

基于压电薄膜的免耕播种机播种深度控制系统*

黄东岩^{1,2} 朱龙图² 贾洪雷¹ 于婷婷²

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130025; 2. 吉林农业大学信息技术学院, 长春 130118)

摘要: 为使免耕播种机在秸秆覆盖地作业时自动保证播种深度的一致性和稳定性,设计了一种主动作用式播种深度自动控制系统。采用聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride, PVDF) 压电薄膜传感器将免耕播种机限深轮的胎面形变量转换为电压信号,信号处理电路对传感器产生的信号放大滤波,提取信号峰值,系统根据峰值信号实时监测播种单体对地表的压力,控制信号形成电路在压力不足时发出控制信号,控制安装在播种机机架与播种单体四连杆间的空气弹簧产生推力,使播种单体能够产生对地表的压力,从而保证播种深度的一致性。试验结果表明,所设计的主动作用式播种深度自动控制系统能够精确控制开沟深度,仿形性能可靠,作业速度为 5 ~ 8 km/h 时,播深合格率 90%,作业速度大于 8 km/h 时,播深合格率明显高于被动作用式播种深度控制装置。

关键词: 免耕播种机 播种深度 自动控制 压电薄膜 单片机

中图分类号: S232.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)04-0001-08

Automatic Control System of Seeding Depth Based on Piezoelectric Film for No-till Planter

Huang Dongyan^{1,2} Zhu Longtu² Jia Honglei¹ Yu Tingting²

(1. Key Laboratory of Bionics Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130025, China

2. College of Information, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Conservation tillage effectively protects the environment. A no-till planter can seed on the straw mulching farmlands, and it is the most important machine in conservation tillage. In order to make sure the consistency of sowing depth, an active seeding depth control system was designed for a no-till planter. The system was consisted of piezoelectric film sensor, a signal processing circuit, a control signal generating circuit and a pneumatic drive system. When planting with a conventional row crop planter which had a plurality of row units mounted on a toolbar, it was necessary to provide a sufficient down force on each row unit to ensure that the seed trench opener was fully penetrated into the soil. Proper down force was also essential to provide proper amount of soil compaction in the side walls of the seed trench. Seeding depth primarily depended on the down force on each row unit. In order to make adjustments to the down force in real time, it was needed to measure the magnitude of the down force on an ongoing basis. The piezoelectric film sensors were used for measuring the deformation of depth limit wheel, the down force of the row unit was monitored in real time according to the deformation of the limit wheel. The piezoelectric film generated charge during rotating of the wheel. The sensor changed the charge into a voltage signal. The voltage signal was processed by low-pass filter and preamplifier circuit in order to eliminate the noise and amplify the filter, and then the peak-holding circuit gained the peak voltage value which was sampled by A/D conversion and sent to control signal generating circuit by the wireless transmitter. Wireless receiver received the digital signal which was compared with the present

收稿日期: 2014-12-27 修回日期: 2015-02-04

* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2014BAD06B03)和吉林省科技发展计划资助项目(20130206007NY)

作者简介: 黄东岩, 博士后, 吉林农业大学副教授, 主要从事农业机械自动化研究, E-mail: cchdy760829@sina.com

通讯作者: 贾洪雷, 教授, 博士生导师, 主要从事保护性耕作技术与仿生智能农业机械研究, E-mail: jiahl@vip.163.com

value stored in the microcontroller, if the received signal was less than the present value, the difference between the received signal and the present value formed the control signal. The pneumatic drive system was consisted of air compressors, tank, filters, electric-gas proportional valve and air spring. To provide the necessary down force, an air spring was assembled at the linkage which was mounted in the row unit to the toolbar. Compressed air was generated by the air compressor and stored in the tank, and then the compressed air was filtered to filter out dust and impurities. Pure compressed air was fed to the electric-gas proportional valve; the output of electric-gas proportional valve was connected to the air spring. The output gas pressure of the electric-gas proportional valve was controlled by control signal, the air spring can generate corresponding down force on the unit row. A field experiment was conducted to verify the performance of the seeding depth automatic control system, and the result showed that the seeding depth control system can provide accurate ditching depth and reliable performance of profiling. When the speed of the planter was over 8 km/h, the qualified sowing depth rate of the active seeding depth control system was much better than that of the passive control system.

Key words: No-till planter Seeding depth Automatic control Piezoelectric film Chip microprocessor

引言

旱作保护性耕作是目前旱作农业先进、适用、经济、环保的耕作方法。国内外大量实践表明^[1-3],实施以秸秆残茬覆盖为主要内容的保护性耕作,是实现保土、保水、保肥和保持生态环境的重要措施。免耕播种是保护性耕作的重要内容。近年来,我国对免耕播种机的研制工作不断取得新进展^[4-6]。免耕播种机播种深度主要依靠平行四连杆仿形机构控制^[7-9],其仿形工作方式有主动作用式仿形和被动作用式仿形,其中被动作用式仿形机构使用最为广泛。

国内外已有不少科研工作者把仿形方向转向了主动作用式^[10-12],这种应用仿形传感器的主动作用式仿形机构能够在一定程度的起伏地面实时调整播种作业深度。进行免耕播种时,秸秆覆盖地表情况复杂,土壤坚实度各处差异较大,仅依靠应用超声波传感器检测到的地面起伏变化来调整播种单体的上下浮动,很难使播种深度一致性达到预期效果^[13-16]。

本文应用 PVDF 压电薄膜测量免耕播种机限深轮的胎面形变量,根据限深轮的胎面形变量实时监测播种单体对地表的压力,并通过在播种机机架与播种单体四连杆间安装的空气弹簧,在播种单体对地压力不足时,推动播种单体能够额外产生对地表的压力,以期控制播种深度。

1 系统工作原理及播深调节机构

如图 1a 所示,免耕播种机上每一行播种单体通过四连杆机构安装在播种机机架上,播种单体可以

上下浮动适应地表的起伏变化。为了有效地清除种床上秸秆、残茬以及大的土块,提高种床土壤温度和播种机的通过性,一对成“八”字型的爪轮和圆盘波纹刀安装在播种单体前端,爪轮圆周均匀地分布着 8~14 个指形轮爪,工作时爪轮上的轮爪插入秸秆、残茬层并与土壤接触,在播种单体推力和土壤反力作用下爪轮旋转。波纹圆盘刀切断覆盖于地面的秸秆进而切开地表,旋转的轮爪将秸秆拾起向侧后方抛出,轮爪前进方向上的秸秆被分至两侧,形成一条土壤裸露的种床区域。一对左右对称的橡胶限深轮安装在开沟圆盘两侧靠后的位置,开沟圆盘的下部切入到种床土壤中,限深轮压在种床土壤表面,开沟圆盘与限深轮的高度差保持固定不变即为播种机开沟深度。

免耕播种机在播种作业过程中使每一个播种单体对地表产生足够的压力是非常必要的,播种单体对地表的压力能够使免耕播种机的波纹圆盘刀有效切断秸秆进而切开地表,使开沟圆盘充分深入到土壤中,并且能够在开沟圆盘两侧堆积足够的土壤以便填埋种子,因此,免耕播种机的播种深度主要取决于播种单体对地表的压力。播种单体对地表的压力是播种单体自重、波纹圆盘刀阻力、开沟圆盘阻力的合力,种箱和肥箱内种子和肥料的重力是播种单体自重的一部分,在播种过程中这部分重量是不断变化的,波纹圆盘刀与开沟圆盘的阻力也不断随土壤坚实度及地表覆盖情况的变化而改变。播种单体对地表压力能够反映出播种单体自重和开沟圆盘阻力的变化,本系统根据播种单体对地表压力来确定空气弹簧对四连杆的推力从而控制播种深度。此时,播种单体对地表的压力是播种单体重力、波纹圆盘

刀与开沟圆盘阻力和可控的空气弹簧推力综合作用的结果。当播种单体对地压力足够时,空气弹簧不产生推力,限深轮结构能有效限制播种单体继续向下而使播种深度过深。

如图 1b 所示,播深调节机构包括四连杆机构、空气弹簧、空气弹簧支架、支板、空气弹簧托板和连杆。其中,空气弹簧一端由空气弹簧支架与播种机架固定连接,另一端与空气弹簧托板固定连接。支板、空气弹簧托板和连杆相互铰接构成局部的四连杆机构,空气弹簧垂直向下的推力通过四连杆机构传递给波纹圆盘刀与开沟圆盘,使其向下切开地表。由图 1b 可以看出,波纹圆盘刀与开沟圆盘向下的行程是空气弹簧行程的 2 倍,这样的结构有利于缩短系统的响应时间,提高系统的响应速度。

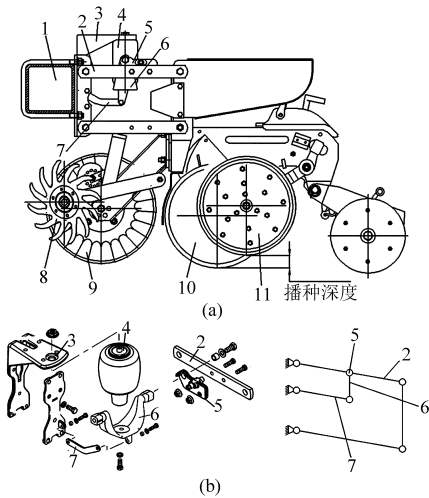
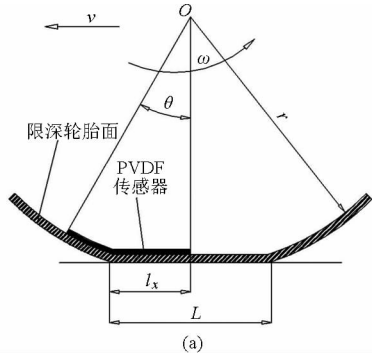


图 1 系统工作原理图
Fig. 1 Working principle of the system
(a) 系统结构 (b) 播深调节机构

1. 机架 2. 四连杆机构 3. 空气弹簧支架 4. 空气弹簧 5. 支板 6. 空气弹簧托板 7. 连杆 8. 爪轮 9. 圆盘波纹刀 10. 限深轮 11. 开沟圆盘

2 系统硬件设计

系统硬件由 PVDF 压电传感器、信号处理电路、



控制信号形成电路和气压传动系统组成。

2.1 PVDF 压电薄膜传感器

如图 2 所示,在一个橡胶限深轮内部粘贴 PVDF 压电薄膜传感器,橡胶限深轮在行进过程中接触地面的印痕区使 PVDF 压电薄膜传感器产生周期性形变, PVDF 压电薄膜内部产生极化现象,同时在薄膜的 2 个上下铝电极表面出现正负相反的电荷。

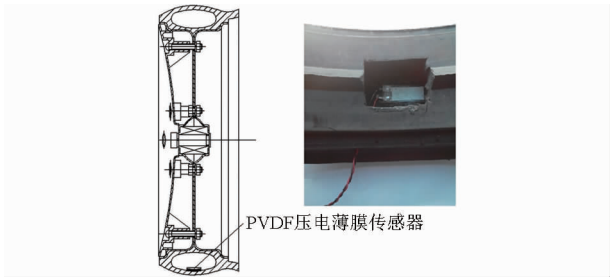


图 2 PVDF 压电薄膜传感器安装位置
Fig. 2 Installation site of PVDF sensor

PVDF 压电传感器经过轮胎接触地面的印痕区形变示意图如图 3a 所示,假设轮胎在单位长度受到均匀的压力 p_0 ,印痕区长 L ,轮胎厚度 t_r ,轮胎半径 r ,PVDF 压电传感器的长、宽、高分别为 l 、 b 、 t_s ,压电薄膜进入轮胎形变印记区的长度为 l_s ,将 $x-z$ 坐标系建立在胎面层的中性层上,沿 x 轴方向的位移为 $u(x, t)$,沿 z 轴方向的位移为 $w(x, t)$ 。

根据力与力矩平衡条件,建立轮胎与 PVDF 压电传感器形变微分单元的受力方程

$$\begin{cases} \frac{\partial N}{\partial x} + \frac{Q}{r} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ -\frac{N}{r} + \frac{\partial Q}{\partial x} + p_0 = \rho \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \\ \frac{\partial M}{\partial x} - Q = 0 \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 N ——微分单元 x 轴方向的力
 Q ——微分单元垂直于 x 轴方向的剪切力
 M ——微分单元所受力矩
 ρ ——轮胎与压电薄膜平均密度

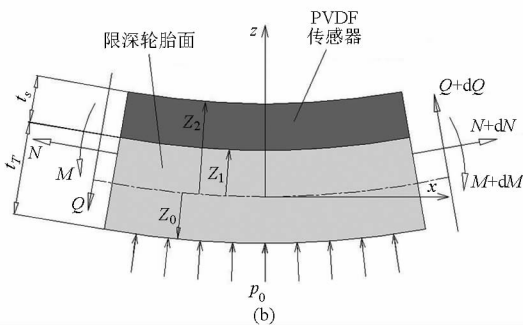


图 3 PVDF 压电传感器受力分析

Fig. 3 PVDF piezoelectric sensor force analysis

- (a) 轮胎与 PVDF 压电传感器形变示意图 (b) 轮胎与 PVDF 压电传感器形变微分单元

PVDF 压电薄膜弯曲过程中在薄膜上下表面产生的电荷量 Q_{en} 为^[17]

$$Q_{en} = \int_A D_3 dA = d_{31} E_{11} \int_A \varepsilon_1 dA \quad (2)$$

式中 D_3 ——3 (z 轴) 方向的方向的电位移

d_{31} ——3 方向与 1 (x 轴) 方向的压电常数

E_{11} ——1 方向的弹性模量

ε_1 ——1 (x 轴) 方向的应变

A ——压电薄膜电极面积

由式(1)、(2)以及边界条件

$$\begin{cases} u(0) = u(l_x) = 0 \\ M(0) = M(l_x) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

可以近似得到

$$Q_{en} = \frac{2d_{31}p_0r}{t_s} l_x \quad (4)$$

则压电薄膜电极两端电压 U_i 为

$$U_i = \frac{2d_{31}p_0r}{t_s C} l_x \quad (5)$$

式中 l_x ——压电薄膜进入轮胎形变印记区的长度

C ——压电薄膜的电容

由式(5)可知,压电薄膜变形过程中产生的电压与 l_x 呈正比,当压电薄膜完全进入轮胎形变印记区,即 $l_x = l$ 时,压电薄膜产生最大电压。播种单体对地表的压力越大,轮胎形变印记区长 L 越大,压电薄膜输出电压越大。在系统工作过程应确保 $L < l$, 以免压电薄膜完全进入轮胎形变印记区后,压力继

续增大时,压电薄膜输出电压最大值不变。

2.2 信号处理电路

信号处理电路由低通滤波电路、电压放大电路、峰值保持电路、A/D 转换电路、单片机 1、无线发送模块组成,如图 4 所示。系统工作原理是:PVDF 压电薄膜传感器将其每次经过轮胎形变印记区产生的电荷 Q_{en} 转换为电压信号 U_i ,再经过低通滤波后进行电压放大,将电压信号 U_i 放大为 U , U 是一个根据电荷 Q_{en} 转换来的周期动态脉冲信号,其周期为限深轮的转动周期,可以在限深轮圆周均布多个传感器来缩短信号 U 的周期,以提高系统的灵敏度。峰值保持电路将 U 峰值转换成直流电压输出,A/D 转换电路将此直流电压转换为数字信号传给单片机 1,单片机 1 控制无线发射模块将信号从限深轮内部发出。

运算放大器 A1,电阻 R1 ~ R4,电容 C1、C2 构成巴特沃斯二阶低通滤波电路,运算放大器 A2,电阻 R5、R6,变阻器 RW 构成放大电路,由示波器观测 PVDF 压电薄膜经过轮胎变形印记区产生的波形为底宽 20 ~ 30 ms 的脉冲信号,因此,设置低通滤波器的截止频率 $f_H = 100$ Hz。

峰值保持电路由 2 个运算放大器 A3 和 A4、晶体管 Tr、二极管 D1、二极管 D2 和电阻 Re、R7,电容 C3 构成,其中晶体管 Q1 和电阻 Re 构成复位电路 (Reset circuit)。峰值保持电路输出一个直流电压到 A/D 转换电路的输入端,其幅值等于输入信号 U

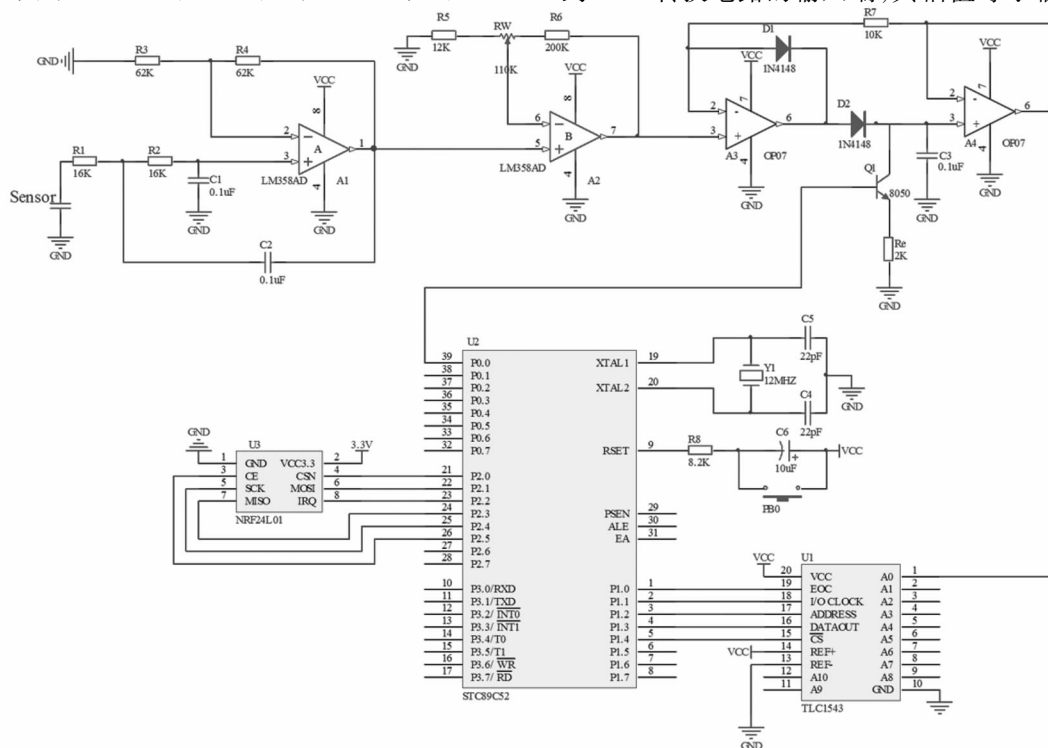


图 4 信号处理电路

Fig. 4 Signal processing circuit

的峰值,A/D 转换后的数字电压信号通过单片机的 I/O 口输入单片机,由单片机通过对数字电压信号进行编码转换处理后,控制与单片机相连的无线发射模块进行无线发射。为了能准确输出电压 U 的峰值,峰值保持电路还需要在下一个峰值(即传感器再次经过印痕区)到来之前复位。复位电路(Reset circuit)是由单片机 1 通过 I/O 口 P0.0 控制的,当单片机 1 通过 I/O 口对晶体管 Q1 的基极输入一个正脉冲信号时,晶体管 Q1 集电极和射极饱和导通,将电容 C2 上的电量释放掉,峰值保持电路的输出变为零,重新跟随输出信号 U 的峰值。

2.3 控制信号形成电路

控制信号形成电路由无线接收模块、单片机 2、

输入键、显示模块、D/A 转换电路和功率放大电路组成,如图 5 所示。系统的工作原理是:无线接收模块接收到无线发射模块发出的数字信号后传送给单片机 2,单片机 2 将接收到的信号与存储在单片机 2 内的预设值进行比较(预设值为理想播种深度时,信号处理电路发出的电压信号 U 的峰值),当接收到的信号小于预设值时,单片机 2 将预设值与接收到信号的差值形成控制信号,控制信号经 D/A 转换电路转换为模拟电压信号后再由功率放大电路放大,传送给电-气比例阀。控制信号的幅值在传感器每次经过印痕区时发生变化,传感器脱离印痕区后,控制信号维持上一次的值不变。单片机 2 内的预设值可通过输入键设置和修改,并在显示模块上显示。

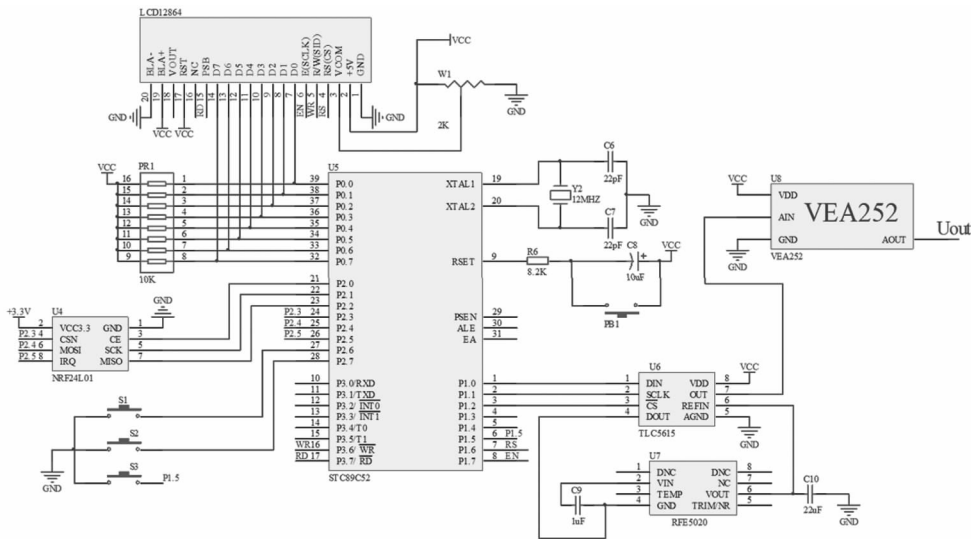


图 5 控制信号形成电路
Fig. 5 Control signal generating circuit

2.4 气压传动系统

气压传动系统由空气压缩机、储气罐、过滤器、电-气比例阀和空气弹簧组成,如图 6 所示。空气压缩机产生压缩空气存储在储气罐内,由过滤器过滤,滤除压缩空气中的粉尘和杂质。电-气比例阀根据控制信号形成电路输出信号的大小输出稳定的气压,从而控制空气弹簧产生相应大小的推力。控制信号幅值越大,空气弹簧产生的推力越强,空气弹簧推动四连杆向下使播种单体对地面产生精确压力,直到使限深轮轮胎面产生足够的变形。当控制信号

形成电路接收到的信号大于或等于预设值时,没有控制信号产生,此时限深轮充分接触地面,从而使播种深度保持一致。

3 系统程序设计

3.1 信号处理程序设计

程序的开始需要对整个系统进行初始化设置,包括定时器 T0、A/D 转换模块、NRF24L01 无线发射模块及单片机相应 I/O 的初始化等,这个过程是由 STC89C52 单片机来完成的。

在模数转换结束后,单片机通过读取前一时刻 A/D 转换值 $V(i)$ 和下一时刻的 A/D 转换值 $V(i+1)$,采用类似爬山算法的方法将前一时刻的 A/D 转换值与下一时刻的 A/D 转换值进行比较,如果 $V(i+1)$ 大于 $V(i)$,则程序用 $V(i+1)$ 替代 $V(i)$,并使单片机重复上述采集、读取和比较过程,直到满足 $V(i+1)$ 小于或等于 $V(i)$,此时采集到的 A/D 转换

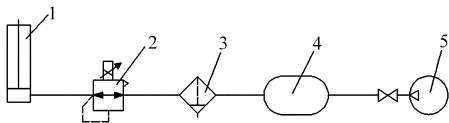


图 6 气压传动系统结构
Fig. 6 Pneumatic transmission system

- 1. 空气弹簧 2. 电-气比例阀 3. 过滤器 4. 储气罐 5. 空气压缩机

值 $V(i)$ 即可认为是当前传感信号经放大后的峰值。单片机 1 使峰值保持电路复位,同时控制 NRF24L01 无线发射模块将峰值 $V(i)$ 发送出去。信号处理程序流程如图 7 所示。

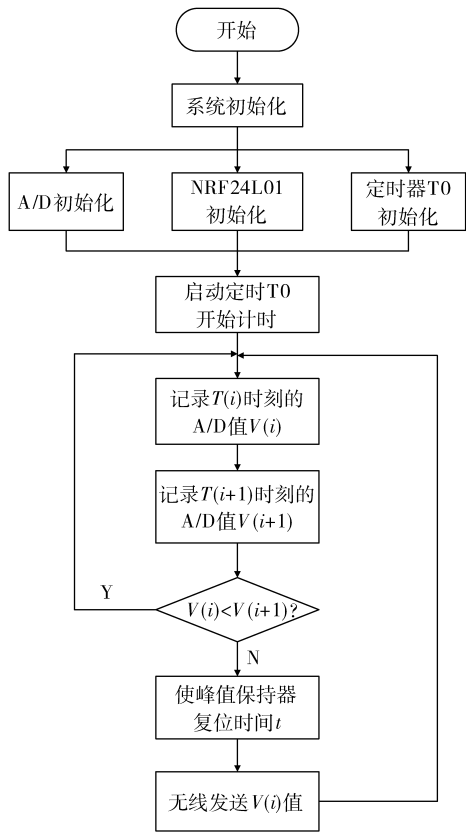


图 7 信号处理程序流程图

Fig. 7 Flow chart of signal processing program

3.2 控制信号产生程序设计

该部分软件设计是为了接收来自信号处理电路发送过来的无线峰值 $V(i)$ 信号,并通过程序控制使之与初始预设值 V 进行比较,如果 $V(i)$ 大于或等于 V ,则说明播种单体对地压力足够,无需额外产生对地表的压力;反之,则系统软件通过单片机控制 D/A 转换器将初始预设值 V 与接收到的峰值 $V(i)$ 的差 ΔV 转换为模拟输出,用以控制气压传动系统做出相应的动作。同时,系统还会将相关需显示的信息通过 LCD 屏予以显示。控制信号产生程序流程如图 8 所示。

4 试验结果与分析

4.1 PVDF 压电薄膜传感器试验

图 9 为使限深轮承受不同的载荷时,峰值保持电路输出的直流电压曲线。限深轮承受的载荷越大,限深轮的胎面变形量也越大,极化现象产生的电荷越多,所产生的动态脉冲信号 U 的峰值越大。由图 9 可知,峰值保持电路输出的直流电压与限深轮

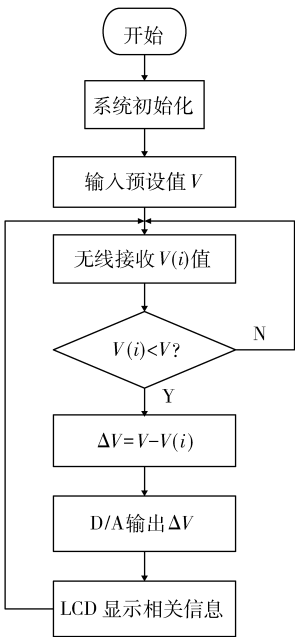


图 8 控制信号产生程序流程图

Fig. 8 Flow chart of control signal generating program

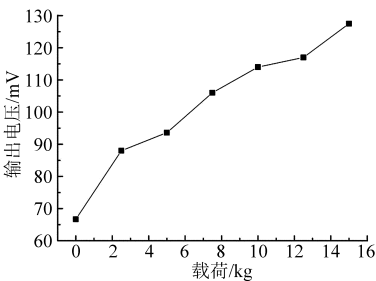


图 9 传感器输出电压与限深轮承载关系曲线

Fig. 9 Relation curve between output of sensor and loading weight of limited depth wheel

承受的载荷量呈线性的正比关系,这与式(5)的结果一致。

4.2 系统响应时间

将空气弹簧装入如图 10 所示支架内,空气弹簧产生的推力可以克服支架弹簧的作用力使支架的中间隔板上下移动,空气弹簧的位移可以由位移传感器测量,使用数据采集卡采集位移传感器的输出信号。

在如图 2 所示的限深轮上施加固定压力,并来回滚动限深轮,PVDF 压电传感器经过轮胎接触地面的印痕区产生形变,PVDF 压电传感器的输出信号经过信号采集电路发送给控制信号形成电路,设定在此固定压力下为理想耕深,控制信号形成电路没有控制信号输出,空气弹簧不产生推力,模拟田间作业的极限情况,将限深轮突然悬空,PVDF 压电传感器的输出信号突然消失,控制信号形成电路输出一个阶跃信号,气压传动系统在此阶跃信号作用下的响应曲线如图 11 所示,空气弹簧行程 40 mm,由

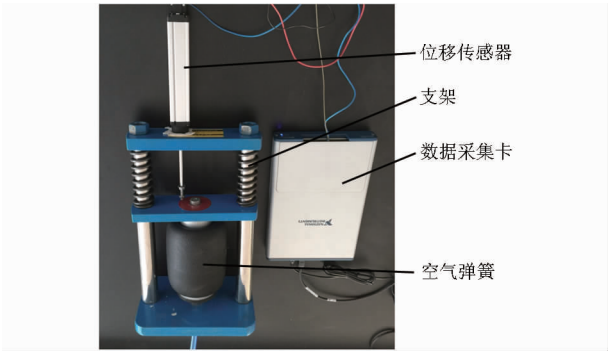


图 10 响应时间测试装置

Fig.10 Response time test device

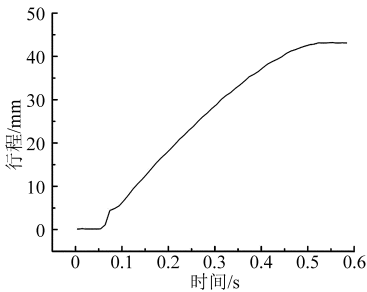


图 11 时间响应曲线

Fig.11 Time response curve



图 12 田间试验效果图

Fig.12 Field test rendering

支架弹簧弹性系数可计算出空气弹簧推力 2 400 N，系统响应时间 0.4 s。

4.3 系统田间性能试验

田间试验于 2014 年春季在吉林农业大学试验农场进行,如图 12 所示。试验地为黑钙土,垄距为 65 cm,前茬为玉米保护性耕作,测定 0 ~ 5 cm 深度土壤含水率为 16.8%,土壤容积密度 1.1 g/cm³,种床平均坚实度 2.4 kg/cm²,垄高 4 ~ 5 cm,茬高 12 ~ 18 cm,留茬行间内有少量植物残株、残叶。系统安装在吉林康达 2BMZF-2X 型免耕精量施肥播种机上,作业行数 2 行,另外一单体采用机械式平行四杆仿形系统,将开沟器入土深度预定为 5 cm。随机选取 3 个测区,测区长度 10 m,为便于测量,卸下播种机覆土装置。为了对比 2 种仿形状态作业效果,作业前对垄体表面修整,使两条垄地表起伏变化高度差均控制在 0.1 m,拖拉机速度稳定后匀速通过试验区,播种机通过后,测量试验区内的种子播深,测定播深时,将开沟器推出的松散土壤刮掉,以垄体的初始平面为测量基准,拖拉机作业速度 5 ~ 8 km/h,不同作业速度下重复测量播深,试验结果如表 1 所示。

表 1 田间对比试验结果

Tab.1 Field contrast test results

参数		作业速度/(km·h ⁻¹)			
		5	6	7	8
平均播深/mm	气动仿形	52	51	54	53
	被动仿形	51	55	56	61
播深合格率/%	气动仿形	94	93	95	91
	被动仿形	88	90	86	58
播深变异系数/%	气动仿形	27	31	33	38
	被动仿形	31	29	36	68

2014 年秋季在吉林农业大学试验农场进行秸秆覆盖地表播种试验,试验地前茬为玉米保护性耕作,测定 0 ~ 5 cm 深度土壤含水率为 19.4%,土壤容积密度 1.2 g/cm³,种床平均坚实度 2.7 kg/cm²,播种前地表秸秆覆盖率平均为 75.15%,播后平均为 47.1%,地表秸秆植被覆盖量为 0.73 kg/m²。开沟器入土深度预定为 5 cm。随机选取 3 个测区,测区长度 10 m,为便于测量,卸下播种机覆土装置。试验结果见表 2。

表 2 秸秆覆盖地试验结果

Tab.2 Straw mulching test results

参数		作业速度/(km·h ⁻¹)			
		5	6	7	8
平均播深/mm	气动仿形	49	51	54	49
	被动仿形	51	53	55	65
播深合格率/%	气动仿形	90	92	95	89
	被动仿形	89	90	85	51
播深变异系数/%	气动仿形	31	35	37	38
	被动仿形	35	32	40	67

综上所述,对比被动式仿形装置,气动播种深度自动控制系统能对地表的起伏及土壤坚实度的变化产生灵敏的反应,精确控制开沟深度,仿形性能可靠,播种作业速度 5 ~ 8 km/h 时,播深合格率能够达到 90%,高速作业时播深合格率明显优于被动式仿形装置,确保免耕播种机在秸秆覆盖地的精确播种质量。

5 结论

(1)应用 PVDF 压电薄膜制作胎面形变传感器,实时监测播种单体对地表压力,通过在播种机机架与播种单体四连杆间安装空气弹簧,推动播种单体能够额外产生对地表的压力,从而保证播种深度的一致性。

(2)设计了结构简单的气动播种深度自动控制系统硬件电路及相应软件,系统根据限深轮是否压实地表来判定开沟器实际开沟深度,当实际深度与预期深度存在偏差时,系统将此偏差转换为控制信

号来控制空气弹簧气压,推动播种单体对地表形成足够压力,使开沟器到达预期深度。

制系统在播种机作业速度为 $5 \sim 8 \text{ km/h}$ 时,播深合格率达到 90%,高速作业时,气动播种深度自动控制系统明显优于被动式仿形装置。

(3)田间试验结果表明,气动播种深度自动控

参 考 文 献

- 高焕文,何明,尚书旗,等. 保护性耕作高产高效体系[J]. 农业机械学报,2013,44(6):35-38,49.
Gao Huanwen, He Ming, Shang Shuqi, et al. High yield and benefit system for conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 35-38, 49. (in Chinese)
- 高焕文,李洪文,李问盈,等. 保护性耕作的发展[J]. 农业机械学报,2008,39(9):43-48.
Gao Huanwen, Li Hongwen, Li Wenying, et al. Development of conservation tillage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 43-48. (in Chinese)
- 胡立峰,李洪文,高焕文,等. 保护性耕作对温室效应的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(5):308-312.
Hu Lifeng, Li Hongwen, Gao Huanwen, et al. Influence of conservation tillage on greenhouse effect [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(5): 308-312. (in Chinese)
- 高焕文,李洪文,姚宗路,等. 我国轻型免耕播种机研究[J]. 农业机械学报,2008,39(4):78-82.
Gao Huanwen, Li Hongwen, Yao Zonglu, et al. Study on the chinese light no-till seeders[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4): 78-82. (in Chinese)
- 王振华,李文广,翟改霞,等. 基于单片机控制的气力式免耕播种机监测系统[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):56-60.
Wang Zhenhua, Li Wenguang, Zhai Gaixia, et al. Monitoring system of pneumatic no-tillage sower based on PIC single-chip microcomputer control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 56-60. (in Chinese)
- 尹彦鑫,郑永军,成智华,等. 少免耕播种机牵引阻力远程监测系统[J]. 农业工程学报,2014,30(6):1-8.
Yin Yanxin, Zheng Yongjun, Cheng Zhihua, et al. Tractive resistance remote monitor system for no-tillage seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(6): 1-8. (in Chinese)
- 白晓虎,张祖立. 基于 ADAMS 的播种机仿形机构运动仿真[J]. 农机化研究,2009(3):40-42.
Bai Xiaohu, Zhang Zuli. Motion simulation of profiling mechanism of a planter based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(3): 40-42. (in Chinese)
- 马永财,张伟,李玉清,等. 播种机单体两种仿形机构的研究[J]. 农机化研究,2011(8):101-103
Ma Yongcai, Zhang Wei, Li Yuqing, et al. Study on two profiling mechanism of planter unit [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011(8): 101-103. (in Chinese)
- 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J]. 农业工程学报,2013,29(14):26-32.
Zhao Shuhong, Jiang Enchen, Yan Yixun, et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14): 26-32. (in Chinese)
- 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(1):227-229.
Wang Xi, Zhang Haiyu, Zhao Jun, et al. Research of electro-hydraulic profiling institutions of soybean seeders[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(1): 227-229. (in Chinese)
- 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)
- Wen Liping, Fan Xiongfei. The design and development of the precision planter sowing depth control system [J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1): 53-58.
- Anthonis J, Mouazen A M, Saey W, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 3: design of depth control system [J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(1): 59-67.
- Mouazen M, Anthonis J, Saey W, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 1: sensor design for measurement of frame height variation from soil surface[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(2): 139-150.
- Saey W, Mouazen A M, Anthonis J, et al. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 2: modelling of the depth control system[J]. Biosystems Engineering, 2004, 89(3): 267-280.
- Mouazen M, Anthonis J, Romon H. An automatic depth control system for online measurement of spatial variation in soil compaction, part 4: improvement of compaction maps by using a proportional integrative derivative depth controller [J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(4): 409-418.
- Yi Jingang. A piezo-sensor-based 'smart tire' system for mobile robots and vehicles[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2008, 13(1): 95-103.