

高地隙植保机速度自动控制系统研制

杜娟¹ 于明群¹ 陈艳普¹ 李敏¹ 金诚谦^{1,2} 印祥^{1*}

(1. 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000;
2. 农业农村部 南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要 针对当前高地隙植保机自动化程度不高、作业时行驶速度变化较大影响施药质量等问题,设计具备手动、自动切换功能的速度自动控制系统。以雷沃 ARBOS 高地隙植保机为研究平台,采用机电一体化控制方法对其变速执行机构、速度控制过程与特性进行分析,采用基于比例微分算法的速度控制方法,实时计算并控制速度执行机构的动作,实现行驶速度的自动调节。田间试验表明,高地隙植保机速度自动控制系统能够按照速度指令控制静液压行走驱动系统的输出,在平均行驶速度为 0.21、0.83 和 0.94 m/s 时,最大速度控制误差分别为 0.05、0.10 和 0.10 m/s,满足高地隙植保机行驶速度控制的基本要求。

关键词 高地隙植保机; 行驶速度; 自动控制; 电动推杆

中图分类号 S224.3

文章编号 1007-4333(2019)12-0104-07

文献标志码 A

Development of an automatic speed control system for high-clearance sprayer

DU Juan¹, YU Mingqun¹, CHEN Yanpu¹, LI Min¹, JIN Chengqian^{1,2}, YIN Xiang^{1*}

(1. College of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract With respect to problems including lack of automation and poor spraying quality due to varying speed existing in high-clearance sprayer, an automatic speed control system was developed for the high-clearance sprayer of LOVOL ARBOS by investigating its transmission mechanism and characteristics in speed control based on mechatronic control methods. A speed control method was used to control the speed executor based on proportion-differential algorithm to realize automatic adjustment of the vehicle speed. Field tests showed that the newly developed automatic speed control system could control the power output of the HST driving system to realize the desired speed. The maximum speed errors were 0.05, 0.10 and 0.10 m/s when the desired value was set to 0.21, 0.83 and 0.94 m/s, respectively indicating that the system could meet requirements for speed control of the high-clearance sprayer.

Keywords high-clearance sprayer; moving speed; automatic control; electric putter

作为一种自走式农业机械,高地隙植保机具有高地隙地盘和宽幅喷雾喷杆,在大田作物的病虫害防治与叶面肥喷施中发挥着重要作用^[1-2]。目前,高地隙植保机的自动化、智能化程度不高、药液喷洒不均匀所导致的驾驶人员作业强度较大、农药利用率不高和环境污染等问题较为严重^[3-5]。行驶速度

作为农业机械的关键作业参数之一,对植保机药液喷洒均匀性、单位面积施药量、雾滴沉积分布有较大影响,因此,行驶速度控制对提高喷药作业质量有一定的实际意义^[6-9]。

目前,与田间施药量相关的植保机行驶速度控制方法主要有:1)控制喷雾载体行驶速度恒定,通过

收稿日期:2019-04-01

基金项目:国家重点研发计划(2017YFD0700405);山东省高等学校科技计划项目(J17KA145);山东省高等学校优势学科人才团队培育计划项目(2016-2020);国家级大学生创新创业训练计划项目(201810433019);山东省农机装备研发创新计划项目(2018YF006)

第一作者:杜娟,讲师,博士,主要从事高效植保技术与装备研究,E-mail:dujuan0427@163.com

通讯作者:印祥,副教授,博士,主要从事农业装备自主导航与智能控制研究,E-mail:666513@163.com

压力调流^[10-11]、变量喷头调流^[12-13]、脉冲宽度调节控制调流^[14-16]等技术控制药液流量；2)保持喷药压力和药液流量恒定，根据田间施药量控制喷雾载体的行驶速度^[17-19]。改变植保机作业速度是一种控制田间施药量的快捷有效方法^[20]。现有高地隙植保机的速度控制大多依靠驾驶员手动调节，而由于田间作业环境的多样性和复杂性，行驶速度仅依靠手动调节很难达到均匀稳定^[4,21]。在喷施过程中，尤其在喷杆喷雾喷幅较宽的条件下，速度变化较大会增加喷杆的振动，难以保证施药质量^[22-23]。

本研究拟以雷沃 ARBOS 系列高地隙植保机为研究平台，采用机电一体化控制方法，设计一种速度自动控制系统，实现手动、自动 2 种速度控制模式的切换、速度指令的实时读取与执行等功能，并使高地隙植保机保持均匀稳定的作业速度，以期为高地隙植保机的无人驾驶和自动导航、智能变量作业提供一定的技术支撑。

1 系统构成

本研究所采用的测试平台是雷沃 ARBOS 系列 ZP9500 型高地隙植保机，具备静液压驱动系统 (Hydro-static transmission, HST) 和机械式 3 挡变速机构，满足道路行驶、田间喷洒等作业需求。田间作业时，操作人员可通过推拉液压变速挡杆实现前进、后退和无级变速等基本行驶功能。根据其变速机构的功能特点和操纵方式，本研究制定了高地隙植保

机速度自动控制系统具体实施方案。如图 1 所示，速度自动控制系统主要包括速度控制器、电机驱动器、电动推杆、模拟电位器等。速度控制器可读取 CAN 总线上的速度指令，也可读取模拟电位器的输出值。其中，模拟电位器由人工手动调节，其输出值可作为速度指令，以保留人工操作模式。速度控制器根据速度指令或模拟电位器的输出值向电机驱动器发送控制信号，控制电动推杆的伸缩动作，从而调节 HST 变速器以实现速度控制。

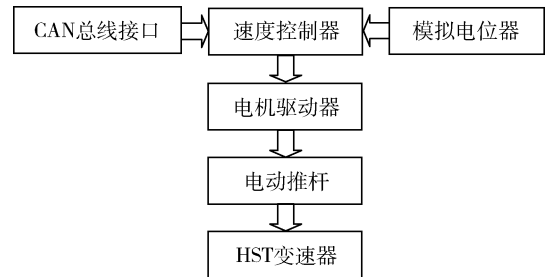
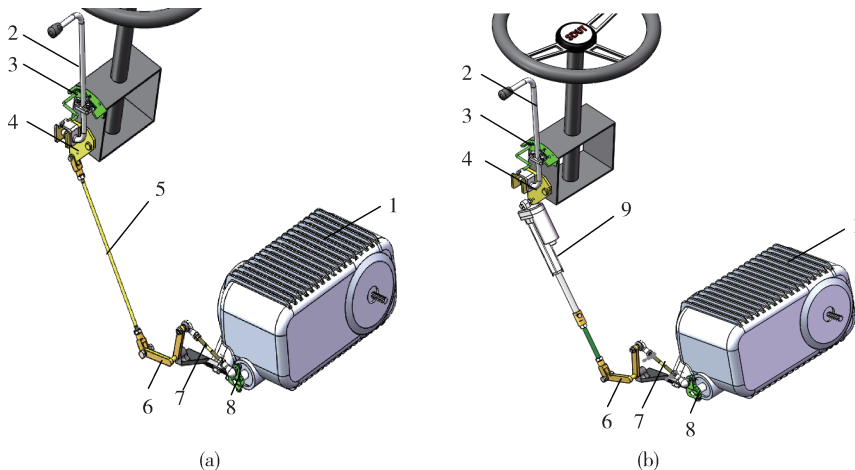


图 1 高地隙植保机速度自动控制系统框图

Fig. 1 Automatic speed control system block diagram for the high-clearance sprayer

2 变速机构设计

1) HST 变速操作机构工作原理。雷沃 ARBOS 系列 ZP9500 型高地隙植保机采用 HST 无级变速系统 (图 2(a))，通过手动推拉 HST 变速操作机构的手动变速杆实现前进、后退、加速、减速、停止等基



1. HST 变速器; 2. 手动变速杆; 3. 导程板; 4. 转臂; 5. 长拉杆; 6. 转接臂; 7. 球头拉杆; 8. HST 摇臂; 9. 电动推杆

1. HST transmission; 2. Manual gear shift; 3. Lead plate; 4. Arm; 5. Long rod; 6. Transfer arm; 7. Ball head rod; 8. HST arm; 9. Electric putter

图 2 ZP9500 型高地隙植保机 HST 变速操作机构 (a) 与更换电动推杆后的变速操作机构 (b)

Fig. 2 HST speed control mechanism of model ZP9500 high-clearance sprayer (a) and the speed control mechanism replaced electric putter (b)

本行驶功能。手动变速杆通过转臂、长拉杆、转接臂、球头拉杆与 HST 摇臂联接。手动变速杆沿导程板的不同位置对应 HST 摇臂的不同转动角度, 决定高地隙植保机的行驶速度。分析 HST 变速操作机构的工作原理可知, 长拉杆的长度决定了 HST 摇臂的旋转角度。

2) 自动变速执行机构。基于上述 HST 变速操作机构的工作原理, 本研究设计了自动变速执行机构以调节 HST 摇臂的旋转位置, 实现行驶速度的自动控制(图 2(b))。在 HST 变速操作机构的基础上, 在固定手动变速杆的情况下, 采用改变长拉杆长度的方式进行速度调节。根据各个杆件的尺寸参数和变速机构的动作要求, 用电动推杆 9 代替长拉杆 5。电动推杆的额定电压 12 V、行程 100 mm、推力 1 000 N, 其上集成电位计用以测量推杆伸出长度。

3 控制系统设计

3.1 电机驱动器设计

由自动变速执行机构中电动推杆的机械结构和工作原理可知, 电动推杆的伸缩动作由推杆电机正反转决定。因此, 本研究设计一种电动推杆电机驱动器, 由此来控制电动推杆电机的正反转。

电动推杆电机驱动器利用 4 个 MOS 场效应管组成 H 桥电机驱动回路(图 3)。场效应管 M1、M2、M3、M4 的导通和截止由 4 个端口 IN1、IN2、IN3、IN4 分别控制。当 M1 和 M4 导通、M2 和 M3 截止时, 电流由电机的 A 端流向 B 端, 电动推杆电机正转。当 M1 和 M4 截止、M2 和 M3 导通时, 电流由电机的 B 端流向 A 端, 电机反转。

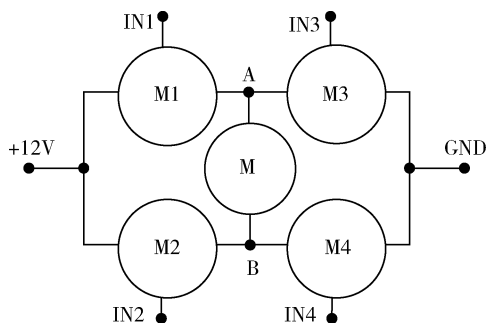


图 3 电动推杆电机驱动器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of motor driver for the electric putter

3.2 速度控制器设计

速度控制器需在速度自动控制模式下读取

CAN 总线上的速度指令, 在手动控制模式下读取模拟电位器的输出值。根据上述指令读取要求和电动推杆电机驱动器的控制方式, 设计速度控制器, 其原理见图 4。

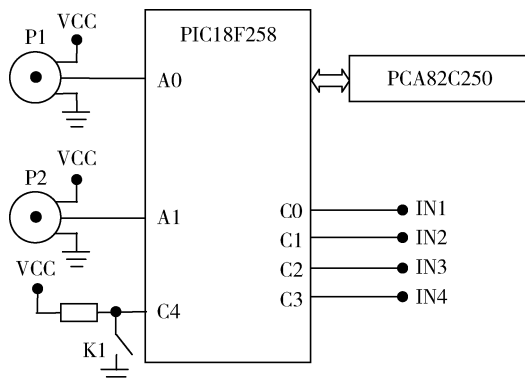


图 4 速度控制器原理图

Fig. 4 Schematic diagram of speed controller

速度控制器以 PIC 系列单片机 PIC18F258 为核心处理器, 采用 PCA82C250 芯片作为 CAN 总线物理接口接收发布到 CAN 总线上的速度指令。由数字端口 C0、C1、C2、C3 分别输出高低电平控制信号至电动推杆电机驱动器的 IN1、IN2、IN3、IN4 以控制电动推杆电机的旋转方向。模拟电位器 P1 的输出端连接至单片机的模拟输入端口 A0, 经 A/D 转换后作为速度指令。电动推杆电位器 P2 的输出端连接至单片机的模拟输入端口 A1。速度控制器通过端口 C4 读取开关 K1 的状态以判断手动/自动模式, 当 K1 闭合时为低电平, 判断为自动模式; 当 K1 打开时为高电平, 为手动模式。

3.3 软件设计

根据速度自动控制系统的速度控制原理、变速执行机构的动作特点、速度指令的输入方式等, 确定了速度控制器的程序流程图(图 5)。系统上电初始化后, 速度控制器读取开关 K1 的状态, K1 打开时读取模拟电位器 P1 的模拟输出值, 进行 A/D 变换以转换为数字速度指令, K1 闭合时读取 CAN 总线上的数字速度指令; 对速度指令进行标度变换, 变换后数值为 P , 同时读取电动推杆电位器 P2 的输出值 P' 。比较并计算 P 和 P' 的差值 ΔP , 若 $\Delta P > 0$, 推杆伸长; 若 $\Delta P < 0$, 推杆收缩; 若 $\Delta P = 0$, 推杆停止。为了更加精确的控制行驶速度, 本研究采用 PD(比例微分)控制算法, 实时控制推杆动作以保证稳定的行驶速度, 推杆动作时间采用式(1)计算:

$$T = K_p E_i + K_D (E_i - E_{i-1}) \quad (1)$$

式中： T 为推杆动作时间，s； K_p 和 K_D 分别为比例系数和微分数； E_i 为期望速度与实际速度的差值，m/s。

依据速度控制器程序流程，利用 MPLAB IDE

开发环境编写了速度控制器的程序，并根据硬件接口要求，完成速度控制器的 PCB 板设计和制作。在实验室内对速度自动控制系统进行了初步调试和功能验证。

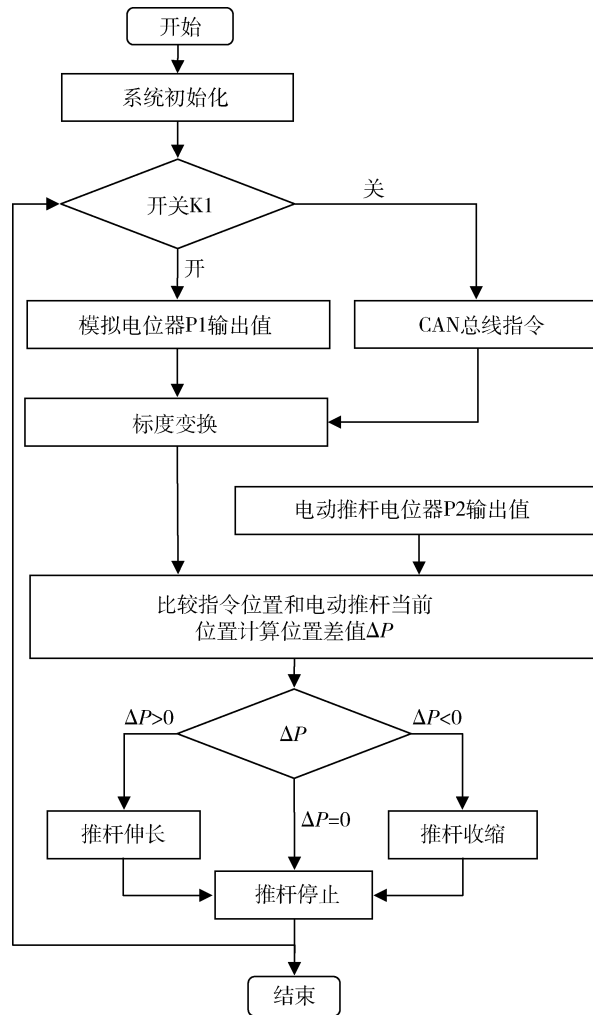


图 5 速度控制器程序流程

Fig. 5 Flow chart of the speed controller

4 田间测试与结果分析

将所研制的速度自动控制系统及其装置集成安装到 ZP9500 型高地隙植保机上，在山东理工大学试验农场进行了田间速度测试。试验时间为 2019 年 3 月 21 日—22 日，试验区域为北方冬小麦种植区，小麦正处于返青期。

测试过程中，采用 RTK-GNSS 高精度定位系统记录行驶轨迹和行驶速度，其接收机采用天宝 BD982 定位主板和 Zephyr 天线，具备 RTX 卫星差分信号接收功能，定位误差 < 3 cm。将 GNSS 接收

机固定安装于驾驶室上方，分别测量模拟电位器指令输入模式和 CAN 总线指令控制模式下的行驶速度。田间速度测试试验结果见表 1，其中，模拟指令是指模拟电位器的输出经 A/D 变换后的数字量，速度值是记录时间段内的平均速度，负值代表后退速率大小，正值代表前进速率大小。由表 1 可知，速度指令与速率大小呈线性关系。

图 6 示出 CAN 总线指令为 107 和 180、模拟指令为 173 时，由 RTK-GNSS 接收机记录测量的行驶速度变化曲线。可见，在速度指令不变的情况下，高地隙植保机行驶速度基本保持不变。在

CAN总线指令为107和180、模拟指令为173时，平均行驶速度分别为0.21、0.94和0.83 m/s，由RTK-GNSS所测得的速度最大误差分别为

0.05、0.10和0.10 m/s。在实际作业过程中，可以将以上速度测试结果为参考进行速度调节与控制。

表1 高地隙植保机速度自动控制系统田间测试结果

Table 1 Test results of the automatic speed control system of the high-clearance sprayer in the field

CAN总线 CAN bus		模拟电位器 Analog potentiometer	
数字指令 Digital signal	速度/(m/s) Speed	模拟指令 Analog signal	速度/(m/s) Speed
40	-1.17	40	-1.16
60	-0.94	60	-0.91
80	-0.64	80	-0.63
107	-0.21	100	-0.32
120	0.00	120	0.00
140	0.32	140	0.32
160	0.65	160	0.66
180	0.94	173	0.83
200	1.26	200	1.26

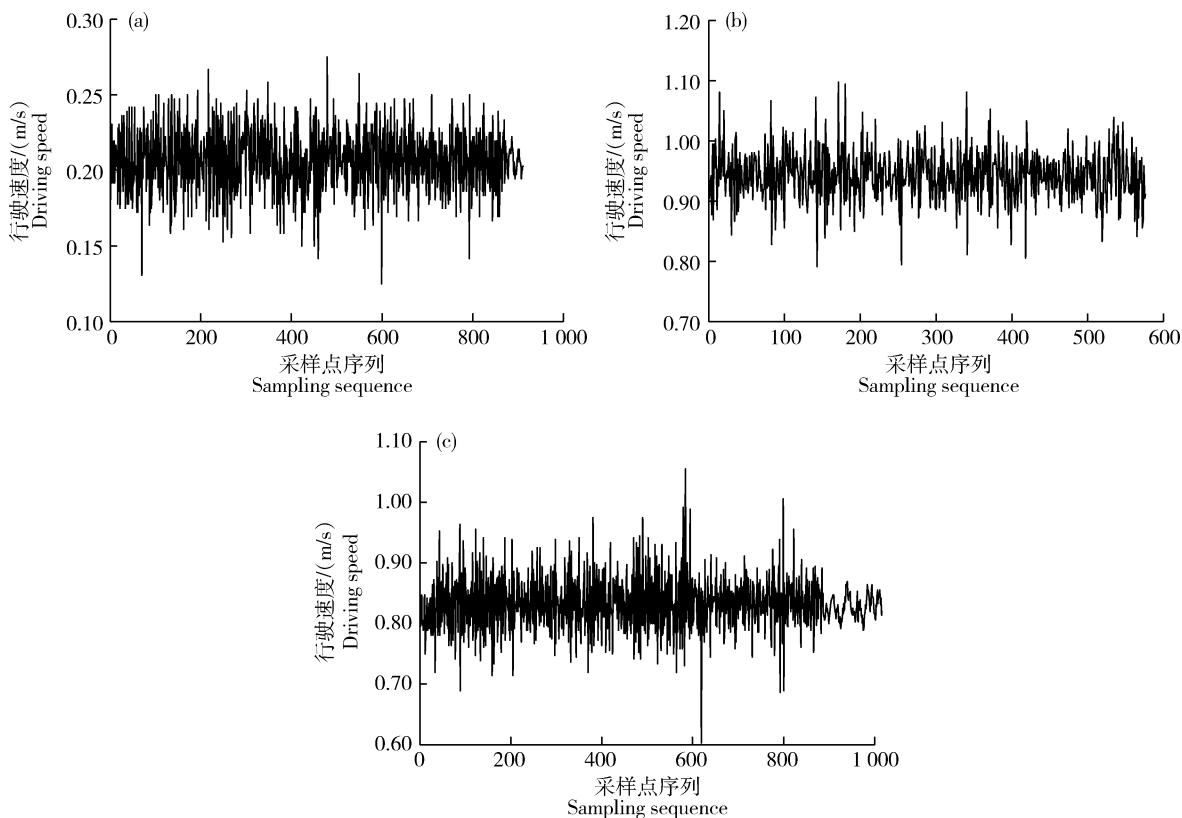


图6 CAN总线指令为107(a)和180(b),模拟指令为173(c)的速度控制曲线

Fig. 6 Speed control curve with CAN bus signal 107 (a), 180 (b) and analog signal 173 (c)

5 结束语

针对当前高地隙植保机自动化程度不高、作业时行驶速度变化较大影响施药质量等问题,以雷沃 ARBOS 高地隙植保机为研究平台,设计了一种具备手动、自动切换功能的速度自动控制系统。

1)对 HST 变速操作机构的工作原理进行了分析,设计了自动变速执行机构,以电动推杆代替长拉杆,通过改变电动推杆的长度进行速度调节。在此基础上,完成了电动推杆电机驱动器、速度控制器及其软件程序的设计。

2)速度自动控制系统能够接收 CAN 总线速度指令和模拟电位器指令,可在数字速度指令和人工调节两种速度控制模式间切换,具备相同的速度控制稳定性;

3)田间速度测试结果表明,该系统能够正确执行速度控制指令,将 HST 摇臂旋转至指定位置,使高地隙植保机保持均匀稳定的作业速度。

本研究设计的速度自动控制系统在数字指令模式下,速度控制器能够通过 CAN 接收其它控制装置发送的速度指令,可为高地隙植保机的无人驾驶和自动导航、智能变量作业提供一定的技术支撑。

参考文献 References

[1] 林立恒,侯加林,吴彦强,李天华,刘向峰,郭凤江. 高地隙自走式喷雾机电控液压转向系统设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(6):91-96
Lin L H, Hou J L, Wu Y Q, Li T H, Liu X F, Guo F J. Design of electro-hydraulic steering system for high clearance self-propelled sprayer[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(6):91-96 (in Chinese)

[2] 张铁,董祥,尹素珍,杨学军,严荷荣,巩琼. 轻便型高地隙喷杆喷雾机大豆田间施药试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 182-188
Zhang T, Dong X, Yin S Z, Yang X J, Yan H R, Gong Q. Spraying performance of lightweight high clearance boom sprayer in soybean field [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(S1): 182-188 (in Chinese)

[3] 刘兆朋,张智刚,罗锡文,王辉,黄培奎,张健. 雷沃 ZP9500 高地隙喷雾机的 GNSS 自动导航作业系统设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1):15-21
Liu Z P, Zhang Z G, Luo X W, Wang H, Huang P K, Zhang J.

Design of automatic navigation operation system for Lovol ZP9500 high clearance boom sprayer based on GNSS [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(1):15-21 (in Chinese)

[4] 裴亮,李晔,冯耀宁,张晓,陈晓,缪友谊. 基于 PLC 的喷杆喷雾机变量喷雾自动控制系统设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 129-132
Pei L, Li Y, Feng Y N, Zhang X, Chen X, Miao Y Y. Design of variable spray automatic control system for boom sprayer based on PLC [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(4):129-132 (in Chinese)

[5] 王宝山,王万章,王森森,种东风,陈蒋. 全液压驱动高地隙履带作业车设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1):471-476
Wang B S, Wang W Z, Wang M S, Chong D F, Chen J. Design and experiment of full hydraulic drive high clearance tracked vehicle[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(S1): 471-476 (in Chinese)

[6] 吕晓兰,傅锡敏,宋坚利,何雄奎. 喷雾技术参数对雾滴飘移特性的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1):59-63
Lv X L, Fu X M, Song J L, He X K. Influence of spray operating parameters on spray drift [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 59-63 (in Chinese)

[7] 许林云,张昊天,张海锋,徐业勇,徐铭铭,蒋雪松,张慧春,贾志成. 果园喷雾机自动对靶喷雾控制系统研制与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22):1-9
Xu L Y, Zhang H T, Zhang H F, Xu Y Y, Xu M M, Jiang X S, Zhang H C, Jia Z C. Development and experiment of automatic target spray control system used in orchard sprayer [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22):1-9 (in Chinese)

[8] Celen I H, Arin S, Durgut M R. The effect of the air blast sprayer speed on the chemical distribution in vineyard [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2008, 11(11):1472-1476

[9] 吕晓兰,傅锡敏,吴萍,丁素明,周良富,闫惠娟. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 70-75
Lv X L, Fu X M, Wu P, Ding S M, Zhou L F, Yan H J. Influence of spray operating parameters on droplet deposition [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(6):70-75 (in Chinese)

[10] 邱白晶,李坤,沈成杰,徐溪超,毛罕平. 连续可变量喷雾系统响应特性试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(9):32-35

- Qiu B J, Li K, Shen C J, Xu X C, Mao H P. Experiment on response characteristics of variable rate continuous spraying system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(9): 32-35 (in Chinese)
- [11] Gonzalez R, Pawlowski A, Rodriguez C, Guzman J L, Sanchez-Hermosilla J. Design and implementation of an automatic pressure-control system for a mobile sprayer for greenhouse applications[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2012, 10(4): 939-949
- [12] Needham D L, Holtz A J, Giles D K. Actuator system for individual nozzle control of flow rate and spray droplet size[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2012, 55(2): 379-386
- [13] Womac A R, Bui Q D. Design and tests of a variable-flow fan nozzle[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2002, 45(2): 287-295
- [14] Lebeau F, El Bahir L, Destain M F, Kinnaert M, Hanus R. Improvement of spray deposit homogeneity using a PWM spray controller to compensate horizontal boom speed variations[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2004, 43(2): 149-161
- [15] 魏新华, 蒋杉, 张进敏, 李青林. 脉宽调制间歇喷雾变量喷施系统施药量控制[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(2): 87-92
- Wei X H, Jiang S, Zhang J M, Li Q L. Application rate control characteristics of blended pulse variable rate application system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2): 87-92 (in Chinese)
- [16] 邱白晶, 闫润, 马靖, 管贤平, 欧鸣雄. 变量喷雾技术研究进展分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(3): 59-72
- Qiu B J, Yan R, Ma J, Guan X P, Ou M X. Research progress analysis of variable rate sprayer technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(3): 59-72 (in Chinese)
- [17] Langenakens J J, Clijmans L, Ramon H, de Baerdemaeker J. The effects of vertical sprayer boom movements on the uniformity of spray distribution[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1999, 74(3): 281-291
- [18] 孙诚达, 邱威, 丁为民, 顾家冰. 梨树风送喷雾关键作业参数优化与试验[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 30-38
- Sun C D, Qiu W, Ding W M, Gu J B. Parameter optimization and experiment of air-assisted spraying on pear trees [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(24): 30-38 (in Chinese)
- [19] 金盛芳. 国外喷雾机喷量稳定性的自动调节装置[J]. *粮油加工与食品机械*, 1980(11): 45-47
- Jin S F. Auto-regulating device for spray volume stability of foreign sprayer [J]. *Machinery for Cereals, Oil and Food Processing*, 1980(11): 45-47 (in Chinese)
- [20] 邓巍, 丁为民, 何雄奎. 变量喷施技术及其雾化特性评价方法综述[J]. *中国农业大学学报*, 2009, 14(3): 94-102
- Deng W, Ding W M, He X K. Technologies and evaluation methodology of variable spray[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2009, 14(3): 94-102 (in Chinese)
- [21] 郭辉, 陈恒峰, 吕全贵, 徐志强, 高国民, 许晓波. 高地隙轮式自走喷雾机液压系统的设计研究[J]. *农机化研究*, 2018, 40(10): 51-56
- Guo H, Chen H F, Lv Q G, Xu Z Q, Gao G M, Xu X B. Design and research on hydraulic system of high gap wheel self-propelled sprayer[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(10): 51-56 (in Chinese)
- [22] Kennes P, Anthonis J, Clijmans L, Ramon H. Construction of a portable test rig to perform experimental modal analysis on mobile agricultural machinery [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 228(2): 421-441
- [23] 崔龙飞, 薛新宇, 丁素明, 顾伟, 陈晨, 乐飞翔. 双钟摆主被动悬架式大型喷雾机喷杆动力学仿真与试验[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(2): 87-95
- Cui L F, Xue X Y, Ding S M, Gu W, Chen C, Le F X. Modeling and simulation of dynamic behavior of large spray boom with active and passive pendulum suspension[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2): 87-95 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春