

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.023

# 基于超声波传感器的小麦追肥精准评估系统研究

李修华<sup>1</sup> 颜森<sup>1,2</sup> 高娜娜<sup>2,3</sup> 安晓飞<sup>2,3</sup> 武广伟<sup>2,3</sup> 孟志军<sup>2,3</sup>

(1. 广西大学电气工程学院, 南宁 530004; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097;

3. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 针对小麦追肥作业过程中开沟器易损苗伤根、追肥位置准确性无法评估的问题, 基于超声波传感器设计了小麦追肥精准评估系统, 提出一种基于超声波传感器阵列交叉探测小麦追肥行的方法, 实时评估追肥机具作业精度。系统由作业轨迹检测部分、数据采集部分和数据分析评估部分组成, 依靠安装在追肥机具上的超声波传感器交叉扫描小麦追肥行, 检测追肥机具作业轨迹。采集器实时采集超声波传感器数据, 记录追肥机具作业轨迹, 采用阈值滤波算法对异常数据进行筛选和剔除, 利用卡尔曼滤波算法最优估计当前时刻电压, 根据目标电压和最优估计电压计算追肥机具偏移距离, 进行追肥机具作业精度评估。田间试验结果表明: 追肥机具作业速度为 3~4 km/h 时, 评估系统能够准确检测出追肥机具作业精度, 偏移误判率为 9%, 最大误差距离为 3.15 cm, 误差距离在 2 cm 之内的占比超过 90%, 标准差均值为 2.10 cm, 与实际作业情况相符。本评估系统可以实现小麦追肥作业过程中, 实时对追肥机具作业精度量化评估, 为小麦精准对行追肥作业精度评价提供了一种新的测量手段。

**关键词:** 小麦追肥; 评估系统; 超声波传感器; 作业精度

中图分类号: S126; S224.22 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0203-07

## Accurate Evaluation System for Wheat Topdressing Based on Ultrasonic Sensor

LI Xiuhua<sup>1</sup> YAN Sen<sup>1,2</sup> GAO Nana<sup>2,3</sup> AN Xiaofei<sup>2,3</sup> WU Guangwei<sup>2,3</sup> MENG Zhijun<sup>2,3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

3. Beijing Research Center for Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of damage to wheat seedlings caused by furrow cutters and failure to evaluate the accuracy of topdressing position in the process of wheat top dressing operation, a precise evaluation system of wheat topdressing based on ultrasonic sensor was studied to evaluate the accuracy of topdressing machine in real time. The system was composed of a work trajectory detection part, a data collection part, and a data analysis and evaluation part. The ultrasonic sensors were installed on topdressing machines to scan the wheat line and detect the operation track of the topdressing machines. The collected data were sent to the controller from each ultrasonic sensor by CAN bus in real time to keep tracking topdressing machine operation. The abnormal data were filtered out and eliminated threshold filter algorithm. The optimally current voltage was estimated by the Kalman filter algorithm. The offset distance of the fertilizing machine and the accuracy of the topdressing machine were calculated according to the difference between the target voltage and the optimal estimated voltage. Field experiment showed that the offset misjudgment rate was 9%, the maximum error distance was 3.15 cm, the error distance during 2 cm accounted for more than 90%, and the average standard deviation was 2.10 cm, which was consistent with the actual operating conditions. In conclusion, the evaluation system provided a new means of measurement for evaluating the accuracy of wheat topdressing.

**Key words:** wheat topdressing; evaluation system; ultrasonic sensor; operation accuracy

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-09-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600)和国家自然科学基金项目(31760342)

作者简介: 李修华(1983—), 女, 副教授, 博士, 主要从事作物检测和农业物联网研究, E-mail: lixh@gxu.edu.cn

通信作者: 高娜娜(1985—), 女, 工程师, 博士, 主要从事农业智能装备技术研究, E-mail: gaonn@nrcita.org.cn

## 0 引言

小麦是我国重要粮食作物,2018年我国小麦播种面积为2 426.619万 $\text{hm}^2$ ,占全国粮食作物的22%。随着我国农业绿色发展的推进,小麦生产也在向绿色、高质、高效方向发展<sup>[1-4]</sup>。数据显示,2018年我国平均每公顷化肥使用量达到340.65 kg,远高于每公顷120.00 kg的世界平均水平,是美国的2.7倍,欧盟的2.6倍。化肥施用过量,引发环境问题,许多地区农作物出现倒伏减产,土壤酸化和板结的问题日益严重<sup>[5-7]</sup>。

目前,小麦追肥以人工和机械撒施为主,肥料利用率低,增产效应不明显,并且小麦属于密植作物,追肥机具作业过程中因对行精度低,导致开沟器损伤麦苗,引起苗黄、苗枯死等现象,造成小麦产量下降,化肥利用率低等问题<sup>[8-10]</sup>。国内外对追肥机具田间作业精度尚无统一、规范的评估方法和指标<sup>[11-12]</sup>。国外主要通过研究农作物的相关参数来评估追肥机具作业精度,常用均值、标准差和均方根误差等统计值作为评价标准<sup>[13-21]</sup>。我国现阶段对小麦追肥技术研究主要集中在变量控制施肥技术方面,针对小麦对行追肥精准评估系统研究相对较少<sup>[22-25]</sup>,对追肥机具作业精度检测通常采用人工测量方法,效率低,且产生的误差较大<sup>[26]</sup>。

针对小麦追肥作业过程中开沟器易损苗伤根、追肥位置准确性无法评估的问题,本文开展追肥机具作业精度评估系统研究,依据小麦种植农艺要求,利用高精度超声波传感器检测追肥机具作业轨迹,评估追肥机具在小麦追肥行间作业精度,检验是否满足田间作业精度的要求。

## 1 小麦追肥精准评估系统设计

### 1.1 工作原理

基于小麦宽窄行种植模式,宽行行间距20 cm,窄行行间距10 cm,依靠安装在追肥机具上的超声波传感器,在小麦种植宽行间检测追肥机具作业轨迹,根据超声波传感器数据评估追肥机具作业精度。用户在车载终端界面进行基本参数设置,评估系统实时采集各个超声波传感器数据,通过CAN总线发送给采集器,记录追肥机具作业轨迹,采用阈值滤波算法进行异常数据筛选和剔除;利用卡尔曼滤波算法最优估计当前时刻电压,并与设定的目标电压进行比较;根据最优估计电压与目标电压的差值计算追肥机具偏移距离,使用对行精度和标准差等指标量化评估追肥机具作业精度,小麦对行追肥精准评估系统工作原理流程如图1所示。

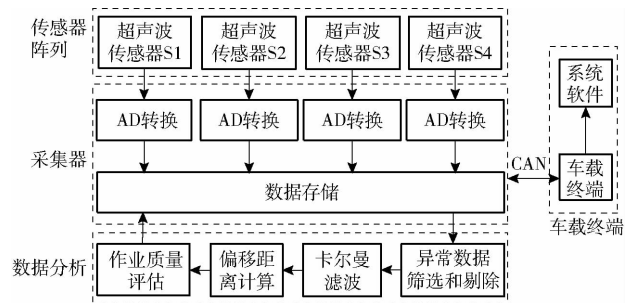


图1 小麦追肥精准评估系统工作原理流程图

Fig.1 Working principle flow chart of wheat topdressing precision evaluation system

### 1.2 总体结构

小麦对行追肥精准评估系统主要由作业轨迹检测部分、数据采集部分、数据分析评估部分组成。追肥机具作业轨迹检测部分依靠安装在追肥机具上的超声波传感器实现,传感器向小麦行发出探测信号,遇到小麦行的遮挡形成回波信号,经过传感器接收器的接收和数值化处理,输出模拟电压信号,当追肥机具发生偏移时,传感器数据会发生波动,实时接收并记录传感器的电压信号,作为追肥机具的作业轨迹。数据采集部分通过采集器实时采集各个超声波传感器数据,并且对超声波传感器数据预处理后,进行存储,实现追肥机具作业轨迹的记录。数据分析评估部分主要包括异常数据筛选和剔除环节、卡尔曼滤波环节、偏移距离计算环节和作业精度评估4个环节,小麦追肥精准评估系统总体结构如图2所示。

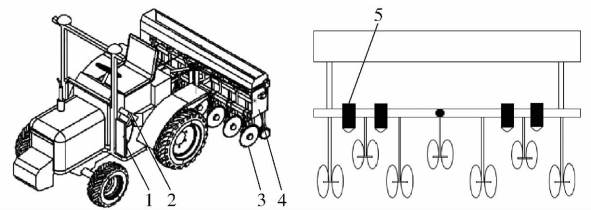


图2 小麦追肥精准评估系统总体结构图

Fig.2 Overall structure diagram of accurate evaluation system for wheat topdressing

1. 评估系统采集器 2. 车载终端 3. 开沟器 4. 追肥机具 5. 超声波传感器

采集器实时接收超声波传感器发送的模拟电压数据,利用阈值滤波完成异常数据筛选和剔除;采用卡尔曼滤波算法对剔除异常数据的超声波传感器数据实时更新和最优估计;计算追肥机具的偏移距离;根据偏移距离进行追肥机具作业精度量化评估,并同步将偏移距离、对行精度和超声波传感器数据等信息发送到车载终端实时显示。

### 1.3 硬件设计

小麦追肥精准评估系统硬件由车载终端、评估系统采集器、4个超声波传感器、追肥机具、传感器

安装支架等组成。评估系统采用的超声波传感器型号为 CUM18-M1DV, 测量范围为 6~100 cm, 扩散角小于 15°, 超声波传感器及安装支架实物如图 3 所示。使用安装支架将超声波传感器 S1~S4 从左往右安装在追肥机具上, 把追肥机具的中点定义为 中心点, 确保 S2 与 S3、S1 与 S4 安装位置分别到中心点的距离相等, 即  $a_1 = a_2, b_1 = b_2$ 。通过调整各个超声波传感器的安装角, 组合成交叉模式, 在小麦追肥行间探测追肥机具作业轨迹。交叉模式中 S1 传感器扫描 C2 追肥行, S2 传感器扫描 C1 追肥行, S3 传感器扫描 C4 追肥行, S4 传感器扫描 C3 追肥行, 图 4 是交叉模式安装示意图。

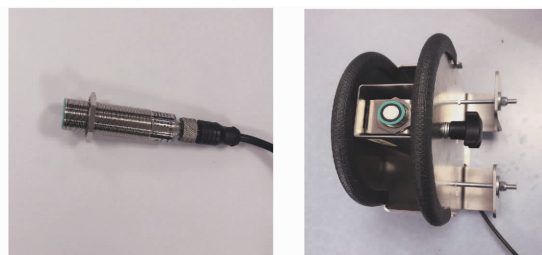


图 3 超声波传感器及安装支架

Fig. 3 Ultrasonic sensor and mounting bracket

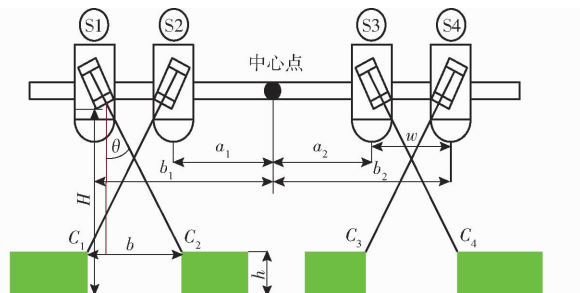


图 4 交叉模式安装示意图

Fig. 4 Cross mode installation diagram

交叉模式超声波传感器安装高度计算公式为

$$H = \frac{b + w}{2} \cot \theta + h \quad (1)$$

- 式中  $\theta$ ——S1 超声波传感器安装角, ( $^\circ$ )
- $b$ ——小麦追肥行的宽度, cm
- $w$ ——相邻超声波传感器安装间距, cm
- $h$ ——小麦高度, cm
- $H$ ——超声波传感器安装高度, cm

### 1.4 软件设计

小麦追肥精准评估软件是整个评估系统的核心, 评估系统软件由信息管理模块、评估分析模块组成, 图 5 为软件功能结构图。信息管理模块主要负责基本参数设置, 包括超声波传感器安装高度和角度, 目标模拟电压等参数设置。追肥机具追肥作业时, 该模块将追肥机具作业速度、位置、对行精度和偏移距离等信息显示在终端界面, 同时该模块设计

包括与下位机通信协议设计, 完成信息交互。评估分析模块由数据采集环节、数据处理环节、精度评估环节组成。评估分析模块主要负责采集各个超声波传感器和 RTK-GPS 信号, 记录追肥机具作业轨迹, 同时对超声波传感器数据采用阈值滤波进行异常数据筛选和剔除, 并对剔除异常数据的超声波传感器数据进行卡尔曼滤波, 根据卡尔曼最优估计的电压, 计算追肥机具的偏移距离, 完成追肥机具作业精度评估。

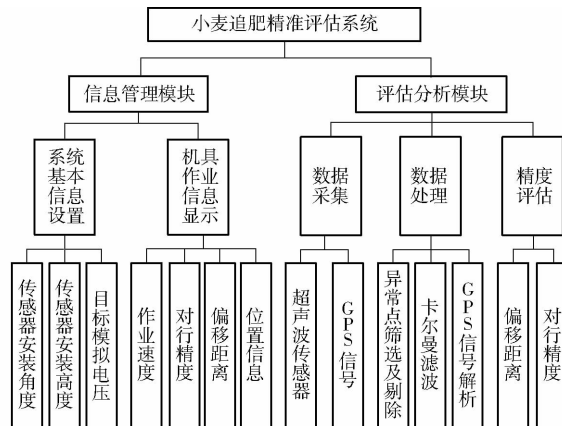


图 5 小麦追肥精准评估系统软件功能结构图

Fig. 5 Software function structure diagram of accurate evaluation system for wheat topdressing

基于以上功能模块, 小麦对行追肥精准评估系统软件工作流程如图 6 所示, 在系统软件主程序设置相应的通信参数, 并检查是否正常通信, 完成信息传输; 根据超声波传感器安装的实际情况, 设置系统基本参数; 当通信正常及基本参数设置完成后, 启动定时采样器, 采集各个超声波传感器数据, 首先对超声波传感器数据用阈值滤波算法对异常数据进行筛选和剔除, 完成数据预处理, 然后采用卡尔曼滤波算法实现对预处理后的超声波传感器数据实时更新和最优估计电压, 再与用户设定的目标电压比较, 根据最优估计的电压和目标电压之间的差值, 计算追肥机具偏移距离, 用偏移距离绝对值的平均值计算对行精度; 最后保存数据, 并且把对行精度、偏移距离、S1 和 S2 超声波传感器数据等信息上传到终端界面实时显示。

根据小麦对行追肥精准评估系统软件需求与设计目标, 在软件开发与实现方面, 需要保证界面简单便捷的操作性能, 基于 C#MFC 框架开发了评估系统界面, 如图 7 所示, 实现在终端界面进行基本参数设置、GPS 数据解析、实时显示等功能。

### 1.5 数据处理和评估指标

#### 1.5.1 数据处理

由于田间环境因素复杂, 不可避免造成超声波传感器数据异常, 这些异常数据占比不高, 但对评估

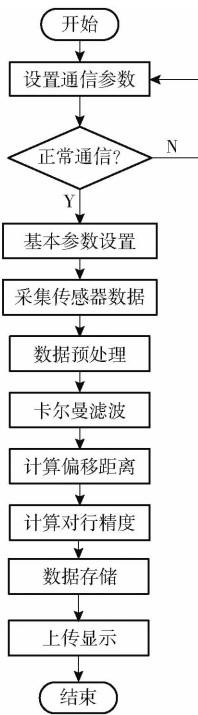


图6 小麦追肥精准评估系统软件工作流程图

Fig. 6 Software workflow of accurate evaluation system for wheat topdressing

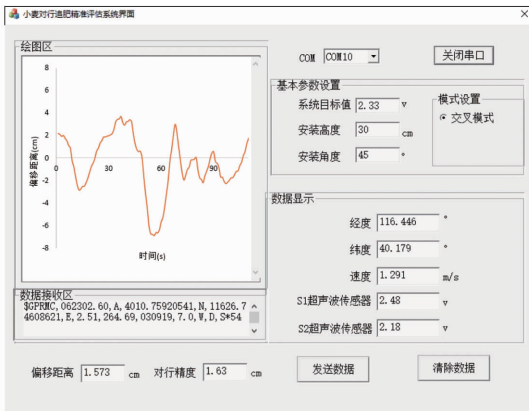


图7 小麦追肥精准评估系统界面

Fig. 7 Interface of accurate evaluation system for wheat topdressing

系统的准确性有一定的影响。针对各个超声波传感器数据进行预处理,采用的方法为阈值滤波进行异常数据筛选和剔除,若前一时刻超声波传感器数据和当前时刻超声波传感器数据差值的绝对值大于1.0 V,即偏移距离大于20 cm,则视为异常数据,进行筛选并剔除。

卡尔曼滤波根据前一时刻最优估计电压和当前时刻采集的超声波传感器数据,用状态方程和递推公式最优估计当前时刻电压,实现对预处理后的数据实时更新和估计。

当施肥机具作业路径发生偏移时,各个超声波传感器数据会出现波动,根据目标电压和最优估计电压,计算追肥机具作业过程中的偏移距离。偏移

距离的正负,由S1传感器数据与目标电压的大小确定,如果S1传感器数据大于目标电压,偏移距离为正,反之,则偏移距离为负,偏移距离计算公式为

$$d(k) = \frac{\sum_{i=1}^4 \left| \sin\theta \frac{y_s - y_0}{5} (G(k) - X_i(k)) \right|}{4} \quad (2)$$

式中  $d(k)$ —— $k$ 时刻评估系统检测的偏移距离,cm  
 $y_s, y_0$ ——超声波传感器输出为5、0 V的标定距离,cm  
 $G(k)$ ——目标电压,V  
 $X_i(k)$ ——第*i*个传感器*k*时刻最优估计电压,V

### 1.5.2 评估指标

本研究用追肥机具作业后的追肥路径对行精度和标准差作为评估指标来量化评估追肥机具作业精度,用偏移误判率和误差距离来评价系统的精度和准确性。

为了直观反映追肥机具直线作业程度,选用对行精度表征,用偏移距离绝对值的平均值表示对行精度。对行精度在一定程度上反映了追肥机具对行作业的精度,其值越小表明追肥机具直线作业的精度越高,麦苗损伤率越低,肥料利用率越高。对行精度计算公式为

$$R = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d(k) \quad (3)$$

式中  $R$ ——对行精度,cm  
 $n$ ——采集数据的总个数

偏移误判率可以反映评估系统的准确性,追肥机具向左偏,评估系统检测出向右偏以及追肥机具向右偏,评估系统检测出向左偏作为误判,偏移误判率根据误判的个数进行计算,公式为

$$\eta = \frac{p}{n} \times 100\% \quad (4)$$

式中  $\eta$ ——偏移误判率,%  
 $p$ ——评估系统误判的个数

误差距离可以反映评估系统的测量精度,误差距离越小,说明评估系统精度越高。误差距离根据评估系统检测的偏移距离与RTK-GPS检测的偏移距离计算,公式为

$$E_d(k) = d(k) - D(k) \quad (5)$$

式中  $D(k)$ —— $k$ 时刻RTK-GPS检测的偏移距离,cm

$E_d(k)$ —— $k$ 时刻评估系统检测的误差距离,cm

## 2 评估系统测试与试验

为了验证评估系统的准确性,在北京小汤山国



家精准农业研究示范基地分别进行超声波传感器性能测试试验、评估系统测试试验和田间试验。评估系统主要根据超声波传感器数据来进行追肥机具作业精度评估,因此超声波传感器的精度和测量误差直接影响系统的准确性,评估系统测试试验主要验证系统的理论设计和程序设计的合理性和准确性,田间试验目的是验证与实际作业情况是否相符。

## 2.1 超声波传感器性能试验

超声波传感器标定距离为 6 ~ 80 cm,当测量距离大于等于 80 cm 时,传感器输出电压为 5 V,测量距离小于等于 6 cm 时,传感器输出电压为 0 V。在 6、10、20、30、40、50、60、70、80 cm 距离处,利用超声波传感器、量尺和高精度手持式激光测距仪 3 种不同的测量方法进行多组试验,记录 3 种测量方法的试验数据,3 次测量取均值,统计结果如表 1 所示。首先对超声波传感器输出电压剔除最大值和最小值,取平均值记录在 Excel 中,并对输入输出数据进行线性回归,线性回归曲线如图 8 所示。

表 1 3 种测量方法试验结果

Tab. 1 Test results of three measurement methods

实际 距离/ cm	传感器测量		激光测量		量尺测量	
	相对 误差/%	标准 差/cm	相对 误差/%	标准 差/cm	相对 误差/%	标准 差/cm
6	4.67	0.39	0.67	0.05	0	0
10	4.50	0.35	1.00	0.08	0	0
20	0.25	0.32	1.00	0.15	0.50	0.14
30	0.23	0.21	0.67	0.17	0.33	0.11
40	0.10	0.06	0.75	0.23	0.50	0.21
50	0.02	0.07	0.40	0.25	0.40	0.25
60	0.63	0.29	0.50	0.31	0.33	0.22
70	0.47	0.46	0.29	0.24	0.29	0.23
80	1.14	0.48	0.38	0.31	0.31	0.26

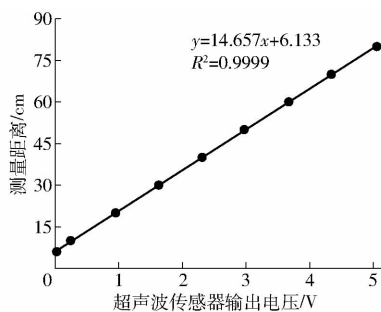


图 8 超声波传感器标定回归曲线

Fig. 8 Ultrasonic sensor calibration regression equation

其决定系数  $R^2$  高达 0.999 9,说明超声波传感器在标定距离范围,传感器输出模拟电压和测量距离成线性关系。

根据在各个距离超声波传感器输出的电压与标定试验的拟合方程计算出对应的测量距离。针对

3 种测量方法利用相对误差和标准差进行对比分析。

由表 1 可知,超声波传感器测量的平均相对误差为 1.33%,平均标准差为 0.29 cm。激光测量仪测量的平均相对误差为 0.63%,平均标准差为 0.20 cm。量尺测量的平均相对误差为 0.30%,平均标准差为 0.16 cm。3 种测量方法的测量误差和标准差较小且基本一致。测量距离在 40 ~ 50 cm 时,超声波传感器测量平均相对误差为 0.06%,平均标准差为 0.07 cm,比激光测量和量尺测量的误差小,说明超声波传感器具有较高的稳定性和精度,满足田间作业要求。

## 2.2 评估系统测试试验

追肥机具作业速度控制在 3 ~ 4 km/h,超声波传感器安装角  $45^\circ$ ,测量距离 42 cm,仿真麦苗高度和间距分别为 6、30 cm,在水泥地面沿作业路线往返行驶多组,对评估系统进行测试,评估系统测试现场如图 9 所示。



图 9 评估系统测试现场

Fig. 9 Picture of evaluation system test scene

追肥机具加装 RTK - GPS,用于采集、记录追肥机具的作业轨迹,作为对照组与评估系统的交叉模式进行对比,先将各组数据点利用最小二乘法进行线性拟合,得到作业轨迹的线性方程,然后以拟合直线为基准,用距离公式计算 RTK - GPS 数据的偏移距离。针对评估系统的交叉模式与 RTK - GPS 数据分别用对行精度、偏移误判率、误差距离和标准差指标对比分析。

由图 10a 可知,追肥机具作业轨迹线性拟合方程为  $y = 0.069 4x + 4 416 376.567 6$ ,其决定系数  $R^2$  为 0.989 7,线性拟合效果较好。评估系统的偏移误判率为 7%,准确率为 93%,平均误差距离为 0.99 cm,其中误差距离在 2 cm 之间的占比超过 97%,最大误差距离为 2.39 cm。RTK - GPS 与评估系统检测出的偏移距离趋势一致且误差距离较小,说明评估系统可靠性高。RTK - GPS 和交叉模式检测的对行精度分别为 2.16、2.05 cm,差值为 0.11 cm,标准差分别为 1.69、1.58 cm。针对各组数

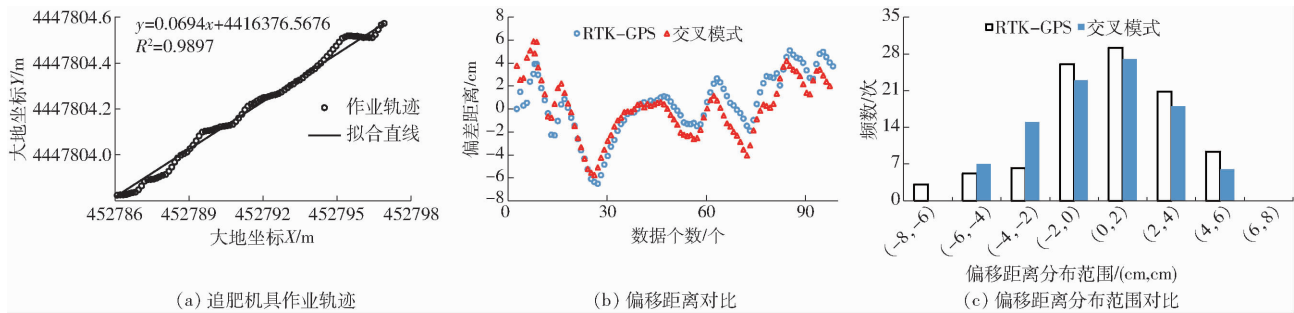


图10 评估系统测试试验结果

Fig.10 Evaluation system test results

据利用各项指标进行对比分析,评估系统与RTK-GPS检测的结果基本相符且差值很小,由此说明评估系统能准确检测出追肥机具作业精度且可靠性高。

### 2.3 田间试验

为了验证评估系统评估追肥机具作业精度的准确性,开展田间试验。小麦追肥行行距20 cm,小麦高度6 cm,追肥机具作业速度控制在3~4 km/h等试验条件下,进行多组试验,记录试验数据,图11为田间试验现场,田间试验结果如表2所示。



图11 田间试验现场

Fig.11 Field experiment

由表2可知,评估系统的平均偏移误判率为9%,准确率为91%,最大误差距离为3.15 cm,误差距离在2 cm之内的占比超过90%,标准差均值为2.10 cm,与实际作业情况相符,因此本评估系统可以实现小麦追肥作业过程中,实时对追肥机具作业精度量化评估。

## 3 结论

(1)为评估追肥机具作业精度,设计了基于超

表2 田间试验结果

Tab.2 Field test results

序号	偏移误判率/%	标准差/cm	最大误差距离/cm
1	8	2.12	2.24
2	7	1.91	1.75
3	6	1.75	1.87
4	11	2.01	2.26
5	12	2.59	3.15
6	9	2.19	2.73
7	8	2.04	2.44
8	10	2.17	2.67
均值	9	2.10	2.39

声波传感器的小麦追肥精准评估系统,该系统通过调整各个超声波传感器角度组合成交叉模式,扫描小麦追肥行,检测追肥机具作业轨迹,对超声波传感器数据进行预处理和卡尔曼滤波,计算追肥机具偏移距离,进行追肥机具作业精度评估。

(2)田间试验结果表明,基于小麦宽窄行种植模式,追肥机具作业速度3~4 km/h,评估系统的交叉模式能够准确检测出追肥机具作业精度,评估系统的偏移误判率为9%,误差距离在2 cm之内的占比超过90%,最大误差距离为3.15 cm,可以实现在小麦追肥作业过程中,实时对追肥机具作业精度量化评估。

(3)采用偏移误判率、误差距离等各项指标分析,评估系统与RTK-GPS检测结果基本相符。本研究提出的基于超声波传感器的小麦追肥精准评估系统可行,根据超声波传感器数据分析计算出的偏移距离可为后续精准对行施肥控制系统提供参考。

## 参考文献

- 赵春江. 对我国未来精准农业发展的思考[J]. 农业网络信息, 2010(4):5-8. ZHAO Chunjiang. Strategy thinking on precision agriculture of China[J]. Agriculture Network Information, 2010(4):5-8. (in Chinese)
- 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1):1-7. ZHAO Chunjiang. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture [J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1):1-7. (in Chinese)
- GEBBERS R, ADAMCHUK V I. Precision agriculture and food security[J]. Science, 2010, 327: 828-831.
- 郭玉珍. 基于精准农业绿色小麦栽培技术推广与田间管理方法探析[J]. 农业工程技术, 2020, 40(15):55-56.
- 王兴仁,江荣风,张福锁. 我国科学施肥技术的发展历程及趋势[J]. 磷肥与复肥, 2016, 31(2):1-5.

- WANG Xingren, JIANG Rongfeng, ZHANG Fusuo. Development course and future trend of scientific fertilization technology in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2016, 31(2):1-5. (in Chinese)
- [6] 唐汉,王金武,徐常塑,等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(4):1-19. TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4):1-19. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190401&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190401&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.001. (in Chinese)
- [7] 张福锁. 科学认识化肥的作用[J]. *中国农技推广*, 2017, 33(1):16-19. ZHANG Fusuo. Scientific understanding of chemical fertilizers' roles[J]. *China Agricultural Technology Extension*, 2017, 33(1):16-19. (in Chinese)
- [8] 冯慧敏,高娜娜,孟志军,等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4):60-67. FENG Huimin, GAO Nana, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4):60-67. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180407&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180407&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.007. (in Chinese)
- [9] 安晓飞,付卫强,王培,等. 小麦种行肥行精准拟合变量施肥控制系统研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊):96-101. AN Xiaofei, FU Weiqiang, WANG Pei, et al. Development of variable rate fertilization control system based on matching fertilizer line and seed line of wheat[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.):96-101. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2019s016&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s016&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.016. (in Chinese)
- [10] 陈满,施印炎,汪小昆,等. 基于光谱探测的小麦精准追肥机设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(5):26-32. CHEN Man, SHI Yinyan, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator based on crop canopy spectral reflectance[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5):26-32. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150505&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150505&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.005. (in Chinese)
- [11] 谢召艳. 基于导航系统的农业机械自动作业精度测试[J]. *农业工程*, 2018, 8(6):55-58. XIE Zhaoyan. A test on automatic operation accuracy of agricultural machinery based on navigation[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(6):55-58. (in Chinese)
- [12] 吉辉利,王熙. 农机卫星导航自动驾驶作业精度评估试验的研究[J]. *中国农业大学学报*, 2017, 22(11):148-156. JI HuiLi, WANG Xi. Accuracy evaluation on the automatic driving operation of agricultural machinery based on satellite navigation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(11):148-156. (in Chinese)
- [13] PIER D T, GIOVANNI B P, DANY D. Navigation aids performance evaluation for precision approaches[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2010, 2010:1-10.
- [14] YOSHISADA N, KATSUHIKO T, KENTARO N, et al. A global positioning system guided automated rice transplanter[J]. *IFAC Proceeding Volumes*, 2013, 46(18):41-46
- [15] LIU P Z, BI S S, ZANG G S, et al. Obstacle avoidance system for agricultural robots based on multi-sensor information fusion[C]// *Computer Science and Network Technology (ICCSNT)*, 2011 International Conference on, 2011.
- [16] GOMEZ-GIL J, ALONSO-ARCIA S, GÓMEZ-GIL F J, et al. A simple method to improve autonomous GPS positioning for tractors[J]. *Sensors*, 2011(11):5630-5644.
- [17] HAN S F, ZHANG Q, NOH H, et al. A dynamic performance evaluation method for DGPS receivers under linear parallel tracking applications[J]. *Transactions of the ASAE*, 2004, 47(1):321-329.
- [18] DOMINGOS S M V, ABDUL M, TONY G, et al. Accuracy and precision evaluation of two low-cost RTK global navigation satellite systems[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 168:105142.
- [19] AGNIESZKA O, WITOLD N, EDYTA P, et al. Accuracy evaluation of real-time GNSS precision positioning with RTX trimble technology[J]. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2018, 28(4):49-61.
- [20] WANG Y Y, YANG G L, YAN D C, et al. Comprehensive assessment algorithm for calculating CEP of positioning accuracy[J]. *Measurement*, 2014, 47:255-263.
- [21] WANG Y Y, JIA X R, YANG G L, et al. Comprehensive CEP evaluation method for calculating positioning precision of navigation systems[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 341:955-960.
- [22] 初金哲,庄卫东,梁冉冉. 精准变量施肥技术发展与分析[J]. *农业机械*, 2018(10):68-71. CHU Jinzhe, ZHUANG Weidong, LIANG Ranran. Development and analysis of precise variable fertilization technology[J]. *Agricultural Machinery*, 2018(10):68-71. (in Chinese)
- [23] 施印炎,陈满,汪小昆,等. 稻麦精准变量施肥机排肥性能分析与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(7):97-103. SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Performance analysis and experiment of precision variable fertilization machine for rice and wheat[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(7):97-103. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170712&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170712&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.012. (in Chinese)
- [24] 孟志军,赵春江,付卫强,等. 变量施肥处方图识别与位置滞后修正方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(7):204-209. MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, FU Weiqiang, et al. Method for identification and position lag correction of variable fertilization prescription map[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(7):204-209. (in Chinese)
- [25] 刘阳春. 变量配肥施肥精准作业装备关键技术研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2012. LIU Yangchun. Research on the key technologies of precision operation equipment for variable fertilization[D]. Beijing:China Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2012. (in Chinese)
- [26] 赵祚喜,罗阳帆,马昆鹏,等. 基于全站仪的插秧机卫星导航作业精度检验方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(增刊):50-56. ZHAO Zuoxi, LUO Yangfan, MA Kunpeng, et al. Satellite navigation operating accuracy testing method of rice transplanter based on total station[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(Supp.):50-56. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2019s008&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2019s008&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.008. (in Chinese)