

吸粮机三级离心风机内部流场的数值模拟

丁问司, 何祥滨

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘要: 为了较好地捕捉多级离心风机内部流动特征, 该文以吸粮机使用的三级离心风机为研究对象, 应用 FLUENT6.3 软件对其内部流场进行了整机三维稳态可压缩计算。计算过程中综合考虑了准确性和经济性, 以 Pro/E 系统建立了风机的全流道模型, 利用动参考系 (moving reference frame, MRF) 模型实现了叶轮间流动参数的实时传递, 用重整化群 (renormalization group, RNG) κ - ϵ 湍流模型、一阶迎风空间离散格式、Roe-FDS (flux difference splitting) 通量差分方法实现了该三级离心风机整机的可压缩计算。根据计算结果, 得到了风机内部主要区域的压力与速度分布图, 通过分析发现风机内部各级叶轮间气体流动速度基本不变, 静压力和总压力逐级上升, 第 1 级和第 2 级叶轮内的流场分布呈对称性, 而第 3 级叶轮内的流场分布呈非对称性。通过对蜗壳内部流场的分析发现了此风机内部流场在蜗壳小端流动不顺畅的设计缺陷, 并给出了蜗壳结构的改进意见, 为进一步提高风机效率提供了参考。

关键词: 离心, 风机, 流场, 串联, 数值计算

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.11.015

中图分类号: TH432

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-11-0078-07

丁问司, 何祥滨. 吸粮机三级离心风机内部流场的数值模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 78-84.

Ding Wensi, He Xiangbin. Numerical simulation of internal flow field in three-stage centrifugal fan of grain sucker[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 78-84. (in Chinese with English abstract)

0 引言

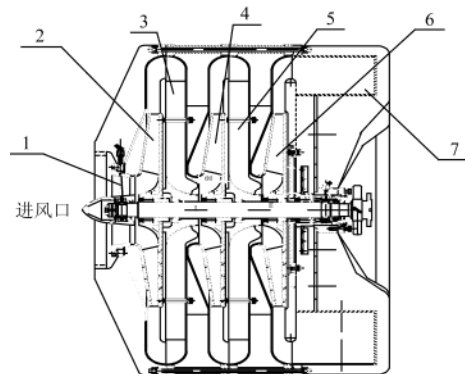
离心风机是目前应用最广的风机设备, 它具有效率高、结构简单、操作方便、噪音小等优点。目前, 粮食工程上使用的离心风机多为单级风机, 为特定的场合提供所需的流量和压力, 但是在大宗粮食散货运输的场合, 单级风机提供的压力和流量不能满足要求, 需要采用多级离心风机, 以提高输送能力。作为气力输送装置的气源驱动核心部件, 气力输送系统中离心风机内部流动备受国内外专家学者的关注, 如清华大学李建锋利用 FLUENT 对 9-26 型高压离心风机内部三维气体流动进行了数值模拟, 得到了其内部流动主要特征^[1]; 西安交通大学李景银以 9-19 No.6 风机为例分析了该风机内部复杂流场及二次流和射流-尾迹结构^[2], 同时对自主开发的 7-40 风机进行了全工况数值模拟, 并对大、中、小 3 种流量下风机蜗壳的内部流场进行了全面研究, 分析了蜗壳对叶轮流动的影响^[3]; SheamChyun Lin 用 Star-CD 全三维不可压模型对前向离心风机进行了整机数值模拟^[4]。然而, 上述研究成果均是基于单级离心风机, 到目前为止, 对多级离心风机内部流场的研究成果少见报道^[5-9]。本文以此为出发点, 利用 FLUENT6.3 对大吨位吸粮机 (150 t/h) 采用的 DJLN07 型三级离心风机内部流动进行了全三维

整机可压缩数值计算。希望通过模拟计算展示多级离心风机内部流动特点, 同时也为多级离心风机的优化设计提供参考。

1 数值计算模型

1.1 流道几何模型

本文研究的三级离心风机结构如图 1。该风机组主要由集流器、三级叶轮、两级导风盘和蜗壳等主要部件组成。主要参数如下: 流量 $Q=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 全压 $P=59 \text{ kPa}$, 转速 $n=4\ 600 \text{ r/min}$, 叶轮外径 $D_2=700 \text{ mm}$, 叶轮进口宽度 $b_1=48 \text{ mm}$, 叶轮出口宽度 $b_2=22 \text{ mm}$, 叶片数 $Z=24$, 蜗壳外径 $R=1\ 130 \text{ mm}$ 。



1. 集流口 2. 第 1 级叶轮 3. 导风盘 I 4. 第 2 级叶轮 5. 导风盘 II
6. 第 3 级叶轮 7. 蜗壳

图 1 三级离心风机结构图

Fig.1 Structure diagram of three-stage centrifugal fan

在建模过程中, 利用 Pro/E 系统建立各部件内部流道后装配成一整体模型。同时为了与风机性能试验工况相

收稿日期: 2011-03-02 修订日期: 2011-09-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50775075)

作者简介: 丁问司 (1968-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事流体传动与控制方面的研究。广州 华南理工大学机械与汽车工程学院, 510641。Email: wsding@scut.edu.cn

匹配，获得准确的边界条件，在风机进口和出口分别添加了一段管道流域，且管道最终出口为一个宽度 8 mm 的圆环。实现数值计算的最终模型如图 2a 所示。

1.2 网格模型

研究中网格模型利用 GAMBIT 软件来划分。对于三级离心风机，考虑其内部流动的复杂性，为使所有网格扭曲率控制在 0.9 以下，在进行网格划分前，将该风机的内部流道分割成 24 个区域，然后在不同区域，按各区域尺度不同，划分成不同尺寸的非正则网格，全机一共划分为约 168 万个网格。图 2b 所示为该三级离心风机网格模型。

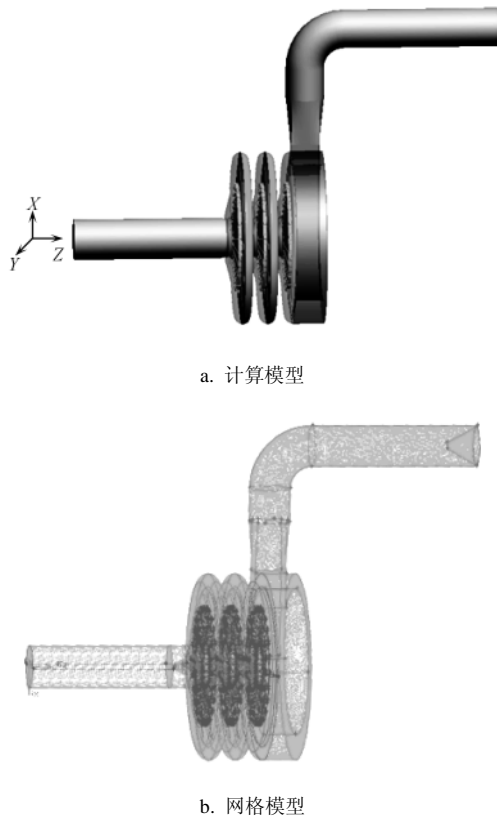


图 2 风机整机计算模型和网格模型

Fig.2 Calculation model and network model of whole machine of fan

1.3 数值方法

由于风机转速达到 4 600 r/min，叶片出口处气流的速度较高，马赫数大于 0.3，所以应考虑流体的压缩性，将风机内部流体设为可压缩模型的理想气体。湍流模型选用考虑旋转效应的 RNG (renormalization group) κ - ϵ 两方程模型，进壁处应用标准壁面函数。通量类型采用 Roe-FDS (flux difference splitting) 通量差分方法，离散格式设为一阶迎风格式。收敛标准取各余项小于 0.01。

1.4 边界条件

入口边界采用入口压力并给定压力值，出口边界采用出口压力并给定压力值。对于叶轮内部及其附近流体流动的描述则采用动参考坐标系 (moving reference frame, MRF)模型，由于此风机为三级，所以将三级叶轮内部流域及其附近流域流体的流动设为 MRF 模型，且每级设置区域的形状相同，如图 3 所示。

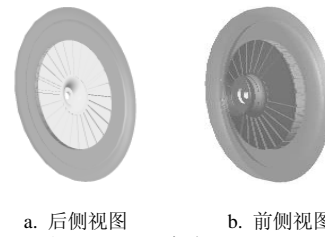


图 3 每级叶轮动参考系模型设置区域

Fig.3 Setting region of moving reference frame model in each stage impeller

2 流场状态分析

2.1 风机压力场分析

为方便研究，取风机在图 2a 中标出 $X=0$ 截面作为分析对象。图 4a 和图 4b 所示为该截面上的静压力和总压力分布。由图 4a 可见，风机内部静压力从风机进口处沿流道是逐级上升的，这是叶轮做功的表现。每级叶轮之间压力变化都较平均。在第 1 级和第 2 级叶轮流道中，静压力分布几乎是以风机转动轴线对称分布的，但在第 3 级叶轮流道中，由于蜗壳的存在而显示出非对称性。在叶轮内部区域，压力变化梯度最高，在导风盘区域压力几乎没变化。图 4b 所示为总压力图，其分布与静压分布基本类似。

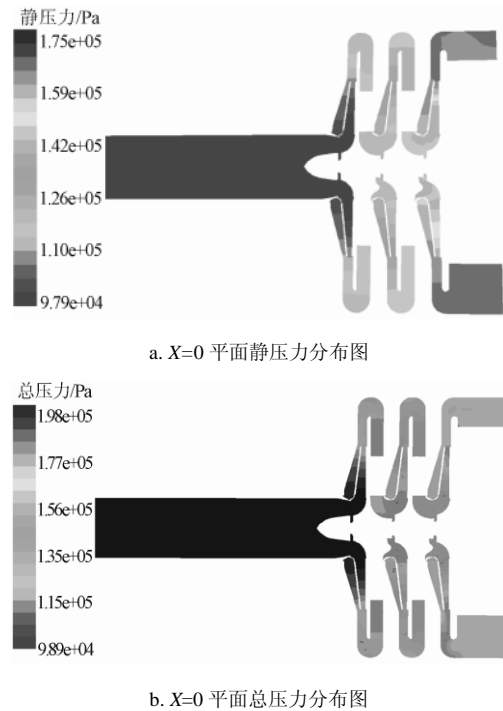


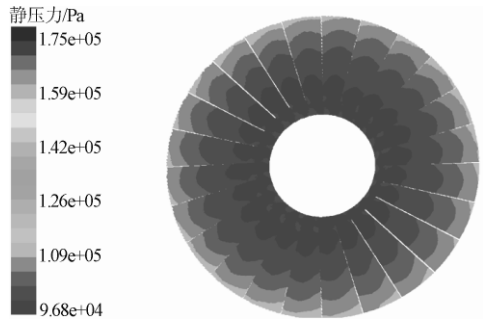
图 4 $X=0$ 平面的静压力和总压力分布图

Fig.4 Distribution diagram of total pressure and static pressure in $X=0$ plane

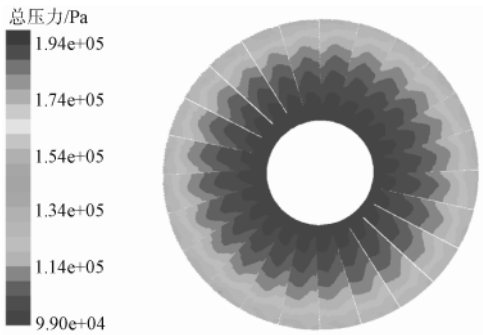
图 5 给出了各级叶轮内部流道的静压力和总压力分布。从图中可看出，各级叶轮内部的静压力和总压力都处在不同数值区间，但无论哪级叶轮，其内部压力分布都和单级离心叶轮的内部压力分布相似^[10-14]，随着流体流向叶轮的出口，同一叶片的压力面和吸力面的压力都逐渐升高，但压力面所受的最大压力总要比吸入面所受

的最大压力要大，并且流道中间的压力要比流道两边的压力低。叶轮内部压力的最小值出现在进口处的吸入面上，最大值出现在出口处的压力面上^[15-16]。从图 5 中可以明显地看出前两级叶轮内部压力几乎呈中心对称分布，而第 3 级叶轮则不具有对称性。

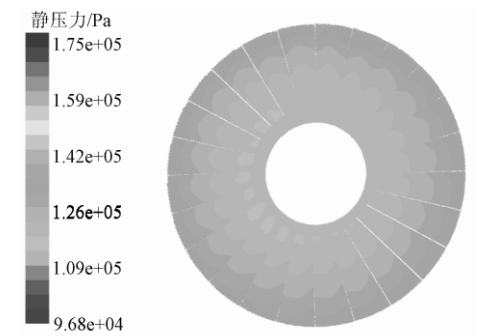
蜗壳截面的静压和总压分布如图 6 所示，由图可以看出，蜗壳内部压力随蜗壳流道从小到大的方向逐渐增大，最后在出口管道中形成稳定的压力。



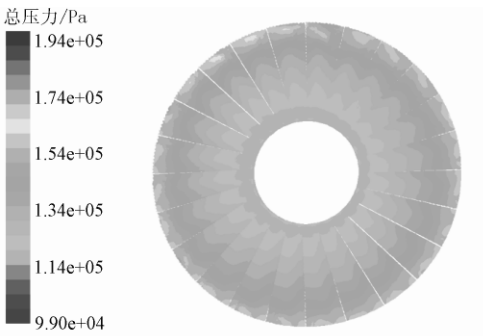
a. 第 1 级叶轮内部流道静压力分布图



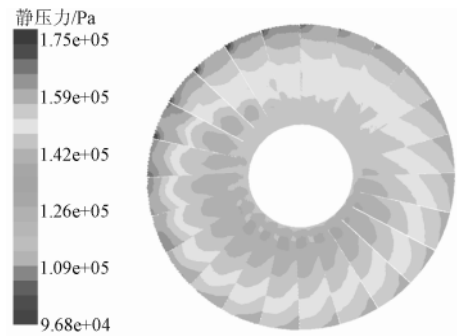
b. 第 1 级叶轮内部流道总压力分布图



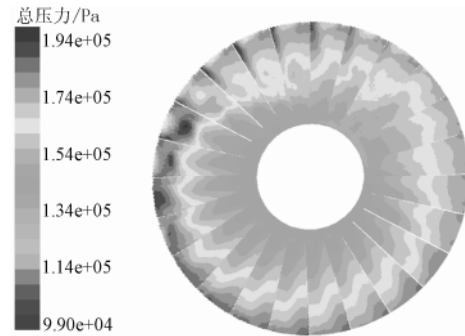
c. 第 2 级叶轮内部流道静压力分布图



d. 第 2 级叶轮内部流道总压力分布图



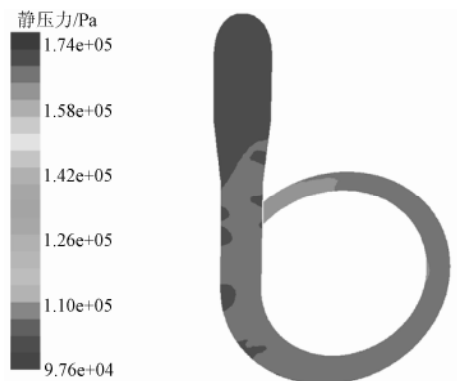
e. 第 3 级叶轮内部流道静压力分布图



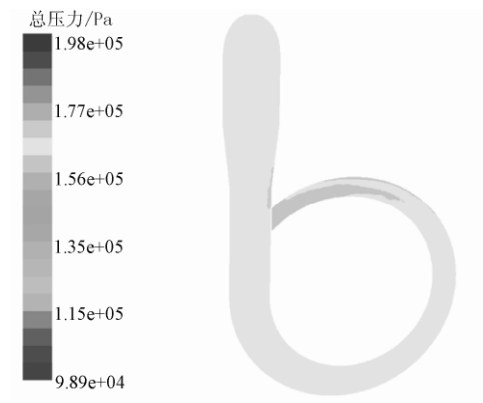
f. 第 3 级叶轮内部流道总压力分布图

图 5 三级叶轮内部流道静压力和总压力分布图

Fig.5 Static and total pressure distribution diagram of inner flow in three stage impellers



a. 静压力



b. 总压力

图 6 蜗壳截面静压力和总压力分布图

Fig.6 Static and total pressure distribution diagram of volute section

2.2 风机速度场分析

图 7 给出了风机在 $X=0$ 平面上的速度分布。从图中可以看出，各级叶轮内部气体流动速度大致相同，在叶轮区域，速度的变化梯度最大，并在叶轮出口处达到最大值。当流体经过导风盘速度下降较快，而当流体流到蜗壳处时，速度将从蜗壳的外缘向内缘逐步降低。

图 8 给出了各级叶轮截面的速度分布。此截面中间区域即为叶轮所在区域。由图 8 可见，无论哪一级叶轮内部，流体速度都是从叶轮进口处逐步增大，在叶轮出口处达到最大值，且速度变化梯度较均匀。在 2 叶片间的流道中，速度分布呈 W 型，即靠近 2 叶片的部分区域和中间区域的速度相对较低，其他区域相对较高，而且靠近叶片压力面的流体速度总比靠近另一叶片吸力面的速度大^[17-18]，但在叶轮出口处，速度

的最大值出现在靠近吸入面的一侧。由于此蜗壳的最小端和最大端不相通，受此影响在第 3 级叶轮处，有部分区域内的流体速度相对较低，严重影响气体流动的顺畅性，如图 8e、f 所示。

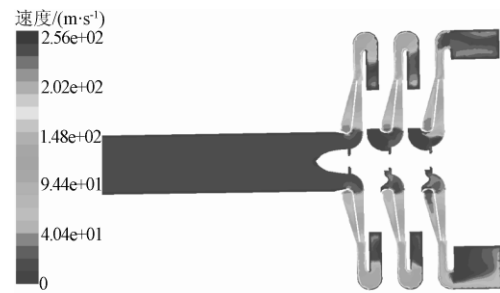
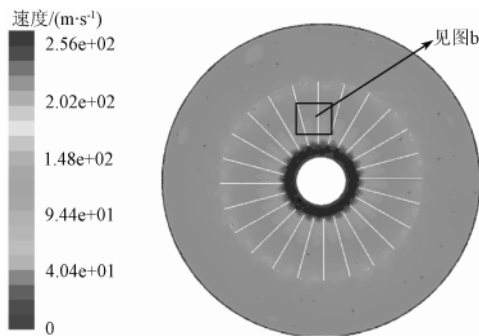
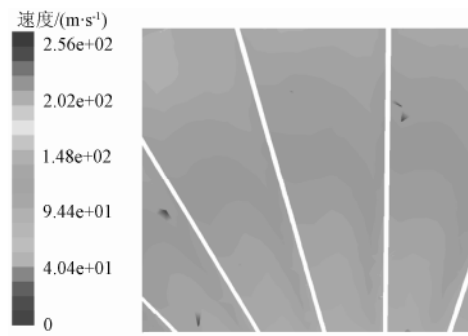


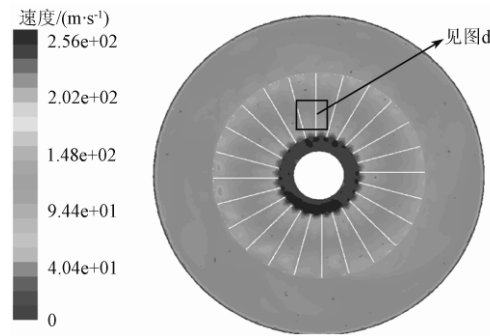
图 7 $X=0$ 平面气体流动速度分布图
Fig.7 Flow velocity distribution diagram of gas in $X=0$ plane



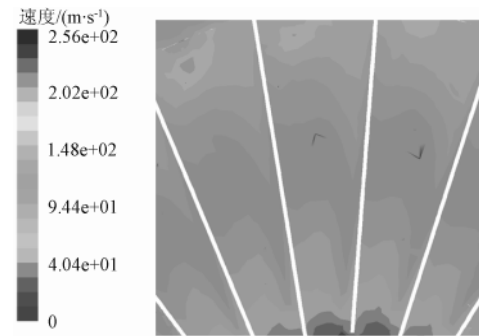
a. 第 1 级叶轮截面速度分布图



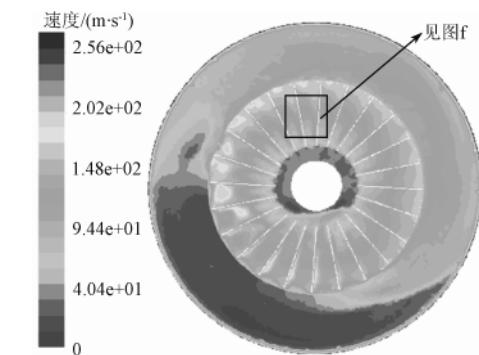
b. 图 a 中黑框区域放大后速度分布图



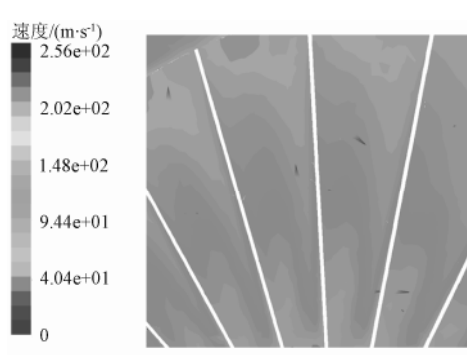
c. 第 2 级叶轮截面速度分布图



d. 图 c 中黑框区域放大后速度分布图



e. 第 3 级叶轮截面速度分布图



f. 图 e 中黑框区域放大后速度分布图

图 8 三级叶轮截面气体流动速度分布图

Fig.8 Flow velocity distribution of gas on three stage impellers sections

蜗壳截面的速度矢量图如图 9a 所示, 从图 9 中可看出, 气体在该蜗壳内流动很不顺畅, 产生了多处的漩涡。分析认为发生这种现象的主要原因是蜗壳形状, 即蜗壳小端与蜗壳出口的通道被壁面所挡, 由于气体运动惯性, 此壁面的存在将使气体在蜗壳内绕流时在小端区域形成大面积低速区, 该区域气流不足, 压力降低, 这时风机内部其他区域的气体将通过逆流来进行补充, 因而形成了较大区域的漩涡和回流。这种现象将导致风机效率的严重降低, 并造成较强的运行噪声^[19]。说明此蜗壳的结构有待改进。

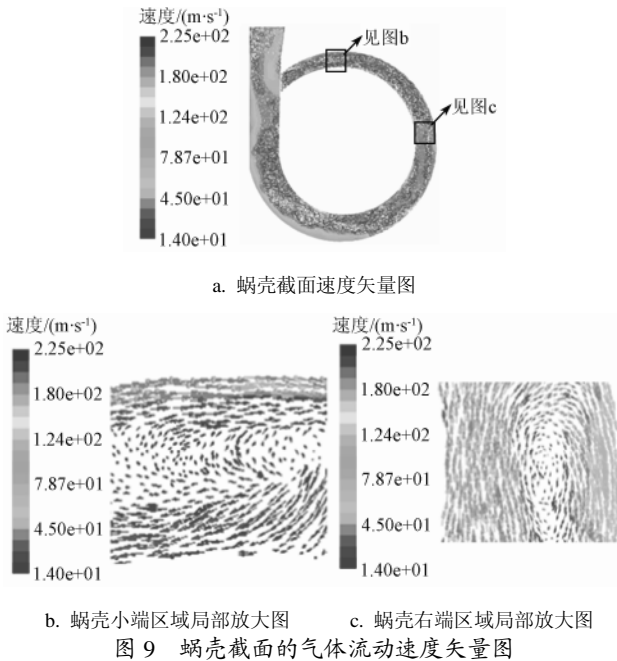
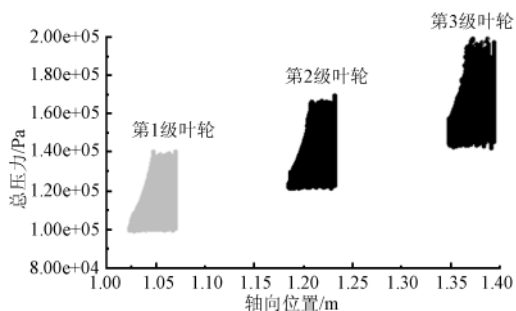


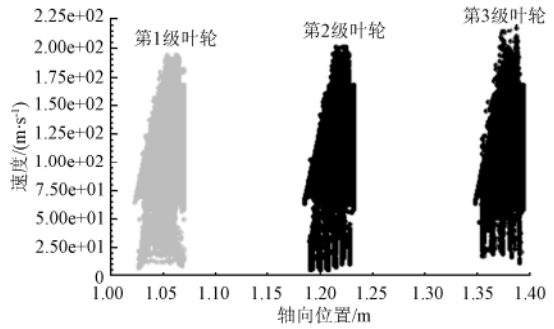
Fig.9 Flow velocity vector diagram of gas on volute plane

3 各级叶轮压力-速度耦合关系分析

本文研究的三级风机在运行时, 通过同一传动轴进行传动, 各级间具有相同的工作转速和相似流道, 各级工作参数与上一级的输出参数有较强的联系。图 10a、b 给出了各级叶轮沿轴向的总压力和速度场分布情况, 由图 10 可知, 总压力和流动速度在各级叶轮内的分布形状相似, 但总压力逐级递增, 且各级间的递增幅度基本一致, 而速度在各级叶轮之间变化不大。图 11 则给出了各级叶轮内总压和速度场联合分布情况。从该图也能看出每级叶轮总压力均随着速度的增大而增大; 且变化趋势相同; 同一速度, 第 3 级叶轮内总压力>第 2 级叶轮内总压力>第 1 级叶轮内总压力。



a. 各级叶轮内总压力分布图



b. 各级叶轮内速度分布图

图 10 各级叶轮内总压力和速度分布图

Fig.10 Total pressure and velocity distribution diagram of each stage impeller

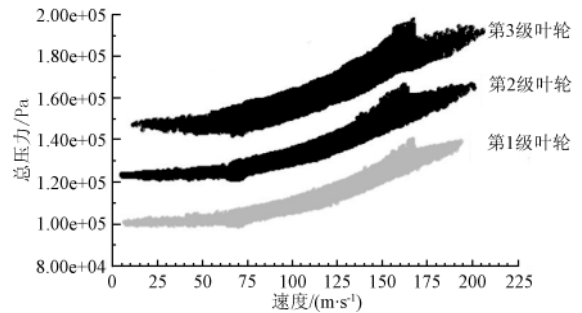


图 11 各级叶轮内压力速度联合分布图

Fig.11 Pressure -velocity distribution diagram of each stage impeller

4 结论与讨论

本文主要对产能为 150 t/h 吸粮机所用的 DJLN07 三级离心风机内部流场进行了数值计算, 观察了该串联式离心风机的内部流动情况。分析数值计算后的结果, 得到以下结论:

1) 气体进入风机后, 其压力在各级叶轮内不断提高。与单级离心风机叶轮内的压力分布类似, 各级叶轮中, 叶片压力面所受的最大压力总要比吸入面所受的最大压力大。前两级叶轮内的压力分布具有中心对称性, 而第 3 级没有。

2) 气体流经各级叶轮时, 由于叶片的转动使气体的速度不断升高, 并在叶轮出口处达到最大。在各级叶轮内部对应位置, 气体的速度大小基本一致。

3) 气体在蜗壳内部流动不顺畅, 产生了多处漩涡及回流现象, 这说明现有蜗壳的设计存在不合理之处, 有待改进。根据上述分析, 笔者认为可通过下述方法改善蜗壳内流动: 将蜗壳小端制成一定角度的斜面形状, 顺着气流扩散方向由浅入深, 以避免出现大面积的低速区和回流的存在, 同时如果将蜗壳截面形状由方形变成圆形, 其内部流动顺畅性将会有较大提高。

通过对多级离心风机内部流场的计算, 可较好地捕捉其内部流动特征, 分析各级间流场耦合关系。同时亦可为多级离心风机的改进设计提供依据。

[参 考 文 献]

[1] 李建锋, 吕俊. 风机流场的数值模拟[J]. 流体机械, 2006, 34(4): 10-13.

- Li Jianfeng, Lü Jun. Simulation of air flow in a blower[J]. Fluid Machinery, 2006, 34(4): 10—13. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李景银, 田华, 牛子宁. 叶片开缝的离心风机流场研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(12): 2028—2030.
Li Jingyin, Tian Hua, Niu Zining. Study on the flow fields in a centrifugal fan with slots along the blade ends[J]. Journal of Engineering the Rmophysics, 2009, 30(12): 2028—2030. (in Chinese with English abstract)
- [3] 吕峰, 牛子宁, 李景银. 离心风机蜗壳内部流动研究[J]. 流体机械, 2009, 37(6): 14—19.
Lü Feng, Niu Zining, Li Jingyin. Study of the flow in the volute of centrifugal fan[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(6): 14—19. (in Chinese with English abstract)
- [4] Lin Sheam-Chyun, Huang Chia-Lieh. An integrated experimental and numerical study of forward-curved centrifugal fan[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6): 421—434.
- [5] 王慧萍, 师清翔, 刘师多, 等. 离心风机与轴流风机串联排气特性试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 72—74.
Wang Huiping, Shi Qingxiang, Liu Shiduo, et al. Experimental study on the performance of the centrifugal fan and the axial flow fan in series[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 72—74. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈慎宇, 睦曦, 王灿星. 离心式通风机内部流场的数值模拟[J]. 流体机械, 2007, 35(9): 22—25.
Chen Shenyu, Gui Xi, Wang Canxing. Three-dimensional numerical simulation of the internal flow in the centrifugal fan[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(9): 22—25. (in Chinese with English abstract)
- [7] 徐长植, 毛义军. 离心通风机整机三维流场的数值模拟[J]. 风机技术, 2005, 5(2): 1—4.
Xu Changzhi, Mao Yijun. Numerical simulation of the whole three-dimensional flow field in centrifugal fan[J]. Fan Technology, 2005, 5(2): 1—4. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘强, 王发展, 孙大洪, 等. 离心风机内部流场研究的现状与展望[J]. 矿山机械, 2010, 38(13): 33—34.
Liu Qiang, Wang Fazhang, Sun Dahong, et al. Study progress and prospect of inner flow fields of centrifugal fans[J]. Mining Machinery, 2010, 38(13): 33—34. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘瑞韬, 徐忠. 离心叶轮机械内部流动的研究进展[J]. 力学进展, 2003, 33(4): 518—532.
Liu Ruitao, Xu Zhong. Research progress of the internal flow in centrifugal impeller[J]. Mechanics Progress, 2003, 33(4): 518—532. (in Chinese with English abstract)
- [10] 邵卫, 李意民, 贾利红. 离心风机内部流场模拟[J]. 煤矿机械, 2006, 27(7): 47—49.
Shao Wei, Li Yimin, Jia Lihong. Numerical simulation of internal flow in centrifugal fan[J]. Coal Mine Machinery, 2006, 27(7): 47—49. (in Chinese with English abstract)
- [11] Yang Ce, Chen Shan, Li Du, et al. Inlet recirculation influence to the flow structure of centrifugal impeller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(5): 647—654.
- [12] Yu Zu, Li Song, He Wei, et al. Numerical simulation of flow field for a whole centrifugal fan and analysis of the effects of blade inlet angle and impeller gap[J]. Hvac & Research, 2005, 11(2): 263—283.
- [13] 张吉礼, 马良栋, 任晓东. Ghost 离心叶轮内部湍流流动数值模拟[J]. 流体机械, 2009, 37(3): 19—23.
Zhang Jili, Ma Liangdong, Ren Xiaodong. Numerical simulation of internal turbulent flow in ghost centrifugal impeller[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(3): 19—23. (in Chinese with English abstract)
- [14] 彭晓强, 张永学, 曹树良, 等. 低比转速离心泵叶轮出口紊流流动结构分析[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 69—72.
Peng Xiaoqiang, Zhang Yongxue, Cao Shuliang, et al. Numerical-analysis of 3D turbulent flow in a low specific speed pump impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(1): 69—72. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘厚林, 董亮, 谈明高, 等. 离心泵网格划分中 Sliver 单元的消除[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 103—107.
Liu Houlin, Dong Liang, Tan Minggao, et al. Sliver elements elimination for mesh generation of centrifugal pumps[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 103—107. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张德胜, 施卫东, 陈斌, 等. 低比转速离心泵内部流场分析及试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 108—113.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Chen Bin, et al. Turbulence analysis and experiments of low-specific-speed centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 108—113. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李国威, 王岩, 吕秀丽, 等. 偏置短叶片离心泵内三维流场数值模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 151—155.
Li Guowei, Wang Yan, Lu Xiuli, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow field in centrifugal pump with deviated short splitter vanes[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 151—155. (in Chinese with English abstract)
- [18] 沙毅. 旋流泵性能及内部流场试验分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 141—146.
Sha Yi. Experiments on performance and internal flow of a vortex pump[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4): 141—146. (in Chinese with English abstract)
- [19] 辛喆, 吴俊宏, 常近时. 混流式水轮机的三维湍流流场分析与性能预测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 118—124.
Xin Zhe, Wu Junhong, Chang Jinshi. Flow field analysis and performance prediction of three-dimensional turbulent flow in francis turbine[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(3): 118—124. (in Chinese with English abstract)

Numerical simulation of internal flow field in three-stage centrifugal fan of grain sucker

Ding Wensi, He Xiangbin

(College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: In order to catch the figure of internal flow field of multi-stage centrifugal fan, centrifugal fan of a pneumatic grain sucker was used as the research object in this thesis, three-dimensional steady and compressible computation was performed for its whole internal flow by using FLUENT 6.3 software. During the course of the calculation, the accuracy and efficiency of computation were overall considered, the model of all channels were built by using Pro/E as a solution domain, the MRF(moving reference frame) method was used to realize real-time transmission of flow parameters among each stage impeller, the RNG(Renormalization Group) k- ϵ turbulent model and method of Roe-FDS (Roe flux difference splitting) flux difference with first order upwind spatial discrete schemes were used to realize the simulation. According to the result, the distribution diagrams of pressure and velocity in the main area were provided, through analyzing it was found that flow velocity of gas between each impeller maintains the same level, but static pressure and total pressure increase gradually, and except the third impeller, the distribution of flow field in the first and second impeller is mostly symmetrical. Through analyzing the internal flow field of volute, the design defect of this fan that gas could not flow smoothly in the small part of volute was discovered, and the advice for improving volute structure was given, which provides reference for improving the efficiency of the fan.

Key words: centrifugation, fans, flow fields, series, numerical simulation