

# 基于正交试验的离子送风数值模拟研究

张剑冰<sup>1</sup>, 陈 宁<sup>1</sup>, Janusz Kozinski<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学电力工程学院, 江苏 徐州 221116)  
(2. 约克大学多伦多科学及工程学院, 多伦多 M3J 1P3, 加拿大)

[摘要] 针对现代人对家居环境质量日益提高的要求, 将离子风与地板送风相结合, 构成一个新型的空气传输系统, 其具有低噪音、低能耗、结构简单、适应性强等特点. 应用计算流体力学软件 CFX 模拟了离子风发生装置内部的流场, 得出了流场分布; 运用正交试验分析各因素的影响, 为离子风传输空气装置的结构设计提供了思路.

[关键词] 离子风, 地板送风, 数值模拟, CFD, 正交试验

[中图分类号] TM85 [文献标志码] A [文章编号] 1672-1292(2013)01-0035-05

## The Numerical Simulation of Ionic Wind Based on Orthogonal Test Method

Zhang Jianbing<sup>1</sup>, Chen Ning<sup>1</sup>, Janusz Kozinski<sup>2</sup>

(1. School of Electric Power Engineer, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, China)  
(2. Faculty of Science & Engineering, York University, Toronto ON M3J 1P3, Canada)

**Abstract:** Indoor air quality has become a research focusing in the field of building environment due to people's demand on living standard and environment. In this paper, a new air transfer system was obtained by combining the ionic wind with under floor air distribution system, which has the advantage of low power consumption, low noisy and simple construction. The inner flow field of ionic wind system was simulated by the commercial CFD software CFX. According to the simulation result, a thought of the physical design of the ionic wind transfer equipment was provided.

**Key words:** ionic wind, underfloor air distribution, numerical simulation, CFD, orthogonal experiment

当今商用建筑空调发展的重要方向是提高室内空气品质、降低建筑能耗, 空调设计因此必须不断改进, 地板送风空调系统就应运而生. 所谓的地板送风系统<sup>[1]</sup>是指: 从地面送出具有一定速度的空气, 在向上流动过程中与工作区的空气掺混, 进行热质交换, 起到调节工作区温度的作用. 气流进入非工作区后, 空气通过自然对流, 从上部排风口排出, 或部分空气通过地面回流到地板下, 与一次空气混合, 经下设的风机处理后再送出. 这种空调送风系统<sup>[2]</sup>可以使经过空调处理过的气流直接进入工作区, 吸收人体的散热和散湿, 提高室内环境的舒适性.

研究表明, 在电晕放电<sup>[3]</sup>时会产生高速离子射流流动, 这种离子射流对周围流体流动产生强烈的扰动, 形成附加的流体运动, 即所谓电诱导二次流<sup>[4]</sup>. 离子的高速运动将会推动空气的流动<sup>[5]</sup>, 为研究新兴空气传输装置提供了思路. 若将离子风与地板送风技术相结合, 不仅能有效地降低噪音、高效地驱动空气, 同时还具有分解空气中有害化学物质和杀灭细菌的作用<sup>[6]</sup>, 可显著提高送风质量, 改善空调舒适性. 离子风与地板送风技术相结合的方式之一是模块化的地板离子送风阵列, 如图 1 所示.

地板离子送风阵列由多个布置于地板的离子送风单元构成, 每一个单元均具有独立可控的离子送风装置. 送风阵列可根据室内人员的活动情况, 在计算机的控制下实现局部送风强度的调节, 使送风可以跟随人体的运动进行动态调节, 为送风系统的节能运行提供了良好的前景. 同时可将旋流风口作为送风口,

---

收稿日期: 2012-09-07.

基金项目: The Natural Sciences & Engineering Research Council of Canada via a Strategic Project Entitled “Immune Buildings: Development of eWAR Systems.”

通讯联系人: 陈宁, 博士, 教授, 研究方向: 太阳能、制冷. E-mail: chenning@cumt.edu.cn

使送出的风呈现旋转射流,这样吹风感不强. 根据经验值,平均每平方米可以布置一个送风口<sup>[7]</sup>.

地板离子送风阵列的核心是离子送风单元,研究其内部离子风的电场与流场的耦合关系,对该单元的设计具有重要作用. 本文对不同形式的离子风产生装置进行了数值模拟,分析了影响其送风性能优劣的因素.

## 1 基于 CFX 的离子风的数值模拟

### 1.1 计算模型

#### 1.1.1 物理模型

该系统的基本结构由电晕极、直流高压电源、收集极和气流通道组成,如图 2 所示. 同时配有旋流风口、传感器、空气过滤网等装置. 产生离子风的主要部件是电晕极和放电极,其他辅助装置用以优化系统,达到舒适、美观、安全的效果. 因此可将离子风产生装置的结构简化为一个圆柱体,中心加针尖,针尖上加载高压,圆筒接地,中间的空心部分即为模拟的流场区域.

本文主要采用 ANSYS 中的 WORKBENCH 分析模块,选用 Analysis Systems 中的 Fluid Flow(CFX)进行分析求解. 如图 3 所示,模型可简化为两个区域:(1)一个直径为 160 mm,高度为 100 mm 的圆柱体中间去除了两个直径为 1 mm 的针尖的区域.(2)一个直径为 160 mm,高度为 100 mm 的圆柱体.

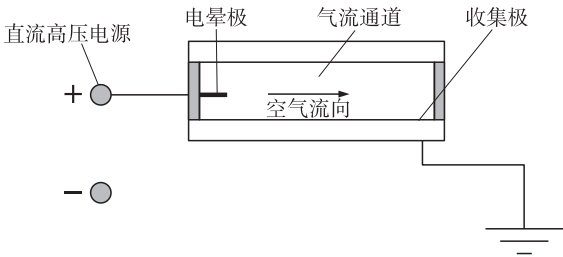


图 2 系统示意图  
Fig. 2 System diagram

#### 1.1.2 数学方程组

(1)向量法(电磁源)描述的流体动力学连续性方程为:

$$\nabla \cdot v = 0. \tag{1}$$

(2)线性动量守恒方程为:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho g + F_e - \nabla p + \mu \nabla^2 v, \tag{2}$$

式中, $\rho \frac{dv}{dt}$ 为单位体积力; $\nabla p$ 为压力梯度; $\rho g$ 为单位体积上的重力; $\mu \nabla^2 v$ 为粘滞力; $F_e$ 为由电场力引起的动量源,表达式<sup>[8]</sup>为:

$$F_e = qE - \frac{1}{2}E^2 \nabla \varepsilon + \frac{1}{2} \nabla \left[ E^2 \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right) \rho \right], \tag{3}$$

式中, $qE$ 为电场施加于流体中自由电荷的库仑力,称为电泳力,其方向取决于自由电荷的极性和电场方向; $\frac{1}{2}E^2 \nabla \varepsilon$ 表示介电电泳力,与介电常数 $\varepsilon$ 的空间变化有关; $\frac{1}{2} \nabla \left[ E^2 \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right) \rho \right]$ 表示电泳现象和电致收缩现象的综合,与 $E$ 、 $\varepsilon$ 及其空间分布有关. $qE$ 为主要受力项,后两项可忽略不计. 介电流体的静力学方程为:

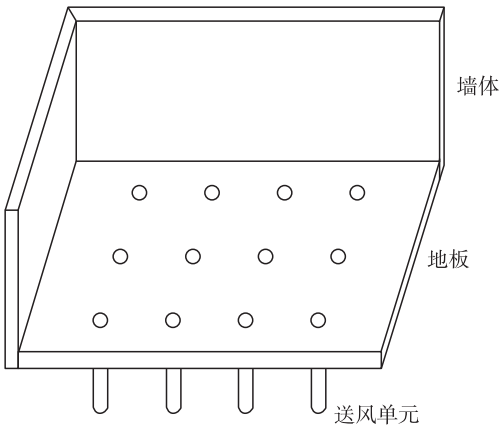


图 1 阵列地板送风  
Fig. 1 Array of underfloor air distribution

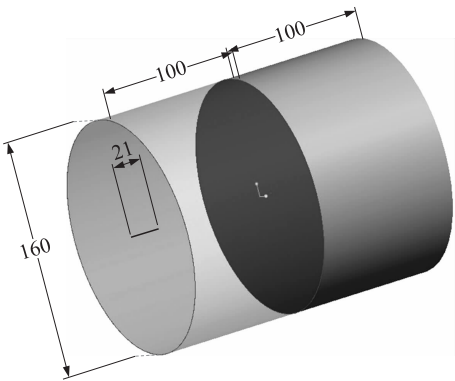


图 3 物理模型  
Fig. 3 Physical model

$$\nabla \cdot \varepsilon E = q, \tag{4}$$

$$\nabla \times E = 0, \tag{5}$$

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial q}{\partial t} = 0, \tag{6}$$

式中,  $J$  为电流密度, 可表示为:

$$J = qv + \sigma_e E + (v \cdot \nabla)(\varepsilon E) - D_e \nabla q, \tag{7}$$

式中,  $D_e$  为电荷扩散系数.

1.1.3 边界条件设置

边界条件设计如表 1 所示.

开始形成电晕放电所需的场强, 取决于几何因素及气体的性质. 皮克 (Peek) 通过大量实验研究, 提出了圆形电晕线起始电晕场强  $E_0$  的半经验公式<sup>[9]</sup>.

对于负电晕:

$$E_0 = f(31.02\delta + 0.954 \sqrt{\frac{\delta}{r_a}}) \times 10^5, \tag{8}$$

式中,  $r_a$  为电晕线的半径/m; 对于非圆形电晕线, 可用当量半径表示;  $f$  为电晕线粗糙系数, 一般取 0.5 ~ 1.0, 电晕线越粗糙,  $f$  值越小;  $\delta$  为气体的相对密度, 按下式计算:

$$\delta = \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0}, \tag{9}$$

式中,  $T_0$  为标准室内空气温度, 298 K;  $T$  为空气的实际温度/K;  $p_0$  为标准大气压,  $1.013 \times 10^5$  Pa;  $p$  为空气的实际压力/Pa.

对于管式, 起始电晕电压为:

$$U_0 = r_a E_0 \ln(r_b/r_a), \tag{10}$$

式中,  $r_b$  为管的半径/m.

根据经验公式的计算, 该装置的起始电晕电压为 14 kV, 所以施加在针尖上的最小电压为 15 kV.

1.2 CFX 试验结果

利用 CFX 软件, 模拟电极电压为 15 kV, 只有一根电极时的出口截面速度 (如图 4) 分布. 由数值计算发现, 高速区存在于针状电极附壁附近的狭小区域, 因此可以推断真正对气流加速有效的区域很小, 适当增加电极数量, 能提高加速区面积, 从而有助于提高空气流量.

1.3 正交试验及分析

由式 (10) 计算可知, 该装置的起始电晕电压为 14 kV. 在安全允许的条件下, 电极电压的最大值选为 55 kV. 故选取电压范围为 15 kV ~ 55 kV. 电极数量一般选取 1 ~ 3 个. 由于物理模型属于轴对称图形, 故电极的分布也是轴对称的 (多个电极时, 电极离中心的距离均为 10 mm). 采用均分法确定变量水平, 本实验采用三因素三水平的正交试验, 每个因素的变化水平如表 2 所示. 表 2 中数字 1、2、3 表示表面凹凸的程度, 数字越大则电极表面的芒刺越多<sup>[9]</sup>, 表面越粗糙. 正交试验根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验, 可以减小实验量, 又能较好地分析实验结果. 选用正交表  $L9(3^4)$  中的前 3 列进行实验<sup>[10]</sup>, 共需做 9 组实验, 且能方便地进行数据计算.

具体的实验工况和试验结果如表 3 所示. 表中,  $\bar{K}_{ij}$  表示第  $j$  列的因素取水平  $i$  时, 所得试验结果的平均

表 1 边界条件设置

Table 1 Parameters of boundary conditions		
边界名称	边界条件类型	压力值
入口	Inlet	0 Pa
出口	Outlet	0 Pa
接地	Wall	Ground
针尖	Wall	Voltage

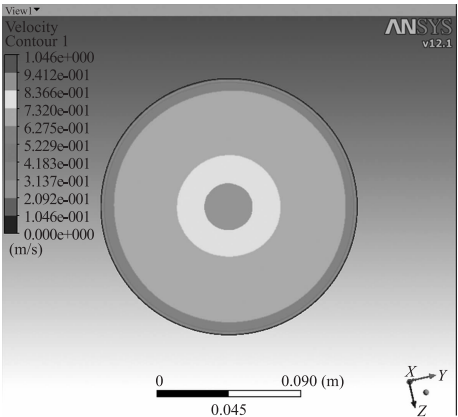


图 4 速度分布

Fig. 4 Distribution of velocity

表 2 正交试验的因素与水平

Table 2 Factors and levels of orthogonal test		
电压/kV	电极数量/个	表面凹凸
15	1	1
35	2	2
55	3	3

值,  $\bar{K}_{ij} = \frac{1}{s} K_{ij}$ , 其中  $s$  为第  $j$  列水平为  $i$  的因素出现的次数;  $K_{ij}$  为第  $j$  列水平为  $i$  的因素的试验结果之和;  $R_j$  为第  $j$  列的极差或其所在因素的极差,  $R_j = \max_i \{ \bar{K}_{ij} \} - \min_i \{ \bar{K}_{ij} \}$ .

表 3 正交试验表

Table 3 Table of orthogonal test

	电压/kV	电极数量/个	表面凹凸	出口平均速度/(m·s <sup>-1</sup> )	出口最大速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	15	1	1	0.21	0.61
2	15	2	2	0.34	0.83
3	15	3	3	0.41	0.92
4	35	1	2	0.63	1.61
5	35	2	3	0.81	0.96
6	35	3	1	0.86	1.12
7	55	1	3	1.04	2.31
8	55	2	1	1.22	2.34
9	55	3	2	1.38	1.62
$\bar{v}$	$\bar{K}_{1j}$	0.320	0.627	0.763	
	$\bar{K}_{2j}$	0.767	0.790	0.783	
	$\bar{K}_{3j}$	1.213	0.883	0.753	
	$R_j$	0.893	0.256	0.030	
$\bar{v}_{\max}$	$\bar{K}_{1j}$	0.787	1.510	1.357	
	$\bar{K}_{2j}$	1.230	1.377	1.353	
	$\bar{K}_{3j}$	2.090	1.220	1.397	
	$R_j$	1.303	0.290	0.044	

由以上分析和模拟结果可以看出：

(1)电压对出口的平均速度影响最大,其次是电极的数量,最后是电极的凹凸. 电极的数量对平均速度的增加效果并不显著,且消耗相对较大. 电极的凹凸对出口速度也有一定的影响.

(2)电压对出口的最大速度影响最大,其次是电极的数量,最后是电极的凹凸. 电压和电极凹凸会增加出口最大速度. 电极数量的增加可以降低出口最大速度,速度更加均匀.

2 结论

本文应用数值模拟的方法,通过模拟得出不同电压下各个结构的速度流场分布,正交试验分析了电压、电极数量、表面粗糙度对离子风的影响程度. 结合地板送风的意义和应用,针对静电驱动系统与地板送风相结合,本文得出如下结论：

(1)电晕极的形状对电晕放电的影响很大,决定其起始电晕电压的大小,并对形成的离子风速也有很大的影响.

(2)电极的数量虽然对出口平均速度的大小的影响不大,但是它可以使出口的速度更加均匀,进而提高送风质量.

[参考文献](References)

[1] 杨娟,刘卫华. 地板送风空调系统研究现状及发展[J]. 制冷与空调,2009(6):1-5.  
Yang Juan,Liu Weihua. The current state of underfloor air conditioning research[J]. Refrigeration & Air-Conditioning,2009(6):1-5. (in Chinese)

[2] 谈克雄,薛加麒. 高压静电场数值计算[M]. 北京:水利电力出版社,1990.  
Tan Kexiong,Xue Jiaqi. The Numerical Computation of High Voltage Static Field[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press,1990(in Chinese).

[3] 何焰. 架空地板送风系统在办公楼中的应用[J]. 制冷空调与电力机械,2003(3):32-34.  
He Yan. The apply of overhead underfloor air distribution system in office building[J]. Refrigeration and Air-Conditioning &

- Electrical Machines,2003(3):32-34. (in Chinese)
- [4] Matthew Rickard,Derek Dunn-Rankin. Characterization of ionic wind velocity[J]. Journal of Electrostatics,2005,63(6-10):711-716.
- [5] Lawton J,Mayo P J. Factors influencing maximum ionic wind velocities[J]. Combustion and Flame,1971,16(3):253-263.
- [6] 亢燕铭,荣美丽,沈恒星,等. 空气净化过程中的电晕放电与离子风[J]. 自然杂志,2002,24(3):125-128.  
Kang Yanming,Rong Meili,Shen Hengxing,et al. The corona discharge and ionic wind in air purification[J]. Journal Nature,2002,24(3):125-128. (in Chinese)
- [7] 田林. 地板送风空调系统在商业建筑的应用探讨[J]. 建筑科学,2008,20:43-45.  
Tian Lin. The apply of underfloor air distribution system in commercial buildings[J]. Building Sciences,2008,20:43-45. (in Chinese)
- [8] Allen P H G,Karaylannis T G. Electrohydynamic enhancement of heat transfer and fluid flow[J]. Heat Recovery System & CHP,1995,15(5):389-423.
- [9] 向晓东,陈旺生,刘新敏,等. 芒刺电晕极场强分析与离子风测定[J]. 武汉冶金科技大学学报:自然科学版,1999(1):39-41.  
Xiang Xiaodong,Chen Wangsheng,Liu Xinmin,et al. The analysis of filed of corona electrodes and determination of Ionic wind[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology of Metallurgy:Natural Science Edition,1999(1):39-41. (in Chinese)
- [10] 《正交实验法》编写组. 正交实验法[M]. 北京:国防工业出版社,1976.  
The Orthogonal Experiment Editorial Group. The Orthogonal Experiment[M]. Beijing:National Defense Industry Press,1976. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]

(上接第14页)

- [5] 刘尚合,武占城,朱长清. 静电放电及危害防护[M]. 北京:北京邮电大学出版社,2004:62-257.  
Liu Shanghe,Wu Zhancheng,Zhu Changqing. Electrostatic Discharge and Protection[M]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2004:62-257. (in Chinese)
- [6] Wilson P F,Ma M T. Fields radiated by electrostatic discharges[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility,1991,33(1):10-18.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 24338. 4—2009,机车车辆设备电磁兼容试验[S]. 北京:中国标准出版社,2009.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 24338. 4—2009, Rolling stock equipment electromagnetic compatibility test[S]. Beijing:Standards Press of China,2009. (in Chinese)
- [8] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17626. 2—2006,电磁兼容试验和测量技术:静电放电抗扰度试验[S]. 北京:中国标准出版社,2007.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of China. GB/T 17626. 2—2006, Testing and measurement techniques of electromagnetic compatibility:Electrostatic discharge immunity test[S]. Beijing:Standards Press of China,2007. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]