

文章编号: 1002-1582(2025)05-0513-08

基于平面激光散射的人体边界层及口呼吸可视化研究

蒋玉蓉^{1*}, 苏宝城¹, 陈和¹, 陈思颖¹, 郭磐¹, 胡芮¹,
田堃泰¹, 李鑫², 吴慧云², 黄书海², 孙振海^{2**}

(1. 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2. 军事科学院 军事医学研究院, 北京 100850)

摘 要: 人体边界层及口呼吸的动态可视化在呼吸道疾病传播研究和个体防护策略优化等领域具有重要意义。为此, 提出一种基于平面激光散射 (PLS) 的可视化方法, 用于研究人体口呼吸与边界层热羽流的相互作用。方法通过扇形片状激光照射人体模型, 利用气溶胶示踪粒子显示气流, 并使用高灵敏度 sCMOS 相机捕获粒子散射信号。采用背景扣除、激光强度校正等图像处理算法和三维重建方法, 实现了人体边界层热羽流及口呼吸气流的二、三维动态可视化。实验结果表明, 方法能够清晰地呈现人体表面边界层热羽流的上升过程, 揭示口呼吸气流对热羽流的干扰作用, 并重建口呼吸气流的三维空间分布及其与边界层的相互作用。方法为研究人体呼吸过程与环境气流的相互影响, 以及深入理解呼吸道疾病传播机制提供了一种新的技术手段。

关 键 词: 激光技术; 平面激光散射; 人体边界层; 气溶胶示踪粒子; 口呼吸; 图像处理; 三维建模

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标识码: A

Visualization of human boundary layer and mouth breathing based on planar laser scattering

JIANG Yurong^{1*}, SU Baocheng¹, CHEN He¹, CHEN Siying¹, GUO Pan¹, HU Rui¹,
TIAN Kuntai¹, LI Xin², WU Huiyun², HUANG Shuhai², SUN Zhenhai^{2**}

(1. Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Academy of Military Medical Sciences, Military Medical Research Institute, Beijing 100850, China)

Abstract: Dynamic visualization of the human boundary layer and oral breathing is of significant importance in respiratory disease transmission research and optimization of individual protection strategies. To this end, a visualization method based on Planar Laser Scattering (PLS) is proposed to investigate the interaction between human oral breathing and the boundary layer thermal plume. In this method, a human model is illuminated with a fan-shaped laser sheet, aerosol tracer particles are used to visualize the airflow, and a high-sensitivity sCMOS camera captures the particle scattering signals. By employing image processing algorithms such as background subtraction and laser intensity correction, along with a three-dimensional reconstruction method, two- and three-dimensional dynamic visualization of the human boundary layer thermal plume and oral breathing airflow is achieved. Experimental results demonstrate that this method can clearly visualize the rising process of the human surface boundary layer thermal plume, reveal the interference of oral breathing airflow with the thermal plume, and reconstruct the three-dimensional spatial distribution of the oral breathing airflow and its interaction with the boundary layer. This method provides a novel technical approach for studying the interaction between human respiratory processes and environmental airflow, as well as for a deeper understanding of the mechanisms of respiratory disease transmission.

收稿日期: 2025-03-26; 收到修改稿日期: 2025-06-13

作者简介: 蒋玉蓉 (1973—), 女, 副教授, 博士, 从事光电探测方向研究。

孙振海 (1971—), 男, 研究员, 博士, 从事大气环境, 生物安全领域方向研究。

* 通讯作者: yrkitty@bit.edu.cn; sunzhenh@sohu.com

Keywords: laser techniques; planar laser scattering; human boundary layer; aerosol tracer particles; mouth breathing; image processing; three-dimensional modeling

0 引 言

人体边界层是人体与环境进行物质和能量交换的重要界面,其结构和特性对呼吸道疾病传播、医疗诊断及人体舒适度评估影响显^[1,2]。口呼吸产生的高速呼出气流会重塑人体边界层热羽流结构,形成独特流场耦合效应^[3-5],进而改变呼吸区气溶胶分布,影响颗粒沉积效率及热湿传递^[6,7]。但传统单点测量技术难以捕捉其时空演变规律^[8]。而可视化研究作为能提供时空连续流场信息的技术手段,可突破传统方法局限,为相关研究提供关键数据支撑^[9]。因此对人体边界层及口呼吸的可视化研究具有重要科学价值。

目前,国内外学者在该领域虽有进展,但现有方法存在局限。早期纹影法^[10]虽能显示流场密度梯度,但依赖精密凹面镜校准,实验条件要求高,难以推广,如徐春文^[11]等的研究受限于凹面镜尺寸和分辨率,无法观测呼气气流最大传播距离。近年来,粒子图像测速技术(Particle Image Velocimetry, PIV)逐渐应用于相关研究^[12,13],但PIV能够提供的时空分辨率有限,且难以得到三维流动特征,设备复杂的同时成本较高。韩梦涛^[14]等的研究就因二维测量局限无法获得完整三维速度场。计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟^[15,16]模拟虽能提供全面流场信息,但计算结果准确性高度依赖湍流模型选择和边界条件设定。魏巍^[17]等通过CFD模拟进行比较不同头部和颈部位置对上呼吸道气流行为的影响,但边界条件的设置存在误差,需要更多临床数据和统计分析。因此,开发能克服现有方法局限性、实现高精度、高分辨率的可视化方法是当前研究的重要挑战。

针对上述挑战,本文引入平面激光散射(PLS)技术。该技术具有非侵入性、高时空分辨率、高性价比等优势^[18,19],光学系统较纹影法更简洁,无需复杂背景纹理和精密调整;硬件成本比PIV技术更低,时空分辨率更高;还避免了CFD模拟中繁琐的网格划分和计算过程,能快速高效实现流场可视化。更重要的是,其具备独特三维重建能力,通过平面激光扫描和图像处理^[20],可获取人体边界层及口呼吸作用的三维空间分布信息,为相关研究提供进一步数据支撑。

因此本研究基于平面激光散射方法,搭建了人体边界层及口呼吸可视化试验装置。该装置通过电

控滑动平台驱动片状激光对目标区域进行动态扫描,结合高灵敏度科学互补金属氧化物半导体(Scientific Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, sCMOS)相机同步采集示踪粒子散射信号,实现了人体边界层热羽流及口呼吸气流的时空连续成像。实验结果表明,PLS技术不仅能够通过图像处理算法揭示两者的动态耦合机制,还能通过三维重建方法得到人体边界层及口呼吸影响下气流的三维分布形态。

1 试验装置与试验

1.1 结构与设备模块

基于平面激光散射(PLS)的人体边界层及口呼吸过程可视化试验装置如图1所示,主要由平面激光探测、人体模拟和环境控制几个模块构成,用于实现人体边界层及口呼吸可视化的研究。

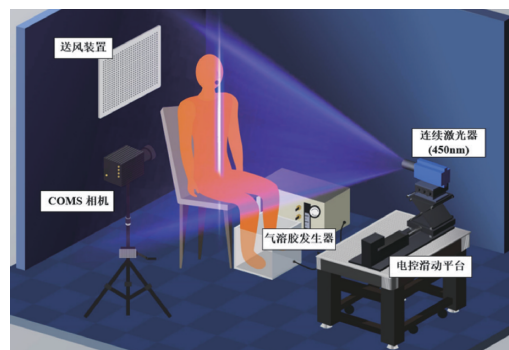


图1 系统示意图

为覆盖人体边界层及口呼吸区域,采用扇形片状激光激发气溶胶示踪粒子。使用出射功率200mW、波长为450nm的连续激光器,通过鲍威尔棱镜整形,生成顶角70°、厚度2mm的稳定扇形片状激光。针对瞬时性较强且变化快速的气溶胶流场信号,使用高分辨率、高动态范围及高灵敏度的sCMOS相机,配合高精度非球面透镜的16mm定焦镜头,对人体边界层及口呼吸区域气溶胶流场进行成像。其中,镜头光圈范围为 $f/2.0 \sim f/16$,相机视场角45°,曝光时间范围10ms~10s,可选图像位深8/12/16bit,可选图像分辨率512×512,1024×1024,2048×2048像素。电控滑动平台用于精确调整激光器的位置,移动范围宽度为10cm,速率为40cm/s,实现对观测区域10cm内的扫描,放置在光学平台上。自主开发的基于Labview的上位机软件用于控制相机和采集数据。图像处理流水线基于Python语言构建,并利用OpenCV等库实现图像处理算法。ParaView软件用于三维可视

化展示。

本研究采用定制的男性坐姿呼吸暖体假人作为人体呼吸装置。该假人具有 16 个独立温控区域，能够精确控制表面温度至 33.5℃以模拟人体生理温度分布。呼吸为口呼吸模式，流量设为 23L/min，其模拟采用正弦波模式，周期为 3.8s，以逼近人体正常呼吸周期。采用六孔气溶胶发生器在坐姿暖体假人脚部附近生成平均粒径约 1μm 的多分散橄榄油颗粒作为示踪粒子，用于示踪人体对流边界层及口呼吸气流。氮气作为驱动气体，通过调节气压和发生器档位控制气溶胶粒子的释放速率。

为精确控制实验环境温度，维持暖体假人与环境间的温差，本研究安置了空调送风装置在假人背部后方。其控制室温为 20℃左右，旨在模拟真实呼吸场景下的热湿交换过程，为人体边界层及口呼吸的研究提供标准化实验条件。

系统设备及实验参数见表 1。

表 1 系统设备及实验参数

设备名称	参数	值
新产业激光器 MDL-Ⅲ-450	激光波长/nm	450
	激光能量/mW	200
sCMOS 相机 HAMAMATSU ORCA-Flash4.0 V3	视场角/(°)	45
	曝光时间/s	0.01~10
	数字输出/bit	8/12/16
	图像分辨率	512×512
		1024×1024
		2048×2048
	暗电流/(electrons/pixel/s)	0.06
	读出噪声/(electrons rms @ 100 fps)	1.6
镜头 KOWA LM16XC	焦距/mm	16
	光圈数 <i>F</i>	2.0~22
电控滑动平台	移动范围/cm	10
	移动速率/(cm·s ⁻¹)	40
其它实验参数	人体呼吸周期/s	3.8
	人体表面温度/℃	33.5
	室内温度/℃	20

1.2 实验设计

实验在暗室环境中进行。首先，开启暖体假人的温控系统和空调系统，使其表面与室内环境之间形成稳定的温差，形成人体边界层。随后，启动相机和激光器，调节参数。为了保证相机获取足够的气溶胶散射能量强度，同时兼顾图像序列的连续性，本研究将相机曝光时间设置为 25ms，帧率设定为 40fps，镜头光圈调为最大 *f*/2.0。此外，为了获得更高的动态范围和足够的图像细节，相机位深设置为 16bit，图像分辨率设置为 1024×1024 像素。当重点研究对象仅为人体边界层影响

下的热羽流时，拍摄范围为 120cm×120cm 确保对图像中研究对象的观察的全面性；当重点研究对象为人体边界层及口呼吸共同作用下的气流时，拍摄范围缩减为 60cm×60cm 确保图像中研究对象的空间分辨率。待各设备运行稳定后，启动气溶胶发生器释放示踪粒子。开启假人口呼吸装置，相机记录示踪粒子在受人体边界层及口呼吸相互作用下的周期性分布，电控滑动平台以 40cm/s 的速率载动激光器对人体呼吸区域 10cm 的宽度范围进行快速周期性扫描，单程扫描时间为 0.25s，对相机记录各扫描时刻激光面上粒子散射信号图像，用于后续插值和重建处理，以获得该区域示踪粒子的三维图像。最后得到的单张三维图像能够揭示对应 0.25s 粒子的平均分布情况，对应时间分辨率 0.25s。上述实验过程所得的这些原始图像数据包含了丰富的流场信息，但直接用于分析存在诸多挑战。首先，图像中存在背景噪声和激光强度不均等问题，需要进行图像处理以提高信噪比。其次，这些图像是二维的，需要通过三维重建处理才能获得气流的三维空间结构。因此，下一章将详细介绍图像处理和三维重建方法的具体过程，为后续的流场分析提供可靠的数据基础。

2 可视化处理过程

2.1 二维图像处理过程

通过一系列图像处理，优化图像视觉效果，清晰展示气溶胶粒子的运动状态。图像处理流程如图 2 所示。

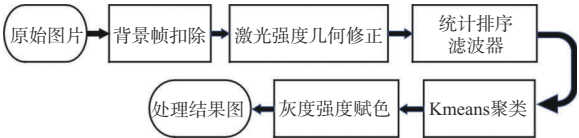


图 2 图像处理流程图

原始图像包含了气溶胶粒子散射信号，但是还存在激光杂散光等背景干扰信号需要剔除处理。因此，先使用相机采集气溶胶发生器未喷发示踪粒子情况下的背景图像，接着再进行实验，相机捕获实验过程中示踪粒子的运动图像，最后再用该图像减去背景图像实现背景帧扣除^[21]，剔除与示踪粒子散射信号无关的干扰信号。

其中激光强度几何修正方法可以消除激光面上激光强度不均匀带来的影响。激光光束经过鲍威尔棱镜扩束后^[22]其在激光平面上的强度分布不均匀，导致图像中各像素灰度值与粒子浓度之间不再是简单的线性关系。通过测量不同距离处激光的相对强度曲线变化来校正激光强度。考虑到激

光强度分布的特点,采用指数函数进行拟合,根据强度曲线对原始图像进行像素级的强度校正,从而补偿激光强度分布不均匀带来的影响。测量并拟合得到的相对强度曲线如图3所示,拟合得到的激光强度分布如下^[23]

$$I = A \exp\left(-\frac{d}{\lambda}\right) + B \quad (1)$$

式中, d 为测量点与激光出射处的距离; I 为该距离下测量得到的激光功率。最终通过计算,拟合得到 A 为 12.15, λ 为 19.85, B 为 1.77。为了评估拟合的准确性,计算了拟合优度 R^2 , 其值为 0.996, 表明该指数函数能够很好地描述激光强度的分布情况。

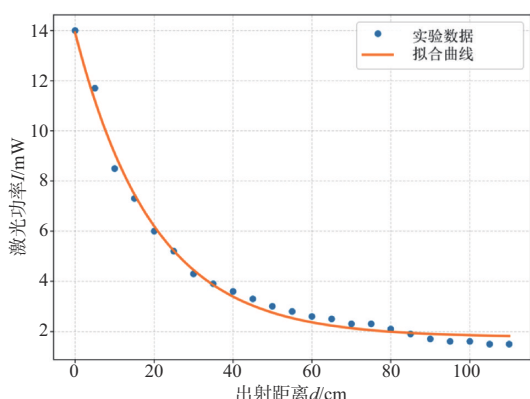


图3 激光光束强度关于距离的分布曲线

当主要背景干扰信号和激光强度不均匀对图像的影响消除后,图像上仍然残留着相机自身引入的噪声,例如暗噪声和读出噪声。为了抑制这些噪声,同时提升示踪粒子信号的视觉呈现效果,使其更加平滑和易于分析,采用平滑空间滤波器^[24]中的统计排序滤波器对图像继续进行处理。根据实验图像的噪声特点,选择 3×3 的邻域作为滤波器窗口大小,并使用排序结果靠中间的值来代替中心像素的值,以在噪声抑制和细节保留之间取得平衡。

在高动态范围下图中的示踪粒子 PLS 信号强度有限,为突出示踪粒子的信号分布,采用 Kmeans 聚类算法^[25]实现气溶胶粒子与背景的分离。根据图像特点,预设 K 值的范围为 100 至 500,并通过对不同 K 值聚类结果的可视化效果进行系统评估^[26]。在评估过程中,重点考察了粒子与背景的分离程度、背景区域的纯净度、粒子形态的完整性以及整体可视化效果是否能最清晰突出示踪粒子的分布特征,最终选择能够产生最佳可视化效果的 K 值作为最优聚类参数。

在经过上述系列处理后,示踪粒子分布信号在图像中的可视化效果将得到一定程度的改善。因为相机采集的原始信号为 16 位的灰度图,此时

图像仍是具有单一通道的灰度图。因此采用自定义颜色映射表的方法为图像进行灰度强度赋色^[27],突出气溶胶粒子特征。颜色映射选定方案通过对图像多次的赋色调试以及效果筛选得来。

最终,原始图像在经背景帧减法、激光强度不均匀校正、统计排序滤波、Kmeans 聚类算法及灰度强度赋色一系列处理后,成功提取出高对比度的示踪粒子分布特征,为后续流场结构分析提供了可靠的数据基础。

2.2 三维重建处理方法

本研究采用实验和数据处理手段相结合的方式实现三维重建可视化。

实验方面,系统采用电控位移平台载动片状激光对目标流场区域进行扫描。在扫描过程中,相机同步进行拍摄并存储图像(图4)。

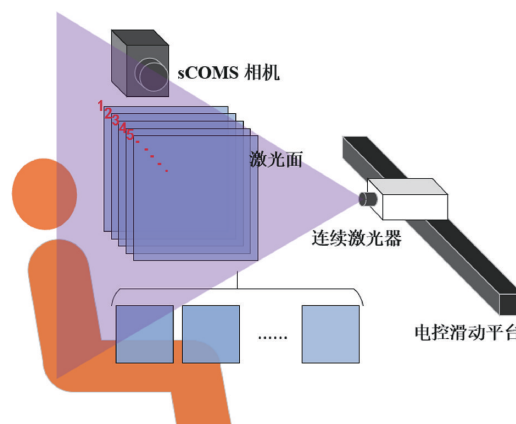


图4 扫描及拍摄过程示意图

由于激光照射区域的粒子散射信号远强于非激光照射区域,因此可以清晰地捕捉到流场信息。将这些图片按照扫描顺序进行排列,并在可视化软件中进行组合,即可近似重建出该时间段内目标区域流场的气溶胶流动情况。扫描区域的体积取决于相机的拍摄面积和电控位移平台的扫描行程,其计算公式表示为

$$V = S \times r \quad (2)$$

式中, V 代表扫描区域的体积; S 代表相机的拍摄面积; r 代表电控位移平台的扫描行程。三维图像所代表的时刻精度取决于电控位移平台的扫描速度,其计算公式表示为

$$\Delta t = \frac{r}{v} \quad (3)$$

式中, Δt 代表时刻精度; v 代表电控位移平台的扫描速度。

得到多组单程扫描切片图像,每组切片用于重建一幅三维图像。

实验中,扫描行程 d 为 10cm,扫描速率 v 为

40cm/s。电控位移平台载动激光器在1s内近似完成四个单程扫描,每个单程扫描耗时约0.25s,因此每张三维图像代表了约0.25s内气溶胶的分布平均情况。相邻两组单程扫描图像之间的时间间隔约为0.25s,因此连续重建的两张三维图像之间的时间间隔也约为0.25s。

得到实验数据后对其进行数据方面的处理,处理流程图如图5。

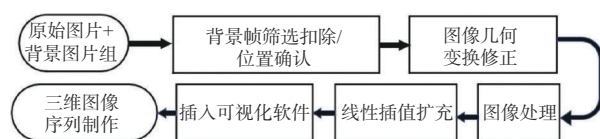


图5 三维重建处理流程图

实验数据包括扫描区域各个位置切片的背景图像和扫描过程中相机拍摄的原始图像。

鉴于本研究聚焦于气溶胶示踪粒子的动态散射信号,采用背景帧扣除是实现运动目标检测的关键步骤。准确进行背景扣除要求使用原始图像在相同空间位置采集的背景图像。然而,在实际实验中,电控滑动平台运动与相机触发之间存在一定的异步性,导致相机捕获的连续帧图像的实际采集位置与理论计算位置难以精确匹配。这种位置的不确定性影响到背景扣除的准确性。

为解决这一实际问题,利用背景图像对原始图像进行背景扣除,通过一种基于轮廓点匹配的方案评估背景扣除效果进而筛选出最佳背景图像,同时确定原始图像的位置。该方案通过寻找原始图像与背景图像中非气溶胶流场区域的对应轮廓点来实现。考虑到不同位置的背景图像存在差异(图6),且气溶胶粒子的流动区域对背景轮廓点强度无影响,因此利用以下方法确定最佳匹配背景:首先,提取原始图像和各背景图像中的轮廓点坐标;然后,计算原始图像轮廓点与各背景图像对应轮廓点之间的像素灰度差的绝对值;最后,将所有轮廓点的像素灰度差绝对值相加,选择总像素灰度差最小的背景图像作为最佳匹配背景,同时该背景图所在位置及该原始图位置。轮廓点提取过程中涉及的图像处理算法包括:直方图均衡化、腐蚀、低通滤波、边缘提取和二值处理等。

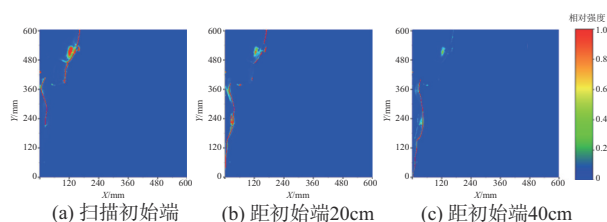


图6 不同扫描区域背景图

背景扣除后,各切片图像的位置得以确定。然而,由于相机位置和视场角固定,成像距离随激光片扫描位置的变化而改变,导致不同成像距离的图像中单像素所代表的实际探测距离存在差异。为保证后续处理的准确性,需对图像进行几何变换修正,使各图像满足像素分辨率一致且单像素对应相同的实际探测距离宽度。具体而言,以某一成像距离(通常选择最小成像距离)下的图像为基准,对其余图像进行上采样插值,使其单像素探测宽度与基准图像保持一致。采用相对误差较小的双线性插值方法,并将上采样后的图像截取至与基准图像相同大小,从而实现所有图像在像素分辨率和探测区域宽度上的统一。

随后,为增强气溶胶粒子的可视化效果,对图像进行进一步处理。图像处理的步骤包括激光强度不均匀校正、统计排序滤波、Kmeans聚类算法和灰度强度赋色,具体参考2.1节的二维图像处理过程。

接下来将上述处理后的切片图像按扫描次序和位置进行分组。每组切片用于重建一幅三维图像。为了提升重建精度,对每组切片进行按线性插值处理,增加数量,计算式表示为

$$\text{img}_{\text{out}} = \frac{d_2}{d_1 + d_2} \times \text{img}_1 + \frac{d_1}{d_1 + d_2} \times \text{img}_2 \quad (4)$$

式中, img_{out} 为插值图片结果, img_1 和 img_2 为插值目标图片位置相邻的左右两张图片; d_1 和 d_2 分别为为插值目标图片位置与 img_1 和 img_2 两张图所在位置的距離。例如,将10张图像插值扩充到101张图像,使得在10cm的扫描宽度下相邻切片之间的间隔为1mm。

然后,将处理后的切片图像组导入可视化软件ParaView中,通过调整图片位置和颜色条等参数,生成具有良好可视化效果的三维图像。

最后,将所有切片组生成的三维图像按时间顺序排列,制作成图像序列或视频。

3 结果与讨论

3.1 图像处理分析

当实验进行中,成像系统在示踪粒子释放过程中连续采集PLS图像,后续对其进行图像处理。图7展示了在不同处理步骤下,相机采集开启后某一时刻采集的PLS图像,拍摄范围为60cm×60cm。如图7(a)所示,仅经过背景帧扣除和激光强度几何修正处理的PLS图像难以清晰辨识示踪粒子的强度分布特征。然而,经过背景帧扣除、激光强度几何修正、平滑空间滤波器以及Kmeans

聚类后的 PLS 图像呈现出更清晰和虚拟化的强度分布,如图 7 (b) 所示。除处理图 7 (a)、(b) 中所使用的图像处理方法外,最后加上灰度强度赋色处理,发现气溶胶粒子的强度分布特征等更加突出,如图 7 (c) 所示。因此,根据比较结果,可进一步记录和分析气溶胶粒子的分布和扩散。

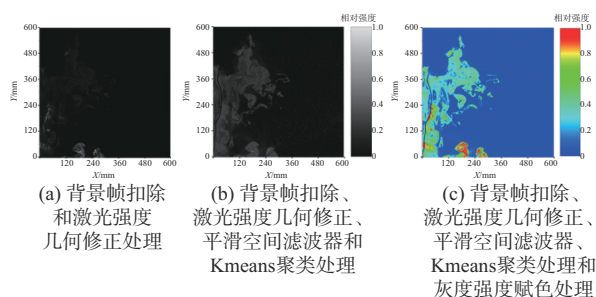


图 7 不同预处理步骤下相机采集开启后某时刻采集图像的处理结果

3.2 人体热羽流上升趋势

人体表面温度通常高于周围环境温度,导致近表面空气受热膨胀,密度降低,产生浮力。受热空气分子向上运动,在人体周围形成一层薄的、紧贴表面的空气层,即人体边界层。边界层内的热空气持续上升,逐渐脱离人体表面,形成上升的热气流,称为人体热羽流。为研究受人体边界层影响下热羽流的动态情况,评估示踪粒子二维分布检测系统的性能,选择对相机捕获的人体热羽流上升过程照片进行一系列图像处理,相机的拍摄范围为 $120\text{cm} \times 120\text{cm}$ 。对相机启动后的 0s 至 2s 内,以 1s 为间隔采集的共三张图像进行处理,处理结果如图 8 所示。

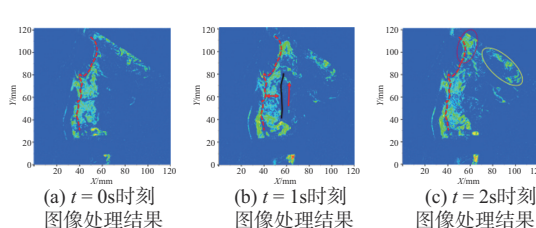


图 8 相机启动后 0s 至 2s 内示踪粒子分布

如图 8 (a) 所示,图片左侧所画红色虚线为暖体假人所在处轮廓。图 8 (b) 中暖体假人到黑色轮廓之间的红色双箭头范围及表示在人体边界层的影响下,气溶胶示踪粒子代表的人体热羽流稳定贴合该区域上升,黑色轮廓右侧的红色箭头表明了人体热羽流延人体边界层上升的大致方向,与人体轮廓基本平行。据多张连续序列图片观察,该条件下气流由人体腰部上升到头部约 0.8m 的距离耗费时间约为 3s。图 8 (c) 红圈部分代表受边界层影响的人体热羽流上升到人体头部,黄圈部分的气溶胶示踪

粒子表示当人体热羽流在头部盘旋一段时间后逐步四处扩散开来,在稍远离人体的地方飘浮、逐渐沉降。根据 PLS 图像,人体热羽流的二维分布可以反映出其沿着人体轮廓从下往上的扩散过程。

3.3 人体边界层及口呼吸相互作用

在 3.2 实验条件基础上,打开暖体假人口呼吸装置,启动相机连续采集过程,拍摄范围调为 $60\text{cm} \times 60\text{cm}$ 以细致观察人体边界层及口呼吸相互作用过程。图 9 和图 10 分别呈现了人体边界层及口呼吸相互作用过程中的二维可视化结果,生动展示了假人在约 2s 的呼气和吸气过程中示踪粒子的流动轨迹。

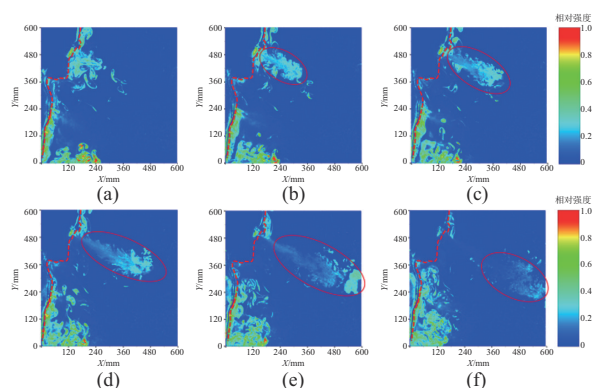


图 9 口呼吸呼气过程示踪粒子流动情况(时间间隔 0.3s)

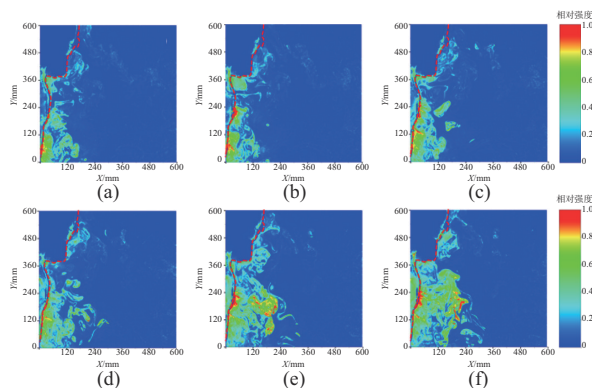


图 10 口呼吸吸气过程示踪粒子流动情况(时间间隔 0.3s)

图 9 中的系列图展示了经过图像处理后口呼吸呼气过程中示踪粒子的流动情况,相邻两图的时间间隔约为 0.3s。图 9 中图左侧所画红色虚线为暖体假人所在处轮廓。图 9 (b) ~ (f) 中红圈部分表示各时刻呼出气流的大小和位置。

图 10 中的系列图展示了经过图像处理后口呼吸吸气过程中示踪粒子的流动情况,相邻两图的时间间隔约 0.3s。图 10 中图左侧所画红色虚线为暖体假人所在处轮廓。

研究结果表明,口呼吸对人体边界层热羽流的影响呈现出显著的不对称性,呼气过程对热羽流的干扰作用明显,而吸气过程的影响则相对较

小。具体而言,呼出口腔气流呈现出显著的动力学特征,由口腔直接喷射而出,具有较强的方向性,形成明显的射流形态,整个喷射过程持续约1.5s,与呼气持续时长接近,略低于设置的呼吸周期的一半1.9s。靠近口腔区域的气流速度较高,初始流速约为33cm/s。随着气流向远端传播,其速度逐渐衰减,扩散范围逐渐扩大。在呼气达0.3s时,气流的扩散范围约为10cm。整个呼气周期内,气流轨迹长度约为40cm,表明口呼吸气流的扩散范围较大,能够显著影响周围环境,并在气溶胶示踪粒子上升过程中阻断部分热羽流的上升趋势。

然而,与呼气过程不同,实验结果表明吸气对人体边界层热羽流的上升影响不明显。尽管吸气会在口腔附近形成负压,但其对热羽流的干扰作用远小于呼气。这可能是由于吸气气流的速度和动量相对较低,呼吸稳定时呼气表示数为0.8bar,而吸气表仅为-0.42bar,其初始流速约22cm/s,不足以显著改变热羽流的上升轨迹。且吸气气流的方向性较差,其方向与热羽流上升方向呈约 80° 夹角,仅引起微小的局部涡旋,且涡旋持续时间不足1s,为吸气时长的一半。较小的速度与动量结合方向性的不足,导致吸气过程难以对整个热羽流产生影响。综上所述,口呼吸对人体边界层热羽流的影响主要体现在呼气阶段,呼气气流的喷射扩散能够显著干扰热羽流的上升,而吸气的影响则相对较小。这一发现对于理解口呼吸对人体周围微环境的影响具有重要意义。

3.4 相互作用过程的三维分布

为了评估系统及方法针对人体边界层及口呼吸相互作用过程可视化三维分布的效果,我们在该过程中延滑轨移动方向的不同位置收集了PLS图像,拍摄范围为 $60\text{cm} \times 60\text{cm}$,激光片扫描区域宽度为10cm。当滑动平台以40cm/s的速度来回移动时,相机以25ms的曝光时间和40Hz的帧速率捕获PLS图像。三维重建的时间分辨率取决于激光片的单程扫描时间;单一切片的空间分辨率取决于像素分辨率和拍摄范围,在扫描方向上的分辨率则由插值后的切片间隔决定。最终我们以0.25s的时间分辨率和约 $0.58\text{mm} \times 0.58\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的空间分辨率重建了三维分布。

图11展示了口呼吸呼气过程中气流的三维动态演化,时间间隔为0.25s。该可视化方法基于平面激光散射(PLS)原理,通过重建示踪粒子的三维空间分布来揭示气流模式。分析表明,受人体边界层影响的热羽流被呼气裹挟,并以33cm/s的初始速度从口腔喷出,形成明显的射流结构,从而显著减少了热羽流的向上通量。随着时间推移,

射流扩散,横截面积增大,示踪粒子浓度降低。对比不同时刻的三维图像显示,气流速度随传播距离增加而衰减,扩散范围则相应增大。例如,在 $t=0\text{s}$ 时,气流在暖体假人口腔附近聚集。在 $t=0.25\text{s}$ 时,呼出气团开始脱离口腔。在 $t=0.5\text{s}$ 时,观察到从口腔延伸至前方约20cm的射流轨迹,并呈现平行于激光扫描方向的扩散。在 $t=0.75\text{s}$ 时,气团进一步扩散,速度降低至约10cm/s,形成更大的气团。在 $t=1\text{s}$ 时,气团达到最大范围并开始消散,与口腔的连接逐渐断裂。随后,气团消散,人体边界层内的热羽流恢复至沿人体表面上升的状态,并进入吸气阶段。该研究结果表明在该时空分辨率下生成的三维模型能够一定程度上定性地揭示口呼吸气流的大致形态、速度变化以及扩散范围等过程特征,为深入理解呼吸气流的动力学特性提供了直观的数据支撑。

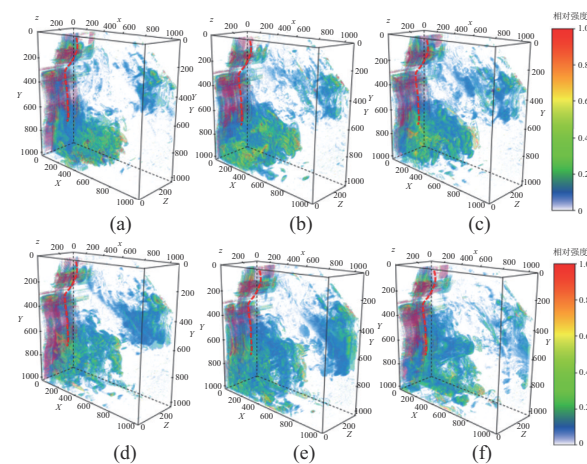


图11 基于平面激光散射的三维重建
口呼吸呼气过程(时间间隔0.25s)

4 结论

本文基于平面激光散射(PLS)的人体边界层及口呼吸可视化进行了研究,实现了人体边界层及口呼吸流场的高时空分辨率、非侵入式观测。其通过片状激光激发气溶胶粒子,结合sCMOS相机同步采集信号,经电控平台动态扫描,捕捉热羽流与口呼吸气流的动态耦合过程。

相较纹影法、PIV及CFD模拟,该方法优势显著:在保证高时空分辨率的同时降低成本、简化流程;非侵入式测量避免干扰流场;优化的图像处理与三维重建算法,可消除噪声、校正激光分布,提升可视化效果与重建精度。实验结果表明,该方法能够清晰地呈现人体边界层热羽流的上升过程,并揭示口呼吸呼气阶段对热羽流的显著干扰作用。通过三维重建,可以定量描述口呼吸气

流的形态、速度变化和扩散范围等关键特征,为深入理解呼吸气流的动力学行为及其与人体边界层的相互作用提供了实验依据。

本研究成果可为呼吸疾病传播、个体化防护及室内空气质量改善提供参考,助力理解呼吸生理机制、评估功能及预防感染。

然而,本研究在实验环境控制、图像处理算法优化和三维重建精度提升等方面仍有改进空间。未来将优化方法、提高精度,结合CFD模拟探索复杂呼吸场景,为人体呼吸研究提供更全面数据。

参考文献:

- [1] Sun Shiyi, Li Jing, Han Jie. How human thermal plume influences near-human transport of respiratory droplets and airborne particles: a review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19:1971—1982.
- [2] Knowpia. Boundary layer[EB/OL]. (2023-08-05) [2025-2-18] https://www.knowpia.com/knownpedia/Boundary_layer
- [3] Bivolarova M, Kierat W, Zavrl E, et al. Effect of airflow interaction in the breathing zone on exposure to bio-effluents[J]. *Building and Environment*, 2017, 125:216—226.
- [4] Winastuti R A, Ratunanda S S, Wijana. Validity-reliability test of indonesian-translated MBD-MBS questionnaire as screening method for mouth breathers[J]. *Oto Rhino Laryngologica Indonesiana*, 2023, 53(2):136—143.
- [5] 刘硕, 刘雅琳, 王怡, 等. 呼吸暖体假人的技术发展及其在健康建筑领域的应用与展望[J]. *科学通报*, 2020, 65(4):274—287.
Liu Shuo, Liu Yalin, Wang Yi, et al. Technology development of breathing thermal manikin and its application and prospect in healthy building[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(4):274—287.
- [6] Sattar A, Israa A, Ali A. CFD modeling of influenza virus diffusion during coughing and breathing in a ventilated room[J]. *Journal of Thermal Engineering*, 2023, 9(1):127—137.
- [7] Mutuku J K, Hou Wenche, Chen W H. An overview of experiments and numerical simulations on airflow and aerosols deposition in human airways and the role of bioaerosol motion in COVID-19 transmission[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, 20:1172—1196.
- [8] 孟令庭, 杨俊伟, 杨华. 风力机翼型失速流动数据同化[J]. *空气动力学学报*, 2024, 42(4):37—45
Meng Lingting, Yang Junwei, Yang Hua. Research on data assimilation of wind turbine airfoils in stall[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2024, 42(4):37—45.
- [9] Bahl P, de Silva C, MacIntyre C R, et al. Towards capturing a database of respiratory exhalations from flow visualisations [C]//14th International Symposium on Particle Image Velocimetry - ISPIV 2021, Chicago, USA:IEEE, August 1—5, 2021.
- [10] Clark R P, Toy N. Natural convection around the human head [J]. *Journal of Physiology*, 1975, 244:283—293.
- [11] Xu Chunwen, Nielsen P V, Liu Li, et al. Human exhalation characterization with the aid of schlieren imaging technique[J]. *Building and Environment*, 2017, 112:190—199.
- [12] 何创新, 邓志文, 刘应征. 湍流数据同化技术及应用[J]. *航空学报*, 2021, 42(4):524704.
He Chuangxin, Deng Zhiwen, Liu Yingzheng. Turbulent flow data assimilation and its applications[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(4):524704.
- [13] Rohacs D, Yasar O, Kale U, et al. Past and current components-based detailing of particle image velocimetry: a comprehensive review[J]. *Heliyon*, 2023, 9(3):e14404.
- [14] Han Mengtao, Ooka R, Kikumoto H, et al. Measurements of exhaled airflow velocity through human coughs using particle image velocimetry[J]. *Building and Environment*, 2021, 202:108020.
- [15] Craven B A, Settles G S. A computational and experimental investigation of the human thermal plume[J]. *Journal of Fluids Engineering: Transactions of the ASME*, 2006, 128(6):1251—1258.
- [16] 程健慧, 王霄, 沈天荣, 等. 飞机尾喷流对舰面温度场影响仿真分析[J]. *空气动力学学报*, 2024, 42:1—8.
Cheng Jianhui, Wang Xiao, Shen Tianrong, et al. Numerical study of carrier ground temperature field under influence of aircraft jet flow[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2024, 42:1—8.
- [17] Wei Wei, Huang Shiwei, Chen Lianhua, et al. Airflow behavior changes in upper airway caused by different head and neck positions: comparison by computational fluid dynamics[J]. *Journal of Biomechanics*, 2017, 52:89—94.
- [18] Pickles J D, Mettu B R, Subbareddy P K, et al. Gas density field imaging in shock dominated flows using planar laser scattering [J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(7):112.
- [19] Ma Yinkai, Li Zhufei, Yang Jiming. Planar laser scattering visualization of streamwise vortex pairs in a Mach 6 flow[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(1):166—177.
- [20] Chen Siying, Chen Yuanyuan, Zhang Yinchao, et al. The 3d modeling system for bioaerosol distribution based on planar laser-induced fluorescence[J]. *Sensors*, 2021, 21(8):2607.
- [21] Piccardi M. Background subtraction techniques: a review [C]//2004 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Hague, Netherlands:IEEE, 2004:3099-3104.
- [22] Powell I. Laser beam shaping using powell lenses[J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(9):1275—1279.
- [23] Bevington P R, Robinson D K. Data reduction and error analysis for the physical sciences[M]. McGraw-Hill, 2003.
- [24] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing[M]. Pearson Education, 2017.
- [25] MacQueen J B. Some methods for classification and analysis of multivariate observations[C]//Proceedings of The Fifth Berkeley Symposium On Mathematical Statistics And Probability. Berkeley, USA: IEEE, 1967:281—297.
- [26] 陈思颖, 郝伟, 陈和, 等. 强度分类变换在平面激光诱导荧光探测气溶胶流场中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(4):0401001.
Chen Siying, Hao Wei, Chen He, et al. Application of piecewise intensity transformation in aerosol flow field detection based on planar laser-induced fluorescence[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2024, 61(4):0401001.
- [27] Fadia P, Shreasiya J, Pareek J. Image colorization[J]. *International Association of Biologicals and Computational Digest*, 2022, 1(2):231—243.