



高速叶轮机流动稳定性

Internal Flow Stability in High-speed Turbomachinery

孙晓峰 孙大坤 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

国防科技图书出版基金

高速叶轮机流动稳定性

Internal Flow Stability in
High-speed Turbomachinery

孙晓峰 孙大坤 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

高速叶轮机流动稳定性 / 孙晓峰, 孙大坤著. —北京:
国防工业出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-118-11477-5

I. ①高… II. ①孙… ②孙… III. ①叶轮机械流体
动力学-流动稳定性 IV. ①TK12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 315325 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)

北京龙世杰印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 27 字数 514 千字

2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 260.00 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

本书由中央军委装备发展部**国防科技图书出版基金**资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,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。这是一项具有深远意义的创举。

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中央军委装备发展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,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展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。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,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 赵伯桥

秘 书 长 赵伯桥

副 秘 书 长 许西安 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

高速叶轮机的流动稳定性问题涉及广泛的工程应用领域,尤其是与航空发动机压缩系统相关的流动稳定性问题,如喘振、旋转失速,直接关系到发动机的性能与安全,从 20 世纪 50 年代在实验中发现这些现象开始其就受到了极大关注。可以说对它的精确预测与有效控制迄今仍旧是这个领域研究人员孜孜以求的目标。此外,随着微电子、控制技术、新型传感器技术的发展,以及计算能力与方法日新月异的变化,研究叶轮机流动稳定性的方式在 20 世纪 90 年代伊始就发生了显著变化,一方面叶轮机流动稳定性主动控制方法的提出让人们看到了未来智能发动机的雏形,另一方面基于大规模并行技术的计算流体力学(CFD)非定常计算方法的应用终于有可能实现叶轮机流动稳定性从先兆到非线性发展的全过程数值模拟,且充分与叶片复杂几何造型相关联,而这一点对研究叶轮机叶片造型对稳定性设计的影响至关重要。所以,站在二十几年前这一时间窗口,看到叶轮机稳定性这样一幅生动的研究画面,确实有众多的专家不禁感到只要沿着既有的技术路线一步一个脚印地往前走,叶轮机流动稳定性设计以及主动控制问题就很有可能迎刃而解。

然而,二十几年过去了,人们并没有看到叶轮机稳定性沿着既有的路线图取得所期望的进展。在叶轮机流动稳定性主动控制方面,由于其基本原理是基于“对消”方法,即首先探测叶轮机稳定性先兆,然后用相位相反、幅值相等的信号加以对消,但研究发现,高速叶轮机无论是喘振或是旋转失速先兆,从线性到非线性演化往往只有几十毫秒,难以用机械元件组成的作动机构进行实时控制。所以,几乎十多年前这个途径就基本戛然而止。此外,用 CFD 作为初边值问题对叶轮机稳定性进行数值模拟,除了初始扰动需要靠经验“试凑”给出外,少则数个星期,多则数月的计算时间是叶轮机在设计阶段难以承受之重。由此看来,无论是对叶轮机稳定性的实时控制方法,或是在设计阶段考虑叶片造型对稳定性的影响,都需要一种全新的理念与研究角度来回答这些关切。事实上,本书除了用一章的篇幅总结过去几十年叶轮机稳定性,如喘振、旋转失速的经典模型以外,其余全部内容,包括从

理论模型、数值计算到实验研究,都是我们团队沿着自己的理论构想和技术路线,独立研究工作的总结。

(1) 从时空模态分解与匹配方法出发,建立了三维可压缩压气机旋转失速稳定性理论模型并给出了相应的特征值计算方法。与已有的经典二维稳定性模型相比,由此发现了壁面边界条件对稳定性的显著影响。据此进一步发展了一种失速先兆抑制型机匣处理技术,从而把传统的控制局部流动的机匣处理方法拓宽到壁面全局稳定性设计控制技术。

(2) 基于 Navier-Stokes 方程(N-S 方程)和复杂固体边界的广义函数描述,利用正在发展的流体力学全局稳定性方法,建立了叶轮机通用流动稳定性特征值理论,可以有效包含任意叶片造型对流动稳定性的影响。与目前建立在初边值问题上完成同样稳定性预测的计算方法相比,利用特征值判断稳定性可以把计算时间从数星期或数月缩短为数小时。这不仅回归了寻求流动稳定性判据的正确途径,而且其高的计算效率,可以真正用于风扇/压气机叶片气动稳定性设计。

(3) 基于系统旋涡-环量-载荷-扰动的失稳机理分析,提出了一种基于涡动力学与 Kutta-Joukowski 升力定理的实时失速预警方法,通过分析近场压力扰动的变化实时监测系统稳定性。这种新的测量分析原理大大不同于当前从各种非定常旋涡及其波动的蛛丝马迹中寻找失稳迹象的测量分析方法。实验结果表明,该方法能够将预警时间提高 80~100 倍。已经将这种预警方法与失速先兆抑制型机匣处理技术相结合,构建了一种从先兆捕捉到作动机构完全不同于已有主动控制路线的新的叶轮机稳定性自适应控制方法。

本书正是围绕上述三个方面的工作逐章展开。相对于已有的叶轮机流动稳定性预测模型与控制方法,书中呈现的内容可谓是“另起炉灶”。的确,我们一直试图把对叶轮机流动稳定性理解的独立价值观融入到我们持续二十多年的研究活动之中。这样的坚持要特别感谢国家自然科学基金委从面上、杰出青年到系列重点项目的不间断支持,尤其是国家自然科学基金委一直倡导的追求卓越、注重原始创新的理念已经牢记于心,是研究行动的真正动力。此外,也要特别感谢中国燃气涡轮研究院的持续资助和率先开展的应用研究,让我们更坚信它的工程应用前景。同时也特别感谢先进航空发动机协同创新中心和国防科技图书出版基金对本书予以资助。最后,还要感谢我们团队在这个方向工作的历届研究生们,没有他们逐年累月的工作积累以及完成的学位论文,不可能在这么短的时间内完成这本书的内容。

相对于高速叶轮机流动稳定性理论与控制所展现的内在复杂性,本书仅仅是从一个特定角度诠释了我们的构想和研究进展。倘若这一努力能够丰富人们对叶轮机流动稳定性机理的认识并能在实际应用中发挥作用,我们会倍感欣慰;倘若还能进一步抛砖引玉,继而使更好、更深入的叶轮机流动稳定性方面的研究成果不断涌现,则正是我们的期望所在。

为此,由衷希望同行批评指正。

孙晓峰 孙大坤

2017年6月

目 录

符号表	1
第1章 绪论	3
1.1 高速叶轮机设计工作中面临的内部流动稳定性问题.....	3
1.1.1 航空发动机智能化对多级压缩系统流动稳定性的要求.....	4
1.1.2 高速叶轮机流动稳定性带来的问题	5
1.2 国内外现状分析及研究进展	8
1.2.1 高速叶轮机流动失稳现象观察与机理认识	8
1.2.2 高速叶轮机流动稳定性失速起始理论预测方法	12
1.2.3 高速叶轮机流动稳定性扩稳设计方法	15
1.3 高速叶轮机流动稳定性研究	27
参考文献	29
第2章 压气机流动稳定性经典模型	36
2.1 二维小扰动稳定性模型	38
2.1.1 Emmons 模型	38
2.1.2 Stenning 模型	42
2.1.3 Stenning 模型与 Emmons 模型的异同	49
2.2 Greitzer 模型	50
2.3 压缩系统动态特性分析模型——DYNTECC	56
2.4 小结	58
参考文献	59
第3章 叶轮机流动稳定性三维解析预测模型	62
3.1 叶轮机流动稳定性三维解析预测模型的建立	62
3.1.1 跨声速稳定性模型概述	63
3.1.2 扰动控制方程和求解方法	67

3.1.3	跨声速模型匹配条件的推导和特征方程的导出	78
3.1.4	小结	95
3.2	环绕积分方法求解稳定性方程特征值问题	95
3.2.1	传统迭代方法	96
3.2.2	环绕积分法	97
3.2.3	环绕积分方法数值验证分析	100
3.2.4	软壁面边界条件的稳定性模型的数值解法	106
3.3	三维旋转失速稳定性理论模型算例分析	108
3.3.1	亚声速压气机失速起始点理论预测	108
3.3.2	高亚声速压气机失速起始点理论预测	113
3.3.3	跨声速压气机失速起始点理论预测	115
3.3.4	多级压气机失速起始点理论预测	118
3.4	小结	128
	参考文献	128

第4章 叶轮机流动稳定性通用理论

4.1	理论架构	131
4.1.1	基本思想	131
4.1.2	理论建立	133
4.2	简化模型	135
4.2.1	简化方式概述	135
4.2.2	子午面模型	136
4.2.3	流线模型	139
4.2.4	径向展开模型	140
4.3	叶片力建模	141
4.3.1	叶片力建模概述	141
4.3.2	叶片力模型	143
4.4	边界条件和匹配条件	144
4.4.1	边界条件	144
4.4.2	匹配条件	145
4.5	求解方法	145
4.5.1	谱方法数值离散	145
4.5.2	奇异值分解法	147
4.5.3	数值解法的校核	149

4.6 小结	150
参考文献	151
第5章 叶轮机流动稳定性通用理论在轴流压气机中的应用	153
5.1 轴流压气机失稳点预测	153
5.1.1 亚声速压气机	153
5.1.2 高亚声速压气机	159
5.1.3 跨声速压气机	163
5.2 压缩性对失稳点预测的影响	165
5.2.1 压缩性概述	165
5.2.2 高亚声速流动稳定性结果对比	166
5.2.3 跨声速流动稳定性结果对比	166
5.3 叶尖间隙对稳定裕度的影响	168
5.3.1 叶尖间隙简述	168
5.3.2 参数化研究	168
5.4 叶片造型对稳定裕度的影响	170
5.4.1 弯掠设计概述	170
5.4.2 参数化研究	171
5.5 基于失速先兆波特征频率的失速演化数值模拟	177
5.5.1 基于失速先兆波特征频率的失速演化数值模拟方法	177
5.5.2 结果分析与讨论	179
5.6 小结	183
参考文献	183
第6章 叶轮机流动稳定性通用理论在离心压气机中的应用	185
6.1 NASA 低速离心压气机简介	186
6.2 定常 CFD 计算	186
6.3 100%设计转速	187
6.3.1 子午面模型结果	187
6.3.2 径向展开模型结果	189
6.4 75%设计转速	190
6.4.1 子午面模型结果	190
6.4.2 径向展开模型结果	191
6.5 小结	192

参考文献	194
第 7 章 SPS 机匣处理扩稳理论设计方法	196
7.1 包含机匣处理的压气机流动稳定性模型	196
7.1.1 SPS 机匣处理概念的提出	197
7.1.2 包含 SPS 机匣处理的壁面边界模型	200
7.1.3 带有机匣处理的稳定性模型	211
7.1.4 结果及讨论	213
7.2 SPS 机匣处理扩稳效果定量评估方法	218
7.2.1 SPS 机匣处理扩稳效果定量评估方法的建立	218
7.2.2 亚声速压气机流动稳定性扩稳效果定量评估算例	222
7.2.3 跨声速压气机流动稳定性扩稳效果定量评估算例	227
7.2.4 理论预测结果的分析与讨论	232
7.3 小结	233
参考文献	234
第 8 章 均匀来流条件下 SPS 机匣处理扩稳特征	236
8.1 SPS 机匣处理在亚声速压气机上的扩稳特征及效果	236
8.1.1 亚声速压气机	236
8.1.2 SPS 机匣处理结构设计	244
8.1.3 SPS 机匣处理在亚声速压气机中的扩稳特征	246
8.1.4 SPS 机匣处理对亚声速压气机效率的影响	258
8.2 SPS 机匣处理在跨声速风扇/压气机中的扩稳特征及效果	264
8.2.1 实验装置	265
8.2.2 参数定义	266
8.2.3 SPS 机匣处理的跨声速压气机扩稳特征及效果	268
8.3 小结	275
参考文献	275
第 9 章 进气畸变条件下 SPS 机匣处理扩稳特征	277
9.1 进气畸变和 SPS 机匣处理的相互作用机制	280
9.2 进气畸变实验方案简介	283
9.2.1 进气畸变流场实验模拟以及 SPS 机匣处理结构设计	283
9.2.2 畸变非均匀压力/速度畸变流场数据采集与处理技术	284

9.2.3 指标参数定义	285
9.3 实验结果及讨论	286
9.3.1 实壁机匣工作特性	286
9.3.2 进气畸变条件下压气机进口流场特性	287
9.3.3 进气畸变条件下 SPS 机匣处理扩稳实验	299
9.4 小结	323
参考文献	324

第 10 章 SPS 机匣处理扩稳机理实验研究..... 326

10.1 SPS 机匣处理扩稳机理实验分析方法	327
10.1.1 测试方案与数据处理	327
10.1.2 测试技术及分析手段校验	328
10.2 SPS 机匣处理扩稳机理的实验观察——亚声速压气机	330
10.2.1 失速瞬间过程动态信号对比	330
10.2.2 设计流量点动态信号对比	332
10.2.3 光壁临界失速点的失速先兆信号考察	333
10.2.4 动态信号随流量变化的观察	335
10.3 SPS 机匣处理扩稳机理实验研究——跨声速压气机	338
10.3.1 跨声速压气机失速过程分析——单支压力传感器信号	338
10.3.2 近失速点 PSD 分析对比	340
10.3.3 进入失速过程低频扰动信号的演化过程对比分析	341
10.4 进气畸变对失速先兆的影响	343
10.4.1 旋转畸变对失速先兆演化过程的影响	343
10.4.2 周向畸变对动态失速信号的影响	345
10.5 进气畸变条件下压气机近失速非定常特性	347
10.5.1 旋转畸变对压气机近失速非定常特性的影响	347
10.5.2 周向畸变对压气机近失速行为的影响	351
10.5.3 径向畸变对压气机近失速行为的影响	353
10.5.4 旋流畸变对压气机近失速行为的影响	357
10.6 叶片载荷展向分布	358
10.7 小结	360
参考文献	361

第 11 章 基于涡动力学和升力定理的实时失速预警方法 362

11.1 实验观察——压力信号随工作点的变化	363
------------------------------	-----

11.2	物理原理——旋转叶片的气动声学特性	365
11.2.1	压缩系统管道中的压力波	365
11.2.2	动态压力传感器测量的压力信号	367
11.2.3	动态压力传感器测量位置	368
11.2.4	叶片力与环量	370
11.2.5	周期性的量化评价	373
11.3	实验研究—— R_c 与稳定裕度的关系	373
11.3.1	试验台介绍	373
11.3.2	实验描述	375
11.3.3	实验结果分析	376
11.3.4	R_c 的统计特性	376
11.3.5	旋转失速与参数 R_c 的关系	378
11.3.6	实时失速预警方法	380
11.3.7	结果讨论	380
11.4	实时失速预警在线实施	381
11.4.1	实验台介绍	381
11.4.2	参数学习	382
11.4.3	光壁压气机的实时失速预警	383
11.5	结论	384
	参考文献	385
第 12 章	高速叶轮机流动稳定性自适应控制方法	388
12.1	新型机匣处理自适应控制概念及特点	391
12.2	SPS 机匣处理自适应控制方案设计	392
12.2.1	SPS 机匣处理结构设计	392
12.2.2	SPS 机匣处理自适应控制方案	399
12.3	SPS 机匣处理自适应控制实验演示	402
12.3.1	控制规律的“自适应”	402
12.3.2	SPS 机匣处理自适应控制效果	403
12.4	小结	405
	参考文献	406

Contents

Symbols	1
Chapter 1 Introduction	3
1.1 Internal Flow Stability in High-speed Turbomachinery Design	3
1.1.1 The Requirements of Smart Engine for the Flow Stability of Multi-stage Compression System	4
1.1.2 The Problem of Flow Instabilities in High-speed Turbomachinery ...	5
1.2 Current Situation and Progress of Research at Home and Abroad	8
1.2.1 Observation and Mechanism for Flow Instabilities for High Speed Turbomachinery	8
1.2.2 A Theoretical Prediction Method of Stall Inception for the Flow Stability of High-speed Turbomachinery	12
1.2.3 The Design Method of Flow Stability for High-speed Turbomachinery	15
1.3 Study on the Flow Stability of High-speed Turbomachinery	27
References	29
Chapter 2 Classical Model of Compressor Flow Stability	36
2.1 Two-dimensional Small Disturbance Stability Model	38
2.1.1 Emmons Model	38
2.1.2 Stenning Model	42
2.1.3 The Comparison Between Stenning Model and Emmons Model	49
2.2 Greitzer Model	50
2.3 Dynamic Analysis Model of Compressor System-DYNTECC	56
2.4 Conclusion	58
References	59
Chapter 3 The Three-dimensional Analytical Prediction Model for the Flow Stability of Turbomachinery	62
3.1 The Establishment of Three-dimensional Analytical Prediction	

Model of Turbomachinery Flow Stability	62
3.1.1 An Overview of the Transonic Stability Model	63
3.1.2 The Control Equation and the Solution Method	67
3.1.3 Dervation of Transonic Speed Model Matching Conditions and Characteristic Equation	78
3.1.4 Conclusion	95
3.2 Solving Eigenvalue Problems of Stability Equations by Using Winding Number Integrals	95
3.2.1 Traditional Iterative Method	96
3.2.2 Winding Number Integral Method	97
3.2.3 Numerical Analysis of Winding Number Integral Method	100
3.2.4 Numerical Method for Stability Model of Soft Boundary Condition	106
3.3 Numerical Analysis of Three-dimensional Rotating Stall Stability Model	108
3.3.1 Theoretical Prediction of the Stall Onset for Subsonic Compressor	108
3.3.2 Theoretical Prediction of the Stall Onset for High-subsonic Compressor	113
3.3.3 Theoretical Prediction of the Stall Onset for Transonic Compressor	115
3.3.4 Theoretical Prediction of the Stall Onset for Multi-stage Compressor	118
3.4 Conclusion	128
References	128
Chapter 4 General Theory of Flow Stability of Turbomachinery	131
4.1 Theoretical Framework	131
4.1.1 Basic Idea	131
4.1.2 The Construction of Theory	133
4.2 Simplified Model	135
4.2.1 An Overview of the Simplified Method	135
4.2.2 Meridional Model	136
4.2.3 Streamline Model	139
4.2.4 Radial Expansion Model	140

4.3	Blade Force Modeling	141
4.3.1	A Brief Description of Blade Force Modeling	141
4.3.2	Blade Force Model	143
4.4	Boundary Condition and Matching Condition	144
4.4.1	Boundary Condition	144
4.4.2	Matching Condition	145
4.5	Solving Method	145
4.5.1	The Numerical Discrete of Spectrum Method	145
4.5.2	Singular Value Decomposition Method	147
4.5.3	The Check of the Numerical Method	149
4.6	Conclusion	150
	References	151
Chapter 5 The Application of General Theory of Flow Stability of Turbomachinery in Axial Compressor		153
5.1	Prediction of Instability Point in Axial Compressor	153
5.1.1	Subsonic Compressor	153
5.1.2	High-subsonic Compressor	159
5.1.3	Transonic Compressor	163
5.2	Influence of Compressibility on Prediction of Instability Point	165
5.2.1	Overview of Compressibility	165
5.2.2	Comparison Between the Results of High-subsonic Flow Stability	166
5.2.3	Comparison Between the Results of Transonic Flow Stability	166
5.3	Influence of Blade Clearance on Stability Margin	168
5.3.1	Brief Description of Tip Clearance	168
5.3.2	Parametric Approach	168
5.4	Influence of Blade Shape on Stability Margin	170
5.4.1	Brief Description of Swept and Bow Blade	170
5.4.2	Parametric Approach	171
5.5	Numerical Simulation of Stall Evolution Based on Characteristic Frequency of Stall Inception Wave	177
5.5.1	A Numerical Simulation Method Based on the Frequency of the Stall Development	177