

DOI: 10.7652/xjtuxb201607020

遗址博物馆特殊环境温度场 调控系统的设计及优化

王宇昂¹, 路昭², 罗昔联¹, 孟祥兆¹, 孙艳军¹, 金立文¹

(1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为保护遗址博物馆中的文物,确定适宜遗址文物长久安全保存的空气温度参数,根据遗址博物馆的特殊复杂环境(“大气-文物-土壤”多参数耦合),研制了遗址文物适宜的封闭式多场耦合实验舱本体及空气温度调控系统。该多场耦合实验舱既包括上部空气环境,也包括底部土壤环境,采用了对下部遗址文物影响最小的低风速上进上回送风方式以满足遗址文物的坑道陈列模式。在舱内换气次数固定的情况下,空气温度调控系统通过铰链机构调节送风角度以优化实验舱内部的气流组织。通过实验并借助CFD软件FLUENT,研究了送风角度对实验舱内部温度场及流场的影响,获得了优化方案。实验及数值模拟结果均表明,对于所设计的多场耦合实验舱,小角度送风有利于实验舱内部温度场及流场的均匀分布,同时可降低系统能耗。研究结果可应用于汉阳陵或兵马俑这类坑式陈列,并可为送风式舱体结构的温度场分布研究提供参考。

关键词: 遗址博物馆; 特殊环境; 多场耦合实验舱; 温度控制系统; 实验研究

中图分类号: TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0131-09

Design and Optimization of Temperature Control System for Special Environment in Site Museums

WANG Yuang¹, LU Zhao², LUO Xilian¹, MENG Xiangzhao¹, SUN Yanjun¹, JIN Liwen¹

(1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

Abstract: To protect the unearthed relics and investigate the temperature related parameters for appropriate preservation environments, a multi-field-coupled test chamber and a temperature control system were developed according to the complex environment in actual site museums in terms of the parameters of air, unearthed relics and soil. The multi-field-coupled system reproduced both the upper air condition and the lower soil environment within the designed chamber. It uses the upper air supply and exhaust flow configuration with minimum impact on the unearthed relics to realize a gallery display layout for the unearthed relics. When the air change number is a given constant in this chamber, the temperature field and flow field distributions can be optimized by changing the angle of air flow supplied to the test chamber via an articulated mechanism. The influences of air feeding angle on the internal temperature and flow fields were investigated by experiment using CFD software FLUENT, and the optimized protection scheme was achieved correspondingly. The experimental and numerical results show

收稿日期: 2015-12-10。 作者简介: 王宇昂(1992—),女,硕士生;孟祥兆(通信作者),男,高级工程师。 基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BKA14B01)。

网络出版时间: 2016-04-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160428.2222.008.html>

that for the multi-field-coupled test chamber developed in this research, uniform internal temperature and flow fields can be obtained under relatively small air feeding angle, while the energy loss can be reduced simultaneously. The designed multi-field-coupled control system may provide a reference to the investigation of air supplied temperature field in similar relics protection sites for such as Han Yang Ling Mausoleum and Terra-Cotta Warriors.

Keywords: site museum; special environment; multi-field-coupled test chamber; temperature control system; experimental investigation

遗址博物馆环境具有室内人员流动不均匀、由空气和开放土壤共同组成室内空间等特点,其温湿度控制受到众多因素的影响,不适当的环境参数将严重影响遗址文物的保存。遗址博物馆(如汉阳陵地下遗址博物馆、秦始皇兵马俑博物馆)是在大型古迹遗址上建立的集文物保护、考古、展览于一体的多功能博物馆,这类博物馆能有效避免风吹、日晒和雨淋等外界自然环境对遗址文物的影响,对于保护文物原貌和开展考古发掘具有重要意义,是国际遗址文物保护的重要发展趋势^[1-2]。遗址博物馆中遗址文物所处的区域不仅包括上部空气环境,而且还包括底部土壤环境。由于底部土壤环境是遗址文物的原位环境,难以实现有效调控,因此,合理调控遗址文物所处区域上部的空气温度是遗址文物长久安全保存的关键手段。

遗址博物馆中不适宜的保存环境会导致遗址文物出现不同程度的病害^[3]。过高的环境温度会加快文物发生化学反应的速度,从而加速对文物的损害,并容易滋生微生物腐蚀文物。研究表明:每当温度升高 10℃,化学反应速度就会增加 2~4 倍^[3];环境温度的波动还将引起文物的热胀冷缩^[4];多环境因素共同作用下文物的受损速度远大于单一因素对文物的影响^[5]。因此,为实现遗址文物长期妥善保存,迫切需要对文物病害与空气温度的定性、定量关系进行研究,从而确定遗址文物适宜的环境控制参数。

目前,环境模拟技术已广泛应用于航空航天、军事、汽车、机电工业及农业等各领域的科学研究中。通过环境模拟技术,可以全面、快速地研究环境参数对产品性能的影响,对产品长期高效运行具有重要意义。然而,环境模拟技术在遗址文物保护方面的应用目前还鲜有涉及。因此,本文建立了适合遗址文物的多场耦合实验舱本体及空气温度调控系统,借助该实验舱可以模拟空气环境参数对遗址文物的影响,从而确定遗址文物适宜的空气环境参数。实验舱内部良好的温度场、流场是研究空气环境参数与文物病害定量、定性关系的必要保证,而气流组织

正是影响多场耦合实验舱内部空气温度及流场的关键因素。现有的研究结果表明,送风角度和送风方式是影响室内气流组织的关键因素^[6-12]。为满足遗址文物的坑道陈列模式,本文采用了上进上回的送风方式,因此送风角度是影响、优化实验舱气流组织的关键因素。基于以上分析,为确保多场耦合实验舱具有良好的温度场及流场,满足遗址文物实验环境要求,本文首先完成了实验舱的设计和搭建,通过实验测试研究了送风角度对实验舱内部温度场的影响,借助 CFD 软件 FLUENT 研究了送风角度对实验舱内部流场的影响,最后通过对比实验和数值模拟结果确定了实验舱的最佳送风角度,并优化了实验舱内部的温度场及流场。

1 实验舱系统设计

1.1 多场耦合实验舱本体设计

本文所设计的多场耦合实验舱是根据遗址博物馆的特殊环境(“大气-文物-土壤”多参数耦合)而建立的用于研究遗址文物适宜环境参数的实验平台,因此实验舱本体结构与常规环境调控室不同,是既包括上部空气环境又包括底部土壤环境的有效组合体。实验舱本体上部空间的内部净尺寸为 2.9 m(长)×2.4 m(宽)×1.2 m(高),采用内外均为不锈钢材料、中间填充聚氨酯发泡保温材料的板材(厚度 $D_1=100$ mm)作为围护结构,以实现优良的保温隔热性能和耐腐蚀性能,同时采用卡扣的方式将 4 块板材进行有效连接;实验舱顶部采用导热系数较小的轻质透明有机玻璃结构(玻璃厚度 $D_2=10$ mm)。实验舱本体下部空间为土壤环境,其内部基本结构与遗址文物坑道展出模式接近,内部净尺寸为 2.9 m×2.4 m×1.1 m。因此,多场耦合实验舱的内部净尺寸为 2.9 m×2.4 m×2.3 m。这样的实验舱本体设计有利于形成与遗址博物馆相同的“大气-文物-土壤”多参数耦合环境,便于进行遗址文物的相关实验研究及陈列展出。同时,在实验舱本体上部空间的围护结构上安装了 2 组可移动的辅助支架

(如图 1 中虚线所示),用于连接温度传感器。多场耦合实验舱本体结构示意图及实物图分别如图 1、图 2 所示。

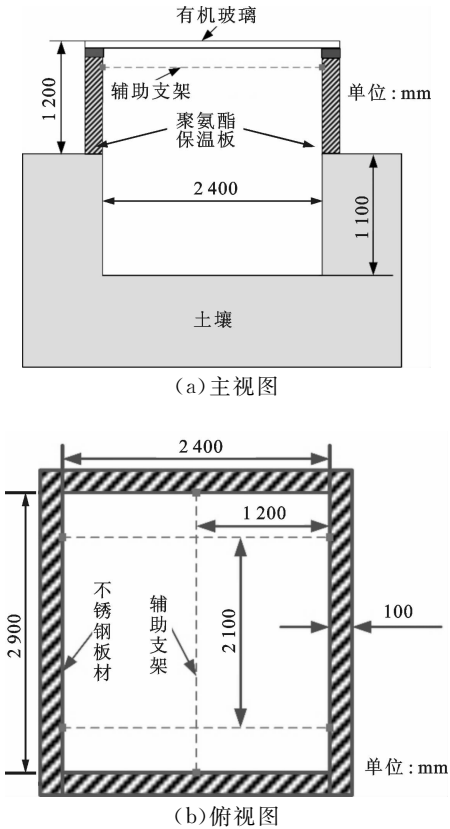


图 1 多场耦合实验舱本体结构示意图

1.2 多场耦合实验舱空气温度调控系统设计

实验舱的空气温度调控系统如图 3 所示,主要由室外冷热水机组、水箱、水泵、水-空气热交换器、送风机、加湿器、电加热器以及空气整流装置、送风角度调节装置等部件组成。其中:室外机组根据实验要求产生冷/热水;水箱采用新型圆柱形保温水箱,容积为 150 L,采用保温水箱是为了避免室外机的频繁启停,有利于延长室外机的使用寿命;水泵为整个水系统提供循环动力,型号为威乐 RS25/6,最

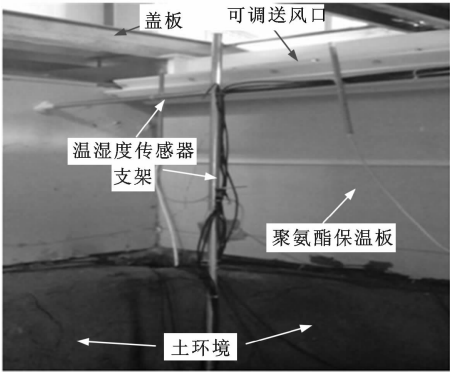


图 2 多场耦合实验舱实物图

大流量为 58、37 和 15 t/h(3 档变速);水-空气热交换器置于风管中,通过室外机组产生的冷/热水与经过其表面的空气进行热交换,从而冷却/加热风管内的空气;送风机(26NF3C-3200-BX 型静音送风机,最大风量为 3 200 m³/h)置于风管中,为整个风系统提供循环动力,并且可通过 VFD015EL43A 型变频器实现不同风速;空气整流装置置于近送风口处,用于降低气流湍流强度及均匀分配送风气体,采用蜂窝状多孔板;加湿器置于风管中,采用超声波十头雾化器调控风管内的空气湿度;电加热器置于水-空气热交换器之后,用于调控风管内的空气湿度,其控制流程如图 4 所示;送风角度调节装置安装于实验舱风管的送风口处,可通过调整送风角度改善实验舱内部的气流组织,采用铰链机构及帆布软连接的方式实现送风角度的调节功能。

2 数值模拟

2.1 物理模型

本文所设计的多场耦合实验舱尺寸为 2.9 m(x) $\times$ 2.4 m(y) $\times$ 2.3 m(z),其中上部空气环境为 2.9 m(x) $\times$ 2.4 m(y) $\times$ 1.2 m(z),下部土壤环境为 2.9 m(x) $\times$ 2.4 m(y) $\times$ 1.1 m(z)。实验舱的物理

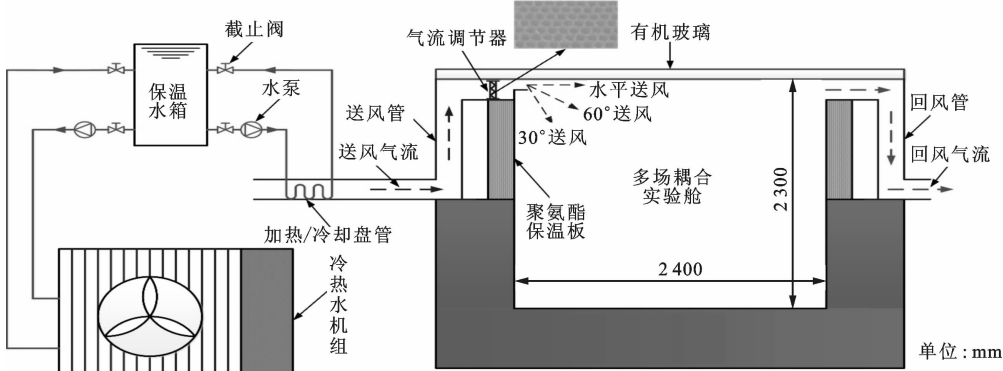


图 3 空气温度调控系统示意图

模型如图5所示。

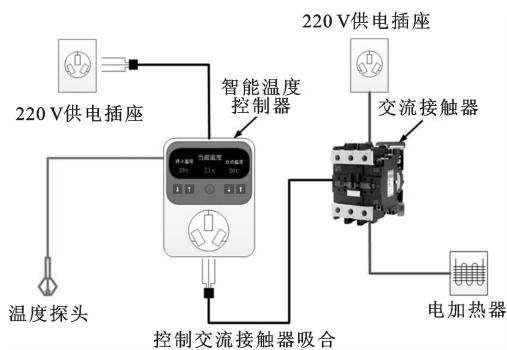


图4 电加热器控制流程

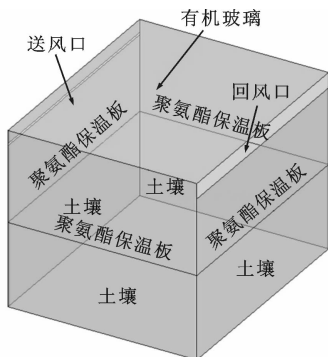


图5 多场耦合实验舱三维物理模型示意图

2.2 数学模型

2.2.1 控制方程 采用三维雷诺平均 N-S 方程结合标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型。模型的通用控制方程可以写成如下形式^[13]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho U\phi) = \text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中： ϕ 为通用变量，分别表示动量方程中的速度 u, v, w ，能量方程中的温度 T ，湍流动能方程中的湍动能 k 和耗散率 ϵ ； $\partial(\rho\phi)/\partial t$ 为非稳态项； $\text{div}(\rho U\phi)$ 为对流项； $\text{div}(\Gamma_\phi \text{grad}\phi)$ 为扩散项； S_ϕ 为源项。

采用 Gambit 软件建立实验舱的物理模型，然后用结构化网格(四边形和六面体网格)对空间进行网格划分，在壁面、送回风口附近采用适当的网格加密。经过网格数独立性测试判断，数值计算时选取的网格数为 597 520(97×80×77)。在数值计算时，采用一阶迎风格式对控制方程进行离散化，并选用 SIMPLE 算法对离散方程进行求解。

2.2.2 基本假设 为了简化问题，做如下假设：

①由于实验舱内部气流低速流动，压力较低，因此假设实验舱内部空气为理想不可压缩流体；②实验舱内部气流流动为稳态、湍流；③实验舱内部气流为自然对流、强迫对流都存在的混合对流流动；④采用 Boussinesq 假设，忽略黏性耗散，假设除密度以外的

其他物性参数为常数，密度变化只考虑动量方程中与体积力有关的项；⑤不考虑实验舱内表面的辐射换热热量，固体壁面上满足无滑移条件。

2.2.3 边界条件 入口边界：采用速度入口边界条件，并假设同一送风口所有位置的送风速度和送风温度均相同，垂直送风。送风速度和送风温度均取实验测量值。

出口边界：采用自由流出边界条件，即所有的空气都从出口流出。

壁面边界：实验舱上部空间围护结构和顶部有机玻璃盖板采用恒定热流密度边界条件，底部土壤环境各壁面采用恒定温度边界条件。

3 实验结果分析

实验主要研究不同工况下送风角度(30°送风、60°送风和水平送风)对实验舱内部温度场的影响，从而获得适用于不同运行工况的最佳送风角度。采用 T 型热电偶测量实验舱外部的空气温度及水-空气换热器的供/回水温度；采用 TR-72wf 型温湿记录仪测量实验舱内部的空气温度，采集时间均为 10 min，记录仪的具体布置如图 6 所示。

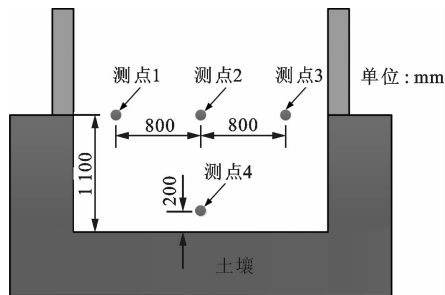


图6 实验舱内部温湿度记录仪布置示意图

3.1 制冷工况

运行工况：实验舱内部空气的目标温度 $t_{a, \text{set}} = 20^\circ\text{C}$ ，室外机的目标温度 $t_{w, \text{set}} = 13^\circ\text{C}$ ，调整变频器至 20 Hz，风速 $v = 2.0 \text{ m/s}$ 。

图 7~图 9 分别描绘了送风角度为 30°、60°和水平送风时，实验舱内部各测点的温度随时间的变化趋势。

由图 7 可以看出：在 30°送风时，实验舱内部不同测点处的温度差异性较小($\Delta t_{st} \leq \pm 0.5^\circ\text{C}$)，即温度场均匀性较好，同时各个测点处的温度随时间的变化范围均不超过 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，即温度控制精度高。

由图 8 可以看出：在 60°送风时，实验舱内温度场的均匀性良好，当舱外温度在 22.0 到 28.5 °C 范围内变化时，水系统和风系统间歇运行即可满足实

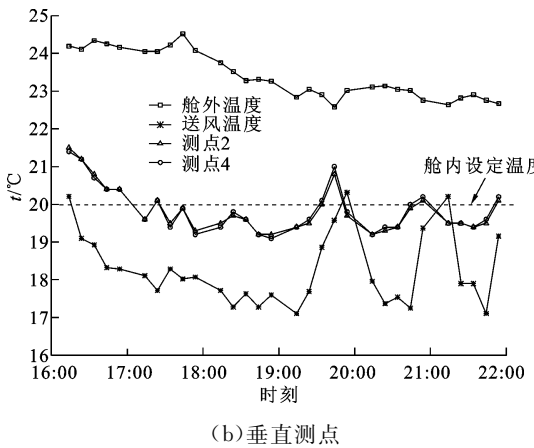
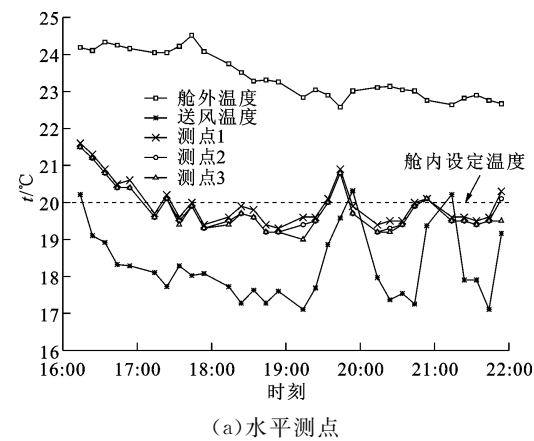


图 7 30°送风时实验舱内部各测点的温度
随时间的变化趋势(制冷工况)

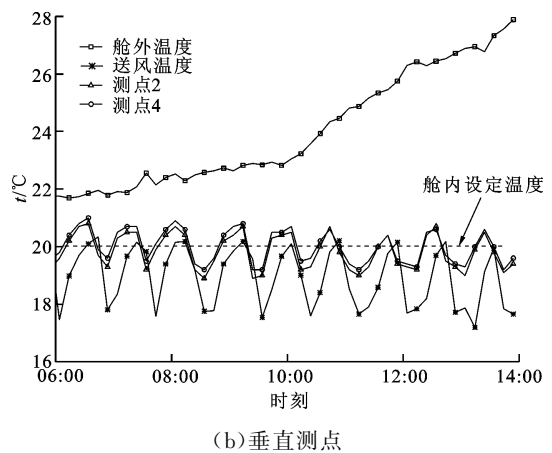


图 8 60°送风时实验舱内部各测点的温度
随时间的变化趋势(制冷工况)

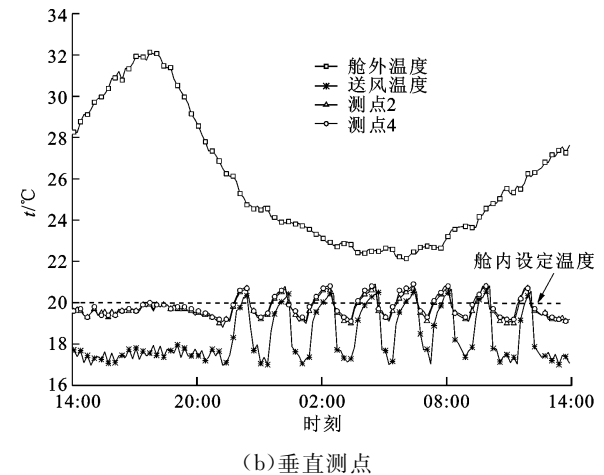
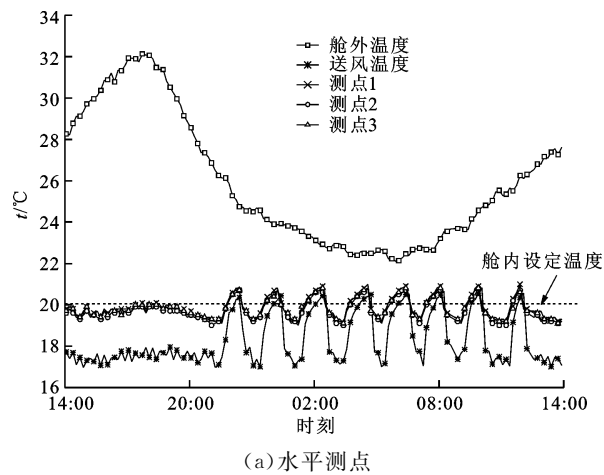
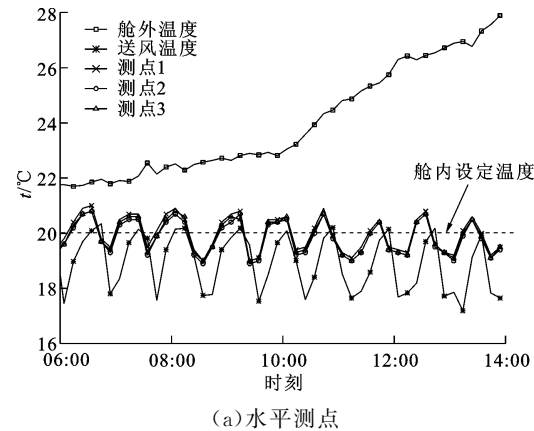


图 9 水平送风时实验舱内部各测点的温度
随时间的变化趋势(制冷工况)

验舱的目标温度要求,且温度随时间的变化范围不超过 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 。

由图 9 可以看出:在水平送风时,实验舱内温度场的均匀性较好,当舱外温度在 26.0 到 32.0°C 范围内变化时,水系统和风系统需要连续运行才能确保实验舱内部空气温度达到目标温度值 20°C ;当舱外温度在 22.0 到 26.0°C 范围内变化时,水系统和风系统间歇运行即可满足实验舱的目标温度要求。



综上所述,对于制冷工况而言,不同送风角度时实验舱内部各测点的温度差异性均较小($\Delta t_{sf} \leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$),但是不同的送风角度对风系统和水系统的运行方式具有一定的影响。相比较而言,水平送

风时由于水和风系统有时需要连续运行,因此较其他 2 种送风方式耗能更多。

3.2 采暖工况

运行工况:实验舱内部空气的目标温度 $t_{a,set}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$,室外机的目标温度 $t_{w,set}=32\text{ }^{\circ}\text{C}$,运行整个系统,同时调整变频器至 20 Hz,风速 $v=2.0\text{ m/s}$ 。

图 10~图 12 分别是采暖工况送风角度为 30° 、 60° 和水平时,实验舱内部各测点温度随时间的变化趋势。

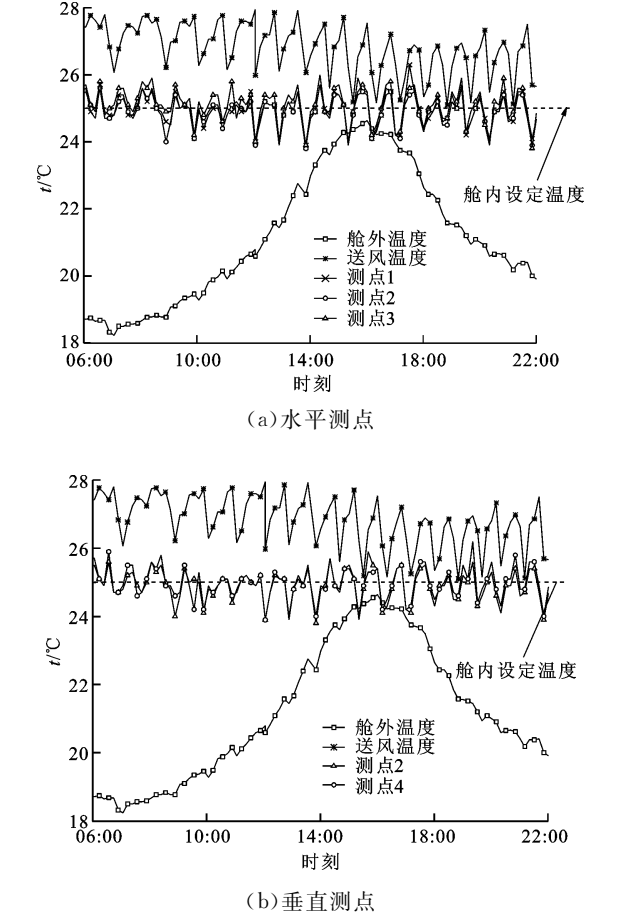


图 10 30° 送风时实验舱内部各测点的温度随时间的变化趋势(采暖工况)

由图 10 可以看出:在 30° 送风时,实验舱内部不同测点处的温度差异性较小($\Delta t_{st}\leqslant\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),即温度场均匀性较好;当舱外温度在 $18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $24.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时,水系统和风系统间歇运行即可满足实验舱的目标温度要求,且温度随时间的变化范围不超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

由图 11 可以看出:在 60° 送风时,实验舱内部不同测点处的温度具有一定的差异性($\Delta t_{st}\leqslant\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$),即温度场的均匀性不佳;当舱外温度在 $18.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $25.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时,水系统和风系统需要连续运

行才能满足实验舱的目标温度要求,且温度随时间的变化范围不超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

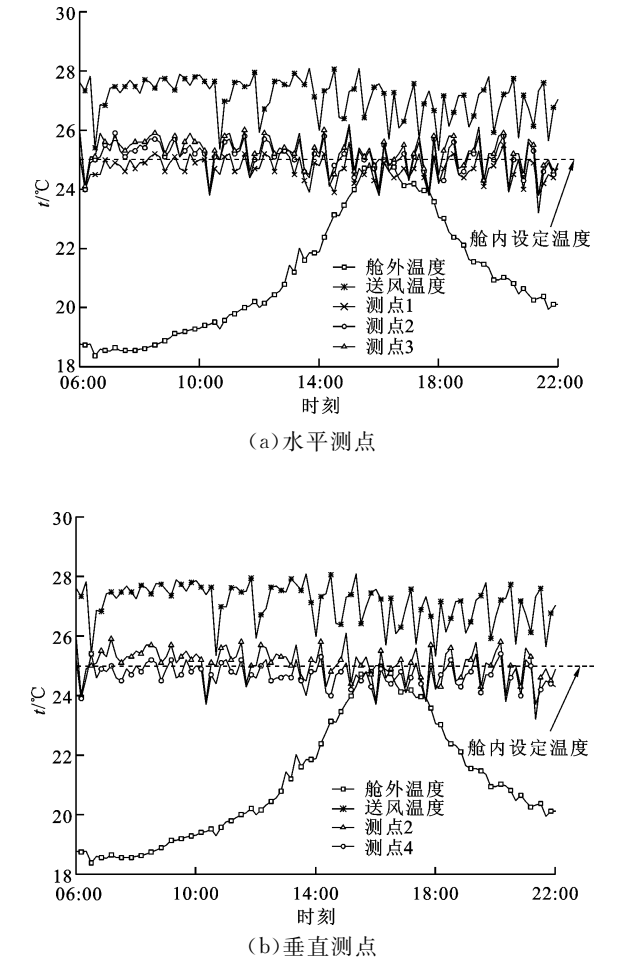


图 11 60° 送风时实验舱内部各测点的温度随时间的变化趋势(采暖工况)

由图 12 可以看出:在水平送风时,实验舱内部垂直方向各测点的温度差异性较大,即温度场均匀性较差;当舱外温度在 $19.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $22.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化时,水系统和风系统需要长时间连续运行才能满足实验舱的目标温度要求。

综上所述:对于采暖工况而言,送风角度对实验舱内部温度场的均匀性影响较大,其中仅送风角度为 30° 时实验舱内部的温度场均匀性才满足实验要求($\Delta t_{st}\leqslant\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$);不同的送风角度对系统的运行方式有一定的影响,相比其他 2 种送风角度,送风角度为 30° 时系统间歇运行即可满足实验舱的目标温度要求,所以此时系统耗能最少。

基于以上分析可知,对于任何实验工况而言,送风角度为 30° 时实验舱内部温度场的均匀性均满足实验要求($\Delta t_{st}\leqslant\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),同时系统能耗较小,因此,多场耦合实验舱的最佳送风角度为 30° 。

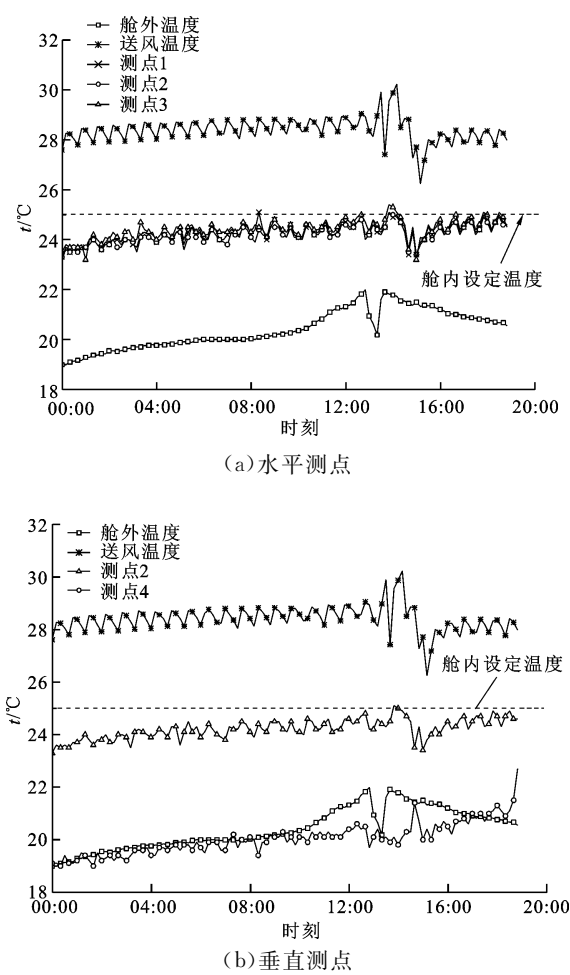


图 12 水平送风时实验舱内部各测点的温度随时间的变化趋势(采暖工况)

4 数值模拟结果分析

采用 CFD 软件 FLUENT 研究 30°和水平送风对实验舱内部流场的影响,进而揭示送风角度对实验舱内部温度场均匀性的影响。计算参数见表 1。

表 1 实验舱在不同送风角度下的边界条件

参数	制冷工况		采暖工况	
	30°送风	水平送风	30°送风	水平送风
$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	2.0	2.0	2.0	2.0
$t/^{\circ}\text{C}$	18.26	18.30	26.94	28.35
$t_s/^{\circ}\text{C}$	18.26	18.30	22.88	19.35
$q_1/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	7.5	7.5	-11.0	-11.0
$q_2/\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	1.2	1.2	-2.0	-2.0

v :送风速度; t :送风温度; t_s :土壤温度; q_1 :顶部换热量; q_2 :围护换热量。

为研究不同送风角度对实验舱内部流场的影响,选取实验舱中心剖面($x=1.45\text{ m}$)进行分析。

4.1 制冷工况不同送风角度下实验舱内部的流场分布

图 13a 为制冷工况 30°送风时实验舱内部的速度矢量图。由图可知,气流从顶部送风口进入,由于送风角度的影响,气流迅速向下流动到达实验舱底部,然后在实验舱底部形成明显的“空气湖”,随后一部分气流流向回风口,一部分气流在实验舱内部循环流动,实验舱内部气流整体分布均匀。

图 13b 为制冷工况水平送风时实验舱内部的速度矢量图。由图可知,气流从顶部送风口进入,在实验舱顶部形成明显的贴附射流,贴附射流中心的速度沿程逐渐减小,然后一部分气流下沉在实验舱内部循环流动,一部分气流直接从回风口流出,实验舱内部气流整体分布均匀。

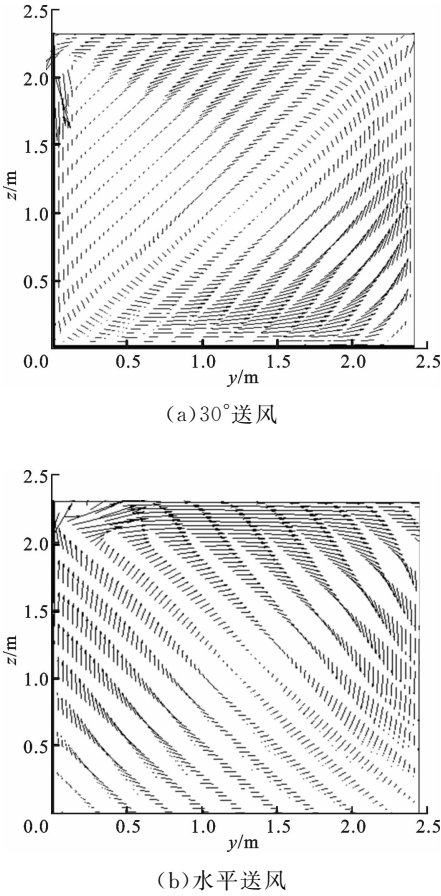


图 13 制冷工况不同送风角度下实验舱中心剖面的速度矢量图

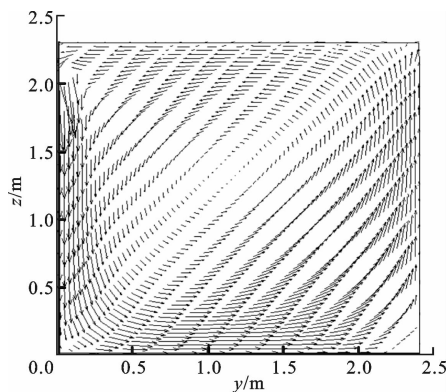
综上所述:在制冷工况下,送风角度对实验舱内部的流场分布影响较小;舱内流场分布均匀,与舱内的温度场分布一致。

4.2 采暖工况不同送风角度下实验舱内部的流场分布

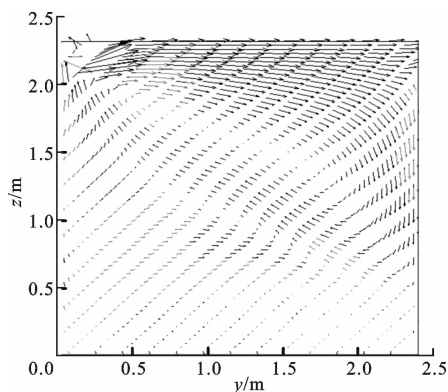
图 14a 为采暖工况 30°送风时实验舱内部的速

度矢量图。由图可知,气流从顶部送风口进入,迅速向下流动到达实验舱底部,然后在实验舱底部形成明显的“空气湖”,随后一部分气流流向回风口,一部分气流在实验舱内部循环流动,舱内气流整体分布均匀。

图14b为采暖工况水平送风时实验舱内部的速度矢量图。由图可知,气流从顶部送风口进入,在实验舱顶部形成明显的贴附射流,贴附射流中心的速度沿程逐渐减小,然而由于热浮力的影响,热空气难以下沉,从而导致实验舱底部出现明显的静风区域,即实验舱内部气流整体分布不均匀。



(a) 30°送风



(b) 水平送风

图14 采暖工况不同送风角度下实验舱中心剖面的速度矢量图

综上所述:在采暖工况下,送风角度对实验舱内部的流场分布影响较大;小角度送风有利于实验舱内部流场均匀分布。该模拟结果与实验舱内部的温度场分布一致。

5 结论

为了保护遗址文物,确定遗址文物适宜的空气环境参数,本文结合遗址博物馆中遗址文物所处区域的特殊环境,成功地研制了适合遗址文物的封闭

式多场耦合实验舱本体及空气温度调控系统。该多场耦合实验舱既包括上部的空气环境,又包括底部的土壤环境;采用对下部遗址文物影响最小的低风速上送下回的送风方式,以满足遗址文物的坑道陈列模式。在舱内的换气次数固定的情况下,通过调整送风角度研究了实验舱内部温度场和流场的分布情况,最终得到了优化方案;通过实验及数值模拟的方法,研究了送风角度对实验舱内部温度场及流场的影响。实验及数值模拟结果均表明,对于本文所设计的多场耦合实验舱而言,小角度送风有利于实验舱内部温度场及流场的均匀分布,同时可以降低系统能耗。本文的研究结果可应用于汉阳陵或兵马俑这类坑式陈列,将有益于遗址文物的长久安全保存,并且可以为送风式舱体结构的温度场分布研究提供参考。

参考文献:

- [1] 徐方圆, 吴来明, 解玉林. 武汉博物馆文物保存环境研究[J]. 文物保护与考古科学, 2007, 19(1): 8-17.
XU Fangyuan, WU Laiming, XIE Yulin. Investigations on the conservation environment of Wuhan Museum[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2007, 19(1): 8-17.
- [2] THOMSON G. The museum environment [M]. London, UK: Elsevier, 2013: 25-87.
- [3] 陈元生, 谢玉林. 影响文物保存的环境因素[J]. 文物保护与考古科学, 1998, 10(2): 37-43.
CHEN Yuansheng, XIE Yulin. The conservation and environmental effect[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 1998, 10(2): 37-43.
- [4] BRIMBLECOMBE P, BLADES N, CAMUFFO D, et al. The indoor environment of a modern museum building, the Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, UK[J]. Indoor Air, 1999, 9(3): 146-164.
- [5] 陈元生, 解玉林. 博物馆文物保存环境质量标准研究[J]. 文物保护与考古科学, 2002, 14(S1): 152-191.
CHEN Yuansheng, XIE Yulin. Studies on museum environmental standards[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2002, 14(S1): 152-191.
- [6] 王廷夷, 邹声华, 李孔清. 房间内空调器合理送风角度的研究[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(1): 69-71.
WANG Tingyi, ZOU Shenghua, LI Kongqing. Research of right supply-air angles of interior air-conditioner[J]. Building Energy & Environment, 2009, 28(1): 69-71.
- [7] ZHAO R, XIA Y, LI J. New conditioning strategy for

- improving the thermal environment [C]// Proceedings of International Symposium on Building and Urban Environmental Engineering [S.l.]: ISBUEE, 1997: 17-21.
- [8] 端木琳, 李伟涛, 王宗山. 风机盘管送风角度对室内热环境的影响 [J]. 建筑热能通风空调, 2005, 24(5): 8-11.
- DUANMU Lin, LI Weitao, WANG Zongshan. Simulation and research of fan-coil unit inlet angles' influence on indoor thermal environment [J]. Building Energy & Environment, 2005, 24(5): 8-11.
- [9] 银桂华, 彭小勇, 左振海, 等. 柜式空调器室内机送风角度对室内热舒适性影响的数值分析 [J]. 制冷与空调, 2009, 23(2): 114-118.
- YIN Guihua, PENG Xiaoyong, ZUO Zhenhai, et al. Numerical simulation to the effect of indoor thermal comfort on air supply angle of indoor unit of cabinet form air-conditioner [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2009, 23(2): 114-118.
- [10] AYAD S S. Computational study of natural ventilation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 82(1): 49-68.
- [11] 胡万玲, 管勇. 空调送风角对冬季办公室气流组织影响的数值研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(3): 151-154.
- HU Wanling, GUAN Yong. Numerical simulation of air field with different angles of wall mounted type air-conditioned office in winter [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2009, 28(3): 151-154.
- [12] 曹西金, 高霞, 温玉杰, 等. 夏季空调送风参数对室内温度场影响的分析 [J]. 建筑节能, 2009, 37(5): 34-37.
- CAO Xijin, GAO Xia, WEN Yujie, et al. Analysis of the impact of inletting parameter of the air-conditioning on indoor temperature field in summer [J]. Building Energy Efficiency, 2009, 37(5): 34-37.
- [13] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 347-350.

(编辑 葛赵青)

(上接第 88 页)

- samples in liquid; a comparative study with atomic force microscopy and scanning electron microscopy [J]. Micron, 2012, 43(12): 1390-1398.
- [8] HANSMA P, DRAKE B, MARTI O, et al. The scanning ion-conductance microscope [J]. Science, 1989, 243(4891): 641-643.
- [9] NOVAK P, LI C, SHEVCHUK A I, et al. Nanoscale live-cell imaging using hopping probe ion conductance microscopy [J]. Nature Methods, 2009, 6(4): 279-281.
- [10] SHEVCHUK A I, GORELIK J, HARDING S E, et al. Simultaneous measurement of Ca^{2+} and cellular dynamics; combined scanning ion conductance and optical microscopy to study contracting cardiac myocytes [J]. Biophysical Journal, 2001, 81(3): 1759-1764.
- [11] NOVAK P, SHEVCHUK A, RUENRAROENGSAK P, et al. Imaging single nanoparticle interactions with human lung cells using fast ion conductance microscopy [J]. Nano Letters, 2014, 14(3): 1202-1207.
- [12] YE X, DING Y, DUAN Y, et al. Room-temperature capillary-imprint lithography for making micro-nano-structures in large areas [J]. Journal of Vacuum Science & Technology; B, 2010, 28(1): 138-142.

[本刊相关文献链接]

- 余宝, 王昭, 黄军辉, 等. 机床滚转角高精度测量中的频偏现象研究. 2016, 50(3): 101-105. [doi:10.7652/xjtuxb201603016]
- 许聪, 李猛, 景敏卿, 等. 超声法测量圆柱滚子轴承润滑油膜厚度. 2015, 49(10): 61-66. [doi:10.7652/xjtuxb201510010]
- 丁正龙, 徐月同, 傅建中. 深孔内径的在线精密测量原理及系统. 2015, 49(1): 65-71. [doi:10.7652/xjtuxb201501011]
- 李朝辉, 王昭, 黄军辉, 等. 滚转角测量中直角棱镜相位损失及解决方法. 2014, 48(9): 112-116. [doi:10.7652/xjtuxb201409019]
- 彭希锋, 王玲, 杨文剑, 等. 自适应优化控制的人工髋关节磨损三坐标测量及评估方法. 2014, 48(8): 128-135. [doi:10.7652/xjtuxb201408022]
- 钟丽红, 王昭, 汤善治, 等. 机床滚转角测量中敏感元件倾斜引起的误差分析. 2013, 47(5): 99-103. [doi:10.7652/xjtuxb201305018]

(编辑 荆树蓉)