

基于多 CCD 同步耦合的动态燃烧场三维辐射测温 (特邀)

段鹏程¹, 程 博², 管今哥¹, 陈 坤¹, 张成飞², 程耀瑜¹, 薛晨阳¹, 郑永秋^{1*}

(1. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 内蒙航天动力机械测试所, 内蒙古 呼和浩特 010076)

摘 要: 为满足燃烧场温度参量时空演化特征诊断的需求, 提出了基于多 CCD 同步耦合的动态三维辐射测温方法。在多视线方向测量基础上, 通过代数重建技术对燃烧场进行体素分割, 根据 Plank 辐射定律采用标准黑体辐射源对光电信号的映射关系进行标定, 利用比色法实现三维温度场表征。进一步在时间序列上控制多 CCD 相机来同步获取燃烧场不同视线方向的辐射信息, 基于 R、G 通道内的灰度信息, 对实验室蜡烛火焰与外场某型号固体火箭发动机试验器尾喷焰的瞬态燃烧场温度参量进行了测试。结果表明, 在实验室内, 蜡烛火焰温度分布范围为 805.4~1280.8 K, 使用热电偶进行时空点位验证, 平均误差为 3.8%, 最大误差为 4.36%; 固体火箭发动机试验器尾喷焰最高温度为 2125.7 K, 经近红外测温仪验证, 测试误差在 8% 以内。该研究能够在保证时间、空间分辨率的条件下对燃烧场的三维温度参量进行特征诊断, 在航天测试领域, 对固体火箭发动机的温度参量测量提供了一种有效的方法。

关键词: 动态燃烧场; 三维温度场; 普朗克黑体辐射定律; 比色测温法

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220352

Three-dimensional radiation thermometry for dynamic combustion field based on multi-CCD synchronous coupling (*invited*)

Duan Pengcheng¹, Cheng Bo², Guan Jingge¹, Chen Kun¹, Zhang Chengfei²,
Cheng Yaoyu¹, Xue Chenyang¹, Zheng Yongqiu^{1*}

(1. Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education,
North University of China, Taiyuan 030051, China;
2. Inner Mongolia Aerospace Power Machinery Testing Institute, Hohhot 010076, China)

Abstract: In order to meet the demands of diagnosing the characteristics of spatiotemporal evolution of temperature parameters in combustion field, a dynamic three-dimensional radiation thermometry method based on multi-CCD synchronous coupling was proposed. On the basis of multiline-of-sight measurements corresponding to different directions, the segmentation of the combustion field in the form of voxel was conducted by the algebraic reconstruction technique. According to Plank's radiation law, the standard blackbody radiation source was used to calibrate the mapping relationship of optical and electrical signals, and the three-dimensional temperature field was characterized utilizing colorimetric thermometry. The radiation information of the

收稿日期: 2022-05-24; 修订日期: 2022-07-17

基金项目: 国家自然科学基金 (62005251, 62131018, 62105305); 山西省基础研究计划 (202103021222012, 20210302123068);
国防基础科研计划 (2020204B037)

作者简介: 段鹏程, 男, 硕士生, 主要从事三维温度场测试方面的研究。

导师简介: 管今哥, 男, 副教授, 博士, 主要从事光谱测试方面的研究。

通讯作者: 郑永秋, 男, 副教授, 博士, 主要从事 MEMS 光学传感器件及测试仪器方面的研究。

combustion field in different line-of-sight directions was further obtained synchronously by controlling multi-CCD on the time series. On the basis of the grayscale information in R and G channels, the temperature parameter in the transient combustion field of the candle flame in the laboratory and the exhaust plume of a certain solid rocket motor device were tested. The results showed that the temperature distribution range of the candle flame in the laboratory was from 805.4 K to 1280.8 K. Through the spatiotemporal point verification using a thermocouple, the average error was 3.8%, and the maximum error was 4.36%. The maximum temperature of solid rocket motor device exhaust plume was 2125.7 K, the measurement error of which was within 8% by the verification of near infrared thermometer. The characteristic diagnosis of the three-dimensional temperature parameter in the combustion field could be realized with sufficient temporal and spatial resolution, which provides an effective method for the measurement of temperature parameter of solid rocket motors in the field of aerospace testing.

Key words: dynamic combustion field; three-dimensional temperature; Planck's blackbody radiation law; colorimetric thermometry

0 引言

在新时代军事战略方针下,我国正在加快研制射程更远、性能更加稳定、打击精度更高、突防能力更强、隐身性更好的导弹武器系统。固体火箭发动机作为导弹武器系统的主要动力装置,其尾喷焰温度是评估推进剂燃烧与喷管能力转化效能,分析尾喷焰探测特征以及发动机比冲、总冲性能的重要依据^[1-2]。为满足新一代固体导弹武器系统研制需求,加快少烟型推进剂设计研制等目标,在固体火箭发动机燃烧喷焰温度测试技术应用上的需求强劲,也亟需燃烧尾喷焰温度实时测试数据资源的支撑。

相比较于接触式燃烧场测温方法,以光学传感为代表的非接触测温具有空间表征、测温范围广、时间响应快等优势^[3],在固体火箭发动机尾喷焰温度测试方面具有重要的应用价值。其中红外热成像测温具有成像速度快、测温迅速的优点,王玮等人基于红外辐射的温度补偿测算技术,使用红外热像仪和比色测温仪对爆炸火焰温度进行了测量,将温度误差由 55.699%~89.847% 减小为 11.242%~59.077%,大大降低了联合测温的误差^[4]。但是其精度受限于发射率的测量,固体火箭发动机尾喷焰燃烧情况复杂,发射率测量误差大^[5]。激光光谱测温方法可以在湍流火焰温度测试中达到高时间、空间分辨率,Liu 等人在温度场测试中引入元素掺杂法和激光诱导击穿光谱法,将易于分析的外掺元素作为被测粒子,侧面测量出火焰温度分布,测量误差不超过 5%^[6]。但激光测试方法不适用于光强较高环境,对火焰进行三维测量时光路结

构复杂且设备成本较高^[7]。光谱辐射测温方法具有无需光源直接成像、空间分辨率高、误差小、可移植性强的优点,适合在复杂测温条件进行动态三维温度测量。Hossain 等人采用光学层析方法对火焰的温度和发射率分布进行了三维重建的研究,计算出了水平截面上的温度分布,然后推导出各种温度值的详细等温等高线,最高热点温度 2 050 K,但空间分辨率有限^[8];Xu 等人通过单个摄像头和基于离子电润湿的可变焦距液体透镜测量火焰的三维温度,探究了火焰的结构与温度分布,但是该方法时间分辨率低,有延时误差,只适用于稳定火焰的三维层析^[9]。Zhao 等人基于光场分层成像技术,利用光场相机通过一次曝光实现对火焰三维空间上四个断层面的温度场重建,该方法能高精度实时进行温度场测量,但光场相机帧率低,时间分辨率不足^[10]。以上对于动态三维温度场重建的方法研究不能做到时间空间分辨率兼顾,且应用成本较高,函需设计出高时空分辨率、成本低、简单可靠的动态燃烧场三维辐射测温方法。

针对上述问题,文中采用多 CCD 同步耦合的方案,采用经典的代数重建技术对动态燃烧场进行三维辐射测温,多个 CCD 相机在保证测量精度的同时可以同步耦合实现动态测量,实验结果通过热电偶及近红外测温仪进行验证。

1 多视线三维动态燃烧场测温系统

1.1 空间辐射源项三维重建模型

采用以代数重建技术为核心的 CT 算法对燃烧场火焰的三维辐射特征进行重建,其具体原理如下。

将火焰断层截面进行体素分割,看作是由 $N \times N$ 个单位立方体组成的^[11-12]。相应的像元矩阵建立是把相机 CCD 靶面接收光信号的射束看作是宽度为 δ 、间距为 δ 的一系列直线,垂直对应相机的成像靶面上的一个像素。将尺寸为 $N \times N$ 的火焰断层的左上角像素记为 1 号像素,右下角记为 N^2 号像素,如果第 i 条射线通过了 j 号像素,则记为 $\omega_{ij}=1$,否则记为 0,同时考虑射束在它经过的像素中走过的距离。相机每个像元的灰度值组成一个一维数组,记为 $[P_1, P_2, \dots, P_m]$,对应每个相机采集到的灰度值,其中 m 为穿过火焰的射线的条数,等于投影角度与每个投影角度上射束的条目的乘积,建立的火焰断层矩阵如图 1 所示。

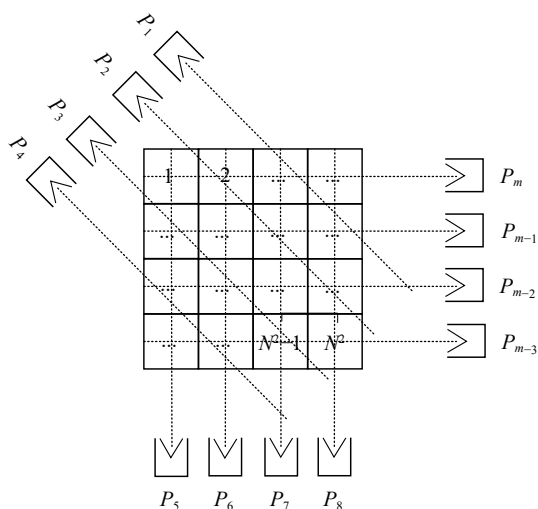


图 1 火焰断面矩阵结构

Fig.1 Matrix structure of flame section

在图 1 的基础上建立火焰断层灰度方程组,共包含 N^2 个未知数, m 个方程,如公式(1)所示:

$$\begin{cases} \omega_{11}f_1 + \omega_{12}f_2 + \dots + \omega_{1N^2}f_{N^2} = P_1 \\ \omega_{21}f_1 + \omega_{22}f_2 + \dots + \omega_{2N^2}f_{N^2} = P_2 \\ \dots \\ \omega_{m1}f_1 + \omega_{m2}f_2 + \dots + \omega_{mN^2}f_{N^2} = P_m \end{cases} \quad (1)$$

上述方程组迭代求解思路如图 2 所示,使得当前估算的火焰断层截面灰度值图像在每一次图像更新中满足一个方程。直线 L_1, L_2, L_3 分别表示三个方程, \bar{x}^k 代表第 k 次迭代的结果,交点代表方程组的解,每一步就是将当前估算的点投影到下一条直线上,使其满足下一个方程。

通过计算 CCD 相机扫描射线经过火焰矩阵区域的长度权值来进行反投影,迭代公式如下:

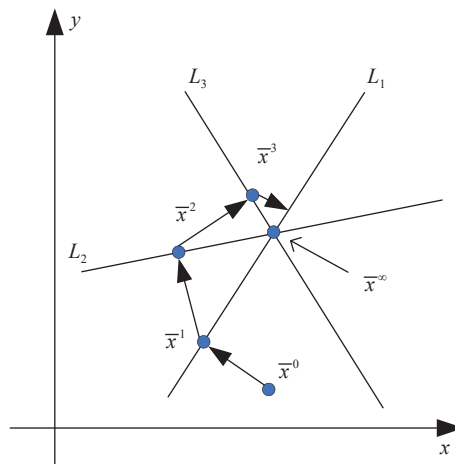


图 2 方程组迭代解析原理

Fig.2 Iterative parsing principle of equations

$$f_j^{k-1} = f_j^k + \lambda \frac{P_i - \sum_{n=1}^N \omega_{in} f_n^k}{\sum_{n=1}^N \omega_{in}^2} \omega_{ij} \quad (2)$$

式中: k 为迭代次数; i 为射线序号; j 为像素序号; N 为未知数数目; λ 为松弛因子,在投影角度数少及噪声小时,松弛因子取较大值,范围为 0.1~0.5,在投影角度数多及噪声大时,松弛因子取较小值,范围为 0.05~0.1,经过多次实验松弛因子随迭代次数而递减,使重建质量最佳, ω_{ij} 为权值因子,可根据投影射线集合结构与像素布置得到。

经过迭代计算可得出一层火焰断面的灰度矩阵,对每一层火焰截面进行迭代计算即得到三维灰度场。

1.2 辐射源温度反演方法

在温度 T_n 条件下,燃烧场火焰的辐射光谱信息 $I(\lambda, T_n)$ 可表征为:

$$I(\lambda, T_n) = \varepsilon_\lambda c_1 \pi^{-1} \lambda^{-5} / \{\exp[c_2/(\lambda T_n)] - 1\} \quad (3)$$

式中:第一普朗克常数 $c_1=3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$;第二普朗克常数 $c_2=1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; ε_λ 为火焰发射率。

在该理论基础,通过比色方法进行测温^[13-14],具体如下。根据维恩位移定律可知,当温度上升时绝对黑体的最大单色辐射强度向短波方向移动,且两个固定波长的强度比在不同温度下存在差异,利用波长窄带比较技术,测量其辐射强度比值可计算温度参量。对于在中间介质吸收较大以及在点或局部很小区域应用等场合,由于辐射能量的衰减在两个波长下几乎相同,二者的比值不受影响。温度重构结果为:

$$T_n = \frac{c_2 \left(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G} \right)}{\ln \frac{I(\lambda_G, T_n)}{I(\lambda_R, T_n)} + \ln \left(\frac{\epsilon_R}{\epsilon_G} \right) + 5 \ln \left(\frac{\lambda_G}{\lambda_R} \right)} \quad (4)$$

式中： λ_R 、 λ_G 为所选取 R、G 通道的中心波长； $I(\lambda_G, T_n)$ 与 $I(\lambda_R, T_n)$ 为当前温度所对应的光谱辐射亮度； ϵ_R 与 ϵ_G 为火焰红光和绿光的发射率。

上述公式中选择 R、G 通道信号的原因在于 CCD 相机对该通道的信号感光率强，且具有较高的光谱分辨率和信噪比，使测温结果更加精确。

1.3 多 CCD 同步耦合结构设计

若对动态火焰燃烧场进行三维测温，多视线方向所对应的不同 CCD 相机需要实现同步操作。自主设计了 CCD 同步耦合系统，能够为八台 CCD 相机提供同步触发信号进行数据同步采集，自主设计的电路板如图 3 所示。其微处理器为 Spartan6 系列 xc6slx9_tqg144，进行同步触发控制的时钟信号由 SJK50 MHz 的晶振提供，控制板上集成了同步信号电平匹配电

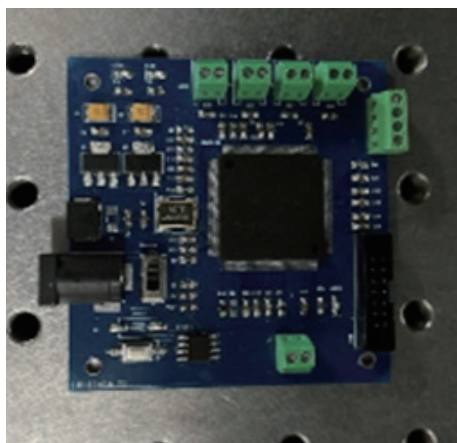


图 3 同步耦合系统控制单元

Fig.3 Control unit of synchronous coupling system

路；软件部分包括可编程逻辑电路中的同步频率生成与调整模块、同步信号生成模块以及同步信号逻辑匹配模块。在进行同步控制时，由时钟电路产生 50 MHz 时钟信号，微处理器对输入信号进行处理，同步频率生成与调整模块对信号进行同步频率调整，进一步由同步信号生成模块生成被控相机的同步信号，逻辑匹配模块的控制相机电平匹配电路生成有效电平信号来控制相机的曝光与数据采集。经过仿真测试，该系统同步触发帧率可达 1000 frame/s 以上，能够满足对燃烧场时空演化特征诊断的需求。同步耦合结构工作流程如图 4 所示。

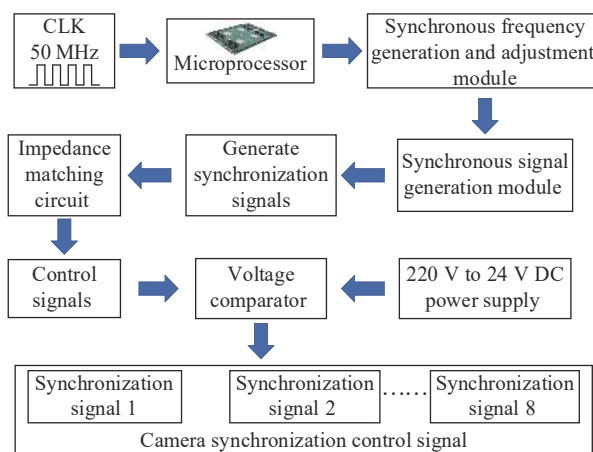


图 4 同步耦合结构工作流程

Fig.4 Work flow for synchronous coupling structure

2 多光路结构燃烧场辐射测温实验装置

2.1 实验室内燃烧场测温

首先在实验室环境中验证基于多 CCD 同步耦合的多视线三维动态燃烧场测温方法的可靠性，相应的多光路结构采集系统如图 5 所示。以被测火焰为圆

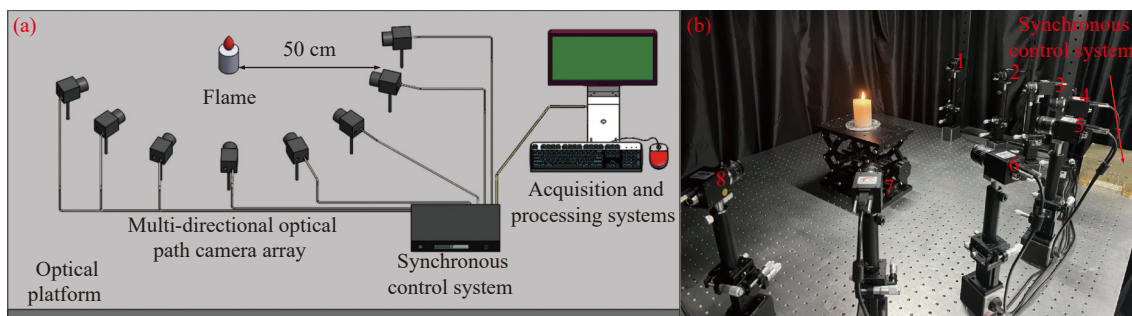


图 5 (a) 多光路采集系统设计；(b) 系统实物

Fig.5 (a) Design drawing of multi-optical path acquisition system; (b) Physical system

心,根据蜡烛火焰的亮度特征以及体积大小,为保证所采集火焰图像具有较高空间分辨率以及合适的强度,在固定半径为 50 cm 的圆周上均匀放置八个相同的 CCD 相机,每个相机以 22.5°等角间隔分别放置在 0°、22.5°、45°、67.5°、90°、112.5°、135°、157.5°位置处。通过同步控制系统对每个 CCD 相机进行外部触发,保证不同 CCD 相机能够采集同一时刻火焰的辐射信息,采集到的图像信息保存到计算机中进行温度场重建。

为减小环境噪声对测试结果的影响,在黑暗环境中采集火焰不同视线方向的辐射信息图像,且在拍摄火焰前用相机拍摄背景噪声。在后续图像处理过程中,从火焰图像中减去无火焰情况下拍摄的背景图像进行背景校正。

2.2 固发试验器尾喷焰测试

进一步将基于多 CCD 同步耦合的多视线三维动态燃烧场测温方法用于外场某型号固发试验器尾喷焰测试,相应的采集装置如图 6 所示。以固发试验器为圆心进行多视线方向光路探测平台搭建,多 CCD 相机结构角度设置与图 5 所示一致。为获取尾喷焰整体图像数据并减弱探测距离较近所导致的振动影响,将相机测试系统布置在半径为 110 cm 的圆周上。



图 6 实验现场布置

Fig.6 Testing field layout

2.3 CCD 相机辐射标定装置

在对燃烧场光辐射信号与 CCD 响应电信号标定过程中,不同测试场景选用不同温度范围的黑体辐射源。根据实验室环境中所用火焰的温度范围,选用中温黑体辐射源对采集图像的强度值与辐射能量的映射关系进行拟合,如图 7 所示。该黑体辐射源的工作温度范围为 300~1200 °C,发射率 ≥ 0.995 ,温度分辨率为 0.1 °C。相机的光圈、曝光时间及到黑体腔体均匀辐射面的距离均与图 5 中的采集参数保持一致。以 10 °C 为间隔对 CCD 相机进行标定,标定范围为

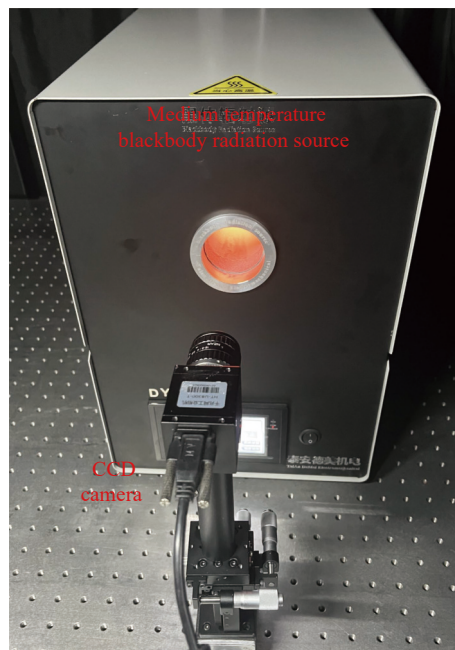


图 7 中温黑体辐射源标定

Fig.7 Calibration of medium temperature blackbody radiation source

600~1200 °C。

由于固发试验器尾喷焰外场实验与实验室环境存在较大差异,且两者温度差距大,故使用高温黑体辐射源对相机进行再次标定,如图 8 所示,其工作温度为 800~1600 °C,发射率 ≥ 0.995 ,温度分辨率为 0.1 °C。标定过程中,相机的工作参数与图 6 所示的外场试验参数一致。

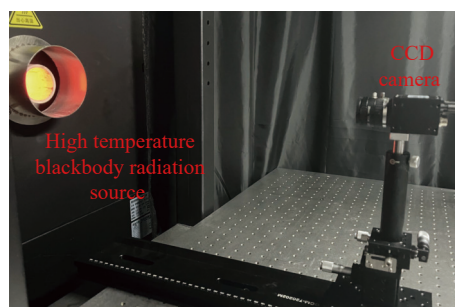


图 8 高温黑体辐射源标定

Fig.8 Calibration of high temperature blackbody radiation source

3 结果与讨论

3.1 三维燃烧场代数重建

由于彩色 CCD 相机在不同颜色通道内某些波长范围光波能量占优,通常在不同颜色通道内选取中心波长来实现较高精度测温^[15],图 9 所示为文中所用

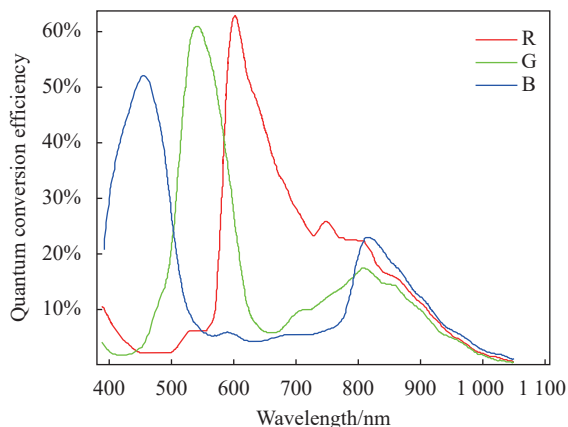


图 9 CCD 相机光谱响应曲线

Fig.9 Spectral response curves of CCD camera

CCD 相机的光谱响应特性。

实验室环境中, 将不同视线方向下获取到的蜡烛火焰图像分别对其进行 R、G、B 通道分离处理, 采用 R、G 通道的光强信息进行比色测温, 其原因为该火焰的辐射信号强度呈现在 R、G、B 通道内依次递减的分布特征; 且在利用黑体辐射源对相机进行标定以及记录火焰辐射信息时, B 通道内的光强特征非常微弱, 导致该通道内探测信噪比较低。

R、G 通道相应的中心波长选取方法如下所述。首先采用光谱仪获取了黑体辐射源的辐射光谱特性。对于 R 通道, 中心波长的选取由相机光谱响应曲线特性以及黑体辐射源标定时辐射光谱的强度分布特性共同决定, 采用 650 nm 作为中心波长进行数据处理; 对于 G 通道, 中心波长由相机光谱响应曲线中响应信号最强的 541.6 nm 决定, 在最大程度上降低比色测温方法的测量误差。

利用代数重建技术分别对 CCD 相机在 R 通道和 G 通道内采集到的不同视线方向火焰信息进行投影处理, 图 10 为其中一个视线方向的 R、G 通道火焰信

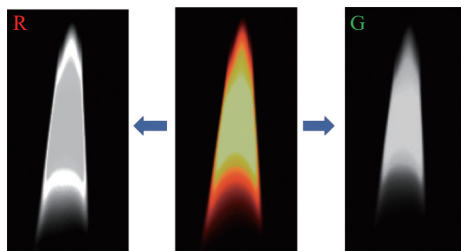


图 10 R、G 通道的火焰灰度信息

Fig.10 Flame grayscale map of R and G channels

息。投影处理可得到两个波长下的火焰三维灰度图, 如图 11 所示。

图 11(a)、(b) 分别为 R、G 两通道的三维火焰灰度切片图, 图中火焰灰度分布从上到下轮廓符合蜡烛火焰的形状, 每层切片的灰度分布也符合蜡烛火焰外焰温度高、内焰温度低的规律。

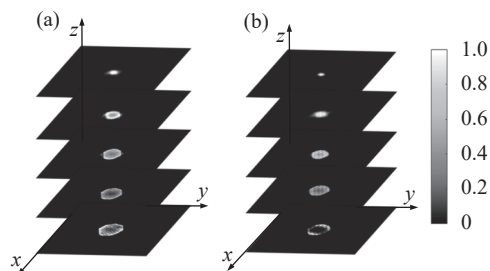


图 11 火焰三维切片。(a) R 通道; (b) G 通道

Fig.11 Three-dimensional slices of flame. (a) R channel; (b) G channel

3.2 光辐射强度与电响应信号标定

在已知温度 T_n 与波长 λ 的情况下, 可由普朗克黑体辐射定律计算得到当前温度下 R、G 通道中心波长所对应的黑体辐射源能量 $I(T_n, \lambda)$ 。在对光辐射强度与电响应信号映射关系进行标定时, 由于黑体辐射源腔体中心位置处的自发辐射强度在空间分布比较均匀, 选取该位置处 200 pixel×200 pixel 区域的图像, 如图 12 所示, 通过计算其灰度平均值得到不同颜色通道下的电信号响应。其中, 电信号数值强度的变化通过控制黑体辐射源的温度来实现。利用最小二乘法对图像灰度与黑体辐射源能量之间的数值关系进行二次拟合, 得到 R、G 通道中两个中心波长下的映射曲线。图 13 与图 14 分别为中温、高温黑体辐射源标定结果。

中温黑体辐射源 R、G 通道标定拟合公式如公式 (5)、(6) 所示, 高温黑体辐射源 R、G 通道标定拟合公

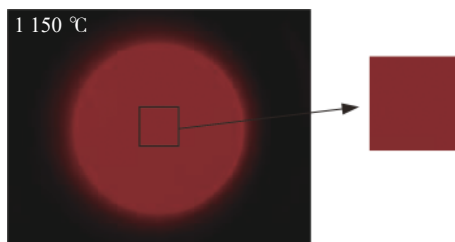


图 12 辐射标定平均灰度值采样

Fig.12 Average gray value sampling for radiation calibration

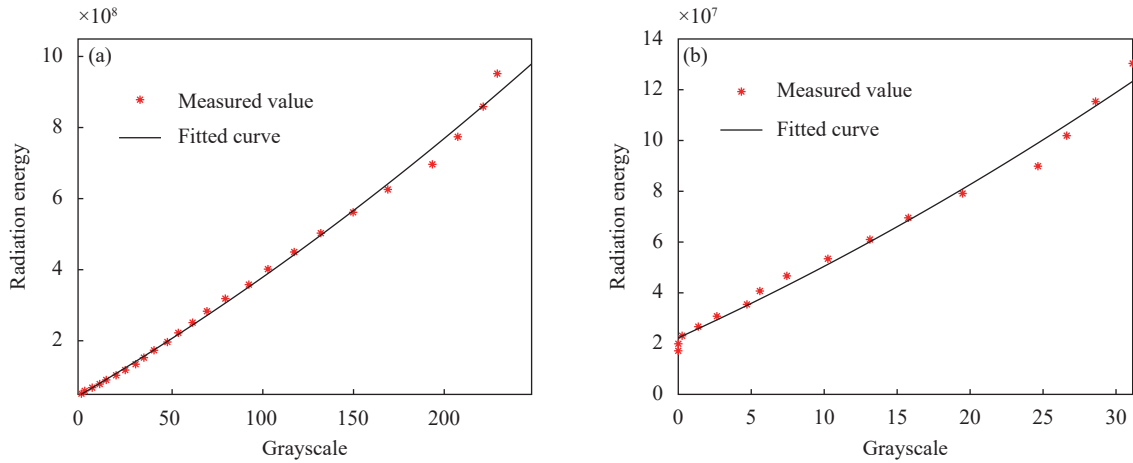


图 13 中温黑体辐射源标定曲线。(a) $\lambda_R=650\text{ nm}$; (b) $\lambda_G=541.6\text{ nm}$

Fig.13 Calibration curves for medium temperature blackbody radiation sources. (a) $\lambda_R=650\text{ nm}$; (b) $\lambda_G=541.6\text{ nm}$

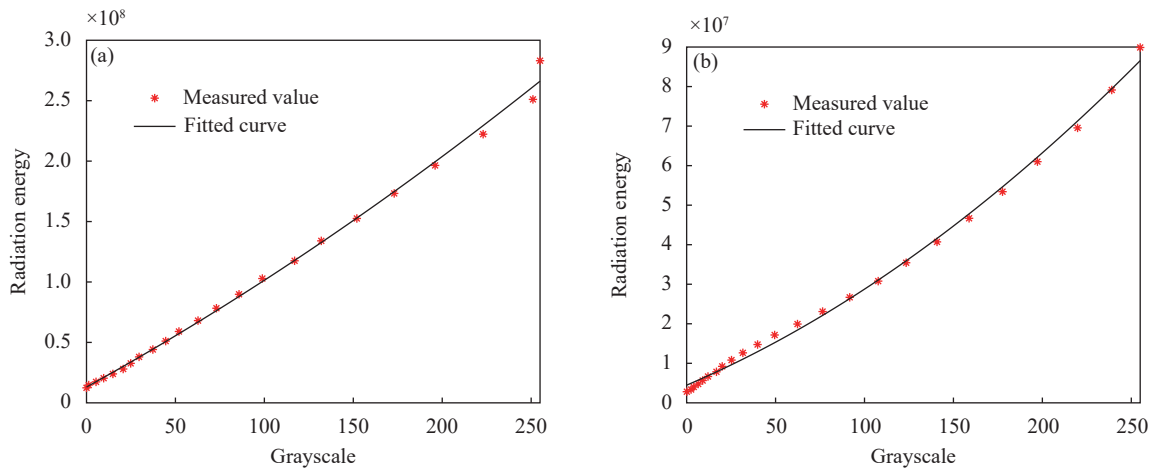


图 14 高温黑体辐射源标定曲线。(a) $\lambda_R=650\text{ nm}$; (b) $\lambda_G=541.6\text{ nm}$

Fig.14 Calibration curves for high temperature blackbody radiation sources. (a) $\lambda_R=650\text{ nm}$; (b) $\lambda_G=541.6\text{ nm}$

式如公式 (7)、(8) 所示:

$$I(\lambda_R, T) = 3.1 \times 10^3 I_R^2 + 3 \times 10^6 I_R + 5 \times 10^7 \quad (5)$$

$$I(\lambda_G, T) = 2 \times 10^4 I_G^2 + 2.6 \times 10^6 I_G + 2.2 \times 10^7 \quad (6)$$

$$I(\lambda_R, T) = 7 \times 10^2 I_R^2 + 8.1 \times 10^5 I_R + 1.3 \times 10^7 \quad (7)$$

$$I(\lambda_G, T) = 5.1 \times 10^2 I_G^2 + 1.9 \times 10^5 I_G + 4.5 \times 10^6 \quad (8)$$

式中: $I(\lambda_R, T)$ 、 $I(\lambda_G, T)$ 为 R、G 通道中心波长和温度下对应的辐射强度, I_R 、 I_G 为该辐射强度所对应的灰度值。

公式 (5)~(8) 中拟合曲线的可决系数 R^2 如表 1 所示, 其相应的 R^2 值分别为 0.996, 0.988, 0.997, 0.997。通过表 1 可以看出, 公式 (5)~(8) 中拟合曲线的可决系数 R^2 均接近 1, 表明拟合曲线的优度较高。

表 1 黑体辐射源标定中拟合曲线可决系数

Tab.1 Determination coefficient of fitted curves for the calibration of blackbody radiation

Parameter	Formula			
	(5)	(6)	(7)	(8)
R^2	0.996	0.988	0.997	0.997

3.3 实验室环境火焰三维辐射测温

针对实验室内使用的蜡烛火焰, 测得其发射率如图 15 所示。经过测量, 蜡烛火焰在 541.6 nm 波长下的发射率 $\varepsilon_G=0.19931$, 在 650 nm 波长下的发射率 $\varepsilon_R=0.22136$ 。蜡烛火焰含有较多的碳烟颗粒, 根据 Mie

理论,该颗粒对光的散射能力远小于吸收能力,因而文中忽略散射效应,只考虑吸收作用,并通过测量吸收系数来计算蜡烛火焰的发射率,吸收特性如表 2 所示。基于上述光电信号之间关系的标定结果,利用公式 (3)、(4) 对 3.1 节中经过代数重建的蜡烛空间火焰进行温度测量,以实现动态三维燃烧场温度表征。图 16 所示为时间测试序列中 t_1 时刻所重建的火焰温度场特性图,每层温度场分布形状近似圆形,从上到下温度逐渐降低,呈现外焰温度高于内焰温度的趋势,下层火焰温度分布更明显,其温度场特性分布及重建火焰外形符合蜡烛火焰的温度结构。重建火焰区域最高温度位于外焰顶端,为 1280.8 K,最低温度位于火焰下方,为 805.4 K。图 17 (a)~(d) 进一步给出燃烧过程中 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 时刻火焰的动态温度特性。为便于研究火焰的时空演化特性,在不同时刻均选取距蜡烛火焰顶端 130 pixel 的距离切片进行比较。对于高度 40 mm、直径 8 mm 左右的蜡烛火焰空间,可以重建出 $362 \times 362 \times 512$ 的三维温度场,可达到较高的空间分辨率。

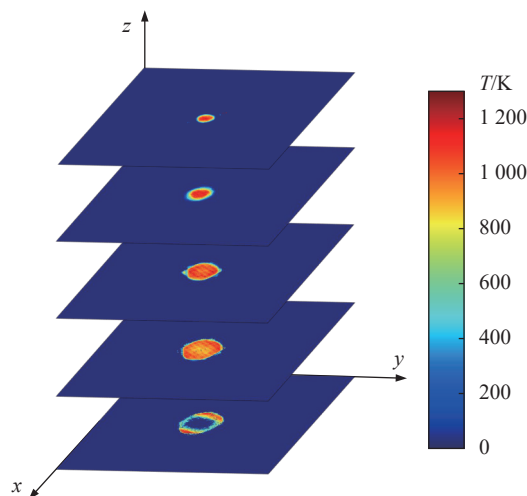


图 16 t_1 时刻火焰温度场层析

Fig.16 Tomography of flame temperature field at t_1

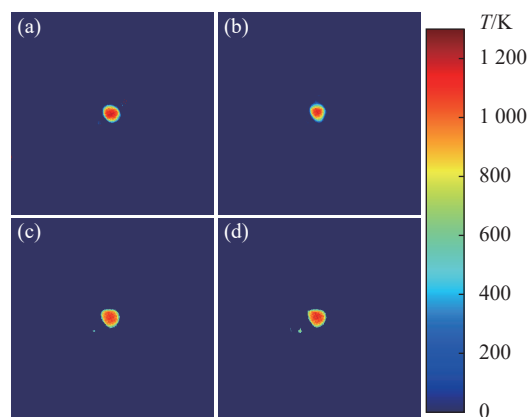


图 17 火焰同一高度位置的温度切片。(a) t_1 ; (b) t_2 ; (c) t_3 ; (d) t_4

Fig.17 Temperature slices of flame at the same height. (a) t_1 ; (b) t_2 ; (c) t_3 ; (d) t_4

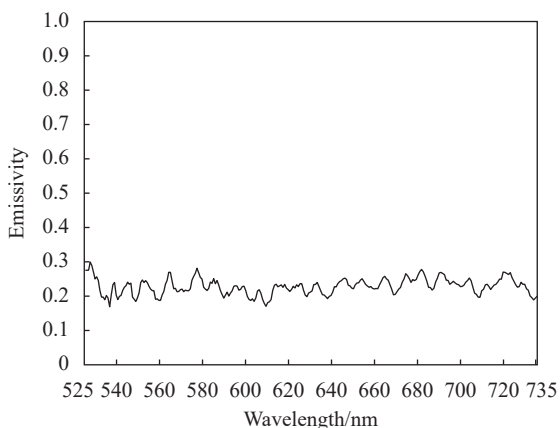


图 15 蜡烛火焰各波长下的发射率

Fig.15 Emissivity of candle flame at different wavelengths

表 2 火焰吸收系数实验测量数据

Tab.2 Experimental measurement data of flame absorption coefficient

Wavelength/nm	$\hat{\alpha}_\lambda(\epsilon_\lambda)$	$\alpha_\lambda/\text{mm}^{-1}$
541.6	0.1993	0.0222
650	0.2214	0.0250

3.4 固发试验器尾喷焰三维辐射测温

对某型号固体火箭发动机试验器尾喷焰进行三维辐射测温,所测固发试验器以少烟型配方燃料作为推进剂,其显著特征在于尾喷焰所含碳烟、固体颗粒较少。在少烟型固体推进剂尾喷焰温度测试中,忽略光传输过程中的散射与吸收效应。通过分析固体火箭发动机尾喷焰的辐射光谱数据^[16],确定该固发试验器尾喷焰辐射在 525~735 nm 波长范围内近似为灰体,在中心波长 λ_R 和 λ_G 下发射率相同。结合公式 (3)、(4),根据所采集的尾喷焰投影信息及高温黑体辐射源标定拟合曲线,反演出该固发尾喷焰的三维温度场。温度场层析切片如图 18 所示,符合发动机尾喷焰喷口的温度分布特征。最高温度达 2 125.7 K,与试验平

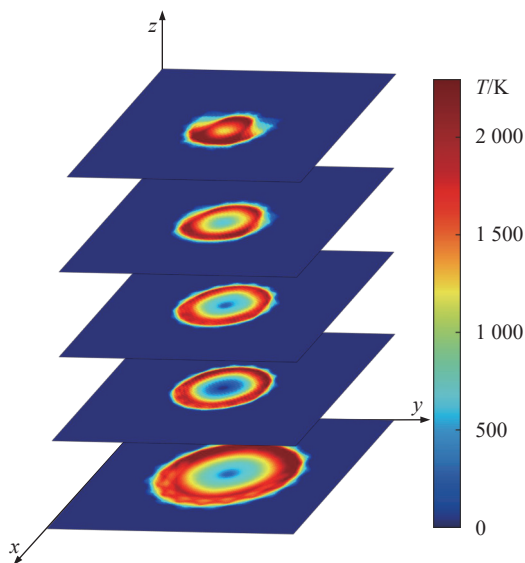


图 18 固发试验器尾喷焰三维温度场层析

Fig.18 Three-dimensional temperature field tomography of the solid rocket motor exhaust plume

台所用近红外测温仪装置进行比对,误差在 8% 以内。

3.5 实验验证

采用 K 型热电偶对上述火焰测温结果的可靠性进行验证,相应的测试点位高度选取如图 19 所示。所用热电偶的温度测试量程为 $-200\sim 1370\text{ }^{\circ}\text{C}$,分辨率为 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-20\sim 999.99\text{ }^{\circ}\text{C}$) 和 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1000.0\sim 1370.0\text{ }^{\circ}\text{C}$),精度为 $\pm(0.3\%|T_n|+0.40)\text{ }^{\circ}\text{C}$,采样速率为 2 Hz 。基于热电偶的测温验证结果如表 3 所示。选取燃烧过程中火焰的相对稳定状态下,多次测量平均温度分别为 1230.6 、 1134.7 、 1108.2 K ,相应位置处的温度场重建结果分别为 1268.3 、 1184.2 、 1152.4 K 。通过计算可知相对误差分别为 3.06% 、 4.36% 、 3.99% ,平均误差为 3.8% 。文中相对误差 δ 的计算公式为:

$$\delta = (I_r - I_m)/I_m \quad (9)$$

式中: I_r 为重建反演温度; I_m 为热电偶测量温度。

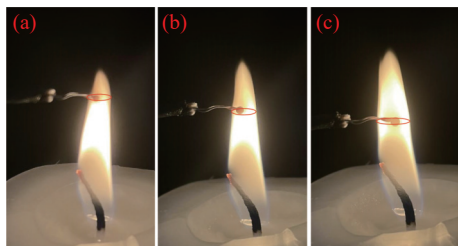


图 19 热电偶测温位置

Fig.19 Position of thermocouple temperature measurement

进一步对上述火焰三维温度场重建结果误差的产生原因进行分析。首先,CCD 相机景深问题使得积分线不同位置的辐射难以保证聚集到靶面的同一像素单元;其次,在辐射测温可靠性验证过程中,热电偶探头被燃烧产生的烟黑附着而导致火焰温度测量值低于实际值。

表 3 基于热电偶的辐射测温结果验证

Tab.3 Verification of radiation thermometry results based on thermocouple

Position	Temperature/K		δ
	I_r	I_m	
1	1268.3	1230.6	3.06%
2	1184.2	1134.7	4.36%
3	1152.4	1108.2	3.99%

4 结论

针对温度场的三维重建,文中提出了一种基于多 CCD 同步耦合的动态燃烧场三维辐射测温方法,有效重建了实验室及外场环境下的燃烧场的三维温度。实验室内测试结果表明,该三维辐射测温方法对蜡烛动态火焰重建最大误差为 4.36% 。在外场实验平台进行了某型号固发尾喷焰三维辐射测温,初步反演出尾喷焰三维温度场,由于测试环境烟尘和燃烧颗粒物影响,误差在 8% 以内,其测温上限可达 $2000\sim 3000\text{ K}$ 。该测试方法能够同步保证时间和空间分辨率,在投影信息不全的情况下仍可取得较好的效果,是未来固体火箭发动机尾喷焰及航天测试的重点研究方向。

参考文献:

- [1] Song Junling, Jiang Yajing, Rao Wei, et al. Design of a high-resolution optical measuring ring for supersonic combustion flow field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20210063. (in Chinese)
- [2] Zhang Danmeng, Bai Lu, Lv Qiang, et al. Image simulation and feature extraction of UV high resolution radiation of plume [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20200466. (in Chinese)
- [3] Li Y, Dai C J. Precise temperature measurement with imaged spectral technique [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*,

- 2016, 36(1): 38-41. (in Chinese)
- [4] Wang Wei, Du Hongjin, Fan Jinbiao, et al. Measurement and calculation technology of temperature compensation of explosion flame based on infrared radiation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(5): 93-104. (in Chinese)
- [5] Lou Chun, Zhang Ludong, Pu Yang, et al. Research advances in passive techniques for combustion diagnostics based on analysis of spontaneous emission radiation [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(1): 1-17. (in Chinese)
- [6] Liu X D, Hao X J, Xue B, et al. Two-dimensional flame temperature and emissivity distribution measurement based on element doping and energy spectrum analysis [J]. *IEEE Access*, 2021, 8: 200863-200874.
- [7] Cai W W, Kaminski C F. Tomographic absorption spectroscopy for the study of gas dynamics and reactive flows [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2021, 8: 200863-200874.
- [8] Hossain M M, Lu G, Sun D, et al. Three-dimensional reconstruction of flame temperature and emissivity distribution using optical tomographic and two-colour pyrometric techniques [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 074010.
- [9] Xu C L, Zhao W C, Hu J H, et al. Liquid lens-based optical sectioning tomography for three-dimensional flame temperature measurement [J]. *Fuel*, 2017, 196: 550-563.
- [10] Zhao Wenchao, Zhang Biao, Xu Chuanlong, et al. Measurement of 3D flame temperature field based on light field optical sectioning tomography [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2017, 47(5): 938-944. (in Chinese)
- [11] Wang H Y, Shi Y F, Zhu X J, et al. 3-D reconstruction of bubble flow field based on the method of multivision by rough-precise location algebraic reconstruction technique [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1002811.
- [12] Lu Dongxiao, Fang Wenhui, Li Yuyao, et al. Optical coherence tomography: Principles and recent developments [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 919-935. (in Chinese)
- [13] Shan L, Huang H Y, Hong B, et al. Temperature measurement method of flame image fusion with different exposures [J]. *Energies*, 2016, 13(6): 1487.
- [14] Kirmse C, Chaves H. Measurement of the average two-dimensional surface temperature distribution of drops in a melt atomization process [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2015, 24: 690-695.
- [15] Rodiet C, Remu B, Degiovanni A, et al. Optimal wavelengths obtained from laws analogous to the Wien's law for monospectral and bispectral methods, and general methodology for multispectral temperature measurements taking into account global transfer function including non-uniform emissivity of surfaces [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2016, 76: 444-454.
- [16] Guo X X, Pan K W, Hou L F, et al. Research on radiation spectroscopy thermometry of plume of solid rocket motor [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(1): 305-311. (in Chinese)