

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.010

# 基于玉米播深控制的农田地形模拟系统设计与试验

付卫强<sup>1,2</sup> 董建军<sup>2</sup> 丛岳<sup>2</sup> 卢彩云<sup>2</sup> 高娜娜<sup>2</sup> 张俊雄<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 开展了玉米播种单体试验台用仿形机构研究,设计了一种可适用于地形上下起伏和地形倾斜的农田地形模拟系统。系统由地形模拟机构、液压系统、电控系统等组成。重点对地形模拟机构进行数学建模,得出了被仿形地形倾斜角与液压缸伸缩的几何关系,并计算确定了地形模拟机构机械尺寸参数。对液压缸进行受力分析,在此基础上对仿形机构的液压系统参数进行了理论计算,确定了液压系统参数,集成电控系统形成了农田地形模拟系统。对农田模拟系统进行了地形模拟试验,在2.0 m/s作业速度下高程模拟误差平均值为1.61 mm,坡度模拟误差平均值为0.56°。试验结果表明,农田地形模拟系统对地形高程和坡度模拟的快速性和准确性能满足农田地形模拟的要求,为播种播深控制系统试验提供了试验平台。

**关键词:** 农田地形; 地形模拟系统; 液压系统; 电控系统; 受力分析

**中图分类号:** S604 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0058-08

## Design and Test of Farmland-terrain Simulation System for Corn Sowing Depth Control

FU Weiqiang<sup>1,2</sup> DONG Jianjun<sup>2</sup> CONG Yue<sup>2</sup> LU Caiyun<sup>2</sup> GAO Na'na<sup>2</sup> ZHANG Junxiong<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

(2. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** The laboratory simulation of the sowing depth consistency control system is mostly testing parallel four-bar linkage or up-and-down movement due to surface fluctuation, while the actual farmland surface morphology varies irregularly in both elevation and slope. In view of this, a farmland-terrain simulation system suitable for rugged topography is designed to study the irregularities of farmland surface morphology led by both topographic fluctuation and terrain tilt. The system consists of terrain simulation mechanism, hydraulic system, control system, etc. The terrain simulation mechanism is connected to the rack through hydraulic cylinder to simulate farmland surface fluctuation. The hydraulic system controls the hydraulic cylinder to drive the terrain simulation mechanism through the electro-hydraulic proportional directional valve. The control system controls hydraulic system and drives the terrain simulation mechanism according to the topographic data. The physical parameters of the terrain simulation mechanism are achieved by mathematic modeling of the profiling mechanism and building the geometrical relationship between the telescopic gradient angle and the expansion or contraction of the hydraulic cylinders. Based on the force analysis of hydraulic cylinder, the parameters of the hydraulic system are determined by theoretical calculation. In the simulation at 2.0 m/s operating speed, the average elevation error is 1.61 mm and the average slope error is 0.56°. The experimental results indicate that the system showed rapid and accurate performance on terrain elevation and slope simulation, and it can meet the requirements of farmland terrain simulation.

**Key words:** farmland topography; terrain simulation system; hydraulic system; control system; force analysis

收稿日期: 2017-07-01 修回日期: 2017-11-21

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2013AA102308)、农业部引进国际先进农业科学技术计划(948计划)项目(2016-X26)和黑龙江省农垦总局科技计划项目(HNK 135-06-05)

**作者简介:** 付卫强(1978—),男,博士生,北京农业信息技术研究中心副研究员,主要从事农机智能装备研究,E-mail: fuwq@nrcita.org.cn

**通信作者:** 张俊雄(1979—),男,副教授,博士生导师,主要从事机械制造、机器视觉及农业机器人技术研究,E-mail: cau2007@cau.edu.cn

## 引言

播种深度是玉米播种机播种作业中的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>,对玉米产量具有非常大的影响<sup>[3-6]</sup>。精密播种作业质量是由仿形、开沟、排种、覆土及镇压5个主要工作部件综合作用决定的,任何一个部件结构性能存在问题都会影响精密播种作业的整体质量<sup>[7]</sup>。种子的覆盖质量及播深的一致性对种子出苗和作物产量有着重要影响。美国 MOLATUDI 等<sup>[8-9]</sup>开展了玉米播种深度对出苗和幼苗活力影响研究。德国 Amazone 公司研制的深度控制装置采用超声波传感器实时检测开沟深度,通过液压系统主动控制开沟深度<sup>[10]</sup>。美国 Ag Leader 等公司<sup>[11-13]</sup>采用销轴传感器感应限深轮状态,通过控制液压缸提高播深一致性。美国 CNH 公司也申请了相关专利<sup>[14]</sup>。国外在播深理论与播深控制装备方面进行了研究,并形成了相应的技术体系。

国内从20世纪80年代起开始播深控制技术研究<sup>[15-18]</sup>。王熙等<sup>[19-21]</sup>研发的播种自动仿形系统通过台架试验对流量控制阀开度和液压缸安装角度进行了改进,提高了系统的平稳性和可靠性。蔡国华等<sup>[22-23]</sup>研制了开沟深度自控系统试验台,模拟开沟深度过深或过浅时的稳态响应过程以及地表高低起伏时的动态响应过程,通过模拟板的上下直线运动模拟地形起伏。赵金辉等<sup>[24-25]</sup>构建的开沟深度控制系统试验台利用机械仿形机构检测地形,通过PLC控制电液系统驱动四连杆仿形机构实现了地形模拟。胡军<sup>[26]</sup>设计了地面仿形传感装置,安装在播种单体上与开沟器一起随机架向前运动。目前,播深控制技术的研究仍以田间试验为主,工作量大,试验周期长,控制单一变量较困难,且受季节影响大,给研究带来极大的不便<sup>[27-30]</sup>,甚至部分研究受试验条件限制仅进行了数字仿真和装置设计<sup>[31-34]</sup>。当前播深一致性控制系统实验室测试以平行四连杆机构或地表起伏的上下运动居多,而实际农田地表形态在高程和坡度方面呈不规则变化。

鉴于此,本文对玉米播种单体试验台用仿形机构进行研究,设计一种可适用于地形上下起伏和地形倾斜的农田地形模拟系统,为播深控制技术深入研究提供室内试验平台。

## 1 农田地形模拟系统设计

### 1.1 系统组成与工作原理

农田地形模拟系统主要由地形模拟机构、液压系统、电控系统等组成(图1)。地形模拟机构通过液压缸安装连接在机架上,用来模拟农田地表起伏。

通过电液比例阀控制液压缸动作,驱动地形起伏模拟机构。电控系统根据农田地形数据实时控制液压系统,驱动地形模拟机构,实现玉米播种作业过程中的农田地形模拟。

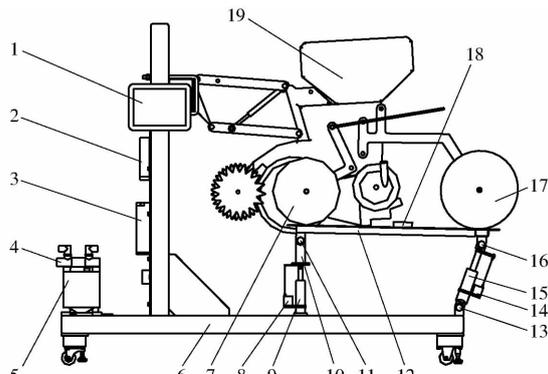


图1 地形模拟系统示意图

Fig. 1 Sketch of terrain simulation system

1. 车载计算机 2. 控制器 3. 电源模块 4. 液压阀组 5. 液压泵站 6. 基座 7. 限深轮 8. 位移传感器(F) 9. 液压缸(F) 10. U型固定架 11. 铰接件(F) 12. 地形模拟板 13. 铰接件(B) 14. 位移传感器(R) 15. 液压缸(R) 16. 铰接件(R) 17. 镇压轮 18. 倾角传感器 19. 玉米播种单体

### 1.2 地形模拟机构设计

#### 1.2.1 数学模型建立

地形模拟机构由地形模拟板支座、地形模拟板、液压缸等组成。地形模拟机构可以简化为图2所示四边形, $O$ 为液压缸(F)与基座焊接点处高度为 $H_2$ 的位置; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为地形模拟机构3个铰接点; $H_1$ 为U型固定架与液压缸(F)连接点到铰接点 $A$ 距离; $H_2$ 为铰接点 $C$ 到基座距离。几何关系如图3。

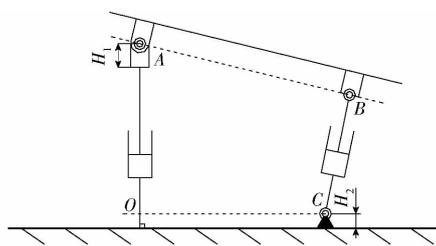


图2 地形模拟机构简图

Fig. 2 Sketch of terrain simulation mechanism

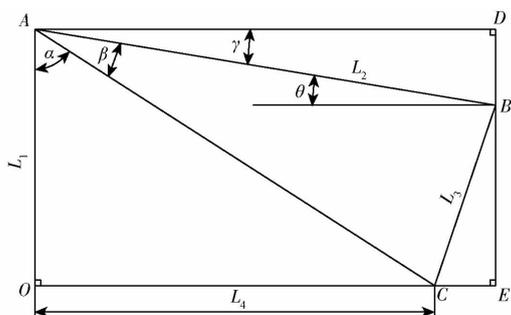


图3 地形模拟机构运动参数几何关系

Fig. 3 Geometric relationship of motion parameters of terrain simulation mechanism



### 1.3.2 液压缸负载分析

由图4可以得出液压缸(F)负载 $F_F$ 与液压缸等效长度的函数关系式

$$F_F = \frac{(L_2 - L_6) m_c g}{L_2} \cos\theta \quad (5)$$

由图4还可以得出液压缸(R)负载 $F_R$ 与液压缸等效长度的函数关系式

$$F_R = \frac{L_6 m_c g}{L_2 L_3} (L_1 \cos\theta - L_4 \sin\theta) \quad (6)$$

则液压缸(F)负载最大值 $F_{Fmax}$ 为1 076.45 N, 液压缸(R)负载最大值 $F_{Rmax}$ 为362.96 N。由此得出液压缸负载最大值 $F_{Fmax}$ 取值1 076.45 N。

### 1.4 液压系统设计

如图5所示, 试验台液压系统由液压缸、电液比例方向阀、液压锁、分流阀和液压泵站等组成。

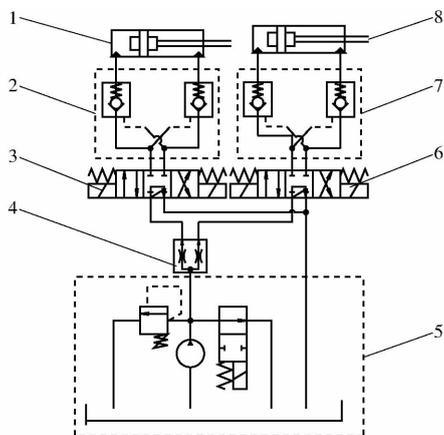


图5 液压系统原理图

Fig. 5 Schematic diagram of hydraulic system

1. 液压缸(F) 2. 液压锁(F) 3. 电液比例方向阀(F) 4. 分流阀 5. 油液泵站 6. 电液比例方向阀(R) 7. 液压锁(R) 8. 液压缸(R)

液压系统压力取决于液压缸负载, 则液压系统压力 $P_s$ 计算公式为

$$P_s = \frac{F_{Fmax}}{\frac{\pi D^2}{4}} \quad (7)$$

式中  $D$ ——液压缸内径, mm

根据液压缸所受的轴向负载和切向力大小, 依据机械设计手册选择液压缸内径 $D$ 为0.032 m, 活塞杆直径 $d$ 取0.018 m。则由式(7)液压系统压力设计最小值 $P_{smin}$ 为1.34 MPa。

液压系统流量设计取决于2个液压缸活塞截面积与活塞伸出速度。根据一般播种速度和最大地形坡度条件, 液压缸往复速度最大值 $v_{max}$ 不低于0.06 m/s, 则液压系统流量不小于5.79 L/min。

由此, 液压泵站设计参数为系统额定压力6.0 MPa, 液压泵排量选4.2 mL/r, 电动机额定转速

2 800 r/min, 工作电压220 V AC。

液压缸控制采用德国ARGO-HYTOS公司的电液比例方向阀, 型号为PRM2-06, 最大流量12 L/min( $\Delta P=1$  MPa), 工作电压12 VDC。

### 1.5 电控系统设计

电控系统由车载计算机、控制器、位移传感器(F)、位移传感器(R)和倾角传感器等组成(图6)。位移传感器(F)和位移传感器(R)分别固定在液压缸(F)和液压缸(R)上, 倾角传感器安装在地形模拟板上。

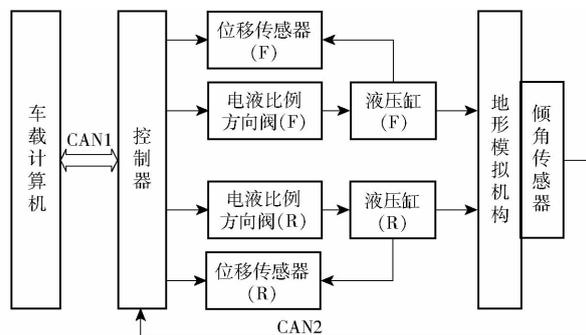


图6 电控系统原理框图

Fig. 6 Schematic diagram of control system

车载计算机采用台湾新汉公司的VMC1000型车载计算机, 具有7英寸触摸屏, 2路RS232接口, 1路控制器局域网络(Controller area network, CAN)总线接口, 3个USB接口, 工作电压9~36 VDC; 操作系统为Windows XP Embedded; 采用Visual MFC编程。控制器采用北京凯商公司的C101型控制器, 主要参数: 6路脉冲宽度调制(Pulse width modulation, PWM)功率输出, 2路CAN总线接口, 8路量程0~5 VDC的10位精度模拟量输入接口, 工作电压 $(12/24 \pm 1)$  VDC; 编程环境为OpenPCS, 结合SFC语言结构清晰与ST语言灵活的优势进行混合编程。倾角传感器采用意大利GFRAN公司的型号为GIBAO $\pm 45$ HC1倾角传感器, 双轴倾角测量范围为 $-45^\circ \sim 45^\circ$ , 精度为0.03°。位移传感器采用台州西域公司的WXY30-1000-V2型拉线式位移传感器, 量程范围1~1 000 mm, 输出信号0~5 VDC, 线性精度0.1% F.S。

电控系统工作流程如下: 车载计算机根据地形数据, 计算玉米播种作业时不同作业速度下地形变化对应的液压缸活塞杆位移和地形模拟机构姿态, 并将控制指令发送到CAN总线上。控制器解析从CAN总线接收控制指令, 得到液压缸活塞杆目标位移和地表模拟板倾斜角度目标值, 通过位移传感器和倾角传感器分别计算获取液压缸活塞杆实际位移和地表模拟板实际倾斜角度, 通过比较计算并输出控制量, 通过控制电液比例方向阀驱动液压缸驱动

地表模拟机构动作,从而实现农田地形模拟。

## 2 试验结果与分析

将地形模拟系统安装固定在玉米播种单体试验台上,将广州致远电子公司的 USBCAN - II 与数据采集模块通过 CAN 总线连接,采用 ZLGCAN Test 软件记录倾角传感器输出数据和液压缸行程。

### 2.1 地形模拟装置模拟坡度范围

在空载条件下先后给电液方向阀通电控制液压缸协调升降,对玉米播种单体试验台用地形模拟机构模拟坡度  $\theta$  范围进行调节,地形模拟机构模拟坡度范围试验测试数据见表 1。

表 1 模拟坡度范围测试数据

Tab.1 Test data of simulated slope range ( $^{\circ}$ )

试验次序	$\theta$ 最小值	$\theta$ 最大值	模拟坡度行程
1	-10.82	13.46	24.28
2	-10.82	13.44	24.26
3	-10.92	13.47	24.39
4	-10.82	13.45	24.27
5	-10.82	13.45	24.27
6	-10.91	13.43	24.34
均值	-10.85	13.45	24.30

从表 1 可以看出,模拟坡度最小值均值、最大值均值和模拟坡度行程均值分别为  $-10.85^{\circ}$ 、 $13.45^{\circ}$ 、 $24.30^{\circ}$ ,与对应的计算预期值相一致。被模拟地形坡度角  $\theta$  范围完全涵盖  $[-10^{\circ}, 10^{\circ}]$  区间,满足设计要求。

### 2.2 液压缸活塞位移数据分析

在空载条件下分别给电液比例方向阀(F)和电液比例方向阀(R)电磁铁输入最大控制电流,分别测量液压缸(F)的活塞杆和液压缸(R)的活塞杆完全伸缩所需要的时间,从而得到液压缸(F)和液压缸(R)活塞杆位移时序图(图 7、8)。从图 7 可以看出,液压缸(F)活塞杆完全伸出所需时间为 2.44 s,完全收回需 1.48 s,对应的,活塞杆运动速度分别为 0.065、0.108 m/s。从图 8 可以看出,在加载条件下液压缸(R)活塞杆完全伸出所需时间为 1.78 s,完全收回需 1.64 s,对应的,活塞杆运动速度分别为 0.101、0.110 m/s。

由此可以得出,液压缸活塞杆速度最大值  $v_{\max}$  均不低于 0.06 m/s,满足设计要求。

### 2.3 电控系统阶跃响应

在加载条件下对电控系统进行阶跃响应测试,液压缸(F)活塞杆位移范围 20 ~ 140 mm,地形模拟板坡度变化范围  $0^{\circ} \sim -10^{\circ}$ 。

从液压缸(F)活塞杆位移阶跃响应曲线(图 9)可以看出,活塞杆位移从 20 mm 到 140 mm 的调节

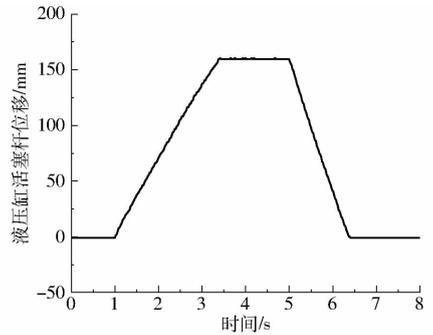


图 7 液压缸(F)活塞杆位移

Fig. 7 Displacement of hydraulic cylinder(F) rod

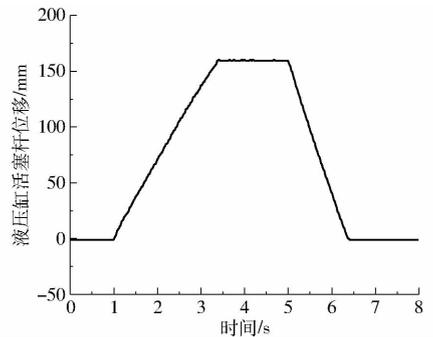


图 8 液压缸(R)活塞杆位移

Fig. 8 Displacement of hydraulic cylinder(R) rod

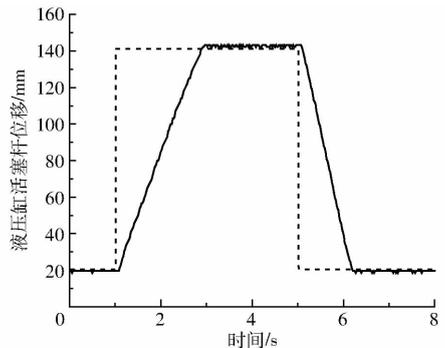


图 9 液压缸(F)活塞杆位移阶跃响应

Fig. 9 Step response of hydraulic cylinder(F) rod displacement

时间为 1.85 s,纯滞后时间 0.10 s,误差 1.67%;活塞杆位移从 140 mm 到 20 mm 的调节时间为 1.19 s,纯滞后时间 0.07 s,误差 1.67%。从地形模拟板倾角阶跃响应曲线(图 10)可看出,地形模拟板倾角从  $0^{\circ}$  到  $-10^{\circ}$  的调节时间为 1.42 s,纯滞后时间 0.14 s,误差 1.29%;地形模拟板倾角从  $-10^{\circ}$  到  $0^{\circ}$  的调节时间为 1.53 s,纯滞后时间 0.13 s,误差 1.51%。

系统的纯滞后时间最大值为 0.14 s,满足电液比例位置控制系统的纯滞后时间一般不大于 0.2 s 的要求;系统控制的最大误差为 1.67%,满足控制系统误差一般不大 2.0% 的要求。

### 2.4 农田地形模拟试验

采用 RTK - GNSS 对北京市国家精准农业示范基地农田进行测量,将测量数据通过高斯变换转换

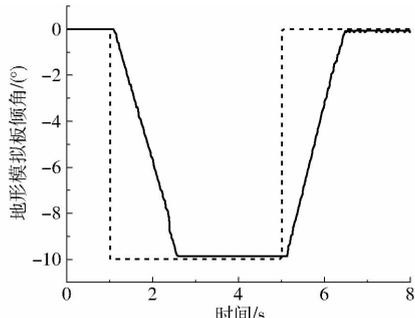


图 10 地形模拟板倾角阶跃响应

Fig. 10 Step response of Terrain simulation plate inclination

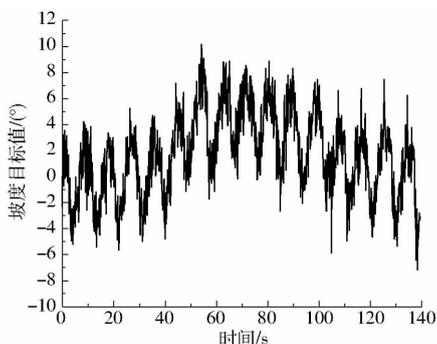


图 13 目标地形坡度曲线

Fig. 13 Target terrain slope curve

为大地坐标数据后提取三维地形数据。将包含位置、高程、坡度的目标地形数据以文本形式存入车载计算机作为地形输入农田地形模拟系统。分别对 0.5、1.0、2.0 m/s 3 种播种作业速度进行农田地形模拟,图 11~14 给出了 2.0 m/s 作业速度下的模拟试验结果。从图 11~14 可以得出,高程模拟误差均值为 1.61 mm;坡度模拟误差均值 0.56°。试验结果表明,农田地形模拟系统对地形高程和坡度模拟的快速性和准确性能满足农田地形模拟的要求。

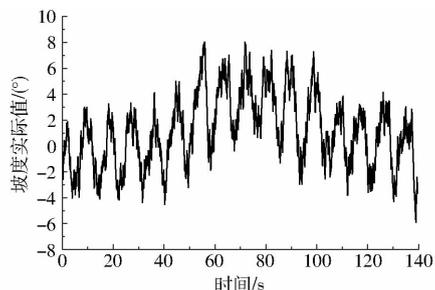


图 14 地形模拟系统模拟地形坡度曲线

Fig. 14 Terrain simulation system simulation of terrain slope curve

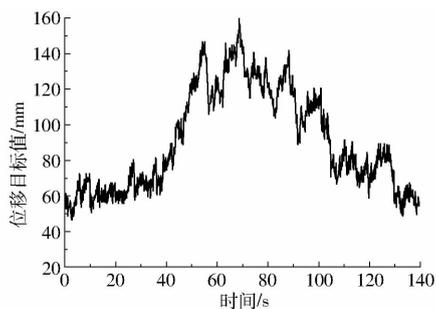


图 11 目标地形高程曲线

Fig. 11 Target terrain elevation curve

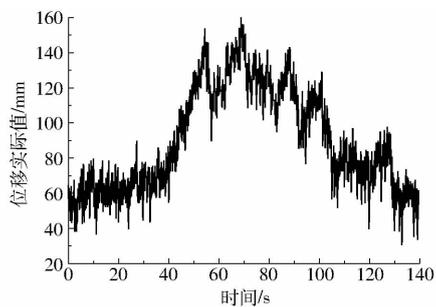


图 12 地形模拟系统模拟地形高程曲线

Fig. 12 Terrain simulation system simulation of terrain elevation curve

### 3 结论

(1)设计的基于玉米播深控制的地形模拟机构通过 2 个液压缸协同动作,可以实现地形上下起伏和地形倾斜的动态模拟,被模拟地形坡度角范围完全涵盖 $[-10^{\circ}, 10^{\circ}]$ 区间,满足设计要求。

(2)设计了驱动地形模拟机构的液压系统,试验结果表明液压缸(F)和液压缸(R)活塞杆伸缩速度满足液压缸活塞杆速度最大值  $v_{\max}$  均不低于 0.06 m/s 的设计要求。

(3)对电控系统进行了阶跃响应试验,试验结果表明,系统控制的最大误差为 1.67%,满足控制系统误差一般不大 2.0% 的要求。

(4)对农田模拟系统进行了地形模拟试验,在 2.0 m/s 作业速度下高程模拟绝对误差平均值为 1.61 mm,坡度模拟绝对误差平均值 0.56°,农田地形模拟系统对地形高程和坡度模拟的快速性和准确性能满足农田地形模拟的要求,从而为播种深度控制系统试验提供了试验平台。

### 参 考 文 献

- 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.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161106&journal\\_id=jcsam](http://www.jcsam.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)

- 2 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
- 3 曹慧英, 王丁波, 史建国, 等. 播种深度对夏玉米幼苗性状和根系特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2397 - 2404.  
CAO Huiying, WANG Dingbo, Shi Jianguo, et al. Effects of sowing depth on seedling traits and root characteristics of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(8): 2397 - 2404. (in Chinese)
- 4 曹慧英. 播深对夏玉米产量形成及其生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.  
CAO Huiying. Effects of sowing depth on grain yield and physiological characteristics of summer maize[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 5 岳丽杰, 文涛, 杨勤, 等. 不同播种深度对玉米出苗的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(5): 88 - 93.  
YUE Lijie, WEN Tao, YANG Qin, et al. Effects of different sowing depths on seeding emergence of maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 88 - 93. (in Chinese)
- 6 张瑞. 一年两熟地区麦茬地玉米免耕播种播深控制机构的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.  
ZHANG Rui. Study on precision depth-control mechanism of corn no-till planter in double-cropping area[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- 7 王景立. 精密播种机覆土与镇压过程对种子触土后位置控制的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.  
WANG Jingli. The research of position control after seed contacting soil in the process of soil covering and roiling with precision seeder[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 8 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.
- 9 MOCK J J, ERBACH D C. Influence of conservation tillage environments on growth and productivity of corn[J]. Agronomy Journal, 1977, 69(3): 337 - 340.
- 10 赵涵俊. 装在开沟器上的超声波探测器[J]. 粮油加工与食品机械, 1989(1): 45.
- 11 Ag Leader Technology. Hydraulic down force installation incompatibilities[EB/OL]. (2017-05-23)[2017-06-25]. <https://www.agleader.com>.
- 12 Ag Leader Technology. ISOBUS hydraulic down force row module detection[EB/OL]. (2016-05-04)[2017-02-25]. <https://www.agleader.com>.
- 13 Precision Planting LLC. Delta force system operation [EB/OL]. (2016-05-07)[2016-11-25]. <https://www.precisionplanting.com>.
- 14 ADAMS B T, WENDTE K W. Manual backup system for controlling fluid flow to cylinders within an agricultural implement; US 2012/10048159 A1[P]. 2012-03-01.
- 15 赵学笃, 张振京. 播种机开沟器平行四杆联接机构的最佳参数[J]. 吉林工业大学学报, 1982(4): 75 - 79.
- 16 李林. 播种机械的仿形机构[J]. 粮油加工与食品机械, 1981(6): 8 - 17.
- 17 张守勤, 马成林, 马旭, 等. 精密播种单体仿形机构的计算机仿真[J]. 农业工程学报, 1994, 10(1): 50 - 55.  
ZHANG Shouqin, MA Chenglin, MA Xu, et al. Computer simulation for the parallelogram linkage of precision planter unit (PLPPU)[J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(1): 50 - 55. (in Chinese)
- 18 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- 19 王熙, 张海玉, 赵军, 等. 大豆播种机电液仿形机构研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(1): 227 - 229.  
WANG Xi, ZHANG Haiyu, ZHAO Jun, et al. Research of electro-hydraulic profiling institutions of soybean seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(1): 227 - 229. (in Chinese)
- 20 王熙, 汪春, 赵军, 等. 霍尔传感器在大豆精播机电液仿形系统中的应用[J]. 农机化研究, 2010, 32(6): 31 - 34.  
WANG Xi, WANG Chun, ZHAO Jun, et al. The application of hall sensors in electro-hydraulic profiling system of soybean precision seeding machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(6): 31 - 34. (in Chinese)
- 21 张海玉. 大豆精播机电液仿形系统研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2010.  
ZHANG Haiyu. Research on electro-hydraulic profiling system of soybean precision planter[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- 22 蔡国华, 李慧, 李洪文, 等. 基于 ATmega128 单片机的开沟深度自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 11 - 16.  
CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 11 - 16. (in Chinese)
- 23 蔡国华. 免耕播种机的开沟深度自控系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.  
CAI Guohua. Study on automatic opener depth control system for no-till seeder[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- 24 赵金辉, 刘立晶, 杨学军, 等. 播种机开沟深度控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 35 - 41.  
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 35 - 41. (in Chinese)
- 25 赵金辉, 杨学军, 刘立晶, 等. 基于 PLC 的播种机开沟器力学性能测试装置[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊):

- 29 - 34. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2014s105&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2014s105&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.005.
- ZHAO Jinhui, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Mechanical performance testing device for planter openers based on PLC[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.):29-34. (in Chinese)
- 26 胡军. 精密播种单体播深控制的理论与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- Hu Jun. Theory and experimental research of sowing depth control for precision seeder unit[D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- 27 胡鸿烈, 孙福辉. 单体仿形压轮式播种单组的设计与试验研究[J]. 农业机械学报, 1996,27(增刊):57-61.
- HU Honglie, SUN Fuhui. Study on designing and testing of the drill unit with individual profiling press wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1996,27(Supp.):57-61. (in Chinese)
- 28 李国梁, 杨然兵, 尚书旗. 2BY-6 型小区育种试验播种机仿形机构研究[J]. 农业工程, 2014,4(6):10-11.
- 29 黄东岩, 朱龙图, 贾洪雷, 等. 基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015,46(4):1-8. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20150401&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150401&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001.
- HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(4):1-8. (in Chinese)
- 30 李玉环, 孟鹏祥, 耿端阳, 等. 玉米播种深度智能调控系统研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(增刊):62-68. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2016s010&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s010&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.010.
- LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):62-68. (in Chinese)
- 31 温丽萍. 基于 PLC 的精密播种机播种深度控制系统研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- WEN Liping. Research of sowing depth control system for precision seeder unit based on PLC[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 32 盛凯. 播种机仿形机构仿形轮配置的研究[J]. 吉林工学院学报, 1995,16(4):21-27.
- SHENG Kai. Studies on the arrangement of profiling wheel in the profiling mechanism of a planter[J]. Journal of Jilin Institute of Technology, 1995,16(4):21-27. (in Chinese)
- 33 王林生, 马瑛, 汪小志, 等. 基于模糊控制的播种机精密单体播深控制仿真研究[J]. 农机化研究, 2016,38(1):86-89.
- WANG Linseng, MA Ying, WANG Xiaozhi, et al. Simulation on precision single sowing depth control of seeder based on fuzzy control[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(1):86-89. (in Chinese)
- 34 陈蒋, 王淼森, 赵明, 等. 玉米播种机电液播深调节装置运动仿真与优化[J]. 农机化研究, 2017,39(10):128-132.
- CHEN Jiang, WANG Miaosen, ZHAO Ming, et al. Motion simulation and optimization design of electro-hydraulic sowing depth adjusting device for corn seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(10):128-132. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 51 页)

- 13 肖德琴, 黄顺彬, 殷建军, 等. 基于 3G 和 Wi-Fi 的高分辨率视觉传感器传输控制方案[J]. 农业工程学报, 2015,31(9):167-172.
- XIAO Deqin, HUANG Shunbin, YIN Jianjun, et al. High resolution vision sensor transmission control scheme based on 3G and Wi-Fi[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(9):167-172. (in Chinese)
- 14 张水军. TD-LTE 制式 4G 移动通信网络应用研究[J]. 信息通信, 2012(2):228-228
- 15 李红亮, 王雨, 梁涛. TD-LTE 网络架构及关键技术分析[J]. 黑龙江科技信息, 2012(24):108.
- 16 KOBAYASHI R, SUZUKI M, NAKANO K. Leader-following formation navigation with virtual trajectories for dynamic multi-agents[C]//Advances in Automotive Control, 2013:773-779.
- 17 王明星, 杨玮, 李民赞, 等. 集成 3S, ZigBee 和射频识别的土壤采样远程智能管理系统[J]. 农业工程学报, 2017,33(增刊 1):143-149.
- WANG Xingming, YANG Wei, LI Minzan, et al. Remote intelligent management system for soil sampling based on 3S, ZigBee and radio frequency identification[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(Supp.1):143-149. (in Chinese)
- 18 张超. 车载通讯服务器的设计与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- ZHANG Chao. The design and implementation of vehicular communication server[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- 19 李静林, 孙其博, 杨放春. 下一代网络通信协议分析[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2010.
- 20 罗丽琴, 詹祖桥. Windows 网络编程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011:182-234.