

高低温试验箱温度偏差校准结果的测量不确定度评定

赵婷婷*, 周昭亮

(西安热工研究院有限公司, 西安 710032)

摘要: 高低温试验箱可以为仪表及材料等提供相应的高低温环境, 其温度场性能及测量不确定度是影响温度试验箱测量结果的重要指标, 通过对温度偏差校准结果的不确定度评定和影响量分析, 进一步了解高低温试验箱的计量性能、误差来源及减小误差影响的方法。依据 GB/T 10592-2023《高低温试验箱技术条件》规定的校准方法选取满足测量要求的温度传感器, 对高低温试验箱温度偏差进行校准。校准确认高低温试验箱温度场性能满足温度偏差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 的允差要求, 测量不确定度满足 1/3 最大允许误差的技术指标要求。高低试验箱校准温度场性能良好, 测量标准器选取短支 A 级铂热电阻满足校准要求且稳定性良好符合长时间交替温度的测量使用。

关键词: 高低温试验箱; 温度偏差; 校准; 测量不确定度

Evaluation of measurement uncertainty of calibration results of temperature deviation in high and low temperature test chamber

ZHAO Ting-Ting*, ZHOU Zhao-Liang

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

ABSTRACT: The high and low temperature test chamber can provide the corresponding high and low temperature environment for instruments and materials, and its temperature field performance and measurement uncertainty are important indicators that affect the measurement results of the temperature test chamber. Through the uncertainty evaluation and influence analysis of temperature deviation calibration results, the measurement performance of high and low temperature test chamber, error sources and methods to reduce the influence of error are further understood. According to the calibration method specified in GB/T 10592-2023 *Technical Conditions for High and Low Temperature Test Chamber*, select the temperature sensor that meets the measurement requirements and calibrate the temperature deviation of the high and low temperature test chamber. The calibration confirms that the temperature field performance of the high and low temperature test chamber meets the tolerance requirement of temperature deviation $\pm 2^{\circ}\text{C}$, and the measurement uncertainty meets the technical index requirement of 1/3 maximum allowable error. The temperature field performance of the high-low test chamber is good, and the short-branch A-class platinum thermal resistance selected by the measurement standard meets the calibration requirements and has good stability.

KEY WORDS: high and low temperature test chamber; temperature deviation; calibration; measurement uncertainty

* 通信作者: 赵婷婷, 工程师, 研究方向为热工计量与管理。E-mail: 502046285@qq.com

*Corresponding author: ZHAO Ting-Ting, Engineer, Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., No. 136 Xingqing Road, Xi'an 710032, China. E-mail: 502046285@qq.com

0 引言

高低温试验箱可用于大多数行业的温度计量以及各种材料的试验中, 电力行业的热工、电测、材料等方面能够实现测量的准确与便捷, 确保仪器仪表量值的准确与统一, 对试验箱实际应用提供数据参考^[1-2]。

高低温试验箱温度范围可达 -65℃ 至 200℃, 其精度高、操作简单、稳定性好、温场均匀性好, 满足大多数电工、电子及其他产品、零部件、材料进行高温或低温试验, 以及高低温循环试验的需求^[3]。为了正确模拟产品环境温度条件就必须保证试验箱的温度场温度偏差等技术指标符合产品温度试验标准的要求。

以下依据 GB/T 10592-2023《高低温试验箱技术条件》对其温度偏差^[4]的校准结果及其测量不确定度进行分析和评定, 就评定方法中的数学建模、不确定度分析^[5]与计算等进行论述。

1 测量系统组成及测量原理

1.1 测量系统组成

校准高低温试验箱的标准器选取为铂热电阻温度传感器, 电测设备为数字多用表, 测量系统如图 1 所示:

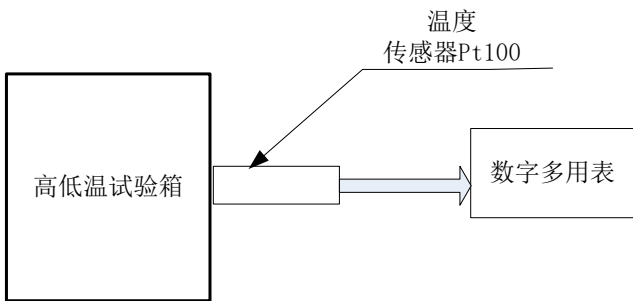


图 1 高低温试验箱温场测试系统图

Fig.1 High and low temperature test chamber temperature field test system diagram

被校高低温试验箱温度偏差校准根据试验箱测量范围^[6]及使用范围, 所用传感器为铂热电阻 Pt100, 测量范围选取 -40~100℃。

1.2 测量方法

用 A 级工业铂热电阻作为测量标准器^[7], 采用直接测量法, 对工作室容积不大于 2 m³ 的温度试验箱进行校准。在试验箱工作室内定出上、中、下三个水平测试面, 简称上、中、下层。上层与工作室的顶面的距离是工作室高度的 1/10, 中层通过工作室几何中心, 下层在最低层样品架上方 10 mm 处。测试点位于三个测试面上, 中心测试点位于工作室几何中心, 其余测试点到工作室壁的距离为各自边长的 1/10, 但对于工作室容积不大于 1 m³ 的试验箱, 该距离不小于 50 mm, 工作室容积不大于

2 m³ 的试验箱, 测试点为 9 个, 布置位置如图 2 所示:

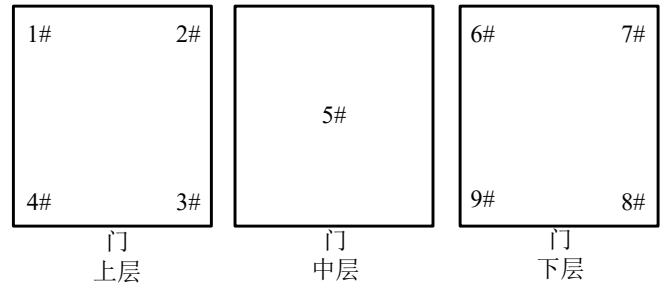


图 2 高低温试验箱温场测试点位置图

Fig.2 High and low temperature test chamber temperature field test point location diagram

将工业铂热电阻置于试验箱工作室定好 9 个测试点位置处, 将试验箱传感器引线出口处按要求封堵好, 防止外界环境对试验箱温场的干扰^[8]。

按照试验箱操作要求设定试验箱温场测试时的校准温度点^[9], 当温度达到设定点温度并稳定 2 h 后^[10], 确认试验箱温度场相对稳定后, 在 30 min 内每 1 min 依次读取各测试点的温度传感器的输出值 1 次, 如此每个测试点共测量 30 次, 对测得的数据按要求进行计算。

2 建立数学模型

校准高低温试验箱的数学模型^[11] 如式:

$$\Delta T = \bar{T}_i - \bar{T}_0 \tag{1}$$

其中:

$$\bar{T}_i = T + \frac{\bar{R}_i - R}{\frac{dR}{dt}} \tag{2}$$

$$\bar{T}_0 = T + \frac{\bar{R}_0 - R}{\frac{dR}{dt}} \tag{3}$$

则式 (1) 变为式 (4):

$$\Delta T = \frac{\bar{R}_i - R}{\frac{dR}{dt}} - \frac{\bar{R}_0 - R}{\frac{dR}{dt}} \tag{4}$$

整理后变为式 (5)

$$\Delta T = \frac{\bar{R}_i - \bar{R}_0}{\frac{dR}{dt}} \tag{5}$$

式中:

ΔT — 温度偏差, °C;

T — 设定点温度, °C;

\bar{T}_0 — 工作空间中心点的温度平均值, °C;

\bar{T}_i — 工作空间其他点的温度平均值, °C;

R — 铂热电阻标称电阻值, Ω ;

\bar{R}_0 — 铂热电阻测得的工作空间中心点的电阻平均值, Ω ;

\bar{R}_i — 铂热电阻测得的工作空间其他点的电阻平均值, Ω ;

$\frac{dR}{dt}$ —铂热电阻在设定温度电阻值对温度的变化率, $\Omega/^\circ\text{C}$ (查询分度表得出)。

根据不确定度传播率通用公式, 合成标准不确定度为:

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)} \quad (6)$$

由于各输入量之间相互独立, 得到合成标准不确定度:

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i)} \quad (7)$$

式中:

$u_c(\Delta T)$ —合成标准不确定度;

$u(x_i)$ —输入量 x_i 的标准不确定度;

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ —被测量量与有关的输入量之间的函数对于输入量 x_i 的偏导数;

$u(x_i, x_j)$ —输入量 x_i 与 x_j 的协方差。

由数学模型可得, 高低温试验箱温度偏差校准结果相关的标准不确定度^[12]包括以下几项:

- (1) 工作空间中心点温度测量重复性引入的标准不确定度, $u_1; \Omega$; (A类评定)
- (2) 工作空间其他点温度测量重复性引入的标准不确定度, $u_2; \Omega$; (B类评定)
- (3) A级铂热电阻引入的标准不确定度, $u_3; \Omega$; (B类评定)
- (4) 数字多用表对工作空间中心点铂热电阻引入的标准不确定度, $u_4; ^\circ\text{C}$; (B类评定)
- (5) 数字多用表对工作空间其他点铂热电阻引入的标准不确定度, $u_5; ^\circ\text{C}$; (B类评定)

利用公式(1)、公式(5)对各影响量求偏导得到各标准不确定度的灵敏系数:

$$c_1 = \frac{d\Delta T}{dR_0} = \frac{-1}{dR/dt}; \quad c_2 = \frac{d\Delta T}{dR_i} = \frac{1}{dR/dt}; \quad c_3 = 1$$

$$c_4 = \frac{d\Delta T}{dR_0} = \frac{-1}{dR/dt}; \quad c_5 = \frac{d\Delta T}{dR_i} = \frac{1}{dR/dt} \quad (8)$$

根据公式(8), 得到合成标准不确定度 $u_c(\Delta T)$ 的表达式为:

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2} \quad (9)$$

代入公式(9), 整理得到:

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{\left(\frac{-1}{dR/dt}\right)^2 u_1^2 + \left(\frac{1}{dR/dt}\right)^2 u_2^2 + u_3^2 + \left(\frac{-1}{dR/dt}\right)^2 u_4^2 + \left(\frac{1}{dR/dt}\right)^2 u_5^2} \quad (10)$$

3 测量不确定度分析

3.1 高低温试验箱温度偏差校准要求和重复性试验数据^[13]

进行重复性试验时, 当温度达到设定温度并稳定 2 h 后, 在 30 min 内每 1 min 依次读取各测试点的电阻输出值 1 次, 共测量 30 次。

在 -40~100 $^\circ\text{C}$ 测量范围内, 对校准点 -40 $^\circ\text{C}$ 、60 $^\circ\text{C}$ 、100 $^\circ\text{C}$ 按照要求进行重复测量, 在 30 min 内读取的 30 个数据作为重复性测量数据, 各测点位置的算术平均值见表 1。

表 1 校准点各测点位置的算术平均值

Table 1 The arithmetic mean of each measuring point position of the calibration point

编号	校准温度点对应的测量平均值 / Ω		
	-40 $^\circ\text{C}$	60 $^\circ\text{C}$	100 $^\circ\text{C}$
5#	84.0954	123.0098	137.8961
1#	84.2676	123.0568	137.8816
2#	84.3795	122.8946	137.7206
3#	84.4317	122.7788	137.8819
4#	84.5277	122.9154	137.8806
6#	83.9874	123.2037	137.9062
7#	83.8994	123.095	137.8906
8#	83.9913	123.1714	138.0753
9#	84.2123	123.2535	137.9291

3.2 校准结果重复性引入的标准不确定度 (A类评定)

由重复性引入的标准不确定度采用贝塞尔公式计算^[14], 实验标准偏差 s 计算见下式:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{(n-1)}}$$

式中:

s —校准结果的实验标准偏差, 单位: Ω ;

x_i —第 i 次校准结果, 单位: Ω ;

\bar{x} — n 次校准结果的算术平均值, 单位: Ω ;

n —校准次数, 取 $n=30$ 。

3.2.1 工作空间中心点温度测量重复性引入的标准不确定度 u_1

$$u_1 = s$$

$$c_1 = -1/(dR/dt)$$

如表 2 所示:

表 2 工作空间中心点温度测量重复性引入的标准不确定度
Table 2 Standard uncertainty introduced in repeatability of temperature measurement at the center point of workspace

校准点 ($^\circ\text{C}$)	温度偏差 ($^\circ\text{C}$)	实验标准偏差 (Ω)	$u_1(\Omega)$	$c_1(\Omega/^\circ\text{C})^{-1}$
-40	1.092	0.0055	0.0055	-2.527
60	0.635	0.0042	0.0042	-2.605
100	0.473	0.0087	0.0087	-2.636

3.2.2 工作空间其他点温度测量重复性引入的标准不确定度 u_2

$$u_2 = s$$

$$c_2 = 1/(dR/dt)$$

如表 3 所示:

表 3 工作空间其他点温度测量重复性引入的标准不确定度
Table 3 Standard uncertainty introduced by repeatability of temperature measurements at other points in the work space

校准点 (°C)	实验标准偏差 (Ω)	$u_2(\Omega)$	$c_2(\Omega/^\circ\text{C})^{-1}$
-40	0.0107	0.0107	2.527
60	0.0062	0.0062	2.605
100	0.0177	0.0177	2.636

3.3 标准不确定度的 B 类评定

根据相应的影响量对高低温试验箱温度偏差进行 B 类不确定度分析^[15], 试验箱温度偏差的性能判定是在空载情况下进行实验性性能评判及不确定度分析^[16]。具体 B 类不确定度分析如下。

3.3.1 工业铂热电阻不确定度引入的不确定度 u_3

工业铂热电阻在各校准点的测量不确定度为 U_3 , $k_3=2$, 即区间半宽 a_3 , 则标准不确定度按下式计算, 计算结果见表 4。

$$u_3 = \frac{U_3}{k_3}$$

$$c_3=1$$

表 4 工业铂热电阻不确定度引入的标准不确定度
Table 4 Industrial platinum thermal resistance uncertainty introduced standard uncertainty

校准点 (°C)	$a_3(^\circ\text{C})$	k_3	$u_3(^\circ\text{C})$	c_3
-40	0.05		0.025	1
60	0.07	2	0.035	1
100	0.08		0.040	1

3.3.2 数字多用表对工作空间中心点铂热电阻引入的标准不确定度 u_4

数字多用表在工业铂热电阻电阻测量时使用的直流电阻量程及最大允许误差为: 100 Ω 档: $\pm(0.010\% \times \text{读数} + 0.004\% \times \text{量程}) \Omega$, 1000 Ω 档: $\pm(0.010\% \times \text{读数} + 0.001\% \times \text{量程}) \Omega$, 区间半宽 a_4 取最大允许误差绝对值, 按均匀分布对待, 取 $k_4 = \sqrt{3}$, 则标准不确定度按下式计算, 计算结果见表 5。

$$u_4 = a_4 / k_4$$

$$c_4 = -1 / (dR/dt)$$

表 5 数字多用表对工作空间中心点铂热电阻引入的标准不确定度

Table 5 Standard uncertainty introduced by digital multimeter for platinum thermal resistance at center point of workspace

校准点 (°C)	电阻值 (Ω)	$a_4(^\circ\text{C})$	k_4	$u_4(^\circ\text{C})$	$c_4(\Omega/^\circ\text{C})^{-1}$
-40	84.0954	0.0124		0.0072	-2.527
60	123.0098	0.0223	$\sqrt{3}$	0.0129	-2.605
100	137.8961	0.0238		0.0137	-2.636

3.3.3 数字多用表对工作空间其他点铂热电阻引入的标准不确定度 u_5

数字多用表在工业铂热电阻电阻测量时使用的直流电阻量

程及最大允许误差为: 100 Ω 档: $\pm(0.010\% \times \text{读数} + 0.004\% \times \text{量程}) \Omega$, 1000 Ω 档: $\pm(0.010\% \times \text{读数} + 0.001\% \times \text{量程}) \Omega$, 区间半宽 a_5 取最大允许误差绝对值, 按均匀分布对待, 取 $k_5 = \sqrt{3}$, 则标准不确定度按下式计算, 计算结果见表 6。

$$u_5 = a_5 / k_5$$

$$c_5 = 1 / (dR/dt)$$

表 6 数字多用表对工作空间其它点铂热电阻引入的标准不确定度
Table 6 Standard uncertainty introduced by digital multimeter to platinum thermal resistance at other points in the work space

校准点 (°C)	电阻值 (Ω)	$a_5(^\circ\text{C})$	k_5	$u_5(^\circ\text{C})$	$c_5(\Omega/^\circ\text{C})^{-1}$
-40	84.5277	0.0125		0.0072	2.527
60	123.2535	0.0223	$\sqrt{3}$	0.0129	2.605
100	138.0753	0.0238		0.0137	2.636

4 合成标准不确定度

根据不确定度传播律, 由于各标准不确定度分量彼此独立, 互不相关, 其合成标准不确定度如下:

$$u_c(\Delta T) = \sqrt{c_1^2 u_1^2 + c_2^2 u_2^2 + c_3^2 u_3^2 + c_4^2 u_4^2 + c_5^2 u_5^2}$$

代入各标准不确定度分量, 得到合成标准不确定度:

$$u_c(\Delta T)_{-40} = 0.0434^\circ\text{C}; u_c(\Delta T)_{60} = 0.0522^\circ\text{C}; u_c(\Delta T)_{100} = 0.0749^\circ\text{C}$$

5 扩展不确定度

高低温试验箱温度偏差的扩展不确定度表示为 $U = u_c(\Delta T) \times k$ ($k=2$), 计算结果如下:

$$U(-40) = 0.087^\circ\text{C}; U(60) = 0.104^\circ\text{C}; U(100) = 0.150^\circ\text{C}$$

6 测量不确定度不报告

被校高低温试验箱偏差校准结果和测量不确定度表述见下表 7:

表 7 测量不确定度表述

Table 7 Measurement uncertainty expression

校准温度点 /°C	-40	60	100
温度偏差 /°C	1.092	0.635	0.473
扩展不确定度 /°C $U(k=2)$	0.087	0.104	0.150

7 结论

通过对高低温试验箱测量方法控制及测量系统的确认, 高低温试验箱温度场性能校准结果满足温度偏差 $\pm 2^\circ\text{C}$ 的允差要求, 测量不确定度结果满足 1/3 最大允许误差的技术指标要求。参考国标在校准过程中通过实际对试验箱工作室各位置点的布置, 工作室上下层的测温元件端部与工作室壁距离 50 mm 位置为最佳温度场性能符合要求的最大位置点, 校准结果得到高低

试验箱校准温度场性能良好, 测量标准器选取短支 A 级铂热电阻满足校准要求且稳定性良好符合长时间交替温度的测量使用。高低温试验箱温度偏差的准确测量和合理评定保证了其测量的可靠性^[17], 为其在实验室精密测量以及有特殊需求设备的现场检测工作^[18]提供了相应的参考价值, 为被试设备及材料提供准确的温度场量值。

参考文献

- [1] 胡凯, 翦文斌, 张旺威, 等. 实验室对低温试验测量不确定度的评定方法 [J]. 环境技术, 2022, 40(05): 233-237.
- [2] 崔晓非. 试验箱温度性能指标测试探讨 [J]. 中国检验检测, 2018, 26(01): 34-36,23.
- [3] 张子豪, 吴晓峰, 余松, 等. 模拟温度 - 高度试验方法的技术研究 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2021, 39(05): 29-32.
- [4] 王华斌, 冯明康, 赖文光, 等. GB/T 10592-2008 高低温试验箱技术条件 [S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [5] 叶德培, 赵峰, 施昌彦, 等. JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.
- [6] 叶德培, 施昌彦, 金华彰, 等. JJF 1001-2011 通用计量术语及定义技术规范 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.
- [7] 徐京辉, 周连琴, 姚伟勇. 温度传感器对温度场波动度测量的影响 [J]. 计量技术. 2000, (01): 20-22.
- [8] 孙立明, 张宁宁, 刘兆旭. 高低温能力验证结果影响因素分析 [J]. 环境技术, 2019, 37(01): 40-44.
- [9] 李毅华, 邓家一, 季家东, 等. 高低温试验箱内温度场实验及数值研究 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(06): 2293-2299.
- [10] 臧兵. 谈谈高低温工作试验中的保温时间 [J]. 航天器环境工程, 2015, 32(04): 408-414.
- [11] 费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [12] 杨雨航. 论温度试验箱开展温度试验不确定度评定方法 [J]. 科技创新与应用, 2019, (31): 139-140.
- [13] 张艳军, 许雪冬, 施子诚. 温度试验箱性能确认测量结果计算方式的初浅比较 [J]. 环境技术, 2020, (S1): 94-97.
- [14] 李慎安. JJF 1059-1999《测量不确定度评定与表示》讨论之四方法确认的重复性标准差与复现性标准差 [J]. 工业计量, 2006, (02): 35-37.
- [15] 熊朝晖, 陈衷. 温度试验箱校准的测量不确定度 [J]. 计量与测试技术, 2010, 37(11): 71-73.
- [16] 卢兆明, 忻龙胡, 伟欣. 温度试验箱内部环境条件的不确定度要素分析 [J]. 上海标准化, 2010, (06): 24-29.
- [17] 沈炯. 环境试验箱温度性能不确定度的评定. 环境技术 [J], 2009, 27(05): 28-30.
- [18] 陈谋义. 环境试验的重要性及环境试验设备的有关问题 [J]. 环境技术, 1999, (02): 6.

作者简介

赵婷婷, 工程师, 研究方向为热工计量与管理。