

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.01.08

浴式黑体辐射源校准方法研究

董磊, 蔡静, 孟苏

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了几种典型的浴式黑体辐射源, 并详细说明了校准方法。校准过程包括恒温槽内工作区域划定、介质温度测量、黑体腔有效发射率评估、辐射温度有效发射率修正等步骤。最终给出了浴式黑体辐射源的校准结果, 并进行了不确定度评定。

关键词: 校准; 浴式黑体辐射源; 恒温槽; 标准铂电阻温度计; 黑体腔; 有效发射率; 辐射温度计

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)01-0033-05

Research on Calibration Methods of Bath Blackbody Source

DONG Lei, CAI Jing, MENG Su

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: This paper introduces several typical bath blackbody sources and gives detailed descriptions of calibration methods. The procedure of the calibration includes definition of the working area in temperature-controlled bath, temperature measurement of the medium, evaluation of effective emissivity of the blackbody cavity and radiation temperature correction for the effective emissivity. At last, this paper presents the calibration results of the bath blackbody sources and assesses the uncertainty.

Key words: calibration; bath blackbody source; temperature-controlled bath; standard platinum resistance thermometer; blackbody cavity; effective emissivity; radiation thermometer

0 引言

在温度计量领域, 浴式黑体辐射源主要用于 $-50 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的辐射温度计以及测量人体温度的红外温度计的检定和校准。由于红外温度计及高精度辐射温度计的检定对黑体辐射源准确度等级要求高, 一般的工作黑体辐射源难以达到要求, 因此通常采用浴式黑体辐射源。

浴式黑体辐射源的校准方法与工作黑体辐射源不同, 通常以标准铂电阻温度计为标准器进行温度标定, 并且经过黑体辐射源有效发射率评估, 计入辐射温度发射率修正值后实现校准。本文将介绍几种典型的浴式黑体辐射源, 并将详细说明其校准方法。

1 浴式黑体辐射源分类与原理

浴式黑体辐射源是一种由恒温槽和黑体腔组成的

黑体辐射源, 根据恒温槽内工作介质的不同, 可以分为水浴黑体辐射源、酒精浴黑体辐射源、油浴黑体辐射源, 温度范围分别为 $5 \sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-50 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 其中最常见的是水浴黑体辐射源和酒精浴黑体辐射源, 油浴黑体辐射源近年来的应用逐渐减少。

浴式黑体辐射源一般在恒温槽的基础上进行改造, 经加装黑体腔后制成, 可以分为卧式或立式^[1]。通常用于温度计检定的通用恒温槽, 其工作区域的开口向上, 便于温度计的垂直安装, 可以将黑体腔竖直放入恒温槽内制成立式浴式黑体辐射源, 其结构原理图见图 1。立浴式黑体辐射源适于手持式辐射温度计的检定, 包括测量人体温度的红外温度计。但是, 大部分高精度辐射温度计一般采用水平安装来进行测量, 因此在恒温槽侧壁开口, 将黑体腔水平置入恒温槽内制成卧浴式黑体辐射源, 显然是更适合这些辐射温度计的瞄准与测量, 其结构原理图见图 2。

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家“十二五”技术基础科研项目(J052012B002)

作者简介: 董磊(1981-), 男, 工程师, 从事辐射温度、辐射热流测量及校准研究工作。

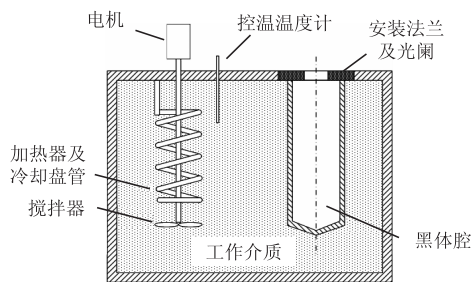


图1 立式浴式黑体辐射源结构原理图

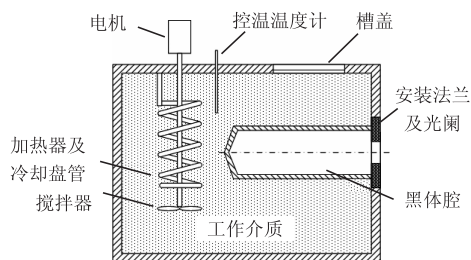


图2 卧式浴式黑体辐射源结构原理图

2 浴式黑体辐射源校准方法

CR-WBB-100 型浴式黑体辐射源是一种典型的卧式水浴黑体辐射源,如图3所示。以此为例,我们对浴式黑体辐射源的校准方法进行详细说明。



图3 CR-WBB-100 浴式黑体辐射源

CR-WBB-100 型浴式黑体辐射源的技术指标为:温度范围 $5 \sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 黑体腔口径 100 mm , 算法向有效发射率 0.9993 ± 0.0003 , 对应波长范围 $8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 。

在实际校准过程中,我们先参照 JJF 1030-2010《恒温槽技术性能测试规范》(以下称《规范》)划定工作区域,采用二等标准铂电阻温度计测试恒温槽内介质的温度稳定性和温度均匀性,并确定介质温度;然后采用表面温度计测量黑体腔壁面的轴向温度梯度,并

利用 STEEP321 软件计算黑体腔的有效发射率;最后给出经过发射率修正的辐射温度作为校准结果,并给出测量不确定度。

2.1 恒温槽内介质温度稳定性

如图4所示划定工作区域,浴式黑体辐射源的工作区域指包含黑体腔的长方体区域,其中该区域的上水平面应与液面保持一定距离,保证标准铂电阻温度计的没入深度。由于黑体腔在恒温槽的一侧开口,实际上该工作区域并未完全涵盖黑体腔整个轴向长度。

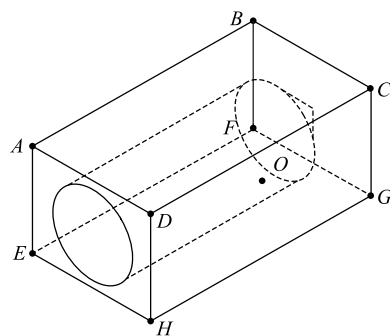


图4 CR-WBB-100 浴式黑体辐射源工作区域示意图

依据《规范》,将标准铂电阻温度计1插入工作区域 $1/2$ 深度位置,即为图4所示的 O 点,为了避开黑体腔, O 点并不是工作区域的几何中心。待恒温槽在某温度点温度稳定 10 min 后,以每分钟至少6次的均匀间隔读取示值, 10 min 共计读取60个示值,取最大值与最小值的差,即为浴式黑体辐射源恒温槽在该温度点相应时间间隔内的波动性。

2.2 恒温槽内介质温度均匀性

依据《规范》,将标准铂电阻温度计1作为固定温度计插入 O 点位置,标准铂电阻温度计2作为移动温度计,依次插入到工作区域上水平面 A, B, C, D 位置处,按一定顺序读取固定温度计和移动温度计的示值,共读取4组示值,移动温度计示值平均值与固定温度计示值平均值之差为该点相对于 O 点的温度示值差,同理测出下水平面 E, F, G, H 位置处相对于 O 点的温度示值差。

从上水平面四点相对于 O 点的温度示值差中找出最大值和最小值,最大值减去最小值的差即为工作区域上水平面的最大温差,同理,从下水平面四点相对于 O 点的温度示值差中找出最大值和最小值,最大值减去最小值的差即为工作区域下水平面的最大温差。从所有八点相对于 O 点的温度示值差中找出最大值和最小值,最大值减去最小值的差即为工作区域的最大

温差。

2.3 恒温槽内介质温度

以标准铂电阻温度计 1 在 O 点处测得的温度示值为浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度，将恒温槽稳定性测试过程中测量所得的 60 个示值取平均值即为介质温度，此组测量值的标准偏差作为重复性。

2.4 黑体腔壁面轴向温度梯度

图 5 所示为 CR-WBB-100 浴式黑体辐射源黑体腔几何形状，使用表面温度计依次测量黑体腔内间隔为 l 的各点 a, b, c, d, e, f 的表面温度，得到浴式黑体辐射源黑体腔壁面的轴向温度梯度。

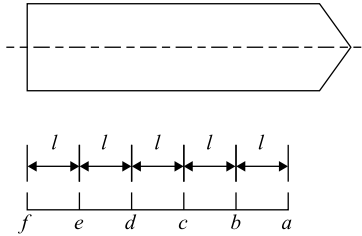


图 5 黑体腔几何形状草图

2.5 浴式黑体辐射源有效发射率

利用浴式黑体辐射源黑体腔的几何形状、表面涂层发射率、壁面轴向温度梯度等参数，通过 STEEP321 软件计算得到浴式黑体辐射源有效发射率的评估值。

2.6 浴式黑体辐射源辐射温度

如果浴式黑体辐射源的有效发射率为 1，浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度可以看作浴式黑体辐射源的辐射温度，两者温度值没有差别。

但是，在用辐射温度计测量黑体辐射源温度的过程中，辐射温度计发射率默认设置为 1，认为黑体辐射源的有效发射率为 1，而实际有效发射率肯定不为 1，这里就会因为有效发射率不为 1 引入辐射温度测量的修正值，黑体辐射源的有效发射率越接近 1，引入的辐射温度发射率修正值就越小。

浴式黑体辐射源辐射温度应为恒温槽内介质温度加上辐射温度发射率修正值。

3 浴式黑体辐射源校准结果

采用二等标准铂电阻温度计测量恒温槽内介质温度及其稳定性和均匀性的结果如表 1 所示；采用表面温度计测量黑体腔壁面的轴向温度梯度的结果如表 2 所示；利用 STEEP321 软件计算黑体腔的有效发射率，计算参数表如表 3 所示；辐射温度发射率修正值及其变化区间的半宽度经如表 4 所示。

表 1 恒温槽内介质温度及其稳定性、均匀性

温度点 /℃	上水平 面温差 /℃	下水平 面温差 /℃	工作区域 最大温差 /℃	温度波动性 /(℃·10 min ⁻¹)	介质 温度 /℃
5.00	0.004	0.006	0.006	0.007	4.776
20.00	0.003	0.004	0.004	0.007	19.821
80.00	0.004	0.003	0.004	0.007	80.037
90.00	0.003	0.004	0.004	0.006	90.091

注：1) 测量介质温度所用的二等标准铂电阻温度计的两次检定周期间稳定性为 0.01℃；

2) 稳定性、均匀性测量结果的不确定度为 $U=0.006\text{℃}(k=2)$ 。

表 2 浴式黑体辐射源黑体腔轴向温度梯度 /℃

温度点	$T_b - T_a$	$T_c - T_a$	$T_d - T_a$	$T_e - T_a$	$T_f - T_a$
5.00	0	0.1	0.1	0.1	0.2
20.00	0	0	0	0	0
80.00	0	0	-0.3	-0.6	-0.8
90.00	0	0	-1.3	-2.8	-3.2

注：1) 表面温度计的测温准确度低，在此只依靠其短期稳定性，利用其测得值与参考点的温度差值来表述黑体腔的轴向温度梯度；

2) 在计算黑体腔有效发射率时，选取的是最大的轴向温度梯度。

表 3 浴式黑体辐射源黑体腔有效发射率计算参数表

影响因素	参 数	值
黑体空腔几何形状	黑体空腔长径比	L/d_c 3:1
	底面形状	120°锥角
	腔孔光阑直径	无
黑体空腔材料特性	黑体空腔内壁材料发射率	ε_c 0.98, 0.97, 0.96
	黑体空腔内壁材料漫射率	D_c 1, 0.7
黑体空腔温度分布	黑体空腔底面温度	T_b 278.0 K, 363.0 K
	黑体空腔壁面温度(温度梯度)	T_i 参见表 2
其它因素	参考温度	T_{ref} 278.0 K, 363.0 K
	环境温度	T_a 0 K
	初始辐射能量束的数量	N 10^7
	追踪的最小能量阈值	T_t 10^{-6}

表 4 辐射温度发射率修正值及其变化区间的半宽 /℃

温度点	发射率修正值	发射率修正值 变化区间的半宽度
5.00	0.014	0.012
20.00	0.002	0.006
80.00	-0.033	0.017
90.00	-0.038	0.019

注：1) 发射率修正值已考虑环境辐射的影响，环境温度范围为 18 ~ 28℃。

2) 发射率修正值已经考虑波段的影响，波长范围 8 ~ 14 μm。

采用 STEEP321 进行计算，浴式黑体辐射源黑体腔

作为等温腔,法向有效发射率为 0.9993(3),浴式黑体辐射源黑体腔作为不等温腔,在波长范围 8~14 μm 内法向有效发射率为 0.9993(3),实际按不等温腔的有效发射率给出辐射温度的发射率修正值。利用普朗克定律可以计算得出计入环境辐射的发射率修正值。

4 校准结果及不确定度评定

4.1 数学模型

$$T_r = T_m + \Delta T_e \tag{1}$$

式中: T_r 为浴式黑体辐射源辐射温度; T_m 为浴式黑体辐射源恒温槽介质温度; ΔT_e 为浴式黑体辐射源辐射温度发射率修正值。

4.2 不确定度来源

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2} \tag{2}$$

式中: u_1 为二等标准铂电阻温度计测量浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度重复性引入的标准不确定度,为 A 类不确定度; u_2 为二等标准铂电阻温度计两次检定周期期间稳定性引入的标准不确定度,为 B 类不确定度; u_3 为测温仪温度准确度(长期)引入的标准不确定度,为 B 类不确定度; u_4 为浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度均匀性引入的标准不确定度,为 B 类不确定度; u_5 为浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度稳定性引入的标准不确定度,为 B 类不确定度; u_6 为辐射温度发射率修正值引入的标准不确定度(包含环境辐射、波段范围的影响),为 B 类不确定度。

4.3 标准不确定度 A 类评定

利用贝塞尔公式计算重复性:

$$u_1 = s(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}{N-1}} \tag{3}$$

式中: $s(T)$ 为测量恒温槽内介质温度的标准差,℃; $\bar{T}$ 为 N 次测量恒温槽内介质温度的算术平均值,℃; T_i 为第 i 次测量恒温槽内介质温度值,℃; N 为测量恒温槽内介质温度的次数,这里取 60 次。则二等标准铂电阻温度计测量浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度重复性引入的标准不确定度为 0.002 ℃。

4.4 标准不确定度 B 类评定

1) u_2 来源于二等标准铂电阻温度计两次检定周期期间稳定性,按标准铂电阻温度计检定规程,其相邻周期检定结果的差值为 10 mK,则变化区间半宽估计为 0.010 ℃,按均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

2) u_3 来源于测温仪 1529 温度准确度(长期),按

仪器说明书,取较大值,则变化区间半宽估计为 0.009 ℃,按均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

3) u_4 来源于浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度均匀性,参见表 1,考虑到测量当中的不确定度,温度点 5.00, 20.00, 80.00, 90.00 ℃,温度均匀性变化区间半宽估计分别为 0.009, 0.007, 0.007, 0.007 ℃,按均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

4) u_5 来源于浴式黑体辐射源恒温槽内介质温度稳定性,参见表 1,考虑到测量当中的不确定度,温度点 5.00, 20.00, 80.00, 90.00 ℃,温度波动性变化区间半宽估计分别为 0.010, 0.010, 0.010, 0.009 ℃,按均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

5) u_6 来源于辐射温度发射率修正值,变化区间半宽参见表 4,按均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 。

4.5 合成标准不确定度

浴式黑体辐射源辐射温度校准标准不确定度分量及合成标准不确定度见表 5。

表 5 标准不确定度分量及合成标准不确定度

序号	不确定度分量	分类	灵敏系数	分布	k 值	标准不确定度/℃			
						温度点 5.00	温度点 20.00	温度点 80.00	温度点 90.00
1	u_1	A	1	/	/	0.002	0.002	0.002	0.002
2	u_2	B	1	均匀	$\sqrt{3}$	0.006	0.006	0.006	0.006
3	u_3	B	1	均匀	$\sqrt{3}$	0.006	0.006	0.006	0.006
4	u_4	B	1	均匀	$\sqrt{3}$	0.009	0.007	0.007	0.007
5	u_5	B	1	均匀	$\sqrt{3}$	0.010	0.010	0.010	0.009
6	u_6	B	1	均匀	$\sqrt{3}$	0.012	0.006	0.017	0.019
合成标准不确定度/℃						0.021	0.017	0.023	0.024

4.6 校准结果及扩展不确定度

校准的结果及其扩展不确定度见表 6。表 6 中辐射温度已进行了发射率修正,并考虑了环境辐射及波段的影响,环境温度范围为 18~28 ℃,波长范围为 8~14 μm。浴式黑体辐射源有效发射率评估值为 0.9993(3)。

