

路开新,赵延辉,曹清,等.基于电容法的溜管式颗粒物料质量流量计设计与试验[J].华中农业大学学报,2025,44(2):94-104.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.02.010

## 基于电容法的溜管式颗粒物料质量流量计设计与试验

路开新<sup>1,2</sup>,赵延辉<sup>1</sup>,曹清<sup>1,2</sup>,雍淦文<sup>1,2</sup>,王田彬<sup>1,2</sup>,刘静<sup>1,2</sup>,牛智有<sup>1,2</sup>

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部智慧养殖技术重点实验室,武汉 430070

**摘要** 为实现溜管内颗粒物料质量流量的在线自动测量,根据颗粒物料与空气介电特性的差异,设计了一种基于电容法的溜管式颗粒物料质量流量计。该装置以STM32单片机、电容数字转换芯片AD7746和以MT8816为核心芯片的极板转换电路搭建数据采集系统,实现八极板组合旋转激励传感器电容信号的有效获取。搭建质量流量计试验台架,以玉米、小麦和颗粒配合饲料为试验材料,标定质量流量与累计电容值之间的关系,构建3种颗粒物料的质量流量预测模型,其模型决定系数 $R^2$ 分别为0.990 4、0.993 9、0.987 9。溜管式质量流量计精度验证试验结果显示,在溜管倾角分别为15°、25°、35°、45°、55°,玉米(小麦)质量分别为30、50、70 kg,颗粒配合饲料质量分别为30、50、65 kg时,玉米、小麦和颗粒配合饲料测量的平均相对误差MRE分别为3.11%、3.76%和3.75%。研究结果表明,将电容法应用于溜管输送颗粒物料过程的质量流量在线测量具有可行性,可以实现颗粒物料质量流量的在线自动测量。

**关键词** 电容; 传感器; 颗粒物料; 质量流量; 在线测量; 溜管

**中图分类号** S965.211 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)02-0094-11

计量装置作为粮食、饲料等领域生产加工的关键设备,在原料接收、入仓和产品包装等多个环节均有涉及<sup>[1-4]</sup>。准确的计量装置不仅可以为企业提供关键生产数据,指导企业管理和生产,还能提升生产效率和产品质量<sup>[5]</sup>。目前,计量装置多采用皮带秤和料斗秤。然而,皮带秤易受外部环境(如温度、湿度和振动)以及物料位置的影响,其测量精度偏低<sup>[6-7]</sup>。料斗秤分失重式和累计式2种。失重式料斗秤采用静态称质量,动态特性不足,难以保证测量过程的连续性<sup>[8]</sup>。累计式料斗秤的长期称量会累积误差,且该装置通常没有定时反馈功能<sup>[9]</sup>。溜管是粮食和饲料生产加工过程中最常用的运输装置之一,其工作原理是利用物料自身的重力自高向低输送物料,具有成本低廉、无需维护的优点<sup>[10]</sup>。由于物料在溜管中的流动速度不稳定且分布不均匀,目前的质量流量测量方式难以及时、准确地测量溜管内物料质量流量的变化,造成测量参数偏差累积,给生产带来不便。

近年来,国内外学者针对颗粒物料质量流量测量开展了包括声学<sup>[11-12]</sup>、光学<sup>[13-15]</sup>、微波<sup>[16-17]</sup>和静

电<sup>[18-19]</sup>等多种方法的研究。声学基于其非侵入性与可靠性好的特点,多用于低固相浓度介质检测;光学法可实现远距离测量、不干扰目标的测量,主要应用于固相浓度不高或待测物具有透光性的场合;微波法具有成本低廉、安装简便以及对环境要求低的优势,适用于空间受限的测量环境。静电法具有价格便宜、灵敏度高、维护工作量小等优点,多用于恶劣的工业环境。综上所述,声学法、光学法、微波法和静电法在颗粒物料质量流量测量领域均有一定的研究,但声学法、光学法、微波法和静电法易受到光照、粉尘、温湿度等环境因素<sup>[20-22]</sup>的影响,导致测量结果稳定性较差,在实际生产过程的应用有一定的局限性。电容法具有结构简单、响应速度快、稳定性好、非接触测量、抗污染能力强等优点,已广泛应用于颗粒物料质量流量测量领域<sup>[23-26]</sup>,但目前主要应用于排种器种子流和排种量测量,对物料质量流量较大的研究应用鲜见报道。

本研究提出基于电容法的颗粒物料质量流量在线自动测量方法,设计一种溜管式颗粒物料质量流量计,开发以STM32为主控芯片的数据采集系统,

收稿日期: 2024-04-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1300305)

路开新, E-mail: 1441383213@qq.com

通信作者: 牛智有, E-mail: nzhy@mail.hzau.edu.cn

分别建立了玉米、小麦、颗粒配合饲料质量流量与累计电容量之间的关系模型,并对流量预测模型进行实验验证,探究基于电容法的颗粒物料质量流量测量可行性,旨在为实现物料质量流量在线实时检测提供新的测定方法和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 整体结构与测量原理

1) 整体结构。溜管式颗粒物料质量流量计主要由电容传感器、数据采集系统2部分组成,其结构示意图如图1所示。

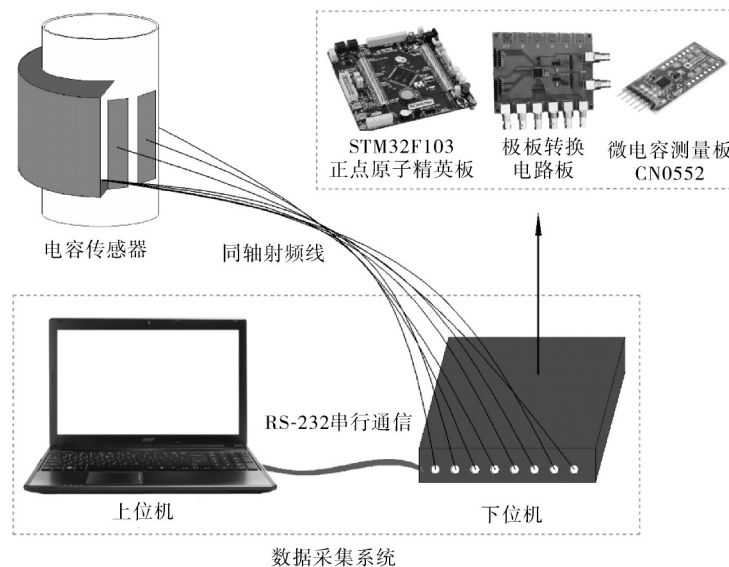


图1 溜管式颗粒物料质量流量计结构示意图

Fig.1 Structure diagram of granular material chute type mass flowmeter

2) 测量原理。溜管输送颗粒物料时,由于颗粒物料与空气的介电常数不同,当颗粒物料经过电容极板时,会引起电容传感器极板间的等效介电常数发生变化,导致电容输出值改变。因此,传感器的电容输出变化量 $\Delta C$ 计算公式为<sup>[25]</sup>:

$$\Delta C = C - C_0 = \frac{S(\epsilon_1 - \epsilon_2)}{\rho_1 d V} M \quad (1)$$

式(1)中, $\Delta C$ 为颗粒物料通过电容传感器时的输出变化量, $F$ ;  $C$ 为测量电容值, $F$ ;  $C_0$ 为基准电容值, $F$ ;  $S$ 为极板面积, $m^2$ ;  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 分别为颗粒物料和空气的介电常数; $\rho_1$ 为颗粒物料容重, $kg/m^3$ ;  $d$ 为极板间距, $m$ ;  $V$ 为电容传感器极板间检测场体积, $m^3$ 。  $M$ 为传感器内颗粒物料质量, $kg$ 。

由式(1)可知,在极板面积 $S$ 、颗粒物料介电常数 $\epsilon_1$ 、空气的介电常数 $\epsilon_2$ 、颗粒物料容重 $\rho_1$ 、极板间距 $d$ 、电容传感器极板间检测场体积 $V$ 确定的条件下,传

开发设计的电容传感器与生产过程中的溜管配套安装,具有无需占据额外空间和其他外力驱动的优点。质量流量计的数据采集系统由上位机和下位机两部分组成,两者之间通过RS232串口实现数据传输。其中,下位机以STM32单片机、自主设计的极板转换电路板和微电容采集模块CN0552等实现电容传感器电容信号的获取。上位机由LabVIEW编写而成,实现模型选取、数据后处理及保存等功能。电容传感器与数据采集系统通过同轴射频线连接以隔绝外界电磁波干扰,实现信号的高速稳定传输。

感器累计电容值 $C$ 与通过传感器的颗粒物料质量 $M$ 呈线性关系。通过标定传感器累计电容值 $C$ 与颗粒物料质量 $M$ 之间的关系,可以建立颗粒物料质量流量测量模型。利用该测量模型可以准确获取颗粒物料的质量流量。

### 1.2 溜管式颗粒物料质量流量计的设计

1) 八极板组合旋转激励电容传感器的设计。电容传感器是质量流量计设计的核心部分,其性能的好坏对测量结果有重要的影响。八极板组合旋转激励电容传感器具有传感器检测场的均匀性误差低,传感器灵敏度波动小,颗粒物料的分布和流型对测量结果影响较小等特点。与螺旋电容传感器相比,八极板组合旋转激励电容传感器的极板长度更短,制作成本更低,安装更便捷<sup>[27-28]</sup>。因此,本研究采用八极板组合旋转测量电容传感器,设计结构如图2所示,其中图2A为电容传感器三维结构,图2B电容传

传感器截面结构。八极板组合旋转激励电容传感器主要由溜管、电容极板、金属屏蔽外壳三部分构成。溜管采用聚氯乙烯(polyvinyl chloride,PVC)耐磨材料,其外径为250 mm,壁厚为5 mm。在溜管外壁均匀粘贴8个紫铜片作为电容极板,如图2B中的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ所示。每个极板的张角为25°,长度为150 mm,厚度为2 mm。屏蔽外壳采用厚度为2 mm的不锈钢制成,其外径为280 mm。

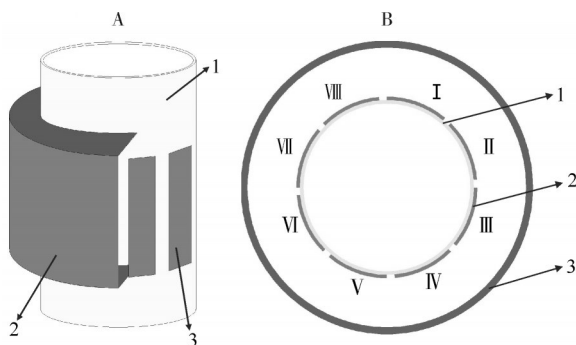


图2 电容传感器结构示意图  
A: 三维图;B: 截面图。1. 溜管;2. 电容极板;3. 金属屏蔽外壳。  
A: 3D diagram; B: Cross-section; 1. Chute; 2. Capacitor plates; 3. Metal shielded shell.

图2 电容传感器结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the capacitive sensor structure

测量时,选取8个极板中对称的1对接地,其余极板分别串接成激励极板和检测极板。每次电容测量都与1对平行板电容传感器的测量等效。以电容极板Ⅰ和Ⅴ接地为例,此时极板Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ为激励极板,极板Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ为检测极板,测得激励极板与检测极板间的电容值为 $C_1$ ;以顺时针依次分别测量电容极板Ⅱ和Ⅵ接地,Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ为激励极板与Ⅶ、Ⅷ、Ⅰ为检测极板两极板间的电容值 $C_2$ ;电容极板Ⅲ和Ⅶ接地,Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ为激励极板与Ⅷ、Ⅰ、Ⅱ为检测极板两极板间的电容值 $C_3$ ;电容极板Ⅳ和Ⅷ接地,Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ为激励极板与Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ为测量极板两极板间的电容值 $C_4$ 。以4次电容测量结果的平均值 $C$ 表征一个测量周期的电容测量值,其计算公式为:

$$C = \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_4}{4} \quad (2)$$

式(2)中, $C$ 为最终的电容测量结果,pF。

通过数据采集系统进行极板转换和电容值采集,每组实际测试程序运行时间约20 ms。八极板均匀布置使电容传感器灵敏度分布具有对称性,通过4组测量即可实现溜管内部颗粒质量的实时评估,单周期耗时约80 ms。

2)质量流量计数据采集系统设计。质量流量计

数据采集系统主要由下位机和上位机2部分组成。其中,下位机分为硬件和软件2部分。

数据采集系统下位机的硬件部分主要包括单片机、极板转换电路和微电容采集模块组成,其总体框图如图3所示。数据采集系统下位机部分以STM32单片机为控制器,搭载自主研发的极板转换模块和微电容采集模块CN0552实现极板按需切换、微电容测量以及数据的处理与上传等功能。

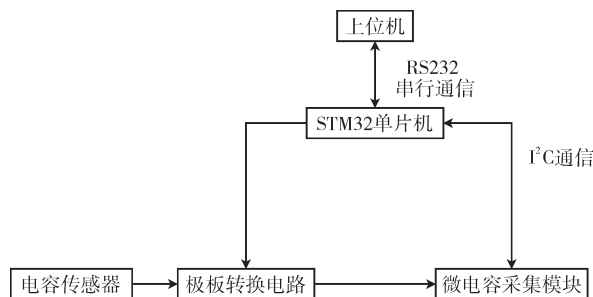


图3 数据采集系统下位机总体框图

Fig.3 Structure chart of the data acquisition system lower computer

电容采集过程中,每个极板都可能处于激励、测量或接地状态。极板转换电路由 $8 \times 16$ 矩阵式模拟开关MT8816和四路SPST模拟开关MAX391组成,其电路原理图如图4所示。STM32单片机依据电容测量的要求,控制MT8816的AX0~AX3引脚、AY0~AY2引脚和DATA引脚、MAX391的IN引脚电平实现对各极板状态的控制。

$8 \times 16$ 矩阵式模拟开关MT8816的控制时序如图5所示。当CS和STROBE同时高电平时,ADDRESS通过AX0~AX3与AY0~AY2引脚高低电平确定通道组合,并由DATA引脚的高低电平控制开关状态。STROBE下降沿锁存地址和开关状态,触发指定组合的通断,其余组合的状态不受影响。此外,当RESET为高电平时,所有开关都将被置于断开状态,此过程大约需要40 ns。四路SPST模拟开关MAX391为常闭模拟开关,通过控制IN引脚的高低电平改变对应开关的闭合和断开,在理想状态下,开关打开需要85 ns,开关闭合需要25 ns。

高精度电容信号的获取是数据采集系统电路设计最为关键的中心环节。为满足微小电容的测量需求,诸多学者提出了多种电路设计方案,如充放电式电路<sup>[29-30]</sup>、交流式电路<sup>[31]</sup>和电容数字转换(capacitance to digital converter,CDC)电路<sup>[32-34]</sup>等。然而,充放电式电路存在零点漂移、电荷注入效应和检测精度低等问题。交流式电路系统复杂,成本高。

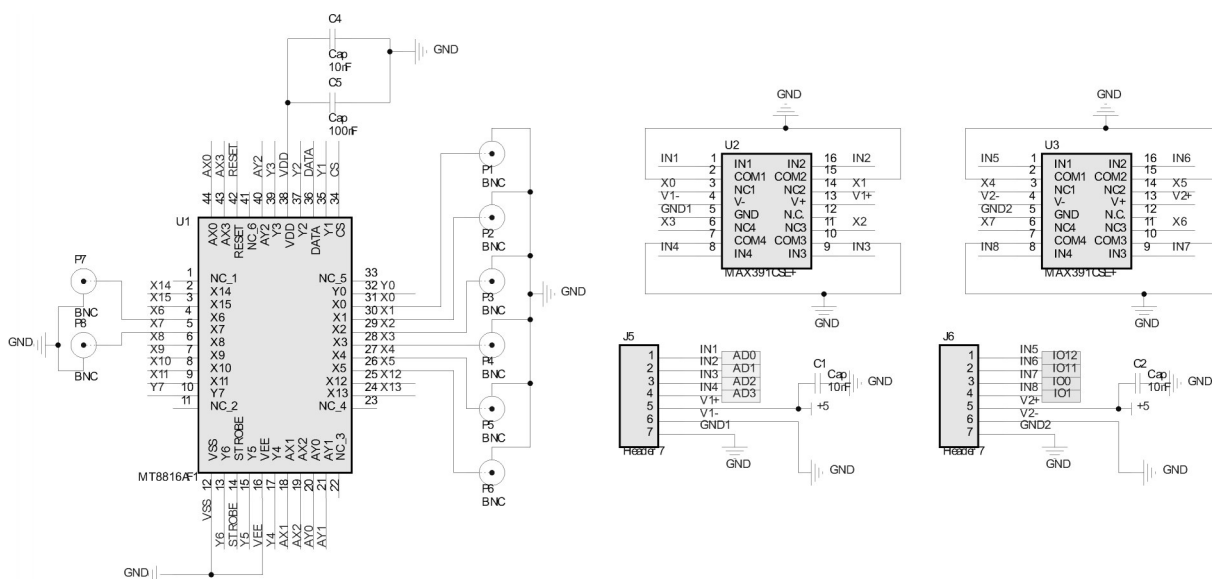


图4 极板转换电路原理图

**Fig.4** Schematic hardware circuit diagram of plate conversion

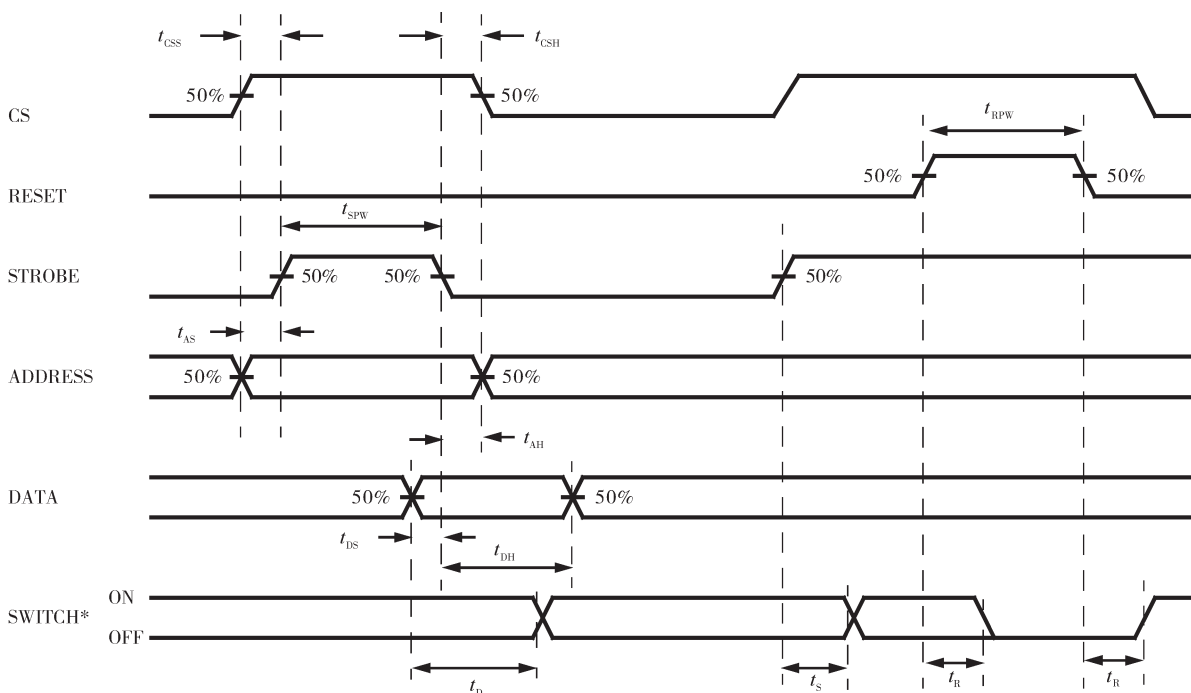


图5 MT8816控制时序图

**Fig.5 MT8816 control timing diagram**

CDC 电路利用集成的 CDC 芯片实现电容测量, 电路组成简单, 且具有较高的电容测量精度和分辨率。因此, 本研究选用 CDC 芯片 AD7746 的 PMOD form-factor 开发板 CN0552 搭建数据采集电路。AD7746 分辨率可达 4 aF, 精度为 4 fF, 量程为  $\pm 4.096$  pF, 通过 AD8515 扩展至  $\pm 50$  pF 输入范围, 作为一款高精度的电容数字转换芯片, 在微电容测量研究中得到了广泛应用<sup>[35-37]</sup>。通过预试验, 当

电容值开始测量和读取的时间间隔为 20 ms 时, 数据采集系统能够获得稳定可靠的测量数据, 测量精度为  $\pm 0.05$  pF, 满足测量需求。

下位机软件采用Keil MDK 软件开发环境,使用C 语言编写下位机软件,实现系统初始化、电容数据采集及预处理。下位机软件控制流程如图6 所示。其控制过程如下:

系统上电后,单片机完成串口、定时器和各IO端



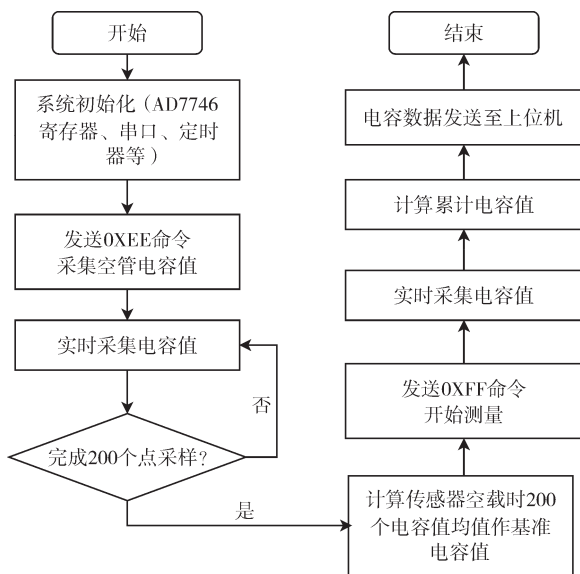


图6 单片机软件程序流程图

Fig.6 Program flowchart of MCU module

口的初始化以及AD7746芯片寄存器的配置;上位机发送指令,驱动AD7746芯片采集空管电容数据,记为基准电容值;待颗粒物料流经溜管时,上位机再次发送指令,驱动AD7746芯片采集电容数据,记为实时电容值;单片机计算累计电容值,并将该值发送至上位机。

本研究基于LabVIEW 2022设计上位机软件。LabVIEW是一种图形化开发环境编程语言,是一个常用的数据采集和仪器控制软件,已被广泛应用于工业界、学术界和研究实验室<sup>[38-39]</sup>。上位机程序工作流程如图7所示,能够实现通讯参数设置、模型选取、数据处理和数据保存等功能。具体工作流程如下:

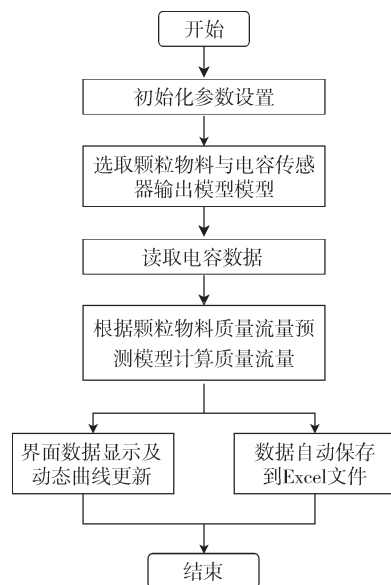


图7 上位机程序流程图

Fig.7 Program flowchart of human-computer

首先,上位机配置串口信息,并选取对应的颗粒物料质量流量预测模型;其次,上位机软件根据RS232串口接收的实时数据,计算单位时间的累计电容值;之后根据选取的质量流量预测模型计算待测物料的质量流量,并实时显示质量流量曲线和累积质量曲线。

为简化溜管式颗粒物料质量流量计的操作流程、提升测量效率,直观显示测量数据和数据处理结果,本研究开发设计了一套颗粒物料质量流量在线自动测量软件,主要包含数据采集模块、数据显示模块、数据储存模块和数据分析模块四部分。人机交互显示界面如图8所示。

颗粒物料质量流量测量系统  
Particulmaterial mass flow measurement system

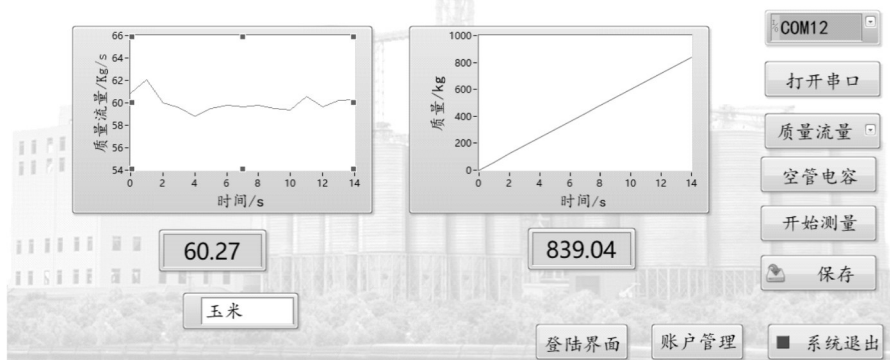


图8 上位机显示界面

Fig.8 Human-computer displays the interface

### 1.3 流量模型建立与系统性能验证

1) 试验样品。以玉米、小麦、颗粒配合饲料为试

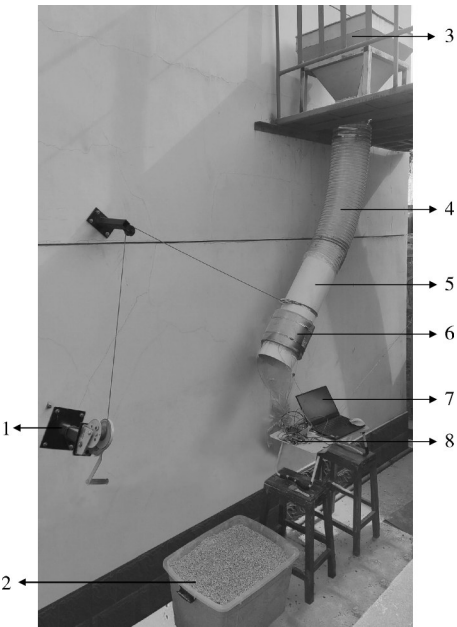
验材料,其中,玉米品种为先玉335,小麦品种为楚襄1号,颗粒配合饲料取自某饲料生产企业的肉大鸡配

合饲料。肉大鸡配合饲料主要由玉米、谷物及其加工产品、豆粕、磷酸氢钙、石粉、氯化钠、氨基酸、维生素及矿物元素等组成。采用烘干法(GB/T 6453—2014)分别测量玉米、小麦、颗粒配合饲料试验样品的含水率分别为 $(12.36\pm0.06)\%$ 、 $(12.36\pm0.09)\%$ 、 $(12.14\pm0.10)\%$ ；采用称质量法(GB/T 5498—2013)分别测得玉米、小麦、颗粒配合饲料试验样品的容重分别为 $(730.31\pm12.22)$ 、 $(795.48\pm7.39)$ 、 $(646.13\pm12.26)$  kg/m<sup>3</sup>。

2)试验设备。搭建质量流量计试验台架,如图9所示。试验台架由手动绞盘、接料箱、料仓、PU聚氨酯弯管、电容传感器和数据采集系统组成。手动绞盘通过转动手柄控制钢丝绳的长度,实现溜管倾角的调整,并在设定角度后自动锁定。安装于溜管末端的电容传感器能够实时检测管道内介质状态的变化,并将信号传输至数据采集系统进行后处理。

3)试验方法和过程。如图10C所示,将溜管倾角设置为35°,称取小麦(玉米)质量分别为20、40、60、80、100 kg,颗粒配合饲料质量为20、35、50、65、75 kg,将称取物料放置于仓内开展标定试验,每种物料同一质量做3次重复试验,取3次试验结果的平均值为最终试验结果。由数据采集系统测量电容传感器的电容值,记录每次颗粒物料流经传感器时的电容测量值与基准电容值差值的累计值,使用Origin对标定试验数据进行处理,分别建立玉米、小麦、颗粒配合饲料质量流量预测模型。

如图10所示,将溜管倾角分别设置为15°(A)、



1. 手动绞盘; 2. 接料箱; 3. 料仓; 4. PU 聚氨酯弯管; 5. 溜管; 6. 电容传感器; 7. 上位机; 8. 控制板。1. Manual winch; 2. Splicing box; 3. Hopper; 4. PU polyurethane elbow; 5. Chute; 6. Capacitive sensors; 7. Human-computer; 8. Control panel.

图9 质量流量计试验台架

Fig.9 Mass flow meter test bench

25°(B)、35°(C)、45°(D)和55°(E),分别称取小麦(玉米)质量为30、50、70 kg,颗粒配合饲料质量为30、50、65 kg放置于料仓内,记录每次电容传感器与传感器基准电容值差值的累计电容值,计算质量流量测量值与实际质量流量之间的相对误差,对质量流量的测量精度进行验证试验。

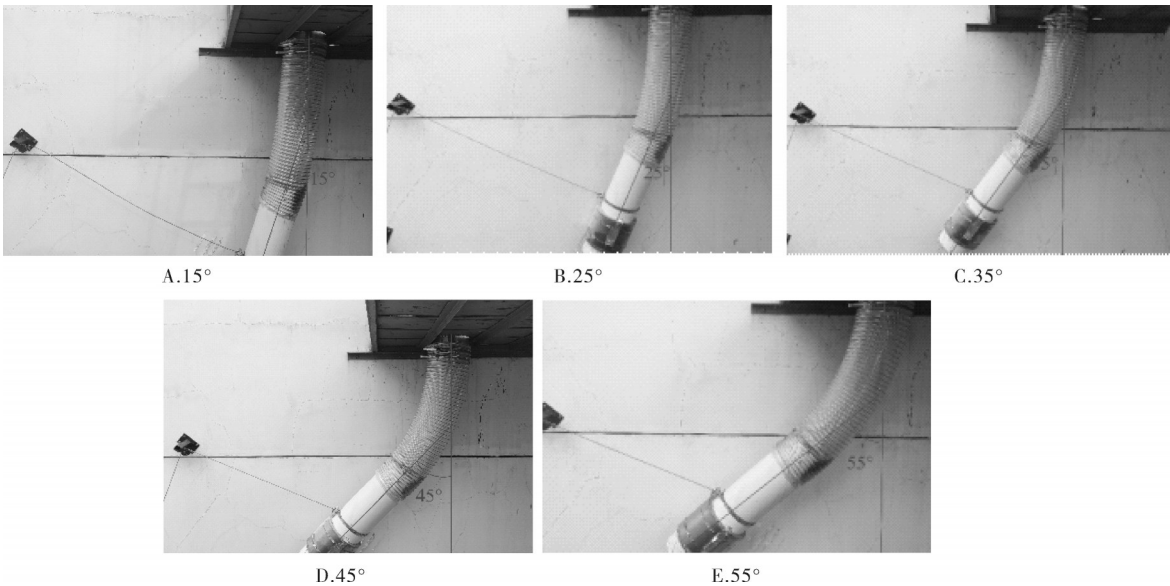


图10 不同倾角状态下的溜管实物图

Fig.10 Physical diagram of the chute at different inclination angles

2 结果与分析

2.1 颗粒物料质量流量预测模型建立

通过数据采集系统测量,电容传感器基准电容为 $(7.3\pm0.1)$  pF。颗粒物料质量与累计电容值的关系如图 11 所示。

由图 11 可知,在本研究所设试验条件下,3 种颗粒物料的质量流量随着电容值响应值的增大而增大,且均呈线性关系。通过线性回归,其中,玉米的拟合曲线方程为 $y=112.9681x+9.1702$ ,决定系数 $R^2$ 为 0.990 4;小麦的拟合曲线方程为 $y=164.9001x+10.1802$ ,决定系数 $R^2$ 为 0.993 9;颗粒配合饲料的拟合方程为 $y=83.6173x+15.8275$ ,决定系数 $R^2$ 为 0.987 9。结果表明,累计电容值与颗粒质量之间的存在较高的线性相关性,可以根据电容传感器输出变化量得到颗粒物料的质量流量。

表 1 3 种颗粒物料质量流量预测模型的方差分析结果

颗粒物料种类 Types of granular material	来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Df	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
玉米 Maize	模型 Model	3 971.055 6	1	3 971.055 6	411.587 6	0.000 3
	误差 Deviation	28.944 4	3	9.648 1		
	总计 Total	4 000.000 0	4			
小麦 Wheat	模型 Model	3 981.821 6	1	3 981.821 6	657.124 4	0.000 1
	误差 Deviation	18.178 4	3	6.059 5		
	总计 Total	4 000.000 0	4			
颗粒配合饲料 Pelleted extrusion mixed feed	模型 Model	1 952.139 8	1	1 952.139 8	327.903 7	0.000 4
	误差 Deviation	17.860 2	3	5.953 4		
	总计 Total	1 970.000 0	4			

从表 1 可以看出,玉米质量流量预测模型的 $F$ 值为 411.587 6, $P<0.01$ ;小麦质量流量预测模型的 $F$ 值为 657.124 4, $P<0.01$ ;颗粒配合饲料质量流量预测模型的 $F$ 值为 327.903 7, $P<0.01$ 。以上数据表明建立的模型具有统计学意义,可用于颗粒物料质量流量的可靠预测。

2.2 测量精度验证

通过改变溜管的倾角验证不同流量条件下颗粒物流质量流量计测量的准确性。玉米、小麦和颗粒配合饲料的测量结果分别如表 2~表 4 所示。

由表 2~表 4 可知,在多个倾角不同质量的条件下,玉米的测量相对误差最大值为 6.66%,最小值为 0.27%,平均相对误差 MRE 为 3.11%;小麦的测量相对误差最大值为 10.98%,最小值为 0.11%,平均相对误差 MRE 为 3.76%;颗粒配合饲料的测量相对误差

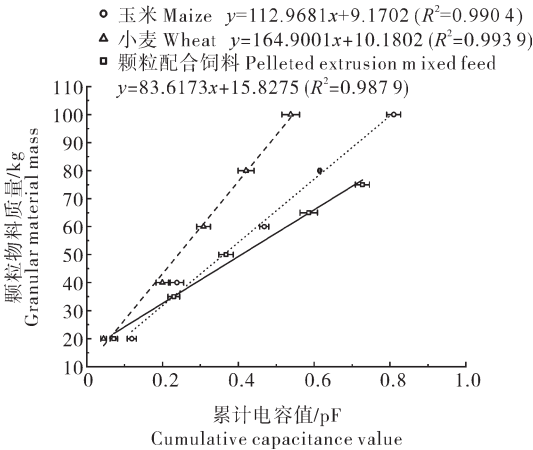


图 11 颗粒物料质量与累计电容值曲线

Fig.11 Granular material mass and cumulative capacitance value

为了进一步评价预测模型的可行性,分别对 3 种颗粒物料模型进行方差分析,分析结果如表 1 所示。

3 讨论

本研究针对实际生产过程中,颗粒物料质量流量易受外部条件干扰的实际问题,设计与生产过程中溜管配套安装的溜管式颗粒物料质量流量计,主要由八极板组合旋转激励电容传感器和数据采集系统等组成。数据采集系统由上位机和下位机两部分组成。其中,下位机部分以 STM32 单片机为控制器,控制极板转换电路和电容数字转换芯片,实现电容值的实时在线测量。上位机部分采用 LabVIEW 设计,可实现质量流量和累计质量曲线的实时显示

表 2 溜管式质量流量计玉米测量结果 Table 2 Measuring result of maize chute type mass flow meter			
溜管倾角/(°) Chute inclination	颗粒物料质量/kg Granular material mass	质量测量值/kg Measurement feed mass	相对误差/% Relative error
15	30	28.126 2	6.66
	50	48.121 6	3.90
	70	66.445 0	5.35
25	30	29.120 4	3.02
	50	53.318 1	6.22
	70	67.778 1	3.28
35	30	29.662 6	1.14
	50	49.635 4	0.73
	70	69.337 0	0.96
45	30	29.301 1	2.39
	50	50.155 0	0.31
	70	72.929 4	4.02
55	30	30.927 9	3.00
	50	52.821 1	5.34
	70	69.811 5	0.27

表 3 溜管式质量流量计小麦测量结果 Table 3 Measuring result of wheat chute type mass flow meter			
溜管倾角/(°) Chute inclination	颗粒物料质量/kg Granular material mass	质量测量值/kg Measurement feed mass	相对误差/% Relative error
15	30	27.033 0	10.98
	50	46.458 2	7.62
	70	65.124 9	7.49
25	30	29.308 6	2.36
	50	47.249 7	5.82
	70	66.081 3	5.93
35	30	30.034 2	0.11
	50	50.844 6	1.66
	70	68.389 9	2.35
45	30	29.044 8	3.29
	50	50.679 7	1.34
	70	70.962 4	1.36
55	30	30.364 0	1.20
	50	51.405 2	2.73
	70	71.523 0	2.13

和数据保存等功能。  
本研究分别建立玉米、小麦、颗粒配合饲料 3 种

表 4 溜管式质量流量计颗粒配合饲料测量结果 Table 4 Measuring result of pelleted extrusion mixed feed chute type mass flow meter			
溜管倾角/(°) Chute inclination	颗粒物料质量/kg Granular material mass	质量测量值/kg Measurement feed mass	相对误差/% Relative error
15	30	27.915 1	7.47
	50	47.180 5	5.98
	65	61.362 0	5.93
25	30	28.701 1	4.53
	50	53.134 1	5.90
	65	62.532 7	3.95
35	30	30.490 5	1.61
	50	49.388 0	1.24
	65	64.104 7	1.40
45	30	30.624 3	2.04
	50	48.585 3	2.91
	65	63.619 7	2.17
55	30	31.861 9	5.84
	50	52.364 8	4.52
	65	64.455 9	0.84

颗粒物料质量与累计电容值的线性拟合模型,3种颗粒物料质量流量预测模型的决定系数 $R^2$ 分别为0.990 4、0.993 9、0.987 9,并对流量计测量精度进行了试验验证。结果表明,设计开发的基于电容法的溜管式颗粒物料质量流量计能够较准确测量颗粒物料质量流量,玉米、小麦、颗粒配合饲料 3 种颗粒物料的测量结果的平均相对误差 MRE 分别为 3.11%、3.76%、3.75%,能够满足实际应用需求。

本文主要探究了将电容法应用于溜管输送颗粒物料过程中质量流量在线测量的可行性。由于在实际生产中,玉米、小麦、颗粒配合饲料产品都有相应的含水率控制标准,因此在初期测试阶段未考虑颗粒物料含水率对传感器测量的影响。然而,在实际应用过程中,由于储存条件的不同,物料含水率、环境温度和湿度都可能对介电常数产生一定影响,引起电容值发生变化。因此,在后续的研究中,应综合考虑环境因素和物料特性对质量流量测量精度的影响,提高测量系统的普适性。

参考文献 References

[1] 侯岩妍. 基于机器视觉的饲料生产智能包装系统设计与应用研究[J]. 饲料研究, 2021, 44(3): 110-113. HOU Y Y. Re-



- search on design and application of intelligent packaging system for feed production based on machine vision[J]. Feed research, 2021, 44(3): 110-113 (in Chinese with English abstract).
- [2] 旷文彬, 邢普. 自动定量包装秤结构设计及动态称重试验研究[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(11): 39-42. KUANG W B, XING P. Research on structural design and dynamic weighing experimental of automatic quantitative packaging weigher[J]. Machine design and manufacturing engineering, 2019, 48(11): 39-42 (in Chinese with English abstract).
- [3] 周晓娟. 粉状饲料动态定量称量包装控制系统设计与实现[J]. 包装工程, 2021, 42(7): 251-256. ZHOU X J. Design and realization of dynamic quantitative weighing and packaging control system for powdered feed[J]. Packaging engineering, 2021, 42(7): 251-256 (in Chinese with English abstract).
- [4] 周颖琦. 基于计算机控制的饲料称重配料系统开发应用[J]. 中国饲料, 2020(20): 110-113. ZHOU Y Q. Development and application of feed weighing and batching system based on computer control[J]. China feed, 2020(20): 110-113 (in Chinese with English abstract).
- [5] 薛蕾. 不同饲料称量系统对饲料生产效率及经济效益的影响[J]. 饲料研究, 2020, 43(12): 133-135. XUE L. Effects of different feed weighing systems on feed production efficiency and economic efficiency effects of benefits[J]. Feed research, 2020, 43(12): 133-135 (in Chinese with English abstract).
- [6] QIAO W, LAN Y, DONG H J, et al. Dual-field measurement system for real-time material flow on conveyor belt[J/OL]. Flow measurement and instrumentation, 2022, 83: 102082 [2024-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2021.102082>.
- [7] PIETRZAK P, MELLER M, NIEDZIECKI M. Dynamic mass measurement in checkweighers using a discrete time-variant low-pass filter[J]. Mechanical systems and signal processing, 2014, 48(1/2): 67-76.
- [8] ENGISCH W E, MUZZIO F J. Feedrate deviations caused by hopper refill of loss-in-weight feeders[J]. Powder technology, 2015, 283: 389-400.
- [9] 陈日兴. 关于最新版 OIML R107-2007《非连续累计自动衡器(累计料斗秤)》的理解与质疑[J]. 衡器, 2011, 40(1): 18-21. CHEN R X. Understanding and questioned of the newest version OIML R107-2007 discontinuous totalising automatic weighing instrument (totalising hopper weigher)[J]. Weighing instrument, 2011, 40(1): 18-21 (in Chinese).
- [10] TAMARA A J, YAP C, MANNAN M A. Gravity pipe flow of polymeric bulk solids in pneumatic conveying system[J]. Chemical engineering science, 2006, 61(24): 7836-7849.
- [11] 安连锁, 刘伟龙, 魏萌, 等. 基于声发射的气力输送颗粒相质量流量监测[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(1): 220-224. AN L S, LIU W L, WEI M, et al. Monitoring of particle mass flow rate in pneumatic conveying based on acoustic emission[J]. Noise and vibration control, 2018, 38(1): 220-224 (in Chinese with English abstract).
- [12] MILLEN M J, SOWERBY B D, COGHILL P J, et al. Plant tests of an on-line multiple-pipe pulverised coal mass flow measuring system[J]. Flow measurement and instrumentation, 2000, 11(3): 153-158.
- [13] PORTER E, VELLIDIS G, LIAKOS V, et al. An optical yield monitor for peanuts: proof of concept and evaluation[J]. Advances in animal biosciences, 2017, 8(2): 199-203.
- [14] MUJI S Z M, RAHIM R A, SHAIB M F A, et al. Optical tomography: the potential of mass flow rate in rice industry[J]. Sensors and actuators B-chemical, 2015, 213: 508-514.
- [15] ZHENG Y N, LI Y, LIU Q. Measurement of mass flow rate of particulate solids in gravity chute conveyor based on laser sensing array[J]. Optics & laser technology, 2007, 39(2): 298-305.
- [16] ZOU J, LIU C G, WANG H G, et al. Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods[J]. Powder technology, 2020, 360: 112-119.
- [17] PANG L, SHAO Y J, GENG C M, et al. Measurement of solid mass flow rate by a non-intrusive microwave method[J]. Powder technology, 2018, 323: 525-532.
- [18] QIAN X C, HUANG X B, HU Y H, et al. Pulverized coal flow metering on a full-scale power plant using electrostatic sensor arrays[J]. Flow measurement and instrumentation, 2014, 40(40): 185-191.
- [19] 吴诗彤, 闫勇, 钱相臣. 静电传感器测量固体颗粒质量流量实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(8): 1575-1581. WU S T, YAN Y, QIAN X C. Experimental study on mass flow measurement of solid particles using electrostatic sensors[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(8): 1575-1581 (in Chinese with English abstract).
- [20] 孟田. 锅炉煤粉流量智能分析装置的研究与设计[D]. 北京: 华北电力大学, 2022. MENG T. Research and design of intelligent analysis device for boiler pulverized fuel flow[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘伟龙. 基于声学的气固两相流质量流量测量研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020. LIU W L. Research on mass flow rate measurement of gas solid two phase flow based on acoustic method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020 (in Chinese with English abstract).
- [22] 李冠冠. 基于静电传感器的颗粒质量流量的测量[D]. 北京: 华北电力大学, 2016. Mass flow rate measurement of particles based on electrostatic sensors[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016 (in Chinese with English abstract).

- [23] SUN Y J, JIA H L, REN D L, et al. Experimental study of capacitance sensors to test seed-flow[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 347/348/349/350: 167-170.
- [24] 周利明, 马明, 苑严伟, 等. 基于电容法的施肥量检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 44-51. ZHOU L M, MA M, YUAN Y W, et al. Design and test of fertilizer mass monitoring system based on capacitance method [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 44-51 (in Chinese with English abstract).
- [25] 周利明, 张小超, 苑严伟. 小麦播种机电容式排种量传感器设计[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 99-103. ZHOU L M, ZHANG X C, YUAN Y W. Design of capacitance seed rate sensor of wheat planter [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 99-103 (in Chinese with English abstract).
- [26] 朱亮, 王关平, 孙伟, 等. 基于空间电容传感器的马铃薯排种状态监测系统研制[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 34-43. ZHU L, WANG W P, SUN W, et al. Development of potato seed-metering state monitoring system based on space capacitance sensors [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 34-43 (in Chinese with English abstract).
- [27] 计斌. 电容传感器的结构优化设计及多目标优化方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015. JI B. Research on structure design and multi-objective optimization of capacitance sensor [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [28] 刘凯, 巴鹏. 新型油液监测电容传感器的设计[J]. 中国仪器仪表, 2007(10): 38-40. LIU K, BA P. Design of capacitance sensor for new monitoring of oil [J]. China instrumentation, 2007(10): 38-40 (in Chinese with English abstract).
- [29] 陈莉. 基于充放电原理的小电容测量电路的设计[J]. 电子设计工程, 2018, 26(16): 147-150. CHEN L. Design of small capacitance measurement circuit based on charge discharge principle [J]. Electronic design engineering, 2018, 26(16): 147-150 (in Chinese with English abstract).
- [30] LIU Q F, HAN Y. Analysis of the effect of stray capacitance on a charge/discharge-based electrical capacitance tomography system[J]. Optik, 2013, 124(23): 6009-6012.
- [31] 郭文川, 刘驰, 杨军. 小麦秸秆含水率测量仪的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 33-40. GUO W C, LIU C, YANG J. Design and experiment on wheat straw moisture content meter [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 33-40 (in Chinese with English abstract).
- [32] WANG Y F, HU L J, YAN H, et al. Structural comparison of electrical capacitance tomography sensor [C]//2017 29th Chinese control and decision conference (CCDC). Chongqing, China: IEEE, 2017: 7764-7769.
- [33] FAN W, CHEN Q, CHEN M, et al. Online capacitive detection method for moisture content of aggregate based on edge effect [J/OL]. Measurement, 2022, 203: 111962 [2024-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111962>.
- [34] LIU Z Y, PAN Y C, WU P, et al. A novel capacitive pressure sensor based on non-coplanar comb electrodes [J/OL]. Sensors and actuators A: physical, 2019, 297: 111525 [2024-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.07.049>.
- [35] 麦智炜, 李长友, 徐凤英, 等. 浮地式粮食水分在线检测装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 207-213. MAI Z W, LI C Y, XU F Y, et al. Design and test of grain moisture online measuring system based on floating ground capacitance [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(10): 207-213 (in Chinese with English abstract).
- [36] GAO W D, LIU C L, LIU T, et al. An area-variant type MEMS capacitive sensor based on a novel bionic swallow structure for high sensitive nano-indentation measurement [J/OL]. Measurement, 2022, 200: 111634 [2024-04-28]. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111634>.
- [37] 邹大军, 李锡文, 何锐波, 等. 基于有限元分析的粉末介电常数测试装置研制[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 423-427. ZOU D J, LI X W, HE R B, et al. Development of device for measuring powder's dielectric constant based on finite element analysis [J]. Chinese Journal of scientific instrument, 2013, 34(2): 423-427 (in Chinese with English abstract).
- [38] 黄土琛, 宫辉, 邵贝贝. 基于USB和FPGA的多功能数据采集系统[J]. 原子能科学技术, 2013, 47(11): 2172-2176. HUANG T C, GONG H, SHAO B B. Multifunctional data acquisition system based on USB and FPGA [J]. Atomic energy science and technology, 2013, 47(11): 2172-2176 (in Chinese with English abstract).
- [39] 张鑫, 李冬梅, 黄元庆. 基于LabVIEW的阵列式传感器数据采集系统[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(S2): 1399-1401. ZHANG X, LI D M, HUANG Y Q. Data acquisition system based on LabVIEW for array sensors [J]. Chinese journal of scientific instrument, 2006, 27(S2): 1399-1401 (in Chinese with English abstract).

## Design and experiment of a chute mass flowmeter of granular materials based on capacitance method

LU Kaixin<sup>1,2</sup>, ZHAO Yanhui<sup>1</sup>, CAO Qing<sup>1,2</sup>, YONG Ganwen<sup>1,2</sup>,  
WANG Tianbin<sup>1,2</sup>, LIU Jing<sup>1,2</sup>, NIU Zhiyou<sup>1,2</sup>

1.College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2.Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Smart Farming for Agricultural Animals,  
Wuhan 430070, China

**Abstract** A chute mass flowmeter of granular materials was designed based on capacitance method and according to the difference in dielectric properties between granular materials and air to achieve online automatic measurement of the mass flow rate of granular materials in the chute. The device was equipped with an STM32 microcontroller, a capacitance-to-digital Converter chip AD7746, and a plate conversion circuit with MT8816 as the core chip to build a data acquisition system, achieving effective acquisition of capacitance of eight-plate rotary excitation sensors. A test bench of mass flowmeter was built. Maize, wheat and granular compound feed were used to calibrate the relationship between the mass flow rate and the value of cumulative capacitance. The models of predicting the mass flow of three kinds of granular materials were constructed, with determination coefficient  $R^2$  of 0.990 4, 0.993 9, and 0.987 9, respectively. The results of verifying the accuracy of chute mass flowmeter showed that the average relative error (MRE) of measurement accuracy for maize, wheat and granular compound feed was 3.11%, 3.76%, and 3.75%, when the inclination angle of the chute was 15°, 25°, 35°, 45°, and 55°, the mass of maize and wheat mass was 30, 50 and 70 kg, the mass of granular compound feed was 30, 50, and 65 kg, respectively. It is indicated that it is feasible to use the capacitance method in the online measurement of mass flow rate in the process of transporting granular materials through a chute, which can achieve the automatic online measurement of the mass flow rate of granular materials.

**Keywords** capacitance; sensors; granular materials; mass flow rate; on-line measurement; chute

(责任编辑:边书京)