

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007051

金属颗粒的电容式速度测量方法研究*

高鹤明,周弘林,宋晓文,闵莹星,赵恒
(西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安 710048)

摘要:针对金属材料在静电场中呈现出的特殊性,设计了一种用于检测管道中金属颗粒速度的电容式传感器。首先,基于多电极理论建立了电容传感器测量金属物质的数学模型,在此基础上,使用 COMSOL Multiphysics 有限元分析工具建立了传感器三维仿真模型,并对其空间灵敏度分布特性进行了分析。然后,基于该传感器的空间滤波效应对金属颗粒速度测量原理进行了理论分析,建立了传感器输出信号功率谱截止频率和金属颗粒速度之间的关系式。最后,开发了基于三角电极电容传感器和电容数字转换芯片 Pcap01 的金属颗粒速度测量系统,并在重力输送装置进行了验证及分析。实验结果表明,该测量方法具有良好的可行性,在 2.44~5.34 m/s 的速度范围内,测量速度的重复性误差小于 4%。

关键词:三角电极电容式传感器;有限元分析;灵敏场分布特性;空间滤波测速

中图分类号: TB934 TH73 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on the capacitive velocity measurement method of metal particles

Gao Heming, Zhou Honglin, Song Xiaowen, Min Yingxing, Zhao Heng

(School of Mechanical and Precision Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In view of the special characteristics of metal materials in electrostatic field, a novel electrode capacitive sensor is designed to detect the flow velocity of metal particles in the pipeline. Firstly, based on the multi-electrode theory, a mathematical model for measuring metallic substance with capacitive sensor is formulated. On this basis, a 3D simulation model of the sensor is established by utilizing the COMSOL Multiphysics finite element analysis tool. The spatial sensitivity distribution characteristics of the sensor is analyzed. Then, based on the spatial filtering effect of the sensor, the principle of metal particle velocity measurement is introduced. The relationship between the cut-off frequency of the sensor output signal power spectrum and the metal particle velocity is established. Finally, a specific measurement system based on the triangular electrode capacitance sensor and the capacitance digital conversion chip Pcap01 is further developed. Experiments are verified and analyzed on a gravity transmission device. Theoretical and experimental results show that the measurement method has good repeatability. In the range of 2.44 ~ 5.34 m/s, the repeatability error of the measurement velocity is less than 4%.

Keywords: triangular electrode capacitive sensor; finite element analysis; sensitive field distribution characteristics; spatial filtering

0 引言

作为机械制造业中最基本的加工方法之一,切削加工在国民经济中占有重要地位。金属切削过程中产生的金属颗粒是机床运行状况和产品质量信息的重要载体。根据生产过程中的加工条件,材料特性等因

素不同,金属颗粒在形状,尺寸分布表现出十分复杂的特征^[1]。采用集中金属颗粒排放系统可以有效防止刀具损坏,确保工件表面质量,同时保证操作者的安全和机床的正常运行^[2]。在常用的金属颗粒输送方式中,管式金属颗粒输送机有着广泛的应用^[3]。通过检测管道内金属颗粒的流动速度,可以了解其流动状态并有效防止输送过程中管道堵塞现象的发生,从而实现机

收稿日期:2020-10-28 Received Date: 2020-10-28

* 基金项目:国家自然科学基金(51775429)项目资助

床加工过程中金属颗粒排放的无人化、高效化、自动化处理。

目前,国内外对于管道内金属颗粒流动速度测量方法的研究还比较少,特别是能够应用于工业机床加工领域的更是稀缺。因此,国内外的科研机构 and 学者对包括声学法、光学法、磁学法、电学法等各种测量方法在管内金属颗粒流动测量方面开展了积极的探索和研究^[4-10]。其中,声学法容易受到温度、外界振动的影响。光学法对环境要求高,系统复杂。磁学法具有结构复杂,安装不方便的缺点。而电学法具有传感器结构简单、非侵入、能够适应各种复杂工业环境等特点,被广泛应用于金属颗粒物的检测^[11-13]。在众多电学检测方法中,电磁法在对金属检测方面应用最广。但是其存在传感器结构复杂,对金属材料流动速度不敏感的缺点。而电学检测方法中的电容检测方法目前在绝缘材料检测方面应用非常广,可以实现介电常数、浓度、速度等参数的测量。而在金属材料检测方面,由于电容传感器具有对介电常数比较敏感的特点,目前主要被用于检测油液中是否含有金属颗粒,而对金属颗粒流动速度检测方面,目前还是空白。这主要是由于电容法对于金属颗粒检测的理论还不够完善,这也成为阻碍其进一步发展的障碍。但是已有的研究成果表明电容传感器具有对金属材料灵敏度高的特点,结合其空间滤波特性,对于实现金属颗粒速度参数的检测具有巨大的研究价值和潜力^[14-20]。

综合以上分析,本文提出一种基于三角电极电容式传感器实现管内金属颗粒流速测量的新方法。首先进一步完善电容传感器实现金属颗粒物测量的理论模型,进而利用有限元仿真软件建立该新型传感器的三维仿真模型,通过分析其灵敏度分布特点,进而得到其实现速度测量的数学模型。最后构建基于该新型传感器的金属颗粒流动速度测量系统,并在重力输送实验装置上进行实验验证和分析。

1 三角电极电容式传感器

三角电极电容式传感器结构如图 1 所示。三角电极电容式传感器由绝缘管道、测量电极对、屏蔽电极和屏蔽罩组成。测量电极对由一个三角形激励电极和一个三角形感应电极组成,两电极所采用的“面对面”布置方式如图 1(b)所示。环状屏蔽电极布置在测量电极两侧。所有电极均紧贴于绝缘管道外壁且由屏蔽罩覆盖,管道与屏蔽罩之间填充有屏蔽材料。同时,为了减小两三角形测量电极轴向间隔处边缘电场的干扰,在其 x 轴正方向(轴向坐标 $\theta=0$)上设置矩形屏蔽条。在该设计中,组成传感器的绝缘管道是由聚氯乙烯制成的,电极和屏蔽罩都是由铜箔制成的。

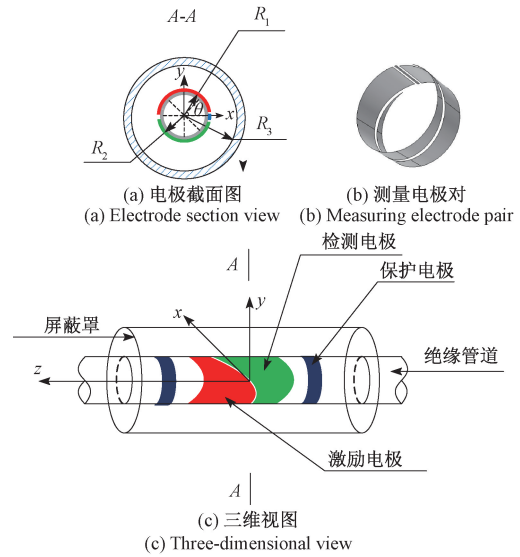


图 1 传感器结构

Fig. 1 Schematic model of the sensor

传感器的几何参数及材料特性主要包括:测量电极宽度 w_1 ,屏蔽电极宽度 w_2 ,测量电极与屏蔽电极间距 d ,激励电极与检测电极间距 d_w ,管道介电常数 ϵ_p ,屏蔽材料介电常数 ϵ_s ,管道内径 R_1 ,管道外径 R_2 ,屏蔽罩半径 R_3 ,屏蔽罩轴向长度 L_p 。根据实验要求,选定参数如下:

$$w_1 = 20 \text{ mm}, w_2 = 10 \text{ mm}, d = 1 \text{ mm}, \epsilon_p = 4, \epsilon_s = 1, d_w = 1 \text{ mm}, R_1 = 8 \text{ mm}, R_2 = 9 \text{ mm}, R_3 = 15 \text{ mm}, L_p = 10R_1。$$

2 数学模型的建立

金属材料对电容式传感器输出信号影响的数学模型是基于多电极理论推导出来的。金属材料中的自由电子在原电场的作用下定向移动,直到其内部无静电场,此时颗粒可以被看作是一额外电极^[21-22]。图 2 是传感器的截面和简化模型,根据金属颗粒对电场的影响,将传感器的整个敏感场划分为受影响区域 E_1 和未受影响区域 E_2 ,两部分对应电容分别表示为 C_1' 和 C_2 。

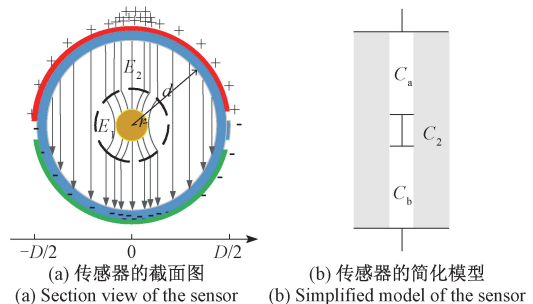


图 2 电容传感器测量金属颗粒的原理

Fig. 2 Capacitive sensor for measuring metal particle

当引入金属颗粒时,受影响区域电荷被重新分配,但总量不变。电极上的电荷分布不再均匀,距离电极越近的金属颗粒表面电荷密度越高,且颗粒周围的部分电场以颗粒为对称中心保持中心对称。变化后的表面电荷密度 σ' 是金属颗粒半径 r_p 及其所处位置 (r, θ, z) 的函数。假设激励电极和检测电极相距 D ,金属颗粒与激励电极相距 d ,可以获得两电极和金属颗粒表面之间的电位差。受金属颗粒影响电容 C' 可用式(1)表示:

$$C' = C'_1 + C_2 = \frac{1}{\frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_b}} + C_2 = \frac{Q_1}{\int_d \frac{\sigma'_a(r, \theta, z, r_p)}{\varepsilon} dl + \int_{D-2r-d} \frac{\sigma'_a(r, \theta, z, r_p)}{\varepsilon} dl} + \frac{Q_2}{\int_D \frac{\sigma_0}{\varepsilon} dl} \quad (1)$$

式中: C_a 和 C_b 为金属颗粒分别与两电极之间的电容; σ'_a 和 σ'_b 为激励和检测电极受金属颗粒影响而改变后的表面电荷密度; σ_0 为未受影响的电极的表面电荷密度; dl 为沿积分路径的微分位移矢量。

应用多电极理论,将处在电场中的金属颗粒看作是一个额外电极,被金属颗粒影响的这一部分电容可以看作金属颗粒分别与两个电极之间的电容串联之后的结果。引入金属颗粒后,可以发现激励电极与检测电极之间的等效距离减小,电荷分布改变,导致两电极之间的等效电位降低,电容值根据某一特定因子增加。电容增加的幅度主要取决于金属颗粒的体积与原空间体积的比率以及颗粒所在的空间位置,而不是材料的相对介电常数。在实际中,传感器敏感空间中电场的实际分布情况是极为复杂的,很难获得式(1)解析解,所以借助有限元分析软件对电场进行计算是十分必要的。

本文采用 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件建立传感器的三维模型,传感器的几何参数与第1节中的描述保持一致,对新型电容传感器的灵敏度分布进行研究。

3 灵敏度分布特性

为了更好的评估金属颗粒空间位置改变对三角电极电容式传感器输出信号的影响,将该传感器的空间灵敏度定义为:

$$S(r, \theta, z) = \frac{C(r, \theta, z) - C_{el}}{C_{sh} - C_{el}} \mu \quad (2)$$

式中: S 表示灵敏度; C 是金属颗粒在某一确定位置处对应传感器的输出电容值; C_{sh} 和 C_{el} 是管道内介质分别为铁和空气时对应的电容值; μ 是校正因子,取管内敏感空间体积与颗粒体积的体积之比。

为了简化分析,根据三角电极电容传感器的结构特

点,可以通过分析颗粒在图3所示的几个典型位置上沿轴向运动时传感器的灵敏度变化情况,得到颗粒在传感器三维空间中不同位置处的灵敏度分布规律。

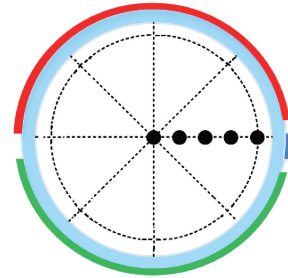


图3 典型的流线型位置

Fig. 3 The typical streamline position

选取 x 轴正方向(即周向位置 $\theta=0$)为代表分析不同径向位置处的轴向灵敏度变化,分别让金属颗粒在固定径向位置($r=0, 2, 4, 5, 6$ mm)上仅在管道轴线方向上运动,图4表示对应位置处灵敏度沿轴向的变化规律。可以看出:颗粒所处的空间位置不同时,传感器的轴向灵敏度分布表现为不同特征参数的高斯脉冲。通过高斯函数拟合,任意轴向位置上灵敏度的分布都可以采用式(3)表示。

$$S(z) = a \exp(-b(z-c)^2) \quad (3)$$

式中: a, b, c 代表高斯函数的拟合系数,其和该轴向灵敏度分布的径向位置有关。

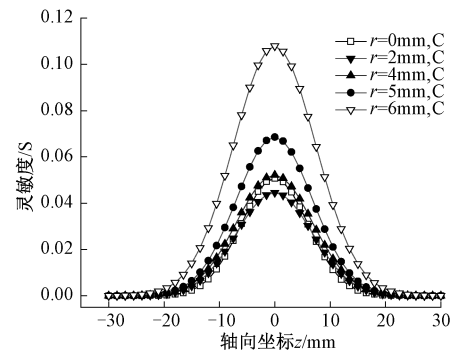


图4 在不同径向位置上,灵敏度轴向分布曲线($\theta=0$)

Fig. 4 Axial distribution curve of sensitivity at different radial positions ($\theta=0$)

4 速度测量

4.1 空间滤波测量原理

在固定的径向位置处,当金属颗粒以一定速度沿轴向运动时,其引起的灵敏度变化可看成是由单位冲击信号 $\delta(z-ut)$ 产生的。传感器轴向灵敏度的单位冲击响应

$h(t)$ 可以表示为:

$$h(t) = \int \delta(z - vt) \cdot S(z) \cdot dz \quad (4)$$

因为单位冲击响应 $h(t)$ 的 Fourier 变换 $H(f)$ 可以用空间频率响应表示,所以时间频率响应特性传递函数幅频特性 $|H(f)|$ 可表示为:

$$|H(f)| = \int h(t) \cdot \exp(-j2\pi ft) \cdot dt = \frac{a\sqrt{\pi}}{v\sqrt{b}} \cdot \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{bv^2}\right) \quad (5)$$

由上式可知,该三角电极电容传感器在时间频域上具有低通滤波的频谱特性。这是因为当金属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捕捉。因此可以通过提取传感器输出信号的频带特性获取速度信息。

在频谱特性曲线中,当幅频特性衰减为 0 时,即上式导数为 0 时,存在:

$$\frac{a}{\sqrt{b}} \exp\left(-\frac{\pi^2 f^2}{bv^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{2(\pi f)^2}{bv^2}\right) = 0 \quad (6)$$

可以看出,在径向位置 r 处,上述方程的解可表示为 $v/f_m = g_s$ (7)

式中: g_s 为结构特征常数;与拟合参数 a 、 b 、 c 有关,其由传感器结构参数决定。在这里, g_s 等于电极宽度 w_1 ; f_m 为电容输出信号频谱上极值点(拐点)所对应的频率;可以为峰值频率 f_{\max} 或截止频率 f_{\min} 。由于在实际信号分析中峰值频率很难准确获取,本文选取截止频率 f_{\min} 求取速度。此外,由于在实际测量过程中颗粒分布,流动状态不稳定的影响,引入一无量纲比例系数 k 进行修正,速度 v 与截止频率 f_{\min} 之间的关系表示为

$$v = k \cdot g_s \cdot f_{\min} \quad (8)$$

式中:测量电极宽度 w_1 为 20 mm,系数 k 由实验确定,取值为 1.74。通过对传感器输出信号进行傅里叶变换,提取其功率谱密度曲线的截止频率 f_{\min} ,最终确定颗粒流动速度 v 。

4.2 实验验证

用于测量金属颗粒速度的实验装置如图 5 所示。该测量系统主要由三角电极电容传感器,信号采集电路和计算机组成。被测颗粒在重力作用下从 PVC 管道下落,流经传感器的敏感空间。实验中通过调节漏斗位置和管道长度可以改变颗粒经过传感器时的速度和下落位置。信号采集电路是由基于 PCA01 电容数字转换芯片及其接口电路实现的。当金属颗粒经过传感器的灵敏空间时,包含颗粒流动状态信息的电容信号通过同轴电缆传输到信号采集电路,由信号采集电路将采集到的信号发送给计算机进行相关处理,系统的采样频率设为 1 kHz。

传感器探头的内径为 13 mm,轴向长度为 110 mm,传感器的其他参数与仿真模型中的参数一致。

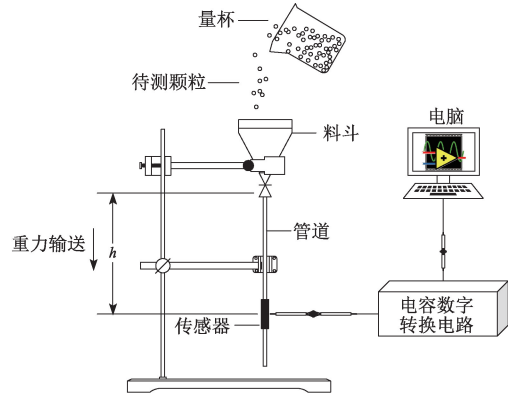


图 5 实验装置图

Fig. 5 Experimental apparatus for test

在该研究中,对传感器的输出信号进行快速傅里叶变换并进行平方运算后得到信号的功率谱密度函数(PSD),以获得单位频率的功率分布。颗粒在开始运动位置到传感器中心位置的垂直距离 h 之间做自由落体运动。以此时的自由落体速度为参考速度,在理论上可以通过 $(2gh)^{1/2}$ 得到。由于颗粒在下落过程中的碰撞和空气阻力等因素,颗粒的实际速度与参考速度略有不同。表 1 记录了垂直安装管道时流经管道的颗粒的高度以及相应的参考速度。在实验中使用直径分别为 4、5 和 6 mm 的 3 种不同尺寸的钢颗粒作为输送材料,颗粒密度为 628 kg/m^3 。

表 1 管道垂直安装时传感器位置高度及参考速度

Table 1 Sensor position height and reference velocity for vertical pipe installation

| 下落高度 h/m | 0.305 | 0.605 | 0.955 | 1.105 | 1.455 |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 参考速度 $v_r/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 2.445 | 3.444 | 4.326 | 4.654 | 5.340 |

5 实验结果与讨论

5.1 输出信号及频谱分析

通过实验验证对该系统速度测量结果的准确性及重复性进行量化评估。图 6 为直径为 6 mm 的钢颗粒从 5 个不同的高度下落时,在一秒内采集到原始输出信号 C ,图 7 为其对应得到的频谱(0~250 Hz)。传感器的输出信号是由一组幅度和相位随机变化的脉冲叠加而成的,这主要是因为颗粒在管道中流动时位置和速度的随机分布引起的。由于电容传感器灵敏场的“软场效应”和多颗粒的抵消效应,相同高度下的不同颗粒引起的信号幅度波动差异较大。

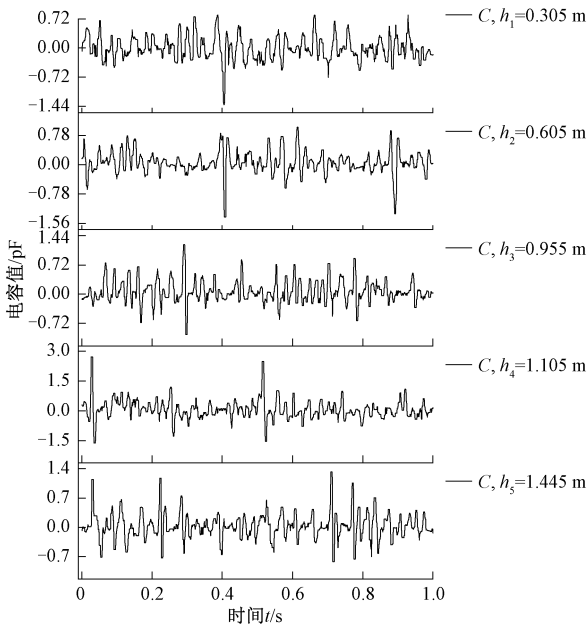


图6 不同高度下的直径6 mm小铁球的原始输出电容信号C

Fig. 6 The raw output signals of C for 6 mm diameter iron particles at different heights

由于电容传感器的结构尺寸和几何形状有限,以及管道中颗粒的流动特性,输出信号的频谱表现出明显的窄带滤波特性,如图7所示。通过对信号频谱进行平滑处理并提取平滑后曲线的截止频率,可以在一定程度上提高频域特征参数提取的准确度,降低频域特征参数提取对速度测量带来的误差。实验结果表明,直径6 mm钢颗粒的下落高度从0.305 m增加到1.455 m,输出信号的峰值频率从71 Hz增加到134 Hz,相应的测量速度为2.47 m/s增加到4.66 m/s。显然该实验结果和前面的理论分析是吻合的,即电容传感器输出信号的截止频率和金属颗粒速度之间具有对应关系,速度的增加会引起电容信号截止频率的增加。

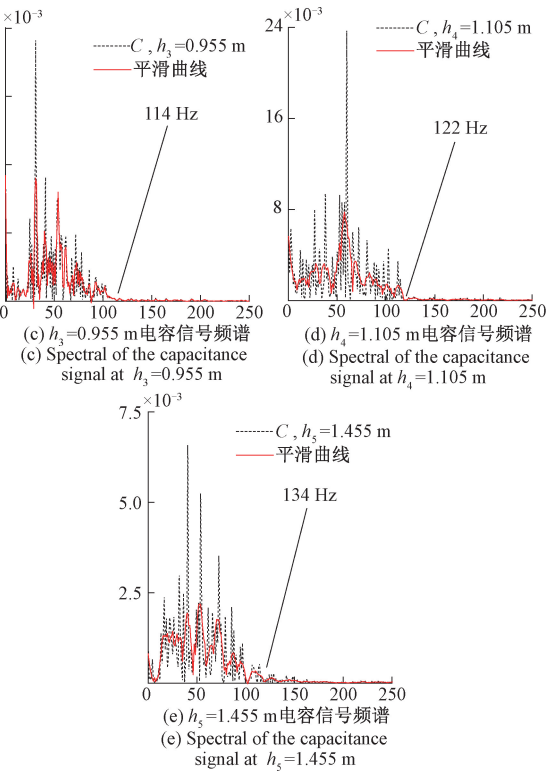
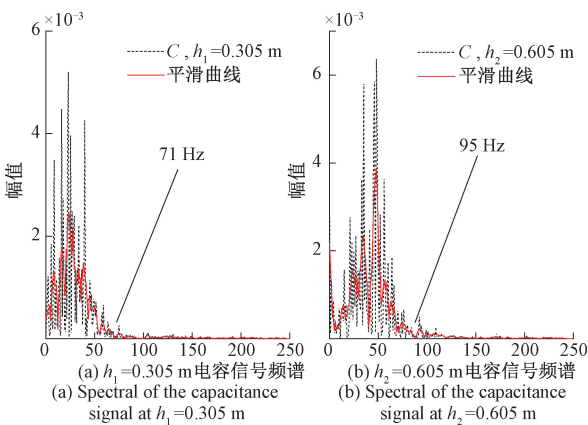


图7 对应于图6的差分输出电容信号的频谱
Fig. 7 Spectral of the differential output capacitance signals corresponding to figure 6.

5.2 测量准确性分析

图8和图9分别为不同尺寸颗粒的测量速度 v_s 与参考速度 v_s 之间的直接比较结果及对应的相对误差。为了消除试验中各种随机误差干扰,这里的测量速度是连续30次测量的平均值。

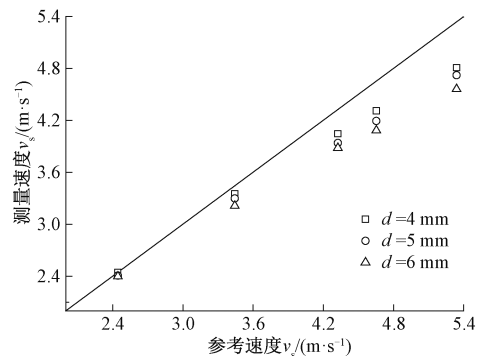


图8 不同颗粒的测量速度和参考速度之间的比较
Fig. 8 Comparison between the measured velocity and the reference velocity for different particles.

如图 8 所示,随着金属颗粒下落高度的增加,测量速度线性增加,该实验结果验证了前面理论分析的正确性,即电容传感器输出信号的截止频率和金属颗粒速度之间具有线性关系。对于实验中选择的 3 种尺寸的钢颗粒,测量的绝对误差及相对误差均随着下降高度的增加而增加。在 5.34 m/s 的参考速度下,测量速度的绝对误差最大为 -0.78 m/s。以直径 4 mm 的颗粒为例,当下落高度从 0.305 m 增加到 1.445 m,测量相对误差从 -0.04% 增加到 -9.97%。颗粒下落高度的增加会引起颗粒与颗粒,颗粒和管壁之间的碰撞和摩擦更加强烈,导致颗粒的下落速度降低。换言之参考速度是大于颗粒的实际速度的,因此测量速度应该比参考的自由落体速度更接近真实的颗粒流速。

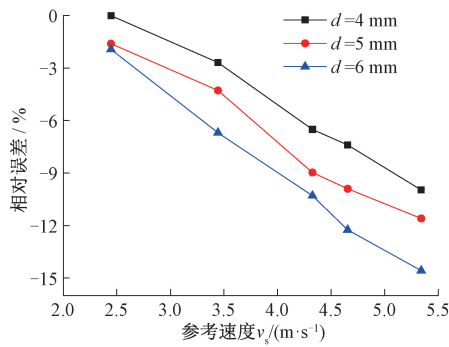
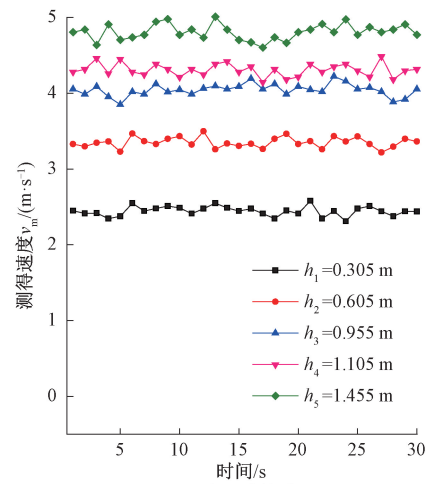


图 9 测量速度相对于参考速度的相对误差

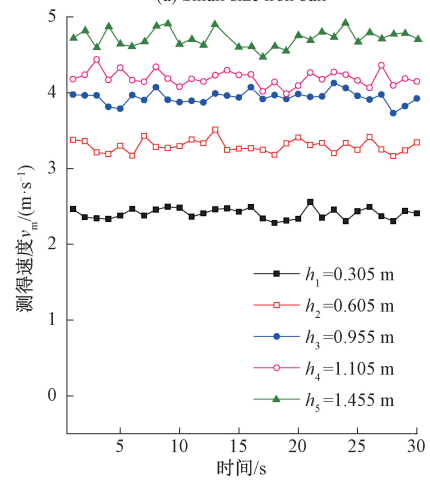
Fig. 9 Relative error of the particle velocity with reference to the reference velocity.

5.3 重复性分析

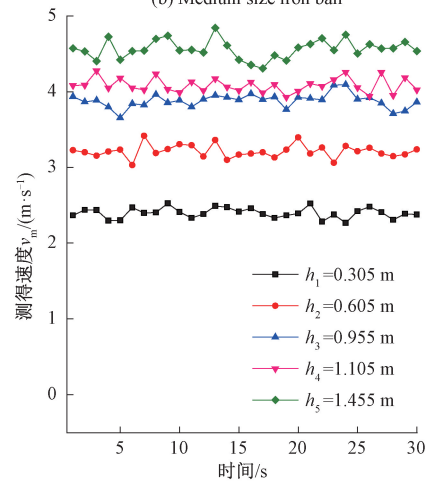
图 10 为不同高度下不同尺寸颗粒的连续速度测量结果。实验结果表明:连续测量时,钢颗粒的测量速度是在一定范围内小幅度波动的,且满足正态分布,系统的速度测量结果是可再现的。随着下落高度增加,颗粒间的碰撞摩擦增多,颗粒与管壁间的摩擦碰撞也会增加,颗粒流动状态越不稳定,从而导致测量速度波动越大。对于相同的下落高度,不同颗粒尺寸的测量速度略有差异但波动范围保持一致,表明颗粒尺寸对流动速度的影响有限。在给定的实验条件下,连续测量获得的测量速度的相对标准偏差 < 4%。随着颗粒速度的增加,其所受到的空气阻力及在流动过程中产生的碰撞摩擦增多,使得颗粒流动状态更加复杂,从而对颗粒的实际速度产生了复杂随机的影响。因此,在该试验装置上进行的颗粒输送实验,颗粒下落高度的增加会影响测量系统的可重复性。



(a) 小尺寸铁球
(a) Small size iron ball



(b) 中尺寸铁球
(b) Medium size iron ball



(c) 大尺寸铁球
(c) Large size iron ball

图 10 不同高度下不同颗粒的连续速度测量结果
Fig. 10 The continuous velocity measurement results of different particles at different heights

6 结 论

本文设计了一种三角电极电容式传感器,首先建立了基于多电极理论的电容传感器测量金属物质的数学模型,并采用有限元法分析了传感器的空间灵敏度分布特性,通过高斯函数拟合该灵敏度分布,从而进一步获得基于该新型传感器空间滤波效应的速度测量数学模型,建立了输出信号截止频率与颗粒速度之间的关系。通过构建基于该新型传感器的测量系统和重力输送实验装置,实验结果表明该测量方法具有良好的准确性和重复性,在 2.44~5.34 m/s 的速度范围内,3 种不同尺寸的小铁球连续测量结果的相对标准偏差均<4%。通过本文的研究工作证实了电容传感器实现金属颗粒速度测量的可行性,从而为金属材料的速度测量提供了新的途径和手段。

参考文献

- [1] SHAW M C, COOKSON J O. Metal cutting principles[J]. Tribology International, 1985, 18(1): 55-56.
- [2] KULKARNI H, DABHADE V V. Green machining of powder-metallurgy-steels (PMS): An overview [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 44(8): 1-18.
- [3] 史康云, 马进峰, 刘永坤. 机械加工车间排屑方式概述[J]. 企业技术开发, 2011, 30(20): 101-102.
- SHI K Y, MA J F, LIU Y K. Overview of chip removal methods in machining workshop [J]. Technological Development of Enterprise, 2011, 30(20): 101-102.
- [4] EL-Hag A H, SAKER Y A, SHURRAB I Y. Online oil condition monitoring using a partial-discharge signal[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1288-1289.
- [5] LI M Q, ZHAO K, SONG Y X, et al. Microfluidic capacitance sensor for detecting metal wear debris in lubrication oil [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(3): 42-46.
- [6] MILLER J L, KITAJEVICH D. In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment [C]. Aerospace Conference Proceedings, 2000 IEEE, 2000: 49-56.
- [7] MURALI S, JAGTIANI A V, XIA X, et al. A microfluidic coulter counting device for metal wear detection in lubrication oil [J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(1): 016105.
- [8] 史皓天, 张洪朋, 王文琪, 等. 一种液压油磨粒检测新方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(9): 44-51.
- SHI H T, ZHANG H M, WANG W Q, et al. Research on a novel method for detection of wear debris in hydraulic oil [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(9): 44-51.
- [9] 白晨朝, 张洪朋, 曾霖, 等. 双螺线圈式液压油微污染物检测传感器[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(6): 16-22.
- BAI CH CH, ZHANG H P, ZENG L, et al. Hydraulic oil micro contaminant detection sensor based on double solenoid[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(6): 16-22.
- [10] 王睿怀, 高鹤明. 平面阵列电容式固体颗粒速度测量方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(5): 133-139.
- WANG R H, GAO H M. Solid particle velocity measurement method based on planar array capacitive sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5): 133-139.
- [11] RAUSCHER M, TREMMEL A, SCHARDT, et al. Non-dispersive infrared sensor for online condition monitoring of gearbox oil [J]. Sensors (Basel), 2017, 17(2): 399.
- [12] SUN J, YAN Y. Non-intrusive measurement and hydrodynamics characterization of gas-solid fluidized beds: A review [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27: 112001.
- [13] ZHANG H, LIN Z, TENG H, et al. A novel on-chip impedance sensor for the detection of particle contamination in Hydraulic oil [J]. Micromachines, 2017, 8(8): 249.
- [14] 李文涛, 叶俊. 气/固两相流螺旋式电容传感器的仿真设计 [J]. 仪表技术与传感器, 2013, (10): 8-10+13.
- LI W T, YE J. Simulation design of gas/solid two-phase flow spiral capacitance sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, (10): 8-10+13.
- [15] 吴新杰, 陈跃宁, 石玉珠, 等. 空间滤波和独立成分分析在速度测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 68-69.
- WU X J, CHEN Y N, SHI Y ZH, et al. Measuring solid velocity using spatial filter and independent component analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 68-69.
- [16] 许传龙, 赵延军, 杨道业, 等. 静电传感器空间滤波效应及频率响应特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006, 36: 556-561.
- XU CH L, ZHAO Y J, YANG D Y, et al. Spatial filtering effect and frequency response characteristics of

- electrostatic sensors [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2006, 36: 556-561.
- [17] 吴新杰, 石玉珠, 陈跃宁, 等. P 基于独立成分分析 (ICA) 处理两相流信号 [J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(3): 221-223.
- WU X J, SHI Y ZH, CHEN Y N, et al. Processing signals of two-phase flow based on independent component analysis (ICA) [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(3): 221-223.
- [18] YANG D, XU X. Twin-array capacitance sensor for multi-parameter measurements of multiphase flow [J]. *Particuology*, 2015, 22(5): 163-176.
- [19] WU X, CUI C, HU S, et al. The velocity measurement of two-phase flow based on particle swarm optimization algorithm and nonlinear blind source separation [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2012, 20(2): 346-351.
- [20] 王晓蕾, 阚哲, 王龙业, 等. 基于静电传感器空间滤波法测量固相速度 [J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2012, 32(3): 70-73+79.
- WANG X L, KAN ZH, WANG L Y, et al. Measurement of solid phase velocity based on electrostatic sensor spatial filtering method [J]. *Journal of Liaoning University of Petroleum & Chemical Technology*, 2012, 32: 70-73+79.
- [21] GAO H M, MIN Y X, LONG H, et al. Metal particles velocity measurement based on a novel structure of

differential capacitance sensor [C]. 2019 14th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2019: 861-867.

- [22] FEYNMAN R P, LEIGHTON R B, SANDS M L. *The feynman lecture on physics* [M]. United States: Addison Wesley Longman, 1963.

作者简介



周弘林, 2019 年于平顶山学院获得学士学位, 现为西安理工大学硕士研究生, 主要研究方向为多相流测试技术。

E-mail: 1056698810@qq.com

Zhou Honglin received her B. Sc. degree from Pingdingshan University in 2019. She is currently a master student at Xi'an University of Technology. Her main research interest is measurement of multiphase flow.



高鹤明 (通信作者), 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 (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southeast University in 2012. He is currently an associate professor at Xi'an University of Technology. His research interest includes process tomography and measurement of multiphase flow.