

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2019.02.03

通风干湿表检定过程的湿度场模拟及验证

黄泰秦, 徐标, 梁显有

(广东省计量科学研究院, 广东 广州 510405)

摘要: 受到温湿度标准箱的尺寸和结构限制, 通风干湿表在检定过程中会对湿度场产生较大影响。本文建立了等比例的三维稳态计算模型, 运用组分传输模型和 SIMPLE 算法对电动通风干湿表检定过程中的湿度场进行数值模拟, 分析湿度场分布特点, 并通过试验验证了模拟结果的科学性和准确性。

关键词: 通风干湿表; 湿度场; 有限元分析

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2019)02-0011-07

Simulation and Verification of Humidity Field in Verification of Ventilation Psychrometer

HUANG Taiqin, XU Biao, LIANG Xianyou

(Guangdong Institute of Metrology, Guangzhou 510405, China)

Abstract: Restricted by the size and structure of the temperature and humidity standard box, the ventilation psychrometer will have a greater impact on the humidity field in the verification process. A three-dimensional steady-state calculation model with equal proportion was established. The component transfer model and SIMPLE algorithm were used to simulate the humidity field in the verification process. The distribution characteristics of the humidity field were analyzed, and the scientificity and accuracy of the simulation results were verified by experiments.

Key words: ventilation psychrometer; humidity field; finite element analysis

0 引言

电动通风干湿表具有高精度、高稳定性的特点, 而且结构简单, 易于维护, 成本低廉, 可作为二级标准湿度标准器, 用于普通温湿度计及温湿度表的检定和校准^[1]。JJG 993-2018《电动通风干湿表》检定规程对检定中使用的计量器具和配套设备提出了比较严格的要求。对二级标准的电动通风干湿表而言, 当使用一级标准精密露点仪作为标准器且采用温湿度标准箱作为配套设备进行检定时, 其使用的温湿度标准箱在有效区域内湿度均匀度应小于等于 0.3% RH^[2]。

湿度均匀度是温湿度标准箱的核心指标兼技术难点。生产厂家一般通过缩小工作区域尺寸、采用隔水式保温等方法, 使其满足技术指标要求。这些高成本的措施造成用于检定电动通风干湿表的温湿度标准箱成本高昂、测试腔小、可用型号少。由于电动通风干湿表的特征尺寸较大(通常为直径 100 mm、高 200 mm 的圆柱形), 且湿球加热到相应温度所需的水汽蒸发量较大, 因此易导致湿度场不稳定, 进而影响检定准确性。本文采用 3D 有限元软件, 对电动通风干湿表检定过程中温湿度标准箱的湿度场状态开展数值模拟, 并进行试验验证。

1 物理模型

以基于双压原理的温湿度标准箱和典型的数字式电动通风干湿表作为研究对象。采用一级标准精密露点仪作为标准器, 使用温湿度标准箱作为配套设备, 建立电动通风干湿表检定过程中的湿度场模型。其中温湿度标准箱如图 1 所示, 其工作内腔的尺寸(长×宽×高)为 350 mm × 350 mm × 350 mm。工作时, 由一个垂直面的进气口提供 20 L/min 且恒定温度的标准湿空气, 在工作腔自然流动后, 经底面排气孔排放到外部环境, 形成一个半开放的流场。

电动通风干湿表如图 2 所示, 由温度计、通风管、上水杯和防辐射护管等部分组成, 其最上方是半球型的通风帽, 均匀分布 6 个通风孔, 下半部分是一个尺寸为 $\Phi 46$ mm × 120 mm 的圆柱。两个温度计防辐射护管的直径为 12 mm。电动通风干湿表的工作原理是: 在恒定的通风速度下, 湿空气流经干、湿球温度计表面, 由于湿球温度计套有湿纱布, 其表面的水分汽化带走蒸发潜热, 使湿球温度计失去热量而温度下降, 降低后的温度值为湿球温度计工作状态下的湿球温度。干、湿球温度计分别测出干、湿温度后, 利用干湿表方程计算出相对湿度值。

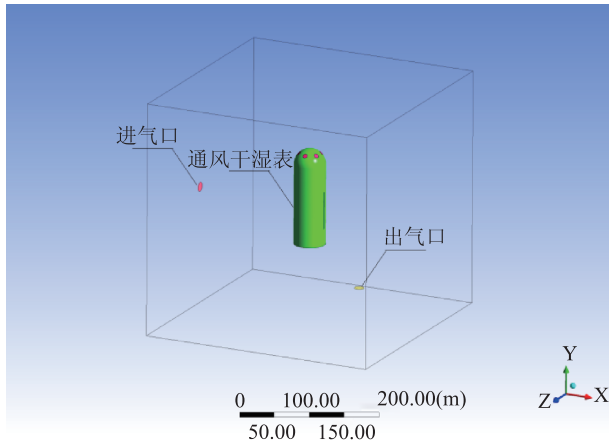


图1 温湿度标准箱模型

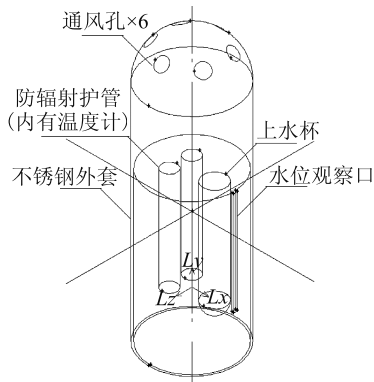


图2 电动通风干湿表模型

使用 Gambit 软件进行建模, 并对温湿度标准箱和电动通风干湿表模型进行非结构化网格划分, 选择 Tet/Hybrid 网格类型和 TGrid 网格生成方法, 建立体网格。网格最大单元体积为 $2.195 \times 10^{-7} \text{ m}^3$, 最小单元体积为 $4.417 \times 10^{-12} \text{ m}^3$, 共有 1809658 个单元。

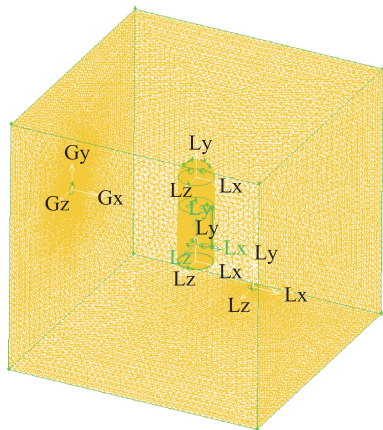


图3 温湿度标准箱与干湿表网格模型

2 数学模型

为了计算电动通风干湿表在检定过程中湿度场的

分布情况, 对检定过程做了部分简化, 并在建立数学模型时做出如下假设^[3]: ①温湿度标准箱和干湿表在工作状态下达到稳定, 箱内具有恒定的湿度场; ②箱内气体为牛顿流体, 在流动过程中不可压缩, 满足 Boussinesq 假设, 忽略流体中的粘性耗散; ③计算时忽略温度场对于湿度分布的影响, 认为所涉及计算区域的温度场是均匀的; ④计算区域内所涉及水分, 不存在凝结和二次蒸发的情况; ⑤由于计算区域内的气体流速较小 ($\leq 4 \text{ m/s}$), 所以认为气体流动为层流流动; ⑥忽略计算区域与环境的换热换质; ⑦忽略干湿表内风扇作为热源的影响。

采用 $k-\varepsilon$ 模型、组分输运模型和 SIMPLE 算法对检定过程的流场进行模拟。采用有限体积法的控制方程, 即质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程进行计算。由于温湿度标准箱出口气体的相对湿度和电动通风干湿表出口气体的相对湿度差异很大, 因此检定过程涉及持续的水分传递。在涉及组分传递过程中, 每一组分均满足组分质量守恒方程, 其中的检定过程没有涉及化学反应, 只涉及水的扩散过程。

计算中使用的守恒型控制方程^[4]如式(1)到式(7)所示。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

x 动量方程

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

y 动量方程

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

z 动量方程

$$\frac{\partial (\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{v}) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho T \mathbf{v}) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + \frac{S_T}{c_p} \quad (5)$$

状态方程

$$\rho = f(p, T) \quad (6)$$

组分质量守恒方程(无化学反应)

$$\frac{\partial (\rho m_l)}{\partial t} + \text{div}(\rho m_l \mathbf{v}) = D_l \text{grad} m_l + S_l \quad (7)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; $\mathbf{v}$ 为速度, m/s ; u, v, w 分别为速度在 x, y, z 方向的分量, m/s ; S 为源项; p 为系统压力; T 为系统温度; D_l 为组分 l 的扩散系数; m_l 为组分 l 的质量分数。

$k-\varepsilon$ 模型中采用的公式及经验常数如下所示^[5-10]。

湍流能量运输方程

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_m + S_k \quad (8)$$

能量耗散运输方程

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (9)$$

涡黏性

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

本实验中的系数取值为 $c_\mu = 0.09$, $c_{1\varepsilon} = 1.45$, $c_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $Pr_t = 0.85$ 。

式中: k 为湍动能; ε 为湍流耗散率; ρ 为密度; G_k 为层流速度梯度而产生的湍流动能; G_b 为浮力产生的湍流动能; Y_m 为可压缩湍流中过度的扩散产生的波动; μ_t 为涡黏性; c_μ 为计算 μ_t 的常数; $c_{1\varepsilon}$, $c_{2\varepsilon}$ 为计算 ε 的常数; σ_k 为 k 方程的湍流普朗特数; σ_ε 为 ε 方程的湍流普朗特数; S_k , S_ε 为源项; Pr_t 为能量的湍流普朗特数。

3 边界条件

1) 入口边界条件

试验所用的温湿度标准箱由一个基于双压原理的湿度发生器提供干气源, 气体输入到隔水式控温的测试腔内以达到试验环境。箱体气源的入口为质量流量入口条件, 这一气源的流量为 20 L/min, 有

$$\frac{dM}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

式中: ρ 为空气密度, 1.293 g/L, 由体积流量换算成质量流量约为 0.000431 kg/s。 M 为通过查表得到的相关温度下, 该进口气体湿度对应的气态水的质量分数。

为了简化处理, 本文不模拟通风干湿表内部的水分蒸发过程, 把干湿表上方的通风孔抽象为一定水分含量的质量流量入口。两支温度计所在的通风总面积为 S_p , 通风速度为 v_p , 则有

$$\frac{dM}{dt} = \rho S_p \frac{dv_p}{dt} \quad (12)$$

式中: v_p 为通风干湿表的通风速度, 约为 2.73 m/s; S_p 为通风总面积, $2.2619 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, 计算得到的质量流量约为 0.0008 kg/s。

2) 出口边界条件

由于不处理通风干湿表的内部水分蒸发过程, 因此把两个温度计的通风入口定义为计算区域的质量出口流动的出口条件, 流量比例为 33%, 同时也把温度标准箱的出气口设置为质量出口流动的出口条件, 流量比例为 67%。

3) 壁面条件

本文主要考虑的是通风干湿表的加湿过程对湿度场的影响, 不考虑温度波动、箱内热源的影响, 因此把标准箱的 6 个壁面和通风干湿表的其他表面都作为等温壁面考虑, 整个系统处于热平衡的状态, 忽略热交换和热传导。

运用 FLUENT 稳态求解器进行运算, 同时添加重力影响, 设重力加速度为 9.81 m/s^2 , 测试温度设置为 293.16 K。通过实测, 当温湿度标准箱设置为 20 °C, 25 % RH, 且达到稳定时, 工作状态下电动通风干湿表通风口附近的相对湿度约为 31 % RH, 以此来设置水分的质量分数, 并将通风干湿表设置在温湿度标准箱的几何中心。

4 模拟结果及分析

通过 Fluent 迭代计算, 设置电动通风干湿表进气端正下方 10 mm 处为监测点 α , 耗时 3 h, 迭代次数 242 次后达到收敛条件。设温湿度标准箱进气口与干湿表连线所在的垂直截面为截面 A, 其相对湿度云图如图 4 所示。设温湿度标准箱垂直方向对称面为截面 B, 其相对湿度云图如图 5 所示。设温湿度标准箱垂直方向高度 225 mm 处为截面 C, 其相对湿度云图如图 6 所示。设温湿度标准箱垂直方向高度 105 mm 处为截面 D, 其相对湿度云图如图 7 所示。

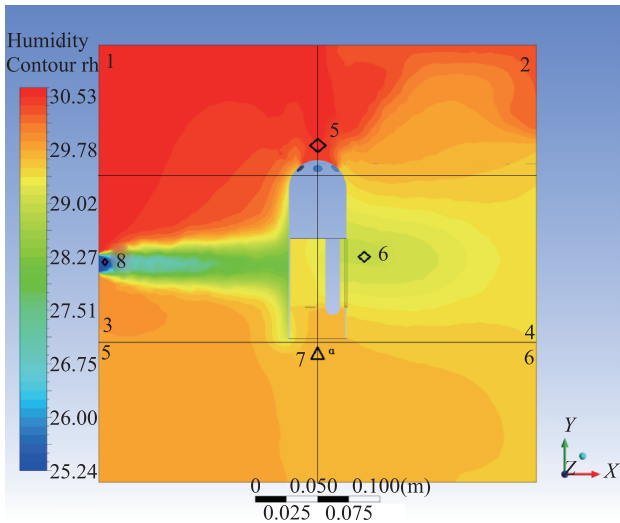


图 4 截面 A 的相对湿度云图

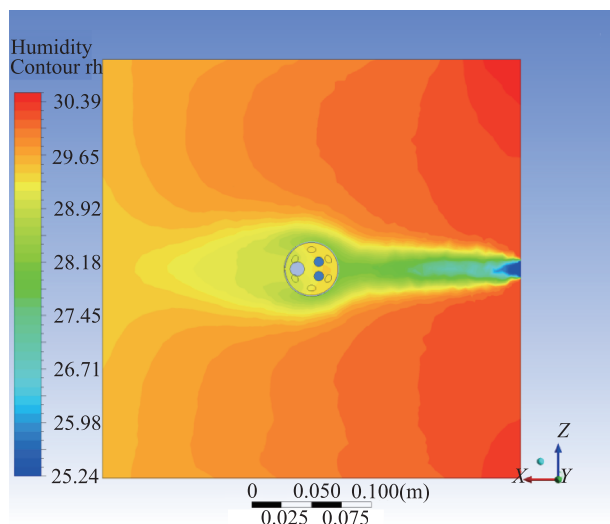


图5 截面B的相对湿度云图

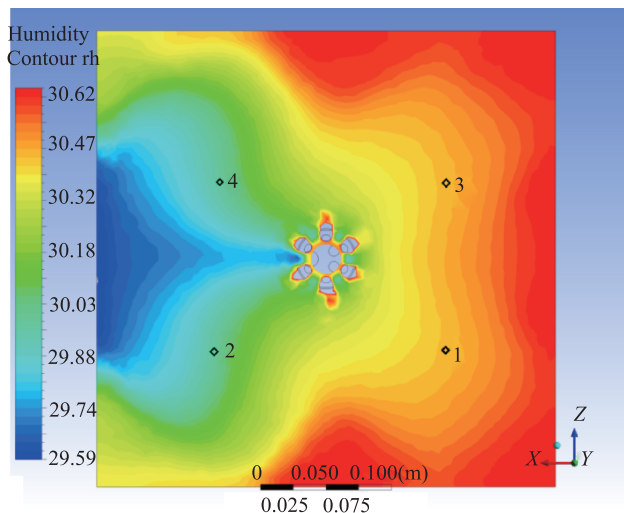


图6 截面C的相对湿度云图

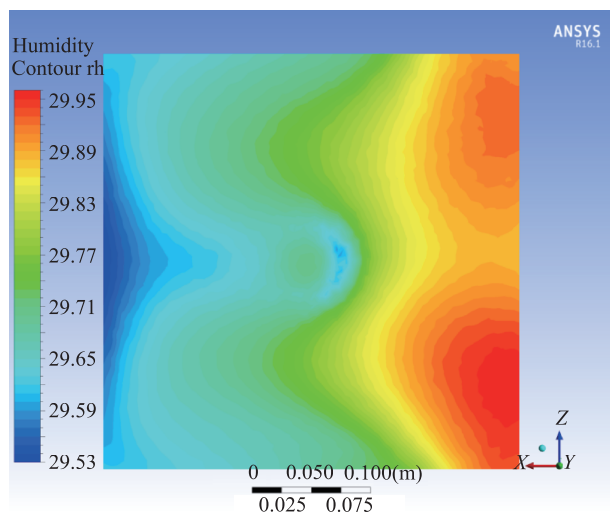


图7 截面D的相对湿度云图

4.1 检定过程中相对湿度分布分析

图4中,截面A可以分为6个区域。监测点 α 的相对湿度为29.71 % Rh。

其中,1区和2区是高湿区,如图8所示,主要由通风干湿表上通风口的湿气流控制,整个区域的相对湿度均匀度为1.62 % Rh,与干湿表进气口的湿度最大差异为0.9 % Rh。

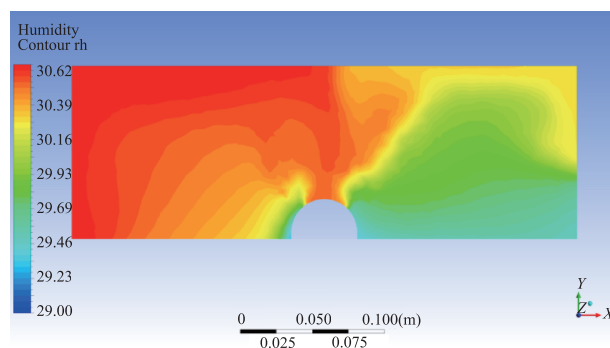


图8 截面A中1区与2区的相对湿度云图

3区如图9所示,主要由温湿度标准箱进气流控制,由于进气流的速度较快,约为2 m/s,产生可观的局域负压,因此这个区域由两个部分组成:一部分是由进气流造成的锥形快速喷流,另一部分是与1区湿气流快速混合层。3区的湿度梯度很大,最大达115 % Rh/m。

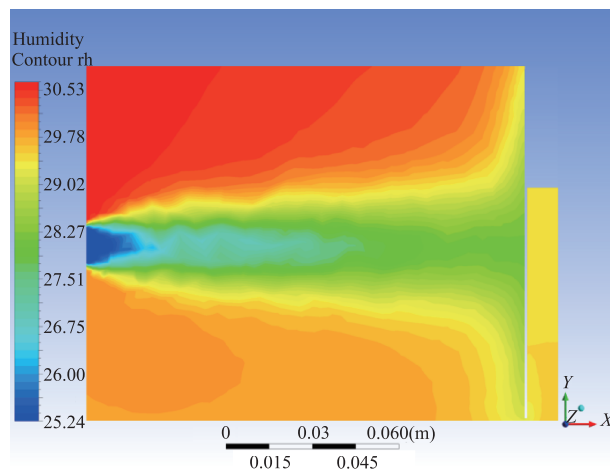


图9 截面A中3区的相对湿度云图

4区是由环流干气流和环流湿气流的混合区域,如图10所示,由于温湿度标准箱的进气流速度较快,经过通风干湿表后,仍是4区相对湿度的主导因素,与监测点 α 的最大湿度差为0.8 % RH。

5区的相对湿度比较均匀,但与监测点 α 的最大湿度差为0.8 % RH,如图11所示。

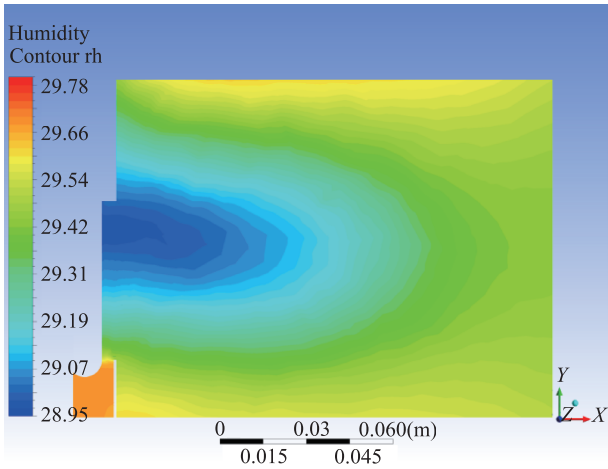


图 10 截面 A 中 4 区的相对湿度云图

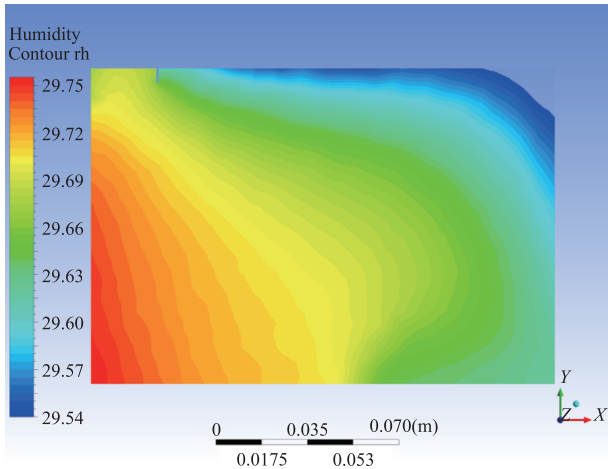


图 12 截面 A 中 6 区的相对湿度云图

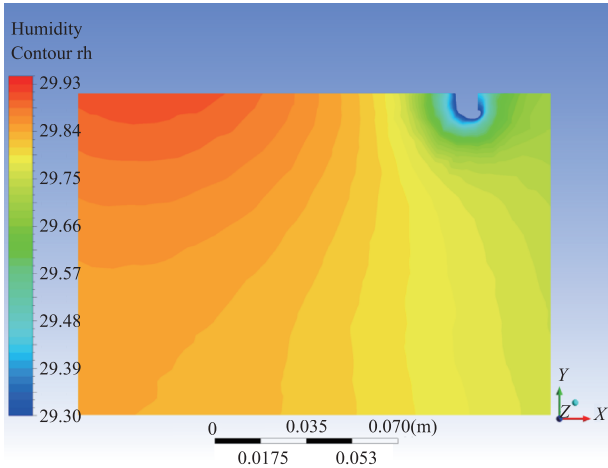


图 11 截面 A 中 5 区的相对湿度云图

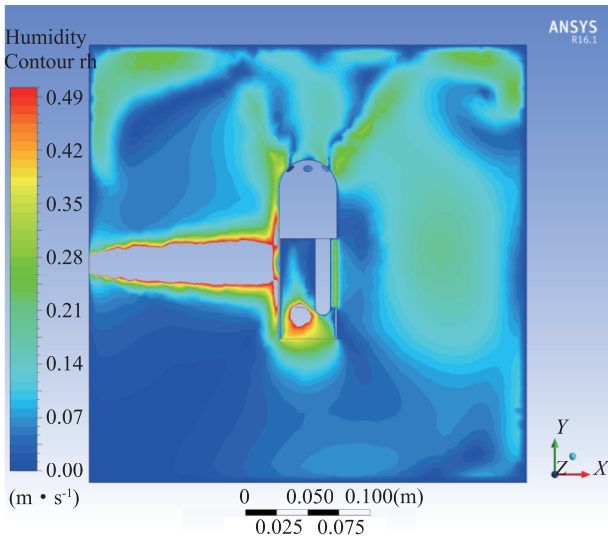


图 13 截面 A 的速度云图
(未显示高于 0.50 m/s 的速度分布)

6 区的相对湿度比较均匀，监测点 α 包含在这个区域内，区域内湿度均匀度仅为 0.21% RH，如图 12 所示。这个区域的形成有以下两个原因：①相对于其他区域，6 区距离温湿度标准箱和通风干湿表通风孔的位置最远，因此 6 区的混合过程最温和；②如图 13 所示，相对于其他区域，6 区的气流速度较小，却不是一个静态区，仍然由流体流速控制水分混合，能够达到一个相对稳定的状态，这与 5 区不同，5 区由于流速太小，扩散因素不可忽略，又因为处于喷口邻近低湿的区域，造成其湿度场不够均匀。

4.2 箱内湿度 60%Rh 附近时的相对湿度分布的分析

如图 14 ~ 17 所示，60 % Rh 时通风干湿表对箱内湿度场的影响很大，类似于 30 % Rh 时的情况。由于 60 % Rh 时湿球温度计上的蒸发量较小，干湿气的相对湿度差异约为 2 % Rh，比 30 % Rh 时要小得多，因此箱内的湿度均匀性要比 30% Rh 时好。但是湿度均匀度较小的区域仍然还在 6 区，并没有明显的改善。

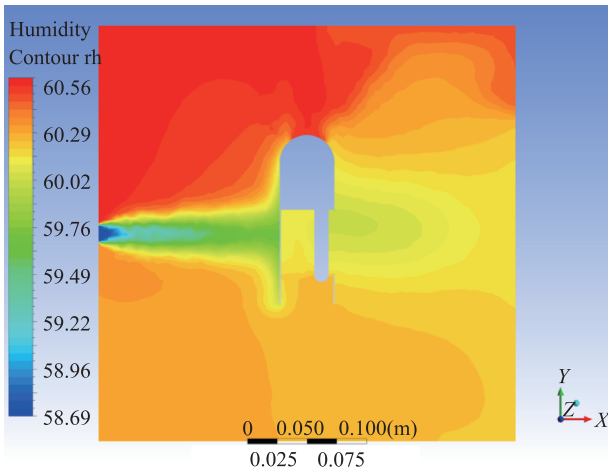


图 14 截面 A 的相对湿度云图

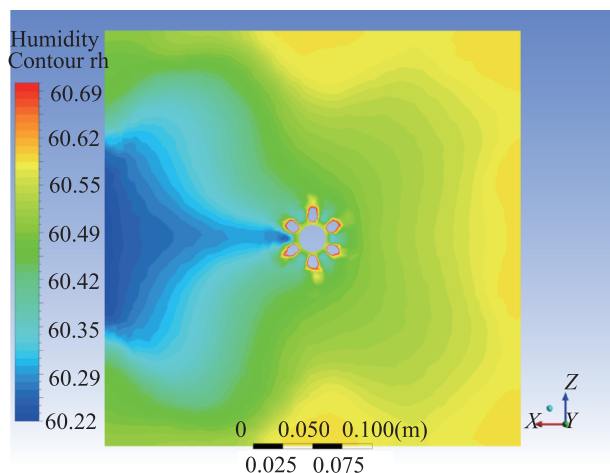


图 15 截面 B 的相对湿度云图

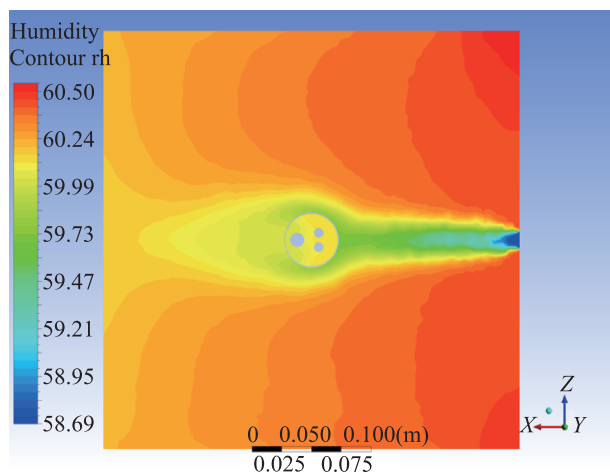


图 16 截面 C 的相对湿度云图

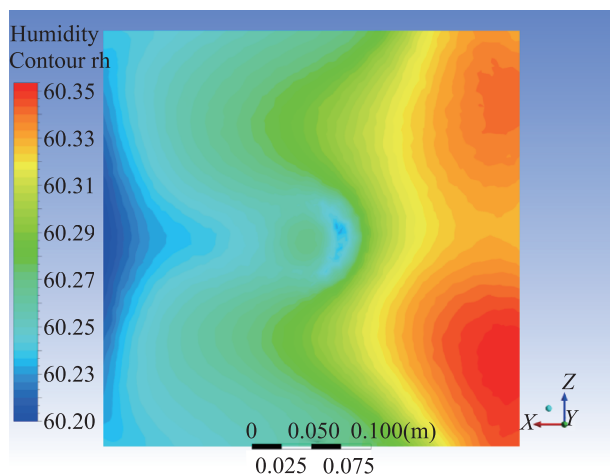


图 17 截面 D 的相对湿度云图

5 试验验证

为了验证该模型的模拟结果,进行了电动通风干

湿表检定试验,使用一级标准精密露点仪作为标准器,且采用温湿度标准箱作为配套设备,验证电动通风干湿表检定过程中湿度场的变化情况。在温湿度标准箱的各特征位置共布置了 8 个试验点,选用 HC2 湿度传感器作为测试仪器,特征点的设置如图 4 和图 6 所示,其中 C 面的高度为 255 mm。检定试验时,将电动通风干湿表置于温湿度标准箱的几何中心,上水管注满水,温湿度标准箱设定为 20 ℃,25 % Rh(或 59 % Rh),待预热完毕,温湿度标准箱的温度恒定后,打开通风干湿表电源,待通风干湿表的干球温度和湿球温度恒定后,打开试验点的湿度传感器电源,再稳定 2 h,开始记录湿度传感器的测量值,对湿度数据进行分析,并与模拟结果比对,如图 18 和图 19 所示。

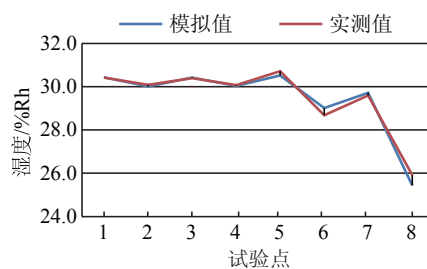


图 18 30% Rh 时试验与模拟结果的比较

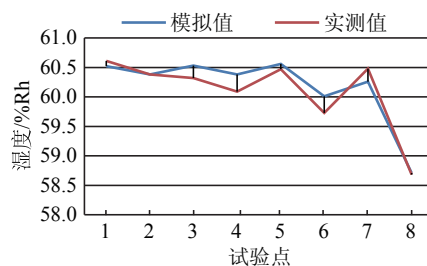


图 19 60% Rh 时试验与模拟结果的比较

根据试验结果与模拟结果的比对图可以看出,各测试位置试验值与模拟值基本吻合,模拟结果基本可以反映出箱内的湿度分布规律。试验值和模拟值的最大差异为 0.48 % Rh(30 % Rh 时)和 0.29 % Rh(60 % Rh 时),考虑到一般湿度传感器的测试准确度和模型简化的影响,则在误差允许的范围内该模型的数值模拟具有一定的科学性和参考价值。

6 结论

对电动通风干湿表检定过程进行数值模拟和试验验证,分析得到干湿表对标准箱内的湿度场的影响情况。对于本文所涉及的温湿度标准箱和电动通风干湿

表而言,可以得出以下结论:

1)当温湿度标准箱的测试腔尺寸与电动通风干湿表的尺寸相近、由垂直面作为标准湿气进口时,由于干湿表的加湿过程产生大量湿气,会产生一个较大的干湿气混合区域,受腔尺寸的限制,该区域无法充分扩展,造成箱体的湿度场不均匀。

2)在该温湿度标准箱的下风向和电动通风干湿表的进风口附近,可以找到一个湿度最大差异约0.21 % Rh的区域。经分析,这一区域之所以有相对较好的均匀性,一方面是因为此区域远离干湿混合区,相邻区域的湿度差比较小,另一方面是因为这一区域具有一个较小却不为零的流体速度,使区域内的水分能够充分交换。

3)数值模拟可以为电动通风干湿表检定提供一个参考。由于检定通风干湿表时,可能会严重破坏测试腔内均匀度,所以需要根据测试腔的大小、发生标准湿气的流量等因素谨慎选择合适的温湿度标准箱。

4)计算电动通风干湿表检定的湿度部分的不确定度时,不应该只考虑温湿度标准箱在空载状态下的均匀性,而应该考虑其在检定状态下的均匀性,因为不同于其他测量仪器,电动通风干湿表的加湿过程可能会对测量系统带来很大扰动。

参 考 文 献

- [1] 张文东.《机械式温湿度计检定规程》修订说明[J]. 计测技术, 2006, 26(B09): 84-85.
- [2] 葛纪全.温湿度表校准方法研究[J]. 计量与测试技术, 2015(9): 20-21.

- [3] 王以忠,胡春园,陈绍慧,等.冷藏车内温度场和湿度场的数值模拟研究[J]. 保鲜与加工, 2010, 58(10): 26-29.
- [4] 唐家鹏. ANSYS FLUENT 16.0 超级学习手册[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [5] 刘鹤年. 流体力学[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [6] 姚爱国,杨清玲. JBB1 型数字式标准干湿表不确定度的评定[J]. 青海气象, 2007(s1): 67-67.
- [7] 魏新华. 湿度自动调节系统[J]. 黑龙江气象, 1999(2): 38-39.
- [8] 刘丽红. 温湿度表检定中的一些问题[J]. 中国设备工程, 2017(12): 188-189.
- [9] 赵伟. 固定干湿表测定湿度的误差分析[J]. 丹东师专学报, 1995(1): 39-41.
- [10] 杨玉顺,王滨,尚希禹,等. 干湿表测量氢冷发电机氢气湿度的研究[J]. 工程热物理学报, 1998, V19(2): 154-157.

收稿日期: 2019-02-26

基金项目: 广东省市场监管局科技项目资助计划(2019ZJ01)

作 者 简 介

黄泰泰(1987-),男,2010年毕业于浙江大学材料科学与工程学系,获工学学士学位;现任职于广东省计量科学研究院,主要从事热工计量、湿度和水分计量等研究。



宁夏获批筹建国家煤化工产业计量测试中心

近日,宁夏首家国家级产业计量测试中心获批依托宁夏计量质量检验检测研究院筹建“国家煤化工产业计量测试中心”,这是我国煤化工产业首家国家计量测试中心。

宁东能源化工基地依据宁夏丰富的煤炭资源,自2003年开发建设以来,形成了煤炭、电力、煤化工三大主导产业的集群化发展。2008年9月,宁夏宁东能源化工基地被确定为“国家级重点开发区”,区域内已形成完整的煤化工产业链。2016年,原自治区质监局结合宁夏产业结构和经济特点,向自治区政府请示,申请筹建“国家煤化工产业计量测试中心”。经过近两年的实地调研,对产业链的详细梳理,及有关专家的多次讨论,2019年4月4日,国家市场监督管理总局致函自治区人民政府同意依托宁夏计量质量检验检测研究院筹建“国家煤化工产业计量测试中心”。

“筹建国家煤化工产业计量测试中心主要是为了促进煤化工产业计量测试技术发展。中心的建立能为煤化工产业提供全产业链、全溯源链、全寿命周期的现代计量服务。同时,中心将联合国内外的煤化工企业、科研院所等单位,打造以煤化工产业为基础的学术交流培训信息平台,为我国煤化工产业的转型升级和创新发展提供坚实的计量支撑服务。”该院负责人说。

(摘自 计量测控)