

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.04

高稳定性大型空气温度校准试验箱的研究

徐含青¹, 徐华太²

(1. 苏州市计量测试院, 江苏 苏州 215128; 2. 济南长峰国正科技发展有限公司, 山东 济南 250031)

摘要: 为满足温度采集仪的校准需求, 研制了高稳定性大型空气温度校准试验箱。阐述了该试验箱的箱体结构、工作原理。以箱体内传热过程的理论模型为基础, 结合 Fluent 软件进行了数值模拟, 分析了试验箱体内温度场以及空气流速场的分布及变化。通过试验证明该试验箱控温精度高、温度波动度小、温场均匀性好, 可推广应用。

关键词: 试验箱; 校准; 温度波动度; 温度均匀度; 控制方程; 数值模拟

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)06-0015-05

Investigation on High Stability Large-scale Air Temperature Calibration Test Box

XU Hanqing¹, XU Huatai²

(1. Suzhou Institute of Metrology, Suzhou 215128, China;

2. Jinan Changfeng Guozheng technology development Co. Ltd, Jinan 250031, China)

Abstract: In order to meet the calibration requirements of the temperature acquisition instrument, a high stable and large air temperature calibration test chamber was developed. The architecture and working principle of the test box are expounded. Based on the theoretical model of heat transfer process in the chamber, numerical simulation was carried out with Fluent software. The distribution and variation of temperature field and air velocity field in the chamber were analyzed. The test proves that the test box has high temperature control precision, small temperature fluctuation and good uniformity of temperature field, and can be popularized and applied.

Key words: test box; calibration; temperature fluctuation; temperature uniformity; regulation equation; numerical simulation.

0 引言

目前, 数字式温度计、冷链记录仪等环境温度采集仪器广泛应用于计量、医疗、物流、食品、药品、环保等各个行业。温度采集仪通常由测温传感器和显示仪表组成(分体式、一体式), 用于监测周围环境空气温度, 测量范围一般为 $-30 \sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]。

现有的温度试验箱或温湿度检定箱控温精度、温度波动度和均匀度等指标不满足温度采集仪的校准要求, 因此, 采用恒温槽作为温度源, 将传感器放入其中, 以二等标铂作为标准器, 实现温度采集仪的校准 [2]。此方法有一定的局限性, 仅适用于校准测温传感器与显示仪表分离的测温仪, 而一体式测温仪无法放入恒温槽中进行校准。

再加上, 温度采集仪器的送检量与日俱增, 为满足社会日益增长的校准需求, 弥补原有方法不足之处, 本文研制了高稳定性大型空气温度校准试验箱。此试验箱温度精度、波动度和均匀度等指标均满足国家校

准规范要求, 配合精密露点仪, 可以方便、快速的完成工作环境温度采集仪的校准。

1 研究思路

由于空气的导热性能比液体差, 要实现在 600 L 工作区空间内温度波动度 $\leq \pm 0.03\text{ }^{\circ}\text{C}/30\text{ min}$ 、温度均匀度 $\leq 0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$, 需要解决空气热循环慢、热扰动大等问题, 相比常规空气温度试验箱, 在箱体结构、精确控温和热传递等方面都需要进一步优化。

1.1 箱体结构

从加强箱体保温、提高热交换效率和提升工作区空气循环性能等方面着手, 从结构和原理上优化箱体设计。在箱体下部设计密闭恒温槽, 采用无机硅油作为循环介质, 通过加热器和制冷压缩机控制介质温度; 在工作区四壁安装盘管加热器, 盘管与恒温槽通过管道连接, 介质在恒温槽和盘管中循环流动, 通过盘管换热来调节工作区空气温度; 工作区箱体内装有变频风机, 工作区四壁设置空气导流风道, 以促进盘

管热交换,并加速空气循环流动。箱体结构如图 1 所示。

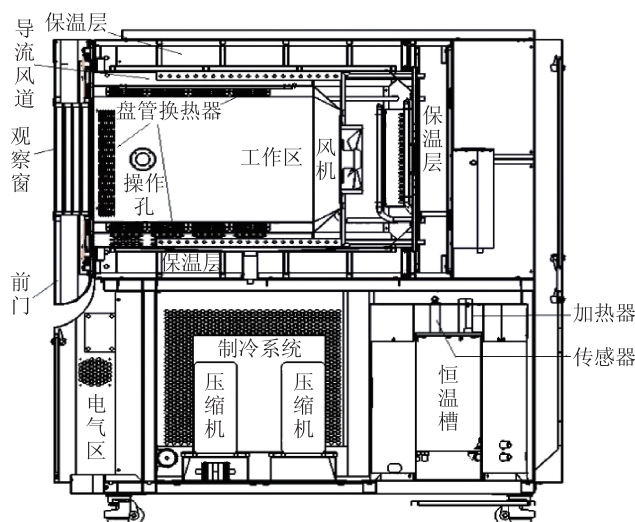


图 1 箱体结构设计示意图

1)为减少工作区与外界的热交换,箱体外壳加厚,工作区四周均包覆 150 mm 的厚硬质聚氨酯保温材料,箱门与工作区连接部分采用隔热板制成,可有效降低工作区箱体及箱门的热量损失,保证工作区温度恒定。

2)为提高热交换效率、降低热扰动,箱体内设计密闭恒温槽,采用无机硅油作为介质,通过加热器和制冷压缩机调节槽内介质温度,在工作区上下左右四面安装盘管换热器,盘管与恒温槽通过管道密闭连接,通过变频循环泵控制介质循环速度,通过盘管换热来调节工作区空气温度。

3)因试验箱工作区体积大,控温范围宽(−30 ~ 70 ℃),为保证降温速度、降低温度波动,制冷系统采用独创的两级复叠式制冷压缩机和辅助压缩机结合的方式,通过 PLC 自动控制压缩机工作,降温时开启全部压缩机,实现快速降温;恒温时关闭辅助压缩机,降低温度波动,提高制冷效率。

4)为提高工作区空气循环,在工作区后部安装变频风机,工作区上下左右四面与后部均设置空气导流风道,空气通过导流风道可直接经过盘管换热器。这种设计促进了空气循环流动,提高了换热效率,提升了工作区温度均匀性^[3]。

5)为保证测量准确性,将准确度为 ±0.01 ℃ 的精密铂电阻分别安装在恒温槽和工作区内,用于测量液体温度和工作区空气温度。并通过软件算法优化控温,提高控温可靠性,降低温度波动度。

1.2 精确控温

为提高控温精度,控制部分采用工业触屏和 PLC 结合方式,并通过精密铂电阻测温,控制部分结构如图 2 所示。

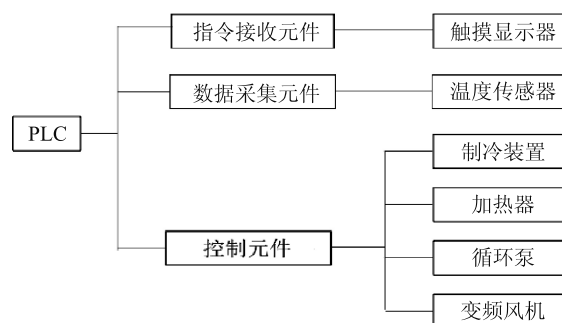


图 2 控制系统设计示意图

工业触屏内嵌 Win CE 操作系统,采用 VC++ 设计人机交互程序,实现温度设定、参数设置功能,并显示设备运行参数和温度曲线。触屏软件将用户操作命令发送给 PLC,由 PLC 控制压缩机、加热器、循环泵、变频风机等设备工作,再通过精密铂电阻采集循环介质温度和工作区温度,采用模糊 PID 控制方式,形成完整的控制、反馈系统,实现对试验箱工作区温度的准确控制。

1.3 热模拟分析

对箱体内热交换和空气温场建立数学模型并进行分析,通过热模拟研究提供理论依据,指导设计方案,优化设计参数。

1) 数学模型

为方便数学模型建立和计算,可认为加热过程为三维非稳态传热,忽略空气在箱体内部的辐射换热,忽略物性随温度的变化,在连续性的前提下^[4],三维流动时传热所符合的动量方程为

$$u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

蛇形盘管所符合的热量传递方程为

$$k_d \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (2)$$

空气流动时所符合的能量方程为

$$u_x \frac{\partial t}{\partial x} + u_y \frac{\partial t}{\partial y} + u_z \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

箱体内的换热过程,所符合的 k 方程和 ε 方程分别如式(4)和式(5)所示。

$$\begin{cases} u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(C_k \frac{k^2}{\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + p - \varepsilon \\ p = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \\ C_k = 1 \end{cases} \quad (4)$$
$$\begin{cases} u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(C_\varepsilon \frac{k^2}{\varepsilon} + \nu \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} p - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ C_\varepsilon = 0.09, C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92 \end{cases} \quad (5)$$

式中： u_x, u_y, u_z 为空气在 x, y, z 方向上的分速度，m/s； u_i 为 x, y, z 上的分速度($i = 1, 2, 3$)； p 为压强，Pa； ρ 为密度，kg/m³； t 为温度，℃； α 为对流传热系数，W/(m²·℃)； ν 为动力粘度，m²/s； k_d 为导热系数 W/(m²·K)； ε 为耗散率； k 为湍动能，J。

2) 热模拟研究

以液体介质流经蛇形盘管加热工作区内空气为例，进行热模拟研究。整个计算区域采用非结构网格划分，网格采用四面体与六面体混合形式。在形状规则的箱体内部采用 Submap 的六面体网格，在盘管与空气流道内采用 Tet/Hybrid 的四面体网格。由于蛇形盘管与空气流动区域的尺度相差较大，为了在有限的网格数内更准确的计算整个空气温度校准试验箱内加热与降温情况，在蛇形盘管中采用局部加密。由于蛇形盘管管壁受内部液体介质与外部空气共同的影响，为使模拟结果更接近实际情况，采用流固耦合算法^[5]。空气以对流的方式与盘管进行换热，故对流参数可按照相关文献取值^[6]。输入参数为液体介质进口速度、进口温度、外界温度及对流换热系数，输出参数为以整个箱体内空间的最高、平均与最低温度。设置求解器为 PISO 算法^[7]，并设定为二阶迎风差分格式。

整个模拟过程为：系统升温时，对恒温槽内循环介质进行加热，介质通入盘管中，使工作区的空气受热升温，当工作区达到设定温度时，恒温槽停止加热进入恒温控制阶段，介质仍在盘管中继续循环流动。此时，通过控制介质温度，使工作区温度逐渐达到稳定，将温度波动限制在很小的范围内。

当达到设定温度时，箱体内空气的温度场和速度场分别如图 3 和图 4 所示。

从图 3 和图 4 可以看出，达到设定温度后停止加热介质，工作区空气流动的平均速度在 0.3 ~ 0.4 m/s 之间。在升温过程中，箱体内原有的低温空气在风机的抽吸作用下被输送到背面风道，先同背面的盘管进行对流换热，再经过上下两侧的风道，与其内部的盘

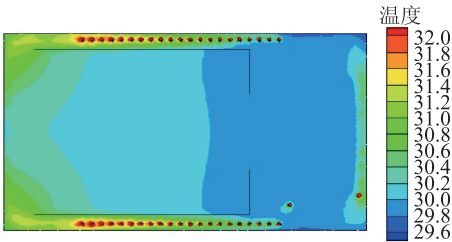


图 3 达到设定温度时箱体内空气的温度场

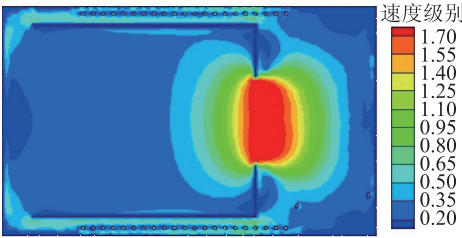


图 4 达到设定温度时箱体内空气的速度场

管进一步换热。由于背面的盘管与空气的换热温差较大，而与上下两侧的温差较小，故背面盘管相对于其它盘管温度较低。被加热的空气通过试验箱左侧的通道流入内部，故整个箱体内温度梯度沿水平方向分布，且从左到右温度逐渐降低。

在刚达到设定的温度时，箱体内部存在较大的温度梯度，在此时进行温度传感器的校准会出现较大的误差。在达到设定温度后，关闭风机以避免热量损失，进入恒温控制阶段，并利用箱体内部的自然对流来减小工作区的温度梯度。温度稳定 30 min 后，箱体内空气的温度场和速度场分别如图 5 和图 6 所示。

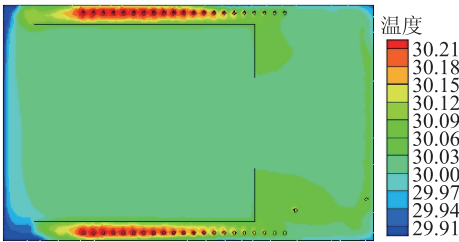


图 5 温度稳定 30 min 后箱体内空气的温度场

由图 5 和图 6 可以看出，试验箱工作区的温度分布已经十分均匀，整体温度维持在 30℃ 左右，相对于加热结束时未出现较大的衰减，高温区域主要出现在流道附近，温度梯度主要出现在风道与内部空间的接触界面上。上述结果证明试验箱在稳定 30 min 后的过程中温度分布逐渐均匀、温度梯度减小，同时保温效果良好、温度未有大幅的衰减。由于恒温阶段关闭了

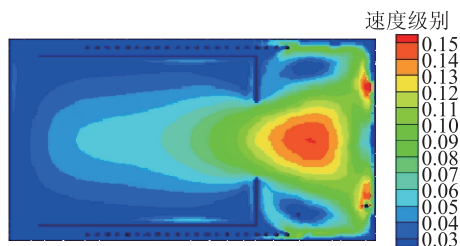


图6 温度稳定 30 min 后箱体内空气的速度场

风机，故整个试验箱内部主要以浮升力驱动的自然对流为主，与加热过程中的速度分布有较大差别。在恒温阶段，箱体内部空气区域的平均速度较低，除了在靠近风机处受到后侧风道内部空气自然对流的影响速度较大外，平均速度在 0.03 m/s 以下。

图 7 为试验箱在达到设定温度后 30 min 内，最高、平均与最低温度变化情况。从图中可以得到，升温结束时，试验箱内温度最高值与最低值相差较大，平均温度为 30.02 ℃。但随着恒温时间的增加，短时间内最高温度快速下降，最低温度逐渐提升，温度逐渐接近，原因是试验箱内的自然对流使冷热空气相互混合，在短时间内使空气温度分布逐渐均匀。在 30 min 时，试验箱内最高、平均、最低温度分别为 30.02，29.99，29.98 ℃。

根据热模拟试验，30 min 时工作区温度波动度为 ± 0.03 ℃，温度均匀度为 0.04 ℃。证明本文设计的空气温度试验箱的温场波动度和温场均匀性均优于传统的温度试验箱，符合高精度温度采集仪的校准要求。

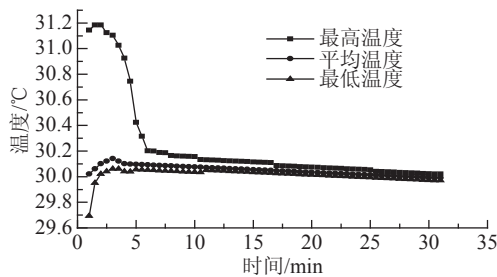


图7 恒温过程中试验箱体内空气温度变化

2 测试与验证

采用测量不确定度 $U = 0.01$ ℃ ($k = 2$) 的高精度智能并行温度巡检仪，依据 JJF 1564-2016《温湿度标准箱校准规范》要求，在箱体工作区范围内按 9 点分布测温，对温场的温度波动度和温度均匀性进行测试。

1) 温度波动度

在 -30，0，70 ℃ 设定点，经过一系列实验得到得

到 30 min 波动度数据，如表 1 所示。

表 1 温度波动度实验数据

序号	设定温度/℃	波动度/℃
1	-30.00	± 0.03
2	0.00	± 0.02
3	70.00	± 0.02

2) 温度均匀性

在 -30，0，70 ℃ 设定点，经过一系列实验得到 30 min 的均匀度数据，如表 2 所示。

表 2 温度均匀度实验数据

序号	设定温度/℃	均匀度/℃
1	-30.00	0.04
2	0.00	0.03
3	70.00	0.03

通过以上测试数据可以看出，试验箱在 -30 ~ 70 ℃ 温度区间内，工作区温场温度波动度小于 ± 0.03 ℃/30 min，均匀度小于 0.05 ℃，证明试验箱技术指标符合设计要求。

3 结论

研制高稳定性大型空气温度校准试验箱，以满足温度采集仪的校准需求。经实验证明，其温度波动度和温场均匀性均优于传统的温度试验箱，且操作简便，符合高精度温度采集仪的校准要求，值得推广应用。

在接下来的工作中，将进一步深入开展理论研究，拓展大型空气温度校准试验箱的控温区范围，集中对 -80 ~ 150 ℃ 温区进行科研攻关，并结合湿度参数，整体提升温湿度场设备性能，进一步解决高精度温湿度传感器、高精度温湿度变送器、高精度温湿度记录器、WBGT 热指数仪等各类仪器的长期校准难题。在设备实际应用方面，未来将继续深入研究恒温介质的温变反应，提升升降温速率，并进一步完善此类设备的校准规范，为温湿度专业计量能力提升做出更好的示范及探索。

参 考 文 献

[1] 郝军智，王兴东．环境试验箱温度偏差测量结果不确定度评定[J]．计量与测试技术，2008，35(9)：58-59.
[2] 张继培．温度计量技术进展近况[J]．上海：上海计量测试，2002，29(1)：4-9.

- [3] 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(1): 48-53.
- [4] 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[J]. 热能动力工程, 2005(5): 468-468.
- [5] 陈锋, 王春江, 周岱. 流固耦合理论与算法评述[J]. 空间结构, 2012, 18(4): 55-63.
- [6] 刘京, 张文武, 邵建涛. 建筑外表面对流换热系数的 CFD 模拟[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2009, 37(8): 94-98.
- [7] 王彤, 谷传纲, 杨波, 等. 非定常流动计算的 PISO 算法[J]. 水动力学研究与进展, 2003, 18(2): 233-239.

收稿日期: 2018-06-19; 修回日期: 2018-07-23

基金项目: 江苏省质量技术监督局 2016 年度科技计划项目 (KJ168370)

作者简介

徐含青(1985-), 九三学社社员, 中国计量测试学会温度专业委员会委员, 中国湿度与水分专业委员会委员, 江苏省热工专业技术委员会委员, 苏州市计量测试院主任, 主要从事温湿度计量研究与管理研究。



掌握量子科技, 为下一场航空技术变革做好准备

量子技术, 是近几年科技领域的大热门, 已广泛应用于生产生活的各个领域, 并正在引发深刻的乃至颠覆性的变革。11 月 30 日, 航空工业党组书记、董事长谭瑞松到航空工业计量所就量子技术对航空产业发展的作用和影响进行专题调研, 参观了冷原子干涉重力测量、超快量子计量实验室, 观看了计量所宣传片, 听取了计量测试前沿技术研究及量子测量技术发展情况的汇报, 并与相关科研人员进行了座谈交流。



谭董事长发表讲话

谭瑞松指出, 计量是所有学科特别是基础学科中的代表性学科, 计量所要不断致力于基础性前沿技术的跟踪和掌握, 同时瞄准产业化, 创新技术研发模式, 促进科技成果转化, 立足于航空工业应用, 服务于军工行业发展, 并强调量子技术需要高水平的研究平台和长期持续地投入, 要将量子技术研究应用纳入集团公司发展战略, 明确发展路线, 凸显量子技术对航空产业发展的地位、作用和影响, 通过创新基金等多种渠道加强对基础研究的重点支持, 集中资源和力量解决基础研究为产业发展所用的问题, 在航空工业工程应用领域发挥更大作用。航空工业不断致力于基础性前沿技术的跟踪和掌握。当下, 量子技术对航空产业发展的地位、作用和影响日渐凸显, 航空工业通过创新基金等多种渠道加强对高水平研究平台的重点建设和量子技术的持续性支持。计量是所有学科特别是基础学科中的代表性学科, 而“量子计量”正是量子技术中重要的应用之一。

在量子计量技术的支撑下, 新一代量子测量仪器具备着天生带有最高精度与自行校准的两方面革命性功能。如今, 新一代量子测量设备已无需计量标准来保障其准确度, 天生就具有最高的测量准确度, 可以直接为工程应用提供最高水平的测量服务。另一方面在于, 量子测量设备是以常数来定义测量, 可以通过自身的测量方法来完成“自行校准”, 保证测量设备的长期可靠使用, 无需每年定期校准或检定即可长期稳定使用。

在量子计量领域, 航空工业计量所已经掌握了原子的激光冷却与俘获、原子喷泉、物质波的干涉操控、原子能态及相关量子信息的探测提取等关键技术。在可预见的未来发展中, 重力加速度量子计量技术对国防科技水平和航空装备性能的提升发挥重要作用。航空工业计量所利用掌握的量子测量核心技术, 将测量能力向磁场等各类关键参数拓展, 基于量子的测量技术将大大提高重力场、磁场的测量精度, 对大地测量、重力基准图绘制、飞行器定位、大型工事侦察等均有重要意义。

随着高精度的量子测量设备、传感设备的成熟应用, 将会给航空装备带来深刻的技术变革。例如, 多参数集成的新型惯性导航量子传感设备将大幅提升航空装备自主导航精度; 高精度的航磁梯度量子测量设备, 将会是专门针对潜艇的反潜手段; 长期可靠、高精度的嵌入式量子芯片等传感测量设备, 可综合监测飞机的健康指标参数, 为飞机的维护使用与增寿提供重要技术支撑。高精度的量子测量技术将使航空装备有明亮的眼睛以自主定位导航, 有灵敏的鼻子以侦察潜藏的敌情, 有敏感的神经系统以快速感知身体的异常, 保障航空装备出色完成各项任务。



专家调研现场