

# 环境模拟实验室内温度场与速度场的 数值模拟与实验研究

孟庆龙<sup>1</sup>, 王 元<sup>2</sup>, 李彦鹏<sup>1</sup>

(1. 长安大学环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054,  
2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:**对环境模拟实验室空间场的温度和速度进行了多工况数值模拟. 考虑环境模拟实验室的特点, 着重研究了模拟器高度为 2 m, A 组灯打开情况下不同送风时的温度和速度场情况, 并将数值结果与实验结果进行了对比分析. 结果表明: 速度模拟相对温度模拟要精确, 其模拟值与实验值基本一致, 温度场实验值较模拟值偏高, 但总体误差不超过 0.3 °C. 按模型验证量化指标中的均方根差(RMSE)对各物理参数各工况下的结果进行评价, 得出: 高度为 0.2 m、0.6 m、1.0 m、1.5 m 时温度 RMSE 分别为 5.3 %、7.1 %、6.5 %、8.9 %, 对应高度的速度 RMSE 分别为 2.1 %、3.4 %、4.1 %、5.3 %. 整个模拟的平均均方根差为 5.34 %, 该数值模型可作为其他工况的基准模型.

**关键词:**计算流体动力学; 环境模拟; 速度场; 温度场

**中图分类号:** TU 111

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2013)05-0712-07

随着认识的深入和要求的不断提高, 人们已不再满足于对自然环境的被动预测, 而是试图采取各种手段对自然环境进行主动模拟, 并通过对模拟环境的控制, 使系统按照指定的方式运行, 从而为发生在这一区域的各种物理问题提供可控的实验研究平台. 环境模拟实验室应运而生. 采用多参数综合模拟的方法对自然环境进行模拟是一种全新的实验研究手段. 与野外实测相比, 在模拟环境中, 测量容易且精确; 与随时变化的自然条件不同, 在人工模拟环境中我们可以通过重要变量的系统改变和可控调节, 在短时间内取得大量数据, 从而大大加快研究进程, 更快捷、更准确的获取我们所关心问题的规律.

1949 年美国温特(F. W. Went)教授在加利福尼亚州的帕萨迪纳(Pasadena)主持建造了世界上首个环境模拟设施, 命名为“phytotron”<sup>[1]</sup>. 建造的主要目的是想在室内再现生物或人类所需的各种自然状态, 并免于外界环境的干扰和影响. 这个环境模拟设施的出现对当时的生物科学研究起到了极其重要的推动作用. 随后, 环境模拟设施如雨春笋, 广泛应用于航空、航天、海洋、农业、环境等各个领域<sup>[2-3]</sup>, 多种不同规模和类型的环境模拟设施相继建立, 这些设施为科学研究提供了实验研究平台<sup>[4]</sup>. 这种人工环境实验平台可进行模型缩尺实验, 生态建筑、近地层模拟、光学实验等, 其对温度和速度分布要求较高, 加上环境模拟实验室构造复杂, 不可能对各种工况进行实验, 为了解多种工况下环境模拟实验室空间场参数分布状况, 一种可行的方法就是进行 CFD 数值模拟<sup>[5-7]</sup>.

本文对环境模拟实验室进行温度场和速度场模拟. 可靠的模拟结果将为其他工况提高数据参考, 为保证模拟结果的准确性, 进行了实验验证, 旨在获得基准数值模型.

## 1 对象—环境模拟实验室

环境模拟实验室建筑面积约 105 m<sup>2</sup>, 屋面平均高度 4.8 m, 局部为二层, 四周墙体为 370 mm 砖墙, 内侧做 120 mm 聚氨酯材料和沥青的保温防潮处理; 实验室整个围护结构进行了保温、隔热、防潮处理.

收稿日期: 2012-09-03 修改稿日期: 2013-09-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208059); 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验开放基金资助项目(GZKF-201215)

作者简介: 孟庆龙(1979-), 男, 河北邢台人, 讲师, 博士, 研究方向: 环境模拟, 建筑设备自动化.

屋面为封闭式屋顶,最初为双层夹胶玻璃,后经改造,在原有基础上增设具有 100 mm 后聚氨酯塑料泡沫夹层的彩钢板制成,彩钢板与原屋顶平面间保留 30 mm 的空隙,以增加热阻,且屋顶四周做封闭处理,以防外界气流进入,进一步增强了保温性能。整个实验室按空间位置分成三部分:实验区、设备室及观察控制室。图 1 给出了实验室的上、下部平面示意图。

为构造真实近地层的局部地表环境,实验中心位置处设有  $6\,280\text{ mm}(\text{L})\times 5\,040\text{ mm}(\text{W})\times 1\,350\text{ mm}(\text{D})$  的地表构造坑。构造坑侧墙及底面采用 120 mm 聚氨酯保温,为保护保温层,保温层外砌 120 mm 厚砖墙。实验区上部设置高度可调的全光谱日光模拟器,为将光源发出的热量排出室外,模拟器配备了通风降温系统;设备区由半封闭式制冷压缩机组、冷凝器、电子膨胀阀、蒸发器、风机、电加热器、变频器等设备组成。这些设备为多参数环境的模拟和实验研究提供了硬件基础,统称为环境控制设备(简称“环控设备”);模型实验区进门设于南侧风机侧面。实验区南墙嵌入放置 3 台轴流送风风机,风机间隙及两侧均充入聚氨酯发泡加以保温。该墙体 2 600 mm 以上至屋顶,利用双层玻璃做墙体。观察控制室设在局部二层上(下部为设备室,放置压缩机、表冷器等),实验人员通过双层玻璃窗可对实验区实验情况进行实时观测。北侧 1 400 mm 高度以下亦放置 3 台轴流式回风风机,与南墙三台风机轴线一一对应。

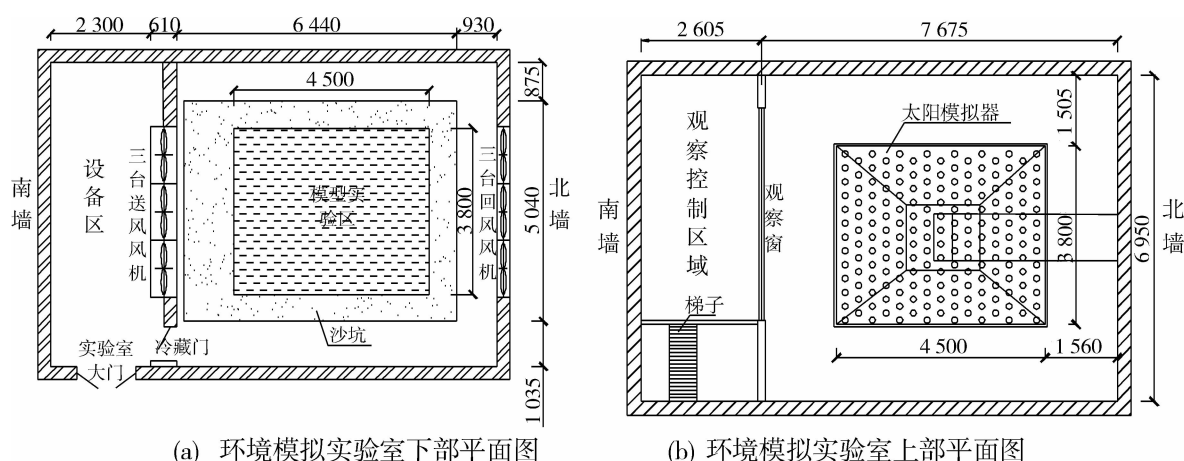


图 1 环境模拟实验室平面/mm

Fig. 1 Plane graph of environment simulation laboratory/mm

## 2 速度场、温度场的数值模拟

采用 CFD 商用软件 Fluent 对系统进行模拟<sup>[8-9]</sup>. Fluent 采用基于完全非结构化网格的有限体积法,具有基于网格节点和网格单元的梯度算法,且包含商用软件中最常用的三种求解算法:非耦合隐式算法、耦合显式算法、耦合隐式算法;可进行定常/非定常流动模拟,而且新增快速非定常模拟功能;Fluent 软件具有强大的网格支持能力,支持界面不连续的网格、混合网格、动/变形网格以及滑动网格等;提供了友好的用户界面和二次开发接口—用户自定义函数(UDF, User Defined Function)<sup>[10-11]</sup>.

### 2.1 计算模型

微气候环境模拟实验室内流动的类型与一般空调通风房间内的气流运动类型相似<sup>[12]</sup>,均属于湍流运动。湍流模型采用可实现  $k-\epsilon$  湍流模型,同时,近壁区采用标准壁面函数法处理<sup>[13]</sup>. 为考虑温差引起的浮升力的影响,采用 Boussinesq 近似<sup>[14]</sup>.

数值模拟是针对实验室内整个实验区进行的,其中重点研究模型实验区。实验室模型包含实验区空间、风机、收缩段、日光模拟器以及风管模型。模型中将每个镝灯简化为具有相同体积大小的圆柱体,并且排风罩作简化处理,计算中其出口直接连接至实验室的顶部,沿程压损按实际设定。其余部分均按照实际情况建立。按照实际尺寸建立的实验室计算模型如图 2 所示。

图中,靠近坐标轴的位于  $y$  轴上的三台风机为送风机(编号依次为 I、II、III 号);在北面墙上与之对应的为回风风机(编号分别为 IV、V、VI)。

## 2.2 网格划分

环境模拟实验室空间结构比较复杂,为了提高网格质量,采用分区方法生成网格.如图3为针对实验室模型划分的网格分区示意图.在灯阵区域,先在日光模拟器之外区域生成六面体结构化网格,再在日光模拟器区域生成四面体非结构化网格.四面体形状的排热罩和它四周切割出来的楔形体生成的是非结构化四面体网格.排热罩上部的风管部分和日光模拟器下部均为六面体结构化网格.图4日光模拟器区域网格分布图.

为了保证准确反映室内气流组织状况,数值计算时对所有固体边界处的网格(如灯阵、送风风机风口、回风风机风口等位置)进行局部加密.针对风机划分了网格风机的结构较复杂且属于不规则形状,因此风机模型选择了非结构化网格.结果证明,针对每一个风机体生成的总体网格总数为19 125.该风机模型可供 Gambit 通过选定组件直接调用.

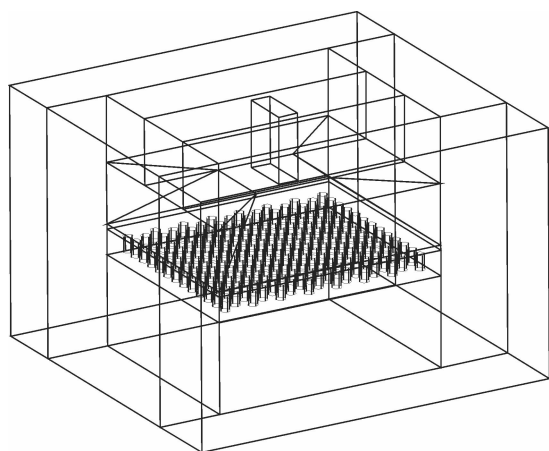


图3 实验室模型分区图

Fig. 3 Model partition of the lab

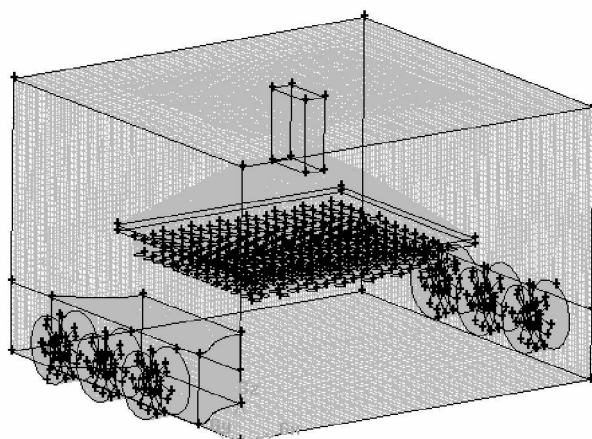


图2 计算模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calculation model

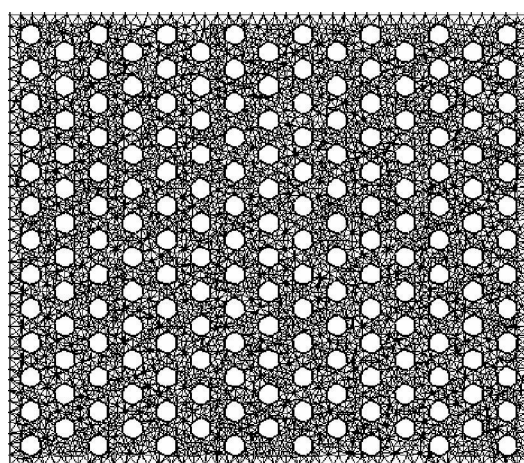


图4 日光模拟器区域网格分布图

Fig. 4 Grid of solar simulator

分别进行日光模拟器在1.5 m与2.0 m处的数值计算.比较网格生成结果可知:日光模拟器高度在1.5 m时网格总数(491 090)较2.0 m工况(45 1205)时要多.其中1.5 m时非结构化网格数为170 878,结构化网格320 212占网格总数的65.2%.2.0 m时非结构化网格数为130 993,此时结构化网格占网格总数的71.0%.导致非结构化网格多的主要原因是由于1.5 m工况时生成的非结构化网格的区域较大.

## 2.3 边界条件的确定

模拟灯架高度为2.0 m和1.5 m两种工况下实验区空间温度场与速度场分布情况,并视光源为内热源.针对所建立的模型,设定边界条件如下:

(1)入口边界条件:实验室入口处气流经由三台送风机进入实验区域,因此,实验室气流入口条件的设定取决于三台送风机模型.热边界条件为直接设定送风温度.送风机模型的入口边界条件选用的是压力进口边界条件,而送风机出口即为实验室模型的入口.入口湍流参数以湍流强度(Turbulence Intensity)和水力直径(Hydraulic Diameter)的形式来给定,各种计算状态下,湍流强度为5%,水力直径为1.2 m.

(2)出口边界条件:实验室气流出口是依靠三台回风机实现,回风机模型的出口边界条件为压力出口边界条件;回风机模型的入口边界条件为按实验室气流压力计算结果设定.

(3)排热罩入口边界条件:排热罩吸入口边界条件选用质量流量,流量根据模拟器开灯数量确定.

(4)壁面边界条件:所有固体壁面采用无滑移边界条件,沿壁面切向流体流速为零.各壁面湍流粘性系数按标准壁面函数法确定.室内四周壁面做了保温处理视为绝热壁面;地面除沙面位置外也视为绝热壁面.沙面边界条件取为第三类边界条件,屋顶为不透光绝热壁.

(5)日光模拟器看作实验室内热源,热源强度与开灯数量成正比.

## 2.4 数值结果与分析

主要针对模型实验区速度场和温度场进行详细分析.模型实验区为模拟器下方  $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 1.0\text{ m}$  的立体空间.为了给出计算所得到的三维结果,选取若干个特征断面为代表性截面,分析这些截面上的温度和速度场.计算过程中,对压力、动量、湍动能、湍动耗散率及密度均作欠松弛处理,欠松弛因子分别为:0.3、0.5、0.5、0.5和1.计算中对连续性方程、三个方向的动量方程、湍动能  $k$  方程和耗散率  $\epsilon$  方程的收敛残差均为  $10^{-4}$ ,能量方程收敛残差为  $10^{-6}$ .

将送风温度固定为  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,模拟器高度为  $2\text{ m}$ ,考虑A组灯打开情况.取中间风机截面为特征界面,温度场和速度场模拟结果如图5和图6所示.从模拟结果可以看出在模型实验室高度( $1\text{ m}$ )范围内温度分布还是比较均匀的,气流的主流风速方向主要在水平方向上( $x$ ),而且在竖直方向( $z$ )速度分布也较均匀.在模型实验区上部距离模拟器越近,温度越高.由于排风罩的作用,模拟器发出的大部分热量被排到室外,其对实验区温度场的影响显得并不那么重要了.而且可以看出,随着送风速度的提高,在  $x$  方向上温度分布更加均匀.

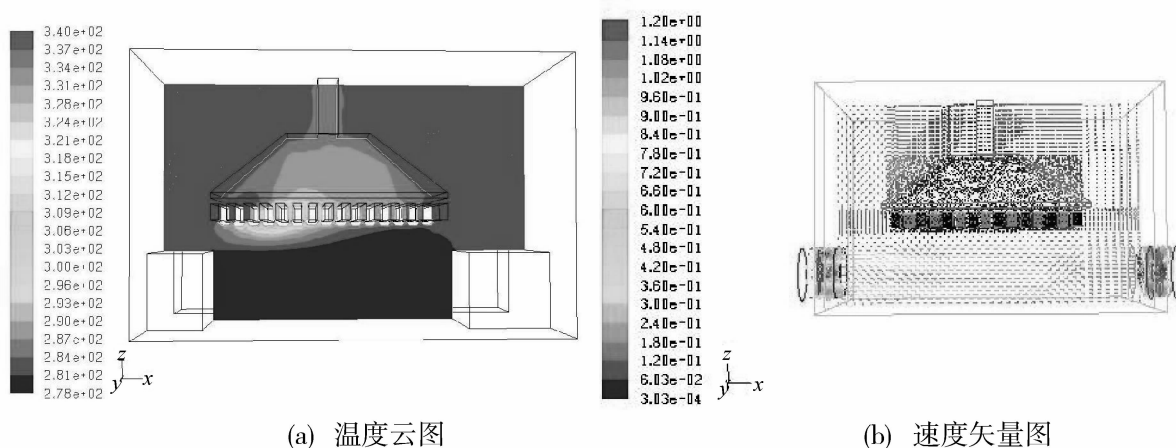


图5 送风速度为  $1.5\text{ m/s}$  时的温度云图与速度矢量图

Fig.5 Temperature and velocity diagram at  $1.5\text{ m/s}$  air supply

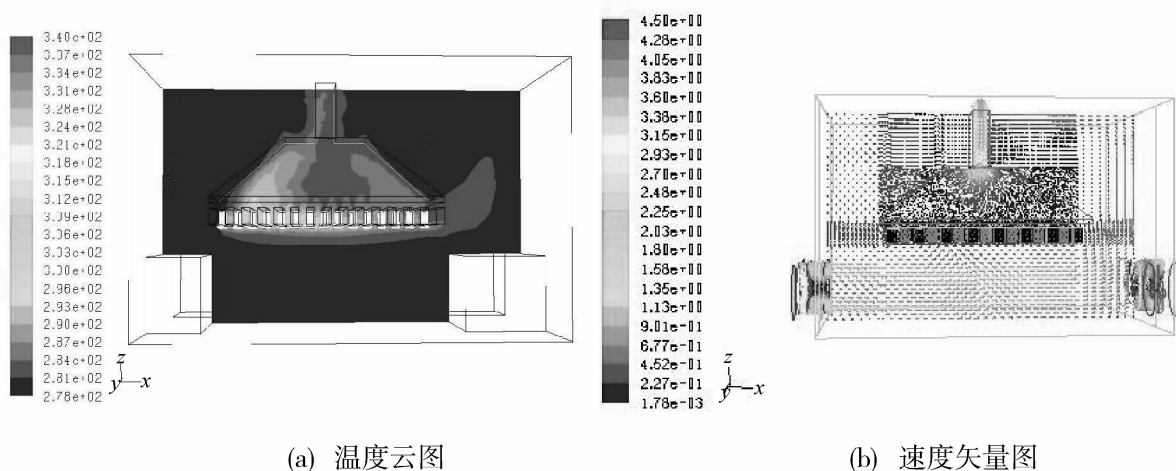


图6 送风速度为  $2.0\text{ m/s}$  时的温度云图与速度矢量图

Fig.6 Temperature and velocity diagram at  $2.0\text{ m/s}$  air supply

## 2.5 实验验证与基准模型的确定

为验证模拟结果的可靠性,进行了相关实验研究.采用丹麦丹迪动态公司的微环境测试仪 VIVO 进行温度和风速测量.

### (1) 测点的布置

取每台风机的轴心截面及相邻风机中线截面为典型测试面.日光模拟器高度设为 2 m,测点距地面高度依次为 0.2 m、0.6 m、1.0 m、1.5 m.

实验研究中的测点位置如图 7 所示:图 7 中 I、II、III 代表三台送风风机;IV、V、VI 代表三台回风风机,测点 A、B、C、分别为送风状态测试点,距离风机出口为 0.4 m, A、B、C 三个位置上不同高度的测量值的平均值作为送风风速.测点布置如编号 1~20.

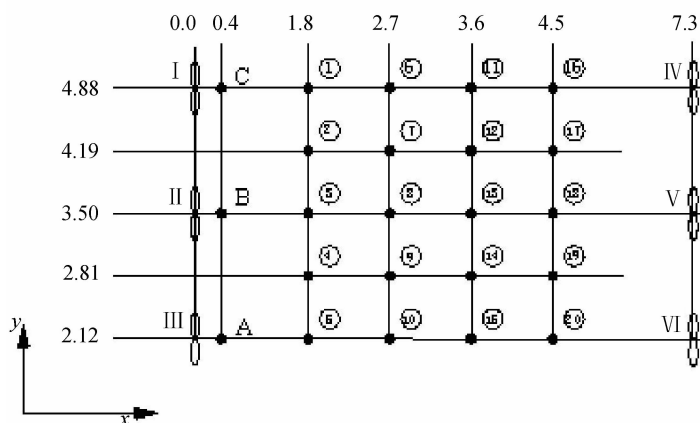


图 7 测点分布平面图/m

Fig. 7 Distribution of measurement points layout

### (2) 模型验证量化指标

一般采用两个无量纲统计学参数作为模型有效性检验的量化指标,即:均方根差(RMSE, root mean square error)和均偏差(MBE, mean bias error)<sup>[15]</sup>,其表达式如下:

$$RMSE = \frac{100}{\langle M_i \rangle} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i)^2} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{100}{\langle M_i \rangle} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - M_i) \quad (2)$$

上述两式中,  $S_i$  表示第  $i$  个模拟值;  $M_i$  表示第  $i$  个测量值;  $N$  为检验模型过程中所取的数据点数;  $\langle M_i \rangle$  表示  $N$  个数据点参量的平均值.

### (3) 模拟结果与实验结果对比

实验开始前,使送风风机与回风风机运行一段时间,保证实验室内部的速度场处于一个比较稳定的状态.仅给出了模拟器高度为 2 m、测点高度为 0.2 m、送风速度为 1.5 m/s 和开启灯组 A 时各测点速度值(图 8)和温度值(图 9),并进行了模拟与测量值的对比.由图 8 结果看出,在该工况下远离送风机的测点(点 16~20)处的风速较点 1~4 风速低约 0.2 m/s.由图 9 可知,实验值较模拟值偏高,但总体无差不超过 0.3 °C.按模型验证量化指标中的均方根差(RMSE)对各物理参数各工况下的结果进行评价,得出:高度为 0.2 m、0.6 m、1.0 m、1.5 m 时温度 RMSE 分别为 5.3 %、7.1 %、6.5 %、8.9 %

,对应高度的速度 RMSE 分别为 2.1 %、3.4 %、4.1 %、5.3 %.整个模拟的平均 RMSE 为 5.34 %,因此可以认为该模拟结果可靠,该 CFD 数值模型可作为基准模型,该模型可进行其它工况下环境模拟

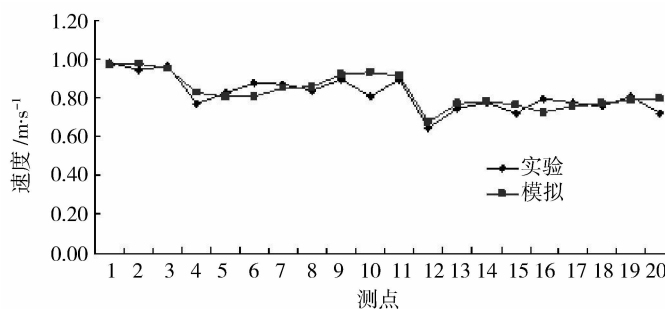


图 8 速度的模拟与测量值对比结果

Fig. 8 Simulation vs measurement for velocity

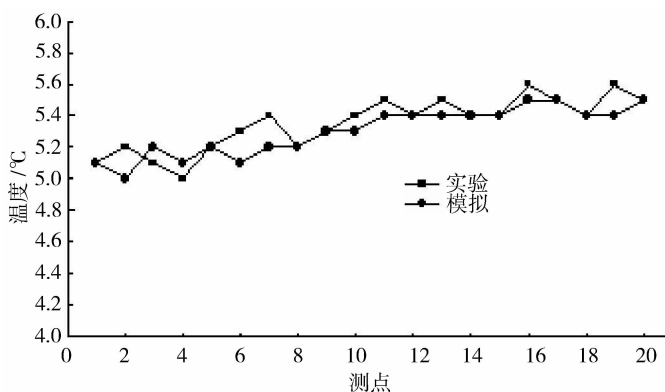


图 9 温度的模拟与测量值对比结果

Fig. 9 Simulation vs measurement for temperature

实验室温度场和速度场的数值模拟研究,并为研究环境模拟实验室控制系统研究提供了模型基础。

### 3 结 语

通过数值模拟并进行实验验证,整个模拟的平均均方根差为 5.34 %。可知模拟与实验结果基本一致,获得了环境模拟实验室的基准模型。该模型可进行其它工况下环境模拟实验室温度场和速度场的数值模拟研究,提供数据参考,为研究环境模拟实验室研究提供了模型基础。

### 参考文献 References

- [1] MOINN A S, OBUKHOV A M. Basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground[J]. Tr Akad Nauk SSSR Geofiz inst, 1954, 24(151): 163-187.
- [2] MERVIS J. Bye, bye Biosphere 2[J]. SCIENCE, 2003, 302(19):2053.
- [3] 李云峰, 吴胜兴. 现代混凝土结构环境模拟实验室技术[J]. 中国工程科学, 2005, 7(2):81-85, 96.  
LI Yun-feng, WU Sheng-xing. Study on Fire Smoke Properties of Subway Station Passageway by Simulation Experiments [J], Engineering Science, 2005, 7(2):81-85, 96.
- [4] 孟庆龙. 近地层微气候环境模拟与基于 CFD 的控制方法研究[D]. 西安:西安交通大学, 2010.  
MENG Qing-long. Simulation of Atmospheric Surface Layer Microclimate and CFD-based Control Method[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2010.
- [5] 徐 俊, 蒲 亮, 厉彦忠, 等. 人工环境室内湿度场的数值模拟和优化[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2007, 41(1): 77-81.  
XU Jun, PU Liang, LI Yan-zhong, et al. Numerical Simulation and Optimization of Humidity Field in Artificially Environmental Chamber [J], Journal of Xi'an Jiaotong University: Nature Science Edition, 2007, 41(1):77-81.
- [6] 肖 彪, 金苏敏, 史 敏. 人工环境试验室内空气流场的研究[J]. 制冷与空调, 2007, 7(5): 89-92.  
XIAO Biao, JIN Su-min, SHI Min. The study of air field in artificial environment laboratory [J], Refrigeration and Air-conditioning, 2007, 7(5): 89-92.
- [7] WANG L, DOLS W S, CHEN Q, et al. Using CFD capabilities of CONTAM 3.0 for simulating airflow and contaminant transport in and around buildings [J], HVAC&R Research, 2010, 16(6): 749-763.
- [8] 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 Fu-jun. Computational fluid dynamics-principle and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [9] 江 帆, 黄 鹏. Fluent 高级应用与实例分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.  
JIANG Fan, HUANG Peng. Fluent application and examples[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [10] Fluent 6.3 User's Guide[DB]. USA: Fluent Inc, 2007.
- [11] ANSYS INC. FLUENT 6.2 UDF Manual [M]. Southpointe, USA: Fluent Inc, 2005.
- [12] WANG M, LIN CH, CHEN Q. Advanced turbulence models for predicting particle transport in enclosed environment [J]. Building and Environment, 2012, 47:40-49.
- [13] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.  
TAO Wen-quan. Numerical transfer heat [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [14] JOUN H, ROBERT AG. Asymptotic solutions for singularly perturbed Boussinesq equations [J]. Applied Mathematics and Computation, 2012, 218(20): 10238-10243.
- [15] WILLMOTT C J, MATSUURA K, ROBESON S M. Ambiguities inherent in sums-of-squares-based error statistics [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(3): 749-752.

## Numerical simulation and experiment for temperature and velocity field in man-made environment laboratory

MENG Qing-long<sup>1,2</sup>, WANG Yuan<sup>2</sup>, Li Yan-peng<sup>1</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Numerical simulations of temperature and velocity field of the environment simulation laboratory space under multiple conditions were carried out. Considering the characteristics of the environment simulation laboratory, with Group A lamp of the simulator on at the height of 2 m, numerical results were compared with the experimental results. The results showed that: the simulation results of temperature are more accurate than that of wind velocity and both simulation values are respectively consistent with the experimental ones. The experimental temperature value is no more than the simulation one by 0.3 °C. According to the model validation root mean square error (RMSE), the following results could be achieved: at the height of 0.2 m, 0.6 m, 1.0 m, 1.5 m, the air temperature RMSE are 5.3 %, 7.1 %, 6.5 %, 8.9 %, corresponding to the high wind velocity RMSE of 2.1 %, 3.4 %, 4.1 %, 5.3 %. The average root mean square error of the simulation was 5.34 %, and the numerical model can be used as the baseline model for other working conditions.

**Key words:** *computational fluid dynamics; environment simulation; velocity field; temperature field*

---

**Biography:** MENG Qing-long, Lecturer, Ph. D., Xi'an 710054, P. R. China, Tel: 0086-18229017219, E-mail: mql19@163.com

---

(上接第 704 页)

## Analysis of rigid pavement with transversely isotropic foundation by damage theory

LIU Jun-qing<sup>1</sup>, YE Wen<sup>1</sup>, WANG Bao-shi<sup>1</sup>

(Science of School, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Combining the irreversible thermodynamic theory and elastic damage theory with the finite element method, a three dimension simulation model for rigid pavement with transversely isotropic subgrade under uniform distributed load is established by matlab language. The failure of damage process of the rigid pavement with transversely isotropic subgrade is simulated. The results show a significant effect on the vertical displacement of pavement considering the damage condition. The damage degree becomes increasingly evident with increasing loads. It better reveals the act of pavement's damage.

**Key words:** *rigid pavement; transversely isotropic subgrade; elastic damage theory; finite element model*

---

**Biography:** LIU Jun-qing, Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13991319036, E-mail: liujunqingjd@126.com