

果树株间避障除草机设计与试验

王永烁¹, 康建明¹, 彭强吉¹, 陈英凯², 方会敏¹, 牛萌萌¹, 王少伟¹

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250110; 2. 山东省农业科学院, 济南 250110)

摘要: 针对果树株间除草作业复杂、杂草除净率低的问题, 基于机构往复式伸缩运动思想, 设计了一种用于清理果树株间杂草的自动避障除草机。通过对除草机各部件进行理论分析, 确定了工作幅宽调节机构、信号采集机构、自动避障机构和除草刀等关键部件的结构及参数。利用弧形触杆和液压系统的协同作用, 构建了自动避障控制系统, 可根据触杆的不同位置状态, 动态控制除草刀避开果树植株。在 ADAMS 中建立了虚拟样机模型, 并进行了单因素仿真试验, 确定了影响株间避障除草的关键因素。以避障液压缸速度、机器前进速度和复位弹簧弹性系数作为主要影响因素, 杂草除净比为评价指标, 利用 Box-Behnken 试验设计原理, 采用三因素三水平响应面分析方法, 设计了二次回归组合试验, 建立了杂草除净比的回归模型, 得到最优参数分别为: 避障液压缸速度 126 mm/s, 机器前进速度 1.57 km/h, 弹性系数 21。以最优参数进行了田间验证试验, 结果表明, 所设计的除草机平均杂草除净比为 92.65%, 达到了果园除草农艺要求。研究结果为果园及其他作物株间除草机的进一步优化提供了参考。

关键词: 农业工程; 除草机; 株间杂草; 自动避障; ADAMS

中图分类号: S224.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)08-2410-11

DOI: 10. 13229/j. cnki. jdxbgxb. 20211121

Design and experiment of obstacle avoidance weeding machine for fruit trees

WANG Yong-shuo¹, KANG Jian-ming¹, PENG Qiang-ji¹, CHEN Ying-kai²,
FANG Hui-min¹, NIU Meng-meng¹, WANG Shao-wei¹

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Jinan 250110, China; 2. Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250110, China)

Abstract: Aiming at the problems of complicated weeding operation among fruit trees and low weed removal rate, based on the idea of reciprocating telescopic motion of mechanism, an automatic obstacle avoidance weeding machine for clearing weeds among fruit trees was designed. The structure and parameters of key components such as working width adjustment mechanism, signal acquisition mechanism, automatic obstacle avoidance mechanism and weeding knife are determined by theoretical analysis of each component of the weeding machine. Using the synergy of the arc-shaped contact rod and the hydraulic system, an automatic obstacle avoidance control system is constructed, which can dynamically control the weeding knife to avoid fruit trees according to the different positions of the contact

收稿日期: 2021-10-28.

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY020621, 2019JZZY020623, 2022CXGC020706).

作者简介: 王永烁(1993-), 男, 工程师, 博士. 研究方向: 农业机械装备. E-mail: 1005736785@qq.com

通信作者: 康建明(1984-), 男, 高级工程师, 博士. 研究方向: 农业机械装备. E-mail: kjm531@sina.com

rod. A virtual prototype model was established in ADAMS, and a single factor simulation experiment was carried out to determine the key factors affecting the weeding and obstacle avoidance between plants. Taking the speed of the obstacle avoidance hydraulic cylinder, the forward speed of the machine and the elastic coefficient of the return spring as the main influencing factors, and the weed removal ratio as the evaluation index, according to the Box-Behnken experimental design principle, using the three-factor and three-level response surface analysis method, a two The regression model of the weed removal ratio was established through the second regression combination test, and the optimal parameters were obtained as follows: the speed of the obstacle avoidance hydraulic cylinder is 126 mm/s, the forward speed of the machine is 1.57 km/h, and the elastic coefficient is 21. The field verification test was carried out, and the results showed that the average weed removal rate of the designed weeding machine was 92.65%, which met the agronomic requirements of orchard weeding. The research results provide a reference for the further optimization of the interplant weeder in orchards and other crops.

Key words: agricultural engineering; weeding machine; weeds between plants; automatic obstacle avoidance; ADAMS

0 引言

杂草清理对于促进果树生长、提高水果产量至关重要,是果园管理的重要环节之一^[1]。目前除草技术主要有化学除草和机械除草两种,随着现代果园的发展及环保要求,机械除草在果园管理中广泛应用^[2]。现代果树种植模式下,现有除草机械难以对果树株间及树根附近的杂草有效清除,严重影响了果树生长,降低了水果产量。

国外对株间机械除草技术研究较早,文献[3]设计运用起垄锄进行行间和株间除草;文献[4-6]通过计算机视觉系统与动态GPS导航技术研究设计了相应的自动避障除草机,虽然提高了机器的作业精度及效果,但是成本过高;文献[7]通过对研制的自动避障玉米株间除草机进行多组对比实验,验证了光电传感器在避障除草装置中的实用性;在国内,文献[8-10]对纯机械的株间除草技术做了研究,并给出了对应的方案;文献[11-14]通过结合传感器等部件对株间除草避障检测技术进行了研究;文献[15,16]设计了除草所需的部分控制系统;文献[17,18]分别研究了单、双边的篱架式葡萄株间自动避障除草机,利用位移和压力传感器变化实现葡萄藤的根部自动避障除草作业,但株间除草存在一定死角,且不能行间除草,相关研究多只针对了部分除草部件进行了局部性研究,缺少可用机器的设计。

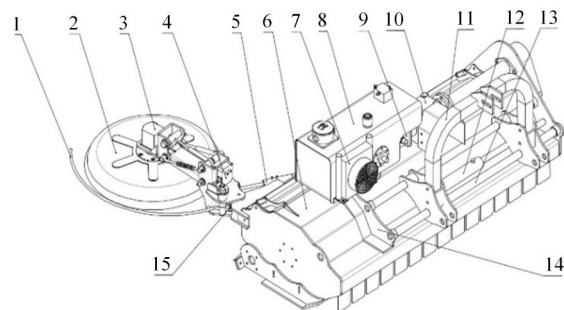
本文总结已有研究并针对现有除草机难以有效除净株间杂草的现状,根据实际使用要求设计了一种果树株间避障除草机。介绍了除草机工作

原理,设计了关键部位的结构,确定了主要参数并进行了运动学分析。利用ADAMS软件建立虚拟样机模型进行仿真分析,确定了影响除草作业的关键因素及评价指标。设计二次回归组合试验,分析各因素对除草效果的影响顺序,得到最优参数组合,并进行田间试验验证,研究结果为果树株间机械除草技术的发展提供了参考。

1 整机结构及工作原理

1.1 整机结构

果树株间自动避障除草机整机结构如图1所示,由机架、传动装置、株间除草装置、行间除草装置、避障机构、液压系统组成。机架作为自动避障除草整机组载体,用来承载安装其他各组成部件,并通过三点悬挂牵引架与拖拉机后悬挂系统连接;液压系统主要由液压油箱、液压换向阀、避障液压



1-弧形触杆;2-除草刀罩;3-液压马达;4-压力控制阀;5-避障液压缸;6-机架;7-风冷装置;8-液压油箱;9-液压泵;10-传动变速箱;11-悬挂牵引架;12-调节液压缸;13-滑杆;14-固定套;15-复位弹簧

图1 除草机简图

Fig. 1 Schematic diagram of the weeder

缸、调行液压缸、液压泵、液压马达、风冷装置等组成,为整个机器运行提供动力传输;自动避障机构作为整机的关键部件,是执行避障作业的核心,主要由避障液压缸、压力调节器、压力控制阀、复位弹簧、弧形触杆等组成。

1.2 工作原理

果树株间避障除草机由拖拉机后输出轴提供动力,通过三点悬挂牵引架与拖拉机三点悬挂架连接,沿拖拉机前进方向运动。

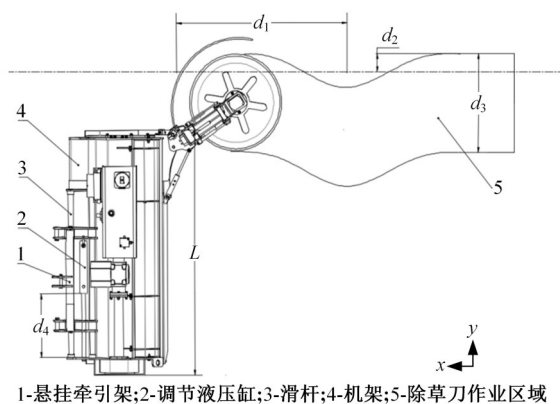
作业前,根据作业园区的种植行距调节液压缸,使株间除草刀盘处于果树株间,并保证作业宽度满足株间除草的作业要求,同时将除草刀盘高度调整至合适的工作位置,保证除草刀盘能进行株间杂草清除作业。作业时,除草机在果树行间随着拖拉机前进方向运动,当前进方向上果树植株碰触到避障机构的弧形触杆时,在接触压力作用下,触杆绕转轴旋转,带动压力调节器调节压力调节阀,在液压系统作用下除草刀作出收缩避让动作,避开果树植株后,避障触杆在复位弹簧作用下逐渐恢复原位,放松对压力调节器的作用,油缸伸出,完成株间避障除草作业。

2 关键部件设计与参数确定

株间避障除草机是由工作幅宽调节机构、信号采集机构、自动避障机构和除草刀 4 个主要部件组成,分别实现不同的行间作业要求,准确识别果树位置,准确避开果树植株并保证植株周围杂草除净率以及完成杂草清除作业的功能。因此,需对各除草单体进行理论分析及参数设计。

2.1 工作幅宽调节机构

果树株间自动避障除草机作业过程如图 2 所



1-悬挂牵引架;2-调节液压缸;3-滑杆;4-机架;5-除草刀作业区域

图 2 除草机工作过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of working process of weeder

示。其中: d_1 为果树株距,mm; d_2 为除草刀盘进入果株间距离,mm; d_3 为除草刀盘覆盖区域宽度,mm; d_4 为幅宽调节机构伸缩距离,mm; L 为机架宽度,mm; x 为机器工作运动方向; y 为幅宽调节方向。根据前期调研,国内果园种植模式根据地域差异多有不同,为满足不同果园的使用,提高除草机的适用性,本文设计的除草机具有工作幅宽调节功能,可通过调节机架水平位置进行幅宽调节,实现不同行宽果树的除草作业。工作幅宽调节机构主要由幅宽调节液压缸、悬挂牵引架和机架组成,悬挂牵引架通过两个固定套穿于机架前方两根平行的 50 mm 滑杆上,两者间隙配合,机架在幅宽调节液压缸控制下沿滑杆水平移动,幅宽调节液压缸一端固定于悬挂牵引架固定套,一端固定于机架,为机架与悬挂架的相对移动提供动力,在作业时通过液压系统控制幅宽调节液压缸伸缩距离 L 满足实际作业幅宽要求。当截止阀打开时,液压管路接通,幅宽调节液压缸工作,机架沿水平滑杆伸缩移动,根据实际作业情况调节幅宽;调节完成后截止阀关闭,液压管路中液压油停止流动,液压缸维持调节后状态保持不变,机架相对悬挂牵引架静止。为满足 2.0~2.5 m 的作业要求,整机机架尺寸为 1800 mm,幅宽调节伸缩距离需要达到 600 mm,考虑到安装于机架的除草刀盘需要摆动、伸缩,摆幅约为 200 mm,为满足幅宽调节要求,幅宽调节液压缸设计伸出距离需要达到 400 mm。经测试,若要满足除草作业需求,除草刀伸入株间的距离不能小于果树半径。通过收集数据,现有标准果园中,果树类型主要有:疏散分层形与高纺锤形,由于高纺锤形效益较好,占比在增加。本选用高纺锤形果树主干作为研究目标,平均半径为 100~110 mm。设计除草刀伸入距离时需要大于此均值,取 120 mm。通过以上数据,计算可得除草机作业幅宽为 2400~2520 mm,符合作业要求。

2.2 信号采集机构

信号采集机构(见图 3)主要由压力调节器、压力控制阀、复位弹簧和弧形触杆等组成,用于识别除草作业时碰到的果树。弧形触杆是由圆弧和一段短直线组成的弧形触杆,其中短端用于连接复位弹簧、转轴,圆弧用于接触识别果树植株,当弧形触杆刚接触到果树植株时,此时弧形触杆处于 P_1 位置,在果树阻挡作用下,弧形触杆绕 O 点旋转至 P_2 位置,并通过转轴带动压力调节器同步

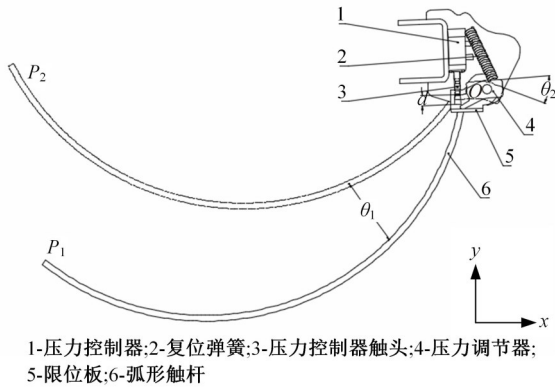


图 3 信号采集机构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of signal acquisition mechanism

转动,压力调节器运动后挤压压力控制阀触头,改变液压系统工作状态,驱动自动避障机构工作,使除草刀避绕果树植株,机构工作过程如图 3 所示,其中 O 为弧形触杆旋转中心; θ_1 为弧形触杆绕 O 点转动角度, ($^\circ$); θ_2 为压力调节器绕 O 点转动角度, ($^\circ$); d 为压力控制器触头在压力调节器作用下的位移, mm; P_1 为弧形触杆初始位置; P_2 为弧形触杆绕中心点 O 转动角度为 θ_1 后的位置; x 为除草机工作运动方向; y 为弧形触杆收缩方向。

避开果树植株后,弧形触杆在复位弹簧作用下逐渐回到初始位置。复位弹簧在机构中除了在避障结束后使弧形触杆复位这个作用外,更重要的是在避障过程中做到使弧形触杆与果树植株时刻保持有效接触,从而使液压系统控制自动避障机构的动态工作。因此,复位弹簧的选取非常重要,既要简单便于安装,又要保证信号采集机构稳定工作。复位弹簧选取需根据胡克定律:

$$F = k \times \Delta x \quad (1)$$

式中: F 为弹力; k 为劲度系数; Δx 为弹簧形变量。

信号采集机构的核心是利用杠杆原理由弧形触杆、转轴及复位弹簧组成的一个机械接触采集装置,用来带动压力调节器调节压力控制阀触头。该杠杆装置中,弧形触杆属于动臂,较长,复位弹簧处于该杠杆的阻力臂,较短,因此触杆的接触力会被放大,即在除草避障过程中,复位弹簧受力较大;另一方面,由于安装位置及空间的限制,弹簧形变量 Δx 不能过大,即需要弹簧在一定的形变量内承受更大的力,所以需要复位弹簧有较大的弹性系数。根据前期试验,弧形触杆在作业过程中受力约为 1500~2000 N,弹簧形变量 Δx 为 30~50 mm,由式(1)计算得弹簧劲度系数在 30~

67 N/mm 内选取。同时,信号采集机构在除草作业中需要反复工作,使用频率很高,且需要保证弧形触杆在接触到果树树干时使触杆紧贴树干,当果树植株作用在触杆上的外力消失后,弧形触杆能顺利回到初始位置,所以要保证复位弹簧的使用寿命。本设计中弧形触杆圆形截面直径为 8 mm,弧度半径为 700 mm,弧长 270 mm,短端长 30 mm。

2.3 自动避障机构

2.3.1 自动避障机构参数确定

为完成除草作业时的避绕果树动作,设计了自动避障机构,主要由避障液压缸、信号采集机构、除草刀盘安装架等组成(见图 4)。自动避障机构销联接于机架一侧,液压系统控制避障液压缸带动除草刀盘绕点 O 转动,即除草刀盘的运动方式为垂直于株间方向上的往复摆动,同时还有与机架一起的水平向前运动。作业时,避障液压缸伸出,将除草刀伸入果树株间进行株间除草作业,信号采集机构检测到的果树位置信息后,传递至液压控制系统,避障液压缸在液压系统作用下收缩,带动除草刀盘向机架内侧收缩,完成一次株间除草避障作业。在除草作业过程中,果树树干与刀盘为相对运动,当相对运动速度不稳定的情况下,容易出现刀盘回收过早导致除草不净或刀盘回收不及时而引起的刀盘卡树现象。为克服这两个问题,根据理论分析,将接触控制杆设计为圆弧形,该设计可以做到触杆在避障时在果树接触压力与复位弹簧弹力共同作用下与果树树干实时接触,并通过换向阀、比例阀组实时动态控制避障液压缸的伸缩程度,既保证了株间杂草除净率,又

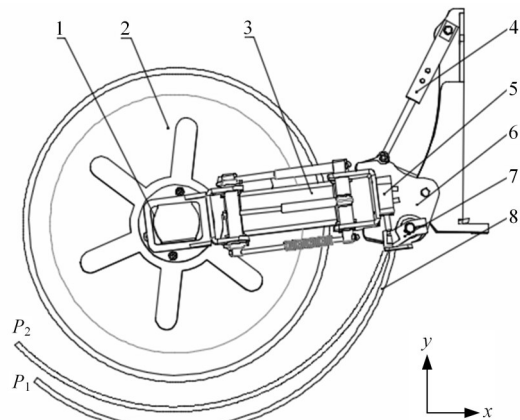
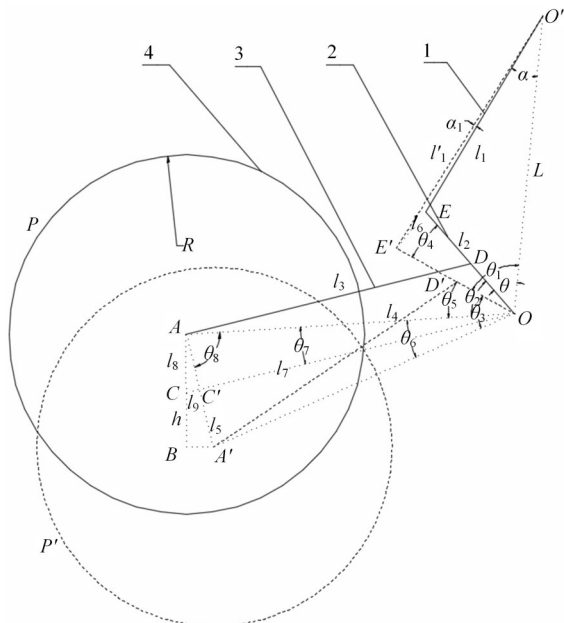


图 4 除草结构示意图
Fig. 4 Schematic diagram of weeding structure

1-液压马达;2-除草刀盘;3-刀盘连接轴;4-液压缸;5-液压控制阀;6-固定板;7-拨板;8-弧形触杆

可防止刀盘卡树现象。为确定各运动参数,需要对自动避障机构进行运动学分析,将自动避障机构实际工作过程简化为二维平面运动模型,如图 5 所示,其中 x 为除草机工作运动方向; y 为弧形触杆收缩方向; P 为液压缸收缩状态下除草刀罩的位置; P' 为液压缸伸出状态下除草刀罩的位置; R 为除草刀罩的半径,mm; l_1 为液压缸收缩状态时的长度,mm; l'_1 为液压缸伸出状态时的长度,mm; L 为液压缸固定位置与连接板固定位置的距离,mm; l_2 为连接板两端的距离 OE ,mm; l_3 为除草刀罩圆心至连接板中点 AD 的距离,mm; l_4 为除草刀罩圆心至连接板固定点 AO 的距离,mm; l_5 为 P 、 P' 两种状态下除草刀罩圆心 A 点到 A' 的距离,mm; l_6 为 P 、 P' 两种状态下连接点 E 点到 E' 的距离,mm; l_7 为点 O 与 C' 的距离,mm; l_8 为 AC 两点的距离,mm; l_9 为 CC' 两点的距离,mm; h 为 P 、 P' 两种状态下除草刀罩圆心 AB 的垂直距离,mm; α 为 $O'O$ 与 $O'E$ 的夹角, $(^\circ)$; α_1 为 $O'E'$ 与 $O'E$ 的夹角, $(^\circ)$; θ 为 OE 和 OO' 的夹角, $(^\circ)$; θ_1 为 OE' 和 OO' 的夹角, $(^\circ)$; θ_2 为 OA 和 OE 的夹角, $(^\circ)$; θ_3 为 OA' 和 OE' 的夹角, $(^\circ)$; θ_4 为 OE 和 OE' 的夹角, $(^\circ)$; θ_5 为 OA 和 OE' 的夹角, $(^\circ)$; θ_6 为 OA 和 OA' 的夹角, $(^\circ)$; θ_7 为 OC 和 OA 的夹角, $(^\circ)$ 。

由图 5 分析可知,若要保证除草机构顺利将株间杂草去除,需要确定除草刀盘在垂直于运行轨迹方向上的最远移动距离 h 。由于除草刀运动



1-液压缸;2-连接板;3-刀罩连接板;4-除草刀罩

图 5 除草机构运动学分析

Fig. 5 Kinematics analysis of weeding mechanism

是由液压缸牵引控制,因此需要确定液压缸伸缩长度与除草刀罩垂直移动距离之间的关系。通过对除草机构运动分析可知,连杆 OE 与 AD 为固定件,因此在运动过程中长度数值及形成的部分夹角数值保持恒定,通过对机构进行结构分析,可得部分几何关系如下:

$$\begin{cases} l'_1 = l_1 + d \\ OE = OE' = l_2 \\ OA = OA' = l_4 \\ \theta_6 = 2\theta_7 \\ AC' = A'C' = \frac{1}{2} OC' \\ \theta_4 + \theta_5 = \theta_2 = \theta_3 = \theta_5 + \theta_6 \\ \triangle ACC' \sim \triangle ABA' \end{cases} \quad (2)$$

在 $\triangle AC'O$ 中由正弦定理得方程如下:

$$\frac{C'O}{\sin \theta_8} = \frac{AC'}{\sin \theta_7} \quad (3)$$

在 $\triangle OEO'$ 、 $\triangle OE'O'$ 、 $\triangle O'EE'$ 、 $\triangle EE'O$ 、 $\triangle OAA'$ 、 $\triangle ACO$ 由余弦定理可分别得到如下方程:

$$\begin{cases} l_2^2 = l_1^2 + L^2 - 2l_1^2 L \cos(\alpha + \alpha_1) \\ l_6^2 = l_1^2 + l_1^2 - 2l_1^2 l_1 \cos \alpha_1 \\ l_6^2 = l_2^2 + l_2^2 - 2l_2 l_2 \cos \theta_4 \\ l_5^2 = l_4^2 + l_4^2 - 2l_4 l_4 \cos \theta_6 \\ l_4^2 = l_5^2 + l_4^2 - 2l_4 l_5 \cos \theta_8 \\ l_8^2 = l_4^2 + (l_7 + l_9)^2 - 2l_4(l_7 + l_9)^2 \cos \theta_7 \end{cases} \quad (4)$$

在 $\triangle ACC'$ 中由勾股定理得:

$$\left(\frac{1}{2} l_5\right)^2 + l_9^2 = l_8^2 \quad (5)$$

最后由 $\triangle ACC' \sim \triangle ABA'$ 可知:

$$\frac{AC}{AA'} = \frac{AC'}{AB} \rightarrow h = \frac{l_5^2}{2l_8} \quad (6)$$

根据除草机工作要求,液压缸伸出时,除草刀中心要位于果树中心线上,收缩后要除草刀水平切线与果树中心连线的垂直距离要大于果株半径, l_2 、 l_3 、 θ_2 为除草机构的设计尺寸,其中 l_2 为 235 mm, l_3 为 1050 mm, $\theta_2=45^\circ$ 。令液压缸处于收缩状态时为初始状态,在此状态下: $\alpha=20^\circ$;液压缸伸出到最大位置时为终止状态,此状态下: $\alpha=17^\circ$,计算得伸长量为 67 mm, $h=400$ mm。通过对果园进行测量, d 的平均值 100 mm, h 变化超过 2 倍半径,机构能有效减少对果株的伤害,同时完成除草作业。

2.3.2 避障液压系统

避障液压系统用于连接控制信号采集机构与自动避障机构,控制除草刀进出果树株间。除草

机避障作业时,触杆有碰到果树和不碰果树两种状态,分别对应液压缸的伸出和收缩动作,为实现两种执行动作的变化,液压系统中采用压力控制阀来实现上述功能。除草机设计选用了中低压液压系统^[19]且流量较大,液压阀组采用机械控制,通过压力调节器与触杆连接控制。在除草机避障作业时,信号采集机构中的触杆碰到果树后,带动压力调节器按压压力控制阀触头,压力控制阀工作,改变液压系统压力,液压系统立即响应,液压换路器换向,进而控制液压缸做出收缩运动;避开果树后,触杆在复位弹簧作用下复位,在压力控制阀作用下,液压系统压力逐渐恢复,液压缸再次伸出,除草刀重新进入果树株间作业。在果园株间除草作业时,液压系统需始终控制液压缸处于伸出并在保压状态。为了保证株间自动让树装置在进行换向时降低液压冲击,在回油路上设计了平衡阀^[20]来增加背压,起保护作用,且在泵的出口设有溢流阀^[21]作为系统调压与安全保护。

液压系统工作流程图如图 6 所示。

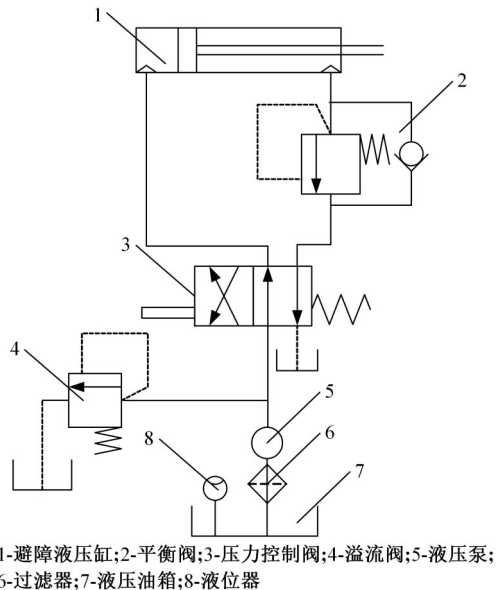


图 6 避障液压系统

Fig. 6 Obstacle avoidance hydraulic system

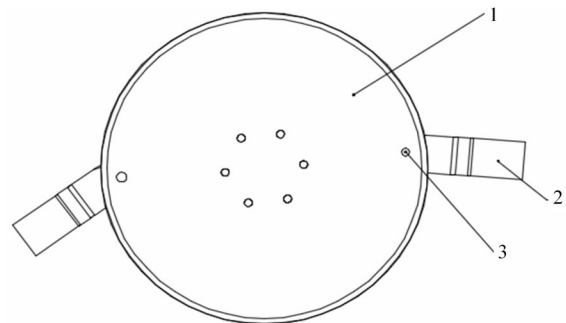
2.4 除草刀盘设计

在不同地域果园内,杂草种类繁多,杂草结构差异较大,考虑到不同地域果园内杂草生长情况及地质情况不同,杂草中含沙石、土砾等会引起高速旋转刀具大负荷变化,在高速工作条件下,大负荷变化不仅会加速刀具磨损,严重情况下会发生刀具断裂,对株间除草作业效率及除草机的稳定性产生严重影响,且常用的圆形锯齿刀、多齿型刀

片及一字型刀片不适用于此复杂环境变化。

为保护刀具,降低果园杂草、沙石、土砾对刀具的影响,提高除草机的适用性,本除草机设计了刀盘、刀片铰接设计(见图 7),结构简单、容易更换,提高了刀具使用寿命同时降低了使用成本。

果园除草作业时,需要将以果树树干为中心的左右两侧相距 200 mm 以上区域内的杂草清除可满足作业要求,为满足作业宽度设计要求,除草刀的工作半径不能小于 200 mm。本设计中除草刀盘直径为 420 mm,甩刀刀片长为 150 mm,刀盘与刀片以防脱螺栓铰接。



1-刀盘;2-甩刀;3-防松脱螺栓

图 7 除草刀组合示意图

Fig. 7 Schematic diagram of weeding knife combination

3 仿真分析

通过前期研究,除草刀盘运动覆盖区域对株间除草效果影响有很大差异,经过初步分析,影响所设计除草机除草刀覆盖区域的主要因素有除草机前进速度、避障液压缸灵敏度(为便于对液压缸灵敏度进行测量,以液压缸的伸缩速度进行表示)、复位弹簧劲度系统、除草刀盘直径以及液压系统流量变化。为模拟除草作业过程中除草刀盘运动覆盖区域,确定各结构、运动参数对所设计株间除草机除草效果的影响程度,利用 ADAMS 对所设计的除草装置进行了虚拟仿真单因素实验,仿真结果为后续试验因素的最终确定提供了理论依据。

3.1 仿真模型建立

仿真实验用于确定各结构、运动参数对除草刀盘运动轨迹及所覆盖面积的影响大小,为提高效率,仿真分析中对避障除草机模型进行了简化。利用 Solidworks 软件建模并导入 ADAMS^[22,23],通过连杆方式代替各主要运动部件,同时保留机架、液压缸、弧形触杆、刀盘及果树植株部分,果树植株以直径 100 mm 圆柱体代替,各圆柱体的间距为 2 m,代表株距。根据各工作部件的实际运

行状态,在各部件之间添加约束(如固定副、运动副、转动副等),触杆与果树植株间的碰触关系通过添加接触力方式实现,触杆端与机架添加弹簧力,模拟复位弹簧功能。模型驱动主要有两个,一是水平的速度驱动,用于模拟拖拉机前进速度,二是沿液压缸的速度驱动,用于模拟液压缸在液压系统下的动作,采用ADAMS中的IF函数来设定液压缸的工作过程:

$$v = IF(\theta_1 - \varphi: v_2, -v_2, v_2) + IF(L - 590: 0, 0, v_2) \quad (7)$$

式中: v 为避障液压缸作业时速度,mm/s; v_2 为避障液压缸初始速度,mm/s; φ 为液压缸初始角度,(°); θ_1 为触杆运动时绕 O 点转动角度,(°); L 为除草刀盘距离机架边缘的长度,mm。

仿真时间为10 s,步长0.002 s,仿真完成后,利用ADAMS中Review中trace功能对模型中的刀盘上的点的运动轨迹进行划线,本模拟中均匀选取除草刀盘边缘12个点,以此12个点的运动轨迹所形成的区域模拟除草覆盖区域。

3.2 仿真结果分析

仿真实验以前进速度、液压缸伸缩速度、复位弹簧弹性系数、除草刀盘直径4个因素为实验对象。考虑到在除草作业中,既要保证工作效率,又要保持机器的灵活性,防止碰撞,因此机器的前进速度不能过大;为保证控制杆接触到果树植株后,刀盘能及时做出规避动作,准确绕开果树植株,液压缸要有相当的灵敏性;除草刀盘的大小也要适中,既要保证对株间的杂草进行有效的清除,又不影响避障效果。以此为基础,经前期计算,初步选定各参数范围:机器前进速度为1.40~1.60 km/h、液压缸伸缩速度为120~180 mm/s,复位弹簧弹性系数范围为20~40,除草刀半径为400~450 mm。为分析各因素对株间除草效果的影响,将每个研究对象取5水平,并以杂草除净比为评价指标,通过控制变量法对4个研究对象分别进行单因素试验,即对其中一个研究对象进行单因素试验时,其余3个研究对象的值均取中间水平值,以此法依次得到4个研究对象的仿真结果,如图8所示。其中,评价指标杂草除净比为:

$$N = \frac{S'}{S} \times 100\% \quad (8)$$

式中: N 为杂草除净比,%; S 为株间杂草总面积, m^2 ; S' 为杂草清除面积, m^2 。

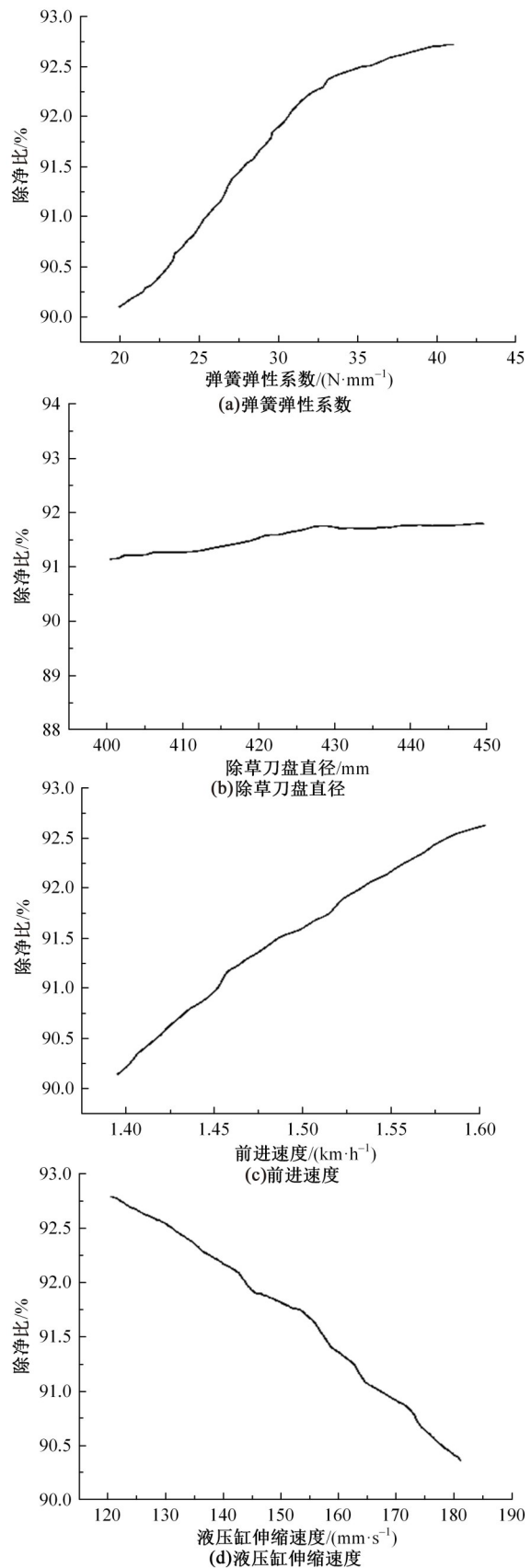


图 8 单因素试验除净比变化图线

Fig. 8 Change graph of net removal ratio in a single factor test

由图 8 分析可知:在所选水平范围内,随着前进速度的增大,除净比逐渐增大,呈正相关趋势变化;随着避障液压缸速度的增大,除净比逐渐减小,呈负相关趋势变化;随着弹簧弹性系数变化,除净比先快速增加而后趋于平稳;随着除草刀盘半径的增大,除草作业覆盖率相比其他 3 种影响因素,数值上无明显变化。综上所述,将避障液压缸速度、前进速度和弹簧弹性系数作为影响除草作业效果的主要因素。

4 试验分析

4.1 试验地点

试验于 2021 年 9 月在山东省招远市金岭镇山东苹果生产全程机械化试验示范基地进行,如图 9 所示,基地种植果树类型为矮化自根砧果树,株行距为 1.6 m×3 m 的标准果园,果树的平均直径为 10 cm,满足该避障除草机的设计要求。试验仪器和设备包括:果园自动避障除草机样机、东方红 1804 拖拉机(80 马力)、测力器(沪豪数显 ZDF-50,精度 0.01 N),Panasonic/松下位移传感器 HG-C1400(量程 200 mm,精度 300 μm)、得力卷尺(0~5 m,精度 1 mm)、秒表、电脑等。



图 9 田间试验现场及样机

Fig. 9 Field experiment site and prototype

4.2 试验方案

4.2.1 试验因素与水平选取

为研究确定的关键参数对除草效果的影响规律,分析仿真实验数据后,选取试验因素零水平为:机器前进速度 1.5 km/h,液压缸伸缩速度 150 mm/s 及复位弹簧弹性系数 30,以除净比为评价指标,根据 Design-Expert10 软件响应曲面设计法中 Box-Behnken Design 原理确定试验因素水平编码表如表 1 所示。

表 1 因素水平编码

编码	前进速度 $X_1/(km \cdot h^{-1})$	液压缸伸缩速度 $X_2/(mm \cdot s^{-1})$	弹性系数 X_3
-1	1.4	120	20
0	1.5	150	30
1	1.6	180	40

4.2.2 试验安排及结果

根据二次回归组合设计方法,为减少样机在果园连续试验次数,选择三因素三水平的 Box-Behnken 试验,共包括 17 组试验,每组试验重复 3 次,取 3 次的平均值作为该组的试验结果,得出每组的除净率,试验安排及结果如表 2 所示。

应用 Design-Expert 10 对表 2 中试验数据拟合进行方差分析^[24,25],建立杂草除净比回归模型,回归模型显著性检验结果如表 3 所示。

由表 3 分析可知, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_2X_3 项的系数显著性水平 P 均小于 0.05,表示回归模型显著,其余项不显著;回归模型的失拟项的 P 值大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的回归方程与实际相符,回归有效,剔除不显著项后得到除草作业覆盖率的回归方程为:

$$N = 89.32 - 1.34X_1 - 0.87X_2 + 0.36X_3 - 0.36X_1X_2 - 0.38X_1X_3 + 1.14X_2X_3 - 0.01X_1^2 + 0.50X_2^2 - 1.02X_3^3 \quad (9)$$

表 2 试验安排及试验结果

序号	X_1	X_2	X_3	除草比/%
1	-1.000	-1.000	0.000	88.23
2	1.000	-1.000	0.000	91.54
3	-1.000	1.000	0.000	87.58
4	1.000	1.000	0.000	89.45
5	-1.000	0.000	-1.000	87.93
6	1.000	0.000	-1.000	91.45
7	-1.000	0.000	1.000	89.34
8	1.000	0.000	1.000	91.35
9	0.000	-1.000	-1.000	91.95
10	0.000	1.000	-1.000	87.58
11	0.000	-1.000	1.000	90.44
12	0.000	1.000	1.000	90.64
13	0.000	0.000	0.000	89.10
14	0.000	0.000	0.000	88.89
15	0.000	0.000	0.000	89.45
16	0.000	0.000	0.000	89.52
17	0.000	0.000	0.000	89.64

表 3 回归方程方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	显著性水平
模型 Model	30.56	9	3.40	36.04	<0.0001
X_1	14.34	1	14.34	152.15	<0.0001
X_2	5.99	1	5.99	63.56	<0.0001
X_3	1.02	1	1.02	10.88	0.0132
X_1X_2	0.52	1	0.52	5.55	0.0506
X_1X_3	0.57	1	0.57	6.03	0.0438
X_2X_3	5.22	1	5.22	55.44	0.0001
X_1^2	0.069	1	0.069	0.73	0.4200
X_2^2	0.0004	1	0.0004	0.004	0.9486
X_3^2	2.86	1	2.86	30.32	0.0009
残差 Residual	0.66	7	0.094	—	—
失拟 Lack of Fit	0.27	3	0.091	0.94	0.4990
误差 Pure Error	0.39	4	0.097	—	—
总和 Cor Total	31.22	16	—	—	—

注: $P < 0.01$ 表示极显著; $P < 0.05$ 表示显著。

4.2.3 响应曲面分析

由表 3 可知, 避障液压缸速度 \times 弹性系数 (X_1X_3)、前进速度 \times 弹性系数 (X_2X_3) 具有交互作用, 响应曲面图的形状能反映出两组交互因素作用的影响规律。

由图 10(a) 可知, 当弹簧弹性系统较大时, 除净比随着液压缸速度变化有轻微上升变化, 但基本维持在一个固定的水平; 当弹性系数较小时, 除净比随着液压缸速度逐渐下降, 出现这种现象, 主要是由于复位弹簧控制下的弧形触杆对启动液压缸运动的压力阀有控制作用, 当弹性系数较大时会延迟避障信号的传出, 液压缸在接收到信号时来不及躲避果树, 虽然可以提高草刀在株间的有效工作面积, 但也容易使除草装置卡住; 当弹性系数较小时, 复位弹簧的控制下的弧形触杆灵敏度增加, 在相同的时间内避障液压缸的行程会相应增加, 过快移出株间作业区域, 遗漏了部分应清理区域, 导致除净比降低。由响应曲面的变化趋势可以看出, 避障液压缸速度影响大于弹性系数变化影响。

由图 10(b) 可看出, 前进速度对除净比的影响呈增大的趋势, 随着复位弹簧弹性系数增加, 在速度较高时出现除净比下降升高的情况。出现这一现象的原因是当速度增加时, 机器相对果树的冲力会增加, 作用在触杆上的力相应增加, 当机器在速度较快、弹性系数较小的状态下行驶时, 复位弹簧抵抗外力的能力较弱, 使自动避障系统过于灵敏, 除草刀过快离开果树株间区域, 所以除净比

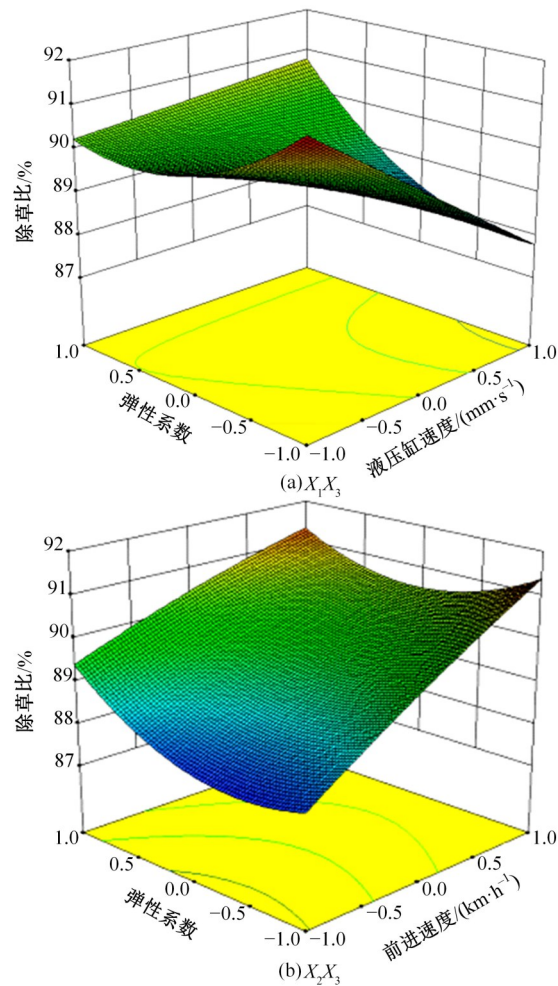


图 10 交互因子对除净率的影响

Fig. 10 Impact of interaction factors on the net removal rate

较低; 随着弹性系数增加, 抵抗外力变化能力增强, 由速度引导的外力变化减弱, 杂草除净比增加。但速度过大时产生的冲力容易损伤果树, 因此速度的取值为允许情况下的最大值。同样, 从变化速率上可以看出, 前进速度对杂草除净率的影响大于弹性系数对杂草除净比的影响。

由表 3 可知, 前进速度、液压缸速度和弹性系数的 F 值分别为 152.15、63.56 和 10.88, 结合响应面分析, 各因素对于除草作业覆盖率的贡献率依次为前进速度、液压缸速度和弹性系数。

4.3 试验结论

为求得 3 个因素的最优解, 利用 Design-Expert 10 软件寻优模块对回归模型进行最优求解, 试验因素的约束条件为: 避障液压缸速度 120~180 mm/s, 前进速度 1.4~1.6 km/h, 弹性系数 20~40, 评价指标除净比目标最大值为 100%。最终优化得到 3 个试验因素参数值分别为: 避障液压

缸速度 126 mm/s,前进速度 1.57 km/h,弹性系数 21,此参数条件下除净比为 92.59%。利用求解获得的最优试验参数进行田间验证试验,共重复 6 次,最终得到平均除净比约为 92.65%,比组合试验的最高值提高了 0.06 个百分点以上。

5 结 论

(1)设计了一种果树株间避障除草机,可在液压系统的控制下根据果园实际种植情况进行避障调节,通过对除草机各单体进行理论分析,确定了关键部件的结构及参数,触杆圆形截面直径为 8 mm,弧度半径为 700 mm,弧长 270 mm,短端长 30 mm,避障液压缸行程为 150 mm,除草刀盘直径为 420 mm,甩刀刀片长为 150 mm。

(2)利用 ADAMS 对设计的除草机进行了单因素仿真实验,通过控制变量的方法找出并确定了影响杂草除净率的主要因素,即避障液压缸速度、前进速度和控制接触复位弹簧弹性系数,为除草机样机试验及优化提供了参考依据。

(3)通过 Box-Behnken 试验设计原理,采用三因素三水平响应面分析方法,设计了二次回归组合试验,建立避障液压缸速度、前进速度和弹性系数对杂草除净比影响的回归模型。获得最佳工作参数分别为:避障液压缸速度 126 mm/s,前进速度 1.57 m/h,弹性系数 21,在最佳工作参数下进行了田间验证试验,获得平均除草作业覆盖率为 92.65%,比组合试验的最高覆盖率提高了 0.06%。

参考文献:

- [1] 于威,韩晓梅. 现代化果园机械除草装备与技术应用现状及发展趋向[J]. 现代农村科技, 2017(6): 97.
Yu Wei, Han Xiao-mei. The application status and development trend of modern orchard mechanical weeding equipment and technology[J]. Modern Rural Science and Technology, 2017(6): 97.
- [2] 王奇,周文琪,唐汉,等. 弧齿往复复式稻田株间自动避苗除草装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 53-61, 72.
Wang Qi, Zhou Wen-qi, Tang Han, et al. Design and experiment of arc-tooth reciprocating motion type seedling avoided weeding control device for intertillage paddy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 53-61, 72.
- [3] Terpstra R, Kouwenhoven J K. Inter-row and intra-row weed-control with a hoe-ridger[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1981, 26(2): 127-134.
- [4] Melander B. Intelligent versus non-intelligent mechanical intra-row weed control in transplanted onion and cabbage[J]. Crop Protection, 2015, 72: 1-8.
- [5] Norremark M. The development and assessment of the accuracy of an autonomous GPS-based system for intra-row mechanical weed control in row crops[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(4): 396-410.
- [6] Norremark M. Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area[J]. Precision Agriculture, 2012, 13(2): 149-162.
- [7] Cordill C, T E Grift. Design and testing of an intra-row mechanical weeding machine for corn[J]. Biosystems Engineering, 2011, 110(3): 247-252.
- [8] 陈振歆,王金武,牛春亮,等. 弹齿式苗间除草装置关键部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 81-86.
Chen Zhen-xin, Wang Jin-wu, Niu Chun-liang, et al. Design and experiment of key components of trash cultivator's working in paddy rice seeding lines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 81-86.
- [9] 杨松梅,王金武,刘永军,等. 水田株间立式除草装置的设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(12): 154-157.
Yang Song-mei, Wang Jin-wu, Liu Yong-jun, et al. Design and simulation analysis of vertical weed control device between seedlings in paddy field[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(12): 154-157.
- [10] 韩豹,申建英,李悦梅. 3ZCF-7700 型多功能中耕除草机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 124-129.
Han Bao, Shen Jian-ying, Li Yue-mei. Design and experiment of 3ZCF-7700 multi-functional weeding-cultivating machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(1): 124-129.
- [11] 张朋举,张纹,陈树人,等. 八爪式株间机械除草装置虚拟设计与运动仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(4): 56-59.
Zhang Peng-ju, Zhang Wen, Chen Shu-ren, et al. Virtual design and kinetic simulation for eight claw intra-row mechanical weeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 56-59.
- [12] 陈树人,张朋举,尹东富,等. 基于 LabVIEW 的八爪式机械株间除草装置控制系统[J]. 农工程学报, 2010, 26(增刊 2): 234-237.
Chen Shu-ren, Zhang Peng-ju, Yin Dong-fu, et al.

- Control system of eight claw intra-row mechanical weeding device based on LabVIEW[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(Sup. 2): 234-237.
- [13] 胡炼, 罗锡文, 张智刚, 等. 株间除草装置横向偏移量识别与作物行跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 8-14.
Hu Lian, Luo Xi-wen, Zhang Zhi-gang, et al. Side-shift offset identification and control of crop row tracking for intra-row mechanical weeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(14): 8-14.
- [14] 陈子文, 李南, 孙哲, 等. 行星刷式株间锄草机械手优化与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 94-99.
Chen Zi-wen, Li Nan, Sun Zhe, et al. Optimization and experiment of intra-row brush weeding manipulator based on planetary gear train[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 94-99.
- [15] 余涛, 蔡晓华, 赵德春, 等. 智能苗间锄草平台设计[J]. 农机化研究, 2013, 35(11): 30-34.
Yu Tao, Cai Xiao-hua, Zhao De-chun, et al. Design of intelligent weeding platform between seedlings[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(11): 30-34.
- [16] 丛茜, 徐金, 马博帅, 等. 基于虚拟仿真的拖拉机后悬挂检测装置设计与实验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(2): 754-760.
Cong Qian, Xu Jin, Ma Bo-shuai, et al. Design and test of tractor hydraulic suspension system testing device based on virtual simulation[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(2): 754-760.
- [17] 王新彦, 江泉, 吕峰, 等. 基于参数化模型的零转弯半径割草机侧翻稳定性[J]. 吉林大学学报:工学版, 2021, 51(5): 1908-1918.
Wang Xin-yan, Jiang Quan, Lv Feng, et al. Rollover stability of zero turning radius lawn mower based on parametric model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 1908-1918.
- [18] 于畅畅, 徐丽明, 王庆杰, 等. 篱架式栽培葡萄双边作业株间自动避障除草机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 1-9.
Yu Chang-chang, Xu Li-ming, Wang Qing-jie, et al. Design and experiment of bilateral operation intra-row auto obstacle avoidance weeder for trellis cultivated grape[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(5): 1-9.
- [19] 张圣, 骆艳洁. 液压系统节能设计[J]. 机床与液压, 2007(1): 151-152, 108.
Zhang Sheng, Luo Yan-jie. Energy-saving design of hydraulic system[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2007(1): 151-152, 108.
- [20] 长广仁藏. 旋耕拖拉机基本设计理论[M]. 北京:机械工业出版社, 1978.
- [21] 胡友民, 杜润生, 杨叔子. 液压系统运行状态监测[J]. 液压与气动, 2002(8): 35-37.
Hu You-min, Du Run-sheng, Yang Shu-zi. Operation status monitoring of hydraulic system[J]. Hydraulics and Pneumatics, 2002(8): 35-37.
- [22] 郭卫东, 李守忠, 马璐. ADAMS2013应用实例精解教程[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [23] 李增刚. ADAMS入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社, 2006.
- [24] 康建明, 彭强吉, 王士国, 等. 弹齿式残膜回收机捡拾装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊1): 295-303.
Kang Jian-ming, Peng Qiang-ji, Wang Shi-guo, et al. Design and experiment on pickup unit of spring-tooth residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Sup. 1): 295-303.
- [25] 彭强吉, 李成松, 康建明, 等. 气力式圆筒筛膜杂质分离机改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 126-135.
Peng Qiang-ji, Li Cheng-song, Kang Jian-ming, et al. Improved design and test on pneumatic cylinder sieve film hybrid separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 126-135.