

基于自动驾驶的小麦精准对行深施追肥机设计与试验

冯慧敏^{1,2} 高娜娜² 孟志军³ 陈立平³ 李 由² 郭玉明¹

(1. 山西农业大学工学院, 太谷 030801; 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: 针对冬小麦返青期地表追施氮肥使氮素挥发导致肥料利用率低的问题, 结合目前在小麦追肥过程中缺少深施氮肥作业装备的现状, 进行了基于拖拉机自动驾驶技术实现精准对行深施氮肥的技术研究, 设计了小麦精准对行精量深施追肥机。追肥机采用安装有自动驾驶系统的拖拉机牵引实现精准对行, 以 RTK-GNSS 接收机测取的作业速度为基准, 通过液压系统驱动排肥机构工作, 双圆盘开沟器开沟深施, 采用 PID 控制排肥轴转速与车辆行驶速度实现实时匹配, 达到精量控制追肥量的目的。田间试验结果表明: 设置目标追肥量为 200 kg/hm², 车辆行驶速度为 5 km/h 时, 追肥机能完成对行深施追肥作业, 机具对行作业误差在 ±6 cm 以内, 追肥量偏差小于 9%, 可满足实际生产需求; 对照撒肥机表层撒肥作业, 每公顷减施氮肥 25 kg 左右, 小麦每公顷增产 486.5 kg 左右。

关键词: 小麦; 深施追肥机; 自动驾驶; PID 控制; 精量排肥; 精准对行

中图分类号: S224.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)04-0060-08

Design and Experiment of Deep Fertilizer Applicator Based on Autonomous Navigation for Precise Row-following

FENG Huimin^{1,2} GAO Na'na² MENG Zhijun³ CHEN Liping³ LI You² GUO Yuming¹

(1. College of Engineering, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China
2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
3. Beijing Research Center of Intelligent Equipment for Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Broadcasting application of nitrogen at returning green stage results in ammonia volatilization and low nitrogen use efficiency. At present, the mechanized topdressing equipment is lacking in China, the precise fertilizer deep applicator was designed to meet the demand of mechanized subsurface topdressing fertilization for wheat, the precise row-following and accurate deep fertilizing method were studied based on autonomous navigation system. The applicator was driven by tractor mounted with autonomous navigation system to realize specific row-following operation, the speed of applicator was resolved by taking advantage of RTK-GNSS technology, the fertilizer application was driven by hydraulic system, double-disc opener opened a ditch to realize deep fertilizing, closed-loop PID control system was used to control motor speed and realize real-time rotation rate adjustment to achieve accurately control fertilizer amount. Field experiments were conducted to examine the performance of applicator, results indicated that: when the fertilizer amount was preseted to be 200 kg/hm², tractor speed at 5 km/h, the row-following deviation within ±6 cm, the dynamic deviation of fertilizer amount deviation within 9%, which met the practical demand; compared with broadcasting application by fertilizer distributor, the amount of nitrogen was decreased by 25 kg/hm², grain yield was increased by 486.5 kg/hm². The applicator could achieve precise deep topdressing fertilization for wheat and be equipped for precision agriculture.

Key words: wheat; deep fertilizer applicator; autonomous navigation; PID control; precise fertilization; specific row-following

收稿日期: 2017-12-30 修回日期: 2018-01-29
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600-2016YFD0200604)
作者简介: 冯慧敏(1990—),女,博士生,主要从事农业机械设计研究,E-mail: fenghuimin2013@163.com
通信作者: 郭玉明(1954—),男,教授,博士生导师,主要从事农业生物力学和农机装备研究,E-mail: guoyuming99@sina.com

0 引言

冬小麦返青后追施氮肥对产量提高作用显著,改变传统的氮肥地表撒施,采用机械深施技术可以降低氮肥挥发速率^[1-2],有效提高氮肥利用率,减少环境污染;还可以提高作物干物质积累量,提高小麦产量,提升籽粒品质^[3-4],同时也是一种减少极端天气造成农业生产损失的有效途径^[5]。

目前,国内小麦追施氮肥以人工和机械表层撒施为主,氮肥因 NH_3 挥发而浪费,肥效利用率低,增产作用发挥不充分^[6-8]。国内外许多学者对氮肥深施技术给予了广泛关注和研究^[9-10],通过对氮肥施用量的精确决策与合理施用,提高氮肥利用率,目标集中在充分发挥效率,减少施肥量^[11-12]。国内冬小麦追肥技术研究主要集中在追肥方法对小麦生长性状的影响^[5,13]和精确控制施肥技术方面^[14-17],针对小麦深施追肥农艺与农机紧密结合的追肥技术作业装备研究相对较少。小麦属于密植作物,在追肥作业过程中存在因追肥机不易走直导致深施肥作业部位不精准及小麦苗根严重损伤致使产量降低等问题。

因此,针对冬小麦返青后深施追肥作业需求,基于拖拉机自动驾驶技术^[18],开展精准对行精量深施技术研究,设计小麦精准对行精确深施追肥机,以小麦追肥农艺要求为指导,精确控制排肥量,将氮肥准确深施在两相邻小麦种植宽行行间,实现降低氮肥施用量,提高氮肥利用率;同时降低小麦苗根损伤风险,提高小麦产量和品质。

1 主要结构与工作原理

1.1 总体结构

小麦精准对行深施追肥机包括精量排肥控制系统、追肥装置、精准对行系统 3 部分。精量排肥控制系统主要包括车载终端、施肥控制器、液压马达、电液比例阀、角位移传感器、压力传感器、RTK-GNSS 接收机及天线等;追肥装置由肥箱、排肥轴、排肥器、双圆盘开沟器、覆土轮等组成。追肥机与拖拉机三点悬挂机构连接,其动力传动采用液压传动。总体结构如图 1 所示,追肥机安装有 7 个排肥器,间隔 30 cm,在小麦种植宽行内进行深施追肥。

1.2 工作原理

小麦精准对行深施追肥机根据小麦种植宽行分布位置设定机具作业路径,在带有自动驾驶系统的拖拉机牵引下,追肥机按照设定的路径前进;作业过程保证拖拉机在精准对行的前提下,行驶速度与电液系统控制液压马达转速实时匹配,实现精确控制

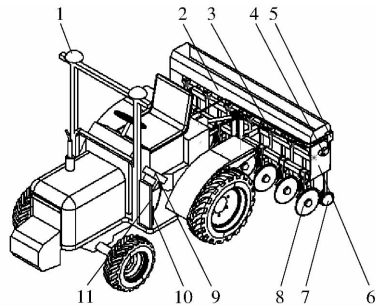


图 1 小麦精准对行深施追肥机结构示意图
Fig.1 Structure sketch of precisely control topdressing fertilizer applicator

1. GNSS 天线 2. 肥箱 3. 外槽轮排肥器 4. 液压马达 5. 电液比例阀 6. 机架 7. 覆土轮 8. 双圆盘开沟器 9. 车载终端 10. 施肥控制器 11. RTK-GNSS 接收机

排肥量。车载终端接收 RTK-GNSS 接收机数据,实时获取拖拉机行进速度信息,根据追肥控制模型计算出液压马达对应的目标转速,通过 CAN 总线将目标转速指令发送给施肥控制器;施肥控制器根据编码器测量马达的实际转速信号,通过调节电液比例阀开度实现液压马达转速闭环控制;液压马达驱动排肥轴,从而带动排肥槽轮转动,排肥器将肥料排至双圆盘式开沟器在小麦种植宽行中间所开的肥沟内,覆土轮覆土将肥料覆盖,防止肥料挥发。

2 追肥深施开沟装置设计

追施氮肥的施入深度达 10 cm 及以上时可有效提高肥料利用率,达到作物增产的目的^[19-21]。本追肥装置主要实现在相邻小麦种植行间开沟作业,达到深施肥农艺要求的落肥深度,尽可能减少开沟器对土壤扰动作用。因此追肥深施装置由双圆盘开沟器和覆土轮构成,通过两圆盘滚动前进完成切土开沟,其开沟宽度较小,对土层扰动小,既有利于土壤保水保墒又可减少苗根损伤。所用双圆盘开沟器参数为:圆盘直径为 350 mm,圆盘夹角 θ 为 10° ,聚点 m 位置高度为 100 mm,结构示意图如图 2 所示,所开沟形轮廓如图 3 所示。

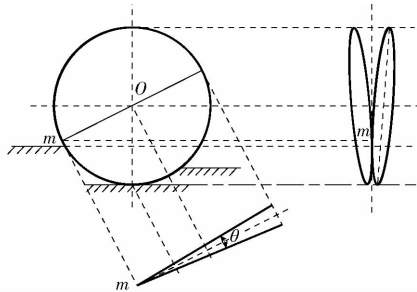


图 2 双圆盘开沟器结构示意图
Fig.2 Structure diagrams of double-disc opener

当双圆盘开沟器开沟深度为 100 mm 时,根据

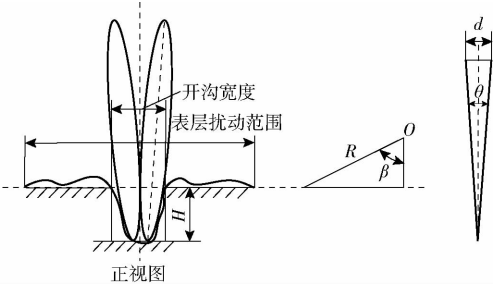


图 3 开沟轮廓图
Fig. 3 Profile of furrow

图 3 及公式计算地面开沟宽度

$$\begin{cases} \beta = \arccos \frac{R-H}{R} \\ L = 2R\sin\beta \\ d = 2L\sin\frac{\theta}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中 β ——圆盘位置夹角, ($^{\circ}$)
 R ——圆盘半径, mm
 H ——开沟深度, mm
 L ——聚点位置对应弦长, mm
 d ——开沟宽度, mm

代入上述圆盘参数, 得出 $d = 55.12\text{ mm}$, 即理论地面开沟宽度为 55.12 mm , 当小麦种植行距大于 20 cm 时, 可避免开沟器对小麦根系割伤, 但实际中表层土壤板结等原因会出现裂缝形成土块, 开沟作业时的扰动范围要偏大。由于双圆盘开沟器回土效果较差, 本机选用双圆盘覆土器, 安装在对应开沟器正后方位置, 当肥料落入肥沟后及时覆土掩盖肥料, 避免肥效损失。

3 精量排肥控制系统设计

3.1 精量排肥控制系统原理

精量排肥控制系统主要以目标施肥量和追肥机作业参数等信息为依据, 通过控制液压马达转速与拖拉机行驶速度信息相匹配, 达到精量均匀排肥的目标, 系统工作原理如图 4 所示。

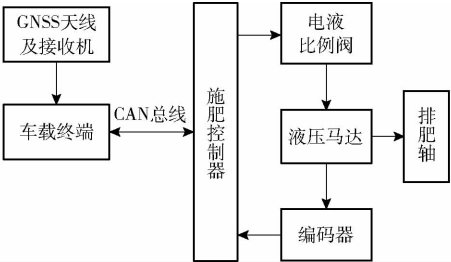


图 4 精量排肥系统原理图
Fig. 4 Schematic diagram of precise topdressing fertilization

系统包括 RTK - GNSS 接收机、车载终端、施肥控制器、电液比例阀、液压马达、排肥轴等。由 RTK - GNSS 接收机完成拖拉机位置信息的实时采集,

RTK - GNSS 接收机与车载终端通过 RS232 串口实现通信。车载终端通过解析 GNSS 语句完成拖拉机行进速度信息与经纬度坐标获取, 通过控制软件中的追肥模型计算液压马达目标转速, 并通过 CAN 总线将指令发送到施肥控制器。施肥控制器根据接收到的控制指令, 获取编码器采集的液压马达实际转速, 通过 PID 控制算法计算控制量, 控制电液比例阀开度实现液压马达转速精确控制达到精量排肥。由于精量排肥系统采用 RTK - GNSS 进行速度测量, 采用液压马达驱动排肥装置工作, 可有效避免由于地轮打滑等造成排肥不均及地轮对土壤过度压实的问题。

3.2 硬件系统设计

3.2.1 液压系统

液压系统包括比例电磁阀、液压马达, 其动力来自拖拉机后液压输出, 系统原理图如图 5 所示。系统主要通过电控系统输出的电流信号改变电磁阀阀门开度, 调节电磁阀的流量, 流量流经液压马达驱动马达转动, 达到精准控制马达与排肥轴转速的目的。其中 PV08 - 30 型比例型电磁阀最大控制电流为 $(1\,400 \pm 150)\text{ mA}$; AGM - 6 型液压减速马达最大恒定转速为 120 r/min , 可满足农机作业中对排肥轴转速的需求。

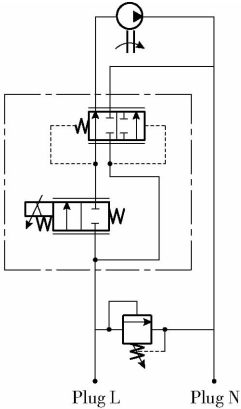


图 5 液压系统原理图
Fig. 5 Schematic diagram of hydraulic system

3.2.2 电控系统

电控系统通过 CAN 总线实现与车载终端的实时通信^[22], 完成液压马达转速的实时采集与精确控制, 从而实现排肥过程的精准化控制。电控系统采用北京凯商公司的 C102N 型控制器, 内置 16 位微控制器模块, 设置为闭环回路控制, 比例电磁铁输出经过脉冲调制 (PWM) 实现阀门的高精度比例控制, 施肥控制器接收到由车载终端下发的目标转速指令, 根据编码器采集的液压马达实际转速, 通过 PID 算法^[23-24]完成电液比例阀电流的计算与调节。

精量排肥控制系统采用标准 PID 算法,实时计算并控制液压马达转速,根据液压马达通过流量与转速关系求出比例系数在 0.05 左右,根据实际输出转速与转速阶跃响应数据分别对 PID 参数进行整定,最终确定比例系数 K_p 为 0.055,积分时间常数 T_i 为 0.003,微分时间常数 T_d 为 0.003,控制频率为 100 Hz。施肥控制器流程如图 6 所示。被控对象为电液比例阀和液压马达。车载计算机计算的液压马达目标转速 R_{in} 作为 PID 控制器的输入信号,输出信号 $I_r(t)$ 为经 PID 控制器计算得到的电磁阀输出电流,输出信号 R_{out} 为经液压驱动系统得到的液压马达实际转速。控制器在执行过程中,通过液压马达内置编码器实时测量马达的转速并反馈到 CAN 总线构成闭环控制,系统控制偏差 $e(t)$ 为液压马达目标转速 R_{in} 与实际转速 R_{out} 差值。

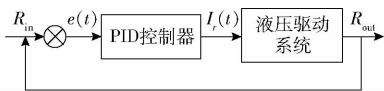


图 6 排肥器转速控制流程图

Fig. 6 Flowchart of rotate speed control system

3.2.3 PID 控制精度分析

为检验 PID 控制精度,分别在静态和动态条件下对马达转速进行了测试分析,结果如图 7 所示。静态测试时间为 1 min,上位机下发转速指令后,串口每隔 100 ms 回传一次指令并记录下马达实时转速,图 7a 为转速设定 25 r/min 时,记录的马达实时转速。试验结果表明,系统所用 PID 控制方法可实现马达转速精准控制,马达转速平均控制误差为

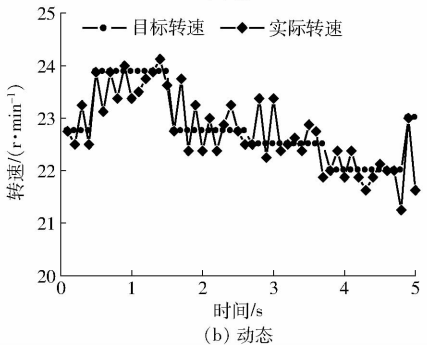
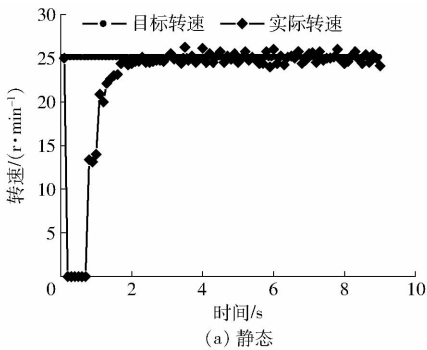


图 7 马达转速测试结果

Fig. 7 Test results of motor rotate speed

1.46%,最大控制误差为 6.5%。动态测试条件下,拖拉机前进速度为 5 km/h,上位机根据拖拉机前进速度每隔 1 s 下发一次转速指令,串口每隔 100 ms 回传一次指令并记录马达实时转速。图 7b 为其中一组试验结果,试验结果表明,动态条件下,PID 控制系统可以在 0.2 s 以内完成转速调节,马达转速平均控制误差为 1.52%,最大控制误差为 10.2%。试验结果表明,本系统可满足精量排肥需求。

3.3 测控软件设计

系统采用 VMC1000 型车载终端,利用 MFC 集成开发环境设计了精量排肥控制系统^[25],系统包括数据采集模块、参数配置模块、系统标定模块、追肥控制决策模块、数据存储模块等功能模块,软件系统工作界面如图 8 所示。系统主要完成:采集处理卫星定位数据;追肥机物理参数设置;追肥作业参数设置;通过 CAN 总线与施肥控制器进行通信;发送控制指令;接收施肥控制器上报的反馈信息等。系统根据模型

$$\begin{cases} dS(t) = \frac{1\,000}{60} \times 10^{-4} V_c(t) W dt \\ dQ_0(t) = Q_0 dS(t) \\ dQ_0(t) = N_T q n_0(t) dt \end{cases} \quad (2)$$

求得液压马达目标转速为

$$n_0(t) = \frac{1\,000 V_c(t) W Q_0}{60 N_T q} \times 10^{-4} \quad (3)$$

- 式中
- $S(t)$ —— t 时刻对应作业面积, hm^2

$Q_0(t)$ —— t 时刻对应目标追肥量, kg/hm^2

$n_0(t)$ —— t 时刻液压马达目标转速, r/min

$V_c(t)$ —— t 时刻 GNSS 采集的拖拉机行驶速度, km/h

W ——追肥机作业幅宽, m

Q_0 ——单位面积追肥量, kg/hm^2

N_T ——排肥管数量, 个

q ——排肥槽轮单转排量, kg/r

车载终端通过 CAN 总线将液压马达目标转速

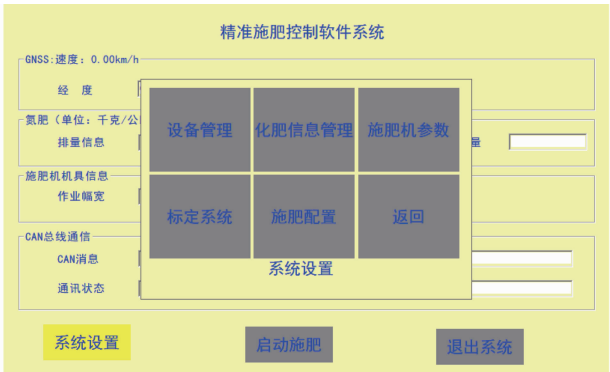


图 8 系统工作界面

Fig. 8 System display interface

指令发送到施肥控制器,完成精量追肥控制过程。系统根据编码器反馈的液压马达实际转速,计算出实际追肥量为

$$Q(t)=\frac{60n(t)N_{\text{T}}q}{1\,000V_{\text{c}}(t)W}\times10^4\tag{4}$$

式中 $Q(t)$ —— t 时刻实际追肥量,kg/hm²
 $n(t)$ —— t 时刻马达实际转速,r/min

4 精准对行系统设计

4.1 精准对行系统原理

由安装自动导航系统的拖拉机牵引追肥机在小麦种植行中间位置行走,实现追肥机精准对行追肥作业。系统由以车载计算机和RTK-GNSS为核心的导航控制部分^[26]以及转向控制器部分、转向液压系统、执行机构等部分组成。以追肥机上第4个双圆盘开沟器所在小麦种植宽行的中心线生成导航基准线,系统根据拖拉机位置与导航基准线的偏差距离、拖拉机前进速度及当前车轮角度等信息,通过PID控制算法计算出当前车轮需要转动角度,采用液压系统驱动车轮转动至目标角度,达到直线跟踪的目的。该系统牵引追肥机进行追肥作业时,可以实现追肥机按指定路线精确作业,最大直线跟踪偏差为±2 cm,保证开沟深施追肥部件在相邻小麦种植行间作业,实现精准对行,最大限度降低了农机作业垄间重叠和遗漏,有效提高了作业效率,避免了开沟部件伤苗、伤根。精准对行系统原理如图9所示。

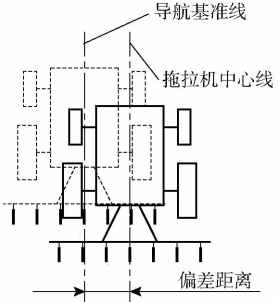


图9 精准对行系统原理图

Fig.9 Schematic diagram of specific row following system

4.2 机具对行作业偏差分析

机具对行作业偏差来源包括拖拉机自动导航系统自身误差,三点悬挂摆动和作业工况引起的机具振动等。试验通过在追肥机具中心位置处安装GNSS天线,拖拉机车头安装RTK-GNSS接收机来采集机具轨迹^[27]。所用GNSS高精度接收机RTK静态定位精度为10 mm+1 μm。试验分别选在平坦的水泥路上和田间进行,将拖拉机速度控制在3~6 km/h,浮动范围为±0.3 km/h,分别沿着导航线方向往返行驶100 m,每个速度下往返行驶3组,记录下轨迹数据。以标准轨迹线为依据,分别计算行驶速度在3~6 km/h时机具对行作业偏差结果,分析结果如图10所示。

根据偏差分析结果可以看出,追肥机田间对行作业偏差范围大于平地对行作业偏差,且行驶速度越快,机具对行作业偏差范围逐渐增大。当行驶速度为3 km/h时,机具田间对行偏差范围为-4.5~4.0 cm;行驶速度达到6 km/h时,机具对行偏差范

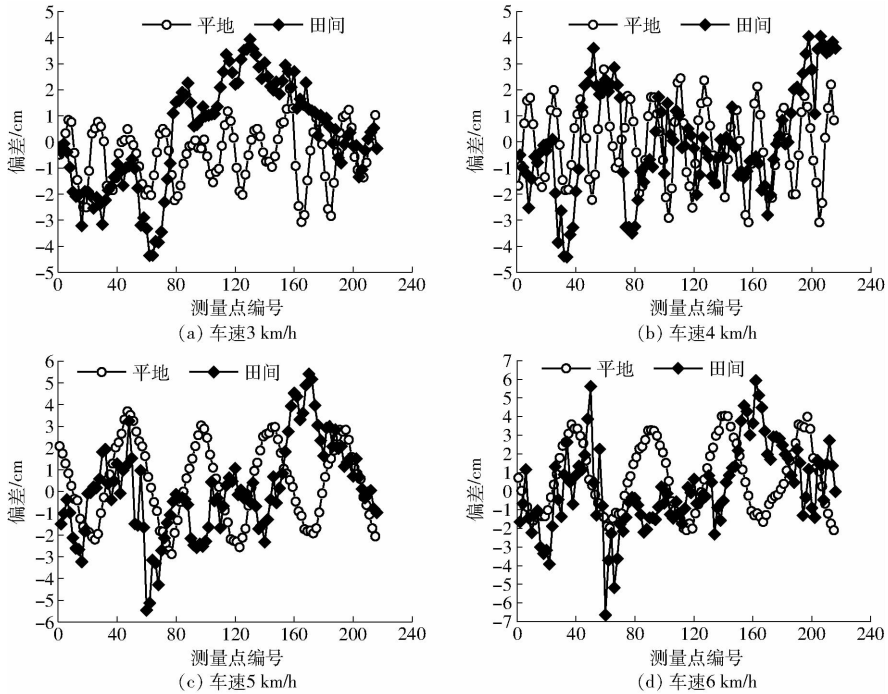


图10 机具对行作业偏差

Fig.10 Deviation of applicator row-following operation

围为 -6.7 ~ 6.0 cm。

以此分析结果和开沟器作业参数为依据确定追肥机适宜的追肥作业参数,当追肥作业速度在 3 ~ 6 km/h,追肥行大于 20 cm 时,可保证开沟盘准确行驶在小麦宽行间,避免开沟器对幼苗根部的切割损伤。

5 试验

参照 GB/T 20346.2—2006《施肥机械 试验方法 第 2 部分:行间追肥机》和 JB/T 7864—2013《中耕追肥机》对追肥机进行标定及田间试验。

5.1 追肥均匀性测定

对追肥机在不同开度和转速条件下的排量进行标定,选用尿素作为试验材料,粒度范围为 0.85 ~ 2.80 mm,测定行数为 7 行,试验共设 6 个排肥槽轮

开度:10、12、15、18、20、24 mm,6 种马达转速:10、15、20、25、30、40 r/min,用 7 个料桶在对应排肥管下对肥料进行收集,对应排量通过称取料桶中肥量质量求得。每个开度和转速下重复 3 次试验,共采样 756 次。部分分析结果见表 1。

表 1 为槽轮开度为 12 mm 和 15 mm 时,不同转速下各槽轮排肥量数据。在槽轮开度不变的情况下,随着槽轮转速的提高,槽轮排肥量逐渐增大,各槽轮间平均排量的变异系数减小。在槽轮转速一定的情况下,槽轮开度越大,平均排量逐渐增大,各槽轮平均排肥量变异系数逐渐减小。其他开度和转速测定条件下,试验结果有相同规律。因此以外槽轮作为追肥机计量工具时,应尽量选择稍大的槽轮开度,以减小各槽轮间差异性^[15]。

表 1 各行排肥量一致性标定结果
Tab.1 Consistency measurement results of each row fertilizer amount

槽轮开度/ mm	转速/ (r·min ⁻¹)	排肥量/(kg·min ⁻¹)							平均排量/ (kg·min ⁻¹)	单转排量/ (kg·r ⁻¹)	变异 系数/%
		槽轮 1	槽轮 2	槽轮 3	槽轮 4	槽轮 5	槽轮 6	槽轮 7			
12	15	0.173	0.187	0.189	0.190	0.179	0.180	0.174	0.182	0.012	3.9
12	25	0.267	0.283	0.280	0.291	0.269	0.275	0.269	0.276	0.011	3.2
12	30	0.314	0.331	0.330	0.334	0.316	0.312	0.315	0.322	0.011	2.9
15	15	0.253	0.263	0.268	0.270	0.265	0.265	0.260	0.263	0.018	2.1
15	25	0.406	0.418	0.417	0.421	0.409	0.413	0.406	0.413	0.017	1.5
15	30	0.478	0.493	0.495	0.492	0.481	0.484	0.483	0.487	0.016	1.4

5.2 田间试验

为验证追肥机作业性能,开展了田间追肥试验。2017 年 4 月初进行追肥试验,小麦播种行距为 (10+20) cm 宽窄行,工作幅宽为 2.1 m,追肥面积为 0.3 hm²。2017 年 6 月底收获,田间试验如图 11 所示。



图 11 田间试验
Fig.11 Field experiments

追肥试验时,拖拉机行驶速度为 5 km/h,追肥深度 10 cm,追肥量为 200 kg/hm²,在 20 cm 宽行内进行深施追肥试验,机具对行作业偏差在 ± 6 cm 内,通过测量,双圆盘开沟器开沟宽度范围为 8 ~ 12 cm,表层扰动范围为 23 ~ 30 cm。将试验地块划分出 10 个 2.1 m × 100 m 的小区域,对施肥量均匀性进行分析。结果见表 2,施肥量偏差小于 9%。

收获后对小麦产量等进行了测定,以 15 cm 等

表 2 田间试验统计结果
Tab.2 Statistical results of field experiments

区域 编号	单转排量/ (kg·r ⁻¹)	目标施肥量/ (kg·hm ⁻²)	实际施肥量/ (kg·hm ⁻²)	施肥量 偏差/%
1	0.015	200	217.83	8.92
2	0.015	200	209.69	4.85
3	0.015	200	212.85	6.43
4	0.015	200	208.80	4.40
5	0.015	200	208.19	4.10
6	0.015	200	213.01	6.51
7	0.015	200	214.67	7.33
8	0.015	200	207.97	3.99
9	0.015	200	208.69	4.35
10	0.015	200	208.91	4.46

行距播种,撒肥机表层撒施追肥 225 kg/hm² 处理为对照组,深施追肥组小麦产量为 5 086.5 kg/hm²,对照组小麦产量为 4 600 kg/hm²,每公顷追氮肥量减少 25 kg 左右,小麦产量每公顷提高 486.5 kg 左右。

6 结论

(1) 针对小麦深施追肥的需求,设计了小麦精准对行深施追肥机,设计了配套精量排肥系统和精准对行系统,通过合理调节 PID 参数,实现了马达转

速的稳定控制,其中马达转速平均控制误差为1.46%,最大控制误差为6.5%;动态条件下,马达转速平均控制误差为1.52%,最大控制误差为10.2%;优先选择槽轮开度15 mm,保证了各行排肥量一致性。

(2)田间试验表明,在(10+20) cm宽窄行种植模式下,作业速度为5 km/h,追肥量为200 kg/hm²,机具对行作业偏差在±6 cm以内,追肥量偏差小于9%,与撒肥机表层撒施对照组相比,每公顷减少氮肥施用量25 kg,小麦产量提高486.5 kg/hm²。

参 考 文 献

- 高凤菊,吕金岭. 尿素追肥深施对小麦产量及氮肥利用率的影响[J]. 耕作与栽培, 2006(1): 28.
- LIU Tianqi, FAN Daijia, ZHANG Xingxing, et al. Deep placement of nitrogen fertilizers reduces ammonia volatilization and increases nitrogen utilization efficiency in no-tillage paddy fields in central China[J]. Field Crops Research, 2015, 184: 80–90.
- 王弘非. 冬小麦施用缓控释氮肥的环境效应及其经济效益研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
WANG Hongfei. Effects of applying slow control released nitrogen on the environmental and economic benefit of winter wheat[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- YUAN Weiling, YUAN Shangyong, ZHANG Feng, et al. Ammonia volatilization from soils fertilized with different nitrogen type and application method in germination and early seedling stages from the radish field[J]. Agricultural Science and Technology, 2016, 17(4): 896–899.
- BANDAOGO A O, BIODJOKAZO F, YOUL S, et al. Effect of fertilizer deep placement with urea supergranule on nitrogen use efficiency of irrigated rice in Sourou Valley (Burkina Faso)[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 102(1): 79–89.
- 梁靖越, 张敬昇, 王昌全, 等. 控释尿素对小麦籽粒产量和氮素利用率的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(1): 157–164.
LIANG Jingyue, ZHANG Jingsheng, WANG Changquan, et al. Effect of controlled release urea on grain yield and nitrogen use efficiency in wheat[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(1): 157–164. (in Chinese)
- ROCHETTE P, ANGERS D A, CHANTIGNY M H, et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? [J]. Journal of Environmental Quality, 2013, 42(6): 1635–1642.
- 霍中洋, 葛鑫, 张洪程, 等. 施氮方式对不同专用小麦氮素吸收及氮肥利用率的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(5): 449–454.
HUO Zhongyang, GE Xin, ZHANG Hongcheng, et al. Effect of different nitrogen application types on N-absorption and N-utilization rate of specific use cultivars of wheat[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(5): 449–454. (in Chinese)
- MAZID M, GAIHRE Y K, HUNTER G, et al. Fertilizer deep placement increases rice production: evidence from farmers' fields in southern Bangladesh[J]. Agronomy Journal, 2016, 108(2): 805–812.
- 舒时富, 唐湘如, 罗锡文, 等. 机械定位深施超级稻专用肥提高土壤肥力和稻产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 9–14.
SHU Shifu, TANG Xiangru, LUO Xiwen, et al. Deep mechanized application of super rice special fertilizer increasing soil fertility and yield of super rice[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 9–14. (in Chinese)
- 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259–273. (in Chinese)
- 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924.
ZHANG Fusuo, WANG Jiqing, ZHANG Weifeng, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924. (in Chinese)
- 孙晓然, 孙绿, 赵长星, 等. 追肥深度对旱地小麦花后旗叶衰老特性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2015, 30(增刊): 420–424.
SUN Xiaoran, SUN Lü, ZHAO Changxing, et al. Effects of fertilization application depth on senescence characteristics of flag leaf after anthesis and yield of dry-land wheat[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(Supp.): 420–424. (in Chinese)
- 陈满, 施印炎, 汪小岳, 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.
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.
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. (in Chinese)
- 王秀, 赵春江, 孟志军, 等. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2004, 20(5): 114–117.
WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(5): 114–117. (in Chinese)
- 陈立平, 黄文倩, 孟志军, 等. 基于CAN总线的变量施肥控制器设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(8): 101–104, 185.
CHEN Liping, HUANG Wenqian, MENG Zhijun, et al. Design of variable rate fertilization controller based on CAN bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8): 101–104, 185. (in Chinese)
- 王金武, 潘振伟, 周文琪, 等. SYJ-2型液肥变量施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 53–58.

- http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150708&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.008.
- WANG Jinwu, PAN Zhenwei, ZHOU Wenqi, et al. Design and test of SYJ-2 type liquid variable fertilizer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(7): 53-58. (in Chinese)
- 18 姬长英, 周俊. 农业机械导航技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2014,45(9): 44-54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140908&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.008.
- JI Changying, ZHOU Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(9): 44-54. (in Chinese)
- 19 NKEBIWE P M, WEINMANN M, BAR-TAL A, et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: a review and meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2016, 196: 389-401.
- 20 PAN Shenggang, WEN Xiangcheng, WANG Zaiman, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. Field Crops Research, 2017, 203: 139-149.
- 21 FENG Huimin, GAO Nana, LI You, et al. Effects of topdressing depth and row spacing on the SPAD and plant height of winter wheat[C]//2017 ASABE Annual International Meeting, ASABE Paper 1700924,2017.
- 22 付卫强, 孟志军, 黄文倩, 等. 基于CAN总线的变量施肥控制系统[J]. 农业工程学报, 2008,24(增刊2): 127-132.
- FU Weiqiang, MENG Zhijun, HUANG Wenqian, et al. Variable rate fertilizer control system based on CAN bus[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(Supp.2): 127-132. (in Chinese)
- 23 梁春英, 吕鹏, 纪建伟, 等. 基于遗传算法的电液变量施肥控制系统PID参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2013,44(增刊1): 89-93,88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s117&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.017.
- LIANG Chunying, LÜ Peng, JI Jianwei, et al. Optimization of PID parameters for electro-hydraulic variable rate fertilization system based on genetic algorithm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1): 89-93,88. (in Chinese)
- 24 陈满, 鲁伟, 汪小岳, 等. 基于模糊PID的冬小麦变量追肥优化控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 71-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.010.
- CHEN Man, LU Wei, WANG Xiaochan, et al. Design and experiment of optimization control system for variable fertilization in winter wheat field based on fuzzy PID[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(2): 71-76. (in Chinese)
- 25 左兴健, 武广伟, 付卫强, 等. 风送式水稻侧深精准施肥装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 14-21.
- ZUO Xingjian, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Design and experiment on air-blast rice side deep precision fertilization device[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(3): 14-21. (in Chinese)
- 26 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动驾驶系统[J]. 农业机械学报, 2010,41(11): 148-152,162.
- LIU Zhaoxiang, LIU Gang, JI Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11): 148-152,162. (in Chinese)
- 27 吉辉利, 王熙. 农机卫星定位导航精度评估方法研究[J]. 农机化研究, 2016,38(11): 242-245,262.
- JI Huili, WANG Xi. The research of agricultural machinery is about satellite navigation accuracy of the evaluation method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(11): 242-245,262. (in Chinese)