DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311486

# 基于同步共轴结构的辐射层析测温仪设计*

管今哥,卫娜瑛,郑永秋,陈 坤
(中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051)

**摘 要**:光学辐射测温技术因时空分辨率高、测温范围宽等优势在燃烧场温度时空演化特性表征领域具有重要应用价值。固体火箭发动机燃烧室内可测试空间受限,基于多视线投影的三维温度场重构方法因光线遮挡而失效。针对该问题,在傅里叶光学理论基础上,建立了燃烧断面与像靶平面之间的物像空间映射关系模型,设计加工了光机电一体化的动态辐射层析测温仪,实现了多个像探测器共光轴且能够同步聚焦于不同空间位置的燃烧断面。试验结果表明,通过对某型号开窗燃烧室内固体推进剂药条燃烧辐射采样数据的卷积与反卷积处理,堆栈的燃烧断面在沿着仪器光轴方向上能够相互分离,在光电信号关系标定基础上利用普朗克辐射定律对已分离的燃烧断面温度分布进行测量过程中,测温的相对误差小于 8%。该仪器能够在单向投影光路上以层析方式实现对动态三维燃烧温度场的解析。

**关键词**: 可测试空间受限;同步共轴;燃烧场三维层析成像;温度表征
**中图分类号**: TH811 TK311 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 510.20

# Design of radiation tomography thermometer based on synchronous coaxial structure

Guan Jinge, Wei Naying, Zheng Yongqiu, Chen Kun
(*Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology*, *North University of China*, *Taiyuan 030051*, *China*)

**Abstract**: The optical radiation temperature measurement is of great importance in the field of characterizing the spatiotemporal evolution characteristics of combustion field temperature due to its advantages of high spatiotemporal resolution and wide temperature measurement range. The testable space in the combustion chamber of the solid rocket motor is limited, and the three-dimensional temperature field reconstruction method based on multi line of sight projection is ineffective due to light obstruction. To address this problem, the object image spatial mapping relationship model between the combustion cross-section and the image plane is formulated based on the Fourier optics theory. A dynamic radiation tomography thermometer with the integrated opto-mechatronics is designed, which achieves multiple image sensors sharing the same optical axis and being able to synchronously focus on combustion cross-sections at different spatial positions. The experimental results show that, by convolution and deconvolution processing of the combustion radiation sampling data of solid propellant strips in a certain type of windowed combustion chamber, the stackable combustion sections can be separated from each other in the direction of the optical axis of the instrument. The relative error of temperature measurement is less than 8% in the process of measuring the temperature distribution of the separated combustion sections using Planck's radiation law based on the calibration of the photoelectric signal relationship. This instrument analyzes the dynamic three-dimensional combustion temperature field in a tomographic way on a single projection.

**Keywords**: limited testable space; synchronous coaxial; three-dimensional tomography of combustion field; temperature characterization

## 0 引 言

固体火箭发动机是战略导弹武器的主要动力装置,其推进剂燃烧释能过程中燃烧场三维温度参量的时空演化特性诊断对于燃料配方改进以及发动机结构优化具有重要的现实意义。由于推进剂的热反应与能量释放是发生在燃烧室中的三维物理化学过程,因而,燃烧室内部温度参量测试才是关键。

收稿日期:2023-05-25 Received Date: 2023-05-25
*基金项目:国家自然科学基金(62005251)、中央引导地方科技发展资金(YDZJSX2022A031)项目资助

测温方法主要包括接触式与非接触式两类。前者会干扰燃烧环境且难以描述“场”的特征。而光学方法作为后者的代表,其因光电器件时空分辨率高以及温度敏感等优点,成为潜在还原固体发动机燃烧室内部温度参量真实状态的一种测试手段[1-2]。其中,激光测温(主动)因激光与燃烧介质的空间作用尺度有限,其集中于燃烧场的关键点位或断面测试[3-5];而辐射测温(被动)凭借像探测器的大视场探测优势,在三维燃烧场温度测试中发挥着重要角色。

在燃烧场辐射光谱三维测温模型方面,以体素为分割单元,联合多向投影采样与 Radon 变换解耦联合的 CT 成像一直是主流的温度场测试方法[6-7]。段鹏程等[8]亦曾基于该方法对固体发动机尾喷焰的温度时空演化特性进行了表征。多向投影三维辐射测温的空间分辨能力与不同视线的传感器数目成正比,滑铁卢大学 Grauer 等[9]通过布设较多数目摄像机获取了燃烧火焰三维结构中的微域辐射特征。多向投影三维辐射测温的时间响应能力取决于不同传感器的同步耦合性能,英国肯特大学最早以单相机光路结合比色测温重构了高动态轴对称火焰的温度空间分布特征。实际上,火焰结构在各种因素影响下呈现非轴对称不规则特征,浙江大学 Yu 等[10]与上海交通大学 Ruan 等[11]提出“反射镜+棱镜”复合结构,局部不同视场光线共用成像靶平面,降低了对传感器之间同步耦合程度的要求。北京理工大学 Wu 等[12]进一步利用光纤内窥镜将全视场不同视线方向的光辐射信号耦合进同一传感器,完美地避开了不同传感器的同步操作过程,特别适用于高动态燃烧场三维辐射测温。

西北工业大学宋尔壮等[13]开创性地将多向投影光纤内窥镜三维测试技术应用由开放型燃烧场过渡到发动机燃烧室内封闭流场。由于室内高压环境使得光学窗口加工尺寸较小,这限制投影数目并最终导致三维重构空间分辨率下降;同时光纤束会严重损耗光信号并降低测量图像的信噪比。为解决上述视场受限的问题,东南大学在傅里叶光学理论基础上,沿成像系统主光轴对燃烧场以切片形式进行分割,并通过机械式改变点扩散函数建立三维燃烧断面与二维成像靶平面间的多维度空间映射关系,实现静态燃烧场空间辐射源项的层析重构。这为在单向投影光路上对不规则燃烧火焰结构进行三维测温提供了借鉴,但其缺乏时间维信息,难以保证对高动态燃烧场温度参量的高精度表征。

随后 Xu 等[14]基于液晶变焦透镜建立多维度物像空间映射关系并获取动态燃烧场的辐射光场信息,但变焦时间分辨率受限于电压变化频率。微透镜阵列传感器被进一步用于探测物方空间的深度信息,鉴于该阵列结构能够同步感知不同方向光线而获取瞬态光场[15],其被应用于高动态燃烧场三维层析测温[16-17]。由于不同微透镜所形成的子像共用同一个像靶平面,因而图像空间分辨率有待进一步提升。

本文在可见光波段设计了基于多像探测器同步共光轴结构的层析测温仪器,其具备时间维与空间维兼容的特征,能够在单向投影光路上实现对动态三维燃烧场温度时空演化特性的解析,有效地解决因燃烧可测试空间受限而影响测温的问题。需要指出的是,固体火箭发动机燃烧室内部流场呈气固两相态,光学辐射测温过程中不同状态燃烧介质在可见光与红外波段的敏感特性存在差异。如果能够进一步发展基于红外层析成像的燃烧流场三维层析测温方法,并结合可见光测温实现多波段数据融合诊断,则能够对多相燃烧介质的温度参量同时进行测试,为固体推进剂燃烧效率的优化提供可靠数据支撑。

## 1 辐射层析测温原理

### 1.1 光学层析成像理论

基于单向投影光路的燃烧场三维层析成像原理如图 1 所示。在空间坐标系 $O-xyz$ 中,将燃烧场分解为一系列相互平行且垂直于 $z$ 轴的二维断面,其中 $z$ 轴与光学成像系统的主光轴重合。

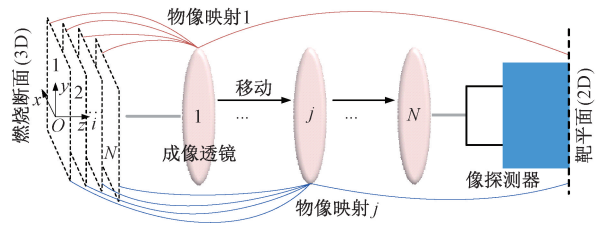



图 1 燃烧断面层析原理

Fig. 1 Principle of combustion cross-section tomography

根据光学成像系统对物平面理想点光源的脉冲响应特性,某一燃烧断面的空间辐射强度(物)与像探测器靶平面上灰度分布(像)的映射关系能够由傅里叶光学理论进行定量表征:

$$f(x,y) * h(x,y) = g(x,y) \tag{1}$$

式中:$f(x,y)$ 与 $g(x,y)$ 分别表示燃烧断面的空间辐射强度与图像灰度分布,$*$ 为卷积符号,$h(x,y)$ 为光学成像系统的点扩散函数,其与透镜自身光学特性及其在光路结构中的几何位置紧密相关。

进一步由几何光学中的物像共轭关系可知,光学成像系统仅能够对三维燃烧场中特定空间位置的断面进行聚焦并清晰成像,剩余燃烧断面在靶平面处形成离焦的弥散图像。假定源于不同燃烧断面的光辐射信号相互独立,则靶平面上所记录的图像灰度分布为聚焦燃烧断面与离焦燃烧断面所对应图像的线性叠加,如式(2)所示。

$$\sum_{i=1}^{N} f(x,y,z_i) * h(x,y,z_{i-j}) = g(x,y,z_j) \tag{2}$$

式中:$N$ 表示所分解的燃烧断面数目,$i$ 与 $j$ 分别表示燃烧断面的序列号与成像透镜的几何位置,二者均满足 $1 \leqslant i \leqslant N$ 与 $1 \leqslant j \leqslant N$。在此基础上,完成三维燃烧场与二维靶平面之间的空间映射关系建模。

若要解析式(2)中不同空间位置处的燃烧断面,需要建立 $N$ 维数目的物像映射方程。通过控制光学成像系统中透镜的几何位置对不同燃烧断面进行聚焦,以此改变系统的点扩散函数:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N} f(x,y,z_i) * h(x,y,z_{i-1}) = g(x,y,z_1) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{N} f(x,y,z_i) * h(x,y,z_{i-2}) = g(x,y,z_2) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^{N} f(x,y,z_i) * h(x,y,z_{i-N}) = g(x,y,z_N) \end{cases} \tag{3}$$

进一步对式(3)进行反卷积变换,并结合光学成像系统点扩散函数的测量,实现对燃烧场不同断面所对应辐射特征的层析求解。

### 1.2　辐射测温方法

辐射测温的理论依据为普朗克辐射定律,其辐射强度与波长以及温度参量的具体关系如式(4)所示。

$$I(\lambda,T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \tag{4}$$

式中:$I$ 为黑体辐射强度,$\lambda$ 为波长,$T$ 为绝对温度,$c_1$ 与 $c_2$ 分别为第一与第二辐射常数。

由于燃烧场并非理想的黑体,其在不同温度下的辐射特性如式(5)所示。

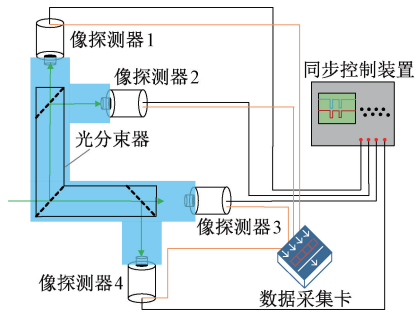
$$I'(\lambda,T) = \varepsilon \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(c_2/\lambda T) - 1} \tag{5}$$

式中:$I'$ 为燃烧场实际辐射强度,$\varepsilon$ 为发射率。

本文采用单色法进行温度测量,即在式(5)基础上通过测量辐射强度与发射率实现温度反演。在温度测量过程中,采用文献[18]中描述的方法确定发射率以及光在燃烧环境中传输时的衰减特性,并以此对像探测器获取的图像强度进行补偿。

## 2　动态层析测温仪器设计

本文提出适用于动态三维燃烧场测温的同步共轴多像探测器光路结构,如图 2(a)所示,共包含 4 个成像通道($N$=4)。借助光分束器改变光线的传播方向,将燃烧场的辐射能量分配到不同的通道,并分别经由像探测器获取燃烧图像。不同像探测器前透镜对物方空间中燃烧场断面的聚焦位置存在差异,因而能够对同一燃烧场景建立式(3)中的多维物像空间映射关系。在同步触发装置控制下,每个像探测器能够同时耦合工作,可应用于动态变化的燃烧环境。同时,不同离焦程度的投影图像单独占用像靶平面,因而该光学层析测温设备具备高时间分辨与高空间分辨兼容表征的优势,相应的实物装置如图 2(b)所示。设备由光机电一体化集成得到,相应的模块单元具体如下。




(a) 同步共轴成像结构
(a) Synchronous coaxial imaging structure

(b) 测温仪器实物
(b) Temperature measuring instrument

图 2　动态辐射层析测温仪器

Fig. 2　Dynamic radiation tomography temperature measuring instrument

### 2.1　光学模块

传统多级光分束器以离散式能量分光棱镜为基本单元[19],不同单元之间相互独立,如图 3(a)所示。需要对多级分光单元进行人工调试,使其处于同一光轴且不同单元间距离一致。若不同分光单元表面不平行会形成视场偏斜,从而导致多光路视场不一致。同时,一级与二级离散式能量分光棱镜之间存在空气介质,根据几何光学知识可知空气与棱镜表面的光反射现象亦会影响系统终端的成像质量。

本文采用集成式能量分光棱镜代替传统的离散式能量分光棱镜,能够有效避免棱镜表面多重反射对成像过程的影响,如图 3(b)所示。基于 K9 玻璃材料对分光棱镜进行加工,采用胶合工艺对光分界面进行处理,且通过镀增透膜的方式减少光能量在分界面处的反射。该集成式能量分光棱镜将入射光束分成四路出射,以等比例方式进行能量分光。

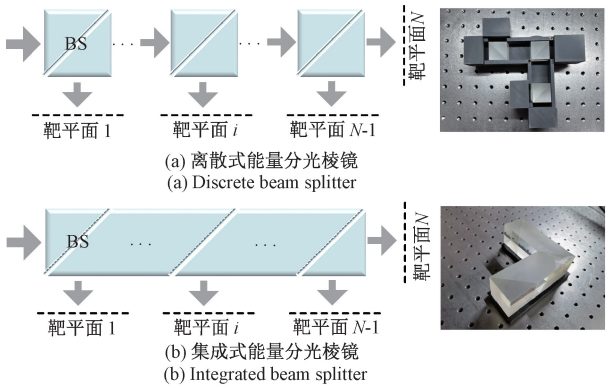



图 3 不同的光分束器结构

Fig. 3 Different beam splitter structure

光分束器的不同出射端面中心以及每个终端像探测器的主光轴均位于同一高度,且端面中心位置处法线方向与主光轴方向保持一致,以实现多像探测器共轴。整个光分束器结构呈对称分布,且从分光棱镜入光口到各个像探测器前端之间的光程均相等,因而不同光路中光能量的衰减程度保持一致。

## 2.2 机械模块

机械结构亦是动态层析测温系统的重要组成部分,其对光学以及电路控制模块起到支撑与固定的作用。本文采用设计软件 SolidWorks 绘制各机械零件的三维模型,以质量轻、硬度高的航空铝合金作为结构材料。其结构如图 4 所示,主要包括 3 个单元:1)底座,以此为水平基板设计不同的水平台阶,能够使得各光学元器件保持中心高度一致;2)分光棱镜凹槽,在其两侧设置与水平基板垂直的竖直挡板,采用螺丝对构件连接进行固定,以 L 型槽匹配能量分光棱镜形状来提高自身稳定性;3)像探测器凹槽,在沿光轴方向的两侧增加竖直挡板,槽上方布置固定盖板,通过抑制相机移动来增加其稳定性。

以上对能量分光棱镜、相机等关键光学元器件的机械固定结构进行了设计,进一步在整体上对光学系统进行机械封装。1)为光学系统提供封闭空间,避免外界光噪声干扰成像效果;2)避免灰尘等物质附着于光学元器件的通光面,影响光能量通透率;3)完整封装有利于层析测温系统的集成,能够更加便捷地进行外场试验。

以测温仪器所属的入光面为前部面板,仅保留面积为 40 mm×40 mm 的通光孔;在后部面板上,设计了电源接口、远程触发等器件接口;左侧面板安装有数据传输接口;右侧及上下两侧面板分别由完整的航空铝合金材料组成。不同位置处面板均独立加工成型,采用螺丝固定的方法进行相互连接。

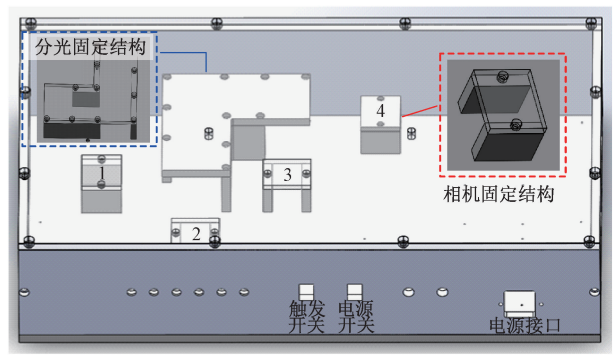



图 4 层析测温仪机械结构

Fig. 4 Mechanical structure of tomography thermometer

## 2.3 电学模块

采用 4 个高速像探测器对燃烧场景的辐射信息进行同步采集,其自身具备硬件触发功能,但仍需能够提供给硬件触发的多路同步信号。本文基于 Xilinx 的 Spartan-6 系列 FPGA 芯片设计同步触发电路,相应的单板电路设计如图 5 所示。

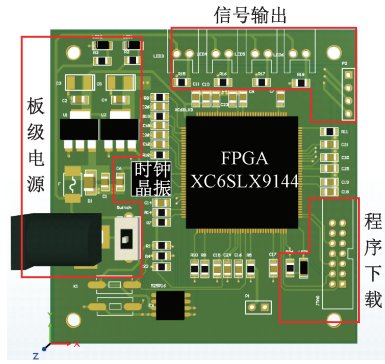



图 5 同步触发电路设计

Fig. 5 Design of synchronous trigger circuit

FPGA 芯片正常工作所需要的不同电压由 5 V 电压转换获取。选取线性稳压电源作为板级电源模块,其自身纹波小,能够保证同步控制电路的稳定性与可靠性。采用 LM1117S 系列的 LDO 降压芯片,可将 5 V 降压为 3.3 V 和 1.2 V,搭配去耦电容,可实现稳定质量的电源输出。

基于 FPGA 进行同步脉冲信号发生器设计,暂定设计高速相机帧率为 200 fps,帧周期为 5 ms。在同步控制电路中采用 50 MHz 的晶振提供时钟信号,时钟周期为 20 ns,程序下载采用 JTAG 通信协议,使用容量为 16 Mbit 的 Flash 芯片存储程序文件,其型号为 M25SP16。当单板电路接通电源后,FPGA 芯片自行从 Flash 读取程序并运行。在 FPGA 内部定义计数器,其按照时钟频率进行计数,因此共需要 250 000 个周期才能产生 200 Hz 的脉冲。计数器从 0 开始计数,当数值达到 249 999 后,计数器清

0 开始重新计数,以此不断地产生 200 Hz 脉冲,每 50 000 个计数周期对应时间为 1 ms。令信号输出在 0~9 999 范围为高电平,在 10 000~49 999 范围为低电平,则可以产生脉宽 1 ms,脉冲周期为 5 ms 的脉冲信号。同理,可以经过参数调节,实现不同脉宽和不同脉周期的信号。由于 FPGA 为并行处理逻辑器件,因此四路脉冲信号可同时输出。在每路信号的输出线路上连接了 LED 指示灯,当该电路进行工作时,指示灯会以相同的频率进行工作。

高速图像数据的采集主要有两个关键因素,分别是数据的传输和存储,并且数据的传输速度要略小于存储速度。同时,存储硬件结构和通信接口都影响着数据的存储速度。综合考虑数据的传输速率和数据传输的可靠性,本文选择使用 PCI-e 接口和固态硬盘进行数据的传输和存储,并且配备了仪器专用工控机。数据的 A/D 采集使用 XIMEA 公司设计的专用 PCI-e 数据采集卡,型号为 EPCIE4XRDCA01A,无需额外的软件或者驱动程序操作。该采集卡包括集成均衡电路和集成增益电路,二者分别提供采集卡驱动器前后的信号完整性和灵活性。

## 3　试验与数据分析

### 3.1　点扩散函数标定

本文基于高斯模型来定量描述辐射层析测温系统的点扩散函数特性:

$$h(x_{i-j},y_{i-j})=\frac{1}{2\sigma^2}\exp\left(-\frac{x_{i-j}^2+y_{i-j}^2}{2\sigma^2}\right) \tag{6}$$

式中:$x_{i-j}$ 与 $y_{i-j}$ 分别表示二维像靶面的像素坐标,其相应的下标 $i$ 与 $j$ 则分别表示燃烧断面位置与成像透镜位置,$\sigma$ 为模型分布的标准差,其用来表征强度分布的分散程度。进一步将式(2) 沿 $y$ 方向进行积分可得到线扩散函数:

$$l(x_{i-j})=\int_{-\infty}^{+\infty}h(x_{i-j},y_{i-j})\,\mathrm{d}y_{i-j}=\frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{x_{i-j}^2}{\sigma^2}\right) \tag{7}$$

由于理想的点光源及线光源均较难获取,本文依赖于光学成像系统对直边物体响应比较敏感的优势,在线扩散函数基础上进一步积分获取边缘扩散函数,以此解析高斯模型中的 $\sigma$ 值。

利用黑白棋格标定板(GP150 12×9)中的边界区域作为直边物体,以 5 mm 厚度玻璃为基底,面板为 0.15 mm 厚的氧化铝材料,精度为 0.01 mm,且其表面不反光。相应的点扩散函数测量装置如图 6 所示,沿着系统主光轴方向使标定板位于不同的空间位置,其中标定板表面法线方向与主光轴平行。系统中 4 个像探测器分别独立聚焦于不同位置处的标定板黑白边界区域。根据几何光学中的物像共轭关系可知,除像探测器之一能够聚焦于标定板,剩余像探测器获取的图像为离焦状态。

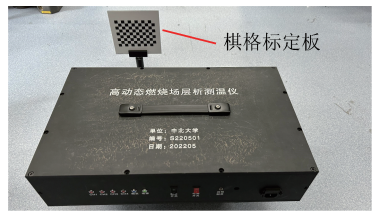
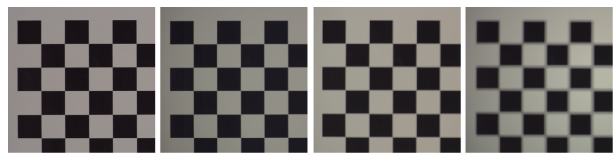



图 6　点扩散函数测量装置

Fig. 6　Device of measuring point spread function

当标定板位于像探测器 1 的聚焦面位置时,不同像探测器获取的图像状态如图 7 所示,像探测器 1~4 所对应的图像离焦程度逐渐增加。



(a) 像探测器1 (a) Detector 1　(b) 像探测器2 (b) Detector 2　(c) 像探测器3 (c) Detector 3　(d) 像探测器4 (d) Detector 4

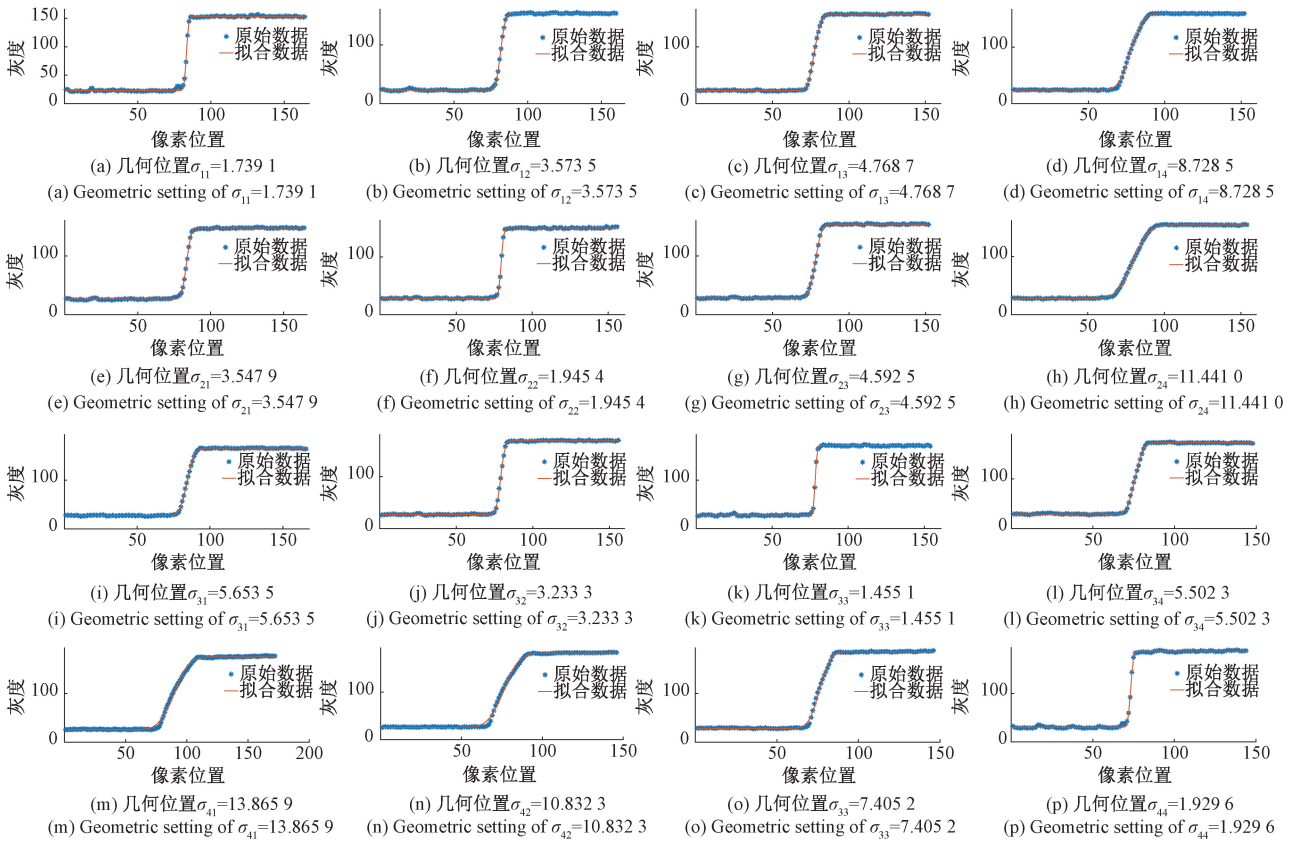
图 7　不同离焦程度下的标定板图像获取

Fig. 7　Image acquisition of calibration board at different defocusing degrees

每一个离焦图像需要匹配独自的点扩散函数,若燃烧场层析数目为 4,则需要解析 16 个点扩散函数。进一步给出了标定板由像探测器 1 聚焦面逐渐移动到像探测器 4 聚焦面过程中,标定板图像的黑白界面处强度变化曲线,如图 8 所示。在直边响应特性基础上,利用阶跃函数对原始的离散数据进行拟合,以实现更高精度的点扩散函数特性测量。通过拟合曲线可计算得到,当标定板位于聚焦面位置 1 时,不同像探测器所对应点扩散函数的 $\sigma$ 值依次为 1.739 1,3.573 5,4.768 7,8.728 5;当标定板位于聚焦面位置 2 时,相应的像探测器 $\sigma$ 值依次为 3.547 9,1.945 4,4.592 5,11.441 0;当标定板移动到聚焦面位置 3 时,不同像探测器点扩散函数的 $\sigma$ 值依次为 5.653 5,3.233 3,1.455 1,5.502 3;当标定板位于聚焦面位置 4 时,不同像探测器点扩散函数的 $\sigma$ 值依次为 13.865 9,10.832 3,7.405 2,1.929 6。将不同 $\sigma$ 值代入式(6),即可求解具有不同几何设置的像探测器点扩散函数。

### 3.2　层析可靠性验证

基于上述点扩散函数测量方法,在实验室环境中对辐射层析测温系统其它几何设置的 $\sigma$ 值进行了标定,并进一步对该光学系统的层析效果进行了验证,相应的实验装置如图 9 所示。沿入射光路方向,将四块透明的亚克力板依次放置于系统的前端,其表面与光轴垂直。




(a) 几何位置$\sigma_{11}$=1.739 1 (b) 几何位置$\sigma_{12}$=3.573 5 (c) 几何位置$\sigma_{13}$=4.768 7 (d) 几何位置$\sigma_{14}$=8.728 5

(a) Geometric setting of $\sigma_{11}$=1.739 1 (b) Geometric setting of $\sigma_{12}$=3.573 5 (c) Geometric setting of $\sigma_{13}$=4.768 7 (d) Geometric setting of $\sigma_{14}$=8.728 5

(e) 几何位置$\sigma_{21}$=3.547 9 (f) 几何位置$\sigma_{22}$=1.945 4 (g) 几何位置$\sigma_{23}$=4.592 5 (h) 几何位置$\sigma_{24}$=11.441 0

(e) Geometric setting of $\sigma_{21}$=3.547 9 (f) Geometric setting of $\sigma_{22}$=1.945 4 (g) Geometric setting of $\sigma_{23}$=4.592 5 (h) Geometric setting of $\sigma_{24}$=11.441 0

(i) 几何位置$\sigma_{31}$=5.653 5 (j) 几何位置$\sigma_{32}$=3.233 3 (k) 几何位置$\sigma_{33}$=1.455 1 (l) 几何位置$\sigma_{34}$=5.502 3

(i) Geometric setting of $\sigma_{31}$=5.653 5 (j) Geometric setting of $\sigma_{32}$=3.233 3 (k) Geometric setting of $\sigma_{33}$=1.455 1 (l) Geometric setting of $\sigma_{34}$=5.502 3

(m) 几何位置$\sigma_{41}$=13.865 9 (n) 几何位置$\sigma_{42}$=10.832 3 (o) 几何位置$\sigma_{33}$=7.405 2 (p) 几何位置$\sigma_{44}$=1.929 6

(m) Geometric setting of $\sigma_{41}$=13.865 9 (n) Geometric setting of $\sigma_{42}$=10.832 3 (o) Geometric setting of $\sigma_{33}$=7.405 2 (p) Geometric setting of $\sigma_{44}$=1.929 6

图 8 不同几何设置下的直边响应

Fig. 8 Straight edge response with different geometric settings

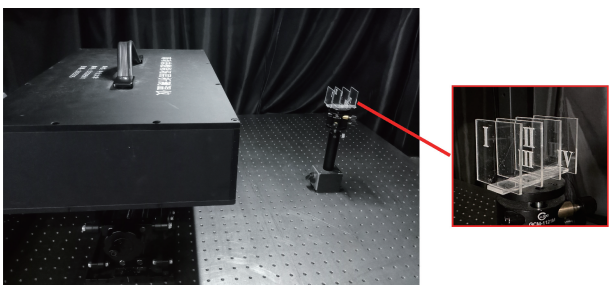
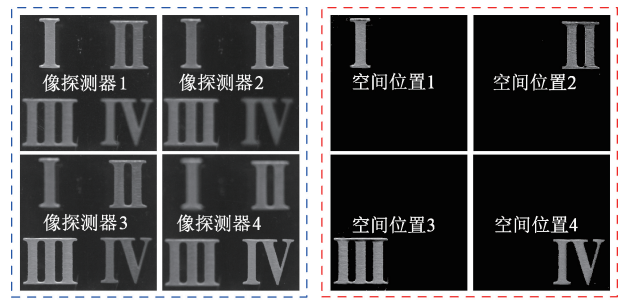


图 9 层析验证装置

Fig. 9 Device of validating tomography

采用激光技术分别将古罗马数字“Ⅰ”、“Ⅱ”、“Ⅲ”、“Ⅳ”刻蚀于不同空间位置处亚克力板的表面,不同数字符号在光轴方向上无交叠。

基于式(3)建立不同像探测器的多维物像空间映射关系,相应的结果如图 10(a)所示。不同像探测器所获取图像的离焦程度存在差异,利用该差异并借助反卷积方法对堆栈的亚克力板数字符号进行分离,并进行图像重聚焦,如图 10(b)所示,古罗马数字“Ⅰ”、“Ⅱ”、“Ⅲ”、“Ⅳ”能够分别独立地清晰显示出来。由于古罗马数字分别处于不同的空间沿轴位置,因而图 10 结果验证了本文所提系统具备对三维场景进行光学层析成像的效能。




(a) 不同离焦状态 (b) 图像层析

(a) Different defocusing states (b) Image tomography

图 10 基于多维物像映射的图像层析

Fig. 10 Image tomography based on multidimensional object image mapping

### 3.3 光电映射关系标定

在普朗克辐射定律基础上,温度反演的信息载体为光信号,而像探测器获取的是电信号。因而,需要建立光电信号之间的映射关系。在北京长城计量测试技术研究所进行的光电信号标定实验如图 11 所示,其中标准黑体辐射源前端对准层析测温仪的入光口。

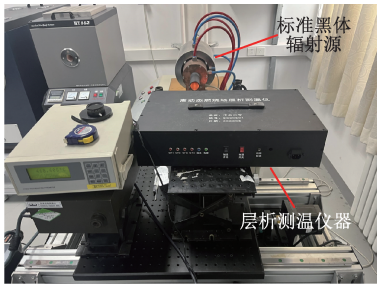



图 11　光电映射标定装置

Fig. 11　Device of optoelectronic mapping calibration

通过调整像探测器的曝光时间,使其图像灰度处于合理范围。在黑体辐射源 1 300℃~1 450℃温度区间内,每隔 30℃进行一次标定。考虑到不同像探测器的光电敏感特性存在差异,进一步对辐射层析测温系统中所有像探测器进行标定。本文采用单色法对温度参量进行重构,且黑体辐射源的红色信号强度比较明显,因而选择像探测器的红色通道对光电信号映射关系进行标定。相应的结果如图 12 所示,其中横坐标为像探测器所记录的图像灰度分布,纵坐标为基于普朗克辐射定律计算得到的光辐射信号强度。

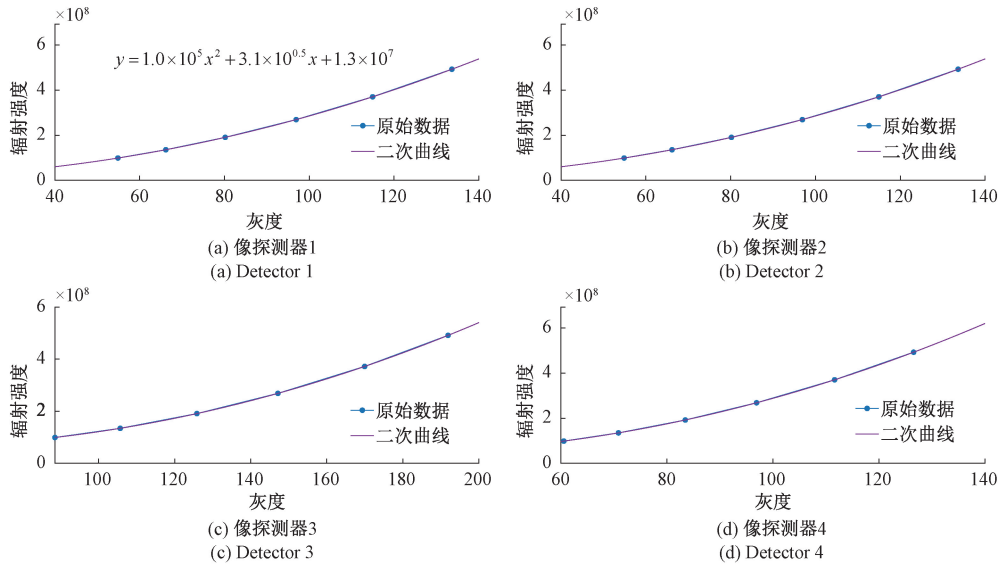
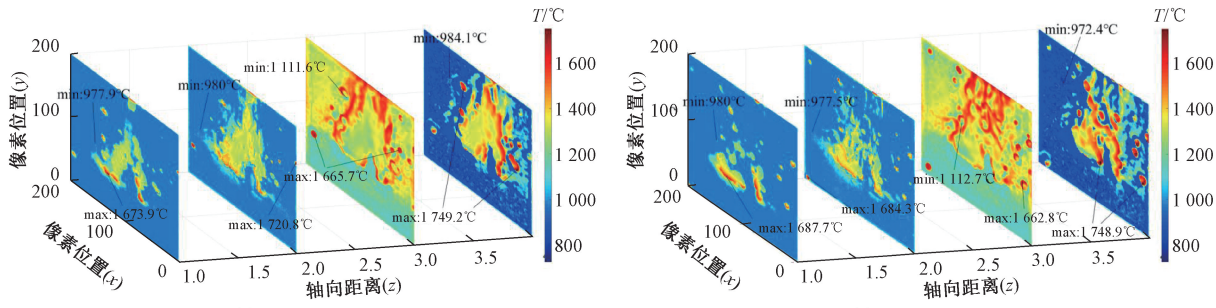



图 12　光电信号映射关系

Fig. 12　Optoelectronic signal mapping relationship

### 3.4　燃烧场温度测量

通过上述已标定的光电信号映射关系,利用辐射层析测温仪器对某型号固体推进剂药条燃烧过程中的温度时空演化特性进行了描述。药条燃烧至自身中间位置附近处的动态燃烧场三维温度分布特性如图 13 所示,其对应的时刻分别为 2 272.73 ms,2 277.27 ms,2 281.81 ms,2 286.35 ms,2 290.89 ms,2 295.43 ms。药条燃烧温度在 970℃~1 750℃之间,根据色条所显示的温度分布可知,第一与第二燃烧段面的整体温度低于第三与第四燃烧面,且多数飞溅的火星位于第三与第四聚焦面(距层析测温仪 50 cm 及 51.5 cm 处)的位置。基于高温热电偶测量结果,以相对误差形式对层析测温仪的精度进行标定,计算结果表明测温误差小于 8%。



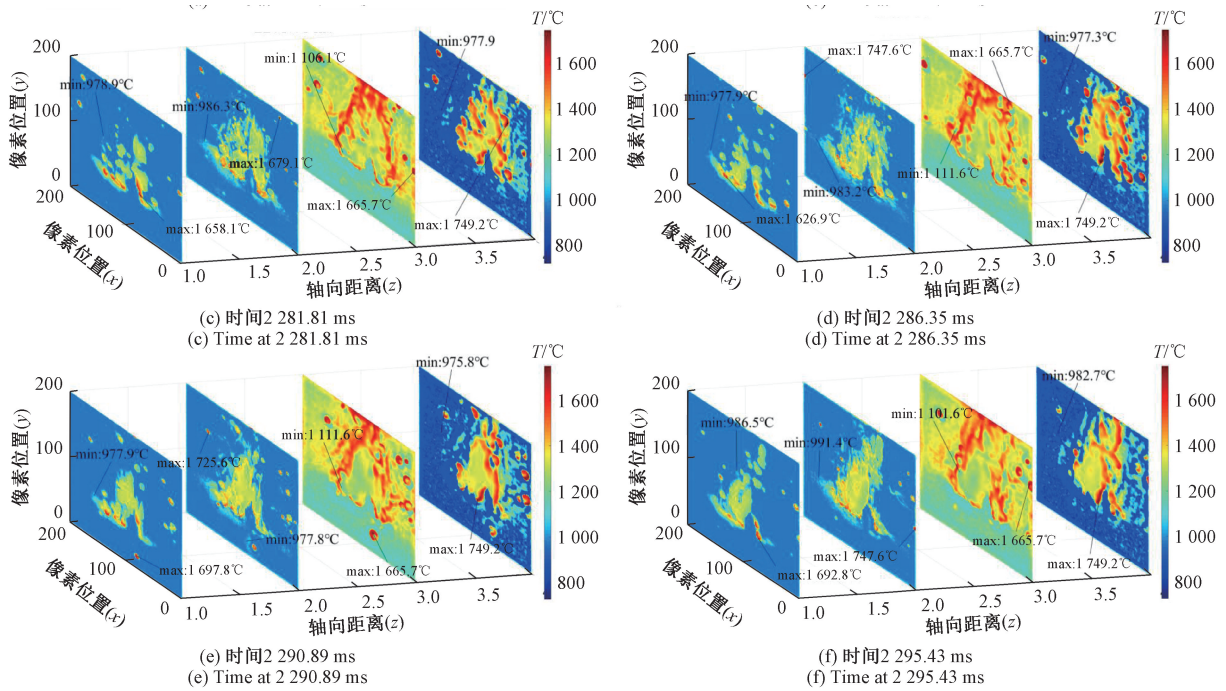



图 13 动态燃烧场温度层析结果

Fig. 13 Results of dynamic combustion field temperature tomography

## 4 结 论

针对固体火箭发动机燃烧室内部可测试空间受限的问题,本文提出基于多像探测器同步共轴的辐射传感结构,通过光机电一体化设计形成完备的燃烧场层析测温仪器。多像探测器能够在沿轴方向上同步聚焦于不同空间位置处的燃烧断面,并实现燃烧断面的相互分离与独立显示,具备在单向投影光路上进行动态三维测温的能力,误差小于 8%。相比于其它结构的层析测温仪器,本仪器具备兼容时间维与空间维信息的能力,能够以更高分辨率对燃烧场的时空演化特性进行表征。

## 参考文献

[1] 张志强, 王萍, 于旭东, 等. 高精度红外热成像测温技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 10-18.
ZHANG ZH Q, WANG P, YU X D, et al. Study on high accuracy temperature measurement technology of infrared thermal imager [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 10-18.

[2] ZHENG S, CAI W G, LIU B, et al. Experimental detection of two-dimensional temperature distribution in rocket-based combined cycle combustion chamber using multispectral imaging processing[J]. Fuel, 2023, 333: 126391.

[3] 曹章, 高欣, 陆方晖, 等. 激光吸收光谱层析成像及复杂燃烧场动态监测[J]. 中国激光, 2022, 49(19): 117-138.
CAO ZH, GAO X, LU F H, et al. Laser absorption spectral tomography for dynamic combustion monitoring[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(19): 117-138.

[4] 胡志云, 张振荣, 王晟, 等. 用于湍流燃烧温度测量的激光诊断技术[J]. 气体物理, 2018, 3(1): 1-11.
HU ZH Y, ZHANG ZH R, WANG SH, et al. Laser diagnostics for temperature measurements in turbulent flames[J]. Physics of Gases, 2018, 3(1): 1-11.

[5] 邱聪聪, 曹亮, 陈晓龙, 等. 冲压发动机羽流温度 TDLAS 在线测量系统[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 70-77.
QIU C C, CAO L, CHEN X L, et al. TDLAS online measurement system for plume temperature of ramjet engine [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 70-77.

[6] 周怀春, 李框宁, 安元, 等. 燃煤电站锅炉及工业窑炉三维燃烧温度分布监测研究进展[J]. 洁净煤技术, 2022, 28(10): 1-14.
ZHOU H CH, LI K N, AN Y, et al. Research progress on monitoring three-dimensional temperature distributions in coal-fired boilers and industrial furnaces[J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(10): 1-14.

[7] 张彪, 李智豪, 李健, 等. 基于背景导向纹影的火焰

三维温度场重建[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(1): 158-161.
ZHANG B, LI ZH H, LI J, et al. 3D reconstruction of flame temperature distribution based on background oriented schlieren[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(1): 158-161.

[8] 段鹏程, 程博, 管今哥, 等. 基于多 CCD 同步耦合的动态燃烧场三维辐射测温(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 51-60.
DUAN P CH, CHENG B, GUAN J G, et al. Three-dimensional radiation thermometry for dynamic combustion field based on multi-CCD synchronous coupling (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 51-60.

[9] GRAUER S J, UNTERBERGER A, RITTLER A, et al. Instantaneous 3D flame imaging by background-oriented schlieren tomography[J]. Combustion and Flame, 2018, 196: 284-299.

[10] YU T, RUAN C, LIU H C, et al. Time-resolved measurements of a swirl flame at 4 kHz via computed tomography of chemiluminescence[J]. Applied Optics, 2018, 57(21): 5962-5969.

[11] RUAN C, YU T, CHEN F E, et al. Experimental characterization of the spatiotemporal dynamics of a turbulent flame in a gas turbine model combustor using computed tomography of chemiluminescence[J]. Energy, 2019, 170: 744-751.

[12] WU H F, GAO Y, WU Y, et al. Computed tomography in resolving flame topology with internal optical blockage involved[J]. Applied Optics, 2022, 61(17): 5161-5171.

[13] 宋尔壮, 雷庆春, 范玮. 基于层析原理的湍流火焰三维测量综述[J]. 实验流体力学, 2020, 34(1): 1-11.
SONG ER ZH, LEI Q CH, FAN W. A review on three-dimensional flame measurements based on tomography[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2020, 34(1): 1-11.

[14] 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.

[15] 李扬, 张旭东, 孙锐, 等. 基于光场 EPI 图像栈的 6D 位姿估计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 122-130.
LI Y, ZHANG X D, SUN R, et al. 6D pose estimation method based on light field EPI image stack[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 122-130.

[16] 单良, 赵腾飞, 黄荟云, 等. 基于阻尼 LSQR-LMBC 的火焰三维温度场重建[J]. 物理学报, 2022, 71(4): 21-32.
SHAN L, ZHAO T F, HUANG H Y, et al. Flame 3D temperature field reconstruction based in Damped LSQR-LMBC[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(4): 21-32.

[17] LI T J, GAO P, ZHANG C X, et al. Meshed axisymmetric flame simulation and temperature reconstruction using light field camera[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 158: 107159.

[18] ZHANG B, WANG C, LIU Y D, et al. Reconstruction of 3D temperature profile of radiative participatory flame based on digital refocusing technique of light field camera[J]. International Journal of Photoenergy, 2019, 11: 1-13.

[19] 卫娜瑛, 管今哥, 郑永秋, 等. 基于级联分光成像的动态火焰层析表征方法[J]. 光学学报, 2023, 43(9): 93-104.
WEI N Y, GUAN J G, ZHENG Y Q, et al. Dynamic flame tomography characterization method based on cascade beam splitting imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(9): 93-104..

## 作者简介

**管今哥**(通信作者), 2009 年于聊城大学获得学士学位, 2016 年于西安交通大学获得博士学位, 现为中北大学副教授, 主要研究方向为燃烧光学诊断。
E-mail: jgguan@nuc.edu.cn

**Guan Jinge** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Liaocheng University in 2009, and received his Ph. D. degree from Xi'an Jiaotong University in 2016. He is currently an associate professor at North University of China. His main research interests include combustion diagnosis based on optical methods.