

马赫数对振荡涡轮叶片非定常流动影响的数值模拟

张正秋, 邹正平, 刘火星, 王延荣

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100083)

摘要: 对影响颤振稳定性关键参数进行研究, 并探讨颤振稳定性随关键参数的变化规律, 对颤振问题的研究具有重要意义。在进一步完善非定常雷诺平均 $N-S$ 方程求解程序的基础上, 基于影响系数法, 在不同振型下就出口马赫数对三维涡轮振荡叶片绕流的影响问题进行了数值模拟。数值模拟结果表明, 所发展的程序对振荡叶栅流动模拟具有较好的精度; 出口马赫数对振荡叶栅内部非定常流动以及叶片表面的非定常气动力将产生影响; 且不同模式下出口马赫数对非定常流动的影响规律表现不尽相同。

关键词: 振荡叶栅; 非定常流动; 振型; 数值模拟; 马赫数

中图分类号: TM623.94 文献标识码: A

引言

颤振是一种包含流体和结构系统稳定性的非定常现象, 虽然人们已进行了不少研究, 但由于其物理机制的复杂性, 导致在实际工程中, 颤阵预测方法很大程度上仍然依赖于经验参数和简化模型, 在燃气轮机试验或工作过程中, 不可预知的颤阵时有发生。因此, 深入研究颤阵物理机制, 并在此基础上发展可靠的颤振稳定性预测模型具有重要意义。

至今为止, 人们对叶轮机颤振问题进行了大量研究, 对其内部物理机制的理解也逐渐深入。Whitehead Verdon 和 Caspa 等人用完全位势方程的解作为定常解, 假设非定常参数随时间按正弦规律变化, 然后求解非定常参数, 形成线性位势分析法^[1-2], 它成为当时叶轮机中颤振预估的主要方法, 但通常这种方法只适用于二维流动。20 世纪 80 年代早期, 人们开始了用非线性的 Euler 和 $N-S$ 方程求解叶栅振动引起的非定常流动研究^[3-4], 研究使得人们对振动叶栅的非定常气动力有了更深层次的理解。在数值方面, Nichols 和 Heikkinen 发展了一种全隐式的子迭代算法来加快程序的收敛速度, 并结合运动网格来进行运动边界问题的研究, 同时

对计算结果进行了一系列验证工作^[5]。相对而言, 国内在公开发表的文献上还未见到振荡叶栅方面相关的实验研究, 但在 CFD 方面, 已有学者对振荡叶栅内部非定常流动和颤振模型的发展进行了卓有成效的研究工作^[6-8]。

分析影响颤振稳定性的因素, 并围绕关键参数进行参数化研究, 探讨颤振稳定性随关键参数的变化规律, 对颤振稳定性判断准则的提出具有重要意义。众所周知, 在雷诺数进入自模化区域后, 马赫数是影响气动性能的重要参数之一, 其对气动性能的影响已为大家熟知, 但马赫数对颤振的影响规律则并不多见, 仍需进一步研究。本研究则主要基于影响系数法在保证折合频率和来流攻角等相同时 (Bjalis 和 Fransson 进行的环形叶栅实验已经表明影响系数法是有效的, 且在跨音状态下, 影响系数法对颤阵稳定性的判断仍然有效^[9]) 利用非定常流动数值模拟程序对由低压涡轮转子叶片组成的扇形振荡叶栅在不同振型和不同出口马赫数下的非定常流动进行了模拟, 并与实验结果进行了对比; 分析探讨了马赫数对非定常流动的影响。

1 研究方法

1.1 数值方法

在 Denton 三维叶轮机粘性流动数值模拟的基础上^[10], 引入了双重时间步法^[11], 并参照 Nichols 等人的方式考虑 GCI 的影响^[12]。在此基础上, 发展了一种基于代数法的三维运动网格生成方法, 使得网格的变形可以快速准确的实现^[13]。实际算例表明, 该运动网格生成方法快速、可靠, 并适用于复杂拓扑结构的网格。

1.2 算例

计算模型为 Fransson 等人设计的试验扇形叶

收稿日期: 2009-04-01; 修订日期: 2009-06-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50776003)。

作者简介: 张正秋 (1979-) 男, 辽宁铁岭人, 北京航空航天大学博士研究生。

栅^[14]，由某低压涡轮转子叶片构成，实验设备如图1所示，表1给出了实验气动条件，叶片运动的方式轴向弯曲、周向弯曲和扭转运动，其中扭转运动的扭转轴位于弦长的40%处。实验时，只有中间叶片以 $\alpha(t) = A e^{i\omega t}$ 的形式运动，其中A为振幅， ω 为振动频率，其它叶片静止不动，振荡叶片折合频率为0.1。其中，中间运动的叶片定义为0叶片，相邻叶片分别定义为+1叶片和-1叶片，本研究非定常计算域完全模拟扇形实验叶栅，图2为计算模型和网格，图中同时给出了振荡叶片表面网格和叶尖间隙网格，叶尖间隙为1%叶高，数值模拟中网格总数为507万，0叶片振动频率根据折合频率、来流速度以及叶片弦长获得。

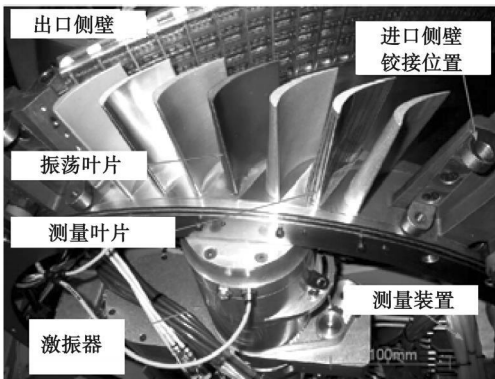


图1 影响系数法实验图示

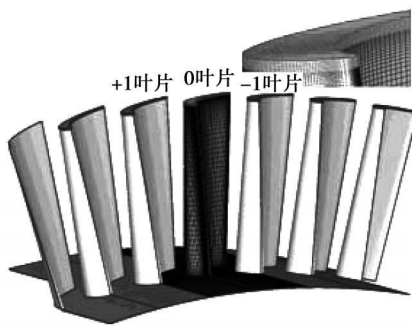


图2 计算模型和网格

2 结果与分析

定常压力系数 ζ 定义为静压与来流动压头的比值。在全局坐标系下，非定常气动力响应（非定常气动力是对叶片振动的响应，因此称其为非定常气动力响应）可以表示为叶片运动的形式： $\zeta_A(x, t) = \zeta_A(x) e^{i(\omega t + \phi)}$ ，其中 $\zeta_A(x)$ 为非定常气动力一阶谐波的幅值，定义为静压与来流动压头和振幅（角度）乘积的比值； ϕ 表示非定常气动力响应和叶片振

动的相位差，当非定常气动力响应领先于振动时，相位差为正。为了避免产生相位值大于 360° 的情况，相位值被限制在 $\pm 180^\circ$ 范围内，因此实际上 $+180^\circ$ 和 -180° 对应同一个角度。

表1 相关实验条件

	各个工作点		
	L1	M1	H1
流量 $m / (kg \cdot s^{-1})$	2.36	3.64	4.89
进口总温 T_{01} / K	303	303	303
进口总压 P_{01} / kPa	112.3	128.4	160.6
出口静压 P_2 / kPa	102.9	105.8	107.5
出口马赫数 M_2	0.37	0.62	0.71
进口气流角 $\alpha_1 / (^\circ)$	-23.9	-21.1	-22.8

2.1 振荡叶片非定常流动数值模拟

对亚音流动下三维振荡涡轮叶片的非定常流动进行了数值模拟研究，给出了环形叶栅中各叶片叶中截面的非定常气动力响应分布，并与实验结果进行了对比分析。在保证折合频率相等的条件下，研究不同振型下出口马赫数对振荡叶片非定常流动的影响。

图3为轴向弯曲模态下，+1/0/-1叶片上非定常气动力响应在不同出口马赫数下的分布，其中图 $\zeta - \text{amI}$ 部分为非定常气动力响应的幅值，图 $\zeta - \text{Ph}$ 部分为相位角；图中横坐标代表叶片表面弧长，其中 $-0.54 \sim 0$ 代表吸力面， $0 \sim 0.46$ 代表压力面。图中表明，叶片+1上非定常气动力响应幅值随出口马赫数变化很小，但由于非定常气动力响应幅值已经通过来流的动压头无量纲化，故实际上其绝对值随着出口马赫数的提高是增大的；并且叶片+1压力面相位变化很小，相对而言，吸力面相位角受马赫数的影响较大。参考叶片0的非定常气动力响应幅值随着出口马赫数的升高有明显的增大，其相位在喉道前受出口马赫数影响较小，但在喉道下游吸力面相位有明显变化。而叶片-1上的非定常气动力响应幅值随出口马赫数的变化非常小，相位在吸力面喉道下游有明显的变化，数值模拟结果对非定常气动力的幅值的预测结果比较准确，但相位的偏差有些区域较为明显，其主要原因之一是这些区域非定常压力幅值非常小，基本接近零，所以不管是表示成复数的形式还是直接将复数的虚部（代表阻尼）提取出来时，很小的误差也会带来相位较为明显的差异。幸运的是这些区域在颤振稳定性评估时并不重要，而非定常压力幅值大区域相位预测精度更为重要，所以不会影响颤振稳定性的评估。当

然如何进一步提高数值模拟对相位预测的精度还需要进一步工作。

在基本正交模式下, 振荡叶片做功和其表面非正常气动力的虚部是等价的, 因此本研究用非正常气动力的虚部来表示气动阻尼。

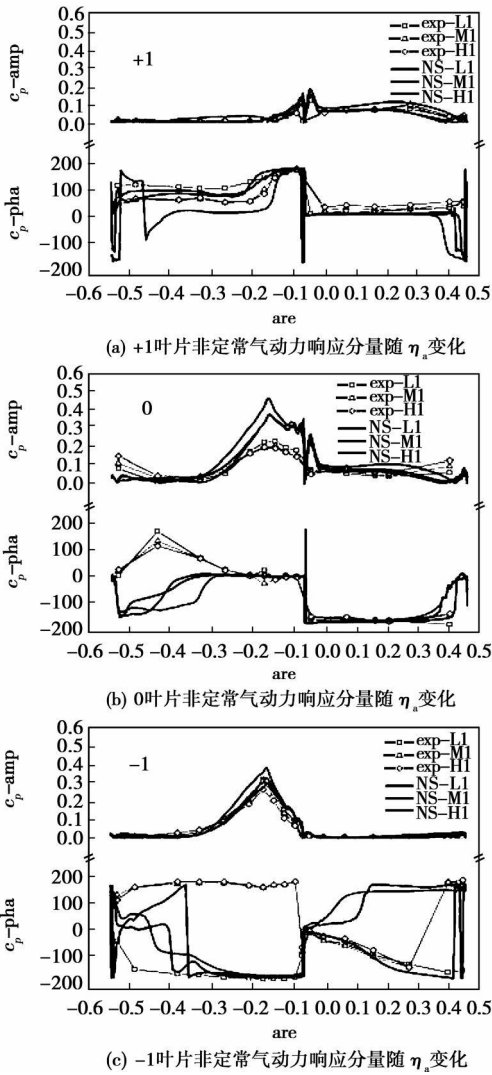


图 3 不同出口马赫数下非正常气动力响应, 轴向弯曲

同时对周向弯曲和扭转运动下的情况进行了研究。不同振型下的非正常气动力响应受出口马赫数影响的分析表明, 无量纲化后的非正常气动力响应幅值随出口马赫数的增加有一定增大, 但增大的幅度很小; 有量纲的非正常气动力响应幅值随出口马赫数的增加而增大; 喉道处的非正常气动力响应受出口马赫数的影响较为敏感; 扭转运动下叶栅中某些叶片上的非正常气动力响应幅值随出口马赫数的变化明显, 这可能是受出口流动方向的变化所致; 相位在喉道上下游有较明显的变化, 再一次表明喉道位置的重要性。

2.2 气动阻尼与叶片间相位角 (IBPA) 的关系

根据能量法, 振荡叶片对流体做正功时叶片颤振稳定, 做负功时叶片颤振失稳。因此可以用振荡叶片对气流做的功来代表气动阻尼, 理论分析证明,

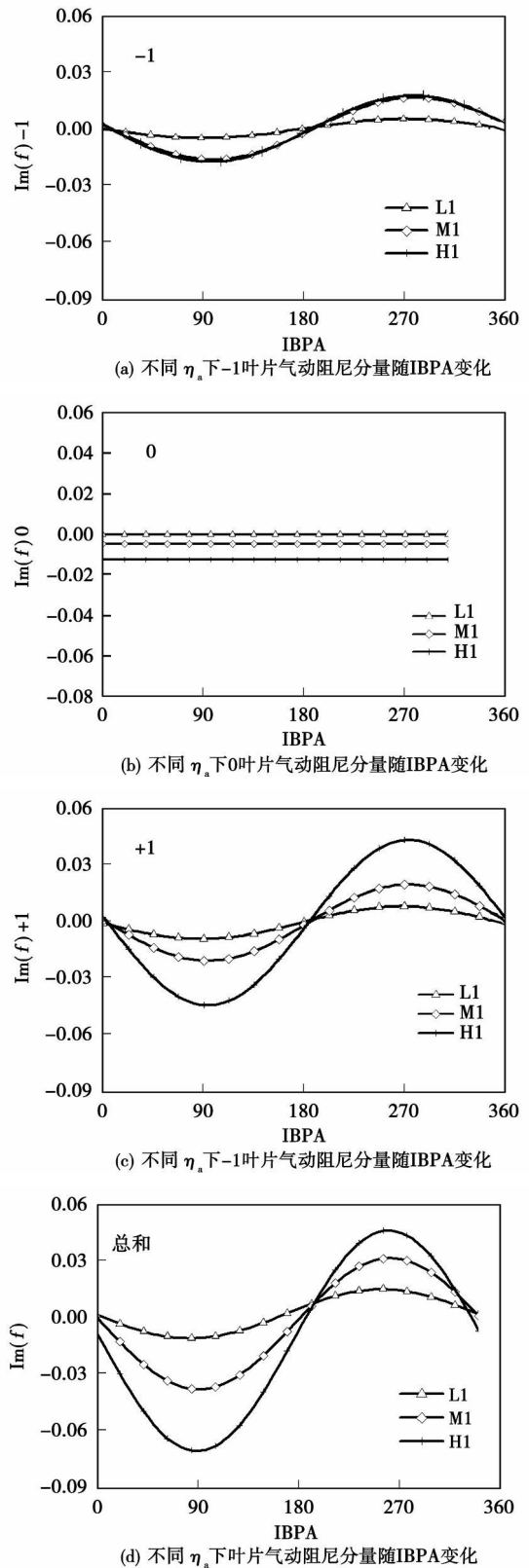


图 4 扭转运动下不同出口马赫数对应的气动阻尼随叶片间相位角变化

不同出口马赫数下气动阻尼随 BPA的变化如图 4所示。扭转模式下,叶片 -1的气动阻尼贡献随马赫数增大而增大,但是 M_1 和 H_1 条件下对应的结果非常接近。最小气动阻尼对应的 BPA为 90° 。参考叶片 0上气动阻尼随出口马赫数的增大而减小。叶片 +1上,随马赫数的增大气动阻尼分量幅值增大,最小气动阻尼对应 90° BPA。3叶片综合作用结果为,最小气动阻尼随出口马赫数的增大而减小且对应 BPA为 90° 。

本研究同时也对轴向弯曲,周向弯曲下的情况进行了分析,结果表明,随马赫数的增大最小气动阻尼减小,且在不同振型下、不同位置叶片气动阻尼分量对马赫数的敏感程度不同。

3 结 论

在进一步发展振荡叶片非定常流动数值模拟程序的基础上,结合影响系数法,就出口马赫数对涡轮振荡叶片的非定常流动及非定常力等的影响进行了数值模拟研究。

(1)本研究进一步发展的数值模拟软件对于模拟振荡叶片内部非定常流动具有较好的精度,适用于叶轮机机械颤振稳定性评估的工具之一。

(2)不同振型下,振荡叶片非定常气动力响应随出口马赫数的变化规律不尽相同;

(3)在亚音情况下,无量纲化非定常气动力响应幅值随出口马赫数的增加有一定程度的增大,但幅度很小;最小气动阻尼则随马赫数的增大减小,且在不同模式下不同位置的叶片气动阻尼对马赫数的敏感程度不同。

(4)在本算例中,相位在喉道上、下游有较明显的变化,这表明喉道是与非定常流动特性相关的一个关键位置,喉道上游部分的流动受流速的影响很小。

参考文献:

[1] WHITEHEAD D S The calculation of steady and unsteady transonic flow in cascade [R]. University of Cambridge Department of Engineering Report CUED/A- turbom/ TR 118 1982

[2] VERDON JM CASPAR JR A linearized unsteady aerodynamic analysis for transonic cascades [J]. Journal of Fluid Mechanics 1984 149 403-429.

[3] HE L An euler solution for unsteady flows around oscillating blades [J]. Transactions of American Society of Mechanical Engineers Journal of Turbomachinery 1990 112(4) 714-722

[4] HUFF D L REDDY T S R Numerical analysis of supersonic flow through oscillating cascades by using a deforming grid [R]. AIAA

Paper 89-2805 1989

[5] NICHOLS R H HEIKKINEN B D Validation of implicit algorithms for unsteady flows including moving and deforming grids [R]. AIAA Paper 2005-683 2005

[6] 蒋滋康,张卫伟. 振动叶栅非定常流场的时间推进计算方法 [J]. 工程热物理学报, 1985 6(3): 232-237.

[7] 胡运聪,周新海. 二维振荡叶栅非定常粘性流动数值模拟 [J]. 应用力学学报, 2003 20(3): 79-81.

[8] 金 琰,袁 新. 三维透平叶片扭转颤振问题的流固耦合数值模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2004 25(1): 41-44

[9] BILCS A FRANSSON TH Aerelasticity in turbomachines. comparison of theoretical and experimental results // Communication du Laboratoire de Thermique Appliquee et de Turbomachines C. Lausanne 1986

[10] DENTON JD The calculation of 3D viscous flow through multistage turbomachines [R]. ASME Paper 90-GT-19 1990

[11] 邹正平,徐力平. 双重时间步方法在非定常流场模拟中的应用 [J]. 航空学报, 2000 21(4): 317-321.

[12] NICHOLS R H HEIKKINEN B D Validation of implicit algorithms for unsteady flows including moving and deforming grids [R]. AIAA-2005-683 2005.

[13] 张正秋,邹正平. 非失速二维振荡叶栅非定常流动数值模拟研究 [J]. 空气动力学学报, 2009 27(2): 255-259.

[14] VOGT DM FRANSSON TH A new turbine cascade for aeromechanical testing // Paper presented at the 16th Symposium on Measuring Techniques in Transonic and Supersonic Flows in Cascades and Turbomachinery C. Cambridge 2002

(本文责任编辑 何静芳)

· 书 讯 ·

工业锅炉节能减排应用技术

本书以工业锅炉节能减排为主线,从各个侧面论述了节能减排有关内容与最新研究成果,突出先进性、实用性、理论联系实际,深入浅出,通俗易懂,图文并茂并举以生动事例。全书共分十一章,涵盖了工业锅炉安全与经济运行、燃煤锅炉强化燃烧技术、煤气(油)锅炉节能、循环流化床锅炉洁净燃烧及洁净煤技术、水处理新技术、环保治理、供热传统节能减排先进实用技术、锅炉检验与修理,以及自动控制技术。

读者对象:能源管理人员、锅炉工程技术人员,环保科技人员,锅炉安全与检验专业人员,锅炉设计与修理维护人员

2009年10月出版

Process of the EDC-five step model is relatively low and the outlet temperature uniformity is optimal with its maximum non-uniformity being assessed at 28%. As a result the NO_x emissions have been minimized. The research results show that the model in question can more rationally predict the flow field distribution of the combustor. Key words: gas turbine combustor; turbulent flow combustion model; numerical simulation

航空燃气轮机推力功势效率研究 = Study of the Thrust Work-potential Efficiency of an Aero Gas Turbine [刊, 汉] / HE Xing SUN Feng-ru (College of Shipbuilding and Power, Naval University of Engineering, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1). — 17 ~ 20

By using the thrust work-potential, one of the work-potential indexes in the second law of thermodynamics, derived was the expression of the thrust work-potential efficiency of various components in an aero gas turbine with the influence of various parameters on the above efficiency being analyzed and a criterion for "tending to be one simultaneously" of various efficiencies being proposed. As a result of the theoretical analysis and numerical calculation, an error in the reference literature [No. 2] was corrected. The research results show that the thrust work-potential efficiency not only assumes a close natural relationship with the component efficiencies, but also enjoys an intrinsic logic correlation with other thermodynamic parameters (such as pressure ratio). What differs from the component efficiencies is the fact that the thrust work-potential efficiency can unitedly evaluate the component efficiencies of an aero gas turbine from the viewpoint of converting a kind of energy to available work, thus laying a solid foundation for the further study of the energy conversion and utilization performance of various types of aero gas turbines. Key words: aero gas turbine; the second law of thermodynamics; thrust work-potential; efficiency

马赫数对振荡涡轮叶片非定常流动影响的数值模拟 = Numerical Simulation of the Influence of Mach Number on the Unsteady Flow in Oscillating Turbine Blades [刊, 汉] / ZHANG Zheng-qiu, ZOU Zheng-ping, LU Huo-xing et al. (National Key Laboratory on Aero-engine Aerodynamics and Thermodynamics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1). — 21 ~ 24

The key parameters influencing flutter stability were studied along with an exploratory investigation of the significance of the judgment criterion of the law governing the change of the flutter stability with the aforementioned parameters on the flutter stability. On the basis of further improving the solution-seeking program for the unsteady Reynolds Number averaged N-S equation and based on an influence coefficient method, a numerical simulation was performed of the influence of the outlet Mach number on the three-dimensional flow around the oscillating turbine blades in various vibration modes. The numerical simulation results show that the developed program features a relatively good accuracy for simulating the flow in the oscillating cascade, and the outlet Mach number will exercise a definite influence on the unsteady flow inside the cascade and the unsteady pneumatic force on the blade surface. Moreover, the law governing the influence of the outlet Mach number on the unsteady flow under various modes is found to be not always identical. Key words: oscillating cascade; unsteady flow; vibration mode; numerical simulation; Mach number

冷却蒸汽进口总压对转子冷却效果影响的数值分析 = Numerical Analysis of the Influence of the Cooling-steam Inlet Total Pressure on Rotor Cooling Effectiveness [刊, 汉] / LU Zhi-qiang, LU Shun-long (College of Energy Source and Power, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), ZHOU Xun (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(1). — 25 ~ 29

At various cooling-steam inlet total pressures, a numerical simulation was performed of the IP (Intermediate Pres-