

气固两相流参数检测技术研究^{*}

廉俊阳 王浩全

(中北大学 信息与通信工程学院 太原 030051)

摘 要: 气固两相流参数检测普遍应用于工业发展中,其参数的实时监测对生产效益与环境保护起决定作用。基于气固两相流实验平台,有限元分析了不同风速下静电传感器的灵敏度特性;将采集的静电信号进行特征值提取,结合最小二乘法对其线性拟合分析,提出了一种静电信号特征量与粉尘颗粒浓度的数学模型;最后通过相对误差分析加以验证。实验结果表明,静电信号均方根值与颗粒浓度更具相关性,相对误差控制在 0.5%~1.24%极小范围内,证实了该数学模型的可靠性,为气固两相流参数检测技术提供了新思路。

关键词: 气固两相流;静电传感器;特征值提取;高次线性拟合;数学模型

中图分类号: TB937 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research on gas-solid two-phase flow parameter detection technology

Lian Junyang Wang Haoquan

(School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Gas-solid two-phase flow parameter detection is widely used in industrial development, and the real-time monitoring of its parameters plays a decisive role in production efficiency and environmental protection. Based on the gas-solid two-phase flow experiment platform, this paper analyzes the sensitivity characteristics of the electrostatic sensor under different wind speeds by finite element; extracts the characteristic value of the collected electrostatic signal, combines the linear fitting analysis with the least square method, and proposes an electrostatic signal the mathematical model of characteristic quantity and dust particle concentration; finally verified by relative error analysis. The experimental results show that the root mean square value of the electrostatic signal is more related to the particle concentration, and the relative error is controlled within a very small range of 0.5% to 1.24%, which confirms the reliability of the mathematical model and is a gas-solid two-phase flow parameter detection technology Provides new ideas.

Keywords: gas-solid two-phase flow; electrostatic sensor; eigenvalue extraction; high-order linear fitting; mathematical model

0 引 言

气固两相流参数检测早已普遍实行在现代工业发展中,其参数的监测直接影响工业生产系统的稳定性,对提高生产效率、减少资源浪费有重要意义。比如在火力发电厂中,炉膛内的颗粒浓度过高或过低时,均会使内壁燃烧温度不平衡,导致材料燃烧不充分,继而引发安全问题。因此,合理的控制输送材料颗粒的质量流量是关键^[1-3]。

眼观国内外信号检测研究领域,李通等^[4]基于静电感应原理测量了管道内介质,得出静电信号与介质浓度呈正相关的数学关系;Tajdari等^[5]研究了静电传感器灵敏度特

性,对传感器输出信号进行了理论分析;王奇^[6]基于COMSOL软件建立了环式静电传感器模型,得出了内部静电场及空间灵敏度的分布特性;封文轩等^[7]基于融合传感器设计了气固两相流参数检测系统,实现了流体参数的快速检测;李鹏等^[8]研发了一种能够实现气固两相流多参数在线计量的实时监测系统。

本文通过分析固体质量流量的影响因子和环形静电传感器的输出信号特性,对不同颗粒浓度下的静电信号进行采集并进行特征值提取与拟合分析,最终提出颗粒浓度与静电信号特征量之间的一种数学模型。最后,通过验证模型,并与其他特征值进行相对误差分析,加以证明该数学模型的可靠性。

收稿日期:2021-07-12

^{*} 基金项目:山西省回国留学人员科研项目(2017-089)、山西自然科学基金(201801D121160)、生物医学成像与影像大数据山西省重点实验室开放基金项目资助

1 理论分析

1.1 粉尘质量流量检测原理

在气固两相流过程中,粉尘的质量流量直接影响着燃煤发电效率,而质量流量测量的关键参数是粉尘颗粒的移动速度与粉尘颗粒的浓度^[9-10]。根据粉尘颗粒经过输送管道时的瞬时质量流量关系表达式:

$$\varphi_M = SC_k V_0 \rho \quad (1)$$

其中, φ_M 为瞬时质量流量, S 为管道纵向横截面积, C_s 为固体颗粒的浓度, V_0 为颗粒移动速度, ρ 为颗粒实际密度值。当粉尘流动一定时间时,通过积分得该时间段内粉尘质量流量表达式:

$$F_M = \int_{t_0}^t F_M dt \quad (2)$$

其中, F_M 为一定时间内的粉尘质量流量, t_0 与 t 分别为起始计算时间与截止计算时间。

1.2 粉尘颗粒浓度数学模型

粉尘颗粒在管道内流动是一个随机过程,在管道内不同的特定空间区域均有着相应的颗粒体积总量,该区域下的颗粒体积总量除以该区域总体积即得特定区域颗粒体积浓度关系式:

$$P_s = \frac{\sum_{i=1}^n V_{s,i}}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

其中, V_0 为颗粒所在选定空间总体积, $V_{s,i}$ 为第 i 个颗粒体积, n 为选定空间内粉尘颗粒总数。由式(3)可知,不同材料的粉尘颗粒体积 $V_{s,i}$ 直接影响特定空间内颗粒体积浓度大小。

1.3 静电信号产生原理

粉尘颗粒输送过程中,颗粒之间碰撞和管道接触面受到的摩擦会导致颗粒表面发生电子转移,而感应电荷的多少取决于颗粒之间的摩擦、碰撞次数与相互接触的有效区域面积,而碰撞次数也被特定空间颗粒浓度大小所影响。粉尘没有开始输送时颗粒自身带电量可看作 0,当粉尘开始输送时,颗粒之间有了摩擦碰撞并逐渐靠近电极感应区域,此时颗粒带电量与颗粒之间的摩擦、碰撞次数满足函数关系表达式:

$$q = q_\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right) \right] \quad (4)$$

其中, q 与 q_∞ 分别为静电感应电荷量与感应最大电荷量, n 与 n_0 分别为颗粒摩擦、碰撞次数与松弛因子。由式(4)可知,随着颗粒摩擦、碰撞次数不断增加,粉尘所带电荷量就会越多,同时电极感应到的电荷量也会随之增大。

1.4 静电传感器感应原理

气力输送系统管道内安置有由电极、隔离层两部分构成的环形静电传感器^[11],其等效三维模型如图1所示。

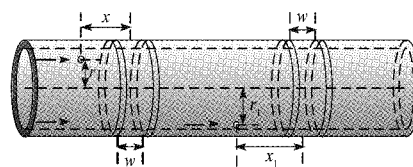


图1 静电传感器等效模型

根据带电粒子经传感器电极的数学关系可推出电极感应电荷静态特性表达式:

$$q(r, w, x) = A(r, w) e^{[k(r, w)x^2]} \quad (5)$$

其中, q 是电极感应电荷量, x 和 x_1 表示粒子到电极直线距离, w 和 r 分别表示电极宽度和粒子到管道中心轴线的距离。当带电颗粒逐渐靠近电极有效感应范围时,电极会逐步感应到相应电荷量,感应电荷数取决于通过电极与电极表面积的通量密度,根据三维空间静电场满足的泊松方程^[12-13],得电极感应空间区域:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) = -\rho \quad (6)$$

其中, φ 、 ρ 、 ϵ 分别为电势、带电粒子空间电荷密度及介电常数。在三维静电场中,传感器电通量 D 、电场强度 E 及电势 $\nabla \varphi$ 满足比例关系式:

$$D = \epsilon E = -\epsilon \nabla \varphi \quad (7)$$

遵循高斯定律,传感器电极感应电荷量 q :

$$q = -a \iint_s \epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial p} ds \quad (8)$$

其中, q 为电极感应电荷量, a 表示电极, s 表示电极包围的空间闭合曲面, p 为空间闭合曲面任意位置法向量。传感器所在静电场能量表达式:

$$W(\varphi) = \frac{\sum_{b=1}^N \int_{H^b} \epsilon \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) dH}{2} \quad (9)$$

其中, H 表示三维空间区域, H^b 表示任意单元的空间区域, N 表示网格划分单元总数。

1.5 静电传感器输出信号特性分析

为研究颗粒速度对静电信号的产生是否有影响^[14-15],本文基于气固两相流实验平台,根据静电传感器各个部分的实际测量参数,利用 Ansys 软件对静电传感器进行了重建。仿真过程如下:

1) 设置其边界条件:管长 48 cm;管道内外径分别为 4.85 cm 与 5.7 cm;电极与隔离层宽度分别为 0.5 cm 与 0.3 cm;带电粒子半径 0.1 mm。

2) 材料选取:管道与电极取不锈钢材质;隔离层取高频线路板材;粒子采用陶瓷粉颗粒。

3) 添加激励:管道设置 GND;粒子带电量 10^{-15} C。

4) 将其求解域划分为若干个连续单元进行有限元分析,重建传感器模型如图2所示。

设定同种颗粒一定体积浓度为 C ,将颗粒移动时间 t

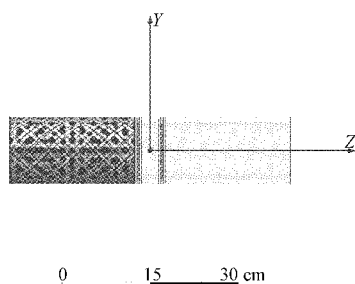


图 2 静电传感器模型

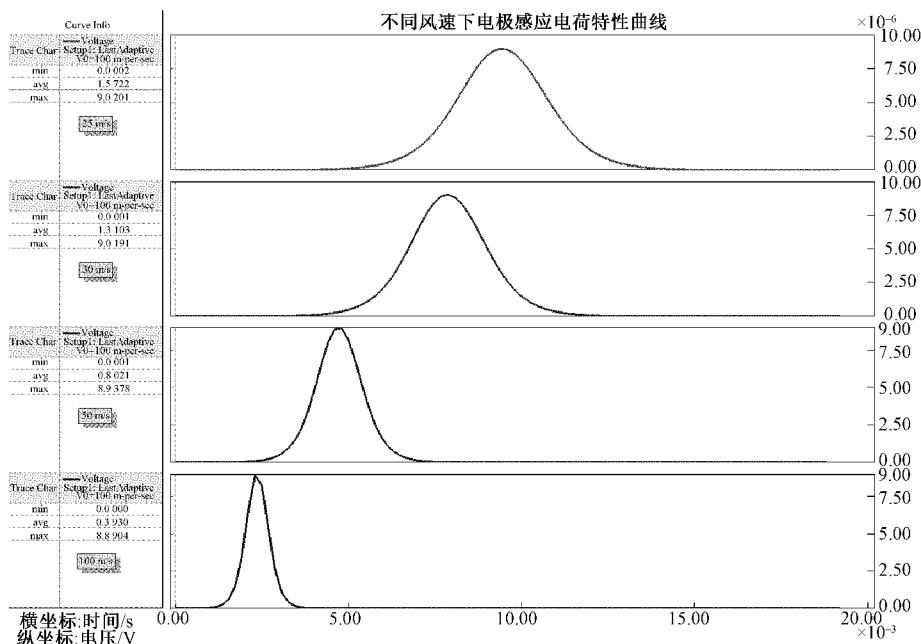


图 3 静电传感器输出特性曲线

时间内电极感应电荷量越容易达到饱和状态。由此分析可得出不同速度对应频率响应曲线如图 4 所示。

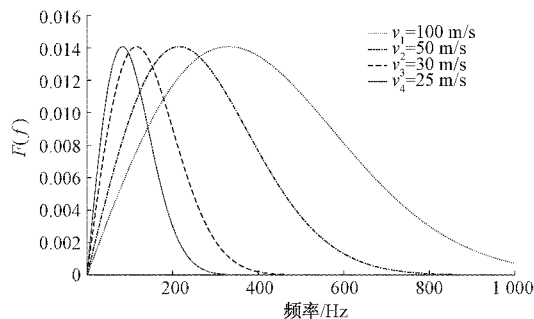


图 4 不同速度下频率响应曲线

如图 4 所示，一定颗粒体积浓度下，当颗粒沿传感器中心轴移动时，颗粒速度越快，其频带越宽，继而推出传感器频率特性由颗粒移动速度所决定。

综上所述，不同颗粒速度并没有改变感应电荷量的多少；接下来通过具体实验，研究颗粒体积浓度与静电信号是否存在一定的数学关系。

作为分析变量，设置风速 25、30、50 和 100 m/s 四个速度值，截止时间 $t_L = 0.0192$ s，过 0.000 192 s 记录一次扫描点，收敛误差调至 0.1。颗粒经传感器时，传感器输出特性曲线如图 3 所示。

如图 3 所示，横、纵坐标分别表示颗粒移动时间与感应电压幅值；由上至下 4 条曲线分别对应风速为 25、30、50 和 100 m/s。当移动颗粒离电极越近时，电极感应电荷灵敏度越高；传感器输出电压信号只有 μV 级，电压峰值最高可达 $9.02 \mu\text{V}$ ；一定体积浓度条件下，风速(颗粒速度)越大，单位

2 实验结果与分析

2.1 静电信号采集

首先将准备好的陶瓷粉末以不同浓度筛选至给料器中，设定鼓风机风速为 25 m/s，利用数据采集卡采集静电信号，采样频率达 25 kHz，采样点数为 5 000。经多次筛选验证，记录了 6 组不同颗粒浓度的实验数据，颗粒浓度大小依次为 0.211、0.247、0.319、0.417、0.564、0.691 kg/m^3 ，再将采集的数据通过 MATLAB 绘制成波形研究其信号特征，有效静电信号波形如图 5 所示。根据傅里叶变换分析静电信号的频域特性：

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt \quad (10)$$

如图 5(a)所示，信号在第 2 000~3 000 个采样点之间有明显波形变化，且波形起伏随粉尘颗粒浓度的增大而增大，当粉尘颗粒浓度为 0.691 kg/m^3 时，信号幅值接近 0.2 V。如图 5(b)所示，6 组静电信号频率均集中在 2 000 Hz 左右，且幅度随浓度增大而增大。

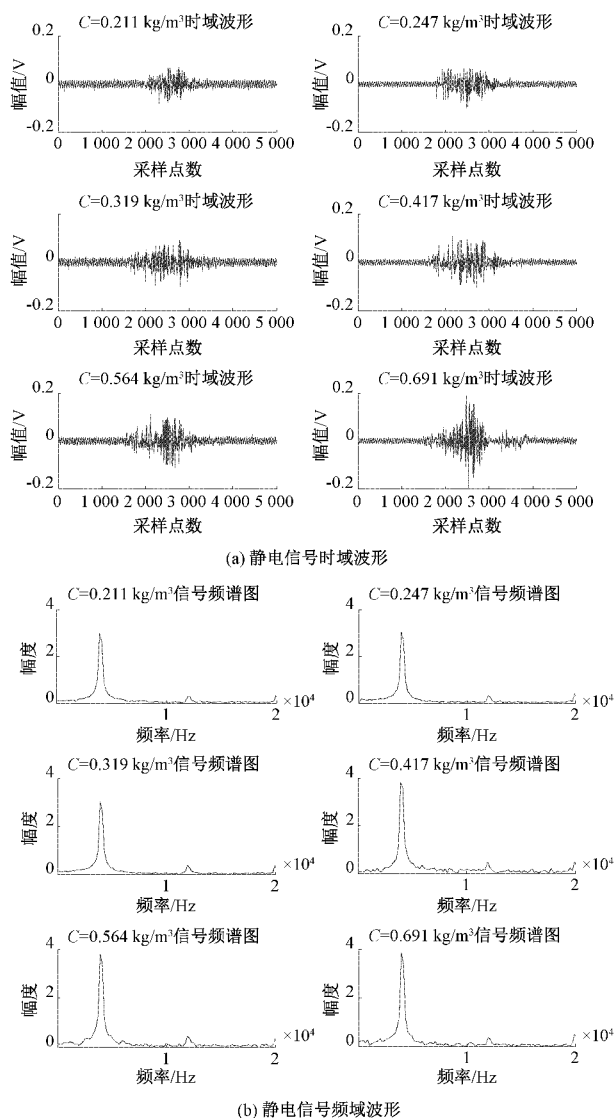


图5 静电信号时域与频域波形

综上所述,采集到的静电信号在时域与频域上初步反映出颗粒浓度大小与静电信号幅值存在一种正相关的数学关系;也验证了颗粒浓度大小直接影响特定空间体积内颗粒碰撞次数,而碰撞次数又进一步影响电极感应电荷量的基本原理;初步确定了本6组实验数据符合理论要求,能够作为建立数学模型的必要研究条件。

2.2 静电信号的特征值提取与分析

为进一步研究静电信号与颗粒浓度的数学关系,本文针对该6组实验数据进行了特征值提取,选取了极具针对性的均方根值(RMS)、方差(ANOV)、平均幅值(AVG)与峰值(PRDV)4种特征量作为研究对象,并引入最小二乘法(ordinary least squares)对实验数据进行多次线性拟合分析,具体步骤如下。

1)根据所测6组实验数据,计算不同粉尘颗粒浓度下的静电信号特征值。静电信号的均方根函数表达式如下:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (11)$$

方差函数表达式如下:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (12)$$

平均幅值函数表达式如下:

$$|\bar{x}| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i| \quad (13)$$

峰值函数表达式如下:

$$X_p = \max\{|x_i|\} \quad (14)$$

结合不同颗粒浓度值,将计算得出的不同特征值记录,并绘制特征值分析表如表1所示。

表1 静电信号特征值分析表

浓度/ (kg·m ⁻³)	均方 根值/V	方差/ V	平均 幅值/V	峰值/ V
0.211	0.013 5	0.000 1	0.009 1	0.078 8
0.247	0.016 1	0.000 2	0.009 9	0.098 5
0.319	0.018 1	0.000 3	0.010 7	0.103 3
0.417	0.018 9	0.000 3	0.012 3	0.107 9
0.564	0.020 3	0.000 4	0.012 3	0.113 5
0.691	0.025 2	0.000 6	0.013 1	0.200 6

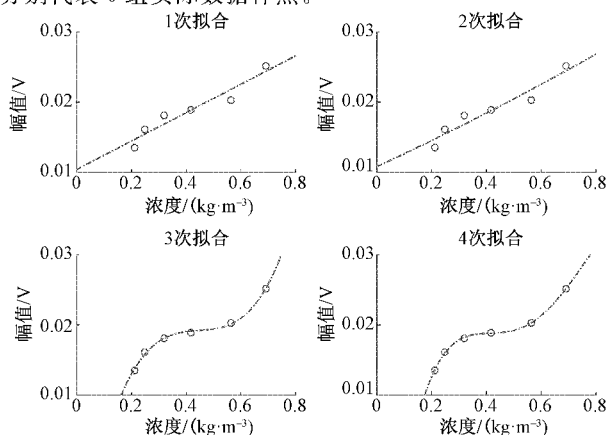
2)根据表1计算得出的相应特征值结合静电信号时域特征,初步定义一个特征函数,并给出基于最小二乘法的线性拟合表达式,其函数表达式分别如下所示:

$$F = f(C) \quad (15)$$

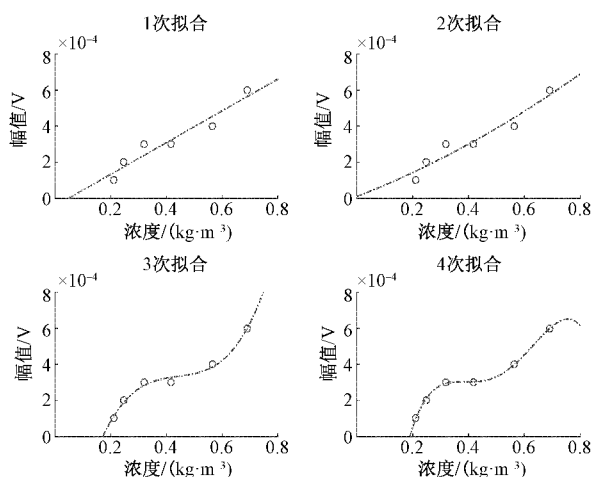
$$F_i(C) = \sum_{i=0}^N C^i, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (16)$$

其中, F 为信号的某种特征量, C 为陶瓷粉颗粒浓度, i 表示1~6组实验次数, N 为一元高次拟合多项式个数。

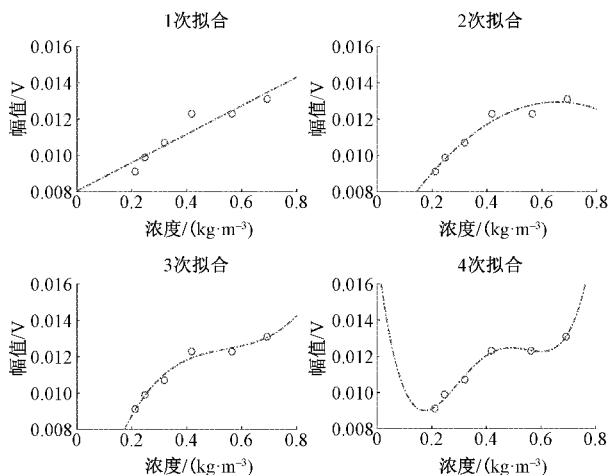
3)采用最小二乘法对实验数据进行特征量1~4次线性拟合分析,验证 F 与 C 的映射关系。不同特征量对应拟合曲线如图6所示,其中虚线代表拟合曲线,6个圆圈标识分别代表6组实际数据样点。



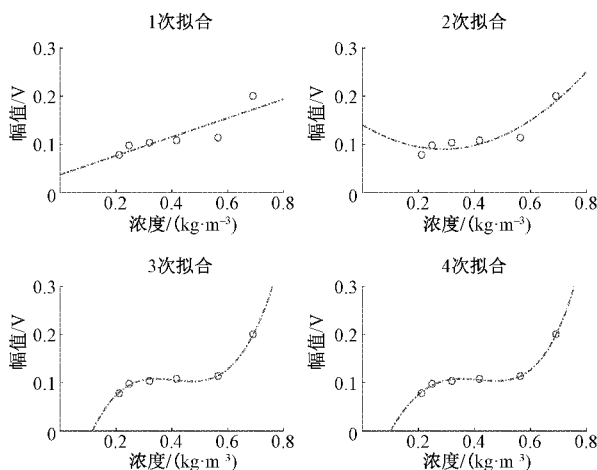
(a) 均方根值1~4次拟合对比曲线图



(b) 方差1~4次拟合对比曲线图



(c) 平均幅值1~4次拟合对比曲线图



(d) 峰值1~4次拟合对比曲线图

图 6 不同特征量对应拟合曲线

如图 6(a)所示,均方根值的 3 次拟合效果与 4 次拟合效果较为理想,且在第 4 个数据样点处可以看出,4 次拟合效果更优于 3 次拟合。

如图 6(b)所示,方差的 3 次拟合效果与 4 次拟合效果均很理想,在第 3 个和第 4 个数据样点上,4 次拟合曲线更贴近真实数据样点,拟合效果优于 3 次拟合。

如图 6(c)所示,平均幅值的 4 次拟合曲线贴合程度明显优于前三者,拟合效果最理想。

如图 6(d)所示,峰值的 3 次拟合效果与四次拟合效果更理想,且在第 4 个数据样点下,4 次拟合曲线要更贴近数据样点。综上所述,每种特征量所对应的 4 次拟合曲线更贴合真实数据样点,说明 4 次拟合效果更好,且与实际数据相关性更高。

4) 对不同特征量的拟合结果进行评估。引入误差平方和(the sum of squares due to error)评估指标,简称 SSE。其函数表达式为:

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y})^2 \quad (17)$$

均方根标准差(root mean squared error)评估指标,简称 RMSE,其函数表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y})^2} \quad (18)$$

确定系数(coefficient of determination)评估指标,简称 R-square,其函数表达式为:

$$R\text{-square} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (19)$$

不同特征量对应拟合程度评判标准:当 SSE 与 RMSE 值越趋于 0 时或者 R-square 值越趋于 1 时,表示实测数据与拟合数据越接近,拟合效果越理想。根据实测数据与拟合数据计算分析,绘制出了误差评估指标分析表,如表 2 所示。

表 2 误差评估指标分析表

特征量	SSE	RMSE	R-square
均方根值	5.359×10^{-8}	2.315×10^{-4}	0.999 3
方差	1.007×10^{-6}	1.003×10^{-3}	0.943 4
平均幅值	1.152×10^{-7}	3.394×10^{-4}	0.990 7
峰值	3.947×10^{-5}	6.282×10^{-3}	0.995 7

由表 2 所示,均方根值的 SSE 值最小,数值更趋于 0, R-square 值最大,数值更趋近于 1;平均幅值的 RMSE 值最小,数值更趋于 0;结合拟合曲线对比综合判定,静电信号均方根值的拟合效果最好,与实际数据样点更贴合且更具说服力。

5) 根据拟合计算得出的多项式系数,建立静电信号均方根与陶瓷粉末颗粒浓度的数学模型:

$$F_{RMS} = -0.678 2C^4 + 1.582 6C^3 - 1.266 5C^2 + 0.429 0C + k \quad (20)$$

其中, F_{RMS} 表示静电信号均方根, C 为颗粒浓度,特

征函数常数项 k 为 -0.0314 。由式(20)可知,静电信号均方根值与陶瓷粉末颗粒浓度是一个线性4次函数关系;且随颗粒浓度增大,静电信号均方根值也随之增大,验证了两者之间具有正相关性。

6)为验证该数学模型的可靠性,本文针对4种特征量进行了不同浓度下的相对误差分析,误差对比折线如图7所示。

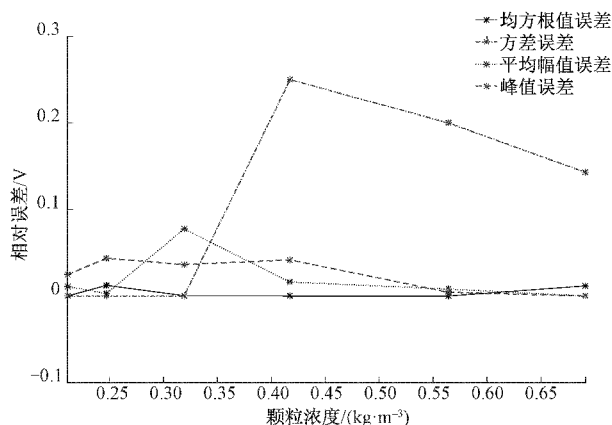


图7 特征量相对误差对比折线图

如图7所示,在相应6个颗粒浓度样点下,均方根值的平均相对误差最小,折线起伏低更趋于平稳状态,且相对误差控制在0.5%~1.24%的极小范围内,进一步验证了本文所建立的数学模型的准确性与可靠性,并为气固两相流参数检测技术提供了重要手段与研究思路。

3 结 论

本文基于气固两相流实验平台,据其参数检测原理分析了固体质量流量的影响因子;围绕颗粒浓度与静电信号之间的数学关系,有限元分析了不同风速下环形静电传感器的输出特性,得出了传感器频域特性由颗粒速度决定;采集不同颗粒浓度下产生的静电信号并进行特征值提取;最后利用最小二乘法对实验数据进行拟合分析,最终提出了静电信号均方根值与陶瓷粉末颗粒浓度的函数表达式,完成了数学建模,并通过误差分析验证了其准确性。

参考文献

- [1] 杨品.气固两相流中固体质量流量测量方法研究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [2] 师登鹏.基于静电传感器的煤粉颗粒粒度和质量流量的测量[D].北京:华北电力大学,2017.
- [3] 萧红,周威,罗久飞,等.一种高梯度静磁场感应式全流量磨粒监测传感器[J].仪器仪表学报,2020,41(6):12-20.
- [4] 李通,李如飞,周燕弟,等.基于电荷感应法的风粉在线检测仪器开发与应用[J].自动化应用,2018(12):38-40.
- [5] TAJDARI T, RAHMAT M F, WAHAB N A, et al. Low noise signal conditioning design for electrostatic sensors[J]. Sensors and Transducers, 2013, 153(6): 200-208.
- [6] 王奇.基于COMSOL模拟的静电传感器空间灵敏度的确定和传感器优化设计[D].北京:华北电力大学,2018.
- [7] 封文轩,杨道业.基于融合传感器的气固两相流参数检测系统设计[J].仪表技术与传感器,2020(3):99-103.
- [8] 李鹏,杨道业,史华莹,等.电容式气固两相流的参数测量系统[J].仪表技术与传感器,2015(5):80-83.
- [9] 陈志雄,王继文,左洪福.滑油系统静电监测模型研究[J].电子测量与仪器学报,2019,33(8):147-153.
- [10] 何成,郑莹娜,李扬.气-固两相流动态测试综合实验平台研究[J].电子测量技术,2013,36(5):64-67.
- [11] 邓芳芳.速度对静电传感器空间灵敏度的影响[J].国外电子测量技术,2020,39(5):47-51.
- [12] WANG S, XU C, JIAN L, ET AL. An instrumentation system for multi-parameter measurements of gas-solid two-phase flow based on capacitance-electrostatic sensor[J]. Measurement, 2016, 94: 812-827.
- [13] 吴晔,崔依冬,王启昌,等.气固两相流静电测速技术与系统[J].科学技术创新,2020(2):187-188.
- [14] 吴南星,甘振华,赵增怡,等.挡板对陶瓷干法造粒气-固两相流混合过程的影响[J].硅酸盐通报,2019,38(1):244-250.
- [15] 张朝,崔豫泓,刘羽,等.风粉混合器内气固两相流动的模拟及试验研究[J].洁净煤技术,2020,26(2):62-69.

作者简介

廉俊阳,硕士研究生,主要研究方向为信号处理、无损检测。

E-mail:904561147@qq.com

王浩全(通信作者),博士,教授,主要研究方向为超声成像检测、无损检测。

E-mail:2558260516@qq.com