

中性滤光片扩大 CCD 测温范围的研究

彭小奇¹, 孙元², 唐英²

(1.湖南工业大学, 湖南 株洲 412008; 2.中南大学 物理科学与技术学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于彩色 CCD (电荷耦合器件) 的比色测温中, CCD 必须工作在光电转换特性的非饱和区。由于 CCD 图像传感器的非饱和区宽度较窄, 单独利用 CCD 测温时, 测温范围难以达到高温检测的应用要求。针对一些学者提出的采用中性滤光片扩大测温范围的思想, 通过深入分析 CCD 光电转换特性和辐射体单色辐射亮度与温度之间的关系, 指出使用中性滤光片虽然可以扩大测温范围, 但其效果并不显著, 仍难以满足高温测量的应用要求, 实验结果证明了结论的正确性。

关键词: 高温测量; 彩色 CCD; 中性滤光片

中图分类号: TK311

文献标识码: A

文章编号: 1673-9833(2007)03-0035-04

Research on Expanding CCD Measuring Range by Neutral Filter

Peng Xiaoqi¹, Sun Yuan², Tang Ying²

(1.Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2.College of Physics Science and Technology, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: CCD (charge-coupled device) has to work in the non-saturation area of the photoelectric conversion characteristics in the temperature measurement by two-color thermometry based on color CCD. Since the non-saturation area of CCD image sensor is narrow, the measuring range can not reach the high-temperature measurement application requirements when CCD is used to measure the temperature alone. With analysis of the CCD photoelectric conversion characteristics and the relation of radiator monochromatic radiation luminance and temperature, it is pointed out that using neutral filter can expand CCD measuring range with limited effect, but can't reach the high-temperature measurement application requirements. The experimental results prove the conclusion.

Key words: high-temperature measurement; color CCD; neutral filter

0 引言

基于彩色 CCD 的比色测温技术是当前高温检测领域中的研究热点之一^[1, 2], 比色测温原理和彩色 CCD 输出图像中包含的色度信息是这种测温方法的基础^[3-5]。彩色 CCD 工作在光电转换特性的非饱和区时, CCD 的三色通道输出信号与辐射体单色辐射亮度有一一对应的关系, 可以利用 CCD 的色度信息计算出辐射体的温

度场。高温测量通常要求较宽的测温范围, 但是由于 CCD 图像传感器的非饱和区宽度较窄, 单独利用 CCD 测温时, 测温范围难以达到高温检测的应用要求。为此, 文献[6, 7]提出在 CCD 摄像头前加高衰减率的中性滤光片, 用来防止 CCD 出现饱和失真, 以此扩大 CCD 的测温范围。本文通过深入分析 CCD 光电转换特性和辐射体单色辐射亮度与温度之间的关系, 指出使用中性滤光片虽然可以扩大测温范围, 但其效果并不显

收稿日期: 2007-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374079), 国家博士点专项科研基金资助项目(20030533008), 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ2066)

作者简介: 彭小奇(1962-), 男, 四川武胜人, 湖南工业大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事复杂工业过程智能检测, 优化决策与智能控制方面的研究。

著, 仍难以满足高温测量的应用要求, 必须寻找其他方法来扩大 CCD 测温的动态范围, 黑体炉测温实验结果证明了结论的正确性。

1 CCD 比色测温原理

彩色 CCD 依靠设置在面阵光电元件靶面间的 3 种滤色点阵, 将入射的可见光分解为 RGB 3 种基色, 三基色通道的输出信号分别为^[8]:

$$\begin{cases} R(T) = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) r(\lambda) d\lambda, \\ G(T) = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) g(\lambda) d\lambda, \\ B(T) = A \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) b(\lambda) d\lambda, \end{cases} \quad (1)$$

$$A = \frac{1}{4} \left[\frac{2a}{f} \right]^2 \tau \mu t \quad (2)$$

式中: $L(\lambda, T)$ 是温度为 T 的辐射体在辐射波长 λ 处的单色辐射亮度;

$r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$ 分别为 CCD 三基色通道的光谱响应特性函数;

a 为镜头的出射光瞳半径;

f 为像方焦距;

τ 为 CCD 的光电转换系数;

μ 为镜头的透光率, 由于 CCD 的镜头对各个波长光波的透光率近似相等, 因此, 可将 μ 近似看作常数;

t 为曝光时间。

设 CCD 的光谱响应特性为理想冲激响应^[9], 则:

$$\begin{cases} R(T) = Ar(\lambda_R)L(\lambda_R, T) = K_R L(\lambda_R, T), \\ G(T) = Ag(\lambda_G)L(\lambda_G, T) = K_G L(\lambda_G, T), \\ B(T) = Ab(\lambda_B)L(\lambda_B, T) = K_B L(\lambda_B, T) \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ 分别取值 700 nm, 546.1 nm, 435.8 nm。

设待测辐射体为灰体, 将式 (3) 中的 R, G 代入比色测温公式可得^[10]:

$$T = \frac{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} \right)}{\ln \frac{R}{G} - \ln \frac{K_R}{K_G} - 5 \ln \frac{\lambda_G}{\lambda_R}} \quad (4)$$

CCD 的光电转换特性如图 1 所示^[11]。

图 1 中, V_D 为 CCD 无光照时的输出电压, 称为暗输出电压, 其对应曝光量为 S_0 ; 特性曲线的拐点 G 所对应的输出电压 V_{SAT} 称为饱和输出电压, 所对应的曝光量 S_E 称为饱和曝光量。当曝光量高于 S_E 后, CCD 输出信号不再增加。

CCD 的非饱和区光电转换特性可由下式描述:

$$U = d_1 S^\gamma + V_D \quad (5)$$

式中: U 为输出信号电压;

S 为曝光量;

d_1 为 CCD 的光响应度;

γ 为表征 CCD 光电转换特性非线性的指数, $\gamma \approx 1$ ^[12]。

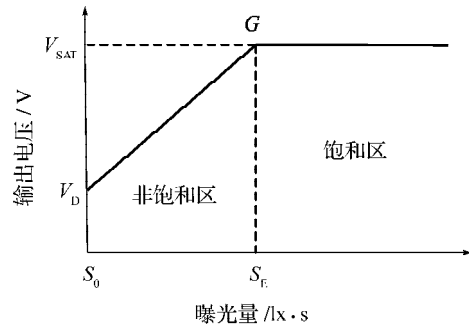


图 1 CCD 光电转换特性

Fig. 1 The photoelectric transition characteristic of CCD

光积分时间过长或光强度过高会使 CCD 势阱中的电荷饱和, 并出现电荷“溢出”现象, 破坏单色辐射亮度与 CCD 三色通道输出信号的一一对应关系, 故 CCD 的工作点需选在其光电转换特性的非饱和区。

2 CCD 三色通道输出特性

CCD 的红基色输出值很大, 绿基色次之, 蓝基色输出值很小, 其原因如下。

2.1 辐射体单色辐射亮度不同

当温度低于 3 000 K 且波长 $\lambda < 0.8 \mu\text{m}$, 即 $\frac{C_2}{\lambda T} \gg 1$ 时, 绝对黑体的单色辐射亮度满足维恩公式^[13]:

$$L^0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (6)$$

普通辐射体的单色辐射亮度为:

$$L(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) L^0(\lambda, T) \quad (7)$$

式中: $L^0(\lambda, T)$ 为绝对黑体的单色辐射亮度;

λ 为波长;

C_1 为第一辐射常数, $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{K}$;

C_2 为第二辐射常数, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$;

$\varepsilon(\lambda, T)$ 为辐射体的光谱发射率;

e 为自然对数的底。

将 $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$ 分别代入式 (6) 可得 CCD 三色通道输出与绝对黑体单色辐射亮度之间的函数关系:

$$\begin{cases} L^0(\lambda_R, T) \approx 7.1 \times 10^{14} \cdot e^{-2.1 \times 10^4 \cdot T^{-1}}, \\ L^0(\lambda_G, T) \approx 7.6 \times 10^{15} \cdot e^{-3.3 \times 10^4 \cdot T^{-1}}, \\ L^0(\lambda_B, T) \approx 2.4 \times 10^{15} \cdot e^{-2.6 \times 10^4 \cdot T^{-1}} \end{cases} \quad (8)$$

图 2 是绝对黑体在 1 000~1 700 K 内 RGB 三基色的单色辐射亮度与温度的函数曲线。从图 2 可以看出, 黑体红色辐射亮度远远大于绿色和蓝色辐射; 而且随着温度的增高, 红色辐射亮度随温度增加而增大的速度也大于绿色和蓝色辐射亮度。普通辐射体的单色辐射亮度也具有相同的特性。

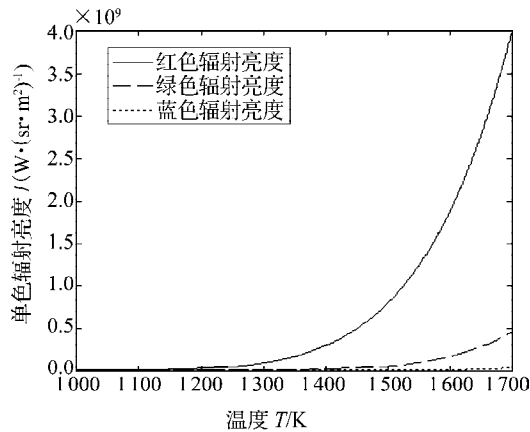


图2 绝对黑体在 1 000~1 700 K 内的单色辐射亮度

Fig. 2 The homochromatic radiation luminance of an absolute blackbody within the temperature 1 000~1 700 K

2.2 CCD 对三基色的灵敏度不同

CCD 对于 RGB 三基色的灵敏度并不相同, 对红光的灵敏度比对蓝光的灵敏度高很多^[14]。因此, 对于相同亮度的红色和蓝色辐射光, CCD 的输出是不同的, 蓝色信号的输出小于红色信号的输出。

由于上述原因, CCD 采集的图像中红色分量容易饱和; 而绿、蓝色分量则容易出现曝光不足、输出信号过低的情况。当红色输出饱和截止时, 单色辐射亮度与 CCD 三色通道输出信号的一一对应关系被破坏; 当绿色输出过低时, 绿色信号受热噪声、暗电流等干扰的影响很大, 会导致测量结果失真。因此, CCD 应用于辐射测温时对其光电转换特性非饱和区宽度有着非常苛刻的要求。高分辨率的 CCD 图像传感器的像素数增多, 导致势阱能存储的最大电荷量减少, 因而非饱和区宽度变窄^[15]; 而 CCD 的分辨率不高, 就不能准确测量高温辐射体的温度场。高温测量通常要求较宽的测温范围, 因此, 必须扩大 CCD 的测温范围以达到高温测量领域的应用要求。

3 中性滤光片对非饱和区的扩大作用

当辐射源射入 CCD 的曝光量为 S 时, 如果加透光率为 μ 的中性滤光片, 则 CCD 实际接收到的曝光量 S_μ 为:

$$S_\mu = \mu \cdot S \quad (9)$$

设加中性滤光片后的饱和曝光量为 $S_{\mu E}$, 对应 CCD 暗电压输出的曝光量为 $S_{\mu 0}$, 则有:

$$\begin{cases} S_0 = \mu \cdot S_{\mu 0} \\ S_E = \mu \cdot S_{\mu E} \end{cases} \quad (10)$$

设 CCD 非饱和区宽度为 ΔS , 加中性滤光片后的非饱和区宽度为 ΔS_μ , 则有:

$$\Delta S = S_E - S_0, \quad (11)$$

$$\Delta S_\mu = S_{\mu E} - S_{\mu 0} = \mu^{-1}(S_E - S_0) = \mu^{-1}\Delta S \quad (12)$$

可见, 在 CCD 镜头前加透光率为 μ 的中性滤光片, 可以使非饱和区宽度增大到原来的 μ^{-1} 倍, CCD 的测温范围也随之扩大。

4 中性滤光片对测温范围的扩大作用

经多次实验后发现, 当红色信号 $R \in [90, 240]$ 时, 测量结果精确度较高。

设温度为 T_1 时, $R(T_1) = 90$, 当温度为 T_2 时, $R(T_2) = 240$, 区间 $[T_1, T_2]$ 即为 CCD 的测温范围。当加透光率为 μ 的中性滤光片后, CCD 的测温范围为 $[T_{\mu 1}, T_{\mu 2}]$ 。由式 (3) 得加滤光片后 CCD 红色通道输出信号为:

$$R_\mu(T) = \mu K_R L(\lambda_R, T) = \mu K_R L_R(T), \quad (13)$$

$$\begin{cases} R(T_1) = K_R L_R(T_1) = 90, \\ R(T_2) = K_R L_R(T_2) = 240, \\ R_\mu(T_{\mu 1}) = K_R \mu L_R(T_{\mu 1}) = 90, \\ R_\mu(T_{\mu 2}) = K_R \mu L_R(T_{\mu 2}) = 240, \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{解得: } \begin{cases} L_R(T_2) = \frac{8}{3} L_R(T_1), \\ L_R(T_{\mu 1}) = \mu^{-1} L_R(T_1), \\ L_R(T_{\mu 2}) = \mu^{-1} L_R(T_2). \end{cases} \quad (15)$$

设定起始温度 T_1 后, 就可以利用式 (8)、(15), 通过数值计算, 估计出加不同透光率的中性滤光片后 CCD 的测温范围。

设当黑体温度为 1 399 K 时, 红色信号 $R=90$, 由此推算出的加不同透光率中性滤光片后 CCD 的测温范围见表 1。

表 1 理论估计的加中性滤光片后的测温范围

Table 1 The range of temperature measurement evaluated by theory after applying a neutral filter plate

滤光片透光率 /%	测温范围 / K			扩增比 /%
	下限	上限	温差	
100	1 399	1 500	101	
70	1 434	1 540	106	5.0
50	1 469	1 579	110	8.9
25	1 545	1 668	123	21.8

由上述理论推导结果可知, 选择透光率合适的中性滤光片可以扩大 CCD 的测温范围, 但其效果并不十分明显。

5 实验结果

选择 JAI 公司的 RGB 彩色 CCD 相机 CV-M77 构建测温系统, 在原云南昆明仪表厂的 WJL-11 型高温卧式黑体炉上进行实验; 选择中国计量科学研究院研制

的RT9031C精密直流光电高温计作为标定用测温仪表(1 073~2 473 K内不确定度 $\delta = 2.4$ K),并将其示值看作实际温度。加中性滤光片后的测温范围见表2,可见实验结果与理论分析一致。

表2 加中性滤光片后的测温范围

Table 2 The range of temperature measurement tested by experiment after applying a neutral filter plate

滤光片透光率 /%	测温范围 /K			扩增比 /%
	下限	上限	温差	
100	1 399	1 474	75	
70	1 426	1 514	88	17.3
50	1 444	1 528	84	12.0
25	1 497	1 596	99	32.0

6 结论

1) 理论推导和实验结果都表明,选择透光率合适的中性滤光片可以扩大CCD的测温范围;

2) 由于CCD单色辐射亮度和辐射体温度呈现非线性的关系,故使用中性滤光片扩大测温范围的效果并不显著,而且测温下限随中性滤光片透光率的减小而增大;

3) 需要探索其他方法来有效扩大CCD的测温范围,以满足高温测量领域的实际应用要求。

参考文献:

[1] 刘征,彭小奇,丁剑,等.国外CCD检测技术在工业中的应用与发展[J].工业仪表与自动化装置,2005(4): 65-69.
[2] 王魁汉,李友,王柏忠.温度测量技术的最新动态及特

殊与实用测温技术[J].自动化仪表,2001,22(8): 1-7.
[3] 李汉舟,潘泉,张洪才,等.基于面阵CCD图像的温度场测量研究[J].仪器仪表学报,2003,24(6): 653-656.
[4] 姜凡,刘石,卢钢,等.双色法火焰监测分析技术用于火焰温度场的实测试验[J].中国电机工程学报,2002,22(12): 133-137.
[5] 张玉杰,吕岑.基于彩色CCD炉膛火焰温度场测量方法研究[J].量子电子学报,2004,21(5): 674-678.
[6] 孙旋,徐向东.基于改进比色测温法的全炉膛火焰监测和燃烧诊断技术研究[J].电站系统工程,2001,17(6): 366-370.
[7] 卫成业,王飞,马增益,等.运用彩色CCD测量火焰温度场的校正算法[J].中国电机工程学报,2001,21(1): 70-76.
[8] 蔡文贵,李永远,许振华.CCD技术及应用[M].北京:电子工业出版社,1992: 128-130.
[9] 卫成业,严建华,商敏儿,等.利用面阵CCD进行火焰温度分布测量(I)——二维投影温度场的测量[J].热能动力工程,2002,17(97): 58-61.
[10] 李汉舟,潘泉,张洪才,等.基于数字图像处理的温度检测算法研究[J].中国电机工程学报,2003,23(6): 195-199.
[11] 宋海鹰,彭小奇,周海叶.非接触式温度测量系统中固体摄像器件的选择[J].传感器技术,2004,23(8): 71-73.
[12] 袁祥辉.固体图像传感器及其应用[M].重庆:重庆大学出版社,1996: 73-75.
[13] 崔志尚.常用辐射测温仪器及其检定[M].北京:计量出版社,1986: 20-21.
[14] 王庆有.图像传感器应用技术[M].北京:电子工业出版社,2003: 189-199.
[15] 凌云光视数字图象公司.CCD&CMOS图像和机器视觉产品手册[Z].北京:凌云光子技术集团出版社: 94-95.