

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.04.003

小麦播种机播量控制参数自校正方法

丁永前^{1,2} 陈冲³ 余洪锋³ 张洪达³ 窦祥林³ 刘卓³

(1. 南京农业大学人工智能学院, 南京 210031; 2. 现代作物生产省部共建协同创新中心, 南京 210095;

3. 南京农业大学工学院, 南京 210031)

摘要: 针对传统外槽轮式播量控制系统因流量-转速标定关系失偏而导致控制精度下降的问题, 提出了一种通过动态校正控制参数保持播量控制精度的方法, 该方法采用基于氮气弹簧为支撑力、S型称重传感器为拉力的称重式播量检测系统, 利用两类传感器加权信号与实际播量方程的线性组合实现原始传感信号滤波的独特测量特性, 构建播量检测算法, 并根据播量动态检测结果对基于流量-转速标定关系的控制参数作动态校正, 实现播量的本质闭环控制, 保持控制精度的稳定。利用搭建的播种机测试平台, 开展了基于播量检测的播量控制参数未校正和自校正动态试验。在所有的测试过程中, 播量检测结果与实际结果之间的绝对相对偏差最大值、平均值和标准差分别为 4.52%、2.68% 和 1.14%; 播量控制参数未校正时, 实际值与目标值之间的绝对相对偏差最大值、平均值和标准差分别为 18.38%、17.06% 和 1.21%, 而引入控制参数自校正后, 实际值和目标值之间的绝对相对偏差的最大值和平均值分别下降至 3.70% 和 2.61%, 标准差为 0.67%。试验结果表明: 基于加权信号的播量检测方法能有效获取播种机的实际播量信息, 实现播量控制参数自校正, 有效维持播量控制系统的控制精度。

关键词: 小麦播种机; 播量检测; 自校正; 加权信号; 滤波

中图分类号: S24

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)04-0031-07

OSID:



Self-correcting Method for Application Rate Control Parameters of Wheat Seed Drill Machine

DING Yongqian^{1,2} CHEN Chong³ YU Hongfeng³ ZHANG Hongda³ DOU Xianglin³ LIU Zhuo³

(1. College of Artificial Intelligence, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Collaborative Innovation Center for Modern Crop Production Co-sponsored by Province and Ministry, Nanjing 210095, China

3. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China)

Abstract: An application rate detection method was proposed based on a special dynamic weighing system where the nitrogen springs through pressure sensors provided the total supporting force and gave rise to the pulling force change of the S-type weighing sensors with the weight change of the material (wheat seed) inside the box. The unique measurement characteristics of the detection system was that the linear combination of the weighted sum of the two types of sensors and the actual application rate equation can filter the original signal of the sensors. The application rate detection method was found based on the measurement characteristics and applied to the application rate control of a seed drill machine with fluted rollers, with the control parameters self-corrected, which made the seed drill machine with fluted rollers realized the substantial closed-loop control of the application rate and ensured continuously high control accuracy. Using the seed drill machine with 6 of 24 fluted rollers were blocked, two types of tests for controlling the application rate, with and without the application of self-correcting control parameters, were carried out. During all the tests, the maximum, average and standard deviation of the absolute relative error between the measured value and the actual value were 4.52%, 2.68% and 1.14%, respectively. While the corresponding statistic data between the actual value and the target value were 18.38%, 17.06% and 1.21%, respectively without control parameters being self-corrected. And the corresponding data were improved to 3.70%, 2.61% and 0.67% after introducing the control parameter self-correcting. The test results showed that the application rate measurement method can effectively

收稿日期: 2022-07-01 修回日期: 2022-08-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD070030403)和江苏省信息农业重点实验室项目(KLIAKF1901)

作者简介: 丁永前(1975—),男,教授,博士,主要从事智能农业装备、智能检测与控制技术研究, E-mail: yongqian@njau.edu.cn

measure the application rate of the seed drill machine and can be applied to self-correcting control parameters and holding high control accuracy.

Key words: wheat seed drill machine; application rate detecting; self-correcting; weighted signal; filtering

0 引言

由于田间的播种施肥量受农田土壤信息、历年产量分布和气候条件等因素的影响,过度细化的播量信息不但难以获取也没有必要,在实际作业过程中,一般以一定面积的田块作为作业单元,在不同作业单元间实施变量作业,在同一作业单元内则实施精确定量作业,并不需要实时调整作业播量^[1-3]。作业单元内的播量作业状况有赖于精确的播量检测方法和控制技术,为了实现种肥播量的精确检测,国内外学者进行了广泛的研究,常用的测量方法有光电法、微波多普勒法、图像法和称重法(测量结果为千克,按行业习惯,本文中称为“重量”)。GRIFT等^[4]、SWISHER等^[5]利用红外光电探测器输出颗粒肥料流量与脉冲宽度,并通过计算得到肥料瞬时流量和总播量;邱桂芝等^[6]提出通过微波多普勒法和电容层析成像原理得到固体颗粒的流量的方法,实验证实了电容和微波相结合测量颗粒物料流量的可行性;BACK等^[7]开发了一种基于图像处理的播量测量系统(IBARMS),使用高速彩色相机获取下落的肥料颗粒图像,去除背景,测量每个颗粒的直径和密度,估算播量;GONZALEZ-MONTELLANO等^[8]搭建基于称重传感器的动态称重系统,使用离散元方法(DEM)测量葡萄收获机仓内的载荷。

现有的这些检测方法中,图像处理法设备昂贵,数据量大;光电法对光电传感器的要求精度高,播量检测精度受肥料密度、含水率影响较大,同时检测探头容易受到肥料粉末覆盖,需要经常标定和清洗;多普勒效应法运用固体质量流量检测,受外界振动干扰影响较大,同时依赖物料流量的标定,检测精度有待进一步提高;称重法作为一种直接式播量检测方法,相对于其它检测方法,由于其适应性强,在农业上运用广泛,比如拖拉机的牵引力测量、精准播种、变量施肥与喷药,以及作物的产量监测、草捆重量监测统计等,都有基于称重传感器的相关应用研究,但在实际作业过程中,称重法因易受振动和突发性冲击干扰而降低测量结果的稳定性和准确性,是目前面临的普遍技术难题^[9-12]。

外槽轮式播种机作为目前广泛采用的作业机型,其控制系统基于预先标定的转速-流量关系实施播量控制,本质上属于开环控制,持续稳定的控制精

度有赖于频繁的标定。随着作业时长的增加,控制精度会随标定参数的失偏而降低,对实际应用产生较大影响^[13-15]。当前尚无高效实时的播量在线监测传感器用来构建播量的闭环控制,如何有效保持持续的控制精度是提高播种施肥机作业性能的关键因素。

本文利用课题组研发的以高压氮气弹簧为支撑力的称重式播量检测装置,根据氮气弹簧支撑力和称重传感器拉力之间存在力方向相反,幅值成比例的特性,提出一种基于信号加权处理的播量检测方法,有效去除振动干扰,并根据实际作业情况,将此方法应用于外槽轮式播种机的播量控制中,以保证控制系统具有较高的持续控制精度。

1 播量控制参数自校正方法

1.1 实际生产对播量的控制要求

在实际生产中,对播量的精确控制一般以一定面积的作业单元作为基本处理单元,在每个基本作业单元内保持恒定的播量,不同作业单元内,根据实际需要调整播量,而并不需要实时调整单位面积的播量^[16]。对播量控制而言,获取实时的播量信息实现闭环控制不仅技术上有困难,而且实际意义并不大。因此,将作业单元作为数据处理单元获取播量的统计信息,对评价和控制作业质量既有技术上的可行性,也有实际应用上的合理性。本文以获取一个作业单元内的播量信息为基础,并以此信息与目标播量之间的差值作为外槽轮式播种机控制参数的校正依据,从而达到播量控制参数自校正的目的。

1.2 外槽轮式播种机的作业特征

现有的外槽轮式播种机播量控制本质上属于开环控制^[17-18],通过标定排料口流量与转速的关系,结合机具行驶速度、目标播量,实时控制驱动电机转速进行播量控制,标定关系一般方程为

$$Y = KX + B \quad (1)$$

式中 X ——槽轮转速, r/min

Y ——槽轮流量, g/min

K ——标定方程斜率, g/r

B ——标定方程截距, g/min

将式(1)进一步转换为槽轮转速与目标播量、速度的关系式

$$X = \frac{1.67AFV}{K} - \frac{B}{K} \quad (2)$$

式中 A ——目标播量, kg/hm^2
 F ——农机具作业幅宽, m
 V ——农机具行驶速度, km/h

标定结果在短期内具有较高的稳定性,应用标定结果实施播量控制可以获得较高的控制精度,只要作业系统的标定关系没有发生显著变化,其控制效果类似于闭环控制;但随着作业时长的增加,外槽轮式施肥播种器的播量将受到物料密度、物料填充系数、带动层特性系数、机构长时间工作引起的磨损(毛刷损坏、毛刷与外槽轮的间隙改变)、物料粘连堵塞等影响,流量-转速标定关系将逐渐偏离实际系统的作业特征,控制精度也随之下降。因此,这种基于标定结果的控制本质上是开环的,要想获得高的控制精度就必须经常对作业系统进行标定,实际应

用过程中难以实现。当前尚无高效实时的播量在线监测传感器用来构建播量的闭环控制,构建一种切实可行的播量闭环控制对实际生产有很大的促进作用^[19]。

1.3 控制参数自校正技术方案

播量控制系统参数自校准的策略如图1所示,播量校准系统通过实时记录一段时间内(对应一个作业单元)的称重信号,利用播量检测算法获取播量方程斜率 K_{op} ,通过比较与目标播量 A 的比值得到校正系数 D ,当获取播量方程斜率 K_{op} 与目标播量的相对误差 E 超过一定阈值 E_0 时,将原流量-转速标定方程斜率 K 替换为校正系数与 K 的乘积,使其恢复正常播量控制精度,否则保持原有控制参数不变。

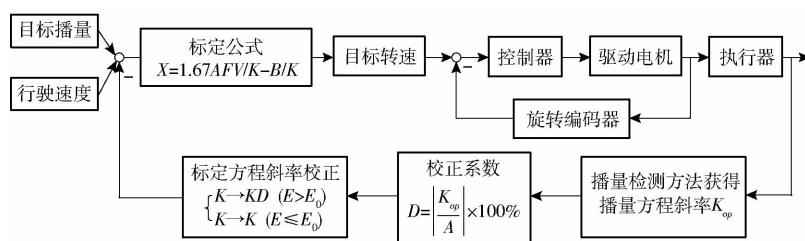


图1 基于参数自校正策略的播量控制算法框图

Fig.1 Block diagram of parameter self-correction strategy for application rate control algorithm

2 播量检测方法

2.1 测量装置工作原理

本文采用基于高压氮气弹簧支撑的播量检测装置,其基本结构和测量原理如图2所示,播种机的种箱采用悬挂式安装,氮气弹簧提供种箱及其附件的总支撑力,S形称量传感器拉力和种箱重力的合力与氮气弹簧的支撑力平衡,氮气弹簧的支撑力与S形称量传感器拉力差值的变化反映种箱内物料重量的变化,从而实现播量的检测。

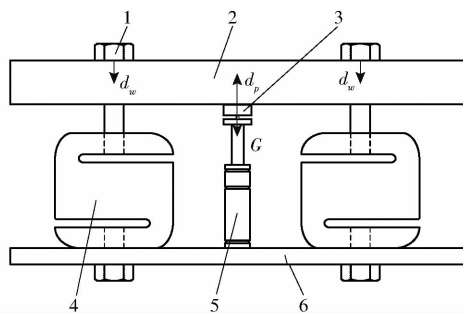


图2 播量检测装置测量原理图

Fig.2 Principle diagram of seeding application rate measuring device

- 1. S型拉力传感器上紧固螺栓
- 2. 悬挂式种箱侧板
- 3. 平膜盒式压力传感器
- 4. S形称量传感器
- 5. 高压氮气弹簧
- 6. 基体座

在忽略高压氮气弹簧的内摩擦力情况下,平膜盒式压力传感器受到的力等于高压氮气弹簧的弹

力,以悬挂式侧板为研究对象进行受力分析,竖直向上为力的正方向,可得到

$$d_p = d_w + G \quad (3)$$

式中 d_p ——高压氮气弹簧弹力
 d_w ——S形称量传感器上紧固螺栓对悬挂式侧板拉力

G ——悬挂式侧板、箱体和物料总重力

随着实际作业过程的进行, G 变小,S形称量传感器上的紧固螺栓对悬挂侧板拉力 d_w 增大,高压氮气弹簧弹力 d_p 减小,各力变化量之间的关系为

$$\Delta d_p = \Delta d_w + \Delta G \quad (4)$$

式中 Δd_p ——高压氮气弹簧弹力变化量
 Δd_w ——S形称量传感器上紧固螺栓对悬挂侧板拉力变化量
 ΔG ——悬挂式侧板、箱体和物料总重力变化量

由于 d_p 和 G 的变化量为正, d_w 的变化量为负,式(4)等同于

$$|\Delta G| = |\Delta d_p| + |\Delta d_w| \quad (5)$$

2.2 测量信号的加权滤波方法

播量检测装置在实际测量过程中,压、拉两个传感器检测到力的变化量存在方向相反,幅值成比例的特征;当装置受到外界干扰时,两个传感器对干扰信号的响应也存在类似特征,且当拉、压传感器信号

相加后整体的振动幅度将减弱。根据测量装置的测量特性,提出了一种信号加权滤波方法:首先对两类传感器信号作“加权和”处理;然后将加权和信号与播量方程进行线性组合,最终完成滤波处理。

利用分配系数 k_w 对信号进行加权和,其中 k_w 可以通过试验方式测定,用来最大程度消除振动干扰影响,利用分配系数,得到基于 S 形称量传感器的拉力和氮气弹簧支撑力的加权和信号 $d_s(S)$ [20]

$$d_s(S) = (1 - k_w)d_w(S) + k_w d_p(S) \quad (6)$$

式中 S ——作业面积

$d_w(S)$ ——S 形称量传感器随作业面积 S 变化时检测到的拉力

$d_p(S)$ ——压力传感器随作业面积变化时检测到的氮气弹簧压力

图 3 为通过播量测试平台获取的两类传感器的响应信号及其加权和信号,为充分表达和对比信号细节,拉、压两类传感器的原始信号在图中进行上下平移。在系统的目标单位面积播量保持恒定时(作业单元内),作业面积与累计播量(与称量信号的增量呈比例关系)之间具有理论上的线性关系,因此本文采用作业面积 S (单位为 hm^2) 为自变量。

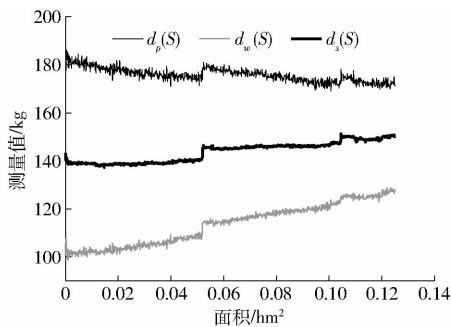


图 3 传感器测量信号基本特性

Fig. 3 Basic characteristic diagram of sensor response signal

由图 3 可知,两类信号的加权和有效消除了原始信号中的振动干扰,但加权和的结果与两类传感器的信号走势并不一致,为此,将两类传感器的加权信号与作业系统的实际播量方程进行线性组合,有

$$d_{ws}(S) = d_s(S) - k_w d_{fit}(S) \quad (7)$$

$$d_{ps}(S) = d_s(S) + (1 - k_w)d_{fit}(S) \quad (8)$$

式中 $d_{fit}(S)$ ——播量方程

$d_{ws}(S)$ —— $d_w(S)$ 的滤波结果

$d_{ps}(S)$ —— $d_p(S)$ 的滤波结果

两类信号的加权和与播量方程线性组合的实质是将两类传感器信号的“加权和”根据播量方程的斜率和截距进行旋转和平移,组合信号的走势变得与实际传感器信号走势一致,最终实现了信号的加权滤波。由于式(5)和式(6)具有相似的处理结果,本文只将 S 形称量传感器的信号作为示例信号展示

信号处理的效果。当 $d_{fit}(S)$ 为实际播量方程时,图 3 中 S 形称量传感器信号的最终加权滤波效果如图 4 所示。

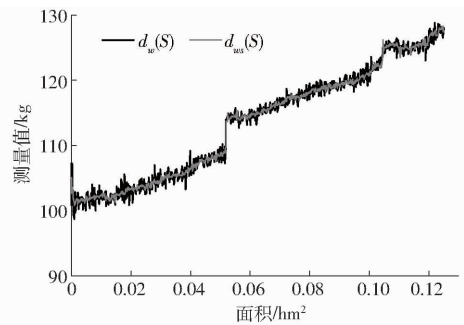


图 4 实际播量方程下的加权信号滤波效果

Fig. 4 Diagram of signal weighted filtering under actual application rate equation

2.3 影响加权滤波效果的因素

式(7)是根据检测系统的测量特征而构建的一种滤波方法,其达到滤波的前提是需要知道系统的实际播量方程 $d_{fit}(S)$ 。其中截距可以根据作业系统的初始状况获知,而斜率需要根据检测作业过程的信息获取,是播量信息的关键因素。下面将分别讨论滤波效果与播量方程参数之间的关系。

为了直观表达式(7)中的播量方程斜率对信号滤波的效果,将播量方程中的斜率分别取为大于真实斜率和小于真实斜率的值后,对称重传感器信号进行加权滤波处理,其滤波效果如图 5 所示,由图可知,斜率的失偏会导致加权滤波信号与传感器原始测量信号之间的偏差增大。

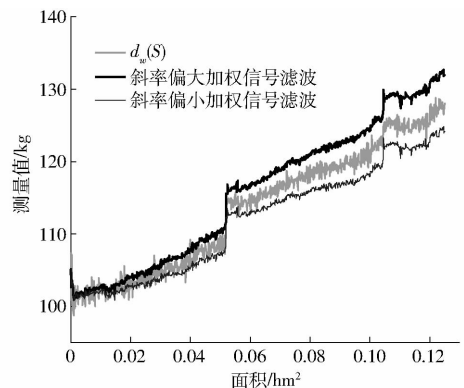


图 5 播量方程斜率有偏差时的加权信号滤波效果

Fig. 5 Diagram of signal weighted filtering when slope of application rate equation deviated

播量方程截距的实际物理意义是播种施肥机工作前箱体及附件重力和箱体内物料重力的总和,理论上可表示为测量系统氮气弹簧压力传感器测量值和 S 形拉力称量传感器测量值之差,但由于机构间摩擦力的存在,该值无法在静态下准确获取,实际中需要将播种施肥机平稳工作在未播量状态下,通过均值滤波消除摩擦力影响后得到,获取的条件相对

苛刻。当播量方程的截距未能准确获取时,所获得的滤波信号与传感器原始测量信号之间的偏差将增大。图6为播量方程截距偏大和偏小时的情况。

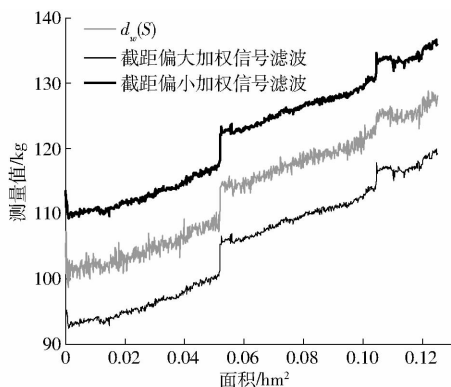


图6 斜率正确、截距有偏差时加权信号滤波效果

Fig.6 Diagram of signal weighted filtering when application rate equation assigned with correct slope and deviant intercept

通过以上分析可知,当代入式(7)中的播量方程 $d_{fi}(S)$ 参数与真实播量方程参数产生偏差时,其获得的加权滤波信号与真实滤波信号之间也将产生偏差,当加权滤波信号为理想滤波结果时,传感器测量值与加权滤波信号之间的“偏差和”以及“偏差的标准差”都接近为零,否则将增大,这为获取播量信息提供了一种新思路。

2.4 播量检测方法构建

在实际测量过程中,测量的主要目的是根据传感器的测量数据快速获取播量方程。加权信号与实际播量方程的线性组合可以实现对传感器原始信号的滤波,而当播量方程参数偏离实际值时,加权滤波信号与原始信号会产生偏差。

加权滤波信号与原始信号的偏差可以表示为

$$E_w(S) = d_s(S) - k_w d_{fi}(S) - d_w(S) \quad (9)$$

(1) 截距已知

当播种施肥机平稳工作在未播量状态下,播量方程的截距可以准确获取,此时所获得的滤波信号与实际传感器测量信号之间无“平移偏差”,可利用传感器测量值与加权滤波信号之间的“偏差和”获取播量方程的斜率。

令播量方程 $d_{fi}(S) = kS + b$, 加权滤波信号与实际传感器测量信号之间的偏差和为

$$Q_w(k) = \sum_{i=1}^N (d_s(S_i) - d_w(S_i) - k_w k S_i - k_w b) \quad (10)$$

理论上,当 k 为真实播量方程斜率时,偏差和绝对值为最小,即最佳斜率 k_{op} 满足

$$\min(Q_w(k_i)) = \lim_{k_i \rightarrow k_{op}} Q_w(k_i) \quad (k_i \in [k_0, k_1]) \quad (11)$$

式中 $[k_0, k_1]$ ——播量方程斜率的可能搜索区间
而当数据长度足够时,根据随机干扰的特性,偏差和亦趋向于“0”,由此最佳斜率计算式为

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N (d_s(S_i) - d_w(S_i) - k_w b)}{k_w \sum_{i=1}^N S_i} \quad (12)$$

(2) 截距未知

当播量方程的截距无法准确获取时,此时所获得的滤波信号与实际传感器测量信号之间有“平移偏差”,可利用传感器测量值与真实滤波信号之间的“偏差标准差”获取播量方程的斜率

$$\begin{cases} \delta_w(k_i) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (E_w(S_i) - E_w(S_i))^2} \\ \min(\delta_w(k_i)) = \lim_{k_i \rightarrow k_{op}} \delta_w(k_i) \\ (k_i \in [k_0, k_1]) \end{cases} \quad (13)$$

式中 $\delta_w(k_i)$ ——加权滤波信号与原始信号的偏差标准差

2.5 播量方程参数求解方法

可采用迭代搜索法求解播量方程的参数,具体思路为:选取区间的左边界值 k_L 、中间值 k_M 和右边界值 k_R 作为初始迭代值,根据“偏差和绝对值”或“偏差标准差”最小的判定条件,确定新的搜索区间。若最小值对应左边界 k_L ,则取原中间位置 k_M 和左边界 k_L 的中间值作为新的中间位置 k_M ,原中间位置作为新的右边界 k_R ;若最小值对应中间值 k_M ,则取原中间位置 k_M 和左边界位置 k_L 的中间值作为新的左边界 k_L ,取原中间位置 k_M 和右边界 k_R 的中间值作为新的右边界 k_R ,保持中间位置 k_M 不变;若最小值对应右边界 k_R ,则取原中间位置 k_M 和右边界 k_R 位置的中间值作为新的中间位置 k_M ,原中间位置 k_M 作为左边界 k_L ,右边界 k_R 保持不变。依此方法直到最小值满足一定的精度条件,此时搜索区间的中间值即为最佳斜率——单位面积播量。

3 试验

3.1 试验条件及方法

(1) 试验条件

在江苏省南京市浦口区南京农业大学的农机鉴定站开展了一系列的小麦播种试验测试。将搭载播量检测装置的外槽轮式播量检测装置安装在旋耕机作业平台上,配备73.5 kW的拖拉机,在槽轮下方放置收集容器,采用测量精度为5 g的电子秤用以测量已播物料的实际质量,试验场景如图7所示。

(2) 试验目的

为验证基于加权信号处理的播量检测方法和播



图7 试验场景

Fig. 7 Field test scenario

量控制参数自校正控制策略的可行性,开展动态试验。动态试验是在拖拉机处于行驶状态下的试验,利用播量检测方法获取动态播量信息,以验证播量检测方法在动态作业状态下的可行性;同时,为了验证播量控制参数自校正控制策略的可行性,动态测试过程中人为堵塞了若干播种通道,破坏控制系统基于标定关系建立的外槽轮转速控制算法,对比参数未校正和参数自校正状态下,播量控制系统的控制效果。

(3) 试验方法

试验总体分为控制参数未校正和控制参数自校正两部分,两部分试验都采用“两因素两水平”测试方案,试验前人为堵塞6个播种通道,造成“流量-转速”标定参数失偏,以测试播量控制参数校正前后播量控制系统的作业效果。试验控制因素为拖拉机行驶车速和单位面积目标播量,行驶速度水平采用5 km/h和7 km/h,单位面积目标播量水平为225 kg/hm²和375 kg/hm²;每个双因素组合试验重复2次,一共16组试验。

3.2 测试结果与分析

采用播量信息对整个播种机做性能评价,播量信息可分为累计播量和单位面积播量。累计播量指在运行一段时间内或一定作业面积内的总物料播量;单位面积播量指在运行一段时间内或一定作业面积内总物料播量与作业面积的比值。以收集装置内收集到的物料量作为播种机累计播量的实际值,以控制系统设置的单位面积播量与作业面积的乘积作为累计播量的目标值,以播量检测方法获取的累计播量(播量检测方法获取的单位面积播量乘以作业面积即为累计播量)作为累计播量的测量值。以测量值与实际值的绝对相对误差评价播量检测方法的测量精度,以实际值与目标值的绝对相对误差评价播种施肥机的播量控制精度。

3.2.1 播量检测方法测试结果及分析

基于实际生产对播量的控制需求,目标单位面积播量已基本确定,所以可以在已知的播量范围内,采用迭代搜索法获取播量参数,动态试验示例数据的单位面积播量目标值为225 kg/hm²,系统记录的

作业面积为0.203 hm²,累计播量实际值为38.755 kg,单位面积播量实际值为190.911 kg/hm²。

迭代搜索法的示例求解过程如表1所示,选取试探区间内的左边界值、中间值和右边界值作为初始迭代值,根据“偏差标准差”最小的判定条件,确定新的搜索区间。当迭代运算到第6次时,达到设定的最小搜索区间,获取的单位面积播量为183.655 kg/hm²,累计播量为37.282 kg,累计播量测量值和实际值绝对相对误差为3.80%。

表1 基于迭代搜索法的目标斜率区间

Tab. 1 Target slope interval change process based on the iterative search method

迭代搜索次数	播量方程斜率/(kg·hm ⁻²)		
	左边界	中间值	右边界
1	138.7	190.1	241.3
2	164.3	190.1	215.7
3	177.3	190.1	202.9
4	177.3	183.7	190.1
5	180.5	183.7	186.9
6	182.1	183.7	185.3

表2列出了16次动态试验的测试结果,所有测试过程中实际值与测量值的最大绝对相对偏差为4.52%,绝对相对偏差的平均值为2.68%,绝对相对偏差的标准差为1.14%,说明基于加权信号处理的播量检测方法在动态测试中可以获取有效播量信息。

表2 累计播量数据统计结果

Tab. 2 Statistical results of cumulative application rate

项目	累计播量/kg			绝对相对偏差/%	
	目标值	实际值	测量值	实际值与测量值	目标值与实际值
参数未校正	46.13	38.86	40.44	4.06	15.75
	45.67	38.76	37.28	3.80	15.15
	46.09	38.02	36.76	3.32	17.50
	46.13	37.71	36.01	4.52	18.24
	45.67	38.28	39.34	2.75	16.17
	45.90	37.90	39.25	3.57	17.44
	46.76	38.26	37.68	1.50	18.17
	46.88	38.51	37.48	2.68	17.84
参数已校正	35.55	34.59	34.04	1.57	2.71
	36.23	35.70	36.79	3.05	1.46
	39.00	36.72	37.81	2.98	3.19
	39.00	38.19	38.05	0.37	2.07
	34.88	35.73	35.40	0.91	2.43
	37.58	35.68	34.75	2.60	3.70
	39.38	38.27	37.46	2.12	2.80
	37.88	39.85	41.14	3.23	2.54

3.2.2 播量控制参数校正前后控制结果分析

播量控制参数未校正时,累计播量的实际值与

测量值之间的最大相对误差为 18.38%,绝对相对误差的平均值为 17.06%,绝对相对误差的标准差为 1.21%。试验结果表明:当流量-转速标定参数产生偏差时,系统的控制精度降低。

由理论分析可知,由单位面积播量的测量值与目标值的比值可获取校正系数,使控制系统恢复正常的控制精度。表 3 列出了动态测试过程引入参数自校正方法时校正系数的计算结果,8 次动态测试获取的校正系数平均值为 0.817,标准差为 2.8%。

表 3 校正系数计算结果

Tab. 3 Calculation results of correction coefficient

车速/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	单位面积播量目 标值/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	单位面积播量测 量值/ $(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	校正系数
5	225	191.275	0.850
	255	183.655	0.816
	375	298.865	0.797
	375	292.725	0.780
7	225	193.785	0.861
	225	187.395	0.832
	375	301.425	0.803
	375	299.820	0.799

由表 2 可知,利用校正系数 0.817 对流量-转速标定参数进行校正后,累计播量的实际值与目标值之间的最大绝对相对偏差和绝对相对平均偏差分别下降为 3.70% 和 2.61%,绝对相对误差的标准差为

0.67%。试验结果表明:播量检测算法不仅可以准确获取播量,而且可用来实现播量控制参数的自校正,达到实质闭环控制效果,维持播量控制系统的控制精度。

4 结论

(1) 应用播量检测装置存在的拉压互补特性,可以构建基于两类传感器加权信号与作业系统实际播量方程的线性组合的传感信号滤波方法,通过迭代搜索法可以快速有效获取播量方程的斜率,实现播量检测,试验测试验证了该播量检测方法的有效性。

(2) 应用所提出的播量检测方法,构建一种利用动态校正控制参数保持播量控制精度的方法,解决传统外槽轮式播量控制系统因流量-转速标定关系失偏而导致控制精度下降的问题。

(3) 在播量控制系统性能测试试验中,引入控制参数自校正前后,播量实际值与目标值之间的绝对相对偏差最大值、平均值和标准差分别由 18.38%、17.06%、1.21% 下降至 3.70%、2.61%、0.67%。测试结果表明:基于加权信号的播量检测方法能有效获取播种机的实际播量信息,实现播量控制参数自校正,有效维持播量控制系统的控制精度。

参 考 文 献

- [1] XIU Y F, LIN H B, WANG R X, et al. The development of a wheat variable precision seeding robot based on GPS[J]. Intelligent Automation and Soft Computing, 2010, 16(6): 869-879.
- [2] SI H P, SUN L, CHEN J, et al. Summary of the developing status of greenhouse tray seeder and seed metering device[C] // International Conference on Applied Mechanics, Materials and Mechanical Engineering, 2013: 217-219.
- [3] DING Y Q, YANG L, ZHANG D X, et al. Novel low-cost control system for large high-speed corn precision planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(2): 151-158.
- [4] GRIFT T E, WALKER J T, HOFSTEE J W. Mass flow measurement of granular materials in aerial application—Part 2: experimental model validation[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 27-34.
- [5] SWISHER D W, BORGEIT S C, SUDDUTH K A. Optical sensor for granular fertilizer flow rate measurement[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(4): 881-888.
- [6] 邱桂芝,葛瑞环,蒋宇,等.循环流化床返料系统固体颗粒微波多普勒测量[J].工程热物理学报,2014,35(8):1569-1574. QIU Guizhi, GE Ruihuan, JIANG Yu, et al. Microwave doppler measurement of solid particles in circulating fluidized bed return system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(8): 1569-1574. (in Chinese)
- [7] 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 the ASABE, 2014, 57(2): 679-687.
- [8] GONZALEZ-MONTELLANO C, BAGUENA E M, RAMLREZ-GOMEZ Á, et al. Discrete element analysis for the assessment of the accuracy of load cell-based dynamic weighing systems in grape harvesters under different ground conditions[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 100: 13-23.
- [9] 冯宁宁,刘刚,张彦娥,等.基于EMD的奶牛动态称量算法[J].农业机械学报,2019,50(增刊):305-312. FENG Ningning, LIU Gang, ZHANG Yan'e, et al. Dynamic weighing algorithm of dairy cow based on EMD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 305-312. (in Chinese)
- [10] 张安琪,孟志军,陈立平,等.小型方捆机草捆动态称量系统信号分析与处理[J].农业机械学报,2020,51(增刊2):243-248,260. ZHANG Anqi, MENG Zhijun, CHEN Liping, et al. Signal analysis and processing of dynamic weighing system for small square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 243-248, 260. (in Chinese)