

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0293-05

直接法和间接法辐射源尺寸效应测量方法研究

郝小鹏¹ 原遵东¹ 赵婉君²

¹中国计量科学研究院热工计量科学与材料特性测量技术研究所, 北京 100013

²北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

摘要 介绍了辐射源尺寸效应(SSE)的定义、测量方法和原理及精密辐射温度计的测温原理。通过直接法和间接法测量标准辐射温度计 RT9032 和德国 KE 公司的 LP4 型辐射温度计的辐射源尺寸效应, 分析了两种测量辐射源尺寸效应方法的差异, 讨论了产生差异的主要原因。这些原因包括由光阑内壁和边缘反射进入黑孔的反射光, 黑孔吸收造成的亮信号的幅度降低和其他杂散光影响因素等。而对于直接法测量 SSE 不确定度较大的问题, 需要采用均匀性、稳定性非常好的光源, 并且通过检测信号来修正漂移。

关键词 计量; 辐射温度计; 辐射源尺寸效应; 直接法; 间接法

中图分类号 TB942 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201037s1.0293

Research about the Direct Method and Indirect Method of the Size-of-Source Effect of Radiation Thermometers

Hao Xiaopeng¹ Yuan Zundong¹ Zhao Wanjun²

¹Division of Thermometry and Materials Evaluation, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

²School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract The definition, measuring methods and principle of size-of-source effect (SSE), and also the measuring principle of radiation thermometer are introduced in this paper. The SSE results with direct and indirect method of RT9032 and LP4 are shown in this paper. The data of SSE got by indirect method is bigger than that of direct method in our measurement system. There are several aspects contributed to the difference of SSE, such as the reflections from the inner cone and edge of the aperture into the black spot, the radiance of the sphere reduced by black spot, and other aspects including the reflections between the front element of the thermometer and the black spot, optical misalignment radiation thermometers and so on. If SSE is measured by direct method employed the integrating sphere, the monitor is necessary to revise the drift of the radiation.

Key words metrology; radiation thermometer; size-of-source effect; direct method; indirect method

1 引 言

在实验室和工业温度测量应用中, 辐射温度计的辐射源尺寸效应(SSE)是测量误差和不确定度的重要来源之一^[1~3]。当测量或比较两个尺寸不同但是具有相同温度的黑体辐射源的单色辐射亮度时会得到不同的信号, 即辐射温度计示值不同, 即测量信号与辐射源的大小有关, 此现象就是辐射源尺寸效应。因此辐射温度计测量信号依赖于目标尺寸和围绕目标的亮度分布。而如果得到不受目标大小影

响的结果, 就需要利用 SSE 的结果来进行修正。

SSE 来源于辐射的衍射和散射、辐射温度计光学系统的不完美和光学畸变等影响。而 SSE 作为精密辐射温度计的关键参数之一, 其测量的准确性对于辐射温度计结果的准确性至关重要。目前 SSE 的测量方法分为直接法和间接法, 此两种方法对仪器的状态和测量精度都有不同的要求。本文介绍了辐射源尺寸效应的定义, 阐述了直接法和间接法的测量原理和区别, 并分析了两种方法测量结果差异

收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-06-08

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAF06B031)资助课题。

作者简介: 郝小鹏(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事辐射测温方面的研究。E-mail: haoxp@nim.ac.cn

的原因,并且介绍了精密辐射温度计的测温原理。

2 实验原理

2.1 标准辐射温度计的测温原理

普朗克黑体辐射定律给出了黑体的光谱辐射亮度 L 与波长、温度之间的确定关系为

$$L(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} [\exp(c_2/\lambda T) - 1]^{-1}, \quad (1)$$

式中 c_1, c_2 为第一、第二辐射常数, λ 为真空中的波长。精密辐射温度计采用干涉滤光片作为单色器,其光电探测器——硅光电二极管的输出光电流为

$$I_p = \int_0^{\infty} \phi(\lambda, T) R(\lambda) d\lambda = \int_0^{\infty} A \Omega L(\lambda, T) \tau(\lambda) R(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

式中 $\phi(\lambda, T)$ 为光电探测器接收的光谱辐射通量, A 为辐射温度计测量目标的面积, Ω 为辐射温度计受光立体角, T 为被测黑体的温度, $\tau(\lambda)$ 为干涉滤光片的光谱透射率, $R(\lambda)$ 为光电探测器的光谱响应。(2) 式为探测器输出 I_p 和温度 T 的单值关系。

若已知精密辐射温度计在参考温度点 T_r 时其光电探测器输出为 I_{pr} 。使

$$\frac{I_p}{I_{pr}} = \frac{\int_0^{\infty} L(\lambda, T) \tau(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} L(\lambda, T_r) \tau(\lambda) R(\lambda) d\lambda} = \frac{L(\lambda_e, T)}{L(\lambda_e, T_r)}, \quad (3)$$

式中 λ_e 为在温度间隔 T_r, T 之间的平均有效波长。将普朗克公式代入(3)式,则有

$$T = \frac{c_2}{\lambda_e \ln \left\{ \frac{I_{pr}}{I_p} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda_e T_r}\right) - 1 \right] + 1 \right\}}. \quad (4)$$

当有效波长 λ_e 随温度的变化可忽略时,温度 T 与光电探测器的输出呈单值关系且为一元显函数。(4) 式是精密辐射温度计计算温度的基本公式。测量非黑体时, T 是被测辐射源的亮度温度。

2.2 SSE 测量方法的原理

SSE 的测量方法分为直接法和间接法。对于直接法测量 SSE 是通过辐射温度计直接测量面积可调的均匀光源的信号得到的,辐射温度计的瞄准焦点放在光源面的中心处,如图 1(a)所示。将最大面积的光源信号归一化得到信号与光源尺寸的曲线即为辐射源尺寸效应的结果^[4]。直接法要求光源的均匀性非常高。直接法测量 SSE 的计算公式为^[5]

$$\sigma(d, d_0) = \frac{v(d) - v(d_0)}{v(d_{\max})}, \quad (5)$$

式中 $\sigma(d, d_0)$ 为辐射源直径从 d 到 d_0 之间变化的信号值与最大辐射源直径的比值,即 d 到 d_0 的 SSE 值; $v(d)$ 表示辐射源直径为 d 时辐射温度计的亮度值, d 是均匀光源的直径, d_0 是光源的最小直径, d_{\max} 为光源的最大直径。

间接法是一种常用的、不确定度较低的测量 SSE 的方法。此方法是辐射温度计测量一个大面积的改变直径的辐射源。而辐射温度计的视场瞄准一个不透光的黑体(在石英玻璃板上打洞,并涂上反射率较高的黑漆),如图 1(b)所示。间接法测量 SSE 的计算公式为^[5]

$$\sigma(d, d_0) = \frac{v(d) - v(d_0)}{v(L)}, \quad (6)$$

式中 $\sigma(d, d_0)$ 为辐射源直径从 d 到 d_0 之间变化的信号值与最亮处信号的比值,即 d 到 d_0 的 SSE 值; $v(L)$ 表示在辐射源直径为 d_{\max} 时,辐射温度计的视场放在不透光的黑点周围的亮区的亮度值。

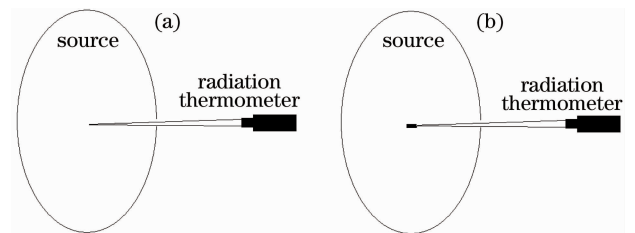


图 1 辐射源尺寸效应测量方法示意图
(a)直接法, (b)间接法

Fig. 1 Schematic of the method of size-of-source effect
(a) direct method, (b) indirect method

3 实验仪器

中国计量科学研究院在建立我国 961.78 °C 以上温区国际温标(ITS-90)的基础上^[6,7],自 20 世纪 90 年代起,已经研制了用作温标传递标准及精密测温的波长为 660 nm 的新型精密光电高温计。相对于老型号的光电高温计(命名为 RT9031),新的光电高温计 RT9032 具有体积小、重量轻、便携性强等优点。而随着光电技术的飞速发展,器件性能不断提高,使得辐射温度计的测温下限不断下延,中心波长为 900 nm 的标准辐射温度计 RT9032-900 近期也已经研制完成,测温范围下延到 600 °C。新型辐射温度计 RT9032-660 和 RT9032-900 测量铜点的扩展不确定度分别为 0.3 K。

实验主要应用三台标准辐射温度计,型号是

RT9032-660, RT9032-900 和 LP4。RT9032 系列辐射温度计由中国计量科学研究院研制,中心波长分别为 660 nm 和 900 nm,而 LP4 辐射温度计是由德国 KE 公司研制生产的,中心波长为 650 nm。相关仪器的详细参数列于表 1。用于测量辐射温度计辐射源尺寸效应的辐射源采用了内径为 800 mm,开口直径为 96 mm,漫反射层为聚四氟的积分球。功率为 150 W,额定电压为 21 V 的 6 个卤钨灯均匀分布在积分球开口处。积分球在额定功率下,开口范围为 48 mm×48 mm 的亮度均匀性为 $\pm 5 \times 10^{-4}$,其结果如图 2 所示。本实验使用了内径从 5~96 mm 的 6 个光阑和具有 2 mm 和 4 mm 直径黑孔的石英玻璃作为瞄准目标。

表 1 辐射温度计的性能参数

Table 1 Radiation thermometer specifications

	RT	RT	LP4
	9032-660	9032-900	
Temperature range / °C	800~3000	600~2000	677~3527
Center wavelength / nm	660	900	650
Band width / nm	10	20	10
Focus distance / mm	150	150	143
Field stop / mm	0.33	0.33	0.25
Resolution / °C	0.001	0.001	0.001

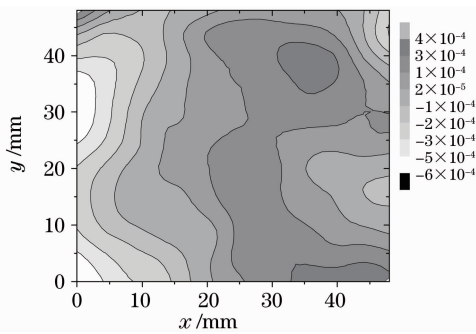


图 2 范围为 48 mm×48 mm 的积分球开口的均匀性图

Fig. 2 Uniformity of integrating sphere source in the range 48 mm×48 mm of the exit port

4 SSE 结果

在 SSE 实验中,几个不同尺寸的光阑轮流地放置在积分球开口处,以此来得到不同面积光源的目的。图 3 为 RT9032 和 LP4 通过直接法和间接法测量的 SSE 结果。从光阑直径由 5 mm 变化到 96 mm,RT9032-660,RT9032-900 和 LP4 的直接法测量 SSE 结果分别为 0.015%,0.105%和 0.244%,而间接法测量 SSE 结果分别为 0.029%,0.122%和 0.257%,其中黑孔直径为 2 mm。通过两种方法得

到的 SSE 结果有明显的差异(差值用 Δ 表示),差异的平均值约为 0.015%。表 2 给出了所有的相关数据。

表 2 采用直接法和间接法在光源直径由 5 mm 变化到 96 mm 时 RT9032 和 LP4 的 SSE 测量结果

Table 2 SSE results of RT9032 and LP4 from 5 mm to 96 mm source diameter measured by direct and indirect method

Measurement method	LP4	RT	
		9032-660	9032-900
Direct method / %	0.015	0.105	0.244
Indirect method / %	0.029	0.122	0.257
Δ / %	0.014	0.017	0.013

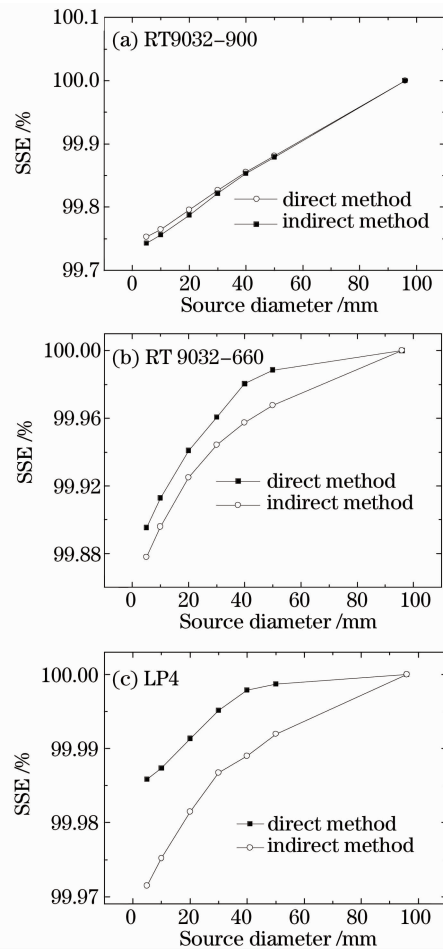


图 3 RT9032 和 LP4 通过直接法和间接法测量 SSE 结果

Fig. 3 SSE determined for RT9032 and LP4 using the integrating sphere source as radiation source by direct and indirect method

5 实验结果讨论

如图 4 所示,通过直接法和间接法测量辐射温度计的 SSE 的结果存在差值。在该实验测量系统

下,直接法测量的 SSE 结果比间接法测量 SSE 的结果小,其差值 Δ 约为 0.015% (为三台辐射温度计的平均值)。 Δ 可能由这两种测量方法的差异引入的反射光、杂散光或者是其他因素引起,差值 Δ 的

主要组成为

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots, \quad (7)$$

式中 Δ_r 为不同因素造成的差异值。

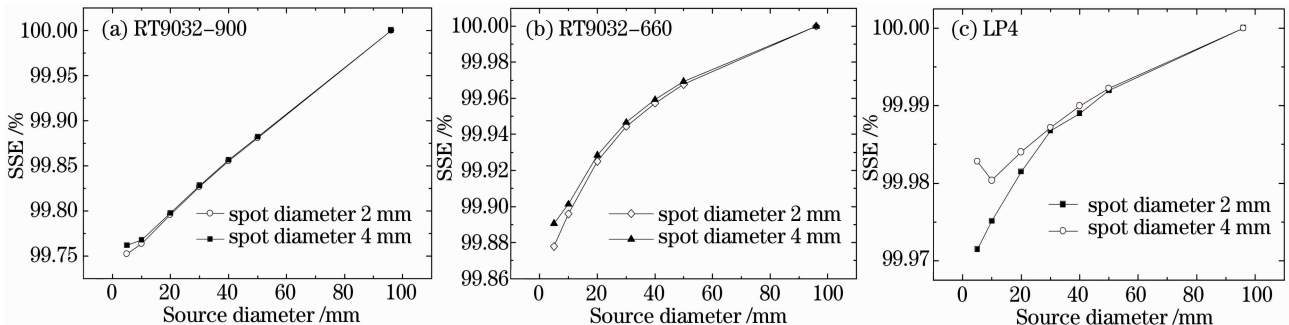


图 4 黑孔直径为 2 mm 和 4 mm 时间接法测量的 SSE 结果

Fig. 4 SSE result measurement with black spot diameter 2 mm and 4 mm by indirect method

首先, Δ 主要来源于通过光阑内壁和边缘反射进入黑孔的反射光。为了观察黑孔直径大小对于反射光进入量的影响,做了不同黑孔直径的实验,其结果如图 4 所示。由图 4 看出,这个差值[由 Δ_1 表示, $\Delta_1 = (4 \text{ mm 黑孔直径}) - (2 \text{ mm 黑孔直径})$]随着辐射源尺寸的变小而变大。差值 Δ_1 在光阑直径为 5 mm 时约为 0.011%,而在光阑直径为 10 mm 时约为 0.005% (如表 3 所示,所有数值在光源直径为 96 mm 处归一化)。辐射温度计测量信号在辐射源直径为 5 mm 时大于辐射源直径为 10 mm 时的情况,这种反常现象在图 4(c) 中观察得到。光线从光阑内壁和边缘被反射进入黑孔中,如图 5(c) 所示。光阑尺寸越小,能够通过光阑内壁和边缘被反射进入黑孔的光线越多。而黑孔直径越大,反射进入黑孔的光线越多。所以从光阑内壁和边缘反射进入黑

孔的光线是造成反常现象的主要原因。图 3 中的间接法测量的 SSE 数据是在黑孔直径为 2 mm 的情况下测量得到的,所以对于此测量情况而言, Δ_1 将会小于 0.011%。但是 Δ_1 仍然是影响 Δ 的最大因素。

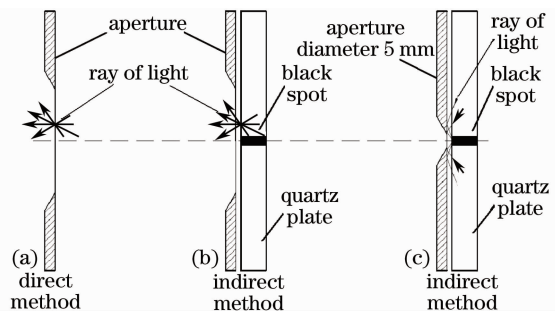


图 5 测量系统示意图

Fig. 5 Abridged general view of the measurement system

表 3 采用间接法在光源直径由 5 mm 变化到 96 mm 时 RT9032 和 LP4 的 SSE 测量结果

Table 3 SSE results of RT9032 and LP4 from 5 mm to 96 mm source diameter measured by indirect method

	LP4		RT9032-660		RT9032-900	
Aperture diameter /mm	5	10	5	10	5	10
Spot diameter 2 mm /%	99.971	99.975	99.878	99.896	99.753	99.764
Spot Diameter 4 mm /%	99.983	99.980	99.890	99.901	99.762	99.768
Δ_1 /%	0.012	0.005	0.012	0.005	0.009	0.004

从直接法和间接法两种方法的测量系统的结构分析,间接法测量所使用的黑孔对光线的吸收使测量亮信号 $v(L)$ 的幅度降低,造成间接法测量的 SSE 变大,引起间接法与直接法的测量结果存在差异 Δ_2 ,如图 5(b) 所示。当 SSE 采用间接法测量时,用一块中间带有黑孔的石英玻璃板。而辐射源亮度受到黑孔的影响而降低。根据间接法 SSE 的计算公

式(5)式,当辐射源的亮信号 $v(L)$ 降低时, SSE 的结果将会变大。

其他方面对于 Δ 的贡献包括间接法测量 SSE 时通过辐射温度计光学元器件反射进入黑孔的光线,以及背景辐射进入黑孔的杂散光等因素。这些因素与辐射温度计的光学系统和测量的背景辐射相关,且影响量非常小,此处不作讨论。

6 结 论

介绍了辐射源尺寸效应的定义,以及测量该效应的方法、相关测量系统和相互差异,并且介绍精密辐射温度计的测温原理。通过直接法和间接法测量标准辐射温度计 RT9032 和德国 KE 公司的 LP4 型辐射温度计的辐射源尺寸效应,分析了两种测量 SSE 方法的测量结果,讨论了产生差异的主要原因。造成间接法测量结果大于直接法的原因主要有三个,分别是:1)由光阑内壁和边缘反射进入黑孔的反射光;2)黑孔吸收造成的亮信号幅度降低;3)其他杂散光影响因素等。而对于直接法测量 SSE 不确定度较大的问题,需要采用均匀性、稳定性非常好的光源,并且通过检测信号来修正漂移。

参 考 文 献

- 1 P. Bloembergen. On the correction for the size-of-source effect corrected by background radiation [C]. Proceedings of 7th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, 1999, 607~612
- 2 G. Machin, M. Ibrahim. Size of source effect and temperature uncertainty: I -high temperature systems[C]. Proceedings of 7th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, 1999, 681~686
- 3 G. Machin, M. Ibrahim. Size of source effect and temperature uncertainty: II -low temperature systems[C]. Proceedings of 7th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, 1999, 687~692
- 4 M. Bart, E. Ham, P. Saunders. A new method to determine the size-of-source effect [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2007, **28**: 2111~2117
- 5 H. Yoon, C. Gibson, V. Khromchenko *et al.*. SSE- and noise-optimized InGaAs radiation thermometer [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2007, **28**: 2076~2086
- 6 Zhao Qi, Yuan Zundong, Li Dajin *et al.*. A new direct current photoelectric temperature comparator for realization of the new ITS-90[J]. *Acta Metrologia Sinica*, 1990, **11**(4): 241~247
赵 琪, 原遵东, 李大今 等. 用于新温标 ITS-90 的直流光电温度比较仪[J]. *计量学报*, 1990, **11**(4): 241~247
- 7 Yuan Zundong, Zhao Qi, Duan Yuning *et al.*. A new transfer standard photoelectric pyrometer[J]. *Acta Metrologia Sinica*, 2003, **24**(4): 257~261
原遵东, 赵 琪, 段宇宁 等. 新型精密光电高温计[J]. *计量学报*, 2003, **24**(4): 257~261