

基于 FLUENT 的紧密纺大风机系统流场模拟与分析

谢春萍^{1,2}, 潘 鹏^{1,2}, 苏旭中^{1,2}, 黄正科^{1,2}

(1. 生态纺织教育部重点实验室(江南大学), 江苏 无锡 214122;

2. 江南大学 纺织服装学院, 江苏 无锡 214122)

摘要 在紧密纺大风机系统设计中, 车头、车尾各锭的负压差异要保持在允许误差范围之内。针对此问题, 通过标准 $k-\epsilon$ 双方程模型对紧密纺大风机系统模型进行分析, 应用三维建模软件 Gambit 与 CFD 软件 Fluent 对系统内部流场进行三维仿真模拟, 了解内部流场的特性, 揭示内部流场的压强分布与变化规律。结果表明: 为实现入口气压一致, 必须将主风道的气压降保持在较低的范围, 减少支管处能量损耗, 利用 CFD 技术对紧密纺大风机系统内部流场进行模拟计算, 得到的流场结果与实际值基本符合, 计算结果得到了实测值的验证。

关键词 紧密纺; 大风机系统; 流场; CFD; 节点; 网格; 旋涡区; 紊流

中图分类号: TS 104.7 文献标志码: A

Flow simulation and analysis on FDF of compact spinning based on FLUENT

XIE Chunping^{1,2}, PAN Kunpeng^{1,2}, SU Xuzhong^{1,2}, HUANG Zhengke^{1,2}

(1. Key Laboratory of Eco-Textile (Jiangnan University), Ministry of Education, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. School of Textiles and Clothing, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract When designing FDF system of compact spinning, the negative pressure drops resulting from spindles at the front and back of the machine should be kept within allowance. For this reason, flow simulation and analysis of FDF on compact spinning is undertaken based on $k-\epsilon$ two-equation model, and the 3-D turbulent flow of the FDF was simulated numerically by 3-D software of Gambit and CFD software Fluent. The flow rule and characteristics and pressure drop distribution of its internal flow field are obtained. The results indicate that the pressure drop in the main pipe must be kept minimum and the energy consumption in the branch pipes should be reduced in order to maintain a constant air pressure at the inlet. The calculated value of the internal flow field of FDF based on simulation using CFD technology is in good agreement with the actual measurement value.

Key words compact spinning; FDF system; flow field; Computational Fluid Dynamics; node; grid; vortex region; turbulence

国内企业对紧密纺大风机系统的研发大都基于流体力学基本原理的理论计算与实验检验。本文利用流体分析软件 Fluent 对紧密纺大风机系统内部流场特性进行模拟仿真。

大风机管道系统是紧密纺设备的重要组成部分, 其产生的负压直接影响紧密纺集聚效能和动力消耗, 通过计算机仿真管道系统的截面形状、整体结构和布置方式, 能够在不影响实际生产的情况下方便、精确地显示管道内压力、流量和温度的分布情

况, 以便于实现对内部流场特性的研究, 为进一步改善整个管道系统形状和结构、降低能耗、实现锭差理想化提供合理的改造建议。

1 CFD 数学方法与模型建立

标准 $k-\epsilon$ 双方程模型是目前使用最广泛的紊流模型^[1], 该模型引入了紊流动能 k 和紊流耗散率 ϵ , 涡黏系数 μ_i 可表示为 k 和 ϵ 的函数, C_μ 为经验常

数,即:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_0 - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon} \epsilon (G_k + G_{3\epsilon} G_b)}{k} - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (2)$$

式中: G_k 为平均速度梯度引起的紊流功能; G_b 为浮力引起的紊流动能产生项; Y_M 为可压紊流中脉动扩张项; $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数; σ_k 、 σ_ϵ 为 k 方程和 ϵ 方程的紊流普朗特数; S_k 、 S_ϵ 为自定义源项。式中经验常数取值分别为: $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $C_{3\epsilon} = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$, 当流动为不可压, 且不考虑自定义源项时, $G_b = 0$, $Y_M = 0$, $S_k = 0$, $S_\epsilon = 0$ 。在一般的流场问题中, $k-\epsilon$ 模型已经得到广泛检验和成功证明^[2]。

2 几何模型的建立和网格划分

利用上述数学原理和思想, 使用 Gambit 建立模型并划分网格, 以紧密纺大风机系统风道作为整个流场加以考察。Fluent 软件本身不能建立模型, 一般由其自带的软件 Gambit 生成, 并进行网格划分。

2.1 模型建立

以对 EJM 128K-SM 型 456 锭普通环锭纺纱机进行紧密纺大风机系统改造为例, 紧密纺大风机系统的风道主要由主风道、支管、次风道、二级支管组成, 如图 1 所示。

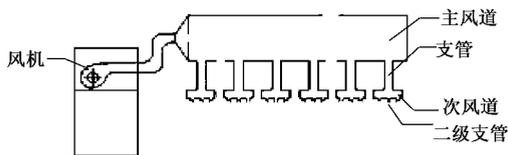


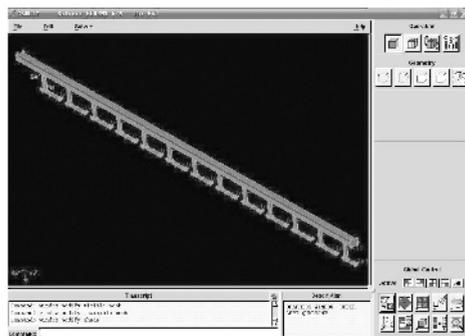
图 1 大风机系统二维结构示意图

Fig.1 2-D structure of FDF system

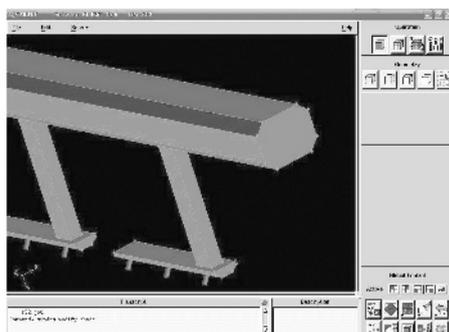
本文使用 Fluent 的前处理软件 Gambit 建立管道系统的三维模型, 如图 2(a) 所示, 局部放大效果图如图 2(b) 所示。

2.2 网格划分

几何模型建立完成之后就要进行网格划分, 网格的质量对于数值计算正确域的稳定性起着非常重要的作用。网格质量包括节点分布、光滑性以及歪斜的角度。



(a) 管道系统的三维模型



(b) 局部放大效果图

图 2 管道系统的三维模型与局部放大效果图

Fig.2 3-D structure model (a) and partial amplified effect (b) of pipe

划分网格时, 主风道整体运用了三棱柱的体网格划分方法。由于直径较小的二级支管内流体速度情况复杂, 因此, 该处湍流流动受壁面的影响很大, 平均流动区域将由于壁面不光滑而明显受到影响。近壁面区域可以分成 3 层: 黏性力层、缓冲层和外层^[3]。在近壁面的外部区域, 湍流动能受平均流速的影响而增大, 湍流运动加剧。通常, 对于这种情况的处理办法是修正湍流模型, 从而使壁面处受黏性力影响的区域也能用网格划分来解决, 对于流体流速变化较大的二级支管需要采用这种网格划分方法^[4-5], 如图 3 所示。

2.3 边界条件加载及求解器选择

大风机系统模型中, 有 70 个负压进口, 可分为 13 个组, 设为压力进口 (pressure-inlet) 边界条件; 主风道出口设为压力出口 (pressure-outlet) 边界条件; 其他设为壁面 (wall) 边界条件, 采用标准壁面函数计算。

本文采用 Segregated 算法, 对材质为空气的湍流模型进行 $k-\epsilon$ 方程的模型计算, 设定收敛条件为 0.0001^[6]。设置材料属性为空气, 默认密度为 1.225 kg/m^3 , 黏度为 $17.89 \times 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 设定出口

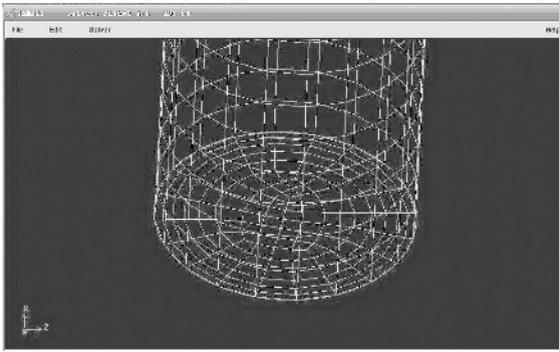


图 3 二级支管示意图

Fig.3 Sketch map of second-class side tube

压力为2 000 Pa,初始化设定。设置监视器迭代次数为 100。

3 计算结果与分析

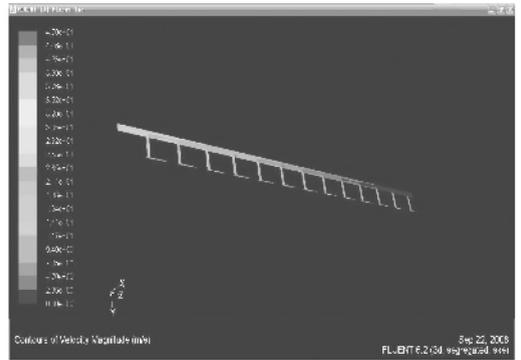
迭代收敛之后,对计算的结果进行后处理。在 Fluent 中,可以用多种形式表达 Fluent 软件计算得到的流场,为了显示 3-D 模型的计算结果,需要创建几个特定的面,并在这些面上显示计算结果,这些具有代表性的面的压强情况可大致描述整个流场的情况。Fluent 自动定义边界为面,如 Inlet-1, Inlet-2, ..., Inlet-13, 压力出口边界上均可显示计算结果。但是这些还不够,还需创建一个能够显示主风道、支管、次风道和二级支管上压强分布情况的一个连续的面,以便直观地显示整个系统的压强分布、气流速度情况。在压力出口试验中,选取了 $x = -2.36\text{ cm}$ 的沿 Z 轴的面,可以较好地观察整个流场中的流速以及压强变化情况^[7]。

3.1 管道内气体流动速度分布

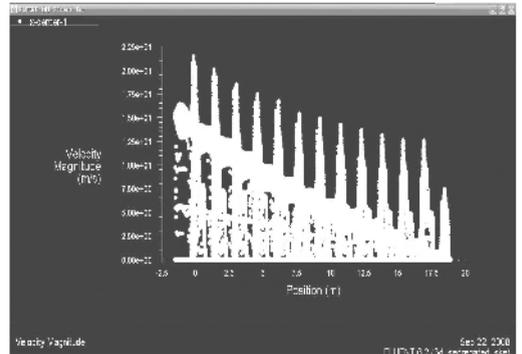
图 4 示出系统内部流场流速与沿 Z 轴气流速度分布情况。在 $x = -2.36\text{ cm}$ 的面上,从车尾的吸风口到车头,气流的速度变化比较明显,车尾的气流速度均为 14.10 m/s ,车头速度均为 2.35 m/s ,整个管道内气流速度出现在车尾支管涡流处,最大值均为 46.99 m/s 。

3.2 管道内气体压强分布

图 5 示出系统内部流场压强分布与沿 Z 轴气流压强分布情况。可以看出,从车尾到车头,整个管道内的气流压强逐渐降低,由于存在沿程能量损耗和局部阻力损失,主风道内的气压由 $1\ 871.88\text{ Pa}$ 逐渐降低到 919.47 Pa ,各支管的气压也相应由 $1\ 599.77\text{ Pa}$ 降低到 783.41 Pa 。从图中可以看出,支管



(a) 系统内部流场流速示意图



(b) 系统内部沿 Z 轴气流速度分布图

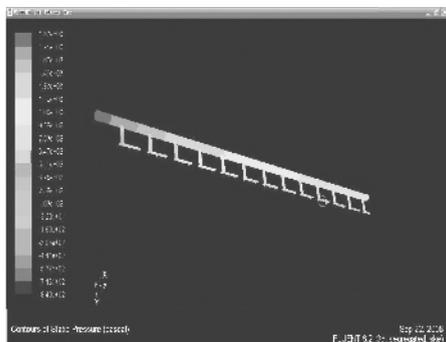
图 4 系统内部流场流速与沿 Z 轴气流速度分布图

Fig.4 Fluid velocity inside system(a) and velocity along Z -axial inside system(b)

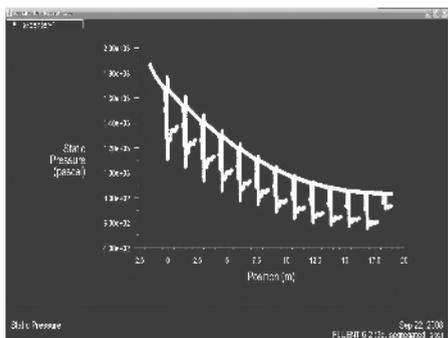
中从上到下存在 600 Pa 左右的能量损耗,这主要是由于支管处的局部阻力损失引起的能耗。

气流流经突然扩大、转向、分岔等局部阻碍时,因惯性作用,主流与壁面脱离,形成漩涡区。局部阻力损失同漩涡区的形成有关,这是因为在漩涡区内质点漩涡运动集中耗能,同时漩涡运动的质点不断被主流带向下游,加剧了下游主流的紊动强度,从而加大能量损失。综上所述,主流脱离壁面,漩涡区的形成是造成局部阻力损失的主要原因^[8]。试验结果表明,在支管处漩涡区越大,漩涡强度越大,局部阻力损失越大,在图 5(b)中,支管处局部阻力损失造成的能量损失为 600 Pa 左右。

在大风机管道系统中,能量损耗还存在局部障碍之间的相互干扰,即不仅仅是在管道分支口处的损失,还包括下游因为紊流加剧而引起的损失。若局部障碍之间相距很近,流体流出前一个局部障碍,在流速分布和紊流脉动还未达到正常均匀流之间,又流入后一个局部障碍,这相连的 2 个局部障碍间存在互相干扰,其损失系数不是正常情况下 2 个局部障碍损失系数之和。根据经典理论,局部障碍直接相连、相互干扰的结果是,局部阻力损失可能有较



(a) 系统内部流场压强分布示意图



(b) 系统内部沿 Z 轴气流压强分布图

图 5 系统内部流场压强分布与沿 Z 轴气流压强分布图

Fig.5 Flow pressure inside system (a) and flow pressure along Z-axial inside system (b)

大的增加或减小,变化幅度约为每个正常局部损失总和的 0.5~3 倍^[4,9]。

3.3 仿真值与模拟值比较

对压强的仿真模拟值与实际测算值进行比较,结果如表 1 所示。

表 1 压强仿真值与实测值比较结果

Tab.1 Comparative results of simulation and measure

| 入流口编号 | 仿真值 | 实测值 | 误差 |
|----------|----------|----------|--------|
| Inlet-1 | 1 599.77 | 1 387.52 | 212.25 |
| Inlet-2 | 1 463.71 | 1 243.56 | 220.15 |
| Inlet-3 | 1 327.65 | 1 127.14 | 200.51 |
| Inlet-4 | 1 191.59 | 1 041.25 | 150.34 |
| Inlet-5 | 1 055.53 | 852.26 | 203.27 |
| Inlet-6 | 978.65 | 783.32 | 195.33 |
| Inlet-7 | 919.47 | 699.12 | 220.35 |
| Inlet-8 | 897.12 | 746.84 | 150.28 |
| Inlet-9 | 811.43 | 640.73 | 170.70 |
| Inlet-10 | 783.41 | 612.82 | 170.59 |
| Inlet-11 | 765.37 | 614.98 | 150.39 |
| Inlet-12 | 732.14 | 591.36 | 140.78 |
| Inlet-13 | 703.25 | 552.47 | 150.78 |

通过对比可以看出,实测值与仿真值之间存在一些误差,经分析认为,仿真值由仿真叠加的累计误

差会引起部分误差,实际测量值(平均值)由于系统的安装连接、内部粗糙度与密封性等原因也会产生一些误差。系统中压强与仿真值误差为 200 Pa 左右,在误差允许的范围之内,故认为仿真结果可靠。

4 结 论

1) 紧密纺大风机系统中,要控制每个出口口的压差在一定的范围内,必须实现将主风道的气压降保持在较低的范围。

2) 系统的支管处能量损耗较大,占整个管道能耗的 30% 左右。

3) 尽量降低管道内的粗糙程度,减少不必要的能耗(如管道内安装使用的螺丝造成涡流等),尤其是当量直径较小的管道。

FZXB

参考文献:

[1] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics and Analysis-Principles and Application Software CFD [M]. Beijing : Tsinghua University Press 2004.

[2] 李文华,苏明军. 常用湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. 水泵技术 2006(4) 39-41.
LI Wenhua, SU Mingjun. The use of common turbulent model in the software of Fluent [J]. Pump Technology, 2006(4) 39-41.

[3] 张宏飞,曹红松,赵捍东,等. 数值仿真中湍流模型的选择[J]. 弹箭与制导学报 2006 26(4) 242-244.
ZHANG Hongfei, CAO Hongsong, ZHAO Handong, et al. The choice of turbulence model in numerical simulation [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006 26(4) 242-244.

[4] MURAKAMI S. Overview of turbulence models applied in CWE 1997 [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998 (74-76): 1-24.

[5] SUDOK S, HIBARA H. Experimental investigation on turbulent flow in a circular-sectioned 90-degree bend [J]. Experiments in Fluids, 1998 25(1) 42-49.

[6] 付曙光,曾良才,张小明,等. 基于 FLUENT 的高压除鳞喷嘴湍流仿真模型 [J]. 武汉科技大学学报, 2007(2) :171-173.
FU Shuguang, ZENG Liangcai, ZHANG Xiaoming, et al. Simulation model of high-pressure descaling nozzle based on Fluent [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2007(2) :171-173.

传感器控制,到达停针位置 E 点时停下。

5 结束语

通过对硬件和软件的优化设计,降低了直驱工业平缝机的电气控制系统成本。该系统具有集成度高,控制器体积小,质量轻,转子无发热的优点。在 180~240 V 的电压区间能正常工作,采用智能模糊速度闭环控制,速度稳定性好,精确的停机位置、闭环的位置控制,消除了拨线时拨到针的可能性。该电路控制系统已经在平缝机中运行良好,满足生产使用的要求。

FZXB

参考文献:

- [1] 方光辉. 变频调速技术在工业缝纫机中的应用[J] 电气传动, 2004(1) 59 - 61.
FANG Guanghui. The application of the frequency varying and speed regulating technique in the industry sewing machine[J]. Electric Drive, 2004(1) 59 - 61.
- [2] 詹阳 邱阿瑞 肖曦 等. 基于 DSP 全数字工业缝纫机交流伺服系统[J]. 电力电子技术, 2005, 39(2) 86 - 87.
ZHAN Yang, QIU Arui, XIAO Xi, et al. DSP-based full-digital AC servo system for industrial sewing machine[J]. Power Electronics, 2005, 39(2) 86 - 87.
- [3] 杨薇薇 沈安文. 基于 DSP 的工业缝纫机驱动控制器的研究[J]. 机械研究与应用, 2005, 18(3) :119 - 120.
YANG Weiwei, SHEN Anwen. Research on driving controller of DSP industry sewing machine[J]. Mechanical Research and Application, 2005, 18(3) :119 - 120.
- [4] 杨建成 蒋秀明 周国庆 等. Fuzzy-PID 复合控制在电子送经中的应用[J]. 纺织学报, 2008, 29(4) :115 - 118.

YANG Jiancheng, JIANG Xiuming, ZHOU Guoqing, et al. Application of Fuzzy-PID compound control on loom electronic let-of and take-up[J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(4) :115 - 118.

- [5] 纪志成 沈艳霞, 薛花. 无刷直流电机自适应模糊控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5) :104 - 109.
JI Zhicheng, SHEN Yanxia, XUE Hua. Study on the adaptive fuzzy control for brushless DC motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5) :104 - 109.
- [6] 代林 高迪驹. 基于模糊控制系统的自整定 PID 参数控制器的设计[J]. 自动化技术与应用, 2005, 25(5) :26 - 29.
DAI Lin, GAO Diju. Fuzzy-based autotuning PID controller[J]. Techniques of Automation and Applications, 2005, 25(5) 26 - 29.
- [7] 陶永华. 新型 PID 控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2002 :101.
TAO Yonghua. New PID Control and Application[M]. Beijing :Machinery Industry Press, 2002 :101.
- [8] HILKERT J M, HULLENDER D A. Adaptive control system techniques applied to inertial stabilization system[C]/SPIE Conference on Acquisition, and Pointing IV. Florida : SPIE-International Society for Optical Engineering, 1990 :190 - 206.
- [9] WOO Zhiwei, CHUNG Hungyuan, LIN Jinye. A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 115(3) :321 - 326.
- [10] 林平 陈丹江 韦鲲 等. 高速工业平缝机精确停针定位控制[J]. 纺织学报, 2006, 27(12) :25 - 28.
LIN Ping, CHEN Danjiang, WEI Kun, et al. Precise control of needle position of the high-speed flat sewing machine[J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(12) :25 - 28.

(上接第 133 页)

- [7] 韩占忠 王敬 兰小平. FLUENT 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004 :201 - 249.
HAN Zhanzhong, WANG Jing, LAN Xiaoping. Fluent Fluid Engineering Simulation Calculating Examples and Application[M]. Beijing :Beijing Insititute of Technology Press, 2004 :201 - 249.

- [8] 刘鹤年. 流体力学[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2003 :141 - 146.
LIU Henian. Fluid Dynamics [M]. Beijing : China Architecture & Building Press 2003 :141 - 146.
- [9] THUM R. Suessen elite spinning system for long and short staple fibers[J]. Textile World, 2000(4) 38 - 39.