

文章编号:1004-4213(2010)01-0127-4

CIS 在瞬时多光谱爆温测量中的应用研究*

王博^{1,2}, 白永林¹, 张蕊利^{1,2}, 任克惠¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对利用 CMOS 图像传感器进行爆温测量的方法进行了理论和实验研究. 提出了一种更符合实际测量要求的瞬时多光谱爆温测量系统, 并用激光器的特征谱线对系统进行了标定. 利用该装置结合多光谱色温回归计算方法, 测量了温度快速变化的卤钨灯的温度, 得到了其随时间的变化曲线.

关键词:爆温; CMOS 图像传感器; 多光谱测温

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0127

0 引言

炸药爆温是指炸药爆炸时放出的能量将爆炸产物加热到的最高温度. 它存在时间短、温度高, 因此是炸药的多个爆轰参量中最难测量的一个量^[1]. 随着武器和火药研究的进一步发展, 不仅要求得到炸药爆炸稳定后爆炸产物的爆温, 还需要能描绘出在整个爆轰过程中(尤其是化学反应区)温度的变化, 因此仅测出炸药爆炸时的平均或某一瞬时的温度已不能满足要求.

CIS 具有图像传感和自扫描的功能, 因而用 CIS 作探测单元可克服目前爆温测量中的许多缺点. 目前爆温测量系统都只能测量某时刻的温度, 无法完成在同一次爆炸过程中的多时刻测量, 并且不能实时地进行数据处理, 测量结果不直观^[2-8]. 此外, 目前对爆温进行测量的研究主要集中在采用辐射测温的方法上, 如全辐射法、亮温法、比色测温法等, 其理论基础是将炸药爆轰过程中产生的辐射看作黑体辐射, 但实际炸药爆轰过程与黑体偏离较大, 因此上述测量方法均无法满足对炸药爆温精确测量的要求. 为了适应国防工业发展的需要, 本文利用 CIS 逐行曝光的特点, 基于多光谱测温技术, 在爆炸过程中采集多个时刻的各个波长的数据, 并串行地输入给计算机, 由计算机对这些数据进行处理, 实现爆炸过程中温度的快速动态分析. 该系统具有快速、多幅、直读和高灵敏度的特点, 它的研制成功, 对于加快新型炸药的研究将会起到重要作用.

1 多光谱辐射测温原理

多光谱测温法是利用被测目标在多个波长下的光谱辐射信息, 经过数据处理同时得到目标的真实温度和光谱发射率. 根据普朗克公式, 对于黑体的辐射, 探测器上的辐照度为

$$E_b(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} [\exp(C_2/\lambda T) - 1]^{-1} \quad (1)$$

由于爆炸场不是黑体, 其光谱辐照度受其表面发射率的影响, 因此探测仪器的光谱辐照度为

$$E(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T) C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (2)$$

式中 (λ, T) 为目标的光谱发射率; C_1, C_2 分别为第一、第二辐射常量; λ, T 分别为有效波长和目标温度. 当 $\lambda T \ll C_2$ 时, 为了便于处理, 式(2)可改为下式, 即利用韦恩近似来代替普朗克定律

$$E_b(\lambda, T) = C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (3)$$

用系统测量已知温度的黑体及某一待测温度的发射体时, 分别有

$$i_b(\lambda, T_b) = R(\lambda) C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T_b) \quad (4)$$

$$i(\lambda, T) = R(\lambda) \epsilon(\lambda, T) C_1 \lambda^{-5} \exp(-C_2/\lambda T) \quad (5)$$

式(4)和(5)中, $R(\lambda)$ 为测量系统的总的光谱响应度. 式(5)与式(4)相比有

$$\frac{i(\lambda, T)}{i_b(\lambda, T_b)} = \epsilon(\lambda, T) \exp(-C_2/\lambda T + C_2/\lambda T_b) \quad (6)$$

对式(6)取对数, 得

$$\ln \left[\frac{i(\lambda, T)}{i_b(\lambda, T_b)} \right] - C_2/\lambda T_b = \ln[\epsilon(\lambda, T)] - C_2/\lambda T \quad (7)$$

由经验知在大多数情况下, 可假设某一温度下光谱发射率的对数与波长呈线性关系, 即

$$\ln \epsilon(\lambda, T) = b_1 \lambda + b_2 \lambda^2 + \dots + b_{n-1} \lambda^{n-1} + b_n \quad (8)$$

并令

$$b_0 = -C_2/T, X_0 = \lambda^{-1}, X_1 = \lambda, X_2 = \lambda^2, \dots,$$

* 国家高技术研究与发展计划资助

Tel: 029-88887613-8623 Email: wangbo125017@163.com

收稿日期: 2009-02-16

修回日期: 2009-04-16

$$X_{n-1} = \lambda^{n-1} \quad (9)$$

$$Y = \ln \left[\frac{i(\lambda, T)}{i_b(\lambda, T_b)} \right] - C_2 / \lambda T_b \quad (10)$$

将式(8)、(9)、(10)代入式(7)则有

$$Y = b_0 X_0 + b_1 X_1 + \dots + b_{n-1} X_{n-1} + b_n \quad (11)$$

式(11)为一标准的多元线性回归模型式,这样在一次测量中最少取 $n+2$ 个波长点的测量值就可由多元线性回归的方法拟合出待测目标的真实温度以及在这一温度下的光谱发射率函数^[1,6-7].

以上的求解步骤都可以编成程序在计算机上实现,只要得到在爆轰期间某个时刻爆轰波在数个波长处的辐射光谱照度值,整个求解爆炸温度和发射率的过程就都可利用计算机快速、方便的完成。

2 多光谱测温实验系统

光谱数据分析系统主要由分光系统、CIS 图像传感器、高速图像采集卡和计算机系统构成.实验装置如图 1.

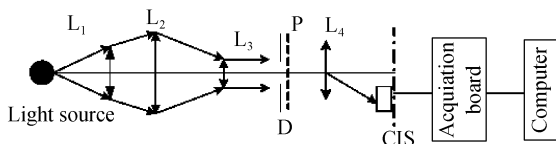


图 1 基于面阵 CMOS 图像传感器的爆温测量系统
Fig. 1 Detonation temperature measuring system based on area array CMOS image sensor

2.1 透镜分光系统

透镜分光系统如图 1, S 为光源, L_1 、 L_2 、 L_3 是三透镜系统,其光路如图所示,作用为使入射光能量集中在狭缝 D 上, P 是光栅,它将狭缝出射的光按波长的大小由第零级开始,从短波向长波散开,并由透镜 L_4 成像在后焦面上. 根据光栅方程

$$d \sin \alpha = k \lambda \quad (k=0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (12)$$

式中 d 是光栅常量, λ 是入射光波波长, k 是衍射级, α 为衍射角. 我们知道,对于给定的光栅常量 d 来说,不同波长的同一级主最大,除第零级外均不重合,并且按波长的大小,自零级开始向左右两侧,由短波向长波散开. 每一波长的主最大,在光栅的衍射图样中都是很细锐的亮线. 这样,当含有许多波长的复合光入射在光栅上时,则在其后焦面上将得到该复合光所有组分的、按波长次序排列的主最大的细亮线,即形成了衍射光谱. 衍射级次 k 越大,色散效果越明显,但能量也随之下降. 另外,在测量时必须调节狭缝的宽度,使其既能产生衍射光谱,又能使 CIS 表面照度满足要求,可在测量谱线的过程中,根据计算机的输出图像作动态调整.

2.2 CMOS 图像传感器及驱动电路

在爆炸高温瞬间,要求测到尽量多个时刻的瞬

时温度. 考虑到系统的响应和处理所必需的时间,我们选用 IBI1300 型面阵 CMOS 图像传感器,利用其在卷帘快门模式^[2-3]下逐行曝光的特点来记录多个时刻的光谱. 如图 2,卷帘快门模式下的面阵 CMOS 图像传感器相当于沿列方向放置并以一定的时间间隔依次曝光的线阵 CCD 阵列. 在爆炸高温瞬间,每行在不同时刻依次曝光并接收瞬时光谱信号,相邻各行测出对应时刻的光源温度,只要各行依次曝光的时间合适,就能够在一帧图像里记录下该段时间内光源的温度变化过程. 根据多光谱测温原理经数据处理后分别得到多个测量时刻的温度结果,这样就可以描述出爆炸过程温度的变化情况了.

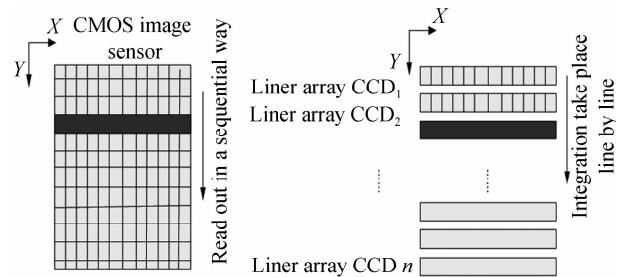


图 2 CMOS 图像传感器与线阵 CCD 阵列
Fig. 2 CMOS image sensor and CCD liner array

CIS 要配上特定的时钟脉冲才能工作,这就需要设计 CIS 驱动电路. 驱动电路的作用是要产生 IBI1300 所需时钟脉冲. 选用复杂可编程器件 (CPLD) 作为硬件设计载体,使用 VHDL 语言对驱动时序发生器进行硬件描述^[4-5]. 大部分控制信号由内部时序器产生,一些基本控制信号需要由外部控制电路产生,相关驱动控制信号如图 3.

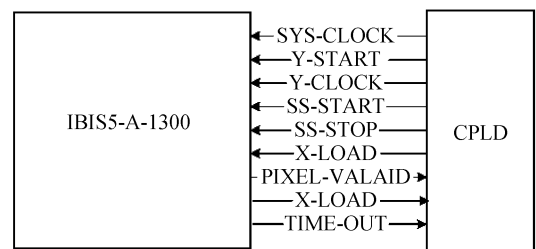


图 3 CIS 驱动控制信号
Fig. 3 CIS drive control signal

2.3 高速图像采集卡

由于此款 CMOS 图像传感器可以利用片上的 ADC 直接输出数字信号,实验中采用带有 SCSI 控制器的 DVR Express CL-160 高速采集卡来实现高速图像数据的采集与存储. DVR Express CL-160 高速采集卡的 Camlink 输入接口为数据的高速传输提供了条件,它自带的 SCSI 接口为数据的高速存储提供了保证,通过 Camlink 输入接口输入的数据可以直接存储到 SCSI 硬盘.

实验中表明,该卡已成功应用于此款高速面阵

CMOS 图像数据的采集,通过软件对存储数据的恢复分析,数据正确无误,无丢帧现象,电压数据与像元上的照度值成一一对应关系。

3 系统的标定

标定的任务是建立起通过光学系统进入 CMOS 图像传感器的光辐射照度 $E(\lambda)$ 和 CMOS 图像传感器输出的光谱图像上像素对应的量化值(灰度值) $g(\lambda)$ 之间的定量关系 $E(\lambda) = f(g(\lambda))$ 。有了这个定量关系,在进行实际测量时,才可以根据采集到的数字图像各像素的量化值转换成对应爆轰过程中辐射光的辐照度,再经过拟合计算得出爆炸温度值^[6-8]。

只要光谱的色散均匀,就可以认为波长与 CMOS 像元位置间存在着近似的线性关系,并可以用方程

$$\lambda(x) = a + bx \quad (13)$$

表示出来(式中 x 是像元位置)。

试验中分别采用输出波长为 630 nm 和 532 nm 的激光器作为标定光源,两个波长的激光在 CIS 感光面上为对应的光谱曲线如图 4;630 nm 的红光谱线位置对应 CIS 像元标号为 240,532 nm 的绿光谱线位置对应 CIS 像元标号 420。将两组数据带入式(13),得

$$\lambda(x) = 760.667 - 0.544x \quad (14)$$

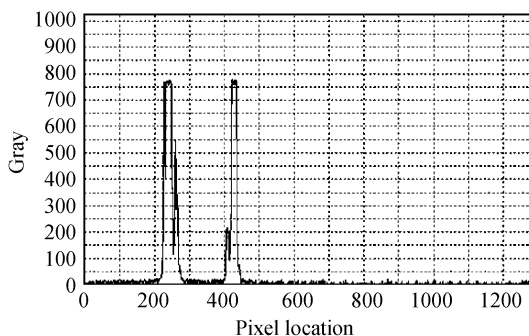


图 4 CIS 标定光谱曲线

Fig. 4 Calibration of CIS spectral curve

有了这个定量关系,在进行实际测量时,便可以根据采集到的数字图像各像素的量化值转换成对应爆轰过程中辐射光的辐照度,再经过拟合计算得出爆炸温度值。

4 实验结果及说明

标定结束后,实验室中我们通过调节卤钨灯的温度变化,来模拟爆温辐射过程。它的辐射光谱在经过分光系统后被 CIS 接收,CIS 芯片自顶向下依次曝光,在曝光读出一帧图像期间,以适当的速度调节流经卤钨灯的电,让其温度产生变化,相应依次在

每行像素上展开的光谱也发生变化,进而算出光源的温度变化。

图 5 是实验中获得的卤钨灯从亮到暗再到亮的光谱图像。经过图像数据的预处理后,可对各波长处的光谱辐照度值进行拟合计算,并用 Delphi 语言在计算机中对图 5 的光谱图像处理并画出温度随列标的分布图如图 6。因这款 CIS 共 1 024 行,每行曝光时间间隔为行周期,所以共采样 1 024 个点得到的温度随时间的变化曲线。

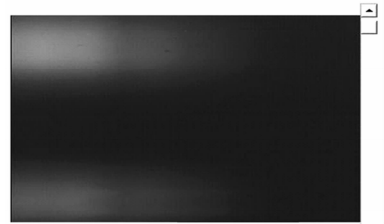


图 5 卤钨灯亮暗变化的光谱图像

Fig. 5 The spectral image of halide tungsten lamp light dark changes

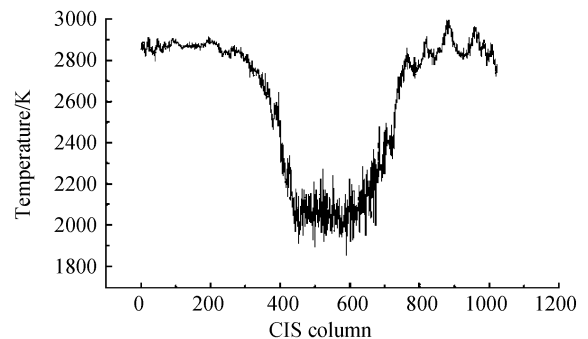


图 6 卤钨灯温度变化曲线

Fig. 6 Halide tungsten high temperature variation curve

5 结论

CIS 作为一种新型的光电器件,在各个方面得到了广泛的应用。本文对 CIS 在光谱测温领域的研究作了一些尝试,实验证明利用 CIS 作为探测单元,完全可以在爆温瞬间,完成多个时刻的光谱信号探测,实现对爆轰过程中温度变化的实时测量。

参考文献

- [1] BAI Yong-lin, REN Ke-hui, OU-YANG Xian, *et al.* Measurement of the denotation temperature by transient multi-wavelength pyrometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(7):868-871.
白永林,任克惠,欧阳娴,等.炸药爆轰温度的瞬时多光谱测量[J]. *光子学报*, 2003, **32**(7):868-871.
- [2] LIU Hai-ying, CAO Jian-zhong, DONG Sen, *et al.* Multiple slope integration based on CMOS image sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12):2473-2476.
刘海英,曹剑中,董森,等.基于 CMOS 图像传感器多斜率光积分的研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12):2473-2476.
- [3] WANG Qing-you. CCD technology [M]. Tianjing: Tianjin University Press, 2000:114-116.

- 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社,2000:114-116.
- [4] TIAN Cheng-lei. CCD spectroscopy measurement system[J]. *Mining Science and Technology*,2004(2):45-48.
- 田承雷. CCD 光谱测量系统研究[J]. *矿业科学技术*,2004(2):45-48.
- [5] QIAN Yi-xian,GAO Xiao-dong,LIANG Wei, *et al.* Design of multi-spectral large format chromatic CCD digital aerial photogrammetric camera[J]. *Acta Photonica Sinica*,2008,37(12):2473-2476.
- 钱义先,高晓东,梁伟,等. 多光谱大面阵彩色 CCD 数字航测相机设计[J]. *光子学报*,2008,37(12):2473-2476.
- [6] DAI Jing-min, YANG Mao-hua, CHU Zai-xiang, *et al.* Multi-wavelength pyrometer and its applications [J]. *Infrared Millim Waves*,1995,14(6):461-466.
- 戴景民,杨茂华,褚载祥,等. 多波长辐射测温仪及其应用[J]. *红外毫米波学*,1995,14(6):461-466.
- [7] SUN Xiao-gang,XU Wen-hui,CHU Zai-xiang. The theoretical analysis of multi-wavelength pyrometer; check and autosearch for emissivity general expression [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*,1998,5(3):36-40.
- [8] TARASOV M D, KUANETZOV F O. Detonation and shock wave front temperature measurement with two color pyrometer based on fiber optics[C]. *SPIE*,1995,2869:890-892.

Application Research of CIS in Transient Multi-wavelength Pyrometry Measurement

WANG Bo^{1,2}, BAI Yong-lin¹, ZHANG Rui-li^{1,2}, REN Ke-hui¹

(1 State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

(2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The theory and experiment method to measure the detonation temperature by means of CIS are studied. A new type system, transient multi-wavelength detonation temperature measuring system, which is reasonable to practical measuring equipment, is presented. The system is calibrated by measuring the standard spectrum of the laser. Combined with multi-wavelength color temperature regression analysis arithmetic, the system is able to measure the temperature of fast varying halide tungsten light and its temperature varying curve with time.

Key words: Detonation temperature; CMOS image sensor (CIS); Transient multi-wavelength temperature measurement



WANG Bo was born in 1983. He is currently pursuing the M. S. degree at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, and his research interests focus on exploration electro-optic gating systems.



BAI Yong-lin was born in 1972. He is an associate professor at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. His research interests focus on FPGA exploration and ultra-fast diagnosis.