

激光与光电子学进展

基于激光吸收光谱技术的圆形燃烧场流场速度
二维重建

于佳琪, 李宁*, 黄孝龙, 康杨, 李灿, 范旭东, 翁春生

南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094

摘要 针对圆形截面非均匀流场的速度分布测量问题,提出了基于激光吸收光谱技术的圆形燃烧场流场速度二维重建方法。建立了激光光谱吸收率与流场速度分布的物理模型,重建了光谱吸收系数分布并对流场速度分布进行了数值模拟。结果表明,对于圆形区域速度分布重建,在信噪比为 15 dB 的重建验证中平均相对误差稳定在 3.73%,在信噪比大于 35 dB 时,重建结果的平均相对误差稳定在 1.50% 以下,且对于不同的输入模型下(双峰、环形)的速度分布重建该方法重建结果稳定,本文使用的重建方法能够较准确地反映流场速度的分布情况,可实现对极坐标下圆形区域及环形区域速度分布的重建。研究结果可为激光吸收光谱技术在发动机流场气体诊断中的应用提供技术支撑。

关键词 光谱学; 激光吸收光谱; 多普勒效应; 二维重建; 光学测量

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222452

Laser-Absorption-Spectroscopy-Based Reconstruction of Two-Dimensional
Velocity Distributions in Circular Combustion Fields

Yu Jiaqi, Li Ning*, Huang Xiaolong, Kang Yang, Li Can, Fan Xudong, Weng Chunsheng

National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China

Abstract Herein, a two-dimensional reconstruction method for circular combustion velocity fields based on tunable diode laser absorption spectroscopy is proposed to obtain the velocity distribution of a circular-cross-section nonuniform flow field. A physical model of laser spectral absorptivity and flow velocity distribution is established, and the region of interest is covered with multiple laser beams from different angular views. The spectral absorption coefficient distribution is reconstructed using an algebra reconstruction technique. The frequency shift in the absorption spectrum of water molecules is substituted to determine the velocity distribution of the flow field so that the velocity distribution in the circular and annular regions in polar coordinates can be reconstructed. For the velocity distribution reconstruction in the circular region, the average relative error is stable at 3.73% in the reconstruction verification with a signal-to-noise ratio of 15 dB. When the signal-to-noise ratio exceeds 35 dB, the average relative error of the reconstruction results is stable below 1.50%. The reconstruction results of the proposed method are thus stable for the velocity distribution reconstruction using different input models (bimodal and annular). The results reveal that the proposed reconstruction method can precisely reflect the velocity distribution of the flow field. Overall, the research results presented herein are significant for promoting the applications of laser absorption spectroscopy in the gas diagnosis of circular and annular exit engine flow fields.

Key words spectroscopy; laser absorption spectrum; Doppler effect; two-dimensional reconstruction; optical measurement

1 引言

随着高空高速航空载具的发展,航空飞行器对高性能发动机的需求日益增加。速度分布是发动机出口

流场的重要特性之一,实现流场速度分布的准确测量对于航空飞行器验证试验具有重要意义,同时高速燃气速度测试也是发动机研发和性能提升的关键^[1-3]。因此,获得发动机出口流场速度分布对推动航天发动

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2022-09-24; 录用日期: 2022-10-09; 网络首发日期: 2022-10-19

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20220952, BK20220919)、瞬态物理国家重点实验室基金项目(6142604210204, 6142604210203)

通信作者: *lining@njut.edu.cn

机的发展具有重要意义。

在过去的十几年间激光吸收光谱技术(TDLAS)作为一项非接触式测量技术广泛应用于爆轰发动机及冲压发动机的出口流场温度和组分浓度等参数的测量^[4-13]。在流场速度测试方面,相较常用的粒子图像测速技术(PIV),TDLAS 流场速度测试具有灵敏度高、响应速度快、可靠性和环境适应性强的优点^[14-16]。

传统的 TDLAS 测速应用时假设被测流场区域速度分布均匀,选取近红外波段 H₂O 吸收谱线为监测对象,基于多普勒效应通过双光路投影设计与多普勒频偏计算方法即可获得流场速度^[17-18]。然而对于具有一定速度梯度的非均匀流场,这种方法将不再适合^[19]。基于 TDLAS 的流场速度二维重建方法利用计算机层析(CT)技术通过多光路投影设计实现离散化层析重建^[20],获得流场的速度分布。

在利用 TDLAS 技术进行圆形截面流场速度二维重建时,目前主要存在的难点在于:1)非均匀流场气体浓度或温度的二维重建问题可根据吸收光谱信号在投影光路的累积效应并结合 CT 重建算法加以求解,但激光吸收光谱的多普勒频偏不存在此种累积效应,如何建立吸收光谱信号与流场速度的关系是实现速度分布二维重建的关键问题。Qu 等^[21-22]提出了一种基于吸收光谱线型变化的分析方法将多普勒频偏与光谱吸收线型建立联系,实现了二维及三维流场速度重建。2)为了获得较为精确的多普勒频偏值,速度测试多采用双光路投影的光路设计。这种设计使得流场速度二维重建的光路与流场气体浓度及温度重建的光路相比更为复杂。3)目前 TDLAS 技术应用于圆形截面流场重建时,多数学者^[23-24]采用矩形网格进行流场离散化处理,对于圆形(脉冲爆轰发动机)尤其是环形(旋转爆轰发动机)发动机出口流场中速度分布的重建,这种网格离散方法无法充分贴合圆形边界,使得重建结果出现边界模糊现象,降低了重建的准确性。Grauer 等^[25]采用了非结构网格进行圆形流场离散,这种离散方式对圆形流场有很好的适应性,但后处理较复杂。

本文基于 TDLAS 技术及激光的多普勒效应,提出一种针对圆形及环形截面流场速度的二维重建方法,采用极坐标网格对流场区域进行划分,建立吸收光谱信号与流场速度之间关系,对高速非均匀流场的速度分布进行重建,并验证重建结果准确性,分析此过程影响因素。该方法可为 TDLAS 技术应用于发动机圆形及环形出口流场速度分布重建提供理论指导,具有重要理论研究意义及工程应用前景。

2 基于 TDLAS 技术的速度二维重建方法

2.1 基于多普勒效应与 TDLAS 技术的速度测试

根据 Beer-Lambert 定律,当特定频率的一束光穿过流场时,透射光强与入射光强的关系为

$$I_t(\nu) = I_0(\nu) \exp \left\{ - \int_0^L P(l) S[T(l)] X(l) \varphi(\nu, l) dl \right\}, \quad (1)$$

式中: I_t 为穿越介质后透射激光强度; I_0 为入射激光初始强度; P 为压强; T 为温度; X 为气体介质浓度; S 为气体特征谱线吸收强度; φ 为归一化线性函数,表示气体吸收强度随频率 ν 的变化; l 为流场中激光光路的长度。在速度重建中,可将压强 P 与温度吸收强度 S 、气体介质浓度 X 统一用光谱吸收系数 a 来表示,即

$$a(l) = P(l) S[T(l)] X(l). \quad (2)$$

则光谱吸收率 A 为

$$A = \int_0^L a(l) dl, \quad (3)$$

式中: L 为该激光在流场中的总长度。根据多普勒效应,当气体在激光传播的方向上存在速度分量时,该激光的频率会受流场速度的影响,使发送激光的频率与接收到的频率之间存在一个与流场速度相关的频偏 $\Delta\nu$,即多普勒频偏,其关系式为

$$\frac{\Delta\nu}{\nu_0} = \frac{u \cos \theta}{c}, \quad (4)$$

式中: ν_0 为入射激光的中心频率; u 为气体速度; θ 为气体流向与激光传播方向夹角; c 为光速。本文采用了双光路互逆投影的光路设计来测量多普勒频偏,对比传统双光路交叉投影的光路设计,双光路互逆投影的光路设计在不改变测试原理的基础上减小了光路的复杂程度,便于后续的多光路布置。测试光路布置方式如图 1 所示,同一激光器出射的两束激光对向穿过流场且分别与流场速度方向呈夹角 θ 与 $\pi - \theta$,多普勒频偏如图 2 所示,两束激光的频率差值 $\Delta\nu$ 为

$$\Delta\nu = \frac{2\nu_0 \cos \theta}{c} u. \quad (5)$$

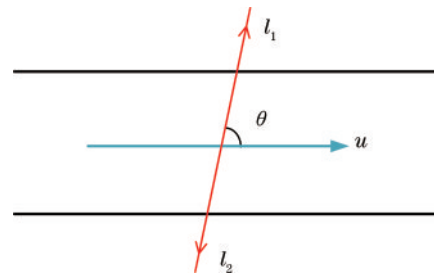


图 1 测试光路图

Fig. 1 Test optical path diagram

2.2 极坐标下的速度二维重建计算方法

对于非均匀速度流场,激光频率偏移为激光所穿过气体共同作用的结果。为了更好地表示激光频率偏移与流场速度之间的关系,本文引入了平均频偏量 $\Delta\bar{\nu}$ ^[26]的概念:激光在穿过流场区域后,平均频率偏移为速度在光路上连续变化所致的频率偏移 $\Delta\nu(l)$ 与其对应的光谱吸收系数 $a(l)$ 相乘后积分的结果,其表达式为

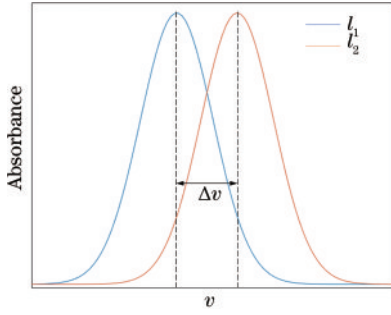


图 2 吸收光谱信号多普勒频偏示意图

Fig. 2 Doppler frequency shift diagram of absorption spectrum signal

$$\Delta \bar{\nu} \cdot A = \int_0^L a(l) \Delta \nu(l) dl. \quad (6)$$

流场区域的离散化方式如图 3 所示,被测区域圆形截面沿径向方向均分为 R 层,在周向方向上分为 N 段,划分为 $R \times N$ 极坐标网格。则积分式(3)可表示为

$$A = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} l_{rn}, \quad (7)$$

式中: a_{rn} 为第 r 层 n 列网格区域内的光谱吸收系数; l_{rn} 为光路穿过该网格区域所经历的路程。同理,积分式(6)可离散为

$$\Delta \bar{\nu} \cdot A = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} \Delta \nu_{rn} l_{rn}, \quad (8)$$

式中: $\Delta \nu_{rn}$ 为第 r 层 n 列网格区域内的激光频率偏移。采用 M 路激光覆盖测试区域,则第 m 路激光的光谱吸收率 A_m 为

$$A_m = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} l_{rnm}. \quad (9)$$

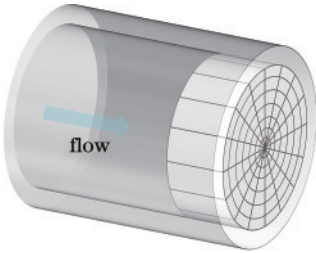


图 3 流场离散化示意图

Fig. 3 Flow field discretization

第 m 条测试激光的平均频偏量 $\Delta \bar{\nu}_m$ 为

$$\Delta \bar{\nu}_m \cdot A_m = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} \Delta \nu_{rn} l_{rnm}. \quad (10)$$

根据式(9),由 M 路激光的测试结果组成线性方程组:

$$\begin{cases} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} l_{rn1} = A_1 \\ \vdots \\ \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} l_{rnm} = A_m \\ \vdots \\ \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} l_{rnM} = A_M \end{cases} \quad (11)$$

以矩阵形式表示为

$$\mathbf{l} \mathbf{a} = \mathbf{A}. \quad (12)$$

显然式(12)所述方程不封闭,传统的方程组求解方式难以适用于这种病态方程,本文采用了代数迭代法来求解此线性方程组。每加载一路激光的光谱吸收率数值 A ,就对矩阵 \mathbf{a} 进行一次迭代,并在每次迭代中根据光滑性准则^[27]加入平滑函数对结果进行修正。当迭代结果稳定时结束迭代获得极坐标离散场中的光谱吸收系数重建矩阵 \mathbf{a} 。

根据式(10),由 M 路激光的频偏测试结果组成频偏方程组:

$$\begin{cases} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} \Delta \nu_{rn} l_{rn1} = A_1 \Delta \bar{\nu}_1 \\ \vdots \\ \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} \Delta \nu_{rn} l_{rnm} = A_m \Delta \bar{\nu}_m \\ \vdots \\ \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn} \Delta \nu_{rn} l_{rnM} = A_M \Delta \bar{\nu}_M \end{cases} \quad (13)$$

将式(11)的结果 \mathbf{a} 代入式(13)中获得线性方程组,

$$\mathbf{Q} \Delta \mathbf{v} = \mathbf{H}, \quad (14)$$

式中: $\mathbf{Q} = \mathbf{l} \mathbf{b}$, \mathbf{b} 为 rn 阶对角矩阵,其主对角线元素与列向量 \mathbf{a} 中对应行的元素相同; $\mathbf{H} = \mathbf{A} \Delta \bar{\mathbf{v}}$ 。与式(12)一致, $\Delta \mathbf{v}$ 通过代数迭代法求解,结果稳定后获得极坐标离散场的频率偏移重建矩阵 $\Delta \mathbf{v}$ 。极坐标离散场的速度分布 \mathbf{u} 可由下式计算得出

$$\mathbf{u} = \frac{c}{2\nu_0 \cos \theta} \Delta \mathbf{v}. \quad (15)$$

2.3 重建结果评定

对于光谱吸收系数重建及速度分布重建获得的结果本文以重建相对误差对重建质量进行评定。对于每个网格中的离散量,其计算公式为

$$e_{rn}^a = \frac{|a_{rn}^r - a_{rn}^o|}{|a_{rn}^o|}, \quad (16)$$

$$e_{rn}^u = \frac{|u_{rn}^r - u_{rn}^o|}{|u_{rn}^o|}, \quad (17)$$

式中: e_{rn}^a 为相应网格中光谱吸收系数离散量的相对误差; a_{rn}^o 为相应网格中的光谱吸收系数; a_{rn}^r 为网格中重建后的光谱吸收系数; e_{rn}^u 为网格中速度离散量的相对误差; u_{rn}^o 为网格中的速度; u_{rn}^r 为网格中重建后的速度。

对于重建后速度分布的整体质量本文采用平均相对误差 E_u 来评估,即

$$E_u = \frac{1}{RN} \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N e_{rn}^u. \quad (18)$$

3 结果与讨论

选择波数在 7185.6 cm^{-1} 的水分子特征吸收谱线

对该方法进行数值验证,选择温度为 1500 K, H_2O 体积分数为 5%, 压力为 0.1~0.3 MPa, 该谱线参数由查阅 HITRAN 2020 数据库^[28] 获得。测试区域截面极坐标离散方式及激光光路投影如图 4 所示, 重建区域截面为一个半径 30 mm 的圆, 以圆形重建区域中心为原点沿径向方向均分为 10 层, 在周向方向上分为 20 段, 划分为 10×20 极坐标网格。测试激光分为 4 组, 其垂直于轴线截面上的投影分别与水平呈 0° 、 45° 、 90° 、 135° , 每组 10 路平行激光均匀覆盖于测试区域, 共 40 路, 每路激光均与轴线呈 30° 。值得注意的是, 由于激光与轴线并非垂直, 实际光路存在一定的厚度, 本文在数值计算中将这一厚度中的速度视为均匀分布。

通过在光谱吸收系数场中添加随机高斯白噪声来模拟实际情况, 信噪比 (SNR) 的换算公式为

$$E_s = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N a_{rn}, \quad (19)$$

$$E_n = \sum_{r=1}^R \sum_{n=1}^N g_{rn}, \quad (20)$$

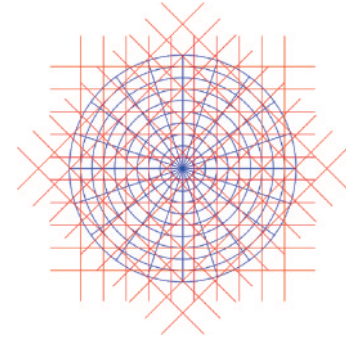


图 4 光路投影分布示意图

Fig. 4 Beams projection arrangement

$$R_{\text{SNR}} = 10 \ln \frac{E_s}{E_n}, \quad (21)$$

式中: E_s 为吸收系数场的能量总和; E_n 为白噪声能量总和; g_{rn} 为加在 a_{rn} 上的高斯白噪声幅值。在仿真测试中原始吸收系数场与原始速度场符合高斯分布。在信噪比为 15 dB 时获得的结果及误差分布如图 5 所示。

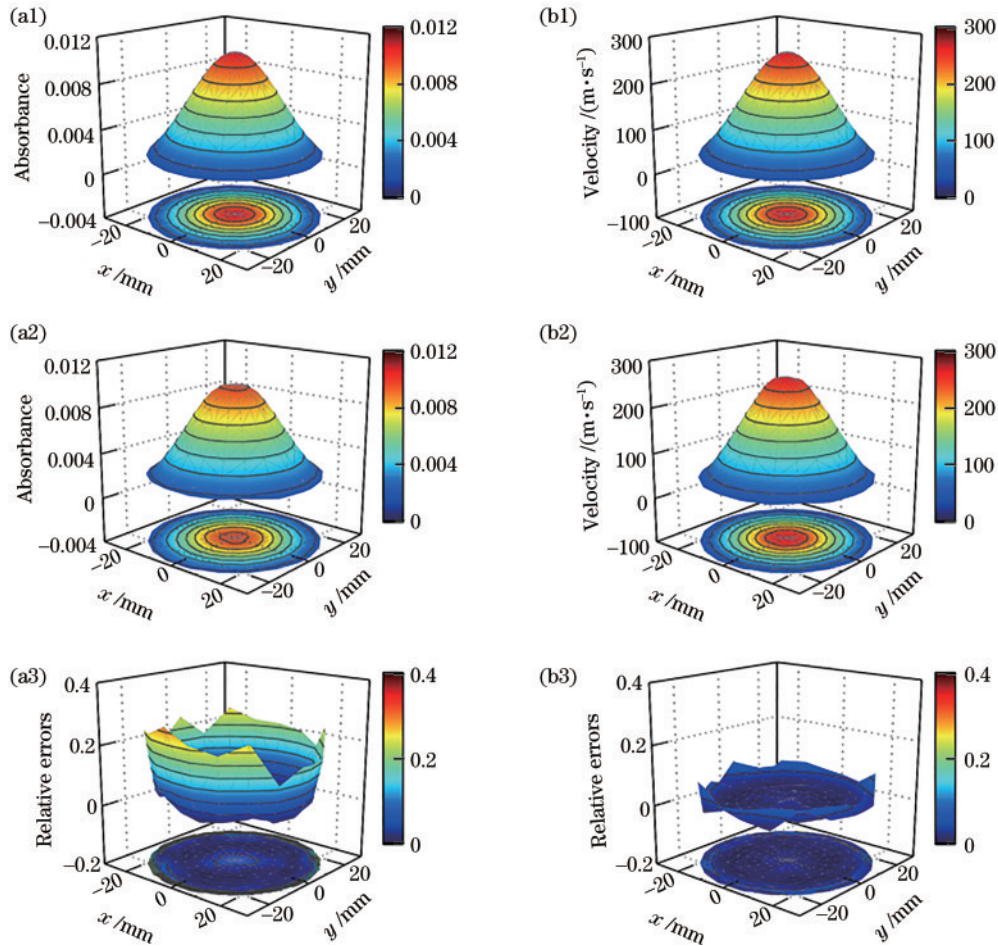


图 5 信噪比 15 dB 下的重建结果。(a1) 原光谱吸收系数场; (a2) 重建光谱吸收系数场; (a3) 光谱吸收系数场相对误差分布; (b1) 原速度场; (b2) 重建速度场; (b3) 速度场误差分布

Fig. 5 Reconstruction result under 15 dB. (a1) Original spectral absorption coefficient field; (a2) reconstructed spectral absorption coefficient field; (a3) relative error distribution of spectral absorption coefficient field; (b1) original velocity field; (b2) reconstructed velocity field; (b3) relative error distribution of velocity field

考虑到高斯白噪声的随机性且重建结果受白噪声影响,本文以相同条件下 50 次的重建平均值作为结果。如图 5 所示,当信噪比为 15 dB 时光谱吸收系数重建与速度分布重建的平均相对误差分别为 9.26% 和 3.73%,重建结果能够较准确地反映原光谱吸收系数场与速度场的分布情况。相对误差最大值出现在重建区域外缘附近,这主要是因为图像外缘的光谱吸收率及速度值较小,且对随机的噪声更加敏感。

3.1 噪声对计算结果的影响

为探究随机高斯白噪声对重建结果的影响,本文设置了 7 在不同信噪比下的对照组。当信噪比在 10 dB~40 dB 之间时速度场 50 次重建后 E_u 均值的变化如图 6 所示,其中误差条的长度代表该信噪比下 E_u 的标准偏差。结果表明测试系统具有良好的抗噪能力,速度场重建 E_u 的均值和标准偏差都随着信噪比的增大而下降,当信噪比超过 35 dB 后, E_u 值稳定在 1.50% 以下。

3.2 流场速度分布梯度对重建结果及误差分布的影响

在信噪比 15 dB 的条件下,本文通过改变流场速度模型分布探究流场速度分布梯度对重建结果的影响。

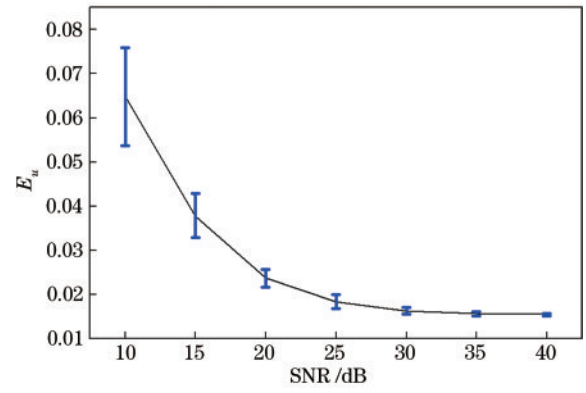


图 6 E_u 随信噪比的变化

Fig. 6 Variation of E_u with SNR

调整速度模型分布,得到的对照结果如图 7 所示。相对误差随着速度分布梯度的变缓而减小,重建区域外缘误差依然大于中心区域。

图 8 为不同速度分布梯度下重建结果的 E_u 值, x 轴代表速度模型的高斯分布标准差,标准差越大代表速度分布梯度越小。图中可见速度重建结果的 E_u 随高斯分布标准差的增大而下降,表现为:标准差从 8 增加至 12 的过程中, E_u 从 28.43% 快速下降至 6.08%;

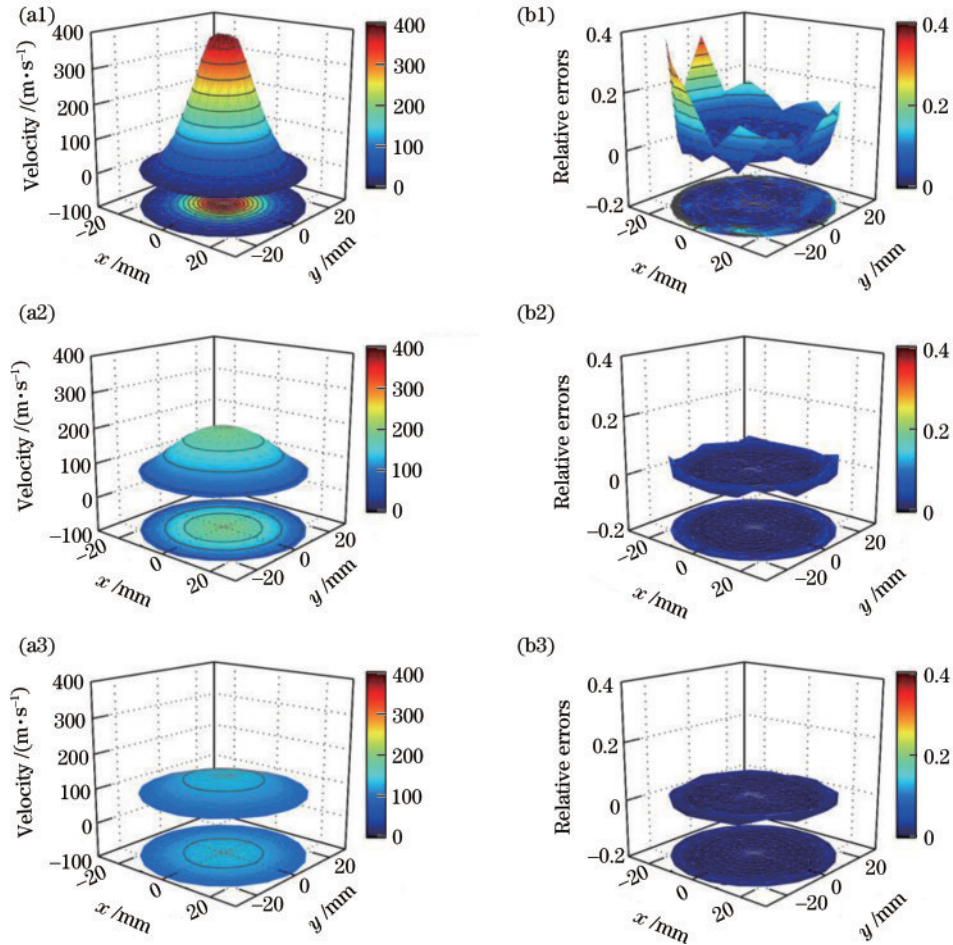
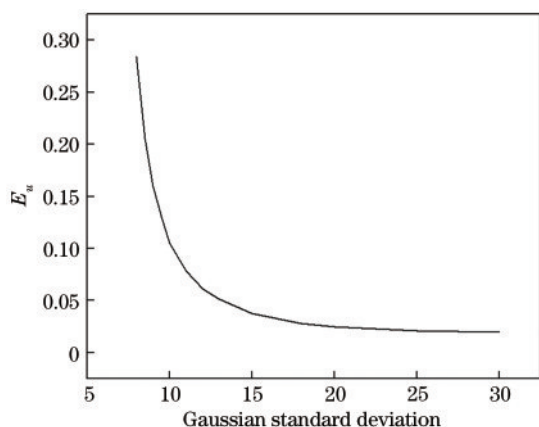


图 7 不同流场速度分布梯度下的重建结果。(a1)~(a3)重建结果;(b1)~(b3)误差分布

Fig. 7 Reconstruction results under different velocity distribution gradients. (a1)~(a3) Reconstruction results; (b1)~(b3) error distribution

图 8 E_u 随速度分布模型高斯分布标准差的变化Fig. 8 Variation of E_u with Gaussian standard deviation of velocity distribution

标准差从 12 上升至 24 的过程中, E_u 缓慢下降至 2.11%, 同时下降的趋势逐渐放缓; 当标准差增至 24

以上时, E_u 随速度分布梯度的变化不明显, 维持在 1.96%。结果表明, 流场速度分布梯度变化时, 本文重建方法依然可以提供有效的流场速度分布信息, 流场速度梯度越平缓重建越准确。

3.3 双峰条件下的重建结果分析

为探究本文重建方法的通用性, 增加分布模型的变化性, 本文增加了对双峰模型条件下的重建模拟。设置双峰场两峰中心相距为 40 mm, 在信噪比 15 dB 条件下重建结果与误差分布如图 9 所示。双峰光谱吸收系数重建与速度分布重建的平均相对误差分别为 8.18% 和 3.63%, 重建结果能够较准确地反映原光谱吸收系数场与速度场的分布情况。总体来看, 双峰场重建结果较单峰场相比重建误差有少量减少, 光谱吸收系数场重建误差下降 1.08%, 速度分布重建误差下降 0.10%。出现误差下降的原因主要有两方面: 1) 双峰场较单峰场有更大面积的小梯度区域; 2) 双峰场有更小面积的低数值区域。

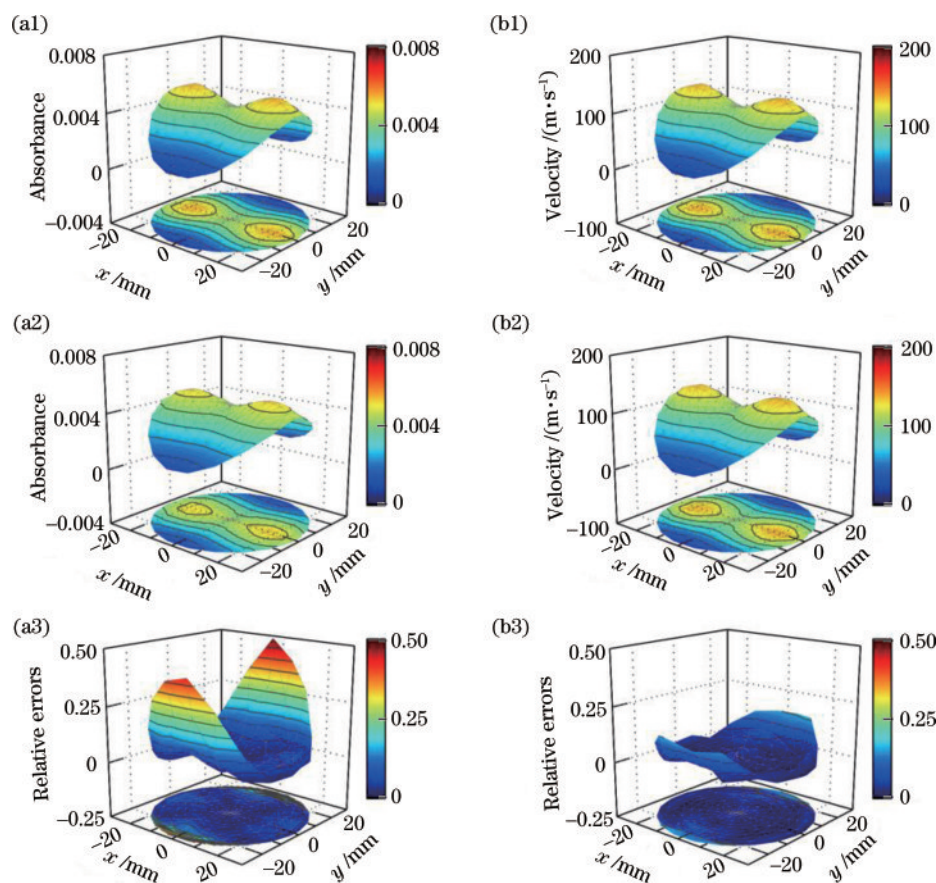


图 9 双峰场重建结果。(a1)原双峰光谱吸收系数场;(a2)重建光谱吸收系数场;(a3)双峰光谱吸收系数场误差分布;(b1)原双峰速度场;(b2)重建速度场;(b3)速度场误差分布

Fig. 9 Reconstruction results of bimodal velocity field. (a1) Original bimodal spectral absorption coefficient field; (a2) reconstructed spectral absorption coefficient field; (a3) error distribution of bimodal spectral absorption coefficient field; (b1) original bimodal velocity field; (b2) reconstructed velocity field; (b3) error distribution of velocity field

3.4 环形场二维重建及结果分析

为了探究在旋转爆轰发动机环形出口条件下本文重建方法的有效性, 选取不同分布的环形速度场进行

重建分析, 由于旋转爆轰发动机出口流场速度分布具有周向不均匀的特点, 本文通过改变环形速度场周向分布梯度探究该重建方法在环形测量条件下的重建效

果。在信噪比 15 dB 条件下获得重建结果如图 10 所示,其中环形场中央的区域没有流场且不参与重建。图 10(a1)~(a3)的速度场周向分布梯度不断增大。结果显示,重建误差随速度场周向分布梯度的增大而增

大,图中 3 种情况下重建的平均相对误差分别为 2.45%、2.69% 和 3.77%。高速区重建误差较小,平均相对误差增大主要是由于低速区域的面积随环形速度场周向分布梯度的增大而增大。

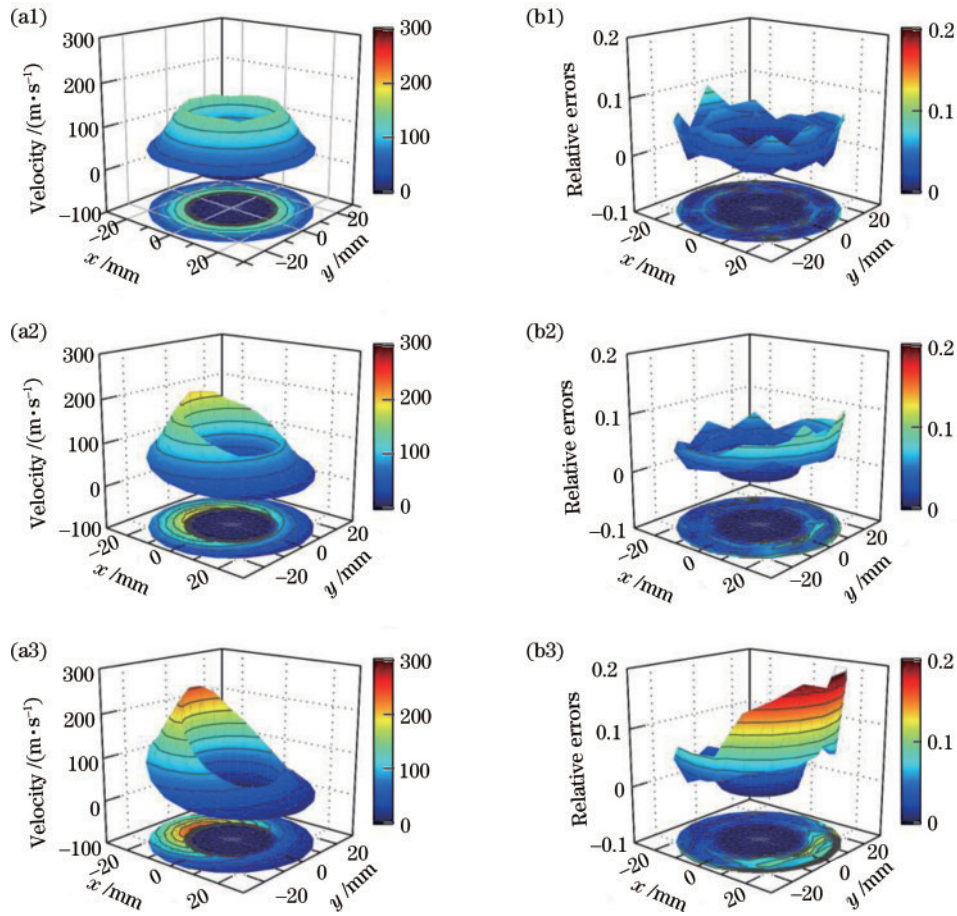


图 10 不同环形速度场的重建结果。(a1)~(a3) 重建环形速度场;(b1)~(b3)重建误差分布

Fig. 10 Reconstruction results of different annular velocity fields. (a1)~(a3) Reconstructed annular velocity field; (b1)~(b3) reconstruction error distribution

3.5 光路分布模式及数目对重建结果的影响分析

在流场速度的二维重建中光路投影数据是重建数据的来源,不同光路分布模式下获得的光路投影数据存在差异。为了探究不同光路分布对重建结果的影响,本文对圆形流场中多种光路分布模式进行了分析研究,如图 11 所示。光路的分布模式按照组数分为 3 种,分别为 3 组式、4 组式与 5 组式,每组之间相差的角

度相等,同组中每两路相邻测试激光间隔相同,且测试激光均匀分布在极坐标网格最大直径上。奇数条激光分布于径向会与网格边界线重合而产生无效的测量数据,因此本文在研究每组中激光数量时均选择偶数。值得注意的是,光路分布模式中组数的增加实际上是投影角度的增加,在同等光路数的情况下组数的增加使每组光路数减少。相对于 4 组式光路分布模式,5 组

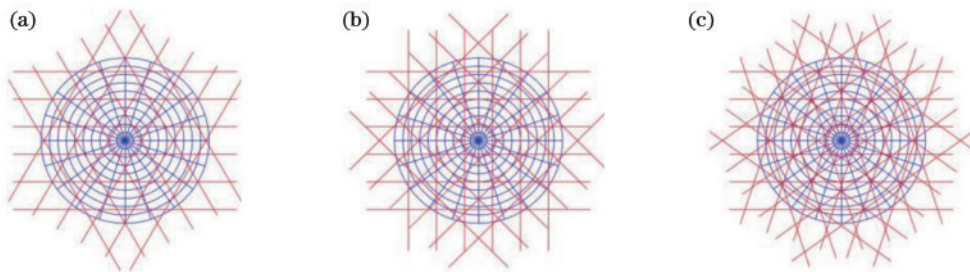


图 11 光路分布模式。(a)3 组式光路分布;(b)4 组式光路分布;(c)5 组式光路分布

Fig. 11 Beam arrangement patterns. (a) 3-group pattern; (b) 4-group pattern; (c) 5-group pattern

式模式下的重建质量没有明显提升,甚至略有下降。继续增加组数已失去研究意义,因此本文不对 5 组式以上的光路分布模式做分析。

分析不同光路分布模式对于重建结果的影响如图 12 所示,重建的 E_u 随光路数的增长而下降,在总光路数大于 40 后 E_u 的下降趋势明显放缓,3 组式与 5 组式重建的 E_u 稳定在 4.52% 附近,4 组式重建的 E_u 稳定在 3.73%。结果表明,该方法下 40 路激光的投影数据能够支撑 10×20 极坐标网格的重建运算而不产生较大的失真。

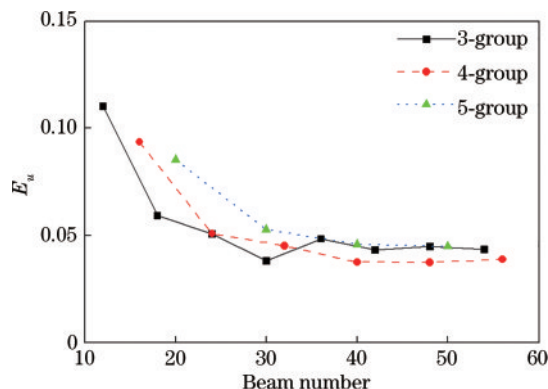


图 12 不同光路分布模式下 E_u 随激光数量的变化

Fig. 12 Variation of E_u with beam number under different beam arrangement patterns

值得注意的是,在 E_u 趋于稳定后,4 组式光路分布的重建质量优于 3 组式与 5 组式,这说明在光路数目大于 40 时,4 组式的光路分布更加合理。而当总光路数小于 40 时,重建质量受到光路数量的限制,且不同光路分布模式对重建效果的影响具有偶然性,当采用 3 组式 30 路激光的光路分布模式时,速度分布重建结果得到了 3.82% 的较小误差,且该光路分布时的 E_u 小于后续 3 组式更高光路数光路分布的重建误差。所以在可布置 40 组或以上数量光路的工况下,4 组式光路是减小光路设计导致重建误差的最佳分布模式,而当可布置光路数小于 40 时,可以选择 3 组式的光路分布模式作为替代。

4 结 论

本文基于激光吸收光谱技术提出了一种应用于圆形流场测量的流场速度分布二维重建技术,实现了对极坐标下圆形区域及环形区域速度分布的重建,通过一系列数值模拟验证了该速度分布重建方法的有效性。主要结论如下。

本文通过仿真验证重建结果准确性,并分析此过程影响因素。在信噪比为 15 dB 时,重建结果的平均相对误差 E_u 稳定在 3.73% 左右。分析了不同信噪比下的重建结果,揭示了该方法具有良好的抗噪能力。在信噪比大于 35 dB 时,重建结果的 E_u 稳定在 1.50% 以下。在不同的输入模型下(双峰、环形)该方法重建

结果稳定;在不同的速度梯度模型的重建中该方法对于平滑的速度分布有更高的重建准确度;对比分析了不同光路分布模式下的重建质量,发现当可布置光路数大于 40 时,采用 4 组依次相隔 45° 的平行激光测量可以获得更高的重建质量。结果表明,极坐标下流场速度分布重建方法在圆形或环形测试区域内能够有效地对流场速度分布进行重建。

参 考 文 献

- [1] Song A C, Zhao Q, Li J W, et al. Real-time plume velocity measurement of solid propellant rocket motors using TDLAS technique[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2021, 46(4): 636-653.
- [2] Huang X L, Li N, Weng C S, et al. *In situ* measurement on nonuniform velocity distribution in external detonation exhaust flow by analysis of spectrum features using TDLAS[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(1): 014703.
- [3] Ge J, Wang D Y, Li S P. Study on the influence of incoming flow velocity on thrust stability of underwater solid rocket motor[C]//AIAA SCITECH 2022 Forum, January 3-7, 2022, San Diego, CA, USA. Virginia: AIAA Press, 2022: 1482.
- [4] Cheong K P, Ma L H, Duan K, et al. A numerical study of multiline-multiband tomographic absorption spectroscopy for axisymmetric flames[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11780: 117801J.
- [5] Si J J, Li G L, Cheng Y B, et al. Hierarchical temperature imaging using pseudo-inversed convolutional neural network aided TDLAS tomography[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 4506711.
- [6] Bendana F A, Sanders I C, Stacy N G, et al. Localized characteristic velocity (c) for rocket combustion analysis based on gas temperature and composition via laser absorption spectroscopy[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(12): 125203.
- [7] Deng B T, Sima C T, Xiao Y F, et al. Modified laser scanning technique in wavelength modulation spectroscopy for advanced TDLAS gas sensing[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 151: 106906.
- [8] Dai J H, Yu T, Xu L J, et al. On the regularization for nonlinear tomographic absorption spectroscopy[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2018, 206: 233-241.
- [9] Ye W L, Liu W H, Xia Z K, et al. Study of multi-parameter in TDLAS detection system based on LabVIEW[C]//2021 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), November 21-25, 2021, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2021: 1170-1175.
- [10] Thurmond K, Dunn I, Ahmed K A, et al. Measurements of H_2O , CO_2 , CO , and static temperature inside rotating detonation engines[C]//AIAA Scitech 2019 Forum, January 7-11, 2019, San Diego, California. Virginia: AIAA Press, 2019: 0747.

- [11] Zhai Y C, Wang F, Chi Y, et al. Optical absorption tomography for temperature and H_2O concentration imaging by a compact photoelectric detecting system combined with twice adaptive algebraic algorithm[J]. Optical Engineering, 2022, 61(3): 034103.
- [12] 王兴平, 彭冬, 李佳胜, 等. 基于波长调制吸收光谱的燃烧流场二维重建[J]. 中国激光, 2021, 48(7): 0711002.
Wang X P, Peng D, Li J S, et al. Two-dimensional reconstruction of combustion flow field using wavelength-modulated absorption spectra[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(7): 0711002.
- [13] 李明星, 许振宇, 阚瑞峰, 等. 用于涡动相关法的激光气体分析仪的研制[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1111001.
Li M X, Xu Z Y, Kan R F, et al. Development of laser gas analyzer for eddy correlation method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1111001.
- [14] Fu B, Zhang C H, Lyu W H, et al. Recent progress on laser absorption spectroscopy for determination of gaseous chemical species[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2022, 57(2): 112-152.
- [15] Ma L H, Ning H B, Wu J J, et al. *In situ* flame temperature measurements using a mid-infrared two-line H_2O laser-absorption thermometry[J]. Combustion Science and Technology, 2018, 190(3): 393-408.
- [16] 孙利群, 邹明丽, 王旋. 可调谐半导体激光吸收光谱法在呼吸诊断中的应用[J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1511001.
Sun L Q, Zou M L, Wang X. Application of tunable diode laser absorption spectroscopy in breath diagnosis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1511001.
- [17] Rao W, Xin M Y, Song J L, et al. Resolution analysis of tunable diode laser absorption spectroscopy system for velocity measurement of the scramjet combustion flow[J]. Optical Engineering, 2019, 58(11): 114101.
- [18] Huang X L, Li N, Weng C S, et al. Analysis of nozzle effect on pulsed detonation engine performance based on laser absorption spectroscopy with Doppler frequency shift[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 10155: 101552W.
- [19] Huang A, Cao Z, Wang C R, et al. An FPGA-based on-chip neural network for TDLAS tomography in dynamic flames[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 4506911.
- [20] Jing W Y, Cao Z, Zhang H Y, et al. A reconfigurable parallel data acquisition system for tunable diode laser absorption spectroscopy tomography[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(24): 8215-8223.
- [21] Qu Q W, Cao Z, Xu L J, et al. Reconstruction of two-dimensional velocity distribution in scramjet by laser absorption spectroscopy tomography[J]. Applied Optics, 2019, 58(1): 205-212.
- [22] Qu Q W, Gao S, Chang L Y, et al. Three-dimensional laser absorption spectroscopy velocimetry for high-speed flow diagnosis[J]. Applied Physics B, 2019, 125(7): 129.
- [23] Zhai Y C, Wang F. Studies on gas concentration reconstruction methods for simultaneous temperature and H_2O concentration tomographic imaging in a flame based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Optical Engineering, 2021, 60(2): 024104.
- [24] Wang Z Z, Deguchi Y, Kamimoto T, et al. Pulverized coal combustion application of laser-based temperature sensing system using computed tomography-Tunable diode laser absorption spectroscopy (CT-TDLAS) [J]. Fuel, 2020, 268: 117370.
- [25] Grauer S J, Steinberg A M. Linear absorption tomography with velocimetry (LATV) for multiparameter measurements in high-speed flows[J]. Optics Express, 2020, 28(22): 32676-32692.
- [26] 王传位, 李宁, 黄孝龙, 等. 基于多角度投影激光吸收光谱技术的两段式速度分布流场测试方法[J]. 物理学报, 2019, 68(24): 247801.
Wang C W, Li N, Huang X L, et al. Two-stage velocity distribution measurement from multiple projections by tunable diode laser absorption spectrum[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(24): 247801.
- [27] 吕晓静. 基于激光吸收光谱技术的脉冲爆轰发动机流场测试研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
Lü X J. Research on the diagnosis of pulse detonation engine flow field based on laser absorption spectroscopy technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [28] Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2022, 277: 107949.