

〈测量技术〉

红外热像仪测温精度校准装置的建立及校准能力验证

史三省, 何志强, 张欲晓

(国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 红外热像仪广泛应用于质量控制、安全检测等领域, 为保证其测温的准确可靠, 建立了红外热像仪测温精度校准装置, 并对该校准装置进行了重复性试验、稳定性考核以及测量不确定度评定, 通过采用传递比较法验证了该校准装置校准结果的可信度和测量不确定度的合理性, 从而验证了该校准装置的校准能力, 即可以开展相应等级的红外热像仪的测温精度校准工作。

关键词: 红外热像仪; 校准装置; 校准能力验证; 重复性试验; 稳定性考核; 测量不确定度评定

中图分类号: TN219

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)05-0429-04

Building and Proficiency Testing of Calibration Device for Temperature Measurement Accuracy of Thermal Imager

SHI Sansheng, HE Zhiqiang, ZHANG Yuxiao

(State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Thermal imager is widely used in quality control, security detection and other fields. In order to ensure the accuracy and reliability of the temperature measurement, the calibration device for temperature measurement accuracy of thermal imager is built, and the repeatability test, stability assessment and measurement uncertainty evaluation of the calibration device are conducted. The reliability of calibration results and the rationality of measurement uncertainty are verified by using transfer comparison method, and thus the calibration capability of the calibration device is verified, which make it can be carried out the temperature measurement accuracy calibration of the appropriate level of thermal imager.

Key words: thermal imager, calibration device, calibration proficiency testing, repeatability test, stability assessment, measurement uncertainty evaluation

0 引言

由于红外热像仪在准确判断设备故障、有效降低维修费用和保障安全可靠供电方面有着立竿见影的功效, 所以它在电力行业得到了很广泛的应用。除此之外, 红外热像仪还广泛应用于质量控制、安全检测等涉及产品质量和人民生命财产安全的领域。为保证红外测温的准确可靠, 应对红外热像仪测温精度进行定期校准, 为此需要依据 JJF 1033-2008《计量标准考核规范》和 JJF 1187-2008《热像仪校准规范》建立红外热像仪测温精度校准装置。

查阅相关文献可以发现, 目前关于红外热像仪

测温问题的研究, 多是关注于环境温度、距离、目标表面发射率、视场角等对红外热像仪测温精度的影响以及如何提高红外热像仪测温精度等方面, 而对于红外热像仪测温精度的校准方法, 和怎样建立校准装置以及如何对建立起的校准装置进行能力验证则很少有人研究^[1-5]。

本文介绍了本单位所建红外热像仪测温精度校准装置的组成及工作原理, 并对该校准装置进行了重复性试验、稳定性考核以及测量不确定度评定, 通过采用传递比较法验证了校准结果的可信度和测量不确定度的合理性, 从而验证了该校准装置的校准能力。本文为此类校准装置的建立及校准能力验证提供了方法, 具有一定的参考价值。

1 校准装置的组成及工作原理

1.1 校准装置的组成

该校准装置由两台黑体辐射源组成，其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 标准器的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of standard device			
名称	型号	测量范围/℃	最大允许误差/℃
黑体辐射源	M340	-20~150	±0.2
黑体辐射源	M305	100~1000	±0.25%×测量值

该校准装置适用于校准最大允许误差为±1℃或±1%×测量值（℃）（取绝对值大者）及以下的红外热像仪。其主要技术指标为：

- 1) 测量范围：-20℃~1000℃。
- 2) 最大允许误差：-20℃~100℃时，±0.2℃；100℃~1000℃时，±0.25%×测量值（℃）。

1.2 校准装置的工作原理

红外热像仪测温精度校准采用直接测量法。

1.2.1 示值误差校准

示值误差是指红外热像仪的温度测量值与被测黑体辐射源的温度标准值之间的差^[6]。校准时将黑体辐射源设置为红外热像仪测量范围内的若干个温度值，将红外热像仪发射率设置为与黑体辐射源发射率相同。在测量距离为 2~3 m 的情况下，调节红外热像仪使其沿黑体辐射源的轴向方向瞄准被测黑体辐射源目标中心，测取温度值，记录红外热像仪测量值与黑体辐射源标准值，计算示值误差，应满足被校红外热像仪的最大允许误差要求。校准原理图如图 1 所示。

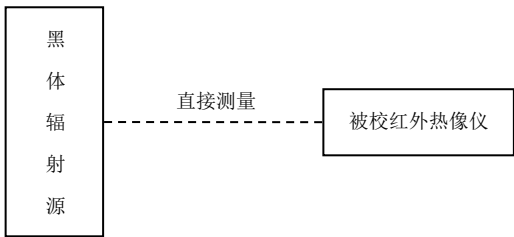


图 1 校准原理图

Fig.1 Calibration principle diagram

1.2.2 测温一致性校准

测温一致性是指在红外热像仪视场内不同区域温度测量结果的一致性^[6]。校准时将黑体辐射源温度设置为 100℃，将红外热像仪的成像画面等分为 9 个区域，在每个区域的中心点按照校准示值误差的

方法进行测温，计算各点之间的温差，应满足被校红外热像仪的最大允许误差要求。

2 校准装置的重复性试验

校准装置的重复性是指在相同测量条件下（即相同测量程序、相同观测者、在相同的条件下使用相同的测量仪器、相同的地点、在短时间内重复测量），对同一被测量进行连续多次测量所得结果之间的一致性^[7]。通常用观测值的实验标准差来表示，即：

$$S(x)=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$$

(1)

式中： $S(x)$ 为校准装置的测量重复性； x_i 为在相同条件下每次测得的实际值（ $i=1, 2, \dots, 10$ ）； \bar{x} 为各次测得值 x_i 的平均值； n 为重复测量次数。

在满足上述前提下，选定一台性能稳定的、最大允许误差为±2℃或±2%×测量值（℃）（取绝对值大者）的 P30 型红外热像仪，对黑体辐射源的 200℃点进行 10 次重复性测量，测量数据如表 2 所示。

表 2 重复性试验测量数据

Table 2 Measurement data of repeatability test				
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
199.2	199.0	199.1	199.2	199.3
x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
199.4	199.1	199.3	199.2	199.3

将数据代入公式(1)，经计算得出： $S(x)=0.12℃$ 。校准装置的测量重复性满足校准结果的测量不确定度的要求。

3 校准装置的稳定性考核

校准装置的稳定性是指校准装置保持其计量特性随时间恒定的能力^[7]。选定一台性能稳定的、最大允许误差为±2℃或±2%×测量值（℃）（取绝对值大者）的 P30 型红外热像仪，每隔一个月在相同测量条件下，对黑体辐射源的 200℃点进行一组 10 次重复性测量，取其算术平均值作为该组的测量结果。共观测 4 组，取 4 个测量结果中的最大值和最小值之差，作为该校准装置在该时间段内的稳定性。测量数据如表 3 所示。

由表 3 可知，校准装置的稳定性为 0.49℃，小于校准装置的最大允许误差的绝对值，故校准装置的稳定性考核合格。

4 校准结果的测量不确定度评定

使用 M305 型黑体辐射源对红外热像仪进行校准, 在 200℃ 点进行不确定度的评定。

表 3 稳定性考核测量数据

Table 3 Measurement data of stability assessment

组别	#1	#2	#3	#4
x ₁	199.1	199.5	199.7	200.2
x ₂	199.6	199.7	199.6	200.1
x ₃	199.4	199.6	199.5	200.1
x ₄	199.7	199.5	199.9	200.1
x ₅	199.8	199.5	199.7	199.8
x ₆	199.9	199.8	199.6	200.2
x ₇	199.9	199.7	199.4	200.2
x ₈	199.3	199.6	199.4	199.9
x ₉	199.4	199.6	199.7	199.9
x ₁₀	199.6	199.9	199.9	200.1
\bar{x}	199.57	199.64	199.64	200.06

4.1 数学模型及不确定度来源分析

红外热像仪示值误差校准的数学模型为:

$$\Delta t_i = t_i - T_i \tag{2}$$

式中: Δt_i 为在第 i 个校准点, 被校红外热像仪的示值误差, ℃; t_i 为在第 i 个校准点, 被校红外热像仪的示值, ℃; T_i 为在第 i 个校准点, 黑体辐射源的示值, ℃。

对红外热像仪校准结果不确定度有影响的量为被校红外热像仪的示值 t_i 和黑体辐射源的示值 T_i , 这两个量彼此独立, 因此, 其合成不确定度为^[8]:

$$u_c = \sqrt{u_{t_i}^2 + u_{T_i}^2} = \sqrt{c_{t_i}^2 u^2(t_i) + c_{T_i}^2 u^2(T_i)} \tag{3}$$

式中: u_{t_i} 为由输入量 t_i 引入的标准不确定度分量;

u_{T_i} 为由输入量 T_i 引入的标准不确定度分量; c_{t_i} 为由数学模型确定的输入量 t_i 的灵敏系数, 由式(2)得到:

$$c_{t_i} = \partial(\Delta t_i) / \partial t_i = 1$$

式中: c_{T_i} 为由数学模型确定的输入量 T_i 的灵敏系数, 由式(2)得到:

$$c_{T_i} = \partial(\Delta t_i) / \partial T_i = -1$$

式中: $u(t_i)$ 为输入量 t_i 的标准不确定度; $u(T_i)$ 为输入量 T_i 的标准不确定度。

4.2 测量不确定度评定

4.2.1 标准不确定度的评定

1) 输入量 t_i 的标准不确定度 $u(t_i)$ 的评定

① 红外热像仪测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

由前面第 2 章的重复性试验得到, 单次测量的实验标准差 $S(x) = 0.12^\circ\text{C}$ 。在实际校准中, 常取 4 次读数的平均值作为测量结果, 则标准不确定度 $u_1 = S(x) / \sqrt{4} = 0.06^\circ\text{C}$ 。

② 红外热像仪示值分辨力引入的标准不确定度分量 u_2

被校红外热像仪在校准温度点的示值分辨力为 0.1°C , 按均匀分布考虑, 则标准不确定度 $u_2 = (0.1^\circ\text{C} / 2) / \sqrt{3} = 0.03^\circ\text{C}$ 。

则输入量 t_i 的标准不确定度 $u(t_i)$ 为:

$$u(t_i) = \sqrt{0.06^2 + 0.03^2} = 0.07^\circ\text{C}$$

2) 输入量 T_i 的标准不确定度 $u(T_i)$ 的评定

黑体辐射源在 200°C 点的最大允许误差为 $\pm 0.25\% \times 200^\circ\text{C} = \pm 0.5^\circ\text{C}$, 按均匀分布考虑, 则输入量 T_i 的标准不确定度 $u(T_i)$ 为:

$$u(T_i) = 0.5 / \sqrt{3} = 0.29^\circ\text{C}$$

4.2.2 合成标准不确定度的计算

由式(3)可得, 合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{1^2 \times 0.07^2 + (-1)^2 \times 0.29^2} = 0.3^\circ\text{C}$$

4.2.3 扩展不确定度的确定

在给出校准结果时, 应报告扩展不确定度 U , 它由合成标准不确定度乘以包含因子 k 得到^[8], 即:

$$U = k \times u_c$$

一般取 $k = 2$, 则 $U = 0.6^\circ\text{C}$ 。

5 校准结果的验证

为了验证校准结果的可信度和测量不确定度的合理性, 采用传递比较法, 即选定一台稳定性较好的红外热像仪作为被校对象, 用本单位的校准装置对其进行校准, 然后将其送到中国计量科学研究院, 用另一更高级校准装置对其进行校准。若本单位和中国计量科学研究院的校准结果分别为 y 和 y_0 , 它们的扩展不确定度分别为 U 和 U_0 , 则应满足^[7, 9-10]:

$$|y - y_0| \leq \sqrt{U^2 + U_0^2} \tag{4}$$

表 4 为本单位和中国计量科学研究院分别校准所得的结果。

由表 4 可知,验证结果满足式(4)的要求,故校准结果的可信度和测量不确定度的合理性得以验证。

表 4 验证结果
Table 4 Validate results

校准点/℃	本单位		中国计量院	
	y /℃	U /℃ (k=2)	y ₀ /℃	U ₀ /℃ (k=2)
200	199.2	0.6	199.3	0.32

6 结论

依据 JJF 1033-2008《计量标准考核规范》建立了红外热像仪测温精度校准装置,并对其校准能力进行了试验验证。经验证,该校准装置的重复性满足校准结果的测量不确定度的要求,稳定性小于校准装置的最大允许误差的绝对值,校准结果和测量不确定度验证合格,符合 JJF 1187-2008《热像仪校准规范》的要求,可以开展测量范围为-20℃~1000℃,最大允许误差为±1℃或±1%×测量值(℃)(取绝对值大者)及以下的红外热像仪的测温精度校准工作。本文为此类校准装置的建立及校准能力验证提供了方法,具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 张健, 杨立, 刘慧开. 环境高温物体对红外热像仪测温误差的影响[J]. 红外技术, 2005, 27(5): 419-422.
ZHANG Jian, YANG Li, LIU Hui-kai. Effect of environmental object on infrared temperature measurement[J]. *Infrared Technology*, 2005, 27(5): 419-422.

[2] 苏佳伟, 石俊生, 王炜穉. 距离对红外热像仪测温精度影响及提高精度的实验研究[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 587-590.
SU Jiawei, SHI Junsheng, WANG Weise. Experimental study of infrared thermal imagers about influence of distance for temperature measurement accuracy and method of improving accuracy[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 587-590.

[3] 胡剑虹, 宁飞, 沈湘衡, 等. 目标表面发射率对红外热像仪测温精度的影响[J]. 中国光学, 2010, 3(2): 152-156.
HU Jianhong, NING Fei, SHEN Xiangheng, et al. Influence of surface emissivity of objects on measuring accuracy of infrared thermal imagers[J]. *Chinese Optics*, 2010, 3(2): 152-156.

[4] 李颖文, 陈福胜, 杨长城, 等. 浅谈红外测试标准的传递[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 119-123.
LI Yingwen, CHEN Fusheng, YANG Changcheng, et al. Introduction to infrared test standard transfer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 119-123.

[5] 黄剑侠, 徐毓雄, 赵自文. 红外成像目标模拟器现场原位校准技术初探[J]. 红外技术, 2015, 37(12): 1032-1035.
HUANG Jianxia, XU Yuxiong, ZHAO Ziwen. Infrared imaging target simulator site in situ calibration technology[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 1032-1035.

[6] 柏成玉, 邢波, 原遵东. 热像仪校准规范[S]/JJF 1187-2008. 北京: 中国计量出版社, 2008: 1-10.
BAI chengyu, XING bo, YUAN zundong. Calibration Specification for Thermal Imagers [S]/JJF 1187-2008. Beijing: Chinese Metrology Press, 2008: 1-10.

[7] 丁跃清, 邓媛芳. 计量标准考核规范[S]/JJF 1033-2008. 北京: 中国计量出版社, 2008: 1-66.
DING yueqing, DENG yuanfang. Rule for the Examination of Measurement Standard[S]/JJF 1033-2008. Beijing: Chinese Metrology Press, 2008: 1-66.

[8] 叶德培, 赵峰, 施昌彦. 测量不确定度评定与表示[S]/JJF 1059.1-2012. 北京: 中国质检出版社, 2013: 1-53.
YE depei, ZHAO feng, SHI changyan. Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement [S]/JJF 1059.1-2012. Beijing: China Zhijian Publishing House, 2013: 1-53.

[9] 中国合格评定国家认可委员会. 能力验证规则[S]/CNAS-RL02: 2016. <https://www.cnas.org.cn/images/rkgf/sysrk/rkgz/2016/04/19/AD876D351ACBD95F881400B2D8D04AC2.pdf>, 2016: 1-21.
China National Accreditation Service for Conformity Assessment. Rules for Proficiency Testing [S]/CNAS-RL02: 2016. <https://www.cnas.org.cn/images/rkgf/sysrk/rkgz/2016/04/19/AD876D351ACBD95F881400B2D8D04AC2.pdf>, 2016: 1-21.

[10] 中国合格评定国家认可委员会. 能力验证结果的统计处理和能力评价指南[S]/CNAS-GL02: 2014. <https://www.cnas.org.cn/images/rkgf/sysrk/rkzn/2015/06/04/2E558652DDEE55F50EDEE49E64499797.pdf>, 2014: 1-20.
China National Accreditation Service for Conformity Assessment. Guidance on Statistic Treatment of Proficiency Testing Results and Performance Evaluation [S]/CNAS-GL02: 2014. <https://www.cnas.org.cn/images/rkgf/sysrk/rkzn/2015/06/04/2E558652DDEE55F50EDEE49E64499797.pdf>, 2014: 1-20.