

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.006

# 气流输送播种机压电式流量传感器设计与试验

赵博 樊学谦 周利明 李阳 车宇 牛康

(中国农业机械化科学研究院,北京 100083)

**摘要:**为实现气流输送播种机播种质量的快速准确检测,设计了一种基于压电陶瓷的弧形阵列式播种流量传感器。在分析气流分配器出种子运动特性的基础上,对感知单元布局及传感器整体结构进行了优化设计;通过不同条件下种子碰撞试验,确定了感知单元的材料和结构尺寸;设计了信号调理电路与脉冲计数电路,实现了种子在线计量,并通过CAN通信实时发送。利用气流输送播种试验台架,分析了气流压力及排种量对传感器检测精度的影响,在正常工作气压范围内,检测误差与气流压力近似满足线性关系,进一步提出了传感器检测的校准模型,并进行了台架试验验证。结果表明:在推荐工作参数条件下,即气压为166 Pa、排种量低于170粒/s时,校准后传感器的检测误差在5%以内,且传感器对堵塞故障报警准确率达100%。该传感器能够有效地监测气流输送播种机的排种性能,有助于提高播种作业质量。

**关键词:**播种机;气流输送;压电;流量传感器

中图分类号: S126; S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)08-0055-07

OSID:



## Design and Test of Piezoelectric Flow Sensor for Pneumatic Seeder

ZHAO Bo FAN Xueqian ZHOU Liming LI Yang CHE Yu NIU Kang

(Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Seed flow during sowing will affect the quality of sowing, which will seriously affect yield when blockage occurs. In order to realize the fast and accurate detection of the seeding quality of the air-flow conveying seeder, an arc array seeding flow sensor based on piezoelectric ceramics was designed. Based on the analysis of the seed movement characteristics of the airflow distributor outlet, the sensing unit layout and the overall structure of the sensor were optimally designed; the seed collision experiments under different conditions were used to determine the structural size and material of the sensing unit; a signal conditioning circuit and a pulse counting circuit were designed to realize the online measurement of seeds and real-time transmission through CAN communication. The effect of airflow pressure and metering quantity on the detection accuracy of the sensor was analyzed using the airflow seeding test bench. In the normal working pressure range, the detection error and air pressure approximately met the linear relationship. Based on this, a calibration model for sensor detection was further proposed and bench verification was performed. The test results showed that the maximum detection error of the sensor was within 5% when the air pressure was 166 Pa and the seeding rate was less than 170 seeds/s under the recommended operating parameters, and the accuracy rate of the sensor's alarm for blockage failure can reach 100%. The system can effectively monitor the seeding performance of the air-flow conveying seeder, which can help to improve the quality of seeding operations.

**Key words:** seeder; air-flow conveying; piezoelectric; flow sensor

## 0 引言

气流输送式播种机具有适应性强、效率高、节省

作业成本等优点,目前在国外已广泛使用<sup>[1-3]</sup>,国内在气流分配器等一些关键零部件上的研究已经取得了很大进展<sup>[4-6]</sup>。气流输送式播种机的作业幅宽

收稿日期: 2019-12-19 修回日期: 2020-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700103)和江苏省现代农业装备与技术协同创新中心项目(4091600023)

作者简介: 赵博(1981—),男,研究员,博士,主要从事机电一体化及自动控制研究,E-mail: zhaoboshi@126.com

通信作者: 周利明(1982—),男,研究员,博士,主要从事精准农业测控技术研究,E-mail: haibo1129@163.com

大、作业速度快,气流分配器的某一行一旦发生故障,将影响其他多行排种均匀性<sup>[1]</sup>,并且会造成严重漏播,影响作物产量。因此,实时准确地获取气流输送式播种机各行排种量信息、掌握排种作业均匀性、及时发现作业故障对于提高播种作业质量具有重要意义。

目前,气流输送式播种机采用的流量传感器主要有光电式、声电式、压电式。如 Digitroll 公司的 BlackEye 为一款红外对射式光电计数传感器,计数准确率接近 100% (油菜籽、大麦准确率为 99%,小麦、豌豆准确率为 98%)<sup>[7-10]</sup>; Intelligent Agricultural Solutions 公司<sup>[8]</sup>研制出基于声电传感器的流量监测系统,通过检测声音脉冲计算流量; Vansco Electronic 公司<sup>[11]</sup>采用延伸到种管内的压电传感器检测种子撞击,通过产生的高频振荡来监测堵漏; John Deere 公司<sup>[12]</sup>将压电薄膜粘贴在内凹的管壁斜面上,设计了一款堵漏检测传感器; HOBERGE 等<sup>[13]</sup>将撞击面设计成传感器阵列,采用压电陶瓷检测种子撞击信号。其中,光电传感器具有灵敏度高、信号易处理、成本低、检测精度高等优点,但是对灰尘、肥料残渣等敏感,需要加强防护和定期维护<sup>[14]</sup>; 声电传感器对粉尘干扰不敏感,结合人工神经网络可以检测种子破损<sup>[15]</sup>,但易受噪声干扰,需要加强隔音抗噪能力<sup>[16]</sup>; 压电式传感器结构简单、灵敏度高、信噪比高,能应用在灰尘、振动等恶劣环境下,而目前的压电传感器多用于气流输送排种管路堵塞的检测,关于高速流量检测的研究应用较少。

本文设计一种基于压电陶瓷的弧形阵列式流量传感器,进行传感器的台架性能试验,以期实现气流输送播种作业过程中的流量检测与堵塞报警。

## 1 传感器总体设计

气流输送式流量传感器由传感器头外壳、感知单元、信号处理单元和信号采集传输单元组成,结构如图 1 所示。感知单元由敏感元件、转换元件、阻尼元件 T 通过强力胶粘结在一起,该传感器采用阵列式结构,包含 6 个感知单元。信号采集传输单元以 PIC18F25K80 单片机为核心,采集 6 路脉冲信号,并通过 CAN 总线传输种子粒数信息。工作原理如下:种子通过检测区时,撞击感知单元产生衰减振荡信号,经信号调理电路处理后输出脉冲信号,采集单元计数脉冲信号并通过 CAN 总线发送种子粒数信息。

## 2 结构设计

### 2.1 通道截面参数

针对某公司生产的气流分配器,其出种口外径

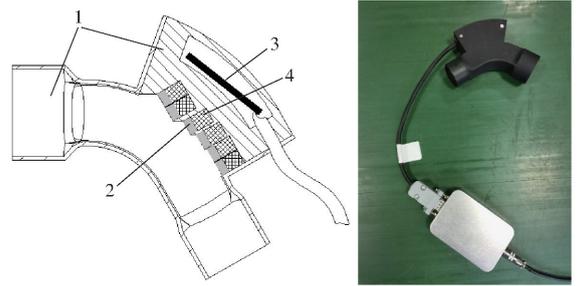


图 1 传感器结构与实物图

Fig. 1 Sensor structure and physical picture

1. 传感器头外壳 2. 感知单元 3. 信号处理电路板 4. 隔振材料

为 33 mm,内径为 25 mm,因此确定传感器的入口内径和出口内径分别为 33 cm 和 25 cm。根据一元等熵气流的连续方程<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} \rho u A = \text{const} \\ \frac{dp}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\rho$ ——气流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$u$ ——气流速度,  $\text{m}/\text{s}$

$A$ ——截面积,  $\text{m}^2$

可知,气体在流动过程中,若截面积变化,将引起气流速度和密度的变化。当截面积变大时,速度变小,种子冲击力减小;当截面积变小时,虽然速度增大,但是单位体积内种子数量必然增多,会使种子之间碰撞增多,能耗增加,部分种子冲击力减小。因此本文采用种子通道进行等截面积设计的方法,同时为了便于感知单元的安装布置,将传感器通道的中间部分设计成正方形,其边长约为 22 cm。

### 2.2 检测区域参数

为了减少气流方向突变带来的能量损耗,并且保证有足够的面积来承受种子的撞击,将传感器中间段设计为方管圆弧,所对应的圆心角设计成  $60^\circ$ 。敏感板与竖直方向应该有一个夹角,夹角太大会造成冲击力不足,太小则种子可能会被弹回形成二次撞击,根据经验设计  $\theta = 30^\circ$ ,如图 2 所示。

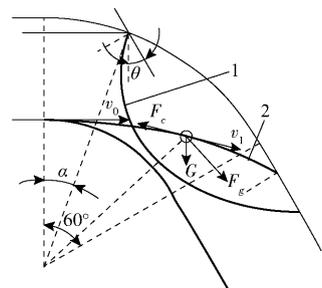


图 2 种子轨迹示意图

Fig. 2 Schematic of seed track

1. 撞击后运动轨迹 2. 撞击前运动轨迹

感知区域的大小应当保证所有种子能够撞击,且尽量避免二次撞击的发生。种子在检测区域内速

度为  $v_1$ , 受到的作用力主要是气流驱动力  $F_g$  及阻力  $F_c$ , 由于重力远小于气流驱动力, 所以可以忽略重力  $G$ , 种子进入检测区域时有很高的水平初速度 ( $v_0 \approx 13 \text{ m/s}$ )<sup>[6]</sup>。种子撞击感知单元前, 其运动轨迹主要由输送气流的速度决定, 在很短的运动时间内, 不会造成种子轨迹的较大偏移; 种子撞击感知单元后, 速度方向迅速改变, 在气流推力下移动方向逐渐与气流方向一致, 为了种子撞击后在竖直方向有较大的偏移来避免二次碰撞, 角度  $\alpha$  区域内不用于检测, 分析过程如图 2 所示。选择  $\alpha = 20^\circ$  制作样机进行试验。

### 3 感知单元碰撞特性分析

播种作业时, 每行的排种频率可表示为

$$F = \frac{5vQH}{36W} \quad (2)$$

式中  $v$ ——播种机行进速度, km/h

$Q$ ——小麦播种量, kg/hm<sup>2</sup>

$W$ ——小麦种子千粒质量, g

$H$ ——播种机行距, cm

根据播种机作业参数<sup>[18-21]</sup>, 选择  $v = 20 \text{ km/h}$ ,  $Q = 400 \text{ kg/hm}^2$ ,  $W = 25 \text{ g}$ ,  $H = 20 \text{ cm}$ , 可得最高撞击频率约为 2 kHz, 由于实际中会出现多粒种子几乎同时撞击, 因此应设计高于 2 kHz 的频率以保证更高的检测精度, 即要求输出信号宽度小于 0.5 ms。

由于检测频率较高, 因此感知单元采取敏感元件、转换元件、阻尼元件的组合结构。其中, 敏感元件用于响应冲击, 其固有频率越高, 瞬态响应分量衰减越迅速, 并且随着厚度  $h$  增加, 一阶固有频率增加而相对变形率下降, 随着宽度  $b$  增加, 一阶固有频率和相对变形率均下降<sup>[22]</sup>; 转换元件选择压电陶瓷, 快速将振动信号转换为电信号, 根据压电效应方程可知, 形变量越大, 压电材料产生的电荷量越多; 选择阻尼元件是为了加速信号衰减以提高检测频率。

通过上述碰撞特性分析可知, 理想的敏感元件需相对变形率和一阶固有频率均较大。已有研究表明<sup>[23]</sup>, T6 铝板和 304 不锈钢在种子撞击下能获得较大的碰撞接触力从而使压电单元产生较大的响应信号。本文传感器针对小麦种子设计, 小麦籽粒长度约 5 mm, 因此设计  $b = 5 \text{ mm}$ , 而  $h$  通过试验选择。

## 4 信号调理电路与采集系统设计

### 4.1 信号调理电路

信号调理电路由带通滤波电路、放大电路、包络

检波电路和施密特比较电路组成。

试验时发现撞击产生的信号幅值足够高, 因此感知单元直接连接带通滤波器滤除杂波干扰。本文采用 RC 带通滤波器, 实际上是低通滤波器和高通滤波器的串联, 其传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{\tau_1 s + 1} \frac{\tau_2 s}{\tau_2 s + 1} \quad (3)$$

式中  $\tau_1$ ——低通滤波时间常数, s

$\tau_2$ ——高通滤波时间常数, s

根据种子撞击感知单元输出信号频率, 选择通频带为 10 ~ 23 kHz。

滤波后的信号强度会衰减, 需要进行放大处理。本文放大电路基于 TL082C 进行设计, 应当设计适宜的削顶失真, 避免小撞击力的冲击不被检测到, 但放大倍数过大将导致检测频率降低。冲击响应信号是一个振荡衰减的多峰信号, 通过二极管包络检波电路可以将信号转换为单峰信号。比较电路能将模拟信号变成脉冲输出, 采用反向施密特触发器电路, 利用其磁滞特性消除信号抖动引起的比较器抖动<sup>[24]</sup>, 选择磁滞宽度为 2 V, 反向跃变电压 1 V。

设计电路时, 首先通过电路仿真初步确定元器件参数, 然后通过后续台架试验确定最终的元器件参数。仿真使用的信号发生电路为采用脉冲仿真源的 RLC 电路。仿真源参数为  $R = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 1.15 \text{ nF}$ ,  $L = 79.97 \text{ mH}$ 。在 Altium Designer 软件中建模, 设置脉宽为  $2 \times 10^{-5} \text{ s}$ , 赋值为 5 V, 然后进行 Mixed Sim 中的 Transient Analysis 仿真, 结果如图 3 所示。

仿真源模拟感知单元输出原始信号, 滤波后信号有所衰减, 仿真选取合适的放大倍数, 使滤波后信号达到放大器最大输出电压。为了能够加速电压衰减使信号宽度变小, 选择放电时间略小, 检波后信号表现为小幅波动的包络信号。发生种子撞击后, 输出信号由高电平跳变为低电平, 脉冲宽度约为 0.3 ms, 小于 0.5 ms。因此, 信号调理电路参数满足设计需要。

### 4.2 信号采集系统

信号采集系统基于 PIC18F25K80 单片机, 采用 CCP 模块和外部中断实现 6 路脉冲信号采集, 并通过 CAN 模块和 TJA1050 实现通信<sup>[25]</sup>。信号采集软件程序流程图如图 4 所示。程序运行后, 首先进行相关初始化工作, CAN 初始化完成后向外发送当前配置的 ID 和波特率, 然后循环等待请求发送计数结果。计数在中断服务程序中完成, 当发生中断时, 检查中断源, 若为 CCP 或者 INT1 中断, 则更新计数值; 若为 CAN 中断且 ID 匹配, 则判断帧类型, 当为数据帧时初始化 CAN 模块, 重新配置 ID 和波特率,

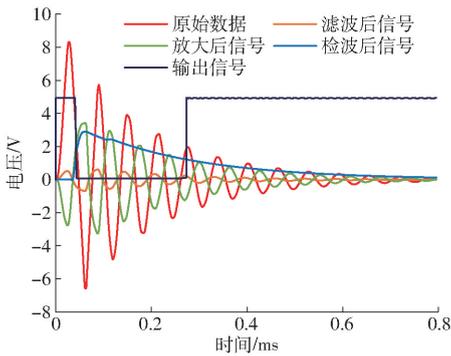


图3 信号仿真曲线

Fig. 3 Curves of signal simulation

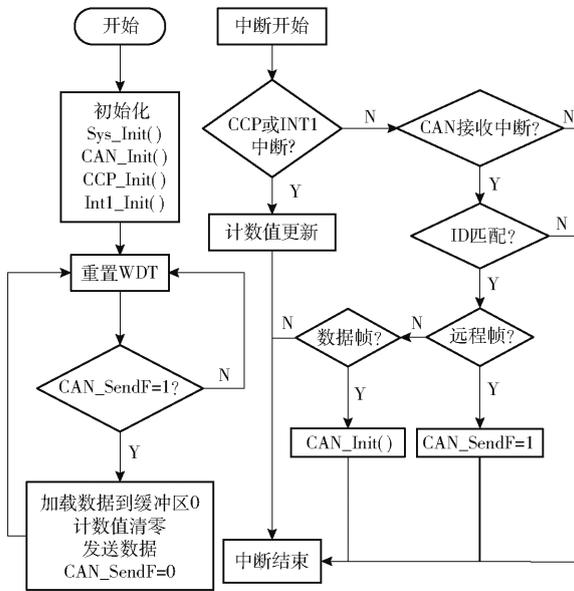


图4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

当为远程帧时,数据发送请求标志置1。

通信帧类型采用标准帧,波特率设置为250 kb/s;计数结果使用6个字节的帧格式发送,分别对应6路传感器单元;接收到的远程帧格式不包含有效数据,接收到的数据帧前5个字节有效,依次为缓冲器标识符的高、低字节,设置波特率控制寄存器的3个字节。

## 5 试验与结果分析

### 5.1 传感器单元试验

结合前述分析,选取T6铝和304不锈钢两种材料、相同长宽、不同厚度的敏感元件,软橡胶和硬橡胶两种阻尼元件,通过组合得到9组感知元件,固定于钢板上,如图5所示。T6铝密度为2700 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为0.33,弹性模量为68 GPa;304不锈钢的密度为7850 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为0.30,弹性模量为210 GPa;试验所用橡胶一种为半透明白色硅橡胶,硬度约50 HA,另一种为发泡工艺海绵硅胶,硬度约30 HA,厚度均为2 mm;结构相同时,硬度大的橡胶

材料弹性模量也较大。

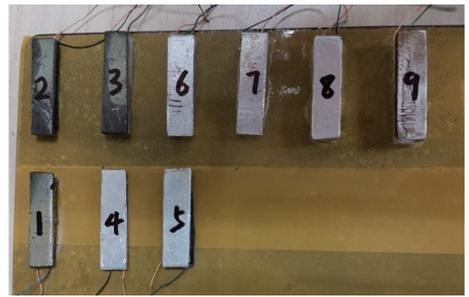


图5 感知单元

Fig. 5 Sensing unit

在相同的撞击条件下进行试验,利用示波器测量各感知单元响应曲线的幅值、频率以及衰减至0.5 V以下所需的时间,结果如表1所示。

表1 不同感知单元测试结果

Tab. 1 Test results of different sensing units

序号	感知单元组成	幅值/V	频率/kHz	衰减至0.5 V以下所需时间/ms
1	1 mm 厚 304 不锈钢			
2	1 mm 厚 304 不锈钢,软橡胶	13.87	12.76	1.58
3	1 mm 厚 304 不锈钢,硬橡胶	10.87	14.08	0.72
4	1 mm 厚 T6 铝			
5	1 mm 厚 T6 铝,软橡胶	14.33	12.35	0.78
6	1 mm 厚 T6 铝,硬橡胶	11.27	15.34	0.62
7	1.4 mm 厚 T6 铝,硬橡胶	10.00	16.24	0.56
8	1.7 mm 厚 T6 铝,硬橡胶	8.20	18.13	0.43
9	3.4 mm 厚 T6 铝,硬橡胶	2.42	29.87	0.28

根据表1可知:无阻尼元件时,输出微弱;相同条件下,T6铝板的响应曲线幅值高于304不锈钢;采用硬橡胶作为阻尼元件时,感知单元的响应频率高,衰减时间短,幅值较低;随着铝板的厚度增加,响应曲线的幅值变小,频率增高,衰减时间变短。

高响应幅值有更好的灵敏度,低衰减时间有助于提高检测频率,高频响应利于压电陶瓷的信号处理电路设计;因此,本文选择1.4 mm厚T6铝板为敏感元件,硬橡胶为阻尼元件的感知单元进行后续试验;该单元能够基本满足频率要求,且输出幅值较高,有助于提高灵敏度。事实上,在一定的厚度范围内(如1.4~1.7 mm)选择,并且搭配合适的电路参数均能够实现检测目的。

各个感知单元的输出信号有相似的曲线形状,其中,感知单元7的响应曲线如图6所示。

压电陶瓷传感器是典型的二阶欠阻尼振荡系统,传递函数的标准形式为

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4)$$

式中  $\omega_n$ ——无阻尼振荡频率,rad/s

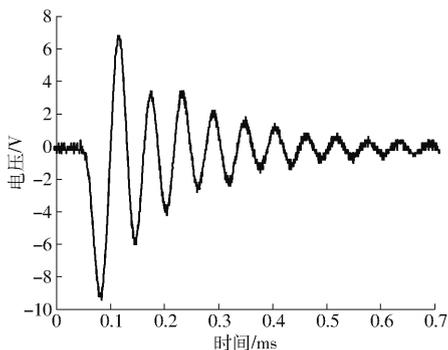


图 6 感知单元响应曲线

Fig. 6 Response curve of sensing unit

$\zeta$  —— 阻尼比

其脉冲响应的输出是稳态分量为 0 的阻尼振荡曲线，振荡频率称为阻尼振荡频率  $\omega_d$ 。通过分析可得无阻尼振荡频率、阻尼比、幅值等一系列信息。

### 5.2 台架试验

台架试验系统主要由排种器、垂直气流分配器、传感器、风机、试验控制台等组成，使用便携式计算机接收传感器数据，如图 7 所示。



图 7 试验系统

Fig. 7 Test system

1. 垂直气流分配器
2. 排种器
3. 风机
4. 传感器头
5. 信号采集单元

传感器通过 CAN - USB 转换模块与计算机相连，通过监测软件定时发送数据请求命令，发送间隔为 1 s，信号采集单元接收到指令后发送种子计数统计结果（脉冲信号个数）。设定不同的输送压力，在排种量约为 130 粒/s 的条件下试验，结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出，测量结果的标准差不大于 1.73%。根据表 2 数据绘制散点图（图 8），可以看出，当气压范围在 139 ~ 200 Pa 时，误差与气压近似满足线性关系。用直线进行拟合，线性度  $R^2 = 0.9533$ 。可得校准模型

$$\bar{N} = \frac{100}{34.456 + 0.375p} N \quad (5)$$

式中  $\bar{N}$  —— 种子数测量校准值，粒

$N$  —— 种子数测量值，粒

$p$  —— 气压，Pa

由表 2 可知，校准误差在 5% 以内，校准后测量

表 2 不同气压试验结果

Tab. 2 Test results at different pressures

序号	气压/ Pa	真实 值/粒	测量 值/粒	误差/ %	标准差/ %	校准 差/%
1	139	707	616	12.87		-0.63
2	139	832	732	12.02	0.88	-1.62
3	139	857	739	13.77		0.40
4	150	817	765	6.36		-3.23
5	150	810	730	9.88	0.21	0.64
6	150	844	758	10.19		0.99
7	166	1 214	1 157	4.70		1.45
8	166	1 118	1 047	6.35	0.84	3.16
9	166	1 069	1 007	5.80		2.59
10	186	858	890	-3.73		0.46
11	186	820	865	-5.49	1.10	-1.23
12	186	777	839	-7.98		-3.62
13	200	874	970	-10.98		-1.40
14	200	984	1 058	-7.52	1.73	1.77
15	200	1 131	1 234	-9.11		0.32

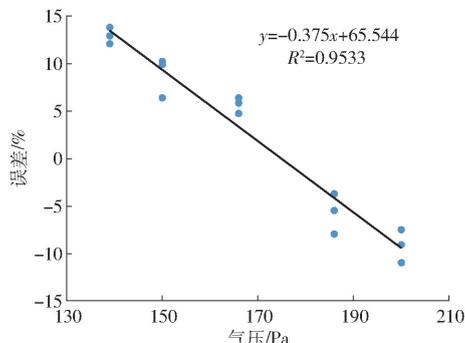


图 8 误差拟合曲线

Fig. 8 Error fitting curve

误差的标准差为 1.96%，说明传感器的电路参数选择和结构设计基本合理。

根据气流分配器生产企业推荐，在工作气压 166 Pa 的条件下，使用校准后的数据观察不同排种量下的检测误差，试验结果如表 3 所示。

表 3 不同排种量试验结果

Tab. 3 Test results at different metering quantities

序号	排种量/(粒·s <sup>-1</sup> )	真实值/粒	测量值/粒	校准误差/%
1	45	493	456	4.35
2	45	748	689	4.75
3	60	697	655	2.82
4	60	897	835	3.74
5	81	1 219	1 134	3.80
6	81	515	491	1.41
7	131	922	863	3.21
8	131	951	878	4.53
9	170	820	754	4.92
10	170	887	817	4.75
11	204	1 019	905	8.16
12	204	1 040	909	9.62

在排种量低于 170 粒/s 时,校准后测量误差在 5% 以内,标准差为 1.10%;该播种量能够满足常规播种机的作业要求;在该气压下,排种量 204 粒/s 时,部分输种管内已经出现少量种子滞留现象,因此在更高排种量时,应提高输送气压。

在工作气压 166 Pa 的条件下,设置不同排种量并设定流量报警阈值,进行管路堵塞报警试验,通过人为堵塞输种管末端制造故障,结果如表 4 所示。试验发现,报警准确率达 100%。

表 4 堵塞报警试验结果

Tab.4 Blockage alarm test results

序号	排种量/(粒·s <sup>-1</sup> )	堵塞次数/次	报警次数/次	准确率/%
1	45	5	5	100
2	81	5	5	100
3	170	5	5	100
4	204	5	5	100
5	241	5	5	100
6	275	5	5	100
7	302	5	5	100
8	344	5	5	100

## 6 结论

(1)设计了一款基于压电陶瓷的弧形阶梯阵列式流量传感器,并试制了样机;考虑到弧形结构可以避免输送气流方向突变,对传感器进行了结构设计;设计了信号调理电路和计数采集电路,并通过 CAN 发送流量信息。

(2)分析了不同感知单元的振动特性,大弹性模量的阻尼材料和厚的敏感元件能够输出高频的响应信号,但是响应幅值会有所降低,针对小麦播种,选择了 1.4 mm 的 T6 铝作为敏感元件,试验时能够较好地检测种子的撞击。

(3)在不同气压和不同排种量下的试验表明,气压对测量精度的影响很大,气压在 139 ~ 200 Pa 时,检测误差与气压近似满足线性关系,据此提出了传感器的校准模型;在一定范围内,排种量对流量检测精度没有明显的影响,当排种量小于 170 粒/s 时,校准后传感器的检测误差在 5% 以内。在整个排种量范围内进行堵塞报警试验,准确率达 100%。

## 参 考 文 献

- [1] 张敏,吴崇友. 气力输送式播种机概况及我国的应用前景分析[J]. 中国农机化学报,2008,29(2):70-72.  
ZHANG Min,WU Chongyou. The survey and the prospect in China of the pneumatic drill[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2008,29(2):70-72. (in Chinese)
- [2] 杨慧,刘立晶,周军平,等. 气流输送式条播机现状及我国应用情况分析[J]. 农机化研究,2013,35(12):216-220.  
YANG Hui,LIU Lijing,ZHOU Junping,et al. Analysis of air seed drill current situations and using situation in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2013,35(12):216-220. (in Chinese)
- [3] Lina. 源自汉诺威展——聊聊气流输送式播种机[J]. 农业机械(导购版),2014(1):49.
- [4] 李中华,王德成,刘贵林,等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报,2009,40(3):64-68.  
LI Zhonghua,WANG Decheng,LIU Guilin,et al. CFD simulation and improvement of air-stream distributive metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):64-68. (in Chinese)
- [5] 戴亿政,罗锡文,王在满,等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):36-42.  
DAI Yizheng,LUO Xiwen,WANG Zaiman,et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(24):36-42. (in Chinese)
- [6] 张晓辉,王永振,仇利,等. 小麦气力集排器排种分配系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3):59-67.  
ZHANG Xiaohui,WANG Yongzhen,ZHANG Li,et al. Design and experiment of wheat pneumatic centralized seeding distributing system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):59-67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180307&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180307&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.007. (in Chinese)
- [7] Digitroll. Seed blackeye sensor[EB/OL]. [2019-10-12]. <http://i-xeed.com/project/blackeye-sensor>.
- [8] Intelligent Agricultural Solutions. Recon wireless blockage and flow monitors[EB/OL]. [2019-10-12]. <http://www.intelligentag.com/products/73/wireless-blockage-flow-monitor>.
- [9] Intelligent Agricultural Solutions. Air seeder monitoring and equalization system using acoustic sensors:US8950260B2 [P]. 2015-02-10.
- [10] Intelligent Agricultural Solutions. Material flow monitoring system and method:US20190204130A1 [P]. 2019-06-04.
- [11] Vansco Electronic. Sensor device for particles in an air stream:US5177470A [P]. 1993-01-05.
- [12] John Deere. Air seeder blockage monitoring system:US5831542A [P]. 1998-11-03.
- [13] HOBERGE S M,HILLERINGMANN U,JOCHHEIM C,et al. Piezoelectric sensor array with evaluation electronic for counting grains in seed drills[C]//IEEE Africon 2011,2011:875-885.
- [14] ANIL C,HABIB K,BILAL K,et al. Development of an opto-electronic measurement system for planter laboratory [J]. Measurement,2017,102:90-95.
- [15] HADI K,HOSSEIN N,ASGHAR M. Detection of damaged seeds in laboratory evaluation of precision planter using impact

- acoustics and artificial neural networks[J]. *Artificial Intelligence Research*, 2012, 1(2): 67-74.
- [16] HADI K, HOSSEIN N, ASGHAR M. Online laboratory evaluation of seeding-machine application by an acoustic technique[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2015, 13(1): 1-8.
- [17] 何立明, 赵翌, 程邦勤. 气体动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [18] 于兴瑞, 耿端阳, 杜瑞成, 等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(增刊): 141-148.  
YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(Supp.): 141-148. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=2018s019&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2018s019&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)
- [19] 刘立晶, 刘忠军, 杨学军, 等. 气流输送式小麦免耕播种机设计和试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 54-57.  
LIU Lijing, LIU Zhongjun, YANG Xuejun, et al. Design and test on pneumatic no-till wheat planter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 54-57. (in Chinese)
- [20] Kubota. Kubota pneumatic seed drills[EB/OL]. [2018-12-22]. [https://www.kubota.com.au/wp-content/uploads/2016/09/KU\\_SD\\_Pneu.-Seed-Drills\\_III\\_IEN\\_AUS\\_LR-1.pdf](https://www.kubota.com.au/wp-content/uploads/2016/09/KU_SD_Pneu.-Seed-Drills_III_IEN_AUS_LR-1.pdf).
- [21] KVERNLAND. The inventors of pneumatic seeding technology[EB/OL]. [2018-12-23]. [https://ien.kverneland.com/content/download/56438/320861/KV\\_pneumatic\\_cult\\_mtd\\_gb.pdf](https://ien.kverneland.com/content/download/56438/320861/KV_pneumatic_cult_mtd_gb.pdf).
- [22] 梁振伟, 李耀明, 赵湛, 等. 基于模态分析的联合收获机籽粒损失监测传感器结构优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(4): 22-29.  
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan, et al. Structure optimization and performance experiment of grain loss monitoring sensor in combine harvester in using modal analysis[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(4): 22-29. (in Chinese)
- [23] 梁振伟, 李耀明, 赵湛. 纵轴流联合收获机籽粒夹带损失监测方法及传感器研制[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(3): 18-26.  
LIANG Zhenwei, LI Yaoming, ZHAO Zhan. Monitoring method and sensor for grain separation loss on axial flow combine harvester[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(3): 18-26. (in Chinese)
- [24] SERGIO FRANCO. Design with operational amplifiers and analog integrated circuits[M]. Columbus: The McGraw-Hill Companies, 2002.
- [25] 金鑫, 李倩文, 苑严伟, 等. 2BFJ-24型小麦精量播种变量施肥机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(5): 84-92.  
JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and test of 2BFJ-24 type variable fertilizer and wheat[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 84-92. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180510&flag=1&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180510&flag=1&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010. (in Chinese)

~~~~~

(上接第54页)

- [21] 李世超, 曹如月, 季宇寒, 等. 基于不同电机的拖拉机自动导航转向控制系统性能对比[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊): 40-49.  
LI Shichao, CAO Ruyue, JI Yuhan, et al. Performance analysis and comparison of different types of steering wheel turning control motors in automatic navigation system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.): 40-49. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2019s007&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s007&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.007. (in Chinese)
- [22] HAN X Z, KIM H J, KIM J Y, et al. Path-tracking simulation and field tests for an auto-guidance tillage tractor for a paddy field[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2015, 112: 161-171.
- [23] HOSSEIN M. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles[J]. *Journal of Terramechanics*, 2013, 50(3): 211-232.
- [24] 陈黎卿, 许鸣, 柏仁贵, 等. 高地隙植保机辅助驾驶系统设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 25-32.  
CHEN Liqing, XU Ming, BAI Rengui, et al. Design and test of auxiliary driving system for high-gap plant protection machine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 25-32. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190903&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190903&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.003. (in Chinese)
- [25] 翟长远, 朱瑞祥, 黄胜, 等. 基于单片机的施药监测系统设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(8): 70-74, 84.  
ZHAI Changyuan, ZHU Ruixiang, HUANG Sheng, et al. Design and experiment of pesticide application monitoring system based on MCU[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(8): 70-74, 84. (in Chinese)
- [26] 孟庆华, 许进, 王东峰. 轮毂电机驱动型电动汽车动力系统研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 33-37, 20.  
MENG Qinghua, XU Jin, WANG Dongfeng. Power system of electric vehicle driven by in-wheel motors[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 33-37, 20. [http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130806&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130806&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.006. (in Chinese)