

高速 CCD 像机的测温系统标定方法

毛尹航, 于天河

(哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 基于 CCD 测温方法是一种非接触式的高温测温方法, 一般工业用 CCD 摄像机测温范围较窄, 无法满足现代高温测量中对测量带宽的要求, 使用超高速 CCD 摄像机进行温度测量可以克服一般 CCD 相机单幅图像量程不足的缺点。根据比色测温原理, 设计了温度标定实验, 并提出了针对不同快门速度下, 建立了温度与比色值的数学模型。超高速 CCD 相机测温数据与实际温度数据之间存在着良好的对应关系, 单幅图像数据测温范围在 500K 左右, 该系统具有实际的应用价值。

关键词: 比色测温; 彩色 CCD; 数字图像处理; 温度测量

DOI: 10.15938/j.jhust.2016.01.015

中图分类号: TK311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2016)01-0072-05

MAO Yin-hang, YU Tian-he

(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The method to measure temperature is based on CCD which is a non-contact method to measure the high temperature. The temperature range of general industrial CCD camera is narrow, which can not meet for the requirement of measuring width in the modern high temperature measurement. The ultra high speed CCD camera to measure temperature can obtain enough image range while the general single CCD camera cannot. According to the principle of colorimetric temperature measurement, the temperature calibration experiment is designed, and the mathematical model of temperature and the color value is established based on different shutter speeds. There is a good corresponding relation between experiment data with high-speed CCD camera temperature measurement and the actual temperature data, and the temperature measuring data range of the single image is around 500 K, which indicates that the system has practical application value.

Keywords: scanning pyrometer; color CCD; digital image processing; temperature measurement

0 引 言

近年来随着电荷耦合器件(charge couple device, CCD)成像技术的发展, CCD 已经逐渐开始应用到高温温度场测量当中^[1]。民用的 CCD 相机的快

门速度在 50fps(帧/秒)左右, 普通工业 CCD 相机, 它的快门速度在 100fps 以下, 其动态范围较窄, 无法满足高温测量范围的要求, 使基于 CCD 的辐射测温技术应用受到限制^[2-3]。随着高速摄像技术的发展, 针对特种拍摄任务的高速摄像机快门速度在 1 000fps, 超高速摄像机, 快门速度在几千至数十万帧

收稿日期: 2015-03-19

作者简介: 毛尹航(1988—), 男, 硕士研究生;

于天河(1972—), 男, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: leftheaven@126.com.

每秒,相继研发并被应用在各种非接触测量领域,如位移、震动、尺寸测量等^[4-7]。本文所述的超高速 CCD 摄像机系统针对高温火焰进行拍摄,每一帧图像记录下来火焰温度场分布情况,图像的灰度数据和相应的曝光时间对其进行数据建模,对温度场重建。本研究所做的工作是测温系统的温度标定实验,阐述了基于图像处理 CCD 比色测温法的基本原理,给出了温度标定方法,为火焰温度场测量奠定了基础。

1 CCD 的成像原理

系统中的 CCD 是光敏单元、输入结构和输出结构等组成的一体化光电转换器件,其突出特点是以电荷作为信号载体,可以由计算机进行快速计算处理。当入射光照在 CCD 光敏单元上时,光敏单元中将产生光电荷 Q , Q 与光子速率 Δn_0 、光照时间 T_c 、光面单元面积 A 成正比,

$$Q = \eta q \Delta n_0 A T_c \quad (1)$$

其中, η 为材料的量子效率; q 为电子电荷量。CCD 图像传感器的光电转换特性如图 1 所示,其中横坐标为照度, lx. s; 纵坐标为输出电压, V_0 在非饱和区满足:

$$f(s) = d_1 s^\tau + V_D \quad (2)$$

式中: $f(s)$ 为输出信号电压 (V); s 为曝光量 (lx. s); d_1 为直线的斜率 ($\frac{V}{\text{lx. s}}$), 表示 CCD 的光响应度; τ 为光电转换系数, $\tau \approx 1$; V_D 为无光照时 CCD 的输出电压称为暗电压。特征曲线的拐点 G 所对应的曝光量 S_E 称为饱和曝光量, 所对应的输出电压 V_{SAT} 称为饱和输出电压。曝光量高于 S_E 后, CCD 的输出信号不再增加。因此要使 CCD 摄像机完成测温工作需要保证 CCD 器件工作在非饱和区。

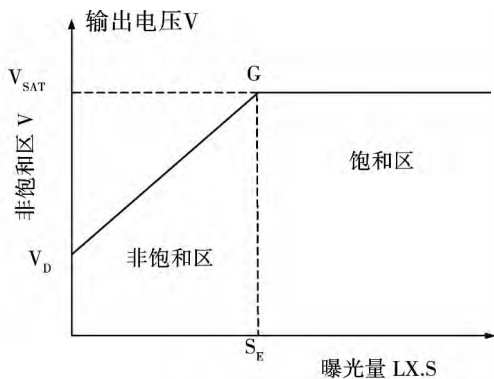


图 1 CCD 光电转换特性

2 基于彩色 CCD 的比色测温法

在利用 CCD 进行比色法测温时,需要对模型进行理想化假设:

1) 假设被测高温物体能通过焦距调节清晰成像,而且空气对高温物理辐射出的可见光反射、散射和吸收很小,忽略空气对 CCD 成像的影响,认为辐射在 CCD 中拍摄的图像真实可靠。

2) 由于被测物体的物理结构不同,火焰加热也并非使每一个像素点都均匀受热,所以假设每一个像素的区域内都是均匀受热,并且温度都是相同的。

3) 假设炉内物料为灰体而且为余弦辐射体,即认为高温物料的亮度,从各个方向看都是一样的。

4) 假设拍摄的被测物体足够小,拍摄的距离足够远,并且拍摄的物体在主光轴附近,以至于可认为拍摄的图像为平面并且共轭的图像。

5) 假设所测得的温度范围为 800 ~ 3 000 K,波长在 300 ~ 800 nm,即满足维恩公式的计算公式。^[8]

根据普朗克公式黑体辐射可表示为:

$$E(\lambda, T) = \pi I(\lambda, T) = \varepsilon_\lambda \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (3)$$

其中, $E(\lambda, T)$ 为辐射能, $I(\lambda, T)$ 为辐射强度, ε_λ 为黑体辐射率, T 为绝对温度, λ 为波长, c_1 为第一辐射常数 $3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, c_2 为第二辐射常数 $1.438 833 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

由假设三可知可利用维恩公式简化普朗克公式则有:

$$M(\lambda, T) = \frac{\varepsilon(\lambda, T) c_1}{\lambda^5 e^{\frac{c_2}{\lambda T}}} \quad (4)$$

最后结合 CCD 摄像机工作特性得到的公式(5)。^[8]

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_b} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln \frac{R}{B} + 5 \ln \frac{\lambda_r}{\lambda_b} + K_{rb}} \\ T &= \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_g} - \frac{1}{\lambda_r} \right)}{\ln \frac{R}{G} + 5 \ln \frac{\lambda_r}{\lambda_g} + K_{rg}} \\ T &= \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_b} - \frac{1}{\lambda_g} \right)}{\ln \frac{G}{B} + 5 \ln \frac{\lambda_g}{\lambda_b} + K_{gb}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中: λ_r 、 λ_g 和 λ_b 分别为红色与绿色的波长, 根据国际照明技术委员会(C. I. E) 标准, 分别为 700 nm, 546. 1 nm 和 435. 8 nm; R 、 G 、 B 分别为该像素点的红色、绿色、蓝色的灰度值. K_{rb} 、 K_{rg} 和 K_{gb} 为常量与所用 CCD 摄像机的特性及被测目标有关. 这样就可以根据公 (5) 得到当前温度值 T , 从而达到测量温度的目的^[10-11]. 使用比色测温法测量温度场的分布, 可以在不知道被测物体的精确的光谱发射率的情况下, 只有两个波长下光谱发射率的比值即可. 因为测量光谱发射率的精确值要比光谱发射率之间的比值困难的多, 从而实际温度场的测量中比色法要方便很多.

3 温度标定方法

3.1 标定实验装置及流程

本测温系统标定所采用的高温黑体炉分度或检定测温范围在 1 073 ~ 2373 K 之间的标准辐射热源, 温标由标准光学高温计传递, 黑体炉的温度由黑体炉温控系统控制和读出. 超高速 CCD 摄像机满像素最大帧速率 2 000 帧/秒(分辨率为 1 280 × 1 024), 非饱和为最大帧速率 160 000 帧/秒(分辨率为 640 × 8), RGB 灰度级为 2^{12} , 使用千兆以太网与上位机链接. 标定实验装置如图 2 所示.



图2 黑体炉标定实验装置图

系统标定实验步骤如下:

- 1) 选择实验场地为暗室, 避免实验进行中其它可见光的干扰(地下室或无窗的密闭室内) .
- 2) 调整 CCD 摄像机与黑体炉位置使其在同一轴线上, 链接 CCD 摄像机与上位机, 调整摄像机镜头光圈大小.
- 3) 关闭暗室灯光, 依据黑体炉操作手册开启黑体炉并设置所需标定温度, 待黑体炉温度稳定后启动 CCD 摄像机及上位机图像采集软件.
- 4) 将软件设定为直接采集原始数据, 关闭相机

白平衡, 设定曝光速度并依此进行数据的采集. 重复以上 3 步骤直到所需标定进行离线数据处理, 将处理后的数据录入测温软件标准数据库. 具体标定流程如图 3.

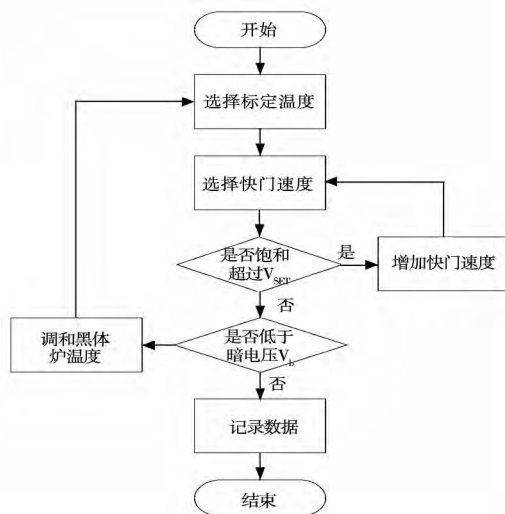


图3 温度标定实验流程图

3.2 标定实验数据处理

3.2.1 数据预处理

使用高速 CCD 摄像机可以在使用相同的中性滤光片和固定曝光光圈时, 通过减少曝光时间以获得更大的量程, 但在高速曝光中会因为随机因素产生不稳定的像素点, 由标定实验所得到的原始数据, 经过中值滤波处理, 排出掉因高速摄像而造成的像素奇点, 即该像素点灰度值与其他点差异过大的点. 图 4(a) 为未经处理的原图像, 图 4(b) 为处理之后的图像. 其中, x 、 y 为像素点的位置坐标, z 为在该像素点时单色的灰度坐标.

3.2.2 温度标定数据处理

由式 5 可知, 在满足一定条件时, 双色的比值和温度存在对应关系, 于是设该对应关系为 f , 比色用的颜色采用红、蓝两色, 则 $\frac{R}{B}$ 与温度 T 存在:

$$T = f\left(\frac{R}{B}\right). \quad (6)$$

如果要使标定温度成立, 则 f 存在反函数 f^{-1} , 即在快门速度一定时, R/B 与温度 T 成一一对应关系. 以快门速度 4 000fps 和 64 000fps 为例, 取标定范围为分别为 1 273. 2 ~ 1 773. 2 K、1 773. 2 ~ 2 273. 2 K, 其在未使用滤光片的情况下标定温度范围为 500 K, 每隔 100 K 进行一次标定实验. 在实际实验中这两种快门速度所标定的测温范围, 接近为该超高速 CCD 相机所能达到的最大测温范围. 预处

理后的数据取中心附近的像素点进行数据分析,求得 R 、 G 、 B 的期望 $\bar{R}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\bar{B}$,其结果如表 1 所示.

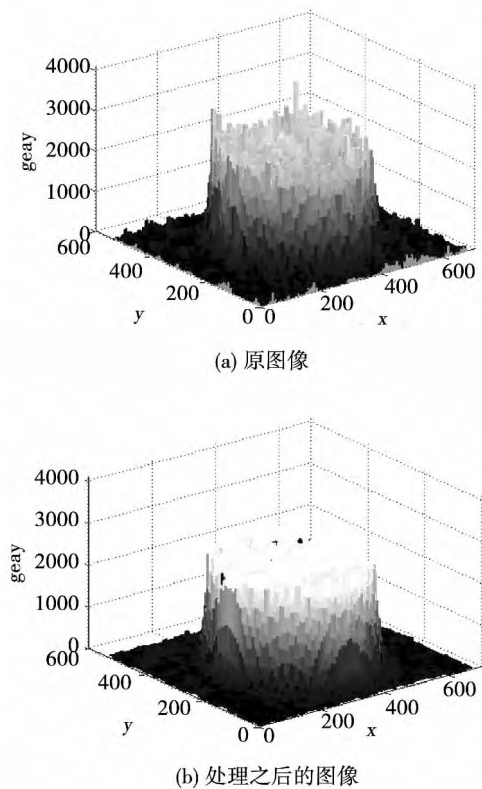


图 4 数据预处理灰度三维对比图

表 1 两种快门速度下的标定结果

快门速度 /fps	温度 /K	$\bar{R}/\bar{G}$	$\bar{R}/\bar{B}$	$\bar{G}/\bar{B}$
4 000	1 273	2.064 9	2.239 4	1.084 5
	1 373	3.330 4	6.907 4	2.074 1
	1 473	3.136 7	18.221 4	5.809 2
	1 573	2.919 1	24.596 3	8.425 9
	1 673	2.764 5	35.110 6	12.700 5
	1 773	2.510 2	44.030 4	17.540 5
64 000	1 773	2.726 1	39.000 0	14.306 1
	1 873	2.480 8	47.395 3	19.104 7
	1 973	2.239 0	40.863 9	18.251 3
	2 073	2.126 6	29.895 3	14.057 7
	2 173	2.036 1	23.661 7	11.621 3
	2 273	1.894 7	20.606 3	10.875 7

从表 1 中数据可知在快门速度为 4 000fps 时, $\bar{R}/\bar{B}$ 与 $\bar{G}/\bar{B}$ 随着温度的升高具有单调性,由文献 11 可知在比色法测温中优先选择光波波长差异较大的两种颜色,所以在 4 000fps 时,选择 $\bar{R}/\bar{B}$ 进行温

度标定. 当快门速度为 64 000fps 时, $\bar{R}/\bar{G}$ 随温度升高具有单调性,所以选择 $\bar{R}/\bar{G}$ 进行温度标定. 采用最小二乘法对所得数据进行曲线拟合,得到预测模型如下:

快门速度为 4 000fps 时

$$T = -0.040\,7\left(\frac{R}{B}\right)^2 + 13.418\,7\left(\frac{R}{B}\right) + 1\,257.990\,3 \tag{7}$$

快门速度为 64 000fps 时

$$T = 457.112\,8\left(\frac{R}{G}\right)^2 - 2\,718.650\,2\left(\frac{R}{G}\right) + 5\,790.591\,4 \tag{8}$$

温度标定拟合曲线如图 5 所示,其中空心圆点为标定实验黑体炉实际温度,实线是模型拟合曲线. 5(a) 图为快门速度 4000fps 时的 R/B 与温度 T 的拟合曲线,5(b) 为在快门速度为 64 000fps 时, R/G 温度 T 的二阶拟合曲线.

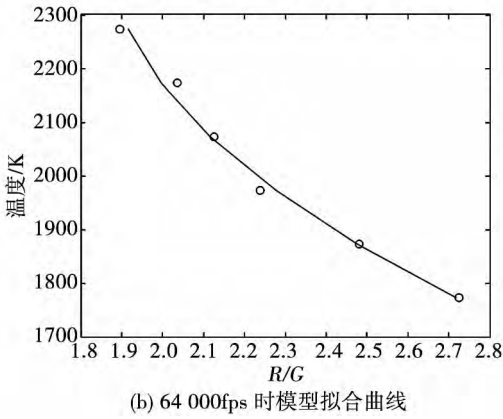
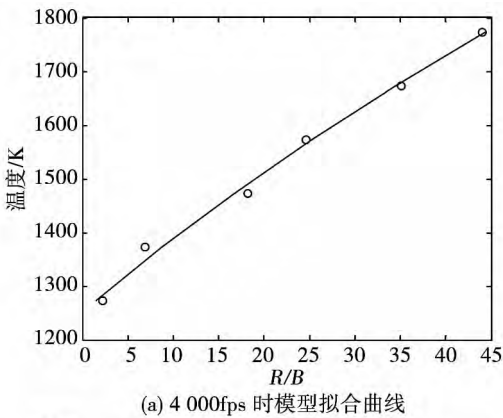


图 5 温度标定模型拟合曲线

温度标定模型预测的温度值与实际黑体炉温度对比如表 2 所示. 由表 2 可知,在快门速度为 4 000 fps 时,相对误差最大值为 1.83%,在快门速度为 64 000 fps 时相对误差最大值为 1.71%,模型误差稳定性较好.

表 2 快门速度为 4 000 fps 和 64 000 fps 时的模型误差

快门速度 /fps	标定温 度 /K	模型预测 温度 /K	实际误 差	相对误 差 /%
4 000	1 273	1 287. 8	- 14. 8	1. 15
	1 373	1 347. 8	25. 1	1. 83
	1 473	1 489. 0	- 15. 9	1. 07
	1 573	1 563. 4	9. 5	0. 61
	1 673	1 679. 0	- 6. 0	0. 36
	1 773	1 770. 0	3. 0	0. 17
64 000	1 773	1 776. 4	- 3. 3	0. 19
	1 873	1 859. 4	13. 6	0. 73
	1 973	1 995. 1	- 33. 7	1. 71
	2 073	2 076. 4	- 3. 3	0. 16
	2 173	2 150. 2	22. 7	1. 06
	2 273	2 280. 5	- 7. 5	0. 33

4 结 论

本文以人工黑体做为标准辐射热源,对超高速 CCD 相机的输出数据进行温度标定实验. 根据实验结果采用最小二乘法曲线拟合分析了实验数据,建立了各个快门速度所对应的温度与 R、G、B 灰度值的关系,并给出了该系统两种代表性的快门速度下的温度标定模型,实验表明该测温系统适用于的超高温场测量场合,根据数据所体现的误差也是在允许范围内,文中所提试验和和分析方法确实可行,具

有较大的使用价值.

参 考 文 献:

[1] 邓兴凯,杨永军. CCD 多光谱辐射测温技术的应用与发展 [J]. 计测技术,2011,31(1): 45 - 48.

[2] 孙元,彭小奇,李晟,等. CCD 辐射测温的动态范围研究 [J]. 传感器与微系统,2008,27(2): 24 - 26.

[3] 孙元,彭小奇,严军. 基于彩色 CCD 的高温场辐射测温方法 [J]. 仪器仪表学报,2011,32(11): 2579 - 2584.

[4] 江孝国,王远,金光,等. 超高速高性能快门型三分幅相机 [J]. 光子学报,2013,42(9): 1065 - 1070.

[5] WAN Xiaofeng, ZENG Pu. A Design of Data Acquisition of High Speed CCD Camera [C] //2009 Eighth IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing, 2009: 743 - 745.

[6] 陈骥,王鑫,曹久大,等. 高速 CCD 激光位移传感器 [J]. 光学精密工程 2008,16(4): 611 - 616.

[7] DIONISIO Doering, NORD Andresen, DEVIS Contarato, et al. A IMPixel Fast CCD Sensor for X-ray Imaging [C] //2012 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record (NSSIMIC) , 2012: 527 - 529.

[8] 唐翊翔,于合龙,陈桂芬. 基于比色法的温度场测量 [J]. 长春师范大学学报,2014,33(3): 25 - 27.

[9] 杨兆飞,司洋. 基于比色测温算法的改进 [J]. 伺服控制,2013, 5: 60 - 61.

[10] 颜卓勇,郭庆华,梁钦锋,等. 基于图像处理的 CCD 测温系统标定方法 [J]. 计算机与应用化学,2007,24(11): 1453 - 1457.

[11] 戴景民,多光谱辐射测温技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学,1995.

(编辑: 关 毅)