

# 玉米茬地免耕播种机具导向系统设计与试验<sup>\*</sup>

李洪文 李 娇 苏艳波 张喜瑞 王庆杰

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**【摘要】** 设计了一种由机具导向架、液压系统和以 DSP 为核心的控制单元组成的机具导向系统。根据与该系统配套的拖拉机确定了机具导向架的基本参数,并通过对机具导向架外框不同位置的受力分析得出该系统可以推动的最大负载满足机具田间作业的要求。以 JDT654L 型拖拉机为试验平台,进行了系统性能试验。结果表明,机具导向架的调节范围为  $-10.8^{\circ} \sim 10.7^{\circ}$ ;该系统换向平稳,换向时间短,对输入信号有较好的响应和控制精度,跟踪信号的最大误差角度不超过  $1.5^{\circ}$ ,能够实时地调整机具前进方向。

**关键词:** 免耕播种机 玉米茬地 导向 设计 试验

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)04-0041-06

## Design and Experiment on Oriented System for No-tillage Planters in Maize Stubble Field

Li Hongwen Li Jiao Su Yanbo Zhang Xirui Wang Qingjie

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

### Abstract

An oriented system for no-tillage planters, which consists of guiding frame, hydraulic system and control unit was designed according to the problem of no-tillage planting quality resulted from the unefficient maize row-following capacity of no-tillage planter in annual double cropping areas. The main parameters of guiding frame determine on the matched tractor. Furthermore, the force analyses in different positions of the outside frame of guiding frame indicates that the guiding system can meet the requirements of the maximum load for adjusting planter direction in the planting. By employing JDT654L tractor as a test platform, the system performance analysis was conducted, and the results showed that the adjusting range of actuator is  $-10.8^{\circ} \sim 10.7^{\circ}$ . Moreover, the outcomes also indicated that the system is capable of commutating steadily and rapidly, and performs a fair response capability and satisfactory control accuracy to input signals, with maximum error angle of no more than  $1.5^{\circ}$ , which assures that the implements direction could be timely corrected.

**Key words** No-tillage planter, Maize stubble field, Orient, Design, Experiment

### 引言

在一年两熟区的玉米茬地免耕播种小麦,机具很难保证对行作业,开沟器碰到根茬易造成堵塞,增加了动力消耗,影响播种质量<sup>[1-2]</sup>。为了保证机具对行作业,拖拉机驾驶员工作时精力需要保持高度集中,这样不仅增加了劳动强度,而且降低了工作效

率。近些年,自动化技术不断应用于农田作业中,利用自动导向技术既可保证机具对行作业,又可以取代驾驶员的部分单一重复性工作,提高劳动效率和质量<sup>[3]</sup>。

目前,在农田作业中的导向技术主要有两种形式:拖拉机自动导航技术,通过控制拖拉机的行走轨迹保证机具的作业质量;机具自动导向技术,拖拉机

偏离作业行的距离不大时,直接实时控制机具改变前进方向,保证作业轨迹的正确性<sup>[4]</sup>。

现阶段农田自动导向技术的研究多是第一种形式,以 GPS、机器视觉、惯性、激光和超声<sup>[5-6]</sup>等传感器为基础,控制拖拉机的行走方向,由于机具与拖拉机并非刚性连接,拖拉机和机具不能同步得到调整,存在一定误差。另外,拖拉机驾驶员在驾驶参照物明显的情况下,驾驶误差仅为 7.5 ~ 10 cm<sup>[7]</sup>,拖拉机偏斜程度较小。因而采用第二种形式,直接控制机具的前进方向,实现机具对行精准作业更具有意义。本文针对一年两熟区设计三点悬挂式拖拉机机具导向系统,并对该系统进行性能检测试验。

## 1 机具导向系统结构及原理

在玉米根茬覆盖的地表,以玉米立茬作为导向基准线,采用机器视觉检测系统目标转角<sup>[8]</sup>,在此基础上通过模拟信号代替该目标转角进行研究。通过控制单元、动力输出装置、液压系统和执行机构组成的机具导向系统,实时调整作业轨迹,保证机具始终工作在玉米行间,使开沟器避开根茬<sup>[9]</sup>。机具导向系统的结构如图 1 所示。拖拉机动力输出轴和传动齿轮将动力传给油泵,是液压系统工作的基础。根据输入的信号值,由控制单元实时调整液压阀(包括电液比例换向阀和电磁溢流阀)的工作位,通过油缸活塞杆的伸出与缩进控制执行机构的偏转。低能耗、数据处理能力强的 TMS320F2812 DSP 是控制单元的核心<sup>[10]</sup>,运用其 A/D 采样、串口接收、PWM 输出、GPIO 输入/输出等模块完成机具导向架的转向控制,保证系统的运行速度和控制精度。

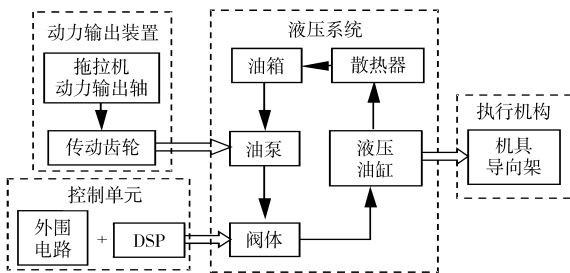


图 1 机具偏转导向系统结构框图

Fig. 1 Structure of the deflection-oriented system for implements

## 2 关键部件设计

### 2.1 执行机构

机具导向架是机具导向系统的执行机构,结构如图 2 所示,包括内框和外框。内框由左、右下悬挂点与拖拉机的下拉杆挂接。外框顶端的两个上悬挂点,分别与拖拉机上拉杆和机具上悬挂点挂接;底部

左、右下悬挂点挂接机具,且与机具刚性连接。当机具右偏斜  $\alpha$  角度时,偏角信号通过角位移传感器传到控制单元,控制右液压缸的活塞杆伸出和左液压缸活塞杆缩进以推动导向架外框向左偏转  $\alpha$  角度,同时带动机具也向左偏转  $\alpha$  角度,完成行走方向的纠正。根据一年两熟区使用的 36.8 ~ 51.5 kW 拖拉机下拉杆挂接点之间的距离确定机具导向架外框全长  $l_w$  为 1 000 mm;内框全长  $l_n$  为 950 mm,其左、右下悬挂点的间距  $l_x$  为 750 mm。

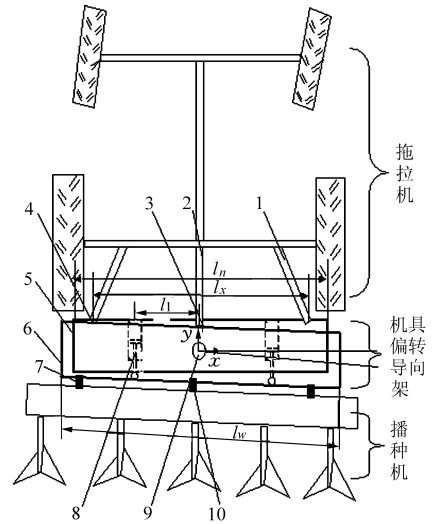


图 2 机具导向架的工作原理图

Fig. 2 Working principle of actuator

1. 拖拉机下拉杆
2. 拖拉机上拉杆
3. 拖拉机上悬挂点
4. 内框下悬挂点
5. 内框
6. 外框
7. 机具下悬挂点
8. 油缸(左)
9. 导向架转轴
10. 机具上悬挂点

机具导向架的角度调节范围与液压缸的安装位置及活塞杆的伸出长度有关。田间实测得机具作业时相对作业行偏斜角度范围为  $-9^\circ \sim 9^\circ$ 。从图 3 中可以得出机具导向架的偏转角度

$$\alpha = \arctan \frac{s}{l} \quad (1)$$

式中  $l$ ——油缸中心位置与中心转轴间距离, mm

$s$ ——油缸活塞杆行程, mm

设计双作用单活塞杆液压缸,以满足系统的需

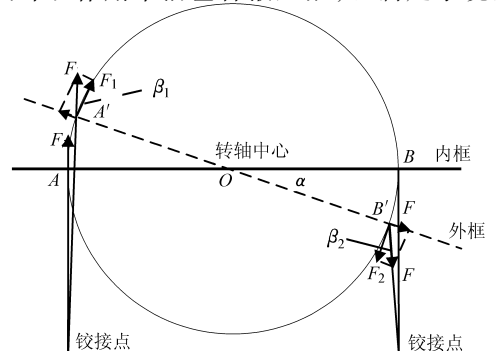


图 3 机具导向架不同位置的受力分析

Fig. 3 Force analysis of actuator on different position

要。缸体头部铰接到内框上,在调节偏角的过程中液压缸可绕铰接点转动,推动导向架偏转,尾部用耳环型安装,采用调质到241~285 HB的45号钢。缸盖和活塞杆采用HT350。将液压缸安装在离中心转轴200 mm处,根据式(1)可得到活塞杆的行程为31.7 mm,由GB/T 2349—1980确定活塞杆的行程为100 mm。

液压缸在机具导向架内外框无相对偏转时和有相对偏转位置时的受力分析如图3所示。机具导向架偏转所需的转矩

$$M = Fl\cos\beta_1 + Fl\cos\beta_2 \quad (2)$$

式中  $F$ ——液压缸活塞的推力, kN

$l$ ——液压缸安装位置A或B到转轴中心O的距离, mm

$\beta_1, \beta_2$ ——左、右液压缸活塞杆推力与外框转动方向切向力的夹角, ( $^\circ$ )

由于 $\beta_1, \beta_2$ 值很小,则 $\cos\beta_1 \approx \cos\beta_2 \approx 1$ ,由此可得

$$M = 2Fl \quad (3)$$

推动机具转向所需的转矩为

$$M' = F'l'$$

式中  $F'$ ——使机具偏斜的力简化到机具质心的合力, N

$l'$ ——合力力臂, mm

在机具导向系统调整偏角过程中,满足

$$M = M' \quad (4)$$

$$F' = \frac{2Fl}{l'} \quad (5)$$

根据机具导向系统的负载,确定液压缸的内径 $D$ 为40 mm。液压泵额定压力与液压缸工作压力的关系为

$$p_0 \geq p_{\max} + \sum \Delta p \quad (6)$$

式中  $p_0$ ——液压泵额定压力,取25 MPa

$p_{\max}$ ——液压缸最大工作压力, MPa

$\sum \Delta p$ ——油路压力损失,取0.5~1.5 MPa<sup>[11]</sup>

由式(6)可得 $p_{\max}$ 为23.5~24.5 MPa。

由油缸内径

$$D = 3.57 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{F}{p}}$$

其中  $p = \frac{2}{3} p_{\max}$

式中  $p$ ——液压缸工作压力, MPa

$$F = \frac{D^2}{(3.57 \times 10^{-2})^2 p} \quad (7)$$

计算中 $p_{\max}$ 取大极限值24.5 MPa,  $D = 40$  mm,代入数值得 $F = 20.5$  kN。一年两熟区使用的免耕

播种机具质心到机具导向架转轴中心的距离范围一般为500~1500 mm,通过式(5)得到 $F'$ 的值为5.47~16.4 kN,即该系统可推动的负载为5.47~16.4 kN。

播种机工作时所受的作用力只有机具重力 $G$ 是常数,其他各力均随开沟器的工作状态和土壤物理机械性质的不同而变化。播种机在工作中所受到的总阻力为<sup>[12]</sup>

$$R_t = 10^{-2} nRab + f_1 G \quad (8)$$

式中  $n$ ——开沟器个数

$R$ ——土壤比阻, N/cm<sup>2</sup>

$a$ ——开沟器播种机耕深, mm

$b$ ——开沟器播种机耕宽, mm

$f_1$ ——滚动阻力系数,取0.25<sup>[13]</sup>

由于免耕播种过程中,采用正位垂直施肥,播种开沟器在施肥开沟器的基础上二次开沟,开沟阻力较小,因此在计算过程中可以忽略。根据农艺要求,施肥深度为80 mm,一般情况下开沟宽度为50 mm,一年两熟区多是壤土,确定土壤比阻为6 N/cm<sup>2</sup>。以玉米茬地播种12行小麦为例,免耕播种机重力一般为1~10 kN。由式(8)可得总阻力 $R_t$ 为3.18~5.38 kN。

由此可以得出 $R_t \leq F'$ ,所以播种机在工作时受到的总阻力在系统可推动的负载力范围内,即该系统满足一年两熟区玉米免耕地的偏斜调整要求。

## 2.2 液压系统

机具导向系统的液压系统可以通过改装拖拉机液压转向系统或者设计一套新液压系统。在实际操作中改装拖拉机自身的油路难度较大,同时改装成本高于新液压系统的成本。因此,设计一套新的液压系统为机具导向系统提供动力,该液压系统的油路如图4所示。新液压系统采用阀体集成安装,简化了液压系统的油路,减少了液压油路的压力损失,使机具导向系统结构紧凑,在玉米茬地的导向更精确。系统通过支架将油箱固定在拖拉机的右前方,为油泵供油。油泵的转动方向与拖拉机动力输出轴的转动方向一致,安装3个传动齿轮,使油泵顺利运转。系统工作时齿轮采用结构简单、成本低的开式传动<sup>[14]</sup>传递动力。在试验过程中,此种传动方式可保证高传动效率,且传动足够平稳。电液比例换向阀调节油液的压力和流量,溢流阀控制卸荷油压。设计的双作用单活塞杆液压缸所承受的负载力满足系统要求,试验过程中能顺利地推动机具导向架转向。

## 2.3 控制单元

机具导向系统的控制单元负责接收探测与反馈

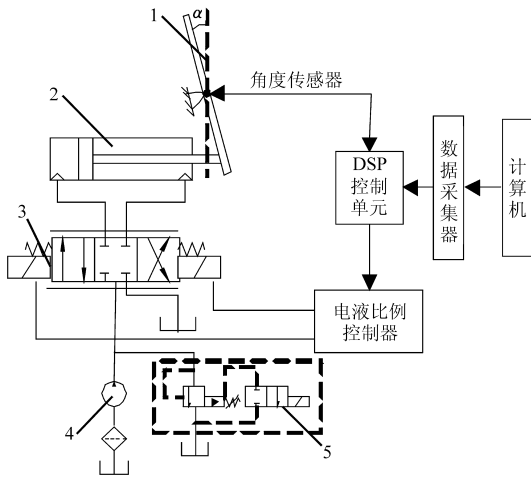


图4 液压系统控制示意图

Fig. 4 Control chart of hydraulic system

1. 机具导向架 2. 双作用单活塞杆液压缸 3. 电液比例换向阀
4. 齿轮泵 5. 电磁溢流阀

信号,同时发出指令控制电液比例阀调节流量与压力。给定信号和角位移传感器测得的机具导向架的反馈信号通过信号采集电路传给信号处理器的ADC模块,在此模块中比较得到给定信号和反馈信号的偏差值。试验测得机具偏转 $1.5^\circ$ 以内时对机具的前进方向影响不大,因此确定两信号的偏差大于 $1.5^\circ$ 时,由控制算法分析、计算并将结果通过PWM模块输出控制量,对机具的前进方向作出调整。其中PWM模块主要控制比例换向阀的工作位,GPIO模块主要控制溢流阀。信号处理器的主要工作单元及其控制对象如图5所示。

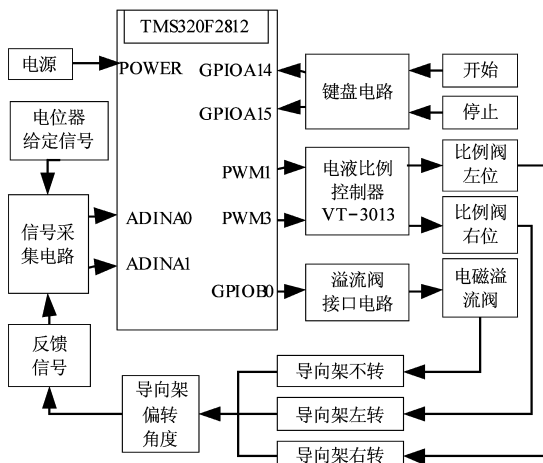


图5 控制单元硬件结构框图

Fig. 5 Hardware structure of control unit

### 3 试验设计及结果分析

机具在田间工作时受到的力极其复杂,通过Matlab/Simulink仿真软件对系统受到不同负载力时的性能进行分析。仿真结果显示,不同的负载力对系统主要性能的影响相差不大。在此基础上以

JDT654L型拖拉机为试验平台,将机具导向架挂接到拖拉机上,进行转向、换向和信号跟踪性能试验。在机具导向架上安装WYT-AT-1型无触点角位移传感器采集偏转的角度,其量程为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。E1641B1型函数信号发生器产生的模拟信号作为目标转角信号,采用经典PID控制算法,根据目标转角和实际转角的差值控制电液比例换向阀工作位,实现转向。试验之前,对传感器进行标定,导向架外框偏转角度为 $0^\circ$ 时,标定传感器的角度值为 $24.9^\circ$ 。

#### 3.1 机具导向架调整范围试验

通过机具导向系统极限位置转向试验检测转向控制系统的导向能力和导向范围。转向时间短,系统转向速度快,导向能力强;反之,导向能力差。为了确定导向范围,进行了两个极限位置的转向过程试验。

图6为机具导向架的转向曲线。试验结果表明,从左极限位置到右极限位置所需的转向时间为 $2.3\text{ s}$ ,转角范围为 $14.1^\circ \sim 35.6^\circ$ ,即相对转角范围为 $-10.8^\circ \sim 10.7^\circ$ ;从右极限位置到左极限位置所需的转向时间为 $2.5\text{ s}$ ,转角范围为 $14.8^\circ \sim 35.6^\circ$ ,即相对转角范围为 $-10.1^\circ \sim 10.7^\circ$ ;两极限位置的转向时间相差仅为 $0.2\text{ s}$ 。实测的最大相对转角范围为 $-10.8^\circ \sim 10.7^\circ$ ,满足免耕播种机具在播种过程中的调节范围。从两个转向过程的曲线中可以得出,机具导向系统转向过程平稳,没有出现明显的振荡现象。

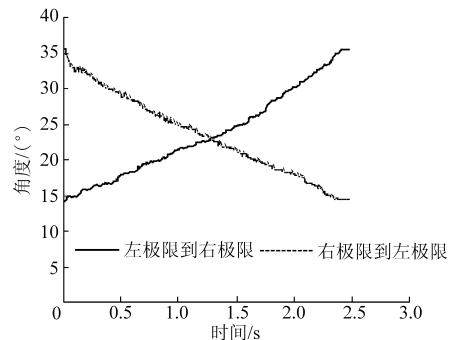


图6 机具导向架转向曲线

Fig. 6 Turning curve of implement-oriented frame

#### 3.2 换向过程试验

在进行田间作业时,玉米行并非一条标准的直线,存在一定的弯斜,因此机具在田间作业时,经常会发生较大或较小的偏斜。机具导向系统必须能及时调整方向,这就要求系统换向平稳且及时。对系统进行大、小角度的换向试验,判定系统的换向及时性和平稳性。图7分别是极限位置和小角度换向的曲线图。

导向架偏转到左、右极限位置时进行大角度换

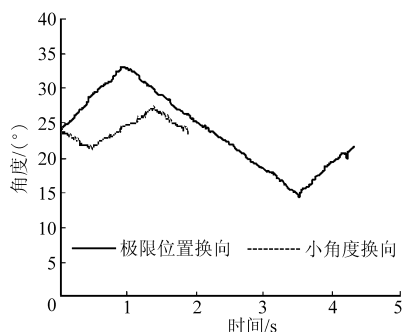


图7 机具导向架换向操作曲线

Fig. 7 Shift curve of implement-oriented frame

向试验。试验测得换向时间约为 0.09 s,可以忽略不计,基本与转向过程没有差别,没有明显的停顿。同时换向过程角度几乎没有波动,换向过程平稳。

取导向架的偏转角度为  $-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$  时进行小角度换向试验。从图中得出换向时间约为 0.06 s,角度波动较小,换向过程较平稳。

所得曲线不平滑是采集系统的精度和外部干扰引起的,角位移传感器采集转向角度在  $0^{\circ} \sim 0.1^{\circ}$  的范围内波动。大角度换向和小角度换向相比,偏转小角度情况下比偏转大角度情况下换向过程平稳,并且换向时间短。当偏转角度越小时,液压缸推动机具导向架外框偏转的力越大。因此,机具导向架在小偏转角度下,换向的速度加快。免耕播种机工作时,由于驾驶员能掌握较大的偏角调整,机具导向系统调整的多是小角度偏斜,因此该系统满足实际调整要求。

### 3.3 信号跟踪试验

通过对连续信号三角波信号和正弦波信号的跟踪试验判断系统的响应和控制精度。图8是系统在锯齿信号作用下,导向架在  $16.9^{\circ} \sim 36.2^{\circ}$  范围偏转过程的响应曲线。结果表明,机具导向系统的响应时间为 0.57 s,跟踪信号达到平稳的时间为 0.93 s。信号跟踪平稳后,转向和换向过程平稳,没有出现超调和振荡,跟踪信号的最大误差角度为  $1.1^{\circ}$ 。

图9是机具导向系统在正弦波信号作用下,导向架在  $17.6^{\circ} \sim 38^{\circ}$  范围内转向过程的响应曲线。此时系统的响应时间为 0.31 s。信号跟踪平稳后,转向和换向过程平稳,没有出现超调和振荡。由于

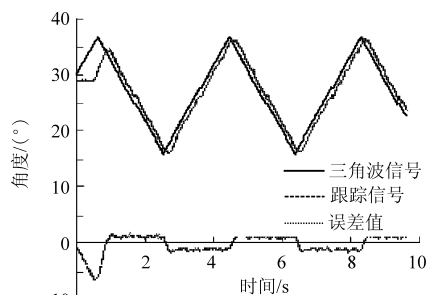


图8 跟踪三角波信号的曲线

Fig. 8 Following triangular wave signal

正弦信号在峰值附近变化比较平缓,使得换向时间较长。跟踪信号的最大误差角度为  $1.5^{\circ}$ 。

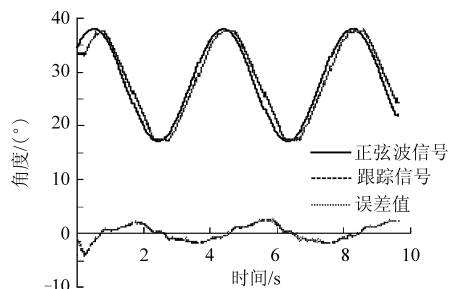


图9 跟踪正弦波信号的曲线

Fig. 9 Following sinusoidal signal

免耕播种机在玉米根茬行间播种小麦时,机具偏转  $1.5^{\circ}$  以内的角度时对机具前进方向影响不大,允许调整误差在  $1.5^{\circ}$  以内。系统的响应时间及达到平稳的时间极短,可以很快对播种机的偏角做出反应并及时地调整。

## 4 结论

(1) 试验测得机具导向系统的调节范围为  $-10.8^{\circ} \sim 10.7^{\circ}$ ,满足机具作业时偏角的调节范围。并且系统转向过程平稳,没有出现振荡现象。

(2) 系统在极限偏角时换向时间为 0.09 s,小偏角时的换向时间为 0.06 s,换向平稳。偏转小角度情况下比偏转大角度情况下换向时间短。

(3) 系统对三角波信号的响应时间为 0.57 s,转向和换向过程平稳;对正弦波信号的响应时间为 0.31 s,换向时间较长。跟踪信号的最大误差角度满足实际耕作要求。

## 参考文献

- 高焕文. 保护性耕作技术与机具[M]. 北京:化学工业出版社,2004:119~141.
- 郑东旭,姜海勇,李兵,等. 玉米整秆覆盖下小麦免耕播种机研究[J]. 河北农业大学学报,2003,26(增刊):285~287.  
Zheng Dongxu, Jiang Haiyong, Li Bing, et al. Study on the no-tillage mulch planter for wheat under the bestow of the whole mealie straw[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2003, 26(Supp): 285~287. (in Chinese)
- 应火冬. 农业机器的随动控制导航[J]. 电子机械工程,2000,87(5):31~33.

- Ying Huodong. The guidance of the agricultural vehicle by means of follow-up control[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2000, 87(5): 31 ~ 33. (in Chinese)
- 4 Keicher R, Seufert H. Automatic guidance for agricultural vehicles in Europe[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(1~2): 169 ~ 194.
- 5 Wilson J N. Guidance of agricultural vehicles—a historical perspective[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(1~2): 3 ~ 9.
- 6 Hague T, Marchan J A, Tillett N D. Ground based sensing system for autonomous agricultural vehicles[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 25(1~2): 11 ~ 28.
- 7 李兵. 小麦对行免耕播种机的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.  
Li Bing. Study on row-follow no-till wheat planter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 8 陈媛. 基于机器视觉的秸秆行茬导航路径的检测研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.  
Chen Yuan. Detection of stubble row for machine vision guidance in no-till field[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- 9 李娇, 李洪文, 何卿, 等. 拖拉机自动导航与机具偏转导航的仿真对比研究[J]. *农机化研究*, 2009, 31(7): 22 ~ 25.  
Li Jiao, Li Hongwen, He Qing, et al. Comparative research of simulation on the automatic guidance system for tractor and the deflexion guidance system for machinery[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31(7): 22 ~ 25. (in Chinese)
- 10 刘和平, 邓力, 江渝, 等. 数字信号处理器原理、结构及应用基础——TMS320F28x[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1 ~ 2.
- 11 [联邦德国]文内尔 H L. 现代农业机械化技术[M]. 现代农业机械化技术翻译组, 译. 北京: 机械工业出版社, 1990: 46 ~ 47.
- 12 王兆卫. 小杂粮免耕播种机的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.  
Wang Zhaowei. Study on small kernel cereal no-tillage planter [D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 13 Morrison J E. Development and future of conservation tillage in American [C] // *Proceedings of China International Conference on Dryland and Water-Saving Farming*, Beijing, China, 2000: 132 ~ 135.
- 14 邱宣怀. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- 15 何卿, 高煊文, 李洪文. 接触式拖拉机导航控制系统[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(1): 97 ~ 101.  
He Qing, Gao Huanwen, Li Hongwen. Automatic guidance control system of tractors with contact sensor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(1): 97 ~ 101. (in Chinese)
- 16 吴晓鹏, 赵祚喜, 张智刚, 等. 东方红拖拉机自动转向控制系统设计[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(增刊): 1 ~ 5.  
Wu Xiaopeng, Zhao Zuoxi, Zhang Zhigang, et al. Development of automatic steering control system based on Dongfanghong tractor[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(Supp.): 1 ~ 5. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 25 页)

- 9 Chang J, Güralp On, Filipi Z, et al. New heat transfer correlation for an HCCI engine derived from measurements of instantaneous surface heat flux [C]. *SAE Paper 2004-01-2996*, 2004.
- 10 Su W H, Huang H Z. Development and calibration of a reduced chemical kinetic model of *n*-heptane for HCCI engine combustion[J]. *Fuel*, 2005, 84(9): 1 029 ~ 1 040.
- 11 黄豪中. 柴油均质压燃(HCCI)发动机燃烧过程数值模拟和实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.  
Huang Haozhong. Numerical and experimental study on the combustion process of diesel HCCI engines[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- 12 张波, 尧命发, 郑尊清, 等. 正庚烷均质压燃燃烧特性和排放特性的实验研究[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2006, 39(6): 663 ~ 669.  
Zhang Bo, Yao Mingfa, Zheng Zunqing, et al. Experimental study on the HCCI combustion and emission characteristics of *n*-heptane[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2006, 39(6): 663 ~ 669. (in Chinese)