

对旋叶栅级间内流干涉的数值研究

肖 朋, 王 军

(华中科技大学 能源与动力工程学院 流体机械教研室, 湖北 武汉 430074)

摘 要:以对旋轴流通风机整机为分析模型, 使用 Fluent 软件, 采用 SIMPLE 算法, 通过求解全三维的雷诺时均 $N-S$ 方程, 对模型风机中两级动叶间的干涉流动进行数值模拟。将定常分析得到的数值模拟结果与对旋风机的本身流动特点结合, 给出了对旋轴流通风机中两级叶轮中的不同周向面 S_1 、不同径向 S_3 流面的流场分布, 从定量和定性两方面揭示了对旋风机两级干涉现象和机理。结果表明: 在对旋叶轮间的级间流场中, 相对而言, 前级叶轮的尾迹干扰效应强于后级位势作用的干扰效应。

关 键 词:对旋; 叶栅; 数值模拟; 干涉

中图分类号: TH432.1 文献标识码: A

1 引 言

对旋叶栅级与普通的单级动静叶栅级不同之处是仅由动叶组成而无静叶, 两级动叶转向相反, 第二级叶轮兼备普通动静叶栅级中静叶栅的导流功能, 并加给气体能量, 从而具有高效、高风压及结构紧凑的特点。

对旋轴流通风机是对旋叶栅级的一种典型运用, 其特殊的动/动叶栅级的内流结构也更具研究性。由于两级对旋叶栅排的相对运动, 使得在两级对旋叶栅间的区域存在强烈的干涉效应, 这种效应也直接影响到风机的整机性能及噪声、振动等问题。而这种干涉现象难以通过试验的手段来进行分析, 因此采用数值分析的手段来实现对旋风机两级叶轮间的内流场结构的研究则是一种可行的方法, 具有重要的现实意义。

另一方面, 现有叶轮机械中用于计算的界面处理模型及计算机硬件条件的发展, 也使得对旋风机的全流道内流数值模拟成为可能。本文使用 Fluent 软件对一种对旋风机三维全流道进行数值计算, 通过分析对旋风机的内流场, 旨在揭示对旋风机两级干涉现象和内在机理。

2 数值模拟方法

2.1 计算模型

对旋风机模型选用文献[1]中结构参数及气动性能数据较为齐全的 OB-84-84B 模型机。主要结构特点体现在它的工作轮叶片考虑了沿径向的压力损失变化, 该叶片的弦长值, 翼型的安装角及其中线的曲率半径按照一定的规律变化, 其特点是在给定压力和流量计算值的条件下能得到最大效率和扩压特性曲线的高效率范围。

图 1 所示为对旋风机结构简图, 其中 1 为集流器, 2 为扩压器, R_1 为第一级工作轮, R_2 为第二级工作轮。其中电机与工作轮直联, 前后两级工作轮的旋转方向相反。表 1 为对旋风机模型机的基本设计参数。

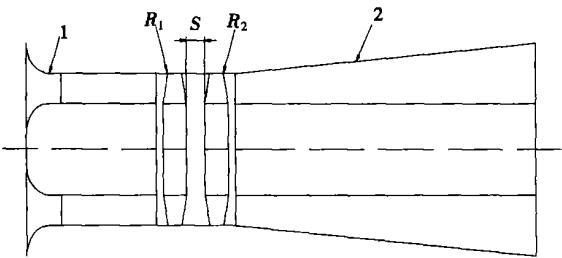


图 1 对旋风机结构简图

表 1 对旋风机模型的基本结构参数

流量系数	压力系数	轮毂比	外径/mm	工作转速/ $r \cdot \min^{-1}$
0.225	0.75	0.6	630	2 900

2.2 计算区域网格划分

计算区域包括从进入集流器到离开扩压器的所有内流通道空间, 模拟计算使用的网格如图 2 所示。数值模拟中为控制网格质量, 需将复杂的计算区域

分割, 各区域单独生成合适的网格节点。在分析时对整个对旋模型机划分为 4 个区域, 即: 1—集流器区域; 2—第一级转子区域; 3—第二级转子区域; 4—扩压器区域。其中区域 1、4 定义为静止区域, 区域 2、3 为运动区域。总的计算单元数约为 150 万, 其中前级叶轮和后级叶轮区的单元数分别为 476 295、481 437。网格使用非结构化网格。

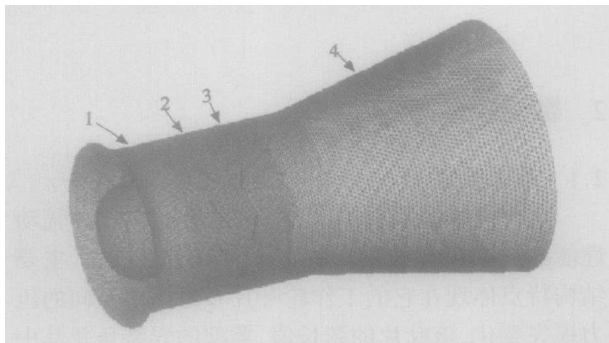


图 2 对旋风机计算域划分示意图

2.3 边界条件的确定

以对旋风机的集流器进口界面作为整个计算域的进口, 扩压器的出口界面定义为整个计算域的出口。进口边界条件给定为运行工况点的质量流量进口, 出口静压为大气压。进出口湍流动能和湍流动能耗散率均依据经验公式计算确定。

本模型计算中采用定常计算, 采用 SIMPLE 方法求解 $N-S$ 方程, 工质为完全气体。壁面采用无滑移边界条件, 近壁区域采用标准壁面函数。采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 对于涉及到旋转、逆压梯度下的边界层、分离流、二次流及回流的问题, 能得到较好的结果。本文研究中忽略了进口前的损失。

3 内流特征及分析

图 3 给出工况点第一级、第二级叶轮中部及两叶轮中间无叶通道中部的径向面上的流速等值分布结果。图 3 径向面分布显示: 第一级、第二级叶片通道中部的速度大小分布结构差异较大。第一级中部径向面不同位置速度的大小不同, 在中部流动速度较低, 而轮毂、叶顶位置上速度增加; 而在第二级中部径向位置, 通道上下流速分布较好, 在叶片边界部位速度变化明显, 而在中部流动结构显示, 由于第一级、第二级叶片所处的相对位置不同, 使得局部图上显示部分区域上从叶顶到叶根速度下降, 而相邻部分的速度则相反。这种分布沿周向基本对称分布, 显示两级叶轮间速度上下传送的特征。

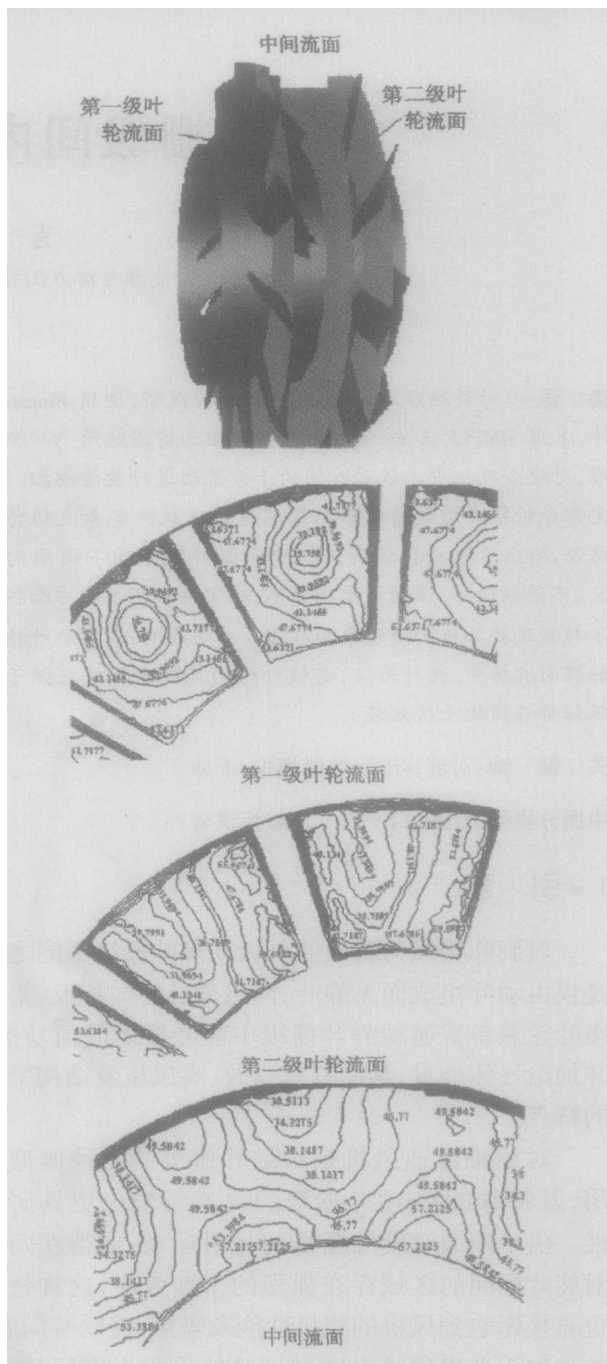


图 3 第一级、第二级叶轮中部径向面及两叶中间径向面上的速度等值分布

4 内流干涉分析

对旋风机内部的三维流动具有其固有的非定常特性。由于前后两级叶片都是旋转的, 动/动叶片排的相对运动造成两级之间的相互干涉, 成为导致对旋级的非定常流动特性的最重要因素。对旋级叶栅间相互干涉的因素由几部分组成: 叶轮通道中的势流场、尾迹区的影响、通道涡及存在动叶顶部间隙射

流的影响等。本文将重点讨论尾迹区的影响, 即前级叶轮的尾迹对两级间内流干涉的影响。

4.1 S_1 流面的两级干涉内流特性

由于对旋风机两级叶栅间的流道是考察的重点对象, 因此沿叶轮径向取环形叶栅面 A、B、C (S_1 流面) 作为考察叶栅流道中干涉现象的特征面, 如图 4 所示, 其中特征面 A 为近轮毂面 ($R=200$ mm), 特征面 B 为中间流道面 ($R=250$ mm), 特征面 C 为近叶顶面 ($R=300$ mm)。

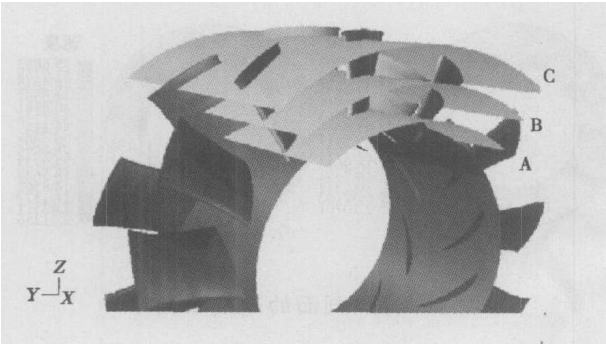


图 4 S_1 特征流面位置示意图

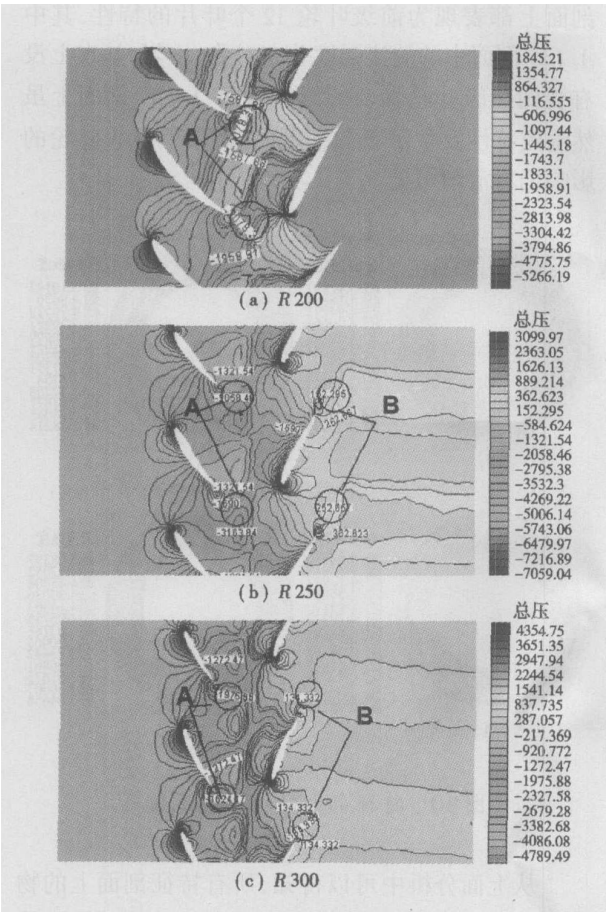


图 5 不同径向位置处的两级叶栅总压等值云图

图 5 所示为不同径向位置处叶栅流道内总压等值云图, 在前后级叶轮的翼型尾缘处 (圆形区域 A、B) 可以看到总压发生明显的降低, 这是由于翼型尾缘处的尾迹流的作用, 造成了能量的损失而导致局部总压下降; 并且沿叶高增加方向总压损失的趋势逐渐增大, 在 $R300$ 流面中可见到两级叶栅间有明显的低压区域。

从图 6 叶栅流道内速度等值云图中可见, 前级叶片的尾迹区低能流体 (圆形区域 A) 进入后级动叶通道, 与后级叶栅流道中的流体发生干涉并扩散。前级叶片尾迹区的低能流体冲击至后级动叶的近前缘区域被截断, 并与该处边界层掺混。值得注意的是, 前级叶片的尾迹并不是向孤立叶排那样沿翼型方向延伸 (圆形区域 B), 而是向后级叶轮旋转的反方向延伸, 然后进入后级叶栅流道。这是由于后级叶轮旋转加压, 对前级叶片的尾迹有抽吸作用而造成的, 这也可以从两级动叶间的流场速度的加速效应得到验证。

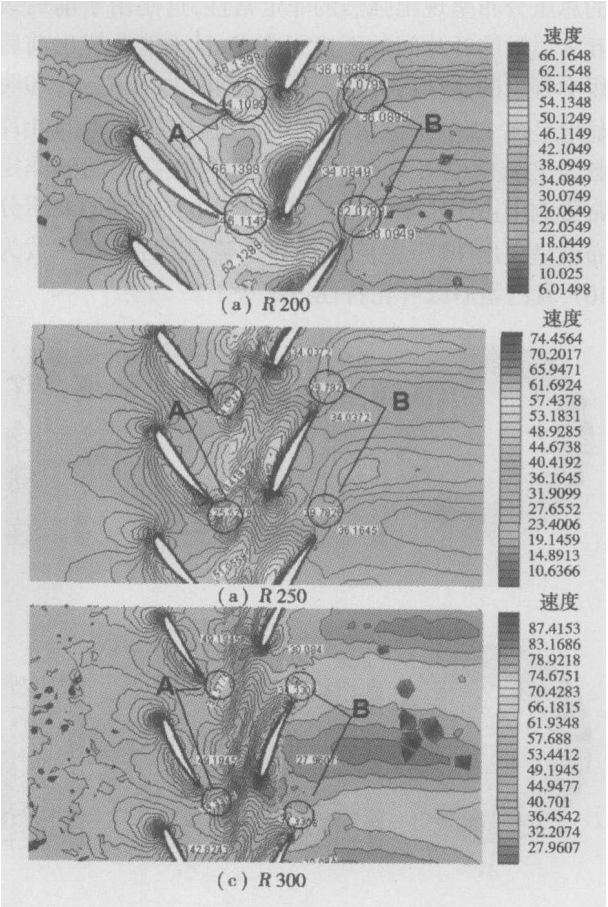


图 6 不同径向位置处的两级叶栅速度等值云图

4.2 S_3 流面的两级干涉内流特性

为分析两级对旋叶栅间的相互干涉效应, 对两

级叶轮 (R_1 、 R_2) 间沿轴向依次取 A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 的 4 个剖面 (S_3 面), 如图 7 所示。其中, 剖面 A_2 为前后两级叶轮计算域的交界面, A_1 在距离 A_2 为 10 mm 的上游特征剖面, A_3 在距离 A_2 为 10 mm 的下游特征剖面, A_4 距离 A_2 为 30 mm 的下游特征剖面。

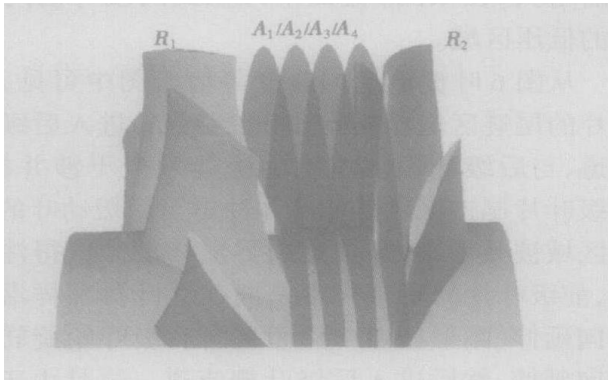


图 7 轴向特征剖面示意图

从图 8 总压云图中可以明显看到, A_1 、 A_2 剖面上的总压分布呈现出强烈的非定常性, 这是由于前后级互为质数的叶片间的干扰所造成, 且不能分辨出前后级中哪级的扰动占优势。而 A_3 剖面的总压分布却明显地呈现 12 个主流区和非主流区 (前级叶轮的叶片数为 12), 这说明了此时前级叶轮特性在级间的非定常影响中占了主要地位。再往下游的 A_4 剖面总压分布就呈现出 10 个主流区和非主流区 (后级叶片数为 10), 就已是后级叶轮特性占优势了。

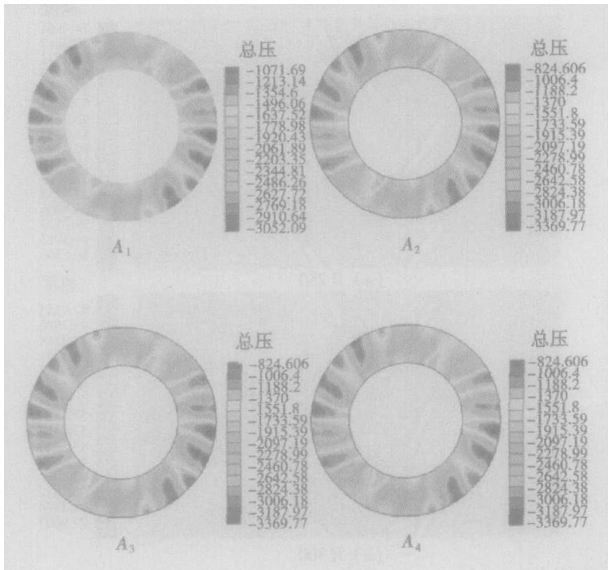


图 8 特征剖面的总压云图

从图 9 速度云图可以看到, A_1 、 A_2 剖面上的速度分布表现为前级叶轮的特性, 到了 A_3 剖面上已表

现为后级叶轮特性, 虽然仍存在前级叶轮的影响, 而 A_4 剖面已是完全的后级叶轮特性了。

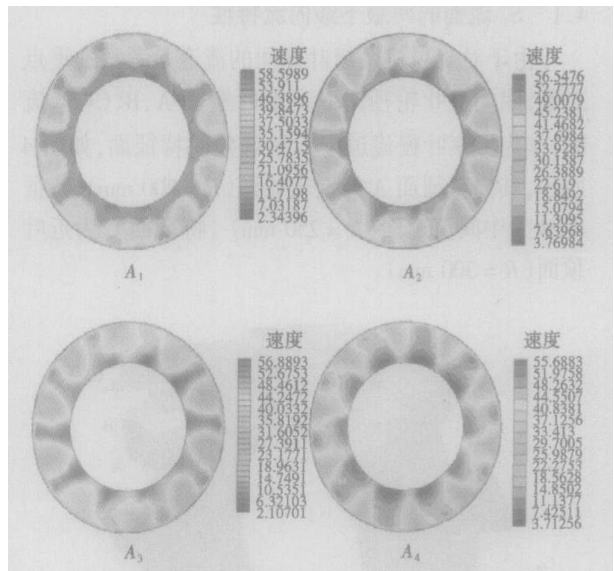


图 9 特征剖面的速度云图

图 10 的湍流强度分布图中, 不难发现各个特征剖面上都表现为前级叶轮 12 个叶片的特性, 其中 A_1 、 A_2 剖面中的湍流强度分布对称、均匀, 基本上没有受到后级叶轮扰动的影响。而 A_3 、 A_4 剖面上虽然湍流特性发生了不同程度的掺混, 但前级叶轮的影响仍然清晰可见。

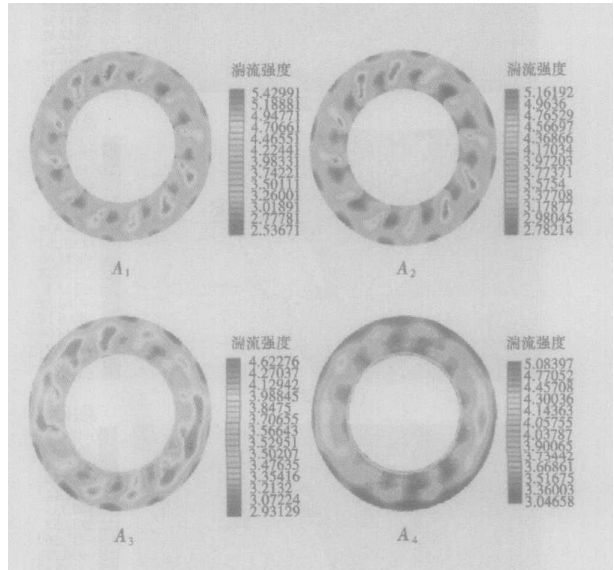


图 10 特征剖面的湍流强度云图

从上面分析中可以得知, 所有特征剖面上的物理量, 均呈现为强的前级叶轮的 特性, 即在两级叶栅间的内流场干涉效应中前级叶轮的影响占主导地位

位。从对旋风机的流动特性分析可认为: 在对旋两级叶轮间的流场中, 前级叶轮的尾迹干扰效应强于后级位势作用的干扰效应, 但同时后级位势作用也给前级叶轮的出口流场带来了影响。导致这种现象的主要原因是, 在动/动叶栅的结构中, 后级叶轮同样需要加功增压而产生的高逆压梯度影响。

4.3 两级叶轮间中叶展处周向速度分布

对旋风机两级间的流场进行考察过程中, 为更清楚探讨前级动叶尾迹的特性, 对尾迹的速度场进行量级分析, 取离开前级动叶尾缘的叶中周向上的物理量为考察对象。定义距离前级叶轮出口面 10 mm 的下游位置的特征圆周为 AA, 沿叶轮轴向方向, 向下游依次取 BB、CC、DD 3 个圆周对象, 如图 11

所示。然后从模型的计算结果中取出 4 个特征圆周上的物理量数值, 并沿圆周展开。

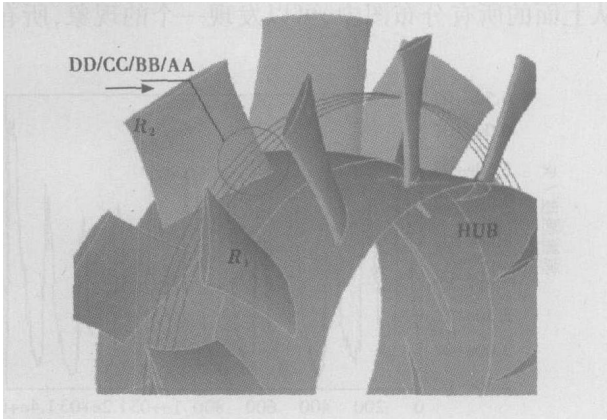


图 11 周向特征观察面示意图

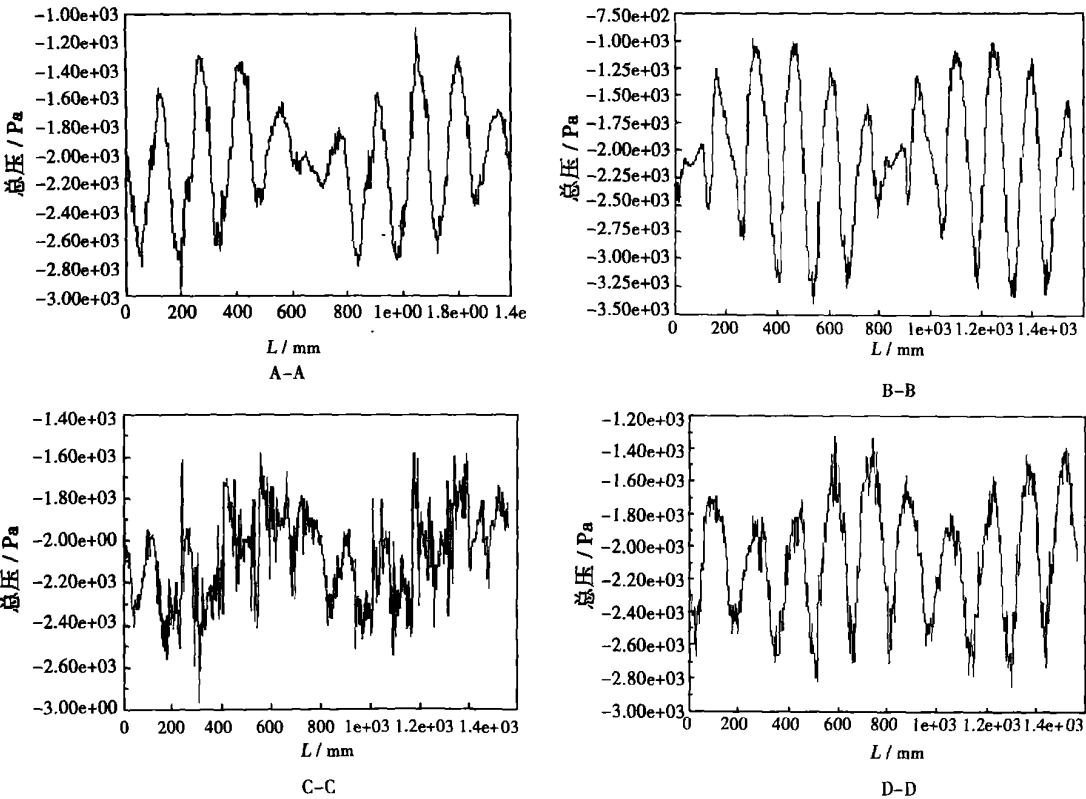


图 12 R250 周向上的总压分布

图 12 是 4 个特征位置上总压值分布, AA、BB 表现出 12 个波峰和波谷, 但其中有两个波峰和波谷已被消弱, 使其也表现出 10 个波峰和波谷的特性, 这是由于后级转子压力场对前级的影响所造成的。到了下游的 CC 位置, 已很难分辨出波峰和波谷, 同时表现出前后级叶轮的特性, 这是此处的压力场掺混剧烈所形成。再往下游的 DD 位置时, 前级叶轮尾

迹特性的影响已经很微弱, 表现出很明显的后级叶轮特性(10 个波峰和波谷)。

图 13 的 4 个特征位置的湍流强度分布, AA、BB 均表现为完整的前级叶轮特性分布, 而到了 CC、DD 位置仍可看到由于前级叶轮尾迹的扰动作用, 使得后级叶轮的特性大为消弱, 同时显示出了前后级叶轮的特性。

对前级叶轮尾迹的数量级分析中显示, 压力场

和速度场中前级叶轮的尾迹干扰效应强于后级叶轮位势作用的干扰效应,这与前面的定性分析吻合。从上面的所有分布图中,可以发现一个的现象,所有

的数值曲线图均表现出周期性特征,且周期数为 2,这正和前后级叶轮叶片数的公约数吻合(12:10)。

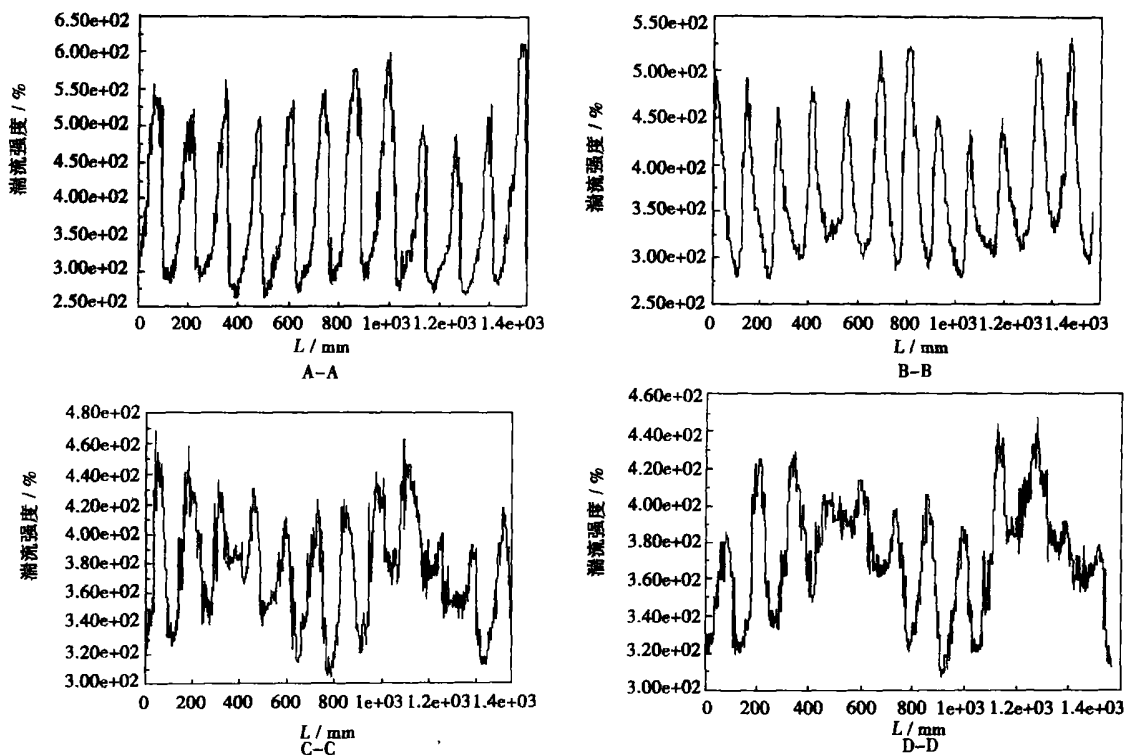


图 13 R250 周向上的湍流强度分布

5 结 论

(1) 本文采用 Fluent 软件,模拟了动/静级叶栅的对旋风机全流道三维流场,在对旋风机两级叶轮间的 S_1 流面上,可以清楚的观察到前级叶轮的近场尾流区及尾迹与后级叶轮的干涉现象。

(2) 对旋风机两级叶轮间的 S_3 流面上,可以清楚看到两级叶轮特性对干涉的影响。并分析可得:在对旋叶栅级间流场中,相对而言,前级叶轮的尾迹干扰效应强于后级位势作用的干扰效应。

(3) 对对旋风机前级叶轮尾迹的数量级分析显示,前级转子的尾迹干扰效应强于后级位势作用的干扰效应,这与定性分析吻合。

参考文献:

- [1] 索洛玛霍娃 T C. 通风机气动略图和特性曲线[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1986.
- [2] 唐狄毅. 叶轮机非定常流[M]. 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [3] HEBBAR K S. Mean and turbulence measurements in the boundary layer and wake of a symmetric aerofoil[J]. *Exp Fluids* 1986, 4: 214—222.
- [4] YAO C, PASEHAL K. PIV measurement of airfoil wake flow turbulence statistics and turbulent structures[R]. AIAA-94-0085, 1994.
- [5] 朱 巍, 李秋实, 范洪涛, 等. 对旋风机对旋叶轮级间流场的实验研究[J]. 航空动力学报, 2000, 16(12): 158—162.
- [6] 刘宝杰. 尾流旋涡的流动机制及其应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
- [7] 王 军, 王建峰, 宋文艳, 等. 对旋式轴流风机非设计点流场的分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(4): 102—104.

(渠 源 编辑)

The thin-layer activation method is a kind of nuclear method for the dynamic and qualitative measurement of wear-and-tear of specified parts and components with no need for system disassembly. This method features high sensitivity, an ability to perform on-line detection, and low radioactivity etc. The working principles and relevant techniques of the thin-layer activation method are described. Its application to the on-line and off-line measurement of wear of turbine blades has made it possible to realize an off-line monitoring of cavitation-caused wear for three kinds of turbine blades and an on-line monitoring of same at specified locations for two kinds of turbine blades. A detailed test and detection procedure is given. Through tests lasting 53 hours, the worn-out mass actually measured of the blades is identical to that obtained by using a weighting method. The standard error of average measured values is $\pm 0.2 \mu\text{m}$. **Key words:** turbine blade, thin layer activation method, wear

对旋叶栅级间内流干涉的数值研究 = Numerical Study of Inter-stage Flows in a Counter-rotating Cascade [刊, 汉] / XIAO Peng, WANG Jun (College of Energy Sources and Power Engineering under the Central China University of Science and Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21 (3). — 249 ~ 254

With a whole counter-rotating axial fan serving as an analytic model and through the use of software Fluent and the adoption of SIMPLE algorithm, conducted was a numerical simulation of interference flows between two stages of moving blades in the model. This has been accomplished after solving a full three-dimensional Reynolds time-averaged $N-S$ equation. By combining the numerical simulation results obtained from a steady flow analysis with the flow characteristics of the counter-rotating fan, the flow field distribution of stream surfaces in different circumferential planes $S1$ and different radial planes $S3$ in the two stage impeller of the counter-rotating axial fan was given and the interference phenomenon and mechanism of two stages of the counter-rotating fan has been revealed qualitatively and quantitatively. It has been found that in the inter-stage flow field between counter-rotating impellers, relatively speaking, the wake interference effect of the front-stage impeller is stronger than that of the rear stage impeller under the action of potential energy. **Key words:** counter rotating, cascade, numerical simulation, interference

后置蜗壳斜流叶轮内部射流—尾迹数值研究 = A Numerical Study of the Jet-flow Wake in the Oblique Flow Impeller of a Rear-mounted Volute Housing [刊, 汉] / CHU Wu-li, YANG Yong, WU Yan-hui, et al (Power and Energy Source College under the Northwest China Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21 (3). — 255 ~ 258, 263

A Fine/Turbo module of commercial software Numeca was used to conduct the whole-machine calculation for an oblique flow blower incorporating an oblique flow impeller and a volute housing as an integrated whole. Moreover, on the basis of having achieved a relatively good agreement with the already available test data, a detailed numerical analysis is performed of its inner flow field, which confirms that inside the oblique flow impellers, there also exist classic jet-flow wake patterns specific to a centrifugal impeller. The research results show that due to a highly nonsymmetrical nature of the volute housing, the jet flow-wake inside various impellers also features totally different patterns. A further study indicates that the basic reason leading to the emergence of this phenomenon lies in the presence of a nonsymmetrical volute housing, which changes the blade-tip leakage flow at the top of the impellers. **Key words:** oblique flow impeller, volute housing, wake/jet flow, blade-tip leakage flow

总压畸变对小型风扇气动影响的数值模拟 = Numerical Simulation of the Impact of Total-pressure Distortion on the Aerodynamic Performance of Small-sized Fans [刊, 汉] / SUN Peng, FENG Guo-tai (Energy Source College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), KUI Dong-wei (Harbin Vocational Col-