

# 带后导叶轴流式通风机内流特征的数值模拟

叶学民, 李 俊, 王松岭, 李春曦

(华北电力大学 能源与动力工程学院, 河北 保定 071003)

**摘 要:** 动叶可调轴流式风机因具有较宽的高效区而得到广泛应用。利用 Fluent 软件, 以 OB-84 型带后导叶的动叶可调轴流风机为对象, 采用 SIMPLE 方法求解了  $N-S$  方程和 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型, 模拟了叶轮径向和轴向特征流面在设计和非设计工况下的内流特征。研究表明: 风机总压沿径向逐渐增大, 压力面尾部存在高压区, 吸力面处存在逆压力梯度, 后缘处总压明显降低; 偏离设计工况时, 后缘处首先产生旋涡, 并使部分流体回流, 形成较大流动阻力; 叶栅流道的总压呈线性增加, 且主要来自静压; 数值模拟所得风机全压和效率特性曲线与实验结果吻合良好, 模拟结果能较好地反映该风机的总体运行性能。

**关 键 词:** 轴流风机; 后导叶; 内流特征; 数值模拟

中图分类号: TK474.8 文献标识码: A

## 引 言

轴流风机内部流动是复杂的三维粘性流, 其流动状况直接决定风机的运行性能, 因此探明风机的内流特征对保持其高效安全运行和开发高性能风机至关重要。现有试验方法很难准确测量风机内流特征及其细节, 利用 CFD 技术进行数值模拟已逐步成为研究风机内部流动的重要手段。数值模拟不仅可以准确预测风机的整机性能, 而且可描述其流动细节, 如速度场和压力场等特征量的变化规律。据此可发现风机设计和运行中存在的问题, 通过采取相应措施加以改进, 可大大减少对实验测试的依赖性, 从而提高风机效率和缩短设计周期。

目前, 对风机的模拟主要集中在离心风机、结构简单的空调用轴流风扇或通风机性能参数改变对效率的影响、叶片不同弯曲方向对低压轴流风扇性能的影响等方面<sup>[1-7]</sup>, 而对含前导叶或后导叶的轴流风机的内流特征, 尤其是变工况下在轴向和径向两类特征流面的研究还很少。

本文以 OB-84 型带后导叶的动叶可调轴流风机为研究对象, 通过模拟叶轮特征流面的内流特性

探讨不同工况下的内流特征, 分析其气动性能, 为风机结构优化设计和实际运行提供理论指导。

## 1 物理模型

### 1.1 计算模型

OB-84 型带后导叶轴流风机的结构参数及气动性能参见文献[8], 其主要特点是工作轮叶片考虑了沿径向的压力损失变化, 叶片弦长、翼型安装角及中线曲率半径按照一定规律变化, 在给定压力和流量条件下, 效率最高且扩压特性曲线高效区较宽。图 1 为该风机结构简图, 表 1 为其主要结构参数。

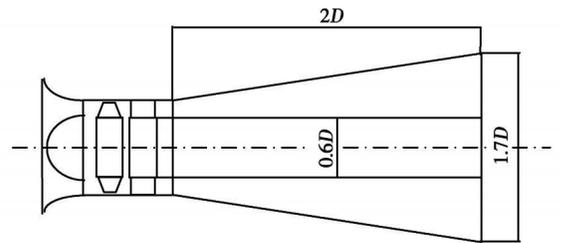


图 1 OB-84 型轴流风机结构简图

表 1 风机的基本结构参数

	外径/mm	轮毂比	叶片数	安装角/(°)	转速/ $r \cdot \min^{-1}$
动叶	1 500	0.6	14	32	1 200
导叶	1 500	0.6	15	76	

### 1.2 计算区域网格划分

基于该轴流风机的结构特点, 采取分区和局部加密的网格划分方法。计算区域包括从集流器到离开扩压器的所有内流流道空间。将整机划分为进口区、动叶区、导叶区和扩压区, 动叶区为运动区域, 其余为静止区域。总的计算单元约为 137 万, 其中动叶区和导叶区分别为 659 292 和 300 231。网格使用非结构网格。

### 1.3 边界条件的确定

以风机集流器进口界面和扩压器出口截面作为整个计算区域的进口和出口。进口边界条件为进口速度,出口为流动出口边界条件,进、出口动能和湍流耗散率均依据经验公式计算确定。

基于 Fluent,采用 SIMPLE 方法求解  $N-S$  方程和 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型,控制方程中的变量和粘性参数用二阶迎风格式离散,近壁区采用标准壁面函数。Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型对涉及旋转、逆压力梯度下的边界层分离、二次流及回流等问题能取得良好的模拟结果。

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 径向内流特征

为分析叶轮内的径向流动特征,沿叶轮径向取环型叶栅流面 A、B、C 3 个特征面,如图 2 所示。其中,A 为近轮毂面 ( $R=480$ ),B 为中间流道面 ( $R=600$ ),C 为近叶顶面 ( $R=720$ )。



图 2 特征流面示意图

图 3 为设计工况下在不同径向位置的叶栅流道的总压分布图。由图可知,风机总压随半径增大而增加,这是因为叶片按扭叶片设计,考虑了压力损失沿径向的变化<sup>[8]</sup>。叶片压力面处的总压从前缘到后缘呈增大趋势,且在尾部出现一个集中的高压区,随半径增大,该高压区逐渐减小。在叶片吸力面,前缘和后缘的压差比较大,且后缘压力高于前缘压力,这样在吸力面产生一个逆压力梯度,使得气流在叶片后缘产生分离。而且吸力面前缘处存在一集中的低压区,沿半径增加方向低压区范围逐渐增大。在  $R=480$  流面翼型后缘处,总压明显降低,这是由于在翼型后缘处产生尾迹流作用,造成能量损失而导致局部总压下降,并且沿叶高增加方向上总压损失呈现出先减小后增大的趋势。

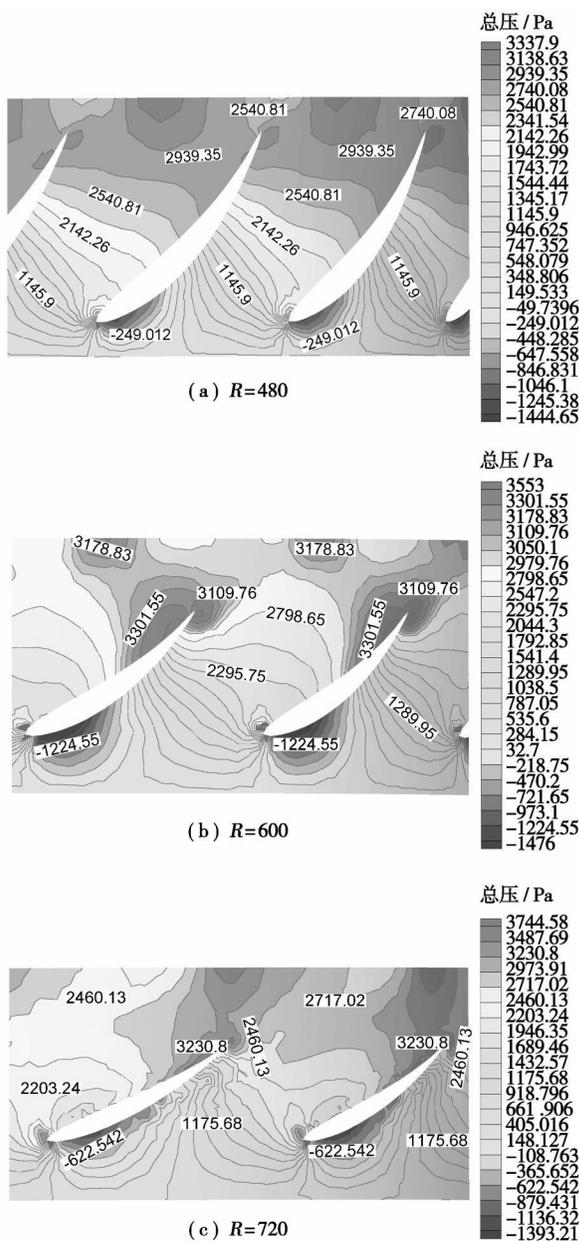
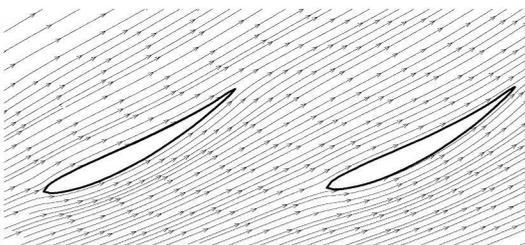


图 3 不同径向位置的总压分布

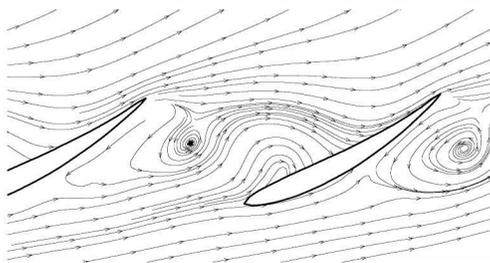
图 4 为不同工况下叶轮流道内的流线图,特征流面为  $R=720$ 。由图 4(a)可知,在设计工况下,气流平滑通过流道,速度变化均匀,只有在吸力面后缘流速略有增大。随流量降低,先在后缘处产生旋涡,部分流体回流,造成流通面积减小;当流量降低到 50%设计流量时,在叶顶吸力面后缘产生一回流涡,回流涡区随流量降低进一步扩大,如图 4(b)所示;25%设计流量时,在叶顶区域回流涡充满整个流道并扩展到叶根部,形成较大的流动阻力,阻碍后续流体的流动,此时只有很少的流体流过叶轮,这与理论研究所得结论完全一致<sup>[9]</sup>,如图 4(c)所示。

### 2.2 轴向内流特征

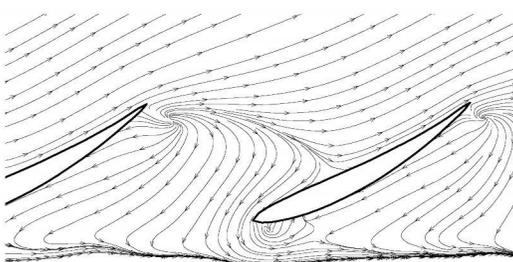
为分析流体压力沿叶轮轴向的变化规律, 从叶轮进口到出口在轴向方向上取 15 个截面, 图 5 为静压、动压和总压的轴向分布。从叶轮进口到叶栅进口 ( $0 < X < 50$ ), 静压和总压基本保持不变, 而动压逐渐增加, 这是由于流体在叶轮内获得加速而使得动压增加; 当流体进入叶栅流道 ( $50 < X < 200$ ), 静压和总压近似呈线性增加, 而动压变化不大, 即流体在叶栅流道中获得的总压主要来自静压的增加, 这是因为叶栅流道沿运动方向逐渐扩散, 动能不断转化为静压以及叶片对流体做功的结果; 当流体离开叶栅流道后 ( $X > 200$ ), 静压、动压和总压趋于不变。



(a) 设计流量



(b) 50%设计流量



(c) 25%设计流量

图 4 不同流量下的流线图

为分析轴向特征流面的压力分布, 取叶轮中间流面和出口流面, 如图 6 所示。图 7 为相应特征面上的压力分布。由图 7(a)可知, 在吸力面靠近叶顶区域出现一负压区, 产生叶顶泄漏损失<sup>[5-9]</sup>。这是由于叶片压力面与吸力面间的压差较大, 位于叶片压力面侧的气流穿过叶顶间隙向吸力面侧流动, 产生叶顶间隙内的泄漏流动, 从而破坏主流流动, 并产生较大的流动损失。在相邻叶片形成的流道内, 叶

顶区存在较大压差, 将导致二次流的产生。图 7(b)为叶轮出口截面总压图, 位于叶顶、叶根相同高度区域处的总压较低且均低于中部位置的总压, 这是由于端壁处较厚边界层的影响以及存在较大尾迹损失缘故, 这与 2.1 中所分析的沿叶高方向尾迹损失先减小后增大的结论一致。

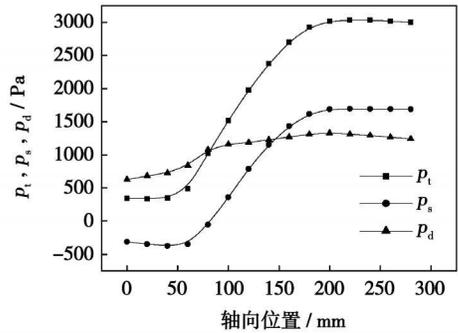


图 5 叶轮轴向压力分布

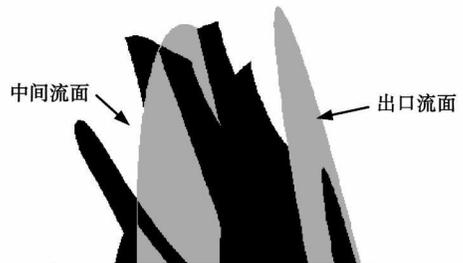
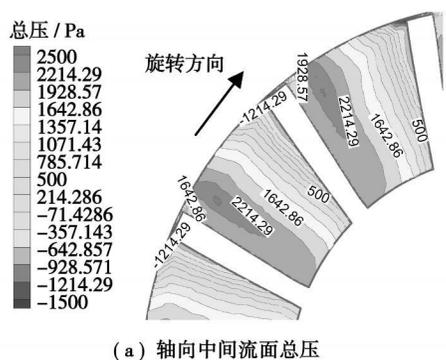
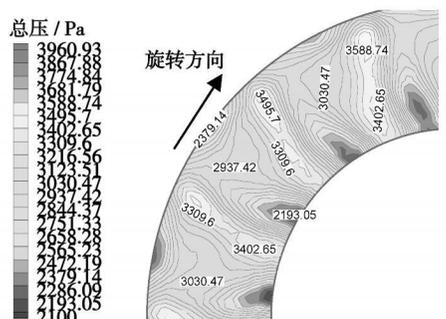


图 6 叶轮轴向特征流面示意图



(a) 轴向中间流面总压



(b) 叶轮出口流面总压

图 7 轴向流面的总压分布

### 2.3 性能曲线比较

图8和图9是对风机全压和效率特性曲线的实验和模拟结果进行了比较。该图表明,二者吻合良好,说明数值模拟结果能较好地反映该风机的总体运行性能。在设计工况点A附近,二者最为接近,相对误差分别为2.6%和0.7%。随流量减小或增大,相对误差有所增大,模拟流量范围内的平均相对误差分别为5.8%和1.6%,验证了数值模拟的可靠性。

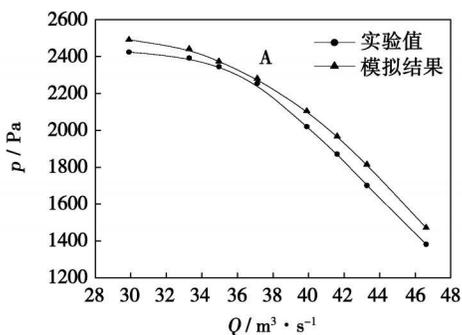


图8 全压—流量特性曲线

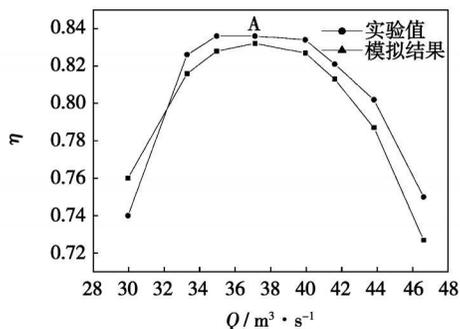


图9 效率—流量特性曲线

### 3 结论

采用 Fluent 软件,对带后导叶的动叶可调轴流风机在径向和轴向特征流面的内流特征进行了数值模拟和分析。研究表明:

(1) 风机总压沿径向逐渐增大;压力面处的总压从前缘到后缘呈增加趋势,尾部存在高压区;吸力面处存在一逆压力梯度;后缘处总压明显降低,总压损失沿径向呈现先减小后增大的趋势。

(2) 偏离设计工况时,叶顶后缘区产生旋涡,导致部分流体开始回流,回流区随流量降低进一步扩大。

(3) 从叶轮进口到叶栅进口,静压和总压基本保持不变,而动压逐渐增加;进入叶栅流道后,静压和总压呈线性增加,而动压变化不大;离开叶栅流道后,静压、动压和总压趋于不变。

(4) 数值模拟所得风机全压和效率特性曲线与实验结果吻合良好,模拟结果能较好地反映该风机的总体运行性能。

### 参考文献:

- [1] 李建锋,吕俊复. 风机流场的数值模拟[J]. 流体机械, 2006, 34(4): 10-13.
- [2] 王军,金培耕,吴光辉,等. 空调用轴流风扇系统内流特性分析与应用[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(3): 305-308.
- [3] 谷慧芳,顾平道,张曦. 基于CFD的空调用轴流风机内部流场研究[J]. 流体机械, 2007, 35(11): 29-33.
- [4] 田斌,席德科,徐燕飞. 轴流通风机内部流场数值研究[J]. 风机技术, 2004(3): 10-14.
- [5] 李杨,欧阳华,杜朝辉. 周向弯曲低压轴流风机叶顶泄漏流动数值研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 240-242.
- [6] 李杨,欧阳华,杜朝辉. 低压轴流风机周向弯曲叶片顶部间隙流动的数值模拟[J]. 动力工程, 2006, 26(5): 707-711.
- [7] 李杨,欧阳华,杜朝辉. 相同工况下叶片的不同周向弯曲对低压轴流风扇性能影响的对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2101-2105.
- [8] 索洛玛霍娃 T C. 通风机气动略图和性能曲线[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986.
- [9] 埃克 B. 通风机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

(编辑 伟)

### ·书讯·

## 《节能技术应用与评价》

本书是关于节能技术基本原理及实际应用的通用性教程,在全面分析了我国能源资源的前提下,提出了我国节能的必要性及潜力,并对节能技术的基本原理、评价方法及具体到各行业的进行较为全面、系统的介绍和分析。全书注重节能技术的前瞻性,尽量讲解各行各业的最新节能技术。

2008年9月出版

curacy, calculation efficiency, gas-heat coupling

带后导叶轴流式通风机内流特征的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Inner Flow Characteristics of an Axial Fan with Rear Guide Vanes**[刊, 汉] / YE Xue-min, LI Jun, WANG Song-ling, et al (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 163 ~ 166

Axial fans with adjustable rotating blades are very often used due to their relatively wide high-efficiency zone. By utilizing software Fluent and with an OB-84 type axial fan incorporating adjustable rotating blades and rear guide vanes serving as an object of study, the SIMPLE method was employed to seek solutions to the  $N-S$  equation and Realizable  $k-\epsilon$  turbulent flow model with a simulation of the inner flow characteristics on the radial and axial characteristic stream surface of the impeller being conducted under design and off-design operating conditions. It has been found that the fan total pressure gradually increases along the radial direction. There exist a high-pressure zone in the tail portion of the pressure surface and a reverse pressure gradient on the suction surface, and the total pressure at the trailing edge decreases remarkably. When the fan operates under off-design conditions, a vortex will first emerge at the trailing edge, forcing the return flow of a portion of fluid and forming a relatively big flow resistance. The total pressure along the cascade flow path assumes a linear increase, which mainly results from a static pressure. The fan total pressure and efficiency characteristic curves obtained from the numerical simulation are in good agreement with the test results, and the simulation results can relatively well reflect the overall operating performance of the fan. **Key words:** axial fan, rear guide vane, inner flow characteristics, numerical simulation

超高负荷吸附式压气机叶栅气动性能分析 = **Analysis of the Aerodynamic Performance of a Super-highly Loaded Adsorption Type Compressor Cascade**[刊, 汉] / CHEN Shao-wen (College of Energy Source and Power, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), GUO Shuang, LU Hua-wei, CHEN Fu (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 167 ~ 171

Numerically studied was the influence of boundary layer elimination by a suction at a low speed on the aerodynamic performance of a super-highly loaded compressor cascade. The distribution of the total pressure loss, diffusion factor and air-flow angle along the blade height was analyzed, and the limit streamline and profile static pressure on the suction surface were given. It has been found that the boundary layer elimination by suction can effectively improve the cascade aerodynamic performance, and the low-energy fluid removal through a suction can decrease the separation of the suction surface and the corner area, increasing the capacity of the flow path and enhancing the cascade load and diffusion capacity. In addition, the larger the suction air flow rate, the more conspicuous the improvement. A suction at a location of 60% axial chord can achieve the best effectiveness. The influence of the suction location on suction effectiveness is larger than that of the suction air flow rate. To appropriately increase the suction air flow rate can enhance the suction effectiveness, and the selection of an optimum suction location and air flow rate is correlated with the diffusion process and separation degree inside the cascade. **Key words:** super-highly loaded compressor cascade, boundary layer elimination through a suction, suction location, suction air flow rate

内可逆焦耳—布雷顿功热并供系统的焓优化分析 = **Exergy Optimization Analysis of an Endo-reversible Joule-Brayton Power-and-heating Cogeneration System**[刊, 汉] / XIE Ping, HUANG Yue-wu (College of Environment Science and Engineering, Donghua University, Shanghai, China, 201620) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(2). — 172 ~ 176