

基于静电传感器的气固两相流流动参数特性研究

张靖宇, 吴晨哲, 李可鑫

天津职业技术师范大学自动化与电气工程学院, 天津

收稿日期: 2021年6月21日; 录用日期: 2021年8月31日; 发布日期: 2021年9月7日

摘要

使用内嵌环形电极进行静电法气固两相流测量时, 测量信号不仅仅包含静电感应电荷信息, 还包含带电颗粒与管壁碰撞转移电荷信息。由于静电感应产生的信号上下波动幅值相等, 时域均值为0。而由于颗粒管壁碰撞产生的转移电荷信号, 当管道材质为不锈钢, 电荷总体带正电, 时域平均值为正值。通过实验对测量电路输出信号进行分析, 发现测量信号具有直流分量, 且在100~600 Hz频段具有较高的能量。在不同的气流量和固体流量下进行实验, 通过设计的直流滤波电路, 对比研究测量信号直流分量幅值及100~1000 Hz频段交流分量幅值与颗粒速度, 浓度的关系, 发现信号直流分量幅值与颗粒浓度之间具有更好的正相关关系。

关键词

静电传感器, 气固两相流, 颗粒浓度

Study on the Flow Parameter Characteristics of Gas-Solid Two-Phase Flow Based on Electrostatic Sensor

Jingyu Zhang, Chenze Wu, Kexin Li

School of Automation and Electrical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

Received: Jun. 21st, 2021; accepted: Aug. 31st, 2021; published: Sep. 7th, 2021

Abstract

In gas-solid two-phase flow measurement based on electrostatic method with embedded ring

文章引用: 张靖宇, 吴晨哲, 李可鑫. 基于静电传感器的气固两相流流动参数特性研究[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(4): 208-215. DOI: 10.12677/jsta.2021.94025

electrode, the measured signal contains not only the information of electrostatic induced charge, but also the information of charge transferred by collision between charged particles and tube wall. Because the fluctuation amplitude of the signal generated by electrostatic induction is equal, the mean value in time domain is 0. When the pipe material is stainless steel, the total transferred charge from contact of particles and the pipe wall is positive, and the average value in time domain is positive. Through the analysis of the output signal of the measurement circuit, it is found that the measurement signal has DC component and high energy in the frequency band of 100~600 Hz. Experiments were carried out under different gas and solid flow rates. Through the designed DC filter circuit, the relationship between the amplitude of DC component and the amplitude of AC component in 100~1000 Hz frequency band and particle velocity and concentration was compared and studied. It was found that there was a better positive correlation relationship between the amplitude of DC component and particle concentration.

Keywords

Electrostatic Sensor, Gas-Solid Two-Phase Flow, Particle Concentration

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在工业生产领域, 气固两相流主要存在于工业废气排放、流化床系统以及气力输送管道中。气力输送是一种使用气体(通常是压缩空气)在封闭管道中运输固体物料的方法[1]。气力输送过程中固料的速度与浓度测量, 可以实现输送效率的提高与能耗的降低。研究者们采取了基于静电、电容、数字成像、磁场、微波、光学、放射、热传导和超声技术的各种测量方法。静电传感器由于具有低成本、结构简单和工作性能稳定的优势, 可用于测量运动颗粒所带电荷、颗粒速度和固体质量流量等参数[2]。在过去的五十年里, 人们对不同形状大小的静电传感器进行了大量的理论和实验研究, 并在工业现场中应用也有了一定进展[3]。

由于固体颗粒与输送空气之间的摩擦, 颗粒之间的相互碰撞以及颗粒与管道壁之间的撞击, 气力输送管道内的颗粒会携带一定数量的静电电荷[4]。虽然颗粒携带的电荷数量通常是不可预知和难以准确测量的, 但是通过特殊设计的电路可以检测出电荷的强度。电极上电荷产生的原因有以下两点: 1、带电颗粒流经电极敏感区域时产生的感应电荷; 2、带电颗粒与电极接触时转移电荷。研究者分别对两种机理下的测量方法进行了研究。Gajewski 等人[5]和 Yan [6]等人分别针对环形电极独立的提出了基于电容耦合和静电感应理论的数学模型。Matusaka 等人[7] [8]对带电颗粒与电极接触的机理进行了研究, 并提出了利用转移电荷进行颗粒质量流量与颗粒带电量的测量方法。

本文分析了基于静电感应原理的环形电极测量电路中同时存在的带电颗粒与电极接触转移电荷的现象, 对静电信号进行了机理分析。

2. 静电传感器原理

2.1. 静电感应原理

气力输送管道内的颗粒会携带一定数量的静电电荷, 当运动颗粒经过电极截面时, 由于运动颗粒所

造成的静电场的波动，一定数量的感应电荷将出现在电极的内表面。电极的外表面与测量电路虚地端相连，感应电流通过测量电路转换成电压信号。其原理见图 1。

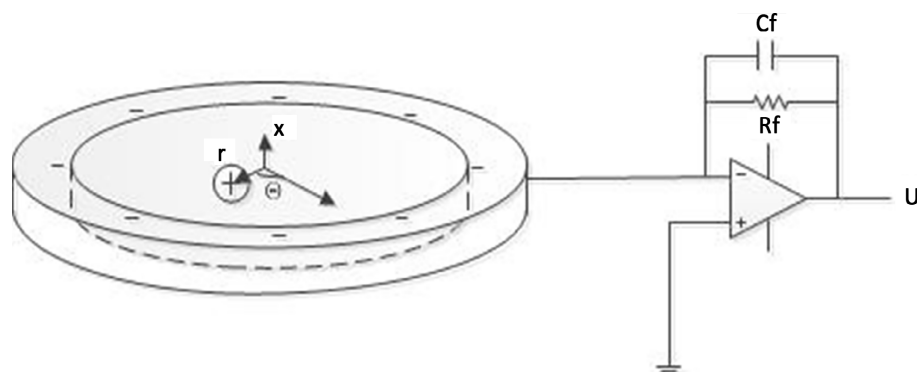


Figure 1. Measurement principle of electrostatic induction method

图 1. 静电感应法测量原理图

带电颗粒在电极上产生的感应电荷与带电颗粒的位置，带电颗粒电荷量的大小有关。当带正电荷的单个颗粒通过环形电极时，在电极内侧产生的感应电荷与传输给测量电路的感应电流如图 2。

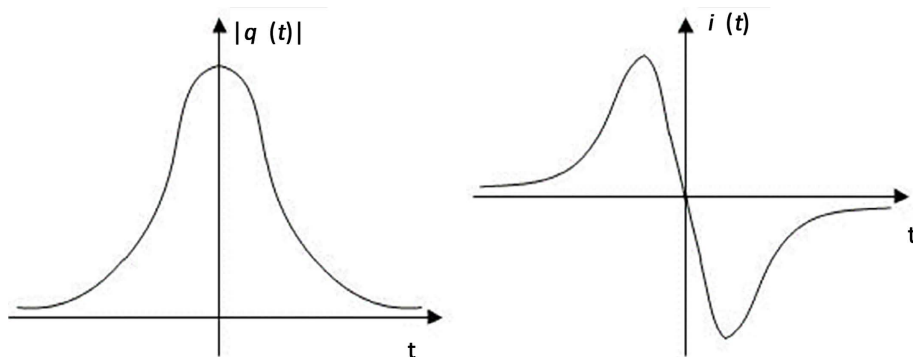


Figure 2. Induced charge and current generated by a single charged particle

图 2. 带电颗粒产生的感应电荷与感应电流

感应电流是感应电荷的单位时间的变化量。所以当接近电极的带电颗粒电荷量与远离电极的带电颗粒电荷量相等时，感应电流值总是有正有负，且正负抵消。从宏观上来看，在大量的带电颗粒静电感应作用下，感应电流均值为 0。只是由于颗粒通过电极截面时，会产生感应电流波动。感应电流波动量的大小可以反映颗粒电荷量的多少，即可反映颗粒浓度信息。而在带电颗粒流经电极区域时，会与电极内壁相撞，产生电荷转移，此会造成接近电极的带电颗粒电荷量与远离电极的带电颗粒电荷量不相等，使感应电流均值不为 0。

2.2. 电荷转移原理

带电运动颗粒经过电极附近区域时，部分颗粒会与电极内表面碰撞。碰撞时根据带电颗粒碰撞面与电极内表面的电势差决定电荷转移的方向。电荷转移产生电流。其原理图如图 3。

Matsusaka [7]将带电颗粒与电极内壁等效为一个电容，带电颗粒与电极内壁电势差等效为电压源。当带电颗粒与电极内壁碰撞并反弹时，虽然接触时间很短，但是足够完成电荷转移过程。转移的电荷量满足下式：

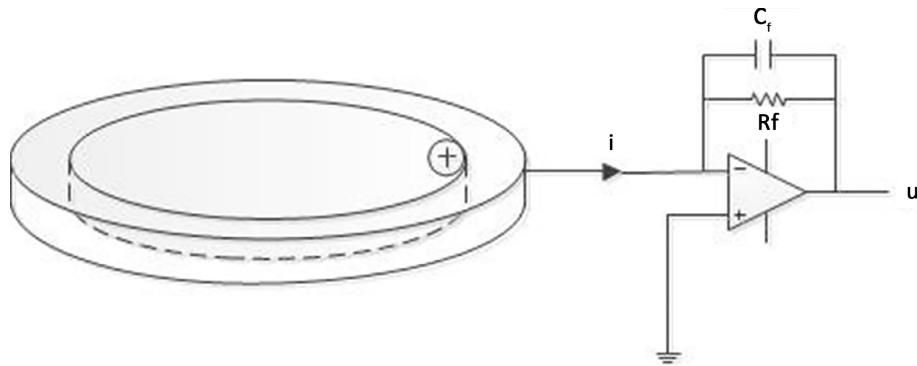


Figure 3. Measurement principle of charge transfer method
图 3. 静电电荷转移法测量原理图

$$\Delta q = k_c CV \quad (1)$$

其中, Δq 是接触过程中转移的电荷, k_c 是充电效率, C 是等效电容, V 是电势差。

当颗粒在不锈钢气力输送管道内流动, 会携带一定数量的静电电荷, 电荷总体极性与管道材质相关。当管道材质为不锈钢时, 气力输送管道内的颗粒总体携带正电荷[8]。当大量带电颗粒流经电极区域时, 靠近电极内壁的带电颗粒将与电极相撞。电荷从带电颗粒转移到电极上, 并通过测量电路形成电流。电荷总体带正电, 电流平均值为正值。颗粒浓度越高, 碰撞发生次数越多, 通过碰撞传递的电荷越多, 电流平均值越大。所以转移电流的平均值中也含有颗粒浓度信息。

2.3. 测量电路原理

不论是静电感应测量方法还是碰撞电荷转移测量方法, 与测量电路直接作用的是电流, 而不是电荷[9][10]。所以进行等效电路分析时, 可将电极等效为电流源。如图4所示。其中 C_a 和 R_a 分别为传感器探头对地的电容和绝缘电阻, C_c 为连接电缆的分布电容, R_i 和 C_i 分别是运算放大器的输入电阻和输入电容。 C_f 和 R_f 分别是反馈电容与反馈电阻。 A 为放大器的开环增益。

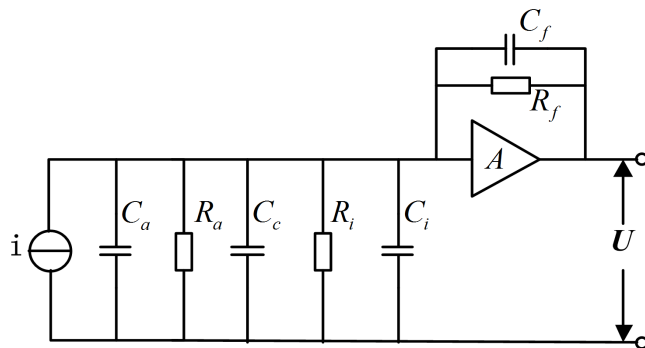


Figure 4. Current source equivalent model of the electrostatic sensor
图 4. 静电传感器等效电流源模型

由于实际电路中均采用开环增益非常大的运算放大器, C_a , C_c 和 C_i 的影响可以忽略。一般情况下, R_a 和 R_i 取值也比较大, 影响也可以忽略。电路信号的放大倍数频谱为式(2)所示, 如图5:

$$\frac{U(\omega)}{I(\omega)} = \frac{A}{(1+A) \left(\frac{1}{R_f} + j\omega C_f \right)} \quad (2)$$

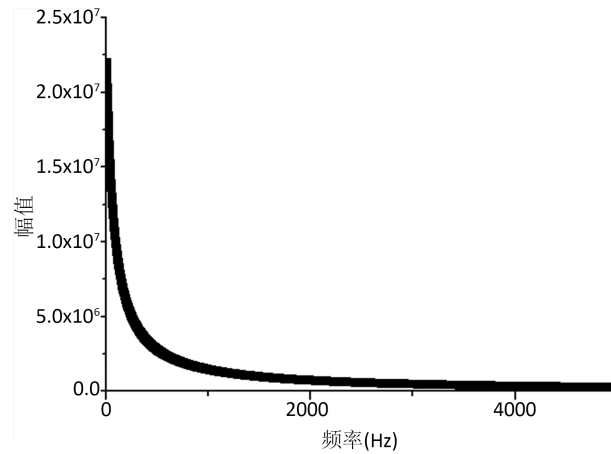


Figure 5. Amplitude-frequency characteristic of the signal conditioning circuit

图 5. 测量电路信号放大倍数频谱

测量电路可以对信号的直流分量进行放大。若不需要信号直流分量,可在测量电路后接带通滤波电路。静电感应法的有效信号范围为 100~1000 Hz, 选取合适的带通滤波电路参数, 可以得到信号交流分量。

3. 实验分析

3.1. 实验装置介绍

实验在天津大学气固两相流装置上进行。气固两相流实验装置为正压气力输送装置, 其组成包括空

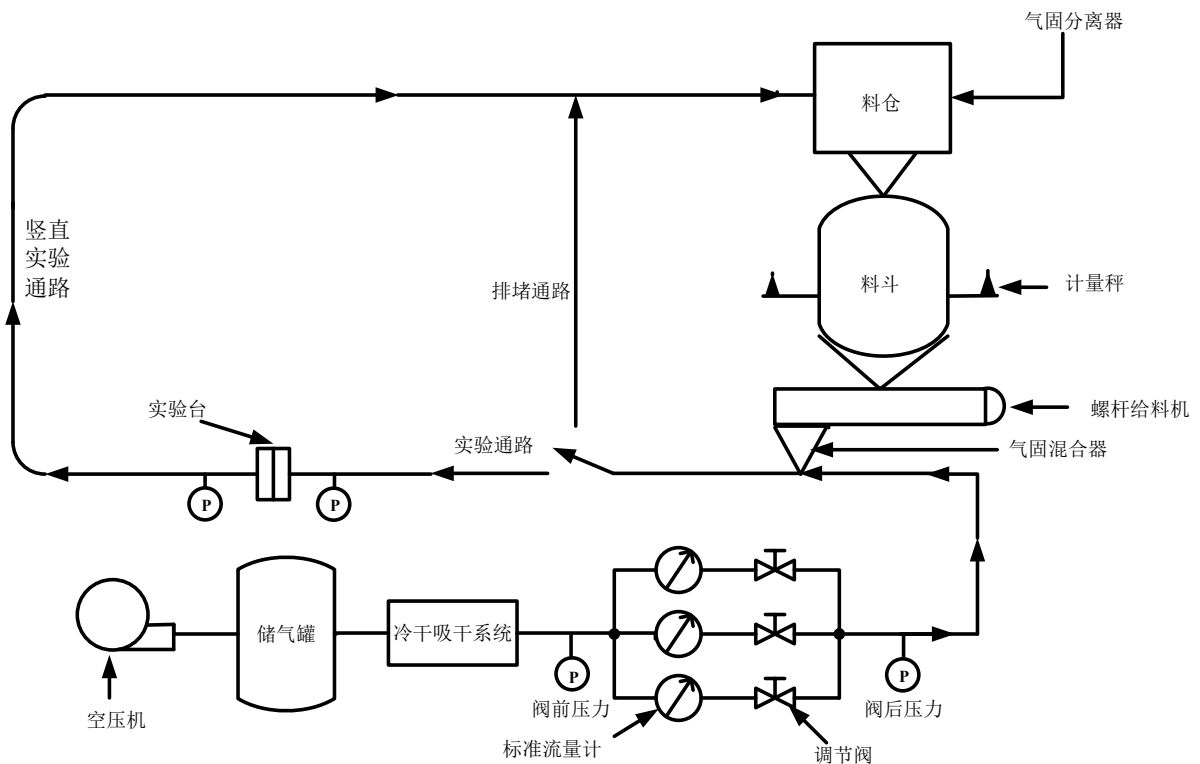


Figure 6. Schematic diagram of the gas-solid two-phase flow test rig

图 6. 气固两相流实验装置结构图

气压缩机、储气罐、水泵、冷干机、吸干机、气路调节阀、螺旋给料机、料仓、料斗和除尘器等。整个实验系统的结构图如图 6 所示。

装置的管道口径为 DN50。实验过程中使用的固体颗粒是石英粉，其密度约为 2.65 g/cm^3 ，粒径约为 $100 \mu\text{m}$ 。固体颗粒的质量流量可以通过螺旋给料机进行控制，并且通过装在料斗下面的称重装置进行测量。静电传感器以及静电相关在线测量系统安装在水平实验管道上。

3.2. 传感器信号频谱分析

为了研究电路输出信号，进行以下实验。传感器采用金属管道，其电极内嵌在管道内壁，与管道中颗粒可以接触。在气流量 $240 \text{ m}^3/\text{h}$ ，固气质量比约为 1.2 的实验条件下，对测量电路的输出信号进行频谱分析，如图 7 所示。

传感器的电路输出信号平均值为 8.92 V ，具有直流分量。当有带电颗粒经过时，可以在电极上产生感应电荷，但随着颗粒的离开，感应电荷消失。如此感应电荷的产生与消失，感应电流方向相反，所以

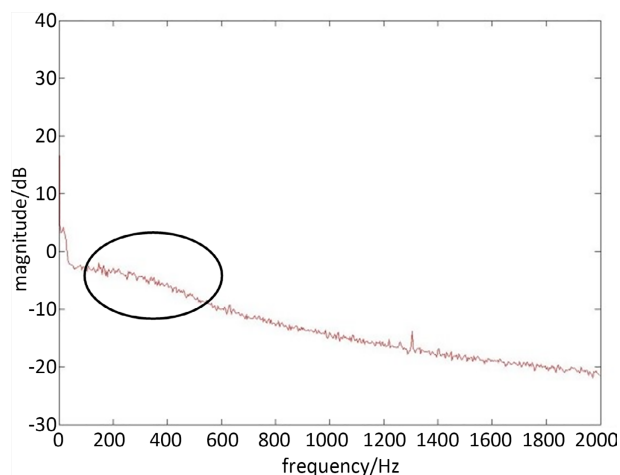


Figure 7. Signal spectrum of measurement circuit without filter circuit

图 7. 不带滤波电路的测量电路信号频谱

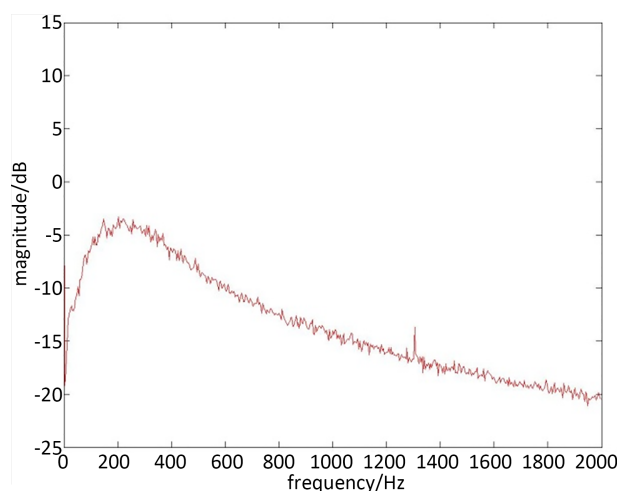


Figure 8. Signal spectrum of measurement circuit with filter circuit

图 8. 带滤波电路的测量电路信号频谱

感应电流总体均值为0,若测量信号有直流分量,应全部为含转移电荷信号。电荷转移电流一直为正值,颗粒总体带正电荷,该种电荷是由于颗粒与之前的金属管壁碰撞带电。同时测量信号在100~600 Hz频段具有较强的能量,其信号包含全部感应电荷信号与转移电荷信号的交流分量。设计带通滤波电路,其低频剪切频率为100 Hz,高频剪切频率为1000 Hz,进行同样的实验,信号频谱如图8所示。

3.3. 颗粒浓度表征关系

实验气流量的范围为160~240 m³/h,对应的气体质量流量约为0.053~0.079 kg/s(标准状态时空气的密度为1.185 kg/m³),固料质量流量的范围为0.029~0.147 kg/s。分别调节气流量和固体流量,固气质量比变化范围为0.4~1.4。

对未经滤波电路的测量信号,其平均值可表征直流分量幅值。通过实验数据分析,其与颗粒速度,颗粒浓度具有正相关关系,如图9。不同颜色的曲线代表不同的气流速度。

对经过滤波电路的测量信号,其标准差值可表征交流信号幅值,如图10,不同颜色的曲线代表不同的气流速度。通过实验分析,其与颗粒速度,颗粒浓度在低颗粒浓度时具有正相关关系,但在高颗粒浓度(固气质量比在1.2~1.4)时,其关系不明显,标准差信号极小的波动就能导致浓度结果很大波动。且信号标准差

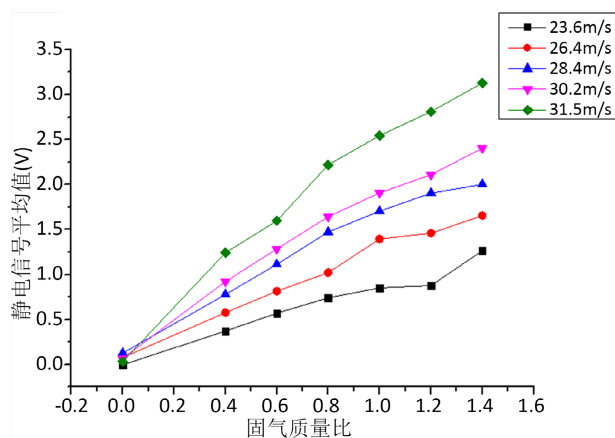


Figure 9. The relationship between the average value of electrostatic signal and particle velocity and concentration

图9. 静电信号平均值与颗粒速度, 浓度关系

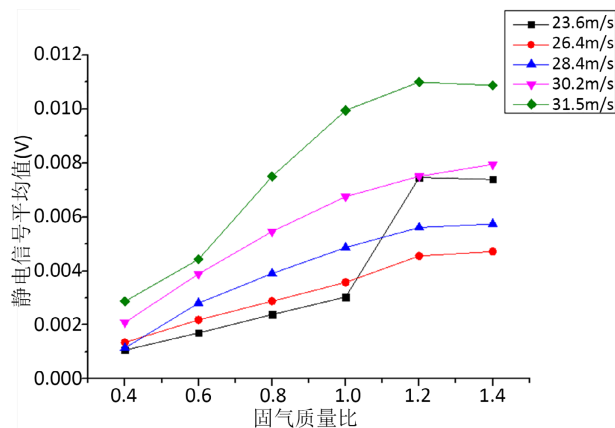


Figure 10. Relationship between standard deviation of electrostatic signal and particle velocity and concentration

图10. 静电信号标准差与颗粒速度, 浓度关系

值在低流速下信号幅值反而更大,可能是因为低流速颗粒沉积导致流型改变,颗粒与管壁碰撞转移电荷更多。

根据实验结果,可看出:

1) 直流分量能量与交流分量能量都能反应固相浓度的变化,而直流分量能量对气流速变化的反应更加灵敏。

2) 直流分量能量与浓度之间存在线性关系,更容易得到拟合曲线,也更容易进行浓度计算。

4. 结论

使用内嵌环形电极进行静电法气固两相流测量时,测量信号不仅仅包含静电感应电荷信息,还包含带电颗粒与管壁碰撞转移电荷信息。表现在测量信号上,测量信号的平均值可以反映碰撞转移电荷的大小,进而表征颗粒浓度。具体的表征机理以及两种测量方式之间的耦合关系仍然需要进一步研究。

致 谢

感谢天津大学天津市过程检测与控制重点实验室为本项目提供实验装置。

基金项目

本论文被天津市自然科学基金(18JCQNJC74500)、天津职业技术师范大学校级科研项目(KJ1732)与(KRKC011815),以及天津市大学生创新创业训练计划(201910066045)支持。

参考文献

- [1] Yan, Y., Birne, B. and Coulthard, J. (1995) Sensing Field Homogeneity in Mass Flow Rate Measurement of Pneumatically Conveyed Solids. *Flow Measurement and Instrumentation*, **6**, 115-119. [https://doi.org/10.1016/0955-5986\(95\)00001-3](https://doi.org/10.1016/0955-5986(95)00001-3)
- [2] Krabicka, J. (2010) Flow Measurement of Pneumatically Conveyed Solids Using Intrusive Electrostatic Sensors. Ph.D. Thesis, University of Kent, Canterbury.
- [3] Matsusaka, S., Ghadiri, M. and Masuda, H. (2000) Electrification of an Elastic Sphere Byrepeated Impacts on a Metal Plate. *Journal of Physics D*, **33**, 2311-2319. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/18/316>
- [4] Qian, X., Zhao, J. and Huang, X. (2020) Investigations into the Blockage of Pulverized Fuel Pipes on Coal-Fired Boilers Using an Electrostatic Sensor System. *Powder Technology*, **370**, 378-387. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.057>
- [5] Gajewski, J.B. (2008) 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. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **44**, 1418-1430. <https://doi.org/10.1109/TIA.2008.2002276>
- [6] Yan, Y. (1996) Mass Flow Measurement of Bulk Solid in Pneumatic Pipelines. *Measurement Science and Technology*, **7**, 1687-1760. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/7/12/002>
- [7] Matsusaka, S., Nishida, T., Gotoh, Y. and Masuda, H. (2003) Electrification of Fine Particles by Impact on a Polymer Film Target. *Advanced Powder Technology*, **14**, 127-138. <https://doi.org/10.1163/156855203762469939>
- [8] Ema, A., Yasuda, D., Tanoue, K. and Masuda, H. (2003) Tribo-Charge and Rebound Characteristics of Particles Impact on Inclined or Rotating Metal Target. *Powder Technology*, **135**, 2-13. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00153-0](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00153-0)
- [9] Wang, C., Li, Y., Jia, L., et al. (2020) Design of Charge-Sensitive and Current-Sensitive Preamplifiers for Electrostatic Sensor. *Journal of Electrostatics*, **105**, 103449-103452. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103449>
- [10] Wang, C., Jia, L. and Gao, W. (2019) Electrostatic Sensor for Determining the Characteristics of Particles Moving from Deposition to Suspension in Pneumatic Conveying. *IEEE Sensors Journal*, **99**, 1-7.