

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2020.03.07

参考黑体辐射源校准方法和不确定度评定

张岚, 蔡静, 孟苏

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 参考黑体辐射源主要用于辐射温度计、热像仪的校准, 为了保障亮度温度量值的准确性, 本文研究了参考黑体辐射源的比较法校准, 以某黑体辐射源标准装置为例, 介绍了校准原理、装置的组成以及相关性能分析, 最后依据该装置对参考黑体辐射源进行了不确定度评定。

关键词: 黑体辐射源; 比较法; 有效发射率; 不确定度

中图分类号: TB94

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2020)03-0030-05

Calibration Method and Uncertainty Evaluation of Reference Blackbody Radiator

ZHANG Lan, CAI Jing, MENG Su

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

Abstract: The reference blackbody radiator is mainly used for the calibration of radiation thermometer and thermal imager. In order to ensure the accuracy of radiance temperature measurement, this paper studies the calibration of reference blackbody radiation source by comparison method. Taking a blackbody radiation source standard device as an example, the calibration principle, the composition of the device and the related performance analysis are introduced. Finally, the uncertainty of the reference blackbody radiator is evaluated according to the standard device.

Key words: blackbody radiator; comparison method; effective emissivity; uncertainty

0 引言

JJG 856-2015《工作用辐射温度计》中规定, 具有检定所需亮度温度校准结果的黑体辐射源被称为参考黑体辐射源。随着红外测温技术的发展, 红外温度计/热像仪的使用越来越广泛, 采用参考黑体辐射源对其进行检定/校准是最常用有效的方法^[1]。依据 JJF 1552-2015《辐射测温用 -10℃ ~ 200℃ 黑体辐射源校准规范》和 JJG(军工)162-2019《-50℃ ~ 1000℃ 辐射测温用参考黑体辐射源检定规程》, 采用多波长有效亮度温度整体溯源的方式对参考黑体辐射源进行校准时, 一般采用比较法^[2-3]。本文以某所已有的标准黑体辐射源为例, 将对参考黑体辐射源的校准方法和不确定度评定进行介绍。

1 校准方法

采用多波长有效亮度温度整体溯源的方式对参考黑体辐射源进行校准, 校准方法为将标准黑体辐射源和被校参考黑体辐射源分别设置在校准温度点, 使用传递用辐射温度计分别测量标准黑体辐射源和被校参考黑体辐射源的亮度温度, 即可计算得到被校参考黑

体辐射源的亮度温度, 校准原理如图 1 所示^[2]。

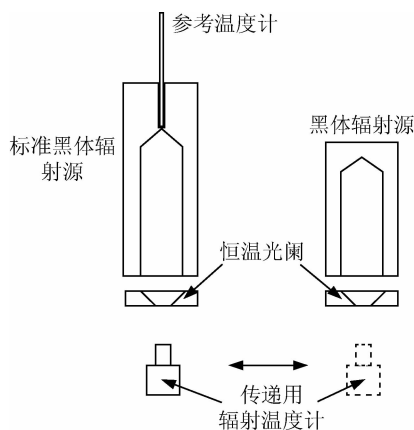


图1 参考黑体辐射源校准原理图

亮度温度测量模型公式为

$$t_c = t_s + (t_{cr} - t_{sr}) - (t_{ci} - t_{cn}) \quad (1)$$

式中: t_c 为被校参考黑体辐射源的亮度温度值, ℃; t_s 为标准黑体辐射源参考温度计示值平均值, ℃; t_{cr} 为传递用辐射温度计测量被校参考黑体辐射源的亮度温度示值平均值, ℃; t_{sr} 为传递用辐射温度计测量标准黑体辐射源的亮度温度示值平均值, ℃; t_{ci} 为被校参考黑体

辐射源控温仪表(或测温温度计)示值的平均值, $^{\circ}\text{C}$; t_{en} 为检定点, $^{\circ}\text{C}$ 。

2 黑体辐射源标准装置介绍

已有 $-50 \sim 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 黑体辐射源标准装置主要由酒精槽浴式标准黑体辐射源(简称酒精槽黑体)、水槽浴式标准黑体辐射源(简称水槽黑体)、水热管标准黑体辐射源(简称水热管黑体)、萘热管标准黑体辐射源(简称萘热管黑体)、钾钠合金热管标准黑体辐射源(简称钾钠热管黑体)、钠热管标准黑体辐射源(简称钠热管黑体)及传递用辐射温度计等配套设备组成。

热管或者恒温槽的结构设计可实现良好的温场均匀性,结合适合的长径比,喷涂高发射率的材料涂层,获得高且稳定的有效发射率,满足辐射温度量传体系的要求。将其作为标准装置,结合多波长的高稳定性传递用辐射温度计,采用比较法,可实现多波长有效亮度温度溯源^[4-5]。目前已经拥有的传递用辐射温度计有 TRT2 ($3.9\text{ }\mu\text{m}$), TRT4.82 ($8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$), KT19.42 ($4.9 \sim 5.5\text{ }\mu\text{m}$) 以及 KT19.01 ($2 \sim 2.7\text{ }\mu\text{m}$)。



图2 标准黑体辐射源外形图

浴式黑体辐射源主要是将一端密闭的管状黑体腔整体伸入工作区内,使工作区的工作介质加热黑体腔,如图3所示,从而可以在黑体腔的壁面和靶面获得均匀的温度分布。工作区采用铂电阻温度计测温与PID调节技术相结合的方式,实现较高的温度稳定性和控温准确度,根据工作区域的工作介质不同,可分为酒精槽黑体与水槽黑体^[6]。

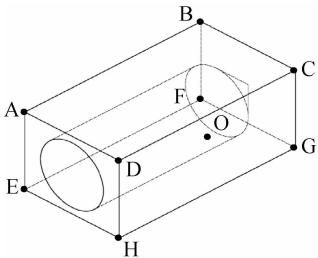


图3 浴式黑体辐射源工作区域示意图

热管式黑体辐射源的主要工作原理为:热管内部被抽成真空状态,充入适当的介质(沸点低、易挥发),

管壁有吸液芯,当热管一端受热时,毛细管中的液体迅速蒸发,蒸气在微小的压力差下流向另一端,释放能量后重新凝结成液体,液体再沿多孔材料靠毛细力的作用流向蒸发段。热管内部介质以此方式重复循环,使得热管具有较好的温度均匀性。热管依靠内部介质相变传递热量,热阻小、导热系数高,均温性好,获得均匀的温场,然后将特定尺寸的黑体腔插入热管内部便可得到较好的均匀温场,根据热管内部介质的不同可以分为水热管黑体、萘热管黑体、钾钠热管黑体与钠热管黑体,热管结构及工作流程如图4所示。

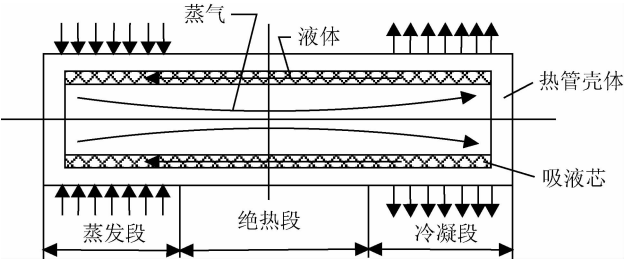


图4 热管结构及工作流程

影响标准黑体辐射源性能的关键指标是有效发射率,根据黑体辐射源空腔的形状、轴向温度分布、黑体空腔表面材料光谱发射率的实测值,并依据 Monte-carlo 法进行有效发射率的计算^[7-8]。采用标准热电偶温度传感器对黑体腔轴向温度场进行测试,测试步骤为:在标准黑体辐射源标准孔和黑体腔内分别放入标准 S 型热电偶,待温度稳定之后,记录两根标准偶的温度,按照 20 mm 的距离向外移动标准偶,温度稳定后,记录两根标准偶的温度,计算得出轴向温度场的温差。测试结果如图5所示。

标准黑体辐射源黑体腔采用圆柱-圆锥形结构,黑体腔表面喷涂高发射率涂层,依据上述轴向温度场测试数据,代入 Steep321 软件计算 $8 \sim 14\text{ }\mu\text{m}$ 下黑体腔的有效发射率,标准黑体辐射源的具体性能参数如表1所示。

表1 标准黑体辐射源具体性能参数

名称	测量范围/ $^{\circ}\text{C}$	有效发射率	黑体腔腔直径/mm
酒精槽黑体	$-50 \sim 20$	0.9998(2)	50
水槽黑体	$5 \sim 90$	0.9993(3)	100
水热管黑体	$50 \sim 150$	0.9996(1)	40
萘热管黑体	$150 \sim 350$	0.9996(1)	50
钾钠热管黑体	$300 \sim 500$	0.9995(2)	40
钠热管黑体	$500 \sim 1000$	0.9996(1)	50

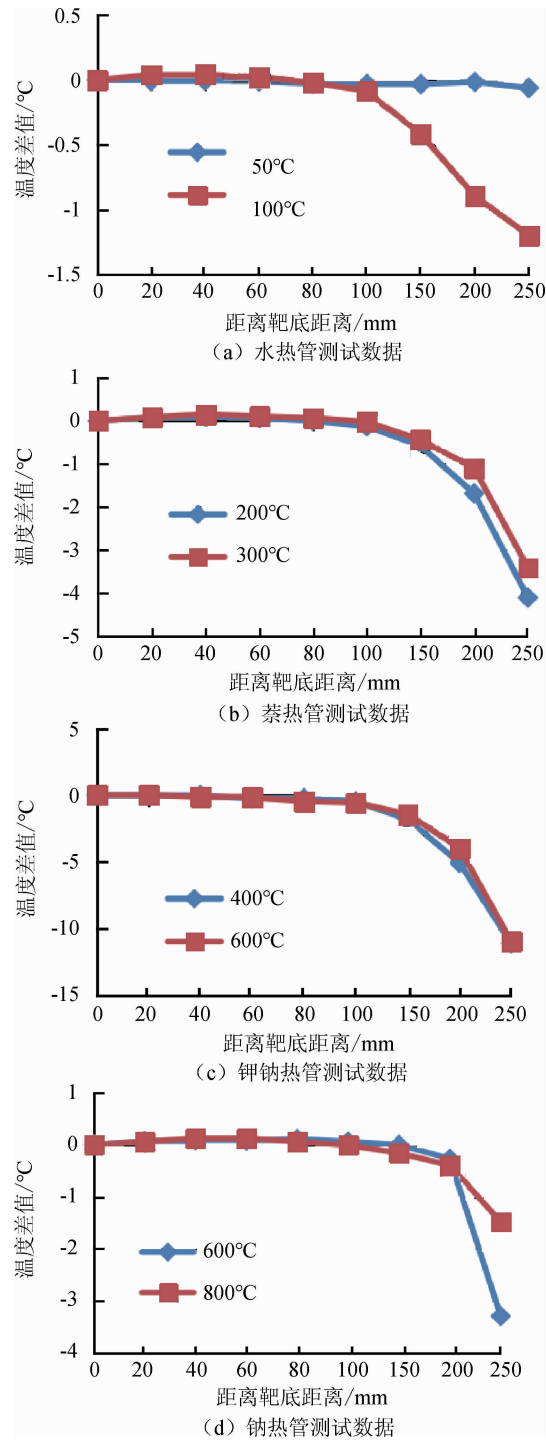


图 5 热管黑体轴向温度场测试结果

3 参考黑体辐射源校准不确定度分量分析^[2]

参考黑体辐射源亮度温度的不确定度主要来源有：标准黑体辐射源的亮度温度($t_s + \Delta t_s$)引入的不确定度，传递用辐射温度计测量温差($t_{cr} - t_{sr}$)引入的不确定度及被校参考黑体辐射源引入的不确定度。

被校参考黑体辐射源 HW112，温度范围为 300 ~

1200 °C，口径为 40 mm，腔长为 300 mm；标准黑体辐射源使用的钠热管黑体，口径为 50 mm，以一等标准 S 型热电偶作为标准器，插入标准黑体后面预留标准孔内，以 800 °C 为例对其校准进行不确定度评定。

3.1 参考温度计测量标准黑体辐射源亮度温度引入的不确定度 u_1

1) 参考温度计传递引入的不确定度 u_{11}

温度为 800 °C 时，一等标准 S 型热电偶扩展不确定度为 0.5 °C，包含因子 k 为 2 时，则

$$u_{11} = 0.25\text{ °C}$$

2) 参考温度计配套电测仪表准确度引入的不确定度 u_{12}

温度为 800 °C 时，使用数字电压表 2700 测量电压值，最大允许误差为 $\pm (30 \times 10^{-6} \times \text{测量值} + 30 \times 10^{-6} \times 200)\text{mV}$ ，转化为温度值为 $\pm 0.54\text{ °C}$ ，服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 时，则

$$u_{12} = \frac{0.54\text{ °C}}{\sqrt{3}} = 0.32\text{ °C}$$

3) 参考温度计温度与空腔底参考点温度的温差引入的不确定度 u_{13}

标准铂电阻温度计插入标准黑体辐射源的后面测温孔内，与空腔底参考点的温差估计在 $\pm 0.3\text{ °C}$ 以内，服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ 时，则

$$u_{13} = \frac{0.3\text{ °C}}{\sqrt{3}} = 0.17\text{ °C}$$

3.2 标准黑体辐射源有效发射率引入的不确定度 u_2

标准黑体辐射源采用钠热管黑体，有效发射率为 0.9996。发射率引入的温度修正量可根据标准黑体辐射源的参考温度计温度、波长、光阑温度 20 °C、有效发射率进行计算。由于标准黑体辐射源的有效发射率很高，测量时认为标准热电偶测得的温度即为亮度温度，不考虑其引入的修正值，而在不确定度评定时需要考虑其引入的不确定度。

表 2 温度修正量

波长 $\lambda/\mu\text{m}$	修正量 $\Delta t/^\circ\text{C}$
8 ~ 14	0.23
16	0.05
3.9	0.12
8	0.21
10	0.23
12	0.25

表2给出了温度为800℃时,使用不同波段的辐射温度计,标准黑体辐射源发射率 ε 为0.9996时引入的温度修正量的绝对值。由表2可知,温度为800℃时,引入的不确定度为

$$u_2 = \frac{0.23}{\sqrt{3}} = 0.14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3.3 标准黑体辐射源和被校参考黑体辐射源的亮度温度差引入的不确定度 u_3

1)传递用辐射温度计的测量分辨力引入的不确定度 u_{31}

TRT 4 的分辨力为0.1℃,服从均匀分布,区间半宽度为0.05℃,包含因子 $k = \sqrt{3}$,标准不确定度为0.029℃,由于分别测量标准黑体辐射源和被校参考,因此计算两次,则 $u_{31} = 0.04 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2)传递用辐射温度计的稳定性引入的不确定度 u_{32}

采用比较测量的方式,利用统计方法消除漂移的影响,可忽略不计。对于现场校准的参考黑体辐射源,无法实现实时测量标准黑体辐射源和被校参考黑体辐射源,因此需考虑传递用辐射温度计的短期稳定性,以3个月为例,温度为800℃时,3个月的稳定性约为0.7℃,服从均匀分布,则 $u_{32} = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

3)传递用辐射温度计SSE引入的不确定度

使用两个相同的光阑,使辐射温度计测量标准黑体辐射源和被校参考黑体辐射源时的SSE相同,可忽略此项不确定度。

4)环境温度对传递用辐射温度计影响引入的不确定度

参考黑体辐射源一般都是在实验室情况下进行校准,环境温度变化对辐射温度计的影响,可忽略不计。

3.4 被校参考黑体辐射源引入的不确定度 u_4

1)被校参考黑体辐射源分辨力引入的不确定度 u_{41}

被校参考黑体辐射源控温仪表分辨力为0.1℃,服从均匀分布,区间半宽度为0.05℃,包含因子 $k = \sqrt{3}$ 时, $u_{41} = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

2)被校参考黑体辐射源短期重复性引入的不确定度 u_{42}

采用A类评定方法重复测量10次,测量数据为:800.9, 800.8, 800.9, 800.8, 800.9, 800.9, 800.9, 801.0, 801.0, 800.9℃。计算其实验标准偏差为

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{(n-1)}} \approx 0.07 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

由于测量结果为两次测量的平均值,因此重复性

引入的不确定度分量为

$$u_{42} = \frac{s}{\sqrt{2}} = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

3)被校参考黑体辐射源亮度温度均匀度引入的不确定度 u_{43}

按照实际测量值,温度为800℃时,亮度温度均匀度为1.0℃,服从均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$,则

$$u_{43} = \frac{1.0}{\sqrt{3}} = 0.58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4)被校参考黑体辐射源亮度温度波动度引入的不确定度 u_{44}

按照实际测量值,温度为800℃时,亮度温度波动度为0.5℃,服从均匀分布,区间半宽度为0.25℃,包含因子 $k = \sqrt{3}$,则

$$u_{44} = \frac{0.25}{\sqrt{3}} = 0.14 \text{ } ^\circ\text{C}$$

上述各不确定度互不相关,测温重复性与分辨力引入的不确定度只考虑其中较大者,因此这里考虑测温重复性引入的不确定度。对于实验室校准的参考黑体辐射源不需要考虑传递用辐射温度计短期稳定性造成的影响,其合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2 + u_2^2 + u_{31}^2 + u_{32}^2 + u_{41}^2 + u_{42}^2 + u_{44}^2} = 0.75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (3)$$

扩展不确定度为

$$U = 2 \times u_c = 1.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (k = 2)$$

对于现场校准的参考黑体辐射源,无法实现实时测量标准和被校,则需要考虑传递用辐射温度计的短期稳定性,其合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_{11}^2 + u_{12}^2 + u_{13}^2 + u_2^2 + u_{31}^2 + u_{32}^2 + u_{41}^2 + u_{42}^2 + u_{44}^2} = 0.85 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

扩展不确定度为

$$U = 2 \times u_c = 1.7 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (k = 2)$$

4 结论

以黑体辐射源标准装置为例,介绍了多波长有效亮度温度整体溯源的校准方法,并对该方法的校准原理、校准装置及相关性能进行了分析。以800℃为例,对采用比较法进行参考黑体辐射源实验室校准和现场校准的不确定度评定进行了全面介绍,同时分析了校准过程中可能对测量结果造成影响的因素,现场校准需要注意考虑传递用辐射温度计的稳定性引入的影响。

依据本文介绍的评定方法,可得出任意温度点的校准不确定度,为今后使用比较法开展黑体辐射源校准工作提供了依据。同时,采用比较法对参考黑体辐射源进行定期校准,完善了辐射温度量传体系,提高了以参考黑体辐射源为标准装置的工作用辐射温度计,红外热像仪校准的准确性。

参 考 文 献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 856 - 2016 工作用辐射温度计[S]. 中国质检出版社, 2016.
- [2] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1552 - 2015 辐射测温用 - 10 $^{\circ}\text{C}$ ~ 200 $^{\circ}\text{C}$ 黑体辐射源校准规范[S]. 中国质检出版社, 2015.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. JJG(军工)162 - 2019 - 50 $^{\circ}\text{C}$ ~ 1000 $^{\circ}\text{C}$ 辐射测温用参考黑体辐射源检定规程[S]. 2019.
- [4] 原遵东, 郝小鹏, 王景辉, 等. 黑体辐射源的多波长有效亮度温度校准和不同溯源方式特点分析[J]. 计量学报, 2017(2).
- [5] 原遵东, 柏成玉, 邢波, 等. 工作用辐射温度计[M]. 北京:

中国质检出版社, 2016.

- [6] 董磊, 蔡静, 孟苏. 浴式黑体辐射源校准方法研究[J]. 计量技术, 2015, 35(1): 33 - 37.
- [7] 黄桑彦, 郝小鹏, 王景辉, 等. 铯、钠热管标准黑体辐射源研制及性能评价[J]. 计量学报, 2014, 35(2): 120 - 124.
- [8] 赵亿坤, 王景辉, 原遵东, 等. 低温标准黑体辐射源的性能研究[J]. 计量学报, 2017, 38(5).

收稿日期: 2020 - 03 - 16; 修回日期: 2020 - 04 - 07

作者简介

张岚(1988 -), 女, 工程师, 硕士, 主要从事辐射温度计量和黑体辐射源研制工作。



《宇航计测技术》2020 年第 2 期目次

温度传感器时间常数测试技术发展现状与分析
微波中功率测量技术发展综述
热防护材料高温型传感器校准技术研究
扫频绝压校准装置的设计与实现
立靶测试系统立靶密集度测量不确定度评定
基于多层感知机的密封继电器 PIND 信号识别
基于经纬仪的光束平差法定向方法改进
基于 DSP 的数控 XY 工作台同步触发测控系统
传动比和转速对永磁齿轮传动特性的影响研究

过盈滚动轴系的多周误差
高保真卫星电源负载场景重现系统设计
CCPT 系统中基于副边阻抗调制技术的反向信号与能量
叠加传输技术研究
浅析航天型号计量保证工作关于军事计量设备自主可
控工作的思考
某拖缆长度测量结构改进方法研究
一种新的飞行器运输振动负荷确定方法浅探
专用测试装备计量特性的分析方法

《宇航计测技术》2020 年第 3 期目次

长河二号授时监测接收机设计与实现
主动光频标的研究进展
基于相干极化调制的小型化 CPT 原子钟进展
汞离子微波频标汞光谱灯设计
随机追踪策略预测钟差的理论分析
小型磁选态铯原子钟产品化进展
国家综合 PNT 体系中的中国罗兰 C 导航系统
国产皮秒级商用 MTIM 测量仪比测
OPC UA 技术在智能校准系统中的应用
在片校准标准件基底边界条件影响

基于遗传基因算法的中子能谱解谱程序研究
准远场天线测量修正方法研究
一种地震动信号特征提取与分类方法
高能(450 kV)X 射线参考辐射场附加过滤研究
基于改进深度学习模型的焊缝缺陷检测算法
集成学习在高误码率下 AOS 协议识别中的应用研究
DME 询问信号捕获的设计与实现
雷达 TR 生产线测试系统远程自动现场整体校准技术
研究
测量设备校准周期调整方法研究