

# 基于微波多普勒法的施肥质量流量检测系统研究

杨立伟<sup>1</sup> 黄家运<sup>1</sup> 张季琴<sup>1</sup> 胡号<sup>1</sup> 刘刚<sup>1</sup> 吕树盛<sup>2</sup>

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

**摘要:** 为了实现施肥量的精确检测,本文构建了基于微波多普勒雷达以及振动干扰抑制方法的肥料质量流量检测系统。由多普勒信号经过快速傅里叶变换处理获得肥料颗粒速度和浓度。定义速度和浓度乘积为传感器输出值,并使用最小二乘法建立传感器输出值和肥料质量流量的线性回归模型。通过对信号的统计规律进行分析,将功率谱的5倍平均值用作区分振动干扰和流量信号的阈值。在实验平台上,使用2种复合肥进行了检测,实验结果表明,肥料质量流量最大检测值可达2 629.9 g/min,检测相对误差不大于5%。此外,将检测系统安装在施肥机上,在水泥路上使用第3种复合肥进行了测试,由于振动影响,检测系统最大检测误差达到21.57%。使用提出的振动干扰抑制方法进行处理后,肥料质量流量检测范围在1 429.1~2 976.9 g/min之间,相对误差不大于10.04%。因此,结合振动抑制方法,微波多普勒法的质量流量检测系统能够精确检测实验平台上和施肥机上不同肥料的质量流量。

**关键词:** 检测系统;微波多普勒法;肥料质量流量

**中图分类号:** S237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S1-0210-08

## Mass Flow Measurement System of Granular Fertilizer Based on Microwave Doppler Method

YANG Liwei<sup>1</sup> HUANG Jiayun<sup>1</sup> ZHANG Jiqin<sup>1</sup> HU Hao<sup>1</sup> LIU Gang<sup>1</sup> LÜ Shusheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to achieve accurate measurement of fertilizer mass flow, a mass flow measurement system based on microwave Doppler method with a method for suppressing vibration interference was proposed. The velocity and concentration of the fertilizer particles were obtained from the Doppler signal of the granular fertilizer, which was processed by using the fast Fourier transform, and the product of the velocity and concentration was defined as the sensor output value. Then, a linear regression model of the sensor output value and fertilizer mass flow was established by using the least squares method. By analyzing the statistical law of the signal, the five times mean value of power spectral density was used as the threshold to distinguish interference and signal. The fertilizer mass flow was changed by changing the rotating velocity of the fertilizing shaft. For laboratory environment, the mass flow of two types of fertilizers was measured. The experimental results showed that for two types of fertilizers, the max measurement value of the system can reach 2 629.9 g/min, and the relative errors of the microwave method were not more than 5%. In addition, the measurement system was installed on the fertilizing machine. An experiment was carried out by using the third type of fertilizer on the cement road beside the farmland. The analysis showed that the interference caused by vibration made the relative errors of measurement larger. The maximum relative error reached 21.57%. In order to improve the measurement accuracy, the proposed vibration interference suppression method was used. After the interference suppression, the fertilizer mass flow measurement range was between 1 429.1 g/min and 2 976.9 g/min, and the relative error was not more than 10.04%. The constructed system can accurately detect the mass flow of different fertilizers in the laboratory and under fertilizing machine conditions.

**Key words:** measurement system; microwave Doppler method; fertilizer mass flow

收稿日期: 2020-08-20 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700503)和国家自然科学基金项目(61705260)

作者简介: 杨立伟(1981—),女,副教授,主要从事农业物联网研究,E-mail: yangliwei@cau.edu.cn

通信作者: 刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事电子信息农业应用研究,E-mail: pac@cau.edu.cn

## 0 引言

世界各国的农业生产方式逐渐向现代农业过渡<sup>[1]</sup>。精细农业作为现代农业的发展方向,引起很多学者的关注。为了推动精细农业的发展,需要优化变量作业技术。其中变量施肥是变量作业技术研究中广泛的应用技术<sup>[2]</sup>。准确检测肥料流量是有效实施变量施肥的关键<sup>[3]</sup>。

检测肥料质量流量的主要方法有直接称量法<sup>[4-7]</sup>、基于排肥轴转速的间接检测法<sup>[8-10]</sup>、基于肥箱余量的间接检测法<sup>[11-15]</sup>、光电法<sup>[16]</sup>、成像法<sup>[17]</sup>和电容法<sup>[18-19]</sup>。现有的检测肥料质量流量的方法存在以下不足:基于直接称量法的大型检测设备不适合在实际操作中进行实时检测。此外,还必须对施肥机进行较大改动才能安装检测设备。基于排肥轴转速或肥箱余量的间接检测法其设备结构简单,但是检测误差相对较大。光电法和成像法,其检测设备很容易受到检测探针上的肥料粉末的影响,从而导致准确性下降。电容法容易受到电磁干扰影响,使检测准确性降低。微波多普勒法具有结构简单、成本低、测量期间不扰动流体等优点,适用于肥料质量流量的检测<sup>[20]</sup>。

微波多普勒固体质量流量检测的概念于1970年被提出<sup>[21-22]</sup>,后来由HAMID等<sup>[23]</sup>探讨此技术的可行性。ISA等<sup>[24-25]</sup>在实验室通过实验论证了固体流体回波信号的能量与流体的流量存在一定的线性关系,为固体流体浓度的检测提供了新思路,并引发了使用类似方法进行固体质量流量检测的研究<sup>[26-28]</sup>。

本文设计一种基于微波多普勒法的肥料质量流量检测系统。以常用的农业复合肥为实验材料,建立肥料质量流量与传感器输出值的关系模型。提出基于频域自适应窄带干扰抑制算法<sup>[29]</sup>的振动干扰抑制方法,以期通过该振动干扰抑制方法来消除振动对肥料质量流量检测精度的影响。最后通过实验对模型的准确度和干扰抑制算法的效果进行验证。

## 1 施肥量检测系统设计

### 1.1 流量检测原理

本文基于微波多普勒雷达检测固体颗粒流速和浓度的原理,开展施肥量检测研究。微波法流量检测的信号处理流程如图1所示。

肥料流质量流量 $Q$ 可以使用“速度-浓度”方法估算<sup>[30]</sup>,即

$$Q = \rho v \beta A_{rea} \quad (1)$$

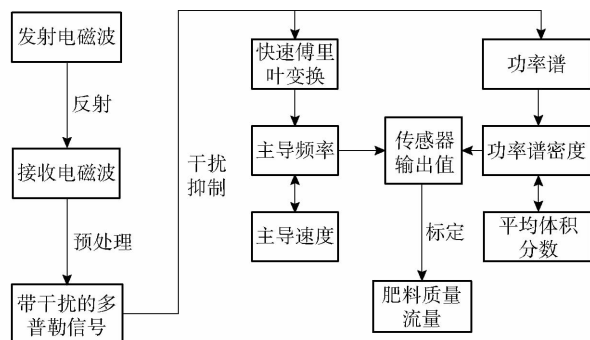


图1 微波多普勒法检测颗粒肥料质量流量流程图

Fig.1 Flow chart for microwave Doppler measurement of granular fertilizer mass flow rate

式中  $v$ ——肥料流动速度, m/s

$\beta$ ——肥料流浓度

$A_{rea}$ ——管道截面积,  $m^2$

$\rho$ ——肥料流中的颗粒密度,  $kg/m^3$

将肥料质量流量的检测转换为对肥料流速和浓度检测。其中,肥料速度和肥料流浓度可以通过多普勒信号结合快速傅里叶变换进行检测。

本文基于多普勒效应进行肥料流速的检测。在施肥过程中,大量肥料颗粒以不同的速度通过管道,所传输的微波信号被流动的肥料颗粒反射。在这种情况下,肥料被视为均质的颗粒介质,大量的反射事件将颗粒的随机相互作用平均化。因此,最终接收的信号可以看作具有确定性分布<sup>[31]</sup>。在接收到肥料反射的信号后,混频器将接收的信号与发射信号的一部分进行混合产生一个下变频信号。下变频信号中包含多普勒频移和反射幅度的信息<sup>[27]</sup>。

离散频率 $f_n$ 计算式为

$$f_n = n f_s / N \quad (n = 0, 1, \dots, N/2 - 1) \quad (2)$$

式中  $N$ ——采样点个数

$f_s$ ——采样频率, Hz

本文变频后的信号称为多普勒信号 $h(t)$ ,其对应的时序采样序列为 $h(k)$  ( $k = 0, 1, \dots, N-1$ )。 $h(k)$ 在 $f_n$ 处的频谱幅值 $H_n$ 可以表示为

$$H_n = FFT(h_k) = \sum_{k=0}^{N-1} h_k e^{-2\pi i k n / N} \quad (3)$$

当采样频率为 $f_s$ 时, $T_s = 1/f_s$ 表示采样周期,由于肥料颗粒在 $NT_s$ 的整个过程中具有不同的速度,因此可以获得不同的多普勒频移。以频谱幅值平方 $|H_n|^2$ 作为加权因子,可以定义肥料流主导速度 $v_{dot}$ 。 $v_{dot}$ 可以从快速傅里叶变换得到,计算式为

$$v_{dot} = \frac{\lambda_e}{2 \cos \theta} \frac{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_n |H_n|^2}{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} |H_n|^2} \quad (4)$$

式中  $\lambda_c$ ——电磁波的波长, m

$\theta$ ——天线向移动物体发射时的角度, ( $^\circ$ )

于是, 主导频率  $f_{dot}$  定义为

$$f_{dot} = \frac{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_n |H_n|^2}{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} |H_n|^2} \quad (5)$$

除了速度以外, 还可以从多普勒信号中提取其他有用信息。肥料流浓度还与信号的功率谱密度  $P_{sd}$  有关<sup>[27]</sup>, 其计算式为

$$P_{sd} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N h_k^2 \quad (6)$$

## 1.2 流量检测系统结构

肥料质量流量检测系统如图 2 所示。该检测系统由料斗、电动排肥装置、输肥管道、金属屏蔽外壳、微波多普勒雷达、数据采集卡、计算机、接料器皿和称量装置等部分组成。其中, 肥料被储存在料斗中。通过改变电动排肥装置中排肥轴的转速改变肥料的质量流量。肥料通过输肥管道进入接料器皿。输肥管道由直径为 50 mm 的聚氯乙烯制成。利用称量装置测量实验期间流出肥料的实际质量, 以作为参考。微波多普勒雷达用作检测肥料质量流量的传感器。雷达发出的电磁波频率为 24.125 GHz。传感器功率为 5 mW。排肥轴与微波多普勒雷达之间的垂直距离为 50 cm。

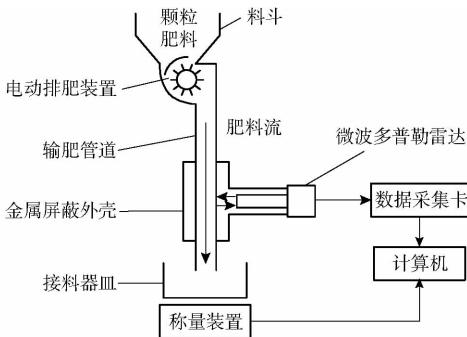


图 2 颗粒肥料质量流量检测系统结构图

Fig.2 Framework map for microwave Doppler measurement of granular fertilizer mass flow rate

## 1.3 数据平滑处理

卡尔曼滤波能够从一系列的不完全及包含噪声的测量数据中综合估计系统的状态。由于每次迭代只计算最新的测量数据, 因此处理效率较高, 被广泛应用于工程、农业等领域。微波多普勒雷达接收到的信号, 经过快速傅里叶变换后获得的信号功率谱毛刺较多。为了对窄带干扰进行抑制的同时不破坏其他频段的功率谱, 采用卡尔曼滤波对功率谱进行平滑处理。

系统更新方程为

$$\hat{X}_k^- = A \hat{X}_{k-1} \quad (7)$$

式中  $\hat{X}_k^-$ ——第  $k$  点的先验状态估计值

$\hat{X}_{k-1}$ ——第  $k-1$  点的后验状态估计值

$A$ ——状态转移矩阵, 取  $A = [1]$

预测协方差为

$$P_k^- = A P_{k-1} A^T + Q_k \quad (8)$$

式中  $P_k^-$ ——第  $k$  点的先验估计协方差

$P_{k-1}$ ——第  $k-1$  点的后验估计协方差

$Q_k$ ——过程激励噪声协方差, 取 0.1

完成系统预测后, 卡尔曼滤波器状态更新方程为

$$K_k = \frac{P_k^- H^T}{H P_k^- H^T + R} \quad (9)$$

$$\hat{X}_k = \hat{X}_k^- + K_k (Z_k - H \hat{X}_k^-) \quad (10)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (11)$$

式中  $K_k$ ——卡尔曼增益矩阵

$H$ ——系统观测方程的设计矩阵, 取  $H = [1]$

$R$ ——观测噪声协方差, 取 50

$\hat{X}_k$ ——第  $k$  点的后验状态估计值

$Z_k$ ——系统观测矩阵, 取  $Z_k = [1]$

$P_k$ ——第  $k$  点的后验估计协方差

$I$ ——单位矩阵

## 1.4 振动干扰抑制方法

当带通信号的带宽与中心频率相比非常小时, 该信号称为窄带信号<sup>[32]</sup>。实验中, 观察到在施肥机施肥实验期间由振动引起的干扰信号为窄带干扰信号。在施肥机施肥实验中, 肥料质量流量检测系统接收的多普勒信号  $r(t)$  可以表示为

$$r(t) = s(t) + j(t) \quad (12)$$

式中  $s(t)$ ——肥料的多普勒信号(简称多普勒信号), V

$j(t)$ ——窄带振动干扰(简称干扰), V

因为关注的是大量肥料颗粒的多普勒信号, 所以将肥料颗粒简化为各向同性的介质。在这个前提下, 吴林文<sup>[33]</sup>提出了一种固体质量流量检测的多普勒信号模型, 可以将多普勒信号建模为平均值为零的高斯过程, 表示为

$$s(t) = \sum_{j=1}^M \sigma_j \cos(2\pi f_d t_{d_j} + \varphi_{d_j}) + n_d \quad (13)$$

式中  $f_d$ ——反射信号的频率, Hz

$M$ ——反射电磁波的粒子数

$\sigma_j$ ——第  $j$  个粒子的多普勒信号反射系数

$t_{d_j}$ ——第  $j$  个粒子的多普勒信号信号延迟, s

$\varphi_{d_j}$ ——第  $j$  个粒子的多普勒信号相位, rad

$n_d$ ——高斯白噪声, V

$r(t)$  在采样频率  $f_s$  下的离散数字信号可以表示为

$$r(m) = s(m) + j(m) \quad (14)$$

式中  $s(m)$ ——离散多普勒信号, V

$j(m)$ ——离散干扰, V

$r(m)$  加窗后的  $N$  点离散傅里叶变换表示为

$$R(k) = S(k) + J(k) \quad (15)$$

式中  $S(k)$ ——经过离散傅里叶变换的多普勒信号, V

$J(k)$ ——经过离散傅里叶变换的干扰, V

离散傅里叶变换可以看作是一组窄带滤波器, 因此,  $S(k)$  可以视为零均值窄带高斯信号<sup>[29]</sup>。  $S(k)$  的包络表示为  $|S(k)|$ , 服从瑞利分布, 包络的平方  $|S(k)|^2$  服从指数分布,  $|S(k)|^2$  的相位服从均匀分布。指数分布的数字特征可以表示为

$$\begin{cases} E(|S(k)|^2) = 1/\lambda \\ \text{var}(|S(k)|^2) = 1/\lambda^2 \end{cases} \quad (16)$$

式中  $\lambda$ ——指数分布的参数

假设在频域干扰检测中有阈值  $T_H$ ,  $|S(k)|^2$  小于  $T_H$  的概率  $P$  为

$$P(|S(k)|^2 < T_H) = \int_{-\infty}^{T_H} \lambda e^{-\lambda X} dX = 1 - e^{-\lambda T_H} \quad (17)$$

当  $T_H$  为  $1/\lambda$ ,  $2/\lambda$ ,  $3/\lambda$ ,  $4/\lambda$ ,  $5/\lambda$  时,  $P$  为 0.632 1、0.864 7、0.950 2、0.981 7、0.993 3。

将频域干扰检测问题转换为假设检验问题。根据以上分析, 在接收信号经过离散傅里叶变换之后, 如果在接收信号中没有窄带干扰, 这时频谱谱线幅度的平方, 也就是功率谱谱线的幅值大于  $5/\lambda$  的概率  $P$  为 0.006 7。即对于显著性水平  $\alpha = 0.006 7$ , 不存在幅值大于  $5/\lambda$  的功率谱谱线。

实际应用中, 通常使用快速傅里叶变换代替离散傅里叶变换。当进行快速傅里叶变换的点数很大 ( $N > 256$ ) 时, 功率谱谱线幅值的平均值可以看作是统计平均值  $E(|S(k)|^2) = 1/\lambda$  的无偏估计, 表示为

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |S(k)|^2 \approx 1/\lambda \quad (18)$$

经过快速傅里叶变换之后, 如没有谱线超过  $T_H$ , 则在接收信号中没有窄带干扰, 则可以直接计算速度和浓度。否则, 幅度大于  $5/\lambda$  的功率谱谱线被认为包含了干扰能量, 必须将其裁剪。在裁剪步骤之后重新计算处理后的谱线的平均  $\mu = 1/\lambda$  的估计值  $\hat{\mu}$ 。重复上述分析, 直到不再存在幅值超过  $T_H$  的功率谱谱线为止。干扰检测和处理算法的具体步骤如下:

(1) 计算  $N$  条功率谱谱线的和, 然后除以  $N$ , 得到样本的平均值并作为  $\mu = 1/\lambda$  的估计值  $\hat{\mu}$ 。

(2) 计算阈值:  $T_H = 5\hat{\mu}$ 。

(3) 遍历所有  $N$  条谱线。如果存在任何功率谱谱线的幅值超过  $T_H$ , 则认为它包含窄带干扰信号的能量并需要被裁剪。

(4) 返回到步骤(1), 再次计算经过处理的功率谱谱线的平均值, 直到没有一条谱线幅值的平方超过  $T_H$ 。

## 1.5 曲线拟合

在检测过程中, 检测系统会受到固体粒径、检测方法和外部干扰的影响, 降低了检测结果的准确性。在实际的检测过程中, 仅需得到对应式(1)中  $v$  的  $f_{dot}$  和对应式(1)中  $\beta$  的  $P_{sd}$ , 并将两者相乘获得传感器输出值  $S_{val}$ 。将  $S_{val}$  与实际质量流量  $Q_t$  拟合, 得到二者的关系模型, 即可进行流量检测。

本文使用最小二乘法进行数据拟合。在计算平方误差的总和并将其最小化后就可以找到数据的最佳函数匹配。本文需要对  $Q_t$  和  $S_{val}$  进行一维线性拟合, 其线性关系表示为

$$Q_t = aS_{val} + b \quad (19)$$

在执行回归之前, 需要检测不同流量的肥料质量流量。而后, 执行线性回归以确定  $Q_t$  和  $S_{val}$  之间的关系。线性回归系数计算式为

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n_f} S_{vali} Q_{ti} - n_f \bar{S}_{val} \bar{Q}_t}{\sum_{i=1}^{n_f} S_{vali}^2 - n_f \bar{S}_{val}^2} \quad (20)$$

$$b = \bar{Q}_t - a\bar{S}_{val} \quad (21)$$

式中  $\bar{S}_{val}$ ——传感器输出值平均值, W

$\bar{Q}_t$ ——实际质量流量平均值, g/min

$n_f$ ——检测次数

在不同的工作环境中, 实际检测结果也会不同, 系数  $a$  和  $b$  也将不同。因此, 为了提高检测精度, 须在不同的环境中进行检测前执行曲线拟合操作。

## 2 室内实验

### 2.1 实验材料与装置

实验选用常用的农业颗粒状肥料: 史丹利 15-15-15 和撒可富 15-15-15 通用高氯复合肥。史丹利 15-15-15 的密度为  $974 \text{ kg/m}^3$ ; 等效直径为  $3.61 \text{ mm}$ ; 球形度为  $90.38\%$ 。化肥颜色呈黑色, 表面质地粗糙。撒可富 15-15-15 密度为  $1095 \text{ kg/m}^3$ ; 等效直径为  $3.45 \text{ mm}$ ; 球形度为  $89.86\%$ 。化肥颜色呈白色, 表面质地粗糙。

在施肥实验台上进行室内实验,如图3所示。

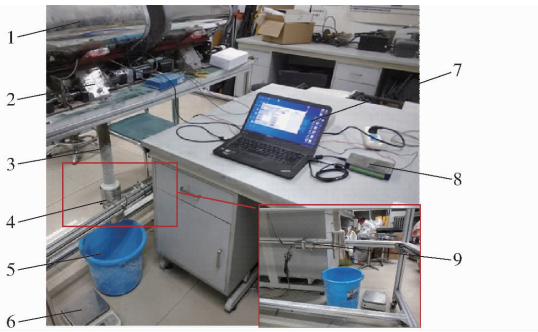


图3 实验室颗粒肥料质量流量测试实验平台

Fig.3 Experimental platform for mass flow measurement of granular fertilizer in laboratory

1.料斗 2.电动排肥装置 3.输肥管道 4.金属屏蔽外壳 5.接料器皿 6.称量装置 7.计算机 8.数据采集卡 9.微波多普勒雷达

## 2.2 标定实验

采用称量法进行传感器标定。通过改变排肥轴旋转速度来改变肥料质量流量。落肥口开度固定为30 mm,排肥轴旋转速度从20 r/min增加到50 r/min,步长为5 r/min,总共7个转速。排肥轴转动时间为60 s,待每次排肥结束后对接料器皿内的肥料进行称量。每个流量重复实验4次取平均值,并通过最小二乘法获得肥料质量和传感器输出值的响应曲线。如图4所示。由图4可知,2个关系模型的决定系数 $R^2$ 不小于0.9867,表明用这2条曲线表示传感器的输出值和肥料质量流量的关系模型是可行的。

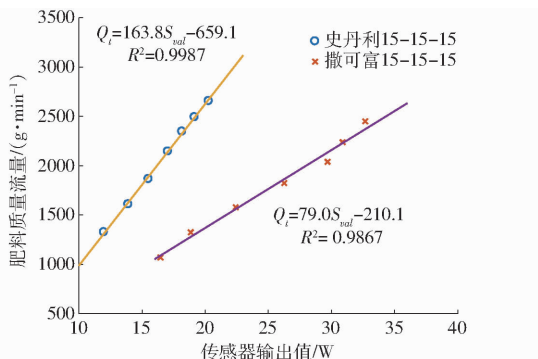


图4 史丹利15-15-15和撒可富15-15-15的传感器输出值-质量流量曲线

Fig.4 Sensor output values-mass flow curves of Stanley 15-15-15 and Sacf 15-15-15

## 2.3 验证实验

每种肥料每个流量实验1次。将室内实验得到的各自肥料的 $S_{val}$ 代入各自的关系模型中获得质量流量计算值 $Q_c$ 。检测相对误差计算式为

$$r = \frac{|Q_t - Q_c|}{Q_t} \times 100\% \quad (22)$$

结果如表1所示。

表1 史丹利15-15-15和撒可富15-15-15的检测结果  
Tab.1 Measurement results of Stanley 15-15-15 and Sacf 15-15-15

| 排肥轴<br>转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 史丹利15-15-15                        |                                    |          | 撒可富15-15-15                        |                                    |          |
|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|----------|
|                                       | $Q_c /$<br>( $g \cdot \min^{-1}$ ) | $Q_t /$<br>( $g \cdot \min^{-1}$ ) | $r / \%$ | $Q_c /$<br>( $g \cdot \min^{-1}$ ) | $Q_t /$<br>( $g \cdot \min^{-1}$ ) | $r / \%$ |
| 20                                    | 1 315.5                            | 1 307.4                            | 1.62     | 1 120.7                            | 1 075.2                            | 4.24     |
| 25                                    | 1 663.8                            | 1 598.6                            | 4.61     | 1 301.0                            | 1 334.6                            | 2.52     |
| 30                                    | 1 854.5                            | 1 877.5                            | 0.28     | 1 515.1                            | 1 564.5                            | 3.15     |
| 35                                    | 2 011.5                            | 2 137.5                            | 4.95     | 1 886.8                            | 1 836.7                            | 2.73     |
| 40                                    | 2 313.9                            | 2 331.0                            | 0.17     | 2 068.8                            | 2 018.3                            | 2.50     |
| 45                                    | 2 529.1                            | 2 517.1                            | 0.48     | 2 359.5                            | 2 274.2                            | 5.00     |
| 50                                    | 2 618.9                            | 2 629.9                            | 0.42     | 2 488.9                            | 2 399.1                            | 3.74     |

从表1可以看出,对于不同的肥料,在不同的质量流量下,检测系统均能够准确实现施肥量的检测。实验室验证实验的相对误差在不大于5%,最大检测值可达2 629.9 g/min,证明了微波多普勒雷达探测颗粒肥料的流动检测质量是可行的。

## 3 施肥机施肥实验

### 3.1 实验材料与装置

在实际施肥作业时,田间工作环境比实验室环境更加复杂多变。其中主要的干扰来自拖拉机行驶过程中的振动。为了验证振动干扰抑制算法的有效性,在北京市海淀区中国农业大学上庄实验站的水泥地上进行了施肥机施肥实验,如图5所示。

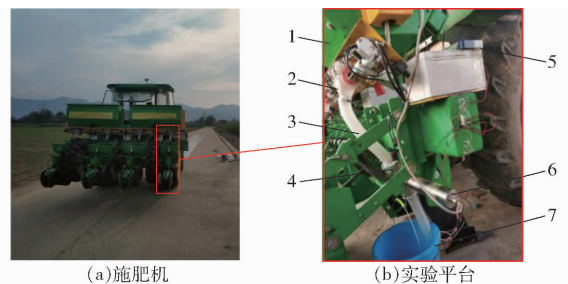


图5 颗粒肥料质量流量检测施肥机施肥实验中的实验平台  
Fig.5 Experimental platform for mass flow measurement of granular fertilizer in vehicle experiment

1.料斗 2.电动排肥装置 3.输肥管道 4.金属屏蔽外壳 5.数据采集卡 6.微波多普勒雷达 7.接料器皿

### 3.2 标定实验

拖拉机静止的条件下进行标定实验。施肥机施肥实验采用撒可富22-8-10作为实验材料,其密度为 $1 555 \text{ kg/m}^3$ ;等效直径为3.11 mm;球形度为84.36%。化肥呈白色,表面质地粗糙。其余实验条件与室内实验条件相同。由于场地限制,单次排肥时间为30 s。获得的传感器输出值-质量流量曲线为

$$Q_t = 290.2S_{val} - 328.6 \quad (23)$$

### 3.3 验证实验

在进行施肥机施肥实验时,将一块木板放在拖拉机的油门下面。在每次实验开始时,将油门压在木板上,一旦拖拉机速度刻度盘的指针稳定,便释放离合器。拖拉机速度稳定后,开始排肥和数据采集。在整个施肥机施肥实验中,油门位置保持不变。排肥结束后,拖拉机倒车回到起点,对接料器皿内的肥料进行称量。施肥机施肥实验拖拉机的挡位为 B2,对应的车速 5.5 km/h。每个排肥流量实验至少重复 4 次。

由于施肥机施肥实验存在振动干扰,使用提出的振动干扰抑制算法对多普勒信号进行处理。施肥机施肥实验的干扰抑制前后的部分功率谱如图 6 所示。从图 6 可以看出,在频率为 70、140、160 Hz 处存在振动造成干扰。振动干扰带宽在 2 Hz 左右,振动造成的干扰是窄带干扰。幅度超过  $5/\lambda$  的功率谱谱线包含干扰,需要被裁剪。因此,将功率谱分为 0~120 Hz 和 120~200 Hz 两部分进行处理。使用

干扰抑制算法计算了两个  $T_H$ 。超过  $T_H$  的谱线不会直接切割,而是通过定位超过  $T_H$  的谱线的极值点来找到干扰的位置。0~120 Hz 之间的功率谱内存在干扰的谱线的幅度裁剪为 0~120 Hz 之间的功率谱的平均值。对 120~200 Hz 之间的功率谱进行类似的处理。在实际实验中,当算法的迭代次数超过 15 时,没有谱线超过  $T_H$ 。因此,干扰抑制算法的迭代次数被设置为 15。

将干扰抑制前和抑制后传感器输出值代入式(23)计算出各自的质量流量计算值,再代入式(22)计算出各自的检测相对误差。结果如表 2 所示。

由表 2 可得,肥料的质量流量范围为 1 429.1~2 976.9 g/min。振动干扰抑制前的最大检测误差为 21.57%。流量信号经过处理后,检测系统能够准确实现施肥量的检测,最大相对误差减小为 10.04%。说明振动干扰抑制算法能够有效减少拖拉机振动对检测结果精度的影响。结合振动干扰抑制方法的微波多普勒肥料质量流量检测系统能够精确检测施肥机施肥的质量流量。

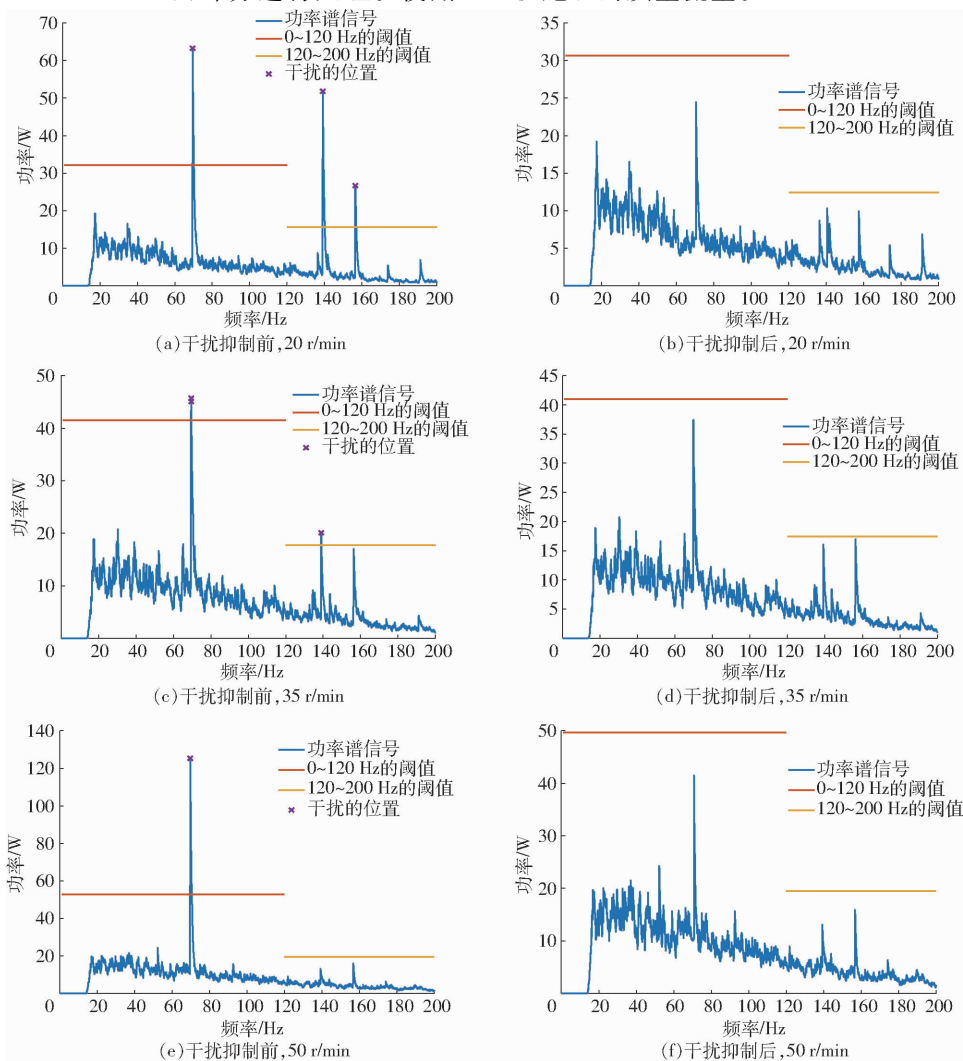


图 6 施肥机施肥实验中不同排肥轴转速下颗粒肥料质量流量信号的功率谱

Fig. 6 Power spectrum of mass flow signal of granular fertilizer for different rotational velocities of fertilizing shaft

表2 撒可富22-8-10的检测结果

Tab.2 Measurement results of Sacf 22-8-10

| 排肥轴<br>转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | $Q_c / (g \cdot \min^{-1})$ |         | $Q_i /$<br>( $g \cdot \min^{-1}$ ) | $r / \%$ |       |
|---------------------------------------|-----------------------------|---------|------------------------------------|----------|-------|
|                                       | 干扰                          |         |                                    | 干扰       |       |
|                                       | 抑制前                         | 抑制后     |                                    | 抑制前      | 抑制后   |
| 20                                    | 1 737.3                     | 1 530.0 | 1 429.1                            | 21.57    | 7.07  |
| 25                                    | 2 037.9                     | 1 873.5 | 1 702.7                            | 19.69    | 10.04 |
| 30                                    | 2 183.7                     | 2 081.7 | 2 001.7                            | 9.10     | 4.00  |
| 35                                    | 2 450.0                     | 2 348.5 | 2 259.2                            | 8.44     | 3.95  |
| 40                                    | 2 565.2                     | 2 473.5 | 2 520.8                            | 2.74     | 2.42  |
| 45                                    | 2 703.9                     | 2 693.7 | 2 755.5                            | 1.87     | 2.33  |
| 50                                    | 2 823.3                     | 2 812.8 | 2 976.9                            | 5.16     | 5.51  |

## 4 结论

(1) 采用微波多普勒雷达检测施肥量, 构建了

肥料质量流量检测系统。提出了基于窄带自适应干扰抑制算法的振动干扰抑制方法。构建的系统能够精确检测实验平台上和施肥机上不同肥料的质量流量。提出的方法能有效抑制振动对检测精度的影响。

(2) 研究了3种复合肥料的质量流量实际值和传感器输出值的响应关系, 建立了3种肥料的线性拟合模型, 并对模型进行了验证。

(3) 室内实验结果表明, 对史丹利15-15-15和撒可富15-15-15这2种肥料, 肥料质量流量最大检测值可达2 629.9 g/min, 最大检测误差为5%。施肥机施肥实验结果表明, 在振动干扰抑制之后, 对撒可富22-8-10, 肥料质量流量检测范围在1 429.1 ~ 2 976.9 g/min之间, 最大检测误差从21.57%减小为10.04%。

## 参 考 文 献

- [1] 汪懋华. “精细农业”发展与工程技术创新[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 1-10.  
WANG Maohua. Development of “fine agriculture” and engineering technology innovation[J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 1-10. (in Chinese)
- [2] 赵春江, 薛绪掌, 王秀, 等. 精准农业技术体系的研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 7-12.  
ZHAO Chunjiang, XUE Xuzhang, WANG Xiu, et al. Advance and prospects of precision agriculture technology system[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(4): 7-12. (in Chinese)
- [3] LEE W S, EHSANI R. Sensing systems for precision agriculture in Florida[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 112: 2-9.
- [4] 谭星祥. 变量施肥性能测试平台的设计与实现[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.  
TAN Xinxiang. The design and realization of performance testing platform for variable rate fertilization[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [5] 余洪锋, 丁永前, 谭星祥, 等. 施肥机施肥性能检测装置的设计与试验[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(3): 511-517.  
YU Hongfeng, DING Yongqian, TAN Xingxiang, et al. Design and experiments on equipment for detecting performance of fertilizer applicator[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2016, 39(3): 511-517. (in Chinese)
- [6] 余洪锋. 机械式施肥播种一体机的变量自动化改造和性能测试[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.  
YU Hongfeng. Variable automatic transformation and performance test of mechanical fertilization and sowing machine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [7] YU H, DING Y, FU X, et al. A solid fertilizer and seed application rate measuring system for a seed-fertilizer drill machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 162: 836-844.
- [8] 王大可, 衣淑娟, 赵雪, 等. 气吸精播机施肥量无线计量监测系统的研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 84-88.  
WANG Dake, YI Shujuan, ZHAO Xue, et al. Research on precise seeder wireless measurement monitoring system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 84-88. (in Chinese)
- [9] 马秀莲, 衣淑娟, 赵斌, 等. 玉米精播机施肥作业性能实时监测系统研究[J]. 农机化研究, 2015, 37(12): 20-22.  
MA Xiulian, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. Research on fertilization operation performance of the real time monitoring system of corn precision seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(12): 20-22. (in Chinese)
- [10] 赵斌, 匡丽红, 张伟. 气吸式精播机种、肥作业智能计量监测系统[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 147-153.  
ZHAO Bin, KUANG Lihong, ZHANG Wei. Seed and fertilizer intelligent gauging and monitoring system of suction precision seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 147-153. (in Chinese)
- [11] 田雅楠, 戚增坤, 王熙, 等. 基于单片机的肥箱料位传感器设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(7): 105-110.  
TIAN Ya'nan, QI Zengkun, WANG Xi, et al. Design and experiment of material level sensor for fertilizer tank based on single chip microcompute[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(7): 105-110. (in Chinese)
- [12] 赵明岩. 基于电容法肥箱料位检测装置的设计与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2019.
- [13] 赵明岩, 王熙, 戚增坤, 等. 基于COMSOL的料位检测传感器电极设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(4): 158-163.  
ZHAO Mingyan, WANG Xi, QI Zengkun, et al. Design and test of electrode for material level detection sensor based on COMSOL[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(4): 158-163. (in Chinese)
- [14] 赵明岩, 王熙, 戚增坤, 等. 肥箱电容式料位传感器设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(12): 151-155.

- ZHAO Mingyan, WANG Xi, QI Zengkun, et al. Design and test of material level detection sensor for fertilizer box based on capacitance method[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(12): 151 – 155. (in Chinese)
- [15] 赵明岩, 王熙, 于志成. 肥箱化肥余量检测传感器 comsol 仿真分析[J]. *南方农机*, 2019, 50(1): 6 – 7.
- [16] 高富强. 气吸式玉米免耕播种机播种施肥性能优化与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.  
GAO Fuqiang. Optimization and experimental study on seeding and fertilizing performance of suction maize no-till seeder[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [17] BACK S W, YU S H, KIM Y J, et al. An image based application rate measurement system for a granular fertilizer applicator [J]. *Transactions of ASABE*, 2014, 57(2): 679 – 687.
- [18] 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 precision seed sowing machine[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(5): 84 – 92. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20180510&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180510&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.010. (in Chinese)
- [19] 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 Liming, MA Ming, YUAN Yanwei, 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)
- [20] HAN J, WANG X T, ZHOU Z, et al. Granular fertilizer mass prediction for electric fertilizer distribution device based on RANSAC[J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(4): 7917 – 7925.
- [21] ELLERBRUCH D A. Microwave methods for cryogenic liquid and slush instrumentation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1970, 19(4): 412 – 416.
- [22] HARRIS J. Interrogating flow fields with radar and laser sources[J]. *Measurement and Control*, 1970, 3(11): 188 – 192.
- [23] HAMID A, STUCHLY S S. Microwave Doppler-effect flow monitor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, 1975(2): 224 – 228.
- [24] ISA M, WU Z. Microwave radar sensor as solid flow counter[C]//High Frequency Postgraduate Student Colloquium. IEEE, 2004: 37 – 40.
- [25] ISA M, WU Z. Microwave Doppler radar sensor for solid flow measurements[C]//2006 European Microwave Conference. IEEE, 2006: 1508 – 1510.
- [26] GREVE D W, OPPENHEIM I J, CHORPENING B T, et al. Microwave Doppler flow sensor for chemical looping combustion systems[C]//Sensors. IEEE, 2013: 1 – 4.
- [27] WU Z, WANG H G, ISA M, et al. Laboratory evaluation of microwave Doppler velocimeter for solid flow measurements[C]//AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics, 2014: 57 – 62.
- [28] PANG L, SHAO Y, GENG C, et al. Measurement of solid mass flow rate by a non-intrusive microwave method[J]. *Powder Technology*, 2018, 323: 525 – 532.
- [29] 张春海, 薛丽君, 张尔扬. 基于自适应多门限算法的变换域窄带干扰抑制[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(3): 461 – 465.  
ZHANG Chunhai, XUE Lijun, ZHANG Eryang. Narrow-band interference suppression in transform domain based on adaptive multi-threshold algorithm[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2006, 28(3): 461 – 465. (in Chinese)
- [30] ZOU J, LIU C, WANG H, et al. Mass flow rate measurement of bulk solids based on microwave tomography and microwave Doppler methods[J]. *Powder Technology*, 2020, 360: 112 – 119.
- [31] ZOU J, WANG H, LIU C, et al. Real-time solid flow velocity measurement based on a microwave sensor[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2019, 41(10): 2699 – 2707.
- [32] 李晓峰, 周宁, 傅志中, 等. 随机信号分析[M]. 5 版. 北京: 电子工业出版社, 2018.
- [33] 吴林文. 微波固体流量计信号处理方法及仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
WU Linwen. Signal processing methods and simulation of microwave solid flow meter[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)