

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614936

基于主动电离阵列式静电传感器的气流速度测量方法研究^{*}

王光祖¹, 陈欣欣^{1,2}, 马利斌², 李 健¹, 许传龙¹

(1. 东南大学能源与环境学院 南京 211189; 2. 内蒙航天动力机械测试所 呼和浩特 010010)

摘 要:针对现有主动电离式静电测速方法中静电信号沿程衰减大、测量准确性受传感器位置影响严重以及互相关计算参数选取较为复杂等问题,提出了一种基于主动电离阵列式静电传感器的气流速度测量方法。设计了包含上游激励模块与下游多通道检测电极的主动电离阵列式静电传感器,采用交变高压激励在流场中主动产生具有固定频率特征的离子示踪信号。通过在风洞平台上开展的风速测量实验,系统分析了交变激励条件下阵列各检测电极输出静电感应信号的频率特性、沿程衰减规律及其空间分布特征,进而提出了一种基于静电信号信噪比(SNR)与衰减率的有效速度筛选准则。实验结果表明:主动电离式静电互相关测速误差受信号衰减特性影响较大,且不同流速下最佳测量结果的位置具有明显差异;采用所提出的有效速度筛选准则,即当电极对 SNR>5.6 dB 且信号衰减率小于 1.5 时,在 10~40 m/s 流速范围,可将速度测量的相对误差与相对标准偏差控制在 2% 以内。此外,交变激励下静电信号频率由激励源频率主导且不随流速变化,基于该特性可将互相关积分时间按信号周期数进行选取,从而显著简化互相关计算参数的选取过程。当积分时间选取为激励信号 5 倍周期时,测速结果的相对标准偏差可稳定控制在 1% 左右。

关键词: 主动电离;阵列式静电传感器;气流速度;交变激励;测量

中图分类号: TH815 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Gas velocity measurement method based on electrostatic sensor array and active ionization

Wang Guangzu¹, Chen Xinxin^{1,2}, Ma Libin², Li Jian¹, Xu Chuanlong¹

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 211189, China;

2. Inner Mongolia Aerospace Power Mechanical Testing Institute, Hohhot 010010, China)

Abstract: To address the limitations of existing active electrostatic velocity measurement methods—such as significant signal attenuation along the path, high sensitivity of measurement accuracy to sensor positioning, and high complexity of selecting cross-correlation parameters—a gas velocity measurement method based on an electrostatic sensor array and active ionization is proposed. An electrostatic sensor array composed of an upstream excitation module and downstream multi-channel detection electrodes was designed. Alternating high-voltage excitation was employed to actively generate ion tracer signals with fixed frequency characteristics within the flow field. Through experiments conducted on a wind tunnel platform, the frequency characteristics, spatial attenuation, and spatial distribution of the electrostatic signals from the sensor array under alternating high-voltage excitation were systematically analyzed. Furthermore, a criterion for effective velocity screening based on the signal-to-noise ratio (SNR) and electrostatic attenuation rate was proposed. Experimental results indicate that the error of active electrostatic cross-correlation velocity measurement is significantly influenced by signal attenuation characteristics, and the optimal measurement position varies notably with flow velocity. When the electrode pair's SNR exceeds 5.6 dB and the signal attenuation rate is less than 1.5, both the relative error and relative standard deviation of velocity measurements can be controlled within 2% over the flow velocity range of 10~40 m/s. Additionally, the frequency of the electrostatic signal is dominated by the alternating high-voltage excitation source and remains insensitive to flow velocity. Accordingly, the cross-correlation integration time can be determined by the number of signal periods, which significantly simplifies the parameter selection

收稿日期:2026-02-07 Received Date: 2026-02-07

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2023YFB4102904)项目资助

process. When the integration time is set to five signal periods, the relative standard deviation of the velocity measurement results is approximately 1%.

Keywords: active ionization; electrostatic sensor array; gas velocity; alternating high-voltage excitation; measurement

0 引言

静电传感技术因其结构简单、成本低、鲁棒性强,且能够适应高温、高压及强磨损等复杂工业环境,在能源化工领域受到了广泛关注与应用^[1-5],如气力输送粉体颗粒流动参数检测^[6-8]、流化床监测^[9-10]、烟气排放监测^[11]等,为流动机理研究和过程优化控制提供重要检测技术支撑。

静电传感技术在流体速度测量方面的应用较为成熟,主要包括互相关法和空间滤波法两类。互相关法通过分析上下游传感器感应信号之间的渡越时间来计算流体速度^[12-14],而空间滤波法则基于传感器阵列的空间滤波效应,利用信号的频谱分析或自相关分析获取流体速度^[15-18]。上述两种测速方法已在燃煤电站一次风粉在线监测中得到成功应用。例如,Qian等^[19]利用静电传感器阵列结合互相关算法,在17~26 m/s的典型工况下,煤粉流速测量的相对误差小于5%。Xu等^[20]基于空间滤波静电传感器阵列结合自相关算法实现了一次风粉流速度和相对浓度的在线监测。静电测速效果不仅与传感器的设计以及互相关计算参数选取密切相关^[13,21],还高度依赖于颗粒在输运过程中的荷电水平^[22-23]。颗粒荷电量越大,信号的信噪比越高,更有利于提高测量可靠性。然而,颗粒的荷电状态极易受物料特性及环境因素的影响^[24-26]。在低浓度、高湿度或颗粒含水量较高的情况下^[27],颗粒荷电量会显著降低,导致静电感应信号微弱,信噪比严重下降,有时甚至导致测量失效。

为了克服上述被动式静电检测技术对流体自然荷电特性的依赖,基于气体电离的主动式静电测量技术逐渐成为研究热点。Zhang等^[28]率先提出了利用脉冲高压作为激励源的静电测速方法,利用小波变换提取感应信号的上升沿来确定颗粒的渡越时间,从而实现速度测量。然而,由于静电感应场的边缘效应(软场特性),基于上升沿确定的渡越时间与电极物理间距并不严格对应,容易引入较大的测量误差。针对这一问题,刘鹏飞等^[29-30]将主动电离技术与互相关测速原理相结合,构建了基于直流激励的激发式静电传感器系统。该方法利用电晕放电产生的离子云作为可检测的示踪信号,通过计算下游检测阵列感应信号的互相关函数来获取流体的渡越时间,验证了主动式静电测速的可行性。然而,刘鹏飞^[29]的实验结果表明,系统的直接测量结果与参考流速之间往往存在超过10%的偏差,因此需要通过引入标定系数对测量结果进行修正。现有研究多采用测量位置固定的

双检测电极结构。然而,静电信号沿检测颗粒流动方向衰减显著,且其衰减特性与流速高度相关,导致不同流速条件下的最佳测量位置存在明显差异。受此影响,传统固定测点设计及单一系数修正的方法难以在宽流速范围内持续保证良好的信号质量与测量精度,从而限制了测量系统的适用性与可靠性。此外,现有主动式静电测速方法多采用直流高压作为激励源,检测到的静电信号实质上是激发电离过程中产生的随机静电电流噪声,信号频率特性取决于传感器结构参数和流体速度,使得互相关速度计算的参数选取需要基于传感器的空间滤波特性、速度测量范围、渡越时间误差要求等综合考虑^[13,31],较为复杂。实际上,对于主动激励式静电传感器,通过合适的激励方式可使静电信号具有特定的频率特征,不依赖于传感器结构和速度,从而大大简化互相关参数的选取过程。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于主动电离阵列式静电传感器的气流速度测量方法,设计了主动电离阵列式静电传感器,通过在风洞平台上开展的风速测量实验,系统分析交变激励条件下各检测电极输出静电感应信号的频率特性及其沿程衰减规律,研究基于静电信号信噪比与衰减率的有效速度筛选准则。此外,还对交变激励模式下积分时间对速度测量结果的影响进行了深入分析。

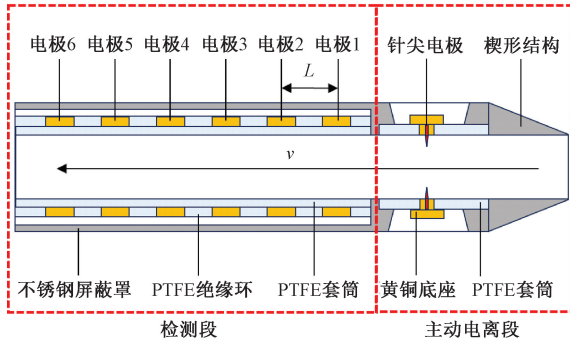
1 理论分析

1.1 主动电离阵列式静电传感器结构

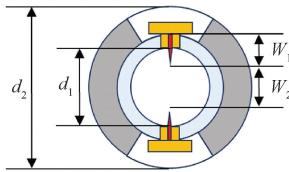
主动电离静电检测技术是在传统静电感应测量的基础上,通过在测量段上游的针尖电极施加高压激励,使其在流动介质中发生电晕放电,主动产生离子或带电粒子。这些带电粒子随气流运动,经过下游静电传感器时在其表面产生感应电荷,形成静电信号。

本文设计的主动电离阵列式静电传感器结构如图1所示,主要由主动电离段和检测段两部分组成。主动电离段由黄铜底座、针尖电极和楔形引流结构组成。两针尖电极位于相同轴向截面内,沿管道横截面的直径方向相对布置。单个针尖电极长为 $W_1 = 12\text{ mm}$,两针尖电极之间的间距为 $W_2 = 15\text{ mm}$,并与检测电极阵列保持严格的同轴对准。不锈钢材质的流线型楔形引流结构与传感器主体的平滑过渡,可对来流进行整流处理,使进入测量通道的气流速度尽可能与未受扰动的主流速度保持一致,从而提高测速结果的可靠性。检测段由6个不锈钢

环形检测电极沿轴向等间距排列,并与聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)绝缘组件(绝缘环和套筒)嵌套组装,外部设置不锈钢屏蔽罩构成整体结构。其中,绝缘环用于实现相邻检测电极之间的电绝缘;绝缘套筒用以防止气流中携带的离子撞击电极而产生电荷转移,从而避免对静电感应信号的干扰。外层屏蔽罩用于屏蔽外部电磁干扰。各检测电极轴向宽度均为 10 mm,相邻电极之间的绝缘环宽度为 10 mm,从而形成中心间距为 $L=20$ mm 的等间距电极阵列布局。传感器测量通道内径为 $d_1=30$ mm,屏蔽罩外径为 $d_2=50$ mm。



(a) 传感器轴向剖面图
(a) Axial sectional view of the sensor



(b) 主动电离段横截面图
(b) Cross-sectional view of the active ionization section

图1 主动电离阵列式静电传感器结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of the active ionization electrostatic sensor array

1.2 速度计算

基于所设计的主动电离阵列式静电传感器,任意两个环状检测电极输出的静电信号均可通过互相关分析获得所测区域内的平均流速。本文选取两个相邻检测电极构成测速电极对,共形成 5 组,分别为电极对 1-2、2-3、3-4、4-5 和 5-6。对于每一个电极对,在假设两检测电极之间气流轴向速度分布相对均匀的条件下,由互相关获得的时间延迟对应的速度,可等效为该电极对所覆盖的圆柱形检测空间内气流的平均速度。

设任意电极对的两个检测电极采集到的静电信号时间序列分别为 x_i 和 $y_i (i=1, 2, \dots, N)$, 其中 N 为采样点数。为了提取两者之间的渡越时间,对两序列进行互相关分析,其互相关系数函数 $R_{xy}(m)$ 如式(1)所示。

$$R_{xy}(m) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} (x_i - \bar{x})(y_{i+m} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-m} (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1+m}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式中: m 为 y_i 相对于 x_i 的离散时间延迟点数; $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 分别为 x_i 和 y_i 的平均值。

互相关系数函数 $R_{xy}(m)$ 反映了两个时间序列在不同时间延迟点数 m 下相似性程度。 $R_{xy}(m)$ 曲线的峰值,即相关系数,既是评价测速结果可靠性的重要指标,也用于确定渡越时间。一般来说,相关系数越大,表明两时间序列的波形相似性越高,从而计算的渡越时间越准确。而峰值对应的延迟点数 M_0 表示使两序列对齐最佳、相似性最高的延迟点数。此时,流体流经两个电极之间的平均渡越时间 τ_0 如式(2)所示。

$$\tau_0 = \frac{M_0}{f_s} \quad (2)$$

式中: f_s 为采样频率。

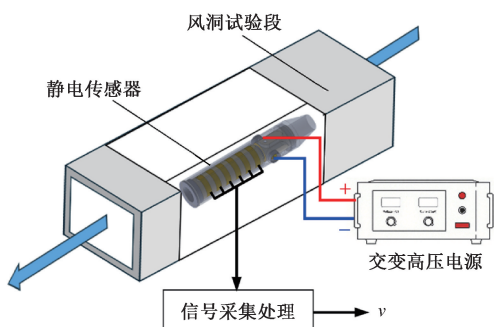
获得渡越时间 τ_0 后,即可根据式(3)计算得出气流的平均流速 v :

$$v = \frac{L}{\tau_0} \quad (3)$$

2 实验系统

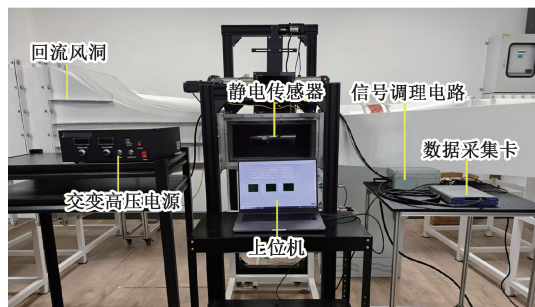
为评估主动电离阵列式静电传感器的测速性能,搭建了如图 2 所示的风洞速度测量实验系统。系统由低速回流风洞、主动电离阵列式静电传感器、信号调理电路、数据采集卡、交变高压电源以及上位机等组成。回流风洞采用全钢结构,实验段截面尺寸为 250 mm×250 mm,长度为 600 mm,具备 0~55 m/s 的连续调速能力,能够充分满足传感器气动性能及测速精度的验证需求。传感器安装于风洞实验段的几何中心,并精准校准轴线使楔形进气口与来流方向对齐,以减小攻角误差对测速结果的影响。通过调节风洞驱动电机的变频器频率,可实现对流速的精确控制。同时,在传感器邻近流场布置标准皮托管,利用其测得的动静压差实时计算标准风速,将其作为评估传感器测速精度的参考基准。为验证传感器的宽范围测量能力,本次实验覆盖了 5~40 m/s 的宽流速范围,具体选取了 5、10、15、20、25、30、35 和 40 m/s 共 8 个流速工况进行测试。

检测系统采用 6 通道信号调理电路,每个通道对应一个检测电极。图 3 所示为单通道静电信号调理电路结构,主要由电流/电压(current-to-voltage, I/V)转换电路、低通滤波电路、高通滤波电路以及反向放大电路组成。其中, I/V 转换电路负责将感应电荷信号转换为电压信号,其反馈电阻 R_f 选取为 1 MΩ, 反馈电容 C_f 选取为



(a) 风洞速度测量实验系统示意图

(a) Schematic diagram of the wind tunnel velocity measurement experimental system



(b) 风洞速度测量实验系统实物图

(b) Photograph of the wind tunnel velocity measurement experimental system

图2 风洞速度测量实验系统

Fig. 2 Wind tunnel velocity measurement experimental system

1 pF; 后级滤波与放大电路进一步滤除干扰并调整信号幅值, 以匹配采集量程。经各通道调理后的电压信号输入 National Instruments 公司 USB-6353 型多功能数据采集卡, 采样频率设定为 200 kHz, 实现对 6 个检测电极输出的电压信号的同步高速采集。采集数据传输至上位机进行存储与互相关计算。

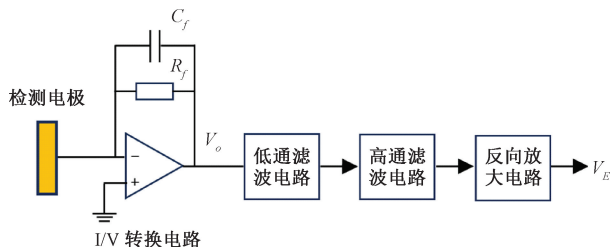


图3 单通道静电信号调理电路结构

Fig. 3 Schematic diagram of the single-channel electrostatic signal conditioning circuit

3 实验验证

3.1 交变激励主动电离的静电信号特性

为使静电信号具备明确且可控的频率特征, 本研究选用一台具有交变特性的高压电源作为针尖电极的激励

源。该电源在正、负输出端之间施加频率为 50 Hz 的周期性锯齿波高压, 其电压差波形如图 4 所示, 从而使针尖电极附近空气发生周期性电离。

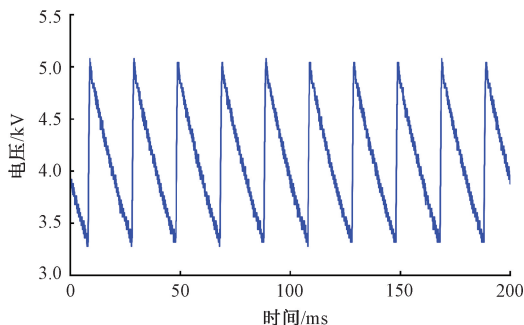


图4 高压电源正负输出端之间的电压差波形

Fig. 4 Waveform of the voltage difference between the positive and negative output terminals of the high-voltage power supply

为验证检测电极信号的频率特性是否受流速影响, 开展了不同流速条件下的实验测试。图 5 为 30 m/s 工况下传感器阵列中 6 个圆环电极采集到的静电感应信号。可以看出, 各电极感应信号在波形幅值上存在一定的差异, 但均呈现出明显且周期一致的波动特征。对应的频谱特征如图 6 所示。图 6 中幅值以电极 1 信号主频幅值为基准进行统一归一化, 以反映不同电极间信号幅值的相对变化。可以看出, 所有检测电极输出静电信号的主频均稳定在 50 Hz, 与激励电源频率保持一致。

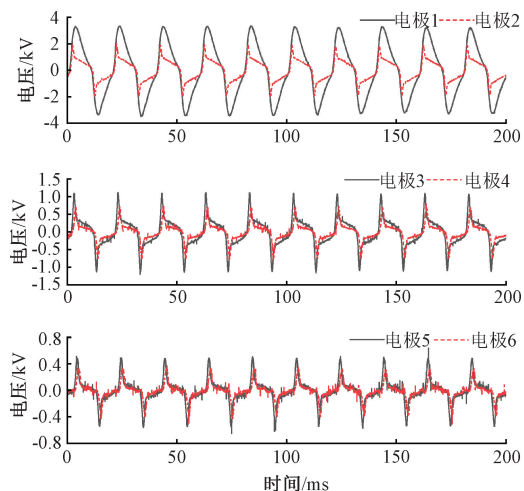


图5 30 m/s 工况下 6 个检测电极输出的静电信号

Fig. 5 Electrostatic signals from six detection electrodes at 30 m/s

进一步, 在 5~40 m/s 的流速范围内对主动电离阵列式静电传感器进行了测试。实验结果表明, 各流速下的静电感应信号均表现出一致的频谱特性, 其主频始终由激励源决定, 稳定维持在 50 Hz, 不随流速变化。

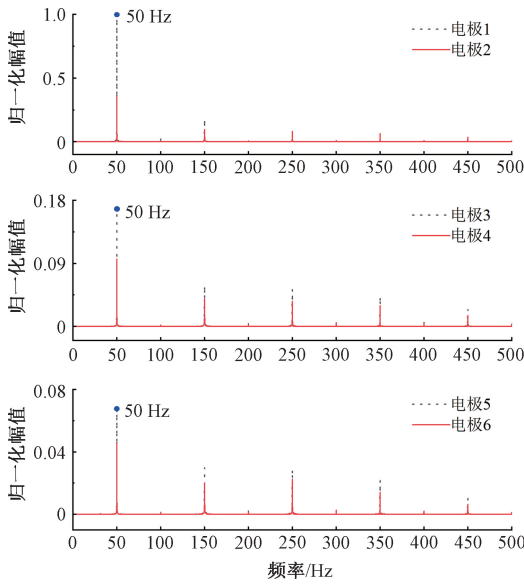


图6 30 m/s工况下6个检测电极输出静电信号的频谱图

Fig. 6 Frequency spectra of electrostatic signals from six detection electrodes at 30 m/s

因此,采用交变高压激励后,静电感应信号的主频由激励源主导并保持稳定,流速信息主要体现在时间延迟上,从而有利于提高渡越时间识别的准确性。此外,由于信号频率特性明确且固定,该方法在信号处理过程中可针对激励频率设计相应的带通滤波策略,从而在高噪声环境下有效抑制非特征频段干扰,进一步提升信噪比与测速结果的鲁棒性。

3.2 静电信号衰减特性随测点位置的变化规律

由针尖电极高压激励产生的离子云团随气流向下游运输的过程中,离子云团中的带电粒子在运输过程中会不断与异性带电粒子发生非弹性碰撞并发生中和反应,转化为中性分子^[32],导致离子云团的净空间电荷密度沿程持续减小。由于静电传感器电极上的感应电荷量与其检测空间内的自由电荷量成正比,因此,随着离子云团的沿程耗散,沿流向布置的6个检测电极所感应出静电信号的幅值逐渐衰减。

由图5可见,在阵列传感器的前端区域(从电极1到电极2区域),下游电极信号幅值相较于上游明显衰减,并出现较为明显的非线性波形畸变。这是由于该区域内的离子云处于带电特性及空间形态的快速调整阶段,电荷密度沿轴向迅速衰减并呈现强烈的时变非均匀性。另外,在阵列末端区域,检测电极输出信号的幅值衰减至较低水平,使得信噪比急剧下降,有效信号会被噪声所淹没,导致互相关系数函数主峰难以识别,无法准确测量速度。因此,有必要考察静电信号沿离子云团流动方向的衰减特性,明确在不同风速条件下信号幅值衰减特性的演化规律,从而界定相关测速的可靠工作区间。

为了研究各电极对的静电信号特性,定义了信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)和信号衰减率两个评价指标。由于各电极对包含两个电极(记为电极*i*和电极*i+1*),为了综合评价该测量截面的信号质量,本文定义电极对的信噪比 $SNR_{i,i+1}$ 为其平均信号有效值与平均背景噪声有效值之比的对数形式,如式(4)所示。

$$SNR_{i,i+1} = 10 \cdot \lg \left(\frac{(\bar{V}_{time,i} + \bar{V}_{time,i+1})/2}{(\bar{V}_{n,i} + \bar{V}_{n,i+1})/2} \right) = 10 \cdot \lg \left(\frac{\bar{V}_{time,i} + \bar{V}_{time,i+1}}{\bar{V}_{n,i} + \bar{V}_{n,i+1}} \right) \quad (4)$$

式中: $\bar{V}_{time,i}$ 与 $\bar{V}_{time,i+1}$ 为上游电极*i*与下游电极*i+1*输出的静电信号平均有效值; $\bar{V}_{n,i}$ 与 $\bar{V}_{n,i+1}$ 为无激励时上游电极*i*与下游电极*i+1*输出的背景噪声平均有效值。

各电极对的信号衰减率 $\eta_{i,i+1}$ 为电极对中上游与下游电极静电信号的平均有效值之比,如式(5)所示。

$$\eta_{i,i+1} = \frac{\bar{V}_{time,i}}{\bar{V}_{time,i+1}} \quad (5)$$

图7为不同流速下,信噪比随电极空间位置的变化规律。图中横坐标40、60、80、100和120 mm依次对应电极对1-2、2-3、3-4、4-5和5-6的测量空间区域的中心与针尖电极之间的轴向间距。显然,信噪比随测量中心与针尖电极轴向间距的增加呈非线性下降趋势。其中,阵列前端区域(40~60 mm)的信号强度从最大值迅速减小,这是因为离子云团在生成初期正负离子复合最为显著,而在阵列后端(80~120 mm),离子复合过程趋于缓和,信号强度仍持续减小,但衰减趋势明显放缓。此外,风速对信噪比具有显著影响,整体表现为风速越高,信噪比越大。

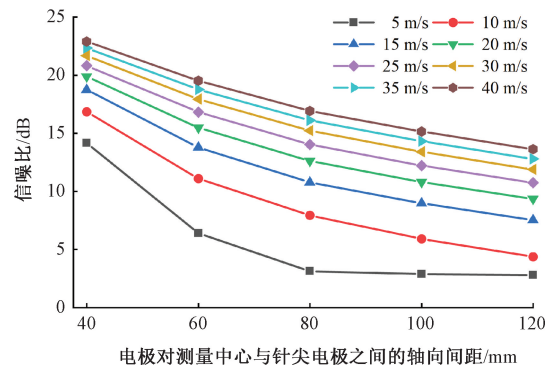


图7 不同流速下信噪比随电极空间位置的变化

Fig. 7 Variation of signal-to-noise ratio with electrode position at different flow velocities

在5 m/s 低速工况下,信号整体较弱,首端位置(40 mm)的信噪比仅为14.1左右,到达末端(120 mm)时已衰减至2.81,衰减幅度为80.1%。末端信号强度已

接近背景噪声水平,信噪比较低,不利于风速的准确测量。随着风速增加,信号强度显著提升。当风速达到 40 m/s 时,首端位置的信噪比提高至约 22.89,末端仍能保持约 13.64,衰减幅度为 40.4%。

图 8 为不同流速下信号衰减率随电极对测量中心与针尖电极轴向间距的变化曲线。可以看出,信号衰减率随测量位置向下游推进整体呈现出非线性衰减规律。在所有流速工况下,阵列前端区域(40~60 mm)的信号衰减率最大且随流速的变化幅度也最大。相比之下,在阵列中后段区域(60~120 mm),信号衰减率较小且变化率明显趋缓,并且在不同流速条件下的取值较为接近,说明离子云团逐渐达到相对稳定状态。

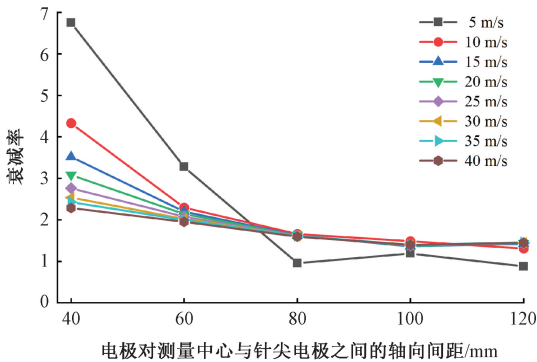


图 8 不同流速下信号衰减率随电极空间位置的变化
Fig. 8 Variation of signal attenuation rate with electrode position at different flow velocities

3.3 静电信号衰减特性对速度测量结果的影响

为了探究静电信号衰减特性对速度测量结果的影响,本文选取 10 m/s 工况作为典型工况进行分析。图 9 展示了该风速下阵列中各电极对的连续速度测量结果。整体来看,各电极对获得的测速结果随时间变化较为平稳,未出现明显的波动,但不同电极对之间的测速精度存在显著差异。其中,电极对 1-2 与 5-6 的测速结果与实际风速偏差较大;相比之下,电极对 2-3、3-4 及 4-5 的测速结果较为接近真实值,且以电极对 4-5 的测量结果最为准确。

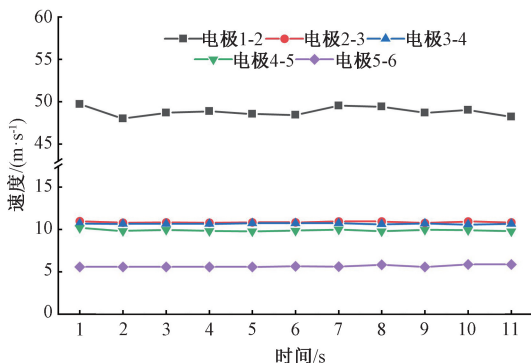


图 9 10 m/s 工况连续速度测量结果

Fig. 9 Continuous velocity measurement results at 10 m/s

电极对之间的测量误差存在差异主要源于信号衰减特性随测量位置发生了显著变化。首先,对于处于阵列前端的电极对 1-2,由于离子云团在生成初期复合作用剧烈,导致相邻测点间的信号衰减率较大。这种快速的沿程衰减破坏了互相关测速所依赖的“凝固流动”假设,使得上下游信号波形发生了显著的非线性畸变,从而导致互相关系数函数峰值定位出现偏移,引起较大的测速偏差。随着测量位置向阵列中段移动,离子输运过程逐渐趋于稳定,信号衰减率显著降低,且信噪比仍维持在较高水平。以电极对 4-5 为例,其上下游信号波形保持了高度的一致性,同时具备优异的信噪比,在“波形相似度”与“信噪比”之间取得了最佳平衡,因此获得了最优的测速精度。最后,对于位于阵列末端的电极对 5-6,虽然其信号衰减率进一步减小(波形畸变较小),但经过长距离输运后,信号强度已衰减至接近背景噪声水平。此时,低信噪比成为限制测速精度的决定性因素,从而影响速度计算的准确性与稳定性,最终使得测速误差再次回升。

图 10 给出了 10 m/s 工况下各电极对的互相关系数函数,可以看出,各电极对均呈现出明显主峰。表 1 所示的各电极对的相关系数均高于 0.8。其中,电极对 1-2 对应最大的相关系数,但其测速误差反而最大。这说明,在固定频率主动电离测速中,较高的相关系数仅表明上下游信号在周期主成分上具有较强相关性,并不能保证时延信息提取的准确性。当信号沿程衰减较大时,波形畸变会导致互相关系数函数峰值位置发生偏移,即使相关系数较高,仍可能产生较大的测速误差。因此,在固定频率主动电离测速方法中,静电信号严重衰减时相关系数不能单独作为判断测速结果可靠性的有效判据。

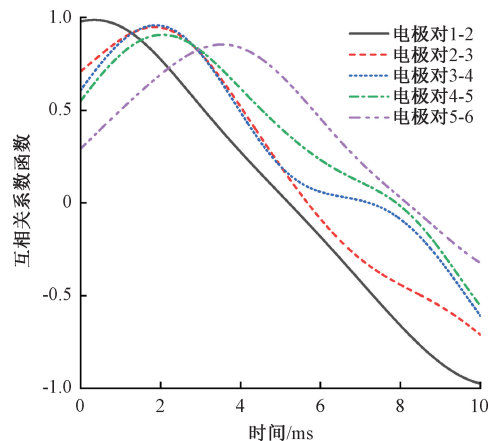


图 10 10 m/s 工况下各电极对的静电互相关系数函数
Fig. 10 Electrostatic cross-correlation functions of the electrode pairs at 10 m/s

表 1 10 m/s 工况各电极对的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of each electrode pair at 10 m/s

电极对	相关系数
1-2	0.985 5
2-3	0.948 3
3-4	0.952 1
4-5	0.895 9
5-6	0.804 0

图 11 给出了不同风速(5~40 m/s)下,不同测量位置对应的测速相对误差。本文所述相对误差均指相对误差的绝对值。横坐标代表 5 个电极对的测量中心与针尖电极之间的轴向间距。可以看出,对于流速 ≥ 10 m/s 的工况,在 40~100 mm 的测量区间,测速误差随距离的增加呈现下降趋势,且下降幅度逐渐减小。随后,在 120 mm 的末端测量位置,10 和 15 m/s 工况下的误差出现了轻微回升。对于 5 m/s 的极低流速工况,其误差分布虽在初始阶段同样随距离增加而降低,并于 60 mm 处达到极小值,但随后在中下游区域出现了显著的误差反弹,且其增大幅度远超 10 和 15 m/s 工况下的回升程度。这表明,不同流速下最佳测量结果的位置具有明显差异。因此,在对测速结果进行筛选时,有必要进一步结合信噪比及其衰减特性进行综合分析。

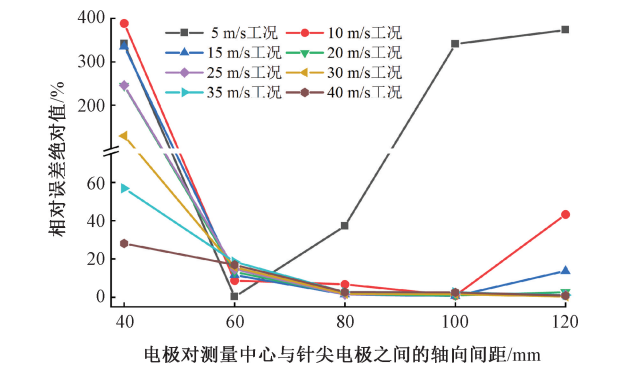


图 11 不同流速下测速相对误差在阵列中的空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of relative velocity measurement errors in the array at different flow velocities

为了探究信号特征与测速精度的内在联系,表 2 统计了不同流速下阵列中各电极对的信号特征参数及其测速误差。统计结果显示,测速准确性高度依赖于信噪比与衰减率的联合分布特征。具体而言,高衰减率或低信噪比均会导致严重的测量偏差。例如,在 20 m/s 工况

下,电极对 1-2 虽具有较高的信噪比($SNR_{1,2} = 19.89$ dB),但由于衰减率过大($\eta_{1,2} = 3.08$),其测速相对误差仍高达 244%;相反,在 10 m/s 工况下,电极对 5-6 尽管衰减率较低,但受限于较低的信噪比($SNR_{5,6} = 4.38$ dB),测速误差亦回升至 43%。唯有同时满足“高信噪比”与“低衰减率”的电极对(如 10 m/s 下的 4-5、20 m/s 下的 4-5 等),才具有较高的测速精度。

表 2 不同流速下阵列各电极对的信号特征参数统计

Table 2 Statistics of signal characteristic parameters for different measurement electrode pairs under various flow velocities

参考流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	测量 电极对	衰减率	信噪比/ dB	平均测量 流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误 差绝对 值/%
5	1-2	6.79	14.17	22.07	341.55
	2-3	3.32	6.40	5.01	0.31
	3-4	0.95	3.13	3.13	37.23
	4-5	1.17	2.88	22.04	340.97
	5-6	0.87	2.80	23.68	373.60
10	1-2	4.32	16.83	48.82	388.29
	2-3	2.29	11.09	10.87	8.71
	3-4	1.66	7.94	10.67	6.76
	4-5	1.47	5.91	9.91	0.88
	5-6	1.30	4.38	14.32	43.28
20	1-2	3.08	19.89	68.83	244.15
	2-3	2.13	15.49	22.65	13.26
	3-4	1.62	12.62	20.32	1.63
	4-5	1.37	10.81	19.80	1.00
	5-6	1.43	9.35	20.54	2.71
40	1-2	2.28	22.89	51.25	28.14
	2-3	1.95	19.52	46.77	16.93
	3-4	1.59	16.93	41.07	2.69
	4-5	1.39	15.14	38.99	2.52
	5-6	1.44	13.64	40.33	0.84

3.4 有效速度筛选准则

基于上述分析,为了在宽流速范围内获得精度较高且稳定的测速结果,本文提出一种基于“信噪比-衰减率”联合约束的通用有效速度筛选准则,如式(6)所示。

$$\begin{cases} SNR_{i,i+1} \geq SNR_0 \\ \eta_{i,i+1} \leq \eta_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $SNR_{i,i+1}$ 为电极对 $i-i+1$ 的信噪比; $\eta_{i,i+1}$ 为该电极

对上下游信号的衰减率; SNR_0 与 η_0 分别为信噪比下限阈值与衰减率上限阈值。

针对本文所设计的阵列式传感器结构,依据前述实验统计规律,建议选取 $SNR_0 = 5.6$ dB、 $\eta_0 = 1.5$ 作为筛选阈值。在实际测量中,凡同时满足上述双重条件的电极对,其测速结果被判定为“有效值”。若同一时刻存在多个有效电极对,则取其测速结果的算术平均值作为最终输出速度 v_0 ,如式(7)所示。

$$v_0 = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k v_j \quad (7)$$

式中: k 为有效电极对数量; v_j 为第 j 个有效电极对的测速结果。

值得注意的是,在 5 m/s的极低流速工况下,阵列中各测量电极对均难以同时满足信噪比与衰减率的双重筛选条件。尽管该工况下电极对2-3的相对误差仅为 0.31% ,但其衰减率高达 3.32 (远超 η_0)。该结果依赖于特定信号条件,具有较强的偶然性,难以作为稳定可靠的测量结果。此时,需通过传感器的结构优化来提高信噪比和降低沿程衰减率,从而从根本上保证能够获得有效测量结果。

图12给出了系统在引入该筛选准则后的测速准确性与稳定性评价结果。可以看出,在 $10 \sim 40$ m/s的宽流速范围,经筛选后输出的有效流速与参考流速保持高度一致,其相对误差与相对标准偏差均稳定控制在 2% 以内,验证了该准则在提升测速可靠性方面的有效性。

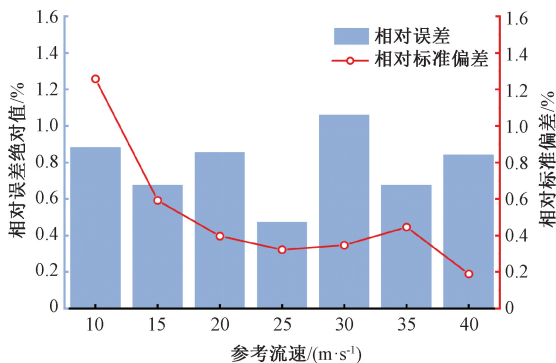


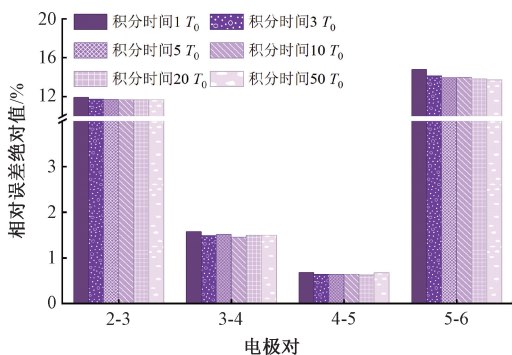
图12 基于筛选准则的系统测速结果准确性与稳定性评价

Fig. 12 Evaluation of the accuracy and stability of system velocity measurement results based on the screening criterion

3.5 积分时间的影响

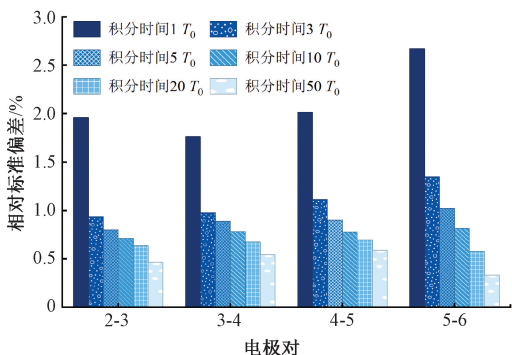
在互相关测速原理中,积分时间是平衡测量精度与系统动态响应特性的关键参数。本研究采用交变高压作为激励源,产生的感应信号频率完全由激励源决定。因此,积分时间的选取主要取决于信号周期数(T_0)。

本研究选取 15 和 35 m/s两个风速工况,对积分时间取 $1, 3, 5, 10, 20$ 和 50 个信号周期(对应时间分别为 $0.02, 0.06, 0.10, 0.20, 0.40$ 和 1.00 s)时的测速性能进行对比分析。图13和14分别给出了上述两种工况下,4个电极对的测速相对误差及相对标准偏差随积分时间变化的结果。



(a) 不同积分时间下的测量相对误差

(a) Relative error under different integration times

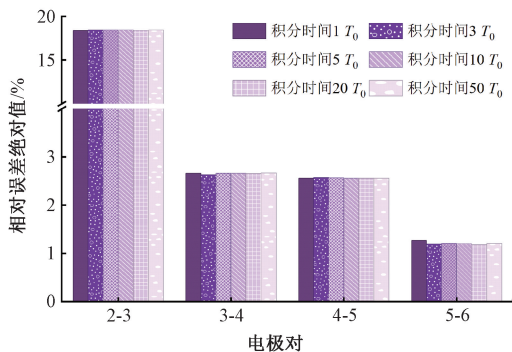


(b) 不同积分时间下的测量相对标准偏差

(b) Relative standard deviation under different integration times

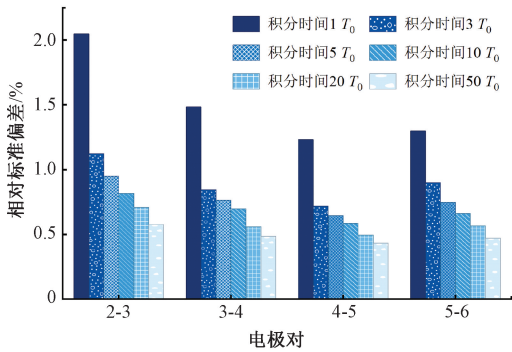
图13 15 m/s 工况下不同积分时间的测量相对误差与相对标准偏差

Fig. 13 Relative measurement error and relative standard deviation under different integration times at 15 m/s condition



(a) 不同积分时间下的测量相对误差

(a) Relative error under different integration times



(b) 不同积分时间下的测量相对标准偏差

(b) Relative standard deviation under different integration times

图 14 35 m/s 工况下不同积分时间的测量相对误差与相对标准偏差

Fig. 14 Relative measurement error and relative standard deviation under different integration times at 35 m/s condition

由图 13(a) 和 14(a) 可见,在所考察的积分时间范围内,各电极对的测速相对误差整体变化较小。即使当积分时间缩短至 1 个信号周期,对应工况下测速误差最小的电极对(即 15 m/s 工况下的电极对 4-5 与 35 m/s 工况下的电极对 5-6)的测速相对误差仍可稳定控制在 2% 以内,且两种流速工况下的变化规律未表现出明显差异。

图 13(b) 和 14(b) 所示为积分时间对测量结果稳定性的影响。当积分时间为 $1 T_0$ 时,相对标准偏差最大;随着积分时间的增加,相对标准偏差明显降低。当积分时间增至 $5 T_0$ 时,两种流速工况下的相对标准偏差均已稳定在约 1% 左右,继续延长积分时间至 $50 T_0$,对测量稳定性的改善已不明显。综合考虑测速精度、测量稳定性与动态响应能力,建议积分时间取 $5 T_0$,此时测速相对误差控制在 2% 以内,相对标准偏差约为 1%。对于对动态响应要求更高的应用场景,可在适当牺牲测量稳定性的前提下,将积分时间缩短至 $3 T_0$,以进一步提高系统的响应能力。

在传统基于直流激励的主动静电测速方法中,静电信号频率受传感器结构及流速影响,难以保持恒定,因此在互相关参数选取时需综合考虑传感器的空间滤波特性与测量速度范围^[13],选取过程较为复杂。相比之下,在本文提出的基于交变激励的主动静电测速方法中,静电信号频率由激励源主导并保持稳定,使积分时间可直接根据信号周期数进行确定,采样频率亦可根据信号特征频率进行选取,从而显著简化了互相关计算参数的选取过程,提高了测速方法在不同流速条件下的通用性与适用性。

4 结 论

本文提出了一种基于主动电离阵列式静电传感器的气流速度测量方法,并通过风洞速度测量实验研究了交变激励下阵列式静电传感器各电极的静电信号特性及其对速度测量的影响。研究表明:在交变高压激励下,虽然各检测电极输出信号的信噪比随测量距离的增加呈非线性衰减趋势,且随流速的升高而显著增强,但信号始终保持稳定的周期性特征,其主频完全由激励源决定且不随流速变化。进一步分析发现,主动电离式静电测速误差受信号衰减特性与信噪比共同影响,并基于此确定了有效速度筛选准则,即当电极对 $\text{SNR} > 5.6 \text{ dB}$ 且信号衰减率小于 1.5 时,判定测量结果有效。采用该准则可在 10~40 m/s 的宽流速范围内,将系统测速的相对误差与相对标准偏差均控制在 2% 以内。此外,得益于交变激励下静电信号的稳定周期特性,将互相关积分时间选取为 5 倍的信号周期,即可使测速结果的相对标准偏差稳定在 1% 左右。

参考文献

- [1] LI J, XU SH P, TANG ZH, et al. Electrostatic coupled capacitance sensor for gas solid flow measurement [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(21): 12807-12816.
- [2] ZHANG W B, CHENG X F, HU Y H, et al. Measurement of moisture content in a fluidized bed dryer using an electrostatic sensor array [J]. Powder Technology, 2018, 325: 49-57.
- [3] 钱相臣, 鲁云龙, 孙林锋. 基于静电与声发射传感器的气送颗粒截面分布测量[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(5): 99-109.
QIAN X CH, LU Y L, SUN L F. Cross-sectional distribution measurement of pneumatically conveyed particles using electrostatic and acoustic emission sensors [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(5): 99-109.
- [4] YAN Y, HU Y H, WANG L J, et al. Electrostatic sensors-their principles and applications [J]. Measurement, 2021, 169: 108506.
- [5] 王胜南, 许传龙, 李健, 等. 阵列式静电-电容传感器灵敏度特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9): 2122-2132.
WANG SH N, XU CH L, LI J, et al. Spatial sensitivity of electrostatic-capacitance sensor array [J]. Chinese

- Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(9): 2122-2132.
- [6] QIAN X CH, YAN Y, WU SH T, et al. Measurement of velocity and concentration profiles of pneumatically conveyed particles in a square-shaped pipe using electrostatic sensor arrays[J]. Powder Technology, 2021, 377: 693-708.
- [7] LI Y P, MENG H, WANG G Z, et al. Measurement of mass flow rates of petrochemical particles based on an electrostatic coupled capacitance sensor[J]. Sensors, 2025, 25(22): 6850.
- [8] 廉俊阳, 王浩全. 气固两相流参数检测技术研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(20): 126-131.
- LIAN J Y, WANG H Q. Research on gas-solid two-phase flow parameter detection technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(20): 126-131.
- [9] YANG Y, ZHANG Q, ZI C, et al. Monitoring of particle motions in gas-solid fluidized beds by electrostatic sensors[J]. Powder Technology, 2017, 308: 461-471.
- [10] SHI Q, ZHANG Q, HAN G D, et al. Simultaneous measurement of electrostatic charge and its effect on particle motions by electrostatic sensors array in gas-solid fluidized beds[J]. Powder Technology, 2017, 312: 29-37.
- [11] YAN Y. Continuous measurement of particulate emissions[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2005, 8(4): 35-39.
- [12] YAN Y, BYRNE B, WOODHEAD S, et al. Velocity measurement of pneumatically conveyed solids using electrodynamic sensors [J]. Measurement Science and Technology, 1995, 6(5): 515-537.
- [13] ZHANG W B, WANG CH, WANG Y L. Parameter selection in cross-correlation-based velocimetry using circular electrostatic sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(5): 1268-1275.
- [14] 万倪, 钱相臣, 闫勇. 多相流互相关测速算法综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(5): 1-11.
- WAN N, QIAN X CH, YAN Y. Review of cross-correlation velocimetry algorithms for multiphase flow measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(5): 1-11.
- [15] XU CH L, WANG SH M, YAN Y. Spatial selectivity of linear electrostatic sensor arrays for particle velocity measurement[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(1): 167-176.
- [16] 李健, 许传龙, 王式民. 静电传感器矩阵颗粒局部分均速度空间滤波测量方法[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3337-3344.
- LI J, XU CH L, WANG SH M. Local particle mean velocity measurement using electrostatic sensor matrix[J]. CIESC Journal, 2011, 62(12): 3337-3344.
- [17] 许传龙, 汤光华, 黄键, 等. 基于静电传感器空间滤波效应的颗粒速度测量[J]. 化工学报, 2007, 58(1): 67-74.
- XU CH L, TANG G H, HUANG J, et al. Solid particle velocity measurement based on spatial filtering effect of electrodynamic sensor [J]. CIESC Journal, 2007, 58(1): 67-74.
- [18] 王奇, 张文彪, 闫勇, 等. 基于谐波小波分解的静电传感器颗粒流动参数测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(1): 26-32.
- WANG Q, ZHANG W B, YAN Y, et al. Measurement of solids flow parameter using electrostatic sensor based on harmonic wavelet decomposition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(1): 26-32.
- [19] QIAN X CH, YAN Y, HUANG X B, et al. Measurement of the mass flow and velocity distributions of pulverized fuel in primary air pipes using electrostatic sensing techniques [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(5): 944-952.
- [20] XU CH L, WANG SH M, LI J, et al. Electrostatic monitoring of coal velocity and mass flowrate at a power plant[J]. Instrumentation Science & Technology, 2016, 44(4): 353-365.
- [21] 王超, 高文宾, 张靖宇. 基于静电传感器的稀相气力输送流动特性分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(9): 1320-1326.
- WANG CH, GAO W B, ZHANG J Y. Flow characteristics analysis of dilute phase pneumatic conveying based on electrostatic sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9): 1320-1326.
- [22] SHAO J Q, KRABICKA J, YAN Y. Velocity measurement of pneumatically conveyed particles using

- intrusive electrostatic sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(5): 1477-1484.
- [23] MATSUSAKA S, MARUYAMA H, MATSUYAMA T, et al. Triboelectric charging of powders: A review[J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(22): 5781-5807.
- [24] 吴洁洁, 姚军, 曹培根, 等. 颗粒形体因素对静电发生的影响[J]. 化工学报, 2013, 64(10): 3534-3541. WU J J, YAO J, CAO P G, et al. Effect of granular shape on electrostatics [J]. CIESC Journal, 2013, 64(10): 3534-3541.
- [25] HU Y H, YAN Y, QIAN X CH, et al. A comparative study of induced and transferred charges for mass flow rate measurement of pneumatically conveyed particles[J]. Powder Technology, 2019, 356: 715-725.
- [26] GAJEWSKI J B. Electrostatic nonintrusive method for measuring the electric charge, mass flow rate, and velocity of particulates in the two-phase gas-solid pipe flows—its only or as many as 50 years of historical evolution[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(5): 1418-1430.
- [27] QIAN X CH, SHI D P, YAN Y, et al. Effects of moisture content on electrostatic sensing based mass flow measurement of pneumatically conveyed particles [J]. Powder Technology, 2017, 311: 579-588.
- [28] ZHANG J Q, GUO Y J, SHEN Y. A wavelet-based method for measuring particulate velocity by an active electrostatic sensor [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(4): 1345-1351.
- [29] 刘鹏飞. 高温烟气流速测量系统关键技术的研究[D]. 南京: 东南大学, 2018. LIU P F. Key techniques research for high-temperature flue gas velocity measurement system [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [30] 李嵩. 基于气体电离的静电流速传感器的开发及其应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2022. LI S. Development and application of electrostatic velocity sensor based on gas ionization [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [31] 李良, 王超, 张文彪, 等. 气固两相流静电相关测速参数选取方法[J]. 化工学报, 2009, 60(3): 615-619. LI L, WANG CH, ZHANG W B, et al. Parameter

selection method of electrostatic correlation velocimetry for gas-solids flow [J]. CIESC Journal, 2009, 60(3): 615-619.

- [32] ADAMIAK K, ATTEN P. Simulation of corona discharge in point-plane configuration [J]. Journal of Electrostatics, 2004, 61(2): 85-98.

作者简介



王光祖, 2023 年于济南大学获得学士学位, 现于东南大学能源与环境学院攻读硕士学位, 主要研究方向为多相流测试技术。

E-mail: 220230551@seu.edu.cn

Wang Guangzu received his B. Sc. degree from the University of Jinan in 2023. He is currently pursuing his M. Sc. degree at the School of Energy and Environment, Southeast University. His main research interest includes multiphase flow measurement.



陈欣欣, 2011 年于山东理工大学获得学士学位, 2014 年于北京科技大学获得硕士学位, 现为内蒙航天动力机械测试所高级工程师, 东南大学能源与动力工程专业在读博士, 主要研究方向为航天动力试验与测试。

E-mail: 403589505@qq.com

Chen Xinxin received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2011, and his M. Sc. degree from University of Science and Technology Beijing in 2014. He is currently a senior engineer at Inner Mongolia Aerospace Power Mechanical Testing Institute. He is currently a Ph. D. candidate in Energy and Power Engineering at Southeast University. His main research interests include aerospace propulsion testing and measurement.



马利斌, 2014 年于内蒙古科技大学获得学士学位, 2017 年于内蒙古科技大学获得硕士学位, 2023 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为内蒙航天动力机械测试所工程师, 主要研究方向为固体发动机试验测试和非线性系统控制与滤波。

E-mail: malibin91@163.com

Ma Libin received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Science and Technology in 2014, his M. Sc. degree from Inner Mongolia University of Science and Technology in 2017, and his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2023. He is currently an engineer at Inner Mongolia Aerospace Power Mechanical Testing Institute. His main research interests

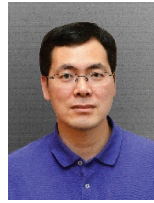
include solid rocket motor testing and nonlinear system control and filtering.



李健, 2010 年、2016 年于东南大学分别获得学士、博士学位, 现为东南大学副研究员, 主要研究方向为多相流测试技术与测试仪表。

E-mail: eelijian@seu.edu.cn

Li Jian received his B.Sc. and Ph.D. degrees both from Southeast University in 2010 and 2016, respectively. He is currently an associate researcher fellow at Southeast University. His main research interests include multiphase flow measurement technology and measuring instruments.



许传龙 (通信作者), 2001 年于东北电力大学获得学士学位, 2003 年、2006 年于东南大学分别获得硕士、博士学位, 现为东南大学能源与环境学院教授, 主要研究方向为多相流测试和燃烧诊断。

E-mail: chuanlongxu@seu.edu.cn

Xu Chuanlong (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Northeast Electric Power University in 2001, and his M.Sc. and Ph.D. degrees both from Southeast University in 2003 and 2006, respectively. He is currently a professor with the School of Energy and Environment, Southeast University. His main research interests include multiphase flow measurement and combustion diagnostics.