

抑制叶顶间隙泄漏的叶轮机械叶片的流场模拟

毛佳妮¹, 曹紫胤²

(1. 华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 上海大学 应用数学和力学研究所, 上海 200072)

摘 要: 根据叶顶间隙流对叶轮机械的性能有重要影响这一特性, 设计了一种叶片。该叶片顶部带有“燕尾冠”, 在叶顶的压力侧和吸力侧都形成“倒钩”。通过对带有“燕尾冠”的叶片和一般的叶片的流场进行数值模拟, 在同等条件下比较两者之间压气机的总体性能、流场特性以及叶顶间隙的泄漏量的区别, 得到优化设计后的“燕尾冠”叶片能较好的保持住叶片表面的压力, 削弱了叶顶间隙泄漏涡的产生和减少了通过叶顶间隙的泄漏量。数据结论为改进和提高叶轮机械的运转性能提供参考依据。

关 键 词: 叶轮机械; “燕尾冠”型叶片; 数值模拟; 叶顶间隙流; 泄漏涡

中图分类号: TK474. 8 文献标识码: A

引 言

叶轮机械中的叶顶间隙是为了避免叶片和机匣或者轮毂壁面碰撞而引入的, 其大小为 1% 叶片高度。在叶顶基元叶片压力面和吸力面两侧的压差作用下, 部分流体翻过叶顶间隙形成叶顶间隙流。在主流速度的合成作用下, 这种泄漏流动通常以叶顶泄漏涡的形式存在叶顶区域, 它是一种非常复杂的三维粘性流动, 其形成不仅受到端壁边界层、叶片表面边界层、主流和其它二次流动的影响, 还受到上下游叶排间非定常气动干涉的影响。

目前普遍认为, 较小的顶部间隙能够改善叶轮机械的性能, 降低噪声; 过大的顶部间隙又会使性能下降, 并能引起旋转失速及喘振等影响叶轮机械正常工作的非定常流动状态。早期的研究主要集中在间隙流简化模型上, 如 Rain 模型和 Chen 模型^[1-2]。近期的研究主要集中在间隙流损失机理及其和稳定性关联的研究上, Store 和 Cumpsty 研究了压气机平面叶栅的间隙流规律^[3], 认为间隙流和主流的掺混是叶顶损失的主要来源; Inoue 和 Foley 等人针对单转子和多级环境下轴流压气机进行了顶部泄漏流的

机理研究^[4-5]; Kang 针对压气机平面叶栅的实验和计算结果显示叶顶存在着三涡结构^[6]。在试验方面, Thompson 等人对机匣上带有不同阶梯式凹槽跨声速转子进行实验研究^[7], Goto、Doukelis 等人对不同间隙尺寸大小的流场进行实验研究^[8-9], Bonhomme Chanabel 等人采用 Turbo-3D 程序和试验相结合的方法对不同间隙尺寸的叶栅流场进行了研究^[10]。以往的研究大部分是考虑不同的叶顶间隙尺寸引起的间隙流对叶轮机械的影响。本研究是通过改变叶顶的形状来研究叶顶间隙流, 设计一种新型叶片, 在叶片顶部带有“燕尾冠”, 在叶顶的压力侧和吸力侧都形成“倒钩”, 如图 1 和图 2 所示。采用三维粘性 $N-S$ 方程和 Spalart-Allmaras 方程湍流模型, 对带有“燕尾冠”型叶片和一般叶片进行数值仿真, 在同等条件下比较两者之间的区别, 并讨论带有“燕尾冠”叶片叶顶间隙流的特征。

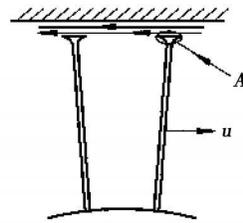


图 1 带有“燕尾冠”的叶片示意图

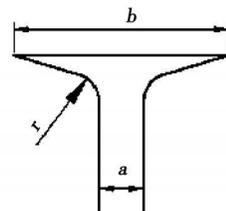


图 2 局部细节图

1 流场仿真

计算选用一低速孤立压气机转子, 翼型采用 Rotor 37, 设计顶部间隙分别为动叶顶部弦长的 1%、2%和 3%, 本算例的数据参数如表 1 所示。

表 1 算例的基本参数

数 值	数 值
动叶叶片/片	60
展弦比	1.86
通道内径/mm	375
叶顶弦长/mm	33.3
叶顶安装角/(°)	38
转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	5 000
轮毂比	0.75
通道外径/mm	500
顶部间隙/mm	0.333/0.666/0.999
叶顶转角/(°)	22

计算采用商用软件 Fluent 中基于 Simple 方法的隐式 Segregated solver 求解三维粘性 $N-S$ 方程。在计算中, 认为整个流场处于湍流状态。为了节省计算量, 这里的湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型。为了更好地模拟叶顶间隙的流动情况, 计算网格采用多重网格法, 在叶顶附近网格划分得细密, 叶顶间隙内径向分布有 10 ~ 15 层网格。计算区域选定为一个叶道, 两侧定义旋转性周期边界, 进口边界给定总温、总压和进口气流角, 出口边界给定轮毂处某点静压, 并按简单径向平衡方程确定出口静压的径向分布, 壁面采用绝热无滑移边界。

2 结果分析

对带有“燕尾冠”的叶片(图 2 中的 r 为 0、 b/a 分别为 1.5 和 3)和一般叶片在同等情况下进行了数值仿真, 比较了压气机的总体性能、流场特性、叶顶间隙的泄漏量, 重点分析叶顶间隙流。

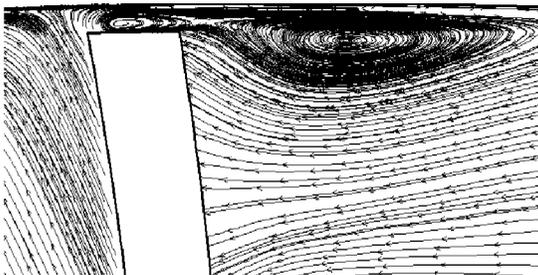


图 3 一般叶片间隙(1 mm)截面流场

小为 1 mm 时, 由于“燕尾冠”叶片顶部压力侧和吸力侧带有“倒钩”, 顶部间隙泄漏涡相对于一般叶片减少了许多。另一方面, 由于叶片带有“燕尾冠”, 导致叶片顶部的面积增大, 为了便于比较, 计算通过叶顶间隙的泄漏量, 采用单位面积的泄漏量, 计算结果如表 2 所示。

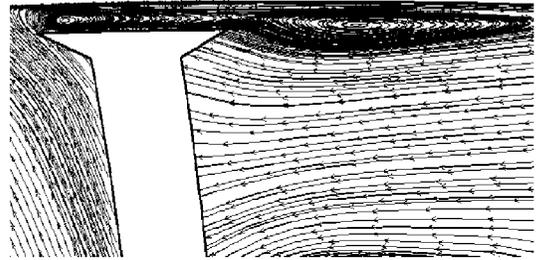


图 4 “燕尾冠”叶片 ($b/a = 1.5$) 间隙(1 mm)截面流场

表 2 叶顶间隙单位面积上的泄漏量

叶顶间隙 /mm	叶片形状	单位面积流量 / $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$
0.33	一般叶片	82.74
	“燕尾冠”叶片 $b/a = 1.5$	60.91
	“燕尾冠”叶片 $b/a = 3$	45.05
0.67	一般叶片	76.12
	“燕尾冠”叶片 $b/a = 1.5$	49.67
	“燕尾冠”叶片 $b/a = 3$	34.54
1.00	一般叶片	66.53
	“燕尾冠”叶片 $b/a = 1.5$	43.21
	“燕尾冠”叶片 $b/a = 3$	27.64

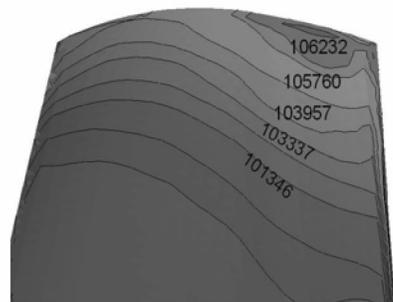


图 5 一般叶片吸力面静压云图(Pa)

表 2 显示, 带有“燕尾冠”的叶片相对于一般叶片来说, 通过叶顶的泄漏量减少了许多。模拟结果可以说明的是“燕尾冠”叶片由于形状上的改进, 能起到抑制泄漏涡的形成并且减少通过叶顶间隙的泄漏量。从叶片表面的静压云图可以看出, 无论在压

从图 3 和图 4 可以看出, 在同一截面处, 间隙大

力面还是在吸力面，“燕尾冠”叶片表面的压力一直延伸到叶片顶部。相对于一般叶片表面静压，“燕尾冠”叶片在吸力面的顶部有一块低压区，而在压力面的顶部有一块很大的高压区，也就是说，“燕尾冠”叶片能够使叶片表面的压力保持住。对于叶顶间隙内流动，目前普遍认为叶片压力面和吸力面之间的压差，导致了由压力面流向吸力面的泄漏流动，由于“燕尾冠”叶片能够使叶片表面的压力保持住，减弱了叶片表面形成泄漏涡，使得泄漏涡减小，这与图3和图4分析是一致的。

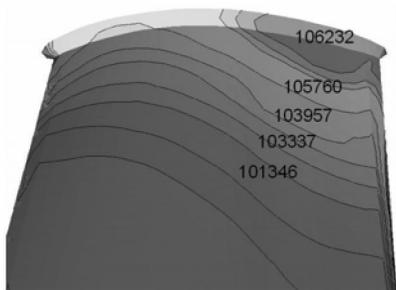


图6 “燕尾冠”叶片吸力面静压云图(Pa)

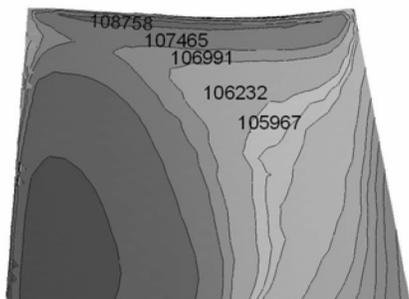


图7 一般叶片压力面静压云图

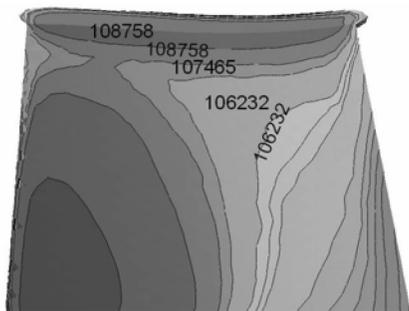


图8 “燕尾冠”叶片压力面静压云图(Pa)

从图9可以看出，带有“燕尾冠”叶片表面在压力面的压力比一般叶片大，吸力面的压力的压力值变化不大，这与图7和图8是吻合的。最后对压气机的总体性能进行分析。

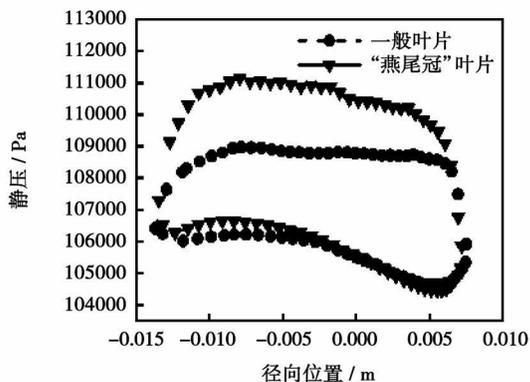


图9 某一半径圆周上叶片表面压力值

从表3可以看出，带有“燕尾冠”叶片的压气机总体性能相对于一般叶片压气机不同。一个重要原因是由于叶片带有“燕尾冠”，“燕尾冠”的大小要取得适中，如果太大会增加流道的阻力，太小会起不到抑制泄漏涡的作用，这就需要对“燕尾冠”叶片进行优化，即找出能抑制泄漏涡和减少叶顶间隙泄漏量，又能提高压气机的总体性能。

表3 压气机的总体性能

叶顶间隙/mm	叶片形状	流量 / kg·s ⁻¹	等熵效率	$\frac{P_{出口}}{P_{进口}}$
0.33	一般叶片	17.17	0.962	1.1081
	“燕尾冠”叶片 $b/a=1.5$	17.36	0.961	1.1076
	“燕尾冠”叶片 $b/a=3$	16.79	0.955	1.1041
0.67	一般叶片	16.87	0.971	1.1037
	“燕尾冠”叶片 $b/a=1.5$	16.98	0.961	1.1051
	“燕尾冠”叶片 $b/a=3$	16.72	0.976	1.1040
1.00	一般叶片	17.03	0.989	1.1042
	“燕尾冠”叶片 $b/a=1.5$	17.53	0.963	1.1093
	“燕尾冠”叶片 $b/a=3$	17.07	0.982	1.1021

3 结 论

用三维粘性 $N-S$ 方程和 Spalart-Allmaras 方程湍流模型模拟了带有“燕尾冠”叶片和一般叶片的压气机。通过流场分析，对叶顶间隙的质量流量以及叶片的做功能力进行了比较，得出以下结论：

(1) 带有“燕尾冠”叶片，由于在叶顶压力侧与吸力侧都形成“倒钩”，能减少叶顶间隙泄漏涡的产生和通过叶顶间隙的泄漏量。

(2) 带有“燕尾冠”叶片，由于在叶顶压力侧与吸力侧都形成“倒钩”，能使叶片顶部压力面的高压力与叶片吸力面的低压力能够保持住。

(3) 带有“燕尾冠”叶片压气机性能相对于一般叶片各不相同, 需要进一步优化选择出一个最佳的组合, 既能抑制泄漏涡的产生, 又能提高压气机的总体性能。

参考文献:

- [1] CROUSE JAMES E. Design and overall performance of an axial-flow pump rotor with a blade tip diffusion factor of 0.43 [R]. NASA TN D-2295, 1964.
- [2] CHEN G T. Similarity analysis of compressor tip clearance flow structure [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113(2): 260-271.
- [3] STORER J A. Tip leakage flow in axial compressors [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1991, 113(2): 252-259.
- [4] INOUE M, KUROUMARU M. Structure of tip clearance flow in an isolated axial compressor rotor [J]. Journal of Turbo-machinery, 1989, 111(2): 250-256.
- [5] FOLEY A C, IVEY P C. Measurement of tip clearance flow in a multi-stage [J]. Axial Flow Compressor, ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(2): 211-217.
- [6] KANG S, HIRSCH C. Tip leakage flow in linear compressor cascade [J]. ASME Journal of Turbo-machinery, 1994, 116(4): 657-664.
- [7] THOMPSON D W, KING P I, RABE D C. Experimental investigation of stepped tip gap effects on the performance of a transonic axial-flow Compressor Rotor [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 477-486.
- [8] GOTO A. Three-dimensional flow and mixing in an axial flow compressor with different rotor tip clearance [R]. ASME Paper 91-GT-89, 1991.
- [9] DOUKELIS A, MAIHOUDAKIS K, PAPALIOUK. The effect of tip clearance gap size and end wall rotation on the performance of a high-speed annular compressor cascade [R]. ASME Paper 98-GT-38, 1998.
- [10] BONHOMMENT CHABANEL C, GEROLYMOS G A. Analysis of tip effects in a high subsonic annular compressor cascade [R]. ASME Paper 98-GT-195, 1998.

(编辑 伟)

新技术、新产品

Renk 齿轮箱在舰船联合动力装置中应用

据《Marine Engineers Review》2007 年 10 月号报道, 德国 Renk (伦克) 齿轮公司是 MAN 集团的子公司, 是船用齿轮传动装置第一流的供应者, 尤其是为 CODOG (柴燃交替使用联合装置)、CODAG (柴燃并车使用联合装置)、COGAG (燃燃并车使用联合装置)、CODAD (柴柴并车使用联合装置) 及 CODIAG (柴油机电力推进和燃气轮机并车使用联合装置) 提供了大量的齿轮箱。

20 世纪 80 年代和 90 年代, Renk 交付 60 多个 CODOG 齿轮箱给德国、土耳其、希腊和葡萄牙等国海军舰队, 德国海军 F122 和 F123 级护卫舰也装用这种齿轮传动装置。

COGAG 联合两台燃气轮机用于单独或共同推进一个喷水推进器, 挪威海军的 Skjold 级轻型护卫舰就采用了这种推进系统。COGAG 装置也用于大型航空母舰, 如英国的 3 艘无敌级航母就装用了 4 台 Olympus TM3B 燃气轮机, 组成 COGAG 系统。

根据 CODOG 理念, CODAG 允许同时使用所有原动机。由 Renk 交付的第一个现代的 CODAG 齿轮箱用于德国的 F124 级护卫舰。

德国 F125 级护卫舰的 CODLAG 推进装置由一个横向连接齿轮箱和两个主减速齿轮箱组成, 它是从 CODAG 应用派生得到的。对于待机和巡航的运行, 电动机具有足够的用于推进的功率, 其特点是具有较低的噪声。对于更高的速度要求, 燃气轮机投入运行, 提供良好的机械驱动效率。对于冲刺速度, 全部原动机可以同时投入运行。正在建造的欧洲多用途护卫舰将采用 Renk 的 CODLAG 齿轮箱。

(吉桂明 供稿)

流动蒸汽湿度测量方法的研究与比较= **Study and Comparison of Flowing-steam Wetness Measurement Methods** [刊, 汉] / NING De-liang, GAO Lei, LIU Xin-quan (CSIC No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 149 ~ 153

In the light of the importance of flowing wet-steam wetness measurement, summed up were both the commonly used methods and the approach under current exploration for measuring the flowing-steam wetness along with an analysis of the limitations of various methods during their applications. Based on the theory that with a different equivalent permittivity of saturated wet steam the capacity of a capacitor will also be different at an identical pressure and temperature, presented and analyzed was a new approach for the on-line measurement of the flowing-steam wetness by using a cylindrically shaped capacitor type sensor. The calibration test results show that this type of sensors has stable static characteristics, and when the wetness ranges from 0 to 12%, the steam flow wetness assumes a comparatively conspicuous nonlinear relationship with the output frequency difference. Finally, the authors have mentioned problems needing special attention during the calibration tests and sensor design. **Key words:** flowing steam, wetness measurement, equivalent permittivity, capacitance method

抑制叶顶间隙泄漏的叶轮机叶片流场的模拟= **Flow Field Simulation of Turbomachine Blades with Their Tip Clearance Leakage Being Suppressed** [刊, 汉] / MAO Jia-ni (College of Energy Source and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), CAO Zi-yin (Applied Mathematics and Mechanics Research Institute, Shanghai University, Shanghai, China, Post Code: 200072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 154 ~ 157

With the growth of national economy, turbomachines are widely used in industrial and mining enterprises. In the light of the special feature of a major influence as exercised by blade-tip clearance stream on turbomachine performance, designed was a new type of blades. The blades in question are provided with a “dovetail crown” at the blade tip, forming a “barb” at both the pressure and suction side of the blade tip. Through a numerical simulation of the flow fields in the blades and other ordinary blades, compared was the difference of the overall performance, flow field characteristics and blade-tip clearance leakage of a compressor between the above two kinds of blades under equivalent conditions. The authors concluded that the “dovetail crown” shaped blades thus optimized and designed can relatively well maintain the pressure on the blade surfaces, reduce the possibility that a leakage vortex occurs at blade tips and diminish the leakage from the blade tip clearance. The data and relevant conclusions thus obtained can provide a helpful reference and basis for improving and raising the operating performance of turbomachines. **Key words:** turbomachine, “dovetail crown” shaped blade, numerical simulation, blade-tip clearance stream, leakage vortex

结构化网格在气热耦合计算中的应用= **Application of Structured Grids in a Gas-heat Coupled Calculation** [刊, 汉] / GUO Zhao-yuan, WANG Qiang, YAN Pei-gang, et al (Propulsion Theory and Technology Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 158 ~ 162

A structured grid for calculating gas-heat coupling was established by adopting a commercial grid generator, and multi-block grid technology was employed to improve the grid quality. The areas of flow- and thermal boundary layers etc. subject to a relatively big change of flow field parameters have been refined. In the meantime, a high-precision numerical transfer mode was used to perform a numerical transfer among various grid blocks, thereby ensuring the high-precision difference scheme among the grid blocks not to be destroyed and thus enhancing the coupled calculating efficiency. Finally, through a gas-heat coupled calculation of Mark II blades and a comparison of the calculation results with test ones, it has been found that the difference of the pressure distribution along the blade profile at the pitch diameter was in a range of 1%, while that of the temperature distribution in a majority of places, in a range of 4%. **Key words:** structured grid, high ac-