

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.020

四要素变量施肥机肥箱施肥量控制算法设计与试验

安晓飞^{1,2} 王晓鸥³ 付卫强^{1,2} 魏学礼¹ 武广伟¹ 李立伟¹

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 黑龙江省农垦总局科技信息中心, 哈尔滨 150036)

摘要: 针对黑龙江农垦地区垄作玉米施肥过程中遇到的肥料分层问题,设计了一种四要素变量施肥控制系统。系统采用电液比例控制技术,主要由液晶显示终端、变量施肥控制器、4路液压马达和编码器、4路排肥机构(排肥轴和外槽轮)和GNSS模块组成。为了实现氮肥、磷肥、钾肥和微肥的一次性及时、准确施用,提出了一种基于复合交叉原则的各路施肥量确定策略,基于PID技术设计了液压马达控制算法。根据用户在变量施肥控制软件中设置的目标施肥量,系统自动确定各肥箱精确施肥量,基于PID液压马达控制算法,实时计算4路液压马达的目标转速,同步向控制器发送4路转速指令,一次性完成氮肥、磷肥、钾肥和微肥4种肥料的同步变量施用。为了验证各路施肥量控制算法的效果,分别进行了PID算法响应时间和精度试验、变量施肥系统单质肥排肥性能验证试验和作业条件下各肥箱施肥量控制算法验证试验。试验结果表明,基于PID技术的排肥轴转速控制算法响应时间不大于0.5s;变量施肥系统单质肥排肥性能误差绝对值不大于3%;作业条件下各路施肥量控制算法显著减少了氮素的施用量,实现了氮肥、磷肥、钾肥的精确投入。四要素变量施肥机各路施肥量控制算法完全满足了垦区玉米施肥精确、均匀施用的要求。

关键词: 垄作玉米; 变量施肥; 施肥量; 控制算法; PID控制

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0149-06

Design and Experiment of Fertilizer Amount Control Algorithm in Four Factors Variable Rate Fertilization System

AN Xiaofei^{1,2} WANG Xiaou³ FU Weiqiang^{1,2} WEI Xueli¹ WU Guangwei¹ LI Liwei¹

(1. Beijing Research Center of Information Technology for Agriculture, Beijing 100097, China

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

3. Science Information Center, Heilongjiang Farm and Land Reclamation Administration, Harbin 150036, China)

Abstract: In view of the Heilongjiang agricultural reclamation region fertilizer layered problems, a variable rate fertilization control system was developed. It consisted of the vehicle intelligent terminal, the variable rate fertilization controller, four channel speed sensor, four channel hydraulic motor, four channel fertilizer components, GNSS receiver and work status sensor. In order to apply the fertilizer of nitrogen, phosphorus, potassium and micronutrient accurately, a new fertilizer amount strategy with the compound crossover principle was proposed. And then with the PID technology, hydraulic motor control algorithm was designed. When the system started to work, according to the set target values of N, P and K, the actual value of N, P and K would be determined automatically with the corresponding strategy. Subsequently, the hydraulic motor speed would be calculated. Nitrogen fertilizer, phosphate fertilizer, potassium fertilizer and micronutrient fertilizer could be fertilized at one time. In order to verify the effect of the fertilizer amount control algorithm, three experiments were carried out. The results showed that the distributing shaft based on PID control algorithm of response time was less than 0.5 s, the system of variable rate fertilization elemental performance error absolute value was no more than 3%. Under the operating condition, it could reduce the use of nitrogen fertilizer obviously and more accurate for N, P and K than that without the algorithm. The control algorithm of the fertilizer amount of the four-factor

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200600、2016YFD0200605)和山东省重点研发计划项目(2016CYJS03A01-1)

作者简介: 安晓飞(1986—),男,副研究员,主要从事农机智能装备研究,E-mail: anx@nrcita.org.cn

通信作者: 付卫强(1978—),男,副研究员,主要从事农机智能装备研究,E-mail: fuwq@nrcita.org.cn

variable fertilizer application machine completely satisfied the requirements of precise and uniform application of maize fertilization in reclamation area.

Key words: ridge growing maize; variable rate fertilization; fertilizing amount; control algorithm; PID

0 引言

精准施肥理念是精准农业实施的关键一环,精准施肥主要分为基于处方图的变量施肥作业和基于实时传感器的变量施肥作业两种方式。两种施肥方式都是为了实现信息感知、精准决策、智能控制和变量投入^[1-5]。

黑龙江农垦地区玉米种植按照垄作模式进行,根据垦区玉米种植的统一规程,实行农机“六统一”制度和农艺“六统一”制度。六统一制度保证了玉米大规模种植的执行和玉米种植的产量。为了进行统一施肥作业,各农场都建有拌肥站,目的是把不同肥料按照一定比例混合后统一施到土壤中。在施肥作业过程中,由于机械振动和肥料密度的差异造成了肥料的分层和施肥不均。

国内外学者针对变量施肥开展了大量的研究工作^[6-19],国外还有部分商用产品,如 CaseIH 公司生产的 ST820 型气力输送式变量施肥播种机。国内目前仍然以机械轮驱动方式为主,同时也出现了部分基于电机和液压马达方式的变量施肥机。

针对垦区农场的这一问题,本文研发基于处方图技术的四要素变量施肥系统^[20],实现肥料上分下统,一次性施用。为了提高施肥量的准确性,进一步针对四要素变量施肥系统施肥量控制开展研究,提出一种基于复合交叉原则的各路施肥量确定策略,提出基于 PID 技术的排肥液压马达转速控制算法,并对施肥系统进行单质肥和复合肥的试验验证。

1 试验材料与方法

1.1 四要素变量施肥控制系统设计

基于电液比例控制技术的四要素变量施肥系统主要由车载终端、变量施肥控制器、4 路转速传感器、4 路液压马达、4 路排肥机构、GNSS 模块组成。四要素变量施肥控制系统总体结构如图 1 所示。系统既可以按照用户设定量同步变量施用,也可以按照施肥处方图进行作业(前期基于测土配方理论,按照养分平衡原则,生成变量施肥处方图)。根据用户在车载终端变量施肥控制软件中设置的目标施肥量,系统自动确定各肥箱精确施肥量,基于 PID 算法,实时计算 4 路液压马达的目标转速,并同步向变量施肥控制器发送 4 路转速指令,一次性完成氮肥、磷肥、钾肥和微肥 4 种肥料的同步变量施用,同时通

过光电编码器实时采集排肥轴转速,将其反馈至控制器,实时动态调整排肥轴目标转速,进而动态调节施肥量。系统的研制开发工作在文献[20]中进行了详细阐述,本文的重点是对各路施肥量控制算法进行论述,故不在此对系统的详细研制工作进行阐述。系统要实现的目标主要包括排肥及时响应,肥料混合均匀,施量精准控制。其中肥料混合均匀的问题由 4 路排肥机构从机械的角度实现了肥料上分下统,另外 2 个问题是本文研究的重点。

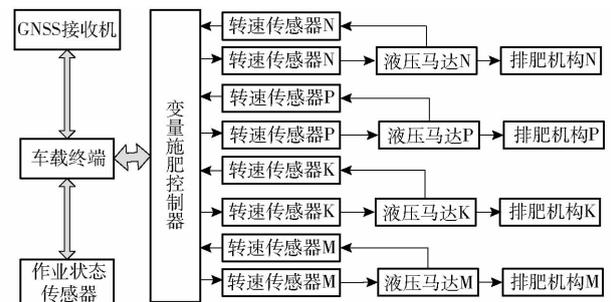


图 1 四要素变量施肥控制系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure of VRF

1.2 变量施肥系统各路施肥量确定策略

国内开展变量施肥研究选取的肥料大部分为单质肥,那么对于四要素变量施肥控制系统就变得非常简单,只需要依次设定氮肥、磷肥、钾肥和微肥目标施肥量,系统分别计算 4 路液压马达转速,即可实现定量精准排肥。而在实际生产过程中,化肥的种类除了单质肥以外还有复合肥料或混合肥料等。复合肥料基本由化学方法制成,通常为二元复肥,养分含量和比例固定。为了提高变量施肥控制系统的施肥准确性,需要消除单质肥和二元复肥之间营养元素的交叉耦合问题,最大限度满足施肥处方营养元素的需求,同时精准控制不同类型化肥的施用量。为了建立排肥量与外槽轮排肥轴转速之间的关系,在本研究中假设肥料的容重保持不变。

消除不同肥箱肥料营养元素交叉耦合,确定不同肥箱准确施肥量的方法主要包括 4 个步骤。各肥箱施肥量确定策略流程如图 2 所示。

在进行变量施肥作业之前,对施肥的作业参数首先进行配置,主要包括:施肥机的参数和化肥的参数信息。其中施肥机参数主要包括施肥机的幅宽、肥管数量;施用化肥信息包括选择配置氮磷钾以及微肥的化肥类型、化肥名称、排量、纯氮含量、纯磷含量、纯钾含量等属性信息。

在此基础上,在施肥机开始工作时,接收 GNSS

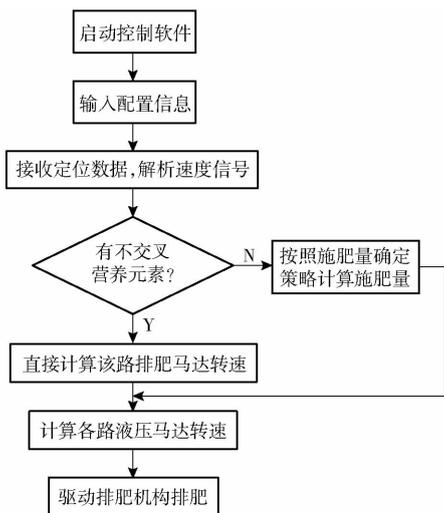


图2 各肥箱施肥量确定策略流程图

Fig. 2 Flow chart of strategy determination for fertilizer application in each fertilizer box

定位数据, 解析施肥机当前所处位置, 并查询调用处方图中当前位置所需的氮、磷、钾以及微量元素养分的目标量。

如果4种肥料中存在不受其他肥箱同类营养元素影响的肥料, 则优先通过施肥量计算公式, 直接计算所属肥箱马达转速; 最后对剩余肥箱施肥量按照所需量从小到大排列, 通常计算顺序为微肥、钾肥、磷肥和氮肥。以氮肥为例, 所在肥箱施肥量计算公式为

$$dN = \frac{N_t - \frac{P_t}{p_b} n_b - \frac{K_t}{k_c} n_c - \frac{M_t}{m_d} n_d}{n_a} \quad (1)$$

式中 dN ——目标施肥量

N_t ——氮元素的目标施量

P_t ——磷元素的目标施量

K_t ——钾元素的目标施量

M_t ——微量元素 M 的目标施量

在计算目标实际施肥量时将其他肥箱中由于营养元素耦合造成的过量施肥量扣除。同理获得其他肥料所在肥箱的准确施肥量。

选取化肥 A 作为氮肥, 假设化肥 A 中可能包含磷、钾、微量元素, 则化肥 A 中氮素含量为 n_a , $0 < n_a < 1$; 磷素含量为 p_a , $0 \leq p_a < 1$; 钾素含量为 k_a , $0 \leq k_a < 1$; 微量元素 M 含量为 m_a , $0 \leq m_a < 1$; 选取化肥 B 作为磷肥, 假设化肥 B 中可能包含氮、钾、微量元素, 则化肥 B 中磷素含量为 p_b , $0 < p_b < 1$; 氮素含量为 n_b , $0 \leq n_b < 1$; 钾素含量 k_b , $0 \leq k_b < 1$; 微量元素 M 含量为 m_b , $0 \leq m_b < 1$; 选取化肥 C 作为钾肥, 假设化肥 C 中可能包含氮、磷、微量元素, 则化肥 C 中钾素含量为 k_c , $0 < k_c < 1$; 氮素含量为 n_c , $0 \leq n_c < 1$; 磷素含量为 p_c , $0 \leq p_c < 1$; 微量元素 M 含量为 m_c , $0 \leq m_c < 1$; 选

取化肥 D 作为含有微量元素 M 的微肥, 假设化肥 D 中可能包含氮、磷、钾元素, 则 D 中微量元素 M 含量为 m_d , $0 < m_d < 1$; 氮素含量为 n_d , $0 \leq n_d < 1$; 磷素含量为 p_d , $0 \leq p_d < 1$; 钾素含量为 k_d , $0 \leq k_d < 1$ 。

在确定了各肥箱肥料精确施肥量后, 在排肥槽轮开度确定的条件下, 通过调整排肥轴转速实现排肥量控制。已知每种化肥的目标施用量后, 排肥机构目标转速

$$n = \frac{Qvw}{10\,000q} \quad (2)$$

式中 Q ——化肥的目标施肥量, g/hm^2

v ——机具前进速度, m/s

q ——排肥器排量, g/r

w ——机具幅宽, m

计算得到的目标转速通过 CAN 总线下载到变量施肥作业控制器, 进而驱动液压马达带动排肥机构实现排肥操作。

当选取的化肥包含单质肥、二元复肥时, 系统最大限度优化配比各化肥营养元素, 合理控制各肥箱施肥。需要特别注意的是在按图作业过程中, 施用二元复肥会同步施用两种营养元素, 由此可能会导致某一营养元素过量施用。

1.3 PID 变量排肥控制算法

系统要保证响应及时、精准投入, 除了需要精确确定每个肥箱的施肥量, 还需要及时响应, 准确控制排肥机构转速。本研究中施肥控制系统采用标准 PID 算法, 实现了对排肥液压马达的闭环控制, 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 P、I、D 系数分别确定为 0.03、0.035、0.05, 图 3 是排肥机构转速控制算法结构图。通过液压马达内置编码器实时测量马达的转速并反馈, 与 GNSS 速度数据采集不同点在于内置编码器马达转速的采样频率在很大程度上决定了 PID 算法的响应时间, 系统采用 100 Hz 采样频率, 将响应时间控制在 0.5 s 以内, 最终实现闭环控制。

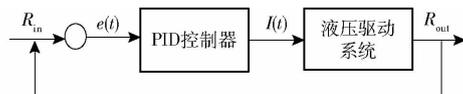


图3 排肥机构转速 PID 控制算法

Fig. 3 PID control speed algorithm

1.4 变量施肥系统施肥量控制算法评价方法

本研究的目的是对四要素变量施肥系统各路施肥量控制算法进行验证, 主要包括 PID 算法响应精度、变量施肥系统各肥箱单质肥排肥性能和作业条件下各肥箱施肥量控制算法验证试验。据此, 评价

指标主要包括相对误差和变异系数。

排肥量误差为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} (x_i - \bar{x})^2}{23}} \times 100\% \quad (3)$$

式中 x_i ——单次施肥质量, kg

\bar{x} ——平均施肥质量, kg

排肥量变异系数为

$$C_v = \frac{\delta}{\bar{x}} \times 100\% \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 PID 算法响应时间和精度试验

在 PID 液压马达控制算法 P、I、D 系数分别为 0.03、0.035、0.05 的条件下,对空载条件下 4 路液压马达进行实时控制,系统设定运行 60 s,目标转速分别为 20、30、40 r/min,通过德国 testo470 型手持式转速测量仪实时测量实际转速。空载条件下, PID 算法响应精度和时间如表 1 所示。由表 1 可知,相对误差在 2.5% 以内,响应时间不大于 0.5 s。

表 1 PID 算法响应精度和时间

Tab.1 PID accuracy and response time

序号	肥箱 序号	设定转速/ (r·min ⁻¹)	实测转速/ (r·min ⁻¹)	相对误 差/%	响应 时间/s
1	1	20	20.45	2.25	0.3
2	1	30	29.60	-1.16	0.4
3	1	40	40.75	1.87	0.4
4	2	20	20.35	1.75	0.5
5	2	30	29.50	-1.66	0.3
6	2	40	40.30	0.75	0.4
7	3	20	20.25	1.25	0.3
8	3	30	29.63	-1.23	0.4
9	3	40	39.50	-1.25	0.5
10	4	20	19.80	-1.00	0.4
11	4	30	29.67	-1.29	0.5
12	4	40	39.89	-0.27	0.5

2.2 变量施肥系统单质肥排肥性能试验

为了验证不同肥箱排肥精度,选取单质肥作为目标肥,进行变量施肥机的静态排肥试验。由于没有合适的单质磷肥和微肥,最后选取单质氮肥装在氮肥箱、磷肥箱、微肥箱,选取钾肥装在钾肥箱。尿素作为氮肥,硫酸钾作为钾肥各 100 kg,采用美国康州 HZ 电子有限公司的 HZT-A3000 型电子天平,精确至 0.01 g。如表 2 所示,在排肥轮转速 10、30、50 r/min 条件下,氮肥、磷肥、钾肥和微肥肥箱排肥最大误差分别为 3.00%、2.00%、3.00% 和 -2.00%,四要素变量施肥机单质肥排肥整体误差

不大于 3.00%,变异系数小于 6.00%。

当排肥轮转速低于 10 r/min 时,由于外槽轮排肥结构抖动严重,排肥量严重偏少;当排肥轮转速高于 50 r/min 时,由于外槽轮转速过快,肥料无法及时填充,造成填充率不足,排肥量同样严重偏少。出现以上两种情况时,排肥量和外槽轮转速无法满足线性关系,可以通过改变外槽轮开度方式,将排肥轮转速限定在 10~50 r/min 之间即可。在正常连续作业条件下,当肥箱中的肥料减少至总肥量 1/4 处时,出现外槽轮处无肥料填充现象,这是由于随着肥料排出,肥料在肥箱中每个外槽轮周围自然堆积,无法填充外槽轮排肥器,同时 2 个排肥器中间也出现了肥料的堆积。在肥箱中加装搅棍,可保证肥料与排肥轴转速保持线性关系。

表 2 各路单质肥排肥结果

Tab.2 Fertilization data of VRF

序号	肥箱 序号	排肥轮转速/ (r·min ⁻¹)	实际排肥 量/kg	系统排肥 量/kg	误差/ %
1	1	10	1.00	0.98	-2.00
2	2	10	1.00	1.02	2.00
3	3	10	1.00	1.01	1.00
4	4	10	1.00	1.02	2.00
5	1	30	1.00	0.97	-3.00
6	2	30	1.00	0.98	-2.00
7	3	30	1.00	1.03	3.00
8	4	30	1.00	1.01	1.00
9	1	50	1.00	1.02	2.00
10	2	50	1.00	0.99	-1.00
11	3	50	1.00	0.98	-2.00
12	4	50	1.00	0.98	-2.00

2.3 作业条件下各肥箱施肥量控制算法验证试验

田间试验选取在黑龙江农垦赵光农场某地块,试验面积 33.33 hm²,试验区范围:东经 126.72°~126.75°,北纬 48.02°~48.04°,总体地势为西南高,东北低。种植作物为玉米,采用 110 cm 大垄种植。针对实际作业中采用的肥料情况,采用小颗粒尿素,粒度 0.000 85~0.002 8 m,总氮质量分数大于 46.4%、磷酸二铵总磷质量分数大于 46%,总氮质量分数大于 18%、硫酸钾总钾质量分数 45%。分别配置目标施量、化肥排量、作业机等参数,然后启动运行,排肥 30 s 后停止,称量实际的排肥质量,每种化肥进行 3 组排肥试验。图 4 是实际肥料排肥结果。

试验结果表明在采用本研究中提出的施肥量确定策略后,各肥箱排肥量为 39.35、65.22、72.44 kg,与不采用该算法相比较减少了 N 肥箱 16.63 kg,完全实现了 N、P、K 的精准施用。当然由于本组合中

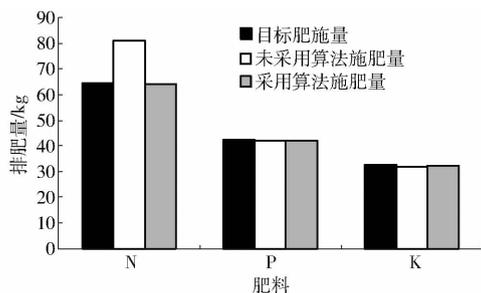


图4 作业条件下各路施肥量

Fig.4 Each fertilizer channel effect under working condition

只有氮肥出现了交叉,运算量并不复杂,当出现多种肥料多次交叉的情况,该施肥量确定策略和PID转速控制算法在精确排肥上将发挥更大的作用。

3 结论

(1)基于电液比例控制技术研发了四要素变量施肥系统,提出了一种基于复合交叉的各肥箱施肥量确定策略,基于PID算法实现了排肥液压马达转速的闭环控制,既能够解决肥料分层问题,又能够解决精准控制投入的问题。

(2)试验验证结果表明,基于PID技术设计的排肥轴控制算法系统响应时间不大于0.5s,变量施肥系统单质肥排肥性能误差绝对值不大于3%,作业条件下采用施肥量确定策略后,实现了氮肥、磷肥、钾肥的精确投入。

参 考 文 献

- 孟志军,赵春江,刘卉,等. 基于处方图的变量施肥作业系统设计与实现[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2009,30(4):338-342. MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, LIU Hui, et al. Development and performance assessment of map-based variable rate granule application system[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2009, 30(4): 338-342. (in Chinese)
- 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)
- 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. Prescription map identification and position lag calibration method for variable rate application of fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):204-209. (in Chinese)
- 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11):38-48. (in Chinese)
- 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)
- 余洪锋,丁永前,刘海涛,等. 小田块变量施肥系统优化设计与应用[J]. 农业工程学报,2018,34(3):35-41. YU Hongfeng, DING Yongqian, LIU Haitao, et al. Optimization design and application of variable rate fertilization system for small-scaled fields [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(3):35-41. (in Chinese)
- MOLATUDI R L, MARIGA I K. The effect of maize seed size and depth of planting on seedling emergence and seedling vigour [J]. Journal of Applied Sciences Research, 2009, 5(12):2234-2237.
- 施印炎,陈满,汪小岳,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. 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. SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Analysis and experiment of fertilizing performance for precision fertilizer applicator in rice and wheat fields[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):97-103. (in Chinese)
- 张睿,王秀,赵春江,等. 链条输送式变量施肥抛撒机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(6):20-25. ZHANG Rui, WANG Xiu, ZHAO Chunjiang, et al. Design and experiment of variable rate fertilizer spreader with conveyor chain [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(6):20-25. (in Chinese)
- 宿宁. 精准农业变量施肥控制技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2016. SU Ning. Research on variable rate fertilization control technology in precision agriculture[D]. Hefei:University of Science and Technology of China, 2016. (in Chinese)
- 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. 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.

(in Chinese)

- 12 CHATTHA H S, ZAMAN Q U, CHANG Y K, et al. Variable rate spreader for real-time spot-application of granular fertilizer in wild blueberry[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 100: 70 – 78.
- 13 MOUAZEN A M, KAROUÏ R, DE BAERDEMACKER J, et al. Characterization of soil water content using measured visible and near infrared spectra [J]. *Soil Science Society of American Journal*, 2006, 70(4): 1295 – 1302.
- 14 TOLA E, KATAOKA T, BUREE M, et al. Granular fertilizer application rate control system with integrated output volume measurement[J]. *Biosystems Engineering*, 2008, 101(4): 411 – 416.
- 15 张继成. 基于处方图的变量施肥系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
ZHANG Jicheng. Research on key technologies of variable fertilizer system based on the prescription [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 16 魏学礼. 东北垄作玉米全要素变量施肥控制系统研发[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
WEI Xueli. Research and development of total factor variable rate fertilization control system for ridge planting maize in northeast of China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 17 乔璐. 混合变量施肥控制系统的设计[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
QIAO Lu. Design of the control system of mixed fertilizer applicator [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 18 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)
- 19 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. 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.
FENG Huimin, GAO Na'na, 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. (in Chinese)
- 20 安晓飞, 付卫强, 魏学礼, 等. 基于处方图的垄作玉米四要素变量施肥机作业效果评价[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(增刊): 66 – 70. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2017s011&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.011.
AN Xiaofei, FU Weiqiang, WEI Xueli, et al. Evaluation of four-element variable rate application of fertilization based on maps [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(Supp.): 66 – 70. (in Chinese)

(上接第 74 页)

- 19 慕永红, 于杨, 张莉萍, 等. 寒地水稻插秧时期对产量与品质的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2009(3): 31 – 34.
MU Yonghong, YU Yang, ZHANG Liping, et al. Effect of seeding and planting period on the rice yield and quality in cold region [J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2009(3): 31 – 34. (in Chinese)
- 20 葛宜元, 王金武, 李世伟, 等. 整株秸秆还田机刀轴载荷谱编制与疲劳寿命估算[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(3): 77 – 80.
GE Yiyuan, WANG Jinwu, LI Shiwei, et al. Load spectrum compiling and fatigue life estimation of the cutter shaft of the whole-straw recycling machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(3): 77 – 80. (in Chinese)
- 21 李明金. 水田搅浆机平地装置的设计与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2014.
- 22 栾峰. 高速插秧机单机作业量影响因素分析[J]. *农业科技与装备*, 2013(8): 32 – 33.
LUAN Feng. Analysis of the factors affecting the operation quantity of one unit of high-speed transplanting machine [J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2013(8): 32 – 33. (in Chinese)
- 23 杨士红, 彭世彰, 徐俊增, 等. 不同水氮管理下稻田氨挥发损失特征及模拟[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 99 – 104.
YANG Shihong, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Characteristics and simulation of ammonia volatilization from paddy fields under different water and nitrogen management [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(11): 99 – 104. (in Chinese)
- 24 胡潇怡. 基于侧深施肥技术的寒地水稻高产高效管理研究与示范[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- 25 KASTEEL R, GARNIER P, VACHIER P, et al. Dye tracer infiltration in the plough layer after straw incorporation [J]. *Geoderma*, 2007, 137(3): 360 – 369.
- 26 陈青春, 石勇, 丁启朔, 等. 正反旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 13 – 18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(9): 13 – 18. (in Chinese)