

2F-6-BP1 型变量配肥施肥机的研制与试验

伟利国, 张小超^{*}, 苑严伟, 刘阳春, 李卓立

(中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 针对国内与大马力拖拉机配套应用施肥机型缺乏的问题, 该文应用变量配肥施肥技术, 设计了 2F-6-BP1 型变量配肥施肥机。施肥机通过 GPS 系统获取车辆在田间的位置信息, 通过预先加载的施肥处方图, 获取当前位置的目标施肥量, 采用称重法反馈肥料流量信息, 并按照当前车辆行进速度, 实时调整施肥量, 进行变量配肥施肥作业, 达到精准施肥目的。对 2F-6-BP1 型变量施肥机系统设计、工作原理及试验情况进行了介绍。室内外试验结果表明, 该变量配肥施肥机称重系统的最大称量误差为 0.65%, 施肥精度可达到 95%以上, 可实现精准施肥作业, 具有良好的经济性和实用性。

关键词: 肥料, 洒施肥, 设计, 精准农业, GPS

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.07.003

中图分类号: S375; TP274

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-07-0014-05

伟利国, 张小超, 苑严伟, 等. 2F-6-BP1 型变量配肥施肥机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(7): 14-18.

Wei Ligu, Zhang Xiaochao, Yuan Yanwei, et al. Design and experiment of 2F-6-BP1 variable rate assorted fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(7): 14-18. (in Chinese with English abstract)

0 引言

传统肥料的施用, 是采取粗放的方式一次播排混合肥料。常常造成作物某种营养成分的缺失, 而另一种营养成分过剩, 这样既没有使肥料得到较高的利用率, 又使土壤环境的营养平衡受到破坏, 长期如此造成地下水的污染。合理地利用化肥及研究施肥技术对中国农业发展有着非常积极的意义^[1-3]。实践表明, 实施按需变量配肥施肥, 可大大地提高肥料利用率、减少肥料的浪费以及多余肥料对环境的不良影响, 因此其经济、社会和生态效益显著, 是未来施肥技术的发展方向^[4-11]。

2F-6-BP1 型变量配肥施肥机是根据中国实际需求与现有的技术水平, 研制的一种与大马力拖拉机配套应用施肥机械新机型。它采用压力传感器获取肥箱内肥料变化情况, 据实时检测值, 解算出实际施肥量和施肥流量, 作为施肥反馈量反馈给施肥控制器形成一个闭环控制系统, 从而可对施肥过程中的施肥量进行监控和调整, 并结合 GPS 技术和施肥处方, 达到精准变量施肥的目的。

1 变量配肥施肥机系统设计

2F-6-BP1 型变量配肥施肥机系统可分为施肥机械结构部分、变量配肥施肥控制系统和软件系统。

收稿日期: 2010-9-27 修订日期: 2011-11-25

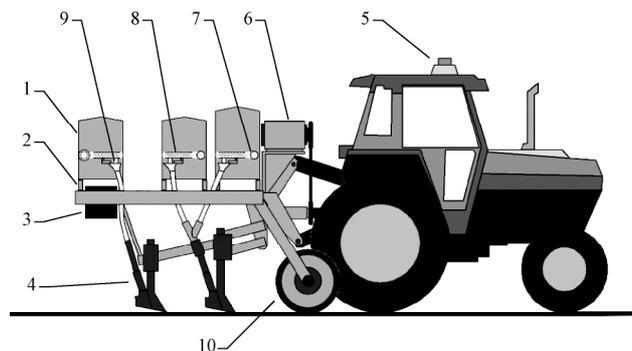
资助项目: 国家科技支撑计划项目(2011BAD20B04, 2011BAD20B06); 国家 973 计划课题(2010CB735707)

作者简介: 伟利国(1978-), 男, 黑龙江鸡西, 高级工程师, 主要从事精准农业智能控制研究。北京 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 100083。Email: weilig78@126.com

*通信作者: 张小超(1957-), 男, 江苏南京, 研究员, 博士生导师, 主要从事精准农业智能装备研究。北京 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 100083。Email: zxchao2584@163.com

1.1 机械结构设计

2BF-6-BP1 型变量配肥施肥机机械结构由肥料箱、悬挂式下料斗、工作踏板、螺旋排肥器、伺服电机、肥箱压力传感器、排肥管、开沟器、发电机、地轮等组成, 结构简图如图 1 所示。为了实现 N、P、K 3 种肥料分施作业, 施肥机上配有 6 个肥箱, 分为 2 组, 每组 3 个肥箱, 分别承装 N、P、K 3 种不同肥料。每个肥箱下设有 6 个排肥口, 6 个排肥槽轮通过一根施肥传动轴带动, 传动轴都连接有一个伺服电动机, 6 个肥箱排肥器的转速分别由 6 个伺服电动机控制, 伺服电动机采用日本安川 SGMJV-04A 型, 额定功率 400 W, 额定转速 3000 r/min, 额定扭矩 1.27 N·m。经测试, 带动排肥器传动轴正常工作扭矩大于 36 N·m, 为了提高电动机工作扭矩, 伺服电动机输出轴端连接一个减速比为 1:40 的减速电动机, 以满足传动要求^[9]。拖拉机动力输出轴带动发电机, 为施



注: 1.肥料箱 2.压力传感器 3.现场检测控制器 4.开沟器 5.GPS 天线 6.发电机 7.伺服电机 8.螺旋排肥器 9.下料斗 10.地轮

图 1 变量配肥施肥机机械结构简图
Fig.1 Structural diagram of variable rate assorted fertilizer applicator

肥伺服电动机提供电能。N、P、K 3 种肥料肥箱各自为一个独立系统，因此每个肥箱的排肥量可以是不同的，这样就达到了变量配肥的目的。每个肥箱采用 4 个满量程 150 kg 的压力传感器支撑架起，考虑到肥箱自身颠簸产生的加速度影响，每个肥箱可以承载 400 kg 的肥料。控制系统根据压力传感器的实时测量值，可监测肥箱内肥料质量变化情况，从而指导施肥作业。施肥机的工作行数为 6 行，作业幅宽 6.6 m，适合大田工作要求。

1.2 变量配肥施肥控制系统

变量配肥施肥控制系统是施肥机的核心部分，主要完成车载传感器信号采集，施肥作业的控制以及施肥机工况数据显示与保存。图 2 为变量配肥施肥控制系统原理图。压力传感器将肥箱内肥料的质量变化转化为电压信号变化，经放大滤波电路进行信号的放大、降噪处理后，由 A/D 转换器将模拟信号转换为数字信号，微控制器进行信号采集时，对多路压力传感器的信号值进行加权平均处理，以消除肥箱内肥料不均或肥箱倾斜对传感器测量结果造成的影响。微控制器将采集到的肥箱内肥料的质量变化数字信号通过 CAN 总线传输到车载计算机中。车载计算机中集成了高精度的 GPS 接收机，可获得当前施肥机的位置信息。车载计算机根据处方图、GPS 信息、车速以及肥箱内肥料质量变化的反馈信息，通过数字 PID 控制算法，计算得到精确的施肥量和 N、P、K 肥料的配比，生成施肥策略，并实时将当前的施肥控制信息发送到现场微控制器，微控制器根据施肥指令，通过 D/A 转换器输出模拟控制信号，对排肥槽电机进行速度控制，进而控制槽轮转速，实现变量配肥施肥的目的。

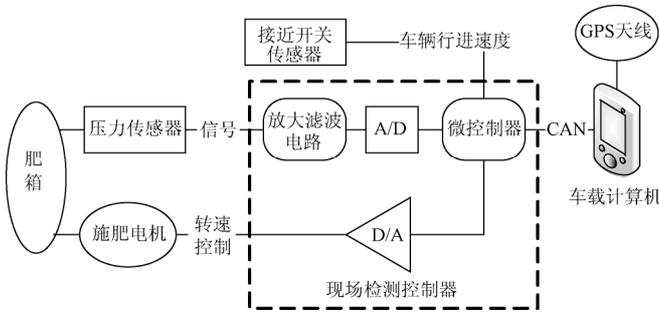


图 2 变量配肥施肥控制系统原理图

Fig.2 Schematics of control system of variable rate assorted fertilizer

现场检测控制器完成对现场压力传感器、车辆行进速度传感器、电机转速信息的采集，并通过 CAN 总线与车载计算机进行通讯，根据上位机指令来控制排肥电机工作。现场检测控制器主要微控制器芯片采用 PIC18F2580，它是 Microchip 公司推出的一款增强型 8 位单片机，最高运行频率可达到 40MHz，具有 ECAN、SPI、USART、AD 等丰富的外围模块，极大的简化了外围电路的设计。微控制器通过 SPI 总线与 A/D 转换器、D/A 转换器通讯连接，实现模拟数字信号之间的转换。AD 转换器是 AD 公司的一款低成本的 16 位转换芯片 AD7706，该芯片采用 Σ - Δ A/D 转换技术，实现 16 位无丢失代码性

能，并达到 0.003%非线性。芯片内部具有 3 个准差分模拟输入通道，多路模拟切换开关、缓冲器和高达 128 倍可编程放大器，AD 采样参考电压为 3 V，由精准参考源提供，参考源芯片采用 AD780。微控制器与车载计算机之间采用 CAN 总线进行组网连接，实现系统模块化、提高系统通讯可靠性，布线简单。

车载计算机是针对精准农业智能装备自主组装开发的一款多功能 PC 一体机，作为系统的人机交互接口，可进行作业参数的设置，显示作业处方图及农业机械作业轨迹，负责控制策略的输出，存储相关作业过程数据。车载计算机集成了 GPS 定位模块和 3G 无线通讯模块，实现车辆的田间定位和远程数据传输。集成 ECAN 通讯模块，具有 RLT8111C 10/100/1000 Mb/s 网络接口，RS232/422/485 接口，USB2.0 等丰富设备接口，可方便与现场控制检测设备进行组网连接。车载计算机采用 10.4 寸工业触摸屏，操作方便，显示内容丰富，工业固态硬盘，压铸铝壳体，适应于恶劣的农业生产环境。图 3 所示为本研究试制的车载计算机。



图 3 车载计算机

Fig.3 Truck-mounted computer

施肥机行进速度是变量配肥施肥一个重要的检测参数^[12-16]。本研究设计开发了一种通过接近开关传感器、地轮带动的旋转齿轮获取施肥机行进速度的检测系统，如图 4 所示。当旋转齿轮的齿靠近传感器时便产生脉冲信号，通过计数器进行计数。在计时周期 T (单位: s) 内，得到的脉冲个数 N_p ，由下式可得出地轮轮速 V (单位: m/s) 为

$$V = 2\pi R\beta N_p / TN_c \quad (1)$$

其中 R 为地轮轴心到地面的距离，m， β 为地轮到旋转齿轮的传动比， N_c 为旋转齿轮的齿数。由于地轮存在打滑现象，传感器数据演算为实际车速 V_c (单位: m/s) 时要考虑地轮的打滑系数 α ，即

$$V_c = \alpha V \quad (2)$$



图 4 速度传感器安装图

Fig.4 Installation diagram of velocity sensor

1.3 软件系统设计

变量配肥施肥系统软件包括车辆位置信息解算、变量配肥施肥专家决策、传感器数据采集显示、处方图数据加载、数据保存与回放等模块功能。车辆位置信息是通过 GPS 接收机提供的 NEMA 信息,解算出车辆当前的坐标位置。数据采集模块完成肥料流量、车速、施肥电机转速、GPS 等传感器信息的采集。变量配肥施肥专家决策系统根据车辆当前位置信息,施肥处方图,生成施肥策略,实时将当前的施肥控制信息发送到现场控制器,实现按需变量施肥。变量施肥过程参数数据实时显示,图 5 为车载计算机控制软件操作界面。

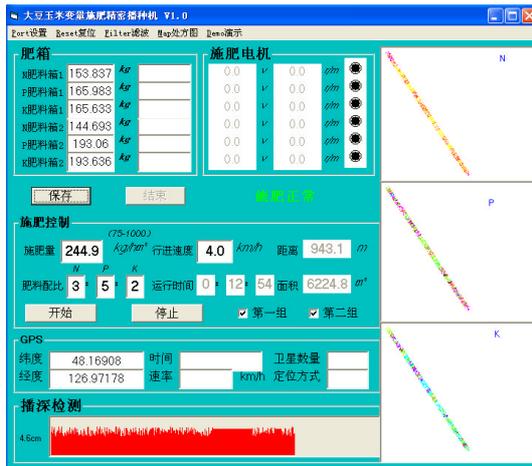


图 5 软件操作界面

Fig.5 Software operation interface

3 试验研究

3.1 室内试验

室内试验主要完成对肥箱下压力传感器的标定,以及不同肥料在排肥轴不同转速下的排量测定。

3.1.1 压力传感器标定

压力传感器标定这里使用 4 个 20 kg 的标准砝码来完成。首先将变量配肥施肥机停放在平整的地面上,记录肥箱空载时,压力传感器测量值,然后将 4 个标准砝码依次放入肥箱中,对肥箱进行加载 20, 40, 60, 80 kg,记录每次加载后传感器的测量值;再依次将 4 个标准砝码从肥箱中取出,对肥箱进行卸载 20, 40, 60, 80 kg,记录每次卸载传感器的测量值,反复重复 3 次。然后计算压力传感器的标定系数 K

$$K = M_{\text{砝码}} / |D_k - D_{k-1}| \quad (3)$$

其中 $M_{\text{砝码}}$ 为标准砝码的质量值,这里 $M_{\text{砝码}}$ 为 20 kg; $|D_k - D_{k-1}|$ 为加载或卸载一个砝码传感器测量值的绝对变化量。由此可得

$$m_{\text{肥}} = K \cdot D_{\text{测}} - m_{\text{空}} \quad (4)$$

其中 $m_{\text{肥}}$ 为肥箱内肥料实时质量值, kg; $D_{\text{测}}$ 为传感器实时测量值, kg; $m_{\text{空}}$ 为空载肥箱的质量值, kg。

对压力传感器标定后,称重系统的测量精度检验,分别往肥箱中加载不同质量的标准砝码,记录系统测量

值,进行分析处理,得到压力传感器的测量误差。测量结果如表 1 所示。经过计算可知,称重系统的最大称量误差为 0.65%。

表 1 测量结果

Table 1 Measurement results

测量次数	加载量/kg				最大误差/%
	20	40	60	80	
1	19.88	39.95	59.93	80.01	0.65
2	20.05	39.74	59.89	79.97	
3	19.91	39.89	59.81	80.03	

3.1.2 不同肥料排肥器排量测定

为了达到精准施肥的目的,需要对不同肥料排肥器的排量进行测定^[17-21]。试验材料为普遍施用的颗粒状肥料:尿素(N)、磷酸二胺(P)和硫酸钾(K)。首先将肥箱内装入肥料,设定施肥电机带动排肥器以一定转速进行工作,施肥下料口处放有接料器皿,施肥量通过称取器皿中的肥料质量得到。使用秒表进行排肥计时,每个排肥器在每个转速下重复试验 3 次。不同肥料排肥器排量测定数据统计分析值如表 2 所示。从表中可以看出 K 肥每圈排肥量最大,与其颗粒容重较大有关。排肥器在低速时每圈排肥量较大,高速时较小。N 肥在不同转速时,每圈的排肥量标准偏差较大,与其流动性好有关。

表 2 不同转速排肥量测定

Table 2 Different speed fertilizing amount measurement

肥料	排肥器转速/ (r·min ⁻¹)	排肥量/ (g·r ⁻¹)			平均排肥量/ (g·r ⁻¹)	标准偏差
		1	2	3		
N	12.5	45.9	44.6	43.8	40.2	4.1
	25	39.7	41.6	38.9		
	50	36.8	35.0	35.2		
P	12.5	54.1	59.1	57.5	53	3.6
	25	52.3	54.2	51.5		
	50	49.2	48.7	50.1		
K	12.5	72.2	71.5	73.1	69.5	2.5
	25	69.6	70.4	68.4		
	50	65.7	66.8	67.6		

3.2 田间试验

田间试验是在黑龙江红星农场第 5-2 地块进行的,施肥面积 12 hm²。根据事先人工采集的土样,获得该地块 N、P、K 含量的养分图,再按照施肥指导量,生成施肥处方图。车载计算机结合处方图,当前车辆 GPS 位置信息以及车辆行进速度,通过施肥专家系统得到施肥量和 N、P、K 3 种肥料的配比,并根据现场控制系统采集的肥箱内的肥料质量值,推算出施肥流量信息,对施肥量和肥料配比进行微调,并将其发送给现场控制器,现场控制器对排肥槽电机转速进行实时调整,实现变量配肥施肥的精准控制。

图 6 为 N、P、K 3 种肥料按照不同配比施肥作业时,肥箱内肥料质量变化的情况,从曲线的斜率可以看出,

施肥控制系统具有较好的施肥配比精度。

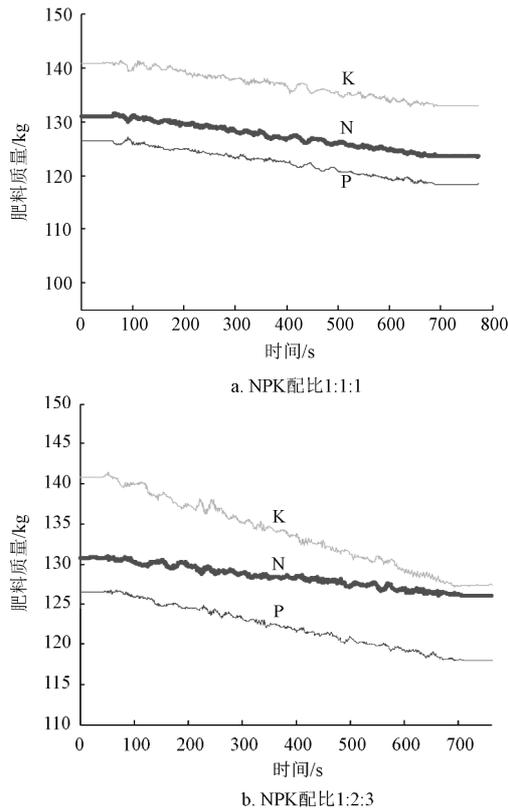


图 6 施肥配比试验

Fig.6 Fertilization experiment results

田间试验数据如表 3 所示，从试验统计结果可知，变量配肥施肥系统控制精度达到 95%以上。经农场技术人员统计，使用该变量施肥机进行施肥作业，相对于传统均匀施肥作业，每公顷地节约化肥 150 元，每公顷产量增收 1350 元，具有较好的经济效益。

表 3 田间试验数据

Table 3 Field experience data

试验编号	肥料	下料质量/kg	实际施肥质量/kg	目标施肥量/(kg·hm ²)	施肥面积/m ²	目标施肥质量/kg	误差/kg	施肥控制误差/%
1	N	3.19						
	P	3.15	9.44	75	1 208	9.06	0.38	4.2
	K	3.1						
2	N	5.01						
	P	7.41	15.35	500	300	15	0.35	2.3
	K	2.93						
3	N	5.13						
	P	15.26	30.67	1 000	300	30	0.67	2.2
	K	10.28						

4 结 论

1) 2F-6-BP1 型变量配肥施肥机采用压力传感器获取肥箱内肥料变化情况，解算出实际施肥量和施肥流量，作为施肥控制器的施肥反馈量，由 GPS 定位信息和施肥处方图确定给定量，从而构成一个变量施肥闭环控制系统，对于恶劣的田间作业环境具有很好的鲁棒性。

2) 施肥槽轮采用永磁型伺服电动机驱动，采用速度控制方式，闭环反馈 PID 控制方法，实现了变量配肥施肥精确控制，变量配肥施肥精度达到 95%以上。

3) 施肥处方图的科学性、实效性，对变量施肥机的作业效果有很大影响，变量施肥控制器的控制精度与施肥流量、车速检测的准确性有很大关系，变量施肥机系统的经济性与实用性等这些方面还需要进一步试验验证和完善。

[参 考 文 献]

[1] 曲桂宝, 田耘. 变量施肥的实现过程及其发展前景[J]. 中国农机化, 2005(4): 50—52.
 Qu Guibao, Tian Yun. The actualize process of variable rate of fertilization and its foreground of development[J]. Chinese agricultural mechanization, 2005(4): 50—52. (in Chinese with English abstract)

[2] 何勇. 精细农业[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003.

[3] 吴巍. 科学施肥技术[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[4] 张书慧, 齐江涛, 廖宗建, 等. 基于 CPLD 的变量施肥控制系统开发与应用[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8): 200—204.
 Zhang Shuhui, Qi Jiangtao, Liao Zongjian, et al. Research and application of control system for variable rate fertilizer applicator based on CPLD[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(8): 200—204. (in Chinese with English abstract)

[5] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[6] 李爱传, 王熙, 汪志强, 等. 电液驱动式变量施肥闭环控制系统研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(7): 272—275.
 Li Aichuan, Wang Xi, Wang Zhiqiang, et al. Research about variable rate fertilization closed-loop control system of electro-hydraulic speed[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(7): 272—275. (in Chinese with English abstract)

[7] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京机械工业出版社, 1994.

[8] Maleki M R, Mouazen A M, De Ramon B K H, et al. On-the-go variable-rate phosphorus fertilisation based on a visible and near-infrared soil sensor[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(1): 35—46.

[9] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(5): 114—117. (in Chinese with English abstract)

[10] 张书慧, 马成林, 吴才聪, 等. 一种精确农业自动变量施肥技术及其实施[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 129—131.
 Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Wu Caicong, et al. Development and application of a variable rate fertilizer applicator for

- precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 129—131. (in Chinese with English abstract)
- [11] John P Fulton, Scott A Shearer, Steven F Higgins, et al. Comparison of VRT granular applicators[C]//2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting. Canada: ASAE Paper, No 041113.
- [12] 杨星钊, 杨富营, 余泳昌. 智能控制变量施肥机械的试验设计[J]. 广东农业科学, 2010(8): 215—217.
- [13] 马旭, 马成林, 桑国旗, 等. 变量施肥机具的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(1): 50—53.
Ma Xu, Ma Chenglin, Sang Guoqi, et al. Design of variable rate fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(1): 50—53. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张书慧, 马成林, 杜巧玲, 等. 精确农业自动变量施肥机控制系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 113—116.
Zhang Shuhui, Ma Chenglin, Du Qiaoling, et al. Design of control system of variable rate fertilizer applicator in precision agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(1): 113—116. (in Chinese with English abstract)
- [15] 周国祥, 苗玉彬, 周俊, 等. 基于现场总线技术的农业机械控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(8): 93—96.
Zhou Guoxiang, Miao Yubin, Zhou Jun, et al. Study on control system of agricultural machinery based on field bus[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘阳春, 张小超, 伟利国, 等. 一种变量施肥技术的实现及其台架试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9): 159—162.
Liu Yangchun, Zhang Xiaochao, Wei Ligu, et al. Design and experiment of a variable rate fertilization control system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 159—162. (in Chinese with English abstract)
- [17] 郑传涛, 杨莉, 刘祎, 等. 基于 AgGPS 的自动变量施肥控制系统研究[J]. 青岛理工大学学报, 2007, 28(2): 90—93.
Zheng Chuantao, Yang Li, Liu Yi, et al. Research of automatic variable fertilization control system based on AgGPS[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2007, 28(2): 90—93. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 with English abstract)
- [19] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [20] Yule I J, Kihnen G, Nowak M. A tractor performance monitor with DGPS capability[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1999, 23(2): 155—174.
- [21] 于合龙, 陈桂芬, 赵兰坡, 等. 吉林省黑土区玉米精准施肥技术研究与应用[J]. 吉林农业大学学报, 2008, 30(5): 753—759, 768.
Yu Helong, Chen Guifen, Zhao Lanpo, et al. Study and application of maize precision fertilization technology in black soil of Jilin province[J]. Journal of Jilin agricultural university, 2008, 30(5): 753—759, 768. (in Chinese with English abstract)

Design and experiment of 2F-6-BP1 variable rate assorted fertilizer applicator

Wei Ligu, Zhang Xiaochao*, Yuan Yanwei, Liu Yangchun, Li Zhuoli

(State Key Laboratories in areas of Soil-Plant-Machine System Technology,
Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: 2F-6-BP1 variable rate assorted fertilizer applicator was designed to solve the problem of lacking suitable variable rate fertilizer application with big power tractor in China. By accessing the speed of the tractor via a speed indicator, and ascertaining the location of the applicator in the field via GPS system, the expert system of the applicator could determine the dispensing rate of the fertilizers based on the preloaded fertilizer maps storing the desired fertilizer level. The expert system of the applicator adjusted fertilizing to attain precision fertilization according to the feedback fertilizer flow. The system design, working process and experiments of the applicator were also explained in the paper. The experiment results indicate that the maximal weighing error of the variable rate fertilizer applicator is 0.65% and the fertilization precision can reach above 95%. Therefore, the variable rate fertilizer is good economic and practical in the precision agriculture.

Key words: fertilizer, applicator, design, precision agriculture, global position system