doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.09.035

马铃薯捡拾机薯土分离输送测控系统设计与试验

安晓飞[1,2]　甘　蕾[1,2]　秦五昌[2]　丛　岳[2]　董珈欣[2]　张安琪[2,3]

（1.新疆农业大学机电工程学院，乌鲁木齐 830052；2.北京市农林科学院智能装备技术研究中心，北京 100097；
3.智能农业动力装备全国重点实验室，北京 100083）

摘要：针对传统升运链式马铃薯捡拾机作业参数难以实时监测、薯土分离转速无法无级变速调节的作业现状，在已有马铃薯捡拾机上设计了一种分离输送测控系统。基于马铃薯捡拾机工作原理，对监测单元、传动系统、液压系统及电控系统进行了设计改造，实现了作业速度的实时监测，以及分离输送带转速、振动轮振频和振幅的监测和控制。对所设计的测控系统开展了控制精度验证试验，设置分离输送带转速 100 r/min，振动轮振频 4.67 Hz，振幅 30 mm，在作业速度为 0.6 ~ 1.2 m/s 的范围内开展了 4 个作业水平试验。试验结果表明，分离输送带转速、振动轮振频和振幅最大标准差分别为 2.25 r/min、0.33 Hz 和 0.06 mm，最大平均绝对误差分别为 1.93 r/min、0.28 Hz 和 0.04 mm；系统平均响应时间为 1 s；说明系统具有较好的准确性和稳定性。基于设计的分离输送测控系统，以伤薯率为评价指标，以分离输送带转速、振动轮振频和振幅为试验因素，开展了田间试验。试验结果表明：各因素对伤薯的影响程度由高到低依次为分离输送带转速、振频、振幅，得到的最优控制参数为：分离输送带转速 84.7 r/min，振频 3.1 Hz，振幅 11.2 mm，最大伤薯率为 1.12%，满足马铃薯捡拾收获作业要求。

关键词：马铃薯；捡拾收获；分离输送；测控系统

中图分类号：S225.7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)09-0440-10　　**OSID**：

Design and Testing of Potato Soil Separation and Conveying Measurement and Control System for Potato Picking Machine

AN Xiaofei[1,2]　GAN Lei[1,2]　QIN Wuchang[2]　CONG Yue[2]　DONG Jiaxin[2]　ZHANG Anqi[2,3]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi* 830052, *China*
2. *Research Center of Intelligent Equipment Technology for Agriculture*,
Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, *Beijing* 100097, *China*
3. *State Key Laboratory of Intelligent Agricultural Power Equipment*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In response to the difficulty of real-time monitoring of operating parameters and the inability to continuously adjust the speed of potato soil separation in traditional lifting chain potato pickups, a separation and conveying measurement and control system was designed on existing potato pickups. Based on the working principle of potato pickers, the monitoring unit, transmission system, hydraulic system, and electronic control system were designed and modified to achieve real-time monitoring of operating speed, as well as monitoring and control of separation conveyor belt speed, vibration wheel frequency, and amplitude. A control accuracy verification test was conducted on the designed measurement and control system, with a separation conveyor belt speed of 100 r/min, a vibration wheel frequency of 4.67 Hz, and an amplitude of 30 mm. Four operational level tests were carried out within the operating speed range of 0.6 ~ 1.2 m/s. The experimental results showed that the maximum standard deviations of the separation conveyor belt speed, vibration wheel frequency, and amplitude were 2.25 r/min, 0.33 Hz, and 0.06 mm, respectively, and the maximum average absolute errors were 1.93 r/min, 0.28 Hz, and 0.04 mm, respectively. The average response time of the system was 1 s, indicating that the system had good accuracy and stability. Based on the designed separation and conveying measurement and control system, field experiments were conducted with potato damage rate as the evaluation index and separation

收稿日期：2025-03-01　修回日期：2025-05-09

基金项目：国家重点研发计划项目(2023YFD2000904)

作者简介：安晓飞(1986—)，男，研究员，博士，主要从事农机智能装备技术研究，E-mail：anxf@nercita.org.cn

通信作者：张安琪(1989—)，男，副研究员，博士，主要从事农机智能装备研究，E-mail：zhangaq@nercira.org.cn

conveyor belt speed, vibration wheel frequency, and amplitude as experimental factors. The experimental results showed that the degree of influence of various factors on potato damage, from high to low, was in the order of separation conveyor belt speed, vibration frequency, and amplitude. The optimal control parameters obtained were separation conveyor belt speed of 84.7 r/min, vibration frequency of 3.1 Hz, amplitude of 11.2 mm, and maximum potato damage rate of 1.12%, which met the requirements of potato picking and harvesting operations.

Key words: potato; picking and harvesting; separation and conveying; measurement and control system

0　引言

薯土分离输送是制约马铃薯收获智能化发展的关键环节[1-2]。国外在马铃薯收获分离输送环节的研发起步较早[3-4]。德国 Grimme 公司生产的马铃薯联合收获机采用橡胶包裹的高质量钢材作为分离杆条来进行薯土分离，通过传感器监测土壤湿度和马铃薯大小动态调整分离间隙，从而保证作业质量[5]。比利时 AVR 公司设计了负载传感器，实时监控输送带的负载情况，配合高频振动，显著提升薯土分离效果[6-7]。美国 Spudnik 公司使用电动推杆垂直驱动调节杆，实现 0 ~ 150 mm 振幅的精准控制，确保分离效果[8]。

为提高薯土分离效果，国内学者对薯土分离输送部分做了大量研究[9]。杨德秋等[10-11]通过设计自走式马铃薯捡拾装袋机，可一次性完成马铃薯捡拾、分离、除秧和装袋工作。吕金庆等[12-13]对马铃薯收获机升运分离过程的马铃薯损伤进行机理分析，设计了一种既适应大型收获也适用分段收获的机具，进一步对结构进行参数优化。杨然兵等[14-15]设计一种橡胶材质的辊式薯土分离装置，能够通过不同的排布方式实现不同程度的分离效果。魏忠彩等[16-17]采用弹性揉搓辊进行薯土分离，并利用液压马达调节振动频率，同时设计了波浪形筛面，可有效提高作业效率和质量。

当前针对马铃薯捡拾机的调控多为机械控制，存在各部件参数难以实时监测以及分离转速无法无级调节的问题[18]。为此，本文研发一种基于电液比例控制的马铃薯捡拾机分离输送测控系统，实现作业速度的实时监测，分离输送带转速、振动轮振频和振幅的实时监测与控制。通过开展台架性能试验，分析车速的监测精度，以及分离输送带转速、振动轮振频和振幅的监测与控制精度；通过田间性能试验对分离输送测控系统的稳定性进行验证，对影响马铃薯捡拾机伤薯率的指标及分离输送最优控制参数进行分析。

1　捡拾机工作原理与运动分析

1.1　整体结构和工作原理

根据华北地区马铃薯捡拾机收获作业模式，选用如图 1 所示的升运链式马铃薯捡拾机分离输送装置作为系统研发平台，该装置为单行单垄作业方式，工作幅宽为 600 mm，薯土分离输送装置长度为 1 200 mm，杆条间距为 54 mm，主要由捡拾铲、薯土分离输送装置、减速装置、机架、振动装置、驱动装置、皮带传动装置、可调地轮等构成。

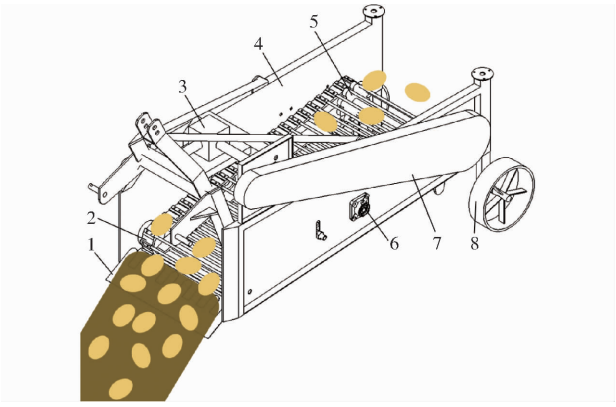


图 1　马铃薯捡拾机分离输送装置结构图

Fig. 1　Structural diagram of potato picking machine separation and conveying device

1. 捡拾铲　2. 薯土分离输送装置　3. 减速装置　4. 机架　5. 驱动装置　6. 振动装置　7. 皮带传动装置　8. 可调地轮

马铃薯捡拾机收获作业时，捡拾铲首先将平铺于地表的马铃薯和土壤一同铲起。随后，通过升运链输送，经振动装置对薯土混合物进行抖动、破碎和筛分处理。在此过程中，薯土混合物向后升运分离输送，最终的理想状态是将马铃薯抛送至下一级装置时，只剩清洁的马铃薯向后方输送[19-20]。

1.2　捡拾机分离输送运动分析

在捡拾机分离输送过程中，影响马铃薯捡拾收获机作业性能的最主要指标是伤薯率[21]。当捡拾机将薯土混合物捡拾到分离输送带上后，薯土混合物的分离主要依赖振动装置和薯土分离输送装置产生的机械振动，以及薯土之间的摩擦、滚动和碰撞效应[22]。随着分离输送带转速、振动轮频率和幅度的提升，杆条的振动强度增强，移动速度增强，物料抛掷高度随之增加，马铃薯沿输送带面的移动速度加快，从而显著提高分离效率。但是，过高的抛掷高度可能导致马铃薯脱离分离输送带的有效范围以及增大碰撞力度，使伤薯率增大。

通过分析薯土混合物在输送带上的运动特性，将输送带简化为平面模型，忽略薯土混合物与分离杆的相对位置关系，其运动轨迹如图 2 所示。以机具为参考系，选取混合物脱离带面瞬间的质心为坐标原点 O，沿输送方向为 x 轴正方向，垂直于输送带方向为 y 轴正方向，建立平面直角坐标系。

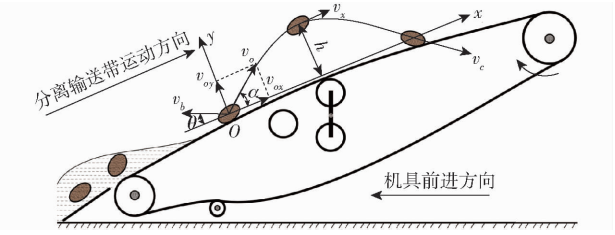


图 2 马铃薯抛落过程运动学分析

Fig. 2 Kinematic analysis of potato drop process

薯土混合物斜抛运动速度表达式为

$$\begin{cases} v_x = v_{ox} - v_b\cos\theta \\ v_y = v_{oy} + v_b\sin\theta - gt \\ v_o = \sqrt{v_{ox}^2 + v_{oy}^2} \end{cases} \tag{1}$$

式中 v_x——薯土混合物斜抛运动过程沿 x 轴方向的速度，m/s

v_y——薯土混合物斜抛运动过程沿 y 轴方向的速度，m/s

t——薯土混合物斜抛运动时间，s

g——重力加速度，取 9.8 m/s^2

v_b——作业速度，m/s

v_{ox}——分离输送带线速度，m/s

v_{oy}——分离输送装置振动获得的瞬时速度，m/s

v_x——被抛置最高点时的速度，m/s

θ——机具前进速度与分离输送带之间的夹角，(°)

薯土混合物到达最大抛起高度时，$v_y = 0$，此时被抛起的最大高度 h 为

$$h = \frac{(v_o\sin\alpha)^2}{2g} \tag{2}$$

式中 α——被抛起至跌落时位移方向与 x 轴方向的夹角，(°)

由斜抛运动原理可知薯土混合物在跌落末端的碰撞速度大小仍为初始速度，即薯土混合物斜抛运动初始速度表达式为

$$v_o = \sqrt{(v_{ox} - v_b\cos\theta)^2 + (v_b\sin\theta + v_{oy})^2} \tag{3}$$

由式(1)～(3)可知，薯土混合物和分离输送带之间相互作用所产生的薯土混合物的初速度变化，主要与作业速度、分离输送带线速度、振动轮线速度、振幅有关。

综上所述，影响马铃薯捡拾机分离输送环节伤薯率的主要参数有作业速度、分离输送带转速、振动轮振频和振幅。为了更好地控制伤薯率，本文的目标是实现对上述参数的监测与控制。

2 分离输送电液控制系统设计

2.1 总体方案设计

基于前面的运动分析可知，作业速度、分离输送带转速、振动轮振频和振幅是影响分离输送作业效果的关键参数。为实现上述参数的监测与控制，更好的控制伤薯率，设计了一套马铃薯捡拾机分离输送测控系统，主要包括车载控制器、电磁比例阀、液压马达、编码器、单天线、电动推杆、作业参数显示屏和机械部件，如图 3 所示。马铃薯捡拾机收获作业时，该系统以 HSC490 车载控制器为控制核心，通过编码器、RTK－GNSS 接收机和电动推杆电位器实时监测作业速度、分离输送带转速、振动轮振频和振幅，以液压阀组电磁比例阀、电动推杆为执行机构，实现对分离输送带转速和振动轮振频的无级调速，实现最优的分离输送作业效果。各作业参数通过基于串口屏设计的监控界面实时显示。



图 3 系统总体框架

Fig. 3 Overall system framework

2.2 关键作业参数监测方案设计

2.2.1 作业速度监测

作业速度监测传感器使用农芯科技(北京)有限责任公司的 AMG_PFZ202 型 RTK－GNSS 导航数据接收机和卫星接收天线，采集频率为 50 Hz，供电电压为 12 V。RTK－GNSS 接收机安装在拖拉机驾驶室内，天线底座带有磁铁，可吸附在拖拉机驾驶室外侧顶部。机具作业时，车载控制器将获取接收机

在 RTK 模式下的作业速度，同时在串口屏实时显示。

2.2.2　转速与振频监测

对驱动轴转速和振动轴进行检测，使用无锡市焱森自动化有限公司生产的 YSK8025－G－500BM－5－24F 型编码器，通过输出脉冲信号来反映驱动轴转速和振动轴振频的增量信息。分辨率由光栅盘线数决定，选择 500 线的编码器，即每秒输出 500 个脉冲信号。供电为 12 V，使用 A 相、B 相信号，最大转速为 6 000 r/min，最大响应频率为 100 kHz，选用孔径为 25 mm，安装在驱动轴和振动轴上。转速与振频的关系式为

$$f=\frac{Zn_1}{60} \tag{4}$$

式中　f——振动轴振频，Hz

Z——振动轮的滚轮数，取 2 个

n_1——振动轴转速，r/min

2.2.3　振幅监测

振幅监测使用电动推杆，通过电位计反映推杆行程位置。选用温州惠丰电器有限公司生产的 HFTGF－A－DW－100－12－20 型电动推杆，行程为 100 mm，电压为 12 V，速度为 20 mm/s，最大推力为 1 500 N。电动推杆垂直地面安装，可增加电动推杆的使用寿命。

2.3　关键执行部件控制方案

2.3.1　转速与振频控制

为了确保分离输送装置具备较佳的扭转力矩和可调转速，该装置由原来的 PTO 传动改为液压马达传动。根据捡拾机的结构参数计算驱动轴马达所需功率。根据田间作业情况以及查阅文献[20]，薯土混合物在分离输送装置上的满载重量 G_1 为 250 N。分离输送装置实际重量，即传送带和钢杆的总重 G_2 为 247 N，薯土分离输送装置受力公式为

$$\begin{cases} F=F_1+F_2+F_3 \\ F_1=\dfrac{Q_1\mu_1 Bg\sin\alpha_1}{v_d} \\ F_2=\mu_2 G_2 \\ F_3=G_1 \end{cases} \tag{5}$$

式中　F——分离输送装置总阻力，N

F_1——作用于驱动带轮上的圆周力，N

F_2——升运链与定位轮间的摩擦力，N

F_3——物料与升运链间的摩擦力，N

Q_1——薯土混合物每秒喂入质量，取 20 kg/s

μ_1——薯土分离装置厚度修正系数，取 0.8

μ_2——薯土分离装置与定位轮动摩擦因数，取 0.3

α_1——薯土分离装置升运倾角，取 20°

B——有效工作幅宽，取 0.56 m

v_d——分离输送带线速度，m/s

当转速取最大值时，所需的功率也是最大的，根据实际田间作业情况和查阅文献[22]，该机具分离输送带线速度取 2.1 m/s。

经计算，得出 $F_1=14.3$ N，$F_2=74.1$ N，$F_3=250$ N，$F=338.4$ N。经过链传动后，链传动在本文的传动比为 1∶1，齿数为 18，单排链，分离输送装置传递功率 P_1 为

$$P_1=\frac{Fv_d}{1\,000\eta_1} \tag{6}$$

式中　η_1——链传动效率，取 0.95

计算得出，$P_1=0.75$ kW。确定链传动的修正功率 P_c 以及驱动分离输送带液压马达所需输出功率 P_d 为

$$P_c=P_d=P_1f_1f_2 \tag{7}$$

式中　f_1——工况系数，取 1.5

f_2——小链轮齿数系数，取 1.08

计算得出 $P_c=1.215$ kW。液压马达需带动分离输送带装置的转矩 T 为

$$T=\frac{9\,550P_c}{n_2} \tag{8}$$

式中　n_2——驱动液压马达转速，r/min

为求得在分离输送作业过程中所需最大转矩，经查阅文献[10]，取 80 r/min。此时，$T=145$ N·m。经上述计算，选取镇江大地液压有限责任公司生产的 BMP125 型摆线液压马达，其排量 120.2 cm³/rev，额定转速 390 r/min，额定扭矩 202 N·m。

由于振动轮承受的扭矩较小，本研究振动装置液压马达初选 BMP50 型摆线液压马达，其排量 51.7 cm³/rev，额定转速 850 r/min，额定扭矩 81 N·m。

本研究所设计的液压回路如图 4 所示，主要包括电磁比例阀、液压马达、减压阀、逻辑阀以及其他辅助元件和管路。液压系统主要分为两条油路：首先是驱动整个分离输送装置，所需扭矩较大，所以液压油先经电磁比例阀，后通过液压马达。其次是驱动振动调节装置，所需扭矩较小，即液压油先经过减压阀使压力减小，再经过电磁比例阀，然后通过液压马达，其中当压力过大时，多余的液压油经过球形梭阀和逻辑阀流回油箱。

2.3.2　振幅控制

由于一个电动推杆不能使振幅调节杆平稳地上下移动，本研究使用 2 个电动推杆，电动推杆一端固定在机架上，另一端连接振幅调节杆。通过调节推杆行程，使振动轮的中心与振幅调节杆的中心相对

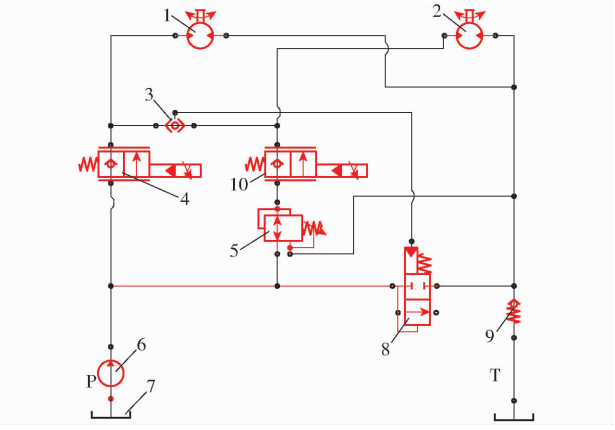


图 4 分离输送装置液压回路

Fig. 4 Separate conveyor hydraulic circuit

1. BMP125 型液压马达 2. BMP50 型液压马达 3. 球形梭阀 4、10. 电磁比例阀 5. 减压阀 6. 液压泵 7. 油箱 8. 液控逻辑阀 9. 单向阀

位置发生改变,进而控制振幅,如图 5 所示。



图 5 振幅控制装置

Fig. 5 Amplitude control device

2.4 系统集成

根据机具现有结构,为方便液压马达的动力传输,设计动力传输固定架,如图 6 所示。驱动轴液压马达输出端通过联轴器与动态扭矩传感器连接,然后通过与轴承座支撑的传动轴连接,把转矩传递给链轮,使用链传动驱动分离输送装置。振动轴液压马达固定在机具侧面,通过链传动与振动轴连接。通过设计振幅调节杆,使电动推杆采用垂直布局的方式安装在机具两侧,可以使两侧推力竖直向下,防止翘曲变形。

为了能够实时获取马铃薯捡拾机的作业状态,通过使用北京迪文科技有限公司生产的串口屏,开发了一套基于 RS232 串口通信的监控系统。该系统采用 115 200 b/s 的波特率进行数据传输,通信协议为 16 进制格式,指令帧以固定前缀 0x5A 和 0xA5 开头,数据位宽为 8 位,停止位 1 位,确保通信的可靠性与实时性。显示界面包括作业速度、驱动轴转速、振动轴转速、振动幅度,实现作业参数的实时显示,如图 7 所示。

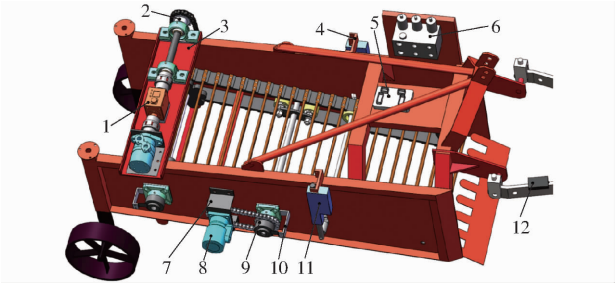


图 6 马铃薯捡拾机分离输送装置测控系统布局图

Fig. 6 Layout of measurement and control system for separation and conveying device of potato picking machine

1. 动态扭矩传感器 2. 链传动装置 3. 动力传输固定架 4. 电动推杆固定架 5. 车载控制器 6. 液压阀组 7. 液压马达固定架 8. 液压马达 9. 编码器 10. 编码器固定架 11. 电动推杆 12. 惯性传感器

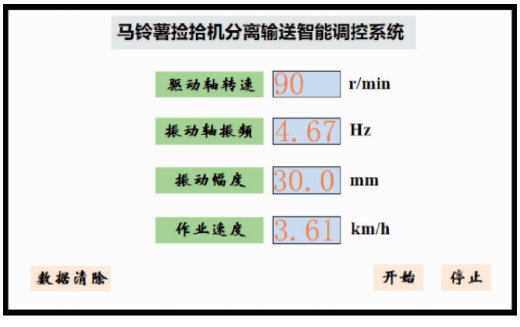


图 7 显示界面

Fig. 7 Display screen

使用北京英智杰科技有限公司生产的 HSC490 型车载控制器。可通过 CAN 总线对下位机控制器发送指令并接收下位机的反馈信号。采用 PID 算法进行液压马达转速控制,即车载控制器通过 PID 控制算法将编码器反馈的转速信号与车载控制器中所设定的转速值进行对比,计算出偏差量,该偏差量作为输入信号传递给车载控制器,车载控制器根据该输入信号计算输出模拟量,液压阀组中的电磁比例阀能够根据输出的模拟量调节油路的流量和流速,同时车载控制器对编码器反馈的数据进行实时监测,从而实现对液压马达转速的精确控制,进而构成一个闭环的微控制系统,如图 8 所示。

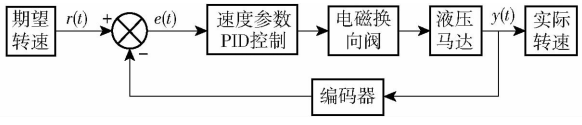


图 8 PID 控制算法框图

Fig. 8 Block diagram of PID control algorithm

3 系统标定试验

3.1 振幅静态标定

将电动推杆置于硬质桌面上,手动控制电动推杆伸缩长度,利用数显游标卡尺测量推杆伸出长度。

本研究标定试验采用每次移动 5 mm，进行一次测量。对实际长度与电动推杆中电位器输出的电压信号进行线性拟合关系运算，得出拟合公式为

$$y_1 = 5.984\,7x_1 + 220.50 \tag{9}$$

$$y_2 = 5.985\,4x_2 + 220.34 \tag{10}$$

式中　y_1——电动推杆 1 模拟电压输入，mV

x_1——电动推杆 1 伸缩长度，mm

y_2——电动推杆 2 模拟电压输入，mV

x_2——电动推杆 2 伸缩长度，mm

两个电动推杆的线性拟合 R^2 均为 0.999 9，证明电动推杆的精度符合要求。

3.2　振幅台架标定

为验证电动推杆的精度，需对其进行台架动态标定。如图 9 所示进行标定试验，手动控制电动推杆伸出长度，启动振动装置，清晰可见白纸上面黑线的分布，取下白纸，使用数显游标卡尺进行测量。



图 9　电动推杆伸出长度与振幅标定试验

Fig. 9　Calibration test for extension length and amplitude of electric push rod

对振动幅度与电动推杆伸出长度进行线性拟合关系运算，得出拟合公式为

$$y_3 = 0.476\,1x_3 + 5.955 \tag{11}$$

式中　y_3——振动幅度，mm

x_3——电动推杆伸缩长度，mm

线性拟合 R^2 为 0.994 7。振动幅度调节范围设定 0 ~ 35 mm。

4　系统控制精度验证试验

4.1　试验材料与方法

评价分离输送测控系统最关键的指标是控制精度，为了验证该系统的准确性和稳定性，开展系统控制精度验证试验。试验在北京市小汤山国家精准农业研究示范基地开展，地块为沙壤土，土壤含水率 11.6%。根据国家行业标准 JB/T 14285—2022《马铃薯收获机械》规定的试验方法提前对地表杂草及石块、树枝等坚硬异物进行清理。同时划定试验区由稳定区、测试区、停车区组成，测定区长度 10 m，测定区前有 30 m 的稳定区，测定区后有 10 m 的停车区。

马铃薯捡拾机配套动力为 JOHN DEERE 904 型拖拉机，功率为 66.2 kW，田间作业情况如图 10 所示。通过田间预试验，设置捡拾铲入土深度 10 cm，分离输送带转速 100 r/min，振动轮振频 4.67 Hz，振幅 30 mm，做 4 个作业速度水平的试验，分别为 0.6、0.8、1.0、1.2 m/s，每个水平下分别检测 3 次，取平均值。



图 10　系统控制精度试验

Fig. 10　System control accuracy test

4.2　试验结果与分析

根据图 11 所示，不同作业速度下分离输送带转速平均值分别为 99.50、99.75、99.65、98.72 r/min；振动轮振频平均值分别为 4.66、4.66、4.65、4.66 Hz；振幅平均值分别为 30.06、30.01、30.04、29.99 mm；分离输送带转速最大标准差为 2.25 r/min，最大平均绝对误差为 1.93 r/min，最大相对误差为 10%；振动轮振频最大标准差为 0.33 Hz，最大平均绝对误差为 0.28 Hz，最大相对误差为 14.35%；振幅最大标准差 0.06 mm，最大平均绝对误差为 0.04 mm，最大相对误差为 0.02%；平均响应时间为 1 s。由此得出，不同作业速度下进行的田间性能试验，机具各部件控制精度误差波动较小，满足马铃薯捡拾收获需求，可为后续试验提供可靠的数据支撑。

结合田间性能试验结果分析，随着作业速度的增加，分离输送带转速和振动轮振频控制精度会有所下降，原因是液压系统执行动作存在一定的滞后性以及田间作业负载变化增大，从而导致控制精度和稳定性有所下降，后期需要对分离输送装置智能调控技术进行深入研究，以提高马铃薯捡拾机在不同作业速度时的控制精度和稳定性。

5　田间试验

5.1　试验方案

基于前序分析可知，采用伤薯率作为评价捡拾机分离输送作业环节的主要指标。为了探究分离输送测控系统各参数对伤薯率指标的影响权重，获取捡拾机分离输送测控系统最优控制参数，2025 年 4

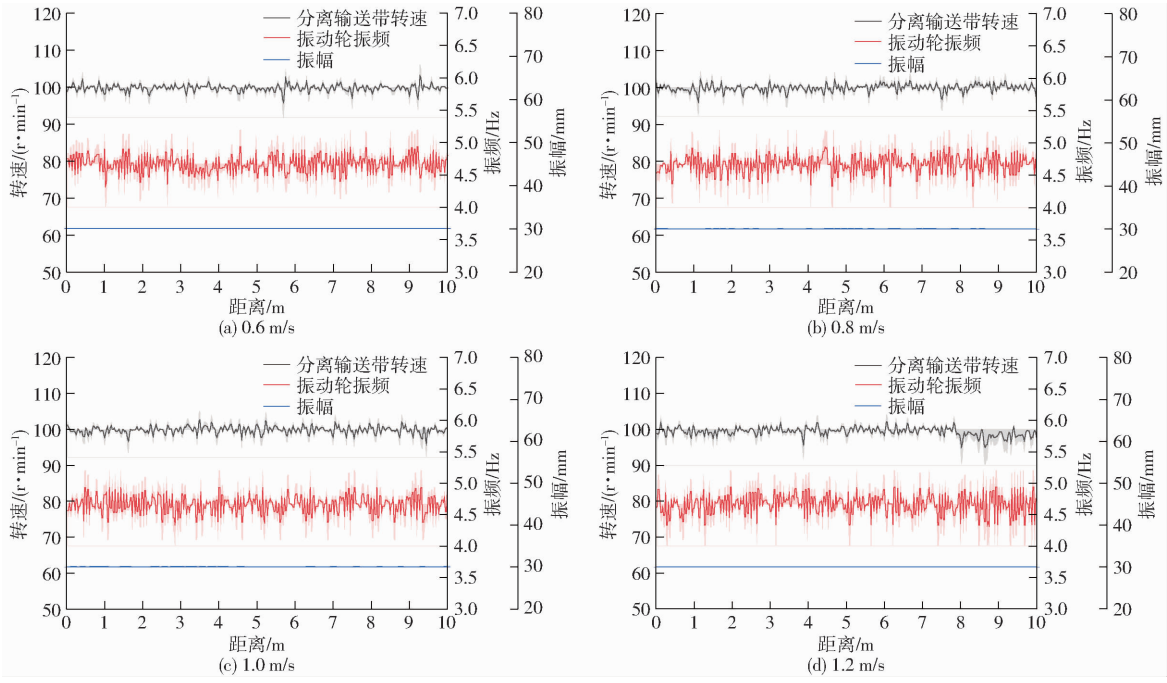


图 11 不同作业速度下转速和振频、振幅变化曲线

Fig. 11 Speed and vibration wheel frequency amplitude variation curves at different operating speeds

月在北京市小汤山国家精准农业研究示范基地开展了田间试验。试验的前期准备工作与系统控制精度试验相同。本试验在 10 m 测定区铺放的马铃薯密度为 3 kg/m^2,伤薯率采集区域在 10 m 测定区,每次试验结束后挑出损伤的马铃薯,使用电子秤称其质量,如图 12 所示。运用 Design-Expert 软件中的 Box－Behnken 功能开展三因素三水平正交试验,结合前文分析,以分离输送带转速、振频、振幅为自变量,伤薯率为响应值。前期预试验观察发现,当作业速度为 0.9 m/s,捡拾铲入土深度为 10 cm 时,设置分离输送带转速在 80 ~ 200 r/min,振频在 2.67 ~ 6.67 Hz 时,马铃薯能够被有效捡拾和分离输送,该



(a) 伤薯率田间试验过程

(b) 马铃薯状态

图 12 田间试验

Fig. 12 Field experiment

机振幅调节范围在 0 ~ 35 mm。参考国家行业标准 JB/T 14285—2022《马铃薯收获机械》,使用伤薯率 Y_1 作为本试验的评价指标,分离输送带转速 X_1、振频 X_2、振幅 X_3 为正交试验因素,因素编码如表 1 所示,试验设计与结果如表 2 所示。

表 1 正交试验因素编码

Tab. 1 Orthogonal experimental factor coding

编码	分离输送带转速/(r·min^{-1})	振频/Hz	振幅/mm
－1	80	2.67	10
0	140	4.67	20
1	200	6.67	30

5.2 方差分析

通过 Design-Expert 13 软件,初步得到伤薯率的二次多项式回归模型,并将对伤薯率影响不显著的交互作用项剔除,由此得出简化后的伤薯率回归模型为

$$Y_1 = -2.621 + 0.014X_1 + 0.075X_2 + 0.133X_3 - 0.001X_1X_2 + 0.044X_2^2 - 0.003X_3^2 \quad (12)$$

由表 3 可知,回归模型 $P < 0.01$,表明各评价指标拟合模型极显著;模型失拟项 $P > 0.05$,说明模型失拟性不显著,表明回归模型拟合程度高,X_1、X_2、X_3 以及二次项 X_2^2 和 X_3^2 对伤薯率影响极显著;交互项 X_1X_2 对伤薯率影响显著;其余交互项和二次项对伤薯率影响不显著。各个因素对马铃薯伤薯率影响从大到小依次为分离输送带转速、振频、振幅。模型的决定系数 R^2 为 0.996 6,同时调整后的 R^2 与预测 R^2

表 2　试验设计与结果

Tab. 2　Experimental design and results

序号	X_1	X_2	X_3	Y_1/%
1	-1	-1	0	0.53
2	1	-1	0	2.45
3	-1	1	0	2.21
4	1	1	0	3.67
5	-1	0	-1	0.65
6	1	0	-1	2.18
7	-1	0	1	1.24
8	1	0	1	2.92
9	0	-1	-1	0.89
10	0	1	-1	2.36
11	0	-1	1	1.37
12	0	1	1	2.93
13	0	0	0	2.11
14	0	0	0	1.95
15	0	0	0	2.05
16	0	0	0	1.99
17	0	0	0	1.93

表 3　回归方程方差分析

Tab. 3　Regression equation variance analysis

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	11.06	9	1.23	229.82	<0.0001
X_1	5.43	1	5.43	1 014.81	<0.0001
X_2	4.40	1	4.40	821.72	<0.0001
X_3	0.708 1	1	0.708 1	132.36	<0.0001
X_1X_2	0.052 9	1	0.052 9	9.89	0.016 3
X_1X_3	0.005 6	1	0.005 6	1.05	0.339 3
X_2X_3	0.002 0	1	0.002 0	0.378 6	0.557 8
X_1^2	0.005 0	1	0.005 0	0.936 9	0.365 3
X_2^2	0.128 2	1	0.128 2	23.97	0.001 8
X_3^2	0.361 5	1	0.361 5	67.57	<0.0001
残差	0.037 4	7	0.005 3		
失拟项	0.015 5	3	0.005 2	0.944 3	0.498 6
误差	0.021 9	4	0.005 5		
总和	11.1	16			

的差值小于 0.2，证明模型拟合性可靠，即回归方程预测值与试验测试值误差很小。

5.3　响应面分析

以上数据证明 3 种因素对于马铃薯捡拾收获作业时的伤薯率都产生了一定影响，运用 Design-Expert 13 软件中的响应曲面分析法，探究试验因素对伤薯率的具体影响规律。

如图 13 所示，振幅为零水平，分离输送带转速由 80 r/min 增加到 200 r/min，振频由 2.67 Hz 上升到 6.67 Hz，伤薯率逐渐增大，分离输送带转速对伤薯率的影响程度比振频对伤薯率的影响程度大。综上结果表明，过高的转速、振频和振幅，会增加薯与薯、薯与杆之间的碰撞力度和切线擦伤程度，从而造成马铃薯的破皮损伤。

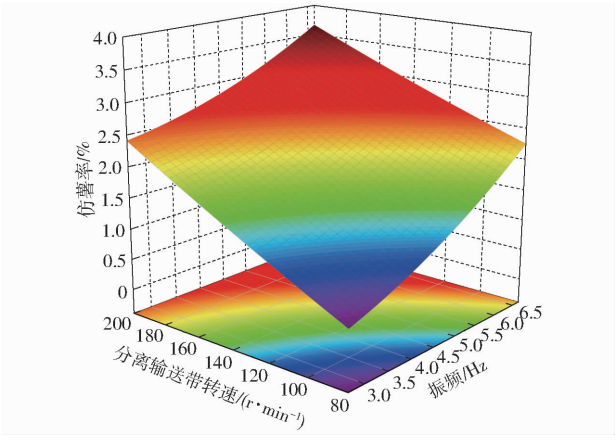


图 13　分离输送带转速与振频交互作用对评价指标影响的响应面图

Fig. 13　Response surface diagram of influence of interaction between speed and frequency of separation conveyor belt on evaluation indicators

5.4　参数优化与验证

为获得马铃薯捡拾收获作业时的最优控制参数组合，根据伤薯率回归模型，对分离输送带转速、振频和振幅进行数学建模

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{13}$$

运用 Design-Expert 13 软件中 Optimization - Numerical 选项，求解得到最优控制参数：分离输送带转速 84.651 r/min，振频 3.06 Hz，振幅 11.175 mm，此时伤薯率为 0.262%。综合考虑田间实际作业环境以及机器实际作业情况，确定优化后的最优控制参数：分离输送带转速 84.7 r/min，振频 3.1 Hz，振幅 11.2 mm。

参数验证试验的试验条件和测试方法与参数影响分析试验相同，在 10 m 测定区分别铺放马铃薯密度为 4、5、6 kg/m^2，每个密度的试验共进行 3 次，对最优控制参数进行伤薯率验证，验证试验结果如表 4 所示。

表 4　不同密度下的田间验证试验伤薯率结果

Tab. 4　Results of field validation experiments on potato damage rate at different densities　%

试验组号	马铃薯收获密度/(kg·m^{-2})		
	4	5	6
1	0.51	0.78	1.12
2	0.67	1.03	0.99
3	0.62	0.94	0.87

验证试验结果表明，最优控制参数条件下的最

大伤薯率为 1.12%,小于国家行业标准所规定的伤薯率小于等于 2.5%。即在不同马铃薯收获密度下,使用该参数组合可以满足马铃薯捡拾机分离输送测控系统的作业要求。

6 结论

(1)基于华北地区马铃薯捡拾收获作业模式,在满足黏壤土的马铃薯捡拾收获作业条件,分析薯土混合物在捡拾收获过程中相互作用关系,设计了一种马铃薯捡拾机分离输送测控系统,可以实现作业速度、分离输送带转速、振动轮振频和振幅的监测,以及分离输送带速度、振动轮振频和振幅无级调控。

(2)为验证测控系统的控制精度和稳定性,开展了系统控制精度验证试验。试验结果表明,在作业速度为 0.6 ~ 1.2 m/s 范围内,分离输送带转速、振动轮振频和振幅最大标准差分别为 2.25 r/min、0.33 Hz 和 0.06 mm,最大平均绝对误差分别为 1.93 r/min、0.28 Hz 和 0.04 mm,最大相对误差分别为 10%、14.35%、0.02%,系统平均响应时间为 1 s。说明系统具有较好的准确性和稳定性,满足马铃薯捡拾收获作业需求。

(3)基于设计的分离输送测控系统,以伤薯率为评价指标,以分离输送带转速、振动轮振频和振幅为试验因素,开展了田间试验。试验结果表明:各因素对伤薯的影响程度由高到低依次为分离输送带转速、振频、振幅,得到的最优控制参数为:分离输送带转速 84.7 r/min,振频 3.1 Hz,振幅 11.2 mm,最大伤薯率为 1.12%,满足马铃薯捡拾收获作业要求。

参 考 文 献

[1] 白丽,陈曦,孙洁,等. 产业融合视角下中国马铃薯加工业发展问题研究[J]. 农业工程学报,2019,35(8):316 - 323.
BAI Li, CHEN Xi, SUN Jie, et al. Development of potato processing industry in China from perspective of industrial integration [J]. Transactions of the CSAE,2019,35(8):316 - 323. (in Chinese)

[2] 李涛,杨敏丽,张雄,等. 西北地区马铃薯机械化生产技术与差异性研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1):307 - 313.
LI Tao, YANG Minli, ZHANG Xiong, et al. Potato production technology and difference of mechanization level in northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 1):307 - 313. (in Chinese)

[3] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报,2019,50(3):1 - 16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(3):1 - 16. (in Chinese)

[4] 刘兴,杨珍,薛建,等. 马铃薯联合收获机械研究进展[J]. 农机化研究,2022,44(5):259 - 263,268.
LIU Xing, YANG Zhen, XUE Jian, et al. Research progress on potato harvesting machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(5):259 - 263,268. (in Chinese)

[5] FAN J, LI Y, LUO W, et al. An experimental study of stem transported-posture adjustment mechanism in potato harvesting [J]. Agronomy,2023,13(1):234.

[6] ZHANG C, ZHAO Y, DU X, et al. Design and experimentation of small potato harvester for heavy soil in hilly and mountainous areas[J]. Agronomy,2024,14(9):2131.

[7] MU G, WANG W, ZHANG T, et al. Design and experiment with a double-roller sweet potato vine harvester[J]. Agriculture, 2022,12(10):1559.

[8] WANG S, GAO X, YOU Z, et al. Experiment and parameter optimization of an automatic row following system for the traction beet combine harvester[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2023,16(1):145 - 152.

[9] 王兴欢,魏忠彩,苏国梁,等. 马铃薯收获机扰动分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(4):101 - 112.
WANG Xinghuan, WEI Zhongcai, SU Guoliang, et al. Design and experiment of a simple harmonic disturbance separation device for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(4):101 - 112. (in Chinese)

[10] 杨德秋,汪昕,刘萌萌,等. 自走式马铃薯捡拾装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):85 - 95.
YANG Deqiu, WANG Xin, LIU Mengmeng, et al. Design and experiment of self-propelled potato collecting and bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(1):85 - 95. (in Chinese)

[11] 程子文,杨德秋,刘萌萌,等. 基于离散元仿真的马铃薯收获机集薯装袋过程研究[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):62 - 74.
CHENG Ziwen, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Bagging process of potato harvester based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 2):62 - 74. (in Chinese)

[12] 吕金庆,王鹏榕,刘志峰,等. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(6):100 - 109.
LÜ Jinqing, WANG Pengrong, LIU Zhifeng, et al. Design and experiment of potato harvester potato stem separation equipment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):100 - 109. (in Chinese)

[13] 吕金庆,杨晓涵,吕伊宁,等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):103 - 113.

LÜ Jinqing, YANG Xiaohan, LÜ Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 103 – 113. (in Chinese)

[14] 杨然兵,田光博,尚书旗,等. 马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):107 – 118.
YANG Ranbing, TIAN Guangbo, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 107 – 118. (in Chinese)

[15] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(7): 119 – 126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 119 – 126. (in Chinese)

[16] 魏忠彩,王业炜,李学强,等. 弹性揉搓式马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(14):60 – 69.
WEI Zhongcai, WANG Yewei, LI Xueqiang, et al. Design and experiments of the potato combine harvester with elastic rubbing technology[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(14): 60 – 69. (in Chinese)

[17] 魏忠彩,苏国梁,李学强,等. 基于离散元的马铃薯收获机波浪形筛面参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):109 – 122.
WEI Zhongcai, SU Guoliang, LI Xueqiang, et al. Parameter optimization and test of potato harvester wavy sieve based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 109 – 122. (in Chinese)

[18] 杨然兵,吕士亭,张健,等. 履带式马铃薯联合收获机辅助驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):231 – 238,343.
YANG Ranbing, LÜ Shiting, ZHANG Jian, et al. Design and test of assisted driving operation system of tracked potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 231 – 238, 343. (in Chinese)

[19] CHEN M, LIU X, HU P, et al. Study on rotor vibration potato-soil separation device for potato harvester using DEM – MBD coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 218: 108638.

[20] 汪昕,杨德秋,刘萌萌,等. 自走式马铃薯捡拾机捡拾装置参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(增刊 2):20 – 29.
WANG Xin, YANG Deqiu, LIU Mengmeng, et al. Parameter optimization and experiment of picking device of self-propelled potato collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 20 – 29. (in Chinese)

[21] 魏忠彩,王兴欢,李学强,等. 履带自走式分拣型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):95 – 106.
WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 95 – 106. (in Chinese)

[22] WANG H, ZHAO W, SUN W, et al. The design and experimentation of a wheeled-chassis potato combine harvester with integrated bagging and ton bag-lifting systems[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1461.

(上接第 404 页)

[26] WU Guanglei, ZHAO Wenkang, ZHANG Xuping. Optimum time-energy-jerk trajectory planning for serial robotic manipulators by reparameterized quintic NURBS curves[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(19): 4382 – 4393.

[27] JAHANPOUR J, ALIZADEH M R. A novel acc-jerk-limited NURBS interpolation enhanced with an optimized s-shaped quintic feedrate scheduling scheme[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 77: 1889 – 1905.

[28] KURAGANO T. Quintic B-spline curve generation using given points and gradients and modification based on specified radius of curvature[J]. WSEAS Transactions on Math., 2010, 9(2): 79 – 89.

[29] QIAO Baijie, CHEN Xuefeng, XUE Xiaofeng, et al. The application of cubic B-spline collocation method in impact force identification[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2015, 64: 413 – 427.

[30] ARORA G, SINGH B K. Numerical solution of Burgers' equation with modified cubic B-spline differential quadrature method [J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 224: 166 – 177.

[31] LI Xingchen, GAO Xifeng, ZHANG Wei, et al. Smooth and collision-free trajectory generation in cluttered environments using cubic B-spline form[J]. Mechanism and Machine Theory, 2022, 169: 104606.

[32] 刘慧,段云鹏,沈跃. 果园移动机器人激光雷达双源信息融合实时导航方法[J]. 农业机械学报,2023,54(8):249 – 258.
LI Hui, DUAN Yunpeng, SHEN Yue. Real-time navigation method of orchard mobile robot based on laser radar dual source information fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 249 – 258. (in Chinese)

[33] 沈跃,刘子涵,刘慧,等. 基于多约束条件的果园喷雾机器人路径规划方法[J]. 农业机械学报,2023,54(7):56 – 67.
SHEN Yue, LIU Zihan, LIU Hui, et al. Orchard spray robot planning algorithm based on multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 56 – 67. (in Chinese)