

贯流风机流场模拟与性能分析*

胡俊伟 丁国良 赵力 张春路

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200030)

摘要: 利用计算流体力学(CFD)软件 STAR-CD 对贯流风机内部气体流动进行了数值模拟,研究了贯流风机的流动状态和结构参数变化对其产生的影响,分析了蜗舌间隙、进口角、蜗壳间隙、蜗舌位置角、出口角变化与贯流风机进、出口流速间的关系,从中寻找出结构参数变化对贯流风机流场影响的规律。同时,还将模拟计算结果与试验结果进行了比较,比较结果表明数值模拟的结果与试验结果基本吻合。

关键词: 贯流风机 CFD 结构参数 数值模拟

中图分类号: TH432

0 前言

贯流风机因其特殊的结构和性能特点逐渐为人们所重视。贯流风机结构简单、体积小、两元性好,可以根据对风量的要求自由选择叶轮长度,送风比较均匀集中,风量大,广泛用于制冷空调、化工机械等各种能量利用系统中。但由于这种风机内部流动复杂,目前国内外对它进行的大部分还是试验研究。

S. Tanaka 和 S. Murata^[1]曾利用激光多普勒测速(LDV)技术对几何相似但具有不同转子尺寸的贯流风机流场进行了测试,分析了风机转子尺寸和雷诺数对贯流风机工作性能的影响。

H. Tsurusaki 和 Y. Tsujimoto 等^[2,3]用粒子轨迹追踪测速技术(PTV)对贯流风机流场进行了测试,分析了贯流风机流动系数 ϕ (ϕ 为与进口流速、转子外径、外径处圆周速度相关的量纲一的参数)对风机内部速度场以及偏心旋涡的影响。

刘师多、周炜等^[4]以贯流风机的壳体为研究对象,在试验基础上建立了该风机吸气能力数学模型,优化确定了壳体最佳结构参数,分析了壳体结构参数(主要是蜗舌参数)对风机吸气能力的影响规律。杨波等^[5]也采用试验的方法,测量并分析在不同叶轮直径和结构尺寸(主要是叶轮直径)时,贯流风机内部流场的变化,并通过对比几组试验数据的比较,对贯流风机特有的偏心涡成因进行了理论分析。

以上研究都是基于试验基础上的,并且有的也只是分析了个别参数对风机性能的影响,没有对风机结构参数的影响进行深入研究。另外,国

内外利用数值模拟的方法对贯流风机流场进行分析计算的研究很少,陈次昌^[6]曾提出一种直接边界元和离散旋涡法相结合的数值解析方法并对贯流风机的内部流动进行了分析计算,同时与试验结果进行了比较。但是,他并没有分析结构参数变化对贯流风机内部流场的影响。因此为了更全面地掌握和了解贯流风机的工作特性,寻求接近实际的流动模型和设计方法,有必要利用计算流体力学(CFD)方法对贯流风机流动状态和结构参数影响进行研究。

利用 CFD 软件(STAR-CD)对贯流风机内部流场进行了数值模拟,研究了贯流风机的流动状态和结构参数变化对风机性能的影响,分析了蜗舌间隙、进口角、蜗壳间隙、蜗舌位置角、出口角变化与贯流风机进、出口流速的关系,从中寻找出结构参数变化对贯流风机内部气体流动影响的规律,为改善贯流风机的工作性能提供了依据,也为优化贯流风机的结构设计提供了条件。

1 贯流风机结构特点

贯流风机主要由蜗舌、隔板和转子三部分组成。在贯流风机设计中,关键在于确定流道边界的最优形状(包括蜗舌、蜗壳形状等),以使风机内部气体流动合理,达到高效、低噪的要求。因此风机内部流场的计算具有很大意义。用于数值模拟的贯流风机结构参数为:风扇外径 $D_1=240$ mm、内径 $D_2=200$ mm,叶片数 24;其余参数(蜗舌间隙 ε_1 、进口角 θ_1 、蜗壳间隙 ε_2 、蜗舌位置角 δ 、出口角 θ_2)均为可调量,叶轮转速 1 000 r/min。图 1 为贯流风机的几何结构。

* 国家重点基础规划 973 研究资助项目(G2000026309)。20030125 收到初稿,20030922 收到修改稿

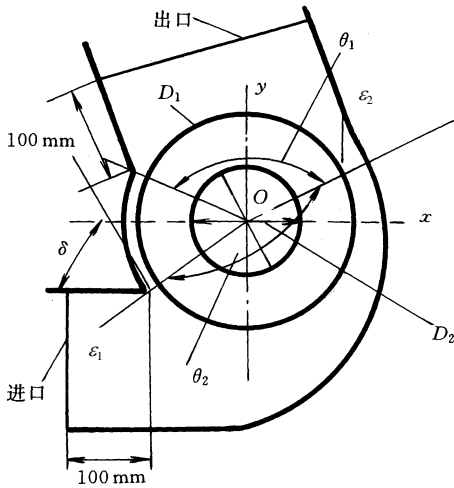


图 1 贯流风机的几何结构图

2 计算结果和分析

采用 SIMPLE 算法和 $k-\epsilon$ /高雷诺数湍流模型进行求解。为了模拟叶片的运动，采用 STAR-CD 中旋转网格的隐式方法进行处理。进口、出口均设为压力边界，并给定大气条件为压力边界值。网格为四面体网格，网格数为 12 万。

2.1 进口角对风机流场的影响

对不同进口角的风机流场进行了模拟，并与试验结果进行了比较。图 2、图 3 分别为进口和出口流速随进口角 θ_1 变化的模拟结果，图中纵坐标均为速度，图 2 横坐标为进口处 x 方向坐标，图 3 横坐标为出口处 y 方向坐标。图 2 中分别为 $\theta_1=90^\circ、110^\circ、120^\circ$ 时进口速度分布曲线；图 3 中至上而下四条曲线分别为 $\theta_1=70^\circ、80^\circ、100^\circ、120^\circ$ 时出口流速分布曲线。由图可见， θ_1 减小，进口流速增加，速度分布较均匀。但随着进口角减小，进风面积也随之减小，从而导致出口速度降低。

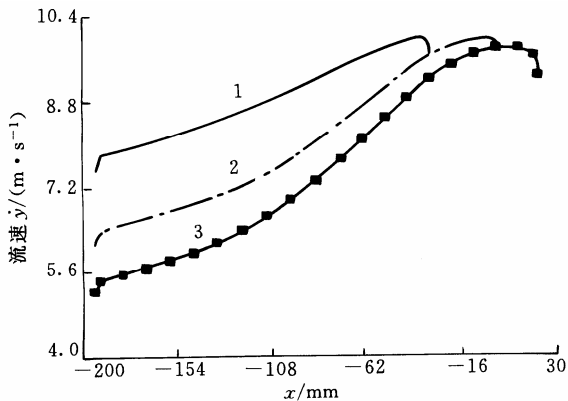


图 2 不同进口角 θ_1 对风扇进口流速的影响分布曲线

1. $\theta_1=80^\circ$ 2. $\theta_1=90^\circ$ 3. $\theta_1=120^\circ$

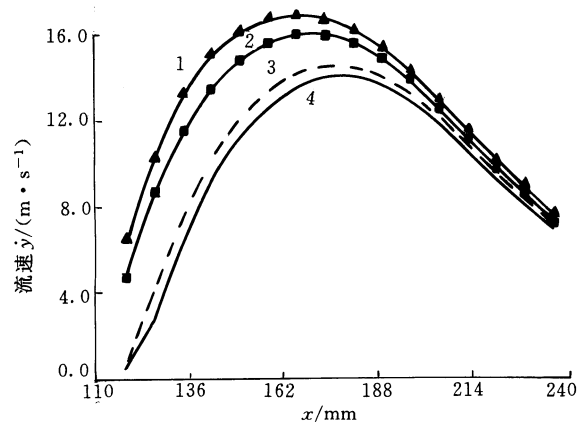


图 3 不同进口角 θ_1 对风扇出口流速的影响分布曲线

1. $\theta_1=120^\circ$ 2. $\theta_1=110^\circ$ 3. $\theta_1=90^\circ$ 4. $\theta_1=70^\circ$

同时还对用 STAR-CD 计算的结果与相同条件下试验所得数据^[7]进行了比较。图 4 表明了出口平均流速随进口角增大而增加的规律，以及与试验值进行比较的曲线，图 4 中横坐标为不同进口角 θ_1 ，纵坐标为速度。图 4 中，虚线为计算模拟结果，实线为试验测定的结果。由该图可看出模拟结果与试验结果基本相符，基本上可反映出出口平均流速的实际变化趋势。

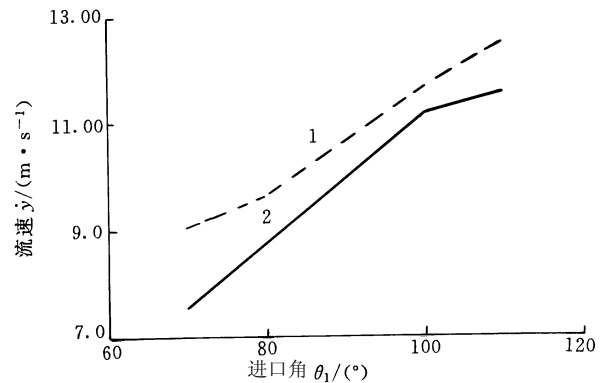


图 4 不同进口角 θ_1 对出口平均流速的影响

1. 计算模拟曲线 2. 试验曲线

2.2 蜗舌间隙对风扇流场的影响

图 5、6 分别为蜗舌间隙 ϵ_1 为 5 mm 和 25 mm 时对风扇流场产生影响的模拟结果。由图 5、6 可看出，叶轮内侧始终存在一个能控制整个气流流动的偏心涡流，该涡流的旋向与叶轮的转向一致。由于这种内涡流的存在，使已经排出的空气又倒流回叶轮内部，这种回流造成了很大的能量损失。横流风机的效率就取决于这种回流流量在总流量中所占的比例。所以控制这种偏心涡的大小和位置将对改善贯流风机的流场有很大作用。同时，从图 5、6 中可发现，蜗舌间隙较大时，偏心涡的中心位置靠近叶轮的中部，而蜗舌间隙减小时，涡心的位置外移，并向蜗舌和出风口靠近。由于涡心向边部偏移，

气流的回流减少,反之则回流增加。这说明蜗舌间隙的大小可以控制气流的流动,减小该间隙可使回流减少,提高风机的效率。图 7 表明了不同蜗舌间隙对风扇出口流速的影响,图 7 中曲线分别为 $\varepsilon_1=10\text{ mm}$ 、 15 mm 、 20 mm 、 24 mm 时的出口流速曲线。由图 7 可看出随着蜗舌间隙 ε_1 的减小出口流速曲线整体是上升的,即出口处各点流速均有所提高,由此可知蜗舌间隙减小,出口流速增加。这正是因为蜗舌间隙减小,偏心涡外移,从而使气流的回流减少,提高了出口流量。

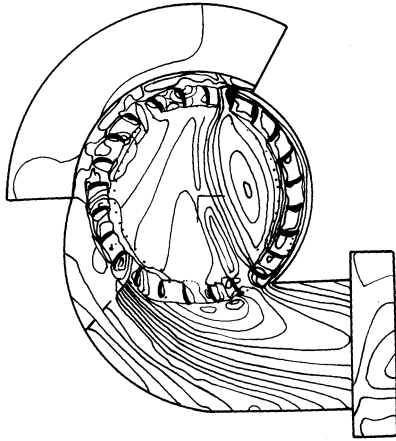


图 5 蜗舌间隙为 5 mm 流场分布

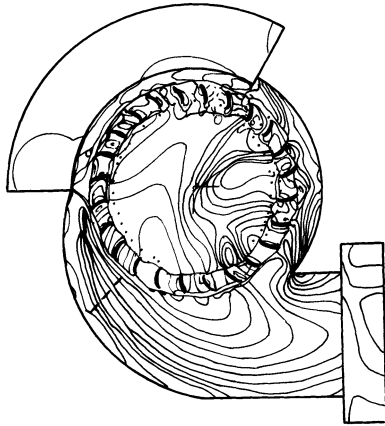


图 6 蜗舌间隙为 25 mm 流场分布

同时也对模拟计算的结果与相同条件下试验所得数据^[7]进行了比较。图 8 为不同蜗舌间隙对风扇出口平均流速的影响分布曲线,其横坐标为不同蜗舌间隙值,纵坐标为速度。图 8 中虚线为计算结果,实线为试验结果。从图 8 中可以看出计算结果与试验结果基本一致,均反映出出口平均流速随蜗舌间隙 ε_1 减小而增大这一特点。

2.3 蜗壳间隙 ε_2 对风扇流场的影响

蜗壳间隙对贯流风机的流场也会产生一定的影响。图 9 为不同蜗壳间隙对风扇进口流速的影响分

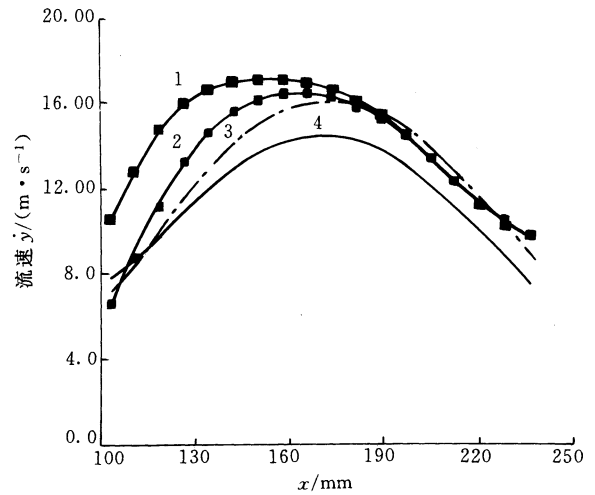


图 7 不同蜗舌间隙对风扇出口流速的影响分布曲线

1. $\varepsilon_1=10\text{ mm}$ 2. $\varepsilon_1=15\text{ mm}$ 3. $\varepsilon_1=20\text{ mm}$ 4. $\varepsilon_1=24\text{ mm}$

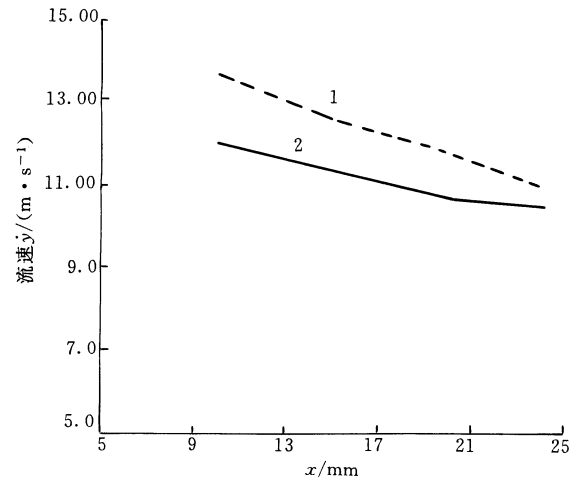


图 8 不同蜗舌间隙对风扇出口平均流速的影响分布曲线

1. 计算模拟曲线 2. 试验曲线

布曲线,其横坐标为进口处 x 方向坐标,纵坐标为速度。图 9 中曲线分别为蜗壳间隙 $\varepsilon_2=9\text{ mm}$ 、 25 mm 、 32 mm 时计算结果。由图 9 可看出随着蜗壳间隙 ε_2 的增加,进口流速曲线整体下降,即进口处各点流速均有所降低。由此可知蜗壳间隙减小,进口流速增加。

图 10 为不同蜗壳间隙对风机出口流速的影响分布曲线,其横坐标为出口处 y 方向坐标值,纵坐标为速度值。图 10 中曲线分别为蜗壳间隙 $\varepsilon_2=9\text{ mm}$ 、 15 mm 、 25 mm 、 32 mm 时计算结果。由图 10 可看出随着蜗壳间隙 ε_2 的增加,出口流速曲线整体轻微下降,即出口处各点流速均有所降低。由此可知蜗壳间隙减小,出口流速也有所增加。另外将图 10 与图 3、7 相比较可看出,图 10 中曲线变化较小,即蜗壳间隙对贯流风机出口流速的影响比进口角、蜗舌间隙的影响要小。

同时就不同蜗壳间隙 ε_2 对风机出口平均流速的影响,将计算的结果与相同条件下试验所得数据^[7]

进行了比较，计算结果与试验结果的平均误差为 8.5%，说明计算结果与试验所得结果基本一致。

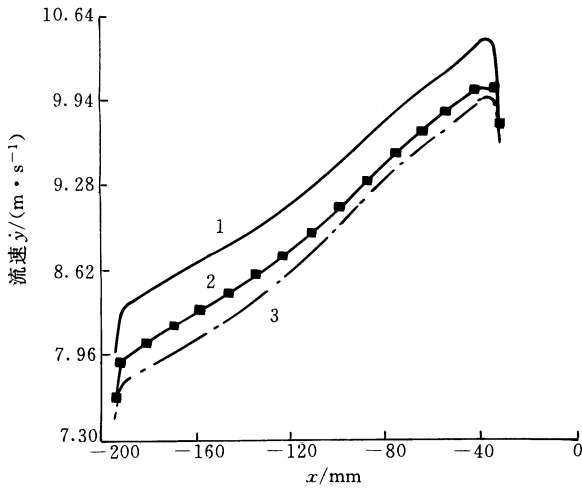


图 9 不同蜗壳间隙对风扇进口流速的影响分布曲线
1. $\epsilon_2=9\text{ mm}$ 2. $\epsilon_2=15\text{ mm}$ 3. $\epsilon_2=25\text{ mm}$ 4. $\epsilon_2=32\text{ mm}$

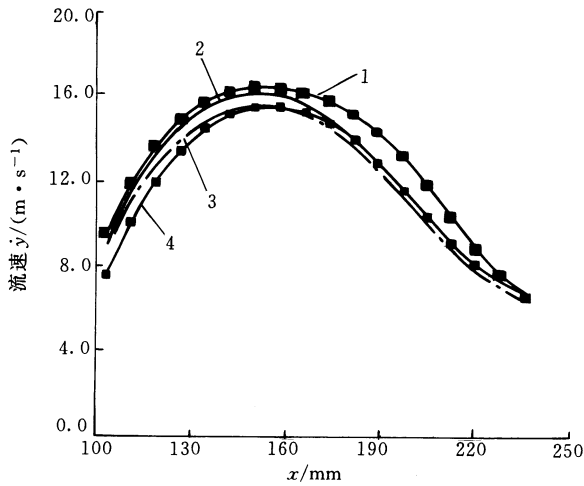


图 10 不同蜗壳间隙对风扇出口流速的影响分布曲线
1. $\epsilon_2=9\text{ mm}$ 2. $\epsilon_2=15\text{ mm}$ 3. $\epsilon_2=25\text{ mm}$ 4. $\epsilon_2=32\text{ mm}$

2.4 蜗舌位置角 δ 、出口角 θ_2 对风机流场的影响

在试验过程中，其他参数不变的情况下单独改变蜗舌位置角或出口角有一定困难，因此一般将蜗舌位置角和出口角作为一个参数进行调节。出于要同试验结果进行比较考虑，计算模拟过程中也将蜗舌位置角和出口角作为一个参数进行调节，即同时改变这两个量，以观察它们对风机流场的影响。

图 11 为蜗舌位置角、出口角同时变化对风机进口流速的影响分布曲线，三条曲线分别为 $\theta_2=130^\circ(\delta=35^\circ)$ 、 $\theta_2=135^\circ(\delta=40^\circ)$ 、 $\theta_2=140^\circ(\delta=45^\circ)$ 时风机进口流速变化曲线，其横坐标为进口处 x 方向坐标值，纵坐标为速度。由图 12 可以看出，随着蜗舌位置角 δ 、出口角 θ_2 的增大，曲线整体有所上升，即随着蜗舌位置角和出口角的增大，风机进口流速增大。

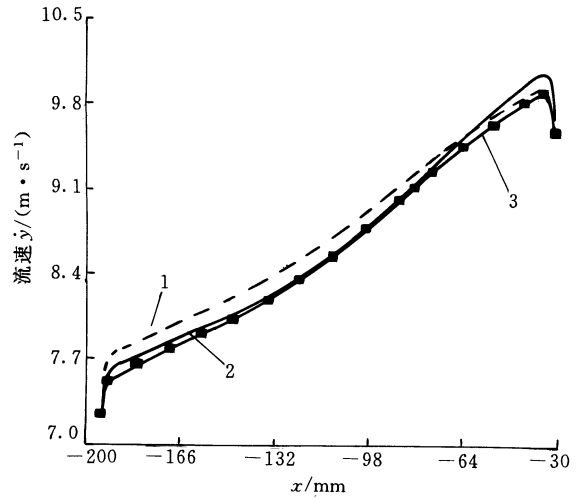


图 11 蜗舌位置角、出口角同时变化对风扇进口速度的影响分布曲线
1. $\theta_2=140^\circ, \delta=45^\circ$ 2. $\theta_2=135^\circ, \delta=40^\circ$
3. $\theta_2=130^\circ, \delta=35^\circ$

图 12 为蜗舌位置角、出口角同时变化对风机出口流速的影响分布曲线，三条曲线分别为 $\theta_2=130^\circ(\delta=35^\circ)$ 、 $\theta_2=135^\circ(\delta=40^\circ)$ 、 $\theta_2=140^\circ(\delta=45^\circ)$ 时风机出口流速变化曲线，其横坐标为出口处 y 方向坐标值，纵坐标为速度值。由图 11 可看出，尽管曲线变化不是很大，但总体来说风机出口流速是随着蜗舌位置角、出口角的增加而增大的，从图 12 中风机出口平均流速的变化曲线也可以看出这种趋势。

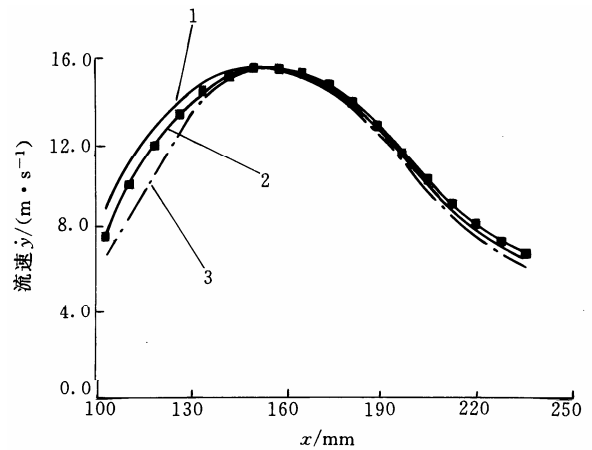


图 12 蜗舌位置角、出口角同时变化对风扇出口速度的影响分布曲线
1. $\theta_2=140^\circ, \delta=45^\circ$ 2. $\theta_2=135^\circ, \delta=40^\circ$ 3. $\theta_2=130^\circ, \delta=35^\circ$

同时就蜗舌位置角、出口角同时变化对风机出口平均流速的影响，将计算的结果与相同条件下试验所得数据^[7]进行了比较，计算结果与试验结果的最大误差在 10% 以内，说明计算结果与试验所得结果基本一致。

3 结 论

利用 CFD 分析软件 STAR-CD 对贯流风机内部气体流动进行计算模拟,分析了进口角、蜗舌间隙、蜗壳间隙、出口角和蜗舌位置角等壳体参数变化对涡心位置以及贯流风机进、出口流速的影响,将模拟结果与试验结果进行了比较,结果表明数值模拟的结果与试验结果基本吻合。对贯流风机的性能模拟与分析,为改善贯流风机的工作性能提供了依据,为贯流风机优化设计打下基础。

主要的研究结论如下。

(1) 随着进口角 θ_1 减小,进口流速增加,速度分布较均匀,即提高了风机的吸气能力,但同时随着进口角减小,进风面积也随之减小,从而导致出口速度降低。因此,根据风机的不同用途,进口角有不同的选取。当风机用作吸杂部件时,要求风机具有较强的吸杂能力,但不能排出过多的气体(排气量过大会给除尘带来很大困难),这时进口角应取较大值,如大于 120° 。当风机主要用于排气时,要求排气压力高、流量大,这时进口角应取得小一些,如小于 80° 。

(2) 随着蜗舌间隙 ε_1 的减小,出口流速增加,这是因为蜗舌间隙减小,偏心涡外移,从而使气流的回流减少,提高了出口流量;虽然蜗舌间隙减小时流量变大,但是蜗舌间隙减小,噪声也会相应增加,一般蜗舌间隙为叶轮外径的 $6\% \sim 9\%$ 之间时可获得较好的气动特性与噪声特性。

(3) 随着蜗壳间隙 ε_2 的减小,进口流速和出口流速均有所增加,但分析表明蜗壳间隙的影响与进口角、蜗舌间隙产生的影响相比要弱一些。

(4) 随着蜗舌位置角 δ 、出口角 θ_2 的增加,风机进、出口流速均有所增大,但它们的影响相对进口角、蜗舌间隙产生的影响也较弱。

参 考 文 献

- 1 Tanaka S, Murata S. Scale effects in cross flow fans (effects of fan dimensions on flow details and the universal representation of performances). *JSME International Journal*, 1995, 38(3): 388~397
- 2 Tsurusaki H, Tsujimoto Y, Yoshida Y, et al. Visualization measure and numerical analysis of internal flow in cross flow fan. *Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119(3): 633~638

- 3 Tsurusaki H, Tsujimoto Y, Yoshida Y, et al. Study of cross-flow-fan internal flow by flow visualization (discussion of measured results by particle-tracking velocimetry). *Journal of Fluids Engineering*, 1996, 39(3): 540~545
- 4 刘师多,周炜. 横流风机吸气能力与壳体参数的关系. *洛阳工学院学报*, 1998, 19(3): 26~30
- 5 杨波,钟芳源,袁辉靖. 横流风机内部流动试验研究. *机械工程学报*, 2000, 36(6): 68~70
- 6 陈次昌. 横流式风机内部流动的研究. *农业机械学报*, 1995, 26(4): 90~94
- 7 赵京华,万淑敏. 横流风机工作性能的试验研究. *天津商学院学报*, 1995, 15(4): 1~6
- 8 赵系华. 横流式农用清洗风机内部气体流动数值模拟研究. *吉林工业大学学报*, 1989, 6(3): 57~63
- 9 王军,金培耕,伍光辉. 空调用轴流风扇系统内流特性的分析与应用. *工程热物理学报*, 2002, 23(3): 305~308

SIMULATION OF FLOW FIELD AND PERFORMANCE ANALYSIS OF CROSS-FLOW FAN

Hu Junwei Ding Guoliang

Zhao Li Zhang Chunlu

(Institute of Refrigeration & Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: The internal flow of a cross-flow fan is simulated with CFD software STAR-CD, and the influence of structure parameters on the performance of the cross-flow fan is analyzed. The structure parameters include volute tongue clearance, inlet angle, volute case clearance, volute tongue angle, outlet angle and so on. Based on the analysis of the influences of the structure parameters on the velocity of inlet and outlet, the relationship between the structure parameters and the flow field of the cross-flow fan can be determined. Some calculated results are verified by the experimental data and show they are reasonable.

Key words: Cross-flow fan CFD Structure parameters Numerical simulation

作者简介: 胡俊伟,男,1975年出生,博士研究生。主要从事制冷空调数值模拟研究。

E-mail: glding@mail.sjtu.edu.cn