

气候环境实验室的温度校准及不确定度评定

杜文辉, 李冬梅, 吴敬涛

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 解决气候环境实验室超大空间温度性能的校准问题。**方法** 通过对实验室结构及气流组织进行分析, 确定实验室有效空间内温度不均匀性及波动度概率较大位置, 设计实验室温度校准方案。通过数据采集系统, 对实验室温度数据进行采集, 并对温度校准的不确定来源进行分析, 评定气候环境实验室温度性能及扩展不确定度。**结果** 以低温工况 -50°C 及高温工况 50°C 数据分析为例, 气候环境实验室在低温 -50°C 时, 室内温度平均值处于 $-48.67\sim-50.27^{\circ}\text{C}$ 范围内的可信度是95%; 在 50°C 时, 室内温度平均值处于 $48.57\sim 50.77^{\circ}\text{C}$ 范围内的可信度是95%。**结论** 气候环境实验室温度性能校准方法可实现对超大空间实验室温度性能的校准, 并验证了气候环境实验室温度的均匀性及波动度等技术指标满足其设计要求。

关键词: 气候环境实验室; 温度校准; 温度均匀性; 不确定度

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.012

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0077-05

Temperature Calibration and Uncertainty Assessment Based on Climatic Environmental Test Facility

DU Wen-hui, LI Dong-mei, WU Jing-tao

(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the calibration problem of the super space temperature performance of Climatic Environmental Test Facility (CETF). By analyzing the structure of CETF and the organization of the airflow, the location of the temperature unevenness and the probability of volatility in the effective space of the laboratory were determined, and the temperature calibration point layout plan for the laboratory was designed. Data on temperature in CETF was acquired through the data acquisition system. The uncertain sources of temperature calibration were analyzed. The temperature performance and the expansive uncertainty were evaluated. Taking the data analysis of low temperature working condition -50°C and high temperature working condition 50°C as an example, the reliability of average indoor temperature in the range of $-48.67\sim-50.27^{\circ}\text{C}$ in the climate environment laboratory was 95% at low temperature -50°C ; and it was 95% at 50°C when the average indoor temperature was in the range of $48.57\sim 50.77^{\circ}\text{C}$. The calibration method of temperature performance of CETF can be used to calibrate the temperature performance of super space laboratory. It also verifies that the technical indexes such as temperature uniformity and fluctuation of CETF meet the design requirements.

KEY WORDS: climatic environmental test facility; temperature calibration; temperature uniformity; uncertainty

收稿日期: 2019-11-14; 修订日期: 2019-12-21

Received: 2019-11-14; Revised: 2019-12-21

作者简介: 杜文辉 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞机气候环境适应性。

Biography: DU Wen-hui (1985—), Male, Master, Engineer, Research focus: climate and environment adaptability of aircraft.

气候环境实验室为各类飞机及武器装备环境适应性研究^[1-2]提供模拟环境,实验室可模拟低温、高温、湿热、降雪、冻雨等多种自然环境工况^[3-4],其最基本的是温度场模拟,因此气候环境实验室温度性能校准至关重要。气候环境实验室相比一般环境箱尺寸较大,温度性能指标要求较高,如美国麦金利实验室(McKinley Climatic Laboratory)体积接近100 000 m³,韩国ADD实验室体积约为20 000 m³。目前国内针对环境箱(试验箱)的校准/检定规范有:JJF 1101—2003《环境试验设备温度、湿度校准规范》、JJF 1564—2016《温湿度环境试验箱校准规范》、HB 6783.3—1993《军用机载设备气候环境试验箱(室)检定方法温度试验箱(室)》。此类校准/检定方法中给出校准点与工作室容积大小的关系^[5-7]为:环境箱容积不大于2 m³时,温度校准点为9个;环境箱容积大于2 m³时,温度校准点为15个;当环境箱容积大于50 m³时,温度校准点的数量可以适当增加。气候环境实验室分为大、小室两部分,其中大室体积约为110 000 m³,远大于校准/检定规范中参考体积。显然此类校准/检定方法中校准点的设置对大空间的气候环境实验室温度性能校准并不适用,因此需要结合实验室的结构设计、气流组织分析,设计新的校准方法。

1 气候环境实验室气流组织分析

气候环境实验室采用顶部送风侧墙回风的气流组织形式,室内设计有5条送风管道,每条管道设计有6个送风口,共30个送风口,均匀布置在实验室的顶部。每条送风管道对应1个回风口,位于侧墙。实验室各风道结构设计完全相同,5条风道呈对称结构。将距实验室墙壁2 m、地面1 m、由顶部送风口向下1.5 m的区域定义为试验有效空间。

气流组织决定温度场特性,通过对实验室低温及高温工况气流组织进行CFD建模分析^[8],各风道气流流动特性基本相似。由于结构中大门、隔离门及墙壁对两侧风道气流组织的影响,两侧风道气流流动特性呈左右对称,而中间三条风道气流流动特性基本相同。实验室在低温工况降温过程初期,由于地面负荷较大,送风射流受地面浮力的影响,送风气流未与周围空气充分混合便被排挤至回风口,实验室垂直梯度温度差较为明显。随着地面温度的降低,送风射流受地面浮力的影响逐渐减小,送风气流和周围空气混合充分,实验室垂直梯度温度差明显改善,如图1所示。随着地面负载的影响逐渐减小,实验室气流组织趋于稳定点。

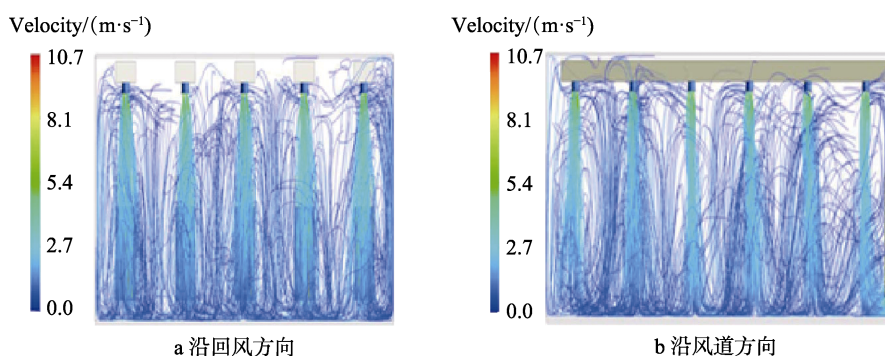


图1 实验室气流组织剖面图

Fig.1 Profile of airflow organization in the laboratory: a) in the direction of return air; b) along the air duct

实验室在高温工况升温过程中,由于地面温度较低,送风射流受自身浮力的影响,很难到达地面,实验室垂直梯度温度差较为明显。随着地面温度的升高,实验室垂直梯度温度差明显改善,随着地面负载的影响逐渐减小,实验室气流组织趋于稳定点。

通过CFD建模分析,当地面负载的影响逐渐减小,并趋于稳定点,低温工况温度不均匀性及波动性主要位于实验室墙壁边缘位置及靠近送风口的空间,高温工况温度不均匀性及波动性点主要位于在实验室边缘位置及靠近地表的空间。

2 气候环境实验室温度性能校准设计

根据实验室流场分析,大门/隔离门、墙壁、地

面负载及送风口位置高度对气流组织有一定影响,试验有效区域中央位置温度均匀性及稳定性较好,各边缘位置温度出现不均匀性及波动概率较大,校准重点选择此类边缘位置。温度传感器的安装充分利用实验室顶部的12条上部运输轨道及传感器支架,安装共设置17条绳索,6台支架,如图2所示。

其中1—4、6、11—12、14—17号绳索每条悬挂3个温度传感器,高度分别为离地1、11、21 m(距上部运输导轨下沿1 m);5、7—10、13号绳索位于实验室核心位置,每条悬挂5个温度传感器,高度分别为离地1、6、11、16、21 m,悬挂式传感器共计63个。传感器支架高度为6 m,每台支架4层,在第一层至第四层各安装1个温度传感器,共24个温度传感器。实验室全部87个校准点,间距覆盖1~5 m

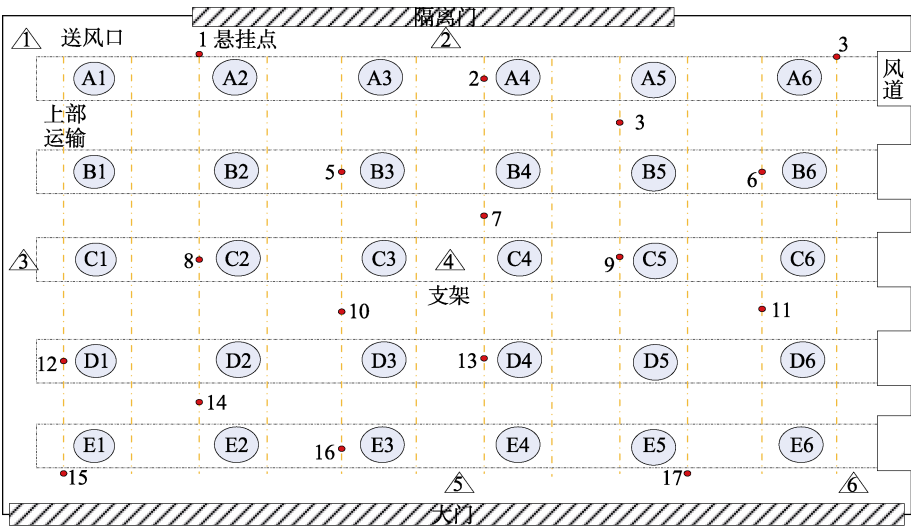


图 2 校准点布局
Fig.2 Layout of matching point

及全量程间距，如图 3 所示。

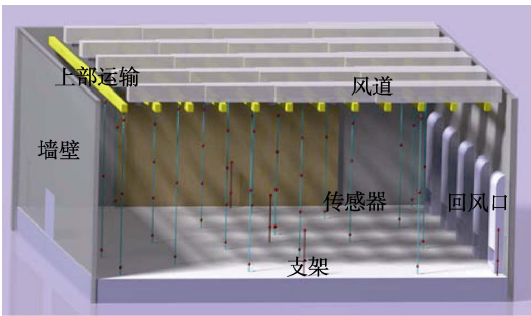


图 3 温度传感器布局
Fig.3 Layout of temperature sensors

3 校准分析

3.1 校准设备

实验室校准设备利用实验室数据采集系统，数据采集系统采用分布式系统构架，用于实验室舱内环境参数、试验件表面响应参数的测量以及测量数据的处

理、显示、存储。系统主要包括：传感器、信号分配箱、数据采集终端、保温箱、数据采集工作站等。传感器采用 A 级 Pt100 温度传感器，将实验室温度信号转换成可传输的电信号，通过宽温电缆接入信号分配箱。集成为大型航空插头后，接入数据采集终端，数据采集终端为传感器提供激励，并采集传感器的输出信号。采集信号接入交换机，转换为光信号，利用光纤接入实验室墙壁的网络接线箱，并传递给数据采集工作站，数据采集原理如图 4 所示。

3.2 校准方法

将实验室温度加载到设计温度点，观测温度稳定后，该时间记作气候环境实验室空仓稳定时间，开始对实验室进行温度性能校准。在 JJF1101—2003《环境试验设备温度、湿度校准规范》中，规定共记录 15 次，转入进行下一个温度点测量。由于数据采集系统以 10 Hz 采样频率记录温度数据，优于校准规范规定记录次数，可在校准结束后，利用数据采集系统的采集数据对实验室温度性能进行计算分析。

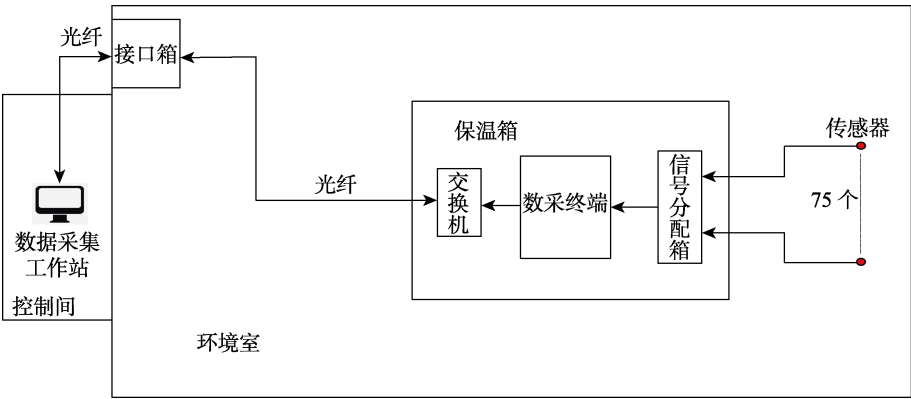


图 4 数据采集原理
Fig.4 Schematic of data acquisition

3.3 温度校准不确定度分析

通过对实验室温度性能不确定度的来源分析^[9-13]和所采用的校准方法可知,实验室温度性能不确定度来源主要由温度平均值的实验标准偏差、不同测量点的温度差、温度随时间的变化及测量仪器的不确定度构成。

1) 温度测量结果平均值的实验标准偏差为:

$$u_{\text{aver}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (t_{ij} - \bar{t})^2}{mn(mn-1)}} \quad (1)$$

式中: $\bar{t}$ 为校准结果的平均值, $\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n t_{ij}}{mn}$; t_{ij} 为第 i 个测量点的第 j 次读数; m 为箱内测量点的个数; n 为每个测量点读数的次数。

2) 气候环境实验室内不同测量点引入的不确定度分量,它由各个测量温度传感器读数平均值的分散度求得,依据贝塞尔公式为:

$$u_{\text{diff}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\bar{t}_i - \bar{t})^2}{m-1}} \quad (2)$$

式中: $\bar{t}_i$ 为第 i 个测量点校准结果的平均值,

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_{ij}}{n}。$$

3) 温度随时间的变化引入的不确定度分量,它依据每次测量所有温度传感器读数平均值的分散度求得,依据贝塞尔公式为:

$$u_{\text{fluc}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (\bar{t}_j - \bar{t})^2}{n-1}} \quad (3)$$

式中: $\bar{t}_j$ 为第 j 次读数校准结果的平均值,

$$\bar{t}_j = \frac{\sum_{i=1}^m t_{ij}}{m};$$

4) 测量设备引入的不确定度分量 u_{inst} ,依据校准/检定证书提供的最大允许误差、准确度等级或扩展不确定度求得。

各个分量之间不相关,因此实验室温度性能的合成不确定度数学模型为:

$$u_c = \sqrt{u_{\text{aver}}^2 + u_{\text{diff}}^2 + u_{\text{fluc}}^2 + u_{\text{inst}}^2} \quad (4)$$

4 气候环境实验室温度校准及数据分析

气候环境实验室温度校准点主要选择不同实验

工况的特殊温度点,如极限高温、50、40、21(基线温度)、-5、-25、-40、-50℃等。实验室先进行低温工况校准,在常温状态下,对实验室进行除湿。除湿结束后,实验室开始降温至第一个校准点,温度到达后,进行维持,每 30 min 对室内温度进行观测。待室内温度稳定后,记录该时间为稳定时间,并开始进行该温度点的数据记录(此过程中数据采集系统实时记录数据),数据测试周期为 1 h。实验室开始降温,进行下一个温度点的校准。低温工况点校准结束后,实验室开始回温,实验室回到常温后,由于地面温度较低,不能直接升温进行高温工况的校准,待地面温度回升后进行高温工况温度校准。

实验室校准过程中,地面温度及降温速率对实验室温度梯度影响较大,校准数据应在地面温度负载较小并趋于稳定后进行测量。

低温工况校准过程中,温度不均匀性及波动性主要位于实验室墙壁边缘位置及中央送风口位置。高温工况校准过程中,温度不均匀性及波动性点主要位于在实验室边缘位置及靠近地表位置,符合 CFD 建模分析。

4.1 -50℃温度校准

以-50℃为例来评定实验室低温工况的温度性能,该工况所有校准数据如图 5 所示。实验室在-50℃稳定状态下,各温度点的温度波动度较小,在 0.6℃以内。温度偏差较大的点主要出现在支架 1 处,及悬挂点 9 上部,靠近风口处,最大差值为 1.3℃。

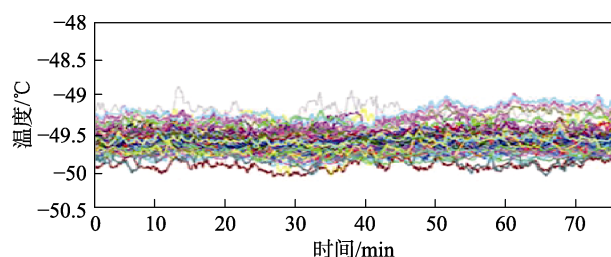


图 5 -50℃校准数据曲线

Fig.5 Calibration data curves at -50℃

实验室在低温工况时温度性能的不确定度评定如下。

1) 室内所有温度点平均值为-49.47℃。

2) 根据式(1)求得由实验室在低温工况时校准结果的平均值标准偏差引入的不确定度分量: $u_{\text{aver}}=0.21℃$ 。

3) 根据式(2)求得由实验室内不同测量位置间的差异引入的不确定度分量: $u_{\text{diff}}=0.28℃$ 。

4) 根据式(3)求得由温度随时间变化引入的不确定分量: $u_{\text{fluc}}=0.09℃$ 。

5) 根据数据采集系统校准证书得知,数据采集系统最大允许误差为 0.1%,校准量程为±100℃。由

温度传感器检定证书得知, 温度传感器准确度等级为 A 级, 即最大允许误差为 $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 求得由测量仪器引入的不确定度为: $u_{\text{inst}}=0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6) 根据式(4)求得合成不确定度为: $u_c=0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

7) 扩展不确定度。当置信概率 $p=0.95$ 时, $k=2$, 则 $U=ku_c=0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。即气候环境实验室在低温 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 室内温度平均值处于 $-48.67\sim-50.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的可信度是 95%。

4.2 50 °C 温度校准

以 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为例来评定实验室高温工况的温度性能, 该工况所有校准数据如图 6 所示。实验室在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 稳定状态下, 各温度点的温度波动度在 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 温度偏差最大的点为悬挂点 7 上侧与悬挂点 3 下侧地表处, 最大差值为 $1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

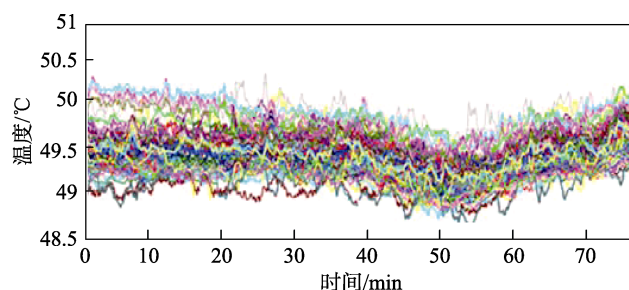


图 6 50 °C 校准数据曲线

Fig.6 Calibration data curves at 50 °C

实验室在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况时温度性能的不确定度评定如下。

1) 室内所有温度点平均值为 $49.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

2) 根据式(1)求得由实验室在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况时校准结果的平均值标准偏差引入的不确定度分量: $u_{\text{aver}}=0.27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

3) 根据式(2)求得由实验室内不同测量位置间的差异引入的不确定度分量: $u_{\text{diff}}=0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

4) 根据式(3)求得由温度随时间变化引入的不确定分量: $u_{\text{fluc}}=0.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

5) 求得由测量仪器引入的不确定度为: $u_{\text{inst}}=0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

6) 根据式(4)求得合成不确定度为: $u_c=0.55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

7) 扩展不确定度。当置信概率 $p=0.95$ 时, $k=2$, 则 $U=ku_c=1.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。即气候环境实验室在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 室内温度平均值处于 $48.57\sim50.77\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内的可信度是 95%。

5 结论

通过气流组织分析结果及实验室送风结构对称原则, 将实验室校准点数量及位置进行最优化处理。通过对实验室低温及高温工况校准数据不确定度的评定, 得出实验室在该温度点温度平均值的扩展不确

定度。针对大空间气候环境实验室(即充分考核实验室温度性能), 该校准方法也具备可行性, 易于应用。

参考文献:

- [1] 王浚, 黄本诚, 万才大. 环境模拟技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.
WANG Jun, HUANG Ben-cheng, WAN Cai-da. Environmental simulation technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1996.
- [2] 胥泽齐, 张世艳, 宜卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 54-59.
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 54-59.
- [3] 王浚. 我国环境模拟技术现状与发展[J]. 航空制造技术, 2004(8): 49-52.
WANG Jun. Present Status and Development of Environmental Simulation Technology in China[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(8): 49-52.
- [4] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 60-65.
TANG Hu, LI Xi-ming. Climatic Test of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 60-65.
- [5] JJF 1101—2003, 环境试验设备温度、湿度校准规范[S].
JJF 1101—2003, Calibration Specification for the Equipment of the Environmental Test for Temperature and Humidity[S].
- [6] JJF 1564—2016, 温湿度环境试验箱校准规范[S].
JJF 1564—2016, Specification for Calibration of Temperature and Humidity Environment Test Chamber[S].
- [7] HB 6783. 3—1993, 军用机载设备气候环境试验箱(室)检定方法温度试验箱(室) [S].
HB 6783. 3—1993, Verification Method of Climatic Environment Test Chamber for Military Airborne Equipment Temperature Test Chamber[S].
- [8] 马建军, 孙侠生. 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.
MA Jian-jun, SUN Xia-sheng. Numerical Analysis of Temperature Uniformity for Climatic Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(1): 48-53.
- [9] JJF 1059—1999, 测量不确定度评定与表示[S].
JJF 1059—1999, Evaluation and Representation of Measurement Uncertainty[S].
- [10] 吴石林. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
WU Shi-lin. Error Theory and Data Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010.
- [11] 倪育才. 实用测量不确定度评定[M]. 北京: 中国计量出版社, 2009.
NI Yu-cai. Evaluation of Uncertainty in Practical Measurement[M]. Beijing: China Measurement Press, 2009.
- [12] JJF 1007—2007, 温度计量名词术语及定义[S].
JJF 1007—2007, Temperature Metrological Terms and Their Definitions[S].