

# 消除背景辐射影响的辐射源尺寸效应测量模型

原遵东

(中国计量科学研究院热工计量科学与材料特性测试技术研究所, 北京 100013)

**摘要** 在较低温度下测量辐射温度计辐射源尺寸效应(SSE)时必须考虑背景辐射对测量的影响,其计算模型涉及无限大辐射源条件下的辐射温度计探测器输出。基于辐射温度计探测器温度对测温模型和 SSE 测量模型的影响分析,提出了利用与背景辐射平衡的虚拟探测器温度的 SSE 计算模型,避免了已有测量方法中对无限大辐射源的需要或因此引入的近似。推导了基于温度数字显示辐射温度计示值的 SSE 计算公式。提出了优化 SSE 测量结果的源温度、分辨力和仪表发射率设置等测量条件。

**关键词** 计量学;辐射源尺寸效应;虚拟探测器温度;背景辐射;辐射温度计

**中图分类号** TB942;TB96;TH811.2;O551.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1212002

## A New Background Radiation-Balanced Model for the Size-of-Source Effect Measurement

Yuan Zundong

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

**Abstract** The background radiation effect of the measurement for the size-of-source effect (SSE) of radiation thermometers must be considered at low and median temperature. The calculation model includes items of radiation thermometer outputs to measure an infinite-size radiation source. After analyzing the influence of the detector temperature on the models of temperature and SSE measurements, a novel calculation model, utilizing a suppositional detector temperature balanced with the background radiation for the SSE measurement is presented. This method prevents the need for an infinite-size radiation source and unavoidable approximation. The relations of the SSE and the increase of temperature reading are given. The measurement conditions of the source temperature, reading resolution and thermometer emissivity setting are analyzed to optimize the result of the SSE measurement.

**Key words** metrology; size-of-source effect; suppositional detector temperature; background radiation; radiation thermometer

**OCIS codes** 120.6780; 120.5630; 120.3930

### 1 引 言

理想辐射温度计的输出信号只与由其光学系统确定的视场之内的目标辐射亮度有关。而实际辐射温度计的输出信号还与其视场以外的背景辐射的强弱有关,表现为输出信号与被测辐射源的大小有关,这被称为辐射温度计的辐射源尺寸效应(SSE)。SSE是辐射温度计光学系统中灰尘引起的散射、透镜表面间的反射、光学系统的像差及衍射等效应的综合结果<sup>[1]</sup>。在光学领域的部分文献和较早的辐射测温文献中,SSE常被归入杂散光影响<sup>[2,3]</sup>。SSE是影响辐射温度计测温的主要不确定因素之一,对

于不同于校准源尺寸条件的测温结果以及不同源尺寸测温结果之间的比较,需要修正 SSE 的影响<sup>[1,4~8]</sup>。国际电工委员会(IEC)制定的辐射温度计国际标准中也将 SSE 列为辐射温度计的重要性能参数<sup>[9]</sup>,将在后续标准中制定对 SSE 的测量方法。

SSE对温度基准和工业测温的影响是各国计量学研究的热点。Bloembergen 等<sup>[1,5]</sup>提出确定 SSE 的两种方法:直接法和间接法。比对研究表明后者的测量不确定度优于前者<sup>[10,11]</sup>。Saunders 等<sup>[12]</sup>提出不受辐射源尺寸限制的 SSE 测量新方法——扫描法,并证明三种方法等价。Bloembergen 等<sup>[1,4~6]</sup>

收稿日期: 2011-05-17; 收到修改稿日期: 2011-07-11

作者简介: 原遵东(1960—),男,研究员,主要从事温度计量和辐射测温方面的研究。E-mail: yuandz@nim.ac.cn

研究了对 SSE 影响的一般性修正公式,适用于温度  
计输出信号与被测亮度成正比的情形。对于低温测  
量,Bloembergen 等<sup>[5,7]</sup>提出对低温辐射温度计 SSE  
的测量应修正辐射源以外的背景辐射的影响;  
Pušnik 等<sup>[13]</sup>指出受辐射源尺寸的限制,修正背景辐  
射影响不得不采用近似处理方法。在其他光学测量  
方法中,不同强度或颜色的背景也常常是影响测量  
结果的重要因素<sup>[14~16]</sup>。

本文分析了现有的低温 SSE 测量方法存在的  
不足,基于辐射温度计测温原理,提出了能消除背景  
辐射影响的更简单的 SSE 测量与计算模型,讨论了  
对 SSE 测量方案的优化,并给出了典型的 SSE 测量  
结果。

## 2 SSE 测量理论

本文讨论具有单一波段的辐射温度计,大多数  
辐射温度计均属此类。

### 2.1 现有 SSE 测量理论

较早的研究 SSE 的文献是针对高温测量的。  
Bloembergen 等<sup>[1,4~6]</sup>则系统地提出了 SSE 理论。

辐射温度计的测量信号是对温度为  $T$ 、半径为  $r$   
的等温圆形黑体辐射源及辐射源之外的温度为  $T_b$   
的等温黑体背景辐射的响应,表示为  $S(r, T, T_b)$ ,  
其中  $r$  始终大于辐射温度计的设计目标直径。这里  
的  $S(r, T, T_b)$  限定为与入射辐射通量成正比。

对于高温测量,辐射温度计对背景辐射的响应  
可忽略,即认为背景温度  $T_b = 0$  K。此时,辐射温度  
计的输出信号为  $S(r, T, 0)$ ,亦可省略背景温度参  
数,表示为  $S(r, T)$ 。

辐射温度计的 SSE 函数表示为

$$\sigma(r) = \frac{S(r, T, 0)}{S(\infty, T, 0)} = \frac{S(r, T)}{S(\infty, T)}, \quad (1)$$

它表示辐射温度计对半径为  $r$  的辐射源的响应与对  
无限大辐射源的响应之比。

在对 SSE 的实际测量中难以实现无限大辐射  
源,常以可实现的辐射源最大半径  $r_{\max}$  为参考条件  
表示测量结果:

$$\sigma(r, r_{\max}) = \frac{S(r, T)}{S(r_{\max}, T)} = \frac{\sigma(r)}{\sigma(r_{\max})}. \quad (2)$$

对用于高温测量的辐射温度计的典型测量结  
果<sup>[17]</sup>见图 1(a),图中结果分别为中心波长 660 nm  
和 900 nm 的 RT9032 型高温计测得。但该定义应  
用于源温度接近或低于环境温度的低温测量 SSE  
时会出现如图 1(b)所示的背景辐射效应<sup>[7]</sup>。为此,  
Bloembergen 等<sup>[5,7,18]</sup>在辐射温度计测量模型中引  
入了辐射源之外的背景辐射修正项。在背景辐射  
的亮度温度(简称背景温度)为  $T_b$  时,辐射温度计输  
出信号为

$$S(r, T, T_b) = S(\infty, T)\sigma(r) + S(\infty, T_b)[1 - \sigma(r)], \quad (3)$$

则

$$\sigma(r, r_{\max}) = \frac{S(r, T, T_b) - S(\infty, T_b)}{S(r_{\max}, T, T_b) - S(\infty, T_b)}. \quad (4)$$

引入辐射源之外的背景辐射修正项后,SSE 的  
表示需要辐射源为无穷大时的辐射温度计输出信号  
项。而  $S(r, T, T_b)$  和  $S(\infty, T_b)$  的影响因素复杂,  
常常不能直接计算或直接测量,须引入近似处  
理<sup>[13]</sup>。由于测量较低温的绝大多数辐射温度计均  
为温度数字显示或温度线性化输出,辐射温度计的  
探测器对入射辐射的直接响应只能通过计算得到。  
引入辐射源之外的背景辐射修正项的 SSE 特性曲  
线见图 1(c)。该方法避免了在较低源温度测量  
SSE 时出现异常结果的问题,成为广泛使用的经典  
方法。

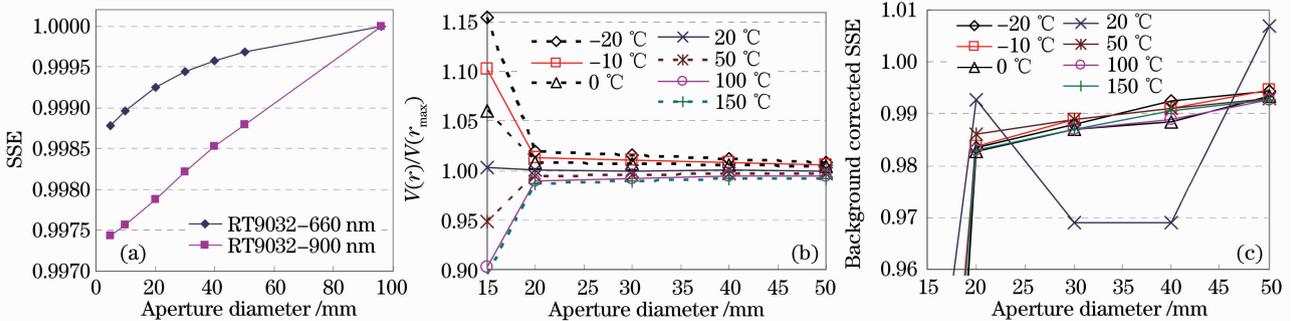


图 1 SSE 的不同表达。(a) (2)式高温测量;(b) (2)式低温测量;(c) (4)式低温测量

Fig. 1 Different expressions of SSE. (a) Eq. (2) used in high-temperature measurement; (b) Eq. (2) used in low-temperature measurement; (c) Eq. (4) used in low-temperature measurement

## 2.2 测量模型存在的问题

直接利用(4)式计算 SSE 函数存在的技术难点是无法获得辐射温度计在测量无限大辐射源时的输出信号。文献[13]提出对(4)式中的无限大辐射源项做近似处理；文献[12]提出不受辐射源尺寸限制的 SSE 扫描测量法，但受信噪比低和计算复杂的制约。

另外文献[7]指出在较低温度(150 ℃以下)应用高温 SSE 定义式[(2)式]会出现图 1(b)所示显著的背景辐射效应的原因与在低温应用中使用高温测温模型有关。从辐射温度计测温模型来分析，大多数低温辐射温度计为 8~14 μm 的辐射温度计，探测器处于环境温度；在图 1(b)和图 1(c)中，环境温度也就是背景温度约为 20 ℃；在这种测量条件下，探测器与背景处于相同温度，它们之间的热辐射交换为零，即探测器实际上对背景辐射没有响应。图 1(b)以探测器输出比表示的 SSE 在较低源温度时异常，而且当探测器温度与源温度相同时，SSE 水平线并未如理论分析所预期的受测量噪声的影响而表现出强烈的波动。产生上述问题的原因是，由辐射温度计温度示值推算辐射温度计探测器输出信号时，采用忽略了探测器辐射影响的高温计测温模型。该模型假设探测器温度处于 0 K，使得在辐射源温度低于背景温度时，源半径越小，探测器输出信号越大，造成半径减小时 SSE 函数大于 1。

## 2.3 新的消除背景辐射影响的 SSE 计算模型

对较低温度的测量，在上述(1)~(4)式的基础上，必须考虑探测器温度对辐射温度计测温模型的影响，辐射温度计输出函数的自变量在被测黑体辐射源温度  $T$  之后增加探测器温度  $T_d$ ，即  $S(r, T, T_d)$ 。对于单一波段辐射温度计，其输出信号

$$S(\infty, T, T_d) = \int_0^{\infty} [L_b(\lambda, T) - L_b(\lambda, T_d)] R(\lambda) d\lambda, \quad (5)$$

式中  $L_b$  为黑体的光谱辐射亮度， $\lambda$  为波长， $T$  和  $T_d$  分别为被测黑体温度和辐射温度计探测器温度， $R(\lambda)$  为辐射温度计的光谱响应度。含背景辐射影响的输出信号

$$S(r, T, T_d, T_b) = S(\infty, T, T_d) \sigma(r) + S(\infty, T_b, T_d) [1 - \sigma(r)]. \quad (6)$$

与(4)式相应，

$$\sigma(r, r_{\max}) = \frac{S(r, T, T_d, T_b) - S(\infty, T_b, T_d)}{S(r_{\max}, T, T_d, T_b) - S(\infty, T_b, T_d)}. \quad (7)$$

由于  $S(\infty, T, T_d) = S(r, T, T_d, T_b)$ ，且(7)式等号右侧的分子、分母均为相同背景温度下的信号差，则

$$\sigma(r, r_{\max}) = \frac{S(r, T, T_d) - S(r, T_b, T_d)}{S(r_{\max}, T, T_d) - S(r_{\max}, T_b, T_d)}. \quad (8)$$

对于以温度数字输出或以温度线性化模拟输出的辐射温度计，不能直接使用上述方法。可利用在数学上等价的虚拟探测器温度 SSE 计算模型，

$$\sigma(r, r_{\max}) = \left[ \frac{S(r, T, T_d)}{S(r_{\max}, T, T_d)} \right]_{T_d=T_b}. \quad (9)$$

它的物理基础为，在虚拟的探测器温度  $T_d = T_b$  条件下，探测器与背景处于辐射平衡态，相互辐射净交换为零。在此条件下不需考虑背景辐射的影响，虚拟探测器温度下的输出

$$S(r, T, T_d)_{T_d=T_b} = S(r, T, T_d) - S(r, T_b, T_d). \quad (10)$$

(9)式适用于远离背景温度的任意源温度下的 SSE 测量。它与不考虑背景辐射的 SSE 高温测量[(2)式]具有相似形式，不同之处为辐射温度计测温模型中未忽略探测器温度的影响。

对于大多数采用非制冷探测器的辐射温度计，与背景辐射平衡的虚拟探测器温度条件在通常的实验室实际测量中是近似满足的。即使在探测器温度不一定等于背景温度的普遍情形下，依然可以根据(9)式由探测器的虚拟信号比计算 SSE。(9)式与(4)式在数学上等价，但(9)式避免了计算公式中出现无限大辐射源项，在形式上更简明地表达了测量模型的物理意义。

在可认为  $T_d, T_b$  均为 0 K 的高温测量时，(9)式与(2)式等同。

## 2.4 温度数字化输出辐射温度计的 SSE 计算

对于温度数字显示或温度线性化输出的辐射温度计，其 SSE 的测量结果只能根据温度示值推算探测器输出信号。由于 SSE 的影响，辐射源半径由  $r_{\max}$  至  $r$  的变化对辐射温度计温度示值  $T$  的变化  $\Delta T_{\text{SSE}}(r, r_{\max})$  由下式确定：

$$S(r, T, T_d, T_b) = S[r_{\max}, T + \Delta T_{\text{SSE}}(r, r_{\max}), T_d, T_b]. \quad (11)$$

根据(9)式及其虚拟测量条件，以  $\Delta T_{\text{SSE}}$  表示的 SSE 函数为

$$\sigma(r, r_{\max}) = \left\{ \frac{S[r_{\max}, T + \Delta T_{\text{SSE}}(r, r_{\max}), T_d]}{S(r_{\max}, T, T_d)} \right\}_{T_d=T_b}. \quad (12)$$

以  $\Delta T_{\text{SSE}}(r, r_{\text{max}})$  为参数的 SSE 表示方法可直观表达 SSE 对温度测量示值的影响。但  $\Delta T_{\text{SSE}}$  不仅是辐射源尺寸和温度计特性的函数,也是辐射源温度的强函数,即  $\Delta T_{\text{SSE}}[r_{\text{max}}, \sigma(r, r_{\text{max}}), R(\lambda), T]$ 。当辐射温度计发射率设置<sup>[9]</sup>不为 1 时,它还是发射率设置和环境温度的函数,给不同测温条件下的 SSE 特性的比较和修正带来困难。采用(12)式可以得到不依赖于具体被测温度的 SSE 表示,便于不同温度下的 SSE 修正计算与不同测量条件和不同温度计之间的 SSE 特性比较。

### 3 数字输出辐射温度计的 SSE 计算

对于输出信号与入射辐射通量成正比的辐射温度计,可直接根据(8)式或(9)式测量瞄准不同直径的辐射源时的输出并计算 SSE 函数。本节讨论温度数字显示或温度线性化输出辐射温度计的 SSE 的计算方法。

计算的理论基础是普朗克定律:

$$L_b(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi} \cdot \frac{1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (13)$$

式中  $L_b$  为黑体光谱辐射亮度,  $c_2 = 0.014388 \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

为简化数学表达与计算,将窄波段辐射温度计视为单色辐射温度计,或对辐射温度计引入极限等效波长<sup>[19]</sup>的概念,结合(3)式和(5)式表示的虚拟探测器温度下的辐射温度计输出可简化为

$$S(r, T, T_d)_{T_d=T_b} = \sigma(r)K[L_b(\lambda, T) - L_b(\lambda, T_b)], \quad (14)$$

式中  $K$  为仪表系数,  $\lambda$  为辐射温度计的等效波长或近似取为中心波长。

### 3.1 高温计

对于高温测量,可对上述测量模型进行两项简化:探测器温度与背景温度下的黑体光谱辐射亮度项可忽略,普朗克公式表示的黑体光谱辐射亮度可用 Wien 近似形式表示。则由(9),(13)和(14)式得到

$$\sigma(r, r_{\text{max}}) = \exp\left\{\frac{c_2}{\lambda} \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T + \Delta T_{\text{SSE}}(r, r_{\text{max}})} \right]\right\}. \quad (15)$$

上式的微分近似形式更为简单:

$$\sigma(r, r_0) - 1 \approx \frac{c_2}{\lambda T^2} \Delta T_{\text{SSE}}. \quad (16)$$

### 3.2 可测低温的辐射温度计

由于多数辐射温度计具备辐射源发射率修正功能,部分辐射温度计具有固定的仪表发射率设置,因此,以下分析按仪表发射率为 1 和小于 1 两种情况分别考虑。

#### 3.2.1 仪表发射率等于 1

根据(14)式,与(9)式对应的 SSE 计算式为

$$\sigma(r, r_{\text{max}}) = \frac{L_b(\lambda, T + \Delta T_{\text{SSE}}) - L_b(\lambda, T_b)}{L_b(\lambda, T) - L_b(\lambda, T_b)}, \quad (17)$$

$$\sigma(r, r_{\text{max}}) = \frac{\frac{1}{\exp\left[\frac{c_2}{\lambda(T + \Delta T_{\text{SSE}})}\right]} - 1}{\frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} - 1} - \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T_b}\right) - 1}. \quad (18)$$

#### 3.2.2 仪表发射率小于 1

仪表发射率不为 1 的辐射温度计,包括固定发射率设置的辐射温度计。环境温度为  $T_{\text{am}}$  时,其 SSE 函数为

$$\sigma(r, r_{\text{max}}) = \frac{\epsilon_{\text{set}} L_b(\lambda, T + \Delta T_{\text{SSE}}) + (1 - \epsilon_{\text{set}}) L_b(\lambda, T_{\text{am}}) - L_b(\lambda, T_b)}{\epsilon_{\text{set}} L_b(\lambda, T) + (1 - \epsilon_{\text{set}}) L_b(\lambda, T_{\text{am}}) - L_b(\lambda, T_b)}, \quad (19)$$

式中  $\epsilon_{\text{set}}$  为仪表发射率。

当环境辐射亮度与背景辐射亮度(虚拟探测器温度)相同时,(19)式与(17)式等同,即 SSE 函数测量结果与辐射温度计的仪表发射率设定值无关。

### 4 测量条件的优化

依据上述测量模型,可分析得出以下优化途径。

选择远高于背景温度  $T_b$  的辐射源温度  $T$ ,可减小温度计噪声、显示分辨力以及背景温度不均匀或不准确对 SSE 测量结果的影响。

当测试用辐射源的上限温度远小于辐射温度计的测温上限时,可采用减小辐射温度计仪表发射率设定值的方式来提高温度示值,进而减小分辨力对测量结果的影响。

部分辐射温度计在不同温度段具有不同显示分辨力,例如,示值小于  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  时分辨力为  $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,示值大于等于  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  时分辨力为  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在这种条件下,在高分辨力低温范围的测温上限附近测量 SSE 的结果,通常优于在低分辨力高温范围的较高温度的测量结果。

## 5 典型 SSE 测量结果

对 8~14  $\mu\text{m}$  数字显示辐射温度计 Raytek MX4 DCI 测量 SSE<sup>[20]</sup>, 并根据(18)式计算, 结果见图 2。在源温度 100  $^{\circ}\text{C}$ 、200  $^{\circ}\text{C}$ 、500  $^{\circ}\text{C}$  下的 3 条 SSE 曲线中, 100  $^{\circ}\text{C}$  的测量结果受辐射温度计测量重复性和 0.1  $^{\circ}\text{C}$  分辨力的影响最大, 结果曲线有明显的阶梯现象, 而 500  $^{\circ}\text{C}$  测量结果的阶梯现象最小。三者非常接近, 差异与分辨力影响量接近, 它们反映的是辐射温度计光学系统的同一特性。

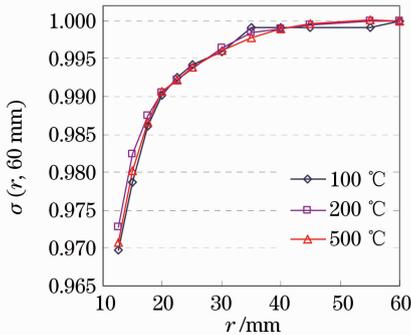


图 2 SSE 测量结果

Fig. 2 SSE measurement results

## 6 结 论

在现有 SSE 测量理论的基础上, 提出了在与背景辐射亮度温度平衡的虚拟探测器温度条件下计算单一波段辐射温度计 SSE 函数的普适计算模型——(9)式。该方法在不引入近似的前提下消除了背景辐射对计算 SSE 测量结果的影响, 避免了原有 SSE 测量模型中对无限大辐射温度计输出信号项的需求以及在计算中对其的近似处理, 具有可操作性, 并简化了原有公式的形式。

对辐射温度计测温模型和 SSE 具体计算公式的分析表明, 对于仪表发射率不为 1 的辐射温度计, 在背景辐射亮度等于环境辐射亮度的条件下, SSE 测量模型在理论上与仪表发射率的设定值无关, 并且可根据温度示值按仪表发射率为 1 的辐射温度计模型计算 SSE 函数。根据理论分析, 可利用对辐射源温度、辐射温度计分辨力和仪表发射率设置等参数的选择优化 SSE 测量结果的测量条件。除非辐射温度计具备十分理想的 SSE 特性, 辐射温度计的检定与校准需要注明实验的源尺寸条件。测温应用中, 被测对象尺寸与检定或校准条件有明显差异时, 需要修正 SSE 对测温结果的影响。修正方法仍可利用与背景辐射亮度温度平衡的虚拟探测器温度原理简化计算。本文结论也适用于辐射度学等测量原理

相似的测量仪器。

## 参 考 文 献

- P. Bloembergen, Y. Duan, R. Bosma *et al.*. The characterisation of radiation thermometers subject to the size-of-source effect[C]. Proc. of TEMPMEKO'96, 1996. 261~266
- Liu Yaohan, Liu Zhigao, Zhou Zhi *et al.*. Study on stray light in self-reversal background correction for atomic absorption spectrometry—the properties of stray light and its influence on background correction[J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2009, **29**(2): 488~491  
刘瑶函, 刘志高, 周 治 等. 原子吸收自吸背景校正中杂散光的研究——杂散光的性质及其对背景校正性能的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(2): 488~491
- Zhang Hongxin, Lu Zhenwu, Sun Qiang *et al.*. Stray light analysis of diffractive/refractive LWIR staring imaging system [J]. *Chinese Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(5): 402~407  
张红鑫, 卢振武, 孙 强 等. 折/衍混合长波红外凝视成像系统的杂散光分析[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(5): 402~407
- Duan Yuning, Zhao Qi, Yuan Zundong *et al.*. Study on the size-of-source effect in radiation thermometry [J]. *Acta Metrol. Sinica*, 1996, **17**(3): 161~166  
段宇宁, 赵 琪, 原遵东 等. 辐射源尺寸效应研究[J]. *计量学报*, 1996, **17**(3): 161~166
- P. Bloembergen. On the correction for the size-of-source effect corrupted by background radiation [C]. Proc. TEMPMEKO 1999, 1999. 607~612
- G. Machin, M. Ibrahim. Size-of-source effect and temperature uncertainty: I—high temperature systems [C]. Proc. TEMPMEKO 1999, 1999. 681~686
- G. Machin, M. Ibrahim. Size-of-source effect and temperature: II—low temperature system [C]. Proc. TEMPMEKO 1999, 1999. 687~692
- P. Bloembergen, Y. Yamanda. The impact of the size-of-source effect on the uncertainty of fixed-point radiance temperatures a case study[C]. 2004. 1141~1148
- International Electrotechnical Commission. IEC/TS 62492-1 2008-04. Industrial Process Control Devices—Radiation Thermometer—Part 1: Technical Data for Radiation Thermometers[S]. 2008
- D. Lowe, M. Battuello, G. Machin *et al.*. A comparison of size of source effect measurements of radiation thermometers between IMGIC and NPL[C]. Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry, 2003, **7**: 625~630
- G. Machin, R. Sergienko. A comparative study of size of source effect (SSE) determination techniques[C]. Proc. TEMPMEKO 2001, 2001. 155~160
- P. Saunders, H. Edgar. On the characterization and correction of the size-of-source effect in radiation thermometers [J]. *Metrologia*, 2009, **46**(1): 62~74
- Igor Pušnik, Goran Grgić, Janko Drnovšek. System for the determination of the size-of-source effect of radiation thermometers with the direct reading of temperature[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(6): 1330~1336
- He Yuhang, Cao Yiping, Zhai Aiping. A 3-D measurement method with orthogonal composite light based on fringe contrast and background calibration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3191~3196  
何宇航, 曹益平, 翟爱平. 基于条纹对比度和背景光校准的正交复合光三维测量方法[J]. *光学学报*, 2010, **30**(11): 3191~3196
- Luo Huan, Yu Lei, Liao Jun *et al.*. Tracking framework for small infrared multi-target in complex background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1536~1541  
罗 寰, 于 雷, 廖 俊 等. 复杂背景下红外弱小多目标跟踪系

- 统[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1536~1541
- 16 Jia Guimin, Wang Xiangjun, Zhang Shibai. Target tracking algorithm based on adaptive template update in complex background[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 659~663  
贾桂敏, 王向军, 张世海. 复杂背景下基于自适应模板更新的目标跟踪算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(3): 659~663
- 17 Hao Xiaopeng, Yuan Zundong, Zhao Wanjun. Research about the direct method and indirect method of the size-of-source effect of radiation thermometers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 293~297  
郝小鹏, 原遵东, 赵婉君. 直接法与间接法测量辐射源尺寸效应方法研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(s1): 293~297
- 18 P. Saunders, J. Fischer, M. Sadli *et al.*. Uncertainty budgets for calibration of radiation thermometers below the silver point [J]. *Int. J. Thermophys.*, 2008, **29**(3): 1066~1083
- 19 Yuan Zundong. Equivalent wavelength of radiation thermometer and its applications [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(2): 374~379  
原遵东. 辐射温度计的等效波长及其应用[J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(2): 374~379
- 20 Guo Lili, Yuan Zundong, Xing Bo *et al.*. The size-of-source effect measurement for industrial radiation thermometers [J]. *Measurement Technique*, 2010, (9): 6~9  
郭莉莉, 原遵东, 邢波等. 工业辐射温度计的辐射源尺寸效应(SSE)测量[J]. 计量技术, 2010, (9): 6~9

栏目编辑: 韩 峰