

基于微波传感的颗粒肥料质量流量测量方法

杨立伟¹ 赵礼豪² 张俊宁² 吕树盛³ 侯冲³ 刘刚¹

(1. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 北京信息科技大学机电工程学院, 北京 100192;

3. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司行业技术服务中心, 北京 100083)

摘要: 施肥量动态高精度测量是实施变量施肥的前提。针对目前测量肥料质量流量方法在田间应用时仍存在测量不准确和无法适应工作环境等问题, 开发了一种基于微波法的颗粒肥料质量流量测量系统, 提出了一种流量质量测量模型和测量方法。以农用颗粒状肥料史丹利 15-15-15 和撒可富 15-15-15 为实验对象, 控制微波传感器距离和肥料的排肥速度, 对数据采用卡尔曼滤波进行平滑处理。实验数据分析表明: 颗粒肥料回波信号的主导频率仅与电动排肥装置和传感器的距离有关, 而功率谱密度仅与肥料颗粒数有关; 通过最小二乘法建立两种复合肥的实际质量流量和传感器输出值的响应关系, 两种复合肥响应关系的决定系数 R^2 均不小于 0.985 8, 并对响应关系进行了验证。撒可富 15-15-15 的测量范围为 1 119.8 ~ 2 065.9 g/min, 最大测量误差为 6.35%; 史丹利 15-15-15 的测量范围为 1 071.9 ~ 1 877.9 g/min, 最大测量误差为 4.85%, 其测量性能符合作业需要。

关键词: 颗粒肥料; 质量流量测量; 微波法; 变量施肥; 卡尔曼滤波

中图分类号: S661.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S2-0323-07

Particle Fertilizer Mass Flow Measurement Based on Microwave Method

YANG Liwei¹ ZHAO Lihao² ZHANG Junning² LÜ Shusheng³ HOU Chong³ LIU Gang¹

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

2. School of Mechatronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

3. Industry Technology Service Center, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: The dynamic high-precision measurement of fertilizer application rate is a prerequisite for implementing variable fertilization. Although there are various methods for measuring fertilizer quality and flow in the field, there are still some problems such as inaccurate measurement and inability to adapt to the working environment when applying to the field. A microwave-based particle fertilizer mass flow measurement system was developed. A flow mass measurement model and method were proposed, and the agricultural granular fertilizer Stanley 15-15-15 and Sacokufu 15-15-15 were used as the experimental object. The microwave sensor distance and fertilizer discharge rate were controlled, and the data was smoothed by using a Kalman filter. The experiment achieved good results. The analysis of experimental data showed that the dominant frequency of the particle fertilizer echo signal was only related to the distance between the electric fertilizer discharge device and the sensor, while the power spectral density was only related to the number of fertilizer particles. By using the least squares method, the response relationship between the two compound fertilizers, Q_i and S_{val} , was established. The determination coefficient R^2 of the response relationship between the two types of compound fertilizers was not less than 0.985 8, and the response relationships were validated. The measurement range for Sacokufu 15-15-15 was 1 119.8 ~ 2 065.9 g/min, with a maximum measurement error of 6.35%. The measurement range for Stanley 15-15-15 was 1 071.9 ~ 1 877.9 g/min, with a maximum measurement error of 4.85%. Its measurement performance fulfilled the operational needs of the task.

Key words: particle fertilizer; mass flow measurement; microwave method; variable fertilization; Kalman filter

0 引言

随着现代化农业的发展,施肥机的使用越来越广泛,肥料流量检测也变得越来越重要。在农业生产中,合理的施肥可以提高作物产量和品质,但是过度施肥会浪费资源^[1-2],同时对环境造成污染。因此,实时检测施肥机的流量对合理使用肥料,提高农业生产效率有重要意义。

为解析肥料质量流量的精准检测机理,目前研究大多通过建立肥料检测模型,探究肥料质量流量与检测信号之间的内在联系。颗粒肥料具有易潮、腐蚀性和粘性等特征,田间工作环境也易受泥土、灰尘等影响,对颗粒肥料质量流量检测一直是技术难题。为解决此问题,国内外研究人员做了大量工作^[3-7],提出了较多的测量方法,包括直接称量法、基于排肥轴转速的间接测量法、光电法、成像法、电容法、静电法和微波法等^[8-11]。

微波传感器是一种常用的流量传感器,可以用于测量各种液体和固体的流量。其工作原理是利用微波信号的反射和散射来测量流体的流速和流量。在施肥机中,微波传感器可以安装在施肥机的出口处,通过测量流体通过传感器的时间和反射信号的变化来确定流量。使用微波传感器测量施肥机的流量具有非接触式测量、高精度测量、实时监测、易于安装等优点。使用微波传感器测量施肥机的流量可以帮助农民合理使用肥料,提高农业生产效率,同时保护环境,减少浪费^[12]。随着技术不断发展和应用不断推广,微波传感器在农业生产中的应用前景将会更加广阔。

微波传感器作为一种非接触式传感器,在农业领域中越来越受到重视。例如,CRUZ等^[13]使用微波传感器测量施肥流量及营养素含量等指标,以实现精准施肥。胡天舒等^[14]针对基于微波传感的田间作物液体施肥量检测方法进行了研究,该方法具有实时性好和操作简便等优点,为农业精准施肥技术发展提供了新的思路和方法。文献[15]研究了基于液体肥料的精准施肥量检测方法。通过对精准施肥装置设计和微波传感器实验研究,证明该技术具有准确度高、实时性好的特点,为农业精准化管理和减少肥料浪费提供了新的途径。

为了更好地实现精准施肥,本文提出一种质量流量检测模型和测量的方法,并在实验室控制微波传感器距离和肥料的排肥速度,对实验数据进行采集。分析颗粒肥料回波信号的主导频率仅与电动排肥装置和传感器的距离有关,而功率谱密度仅与肥料颗粒数有关;通过最小二乘法建立两种复合肥的

实际质量流量 Q_t 和传感器输出值 S_{val} 的响应关系,并对响应关系进行验证。

1 检测系统设计

根据回波信号的特征,将多普勒回波信号的主导频率和功率谱密度分别对应肥料流体的速度和浓度。其中,主导频率和功率谱密度由多普勒回波信号经过快速傅里叶变换(FFT)获得。根据系统所完成的功能,设计颗粒肥料质量流量测量系统。

1.1 流量检测模型

肥料质量流量 Q 可以使用“速度-浓度”方法估算,即

$$Q = \rho VCS \tag{1}$$

式中 V ——肥料流动速度, m/s
 C ——流动肥料体积分数, %
 S ——管道截面积, m^2
 ρ ——肥料流中的颗粒密度, kg/m^3

由式(1)可知,当管道切面面积和肥料密度已知时,对肥料质量的测量转换为对肥料流动速度和体积分数的测量。系统测量原理如图1所示。

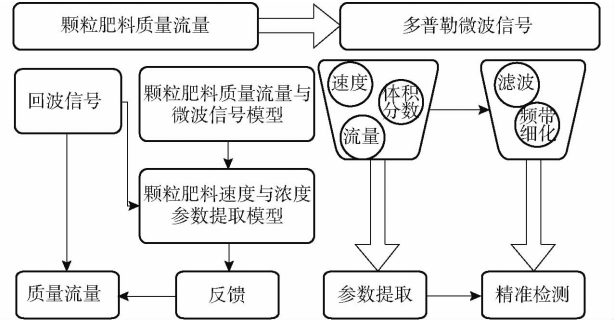


图1 微波法测量颗粒肥料质量流量系统原理图
Fig.1 Microwave-based measurement principle diagram of granular fertilizer mass flow system

1.2 流量检测原理

根据多普勒效应的基本原理^[16],一般假设雷达和目标间的相对速度远小于光速 c , 对于一个速度为 v 的并向雷达运动的目标,其多普勒频移 f_d 和发射信号频率 f_0 之间满足

$$f_d = -2f_0 \frac{v}{c} \cos\theta \tag{2}$$

式中 θ ——发射信号与目标运动方向之间的夹角
根据多普勒频移公式(2),可以发现,当目标向雷达靠近时,频率增加;当目标远离雷达时,频率减小。

如果设 $f = f_0 - \Delta f$ 表示接收信号的频率,则式(2)化简为

$$f_d = 2f_0 \frac{v}{c} \cos\theta \tag{3}$$

单个运动物体所造成的多普勒频移可由式(3)

描述。当多个运动物体一起通过测量场,且速度各不相同,检测到的多普勒信号是由多个回波信号叠加产生的。由于使用 FFT 处理多普勒信号,离散频率 f_n 计算式为

$$f_n = n f_s / N \quad (n = 1, 2, \cdots, N) \tag{4}$$

式中 N ——采样点数量 f_s ——采样频率,Hz
假设多普勒信号 $d(t)$ 对应的时序采样序列为 $t(k)$ (其中 $k = 0, 1, \cdots, N - 1$)。 $d(k)$ 在 f_n 处的频谱幅值 P_n 可以表示为

$$P_n = \text{FFT}(d(k)) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-2\pi i k n / N} \tag{5}$$

令 $T_s = 1/f_s$ 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 $|S_n|^2$ 作为加权因子,可以定义肥料流的主导速度 V_{dot} ,且可以从快速傅里叶变换得到,计算式为

$$V_{dot} = \frac{\lambda_e}{2 \cos \theta_1} \frac{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_n |S_n|^2}{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} |S_n|^2} \tag{6}$$

式中 λ_e ——电磁波的波长,m
 θ_1 ——天线向移动物体发射时的角度,(°)
主导频率 f_{dot} 定义为

$$f_{dot} = \frac{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} f_n |S_n|^2}{\sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} |S_n|^2} \tag{7}$$

1.3 颗粒肥料质量流量测量系统结构

肥料质量流量检测系统如图 2 所示。该检测系统由肥箱、伺服电机自动排肥装置、输肥管道、微波传感器、数据采集卡、计算机、肥料收集装置和称量装置等部分组成。

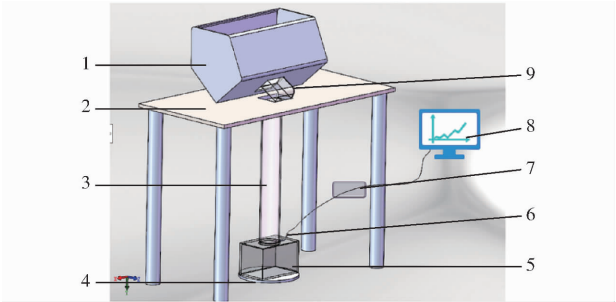


图 2 颗粒肥料质量流量检测系统结构图
Fig.2 Frame work map for microwave Doppler measurement of granular fertilizer mass flow rate
1. 肥箱 2. 试验台 3. 输肥管道 4. 称量装置 5. 肥料收集装置 6. 微波传感器 7. 数据采集卡 8. 计算机 9. 伺服电机自动排肥装置

肥箱中存储的是颗粒肥料。通过对编码器的操作可以控制整个电动排肥装置的电机转速,从而改变肥料的质量流量。从肥箱下落的颗粒肥料通过输肥管道落入肥料收集装置,输肥管道为直径 50 mm 的聚氯乙烯管。最后用称量装置测得实验的实际质量流量,作为对比参照。微波多普勒传感器用作检测肥料质量流量。多普勒微波雷达传感器发射的电磁波频率为 24 GHz,且安装在距离排肥轴垂直距离为 50 cm 的位置。

微波多普勒传感器的功能是完成微波信号的发射接收,并输出电压信号。考虑到微波多普勒流量计需要应用在实际施肥的恶劣环境中,采用 RFbeam 公司发射频率稳定且定位精度高的 24.125 GHz 的 K-LC2 波导谐振型传感器作为信号的收发一体模块,相比于 K-LC1a 型传感器拥有更高的灵敏度和更大的检测范围。

电动排肥控制模块中包括驱动控制一体器、排肥轴电机、电源、编码器和输肥管道。本研究使用微波法进行流量测量,由于电磁波无法穿过金属,所以输肥管道不能使用金属材料。因此选择不会吸收微波信号并且具有质量轻、韧性好、防潮隔热的聚氯乙烯作为管道材料。DSEM-V241230E60LN 型排肥轴电机伺服电机以及配套的编码器和驱动控制一体器,加上 PF60-20P2S20P1 型行星减速器,由 MOTEC 伺服驱动器驱动。这套伺服系统需 24 V 电源,故选用 MOTEC24V 电源,且转速变化范围大,可以用来模拟施肥机作业情况。

收集装置由聚乙烯颗粒肥料收集盒和电子秤组成,称量收集的颗粒肥料,得到实际质量流量。

在实验室中进行系统搭建,并进行实验。室内实验平台如图 3 所示。



图 3 室内检测系统实验平台
Fig.3 Indoor detection system experimental platform
1. 肥箱 2. 驱动控制器 3. 伺服电机自动排肥装置 4. 输肥管道 5. 称量装置 6. 肥料收集装置 7. 微波传感器 8. 计算机 9. 电源

2 数据平滑处理

多普勒微波雷达传感器接收到的信号,会先进

行快速傅里叶变换,导致得到的信号功率谱毛刺较多。故采用卡尔曼滤波对功率谱进行平滑处理,从而对带干扰进行抑制的同时不破坏其他频段的功率谱。

2.1 多普勒信号表达式

多普勒雷达微波传感器会发射固定频率的连续波,当发射的信号与固体颗粒肥料接触时,会把信号反射回微波传感器。而信号在传递过程中需要时间,把这个延时称为 t_d 。单个固体肥料颗粒的回波 $u(t)$ 可表示为

$$u(t) = \sigma \cos(2\pi f_0(t - t_d) + \varphi_r) \tag{8}$$

式中 σ ——固体颗粒肥料对信号的反射系数
 φ_r ——回波信号的相位

多普勒微波传感器会同时接收到多个固体颗粒肥料的回波信号,可以将其看成若干个信号之和。故接收到的回波信号为

$$y(t) = \sum_{j=1}^M u_j(t) + u_0(t) \tag{9}$$

式中 M ——反射回波的颗粒肥料数目
 $u_0(t)$ ——与管道内壁接触的回波

因为管道内壁是固定的,所以反射波并没有发生多普勒频移,这些信号可用一个表达式表示。回波信号在传感器内部经过混频、去直流、低通滤波等处理后可得出多普勒信号

$$s(t) = \sum_{j=1}^M \sigma_j \cos(2\pi f_{dj}t_{dj} + \varphi_{dj}) + n_d \tag{10}$$

式中 σ_j ——第 j 个颗粒肥料的反射系数
 t_{dj} ——多普勒信号时延
 φ_{dj} ——多普勒信号相位
 n_d ——高斯白噪声
 f_{dj} ——第 j 个颗粒肥料的多普勒频移

2.2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波是一种常用于系统建模和状态估计问题的最优估计算法。由于每次迭代只计算最新的测量数据,因此处理效率较高,被广泛运用于工程、农业等领域。建立一个状态转移矩阵 F ,用于描述随时间系统状态变化的趋势。假设 Δt 为状态转移时间间隔,则系统状态转移方程可以表示为

$$\mathbf{x}_k = F\mathbf{x}_{k-1} + \boldsymbol{\omega}_{k-1} \tag{11}$$

式中 $\mathbf{x}_k, \mathbf{x}_{k-1}$ ——状态向量
 $\boldsymbol{\omega}_{k-1}$ ——系统过程噪声
 $\boldsymbol{\omega}_{k-1}$ 简化为零均值高斯噪声,即 $\boldsymbol{\omega}_k \sim N(0, \mathbf{R})$, $\mathbf{R}$ 为测量噪声协方差矩阵。

假设使用微波传感器进行测量,传感器所得数据有时候会带有误差。设传感器测量的观测向量为 $\mathbf{z}_k$,则传感器观测方程可表示为

$$\mathbf{z}_k = H\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \tag{12}$$

式中 H ——观测矩阵,用于将系统状态向量 $\mathbf{x}_k$ 转换为传感器测量值 $\mathbf{z}_k$
 $\mathbf{v}_k$ ——测量误差,假设为高斯噪声 $\mathbf{v}_k \sim N(0, R)$

卡尔曼滤波算法可以通过预测和更新过程对系统状态变量进行估计。步骤如下:首先根据上一个时刻的状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}$ 和控制向量,利用状态转移矩阵和控制矩阵,预测当前时刻的状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ 。然后,利用观测矩阵和测量值,计算出最优的状态估计值。最后,利用更新后的状态估计值和协方差矩阵 $\mathbf{P}_{k|k-1}$,再次预测下一时刻的状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}_{k+1|k}$,以此不断循环递归,实现对系统状态的实时估计。

根据卡尔曼滤波算法的预测和更新过程,可以得到:

预测状态估计值
$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = F\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} \tag{13}$$

预测协方差矩阵
$$\mathbf{P}_{k|k-1} = F\mathbf{P}_{k-1|k-1}F^T + \mathbf{Q} \tag{14}$$

式中 $\mathbf{Q}$ ——过程噪声协方差矩阵
计算卡尔曼增益矩阵
$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}H^T (HP_{k|k-1}H^T + \mathbf{R})^{-1} \tag{15}$$

更新状态估计值

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} \tag{16}$$

2.3 模型拟合

实际测量过程,该系统会受到各种干扰,如固体粒径和测量方法等,这会导致测量结果不准确。后期实际施肥作业初期,选用拖拉机和同一种化肥进行实验,所以仅需得到对应式(1)中 v 的主导频率 f_{dot} 和 c 的功率谱密度 P_{sd} ,并把二者相乘,即传感器输出值 S_{val} 。最后将 S_{val} 与实际质量流量 Q_t 拟合,可得两者关系模型,即可进行流量测量。

本文采用最小二乘法进行数据拟合。将 Q_t 和 S_{val} 进行一维线性拟合,其线性关系表示为

$$Q_t = aS_{val} + b \tag{17}$$

其中
$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n_f} S_{vali}Q_{ti} - n_f\overline{S_{val}}\overline{Q_t}}{\sum_{i=1}^{n_f} S_{vali}^2 - n_f\overline{S_{val}}^2} \tag{18}$$

$$b = \overline{Q_t} - a\overline{S_{val}} \tag{19}$$

式中 $\overline{S_{val}}$ ——传感器输出值平均值, W
 $\overline{Q_t}$ ——实际质量流量平均值, g/min
 n_f ——测量次数

先测量不同 Q_t ,然后执行线性回归,确定 Q_t 和 S_{val} 之间的关系。

系数 a 和 b 会随着测量环境的不同而不同。所以为提高测量精度,须在不同环境中进行测量之前执行模型拟合操作。

3 实验室验证

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 密度为 974 kg/m^3 ,等效直径为 3.61 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 $1\,095\text{ kg/m}^3$,等效直径为 3.45 mm ,球形度为 89.86% 。化肥颜色呈白色,表面质地粗糙。在肥料质量流量测量系统上进行室内实验。

3.1 流量测量影响因素

为了测试传感器安装位置和颗粒肥料个数对测量结果的影响,在颗粒肥料质量流量实验平台上,采集了颗粒肥料在不同下落高度和不同颗粒数的多普勒信号。以史丹利 15-15-15 为实验材料,实验地点为中国农业大学。实验开始前,调整仪器设备使其正常工作。采集卡的采样频率设为 $1\,024\text{ Hz}$,采样时间为 1 s ,预设固定电机转速。将传感器安装在距离电动排肥装置 300 mm 和 500 mm 处。然后采用手动方式向排肥装置释放化肥,分别选择 1 粒化肥、2 粒化肥、4 粒化肥、8 粒化肥、16 粒化肥进行实验,每组化肥重复 10 次。分别计算 f_{dot} 和 P_{sd} ,分析影响因素。

颗粒肥料从 300 mm 和 500 mm 处作自由落体,理想情况下经过传感器时的速度分别为 2.42 m/s 和 3.13 m/s 。本实验平台中传感器垂直于管壁安装,天线角度为 12° 。因此颗粒运动方向和雷达发射电磁波角度为 78° 。根据式(3)可计算得,颗粒肥料从 300 mm 处下落的多普勒频移 f_{d1} 为 81.73 Hz , f_{d2} 为 105.71 Hz 。根据实验测得不同投放颗粒数的 10 组史丹利 15-15-15 在 300 mm 和 500 mm 处肥料下落的平均 f_{dot} 如表 1 所示。

表 1 颗粒肥在同高度平均 f_{dot} 测量结果
Tab.1 Average f_{dot} measurement result of granular fertilizer at the same height

距离/ mm	肥料颗粒数量				
	1	2	4	8	16
300	74.57	76.18	80.02	73.32	76.89
500	104.15	102.37	104.00	100.29	102.42

根据实验测得,史丹利 15-15-15 在 300 mm 和 500 mm 处不同数目颗粒下落的平均 P_{sd} 如表 2 所示。

表 2 颗粒肥在同高度平均 P_{sd} 测量结果
Tab.2 Average P_{sd} measurement result of granular fertilizer at the same height

距离/ mm	肥料颗粒数量				
	1	2	4	8	16
300	0.92	0.41	1.23	2.04	4.20
500	0.20	0.52	0.95	2.17	4.58

结果表明,不同颗粒数肥料在同一距离 f_{dot} 接近,且肥料作自由落体运动,当颗粒肥料从距离微波传感器 500 mm 处下落时的平均 f_{dot} 大于 300 mm 的测量结果。可得,使用微波多普勒传感器测量颗粒肥料的质量流量时,其 f_{dot} 仅与伺服电机自动排肥装置和传感器的距离有关。与肥料颗粒数不存在明显关系。

当同时下落的肥料颗粒数增加时,传感器测得的 P_{sd} 也增大,两者之间存在明显的正相关关系。这种正相关关系在传感器距离落肥口 300 mm 、 500 mm 的实验中均存在。并且在 2 种不同距离测得的 P_{sd} 几乎相同。从以上分析可以得出,使用微波多普勒传感器测量颗粒肥料的质量流量时,其 P_{sd} 仅与肥料颗粒数有关。与伺服电机自动排肥装置和传感器的距离不存在明显关系。

3.2 施肥量测量系统室内验证

实验室施肥作业时,对于连续肥料质量流量的测量,采用称量法进行传感器的标定,分别建立撒可富 15-15-15 和史丹利 15-15-15 的 $S_{val}-Q_t$ 模型进行提前标定。先将微波传感器固定在距离排肥管 400 mm 处,然后控制编码器改变排肥轴旋转速度来改变颗粒肥料质量流量。落肥口的开度固定为 30 mm ,排肥轴旋转速度以步长为 5 r/min ,分为 7 个挡位,从 20 r/min 增加到 50 r/min 。排肥轴每个挡位转动时间为 60 s ,在每次排肥轴转动停止后,对肥料收集装置内的颗粒肥料进行收集称量。重复实验 4 次,将每次计算得到的 S_{val} 代入模型中就可以获得当前肥料的质量流量。

因每次实验需时间为 60 s ,故将 g/min 用作质量流量单位。撒可富 15-15-15 标定实验的原始测量数据如表 3 所示,相同排肥轴转速 $\omega_{fs}(\text{r/min})$ 下获得的数据分别取平均值。

史丹利 15-15-15 标定实验的原始测量数据如表 4 所示。

通过最小二乘法获得 $S_{val}-Q_t$ 响应模型,结果如图 4 所示。

由图 4 可知,不同肥料有不同的关系模型。2 个关系模型决定系数 R^2 不小于 $0.985\,8$,表明用这 2 个模型表示 S_{val} 和 Q_t 的关系模型是可行的。

表 3 撒可富 15-15-15 标定实验的原始测量数据

Tab.3 Raw measurement data for calibration experiment of Sacokufu 15-15-15

$\omega_{fs}/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$f_{dot}/$ Hz	$P_{sd}/$ ($W \cdot Hz^{-1}$)	$S_{val}/$ W	$Q_t/$ ($g \cdot \min^{-1}$)
20	87.31	4.61	4.02	1 200.73
25	89.30	5.10	4.55	1 428.83
30	90.13	5.36	4.83	1 612.45
35	90.71	5.50	4.99	1 753.28
40	91.13	5.91	5.39	1 887.80
45	91.49	6.11	5.59	2 015.80
50	92.29	6.22	5.74	2 083.10

表 4 史丹利 15-15-15 标定实验的原始测量数据

Tab.4 Raw measurement data for calibration experiment of Stanley 15-15-15

$\omega_{fs}/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$f_{dot}/$ Hz	$P_{sd}/$ ($W \cdot Hz^{-1}$)	$S_{val}/$ W	$Q_t/$ ($g \cdot \min^{-1}$)
20	89.34	3.25	2.90	1 085.10
25	89.72	3.54	3.18	1 276.25
30	90.32	3.93	3.55	1 443.13
35	90.89	4.35	3.96	1 590.95
40	90.71	4.64	4.21	1 705.03
45	90.30	5.02	4.54	1 786.30
50	90.63	5.17	4.68	1 861.28

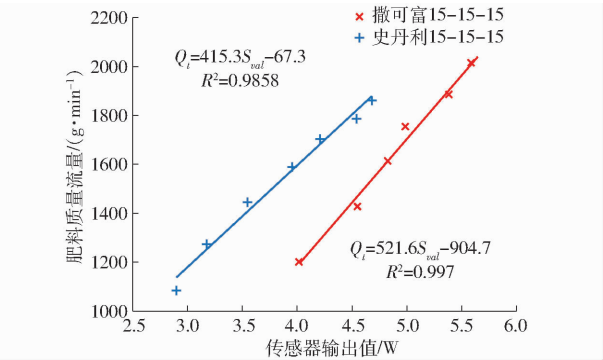


图 4 史丹利 15-15-15 和撒可富 15-15-15 的 $S_{val}-Q_t$ 模型

Fig. 4 Stanley and Sacokufu 15-15-15 $S_{val}-Q_t$ model

将在实验室得到的 2 种肥料的 S_{val} 分别代入关系模型,从而得到计算值 Q_c 。图 5 为在不同排肥轴转速下 2 种颗粒肥实际质量流量和通过传感器输出值代入模型计算值的对比。

相对误差 r 计算公式为

$$r = \frac{|Q_t - Q_c|}{Q_t} \times 100\% \quad (20)$$

故 2 种颗粒肥实际传感器输出值和模型计算值误差如表 5 所示。

由图 5 和表 5 可看出,对于不同种类肥料,在不

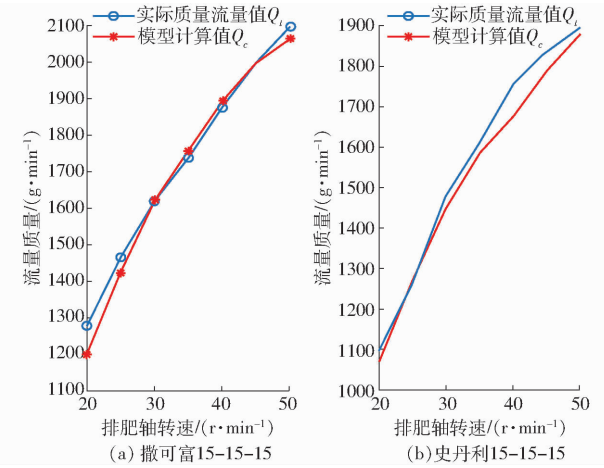


图 5 Q_t-Q_c 对比

Fig. 5 Q_t-Q_c comparison chart

表 5 2 种颗粒肥实际值和计算值相对误差

Tab.5 Relative error between actual and calculated values of two types of granular fertilizer %

肥料	转速/($r \cdot \min^{-1}$)						
	20	25	30	35	40	45	50
撒可富	6.35	2.85	2.22	1.19	0.96	0.89	1.25
史丹利	2.34	1.75	2.54	1.49	4.85	2.67	0.95

同质量流量下,测量系统均能实现施肥量的准确测量。撒可富 15-15-15 的测量范围为 1 199.8 ~ 2 065.9 g/min ,最大测量误差为 6.35%;史丹利 15-15-15 的测量范围为 1 071.9 ~ 1 877.9 g/min ,最大测量误差为 4.85%。实验结果证明了微波多普勒雷达测量颗粒肥料的流量是可行的。

4 结论

(1) 基于微波多普勒效应基本原理,对颗粒肥料多普勒回波信号进行快速傅里叶变换。通过计算 f_{dot} 从多普勒回波信号中提取颗粒肥料的运动速度相关信息;研究了流量测量的影响因素,并得出:颗粒肥料的多普勒回波信号的 f_{dot} 仅与伺服电机电动排肥装置和传感器的距离有关, P_{sd} 只与肥料颗粒数目有关,并且二者存在明显的正相关关系。

(2) 研究了撒可富 15-15-15 和史丹利 15-15-15 复合肥料传感器输出值和实际值的响应关系,并建立了拟合模型。实验结果表明,2 种复合肥的拟合模型的决定系数 R^2 不小于 0.985 8。

(3) 测量系统能实现施肥量的准确测量:撒可富 15-15-15 测量范围为 1 119.8 ~ 2 065.9 g/min ,最大测量误差为 6.35%;史丹利 15-15-15 测量范围为 1 071.9 ~ 1 877.9 g/min ,最大测量误差为 4.85%。

参 考 文 献

[1] 李普,梁春英,王紫玉,等.我国精准变量施肥技术研究现状和建议[J].农业工程,2021,11(11):31-34.
LI Pu, LIANG Chunying, WANG Ziyu, et al. Research status and recommendations on precision variable rate fertilization technology in China[J]. Agricultural Engineering, 2021, 11(11): 31-34. (in Chinese)

[2] ZHANG Y H, ZHANG K L, YU Y, et al. Design of maize variable fertilization condition and fault warning system[C]//2019 ASABE Annual International Meeting: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2019.

[3] SHI Y Y, CHEN M, WANG X C, et al. Efficiency analysis and evaluation of centrifugal variable-rate fertilizer spreading based on real-time spectral information on rice[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 0168-1699: 204.

[4] ZHOU L M, NIU K, CHEN K K, et al. Design and test of real-time monitoring system for non-contact fertilization flow[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2022, 66(1): 351-360.

[5] AKTHER Z, TAHA W, RAHMAN M S U, et al. Detection of solid contaminants in gas flows using microwave resonant probes[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(3): 035109.

[6] 李凯. 变量施肥系统的设计与研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2017.
LI Kai. Design and research of variable fertilization system[D]. Shihezi: Shihezi University, 2017. (in Chinese)

[7] 戚武振. 智能稻麦播种机变量施肥系统设计与研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.
QI Wuzhen. Design and research on variable fertilization system of intelligent rice-wheat seeder[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[8] 贾洪雷, 温翔宇, 王刚, 等. 颗粒肥料质量流量传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊): 130-136.
JIA Honglei, WEN Xiangyu, WANG Gang, et al. Design and experiment of mass flow sensor for granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Suppl.): 130-136. (in Chinese)

[9] 刘艺豪. 固态肥料排肥器流量控制系统研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2022.
LIU Yihao. Research on flow control system of solid fertilizer discharge device[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2022. (in Chinese)

[10] 王辉, 刘艺豪, 周利明, 等. 施肥播种机肥料流量分段式 PID 控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 32-40, 94.
WANG Hui, LIU Yihao, ZHOU Liming, et al. Design and experiment of PID control system for fertilizer flow in fertilizer planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 32-40, 94. (in Chinese)

[11] 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.

[12] 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]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 84-92.
JIN Xin, LI Qianwen, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment of 2BFJ-24 wheat precision sowing variable fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 84-92. (in Chinese)

[13] CRUZ M M, GEORGIEV G, BLASCO J. Design, development and testing of a microwave sensor for precision fertilisation[J]. Biosystems Engineering, 2016, 150: 73-84.

[14] 胡天舒, 彭宏宇, 幸文龙, 等. 基于微波传感的田间作物液体施肥量检测[J]. 传感技术学报, 2021, 34(2): 279-284.
HU Tianshu, PENG Hongyu, XING Wenlong, et al. Detection of liquid fertilizer application in field crops based on microwave sensing[J]. Journal of Sensing Technology, 2021, 34(2): 279-284. (in Chinese)

[15] 杨立伟, 黄家运, 张家振, 等. 基于微波传感的精准施肥量检测研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 263-269.
YANG Liwei, HUANG Jiayun, ZHANG Jiazhen, et al. Research on accurate fertilizer amount detection based on microwave sensing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 263-269. (in Chinese)

[16] WANG D, SUN J, WANG Y, et al. Eliminating the influence of moisture on solid concentration measurement in gas-solid flows using combined sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.