

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902728

平面阵列电容式固体颗粒速度测量方法研究^{*}

王睿怀¹ 高鹤明²

(1. 内蒙古建筑职业技术学院 机电与暖通工程学院 呼和浩特 010070;
2. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘 要:颗粒流动速度是反应气固两相流动状况的重要参数,提出一种全新的基于平面阵列式电容传感器的固体颗粒速度测量方法。首先利用三维电磁场仿真软件 Ansoft 对传感器建模,获取其空间轴向灵敏度的基础上,对其空间滤波特性进行理论分析,并得到了速度测量的数学关系式。在此基础上,设计了一套基于平面阵列式电容传感器测量固体颗粒速度的系统,并在重力输送实验装置上进行了实验验证。实验结果表明,颗粒流动速度 1~3 m/s 时,颗粒速度与传感器输出信号频谱宽度呈线性关系,测量相对误差低于 9%,测试系统重复性误差优于 11%。

关键词:颗粒局部平均速度;平面阵列式电容;空间滤波效应;气固两相流

中图分类号: TP391;TN06 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Solid particle velocity measurement method based on planar array capacitive sensor

Wang Ruihuai¹ Gao Heming²

(1. College of Mechanical Electrical Heating and Ventilation Engine, Inner Mongolia Technical College of Construction, Hohhot 010070, China; 2. School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract:The particle flow velocity is an important parameter of gas-solid two-phase flow. This paper presents a new method for measuring solid particle velocity based on planar array capacitive sensors. Firstly, the 3D electromagnetic field simulation software Ansoft is used to model the sensor, and the spatial axial sensitivity is obtained. Based on the distribution of the axial sensitivity, the spatial filtering characteristic of planar array capacitive sensors is investigated, and the mathematical expression of the velocity measurement is derived. Then a measurement system based on planar array capacitive sensor for measuring the velocity of solid particles is designed and experimentally evaluated on the gravity transport experimental device. The experimental results indicate that the particle velocity is linear with the spectral width of the sensor output signal when the particle flow velocity is between 1 m/s and 3 m/s. The relative error of the velocity measurement is less than 9%, and the repeatability error of the test system is within 11%.

Keywords:local average velocity of particles; planar array capacitor; spatial filtering effect; gas-solid two-phase flow

0 引 言

颗粒速度是反应气固两相流动状态的重要参数,实现速度参数的在线测量对于气固两相流的生产过程的流量计量和安全运行具有重要意义^[1-7]。根据不同的传感器测量原理,目前已有多种方法用于固相颗粒速度的测

量,如静电、多普勒、核磁共振、示踪法等^[8-16]。与之相比,电容传感器因其具有低功耗、无辐射、响应快、非侵入、以及安全可靠等特点,在速度参数测量方面具有较大的应用潜力。

近年来,国内外相关学者对电容传感器在测速方面的应用开展了大量的研究工作,主要包括电容互相关法测速和空间滤波法测速两种方法。其中空间滤波法由于

其受测量对象流动状态影响较小,受到了特别关注。其中,Hrach 等^[17-18]和 Shen 等^[19]分别设计了半环形电容传感器和圆环状电容传感器,并对两种结构电容传感器的空间滤波测速方法进行了研究,包括传感器的空间滤波效应以及速度测量的方法。但是该测量方法受制于其传感器结构的限制,无法获取管道截面局部区域的速度分布,只能得到管道截面上固体颗粒的平均速度。

针对该研究现状,本文提出一种基于新型平面阵列式电容传感器实现局部速度测量的新方法。首先采用 3D 电磁场有限元分析软件 Ansoft 建立该新型传感器的仿真模型,通过分析其轴向灵敏度分布特性和灵敏范围,并进一步从理论上推导和建立传感器输出信号与颗粒流动速度之间的定量关系式。最后,设计和只做了基于该新型平面阵列电容传感器的速度测量系统,并在重力输送装置上进行实验验证。

1 传感器结构与数学模型

1.1 平面阵列式电容传感器结构

平面阵列式电容传感器结构示意图如图 1 所示,该传感器由绝缘管道、电极阵列和屏蔽罩 3 部分构成。其中,电极阵列包括 16 个矩形检测电极,1 个矩形激励电极和两个保护电极构成。整个电极阵列安装在绝缘管道的外壁,外部被金属屏蔽罩包裹,以防止外部的电磁干扰;16 个检测电极分为两组,一组 8 个,沿管道轴向方向对称分布在环状激励电极的两侧,分别和环状激励电极构成对称电容 C_{1i} 和 C_{2i} ($i=1,2,3,\dots,8$)。根据平面电容利用“边缘电场”检测原理,管道截面将被剖分为 8 个扇形灵敏区域 S_i ($i=1,2,3,\dots,8$)。该传感器的结构参数如下,绝缘管道的内径和外径分别为 $R_1=11\text{ mm}$, $R_2=12.5\text{ mm}$,检测电极和激励电极的轴向长度 $w=10\text{ mm}$,检测电极张角 $\alpha=42^\circ$,保护电极的轴向长度 $s=5\text{ mm}$,激励电极和检测电极之间的间距 $d=1\text{ mm}$,保护电极和检测电极之间为 5 mm 。

1.2 平面阵列式电容传感器数学模型

电容传感器极片之间的电场可以作为静电场来研究,假设场域介质内没有自由电荷存在,电位和介电常数之间的关系可以用 Poisson 方程及其边界条件来描述,即:

$$\nabla \cdot [\varepsilon_0 \varepsilon_r(x, y, z) \nabla \phi(x, y, z)] = 0 \quad (1)$$

式中: $\phi(x, y, z)$ 是场域内电势分布; ε_0 是真空电容率; ε_r 是介质相对电容率分布。

根据式(1)获取电势分布函数 $\phi(x, y, z)$, 对其求取梯度可得电场强度 E 的分布,即:

$$\vec{E} = -\text{grad}\phi = -\nabla\phi \quad (2)$$

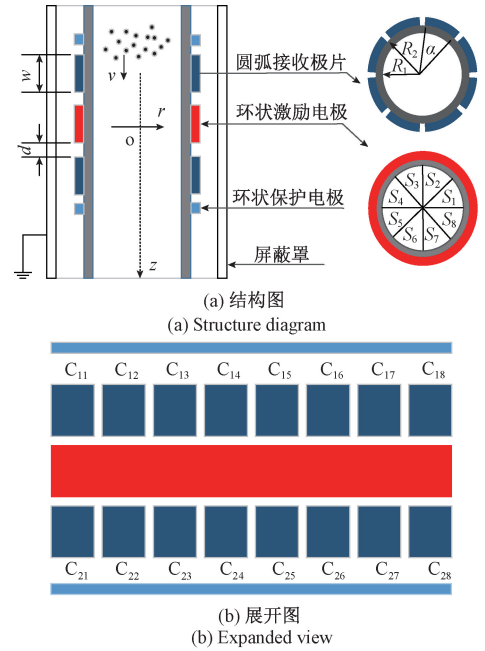


图 1 平面阵列式电容传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of planar capacitive sensor array structure

在获取场强分布函数 $E(x, y, z)$ 后,可利用高斯公式计算出检测电极上电荷量 Q 的分布:

$$Q = \int_{VOL} \rho_v dv = \oint_{\partial\Omega_1} \vec{D} \cdot d\vec{S} \quad (3)$$

最后,由电容的定义式可得到检测电容与待测物介电常数的关系式。

$$C = \frac{Q}{V_1 - V_2} = \frac{-\varepsilon_r \oint_{\partial\Omega_1} |\text{grad}\phi| \cdot d\vec{s}}{V_1 - V_2} \quad (4)$$

式中: V_1 是激励电极电压; V_2 是检测电极电压。

对于已知的传感器结构,内部电势的分布情况可由式(1)计算获得,传感器输出电容值可由式(4)得出。由于平面阵列式电容传感器数学模型较为复杂,无法获得式(1)的解析解,故本文采用有限元分析软件 ANSOFT 对传感器进行 3 维建模的方法数值求解,建立的仿真模型参数和图 1 一致。

2 颗粒速度测量原理

2.1 平面阵列式电容传感器灵敏区域

建立如图 1(a) 所示坐标系,以模型中心为原点,选定模型的不同径向位置,在图 1(a) 改变 z 坐标值,这样定义具有相同径向坐标,不同 z 坐标的轴向灵敏度^[20]为

$$s_{ij}(z) = \frac{C_{ij}(z) - C_{el}}{C_{eh} - C_{el}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $s_{ij}(z)$ 是电容 C_{ij} 的轴向灵敏度; C_{el} 空管电容值; C_{eh} 是满管电容值。

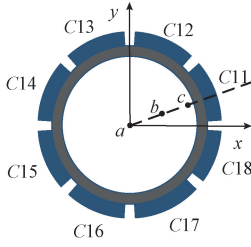


图2 管道内典型轴向流线位置示意图

Fig. 2 Typical axial flow line position within the pipe

当颗粒在管道内沿轴向流动时,会引起传感器输出信号的变化,该变化值可以由传感器的轴向灵敏度表示。考虑到平面阵列式电容传感器结构的对称性,本文选择管道截面区域 S_1 为代表进行灵敏度分布的研究。在 S_1 区域选取3个径向位置 a, b, c ($\theta = 22.5^\circ, r = 0, 5, 10$ mm) 表征传感器轴向灵敏度特性,如图2所示。分析灵敏度时选取靠近 S_1 区域的电极对 C_{11} 和 C_{21} 进行分析。通过ANSOFT软件进行仿真计算,可以获得不同径向位置上沿轴向的灵敏度分布函数,结果如图3所示。

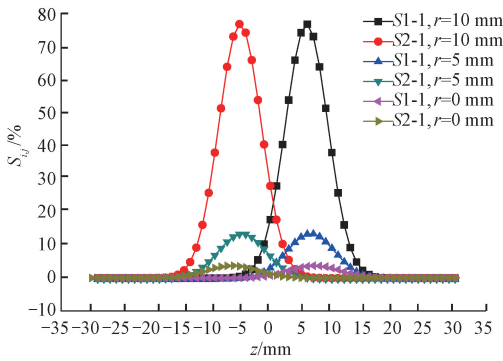


图3 管道内典型位置轴向灵敏度变化曲线

Fig. 3 Vertical sensitivity change curve of typical position in pipeline

图3为电极对 C_{11} 和 C_{21} 的轴向灵敏度变化曲线。可以看出,灵敏度沿轴向近似于高斯函数分布,在电极间距中心处达到峰值;电极对 C_{11} 和 C_{21} 的轴向灵敏度分布规律完全相同,整体上呈现双峰变化规律,峰值点位置相差 $w = 10$ mm,这是由传感器轴向布置的距离决定的。此外,在灵敏区域内,靠近内壁处灵敏度变化较大,而管道中心和远离电极处,灵敏度变化较小,可以认为对传感器输出几乎没有影响,即平面阵列式电容传感器具有局部敏感的特性,其敏感区主要集中在靠近电极的附近区域。

2.2 空间滤波测速原理

由图3轴向灵敏度分布特性可知,在固定径向和周向位置 (r, θ) 处,灵敏度沿轴向分布类似于高斯曲线分布,可表示为:

$$s(z) = ae^{-b(z-c)^2} + de^{-g(z-m)^2} - Z/2 \leq z \leq Z/2 \quad (6)$$

式中: Z 为传感器灵敏空间轴向长度。

轴向灵敏度 $s(z)$ 的傅里叶变换表示出传感器的轴向方向的空间滤波特性,对式(6)进行傅里叶变换,可得:

$$S(f_z) = \int s(z) \cdot \exp(-j2\pi f_z z) \cdot dz =$$

$$\frac{a\sqrt{\pi}}{\sqrt{b}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 f_z^2}{b}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_z c) + \frac{d\sqrt{\pi}}{\sqrt{g}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 f_z^2}{g}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_z m) \quad (7)$$

式中: $S(f_z)$ 是平面阵列式电容传感器空间滤波特性传递函数; f_z 是空间频率。对于结构参数给定的传感器,在不同的径向和周向位置处,拟合系数 a, b, c, d, g 和 m 的数值各不相同,但是平面阵列式电容传感器的空间滤波特性可以用如式(7)所示的公式统一描述。

在固定的径向位置处,让固相颗粒以一定速度沿轴向方向运动,这样由固相介质分布不均引起的灵敏度变化可以看成是由单位冲击信号 $\delta(z - vt)$ 产生的。传感器轴向灵敏度的单位冲击响应可近似表示为:

$$h(t) = \int \delta(z - vt) \cdot s(z) \cdot dz =$$

$$\int S(f_z) \cdot \exp(-j2\pi f_z vt) \cdot df_z \quad (8)$$

因为 $h(t)$ 的傅里叶变换 $H(f)$ 可以用空间滤波特性传递函数表示,所以时间频率响应特性传递函数幅频特性 $|H(f)|$ 可近似表示:

$$|H(f)| = \int h(t) \cdot \exp(-j2\pi ft) \cdot dt =$$

$$\frac{a\sqrt{\pi}}{v\sqrt{b}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{bv^2}\right) + \frac{d\sqrt{\pi}}{v\sqrt{g}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{gv^2}\right) \quad (9)$$

由式(9)可知,平面阵列式电容传感器在时间频域上具有低通滤波的频谱特性。这是因为当固相颗粒流动引起电容变化时,传感器会在一定的空间权函数下对这种“流动噪声”进行平均,这种噪声并不能完全被传感器接收。因此可以通过分析传感器输出信号的频率特性获取速度信息。

在频谱特性曲线中,当幅频特性衰减为0时,即式(9)导数为0时,存在:

$$\frac{a}{\sqrt{b}} \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{bv^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{2(\pi f)^2}{bv^2}\right) + \frac{c}{\sqrt{d}} \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{dv^2}\right) \cdot$$

$$(1 - \frac{2(\pi f)^2}{\omega^2}) = 0 \tag{10}$$

如果在径向位置 r 处引入结构特征常数 g_s , 上述方程的解可表示为:

$$v/f_m = g_s \tag{11}$$

式中: g_s 为传感器结构特征参数,该值为一常量,与传感器结构参数有关; f_m 为电容输出信号频谱的截止频率,即频带宽度。

在实际测量过程中,由于颗粒在管道内的流动情况非常复杂,考虑到管道内颗粒速度分布、粒径大小、颗粒荷电对电容的影响以及传感器结构因素的影响等,因此引入无量纲校正系数 k ,式(11)可以改为:

$$v = kf_m \tag{12}$$

式中: k 值由实验标定。由式(12)可见,获得截止频率 f_m ,即可计算出颗粒流动的平均速度 v 。

平面阵列式电容传感器实际应用时,通过的颗粒流是随机分布的,因此每个脉冲间隔并非固定不变,输出信号是一系列等宽度高斯脉冲的叠加。颗粒流脉冲信号可表示为:

$$s(t) = sij(t) + sij(t + T1) + sij(t + T2) + sij(t + T3) + \cdots \tag{13}$$

根据傅里叶变换时移特性可得:

$$S(\omega) = H(\omega) \cdot (1 + e^{-j\omega T1} + e^{-j\omega T2} + e^{-j\omega T3} + \cdots) \tag{14}$$

由式(14)可知,单颗粒脉冲信号对连续变化信号的幅值进行调制,即单颗粒脉冲信号的频谱可以由连续变化信号频谱的包络线所表示。

3 实验研究与结果分析

3.1 实验系统

平面阵列式电容传感器空间滤波颗粒速度测量系统主要由平面阵列式电容传感器、PCAP01 电容数字转换电路和计算机数据采集和处理系统组成。电极采用厚度为 0.1 mm 薄铜片,安装在 PVC 管道外侧。电容数字转换电路放置在抗电磁干扰的金属盒内,输出信号通过 PICOPROG 仿真器连接到计算机中。平面阵列式电容传感器的结构参数与图 1 参数一致,测试系统信号采样频率 $f=2.38\text{ kHz}$,采样时间 $t=30\text{ s}$,采用图形化编程软件 LabVIEW 实现数据的分析、处理和显示。

空间滤波法测量颗粒流动速度方法中,通过测量输出电容信号频谱宽度获取速度信息。从理论分析可知,平面阵列式电容传感器输出信号中不仅包含速度的频谱信息,同时含有直流低频信息,称为基频信息,主要是由传感器空管电容值 C_{el} 引起,基频信息叠加在包含速度信息的频谱中,在信号处理过程中会导致频谱宽度发生

偏移,从而影响速度测量的准确性。因此,本文将对空管、满管电容值进行标定,并将实验数据做如式(5)归一化电容值处理。

本文采用重力输送颗粒流实验装置,并将管道 45°布置,完成对局部颗粒速度的测量,如图 4 所示。实验过程中,将颗粒物放入漏斗,使其在重力作用下由静止沿管道壁流下,忽略颗粒与管道壁之间的摩擦力,仅考虑重力作用时,颗粒到达传感器时的理论速度可以按照下式计算获得。

$$v = \sqrt{2al} = \sqrt{2g\cos45^\circ l} \tag{15}$$

式中: v 是理论计算速度; a 是加速度; l 是漏斗到传感器之间的距离; g 是重力加速度, $g=9.8\text{ m/s}^2$ 。本文将该理论速度作为参考速度。实验中通过夹装管道的方式改变传感器与漏斗之间的距离,从而实现不同速度的测量。本文设置了 3 个距离进行输送,具体参数如表 1 所示。实验中输送的颗粒为树脂颗粒,其特性参数如表 2 所示。

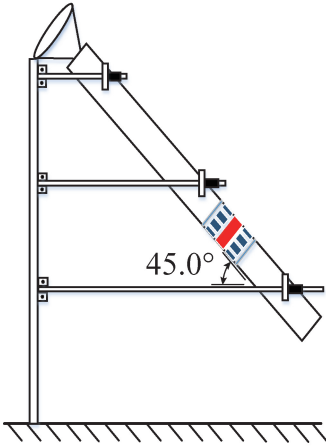


图 4 管道 45°安装时重力输送装置
Fig. 4 Gravity-fed flow rig

表 1 管道 45°安装时的距离及参考速度
Table 1 Distance and reference speed during 45° installation

L/m	0.07	0.29	0.65
$v_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.985	2	3

表 2 输送物料特性参数
Table 2 conveying material characteristic parameters

材料	平均直径	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	相对介电常数/ ($\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$)
树脂	5	1410	8.95

3.2 结果与分析

将管道倾斜 45°布置,可以使颗粒沿管壁流动,从而保证颗粒在传感器的敏感区域内流动。在本实验中,通

过调节管道的位置使颗粒流经 C_{11} 和 C_{21} 的敏感区域。图 5 所示为绝管管道倾斜 45° 时,树脂颗粒从距传感器不同距离落下时电极对 C_{11} 的输出信号。图 6 所示为对应图 5 输出电容信号的频谱特性。由图 5 可以看出,电极对 C_{11} 输出信号在时域上呈现不规则的脉冲,主要是因为颗粒在管道内流动时分布不均造成。当单个颗粒沿轴向经过传感器敏感区域时,电极对的输出信号近似为一个连续变化的高斯脉冲,这主要是由平面电容利用“边缘电场”检测的敏感机理决定的,如图 3 的灵敏度曲线所示。但是,当多颗粒流经传感器时,各颗粒在电极对敏感空间内沿轴向穿过的位置不相同,且通过的颗粒个数也是随机分布的,因此各脉冲间隔呈现不规则分布。

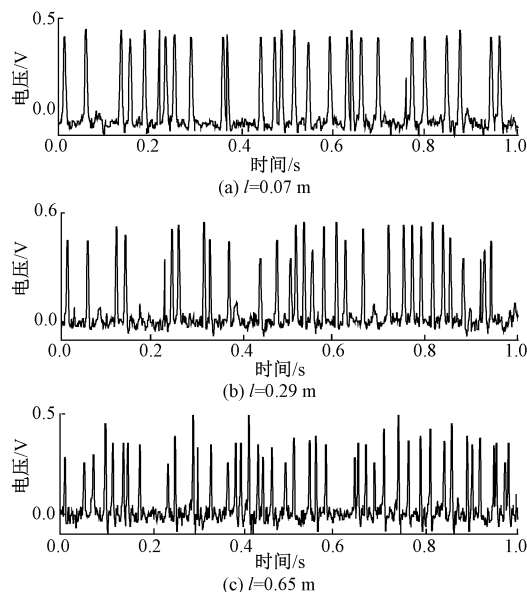


图 5 管道 45° 安装时电容 C_{11} 输出信号

Fig. 5 Output signals of capacitor C_{11} in inline pipeline of 45°

此外,由于管道振动、电磁干扰、测量电路内部热噪声等因素的影响,导致输出信号中含有大量的噪声。为了有效克服上述因素的影响,提高速度测量的精度和稳定性,本文采用了多项式拟合,实现对频谱特征趋势项的提取,如图 6(d) 所示。由图 6 可以看出,颗粒速度增大,电容输出信号的频谱宽度明显增加,但是幅值降低,这与式(9)是吻合的。此外,参考速度与频带宽度基本呈线性关系,如图 7 所示,该实验结果与理论部分获取的速度计算式(12)吻合,因此证明了理论分析的正确性。利用该线性关系通过频带宽度可以计算得到测量速度。

为了评价该测量方法的准确度,取 10 次连续测量的平均值为测量速度,与参考速度比较如图 8 所示。根据图 8 所示,测量速度均低于参考速度,这主要是由于颗粒沿管道壁下落过程中会发生碰撞和摩擦,而参考速度则忽略了该影响。为了量化分析测量速度的准确性,计算

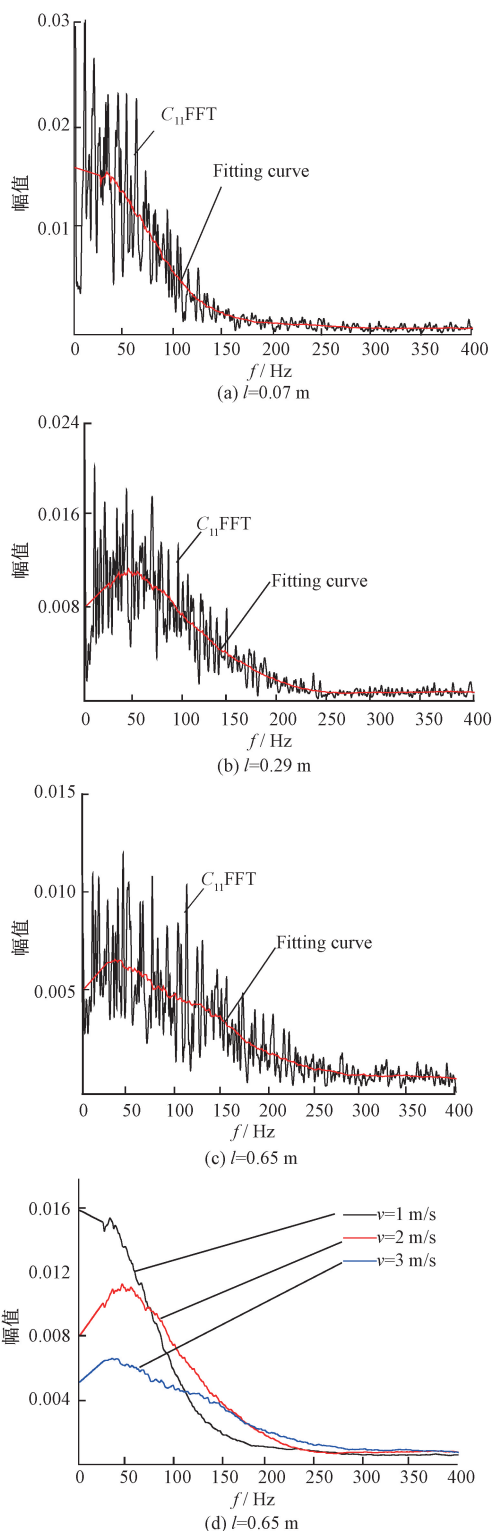


图 6 管道 45° 时电容 C_{11} 输出信号的频谱特性

Fig. 6 Power spectral characteristics of output signals of capacitor C_{11}

测量速度和参考速度的相对误差,在参考速度 $1 \sim 3$ m/s 范围内,相对误差为 $-9\% \sim -2.3\%$ 。因此该测量方法具

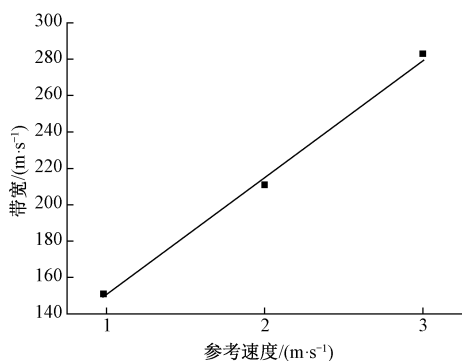


图 7 信号频带宽度与参考速度的关系

Fig. 7 The relationship between signal bandwidth and reference velocity

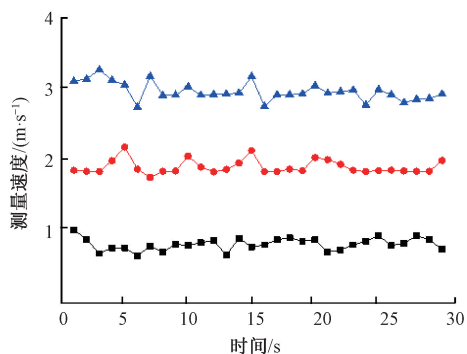


图 9 树脂颗粒在不同距离落下连续速度测量

Fig. 9 Consecutive velocity measurements of resin particles in incline pipeline of 45°

有较好的测量精度,根据实际工程中气固两相流测量小于 10% 的误差要求,其能够满足实际工程的需要,具有较好的应用前景。

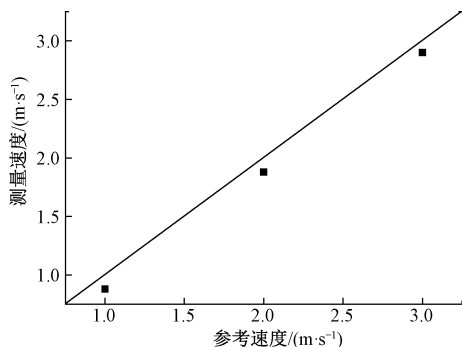


图 8 测量速度与参考速度的关系

Fig. 8 The relationship between measurement velocity and reference velocity

图 9 所示为树脂颗粒在 45° 管道内流动时,3 种输送距离下电极对 C_{11} 速度连续测量结果。可见,在相同距离下,速度测量结果一致性较好,树脂颗粒速度测量的重复性误差在 4.2%~10.3%。产生该误差的原因在于每次试验中颗粒流动会发生随机的碰撞,导致其实际运动时每次的速度都会发生变化。因此,该测量方法具有良好的可行性,能够适应实际测量的需要。

4 结 论

本文针对气固两相流动中固体颗粒速度测量的实际需求,提出一种新型的基于平面阵列式电容传感器的速度测量方法。通过建立传感器的三维仿真模型,获取其轴向灵敏度分布,进而从理论上推导和建立了基于该传感器空间滤波效应的测速数学模型。在此基础上,设计了一套基于平面阵列式电容传感器的速度测量系统,并

在搭建的重力输送装置上进行了实验验证。实验结果表明颗粒流动速度在 1~3 m/s 时,颗粒速度与传感器输出信号频谱宽度呈线性关系,测量相对误差低于 9%,测试系统重复性误差优于 11%,初步证明了平面阵列式电容传感器实现局部固体颗粒速度测量的可行性,其具有良好的工程应用价值。但是限于实验条件的约束,本文中的参考速度采用理论计算的方法获取,今后的研究工作将增加高速摄影的方法获取参考速度,以对本文提出测量方法的精度做进一步研究。

参考文献

- [1] CONG X, GUO X, GONG X, et al. Investigations of pulverized coal pneumatic conveying using CO_2 and air[J]. Powder Technology, 2012, 219:135-142.
- [2] WANG C, ZHANG J, GAO W, et al. Cross-correlation focus method with an electrostatic sensor array for local particle velocity measurement in dilute gas-solid two-phase flow[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26:115301.
- [3] LIANG C, XIE X, XU P, et al. Investigation of influence of coal properties on dense-phase pneumatic conveying at high pressure[J]. Particuology, 2012, 10(3):310-316.
- [4] LU Z X, YANG G, WANG Z S. Velocity measurement for flow particles by using spatial filtering technique based on sensor array[J]. Advanced Materials Research, 2012, 508:263-266.
- [5] HOU P, YANG H, LI R, et al. Measurement of velocity field distribution of complex particle flow by spatial filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26:23-29.
- [6] 温宗周, 袁妮妮, 刘超, 等. 电波流速仪信号处理技术研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(12):128-144.
WEN Z ZH, YUAN N N, LIU CH, et al. Wave velocity signal processing technology research [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(12):128-144.

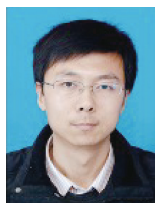
- [7] YAN F, RINOSHIKA A. Characteristics of particle velocity and concentration in a horizontal self-excited gas-solid two-phase pipe flow of using soft fins [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012 (41): 68-76.
- [8] 郭森, 胡永辉, 闫勇, 等. 基于互相关的堆积物料中声波传播时间测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12):6-14.
GUO M, HU Y H, YAN Y, et al. Measurement of sound travel time in stored bulk material using cross-correlation techniques[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 6-14.
- [9] 付宇, 殷逸冰, 左洪福. 航空发动机尾气静电监测及其信号特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 160-168.
FU Y, YIN Y B, ZUO H F. Aero-engine exhaust electrostatic monitoring and signal characteristics analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2):160-168.
- [10] YE J M, ZHANG T, ZHOU L P. Spatial sensitivity characteristis of inner and outer ring capacitance sensor[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41 (12): 1498-1504.
- [11] XU C, LI J, WANG S. A spatial filtering velocimeter for solid particle velocity measurement based on linear electrostatic sensor array [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2012, 26(4):68-78.
- [12] LI J, XU C, WANG S. Spatial filtering characteristics of electrostatic sensor matrix for local velocity measurement of pneumatically conveyed particles [J]. Measurement, 2014, 53(5):194-205.
- [13] HRACH D, FUCHS A. Investigation of field electrode geometries in capacitive flow measurement [C]. IEEE Sensors conference, 2008, 17-20.
- [14] ISMAIL B, AHMED W. Innovative techniques for two-phase flow measurements [J]. Recent Patents on Electrical Engineering, 2008(1):1-13.
- [15] KLINZING G E, BASHA O M. A correlation for particle velocities in pneumatic conveying [J]. Powder Technology, 2017(310):201-204.
- [16] ZHENG Y, LIU Q. Review of techniques for the mass flow rate measurement of pneumatically conveyed solids [J]. Measurement, 2011, 44(4):589-604.
- [17] HRACH D, FUCHS A, ZANG H. Capacitive flowmeter for gas-solids flow applications exploiting spatial frequency[C]. Sensors Applications Symposium, IET, 2008:26-30.
- [18] HRACH D, FUCHS A. Investigation of field electrode geometries in capacitive flow measurement[C]. Sensors, IEEE, 2008:17-20.
- [19] SHEN D, YANG G, WANG Y, et al. Design of particle velocity measurement system based on spatial filtering effect of capacitive sensor [C]. Control and Decision Conference, IEEE, 2014:4132-4136.
- [20] GAO H M, DENG H W, LIU J. Particle velocity measurement using linear capacitive sensor matrix [C]. 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), IEEE, 2017.

作者简介



王睿怀, 2009 年于北京建筑工程学院获得硕士学位, 现为内蒙古建筑职业技术学院高级工程师, 主要研究方向为供热、供燃气、通风与空调系统及其自动化。

E-mail:wangruihuai@163.com



Wang Ruihuai received his M. Sc. degree from Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture in 2009. Now he is a senior engineer in Inner Mongolia Technical College of Construction. His main research interest includes automation of HVAC System.

高鹤明, 2012 年于东南大学获得博士学位, 现为西安理工大学副教授, 主要研究方向为层析成像与多相流测试。

E-mail:gaoheming@126.com

Gao Heming received his Ph. D. degree from Southeast University in 2012. Now he is an associate professor in Xi'an University of Technology. His main research interest includes process tomography and measurement of multiphase flow.