考虑到工程叶盘结构振

动分析的模型规模较大、计算繁复,给出了适用于叶盘结构的若干自由度减缩技术和高效时域求解算法等。第二部分是第6章和第7章,基于第一部分的计算方法,计算和研究了典型工程叶盘结构流体激励下的振动特性,包括确定性的和概率性的、时域的和频域的,具有多种结构失谐及其组合的等多方面的振动响应特性。特别是第7章,基于第2~5章的计算方法,提出了流体激励耦合振动响应的计算方法,从多方面系统研究了某型压气机转子叶盘在实际流体激励下的振动响应特性。第三部分由第8章至第10章组成,全面阐述和分析了流体激励叶盘结构振动问题的双重失谐基本概念、共振激励原理,研究了典型工程环境的失谐流体激励特性和在谐调、失谐流体激励下的谐调、失谐叶盘结构振动响应特性等。第四部分由第11章、第12章组成,第11章讨论了考虑陀螺效应时的叶盘振动问题,第12章则结合典型工程叶盘振动故障,说明了基于失谐设计抑制叶盘结构振动响应的实例。

本书成稿后,重庆大学姚建尧教授进行了系统的文字整理和公式编辑,并编写了1.3节叶盘结构的流固耦合分析等。

本书的研究工作得到作者所在课题组朱梓根、洪杰和李琳教授等多方面的帮助;得到北京航空航天大学陈懋章院士和刘宝杰教授,中航工业集团尹泽勇院士,中航工业沈阳发动机设计研究所张连祥、杨士杰副总设计师等的大力支持。在此,表示衷心感谢。

王建军 李其汉

北京航空航天大学405教研室

2015.5

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 航空发动机叶盘结构振动与失谐振动局部化	1
1.1.1 叶盘结构振动与失谐振动局部化	1
1.1.2 叶盘共振和振动响应评价问题	3
1.2 叶盘的结构动力学建模技术	4
1.2.1 叶盘结构振动分析模型	4
1.2.2 失谐的模拟技术	6
1.3 叶盘结构的流固耦合分析	7
1.3.1 叶盘结构的流固耦合问题	7
1.3.2 叶盘结构流体激励的模拟	9
1.3.3 叶盘结构的流固耦合方式	11
1.4 流体失谐设计与双重失谐振动问题	12
1.4.1 流体失谐设计问题	12
1.4.2 双重失谐叶盘结构流体激励振动问题	13
1.5 结构振动方程代数动力算法	14
1.6 科氏力对叶盘结构振动特性的影响	17
1.7 本书的主要内容和特点	18
第 2 章 整体叶盘结构振动响应求解方法	21
2.1 引言	21
2.2 振型叠加法	21
2.3 激励叠加法	23
2.4 基于时间差分的直接积分法	24
2.4.1 算法比较	24
2.4.2 Newmark 法	25
2.4.3 广义 α 法	26
2.5 精细积分法	27
2.6 常用算法比较	29

2.6.1	共振状态	29
2.6.2	非共振状态	33
2.7	本章小结	34
第3章	基于模型双重减缩的失谐叶盘时域响应求解方法	35
3.1	引言	35
3.2	失谐叶盘结构有限元模型的双重减缩基本原理	36
3.2.1	静力减缩原理	36
3.2.2	模态减缩原理	37
3.3	精细积分时域求解方法	38
3.4	板状叶盘结构分析实例	41
3.4.1	分析模型和模态特性	41
3.4.2	静力减缩-精细积分法的数值结果	42
3.4.3	模态减缩-精细积分法的数值结果	43
3.4.4	模型双重减缩(DRARM)的数值结果	44
3.4.5	DRARM 的数值效率	45
3.5	典型工程叶盘结构分析实例	47
3.6	本章小结	50
第4章	整体叶盘结构振动响应分析的代数动力算法	52
4.1	引言	52
4.2	代数动力算法基本格式	53
4.3	基于 Krylov 子空间的算法	54
4.3.1	标准 Krylov 子空间方法	54
4.3.2	重开始的 Krylov 子空间法	55
4.3.3	重开始 Krylov 子空间法的算法实现	56
4.4	基于多项式插值的算法	58
4.4.1	插值方法计算矩阵函数的基本思路	58
4.4.2	ReLPM 方法及其实现过程	59
4.4.3	ReLPM 方法的算法实现	60
4.5	代数动力算法在结构动力学方程时域求解中的应用及其改进	63
4.5.1	代数动力算法在结构动力学方程求解中的应用流程	63
4.5.2	稳定性问题	64
4.5.3	精度和效率问题	65
4.5.4	算法的改进措施	65
4.6	数值算例	66

4.6.1	悬臂板分析实例和算法特点	67
4.6.2	叶盘结构分析实例和算法特点	70
4.6.3	关于算法效率的说明	72
4.7	本章小结	73
第5章	基于周期性的叶盘结构振动瞬态响应计算方法	74
5.1	引言	74
5.2	基于扇区描述的叶盘结构振动方程的建立	75
5.2.1	叶盘结构振动方程及其约化	75
5.2.2	激励转换	78
5.3	谐调叶盘结构瞬态响应求解流程	80
5.3.1	系统矩阵的获取	80
5.3.2	谐调叶盘结构运动方程的求解流程	81
5.4	失谐叶盘结构建模和振动方程的求解流程	83
5.4.1	失谐叶盘运动方程的建立	83
5.4.2	失谐叶盘的求解策略和求解流程	84
5.5	基于周期对称性的模态减缩方法	86
5.5.1	扇区模型的模态减缩	86
5.5.2	周期对称模型模态减缩方法的计算流程	88
5.6	代数动力算法在扇区模型中的应用	89
5.7	谐调和失谐叶盘结构瞬态响应分析实例	90
5.7.1	谐调叶盘	90
5.7.2	失谐叶盘结构瞬态响应分析实例	93
5.8	本章小结	96
第6章	谐调和失谐叶盘模拟与振动特性分析	98
6.1	引言	98
6.2	叶盘结构模型和载荷模拟	98
6.3	谐调叶盘结构模态和响应特性	100
6.3.1	谐调叶盘结构模态特性	100
6.3.2	谐调叶盘结构频率响应特性	102
6.4	叶片失谐与模拟方法	104
6.4.1	基于弹性模量模拟的叶片失谐形式	104
6.4.2	叶片几何型面的失谐模拟	106
6.5	振动响应局部化的定量描述方法	107

6.6	随机失谐叶盘结构的概率响应特性	109
6.6.1	概率响应分析步骤	109
6.6.2	振动响应局部化概率特性	109
6.6.3	失谐程度与叶片振动频率响应特性	111
6.7	人为失谐叶盘结构的频率响应特性	112
6.7.1	人为失谐对谐调叶盘结构响应特性的影响	112
6.7.2	人为失谐对随机失谐叶盘结构响应特性的影响	115
6.8	错频叶盘结构的概率响应特性	119
6.8.1	叶片错频及其概率特性	119
6.8.2	错频叶片频差对叶盘概率振动响应局部化的影响	119
6.8.3	错频叶片频差对叶盘叶片概率振动响应特性的影响	121
6.9	本章小结	122
第7章	流体激励叶盘结构耦合振动响应分析	123
7.1	引言	123
7.2	叶盘结构流体激励振动响应分析方法	124
7.3	典型叶盘激励流场及其激励特性分析	126
7.3.1	三维非定常流场分析与流场激励特性	126
7.3.2	叶片表面压强幅值分布	129
7.3.3	激励节径阶次分析	132
7.4	典型叶盘结构模态特性	134
7.4.1	谐调叶盘模态特性	134
7.4.2	叶盘的失谐模拟	135
7.4.3	失谐叶盘模态特性	136
7.5	流体激励下叶盘结构频率响应分析	139
7.5.1	谐调叶盘频率响应分析	139
7.5.2	失谐叶盘频率响应分析	143
7.5.3	模态局部化和响应局部化的关系	147
7.6	流体激励下叶盘结构时域响应分析	154
7.6.1	关于流体激励下叶盘时域响应计算方法的比较	154
7.6.2	流体激励下谐调叶盘非共振状态响应分析	155
7.6.3	流体激励下谐调叶盘共振状态响应分析	161
7.6.4	流体激励下失谐叶盘时域响应分析	163
7.7	抑制失谐响应的几种措施	168
7.8	本章小结	170

第 8 章 流体激励叶盘结构双重失谐激励原理和特性分析	173
8.1 引言	173
8.2 流体激励叶盘结构的节径谱和共振问题	173
8.2.1 叶盘结构节径谱	174
8.2.2 流体激励节径谱	174
8.2.3 叶盘结构共振条件的空间“节径谱”	176
8.2.4 流体激励叶盘结构共振问题	177
8.3 谐调与设计失谐流体激励分析	178
8.4 结构谐调与失谐叶盘模态频率特性和振型节径特性	181
8.4.1 谐调叶盘结构与模态特性	181
8.4.2 叶盘结构的失谐与模态特性	183
8.5 谐调与设计失谐流体激励频率特性和空间节径特性	187
8.5.1 典型静子叶片的谐调和失谐分布设计	187
8.5.2 静子叶片谐调分布的流体激励特性	188
8.5.3 静子叶片失谐分布设计的流体激励特性	188
8.6 本章小结	192
第 9 章 谐调和失谐流场与流体激励特性分析	193
9.1 引言	193
9.2 谐调与设计失谐流体准三维流体动力学计算分析	194
9.2.1 两级全环流体动力学计算模型	194
9.2.2 典型流场的流体动力学基本特性	196
9.3 典型谐调非定常流场的激励特性	199
9.3.1 谐调流体频域激励特性	199
9.3.2 谐调流体空间激励特性	201
9.4 典型流体失谐分布 A 非定常流场的激励特性	202
9.4.1 流体失谐分布 A 激励频域分析	202
9.4.2 流体失谐分布 A 激励空间分析	204
9.5 典型流体失谐分布 B 非定常流场的激励特性	204
9.5.1 流体失谐分布 B 激励频域分析	205
9.5.2 流体失谐分布 B 激励空间分析	206
9.6 本章小结	207
第 10 章 双重失谐流体激励叶盘结构振动响应特性分析	208
10.1 引言	208

10.2	谐调流体激励下谐调叶盘结构振动响应特性	209
10.2.1	模拟流体激励下叶盘振动响应	209
10.2.2	典型流体激励下叶盘振动响应	211
10.3	谐调流体激励的失谐叶盘结构振动响应特性	213
10.3.1	模拟流体激励的失谐叶盘振动响应	213
10.3.2	典型流体激励的失谐叶盘振动响应	216
10.4	失谐流体激励下谐调叶盘结构振动响应特性	218
10.4.1	模拟流体失谐分布激励下谐调叶盘振动响应特性	218
10.4.2	典型流体失谐分布激励下谐调叶盘振动响应特性	222
10.5	模拟激励双重失谐叶盘振动响应特性	225
10.5.1	失谐流体激励的结构失谐模式Ⅰ叶盘振动响应特性	225
10.5.2	失谐流体激励的结构失谐模式Ⅱ叶盘振动响应特性	229
10.5.3	模拟失谐流体激励下结构失谐模式Ⅲ叶盘瞬态响应特性	232
10.6	典型流体激励双重失谐叶盘振动响应特性	235
10.6.1	典型失谐流体激励的结构失谐模式Ⅰ叶盘振动响应特性	235
10.6.2	典型失谐流体激励的结构失谐模式Ⅱ叶盘振动响应特性	236
10.6.3	典型失谐流体激励的结构失谐模式Ⅲ叶盘振动响应特性	237
10.7	谐调与设计失谐流体激励下叶盘的概率响应特性	239
10.7.1	谐调流体激励下结构失谐叶盘的概率响应特性	239
10.7.2	失谐流体激励下结构失谐叶盘的概率响应特性	240
10.8	本章小结	241
第11章	考虑陀螺效应的谐调和失谐叶盘结构振动特性	243
11.1	引言	243
11.2	旋转叶盘结构振动方程和分析	243
11.2.1	转动系统惯性力分析	243
11.2.2	考虑旋转效应的结构有限元方程	244
11.2.3	旋转叶盘振动方程	246
11.2.4	典型叶盘结构有限元模型和分析方法	248
11.3	旋转效应下谐调叶盘结构模态特性	248
11.3.1	离心力对谐调叶盘模态特性的影响	248
11.3.2	科氏力对谐调叶盘模态特性的影响	250
11.3.3	离心力和科氏力共同作用的谐调叶盘模态特性	253
11.4	旋转效应下失谐叶盘结构模态特性	255
11.4.1	不同转速下离心力对失谐叶盘模态特性的影响	255
11.4.2	离心力和科氏力共同作用下失谐叶盘模态特性	257

11.5	旋转效应下谐调叶盘结构频率响应特性	259
11.5.1	工作转速下谐调叶盘的频率响应特性	259
11.5.2	半工作转速下谐调叶盘的频率响应特性	260
11.6	旋转效应下失谐叶盘结构频率响应特性	261
11.6.1	工作转速下失谐叶盘的频率响应特性	261
11.6.2	半工作转速下失谐叶盘的频率响应特性	263
11.6.3	不同失谐模式的叶盘频率响应特性	265
11.7	本章小结	266
第12章	基于失谐设计的典型叶盘振动响应抑制	267
12.1	引言	267
12.2	有限元模型与激励载荷	267
12.2.1	模型和失谐模拟	267
12.2.2	激励载荷	268
12.3	典型频率范围阶次激励频率响应特性	269
12.3.1	频率范围1的频率响应特性	269
12.3.2	频率范围2的频率响应特性	271
12.4	实验状态频率响应特性数值模拟	272
12.5	给定激励频率的叶盘结构频率响应特性	273
12.5.1	第1组频率激励的频率响应	273
12.5.2	第2组频率激励的频率响应	274
12.5.3	第3组频率激励的频率响应	275
12.6	本章小结	275
参考文献		277

Contents

1. Introduction	1
1.1 Vibration and mistuned vibration localization of aeroengine bladed disks	1
1.1.1 Vibration and mistuned vibration localization in bladed disks	1
1.1.2 Assessment of resonance and vibration response for bladed disks	3
1.2 Structural dynamics modeling techniques of bladed disks	4
1.2.1 Structural models for vibration analysis of bladed disks	4
1.2.2 Simulation and modeling methods for mistuning	6
1.3 Fluid structure interaction analysis of bladed disks	7
1.3.1 Fluid structure interaction problems in bladed disks	7
1.3.2 Simulation methods for fluid excitations	9
1.3.3 Coupling schemes for fluid structure interactions	11
1.4 Fluid excitation mistuning and vibration problem with mistuning in both fluid and structure	12
1.4.1 Design of fluid excitation mistuning	12
1.4.2 Fluid excited vibration of bladed disks with mistuning in both fluid and structure	13
1.5 Algebraic dynamical algorithm for structural vibration equations	14
1.6 Effects of Coriolis force on bladed disk's vibration characteristics	17
1.7 Outlines and features of this book	18
2. Numerical methods for vibration response analysis of bladed disks	21
2.1 Introduction of this chapter	21
2.2 Modal superposition method	21
2.3 Fluid excitation superposition method	23
2.4 Direct time – integration methods	24
2.4.1 Comparisons between methods	24
2.4.2 Newmark method	25
2.4.3 Generalized α method	26
2.5 Precise integration methods (PIM)	27

2.6	Comparisons between the common methods	29
2.6.1	Resonance state	29
2.6.2	Non – resonance state	33
2.7	Summary of this chapter	34
3.	Time domain analysis of mistuned bladed disks using doubly response analysis reduction method (DRARM)	35
3.1	Introduction of this chapter	35
3.2	Theories of doubly response analysis reduction method	36
3.2.1	Guyan (static) reduction theory	36
3.2.2	Modal reduction theory	37
3.3	Time domain analysis using precise integration method	38
3.4	Numerical example of a simplified bladed disks	41
3.4.1	FE model and modal characteristics of the example bladed disks	41
3.4.2	Numerical results of Guyan reduction – PIM method	42
3.4.3	Numerical results of modal reduction – PIM method	43
3.4.4	Numerical results of DRARM	44
3.4.5	Numerical efficiency of DRARM	45
3.5	Numerical example of an industrial bladed disks	47
3.6	Summary of this chapter	50
4.	Algebraic dynamical algorithms for response analysis of bladed disks	52
4.1	Introduction of this chapter	52
4.2	Basic format of algebraic dynamical algorithms	53
4.3	Algorithms based on Krylov subspace	54
4.3.1	Standard Krylov subspace methods	54
4.3.2	Restarted Krylov subspace methods	55
4.3.3	Realization of restarted Krylov subspace methods	56
4.4	Algorithms based on polynomial interpolation	58
4.4.1	Basic theory of matrix function calculation using interpolation method	58
4.4.2	ReLPM and its realization	59
4.4.3	Algorithms of ReLPM	60
4.5	Applications and improvements of algebraic dynamical algorithm (ADA) ...	63
4.5.1	Procedures for applications for ADA	63