

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.02.003

# 变截面风管均匀送风的气流组织 CFD 模拟

肖婷<sup>1</sup>, 李林<sup>1</sup>, 梅硕俊<sup>2</sup>, 赵福云<sup>1,2</sup>, 王汉青<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 利用计算流体力学的方法, 对变截面风管内以及出风口处的气流组织进行数值模拟研究, 探讨在不同雷诺数  $Re$  (风速) 下, 管道中不同空间断面上的压力、速度分布以及出风口送风量与出风方向; 分析变截面风管送风的均匀特性, 以及均匀送风与变截面风管之间的内在联系。以雷诺数  $Re$  为变量, 分别模拟了  $Re$  为 10 000, 50 000, 100 000 及 500 000 时几个工况下的气流组织分布。各种工况下的气流组织模拟结果表明: 在一定范围内,  $Re$  的数值越大, 风管内的静压分布越均匀, 送风的均匀性越好; 而当  $Re$  大于 100 000 时, 送风的均匀性变化不明显。同时也证实了变截面风管对整个管内静压分布的平衡作用是均匀送风的主要原因。

**关键词:** 变截面风管; 均匀送风; 数值模拟; 计算流体动力学

中图分类号: TU834.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)02-0013-08

## CFD Simulation of Air Distribution in Variable Cross-Section Duct with Uniform Air Supply

XIAO Ting<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, MEI Shuojun<sup>2</sup>, ZHAO Fuyun<sup>1,2</sup>, WANG Hanqing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Conducted numerical simulation on the air flow distributions inside variable cross-section duct and the outlet of the duct by the method of computational fluid dynamics. Investigated the pressure, velocity distribution, outlet supply air volume and wind direction in different spatial section of duct. Analyzed the uniform features of variable cross-section duct air supply as well as the internal relations between uniform air supply and variable cross-section duct. With Reynolds numbers  $Re$  as variable, simulated the air distribution at the working conditions of  $Re = 10\,000, 50\,000, 100\,000$  and  $500\,000$ . The simulated results indicates that in a certain range, as  $Re$  is larger, the static pressure distribution in duct is more uniform and the uniformity of the air supply is better; while  $Re$  is over  $100\,000$ , the uniformity variation of air supply is not obvious. It confirms that the balance function of variable cross-section duct to the duct static pressure distribution is main reason for uniform air supply.

**Keywords:** variable cross-section duct; uniform air supply; numerical modeling; computational fluid dynamics

## 0 引言

均匀送风即通风系统的风管把等量的空气沿风

管侧壁的成排孔口或短管均匀送出, 使送风空间得到均匀的空气分布。空调送风管道的送风均匀性是

收稿日期: 2015-12-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208192, 51304233), 湖南省杰出青年基金资助项目(14JJ1002), 科技部十二五科技支持计划基金资助项目(2011BAJ03B07)

作者简介: 肖婷(1993-), 女, 湖南郴州人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为城市建筑群空气环境模拟,

E-mail: [xiaoting\\_hunan@sina.com](mailto:xiaoting_hunan@sina.com)

影响空调房间温度场、湿度场、浓度场以及室内舒适度的重要因素之一。

实现均匀送风可通过多种方式，改变送风管道断面面积即为其中一种。在空调和通风工程中，有的使用侧面开有条缝的管道送风，并要求条缝在整个长度上出风速度不变。因此，随着管内风量的减少，需改变管道截面尺寸，才能使管道内的静压保持一定<sup>[1]</sup>。这是由于风道断面及送风口面积不变时，管内静压会不断增大，而在变截面送风管道中，送风口面积不变，只是随着管内风量的减少，改变管道截面尺寸，可以使管道内的静压保持一定，由此来达到均匀送风的效果。

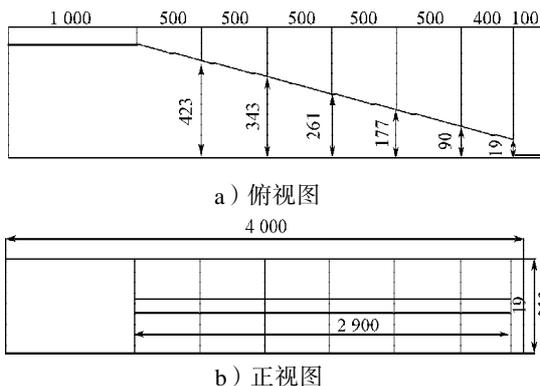
空气在风管内流动时，其静压垂直作用于管壁，如果在风管的侧壁开孔，由于孔口外存在静压差，空气会从孔口流出。空气从孔口流出时，它的实际流速和出流方向不只取决于静压产生的流速和方向，还受管内流速的影响<sup>[2]</sup>。

近年来，随着计算流体力学（computational fluid dynamics, CFD）的高速发展，在暖通空调应用中采用 CFD 技术来预测气流组织、优化设计方案已成为普遍趋势。本文利用 CFD 技术，对变截面风管内的气流组织进行模拟，研究管内气流分布情况，以期对变截面风管的优化设计提供借鉴。

### 1 建立模型

#### 1.1 物理模型

以一个既定的变截面风管<sup>[3]</sup>为模拟对象，探究其与均匀送风之间的联系。该模型通过送风管道侧壁的条形送风口送风，沿管道长度方向间隔一定距离有序地改变管道截面，以达到平衡管内静压保持均匀送风。模型风管总长度、高度保持不变，分别为 4 000 mm 和 333 mm，宽度沿长度方向依次递减，因此，截面面积也随之相应变化。在变截面风管的侧壁有一个条形出风口，具体尺寸如图 1 所示，模拟进出风口气流方向如图 2 所示。



c) 侧视图

图1 风管模型三视图

Fig. 1 Three views of the duct model

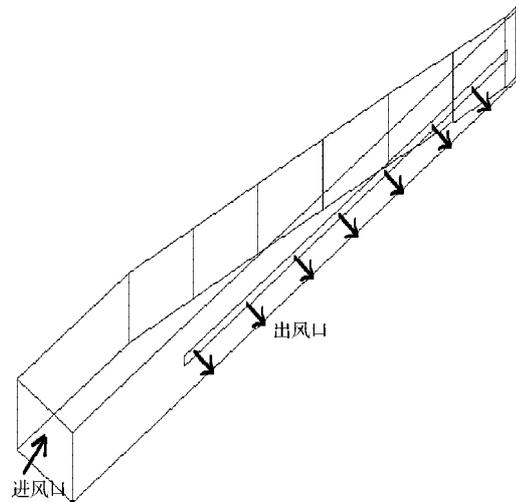


图2 风管进出风气流方向示意图

Fig. 2 Schematic of air flow direction in and out duct

#### 1.2 计算模型

依照已定风管尺寸采用 CAD 软件建立三维几何模型，再导入 Gambit 软件建立风管均匀送风系统的物理模型后，选用贴体性较好的四面体非结构网格单元对其空间进行网格划分；对进风口、出风口以及梯度变化的管道壁面处进行局部加密处理。网格划分如图 3 所示。

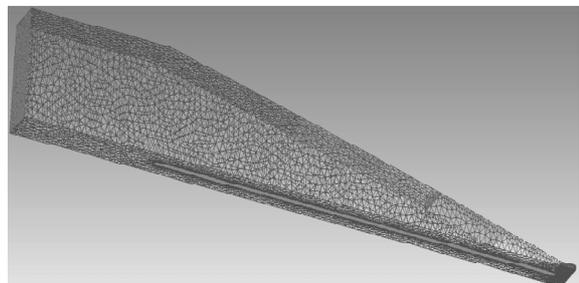


图3 变截面风管的网格划分示意图

Fig. 3 Grid arrangement of variable cross-section duct

由于风管内送风的空气密度变化不大，可当作不可压缩流动。对于高雷诺数湍流，两方程的  $k-\epsilon$  模型以其结果的准确性与计算的经济性而被广泛采用。与传统的标准  $k-\epsilon$  模型相比，RNG  $k-\epsilon$  模型由于在  $\epsilon$  方

程中增加了一个附加项, 使得其在计算速度梯度较大的流场时精度更高。考虑到在变截面处有较大的速度梯度, 本文采用 RNG  $k-\varepsilon$  模型。

计算模型中所有的墙壁采用无渗透和无滑移假设。送风口边界类型定义为速度入口, 并假定同一送风口所有位置的送风温度相同, 送风方向垂直于入口边界。出口处采用自由出流假设, 即可视为充分发展湍流。在进行数值计算时, 选用二阶迎风格式对控制方程进行离散, 并用 SIMPLE 算法对离散方程进行求解。

## 2 计算方法

由于送风管道的几何尺寸已经确定, 而入口截面面积不变, 送风速度直接决定了风量, 风管不同管段的截面积不同又会影响整个管道压力分布。因此, 在不同风速的影响下, 管道内气流是否均匀分布以及管内压力是否不变, 这些变量又是否会影响均匀送风的实现, 这都是需要探讨的问题。

雷诺数 ( $Re$ ) 是研究流动模型的重要依据。雷诺数较小时, 黏滞力对流场的影响大于惯性力, 流场中流体的扰动会因黏滞力而衰减, 流体流动稳定, 为层流; 反之, 若雷诺数较大时, 惯性力对流场的影响大于黏滞力, 则流体流动不稳定, 流速的微小变化容易发展、增强, 形成紊乱、不规则的紊流流场。

取不变的风管高度作为特征长度, 通过方程 (1) 计算进口风速。

$$Re = \frac{ul}{\nu}, \quad (1)$$

式中:  $u$  为进口风速;

$l$  为特征长度, 本研究取风管高度, 其取值为 0.333 m;

$\nu$  为空气的运动黏度, 取值为  $14.8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

选用不同雷诺数下的工况对风管内的气流分布进行数值模拟; 同时对出口截面, 风管高度方向的中线面以及沿风管长度方向变化的各截面, 进行不同工况下的压力及速度分布对比。各工况参数如表 1 所示, 各截面参数如表 2 所示。

表 1 各工况参数

Table 1 Parameters for 4 working conditions

工况序号	$Re$	进风口速度 / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )
1	10 000	0.44
2	50 000	2.22
3	100 000	4.44
4	500 000	22.22

通过风量分布以及送风方向来体现送风的均匀性, 风量的计算公式为

$$Q = VF, \quad (2)$$

式中:  $Q$  为送风量, 即通过出口截面送出的风量;

$V$  为风速, 取垂直于出口截面的分速度;

$F$  为风道出口截面面积, 取值为  $0.1421 \text{ m}^2$ 。

表 2 各截面参数

Table 2 Parameters of each section

截面名称	位置参数 / m	截面面积 / $\text{mm}^2$
出口截面	$y=0$	$2\,900 \times 49$
中线面	$z=0.166$	$1\,273\,200$
截面 1	$x=0$	$500 \times 333$
截面 2	$x=0.500$	$423 \times 333$
截面 3	$x=1.000$	$343 \times 333$
截面 4	$x=1.500$	$261 \times 333$
截面 5	$x=2.000$	$177 \times 333$
截面 6	$x=2.500$	$90 \times 333$
截面 7	$x=2.900$	$19 \times 333$

注:  $x$  方向为风管长度方向,  $y$  方向为风管宽度方向,  $z$  方向为风管高度方向。

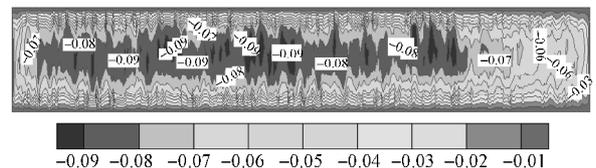
## 3 数值计算结果与分析

采用软件 Tecplot 360 对计算结果进行可视化的处理。

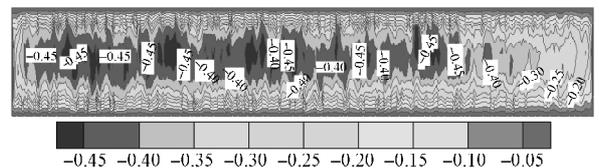
### 3.1 送风均匀性的对比分析

#### 3.1.1 出口截面气流组织分析

数值模拟得到各工况下出风口出口截面的流量云图, 如图 4 所示。从图中可以看出, 4 个工况下的送风风量沿风管长度方向都有衰减, 但从工况 1 到工况 4, 衰减程度逐渐减小, 风量在出口截面上的分布也越来越均匀。对出口截面进行各工况下的风量分布情况进行对比研究可知, 整个出风口处的风量分布呈由中心向管壁递减和沿着管内空气流动方向递减的趋势。



a) 工况 1



b) 工况 2

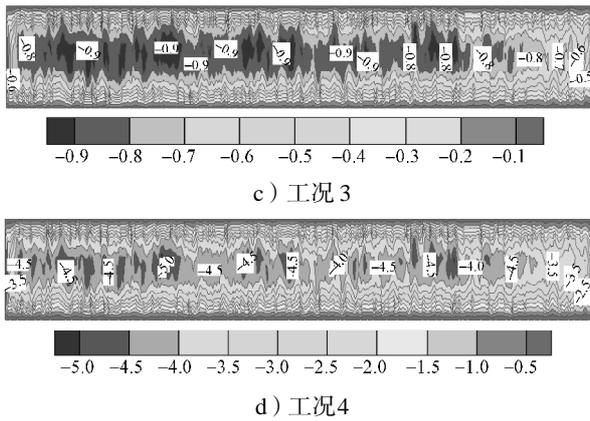


图4 各工况下出口截面流量云图对比

Fig. 4 Comparison of exit section flow nephograms under 4 working conditions

由于速度矢量在风管中不停地变化着大小与方向，为了准确地描述风管出口处的出风速度分布，需要对垂直于出口截面的分速度进行研究。

首先，对出口截面上y方向的速度分布情况进行分析，各工况下的速度云图如图5所示。

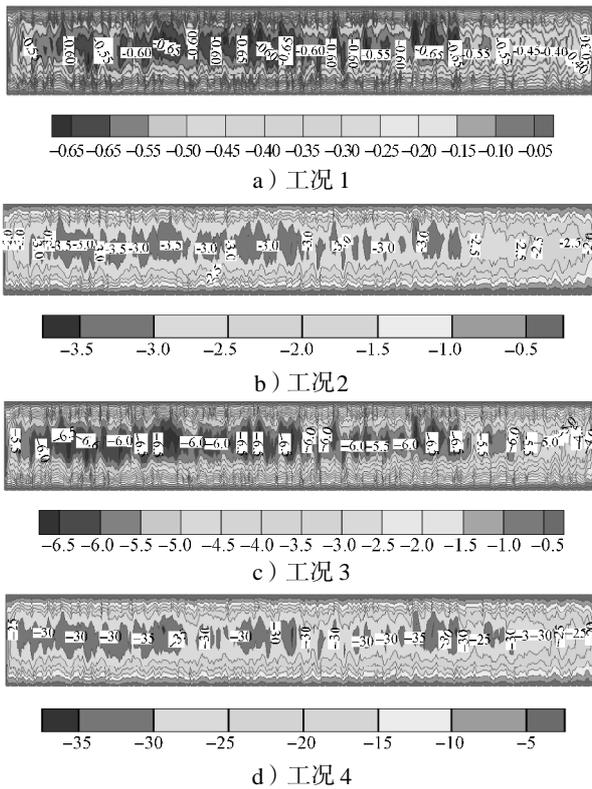


图5 各工况下出口截面y方向速度云图对比

Fig. 5 Comparison of exit section velocity nephograms of y direction under 4 working conditions

由图5可知，与风量分布一样，出口截面的速度也是从中心向边缘递减。而从速度云图可以更加直观地看出，在不同工况下，出口风速虽然各不相同，但是在出口中心都分布较均匀，只有在出口边

缘才有明显的速度衰减。由图5a可知，在工况1下，由于雷诺数小（即入口速度较小，只有0.44 m/s），使得黏性的作用更加突出，其速度边界层更厚，因而在出口处形成不均匀的速度分布。由图5b~5d可以看出，从工况2到工况4，虽然也有速度衰减，但速度差值较小，可以认为送风效果较好。

再对出口截面上y方向的速度方向分布情况进行分析，各工况下的速度矢量图如图6所示。由图6a可知，工况1中的出口速度在出口前端基本垂直于出风口出口截面，此时送风均匀，送风效果较好；但是沿着风管内的送风方向，速度方向与风管之间的夹角越来越小。由此可见，整个工况下的送风均匀性并不好。由图6b~6d可知，从工况2到工况4，出风口处的速度方向基本垂直于出风口的出口截面，送风均匀性良好。对比图中4种工况可以看出，随着雷诺数的增大，送风速度方向与出风口越整体趋近垂直，送风均匀性越好。在工况3中，出风口速度已垂直于出风口截面，送风均匀性稳定；在工况4中，送风均匀性无明显变化。

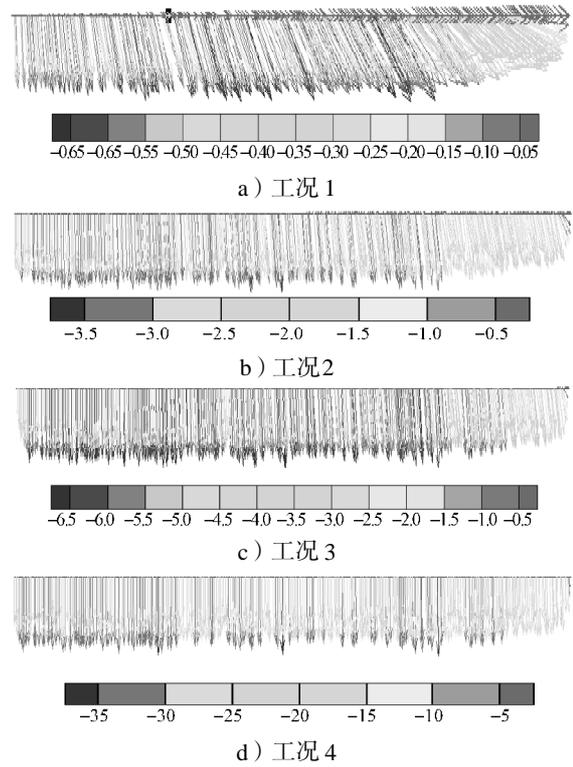


图6 各工况下出口截面y方向速度矢量对比

Fig. 6 Comparison of exit section velocity vector of y direction under 4 working conditions

### 3.1.2 出口截面压力分布

对各工况下出口截面的压力分布进行模拟研究，分析风管送风的均匀性。不同工况下出口截面的压力云图如图7所示。由图可以看出，各个工况下的出口

截面压力从中心向边缘递减, 截面中心的压力分布最均匀, 压力值相差较小, 但越靠近风口边缘压力减小梯度越大, 随着气流方向也呈现一定递减趋势, 风管末端压力小于风管前段压力。对比图 7 中 4 种工况下的压力云图可知, 从工况 1 到工况 4, 压力分布的均匀性逐渐变好, 并且压力值波动范围也越来越小。

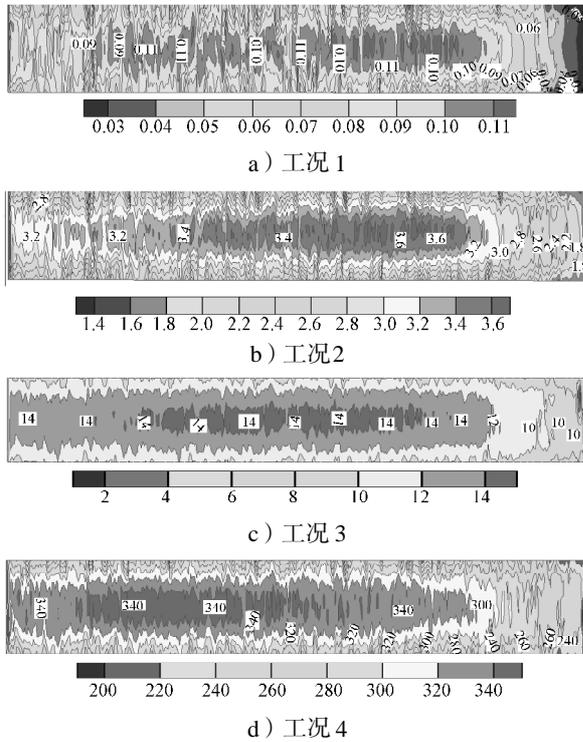


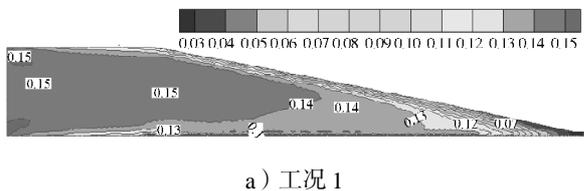
图7 各工况下出口截面压力云图对比

Fig.7 Comparison of exit section pressure nephograms under 4 working conditions

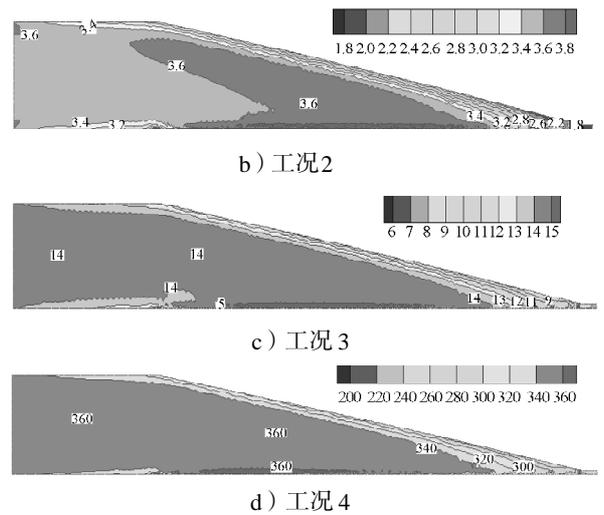
### 3.2 不同工况下风管内气流组织对比分析

#### 3.2.1 中线面压力和速度分布

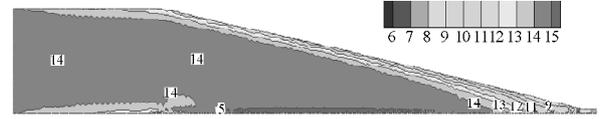
图 8 为各种工况下中线面的速度云图, 它反应了整个风管内的基本气流分布情况。由图 8a 和 8b 可以看出, 工况 1 和工况 2 下中线面的压力分布分层明显, 分界面的压力差值也随着  $Re$  的增加逐渐减少。由图 8c 和 8d 可以看出, 工况 3 和工况 4 下中线面的压力分布基本均匀, 即风管内压力基本一致。由图 8 可知, 随着  $Re$  的增大, 中线面的压力分布逐渐均匀; 在各工况下, 压力在管壁处有明显递减, 但管内压力波动不大。这样的结果验证了变截面风管对整个管内静压分布起到了平衡的作用。



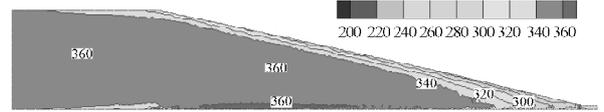
a) 工况 1



b) 工况 2



c) 工况 3



d) 工况 4

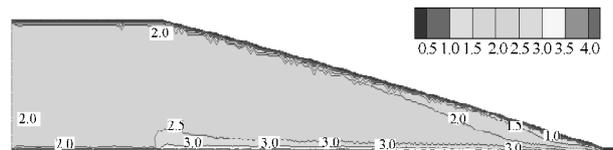
图8 各工况下中线面压力云图对比

Fig. 8 Comparison of middle-section pressure nephograms under 4 working conditions

各工况下中线面的速度云图如图 9 所示。由图可知, 在各个工况下, 整个风管内的速度分布基本均匀, 在出风口处速度也是沿风管方向均匀分布; 管壁处由于气体的黏性作用等因素导致的速度分层现象并不影响整个管内速度分布的均匀性。



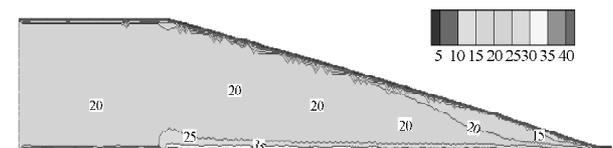
a) 工况 1



b) 工况 2



c) 工况 3

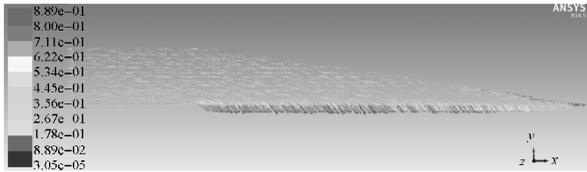


d) 工况 4

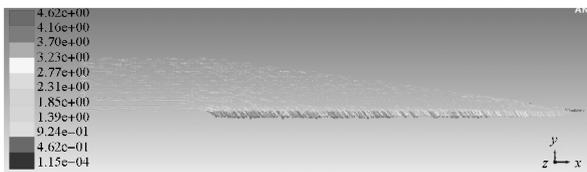
图9 各工况下中线面速度云图对比

Fig. 9 Comparison of middle-section velocity nephograms under 4 working conditions

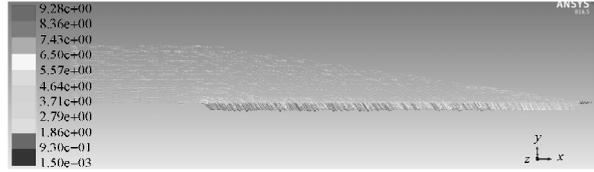
各工况下中线面的速度矢量图如图 10 所示。由图可以看出，管内流体速度方向基本一致，并且出口速度方向相互平行，即使在最小速度的工况下也没有出现气流停滞，甚至无气流的真空状况。这进一步验证了通过平衡管内静压保证了变截面风管内气流的均匀性。



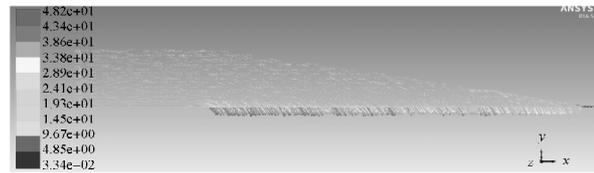
a) 工况 1



b) 工况 2



c) 工况 3



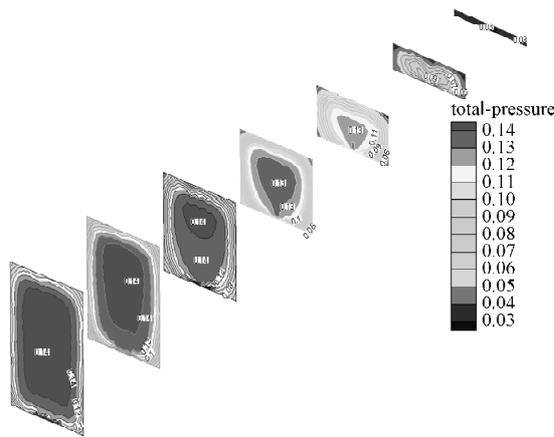
d) 工况 4

图 10 各工况下中线面速度矢量图对比

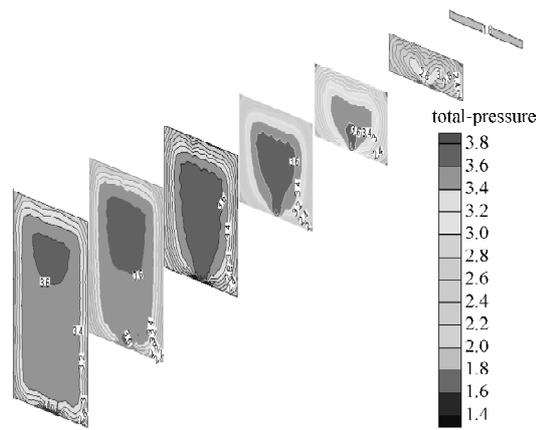
Fig. 10 Comparison of middle-section velocity vector images under 4 working conditions

### 3.2.2 x 方向各截面压力和速度分布

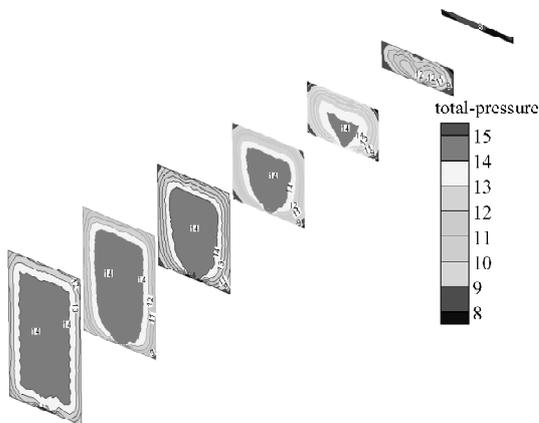
在  $x$  方向取 7 个截面作为研究对象，从垂直于出风口边缘的风管截面开始，截取出风口上方每一个变化的截面进行研究，各种工况下各截面的压力云图如图 11 所示。



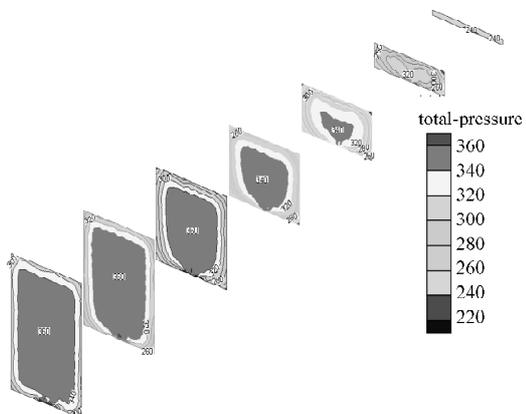
a) 工况 1



b) 工况 2



c) 工况 3



d) 工况 4

图 11 各工况下  $x$  方向各截面压力云图对比

Fig. 11 Comparison of various sections pressure nephograms in direction of  $x$ -axis under 4 working conditions

由图 11 可以看出,靠近进风口的截面压力分布较后面的均匀,后面较小截面压力分层情况明显;所有界面压力均为由中心向管壁递减;随着  $Re$  数的增大,压力分布也更加均匀。通过图 11a 和图 11b 比较前面较大的截面可知,在工况 1 和工况 2 下的各个截面有不同程度的压力分层;通过图 4c 和图 4d 比较前

面较大的截面可知,在工况 3 和工况 4 下各个截面的压力基本上均匀分布。

在各工况下各截面的速度云图如图 12 所示。由图可以看出,忽略近壁面处的速度边界层,速度分布在各个截面上基本均匀。

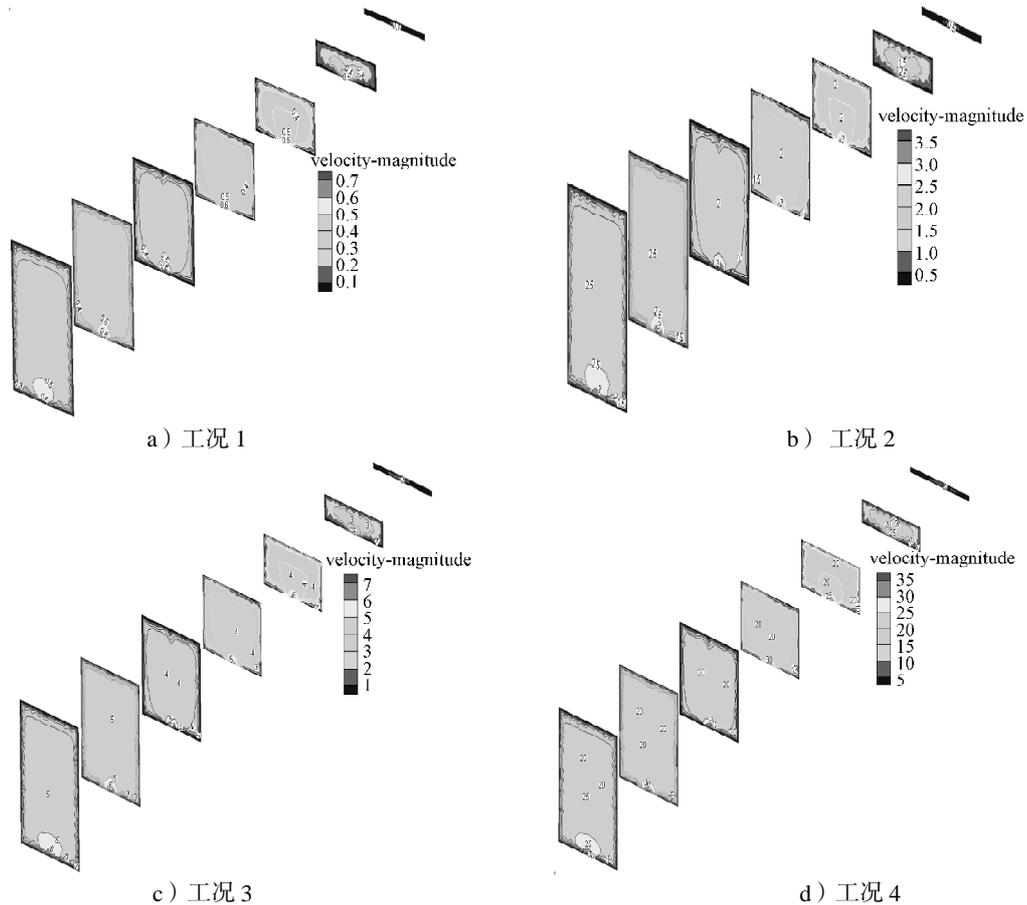


图 12 各工况下  $x$  方向各截面速度云图对比

Fig. 12 Comparison of various sections velocity nephograms in direction of  $x$ -axis under 4 working conditions

## 4 结论

根据以上模拟分析,可得如下结论。

1) 变截面风管能在一定程度上保证管内气流分布均匀并保持条形风口的静压各处相等,但受管内流速影响较大。

2) 变截面风管在  $Re$  为 10 000 时管内气流分布最不均匀,送风均匀性最差;  $Re$  从 50 000 开始增大,无论是管内的气流组织(主要指压力分布)还是送风的均匀性都逐渐变好,并且  $Re$  达到一定数值后,  $Re$  的增大不再对送风的均匀性产生影响。

3) 对于本文试验的变截面风管,  $Re$  大于 100 000 后,送风的均匀性已不受影响。因此,在既定的变

截面风管中,合理的速度范围内,送风速度越大越能保证送风的均匀性;送风速度过小,则会导致风管末端的速度死区;送风速度过大,易产生噪声等一系列问题。

### 参考文献:

- [1] 任吉云.带条缝的变截面均匀送风管道的的设计[J].建筑技术通讯(暖通空调),1988(4):5-7.  
REN Jinyun. Design of Variable Cross-Section Uniform Air Supply Duct with Strip Joints[J]. Journal of HV & AC, 1988(4): 5-7.
- [2] 付祥钊,肖益民.流体输配管网[M].北京:中国建筑工

业出版社, 2009: 62-64.  
 FU Xiangzhao, XIAO Yiming. Fluid Transmission and Distribution Network[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009: 62-64.

[3] 王汉青. 通风工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 261-268.  
 WANG Hanqing. Ventilation Engineering[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 261-268.

[4] 赵彬, 李先庭, 胡斌, 等. 计算流体力学在暖通空调工程中的应用[J]. 制冷空调与电力机械, 2001, 22(4): 10-14.  
 ZHAO Bin, LI Xianting, HU Bin, et al. Application of CFD for HVAC Industry[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2001, 22(4): 10-14.

[5] 杨秀莉. 关于均匀送风原理与计算探讨[J]. 山西建筑, 2009, 35(29): 169-170.  
 YANG Xiuli. On Exploration for Balanced Ventilation Principle and Calculation[J]. Shanxi Architecture, 2009, 35(29): 169-170.

[6] 杨晚生, 张吉光, 韩海涛. 静压式均匀送风道送风机理分析[J]. 广东工业大学学报, 2005, 22(1): 110-114.  
 YANG Wansheng, ZHANG Jiguang, HAN Haitao. Study on the Performances of New Model Non-Adjustment Static Pressure Supply Air Duct[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2005, 22(1): 110-114.

[7] 王汉青. 暖通空调流体流动数值计算方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 18-64.  
 WANG Hanqing. HVAC Fluid Flow Numerical Calculation Method and Application[M]. Beijing: Science Press, 2013: 18-64.

[8] WANG Hanqing, HUANG Chunhua, LIU Di, et al. Fume Transports in a High-Rise Industrial Welding Hall with Displacement Ventilation System and Individual Ventilation Units[J]. Building and Environment, 2012, 52: 119-128.

(责任编辑: 邓光辉)



(上接第 12 页)

Element Analysis on Mechanical Properties of Short Pier Shear Wall with Openings Under Monotonic Loading[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(2): 14-20.

[7] 鲁楠, 杨晓华, 周磊, 等. 不同开洞位置对短肢剪力墙抗震性能影响分析[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(5): 5-9, 28.  
 LU Nan, YANG Xiaohua, ZHOU Lei, et al. Influence of Different Opening Position on Seismic Performance of Short Pier Shear Wall[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(5): 5-9, 28.

[8] 陈端云. 墙肢孔洞对短肢剪力墙承载性能的影响研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2015.

CHEN Duanyun. Effects to the Bearing Capacity of Opening on Short Limb Shear Wall[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.

[9] 刘星. 墙肢孔洞对短肢剪力墙抗震性能影响研究[D]. 湖南工业大学, 2015.  
 LIU Xing. Effects of Open Holes on the Seismic Performance of Short Leg Shear Wall[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2015.

(责任编辑: 邓光辉)