doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.033

马铃薯捡拾装置作业参数模糊 PID 自调节系统研究

汪　昕[1,2]　杨德秋[1,3]　李　洋[1,3]　刘萌萌[1,3]　程子文[1,3]　贾晶霞[1,3]
陈新予[1,3]　陶鑫愿[1,3]　张丽娜[1,3]
(1.中国农业机械化科学研究院集团有限公司,北京 100083;2.中国农业大学工学院,北京 100083;
3.农业装备技术全国重点实验室,北京 100083)

摘要:针对安装在自走式马铃薯捡拾装袋机上的马铃薯捡拾装置作业时,前方易壅土导致薯土混合物输送不畅,因此驾驶员需频繁手动调节捡拾铲入土深度,易出现误判而造成整机伤薯率、漏薯率和含杂率关键作业指标达不到作业要求的问题,研究了一种马铃薯捡拾装置作业参数自调节系统。在装置作业过程中,根据超声波传感器实时测量的壅土高度,通过液压驱动无级调节捡拾铲入土深度、输送链线速度以及薯土分离振动强度,达到较优的作业质量。基于 DEM-MBD 耦合仿真对捡拾装置不同作业参数组合下的作业质量进行仿真研究,明确了作业参数影响作业质量的一般规律。基于该规律,设计了作业参数自调节方法。根据装置作业参数的控制需求,基于 AMESim-Matlab/Simulink 开展电液控制系统仿真研究,对比了模糊 PID 与经典 PID 的控制效果,仿真结果表明,模糊 PID 控制较经典 PID 控制在阀控缸系统和阀控马达系统的响应速度均有所提高。最终将使用该模糊 PID 控制的作业参数自调节系统搭载在捡拾装置上开展田间试验,试验结果表明搭载作业参数自调节系统的捡拾装置作业时的漏薯率为 2.17%、伤薯率为 2.51%、含杂率为 1.64%,各项指标均满足作业要求且优于手动控制,验证了搭载作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置较手动控制的优越性。

关键词:马铃薯收获机;捡拾装置;作业参数调节系统;模糊 PID 控制;DEM-MBD
中图分类号:S225.2+3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0361-13　　**OSID**:

Fuzzy PID Self Adjusting System for Operation Parameters of Potato Picking Device

WANG Xin[1,2]　YANG Deqiu[1,3]　LI Yang[1,3]　LIU Mengmeng[1,3]　CHENG Ziwen[1,3]　JIA Jingxia[1,3]
CHEN Xinyu[1,3]　TAO Xinyuan[1,3]　ZHANG Li'na[1,3]
(1. *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing* 100083, *China*
2. *College of Engineering, China Agricultural University, Beijing* 100083, *China*
3. *State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In response to the problem that the potato picking device installed on a self-propelled potato picking and bagging machine is prone to soil accumulation in the front, resulting in poor transportation of the potato soil mixture. Therefore, the driver needs to frequently manually adjust the depth of the picking shovel into the soil, which can easily lead to misjudgment and result in the failure of the key operation indicators of the whole machine's potato damage rate, leakage rate, and impurity rate to meet the operation requirements. A potato picking device operation parameter self adjustment system was studied. During the operation of the device, based on the real-time measurement of the height of the soil accumulation by ultrasonic sensors, the depth of the picking shovel entering the soil, the linear speed of the conveying chain, and the vibration intensity of the potato soil separation were continuously adjusted through hydraulic drive to achieve optimal operation quality. Based on DEM-MBD coupling simulation, the simulation was conducted on the operational quality of the picking device under different combinations of operational parameters, clarifying the general law of the impact of operational parameters on operational

收稿日期:2024-03-27　修回日期:2024-04-20
基金项目:财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-09-P25)
作者简介:汪昕(2001—),男,博士生,主要从事马铃薯收获机械研究,E-mail:2696524623@qq.com
通信作者:杨德秋(1974—),男,研究员,主要从事马铃薯生产全程机械化研究,E-mail:yangdq@maen.com.cn

quality. Based on this law, a self adjustment method for homework parameters was designed. Based on the control requirements of device operation parameters, a simulation of electro-hydraulic control system was conducted by using AMESim - Matlab/Simulink. The control effects of fuzzy PID and classical PID were compared, and the simulation results showed that fuzzy PID control improved the response speed of valve-controlled cylinder system and valve-controlled motor system compared to classical PID control. The field experiment was carried out by using the fuzzy PID control operation parameter self adjustment system on the picking device. The test results showed that the picking device equipped with the operation parameter self adjustment system had a potato leakage rate of 2.17%, a damaged potato rate of 2.51%, and a impurity rate of 1.64% during operation. All indicators met the operational requirements and were superior to manual control, verifying the superiority of the potato picking device equipped with a self adjusting system for operational parameters over manual control.

Key words: potato harvester; picking device; operation parameter adjustment system; fuzzy PID control; DEM - MBD

0 引言

马铃薯捡拾是指在马铃薯分段收获中,将经马铃薯挖掘机挖掘后平铺在垄面上的马铃薯拾起装袋的流程。目前,我国的马铃薯捡拾绝大部分依靠人工完成,劳动强度大、效率低,逐年减少且不固定的捡拾工作人群导致劳动力出现季节性短缺,收获期未能及时入库的马铃薯遭遇霜冻天气立即腐烂变质,马铃薯种植户的利益得不到有效保障。同时马铃薯机械化捡拾也是影响我国马铃薯收获机械化率的重要因素之一。因此对马铃薯机械化捡拾开展研究符合我国国情以及行业发展需要,对粮食安全具有重要保障作用[1-2]。

当前我国的马铃薯机械化捡拾技术处于起步探索阶段,目前研发的马铃薯捡拾装袋机能代替人工实现捡拾装袋的操作,但作业质量不高,其主要原因是受地形起伏等因素的影响,捡拾装置前端易出现壅土情况,驾驶员需根据壅土情况频繁调整捡拾铲的入土深度,驾驶员判断的延时加上液压系统控制油缸动作的滞后性不能适应复杂多变的田间作业环境,且驾驶员易出现误判造成切薯、漏薯的现象,造成整机伤薯率、漏薯率和含杂率关键作业指标达不到作业要求。

由于模糊 PID 控制在应对田间作业场景具有实用性,近年来越来越多地运用在农业机械的控制中[3-6]。在电液控制系统的仿真研究中,AMESim 软件作为著名的液压仿真软件,有着全面系统的元件库且与 Matlab/Simulink 有着很好的仿真接口,因此近年来,许多学者使用 AMESim - Matlab/Simulink 联合仿真对电液控制系统开展研究,并取得良好的应用效果。

为提高捡拾装置作业质量,本文基于改进后的中机美诺 4U2LJ - 1730 型马铃薯捡拾装袋机捡拾装置为主体,开发一种马铃薯捡拾装置作业参数自调节系统。在基于 DEM - MBD 耦合仿真明确作业参数影响作业质量的一般规律后,基于 AMESim - Simulink 对模糊 PID 控制和经典 PID 控制下的马铃薯捡拾装置电液系统开展对比仿真分析,验证模糊 PID 控制的响应性能。并通过田间试验验证搭载该模糊 PID 控制作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置作业性能。

1 马铃薯捡拾装置整体结构与工作原理

1.1 整体结构

自走式马铃薯捡拾装袋机主要由捡拾装置、驾驶室、升运链装置、分拣装置和卸料装置等组成,结构如图 1 所示。

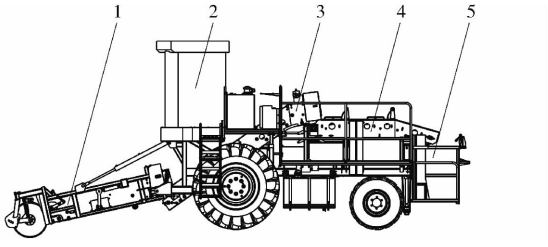

图 1 自走式马铃薯捡拾装袋机整体结构图

Fig. 1 Overall structure diagram of self-propelled potato collecting machine

1. 捡拾装置 2. 驾驶室 3. 升运链装置 4. 分拣装置 5. 卸料装置

捡拾装置主要由切土圆盘、捡拾铲、超声波传感器、升降油缸、传动机构和抖动调节机构等组成,结构如图 2 所示。捡拾装置参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

在捡拾装置作业过程中,位于捡拾铲末端正上方的机架上固定一个超声波传感器实时测量壅土高度,并将壅土高度值输入 PLC 控制器中。同时传感系统Ⅱ中的位移传感器和转速传感器将当前作业参数也输入 PLC 控制器中,与控制器中设定的当前壅

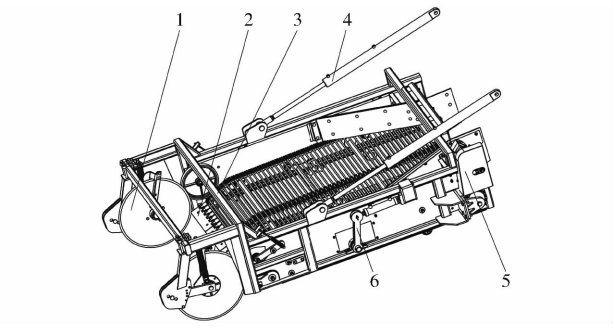

图 2　捡拾装置结构图

Fig. 2　Structural diagram of picking device

1. 切土圆盘　2. 捡拾铲　3. 超声波传感器　4. 升降油缸　5. 传动机构　6. 抖动调节机构

土高度对应的作业参数作比较。控制器根据实际与期望作业参数的差值，控制比例换向阀Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ的开度分别改变升降油缸伸长量、振幅调节油缸伸长量和液压马达转速，实现对捡拾铲入土深度、薯土分离振动强度和输送链线速度 3 个关键作业参数的自动调节。作业参数自调节硬件系统原理如图 3 所示。

表 1　捡拾装置参数

Tab. 1　Parameters of picking device

参数	数值
总体尺寸/(mm × mm × mm)	2 000 × 1 700 × 900
总体质量/kg	850
整机配套功率/kW	110
作业幅宽/mm	1 600

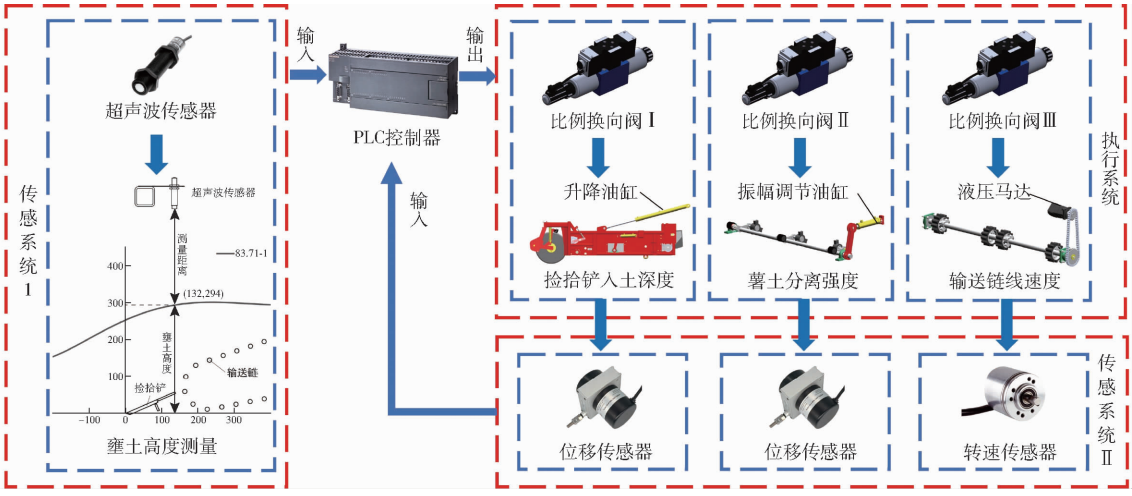

图 3　作业参数自调节硬件系统原理图

Fig. 3　Schematic of hardware system for self adjusting operation parameters

2　关键作业参数设计

2.1　捡拾铲入土深度

当捡拾铲入土深度较大时，装置前端上土量较大，装置薯土分离工作压力增大，易造成含杂率增大，但马铃薯因为有土壤的包裹缓冲作用，在输送和薯土分离过程中发生的机械碰撞损伤减小，伤薯率也会随之降低；同理，当入土深度较小时，装置前端上土量较少，含杂率随之降低，但伤薯率会随之升高。

捡拾装置作业时，捡拾铲入土深度通过升降油缸的伸长量进行调节。为明确升降油缸伸长量与捡拾铲入土深度的关系，简化捡拾装置挂接状态几何模型如图 4 所示，其中点 A 为油缸挂接点、点 B 为捡拾装置挂接点、点 C 为挂接油缸与捡拾装置的连接点、点 D 为捡拾铲尖所在位置。

根据图 4 的几何关系，捡拾铲入土深度 d 的表达式为

$$d = h_1 - h_2 \tag{1}$$

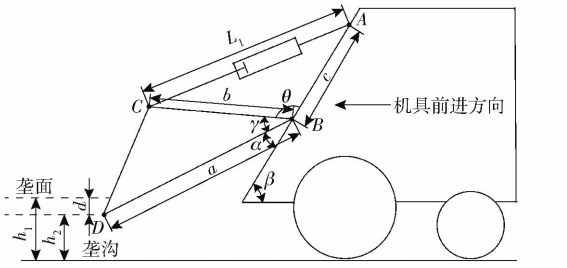

图 4　捡拾装置挂接模型简图

Fig. 4　Schematic of picking device attachment model

其中

$$\begin{cases} h_2 = h_B + a\sin(\alpha - \beta) \\ \alpha = \pi - \gamma - \theta \\ 2bc\cos\theta = b^2 + c^2 - L_1^2 \end{cases} \tag{2}$$

联立式(1)、(2)得

$$d = h_1 - h_B - a\sin\left(\gamma + \beta + \arccos\frac{b^2 + c^2 - L_1^2}{2bc}\right) \tag{3}$$

式中　h_1——垄面到垄沟距离，取 250 mm

h_2——捡拾铲铲尖到垄沟距离，mm

h_B——点 B 到垄沟垂直距离，mm

a——点 B 到点 D 距离,取 2 081 mm

b——点 B 到点 C 距离,取 1 335 mm

c——点 A 到点 B 距离,取 913 mm

L_1——点 A 到点 C 距离,mm

α——BD 与 AB 夹角,(°)

β——AB 与水平方向夹角,取 75.5°

γ——BC 与 BD 夹角,取 20°

θ——BC 与 BA 夹角,(°)

结合实际的捡拾装置作业经验,综合考虑捡拾铲入土深度对作业的漏薯率、伤薯率、含杂率的影响,捡拾铲合理的入土深度应该在 80 ~ 120 mm。通过计算可以得出,对应 L_1 的变化范围为 1 736.3 ~ 1 722.5 mm,结合升降油缸缩回安装距离为 1 520 mm,可得升降油缸伸长量范围为 216.3 ~202.5 mm。

2.2 薯土分离振动强度

薯土分离振动强度是影响装置作业质量的重要因素之一。振动强度越大,薯土混合物在输送过程中的筛分越彻底,含杂率会降低,但马铃薯与链杆的碰撞次数增加、碰撞程度加剧,因此伤薯率也随之增大。

装置作业时,输送带上固定的链杆拨动被动式三角形抖动轮旋转,调节油缸推动调节板改变固连在轴上抖动轮与托轮的位置,通过抖动轮、托轮与输送带接触位置关系的变化完成对薯土分离过程中振动强度的调节,在此过程中,抖动轮被抖动调节油缸顶起的高度越高,则振动强度越大。薯土分离机构结构示意图如图 5 所示。

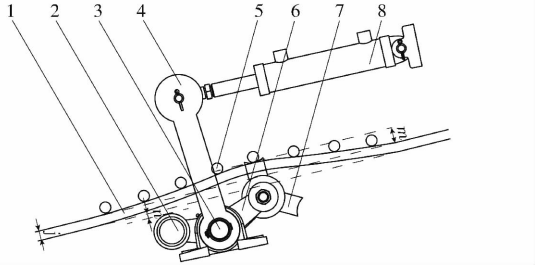

图 5 薯土分离机构结构示意图

Fig. 5 Schematic of potato soil separation mechanism structure

1. 输送带 2. 托轮 3. 轴 4. 调节板 5. 链杆 6. 抖动连接板 7. 抖动轮 8. 抖动调节油缸

为进一步明确该调节过程,设置合理的振动幅度调节范围,绘制机构几何简化模型如图 6 所示,其中点 E 为轴中心点、点 F 为振幅调节油缸挂接点、点 G 为振幅调节油缸与调节板的连接点。同时为方便后续的计算与仿真建模,确定抖动轮相对捡拾铲铲尖的位置,以捡拾挖掘铲铲尖为原点,垂直于重力向装置后方的方向为 x 轴正方向,与重力方向相反的方向为 y 轴正方向,建立平面直角坐标系。

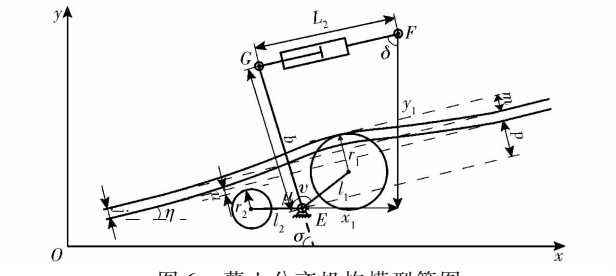

图 6 薯土分离机构模型简图

Fig. 6 Schematic of potato soil separation mechanism model

通过图 6,可得位置关系式

$$\begin{cases} m = l_1\sin(\eta + \upsilon + \sigma) + r_1 - j - p \\ n = p - r_2 + l_2\sin(\mu - \eta - \sigma) \end{cases} \tag{4}$$

式中 j——输送带厚度,取 10 mm

m——输送带被抖动轮顶起高度,mm

n——托轮到输送带下表面最短距离,mm

p——轴中心点到输送带下表面距离,取 81.35 mm

η——无抖动支撑状态下,输送带与水平方向夹角,取 14°

υ——调节板与抖动轮连接臂夹角,取 75°

μ——调节板与托轮连接臂夹角,取 60°

σ——调节板与水平方向夹角,(°)

l_1——抖动轮中心点到轴中心点距离,取 120 mm

l_2——托轮中心点到轴中心点距离,取 100 mm

r_1——抖动轮齿顶部凹槽最低点到抖动轮中心点距离,取 75 mm

r_2——托轮半径,取 37.5 mm

从图 6 可以看出,油缸伸长量决定调节板与水平方向的夹角 σ,关系式为

$$\begin{cases} x_1 = L_2\sin\delta - q\cos\sigma \\ y_1 = L_2\cos\delta + q\sin\sigma \end{cases} \tag{5}$$

式中 x_1——点 E 到点 F 的水平距离,取 300 mm

y_1——点 E 到点 F 的垂直距离,取 350 mm

L_2——点 F 到点 G 的距离,mm

q——点 E 到点 G 的距离,取 280 mm

δ——FG 与 y 轴负方向夹角,(°)

且 L_2 与 δ 的关系式为

$$\frac{L_2}{\sin\left(\delta - \arctan\dfrac{y_1}{x_1}\right)} = \frac{q}{\sin\left(\delta - \arctan\dfrac{x_1}{y_1}\right)} \tag{6}$$

马铃薯捡拾装置的作业对象是经马铃薯挖掘机振动分离后的薯土秧混合物,土壤颗粒较小,且与马

铃薯的黏合性较低，因此所需的薯土分离振动强度较小。结合田间作业经验，振幅调节油缸伸长量的合理范围在 50 ~ 100 mm 之间，联立式(4) ~ (6)可得：此时输送带被抖动轮顶起的高度范围为 2.96 ~ 21.75 mm。

2.3　输送链线速度

参考马铃薯挖掘机和马铃薯联合收获机的研究经验，输送链线速度也是决定装置作业质量中伤薯率和含杂率的关键因素之一。结合捡拾装置的作业场景以及匹配装置的前进速度和后端升运链的输送速度，捡拾装置输送链线速度的合理范围在 1 ~ 1.2 m/s。

捡拾装置作业时，液压马达驱动小链轮带动大链轮转动，在大链轮的转动下，固连在轴上的梅花驱动轮带动与之啮合的链杆运动，最终实现输送链对薯土混合物的输送。传动机构示意图如图 7 所示。

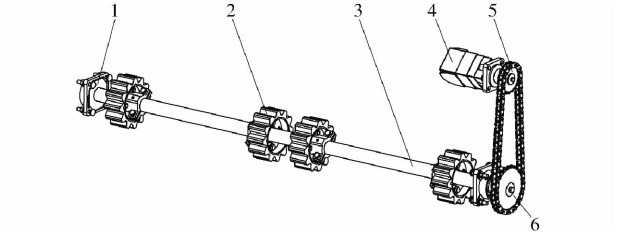

图 7　传动机构示意图

Fig. 7　Schematic of transmission mechanism

1. 轴承座　2. 梅花驱动轮　3. 驱动轴　4. 液压马达　5. 小链轮　6. 大链轮

由图 7 可以看出，输送链线速度 v_1 的表达式为

$$v_1 = \frac{r_3 r_5}{r_4}\omega_1 \tag{7}$$

式中　r_3——梅花驱动轮驱动半径，mm

r_4——大链轮分度圆半径，mm

r_5——小链轮分度圆半径，mm

ω_1——液压马达角速度，rad/s

3　基于 DEM - MBD 的作业参数仿真分析

为明晰不同作业参数对装置作业质量的影响，基于离散元软件 EDEM 和多体动力学软件 RecurDyn 耦合仿真，进行不同入土深度、输送链线速度和振动强度下装置作业情况仿真试验，为后续装置作业参数自动调节策略和调节范围提供依据和参考。

3.1　DEM - MBD 仿真模型建立

3.1.1　离散元模型建立

考虑到北方一季作区沙壤土特性，参照文献[2]，分别建立土粒，大、中、小 3 个等级的类球形与椭球形马铃薯土垄离散元模型，并设置离散元仿真与接触参数。

3.1.2　多体动力学模型建立

捡拾装置使用的输送带采用 3 层夹线橡胶，保证柔性的同时兼顾抗拉强度，输送链杆由铆钉和长条形垫片铆接在输送带上。链杆与橡胶带连接示意图如图 8 所示。

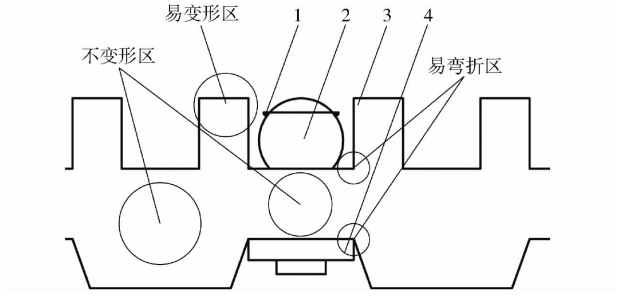

图 8　链杆与橡胶带连接示意图

Fig. 8　Schematic of connection between chain rod and rubber belt

1. 铆钉　2. 输送链杆　3. 橡胶带　4. 垫片

根据图 8 的连接结构，输送带实际作业时，输送带中部的主体部分不发生变形，在弯折角部分易发生折弯；折弯时，上方凸出的长方体橡胶与链杆发生接触，易发生变形。实测该带杆振动可调式薯土分离装置在弯折角部分发生的最大折弯角为 7.5°。基于上述分析，为在 RecurDyn 中模拟橡胶带实际运动，将橡胶带的运动分解为橡胶带组件 a 与橡胶带组件 b 互相绕连接处中心点以限位 7.5°的接触条件转动。结构示意图如图 9 所示。

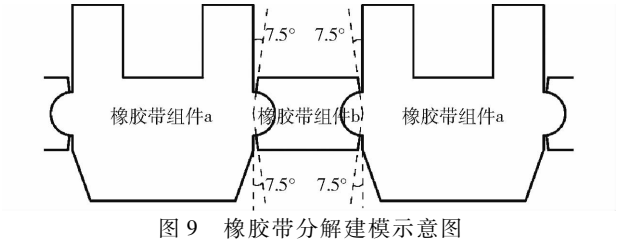

图 9　橡胶带分解建模示意图

Fig. 9　Schematic of rubber belt decomposition modeling

在 Solidworks 中完成捡拾装置建模并简化仿真模型，根据后续需要仿真的参数结合第 2 节对装置部件的设计计算，调整不同入土深度与振动强度下的捡拾装置三维模型，保存为. xt 格式导入 RecurDyn 中，设置约束、接触，并且添加运动。单根链杆的主要添加设置如图 10 所示，使用“Merge”功能将链杆与两端橡胶带组件 b 合并；使用“Revolute”功能设置橡胶带组件 a、b 之间的转动约束；使用“Inplane”设置橡胶带组件 a、b 的两侧位移；使用“GeoSur”设置橡胶带组件 a、b 之间的接触，以及单根链杆与抖动轮、梅花驱动轮和集薯板的接触，并重复设置其他链杆。

将设置好的 RecurDyn 模型导出为. wall 文件，并在 EDEM 中通过“Geometries”-“Import Geometry

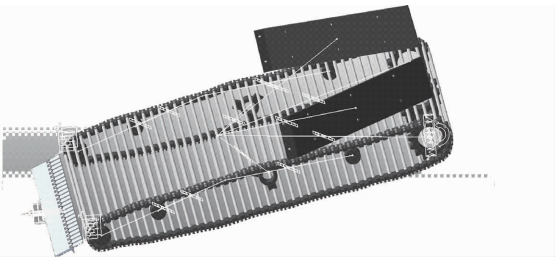

图 10 RecurDyn 模型设置

Fig. 10 Model settings in RecurDyn

from RecurDyn”将多体动力学模型导入,更换零部件相应的材料属性,即完成 EDEM - RecurDyn 联合仿真模型的建立。

3.2 DEM - MBD 仿真试验

3.2.1 仿真试验方案

EDEM 试验仿真模型如图 11 所示。

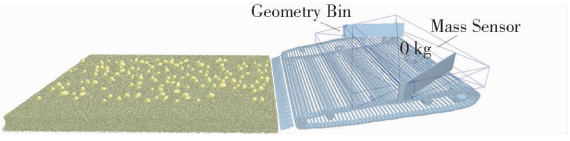

图 11 EDEM 仿真模型

Fig. 11 EDEM simulation model

综合考虑到捡拾机作业效率与后方分拣人员的工作强度,将整机前进速度设定为 0.70 m/s。以影响作业质量的关键作业参数:捡拾铲入土深度、输送链线速度以及抖动油缸伸长量为自变量。

结合仿真模拟试验(如图 11 所示),在 EDEM 软件的捡拾装置模型中段,使用“Geometry Bin”工具建立大小为 1 600 mm × 500 mm × 250 mm 的区域框住位于抖动轮上方的分离输送区域,测量该区域马铃薯的受力情况,参考文献[7],当马铃薯碰撞受力达到 200 N 时,即可视为伤薯,参考 NY/T 2464—2013《马铃薯收获机作业质量》统计计算仿真试验的伤薯率,计算式为

$$L_{s1} = \frac{Q_{s1}}{Q} \times 100\% \tag{8}$$

式中 L_{s1}——仿真伤薯率,%

Q_{s1}——伤薯质量,kg

Q——总薯质量,kg

如图 11 所示,在 EDEM 软件的捡拾装置模型后段,使用“Mass Sensor”工具统计仿真结束时输送分离后端集薯板之间的土壤占该区域薯土混合物的质量比。公式为

$$L_{z1} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \times 100\% \tag{9}$$

式中 L_{z1}——仿真统计区域中土壤占薯土混合物的百分比,%

M_1——统计区域中马铃薯质量,kg

M_2——统计区域中土壤质量,kg

以上述的仿真试验伤薯率(Y_1)和土壤质量比率(Y_2)为响应值,开展三因素三水平试验,设定各试验因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码

Tab. 2 Coding of factors

编码	因素		
	捡拾铲入土深度/mm	输送链线速度/(m·s^{-1})	抖动油缸伸长量/mm
-1	80	1.00	50
0	100	1.10	75
1	120	1.20	100

设置仿真时间为 4.5 s、时间步长为 0.01 s 后进行联合仿真。当捡拾铲入土深度为 100 mm、输送链线速度 1.00 m/s、抖动油缸伸长量 100 mm 时,仿真受力图如图 12 所示,可以看出马铃薯受力较大区域集中在捡拾装置中段的抖动轮上方,且部分马铃薯的碰撞力大于 100 N;同时,该条件下的输送分离装置后端,土壤含量较少,薯土分离较彻底。

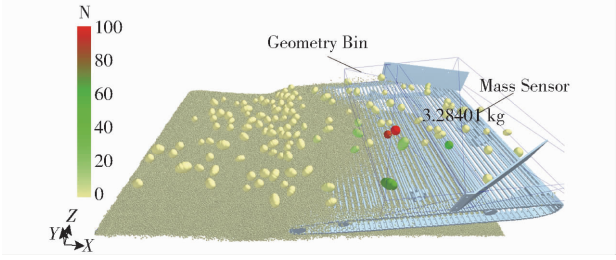

图 12 仿真分析

Fig. 12 Simulation analysis

使用“Mass Sensor”工具统计该区域土壤质量比率,得出该仿真条件下,M_1 = 5.778 26 kg,M_2 = 0.177 999 kg,则 L_{z1} = 2.99%。

使用“Geometry Bin”工具测量该区域马铃薯的受力情况,椭球形和类球形马铃薯受力如图 13a、13b 所示。可以得出:马铃薯在 1.23 s 开始进入到输送抖动区域,绝大部分马铃薯与输送链杆的接触碰撞力小于 100 N。在该仿真参数组合下,有 4 次碰撞发生伤薯(4 次碰撞时刻,均只有 1 个马铃薯的碰撞力大于 200 N 且马铃薯各不相同),根据质量比重可算出仿真伤薯率为 2.83%。

3.2.2 仿真试验结果

按上述仿真试验和数据统计方法,对该捡拾装置开展三因素三水平试验[8-9],最终试验结果如表 3 所示(X_1、X_2、X_3 为因素编码值)。对二次回归模型进行方差分析和显著性检验。

根据仿真伤薯率 Y_1 的试验数据分析结果可知,该模型 P = 0.000 2,说明仿真伤薯率 Y_1 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性,失拟项 P = 0.189 8 >

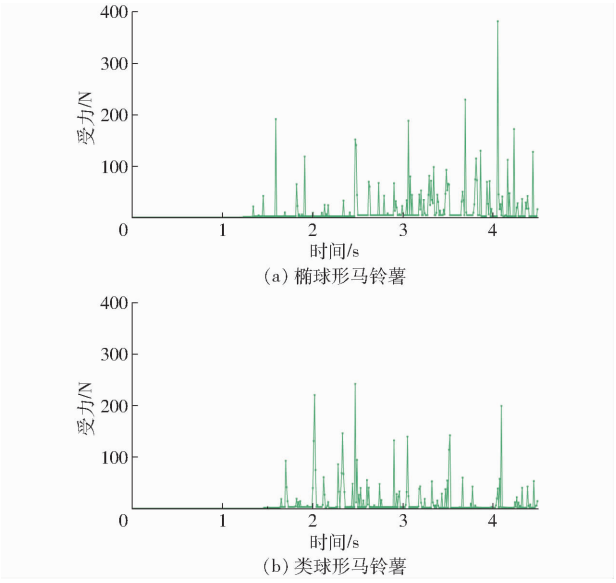

图 13　马铃薯受力仿真曲线

Fig. 13　Potato stress simulation curves

表 3　试验结果

Tab. 3　Experiment results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	2.81	2.74
2	1	-1	0	2.28	3.88
3	-1	1	0	2.85	3.64
4	1	1	0	2.61	4.63
5	-1	0	-1	2.34	3.28
6	1	0	-1	2.22	4.55
7	-1	0	1	3.37	2.86
8	1	0	1	3.25	4.07
9	0	-1	-1	2.23	2.90
10	0	1	-1	2.16	4.34
11	0	-1	1	2.83	2.99
12	0	1	1	3.28	2.95
13	0	0	0	2.8	3.59
14	0	0	0	2.77	3.72
15	0	0	0	2.88	3.67
16	0	0	0	2.72	3.85
17	0	0	0	2.67	3.95

0.05 不显著，说明模型较稳定，回归方程拟合较好。同时，X_3 对仿真伤薯率 Y_1 影响极显著；X_1、X_2、X_2X_3、X_2^2 对仿真伤薯率 Y_1 影响显著。剔除不显著项建立仿真伤薯率 Y_1 回归模型为

$$Y_1 = 2.78 - 0.13X_1 + 0.094X_2 + 0.47X_3 + 0.13X_2X_3 - 0.15X_2^2 \quad (10)$$

根据仿真土壤质量比率 Y_2 的试验数据分析结果可知，该模型 $P < 0.0001$，说明仿真土壤质量比率 Y_2 作为响应函数的回归模型具有高度的显著性，失拟项 $P = 0.6016 > 0.05$ 不显著，说明模型较稳定，回归方程拟合较好。同时，X_1、X_2、X_3、X_2X_3、X_3^2 对仿真土壤质量比率 Y_2 影响极显著；X_1^2、X_2^2 对仿真土壤质量比率 Y_2 影响显著。剔除不显著项建立仿真土壤质量比率 Y_2 回归模型为

$$Y_2 = 3.76 + 0.58X_1 + 0.38X_2 - 0.27X_3 - 0.37X_2X_3 + 0.18X_1^2 - 0.21X_2^2 - 0.25X_3^2 \quad (11)$$

3.2.3　作业参数优化

根据上述仿真试验结果分析，捡拾铲入土深度、输送链线速度和抖动油缸伸长量对仿真伤薯率和土壤质量比率均有较大影响，即对捡拾装置作业质量有较大影响，为获得捡拾装置无作业参数自调节时的最优工作参数，为与搭载作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置开展田间试验进行对比，利用 Design-Expert 10.0.1 软件的优化模块对马铃薯捡拾装置仿真伤薯率和土壤质量比率进行优化求解。设定仿真伤薯率和土壤质量比率权重相同，目标函数为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \\ 0 \leqslant Y_1 \leqslant 3\% \\ 0 \leqslant Y_2 \leqslant 4\% \end{cases} \end{cases} \quad (12)$$

得出仿真理论上最优解：当捡拾铲入土深度为 83.47 mm、输送链线速度为 1.00 m/s、抖动油缸伸长量为 50.00 mm 时，马铃薯捡拾装置仿真伤薯率 2.30%、土壤质量比率 2.47%。

4　作业参数自调节系统设计

4.1　作业参数自调节方法

根据装置实际作业经验，当捡拾铲入土深度越深时，前方喂入的薯土混合物越多，因此造成装置前端壅土高度越高；当输送链线速度越高时，单位时间内向捡拾装置后方运输的薯土混合物体积越多，壅土高度越低。

因此，综合作业参数影响装置作业质量和壅土高度的规律，作业参数自调节方法设计思路是：当壅土高度值高于仿真最优参数组合的壅土高度时，说明捡拾装置在面对当前地块作业时，捡拾铲入土深度较深，输送链线速度较小，为保证较小的含杂率，应减小捡拾铲入土深度、提高输送链线速度并且提高薯土分离的振动强度；同理，当壅土高度值低于仿真最优参数组合的壅土高度时，说明捡拾装置在面对当前地块作业时，捡拾铲入土深度较浅，输送链线速度较大，为保证较小的伤薯率，应增大捡拾铲入土深度、降低输送链线速度并且降低薯土分离的振动强度。

对仿真最优参数组合下的壅土高度开展试验，可得此时的壅土高度为 294 mm。因此，结合装置实际作业情况，最终确定作业参数自调节规则如图 14 所示。

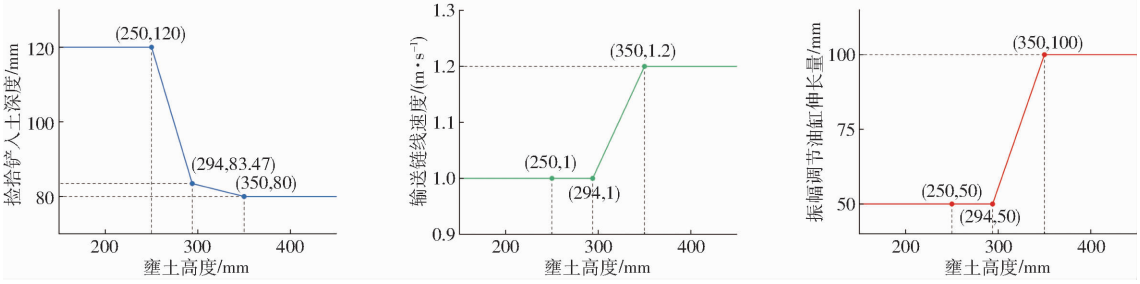

图 14 作业参数自调节规则

Fig. 14 Self regulation rules of operation parameters

捡拾铲入土深度的自动调节规则为:当壅土高度小于 250 mm 时,捡拾铲入土深度保持在 120 mm;当壅土高度在 250 ~ 294 mm 范围内递增时,捡拾铲入土深度在 120 ~ 83.47 mm 呈线性关系递减;当壅土高度在 294 ~ 350 mm 范围内递增时,捡拾铲入土深度在 83.47 ~ 80 mm 呈线性关系递减;当壅土高度大于 350 mm 时,捡拾铲入土深度保持在 80 mm。

输送链线速度的自动调节规则为:当壅土高度小于 294 mm 时,输送链线速度保持在 1.0 m/s;当壅土高度在 294 ~ 350 mm 递增时,输送链线速度在 1.0 ~ 1.2 m/s 呈线性关系递增;当壅土高度大于 350 mm 时,输送链线速度保持在 1.2 m/s。

振幅调节油缸伸长量的自动调节规则为:当壅土高度小于 294 mm 时,振幅调节油缸伸长量保持在 50 mm;当壅土高度在 294 ~ 350 mm 递增时,振幅调节油缸伸长量在 50 ~ 100 mm 呈线性关系递增;当壅土高度大于 350 mm 时,振幅调节油缸伸长量保持在 100 mm。

4.2 模糊 PID 控制系统设计与仿真

4.2.1 模糊 PID 控制系统设计

(1)模糊 PID 控制原理

为应对农田多变复杂的作业环境,对装置中捡拾铲入土深度控制、薯土分离振动强度控制以及输送链线速度控制均采用模糊 PID 控制器。分别将液压缸活塞杆输出位移和液压马达输出轴转速的期望值和测量值之间的误差 e 和误差变化率 e_c 输入 PID 控制器和模糊控制器,使用以专家经验确定的隶属度函数和模糊规则推理后得到的输出参数修正变化量 ΔK_P、ΔK_I 和 ΔK_D,修正变化量与初始设定的 PID 参数进行线性叠加并与输入的误差和误差变化率根据 PID 控制原理进行计算,得到输出控制电压 Δu,以调整比例换向阀的阀口开度,其控制原理如图 15 所示[10-15]。

(2)模糊子集

在马铃薯作业参数自调节捡拾装置的模糊 PID 控制器设计中,捡拾装置挂接油缸、抖动调节油缸、液压马达的误差 e 和误差变化率 e_c 以及模糊控制器输出的 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 模糊等级均为:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。设置上述 3 个执行元件的 e 和 e_c 的模糊论域均为[-6,6],ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 的模糊论域均为[-3,3]。模糊控制器采用三角形隶属函数,MAMDANI 推理机,解模糊算法采用重心法。

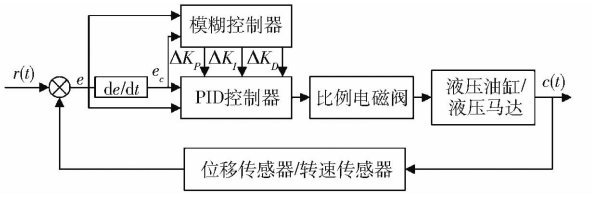

图 15 马铃薯捡拾装置模糊 PID 控制原理图

Fig. 15 Schematic of fuzzy PID control for potato picking device

(3)模糊规则

根据专家经验,设计 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 的模糊规则如表 4 所示。

表 4 ΔK_P、ΔK_I、ΔK_D 模糊规则

Tab. 4 Fuzzy rule of ΔK_P, ΔK_I and ΔK_D

参数	e_c	e						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
ΔK_P	NB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	PS	PS	NM
	PS	PS	ZO	ZO	PS	PS	NM	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB
ΔK_I	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
	NS	NB	PM	NS	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
	PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
ΔK_D	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	PS	NM	NM	NM	NS	ZO
	NS	ZO	PS	NM	NM	NM	NS	ZO
	ZO	ZO	PS	NS	ZO	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	PS	PS	ZO	ZO
	PM	PB	NS	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

4.2.2　模糊 PID 系统仿真分析

根据上述控制系统的相关设计要求并结合自走式马铃薯捡拾机整机的液压需求，最终马铃薯捡拾装置液压原理图如图 16 所示。其中泵Ⅰ负责给升降油缸和振幅调节油缸供油，泵Ⅱ负责给液压马达供油。

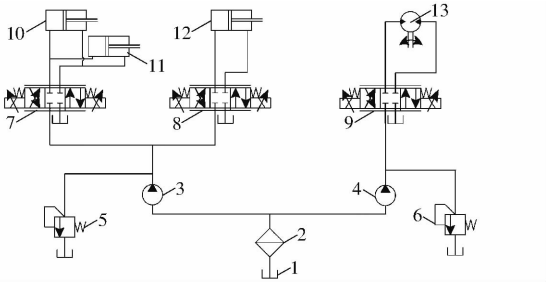

图 16　马铃薯捡拾装置液压原理图

Fig. 16　Hydraulic schematic of potato picking device

1. 油箱　2. 滤油器　3. 泵Ⅰ　4. 泵Ⅱ　5. 溢流阀Ⅰ　6. 溢流阀Ⅱ　7. 比例换向阀Ⅰ　8. 比例换向阀Ⅱ　9. 比例换向阀Ⅲ　10. 挂接油缸Ⅰ　11. 挂接油缸Ⅱ　12. 抖动调节油缸　13. 液压马达

为验证捡拾装置模糊 PID 控制的有效性，采用 AMESim－Matlab/Simulink 联合仿真的方式对捡拾装置电液控制系统开展仿真分析，并将模糊 PID 控制与经典 PID 控制的控制效果进行对比分析。

（1）阀控缸系统仿真模型建立

根据马铃薯捡拾装置液压原理图，建立阀控缸液压系统仿真模型，如图 17 所示。

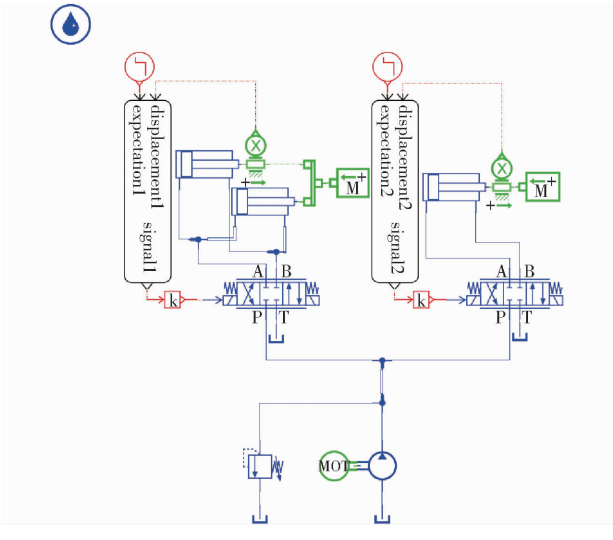

图 17　阀控缸液压系统仿真模型

Fig. 17　Simulation model of valve controlled cylinder hydraulic system

根据实际的控制需求，在图 17 左侧部分，挂接油缸的控制中，设置油缸伸长量传感器用于控制系统中“displacement1”的输入，并在“expectation1”中输入挂接油缸伸长量为 0.21 m 的阶跃信号作为控制的期望值。同理，在图 17 右侧部分，抖动调节油缸的控制中，设置油缸伸长量传感器用于控制系统中“displacement2”的输入，并在“expectation2”中输入抖动调节油缸伸长量为 0.05 m 的阶跃信号作为控制的期望值。

结合液压元件的选型，阀控缸液压系统的主要设置参数如表 5 所示。

表 5　阀控缸液压系统主要参数

Tab. 5　Main simulation parameters of valve controlled cylinder hydraulic system

元件	参数	数值
泵	额定排量/(mL·r^{-1})	16
	额定转速/(r·min^{-1})	2 500
溢流阀	开启压力/MPa	15
液压泵压油管路	管径/mm	12
	长度/mm	2 600
比例换向阀	压差 1 MPa 时，额定流量/(L·min^{-1})	50
挂接油缸	缸径/mm	63
	杆径/mm	35
	行程/mm	380
挂接油缸质量块	质量/kg	1 302.3
抖动调节油缸	缸径/mm	50
	杆径/mm	28
	行程/mm	150
抖动调节油缸质量块	质量/kg	10

分别通过 AMESim 中的 simucosim 模块和 Simulink 中的 S－FUCTION 模块建立联合仿真枢纽。为对比经典 PID 控制与模糊 PID 控制对阀控缸液压系统的控制效果，在 Matlab/Simulink 中分别对设置的 S－FUCTION 模块进行经典 PID 控制和模糊 PID 控制，经过参数调整后，最终在 Matlab/Simulink 中建立的阀控缸控制系统如图 18 所示。其中，在挂接油缸的控制中，经典 PID 的控制参数为 $K_P=25$、$K_I=0$、$K_D=0$，模糊 PID 初始控制参数为 $K_P=50$、$K_I=0.01$、$K_D=0.01$；在抖动调节油缸的控制中，经典 PID 的控制参数为 $K_P=100$、$K_I=0$、$K_D=0$，模糊 PID 初始控制参数为 $K_P=200$、$K_I=0.1$、$K_D=0.1$。

（2）阀控马达系统仿真模型建立

根据马铃薯捡拾装置液压原理图，建立阀控马达液压系统仿真模型如图 19 所示。

根据实际的控制需求，在图 19 液压马达的控制中，设置转速传感器用于控制系统中“velocity”的输入，并在“expectation3”中输入液压马达转速为 220 r/min 的阶跃信号作为控制的期望值。

结合液压元件的选型，阀控马达液压系统的主要参数如表 6 所示。

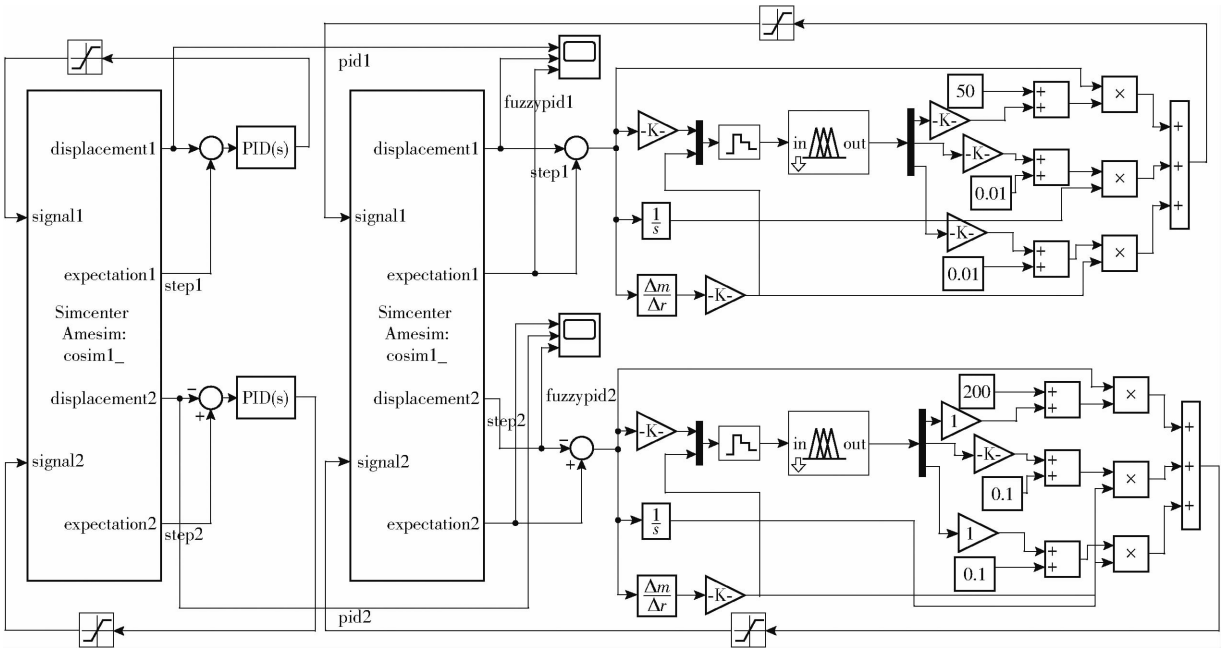

图 18 阀控缸控制系统仿真模型

Fig. 18 Simulation model of valve controlled cylinder control system

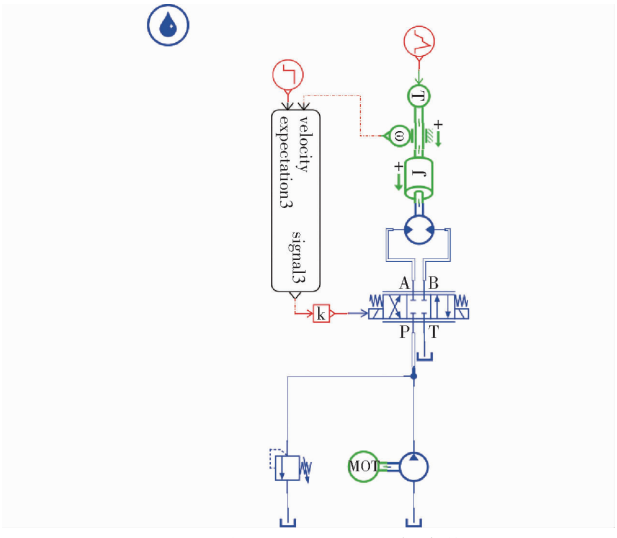

图 19 阀控马达液压系统仿真模型

Fig. 19 Simulation model of valve controlled motor hydraulic system

在 Matlab/Simulink 中建立阀控马达控制系统仿真模型如图 20 所示。其中,在液压马达的控制中,经典 PID 的控制参数为 $K_P = 0.007\ 5$、$K_I = 0.045$、$K_D = 0.000\ 08$,模糊 PID 初始控制参数为 $K_P = 0.01$、$K_I = 0.055$、$K_D = 0.006$。

在仿真中,分别将阀控缸控制系统和阀控马达控制系统仿真模型中的阶跃信号、经典 PID 控制的输出信号以及模糊 PID 控制的输出信号接入同一个示波器中,观察仿真曲线,得到阀控液压元件控制仿真曲线如图 21 所示。

从图 21 中可以看出,在阀控缸控制系统和阀控马达控制系统中,模糊 PID 控制仿真对阶跃信号期望值的响应速度均快于经典 PID 控制系统。如表 7

表 6 阀控马达液压系统主要参数

Tab. 6 Main simulation parameters of valve controlled motor hydraulic system

元件	参数	数值
泵	额定排量/(mL·r^{-1})	16
	额定转速/(r·min^{-1})	2 500
溢流阀	开启压力/MPa	15
液压泵压油管路	管径/mm	16
	长度/mm	1 200
比例换向阀	压差 1 MPa 时,额定流量/(L·min^{-1})	50
液压马达	额定排量/(mL·r^{-1})	311
	额定转速/(r·min^{-1})	240
	转动惯量/(kg·m^2)	2
	负载扭矩/(N·m)	20
液压马达进/回油管路	管径/mm	16
	长度/mm	1 900

所示,分别统计二者稳定在稳态值 ±2% 的调整时间,并计算模糊 PID 控制调整时间降低百分比 η,公式为

$$\eta = \frac{t_c - t_f}{t_c} \times 100\% \tag{13}$$

式中 t_c——经典 PID 控制下达到期望值的时间,s

t_f——模糊 PID 控制下达到期望值的时间,s

5 田间试验

田间试验于 2023 年 9 月在内蒙古自治区锡林郭勒盟太仆寺旗进行,试验地块为旱地垄播,所种植的马铃薯品种为夏坡蒂,垄高 25 cm,垄距 90 cm,耕作层含水率为 7% ~18%,实测单产 3 528 kg/hm^2。

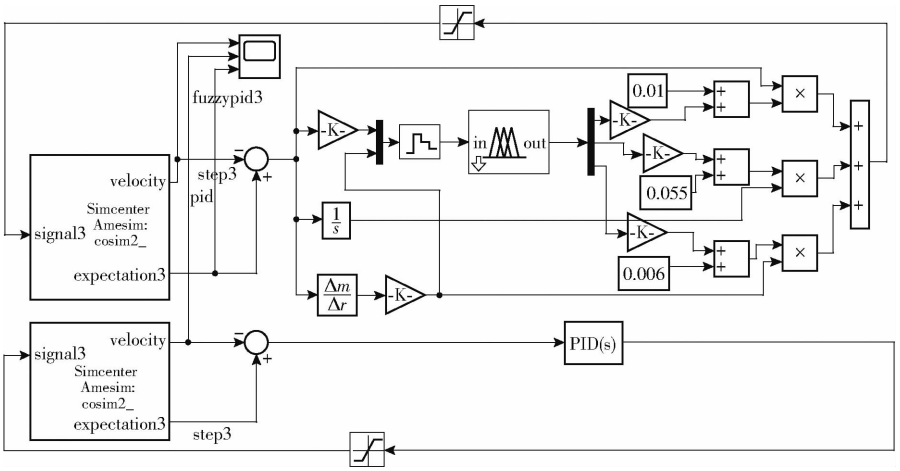

图 20　阀控马达控制系统仿真模型

Fig. 20　Simulation model of valve controlled motor control system

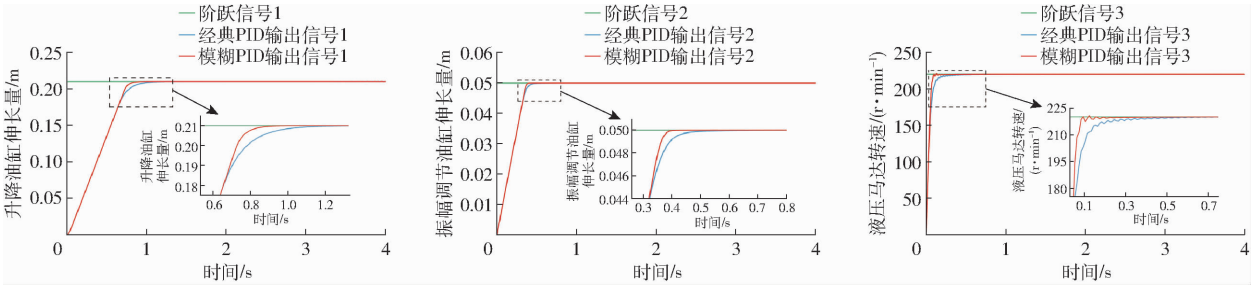

图 21　阀控液压元件控制系统仿真曲线

Fig. 21　Simulation curves of valve-controlled hydraulic component control system

表 7　控制系统性能对比

Tab. 7　Control system performance comparison

部件	t_c/s	t_f/s	η/%
挂接油缸	0. 89	0. 77	13. 48
抖动调节油缸	0. 40	0. 37	7. 50
液压马达	0. 18	0. 09	50. 00

为将搭载作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置在实际田间作业各项指标与驾驶员手动控制做对比，共设计 2 组试验。第 1 组试验使用仿真试验中最优化参数组合，调节挂接油缸伸长量将捡拾铲入土深度调整为 83. 47 mm、输送链线速度调节至 1. 00 m/s、抖动油缸伸长量调节至 50. 00 mm，考虑到实际作业地面略有起伏，允许操作熟练、经验丰富的驾驶员在作业过程中进行微调；第 2 组试验完全使用搭载作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置进行田间作业。其中每组试验进行 3 次，机具均保持 0. 7 m/s 速度进行作业。每次试验，挂接有捡拾装置的自走式马铃薯捡拾机的作业长度为 200 m。田间试验现场如图 22 所示。



图 22　田间试验现场

Fig. 22　Site map of field test

参考 DB64/T 1795—2021《马铃薯机械化捡拾技术规程》，统计 2 组共 6 次田间试验的漏薯率 L_l、伤薯率 L_s 及含杂率 L_z，结果如表 8 所示。

表 8　田间作业数据统计

Tab. 8　Statistics of field operation data　%

试验组	作业指标	试验Ⅰ	试验Ⅱ	试验Ⅲ	均值
手动调节	漏薯率	2. 95	2. 86	2. 64	2. 82
	伤薯率	3. 28	2. 91	3. 03	3. 07
	含杂率	2. 37	2. 50	2. 52	2. 46
自动调节	漏薯率	2. 28	2. 21	2. 02	2. 17
	伤薯率	2. 65	2. 58	2. 31	2. 51
	含杂率	1. 62	1. 74	1. 55	1. 64

从表 8 可以看出，搭载作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置在漏薯率、伤薯率和含杂率 3 项作业指标上明显优于手动控制下马铃薯捡拾装置的作业效果。根据实际作业经验，当对装置进行手动控制时，会发生因地形起伏，驾驶员对升降油缸伸长量调节不及时以及升降油缸动作不能迅速到位而导致捡拾铲入土深度不合理，造成漏薯和切薯的现象发

生,因此,漏薯率和伤薯率随之增大。同时被切割且大于输送链节距的薯块跟随输送系统运送至马铃薯捡拾机的分拣台装置,两侧的分拣人员需要分拣出被切割的薯块,增大工作量和劳动强度,因此在分拣作业过程中,易出现杂物分拣剔除不及时,含杂率也随之增大。而对搭载有作业参数自调节控制系统的马铃薯捡拾装置,这种情况有较大程度的改善,因此漏薯率、伤薯率和含杂率均表现出较大的优势。

6 结论

(1)设计了一种挂接在自走式马铃薯捡拾机上的马铃薯捡拾装置,该装置可一次完成捡拾、输送、薯土分离和除秧操作。

(2)使用 EDEM - RecurDyn 联合仿真对马铃薯捡拾装置开展仿真试验,以不同入土深度、输送链线速度和振动强度作为仿真因素,以仿真伤薯率和捡拾装置末端土壤质量比率为响应值。通过响应曲面分析,明晰作业参数影响装置作业质量的一般规律,并进行了最优作业参数优化。

(3)开发了一种捡拾装置作业参数自调节方法,搭建了装置作业自调节参数系统。并基于 AMESim - Simulink 对电液系统进行联合仿真,验证了模糊 PID 控制系统在控制响应速度上优于经典 PID 控制系统。

(4)将搭载使用该模糊 PID 控制的作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置挂接在自走式马铃薯捡拾机上开展了田间试验。对比了搭载作业参数自调节系统与仿真最优参数组合下允许手动微调二者对装置控制时作业的漏薯率、伤薯率和含杂率关键指标。最终结果表明搭载作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置作业时的漏薯率为 2.17%、伤薯率为 2.51%、含杂率为 1.64%。各项指标均满足作业要求且优于手动控制,验证了搭载作业参数自调节系统的马铃薯捡拾装置较手动控制的优越性。

参 考 文 献

[1] 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)

[2] 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)

[3] 沈跃,张亚飞,刘慧,等. 农业装备自动控制技术研究综述[J]. 农业机械学报,2023,54(8):1 - 18.
SHEN Yue, ZHANG Yafei, LIU Hui, et al. Research review of agricultural equipment automatic control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):1 - 18. (in Chinese)

[4] 丁幼春,张驰海,董万静,等。基于雷达测速的棉花精量直播机排种测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(5):59 - 70.
DING Youchun, ZHANG Chihai, DONG Wanjing, et al. Design and test of seeding measurement and control system for cotton precision directing machine based on radar speed measurement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):59 - 70. (in Chinese)

[5] 韩长杰,李超,徐阳,等. 棉花打顶机履带行走系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(5):121 - 129,267.
HAN Changjie, LI Chao, XU Yang, et al. Design and experiment of crawler walking system of cotton topping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(5):121 - 129,267. (in Chinese)

[6] 况福明,姬傲,何箐,等. 田间水稻育秧机取泥装置控制系统研究[J]. 农业机械学报,2025,56(2):290 - 304.
KUANG Fuming, JI Ao, HE Jing, et al. Control system of mud collection device for rice seedling cultivation machines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(2):290 - 304. (in Chinese)

[7] 高迎旺. 马铃薯隐形损伤的生物散斑活性特征及检测研究[D]. 杭州:浙江大学,2018.
GAO Yingwang. Study on biospeckle activity and detection of potato invisible damages[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)

[8] 侯加林,方立志,张海阔,等. 多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(1):65 - 75,163.
HOU Jialin, FANG Lizhi, ZHANG Haikuo, et al. Design and experiment of multi-disturbance clearing and single-seed sowing device for garlic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):65 - 75,163. (in Chinese)

[9] 王相友,刘为龙,张浩,等. 整列定位夹切组合式马铃薯种薯切块装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(11):148 - 158.
WANG Xiangyou, LIU Weilong, ZHANG Hao, et al. Design and experiment of seed potato cutting device of sorting-positioning and clamping-cutting combined[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11):148 - 158. (in Chinese)

[10] YADAV A K, GAUR P. Improved self-tuning fuzzy proportional-integral-derivative versus fuzzy-adaptive proportional-integral-

derivative for speed control of nonlinear hybrid electric vehicles[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2016, 11(6): 061013.

[11] QÜ B, QI J. Research on speed control algorithm of stepper motor with fuzzy PID optimization based on genetic algorithm[C]// 2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). IEEE, 2023, 11: 682 - 686.

[12] LIU X, SHAN Z, YANG F, et al. Research on key problems of synchronous control of hydraulic system based on particle swarm fuzzy PID[C]//2023 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). IEEE, 2023: 1732 - 1737.

[13] ZHOU C, XÜ F, CHENG D. A multi-objective optimization method for hydraulically interconnected suspension system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2024, 238(5): 1234 - 1248.

[14] WANG Z, HU S. Research on fuzzy PID control of forearm of tunnel steel arch mounting machine[J]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2019, 1187(3): 032072.

[15] JIA X, WANG X, XIE X, et al. Research on speed-sensorless induction motor control system based on AMESim - Simulink simulation[C]// Proceedings of 2012 UKACC International Conference on Control. IEEE, 2012: 375 - 380.

(上接第 348 页)

[14] ISO 7119:1981. Continuous mechanical handling equipment for loose bulk materials-screw conveyors- design rules for drive power[S]. 1981.

[15] 肖文立,廖宜涛,单伊尹,等. 油菜直播机四头螺旋双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):68 - 77.
XIAO Wenli, LIAO Yitao, SHAN Yiyin, et al. Design and experiment of quad-screw double-row fertilizer apparatus for rape seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 68 - 77. (in Chinese)

[16] 向冬枝,徐余伟. 螺旋输送机设计参数的选择和确定[J]. 水泥技术,2010(1):29 - 33.
XIANG Dongzhi, XU Yuwei. Design parameter selection of spiral conveyer[J]. Cement Technology, 2010(1): 29 - 33. (in Chinese)

[17] 郑欣欣. 倾斜式螺旋输送机输送性能及螺旋体有限元仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.
ZHENG Xinxin. Research on the conveying performance of inclined screw conveyor and finite element analysis of screw body [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2021. (in Chinese)

[18] 顿国强,刘文辉,吴星澎,等. 螺旋挤压式精量排肥器的仿真优化设计及试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2023,53(10):3026 - 3037.
DUN Guoqiang, LIU Wenhui, WU Xingpeng, et al. Simulation optimization and experiment of screw extrusion precision fertilizer ejector[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(10): 3026 - 3037. (in Chinese)

[19] 王金峰,付佐栋,翁武雄,等. 圆锥盘推板式水田侧深施肥双行排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):53 - 62,106.
WANG Jinfeng, FU Zuodong, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of conical-disc push plate double-row fertilizer apparatus for side-deep fertilization in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 53 - 62, 106. (in Chinese)

[20] 廖庆喜,陈勇,张青松,等. 油菜侧深穴施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(2):41 - 52.
LIAO Qingxi, CHEN Yong, ZHANG Qingsong, et al. Design and experiment of side deep hole fertilization device for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 41 - 52. (in Chinese)

[21] 贾洪雷,谭贺文,温翔宇,等. 气力集排式精量配混施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊 2):109 - 119.
JIA Honglei, TAN Hewen, WEN Xiangyu, et al. Design and experiment of pneumatic aggregate and discharge precision fertilizer mixing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 109 - 119. (in Chinese)

[22] ZENG S, TAN Y, WANG Y, et al. Structural design and parameter determination for fluted-roller fertilizer applicator[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2): 101 - 110.