光电器件

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20240729001

CMOS机芯温度系数校正模型及效果验证

竹学武[1]，占春连[1*]，郭　靖[2]，高　涵[1]，王加朋[1]，于昌本[1]，
孔德仁[3]，商　飞[3]，徐春冬[3]

（1. 中国计量大学 光学与电子科技学院，杭州 310018；2. 北京振兴计量测试研究所，北京 100074；
3. 南京理工大学 机械工程学院，南京 210094）

摘　要： CMOS图像传感器具有低功耗、低成本、高集成度、高响应速度以及高测温上限等特性，在辐射测温领域中具有广泛应用。在外场试验过程中，CMOS图像传感器的机芯温度会随环境温度变化而波动，这种波动会导致背景灰度及响应系数发生变化，影响CMOS机芯的定量能力，从而增大测温误差。基于此，文章提出一种普适性校正方法。该方法通过分别构建背景灰度及响应系数随温度变化的校正模型，实现CMOS机芯在不同环境温度下的量值稳定性，有效提高了测温精度。实验中，利用高低温温箱模拟外场273.2～313.2 K的环境温度变化范围，利用标准高温黑体，获取CMOS图像传感器对1 073.2 K目标的测试数据。实验结果表明，该校正方法在实验环境温度范围内，可使CMOS图像传感器测温的最大温差由10.9 K降低至2.2 K。

关键词： 机芯温度；误差校正；辐射测温；玻色-爱因斯坦分布；CMOS图像传感器

中图分类号： TN216　**文章编号：** 1001－5868(2025)03－0416－07

CMOS Movement-Temperature-Coefficient Correction Model and Effect Verification

ZHU Xuewu[1], ZHAN Chunlian[1], GUO Jing[2], GAO Han[1], WANG Jiapeng[1], YU Changben[1],
KONG Deren[3], SHANG Fei[3], XU Chundong[3]

(1. School of Optics and Electronic Science and Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, CHN; 2. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Test, Beijing 100074, CHN; 3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, CHN)

Abstract: CMOS image sensors are characterized by low power consumption, low cost, high integration, high response speed, and high temperature-measurement limit, and are widely used for measuring radiation temperature. During a field experiment, the movement temperature of a CMOS image sensor fluctuates depending on the environmental temperature, which consequently alters the background grayscale and response coefficient, thus affecting the quantitative ability of the CMOS movement and increasing the temperature-measurement error. We propose a universal calibration method to address this issue. By constructing a temperature-calibration model for the background grayscale and response coefficient, we achieve stable CMOS movement values under different environmental temperatures and improve the temperature-measurement accuracy. We simulate environmental temperature changes from 273.2 to 313.2 K in an external field using high- and low-temperature chambers and use a standard high-temperature blackbody to obtain test data for a CMOS image sensor on a 1 073.2 K target. Experimental results show that this correction method can reduce the maximum temperature difference recorded by the CMOS image sensor from 10.9 to 2.2 K in a 273.2～313.2 K environment.

收稿日期：2024－07－29.

* **通信作者：**占春连

Key words: movement temperature; error correction; radiation temperature measurement; Bose-Einstein distribution; CMOS image sensor

0 引言

温度是表征物体特性的重要基本参数，其高精度测量对于金属加工、机械制造、航空航天等诸多领域至关重要[1-2]。CMOS图像传感器以其低功耗、低成本、高集成度、高响应速度以及高测温上限等特性[3-4]，在测温领域获得了广泛应用。然而，在外场试验条件下，环境温度的变化会导致CMOS图像传感器机芯温度的波动，进而对其测温精度产生影响。因此，研究在不同环境温度下提高其测温精度的校正方法，具有重要的工程应用背景及意义。

为实现CMOS图像传感器的高精度测温，国内外研究者已开展了大量工作。Bosco等提出一种结合硬件和软件的校正方法，该方法基于缺陷像素图，保存了像素的缺陷历史记录，对缺陷图中列出的所有像素执行强校正[5-6]；Sun等采用一种基于神经网络的校正算法，减少了测量距离与校准距离差异引起的测温误差[7]；Liu等提出一种基于灰度值补偿的固定模式噪声校正方法，用于消除时滞积分CMOS图像传感器输出图像中的固定模式噪声[8]；Hu等在极低光照条件下捕获图像，通过分析积分球数据并采用逐像素平场去噪算法消除像素响应非均匀噪声[9]；白琼等提出包括线性校正、分段线性校正及多项式拟合校正等多种非均匀性校正方法以降低图像的模式噪声[10]；Zhu等提出一种针对高温背景下反射辐射测温误差的高精度校正方法[11]。上述工作有效提高了CMOS图像传感器测温精度，但针对外场环境温度变化导致机芯温度波动及其对测温精度影响的研究尚显不足。

CMOS图像传感器在外场试验测温时，环境温度的变化会导致背景灰度和响应系数发生变化，使其测温结果出现不同程度的误差。针对上述问题，本文提出一种校正方法：通过建立数学模型，校正背景灰度及响应系数随机芯温度的变化，从而提高CMOS图像传感器在不同温度环境下的测温精度，并通过实验验证校正效果。对于背景灰度，基于玻色-爱因斯坦分布构建了背景灰度与机芯温度间的数学模型；对于响应系数，通过一阶泰勒展开得到响应系数的校正模型。结合以上两个模型，可有效修正不同环境温度下整体图像灰度的波动。实验结果表明，该校正方法在273.2～313.2 K环境温度范围内，可使CMOS图像传感器测温的最大温差由10.9 K降低至2.2 K。

1 CMOS图像传感器测温原理

辐射测温法是一种用于非接触测量物体表面温度的方法[12]，具有非破坏性和测温范围宽等优点，适用于复杂环境条件下的物体表面温度测量。辐射测温以普朗克黑体辐射定律为基础[13]，该定律描述了黑体光谱辐射出射度与黑体温度、波长之间的关系：

$$M(\lambda, T_b)=\frac{C_1}{\lambda^5}\left(e^{\frac{C_2}{\lambda T_b}}-1\right)^{-1} \tag{1}$$

式中，$M(\lambda, T_b)$为光谱辐射出射度，单位为$W\cdot m^{-2}\cdot \mu m^{-1}$；$\lambda$为波长，单位为μm；$T_b$为黑体绝对温度，单位为K；$C_1$为第一普朗克系数，其数值为$3.741\,8\times 10^{-16}$，单位为$W\cdot m^2$，$C_2$为第二普朗克系数，其数值为$1.438\,8\times 10^{-2}$，单位为m·K。

CMOS图像传感器在工作过程中，首先光学系统接受辐射，并在对应像元熵产生模拟信号，再通过模数转换器等对模拟信号进行一系列的加工和读出，最后输出对应的图像[12-13]。

在成像测量过程中，CMOS图像传感器可以对目标的亮度进行响应。理想情况下，可以通过公式(2)对像元的响应特性进行描述：

$$DN=R(T)L(\lambda, T_b)+DN_b(T) \tag{2}$$

式中，DN为像元输出的图像灰度；$L(\lambda, T_b)$是温度为T_b的黑体经单色化后在波长λ处发出的光谱辐射亮度，单位为$W\cdot m^{-2}\cdot \mu m^{-1}\cdot sr^{-1}$；$R(T)$为传感器响应系数；$DN_b(T)$为传感器背景灰度；$T_b$为黑体温度，单位为K；$T$为机芯温度，单位为K。理想黑体为朗伯体，其光谱辐射亮度为：

$$L(\lambda, T_b)=\frac{M(\lambda, T_b)}{\pi} \tag{3}$$

式中，π为黑体对图像传感器的立体角，单位为sr。

CMOS图像传感器的机芯温度会随着环境温度的变化而变化，该变化对背景灰度及响应系数都存在影响，因此，对背景灰度及响应系数的校正是提高CMOS图像传感器测温精度的关键，下面进行背景灰度及响应系数的校正。

2 CMOS图像传感器灰度校正

2.1 CMOS图像传感器测温系统

黑体辐射光经过成像光学镜组的聚焦和折射，投射在CMOS图像传感器的感光面上。测温系统整体示意图如图1所示。

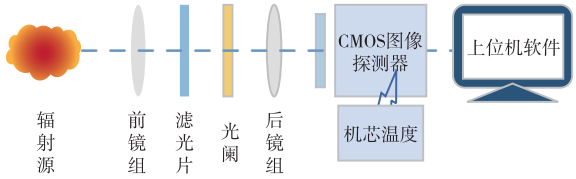


图1 CMOS测温系统示意图

2.2 背景灰度校正模型

若明确背景灰度与机芯温度间的数学模型，通过数学模型即可求解任意机芯温度的背景灰度，从而提高测温精度。当机芯温度升高时，传感器晶体里的声子数量增加，载流子与声子的散射概率升高导致传感器噪声增大。与图像灰度值直接相关的是传感器像元或阵列产生的载流子密度[14]，而噪声的微观来源是载流子-声子相互作用[15]，因而考虑用声子分布函数进行背景灰度的拟合。声子是玻色子，其在任意量子态上分布的粒子数不受泡利不相容原理的限制，处在能层中粒子的最概然分布，称为玻色-爱因斯坦分布，表达式为：

$$n_l=\frac{1}{e^{\frac{\varepsilon_l}{kT}}-1} \tag{4}$$

式中，n_l表示系统处于能级ε_l上的粒子数；ε_l表示系统的粒子能级；$l(l=1,2,\cdots)$表示粒子的能级编号，k玻尔兹曼常数，其数值为$1.380\ 650\ 5\times10^{-23}$ J/K。基于公式(4)可以建立噪声灰度与机芯温度的模型，即：

$$DN_{\mathrm{b}}(T)=\frac{A}{e^{\frac{\varepsilon}{kT}-C}-1}+B \tag{5}$$

式中，T为机芯温度，单位为K；A为图像传感器声子热运动引入的系数；k玻尔兹曼常数；ε为图像传感器中声子所处的平均能级，单位为J；C为约束传感器工作温度的参数；B为图像传感器中不受声子热运动影响的背景灰度。通过公式(5)即可拟合背景灰度随机芯温度的变化曲线，获取不同机芯温度下的背景灰度。

2.3 扣除背景的图像灰度校正模型

试验得到不同机芯温度扣除背景的图像灰度的散点分布并基于最小二乘法对其线性拟合，结果如图2所示。

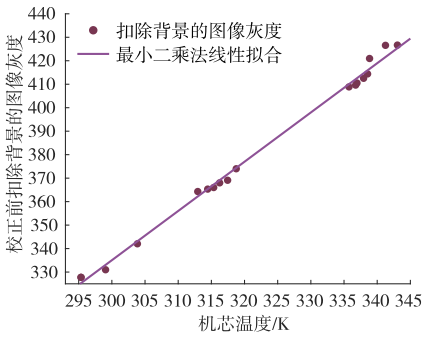


图2 扣除背景的图像灰度随机芯温度变化散点分布及线性拟合结果

通过公式(5)即可得到不同机芯温度的扣除背景的图像灰度，此时公式(2)变为：

$$\hat{DN}(T)=R(T)L(\lambda,T_{\mathrm{b}}) \tag{6}$$

式中，$\hat{DN}(T)$为机芯温度T时扣除背景的图像灰度。当$T=T_0$时，可得到：

$$\hat{DN}(T_0)=R(T_0)L(\lambda,T_{\mathrm{b}}) \tag{7}$$

式中，T_0为校正后的同一机芯温度；$\hat{DN}(T_0)$为机芯温度T_0时扣除背景的图像灰度。根据图2数据分布特点发现扣除背景的图像灰度随机芯温度的变化关系可近似为线性关系。因$\hat{DN}(T)$和$R(T)$阶数相同，$R(T)$可在图像传感器正常工作的机芯温度范围内对机芯温度T_0进行一阶泰勒公式展开，表达为：

$$R(T)=R(T_0)+R^{(1)}(T_0)(T-T_0)+R_n \tag{8}$$

式中，$R^{(1)}(T_0)$为传感器响应系数在T_0的一阶导数；R_n为一阶泰勒公式余项，其表达式为：

$$R_n=\frac{R^{(2)}(T_0)}{2}(T-T_0)^2 \tag{9}$$

式中，$R^{(2)}(T_0)$为传感器响应系数在T_0的二阶导数。通过对图2所示数据点进行二阶多项式拟合，二阶多项式拟合结果的T^2系数为0.004 8，该系数的值很小可以忽略，则余项R_n的值也可忽略不计。此时$R(T)$泰勒公式的展开式为：

$$R(T)=R(T_0)+R^{(1)}(T_0)(T-T_0) \tag{10}$$

公式(10)即为响应系数的校正方程，因无法直接求解出$R^{(1)}(T_0)$，因而将其代换为扣除背景的图像灰度进行计算。公式(10)两边同时乘以$L(\lambda,T_{\mathrm{b}})$，结合公式(6)和(7)得到：

$$\hat{DN}(T)=\hat{DN}(T_0)+R^{(1)}(T_0)L(\lambda,T_b)(T-T_0) \tag{11}$$

等式两边同时除以$\hat{DN}(T_0)$，结合式(7)得到：

$$\frac{\hat{DN}(T)}{\hat{DN}(T_0)}=1+\frac{R^{(1)}(T_0)}{R(T_0)}(T-T_0) \tag{12}$$

当T_0的值确定时，$R^{(1)}(T_0)$，$R(T_0)$的值都为定值。因而可以把$\frac{R^{(1)}(T_0)}{R(T_0)}$看作常数$m$，得到：

$$\frac{\hat{DN}(T)}{\hat{DN}(T_0)}=1+m(T-T_0) \tag{13}$$

扣除背景灰度的图像灰度与机芯温度的散点近似线性分布，因而基于最小二乘法的线性函数进行数据拟合[16]。最小二乘准则为使各项实际测试值与计算值之间差的平方和最小，即：

$$J_{\min}=\sum_1^N v_i^2 \tag{14}$$

式中，v_i为各实测值与计算值之间的差值。

基于最小二乘法拟合扣除背景的图像灰度与机芯温度间的线性方程，表达式为：

$$\hat{DN}(T)=a(T-T_0)+b \tag{15}$$

式中，a，b为线性方程回归系数。

等式两边同时除以b可将其形式化为与公式(13)相同，如公式(16)所示，便于参数m的求解：

$$\frac{\hat{DN}(T)}{b}=1+\frac{a}{b}(T-T_0) \tag{16}$$

3　试验装置及测试流程

3.1　试验仪器

主要试验仪器有：

(1)点源黑体，提供标准温度；所用点源黑体为航空工业计量所生产的HW-112点源黑体辐射源，表1为点源黑体的性能指标，其外观如图3所示。

表1　点源黑体性能指标

指标	数值
温度分辨率/K	0.1
温度范围/K	573.2～1 473.2
发射率	0.99
稳定性/K	573.2 ±0.1 1 473.2±0.2
扩展不确定度	≤1.4(k=2)

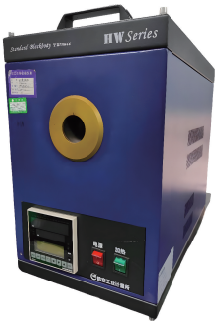


图3　点源黑体外观实物图

(2)高低温交变湿热试验箱，模拟温度变化的外场温度环境；试验中使用的高低温交变湿热试验箱的性能指标如下：

温度范围：243.2～358.2 K

湿度范围：25%RH～98%RH

工作室尺寸：$W\times H\times D$=3 m×2.4 m×3.6 m

温度分辨率：0.1 K

(3)CMOS图像传感器一台，数据采集；所用CMOS图像传感器为工业应用的USB3.0接口黑白相机系列，型号为IUA7100KMA，如图4所示。



图4　CMOS图像传感器

(4)上位机软件，设置传感器采集参数以及温度数据反演；上位机软件总体结构可分为6个模块，分别为人机交互及控制模块、红外图像采集模块、温度反演模块、参数设定模块、数据存取模块、数据标定模块。各模块间关系如图5所示。

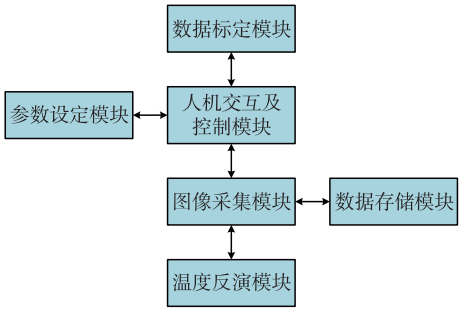


图5　上位机软件总体结构

3.2　试验流程

(1)系统开机预热CMOS图像传感器测温系统置于高低温交变湿热试验箱内的平台上，开启系统

进行预热(一般预热30 min以上),使得系统内部机芯温度达到稳定。

(2)设定黑体温度黑体置于高低温交变湿热试验箱内的平台上,设置温度为1 037.2 K并等待温度稳定。

(3)设定高低温交变湿热试验箱温度高低温交变湿热试验箱设置三个温度点273.2,298.2和313.2 K循环。

(4)高低温测试数据采集

高低温测试标定数据采集按照如下步骤进行:

①开启温箱,将温箱全程通入干燥空气,控制相对湿度在15%以下,按照1 K/min速率控温,依次选取上述设定的温度值使其内部温度达到稳定;

②测温系统放置于黑体辐射源的轴延长线处,确保光轴与延长线共线,瞄准辐射源中心,调焦并使其能够清晰成像;

③使用测温系统在高低温交变湿热试验箱每个设定温度对高温黑体辐射源进行一次图像采集,并合上测温系统镜头盖采集一次背景图像,分别记录测试数据;

④通过Matlab程序读取各图像灰度值,保留有效数据值。

4 试验数据处理及分析

4.1 背景灰度拟合结果

通过上述试验流程得到背景灰度随机芯温度的变化数据,如表2所示。

表2 背景灰度与机芯温度的试验数据汇总

机芯温度/K	背景灰度	机芯温度/K	背景灰度
307.0	15.8	326.1	15.9
314.3	15.8	328.2	15.9
319.4	15.8	328.2	15.9
319.4	15.8	328.6	15.9
319.7	15.8	341.3	16.1
320.6	15.8	341.3	16.1
321.6	15.8	342.8	16.2
324.3	15.8	343.4	16.2
324.3	15.8	343.8	16.3
324.3	15.8	343.8	16.3
325.2	15.8		

使用绘图工具绘制表2中的数据分布并且结合背景与机芯温度间的数学模型,对数据进行非线性拟合处理,数据拟合结果展示如图6所示,模型中各参数数值如表3所示。

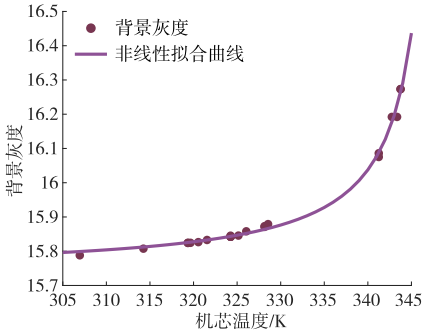


图6 非线性函数拟合背景分布结果

表3 背景灰度与机芯温度的模型参数汇总

物理参数	数值
声子热运动引入的系数A	0.03
声子平均能级ε/eV	0.13
约束传感器工作温度的参数C	4.2
不受声子热运动影响的背景灰度B	15.7

将表3中的数据带入公式(5)中即可获得CMOS图像传感器机芯温度与背景灰度的方程。通过观察公式(5)结构发现此式存在奇点,即分母数值为0时:

$$e^{\frac{\varepsilon}{kT_b}}-C=0 \tag{17}$$

根据公式(17)计算出的机芯温度数值为348.8 K,此时图像传感器背景灰度无穷大,传感器被噪声湮没,传感器无法正常工作,计算结果与实际相机工作极限温度相符合,验证了模型的可靠性。

4.2 扣除背景灰度的图像灰度拟合结果

图2拟合结果显示最小二乘法线性拟合曲线斜率a的数值为2.1。为有效呈现出校正效果,需选取一机芯温度作为校正后同一机芯温度。结合实验数据发现图像传感器在室温298.2 K的环境下工作至稳定状态的机芯温度约为313.2 K,因而便选择313.2 K作为图像传感器校正后同一机芯温度,即T_0的值为313.2,进而计算b值为363.4。通过a,b比值即可求解m,当T_0值为313.2时,公式(13)中m的值为0.006。将m的值代入到公式(13)中即可得到完整的校正方程,该方程可有效降低图像传感器由机芯温度不同导致的扣除背景的图像灰度差异,提高CMOS图像传感器测温精度。

4.3 校正效果验证

通过公式(13)即可将不同机芯温度的扣除背景图像灰度校正为同一机芯温度扣除背景图像灰度。读取试验得到的传感器在不同机芯温度对1 072.2 K标准黑体采集图像的灰度值,并计算出校正后的灰度值。校正前后的扣除背景图像灰度值

的对比结果如表4所示。

表4　校正前后传感器读取1 073.2 K标准高温黑体的扣除背景图像灰度数据对比

机芯温度/K	校正前	校正后
295.4	327.8	366.9
299.1	331.0	361.6
303.9	342.0	362.3
313.0	364.3	364.7
314.5	365.3	362.5
315.4	366.0	361.2
316.3	368.0	361.3
317.5	369.1	359.8
318.8	374.0	361.8
335.8	408.9	360.0
336.8	409.6	358.8
337.0	410.5	359.2
338.0	412.5	359.1
338.6	414.4	359.6
338.9	421.0	364.7
341.3	426.6	365.0
343.1	426.7	361.8

将表4中数据绘制成图7。可以看出，在不同机芯温度下，校正后扣除背景的图像灰度数值的稳定性得到显著提高。由此判断使用校正模型可降低机芯温度变化导致的扣除背景图像灰度差异。

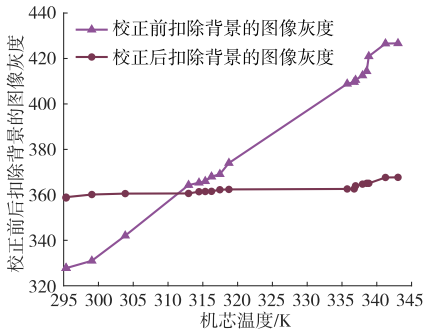


图7　校正前后传感器读取1 073.2 K标准高温黑体的扣除背景的图像灰度折线比较

从图7可以看出校正后的扣除背景的图像灰度受机芯温度的干扰较小，接下来将对其进行校正前后测温误差大小的比较。通过温度标定曲线反演出校正前后CMOS图像传感器对1 037.2 K标准高温黑体的测温的误差情况，校正前后测温误差数据汇总如表5所示。

将表5中的数据散点绘制成图8。通过数据对比，发现CMOS图像传感器的测温精度得到有效提高，测温的最大误差由10.9 K降低至2.2 K。

表5　校正前后传感器对1 073.2 K标准高温黑体的测温误差数据对比

机芯温度/K	校正前	校正后
295.4	−8.8	−0.5
299.1	−8.0	−1.5
303.9	−5.7	−1.4
313.0	−1.0	−0.9
314.5	−0.8	−1.3
315.4	−0.6	−1.7
316.3	−0.2	−1.6
317.5	−0.1	−1.9
318.8	1.0	−1.5
335.8	7.7	−1.9
336.8	7.8	−2.2
337.0	8.0	−2
338.0	8.3	−2.1
338.6	8.7	−2
338.9	9.9	−0.9
341.3	10.8	−0.8
343.1	10.9	−1.5

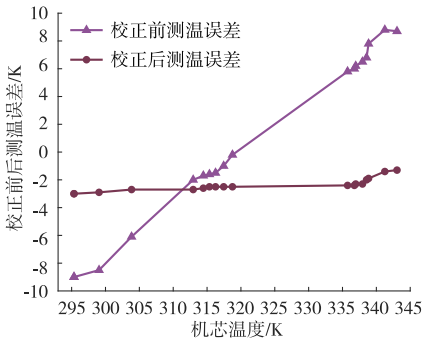


图8　校正前后传感器对1 073.2 K标准高温黑体的测温误差折线比较

5　结论

在不同环境温度下，CMOS图像传感器由于机芯温度变化使其对同一物体测温误差较大，机芯温度会对传感器背景灰度和响应系数存在影响。对于背景灰度，通过玻色-爱因斯坦分布构建了传感器背景灰度分布的数学模型，该模型可实现求解各机芯温度的背景灰度，实现背景灰度的校正；此外，通过一阶泰勒展开构建了响应系数校正方程，结合像元响应灰度方程即可将不同机芯温度扣除背景的图像灰度校正为同一机芯温度的扣除背景的图像灰度，实现对误差的校正。所提出的校正方法将机芯温度对传感器响应系数及背景灰度的影响引入像元响应方程，使得其更具有普适性，适用于不同温度的目标。使用高低温温箱模拟外场温度环境，以标准高温黑体为被测对象展开试验。试验结果

表明:此校正方法可实现在273.2～313.2 K环境温度下,针对1 037.2 K标准高温黑体,CMOS图像传感器测温的最大误差由10.9 K降低至2.2 K。随着CMOS图像传感技术的不断发展,所提出的方法在不同环境温度下的测温场景中具有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 赵金辉,郭 婧,张浩宇. 传统扩散连接在金属材料加工中的研究及应用[J]. 金属加工(热加工),2024(10):70-81.
Zhao Jinhui, Guo Jing, Zhang Haoyu. Research and application of traditional diffusion bonding in metal material processing[J]. MW Metal Forming, 2024(10): 70-81.

[2] 张天宇,吴嘉雯,方弘毅,等. 航空涡轮叶片表面红外温度测量[J]. 节能技术,2023,41(3):195-202,223.
Zhang Tianyu, Wu Jiawen, Fang Hongyi, et al. Infrared temperature measurement of aircraft turbine blade surface[J]. Energy Conservation Technology, 2023, 41(3): 195-202, 223.

[3] Abarca A, Theuwisse A. A CMOS image sensor dark current compensation using in pixel temperature sensors[J]. Sensors, 2023, 23(22): 9109.

[4] 董建婷,杨小乐,董 杰. 面阵CMOS图像传感器性能测试及图像处理[J]. 红外与激光工程,2013,42(12):3396-3401.
Dong Jianting, Yang Xiaole, Dong Jie. Performance test and image processing of area CMOS image sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3396-3401.

[5] Bosco A, Bruna A, Naccari F, et al. Hardware/software solution for high precision defect correction in digital image sensors [C]// 2008 IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2008: 1-4.

[6] Jain A, Gupta R. A survey on defect and noise detection and correction algorithms in image sensors[C]// 2015 International Conference on Advances in Computer Engineering and Applications, 2015: 754-759.

[7] Sun J, Wu J, Huang Y, et al. Research on the influence upon accuracy of temperature measuring in distance and correction method [C]// 2009 Asia-Pacific Conference on Information Processing, 2009: 278-280.

[8] Liu Z, Xu J, Wang X, et al. A fixed-pattern noise correction method based on gray value compensation for TDI CMOS image sensor[J]. Sensors, 2015, 15(9): 23496-23513.

[9] Hu C, Bai Y, Tang P. Denoising algorithm for the pixel-response non-uniformity correction of a scientific CMOS under low light conditions[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B3: 749-753.

[10] 白 琼,杨少华,严 明,等. 一种优化CMOS图像传感器成像质量的方法[J]. 现代应用物理,2023,14(1):30-35,55.
Bai Qiong, Yang Shaohua, Yan Ming, et al. A method for optimizing the imaging quality of CMOS image sensor[J]. Modern Applied Physics, 2023, 14(1): 30-35, 55.

[11] Zhu J, Wang B T, Liang T, et al. A high-precision temperature measurement method through correcting reflected radiation under high-temperature background [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 9508808.

[12] 陈紫玲. 基于特征光谱成像技术的CMOS相机灰度响应定标方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2022.
Chen Ziling. Research on gray response calibration method of CMOS camera based on characteristic spectrum imaging technology[D]. Changsha: Hunan University, 2022.

[13] 梁 璠. 基于CMOS图像传感器的高速图像采集系统设计[D]. 太原:中北大学,2020.
Liang Fan. Design of high-speed acquisition system based on CMOS image sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2020.

[14] 张晓龙,刘 英,孙 强. 高精度非致冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. 中国光学,2012,5(3):235.
Zhang Xiaolong, Liu Ying, Sun Qiang. Radiometric calibration of uncooled long-wave infrared thermal imager with high-precision[J]. Chinese Optics, 2012, 5(3): 235.

[15] Hammig M D, Kang T, Jeong M, et al. Suppression of interface-induced noise by the control of electron-phonon interactions [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2013, 60(4): 2831-2839.

[16] 李晓晴. 车载式高精度工业CT结构参数快速获取研究[D]. 北京:清华大学,2018.
Li Xiaoqing. Fast acquisition of structural parameters of vehicular high-precision industrial CT[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.

作者简介:

竹学武(2000—),男,硕士研究生,主要从事光学计量、辐射测温方面的研究;

占春连(1969—),女,研究员,博士生导师,现中国计量大学光学与电子科技学院院长,主要研究方向为光学计量测试技术及光学精密测试仪器研发。