

文章编号 1004-924X(2026)04-0525-11

航空发动机尾喷温度场的背景纹影光学中心校正

秦 炆*, 吴 军

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要:针对背景纹影技术中因相机光轴偏转导致的投影偏移与轴对称温度场重建失真问题,本文提出一种基于几何光学建模的光学中心校正方法。传统方法假定相机光轴与流场轴线严格对准,未考虑实际装调中不可避免的角度偏差。本研究通过建立存在光轴偏转的精确几何模型,推导了实际投影坐标与理想传感器坐标之间的解析映射关系,在单相机轴对称测量架构下实现了含偏转误差的偏折角准确解算。结合 Abel 逆变换与 Gladstone-Dale 关系,完成了从偏折角到折射率场再到温度场的完整重构。实验系统在 $\pm 6^\circ$ 偏转范围内进行了验证,结果表明:在 $\pm 6^\circ$ 工况下,重建温度场的平均偏差由传统方法的 18.26 K 降至 -0.94 K,精度提升约一个数量级。该方法显著提高了背景纹影技术在非理想装调条件下的测量可靠性,为航空发动机尾喷温度场的高精度、强鲁棒性光学诊断提供了有效的校正手段。

关键词:背景纹影法;航空发动机尾喷温度场;光学中心校正;几何光学模型;Abel 逆变换

中图分类号:V231.1;O439 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263404.0525

CSTR:32169.14.OPE.20263404.0525

Optical center calibration for aero-engine exhaust temperature field measurement using background-oriented schlieren

QIN Yang*, WU Jun

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China., Tianjin 300300, China)

* Corresponding author, E-mail: 2024012119@cauc.edu.cn

Abstract: To address the projection offset and axisymmetric temperature-field reconstruction distortion caused by camera optical-axis misalignment in background-oriented schlieren (BOS) technology, this paper proposed an optical center calibration method based on geometric optical modeling. Conventional methods assumed strict alignment between the camera optical axis and the flow axis, neglecting unavoidable angular deviations in practical installation. In this work, an accurate geometric model incorporating optical-axis tilt was established, from which an analytical mapping between actual projection coordinates and ideal sensor coordinates was derived. This enabled precise deflection-angle calculation under misaligned conditions while maintaining a single-camera axisymmetric measurement architecture. By integrating the Abel inverse transform and the Gladstone-Dale relation, a complete reconstruction chain from deflection angles to refractive-index fields and finally to temperature fields was achieved. Experimental validation was conducted within a misalignment range of $\pm 6^\circ$. The results show that under a $+6^\circ$ tilt condition, the average temperature deviation is reduced from 18.26 K using the conventional method to -0.94 K.

收稿日期:2025-10-28;修订日期:2025-12-16.

基金项目:国家自然科学基金(No. 52375557);天津市科技计划(No. 24JCYBJC00160);中央高校基本科研业务费项目(No. 3122024PT07)

K with the proposed approach, corresponding to an improvement of approximately one order of magnitude in accuracy. The method significantly enhances the measurement reliability of BOS under non-ideal installation conditions and provides an effective calibration tool for high-precision, robust optical diagnosis of aero-engine exhaust temperature fields.

Key words: background-oriented schlieren; aero-engine exhaust temperature field; optical center calibration; geometric optical model; Abel inverse transform

1 引 言

航空发动机尾喷温度场是表征其燃烧状态与推进性能的关键参数,其精确测量对于发动机状态评估、性能优化及安全控制具有重要意义^[1-2]。在真实复杂工况下实现该区域温度场的精确重构,是提升发动机诊断能力与健康管理水平的核心技术挑战。传统接触式测温手段易干扰流场,且难以满足高分辨率非侵入式测量需求^[3]。在非接触测温方法中,声学测温法在发动机高频噪声背景下信噪比显著下降^[4];燃烧室光谱测温中,激光光谱法需复杂光学结构,而辐射光谱法在微型喷流环境下因发射率波动导致温度响应不稳定^[5-6]。相比之下,基于折射率场反演的纹影法具有非介入、高精度和三维适应性优势,通过捕捉光线偏转实现温度场重构,系统结构简洁且测量准确,适用于发动机尾喷口复杂流场的高分辨率温度可视化。

纹影法主要包括传统纹影法、干涉纹影法、彩色纹影法和背景导向纹影法^[7-8]。传统透射式纹影系统采用基于透镜或反射镜的傅里叶光学架构^[9],虽能实现高灵敏度测量,但其光路结构复杂、对准精度要求极高,且测量区域受光学元件尺寸限制,在发动机尾喷等大尺度现场测量中适用性有限^[10];干涉纹影法难以满足环境稳定性的极端要求^[11];彩色纹影法通过色散元件将不同偏折角的光线映射为特定颜色^[12],然而其色散范围有限,在大范围流场产生的复杂偏折场中易出现颜色混叠与饱和度失真,导致无法准确量化大梯度折射率变化;背景导向纹影法(BOS)因其设备简单、成本较低,在流体力学、燃烧学和热传输等领域得到了广泛应用^[13],用于测量流场中的密度梯度和折射率变化。

背景纹影技术(Background Oriented Schlieren, BOS)由 Richard 和 Adrian 于 21 世纪初在传

统纹影法基础上提出^[14-15]。其基本原理是通过检测非均匀折射率场引起的光线偏折所导致的背景图像位移,进而反演流场参数^[16]。随着对测量精度要求的不断提高,研究重点逐渐转向定量测量技术。现有 BOS 精度提升研究主要集中于偏折光路改进和设备装调优化。在偏折光路改进方面,传统纹影系统偏折角计算基于旁轴光假设^[17],唐亮通过视频测偏折角反演风洞密度场^[18],潘智祥则通过扇形光路获取偏折角数据来重构温度场^[19]。这些重构模型的使用前提需基于相机光轴穿过待测区域且与背景板垂直的理想光路搭建系统。偏折角的测量核心是通过几何光学转换实现的,在 BOS 中,背景点的位移受实验装置的几何参数影响^[20],包括背景板、测量区域和相机三者的位置与姿态。其不确定性将直接影响测量结果,相机作为记录光线偏折信息的核心传感器,其几何参数配置对测量结果具有决定性影响。王小宇利用双目相机系统,校正轴对称温度场的中心位置,提升重构精度^[21]。虽然双目视觉系统能够通过立体标定优化空间定位,但其系统复杂、成本高昂,且对环境振动与热扰动较为敏感,在发动机高温强振工况下的适用性受限。传统单相机测量方法基于理想投影模型,未系统分析实际装调中存在的光学中心偏差及其引发的系统误差。这类几何偏差会与流场折射效应耦合,作为固定误差被引入重建过程,导致温度场重建失真。

为此,本文提出一种基于光学中心校正的轴对称温度场重构方法。通过建立因成像平面偏转引起的光路变化几何模型,推导了传感器投影偏移量与偏折角之间的解析关系,结合 Abel 逆变换^[22]、理想气体状态方程与 Gladstone-Dale 定理,构建了完整的温度场重建框架。实验结果表明,该方法在多种光轴偏转条件下均能有效校正系统误差,保持稳定的重建精度,为实现复杂装调

条件下发动机尾喷温度场的精确测量提供了可靠解决方案。

2 光轴偏转轴对称温度场的重建方法

2.1 光线偏转角的校正计算

根据理想气体状态方程(1)与 Gladstone-Dale 定理(2),在特定光波条件下,气体折射率可表示为温度、压力及气体组分的函数。其中 ρ 为气体密度, R 为气体常数, T 为热力学温度, n 为气体折射率, K 为 Gladstone-Dale 常数。当光线在折射率非均匀的流场中传播时,其轨迹遵循 Bouguer 方程^[23-24]描述的光线偏折规律,这种偏折效应在成像系统中表现为传感器平面上可测量的投影偏移量。通过分析投影偏移量并结合成像光路几何模型,即可推算出光线通过流场后的偏折角。

$$PM = \rho RT, \quad (1)$$

$$n - 1 = K\rho. \quad (2)$$

在传统的光线偏折测量中,基于平行光假设和相机光轴严格对准轴对称场温度场中心的理想模型所计算的偏转角,在实际应用中会因系统装调偏差与大视场特性而引入误差,如图1展示了理想相机光轴与存在光轴偏转的相机模型的光路对比。

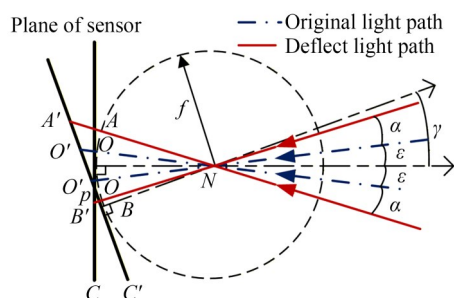


图1 理想光轴与偏转光轴的内部光路模型

Fig. 1 Internal optical path models of ideal and deflected optical axes

理想传感器平面 C 与偏转传感器平面 C' 均与以光心 N 为圆心、半径为 f 的圆相切,两平面相交于点 p ,夹角为 γ 。两条与主光轴对称、初始夹角为 ϵ 的未偏折的光线,经光心 N 分别成像于理

想传感器平面上的点 O 与偏转传感器平面上的点 O' 。

当光线穿过流场时,依据轴对称流场的对称特性,两条光线均发生偏折且与原光路成 α 夹角,并最终分别抵达理想传感器上的点 A, B 以及偏转传感器上的点 A', B' 。光轴偏转导致其光轴基准轴线(即光心至流场中心的连线),破坏了理想的共线成像条件;同时,在大范围流场与大尺寸传感器条件下,边缘视场光线表现出明显的非平行性与离轴传播行为,进一步引入了几何非对称性。在上述因素耦合作用下,光线经流场偏折后在传感器上的投影偏移量呈现系统性偏差:在理想传感器上 $|AO| = |BO|$,而在偏转传感器上 $|A'O'| \neq |B'O'|$ 。由于点 p 位于主光轴下方,且轴对称流场中心区域光线不发生偏折,因此位于理想主光轴上方的 $A'O'$ 大于 $B'O'$ 。

该现象导致基于传统模型所预测的投影偏移量与实际测量值发生显著偏离,进而引起偏折角计算失真。特别地,在相机光轴偏转方向对应的半侧传感器区域中,重建误差更为突出,严重影响了轴对称流场重构的精度与可靠性。因此,为提高实际测量工况下轴对称流场的背景纹影测量的精度,必须建立能够量化并校正光轴偏转所引入的非对称投影误差的校正模型或重建算法,以消除系统装调偏差对偏折角计算与流场重构结果的影响。

通过精确测量光线偏折角可进一步反演流场折射率分布,并基于轴对称假设采用 Abel 逆变换实现温度场重建。

如图2所示,来自背景散斑的光线穿过轴对称温度场时,因折射率梯度变化而发生偏折。

图中细虚线表示相机镜头光心、轴对称温度场中心点 O 及背景板法线共线。点划线表示相机光轴,并与细虚线形成偏转角 γ 。线段 AP 表示在无待测温度场时,背景散斑点 P 在相机 CMOS 上的初始投影点 A ,线段 AN 长度为此光路光线从镜头光心到 CMOS 的距离;粗虚线线段显示了同一点 P 在存在温度场时的偏折光路,光线经偏折后最终投影至 CMOS 上的点 B 。而偏移量 ΔH 即为此偏折效应导致的像素位移,量化为点 B 与点 A 在 CMOS 靶面上的像素距离 ($\Delta H = |B - A|$)。I 区域局部放大图中标注:线

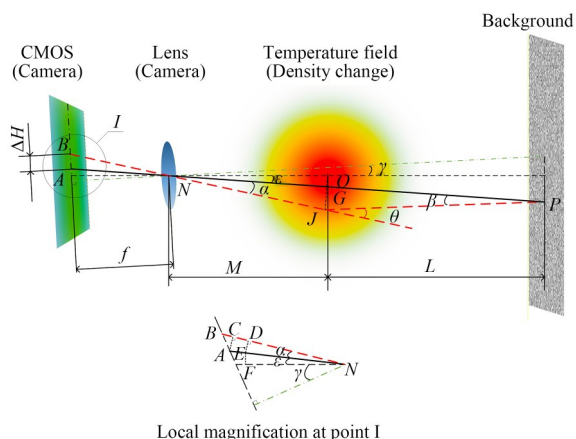


图 2 光通过温度场射入偏转光轴相机的路径的原理图
Fig. 2 Schematic of the path of light through the temperature field into the deflected optical axis camera

段 FN 长度等于像距 f , 且线段 AC, ED 分别垂直于 BN 。

传统光的偏转角度计算表达式如下所示:

$$\theta = \frac{(M+L)\Delta H}{LV}. \quad (3)$$

从背景斑点发出的光与基准轴线的夹角为 ϵ , 并且光线偏转前后其延长线的交点为 J 。相机光心为 N 。 f 为像距, M 和 L 分别为轴对称温度场中心到镜头光心和背景板平面的距离。在光轴偏转模型下, 光偏转角为 $\theta = \angle JPN + \angle JNP$ 。其中 $\angle JNP$ 为 α , $\angle JPN$ 为 β 。 α 计算过程如下, 参考 I 区局部放大图。计算 $\sin \alpha$ 表达式后, 进而求解 α :

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \sin \angle END = \frac{ED}{EN} = \frac{EN \cdot CA}{EN \cdot AN} = \\ \frac{AB \cdot \sin \angle ABN}{AN} &= \frac{\Delta H \cdot \cos(\alpha + \epsilon + d)}{AN} \Rightarrow \\ \alpha &= \arctan \left(\frac{\Delta H \cos(\epsilon + d)}{AN + \Delta H \sin(\epsilon + d)} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

β 计算过程如下, 根据图 2 光路结构, 因 $\tan \alpha = JG/GN$, $\tan \beta = JG/GP$, 所以 $\tan \alpha / \tan \beta = GP/GN$ 。 β 计算过程如下, 其中: $GN = M \cos \theta$, $NP = (M+L) / \cos \theta$, $GP = NP - GN$ 。计算 $\tan \beta$ 表达式后, 进而求解 β :

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \tan \alpha \cdot \frac{GN}{GP} = \\ \tan \alpha \cdot \frac{M \cos^2(\epsilon)}{(M+L) - M \cos^2(\epsilon)} &\Rightarrow \end{aligned}$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{\tan \alpha \cdot M \cos^2(\epsilon)}{M \sin^2(\epsilon) + L} \right). \quad (5)$$

由于 α 和 β 的值非常小, 因此可以使用它们正切值进行近似。因此在光轴偏转模型下, 光偏折角 θ 几何校正算法 (Correction algorithm) 计算表达式如式 (6):

$$\theta = \alpha + \beta \approx \tan \alpha + \tan \beta = \frac{\Delta H (M+L) \cos(\epsilon + d)}{(AN + \Delta H \sin(\epsilon + d))(M \sin^2(\epsilon) + L)}. \quad (6)$$

2.2 轴对称温度场的重建方法

根据费马原理, 光线传播的真实路径使光程取极值。对光程应用变分法并结合欧拉-拉格朗日方程, 可导出光线在非均匀折射率介质中传播时所遵循的光线方程 (7):

$$\frac{d}{ds} \left(n \frac{dr}{ds} \right) = \nabla n, \quad (7)$$

其中: r 是光路上任意点的位置矢量, s 为沿光传播轨迹的弧长参数。将 (7) 分解为以下一阶方程组, 其中 J 是光线方向向量。那么光线偏转角由 (8) 定义, 其中 $n(dr/ds) = J$, $dJ/ds = \nabla n$ 。

$$\theta = J^{\text{out}} - J^{\text{in}} = \int_s \nabla n ds. \quad (8)$$

基于轴对称流场的重建原理, 通过 Abel 反演算法将折射率场的一维投影数据重构为二维径向分布场, 进而结合 Gladstone-Dale 定律实现温度场重建。光传播路径如图 3 所示。

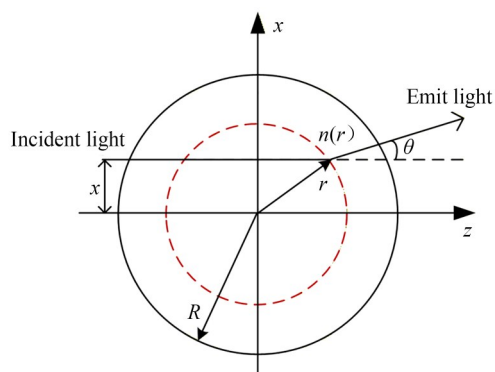


图 3 光线在折射率场中偏转的原理图
Fig. 3 Schematic representation of the deflection of a ray in a refractive index field

图中 r 表示被测平面中任意位置的径向半径, R 为流场探测域最大径向边界, θ 表示位置 x 处测量的光线偏折角。根据光线方程 (4), 光线

穿过轴对称折射率场产生的偏转角可如下获得:

$$\theta(x) = 2x \int_r^R \frac{d\Delta n(r)}{dr} \cdot \frac{dr}{\sqrt{x^2 - r^2}}, \quad (9)$$

其中:折射率差 $\Delta n(r) = n(r) - n_0$, 即流场折射率与周围环境折射率之差^[25], n_0 为环境折射率。该折射率差的径向分布可通过如下的 Abel 逆变换获得:

$$\Delta n(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \theta(x) \cdot \frac{dx}{\sqrt{x^2 - r^2}}. \quad (10)$$

气体的密度 ρ 与折射率 n 之间公式(2)确定, 将公式(2)分别应用于流场和环境状态, 相减后可得密度场, 基于理想气体状态方程建立密度 ρ 与温度 T 的关联:

$$\rho = \frac{MP}{R_0 T}, \quad (11)$$

其中: M 表示气体摩尔质量, P 为静压(假设为恒定值), R_0 为通用气体常数, T 是气体温度。在流场压强等于环境压强的假设下, 将状态方程分别应用于流场和环境, 将两式相除, 得到温度表达式:

$$T(r) = \frac{\rho_0}{\rho(r)} T_0. \quad (12)$$

将式(11)代入式(12)得:

$$T(r) = \frac{n_0 - 1}{n(r) - 1} T_0. \quad (13)$$

因此通过 Abel 逆变求解折射率场分布后, 运用折射率和温度之间的关系, 可以获得轴对称温度分布。

3 光轴偏转轴对称温度场的实验验证

3.1 仿真模型建立

基于背景导向纹影的数值仿真模型, 所采用的测量光路布局如图4所示。背景散斑平面与相机成像系统分别置于待测平面高温度场的两侧。设定火焰中心位于坐标原点(0, 0), 温度场的高斯函数^[26]表达式为:

$$T = \frac{2850}{\pi} e^{-\frac{x^2 + y^2}{100}} + 293. \quad (14)$$

该轴对称温度场最高温度设定为 1 200 K, 考虑到温度场在径向无限延伸且无明显边界, 采用 0.1 K 的温度阈值来确定其有效作用范围。通过

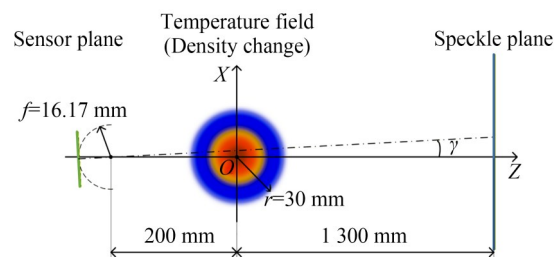


图4 温度测量模拟图

Fig. 4 Simulation diagram of temperature measurement

计算, 该阈值对应的半径尺度为 30 mm, 其折射率场分布如图3所示。背景散斑平面固定于 $Z = 1\ 300\text{ mm}$ 处, 相机镜头光心则位于 $Z = -200\text{ mm}$ 处。选用 16 mm 焦距镜头, 根据高斯光学公式(15)计算得像距 $f = 16.17\text{ mm}$ 。本研究以相机光心为旋转中心, 设定传感器偏转角为 γ , 以模拟实际应用中常见的相机非理想光轴工况。

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{u}. \quad (15)$$

为验证光轴偏转带来的影响及本文校正算法的有效性。基于工程实际考量, 设定偏转角在 $0^\circ, 4^\circ, 6^\circ$ 和 -6° 的工况进行仿真。首先, 基于设定的高斯型温度场分布, 通过 Gladstone-Dale 关系与 Abel 变换正演模型, 推导出理论上的光线偏折角分布, 以此作为评估算法精度的基准真值。随后, 通过数值求解光线方程(7)~(8)进行光线追迹仿真, 获取传感器平面上的光斑偏移量。将该偏移量分别代入传统算法(Traditional algorithm)表达式(3)与本文提出的几何校正表达式(6), 计算相应的光线偏折角, 以实现与传统算法及本文方法的定量对比。

3.2 仿真结果与分析

图5对比了 $\gamma = -6^\circ$ 和 6° 两种角度在传统算法计算的偏折角和理论偏折角, 表1显示了这两种偏转角左右半区传统算法与理论偏折角极值点的绝对值差。

在光轴 6° 偏转工况下, 传统方法重建误差呈现明显的非对称分布, 高误差区域主要集中在传感器平面左侧, 其极值单数据点的最大相对误差达到 2.33%; 而在 -6° 偏转时, 高误差区域则系统性地转移至传感器平面右侧, 且误差幅值与分布范围与 6° 工况高度对称。这种随偏转方向反转而发生的误差分布镜像特性, 与理论推导中

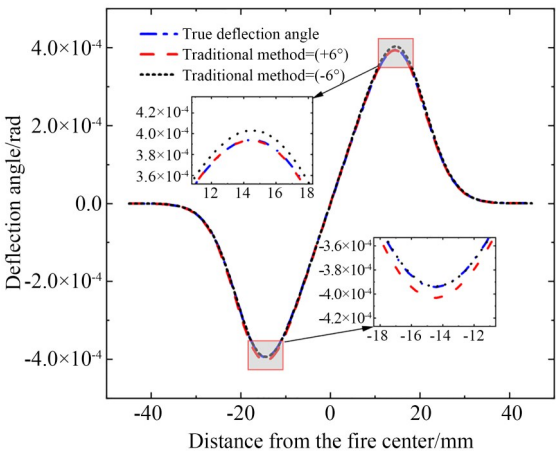


图 5 光轴偏转左右半区偏折角分布
Fig. 5 Deflection angle distribution of the optical axis deviation from the left and right half regions

“光轴偏转导致左右半区投影偏移量不等”的预测完全一致。

轴对称温度场的重建仅需半侧偏折角数据。为此,本文选取因光轴偏转导致投影偏差最为显著的半侧数据,分别采用传统算法与本文几何校正算法计算光偏折角;继而重建温度场。重建的

表 1 传统算法与理论值的偏折角极值点误差

Tab. 1 Deviation angle extreme point error between the traditional algorithm and the theoretical value

$\gamma/(^{\circ})$	$\theta_{L-half}^{Err}/rad$	$\theta_{R-half}^{Err}/rad$
+6	$0.091\,74\times10^{-4}$	$0.003\,83\times10^{-4}$
-6	$-0.003\,83\times10^{-4}$	$-0.091\,74\times10^{-4}$

温度场结果如图 6(a)~6(c)所示,不同角度下几何校正前后的误差对比则列于表 2。

数据表明,在无偏转的 0°工况下,传统算法与本文校正算法均表现出良好的精度,最高温度误差分别为 0.44% 与 0.38%,显示两者在理想光轴条件下性能相当。随着光轴偏转角度增大至 4°与 6°,传统算法的误差显著升至 3.80% 与 6.89%,反映出其系统偏差随偏转加剧而恶化。相比之下,校正算法在不同偏转条件下均保持稳定,在 4°与 6°时分别为 0.39% 与 0.44%。结果表明,本文所提方法在无偏转工况下保持了与传统方法相当的精度,同时在相机存在光轴偏转时显著改善了重建结果的准确性,有效抑制了光学中心偏移而导致的系统误差。

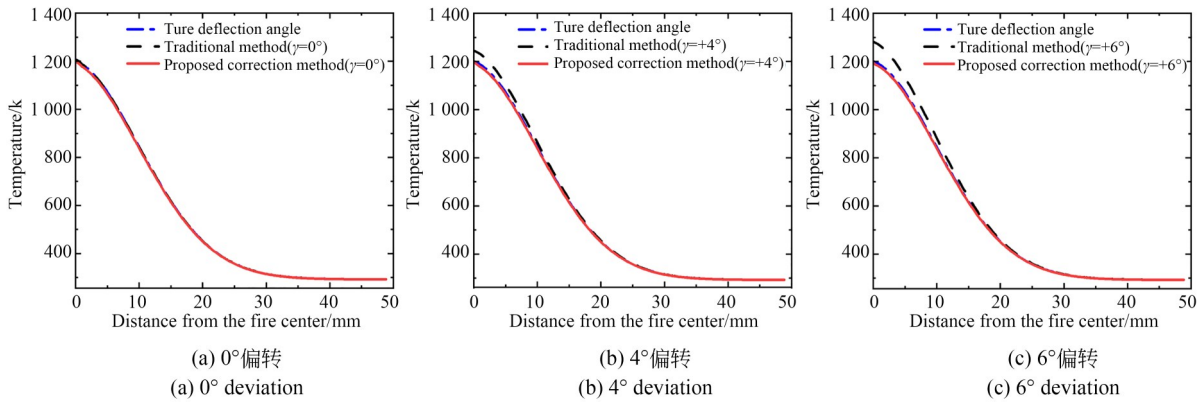


图 6 不同偏转角度仿真温度
Fig. 6 Simulation temperatures at different deflection angles

表 2 校正前后的温度重建误差对比

Tab. 2 Comparison of temperature reconstruction error before and after correction

$\gamma/(^{\circ})$	T_{trad}^{max}/K	$e_{T-trad}^{max}/\%$	T_{corr}^{max}/K	$e_{T-corr}^{max}/\%$
0	1 205.31	0.44	1 195.49	0.38
+4	1 245.60	3.80	1 195.35	0.39
+6	1 282.73	6.89	1 194.72	0.44

3.3 实验系统构建与标定

本研究基于自主搭建的 BOS 测量系统开展实验验证。如图 7 所示,系统主要包括以下部分:采用 SW60 微型涡喷发动机作为轴对称高温流场源,其额定排气温度为 1 043 K;成像系统由一台高速相机与精密光学滑台构成,用于实现确定光轴位置和可控视角偏转;背景板为随机生成的

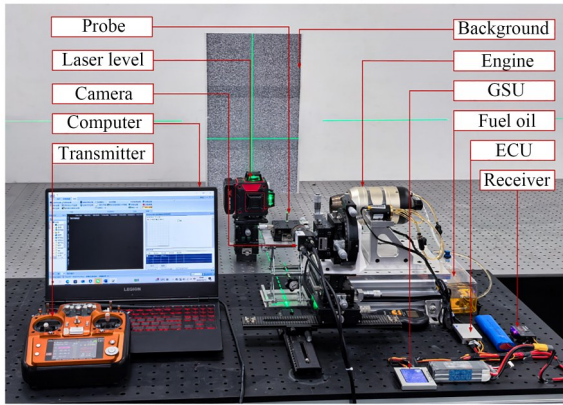


图7 实验设备布置图

Fig. 7 Layout of experimental equipment

点阵;高精度激光水准仪用于辅助实验系统的初始对准。系统几何布局如下:相机与背景板间距为1 300 mm,火焰中心距相机400 mm,测量区域位于发动机尾喷口后方1倍直径(1D)处的流场过渡区^[27]。该位置的选取旨在平衡温度场强度与时均稳定性:相较于更靠近喷口的区域,1D位置流场湍流度适当降低,有利于BOS测量;同时相较于下游区域,该位置能保持足够高的核心区温度以确保有效的折射率梯度。

实验系统的布置与标定流程如下:首先,使用高精度激光水准仪确定微型涡喷发动机的几何轴线作为系统基线,并在尾喷口1D处定位测量截面,利用探针进行标记。随后,借助激光水准仪与相机光学定位装置,将相机光轴精确对准该标记点^[28],同时调整相机镜头光心在R轴旋转滑台转轴上方,并调整背景散斑板使其平面与相机光轴垂直。为消除镜头畸变对位移测量的影响,在散斑板平面放置棋盘格标定板,通过多角度拍摄获取系列标定图像。基于张正友标定法,利用相机标定工具箱对相机进行标定,获得内参矩阵及径向、切向畸变系数。标定结果显示,平均重投影误差小于0.1 px,表明标定精度良好,保障图像像素位移的几何真实性,确保背景纹影测量的精度。

3.4 轴对称温度场BOS的实验重构

实验在系统标定完成后于常温常压环境下进行。环境温度为20℃,大气压为100 288 Pa,光波波长为0.54 μm。基于Gladstone-Dale关系计算得到环境折射率约为1.000 273。发动机采用滑油与煤油按1:20配比的混合燃油。将发动

机调整至50 000 RPM稳定运行,随后通过R轴旋转滑台控制相机光轴偏转,依次在0°,4°,6°与-6°四种角度下同步采集背景纹影图像。基于对静态非流场区域位移场的统计分析,本系统获得的位移测量精度为0.016 px。依据3σ准则^[29]确定系统的可靠最小可分辨位移为0.048 px,根据CMOS像元尺寸 $\delta x = 1.4 \mu\text{m}$ 计算实际像素位移 ΔX 。通过图像放大率公式(16)和近光轴假设偏转角^[30]计算得到最小可探测偏折角 $\theta_{\min} = 3.33 \times 10^{-6} \text{ rad}$ 。其中 m 为图像放大率, $\theta_{\min} = \Delta X/mL$ 。基于公式(9)推算出系统所能探测的最小折射率变化 $\Delta n_{\min} = 3.33 \times 10^{-6}$ 。

$$m = \frac{f}{M + L - f} \quad (16)$$

结合公式(2)与(13),由折射率变化灵敏度推导温度分辨率:

$$\Delta T = T_0 \cdot \frac{\Delta(n-1)}{n_0-1} \quad (17)$$

最终获得温度分辨率为3.58 K,该结果表明本文构建的光学测量系统在实际工况下具备开尔文量级的可靠温度检测能力。

在喷口后方1D轴对称截面处,分别采用传统方法与本文提出的相机光轴偏转角校正方法,对四种偏转角度下的半侧流场数据进行了温度场重构。图8展示了各工况下的重建结果对比:

图8(a)对比了四种工况下的温度场重建结果:0°基准工况下的传统方法与校正方法曲线基本重合,平均偏差为-1.78 K;±6°偏转工况下校正方法所得两条曲线呈现高度一致性。该结果验证了校正方法在无偏转条件下与传统方法精度相当,且对偏转方向具有不敏感性。图8(d)进一步展示了校正方法在0°工况与传统方法的温度场差异,以及在±6°工况下的温度场差异,后者平均差异仅为0.26 K,体现了该方法在对称偏转条件下的稳定性。图8(b)与8(c)分别展示了4°与6°偏转工况下的重建结果:传统方法与0°基准存在显著偏离,而校正方法在空间分布与数值幅值上均更接近基准状态。对应的偏差分布图8(e)与8(f)显示,在4°工况下,校正方法将温度场的平均偏差从传统方法的5.92 K降低至0.84 K;在6°工况下,平均偏差则由18.26 K显著降低至-0.94 K,降幅达一个数量级。

综合结果表明,本文所提校正方法在不同偏

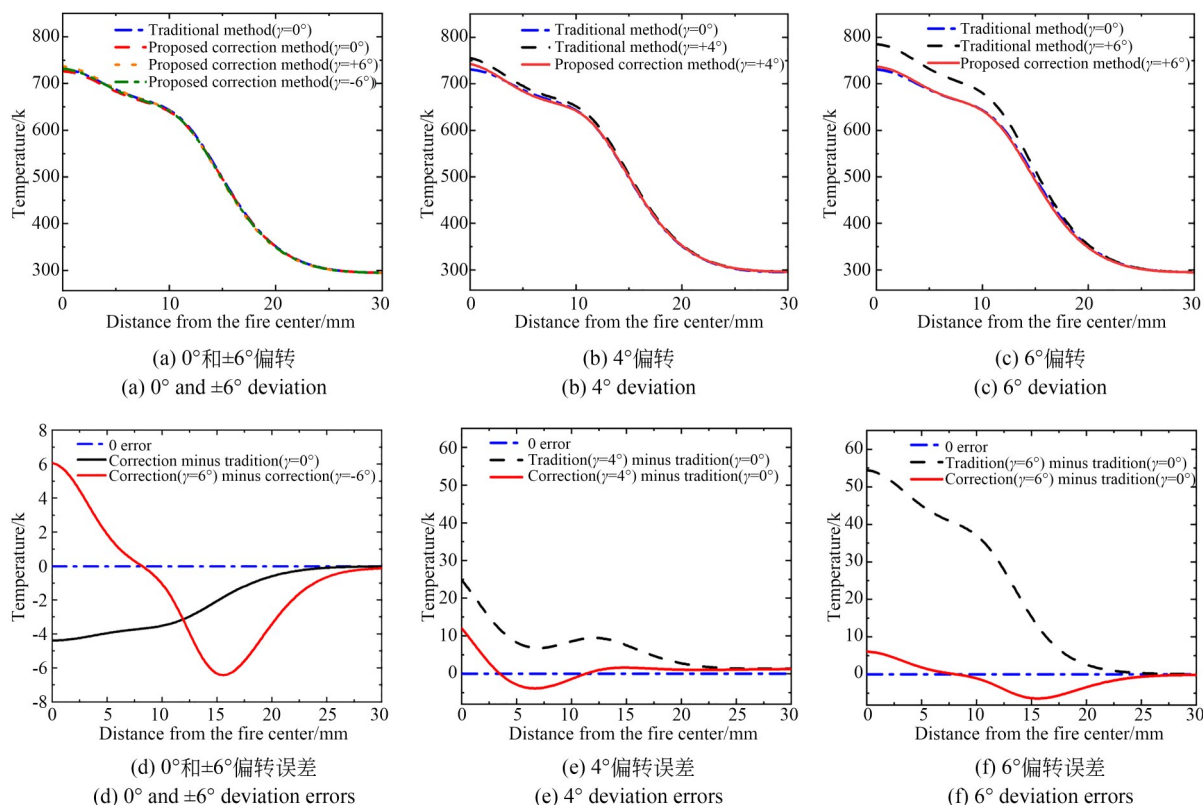


图 8 不同偏转角度实验温度和误差

Fig. 8 Experimental temperature and error at different deflection angles

转条件下均能有效抑制重建偏差,显著提升轴对称温度场的测量准确性与鲁棒性。相较于双目校正系统,单相机架构具有系统简洁、环境适应性强的优势。该系统经一次性标定后,即可基于通过图像相关算法获取特征点的亚像素位移场,并结合本文光学中心校正模型,在线解算光轴偏转角和重构温度场。该方法避免了多相机系统的复杂同步与频繁标定,在高温、振动等严苛环境下更具工程实用性。需要说明的是,受限于实际实验环境中存在的流场脉动、光学扰动及图像噪声等因素,校正方法重建结果与基准温度场之间仍存在一定偏差,其精度虽未完全达到理想仿真条件,但相较于传统方法已实现显著提升,验证了所提校正算法在实际复杂条件下的有效性与工程适用性。

4 结 论

本文通过建立存在光轴偏转的相机几何光学模型,系统研究了背景纹影法中相机光轴偏转

对轴对称温度场重建精度的影响机理及校正方法。研究结果表明:

背景纹影法中因光轴偏转而导致传感器左右半区投影偏移量不等的非对称误差是造成重失真的主要原因。针对该问题,提出了基于几何光学校正的光轴偏转角校正法,通过构建实际投影几何与理想传感器坐标的映射关系,有效修正了偏折角的系统性计算偏差。理论分析、数值仿真与实验验证均表明,该方法在 6° 光轴偏转范围内均能有效校正系统误差,平均偏差从传统方法的 18.26 K 降低至 -0.94 K ,精度提升约一个数量级,显著提升了实际复杂装调环境下BOS测量的可靠性、鲁棒性与工程适用性。当前实验数据表明该方法在典型偏差范围内具有显著校正效果,若未来遇到特殊大偏角场景,该方法仍具备通过相同原理进行校正的理论可行性。

尽管实验中存在流场固有脉动、环境扰动以及超声速气流对折射率和相机散斑成像质量的不利影响等不可控因素,但本文所构建的校正框架为校正装调偏差提供了有效的理论依据与技

术途径。后续研究可着眼于将该方法拓展至更普遍的非对称与三维流场重构中,进一步拓宽其在发动机诊断及其他热流测量领域的工程应用范围。

参考文献:

- [1] 梁艳媛,李琼云,刘青铜,等. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷基复合材料制备工艺及应用[J]. 航空制造技术, 2025, 68(19): 51-67.
LIANG Y Y, LI Q Y, LIU Q T, *et al.* Preparation technology and applications of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ceramic matrix composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2025, 68(19): 51-67. (in Chinese)
- [2] 时军伟. 基于纹影法的等离子体冲击特性测试技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.
SHI J W. *Research on Schlieren-Based Diagnostic Techniques for Plasma Shock Characteristics* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025. (in Chinese)
- [3] 黄志坚. 基于无网格方法的强制水跃研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2023.
HUANG Z J. *Study of Forced Hydraulic Jump Based on A Mesh-Free Method*[D]. Ningbo: Ningbo University, 2023. (in Chinese)
- [4] 雒晓宇,刘丕亮,崔桂梅,等. 超声波测量高炉炉喉温度仿真研究[J]. 电子器件, 2024, 47(6): 1711-1719.
LUO X Y, LIU P L, CUI G M, *et al.* Simulation study on ultrasonic measurement of blast furnace throat temperature[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2024, 47(6): 1711-1719. (in Chinese)
- [5] 杨隆杰. 高速高精度比色测温技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院西安光学精密机械研究所), 2025.
YANG L J. *Research on High-Speed and High-Precision Colorimetric Temperature Measurement Technology*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2025. (in Chinese)
- [6] 郭智方,周世圆. 固体火箭发动机尾焰测温技术研究[J]. 遥测遥控, 2025, 46(3): 51-62.
GUO Z F, ZHOU S Y. Temperature measurement technology of solid rocket motor tail flame[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2025,

作者贡献声明:

秦扬:测量方法的提出,测量实验的设计及数据整理和分析,论文撰写;

吴军:论文审核与编辑。

- 46(3): 51-62. (in Chinese)
- [7] 陈明扬. 基于共振光声腔共振频率跟踪的氢气检测技术研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.
CHEN M Y. *Research on Hydrogen Detection Technology Based on Resonant Frequency Tracking of Resonant Photoacoustic Cavity* [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)
- [8] 熊渊. 背景纹影测量技术研究与应用进展[J]. 实验流体力学, 2022, 36(2): 30-48.
XIONG Y. Recent advances in background oriented Schlieren and its applications[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36(2): 30-48. (in Chinese)
- [9] 郑星,黄海莹,毛勇建,等. 大口径爆炸激波管出口冲击波流场图像测量[J]. 光学精密工程, 2024, 32(15): 2355-2362.
ZHENG X, HUANG H Y, MAO Y J, *et al.* Image measurement of shock wave flow field at outlet of large diameter explosion shock tube [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(15): 2355-2362. (in Chinese)
- [10] 李越. 超声速燃油射流诱导激波演化规律及对喷雾特性影响研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
LI Y. *Investigations on the Evolution Law of the Shock Wave Induced by Supersonic Diesel Jet and its Influence on the Spray Atomization* [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [11] 吴军,宋丰成,潘智祥,等. 采用干涉条纹纹影法的轴对称温度场测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(2): 150-159.
WU J, SONG F C, PAN Z X, *et al.* Measurement of axisymmetric temperature field by interference fringe Schlieren method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(2): 150-159. (in Chinese)
- [12] 李炜龙. 纹影仪流场密度定量测量技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2017.
LI W L. *Study on Quantitative Schlieren Techniques for Density Measurement of Flow Field*

- [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2017. (in Chinese)
- [13] 蔡雨辰, 严彦, 龙金刚, 等. 纹影技术综述[J]. 科技资讯, 2023, 21(9): 216-221.
CAI Y C, YAN Y, LONG J G, *et al.* An overview of the schlieren technology [J]. *Science & Technology Information*, 2023, 21(9): 216-221. (in Chinese)
- [14] ALVAREZ-HERRERA C, MORENO-HERNÁNDEZ D, BARRIENTOS-GARCÍA B, *et al.* Temperature measurement of air convection using a Schlieren system[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, 41(3): 233-240.
- [15] ALVAREZ-HERRERA C, MORENO-NIETO A R, MURILLO-RAMÍREZ J G. *Study of Temperature Distribution Over a Stirling Engine by Using the Schlieren Technique*[M]. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [16] 吴军, 祝玉恒, 袁少博, 等. 基于光线追迹法的非均匀温度场视觉测量畸变校正[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(1): 0108001.
WU J, ZHU Y H, YUAN S B, *et al.* Distortion correction of visual measurement in inhomogeneous temperature field based on ray tracing method [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(1): 0108001. (in Chinese)
- [17] 周昊, 吕小亮, 李清毅, 等. 应用背景纹影技术的温度场测量[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 63-67.
ZHOU H, LÜ X L, LI Q Y, *et al.* Temperature measurements using the background oriented schlieren technique [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(5): 63-67. (in Chinese)
- [18] 唐亮. 高速风洞试验密度场视频测量方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
TANG L. *Research on Videogrammetry of Density Field in High Speed Wind Tunnel Test* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [19] 潘智祥. 基于扇形光路纹影法的近场空间三维温度场重构方法研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2024.
PAN Z X. *Research on Reconstruction Method of Three-Dimensional Temperature Field in Near-Field Space Based on Fan-Shaped Optical Path Schlieren Method* [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2024. (in Chinese)
- [20] 胡炜, 李敬轩, 杨立军, 等. 不完全角度背景纹影层析测量综述[J]. 火箭推进, 2024, 50(6): 1-26.
HU W, LI J X, YANG L J, *et al.* Review of incomplete-angle background-oriented schlieren tomography [J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2024, 50(6): 1-26. (in Chinese)
- [21] 吴军, 王小宇, 唐源鸿, 等. 基于双目背景纹影法的轴对称温度场自适应重构方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 168-177.
WU J, WANG X Y, TANG Y H, *et al.* Study on the adaptive reconstruction method of axisymmetric temperature field based on binocular background oriented Schlieren method [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(10): 168-177. (in Chinese)
- [22] 高旭, 柴建忠, 王旌尧, 等. 天基高轨红外探测器对飞机低温尾焰探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2025, 54(6): 20240539.
GAO X, CHAI J Z, WANG J Y, *et al.* Performance analysis of space GEO infrared detectors on the low temperature tail flame of aircrafts [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2025, 54(6): 20240539. (in Chinese)
- [23] 孙一强, 朱檀泉, 牛青林, 等. 液体火箭发动机喷焰多波段辐射信号高度律[J]. 航空学报, 2024, 45(24): 34-50.
SUN Y Q, ZHU T X, NIU Q L, *et al.* Altitude-scaling law for multi-band radiation signals from liquidpropellant rocket engine exhaust plumes [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(24): 34-50. (in Chinese)
- [24] 李瑞鹏. 基于统计回归的二氧化碳柱浓度反演方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
LI R P. *Study on Inversion Method of Carbon Dioxide Column Concentration Based on Statistical Regression* [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024. (in Chinese)
- [25] RICHARD H, RAFFEL M. Principle and applications of the background oriented schlieren (BOS) [J]. *Measurement Science and Technology*, 2001, 12(9): 1576.
- [26] 龙连春, 张超亚. 圆板在局部 Gauss 温度场作用下的响应分析[J]. 应用数学和力学, 2016, 37(4): 391-403.
LONG L C, ZHANG C Y. Response analysis of thin circular plates in the local Gaussian temperature field [J]. *Applied Mathematics and Mechan-*

- ics, 2016, 37(4): 391-403. (in Chinese)
- [27] 李东. 航空发动机试车台流场气动特性及影响因素研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2023.
LI D. *Research on Aerodynamic Characteristics and Influencing Factors of Aero-Engine Test Bed Flow Field* [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023. (in Chinese)
- [28] 孙晓燕. 冷弯C型钢构件的随机几何缺陷模拟方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2023.
SUN X Y. *Simulation Method for Random Geometric Imperfection in Cold-Formed C-section Steel Members* [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023. (in Chinese)
- [29] 朱鹏超. 基于机器视觉的创面测量技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2025.
ZHU P C. *Research on Wound Measurement Technology Based on Machine Vision* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2025. (in Chinese)
- [30] MEIER A H, ROESGEN T. Improved background oriented schlieren imaging using laser speckle illumination[J]. *Experiments in Fluids*, 2013, 54(6): 1549.

作者简介:



秦 炆(2001—),男,云南罗平人,硕士研究生,毕业于中国民航大学获得学士学位,2024年于中国民航大学攻读硕士学位,主要研究方向为视觉检测技术。E-mail: 2024012119@cauc.edu.cn



吴 军(1986—),男,山西忻州人,博士,教授,2009年、2011年、2014年于天津大学分别获得学士、硕士、博士学位,现为中国民航大学教授,主要研究方向为激光与视觉检测技术。E-mail: wujuncauc@163.com