

室内空气自然对流换热的数值模拟研究

哈尔滨工业大学 张志强[☆] 周志刚 王昭俊 方修睦 廉乐明

摘要 应用 PHOENICS 软件对自然对流换热条件下室内空气温度场和速度场进行了数值模拟,并对温度场的模拟结果进行了实验验证。结果表明,模拟计算值与实验值吻合得较好。

关键词 自然对流换热 数值模拟 温度场 速度场 PHOENICS 实验

Numerical simulation of indoor natural convection heat transfer

By Zhang Zhiqiang[★], Zhou Zhigang, Wang Zhaojun, Fang Xiumu and Lian Leming

Abstract With the PHOENICS software, simulates the temperature and velocity fields of indoor air in the case of the natural convection heat transfer and tests the simulated result of the temperature field by an experiment. The simulated result agrees well with the experimental result.

Keywords natural convection heat transfer, numerical simulation, temperature field, velocity field, PHOENICS, experiment

★ Harbin Institute of Technology, Harbin, China

①

0 引言

随着计算机技术的发展,计算流体力学(CFD)技术在暖通空调领域获得了广泛的应用。利用 CFD 技术可以对室内温度场、速度场、湿度场以及有害物浓度场进行模拟和预测,从而得到房间内温度、速度、湿度及有害物浓度等物理量的详细分布情况,这对于房间气流组织方案的设计、提高室内热舒适性和室内空气品质,以及减小建筑物能耗都有重要的指导意义。笔者应用 PHOENICS 软件对室内自然对流换热的流场进行了数值模拟,并用实验进行了验证。

1 模拟计算

1.1 物理模型

实验房间结构如图 1 所示。该实验室位于办公楼 1 层,房间尺寸为 6.0 m×3.3 m×3.2 m(长×宽×高),有 0.5 m 厚吊顶,南向外墙为 490 mm 厚砖墙,其他墙均为内墙,有 1 南向双层钢质外窗,外窗下布置对流型散热器。

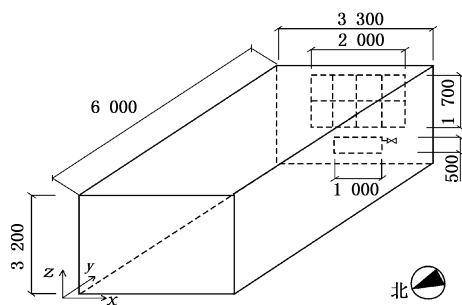


图 1 实验室建筑结构图

1.2 数学模型

模型中除了描述物理过程的质量、动量和能量方程(本文从略)外,本文选用了计算自然对流的 $K-\epsilon$ 两方程模型。由于考虑了浮升力的影响, K, ϵ 方

①☆ 张志强,男,1977 年 6 月生,硕士研究生,工学硕士,助理工程师

150620 广州市设计院第四设计室

(020) 87518388 - 8909

E-mail: zhangzhiqiang_77@163.com

收稿日期:2002-09-06

修回日期:2004-01-17

程在形式上与强制对流时有所不同,浮升力对 K 及 ϵ 方程都造成附加源项,方程如下^[1]:

K 方程:

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j K)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + S_K \quad (1)$$

$$S_K = \mu_t G - \rho \beta g \frac{\mu_t}{\sigma_K} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - \rho \epsilon \quad (2)$$

ϵ 方程:

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial (u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{c_1 \epsilon}{K} \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + S_\epsilon \quad (3)$$

$$S_\epsilon = c_1 \mu_t \frac{\epsilon}{K} G - c_3 \rho \beta g \frac{\mu_t}{\sigma_T} \frac{\epsilon}{K} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) - c_2 \frac{\epsilon^2}{K} \quad (4)$$

$$G = 2 \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \quad (5)$$

式(1)~(5)中 ρ 为流体密度; K 为湍流脉动动能; t 为时间; u_i, u_j 为速度, i, j 为张量下角标, $i, j = 1, 2, 3$; μ, μ_t 为动力黏度, 下角标 t 表示该物理量由湍流脉动引起; G 为湍流脉动动能产生率; β 为容积膨胀系数; T 为热力学温度; ϵ 为湍流脉动动能耗散率; S_K, S_ϵ 为源项; $\sigma_K, \sigma_\epsilon, \sigma_T$ 为常数, 其取值为 $\sigma_K = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3, \sigma_T = 0.9 \sim 1.0$; c_1, c_2, c_3 为经验系数, $c_1 = 1.44, c_2 = 1.92, c_3 = 1.44$ ^[1]. K 方程中源项计算式(2)及 ϵ 方程中源项计算式(4)中, 下部画线的项就是由浮升力产生的附加项。

1.3 边界条件

用 PHOENICS 软件模拟时, 需给出围护结构及热源的第一类(壁面温度)或第二类(壁面热流)边界条件, 本文给出第一类边界条件(见表 1)。

表 1 围护结构及热源表面温度 /℃

	东墙	西墙	南墙	北墙	顶棚	地面	散热器	窗
表面温度	13.35	13.52	10.71	12.76	14.39	12.83	28.91	5.32

为了便于模拟结果和实验结果的对比, 表中所给各表面温度值由实验实测得到。

1.4 模拟结果(见图 2~8)

1.5 模拟结果分析

1.5.1 从图 2, 3, 4 可以看出, 采用对流散热器供暖的房间, 在竖直方向上空气温度分布出现明显分层, 空气温度沿高度方向逐渐升高, 竖直方向的最大温

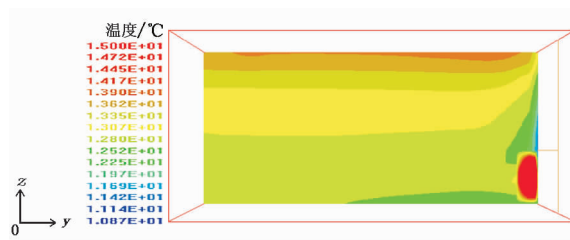


图 2 $x = 1.65$ m 截面温度分布图

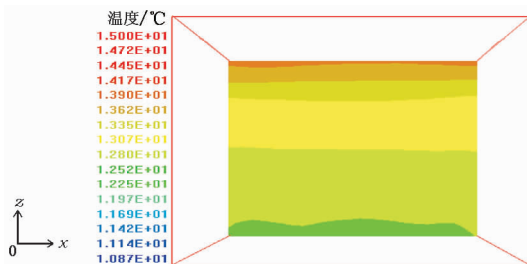


图 3 $y = 3$ m 截面温度分布图

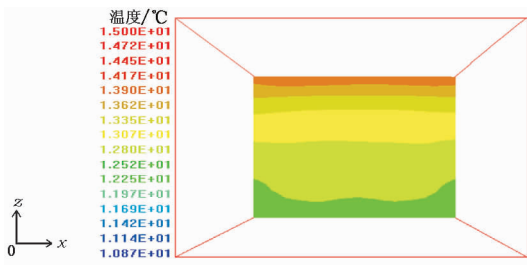


图 4 $y = 4.5$ m 截面温度分布图

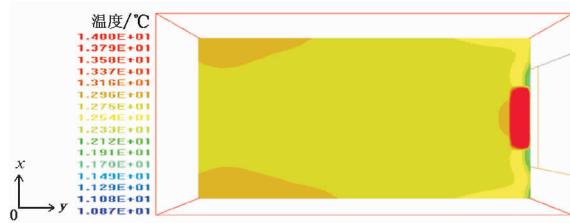


图 5 $z = 0.6$ m 截面温度分布图

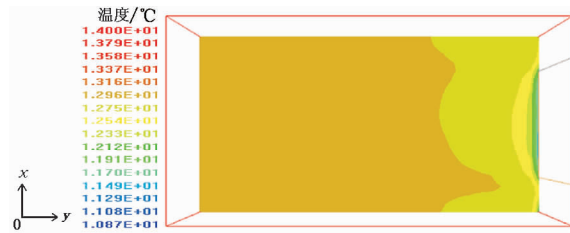


图 6 $z = 1.1$ m 截面温度分布图

差在 4℃ 以内, 温度梯度均小于 1.5℃/m, 而在人们主要活动区, 即距地面 0.1 m 到 1.5 m 水平面间的最大温差在 3℃ 以内, 符合热舒适性的要求。

1.5.2 从图 5, 6, 7 可以看出, 在水平方向温度分布趋于均匀一致, 同一水平面上各点温度之间的差



图 7 $z = 1.8 \text{ m}$ 截面温度分布图

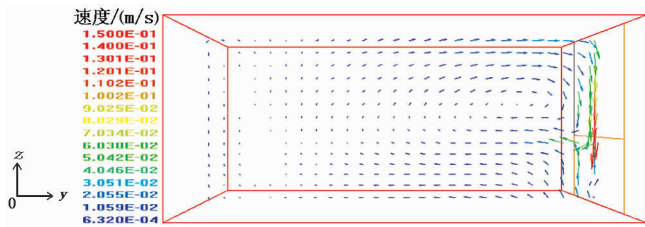


图 8 $x = 1.65 \text{ m}$ 截面速度场分布

值都在 $0.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。

1.5.3 图 8 是垂直 x 轴方向,中间竖直截面空气速度场分布。可以看出,在截面大部分区域内,气流速度很小,主流区速度在 0.06 m/s 以内;在散热器与窗户的交界处,靠近外窗表面的空气被冷却,在重力作用下沿窗表面向下流动,与被散热器加热并在浮升力作用下沿壁面向上流动的气流相遇并形成旋涡,整个截面的最大流速就出现在此处,为 0.298 m/s ;但是,整个截面 95% 以上的流速在 0.15 m/s 以内。

2 实验验证

为了验证室内温度场的模拟结果,需测出围护结构和热源的表面温度,以及室内温度的分布。

2.1 温度测点布置

2.1.1 围护结构内表面温度的测定

在测试房间的东墙、西墙、南墙(外墙)、北墙、地面、顶棚和外窗表面中心处布置热电偶,测得各表面温度。

2.1.2 散热器表面温度的测量

在散热器各表面布置热电偶测点,取各测点温度平均值作为散热器表面温度,热电偶布点情况如图 9 所示。

2.1.3 室内温度分布的测量

为测得室内温度分布,在测试房间距地面 1.5 m 水平面的两条对角线上均匀地选取 5 个点,在对角线交点 3 的正上方再选取点 6,使用热电偶进行测量,具体的测点布置见图 10。

2.2 验证结果

图 11 给出了 6 个测点空气温度的实测值与模拟值,平均绝对误差和平均相对误差分别为 0.1567

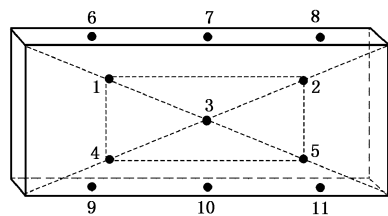


图 9 散热器表面测点布置图

$^{\circ}\text{C}$ 和 1.16% ,最大绝对误差为 $0.21 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最小绝对误差为 $0.07 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3 结论

用 PHOENICS 软件模拟自然对流供暖房间内的空气温度场、速度场,并与实验结果进行对比分析可以看出,模拟结果是可以应用到实际工程中去,其精度完全可以满足实际工程的需要。

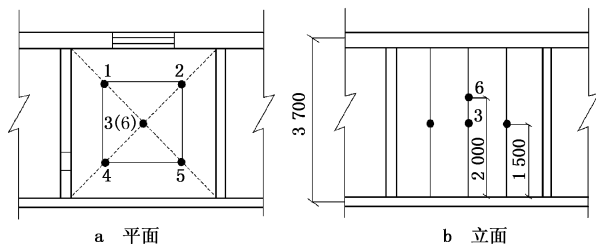


图 10 室内温度测点布置示意图

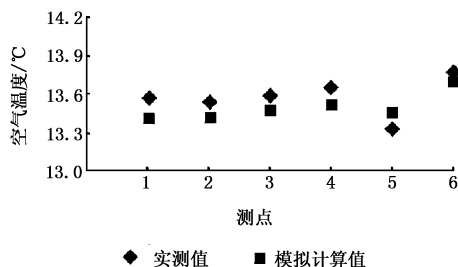


图 11 实测值与模拟计算值对比

参考文献

1 陶文铨. 数值传热学. 西安:西安交通大学出版社,1988

• 书讯 •

《洁净手术部建设实施指南》(2004)出版

为了配合贯彻执行《医院洁净手术部建设标准》和《医院洁净手术部建筑技术规范》,由许钟麟主编和梅自力、于冬副主编的《洁净手术部建设实施指南》(2004)已由科学出版社出版。

《指南》分三篇。第一篇为技术措施,其中以“术语”的形式概括介绍了空气洁净技术的最基本的一些概念、原理。第二篇为工程实例,选编了 21 家医院已建成的洁净手术部的图、文资料。第三篇为国内外相关标准、规范介绍与摘编。

全书约 90 万字,以与国际通行的大 16 开精装出版,定价每本 150 元,邮寄每本外加 10 元。预订者可电话联系,电话:(010) 64076617,联系人:宋石明。(本刊)