

# 单 CCD 数字滤光温度场测量

郑德忠, 周颖慧

(燕山大学河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北秦皇岛 066004)

**摘要:** 为提高 CCD 辐射测温精度, 需在光路中加载滤光片以获取单色光. 然而现场搭建光路极为不便且难于实现精确的图像匹配. 为减小误差且便于工程实现, 提出了对 CCD 光谱响应曲线寻迹的数字滤光方法, 并与多色滤光系统进行了比较. 结果表明, 数字滤光方法简单有效, 无需外置滤光光路即可实现图像辐射测温.

**关键词:** 温度测量; CCD 光谱响应; 曲线寻迹; 数字滤光

**中图分类号:** TB942      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2009)12-2774-04

## Digital Filtering for Temperature Field Measurement Using a Single CCD Camera

ZHENG De-zhong, ZHOU Ying-hui

(Measurement Technology and Instrumentation Key Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract:** To improve the accuracy of temperature measurement using a CCD camera, the common used method is to build a filtering system in optical path. The method, however, is unsuitable for real industrial measurement because of the complexity of building and adjusting the filtering device, and meanwhile, image matching needs to be considered for obtaining accurate grayscale ratio. To be convenient for industrial temperature measurement, a digital filtering method is proposed based on an algorithm of CCD spectral response curve tracing. The method is compared with conventional method of loading filtering devices. The result indicates that the digital filtering is more convenient for temperature field measurement and keeps a satisfactory accuracy.

**Key words:** temperature measurement; CCD spectral response; curve tracing; digital filtering

### 1 引言

近年来, 基于 CCD(Charge Coupled Device)相机的辐射测温方法在工业中受到广泛关注<sup>[1-3]</sup>, 然而测量精度仍有待提高. CCD 光谱响应带宽是引起误差的主要原因之一. 针对该问题, 多在测温光路中加载滤光片以获取单色辐射光<sup>[4,5]</sup>. 光束接收方式大致有两种: 单通道型和多通道型. 前者采用旋转装置和多滤光片分时接收辐射光, 优点是光路简单, 缺点是不适于测量动态温度场且需要保持旋转装置和 CCD 的同步; 后者采用多 CCD 经各自滤光片同时接收单色辐射图像, 优点是响应迅速, 缺点是需要保持多 CCD 的参数一致、同步运行及需实现图像匹配.

本文提出了基于 CCD 光谱响应曲线寻迹的数字滤光方法. 该方法利用曲线寻迹思想和数字图像处理技术将光谱曲线离散化, 得到描述 CCD 光谱响应特性的二维离散坐标, 进而获得单波长下的灰度输出; 在黑体炉上建立起原始辐射图像灰度比与单波长下灰度比间的

映射关系, 得到滤光公式, 以实现工业现场的数字滤光温度场测量.

### 2 测温原理与滤光分析

CCD 温度场测量的原理是基于维恩辐射定律发展出的比色测温法<sup>[6]</sup>. 当温度在 800 °C~ 2000 °C 可见光范围内, 可视辐射体为灰体, 基于维恩定律的双色测温公式如下:

$$T = \frac{c_2 \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}{5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} + \ln \frac{s(\lambda_2, T)}{s(\lambda_1, T)} + K} \quad (1)$$

式中,  $T$  是被测量对象的绝对温度 ( $K$ );  $c_2$  为普朗克第二常数;  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为某单色光波长, 受 CCD 感光特性的限制, 波长组合只能在红光(R)、绿光(G)和蓝光(B)中进行选择.  $s(\lambda_1, T)$  和  $s(\lambda_2, T)$  是相应波长下的灰度值, 原理上与相应波长下的辐射能成正比;  $K$  为系统标定因子, 与测量系统的辐射衰减、测量距离、CCD 参数等有关, 用于校正辐射图像灰度与温度的关系, 可通过黑体

炉标定得出。

由式(1)可以看出, 灰度值对温度的计算起关键性作用。假设辐射体的辐射能谱为  $E_T(\lambda)$ , 则 CCD 的 RGB 输出为:

$$\begin{cases} V_R(T) = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) f_R(\lambda) d\lambda \\ V_G(T) = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) f_G(\lambda) d\lambda \\ V_B(T) = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) f_B(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (2)$$

式中  $f_*(\lambda)$  ( $*$  = R, G, B) 为 CCD 各颜色分量的光谱响应函数。比色公式要求 RGB 灰度值应与辐射能成正比, 即  $f_*(\lambda)$  应为冲激函数, 此时有

$$\begin{cases} V_R(T) = K_R E_T(\lambda) \\ V_G(T) = K_G E_T(\lambda) \\ V_B(T) = K_B E_T(\lambda) \end{cases} \quad (3)$$

任选两个颜色值代入式(1), 即可获得该点的温度值。然而实际的 CCD 光谱响应非理想冲激函数, 典型曲线如图 1 所示。

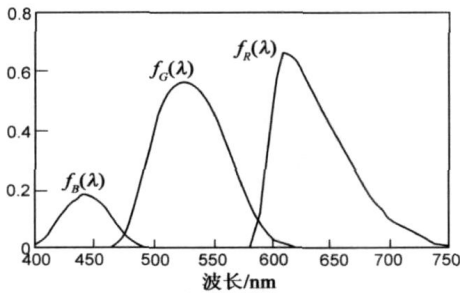


图1 典型CCD光谱响应曲线

由图 1 曲线可以看出, CCD 光谱响应带宽较宽, 导致 RGB 的输出非单波长下函数值的乘积, 而是由式(2)得到的整个波段内两曲线积的积分, 这直接影响了温度计算的准确性。

### 3 单 CCD 多色滤光系统

为减小由 CCD 光谱响应带宽引起的误差, 设计了一个滤光光路实现 RGB 分量的同步滤光和单 CCD 接收, 系统如图 2 所示。

光路中的滤光单元主要由分光镜、透射镜、反射镜和滤光片组成, 将接收到的辐射光分成三束, 各自通过

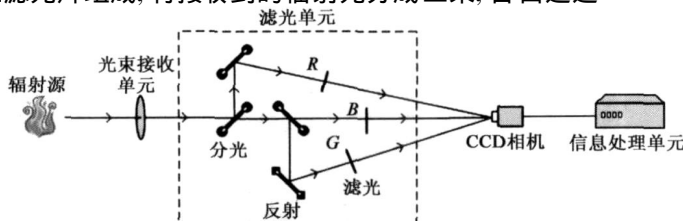


图2 单CCD多色滤光系统

R、G、B 窄带滤光片后被单 CCD 接收, 然后传入信息处理单元进行图像匹配和温度场计算。

然而工业现场进行光路的建立和调节十分不便且易增大现场误差。此外, 要获得各像素点的灰度比需要对各单色图像进行像素匹配, 而分光过程会产生图像的变形和畸变, 增大了匹配的难度。为便于现场应用, 提出一种避免加载滤光光路的方法——数字滤光。

### 4 数字滤光

为应用式(3)获得辐射图像的 RGB 输出  $V_*(T)$ , 需得到单波长下的光谱响应输出。而 CCD 光谱响应较为复杂, 且随 CCD 的不同也有所差异, 很难找出完全描述光谱曲线的数学解析式。本文利用曲线寻迹思想和数字图像处理技术将式(2)中光谱响应函数  $f_*(\lambda)$  数字离散化, 提取曲线在各波长点下的二维坐标值, 即可描述该 CCD 的光谱响应特性。

由 CCD 摄取的数字图像灰度级为 0~ 255, 由灰度直方图可获得每一级的像素数, 取加权平均阈值  $\delta$  进行图像分割

$$\delta = \frac{\sum_{i=0}^{255} P_i * i}{\sum_{i=0}^{255} P_i} \quad (4)$$

$P_i$  为第  $i$  个灰度级对应的像素数。

将分割后的图像二值化并置于一坐标系中。从左至右逐列扫描, 遇到第一个灰度值为 1 的像素点时, 定义为  $X$  轴起点  $x_0$ ; 从右至左扫描, 遇到的第一个灰度值为 1 的点定义为  $X$  轴的终点  $x_n$  ( $n$  为曲线所占像素列数)。同理, 逐行扫描各行像素, 定义  $Y$  轴的起点和终点分别为  $y_0$  和  $y_m$  ( $m$  为曲线所占像素行数), 于是有

$$\begin{cases} x_0 = \lambda_{\min} & \begin{cases} x_n = \lambda_{\max} \\ y_m = 1 \end{cases} \\ y_0 = 0 \end{cases}$$

其中  $\lambda_{\min}$  至  $\lambda_{\max}$  为 CCD 在可见光内光谱响应的波长范围。

设离散化的光谱响应曲线某点的坐标为  $(\lambda_i, y_j)$ , 则有

$$\lambda = \lambda_{\min} + i * \frac{(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})}{n} \quad (5)$$

$$y_j = \frac{1}{m} * j$$

$i$  为列扫描数,  $i = 0, 1, 2, \dots, n$ ;  $j$  为行扫描数,  $j = 0, 1, 2, \dots, m$ 。

输入波长  $\lambda$  可计算出该波长在曲线图像中对应的列数  $i$

$$i = \frac{n * (\lambda - \lambda_{\min})}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}} \quad (6)$$

在第  $i$  逐行扫描, 即可得到该波长下的光谱响应值  $y_{\lambda}$ . 当  $i$  从 0 取到  $n$ , 光谱曲线在可见光波段内各波长下的光谱响应输出便可获得.

任选一波长, 由式(6)和式(3)得该波长点下的灰度输出为

$$V_*(T) = y_* E_T(\lambda) \quad (7)$$

式中辐射体表面的辐射能  $E_T(\lambda)$  可由维恩定律表达, 式(7)变为:

$$V_{\lambda}(T) = y_{\lambda} \epsilon_r C_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T} \quad (8)$$

当被测目标为黑体时, 发射率  $\epsilon_r = 1$ . 式(8)即为 CCD 光谱响应为理想冲激函数时的灰度输出.

当 CCD 在黑体炉不同的温度点下直接摄取辐射图像时, 可得到一组原始辐射图像的灰度输出; 而采用式(8), 可得相同温度点单波长下的灰度输出, 两者之间建立的映射关系可起到滤光的作用, 称该映射关系为数字滤光公式. 由于从黑体炉上获取映射关系可视为灰度标定, 故该方法具有可行性.

由于实验摄取到的蓝光较弱, 信噪比较低, 故采用 RG 分量计算滤光关系式. 由于测温式(1)中用到的是灰度比, 因此实验中直接求取 RG 灰度比的映射关系. 经过多次实验分析, 得滤光经验公式为

$$V_{Frg} = 7.0419V_{Og}^2 - 15.1313V_{Og} + 10.7428 \quad (9)$$

$V_{Frg}$  经数字滤光后的 RG 灰度比,  $V_{Og}$  为原始 RG 灰度比.

在实际的工业测量中, 可用 CCD 直接摄取高温辐射图像, 然后在信息处理系统内部实现图像分光过滤及温度场的计算与显示, 处理过程如图 3 所示.

由 CCD 摄取的真彩色图像由 RGB 三种颜色分量构成, 因此一幅原始的辐射图像(图 3 中 A)可分解为 RGB 三幅单色图像, 实现了图像分光(图 3 中 B); 然后应用式(9)对分光后的 RGB 单色图像做数字滤光处理, 得到滤光后的图像(图 3 中 C)进行温度计算.

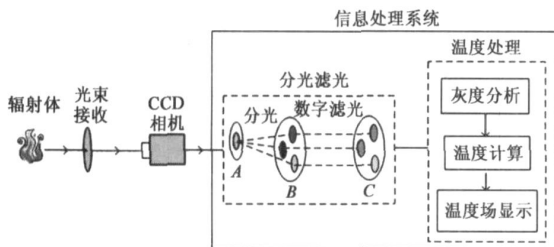


图3 数字滤光系统

### 5 实验分析

运用数字滤光方法, 首先在实验室 2.5kW 热处理炉上进行了实验研究. 采用 Sony 1/1.8 英寸彩色面阵 CCD, 分辨率为 2048 \* 1536. 外置光路中滤光片中心波

长为 540nm 和 640nm, 半带宽 10nm.

温控装置将燃烧炉温度从 1070℃ 缓慢升至 1170℃, 每隔 10℃ 取一点, 分别采用图 2 光路和图 3 的数字滤光方法计算辐射温度. 温度测量结果如图 4 所示.

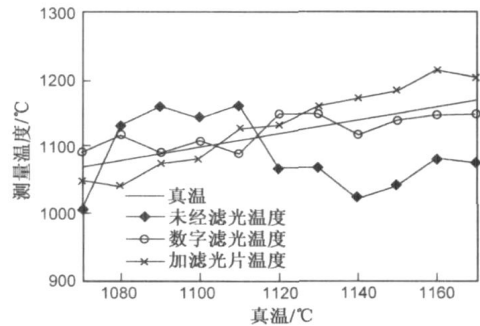


图4 滤光前后温度计算结果

由图 4 曲线可以看出, 两种滤光方法均使测温精度明显提高, 显示了滤光环节的必要性; 并且数字滤光与加载真实滤光片的测温效果相当. 数字滤光方法无需任何外置滤光光路, 现场实用性较强, 为开发便携式测温系统创造了条件.

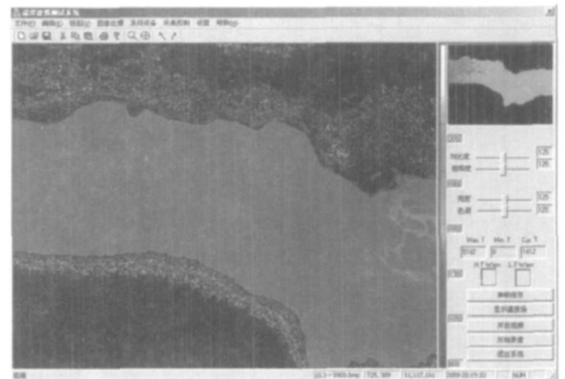


图5 数字滤光后铁水等温面图

图 5 显示了一幅从高温熔炉中分离出的铁水图像经数字滤光后的温度场等温面图, 标准热电偶测得铁水温度为 1471℃.

经数字滤光计算得铁水的平均温度为 1412℃, 相对误差为 4.01%, 其准确性明显高于未经滤光而直接计算的结果, 其平均温度为 1348℃, 相对误差为 8.36%. 该结果表明, 数字滤光可用于现场工业测量.

### 6 结论

通过对 CCD 光谱响应曲线做离散化寻迹, 计算出辐射图像单波长下的 RGB 输出, 并在黑体炉上与原始 RGB 输出做比较, 建立起灰度比值的映射关系式, 从而实现了高温辐射图像的数字滤光测温. 通过与多色滤光系统的测温结果比较, 显示出数字滤光方法的可行性和工程实用价值.

## 参考文献:

- [ 1 ] M SHINODA, A SUGANO, Y WATANABE. Prediction method of unburnt for coal fired utility boiler using image processing technique of combustion flame[ J]. IEEE transaction on Energy Conversion, 1990, 5(4): 640- 646.
- [ 2 ] GANG LU, YONG YAN, GERRY RILEY, HARRISHI CHANDR BHEEMUL. Concurrent measurement of temperature and soot concentration of pulverized coal flames[ J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 52(5): 990- 995.
- [ 3 ] YUICHIRO TAGO, FUMIE AKIMOTO, KUNIYUKI KITAGAWA, NORIO ARAI. Measurements of surface temperature and emissivity by two dimensional four color thermometry with narrow bandwidth[ J]. Energy, 2005, 30(2- 4): 485- 495.
- [ 4 ] H C ZHOU, S D HAN, F SHENG, C G ZHENG. Visualization of three dimensional temperature distributions in a large scale furnace via regularized reconstruction from radiative energy images: numerical studies[ J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2002, 72(4): 361- 383.
- [ 5 ] HIDEAKI YAMAGISHI, JUNICHI YAMAGUCHI. Fire flame detection algorithm using a color camera[ A]. Proceedings of the 1999 International Symposium on Micromechatronics and Human Science[ C]. Nagoya, Japan: IEEE, 1999. 255- 259.
- [ 6 ] E RENIER, F MERIAUDEAU, P SUZEAU, F TRUCHETER. CCD temperature imaging: applications in steel industry[ A]. Proceedings of the 1996 IEEE IECON: 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control Instrumentation[ C]. Taipei, China: IEEE, 1996. 1295- 1300.

## 作者简介:



郑德忠 男, 1949 年生, 教授、博士生导师, 燕山大学校学术委员会委员, 《传感技术学报》副主编, 河北省信息化专家组成员, 河北省人工智能学会副理事长。主要研究方向为系统仿真、信号处理、遥测遥控和先进控制等。负责主持了四十余项纵横向科研课题, 获机械部科技进步奖等省部级奖 4 项, 发表了论文 80 余篇。

E mail: qhdzdz@sina.com



周颖慧 女, 1980 年生, 燕山大学博士研究生。主要研究方向为图像处理及燃烧过程监控。

E mail: yinghui80@sohu.com