

旋转耕作部件性能测试试验台设计与应用

曾 荣^{1,2} 李东东^{1,2} 祝英豪^{1,2} 夏俊芳^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对现有室内土槽测控方式落后、旋耕刀辊更换不便,以及田间试验的土壤环境因素不可控等问题,提出了一种用于旋转耕作部件性能测试的专用智能化测试试验台,阐述了其设计原理及测控方式。试验台由测试台车及轨道系统构成,测试台车集旋耕、土壤平整、土壤压实、耕深调节功能于一体,功能相对独立,能够实现刀辊快速更换;轨道系统由多段拼装而成,长度可扩展,高度可调节,位置可移动。测试台车行走、旋耕作业及耕作深度调节均采用电力拖动方式;控制系统以 PLC 为核心,借助无线射频 LoRa 通信控制技术,实现无线控制输入;通过调试,测试台车可实现 0~1.17 m/s 前进速度、0~340 r/min 旋耕转速及 0~30 cm 耕作深度的稳定无级调节。测试系统集成前进速度、刀辊扭矩、刀辊转速、刀辊功耗等多参数测试于一体,通道可扩展,同时采用无线数据传输方式,传感器数据与计算机之间采用无线连接。应用该试验台开展了旋耕刀辊功耗试验,以前进速度、刀辊转速及耕作深度为因素,以功耗为指标,对普通旋耕刀辊开展了三元二次旋转正交组合试验;以螺旋横刀刀宽、安装角为因素,以功耗为指标,对组合旋耕刀辊进行了试验。试验表明,所设计的旋转耕作部件性能测试试验台满足多因素多水平的测试需求,验证了该试验台对不同旋转耕作部件的良好适应性。

关键词: 旋转耕作部件;性能测试试验台;控制系统;测试系统;功耗试验

中图分类号: S222.3; N945.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)05-0088-10 **OSID:**



Design and Application of Performance Test Bench for Rotary Tiller Components

ZENG Rong^{1,2} LI Dongdong^{1,2} ZHU Yinghao^{1,2} XIA Junfang^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Multi-factor and multi-level machine-soil interaction experiment is the basis of structural design and determination of optimal working parameters for rotary tiller components. Existing indoor soil-bins have the disadvantages of backward control and measurement methods and inconveniences in replacement of blades rollers. At the same time, the problems of uncontrollable soil environmental factors exist in field experiments. In view of the above problems, a special intelligent test bench for performance test of rotary tiller components was presented, and its design principle, control mode and measurement method were expounded. The test bench consisted of a test trolley and a track system. The test bench was composed of the test trolley and the track system. The test trolley integrated the functions of rotary tillage, soil leveling, soil compaction, and tillage depth adjustment. With relatively independent functions, the test bench can realize rapid replacement of rotary blade rollers. The track system was assembled by multiple sections, for which the total length can be expanded, the height can be adjusted and the position can be moved. Electric drive mode was adopted in driving, rotary tillage, and tillage depth adjustment of the test trolley. Taking PLC as control core, radio frequency LoRa communication control technology was used to achieve wireless control input, which guaranteed the convenience in operation and maintenance of

收稿日期: 2019-08-14 修回日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605182)、公益性行业(农业)科研专项(201503136)、国家重点研发计划项目(2017YFD0301303)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(2662016QD001)

作者简介: 曾荣(1988—),女,讲师,博士,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail: zengrong@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 夏俊芳(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计及测控研究,E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

the test bench. The debugging results showed that the forward speed, rotary tillage speed and tillage depth can be adjusted continuously, which were in ranges of $0 \sim 1.17 \text{ m/s}$, $0 \sim 340 \text{ r/min}$ and $0 \sim 30 \text{ cm}$, respectively. Multi-measuring functions were completed in the test bench, such as forward speed, working torque, rotary speed, and power consumption. The test channels were designed to be extensible. What's more, wireless data transmission mode was adopted to realize wireless connection between sensor data and computer. Power consumption experiments of rotary blade rollers were carried out on the test bench. Taking forward speed, rotary speed and tillage depth as the experimental factors, and power consumption as experimental index, the rotating perpendicular combination experiment was conducted on standard rotary blade roller. The effects of the three factors on power consumption were studied and the regression (equation) of the experimental index and factors was established. In addition, the comprehensive experiment was carried out on combined rotary blade roller with the index of power consumption, and the effects of width and installation angle of the helical blade were analyzed. The above experiments verified that the presented test bench can meet the requirements of multi-factor and multi-level experiment, and the good adaptability to different rotary blade components.

Key words: rotary tiller components; performance test bench; control system; test system; power consumption experiment

0 引言

精准农业、保护性耕作对新型土壤耕作机具的研发提出了更高要求^[1-4]。为适应新型土壤耕作机具的研发,对试验测试设备性能和测试功能的要求越来越高。以旋耕机旋耕刀辊、秸秆粉碎机粉碎刀辊为代表的旋转耕作部件,其性能受自身工作参数、结构参数及土壤特性参数的综合影响^[5-13],在进行旋转耕作部件设计以及最优工作参数确定时,需进行多因素多水平的机具与土壤交互试验。

传统的旋转耕作部件特性试验通常在田间或室内土槽试验台上完成。田间试验能够直接反映耕作机械的实际性能及土壤的响应^[14],主要通过拖拉机悬挂旋转耕作部件完成。该方式存在耕深不稳定、机具振动强烈、工作参数控制精度差的弊端。此外,田间试验时刀辊的互换性差、工作效能差,不利于开展多因素多水平试验。土槽试验平台可为旋耕部件的研发提供准确有效的试验数据,对于农机减阻降耗、结构优化等设计,以及土壤耕作部件松碎土机理探索具有重要的意义,是进行土壤耕作部件研发的有效装置^[15-16]。传统的土槽试验台通常在室内搭建,占地面积大、制造和维护成本高、软件封装无法扩展,不具备可移动性^[17-19]。此外,驱动方式和控制方式落后,试验台测试系统的测试手段、测试方法、测试功能、测试装置的性能等不能满足新型耕作机具试验测试任务及测试要求。

针对上述田间试验和室内土槽试验存在的问题,许多高校及科研院所开展了田间原位测试系统的研制,开发了基于现有室内土槽的土壤耕作试验装置。田间原位测试系统可以反映田间真实作业状态,同时也带来了土壤环境因素不可控的问题,对于

研究新型耕作部件的特性及确定最优工作参数带来了困难^[14,20-21]。基于土槽的试验装置保证了试验的可重复性,但同时存在测控方式落后、耕深调节不准确及刀辊更换不便等问题,对于旋转耕作部件的测试针对性不强,测试系统动态特性较差,测试功能不够完善^[22-25]。

因此,根据旋转耕作部件性能试验的需求,本文设计一台专门用于旋转耕作部件性能测试的试验平台,以兼顾田间试验及室内土槽试验的优点。

1 试验台总体结构

传统的土槽试验台占地面积大、设备维护成本高、控制策略复杂,对旋转耕作部件的性能测试针对性和专用性不强。本试验台设计要求控制系统控制策略简单可靠,结构尽可能紧凑合理、维护方便、占地面积小;要求试验台移动方便;可对旋耕刀辊扭矩、转速和功率以及试验台前进速度等多项参数进行测试。根据上述设计要求对试验台进行了总体设计,其结构示意图如图1所示。该试验台主要由轨道系统、试验台车及搭载在试验台车上的旋耕部件、耕深调节部件、土壤镇压部件、控制柜等主体结构组成。轨道系统铺设在地面,可模拟土槽功能,同时可在特定田块铺设成多行,以实现田间测试;试验台车采用自驱动行走的方式沿轨道运行,且同时完成旋耕作业;旋耕作业、耕深调节均采用电力拖动方式,可实现无级调节,其中耕深调节采用伺服驱动的方式,参数调节更加稳定、精确,且可实现闭环控制。上述方式可避免田间试验由拖拉机驱动带来的土壤物性的改变,也可避免目前室内土槽常采用的三点悬挂加驱动轴的连接方式,旋耕刀辊互换性强,耕作深度调节准确。试验台可保证一定的作业幅宽从而

适应不同刀辊的需求,同时也可保证有效的作业距离。

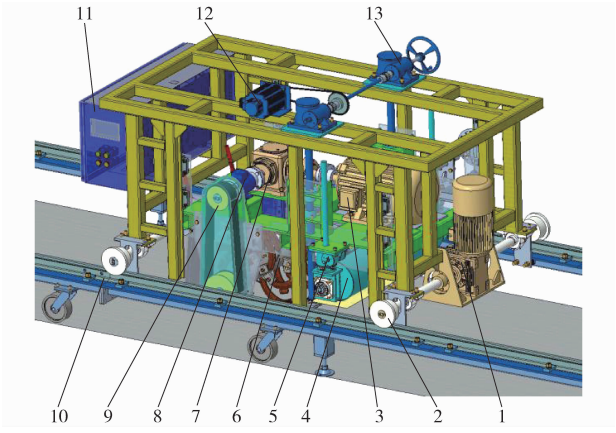


图 1 试验台示意图

Fig.1 Schematic of test bench

1. 台车驱动电机 2. 台车行走轮 3. 旋耕驱动电机 4. 镇压滚筒 5. 镇压蜗轮蜗杆升降机 6. 旋耕刀辊 7. 旋耕转向器 8. 扭矩转速传感器 9. 旋耕侧边同步传动装置 10. 轨道系统 11. 控制柜 12. 耕深调节驱动电机 13. 耕深调节蜗轮蜗杆升降机

2 关键部件设计

2.1 轨道系统

轨道系统为试验台车的行走提供支撑。为适应不同作业长度,且保证可移动性,轨道系统采用拼接式设计。目前的轨道系统采用三段拼接而成,长度分别为2、4、6 m,轨道跨度为1.2 m,如图2所示。2 m轨道可作为试验台车的移动装置,下方设置万向轮,当试验台车被移动至2 m轨道上时,可人力推动2 m轨道,将试验台车移动至其他位置。每段轨道可通过端面连接板进行连接,当需要增大作业距离时,可在6 m轨道端部进行拼接。轨道系统可铺设于特定场地实现土槽测试功能,此时多段轨道固定拼接,通过每段轨道下方的地脚调节高度并保持轨道系统平衡。轨道系统也可铺设于特定田块,此时需在田块铺设多行轨道,田块尾部硬化处理,单行耕作结束后借助2 m轨道将试验台车移动至下一行继续进行耕作,从而实现田间测试。轨道系统可铺设于旱地及水田,满足不同物性土壤条件下的测试需求。

2.2 试验台车

试验台车由车体及搭载于车体上的旋耕部件、耕深调节及镇压部件等主要工作部件组成。试验台车由前进三相异步电动机驱动,通过车体两侧安装的行走轮与轨道系统上的钢轨配合,保证行走的稳定性。针对旋耕机正旋切土条件下产生的寄生牵引力,前进驱动电机选用刹车制动电机,同时通过加速度控制对制动过程进行调节,以保证台车启动与刹

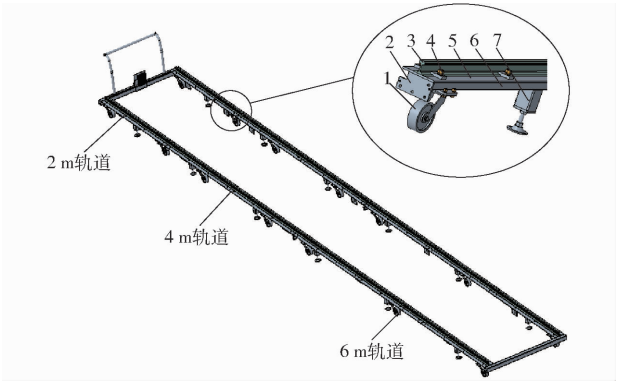


图 2 轨道系统组成

Fig.2 Structure of track system

1. 万向轮 2. 端面连接板 3. 钢轨 4. 压轨器 5. 支撑板 6. 支撑方钢 7. 地脚

车平稳。为测量台车前进速度,在行走轮轴端安装编码器,通过编码器测量行走轮转速。台车行走主要依靠行走轮与轨道上的钢轨之间的滚动,由于钢材的接触过程中滑动摩擦可以忽略不计,因而可由行走轮转速获得台车前进速度。由于旋耕作业时牵引阻力非常小,尤其正向旋耕时,其牵引阻力可以忽略不计,选用驱动功率为3 kW的驱动电机实现台车行走。

试验台车车体与旋耕部件之间采用分体式设计,实现两者之间的相对运动,从而实现旋耕刀辊的耕作深度的调节。通过安装于车体上的导轨、旋耕部件上的滑块对旋耕部件的上下运动进行导向,通过伺服电机实现蜗轮蜗杆升降机驱动旋耕部件的上下运动。运用数显式扭矩扳手转动涡轮测定升降机驱动旋耕部件升降所需的最大扭矩,选用功率为2.3 kW、额定扭矩为15 N·m的伺服电机作为耕作深度调节的动力。旋耕动力由三相异步电机提供,经由转向器、侧边传动传递至刀辊;刀辊通过法兰与旋耕部件连接,实现不同结构的旋转耕作部件的快速更换。为实现旋转耕作过程的动态扭矩、功率测量,在侧边传动前端直连扭矩转速传感器。为实现多种刀辊的功耗适应性^[26-28],使试验台满足多种土壤物性下的碎土、碎茬、秸秆还田等测试需求,选择驱动功率为11 kW的驱动电机。

当试验台以土槽功能工作时,镇压部件可用于多次重复试验的土壤恢复。镇压部件与旋耕部件之间采用嵌套式设计,通过镇压蜗轮蜗杆升降机对镇压高度进行调节。土壤恢复主要依靠内部带叉状轮轂的镇压滚筒与土壤之间的挤压实现。在进行重复试验时,首先调节合适的镇压深度,通过台车行走带动滚筒在直线运动时产生被动滚动,与土壤之间进行挤压,从而实现土壤镇压。

耕作深度是多因素多水平试验中的一项关键因

素,由于地面在每次试验之后,其绝对高度均会发生一定的差异,因而设计了两种标记耕作深度的方式。第1种为手动观察方式,借助于布置在车架上的标尺及布置于旋耕装置上的指针,观察刀辊距离地面的高度,其工作原理如图3所示。当观察到旋耕刀与地面将要接触时,标记为位置1,记录此时标尺上的刻度,根据所要调节的耕深 h 继续调节直至指针到达位置2,该方法操作简单,较为可靠。第2种为自动方式,该方式借助于安装在刀轴固定端的距离传感探头,在每次试验准备期间,按下耕深自动调节按钮,伺服电机驱动升降机运动至耕深预定值(保证每次耕深调节前刀辊与地面之间的高度为预定值),暂停2 s,伺服电机再次启动运行驱动升降机向下运动至设定的所需耕深;该方式取决于传感器的精度,而传感器在使用过程中(尤其当前次试验耕深较大时)容易粘附土壤,造成检测不准确,影响耕深调节过程,因而在使用时需人为监测传感器状态。

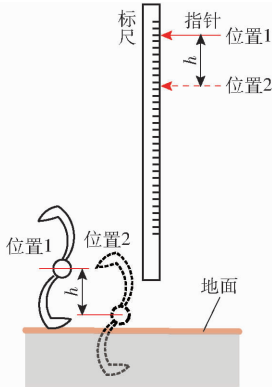


图3 耕作深度标记原理图

Fig.3 Schematic of tillage depth marking

通过设计,该试验台车的技术参数如表1所示。

表1 试验台车技术参数

Tab.1 Performance parameters of test trolley

参数	数值
台车尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 000×1 100×900
台车质量/kg	1 000
牵引驱动功率/kW	3
旋耕驱动功率/kW	11
耕深调节驱动功率/kW	2.3
台车前进速度/(m·s ⁻¹)	0~1.17
旋耕刀辊转速/(r·min ⁻¹)	0~340
耕作深度调节范围/cm	0~30
镇压深度调节范围/cm	0~15
旋耕幅宽/mm	753
镇压辊工作幅宽/mm	850

3 测控系统设计

测控系统是实现试验台功能的关键组成部分,

其中控制系统用于实现各项工作参数的调节,测试系统用于性能参数的数据采集与处理。对试验台的控制系统与测试系统分别进行阐述。

3.1 基于 PLC 的控制系统设计

控制系统需完成台车驱动电机、旋耕驱动电机及耕深调节伺服电机的控制,实现不同前进速度、旋耕转速及耕作深度等作业参数的调节,以适应多因素多水平试验需求。

控制系统以 PLC 作为控制单元,实现整机的各项控制。台车驱动电机与旋耕驱动电机均为三相异步电机,采用变频器对其进行控制;同时为了提高系统的可控性和集成度,变频器与 PLC 之间实现 Modbus 通讯。耕深调节电机为伺服电机,由 PLC 的脉冲输出口实现定位控制。控制系统的输入包括:启动、停止等数字量控制输入以及前进速度、旋耕转速、需求耕深、距离传感器等模拟量控制输入;距离传感器通过模数转换模块与控制器之间实现数据读取;前进速度、旋耕转速、需求耕深等参数通过文本控制器进行输入,可在每一次试验前(停机状态)进行文本输入。试验台车的运行状态及作业参数的调节需在试验过程中进行,因而控制试验台车的操纵装置须在无线下操作,以方便试验人员对试验台车的控制。基于 LoRa 无线射频控制技术,设计了无线按钮盒,将常用操纵按钮集成于无线按钮盒,实现对控制系统的无线输入,控制按钮与无线按钮盒内的 ZKD-(12H2SO)-LoRa 无线模块进行有线连接;无线传输另一侧 PLC 控制器同样与另一无线模块进行连接,由两个无线模块实现数据传输。该无线控制系统能够实现全天候、远距离、低功耗控制。控制系统构成如图4所示。

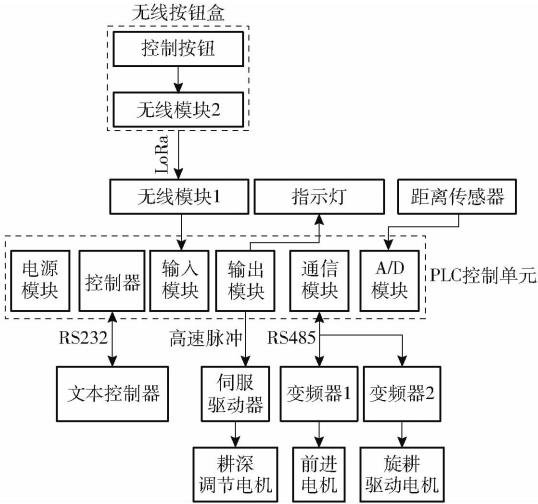


图4 控制系统构成

Fig.4 Composition of control system

控制系统软件分为整机运行的逻辑程序、PLC

与变频器之间的通信程序及 PLC 与伺服驱动器之间的定位控制程序。整机运行的逻辑控制流程如图 5

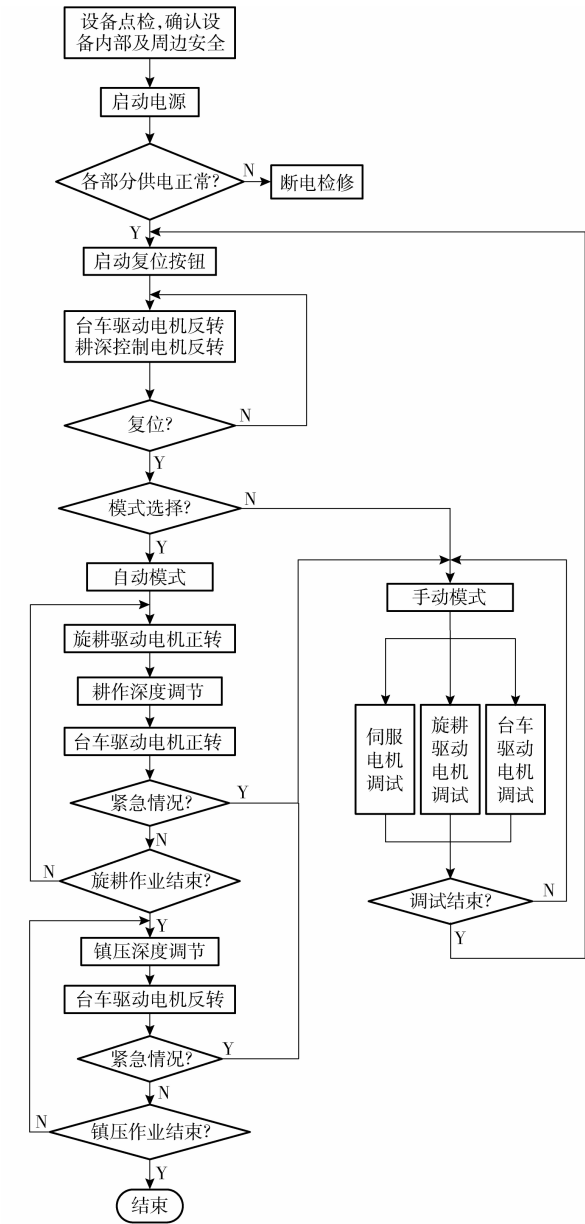


图 5 逻辑控制流程图

Fig. 5 Flow chart of logical control

所示,整机工作分为自动模式(工作模式)和手动模式,自动模式用于正常试验的控制,手动模式用于调试或出现故障后的各项检修。对控制系统进行联机调试,控制系统能实现旋耕刀辊在 0 ~ 340 r/min 范围内的转速连续调节,此时变频器输出频率范围为 0 ~ 47.62 Hz;控制系统能实现试验台车在 0 ~ 1.17 m/s 范围内的前进速度连续调节,此时变频器输出的频率范围为 0 ~ 42.65 Hz;控制系统能实现耕作深度在 0 ~ 30 cm 范围内的稳定调节。

3.2 基于虚拟仪器的测试系统设计

虚拟仪器利用高精度的传感器、高性能的数据采集硬件、方便高效的采集软件完成测试工作^[29-30]。基于虚拟仪器的测试系统无需实际的数据处理与分析硬件,借助于软件即可实现数据后处理、存储与显示。该试验台使用 LabVIEW 软件平台,借助相应的采集硬件,构建测试系统。

3.2.1 系统构成

测试系统完成试验台车的作业参数测量和旋耕刀辊的性能参数测量。目前,主要实现旋耕刀辊的作业转速、扭矩、作业功耗及试验台车的前进速度等参数的实时测量。采用动态扭矩转速传感器对旋耕刀辊的作业扭矩与转速进行测量以获得功耗,采用编码器对台车行走轮转速进行测量以获得前进速度。各传感器的输出信号由数据采集卡进行采集,构建多通道同步数据采集系统;通过 LabVIEW 图形化编程软件对采集到的数据进行分析、处理、实时显示与存储。由于传感器与数据采集卡之间必须有线连接,而传感器均安装于台车上并随台车行走,因而将数据采集卡布置于控制柜内。为方便测试工作,在计算机(LabVIEW 测试软件)与数据采集卡之间构成无线局域网,应用无线以太网技术实现测试数据与计算机之间的无线传输。测试系统性能参数如表 2 所示,测试系统构成如图 6 所示。

表 2 测试系统性能参数

Tab. 2 Performance parameters of measurement system

测试仪器	型号	性能参数					
		量程	精度	输入电压	输入(出)特性	采样频率	通道数
动态扭矩传感器	CKY-810	500 N·m	±0.5% FS	±15 V(DC)	5 ~ 15 kHz(扭矩) 60 pulse/r(转速)		
旋转编码器	E6B2-CWZ5B			12 ~ 24 V(DC)	1 000 pulse/r		
以太网机箱	NI cDAQ-9184			10 ~ 30 V(DC)			4 卡槽
数据采集卡	NI 9361	5 V(差分)、 24 V(单端)		机箱提供	1 MHz	1 MHz	8
	NI 9205			机箱提供	±200 mV、±1 V、 ±5 V、±10 V	250 kHz	32
无线网关	AWK-3121			12 ~ 48 V(DC)			

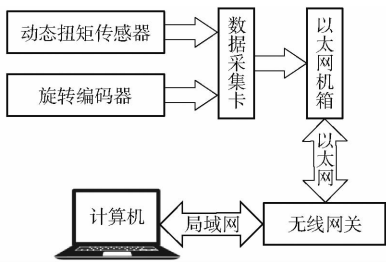


图 6 测试系统构成
Fig. 6 Structure of test system

3.2.2 测试原理

测试原理为测试系统程序设计的基础，基于 LabVIEW 软件设计，测试系统可实现旋耕刀辊工作转速、扭矩、功耗及前进速度的实时采集、分析、显示与存储等多项功能。

通过测试扭矩、转速获取功率是常用方法之一^[31]。旋耕刀辊作业功耗 $M(\text{kW})$ 、扭矩 $T(\text{N}\cdot\text{m})$ 及转速 $n(\text{r}/\text{min})$ 之间关系为

$$M = \frac{Tn}{9\,549} \tag{1}$$

旋耕刀辊作业扭矩、转速由安装于侧边传动装置前端的动态扭矩转速传感器进行测量。传感器的扭矩信号以电压脉冲或频率信号为输出；经标定，扭矩与脉冲频率之间呈线性关系，即

$$T = \begin{cases} 100(f_T - 10) & (f_T \geq 10 \text{ kHz}) \\ 100(10 - f_T) & (f_T < 10 \text{ kHz}) \end{cases} \tag{2}$$

式中 f_T ——扭矩脉冲信号频率，kHz

传感器的转速信号同样以电压脉冲或频率信号为输出，由表 2 可知，转速传感器分辨率为 60 pulse/r，即每转一圈输出 60 个脉冲，由此可知转速测试值与转速脉冲信号频率之间的对应关系为

$$n = f_n \tag{3}$$

式中 f_n ——转速脉冲信号频率，Hz

台车前进速度由行走轮线速度确定，通过编码器测量行走轮转速并换算成线速度以获得前进速度。编码器以电压脉冲或频率作为输出信号，由于其分辨率为 1 000 pulse/r，则台车行走速度与编码器脉冲信号频率之间的对应关系为

$$v = \frac{60rf_v}{1\,000} \tag{4}$$

式中 v ——台车行走速度，m/s

r ——驱动轮半径，m

f_v ——编码器脉冲信号频率，Hz

4 旋耕刀辊功耗试验

使用设计的试验台开展旋耕刀辊功耗应用试验。根据 GB/T 5668—2008《旋耕机》要求，旋耕试

验指标包括秸秆掩埋率、秸秆粉碎率、碎土率和功耗等。由于本试验主要目的是对耕作性能试验台进行应用验证，因此主要以功耗作为试验的评价指标。

应用上述试验台，开展通用旋耕刀辊功耗试验及组合旋耕刀辊功耗试验。试验研究工作参数、结构参数对旋耕刀辊的功耗影响，可减少土壤不均匀性等因素对结果的影响，因而试验台以土槽工作方式布置于华中农业大学室外土槽田块。试验分别于 2019 年 3 月和 2019 年 5 月进行，试验台车及试验现场如图 7 所示。试验土壤类型为壤土，经测定，0 ~ 12 cm 土壤干基含水率为 14.0%，5 ~ 17 cm 土壤干基含水率为 16.1%；15 cm 深处土壤坚实度为 605.2 kPa，10 cm 深处土壤坚实度为 1 240.67 kPa，20 cm 深处土壤坚实度为 1 852.3 kPa。



(a) 试验台车 (b) 试验现场
图 7 试验台车及试验现场

Fig. 7 Test trolley and test site

4.1 通用旋耕刀辊功耗试验

试验刀辊长度为 690 mm，每个回转面布置 2 把 IT245 标准旋耕刀，共 18 把旋耕刀，旋耕刀在刀轴上的排列展开如图 8 所示。

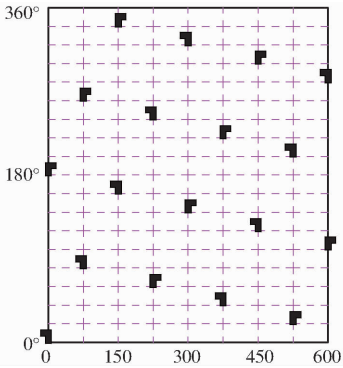


图 8 试验刀辊旋耕刀排列展开图

Fig. 8 Developed view of arrangement of blades on tested rotor

根据小麦播种、油菜和水稻直播深度要求，结合 GB/T 5668—2008《旋耕机》与现有旋耕刀辊性能试验的研究成果^[32-33]，确定试验耕作深度为 10 ~ 18 cm，前进速度为 0.4 ~ 1 m/s，刀辊转速为 220 ~ 300 r/min。

设计三元二次回归正交旋转组合试验，以刀辊作业功耗为试验指标，研究刀辊转速、耕作深度与前

进速度三因素对刀辊作业功耗的影响。试验因素编码如表 3 所示,试验设计与结果如表 4 所示(X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值),其中零水平试验设定为 6 次,共进行 20 组试验,每组试验分别进行 3 次,取功耗平均值。试验过程中通过编制的测试软件对扭矩传感器和转速传感器的信号进行采集与分析,设定采样频率为 60 000 Hz,分别记录每次试验的功耗。

表 3 试验因素编码
Tab.3 Coding of test factors

编码	因素		
	刀辊转速	耕作深度	前进速度
	$x_1/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	x_2/cm	$x_3/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
1. 682	300	18. 00	1. 00
1	284	16. 38	0. 88
0	260	14. 00	0. 70
- 1	236	11. 62	0. 52
- 1. 682	220	10. 00	0. 40

表 4 试验设计与结果
Tab.4 Experimental design and results

试验 序号	因素			作业功耗 P_1/kW			
	X_1	X_2	X_3	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值
1	- 1	- 1	- 1	1. 909	1. 993	1. 954	1. 918
2	1	- 1	- 1	2. 827	2. 760	2. 575	2. 721
3	- 1	1	- 1	5. 788	5. 634	5. 958	5. 793
4	1	1	- 1	4. 470	4. 849	4. 593	4. 637
5	- 1	- 1	1	2. 163	2. 032	2. 244	2. 147
6	1	- 1	1	3. 946	4. 167	4. 267	4. 127
7	- 1	1	1	5. 912	5. 825	6. 078	5. 938
8	1	1	1	7. 096	7. 369	7. 656	7. 373
9	- 1. 682	0	0	3. 148	3. 212	3. 409	3. 256
10	1. 682	0	0	5. 398	5. 178	5. 025	5. 200
11	0	- 1. 682	0	2. 607	2. 803	2. 694	2. 701
12	0	1. 682	0	6. 331	6. 543	6. 428	6. 434
13	0	0	- 1. 682	2. 537	2. 649	2. 950	2. 712
14	0	0	1. 682	5. 284	5. 370	5. 695	5. 450
15	0	0	0	4. 103	3. 875	3. 955	4. 178
16	0	0	0	3. 696	3. 694	3. 803	3. 731
17	0	0	0	4. 131	4. 239	4. 218	4. 196
18	0	0	0	3. 611	3. 739	3. 831	3. 727
19	0	0	0	3. 694	3. 794	3. 861	3. 783
20	0	0	0	4. 017	4. 295	4. 216	4. 176

运用 Design-Expert 软件对表 4 中试验数据进行多元回归拟合,获得各因素对通用旋耕刀辊作业功耗 P_1 影响的三元二次回归方程

$$P_1 = 3. 96 + 0. 46X_1 + 1. 4X_2 + 0. 67X_3 -$$
$$0. 31X_1X_2 + 0. 47X_1X_3 + 0. 16X_2X_3 +$$
$$0. 097X_1^2 + 0. 22X_2^2 + 0. 045X_3^2 \quad (5)$$

回归方程的显著性检验如表 5 所示。根据表 5 可知,上述回归模型的拟合度极显著($P < 0. 01$),失

拟不显著($P > 0. 05$),表明在试验参数选取范围内,所建立的回归方程可用,回归模型可用。功耗回归方程的样本决定系数 $R^2 = 0. 959$,表明回归方程与实际情况拟合良好,通过此方程能较好地对通用旋耕刀辊作业功耗进行预测。通过对式(5)回归系数的检验可知,影响通用旋耕刀辊功耗的因素主次顺序分别为:耕作深度、前进速度、刀辊转速、刀辊转速和前进速度的交互。

表 5 回归方程方差分析
Tab.5 Variance analysis of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方和	F	P
回归模型	39. 28	9	4. 36	25. 99	<0. 000 1 **
X_1	2. 94	1	2. 94	17. 48	0. 001 9 **
X_2	26. 73	1	26. 73	159. 19	<0. 000 1 **
X_3	6. 09	1	6. 09	36. 28	0. 000 1 **
X_1X_2	0. 78	1	0. 78	4. 67	0. 056 1
X_1X_3	1. 77	1	1. 77	10. 57	0. 008 7 **
X_2X_3	0. 19	1	0. 19	1. 16	0. 307 6
X_1^2	0. 14	1	0. 14	0. 81	0. 389 5
X_2^2	0. 68	1	0. 68	4. 05	0. 072 0
X_3^2	0. 03	1	0. 03	0. 17	0. 684 8
残差	1. 68	10	0. 17		
失拟	1. 39	5	0. 28	4. 83	0. 054 3
误差	0. 29	5	0. 058		
总和	40. 95	19			

注:**表示差异极显著($P < 0. 01$)。

4. 2 组合旋耕刀辊功耗试验

组合旋耕刀辊在通用旋耕刀辊基础上加入螺旋横刀与弯刀,以达到秸秆埋覆和防堵防缠的耕作效果^[28]。本试验以组合旋耕刀辊为试验对象,其幅宽为 370 mm,研究螺旋横刀宽度(以下简称刀宽) b 及安装螺旋角(以下简称安装角) θ 对组合旋耕刀辊作业功耗 P_2 的影响;组合旋耕刀辊结构及试验用螺旋横刀如图 9 所示。试验过程中,安装角选取 4 个水平分别为 55° 、 45° 、 35° 、 25° ,刀宽选取 3 个水平分别为 25、30、35 mm,试验过程中工作参数选定为:前进速度为 0. 6 m/s、旋耕转速为 240 r/min,耕作深度为 15 cm。在上述两因素不同水平下开展试验。试验中分别记录每次试验的平均功耗,结果如表 6 所示。

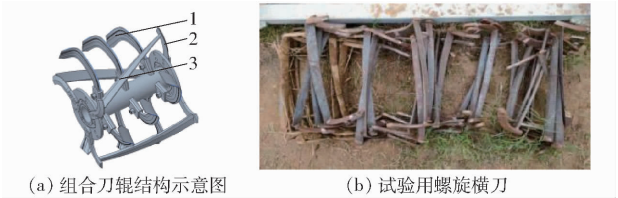


图 9 组合旋耕刀辊及试验用螺旋横刀

Fig. 9 Combined rotary tillage roller and experimental helical blades

1. 旋耕刀 2. 螺旋弯刀 3. 螺旋横刀

表 6 试验设计与结果

Tab. 6 Experimental design and results

编号	刀宽 b/mm	安装角 $\theta/(\text{^\circ})$	功耗 P_2/kW
1	25	25	4.475
2	25	35	4.084
3	25	45	3.711
4	25	55	3.900
5	30	25	4.914
6	30	35	4.238
7	30	45	3.819
8	30	55	3.906
9	35	25	5.061
10	35	35	4.344
11	35	45	4.080
12	35	55	4.052

对上述结果进行多项式曲面拟合,调整多项式参数获得最佳拟合结果,得拟合方程

$$P_2=4.018+0.1137b-0.5682\theta+0.018b^2-0.03738b\theta+0.2201\theta^2+0.1061b^2\theta+0.6836b\theta^2+0.0774\theta^3$$

(6)

功耗与刀宽、安装角的拟合曲面如图 10 所示。其拟合优度结果显示,此时误差的平方和与均方根分别为 0.004 569 及 0.047 59,均趋近于 0;决定系数与调整决定系数分别为 0.997 7 和 0.988 3,均趋近于 1,说明拟合效果较好,拟合方程能够描述功耗随刀宽与安装角之间的变化趋势。

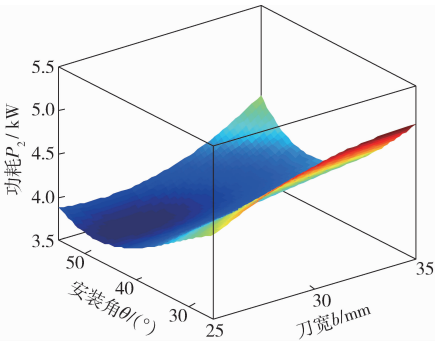


图 10 拟合曲面

Fig. 10 Fitting surface

上述试验结果表明螺旋横刀刀宽和安装角均对组合旋耕刀辊的作业功耗影响显著。当刀宽不变,组合旋耕刀辊功耗随着安装角的增加呈现先减小后增加的趋势;当安装角不变,组合旋耕刀辊功耗随着刀宽的增加而增大。上述结果受动态切土角及切土面积影响,可用于指导组合刀辊螺旋横刀的优化设计。

5 结论

(1)设计的旋转耕作部件性能测试试验台采用轮轨运转式,集旋耕作业、耕深调节、土壤恢复等功能于一体,其结构简单、占地面积小,具备可移动性。以 PLC 为主控单元,采用无线输入的方式,以电力拖动及伺服控制实现试验台各项运动功能,可实现平稳无级调速,前进速度调节范围为 0~1.17 m/s,旋耕工作转速调节范围为 0~340 r/min,耕深调节方式稳定可靠,可实现最大 30 cm 的深度调节。

(2)设计的基于虚拟仪器及无线数据传输技术的测试系统通道可扩展、动态特性好、操作简单,可实现旋耕转速、前进速度、旋耕扭矩以及作业功耗的数据采集、数据存储及数据实时分析等多项功能,满足田间动力参数测试需求。

(3)以前进速度、刀辊转速及耕作深度为因素,以作业功耗为指标,对通用旋耕刀辊开展了三元二次旋转正交组合试验,分析了影响通用旋耕刀辊功耗的显著性因素,并建立了功耗回归方程。三因素对功耗的影响显著性存在差异,显著性由大到小分别为耕作深度、前进速度、刀辊转速、刀辊转速和前进速度的交互。

(4)以螺旋横刀刀宽、安装角为因素,以作业功耗为指标,对组合旋耕刀辊开展了试验,对试验结果进行了曲面拟合,获得了功耗与两因素的二元三次曲面拟合方程。结果表明,螺旋横刀刀宽及安装角对功耗的影响显著,当刀宽不变时,刀辊功耗随着安装角的增加呈现先减小、后增加的趋势,当安装角不变时,刀辊功耗随着刀宽的增加而增大。

参 考 文 献

[1] BHAKTA I, PHADIKAR S, MAJUMDER K. State-of-the-art technologies in precision agriculture: a systematic review [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(11): 4878–4888.

[2] 高焕文,何明,尚书旗,等.保护性耕作高产高效体系[J/OL].农业机械学报,2013,44(6):35–38. GAO Huanwen, HE Ming, SHANG Shuqi, et al. High yield and benefit system for conservation tillage [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 35–38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130607&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.007. (in Chinese)

[3] 何进,李洪文,陈海涛,等.保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):1–19. HE Jin, LI Hongwen, CHEN Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1–19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[4] 李安宁,范学民,吴传云,等.保护性耕作现状及发展趋势[J].农业机械学报,2006,37(10):177–180,111.

- LI Anning, FAN Xuemin, WU Chuanyun, et al. Situation and development trends of conservation tillage in the world [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 177–180, 111. (in Chinese)
- [5] 于艳, 尚书旗, 刘晓红. 新型土槽试验平台及测控系统的设计与应用[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(2): 69–73.
YU Yan, SHANG Shuqi, LIU Xiaohong. Design and application of new testing slots in the tracking control system [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(2): 69–73. (in Chinese)
- [6] 于艳, 尚书旗, 刘晓红. 基于 PLC 的农机试验土槽控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2011, 33(1): 138–140.
YU Yan, SHANG Shuqi, LIU Xiaohong. Design of control system for tests platform of soil-bin for agricultural machine based on PLC [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1): 138–140. (in Chinese)
- [7] 毛罕平, 陈翠英. 秸秆还田机工作机理与参数分析[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 62–66.
MAO Hanping, CHEN Cuiying. Working mechanism and parameters determination of field straw chopper [J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 62–66. (in Chinese)
- [8] 郭志军, 佟金, 任露泉, 等. 耕作部件-土壤接触问题研究方法分析[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 102–104, 112.
GUO Zhijun, TONG Jin, REN Luquan, et al. Research method on the interacting problem of tillage tool-soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 102–104, 112. (in Chinese)
- [9] 王增辉, 黄东岩, 李卓识, 等. 工作参数对旋耕碎茬通用刀片功率消耗的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(增刊1): 122–125.
WANG Zenghui, HUANG Dongyan, LI Zhuoshi, et al. Universal the blade the broken stubble power consumption influence of the working parameters of the rotary tiller broken stubble [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(Supp.1): 122–125. (in Chinese)
- [10] 周宏明, 薛伟, 桑正中. 旋耕机总体参数的优化设计模型[J]. 农业机械学报, 2001, 32(5): 37–39, 43.
ZHOU Hongming, XUE Wei, SANG Zhengzhong. Optimized design model for general parameters of a rotary tiller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5): 37–39, 43. (in Chinese)
- [11] ASL J H, SINGH S. Optimization and evaluation of rotary tiller blades; computer solution of mathematical relations [J]. Soil & Tillage Research, 2009, 106: 1–7.
- [12] MATIN M A, FIELKE J M, DESBIOLLES J M A. Torque and energy characteristics for strip-tillage cultivation when cutting furrow using three designs of rotary blade [J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 329–340.
- [13] AHMADI I. A power estimator for an integrated active-passive tillage machine using the laws of classical mechanics [J]. Soil & Tillage Research, 2017, 171: 1–8.
- [14] 杨艳山, 丁启朔, 丁为民, 等. 田间原位综合耕作试验台设计与应用[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 68–74.
YANG Yanshan, DING Qishuo, DING Weimin, et al. Design and application of multi-purpose in-situ tillage tool testing platform [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 68–74. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160110&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.010. (in Chinese)
- [15] 梁举科. 微耕机旋耕部件土槽试验台设计及试验研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2016.
- [16] 朴献淑, 徐龙一, 马成林. 模糊控制在土槽牵引车实时系统中的应用[J]. 农业工程学报, 1997, 13(增刊1): 255–259.
PIAO Xianshu, XU Longyi, MA Chenglin. Application of fuzzy-control theory to the real-time system of soil bin draft vehicle [J]. Transactions of the CSAE, 1997, 13(Supp.1): 255–259. (in Chinese)
- [17] 孙新城, 叶军, 严江军, 等. 旋转式农机土槽试验台运行平稳性控制方法及试验验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 46–52.
SUN Xincheng, YE Jun, YAN Jiangjun, et al. Running stability control method and test verification of soil groove test rig for rotary agricultural machine [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 46–52. (in Chinese)
- [18] 田斌, 吴建民, 胡靖明, 等. 新型免耕农业机械试验土槽的设计[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(1): 94–96.
TIAN Bin, WU Jianmin, HU Jingming, et al. Design of new trial soil slot for no-tillage farm machinery [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2006, 41(1): 94–96. (in Chinese)
- [19] 王英雪, 赵立军, 刘环宇, 等. 小区自走式旋耕机的设计优化与试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 165–169, 179.
WANG Yingxue, ZHAO Lijun, LIU Huanyu, et al. Study on a self-propelled rotary cultivator used in village [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 165–169, 179. (in Chinese)
- [20] 丁艳, 袁栋, 姚克恒, 等. 田间旋耕刀测试试验台设计与应用[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(3): 6–10.
DING Yan, YUAN Dong, YAO Keheng, et al. Design and application of field rotary tiller test bench [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(3): 6–10. (in Chinese)
- [21] 曾百功, 叶进, 杨仕, 等. 微耕机土壤耕作部件田间测试平台的研制[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 456–459.
ZENG Baigong, YE Jin, YANG Shi, et al. Development of field test platform for tillage components of micro-cultivator [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2017, 43(4): 456–459. (in Chinese)
- [22] 孙志全, 杨洲, 孙健峰, 等. 耕作部件性能测试台测控系统——基于 ZigBee 和 LabVIEW[J]. 农机化研究, 2018, 40(5): 195–200.
SUN Zhiquan, YANG Zhou, SUN Jianfeng, et al. Measurement and control system based on Zigbee and LabVIEW for performance testing platform for tillage parts [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(5): 195–200. (in Chinese)
- [23] 许洪斌, 梁举科, 徐涛金, 等. 微耕机旋转耕作部件土槽试验台设计[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 1–5, 19.
XU Hongbin, LIANG Juke, XU Taojin, et al. Design on soil bin test rig for rotary tillage tool components of mini tiller cultivator [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 1–5, 19. (in Chinese)

[24] 李永磊,宋建农,董向前,等. 基于土槽试验台的旋转耕作部件试验装置设计[J]. 农业工程学报,2012, 28(17): 38-43.
LI Yonglei, SONG Jiannong, DONG Xiangqian, et al. Design of test device for rotary tiller components based on soil bin [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 38-43. (in Chinese)

[25] 颜华,吴俭敏,林金天. 环形土槽微耕机试验平台设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 68-72.
YAN Hua, WU Jianmin, LIN Jintian. Design of micro-cultivator testing platform with annular soil bin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 68-72. (in Chinese)

[26] 祝英豪,张居敏,曾荣,等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):49-57,273.
ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4): 49-57,273. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190406&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.006. (in Chinese)

[27] 张居敏,夏俊芳,贺小伟,等. 旋耕埋草机立刀设计功能实现程度的分析[J]. 华中农业大学学报,2014,33(3):124-127.
ZHANG Jumin, XIA Junfang, HE Xiaowei, et al. Analysis on design functions realization degree of vertical blade for stubble burying rotary tiller [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(3): 124-127. (in Chinese)

[28] 张居敏,周勇,夏俊芳,等. 旋耕埋草机螺旋横刀的数学建模与参数分析[J]. 农业工程学报,2013,29(1): 18-25.
ZHANG Jumin, ZHOU Yong, XIA Junfang, et al. Mathematical modeling and analysis of helical blade for stubble burying rotary tiller [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(1): 18-25. (in Chinese)

[29] 苗中华,陆鸣超,胡晓东,等. 基于虚拟仪器技术的采棉机智能监控系统开发与应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 35-42.
MIAO Zhonghua, LU Mingchao, HU Xiaodong, et al. Development and application of intelligent monitoring and controlling system of cotton-picking machine based on virtual instrument technology [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 35-42. (in Chinese)

[30] 乔晓东,王晓燕,颜华,等. 基于虚拟仪器的后悬挂农具田间测试系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(10): 98-103.
QIAO Xiaodong, WANG Xiaoyan, YAN Hua, et al. Field test system of rear suspension tools based on virtual instrument [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 98-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131017&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.017. (in Chinese)

[31] 杨俊峰. 基于虚拟仪器的动态扭矩实验测试系统的研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2007.

[32] 汲文峰,贾红雷,韩伟峰,等. 通用刀片功率消耗影响因素分析与田间试验[J]. 农业机械学报,2010, 41(2): 35-41.
JI Wenfeng, JIA Honglei, HAN Weifeng, et al. Analysis of influencing factors on power consumption and field test of universal blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 35-41. (in Chinese)

[33] 张秀梅,张居敏,夏俊芳,等. 水旱两用秸秆还田耕整机关键部件设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 10-16.
ZHANG Xiumei, ZHANG Jumin, XIA Junfang, et al. Design and experiment on critical component of cultivator for straw returning in paddy field and dry land [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(11): 10-16. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 35 页)

[21] TIAN Xiaojie, CHENG Yaoyu, CHANG Guoli. Detect and recognize hidden cracks in silicon chips based on deep learning SSD algorithm[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2019,47(1):36-40.

[22] 童基均,常晓龙,赵英杰,等. 基于深度学习的运动目标实时识别与定位[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(8):32-38.  
TONG Jijun, CHANG Xiaolong, ZHAO Yingjie, et al. Real-time recognition and localization of moving targets based on deep learning[J]. Journal of Computer Systems, 2018, 27(8): 32-38. (in Chinese)

[23] LI Z, PENG C, YU G, et al. Detnet: a backbone network for object detection[J]. arXiv preprint arXiv:1804.06215, 2018.

[24] 董镛刚. 特征金字塔网络在图像检测中的应用[J]. 科学技术创新, 2018(10):85-86.  
DONG Leigang. Application of feature pyramid network in image detection [J]. Science and Technology Innovation, 2018(10):85-86. (in Chinese)

[25] 刘晓楠,王正平,贺涛涛,等. 基于深度学习的小目标检测研究综述[J]. 战术导弹技术, 2019(1):100-107.  
LIU Xiaonan, WANG Zhengping, HE Yuntao, et al. Review of research on small target detection based on deep learning [J]. Tactical Missile Technology, 2019(1): 100-107. (in Chinese)

[26] SUN Haoze, CHANG Tianqing, WANG Quandong, et al. Image detection method for tank and armored targets based on hierarchical multi-scale convolution feature extraction[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9):1681-1691.

[27] 李艳霞,柴毅,胡友强. 不平衡数据分类方法综述[J]. 控制与决策,2019, 34(4): 673-688.  
LI Yanxia, CHAI Yi, HU Youqiang. Overview of imbalanced data classification methods[J]. Control and Decision, 2019, 34(4): 673-688. (in Chinese)

[28] LIN T Y, GOYAL P, GIRSHICK R, et al. Focal Loss for dense object detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017(99):2999-3007.

[29] SHETTY S. Application of convolutional neural network for image classification on Pascal VOC Challenge 2012 dataset[J]. Computer Vision and Pattern Recognition,2016, 34(1):155-162.