

赵明明, 郝向泽, 赵天才, 等. 基于激光传感器的开沟深度控制系统的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(6): 91-96.

基于激光传感器的开沟深度控制系统的设计与试验

赵明明¹, 郝向泽², 赵天才¹, 何丽楠¹, 何瑞银¹

(1 南京农业大学 工学院/江苏省智能化农业装备重点实验室, 江苏 南京 210031; 2 苏州市相城区农业局, 江苏 苏州, 215100)

摘要:【目的】针对链式开沟机开沟深度难以精确调节的问题, 设计一种基于激光传感器的开沟深度控制系统。【方法】采用激光三角反射式位移传感器实时检测开沟深度, 并与设定目标值比较; 通过控制系统决策驱动液压系统与执行机构, 实现开沟深度的闭环控制; 通过田间试验, 比较了开沟深度控制系统开启前后控制精度和稳定性。【结果】静态试验结果表明, 当开沟深度检测值与目标值相差±50 mm 时, 系统响应时间分别为 0.19 和 0.31 s, 最大控制误差 3 mm。田间试验表明, 开沟深度分别为 200、300 和 400 mm, 前进速度为 3 km·h⁻¹ 时, 启动开沟深度控制系统后, 链式开沟机开沟深度的控制精度和稳定性均得到提高; 与关闭系统相比, 启动系统后控制精度提高了 2.3%, 稳定性系数提高了 4.3%。【结论】该控制系统响应迅速、控制精度较高, 控制误差满足了设置要求。研究结果为链式开沟机开沟深度控制提供了一种解决方法。

关键词: 激光传感器; 控制系统; 链式开沟机; 开沟深度; 设计与试验; 控制精度; 稳定性
中图分类号: S222.52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)06-0091-06

Design and test of a trenching depth control system
based on laser sensor

ZHAO Mingming¹, HAO Xiangze², ZHAO Tiancai¹, HE Li'nan¹, HE Ruiyin¹

(1 College of Engineering, Nanjing Agricultural University/Jiangsu Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing 210031, China; 2 Agricultural Bureau of Xiangcheng District in Suzhou, Suzhou 215100, China)

Abstract: 【Objective】 To design a kind of trenching depth control system based on laser sensor, so as to solve the problem that it is difficult to adjust accurately the trenching depth of chain trencher. 【Method】 The laser triangular-reflecting displacement sensor was used to detect the trenching depth in real time, which was compared with the target value. The closed-loop control of trenching depth was realized by the control system making decision and driving hydraulic system and actuator. The field experiment was conducted to compare the control precision and stability before and after enabling the system. 【Result】 The result of static test showed that when the different values between the detection depth and the target depth were ±50 mm, the response time of the system were 0.19 and 0.31 s respectively, and the maximum control error was 3 mm. The field test showed that when the trenching depths were 200, 300 and 400 mm respectively at the speed of 3 km·h⁻¹, the control precision and stability for trenching depth of the chain trencher were improved after starting the control system. Compared with closing the system, the control precision and stability coefficients increased by 2.3% and 4.3% respectively after opening the system. 【Conclusion】 This control system responds quickly with a high control accuracy, and the control error satisfies the set requirements. The result provides a solution for

controlling the trenching depth of the chain trencher.

Key words: laser sensor; control system; chain trencher; trenching depth; design and test; control accuracy; constancy

链式开沟机是一种连续开沟设备,具有结构简单、作业效率高以及开沟深度便于调节的优点,广泛应用于管道、线缆铺设以及农田水利建设和市政工程等开沟作业^[1-2]。但链式开沟机作业时容易受地表不平影响,导致开沟深度波动大,严重地影响了作业质量^[3]。因此,实现链式开沟机开沟深度的精确控制具有重要意义。赵金辉等^[4]采用延迟时间补偿法构建了开沟深度数学模型,利用 PLC 控制系统实现了开沟深度的有效调节;蔡国华等^[5]基于 ATmega128 单片机,设计了一种播种机开沟器深度自控系统试验台,实现了开沟深度的跟踪控制;Weatherly 等^[6]设计了一种主动式播种深度控制系统,利用 DFS 传感器检测土壤含水率,实现了开沟深度自动调节;黄东岩等^[7]利用压电薄膜传感器获取播种单体与地面的压力,通过控制空气弹簧实现了播种深度的自适应调整。上述研究主要针对播种机的改良,对于链式开沟机开沟深度控制方面的研究鲜有报道。为此,本文设计了一种基于激光传感器的开沟深度控制系统,以期实现开沟深度的闭环控制,为链式开沟机开沟深度控制问题提供一种解决方法。

1 系统结构与工作原理

1.1 系统结构

开沟深度控制系统结构框图如图 1 所示。系统主要由主控单元、液压系统和执行机构组成,其中主控单元由可编程控制器、激光传感器、交互设置界面和电源模块等组成,液压系统由电磁阀组、液压缸和拖拉机液压输出等组成,执行机构由开沟链组合和升降架等组成。链式开沟机结构图如图 2 所示。链式开沟机通过挂接机构与拖拉机 3 点悬挂,2 个激光传感器对称安装在升降架两侧,电磁阀组安装在机架上,液压缸安装在机架两侧,升降架与机架两侧铰接,开沟链组合通过 U 型螺栓固定在升降架上。

1.2 系统设计

1.2.1 执行机构 沟深调节执行机构由机架、液压缸、升降架和开沟链组合等构成(图 2)。其中,液压缸上端与机架铰接,下端与升降架铰接;升降架两侧与机架铰接;开沟链组合固定在升降架上。当液压缸上侧(下侧)进油时,活塞伸出(收缩),带动升

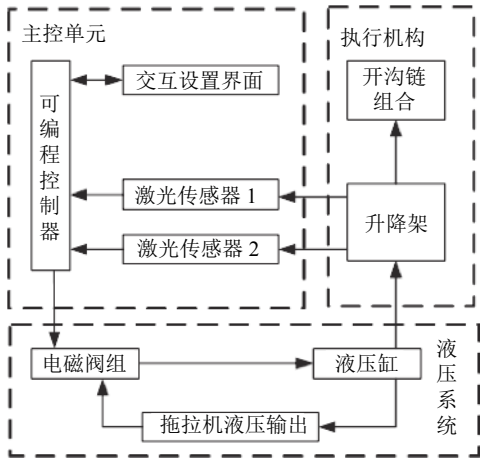
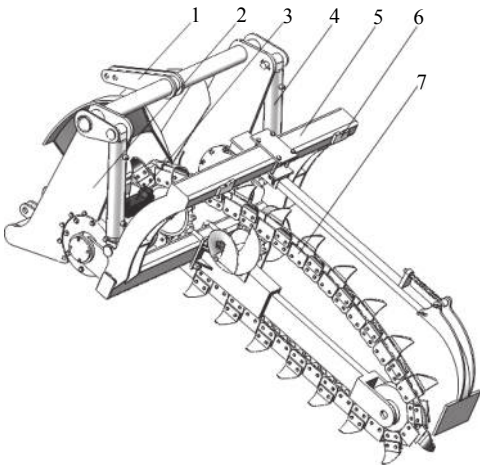


图 1 控制系统结构框图

Fig. 1 The structure block diagram of control system



1: 挂接机构; 2: 机架; 3: 控制阀组; 4: 液压缸; 5: 升降架; 6: 激光传感器; 7: 开沟链组合

图 2 链式开沟机结构图

Fig. 2 The structure diagram of chain trencher

降架及固定其上的开沟链组合绕升降架铰接点向下(向上)转动,实现开沟深度调节。研究选用耳环型液压缸,工作行程 0~400 mm,开沟深度调节范围 0~500 mm。

1.2.2 液压系统 如图 3 所示,为了实现开沟深度闭环控制,在拖拉机液压输出和液压缸之间加装电磁阀组。电磁阀组包括电液比例控制阀和两位三通电磁阀,电液比例控制阀起到控制液压油流量与流向的作用,两位三通电磁阀用于链式开沟机未切削土壤前的空程快进^[8]。具体工作过程:链式开沟机未切削土壤前,电液比例控制阀处于中位,两位三通电磁阀失电右位接入系统,液压缸有杆腔与无杆腔

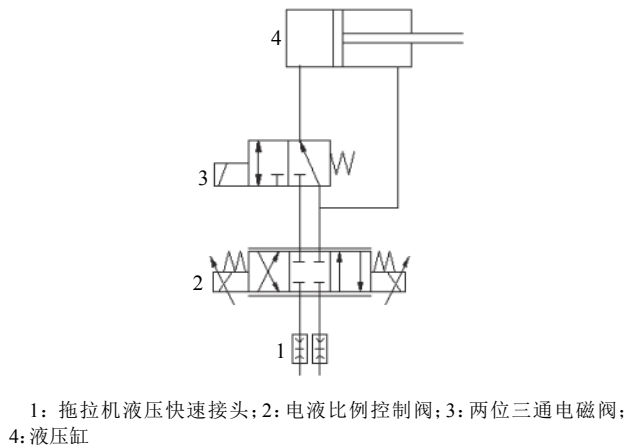


图 3 液压系统原理图

Fig. 3 The schematic diagram of hydraulic system

相连形成差动连接, 液压缸活塞快速伸出, 推动开沟链组合快速到达工作位置。到达工作位置后, 两位三通电磁阀得电一直处于左位接入系统的状态, 当误差(e) $\leq$ 最大允许误差(e')时, 电液比例控制阀处于中位, 无液压油进入, 液压缸无动作; 当 $e > e'$ 且传感器获取的开沟深度(h) $<$ 设定目标开沟深度(h')时, 电液比例控制阀处于右位, 液压油进入无杆腔, 液压缸活塞伸出; 当 $e > e'$ 且 $h > h'$ 时, 电液比例控制阀处于左位, 液压油进入有杆腔, 液压缸活塞收缩。

研究选用的拖拉机为东方红 LX754, 其液压泵型号为 CBN-G316, 液压泵额定压力为 25 MPa, 额定流量为 50 L $\cdot$ min $^{-1}$ 。据此电液比例控制阀选择 VTOZ 公司生产的 MA-DHZO-A 型, 两位三通电磁阀选择 Huade 公司生产的 4WRE10M16-10B/6AG24NETZ4/M 型。

1.2.3 控制系统 系统采用的控制器为 STC12C5A60S2 系列单片机, 完全兼容传统 8051, 内部集成 MAX810 专用复位电路, 2 路 PWM, 8 路高速 10 位 A/D 转换 (250 K/S), I/O 端口丰富; 采用 LM2576HVT-5.0 集成电路将拖拉机 12 V 直流转化成 5 V 直流^[6], 为单片机供电^[9-10]; 驱动器选用东驰 ET-HX 型电子放大器。控制器连接示意图见图 4。控制器在固定频率下输出 PWM 信号, 根据开沟深度检测值与目标值的差值, 调节 PWM 波的占空比, 获得对应输出电流, 经驱动器放大后加载到电液比例控制阀, 控制电液比例控制阀阀芯的移动方

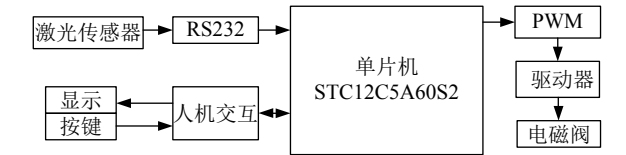


图 4 控制器连接示意图

Fig. 4 The connection diagram of controller

<http://xuebao.scau.edu.cn>

向和阀口开度, 实现对液压系统流方向和流量的比例控制。

根据臧盛超^[11]的方法, 使用 Keil uvision 5 编译器进行程序编写与编译。主流程图如图 5 所示。

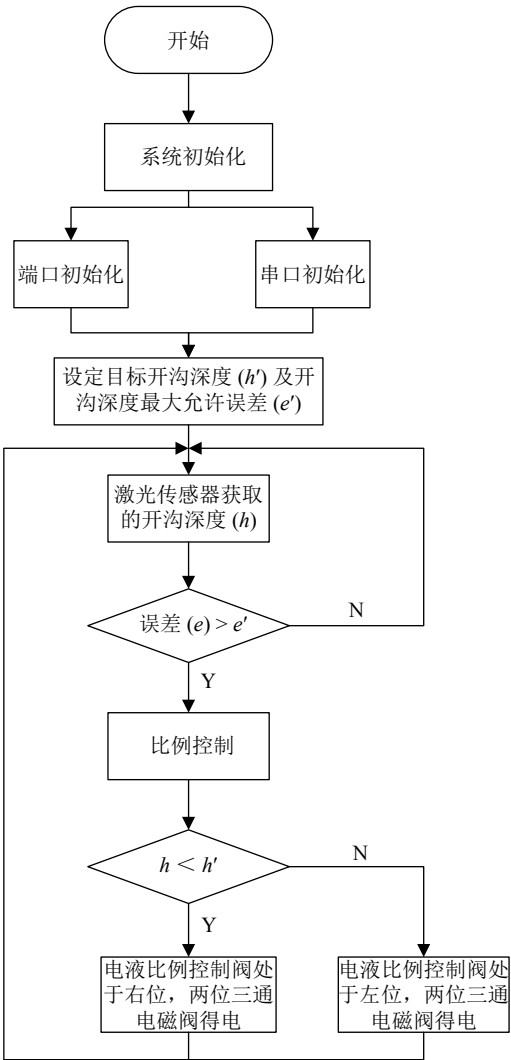


图 5 软件流程图

Fig. 5 The flow chart of software

1.3 测距原理

激光三角法测距技术是光电检测技术的一种, 与其他非接触测量方法相比, 具有结构简单, 使用灵活, 测量迅速, 对待测表面要求较低等优点^[12-13]。本研究采用激光三角反射式位移传感器, 其测距原理如图 6 所示, 半导体激光器 (Laser diode, LD)^[1]发出的光束经会聚透镜垂直投射并聚焦到被测物体表面上形成光斑, 由于物体表面具有一定粗糙度, 引起光斑在物体表面发生漫反射, 其中一部分散射光经过接收透镜成像于光电探测器件 (Charge coupled device, CCD)^[2]上。当被测物体发生微小位移或表面高低发生变化, 光点将沿激光束的方向产生微小

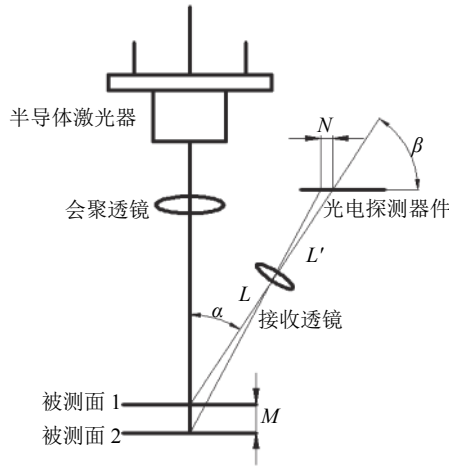


图 6 激光三角反射式位移传感器测距原理图

Fig. 6 The principle diagram of distance measurement of laser triangular reflection displacement sensor

移动,致使 CCD 上像点随之移动^[14-15]。系统采集像点移动信号,经调理电路处理反馈给控制器计算出物体产生的位移。若像点在 CCD 上移动的距离为 N ,被测物体表面移动的距离为 M ,由相似三角形得出:

$$\frac{L'}{N} = \frac{L + M \cos \alpha}{M \sin \alpha}, \tag{1}$$

整理后有:

$$M = \frac{NL}{L' \sin \alpha - N \cos \alpha}, \tag{2}$$

式中: L' 为接收透镜后主面到成像面中心点的距离; L 为激光束光轴的交点到接收透镜前主面的距离; α 为激光束光轴与接收透镜光轴之间的夹角^[4]。

本研究采用的激光传感器型号为德国 MICRO-EPSILON 公司的 1700BL 型,测距范围为 2~1 000 mm,分辨率为 0.03 μm ,波长为 405 nm (可视/红色),最大输出功率 1 mW,能够满足开沟深度检测的要求。

1.4 工作原理

在升降架两侧相同位置安装 2 个激光传感器,形成双激光检测模块,安装位置与开沟链组底部的垂直距离为 h_1 。当链式开沟机工作时,双激光检测模块同步检测对地距离为 h_2 和 h_3 ,为有效地减少因地表不平造成的检测误差,取 h_2 和 h_3 的平均值作为最终检测结果。根据以上参数计算开沟深度检测值 (h):

$$h = h_1 - \left(\frac{h_2 + h_3}{2} \right), \tag{3}$$

设定 e 为链式开沟深度的检测值 (h) 与目标值 (h') 之差的绝对值:

$$e = |h - h'|, \tag{4}$$

系统工作前,首先在交互设置界面中设定开沟深度目标值 (h') 和开沟深度最大允许误差 (e'),当 $e \leq e'$,开沟深度符合设定要求,控制器无信号输出,液压缸不动作;当 $e > e'$,开沟深度不符合设定要求,控制器输出响应信号驱动电磁阀组动作,通过液压缸推动执行机构,调节开沟深度直到符合设定的最大允许误差,控制器将停止信号输出,电磁阀组失电,停止深度调节。

2 试验结果

2.1 静态响应试验

静态响应试验在南京农业大学工学院控制系统综合试验台上进行。分别在升降架两侧安装激光传感器,然后连接传感器、控制器和电磁阀组,完成控制系统的组装;根据蔡国华等^[15]的方法,在传感器下方放置可上下移动的平板用于模拟地表;选用 NI USB-6009 数据采集卡采集激光传感器检测的开沟深度 (h),采样频率设定为 100 Hz。

在交互设置界面设置 $h_1=700\text{ mm}$ 、 $h'=300\text{ mm}$ 、 $e'=5\text{ mm}$,调整平板与传感器的距离分别为 350 和 450 mm,即模拟开沟深度过深或过浅 50 mm。启动系统,静态响应曲线如图 7 所示。由静态响应曲线可知,当开沟深度比目标开沟深度深 50 mm 时,响应时间 0.19 s,控制误差 2 mm;浅 50 mm 时,响应时间 0.31 s,控制误差 3 mm。表明开沟深度控制系统响应迅速,控制误差能够满足设置要求。

2.2 田间试验

田间试验于 2017 年 8 月在南京市高淳区桤溪镇禾田坊家庭农场进行,试验地块长 74.3 m、宽 52.6 m,土壤类型为水稻土^[16-17],试验前测定 0~400 mm 土壤容重、含水量和坚实度,结果如表 1 所示。根据秸秆集中沟埋还田对开沟深度的要求^[18-19],选定开沟深度分别为 200、300 和 400 mm;根据链式开沟机常用作业速度范围^[20-21]和当地实际作业情况,选择在机具前进速度为 3 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的条件下进行试验。链式开沟机沿田块长边进行开沟作业,每个开沟深度重复作业 10 个行程,前 5 个行程不启用控制系统,后 5 个行程在机具启动后,行进前启用控制系统。根据《田间开沟机械作业质量》标准^[22],每个行程的作业距离均大于 50 m。同一开沟深度条件下,系统启用前后各随机选取 2 个作业行程,每个行程内等距 (10 m) 取 5 点,共 10 点,用卷尺测量实际开沟深度,每个点重复测量 3 次,取平均值进行数据分析,测量结果见表 2。

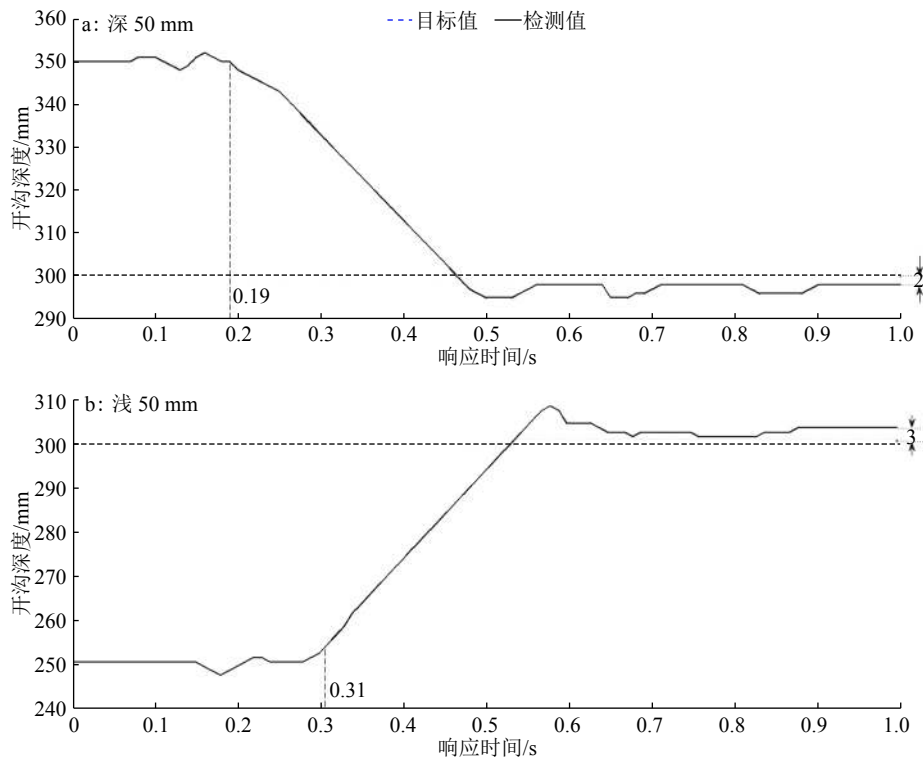


图 7 不同开沟深度的静态响应曲线

Fig. 7 The static response curve at different trenching depth

表 1 田间试验的土壤参数

Table 1 Parameters of soil in the field experiment			
深度/mm	容重/(g·cm ⁻³)	含水量(w)/%	坚实度/MPa
0~100	1.31	21.63	0.91
100~200	1.48	18.45	1.89
200~300	1.55	16.83	2.34
300~400	1.58	15.97	2.87

表 2 不同的选定开沟深度下系统启用前后的实际测量结果

Table 2 The measurement results of different selected trenching depths before and after enabling the system

试验点	200 mm		300 mm		400 mm	
	关闭	启动	关闭	启动	关闭	启动
1	156	213	351	296	422	366
2	181	172	269	319	353	421
3	233	166	344	271	371	396
4	165	187	278	288	353	373
5	178	191	353	323	465	425
6	189	209	286	262	356	376
7	233	196	336	271	449	428
8	239	179	245	322	386	386
9	196	189	329	289	331	389
10	206	216	347	311	418	438
平均值	184.6	191.8	313.8	295.2	390.4	399.8

根据实际开沟深度测量结果, 计算开沟深度稳定性系数, 结果如图 8 所示。

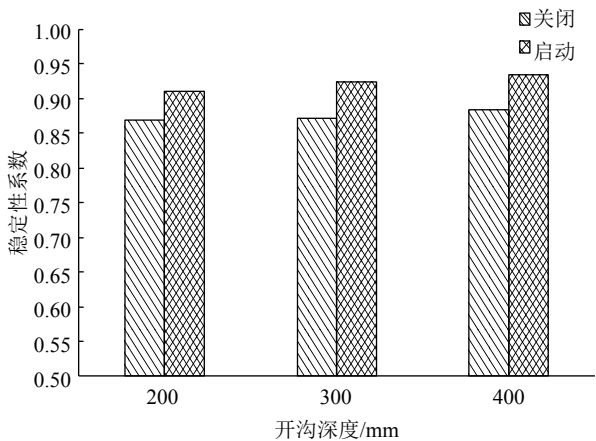


图 8 开沟深度稳定性系数

Fig. 8 The stability coefficient of trenching depth of chain trencher

设定开沟深度为 200、300 和 400 mm 时, 关闭开沟深度控制系统, 实际测量的开沟深度平均值分别为 184.6、313.8 和 390.4 mm, 开沟深度稳定性系数为 86.8%、87.2%和 88.3%; 启动系统后, 平均值分别为 191.8、295.2 和 399.8 mm, 稳定性系数分别为 91.1%、92.3% 和 93.5%。表明启动开沟深度控制系统后, 链式开沟机开沟深度的控制精度和稳定性得到提高, 控制精度提高 2.3%, 稳定性系数提高 4.3%。

3 结论

基于激光三角反射式测距原理, 设计了针对链式开沟机的开沟深度控制系统, 通过双激光检测模块实时采集开沟深度, 实现开沟深度自适应实时调节。静态响应试验表明, 当开沟深度与目标值相差 $\pm 50\text{ mm}$ 时, 系统响应时间分别为 0.19 和 0.31 s, 最大控制误差 3 mm, 系统响应迅速, 控制误差在设定范围内。田间试验表明, 启动系统后, 控制精度提高了 2.3%, 稳定性系数提高了 4.3%。本研究结果为链式开沟机开沟深度控制问题提供了一种解决方法。

参考文献:

[1] 覃国良, 廖庆喜, 周善鑫, 等. 基于 MATLAB 的链式开沟机功耗的优化设计与分析[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(1): 210-214.

[2] 王京凤. 微型果园开沟机的设计分析与优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.

[3] 张琦, 王伟, 廖结安. 国内外果园施肥开沟机的研究现状[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 264-268.

[4] 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.

[5] 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.

[6] WEATHERLY E T, BOWERS J C G. Automatic depth control of a seed planter based on soil drying front sensing[J]. T ASABE, 1997, 40(2): 295-305.

[7] 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]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 1-8.

[8] 万国伟, 舒彩霞, 刘晓鹏, 等. 液压驱动式圆盘耙设计与仿真试验[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 117-124.

[9] 林家泉, 程绪宇, 周贤民, 等. 一种小型直流电机控制系统硬件设计方案[J]. 自动化与仪表, 2014, 29(11): 73-76.

[10] 张锋, 刘丹. 温室大棚数据采集与控制系统设计[J]. 现代化农业, 2018(4): 2-4.

[11] 臧胜超. 基于 EPA 的工业控制器的设计[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.

[12] 王晓嘉, 高隼, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004(S2): 601-604.

[13] 郝向泽, 何旭鹏, 邹翌, 等. 基于光电传感器的精密播种机排种性能监测系统研究[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(1): 120-124.

[14] 梅剑春, 叶青, 田建国. 钢管管端内外径测量系统的设计与实现[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 815-821.

[15] 冯俊艳, 冯其波, 匡萃方. 高精度激光三角位移传感器的技术现状[J]. 应用光学, 2004(3): 33-36.

[16] 魏彬彬. 高淳县生态农业发展规划研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006.

[17] 张维理, 徐爱国, 张认连, 等. 土壤分类研究回顾与中国土壤分类系统的修编[J]. 中国农业科学, 2014, 47(16): 3214-3230.

[18] YANG H S, YANG B, DAI Y J, et al. Soil nitrogen retention is increased by ditch-buried straw return in a rice-wheat rotation system[J]. Eur J Agron, 2015, 69: 52-58.

[19] WANG X H, YANG H S, LIU J, et al. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice-wheat rotation system[J]. Catena, 2015, 127: 56-63.

[20] 农机通. 清旋 1KJ-35 开沟机[EB/OL]. [2018-04-19]. <https://www.nongjitong.com/product/11167.html>.

[21] 几款链式开沟机的性能及特点比较[J]. 农业机械, 2006(20): 6.

[22] 中华人民共和国农业部. 田间开沟机械作业质量: NY/T 740—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.

【责任编辑 周志红】