

Analysis of Uncertainty of Temperature Field in Laboratory of Enthalpy Difference

Weifeng Tian, Zhengtao Li, Kun Lu, Pan Han, Zhiming Yang

School of Energy and Power, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email:weifeng_tian@126.com

Received: Aug. 6th, 2020; accepted: Aug. 20th, 2020; published: Aug. 27th, 2020

Abstract

The uncertainty of the temperature field is an important factor that affects the measurement results of the enthalpy difference laboratory. The enthalpy difference laboratory built in this paper collects the air supply parameters of the tested machine. The air supply form of the tested machine is side air. A mathematical model is established to calculate the uncertainty of temperature field. To evaluate the uncertainty of the calculation results, finally, the reliability of the collected data and measurement method is verified through simulation, so as to improve the scientificity and accuracy of the enthalpy difference laboratory temperature measurement.

Keywords

Uncertainty, Machine under Test, Side Wind, Simulation

焓差实验室温度场的不确定度分析

田炜丰, 李征涛, 路 坤, 韩 盼, 杨志明

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海
Email:weifeng_tian@126.com

收稿日期: 2020年8月6日; 录用日期: 2020年8月20日; 发布日期: 2020年8月27日

摘 要

温度场不确定度是影响焓差实验室测量结果的重要因素, 本文依托搭建的焓差实验室采集被测机的送风参数, 被测机的送风形式为侧出风, 建立数学模型计算温度场的不确定度, 对计算结果进行不确定度评定, 最后通过仿真模拟验证采集数据和测量方法的可靠性, 以此提高焓差实验室温度测量的科学性和准确性。

关键词

不确定度, 被测机, 侧出风, 模拟

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

焓差实验室是依据空气焓差法[1]来检测空调各种性能参数的重要设备。空调温度的波动、均匀性、垂直温差[2]是影响人体热舒适度的重要因素,因此在焓差实验室对被测机的出风参数进行收集,这些测量参数结果的准确性直接影响到对被测机测量结果的评定,在被测机测试的过程中,不可避免的会受系统设备、操作方法、测量对象等因素的影响,所得的实验结果存在误差,测得的这些数据呈一定的概率分散在某个区域中,最终使得计算得出的温度场均匀度具有不确定性,温度场的不确定度是指因为误差的存在,对被测量值的不能肯定,不确定度越小测量结果的准确度就越高[3]。

Pistikopoulos [4]对不确定性参数进行分类,温度场的不确定度属于过程不确定性;路坤[5]针对汽车空调焓差实验室温度场均匀性的问题,提出在送风结构中增加绕流件的方法,改善实验室温度场均匀性;杜文辉[6]对实验室气流组织进行 CFD (Computational Fluid Dynamics)建模分析,评定了温度场均匀性及波动度等指标;闫坦坦[7]将 BIM (Building Information Modeling)技术与 CFD 技术进行结合,对气流组织的分布状况进行数值模拟分析;马建军等[8]采用 CFD 方法对环境实验室温度均匀性进行数值分析,得出在相同温差下减少送风口的数量,并提高单个送风口的速度可以提高温度均匀性的结果。本文依托搭建的焓差实验室,收集不同工况下的温度场参数,通过仿真模拟被测机的出风参数,比较试验结果与模拟结果存在的误差,验证实验测量设备和实验方法的准确性,为以后的被测机的测试提供依据。

2. 实验数据数据采集测试设备和实验准备

2.1. 实验采集设备

焓差实验室的温度采集设备主要由铜—康铜 T 型热电偶、千野铠装铂电阻、横河的 MX100 数据采集器等设备组成。T 型热电偶性价比较高、测量范围广,被均匀布置在测试区域中;千野铠装铂电阻测量精度高、具有良好的气密性和绝缘性,用来作为温度参考点的温度值;铂电阻和热电偶采集的数据通过数据采集器传输到工作电脑中。本次实验分别对制冷和制热两种工况的测试数据进行了采集,测试点的高度在实验室距离地面 1 m 和 1.5 m 的两个水平面,测点根据被测机的出风情况均匀布置。等到测试区域的环境工况和测试设备的工作状态达到实验室标准要求后,每隔 10 分钟采集一次实验数据,共采集 8 组。

2.2. 被测机分别在制冷工况下和制热工况下的测试数据

被测机空调的出风形式为侧出风,我们选取具有代表性的测点收集到的数据进行分析,图 1 和图 2 是被测机在制冷工况下,1 m 平面和 1.5 m 平面内对应测点的收集到的温度测试数据;图 3 和图 4 是被测机在制热工况下 1 m 平面和 1.5 平面对应测点收集到的温度测试数据。

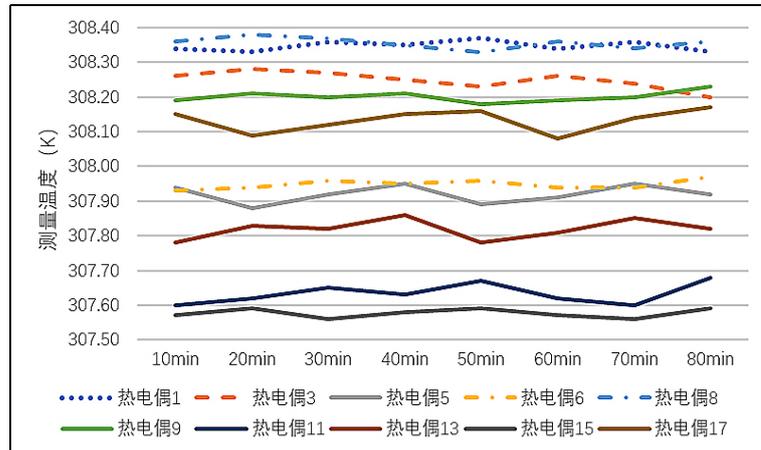


Figure 1. 1 m plane temperature measurement value at T = 35°C
 图 1. 1 m 平面温度测量值 T = 35°C

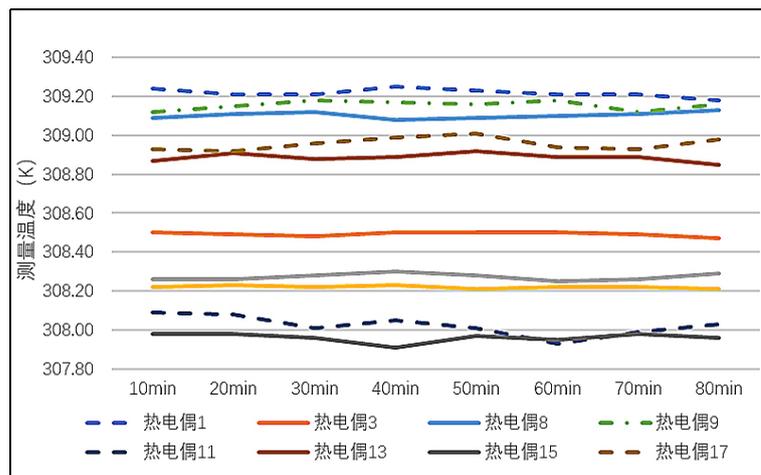


Figure 2. 1.5 m plane temperature measurement value at T = 35°C
 图 2. 1.5 m 平面温度测量值 T = 35°C

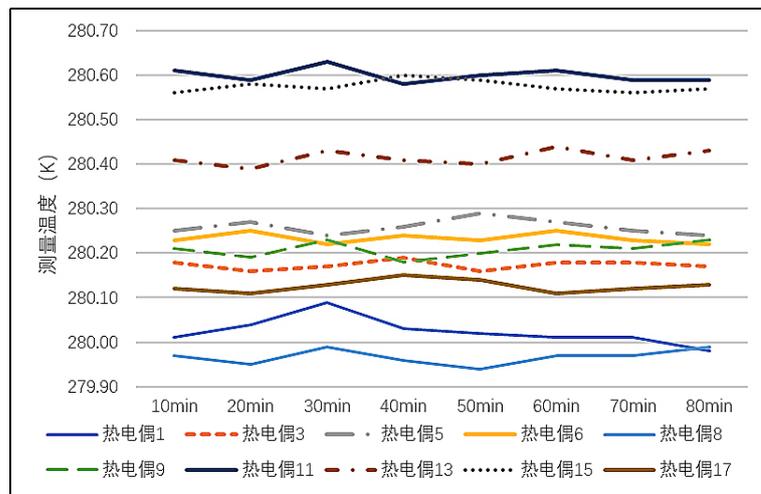


Figure 3. 1 m plane temperature measurement value at T = 7°C
 图 3. 1 m 平面温度测量值 T = 7°C

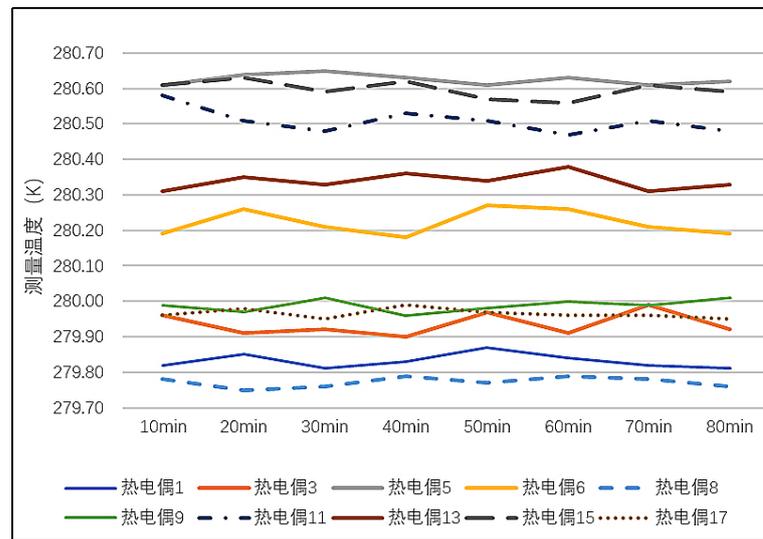


Figure 4. 1.5 m plane temperature measurement value at $T = 7^{\circ}\text{C}$
 图 4. 1.5 m 平面温度测量值 $T = 7^{\circ}\text{C}$

通过对采集的数据进行分析, 制热工况较制冷工况下采集到的数据更加集中, 在同一时间内采集到的最高温度与最低温度的差值, 制冷工况要高于制热工况。在同一工况下 1 m 平面温度测量值分布要比 1.5 m 平面温度测量值分布均匀, 1.5 m 平面温度更加接近被测机的出风温度; 随着时间的变化, 各点温度随时间变化幅度较小, 同一测试点温度随时间的变化在 $\pm 0.1\text{ K}$ 范围内, 可以认为在对应工况条件下, 实验室内部测试环境相对稳定。

3. 被测机出风温度均匀性不确定度分析

建立适合的数学模型, 分析影响焓差实验室温度场不确定度的影响因素, 影响因素的来源主要有三个方面[9] [10] [11]: 首先是人工操作引起的误差, 主要包括被测机工装的差异, 风管安装的密封性, 温度测点的布置; 其次是仪器精度引起的误差, 包括热电偶、铂电阻和 PID 调节器的精度和响应时间, 喷嘴流量的风速、空气处理设备的调节能力等等; 最后是最基本数据测量引起的误差, 温度测量的准确性影响到最终结果的评定。

不确定度的评定方法可以分为 A 类不确定度和 B 类不确定度[12], A 类不确定度的评定方法是使用统计分析的方法对一系列采集数据进行评定, 采用实验标准差来表征评定结果[13]; B 类标准不确定度是基于经验和资料, 对被测量的概率分布进行估计, 采用相应方法的估计标准差来表征。实验室数据采集完成后, 建立适合的数学模型, 对焓差实验室的两种工况分别进行不确定度计算。

3.1. 不确定度求解数学方程[14] [15]

$$\Delta T = T_{i\max} - T_{i\min} \quad (1)$$

$$\Delta T = \overline{\Delta T} = \sum_{i=1}^n (T_{i\max} - T_{i\min}) / n \quad (2)$$

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中:

ΔT ——温度均匀度，取 n 次测量后平均值作为最后结果；

$T_{i\max}$ ——第 i 次测得数据的最大值；

$T_{i\min}$ ——第 i 次测得数据的最小值；

S ——实验标准偏差；

n ——试验次数。

由测量实验重复性引入的不确定度为

$$u_1(\Delta t) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

由测量标准的修正引入的不确定度为

$$u_2(\Delta t) = \sqrt{u^2(T_{i\max}) + u^2(T_{i\min})} = \sqrt{2}u(t) \quad (5)$$

$$u(t) = \frac{U_0}{k} \quad (6)$$

式中：

U_0 ——测量设备的扩展不确定度；

k ——为测量设备包含因子。

合成标准不确定度

$$u_0(\Delta t) = \sqrt{u_1^2(\Delta t) + u_2^2(\Delta t)} \quad (7)$$

取 $k_1 = 2$ ，扩展不确定度为

$$U = k_1 u_c(\Delta t) \quad (8)$$

3.2. 不确定度评定

通过上述公式计算，在制冷工况下环境控制温度为 35℃时，实验室均匀度不确定度为±0.14 K，即实验室温度场均匀度真值以 95%的概率在 1.525~1.805 K 之间；在制热工况下，环境控制温度为 7℃时，求得实验室均匀度不确定度为±0.164 K，即实验室温度场均匀度真值以 95%的概率在 0.806~1.134 K 之间。由图 5 和图 6 可以看出，本次实验所测量的均匀度均在计算的不确定度范围内，所测得数据具有较高的可信度。

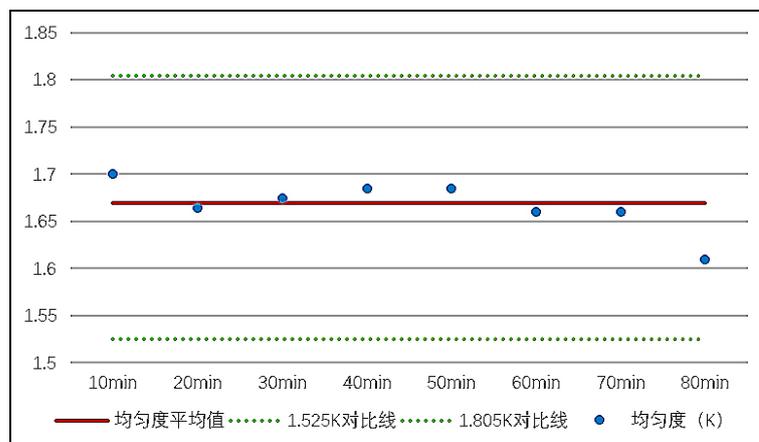


Figure 5. Comparison diagram of air outlet uniformity under cooling conditions
图 5. 制冷工况出风均匀度对比图

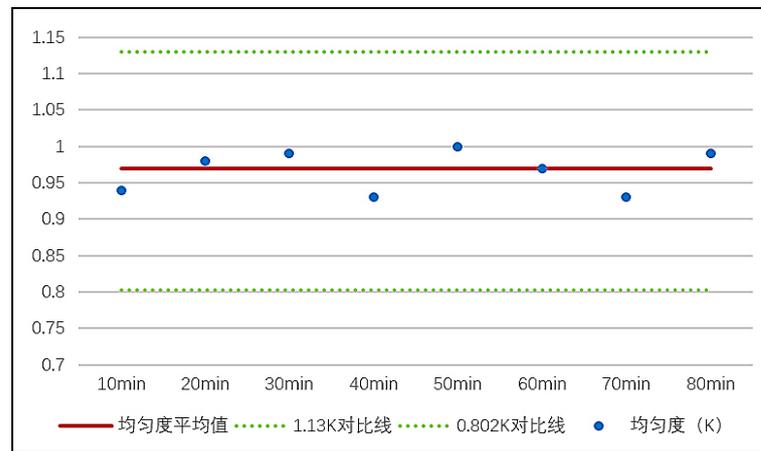


Figure 6. Comparison diagram of air outlet uniformity under heating conditions
图 6. 制热工况出风均匀度对比图

4. 被测机温度场数值模拟

焓差实验室一般由室内侧和室外侧两部分组成, 被测机的送风侧是室内侧, 本文主要研究室内侧房间温度的变化过程, 根据室内侧房间结构建立数学模型并且进行一系列简化。1) 被测机释放出的冷量和热量是室内侧负荷变化的主要部分, 所以忽略其它设备的散热; 2) 假设实验室内空气不可压缩、稳态、定常流动; 3) 不考虑实验室外部的传热。使用 Fluent 软件对实验室室内侧温度场进行模拟, 验证实验室采集温度数据的准确性。Fluent 软件是目前应用最为广泛的 CFD 软件, 它具有丰富的物理模型, 软件可用在流体、热传递、声学等方面的模拟, 本课题选用 RNG k- ϵ 作为湍流模型进行后续分析, 该模型准确性和精度更高, 计算能力更强。

4.1. 制冷工况下送风模拟分析

图 7 和图 8 是制冷工况下($T = 35^{\circ}\text{C}$)焓差实验室被测机侧出风的模拟计算结果云图, 分别对 1 m、1.5 m 两个平面上的温度场进行模拟分析。

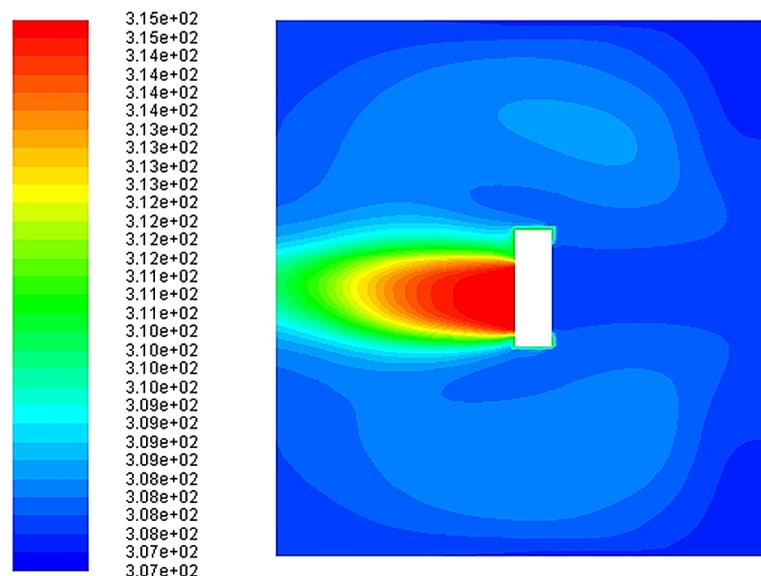


Figure 7. 1 m plane isotherm cloud map
图 7. 1 m 平面等温线云图

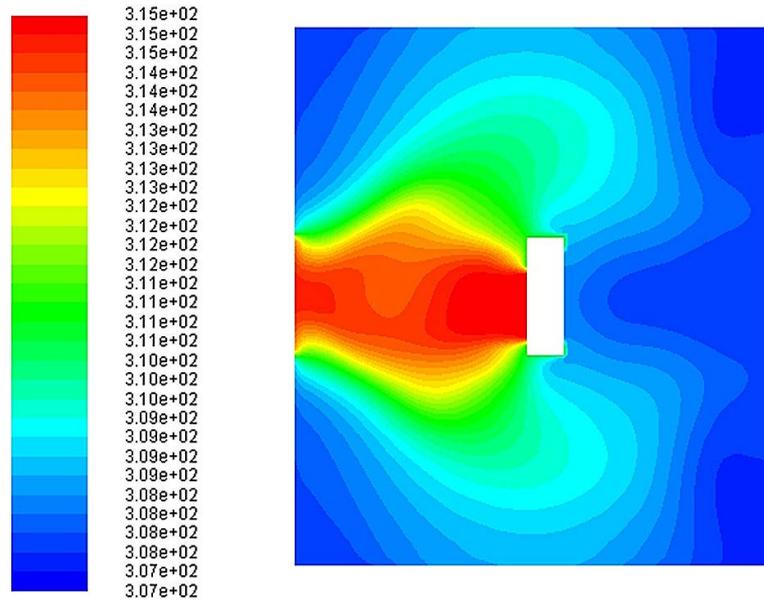


Figure 8. 1.5 m plane isotherm cloud map
图 8. 1.5 m 平面等温线云图

对 1 m、1.5 m 两个平面内温度场的分布进行分析，通过观察我们可以发现，整体上 1 m 平面温度分布要比 1.5 m 平面温度分布更加均匀，1 m 平面温度梯度变化较小，由于受到被测机排出气体的影响，在被测机出风口处温度变化非常明显，最高温度可以达到 314 K，对实验室温度场均匀性有很大影响，被测机进风口处温度分布比较均匀。1 m、1.5 m 两个平面内温度最小值均出现在靠近墙壁的位置，温度最小值为 307.5 K，在被测机主要试验区域温度分布比较均匀，在此区域，1 m 平面内最高为 308.4 K，最低温度为 307.6 K，1.5 平面最高温度为 310.7 K，最低温度为 307.6 K，虽然实验室整体温度波动较大，但是在被测机进风口处温度波动控制在 ± 0.5 K 以内。

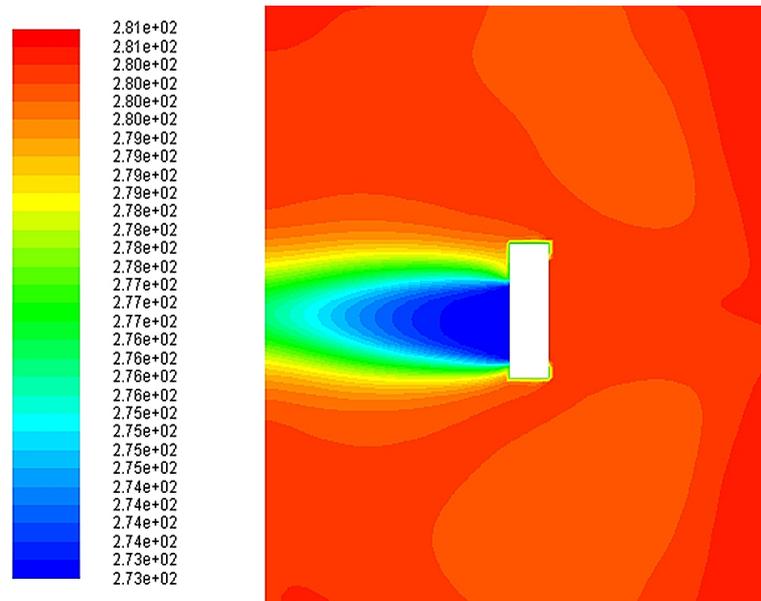


Figure 9. 1 m plane isotherm cloud map
图 9. 1 m 平面等温线云图

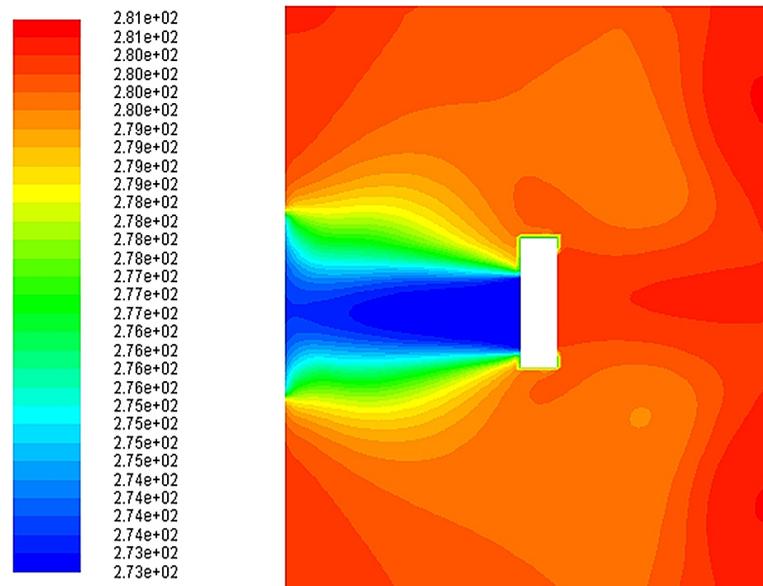


Figure 10. 1.5 m plane isotherm cloud map
图 10. 1.5 m 平面等温线云

4.2. 制热工况下送风模拟分析

图 9 和图 10 是制热工况下($T = 7^{\circ}\text{C}$)焓差实验室侧出风被测机的模拟计算结果云图, 分别对 1 m、1.5 m 两个平面上的温度场进行模拟分析。

制热工况与制冷工况温度分布情况有很多相似之处, 1 m、1.5 m 两个平面位于被测机出风口处温度变化比较明显, 在被测机进风口处温度梯度则比较平缓; 1 m 平面温度分布比 1.5 m 平面更加均匀, 主测试区域内 1 m 平面温度基本没有变化; 1.5 m 平面内温度变化梯度虽然比较明显, 但其温度均匀性仍然要优于制冷工况。对实验室内主要试验区域内温度进行分析, 在被测机进风口处, 1 m 平面最高温度为 280.4 K, 最低温度为 280.1 K; 1.5 m 平面最高温度为 280.7 K, 最低温度为 279.8 K。被测机进风口处温度在 ± 0.5 K 范围内波动, 符合实验标准。

5. 结语

通过实验收集被测机侧的出风参数, 对结果进行不确定度分析, 求得制热工况下实验室均匀度不确定度为 ± 0.14 K, 制冷工况下实验室均匀度不确定度为 ± 0.164 K, 符合 GB/T7725-2004 规定焓差实验室测量值的不确定度小于 ± 0.2 K, 表征被测量的真值所处的量程范围符合规定, 测得的数据可信度较高, 满足测量要求。

通过仿真模拟得到的数据与实验室内相同测点的数据进行对比, 1 m、1.5 m 平面实际测量值与模拟计算值差值控制在 0.05~0.25 K, 被测机进风温度控制在 ± 0.5 K 以内, 由于实际实验测量存在误差, 因此认为应用的物理模型和计算方法可以应用于实验室温度场不确定性的优化研究, 并且得到的计算结果与实际情况相似。

通过进行不确定度分析, 我们不仅可以利用不确定度的大小衡量数据的真实性, 同时可以根据不确定度的影响性, 来验证焓差实验室测量的合理性, 对以后实验室的升级和改进有很大帮助。

参考文献

- [1] 张铁雁, 姜俊明, 陈建民, 等. GB/T7725-2004 房间空气调节器[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

-
- [2] 赵朝义, 呼慧敏, 付裕, 等. GB/T33658-2017 室内人体热舒适环境要求和评价方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [3] 臧慕文. 分析测试不确定度的评定与表示(I) [J]. 分析试验室, 2005, 24(11): 74-79.
- [4] Pistikopoulos, E.N. (1995) Uncertainty in Process Design and Operations. *Computers & Chemical Engineering*, **19**, 553-563. [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(95\)87094-6](https://doi.org/10.1016/0098-1354(95)87094-6)
- [5] 路坤, 李征涛, 张婷, 等. 汽车空调焓差实验室温度场均匀性改善分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2020, 58(6): 116-120.
- [6] 杜文辉. 大型气候环境实验室温度场评定方法研究[J]. 科技与创新, 2020(8): 73-74.
- [7] 闫坦坦. 基于 BIM 技术的空调房间 CFD 气流组织模拟分析[J]. 洁净与空调技术, 2020(2): 107-111.
- [8] 马建军, 孙侠生, 李喜明. 环境实验室温度均匀性的数值分析研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(1): 48-53.
- [9] 张凯, 张小松, 陈向阳, 等. 空调器空气焓差法性能测试不确定度分析[J]. 流体机械, 2006, 11(34): 72-75.
- [10] 王泽慧, 赵新明, 陈洁. 关于校准实验室恒温场的讨论[J]. 中国计量, 2019(1): 121-122.
- [11] 杨淑玲, 李征涛, 赵鹏瑞. 汽车空调换热器性能试验台的研制及实验分析[J]. 能源工程, 2017(2): 76-83.
- [12] 郁夏夏, 路阳, 张维加, 等. 空气焓差法测量制冷量不确定度的理论与实践分析[J]. 制冷技术, 2013, 4(33): 15-18.
- [13] 朱建荣. Valprobe 无线温度验证系统的测量结果不确定度研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [14] 康志茹, 耿荣勤, 魏晓克, 等. JJF1101-2003 环境试验设备温度、湿度校准规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [15] 叶德培, 赵峰, 施昌彦, 等. JJF1059.1-2012 测量不确定度的评定与表示[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.