doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.014

自主调平辣椒整枝打杈机构设计与试验

张赟磊[1] 郭豪鉴[1] 马锃宏[1,2] 赵 雄[1,3] 俞高红[1,3] 杜小强[1,4]

（1. 浙江理工大学机械工程学院，杭州 310018；2. 浙江省种植装备技术重点实验室，杭州 310018；3. 农业农村部东南丘陵山地农业装备重点实验室(部省共建)，杭州 310018；4. 全省农业智能感知与机器人重点实验室，杭州 310018）

摘要：目前在辣椒移栽、果实收获等领域已有相关机械化产品，但对能够实现辣椒果实增产增收的整枝打杈环节仍需人工操作。结合辣椒种植环境的多样化，本文设计了一种能够实现自主调平、切削侧枝的辣椒整枝打杈机构，并对其调平控制方法进行了研究。根据辣椒整枝打杈农艺，设计了对辊式离心多刀整枝打杈末端执行器。利用EDEM软件建立了辣椒植株的柔性体离散元模型，进行了对辊式离心多刀整枝打杈末端与植株的互作仿真试验。选取进给速度、打杈机构倾角、辊子转速3个对打杈性能影响较大的参数进行了正交试验分析，最终得到整枝打杈末端的最优参数组合：为进给速度1.5 m/s、打杈机构倾角15°、辊子转速1 187 r/min。设计了整枝打杈末端自主调平机构，利用ADAMS软件对所设计的调平机构进行动力学仿真。提出了基于模糊PID的调平控制方法，利用Matlab/Simulink仿真模块对比了传统PID算法与模糊PID算法的响应速度。最后，搭建了辣椒整枝打杈样机，进行了田间试验。试验结果表明，当作业速度为1.5 m/s时，侧枝切除率达到86.3%，辣椒植株损伤率控制在6.7%以内，最终辣椒打杈成功率为76.7%，验证了本文所设计的辣椒整枝打杈机构的可行性。

关键词：辣椒；整枝打杈机构；离散元；自主调平；模糊PID控制

中图分类号：S224.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0134-11

Design and Experiment of Self Leveling and Pruning Mechanism for Chili Pepper

ZHANG Yunlei[1] GUO Haojian[1] MA Zenghong[1,2] ZHAO Xiong[1,3] YU Gaohong[1,3] DU Xiaoqiang[1,4]

(1. *School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*
2. *Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou* 310018, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Equipment for Hilly and Mountainous Areas in Southeastern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Hangzhou* 310018, *China*
4. *Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Sensing and Robotics for Agriculture, Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: Currently, there are mechanized products available for pepper transplanting and harvesting, but manual operations are still required for pruning, which is crucial for increasing pepper yield. Considering the diverse planting environments for peppers, a self-leveling pepper pruning machine was designed and its leveling control system was developed. Based on the agricultural practice of pepper pruning, an end-effector for pruning was designed and its working principle was introduced. The flexible-body discrete element model of pepper plants was established by using EDEM software to simulate the interaction between the end-effector and the plant. Orthogonal experimental analysis was performed by selecting three parameters, namely feed speed, end-effector tilt angle, and roller speed, which had a significant impact on the pruning performance. The optimal parameter combination for the end-effector was determined as follows: feed speed was 1.5 m/s, end-effector tilt angle was 15°, and roller speed was 1 187 r/min. To meet the requirements of operating in complex hilly terrain, a dual-axis leveling mechanism was designed and its working principle was introduced. Dynamic simulation of the designed leveling mechanism was conducted in ADAMS, providing reference for the selection of the driving components. Simultaneously, the leveling control algorithm was determined, and the response speed of the traditional PID algorithm

收稿日期：2024-07-20 修回日期：2024-09-20

基金项目：国家重点研发计划项目(2022YFD2001803)

作者简介：张赟磊(2001—)，男，硕士生，主要从事辣椒整枝打杈技术与装备研究，E-mail: 1836786620@qq.com

通信作者：杜小强(1978—)，男，教授，博士，主要从事智能农机装备和农业机器人研究，E-mail: xqiangdu@zstu.edu.cn

was compared with the fuzzy PID algorithm by using the Matlab/Simulink simulation module. Finally, a prototype of pepper pruning was built and field experiments were conducted. The experimental results showed that at a working speed of 1.5 m/s, the lateral branch cutting rate reached 86.3%, the pepper plant damage rate was controlled within 6.7%, and the final success rate of pepper branching was 76.7%, verifying the feasibility of the designed pepper pruning mechanism.

Key words: pepper; branch pruning machine; discrete element; self-leveling; fuzzy PID control

0　引言

辣椒是我国栽培面积最大的蔬菜作物之一，同时我国也是世界上辣椒种植面积和消费量最大的国家[1]。根据相关数据显示[2-6]，我国辣椒种植面积达到约 1.330×10^8 hm^2，占世界辣椒面积 35.00%，辣椒总产量 2.800×10^9 t，占世界辣椒总产量 46.00%；经济总产值 700 亿元，居蔬菜首位，占世界蔬菜总产值 16.67%。且由于辣椒生存环境适应性较强，我国各地均可种植，已成为许多地区主要经济支柱作物[7]。同时，为了解决种植方面缺少人工的问题，已经出现了许多用于辣椒机械化种植、采收的机械。但为了收获的辣椒形状更好、产量更多，需要对辣椒植株进行整枝打杈，去除侧枝[8]，而在这一环节目前还未有相关机械化产品，均通过人工来进行操作。

目前国内外针对侧枝修剪环节开展的研究工作主要以树枝、葡萄侧枝、苹果侧枝等枝干较硬的木本植株为主[9-10]。在木本植株硬质枝条侧枝切除的研究基础上，随着技术的发展，国内外出现了一些针对草本植株柔性枝条侧枝切除的装备，但切除效率低下。

针对现有侧枝修剪机械切除效率低且对柔性枝条侧枝切除研究较少的问题，结合辣椒整枝打杈农艺设计一种对辊式离心多刀整枝打杈末端执行器。采用 EDEM 软件建立侧枝-末端互作的离散元模型并进行仿真试验，确定整枝打杈末端最佳工作参数。为适应打杈姿态要求与丘陵山地复杂地形，设计整枝打杈机构实时自主调平系统。最后进行辣椒整枝打杈机样机田间试验，以验证整体实际工作性能。

1　对辊式离心多刀打杈机构设计与仿真优化

1.1　打杈机构结构设计与工作原理

以“杭椒 1 号”作为研究对象，所设计的辣椒整枝打杈机构结构如图 1 所示，主要由弹刀辊子、辊子框架、弹性防护罩、驱动电机以及控制元件安装板等部件组成。弹刀辊子通过嵌入辊子框架内部的法兰轴承进行中心定位，利用转轴固定在框架上并使其能相对框架旋转。其中，下方转轴通过联轴器与驱动电机相连作为原动件，以同步带和同步带轮作为传动部件实现上方转轴联动。

在打杈机构中主要工作部件为弹性防护罩和弹刀辊子，其结构如图 2、3 所示。植株生长具有一定曲度，主

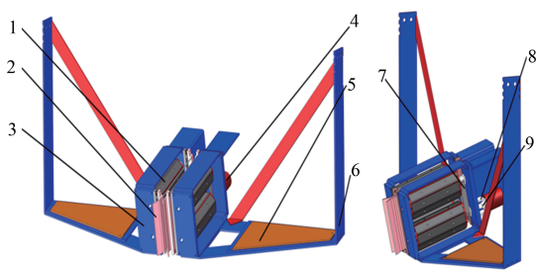

图 1　打杈机构整体结构图

Fig. 1　Overall structural diagram of machine of fork

1. 弹刀辊子　2. 弹性防护罩　3. 辊子框架　4. 驱动电机　5. 控制元件安装板　6. 悬挂杆　7. 同步带　8. 电机支架　9. 刚性联轴器

茎直径不一等问题，弹性防护罩能够减少主茎在打杈过程中的损伤，同时提升机构的普适性。此外针对辣椒种植位置会有一定的左右偏差的问题，在弹性防护罩前端设计了导向装置以适应种植的偏移情况。弹刀辊子能够较好地弥补弹性防护罩伸缩带来的侧枝残留余量，最终实现高效侧枝切除的目标。

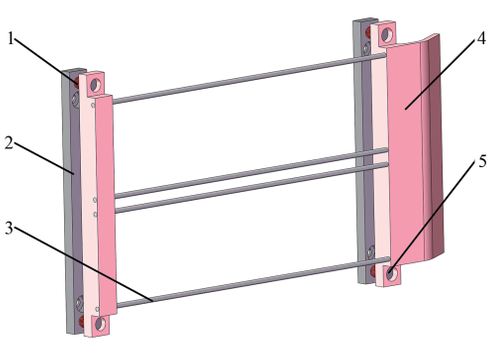

图 2　弹性防护罩结构图

Fig. 2　Detailed structural diagram of elastic protective cover

1. 压缩弹簧　2. 载板　3. 钢丝　4. 导向片　5. 光螺母

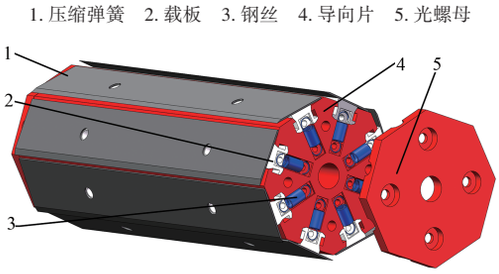

图 3　弹刀辊子结构图

Fig. 3　Detailed structural diagram of knife roller

1. 刀片　2. 浮动块　3. 拉伸弹簧　4. 辊子　5. 端盖

根据打杈农艺要求，结合种植株距和打杈时辣椒生长阶段，确定弹刀辊子为外接圆直径 38 mm 的八边形结构，为了尽量减少残留余量且适应辣椒主茎直径变化，

确定弹性防护罩单边收缩量为2 mm，同时确定弹刀辊子上刀片弹出最大量为2 mm。

打杈机构通过悬挂杆挂接在底盘工作平面上，刀具框架与地面呈一定角度布置，如图4所示。因此整枝打杈机构在工作过程中可以通过沿行进方向的平动来提供两个方向的位移分量，补偿了弹刀辊子垂直向上的自由度的同时增大了与植株的接触面积，提升打杈效率。打杈操作的实现主要依靠辊子带动安装在其上的刀片，对辣椒侧枝进行旋转切割。考虑到向下切割时由于主茎直径较细，可能导致主茎向下弯曲造成主茎损伤，因此旋转方向选择为刀片与植株接触时植株受力方向垂直向上。

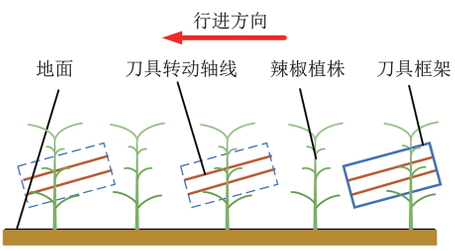

图4 打杈机构作业示意图

Fig. 4 Schematic of branching end operation

为了通过转速匹配刀片弹出的距离，对弹刀辊子中的弹刀机构进行受力分析计算，其工作原理如图5所示。

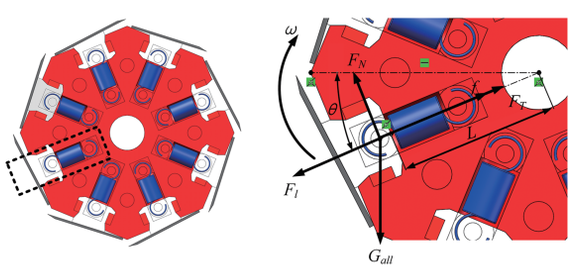

图5 弹刀辊子作业示意图

Fig. 5 Schematicof knife roller operation

白色部位为浮动块，深蓝色部分为拉伸弹簧，深灰色部分为刀片，中心白色为转轴固定的圆形通孔。其受力公式为

$$F_l = \frac{G_{all}\omega^2 L}{g} \tag{1}$$

$$F_T = k\Delta x \tag{2}$$

$$f = \mu F_N = \mu G_{all}\cos\theta \tag{3}$$

$$F_l + G_{all}\sin\theta = F_T + f \tag{4}$$

式中 F_l——辊子绕轴旋转所产生的离心力，N

G_{all}——滑动块和刀片以及二者紧固件所有的重力，N

g——重力加速度，m/s^2

L——浮动块与转动中心的距离，mm

k——弹簧弹性系数

Δx——弹簧伸长量，mm

f——滑动块与辊子之间的摩擦力，N

μ——滑动块与辊子之间的摩擦因数

F_N——辊子对滑动块的支撑力，N

整理式(1)~(4)可得转速与刀片弹出距离的关系

$$\Delta x = \frac{G_{all}\omega^2 L - \mu g G_{all}\cos\theta + g G_{all}\sin\theta}{kg} \tag{5}$$

1.2 离散元仿真试验

1.2.1 仿真参数设置与仿真模型建立

为了更加直观地展示打杈末端切割植株的效果，为优化末端关键部件提供依据，采用EDEM软件对侧枝-末端进行离散元建模仿真。

运用EDEM软件进行仿真分析之前，一般需要输入所需仿真模型的物理特性参数，包括本征参数、接触参数等。其中泊松比、弹性模量、密度等属于模型的本征参数，而植株与刀片材料之间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数等属于接触参数[11-17]。

通过相关研究试验和参考文献[11-19]确定辣椒侧枝密度为894.3 kg/m^3，泊松比为0.33，剪切模量为3.3×10^6 Pa。钢密度为7.85×10^3 kg/m^3，泊松比为0.3，剪切模量为7.9×10^{10} Pa。其余离散元仿真接触参数如表1所示。辣椒植株颗粒粘结参数如表2所示。

表1 辣椒侧枝离散元仿真参数

Tab. 1 Discrete element simulation parameters of chili lateral branches

参数	数值
辣椒侧枝-辣椒侧枝碰撞恢复系数	0.050
辣椒侧枝-辣椒侧枝静摩擦因数	0.865
辣椒侧枝-辣椒侧枝滚动摩擦因数	0.067
辣椒侧枝-钢碰撞恢复系数	0.150
辣椒侧枝-钢静摩擦因数	0.756
辣椒侧枝-钢滚动摩擦因数	0.025

表2 辣椒植株颗粒粘结参数

Tab. 2 Adhesive parameters of chili plant particles

粘结参数	数值
法向刚度/(N·m^{-1})	5×10^6
切向刚度/(N·m^{-1})	3×10^6
临界法向应力/Pa	1×10^6
临界切向应力/Pa	1×10^6
粘结半径/mm	1.8

利用Solidworks三维建模软件，结合辣椒植株的生长特征建立辣椒植株的三维模型，为了减少后续仿真的计算量，将叶片、根系等对侧枝切除影响不大的部分忽略。

采用以整个辣椒植株作为颗粒工厂，让颗粒在整个辣椒植株中随机生成的方法来完成辣椒植株离散元的建模。

1.2.2 侧枝-打杈机构互作仿真试验与分析

为了减少计算量，对打杈机构进行简化，在保证其切割功能的前提下尽量减少其余部件，并将简化后的辣

椒打杈机构三维模型导入到EDEM离散元仿真软件中。根据实际试验需要设置末端的运动参数，包括末端平移运动速度与辊子自转速度，其作业方向为y轴正方向，重力方向为z轴负方向。当整枝打杈末端完全与辣椒植株脱离且脱落的侧枝飞出后，代表仿真试验结束。其仿真试验的过程如图6所示。

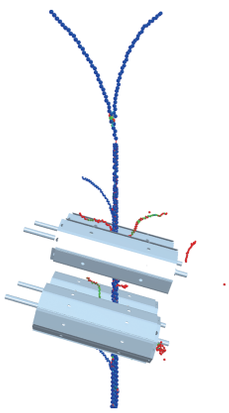

图6　侧枝-打杈机构互作仿真试验过程

Fig. 6　Simulation experiment process of lateral branch machine of fork interaction

为了表征侧枝切除后残留余量，运用EDEM软件中自带的后处理软件进行分析。通过在后处理中建立Geometry Bin框选侧枝的范围，如图7所示，在侧枝被切除后自动统计留在框内的颗粒数，以此来表征侧枝被切除后的残留余量。

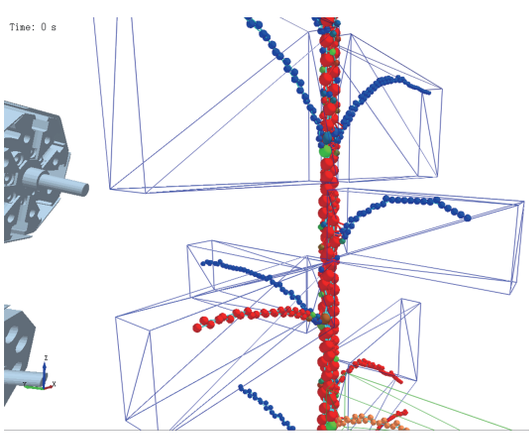

图7　切除前添加侧枝Geometry Bin框

Fig. 7　Add lateral branch Geometry Bin box before excision

将各个Geometry Bin框内剩余的颗粒进行统计并分别进行数据导出，保存为.csv表格形式。对数据进行处理，由于横坐标都为时间，可将各节点残留颗粒数量进行累加，得到如图8所示颗粒残留余量曲线。从图8中可以看出，在0 s时还未开始切割，此时Geometry Bin框内颗粒总数为269。到0.3 s后切除完毕，打杈末端完全与植株分离时，剩余颗粒数为24。曲线在0.15 s后产生了振荡，这是由于在切除过程中，上方已经被切除的侧枝颗粒重新进入了下方侧枝所在框内，造成重复计数，因此以0.3 s之后所有侧枝均脱离所建立的Geometry Bin框范围所得到的颗粒数为统计值。

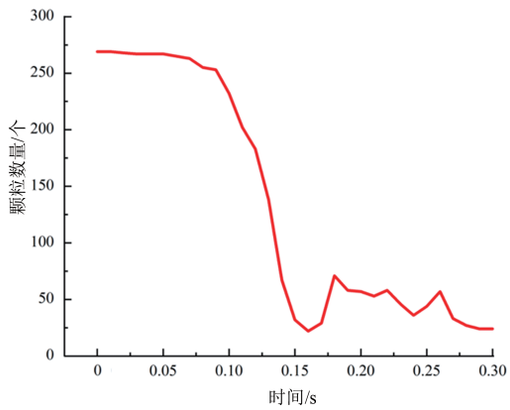

图8　侧枝颗粒数量-时间曲线

Fig. 8　Number-time curve of lateral branch particles

1.3　参数试验优化

1.3.1　三因素三水平正交试验设计

由于影响打杈机构工作性能的因素较多，因此为了减少仿真试验次数，采用正交试验法[20]，能够以简单的试验设计得到有效的试验结果。

参考对辊式玉米摘穗机构研究[21]，结合对辊式离心多刀打杈机构作业方式，确定打杈机构倾角、进给速度、末端辊子转速为影响整枝打杈效果的主要因素。确定末端倾角β、进给速度v、辊子转速n因素编码如表3所示。末端倾角β过大会导致切除距离过长，引起辣椒植株顶部枝条的损伤，过小会导致垂直向上位移分量减小，导致切除不净。进给速度v增大有利于提升作业效率，但速度过大会降低侧枝切除率。

表3　三因素三水平正交试验因素编码

Tab. 3　Three-factor three-level orthogonal experimental factor coding

编码	因素		
	进给速度v/(m·s^{-1})	末端倾角β/(°)	辊子转速n/(r·min^{-1})
−1	0.5	15	800
0	1.0	25	1000
1	1.5	35	1200

为了优化整枝打杈末端的工作性能，探究3个主要影响因素对侧枝切除的效果，对打杈机构倾角β、进给速度v、辊子转速n这3项参数进行正交试验分析，设计了三因素三水平正交试验。

辣椒整枝打杈末端作业时需要保证高切除率。根据

$$C_R = \frac{M_e}{M_s - M_e} \times 100\% \tag{6}$$

式中　C_R——侧枝切除率，%

M_s——作业前Geometry Bin框内侧枝颗粒数量

M_e——作业后Geometry Bin框内剩余侧枝颗粒数

计算得出辣椒整枝打杈的侧枝切除率，并将其作为正交试验的评价指标。

1.3.2 试验方案与结果分析

根据三因素三水平正交试验的设计原则，总共进行了17组辣椒整枝打杈仿真试验，并统计每一组试验前后Geometry Bin框内的侧枝颗粒数量。根据式(6)计算得出辣椒整枝打杈的侧枝切除率，其中正交试验的试验方案与试验结果均表4所示，A、B、C为进给速度、末端倾角、辊子转速编码值。

表4 试验方案与结果

Tab. 4 Experimental plan and results

序号	因素			侧枝切除率/%
	A	B	C	
1	−1	−1	0	85
2	1	−1	0	92
3	−1	1	0	62
4	1	1	0	58
5	−1	0	−1	72
6	1	0	−1	77
7	−1	0	1	75
8	1	0	1	78
9	0	−1	−1	85
10	0	1	−1	72
11	0	−1	1	95
12	0	1	1	62
13	0	0	0	78
14	0	0	0	79
15	0	0	0	80
16	0	0	0	81
17	0	0	0	82

采用Design-Expert 13.0数据分析软件对表4中数据进行分析处理，得到关于辣椒侧枝切除率回归模型，同时得到了该正交试验模型方差分析数据，如表5所示。

侧枝切除率回归模型$P<0.01$，表明该模型极显著，失拟项$P>0.05$，表明该模型失拟项不显著，因此判断该回归模型拟合程度高。

表5 侧枝切除率方差分析

Tab. 5 Analysis of variance in lateral branch resection rate

来源	平方和	自由度	均方根	F	P
模型	1 566.81	9	174.09	40.29	<0.000 1
A	15.13	1	15.13	3.50	0.103 6
B	1 326.12	1	1326.12	306.87	<0.000 1
C	2.00	1	2.00	0.462 8	0.518 2
AB	30.25	1	30.25	7.00	0.033 1
AC	1.000 0	1	1.000 0	0.231 4	0.645 2
BC	100.00	1	100.00	23.14	0.001 9
A^2	80.59	1	80.59	18.65	0.003 5
B^2	7.96	1	7.96	1.84	0.216 8
C^2	0.065 8	1	0.065 8	0.015 2	0.905 3
残差	30.25	7	4.32		
失拟项	20.25	3	6.75	2.70	0.180 7
误差	10.00	4	2.50		
总和	1 597.06	16			

3个因素对侧枝切除率的影响由强到弱排序为打杈机构倾角、进给速度、辊子转速，将影响不显著因素进行剔除后，采用线性回归法对各个因素进行拟合，最终得到3个因素对侧枝切除率的回归方程

$$C_R = 80.00 + 1.384A - 12.88B - 1.00C - 2.75AB - 5.00BC - 4.38A^2 \quad (7)$$

根据表5和式(7)可知，打杈机构倾角、进给速度、辊子转速存在相互影响，为了探究各因素对侧枝切除率的影响，忽略不显著的影响因素，分别绘制末端倾角与进给速度、末端倾角与辊子转速交互效应对侧枝切除率响应曲面，如图9、10所示。

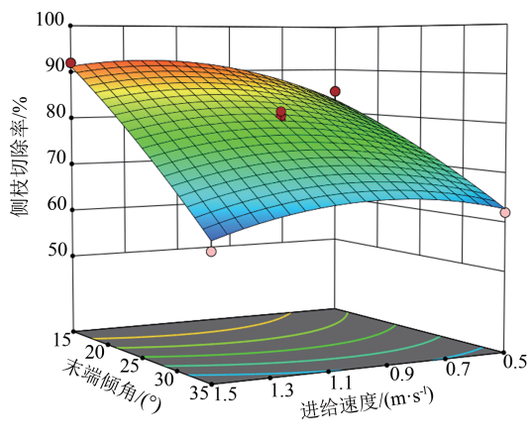

图9 AB响应曲面(C=0)

Fig. 9 AB response surface

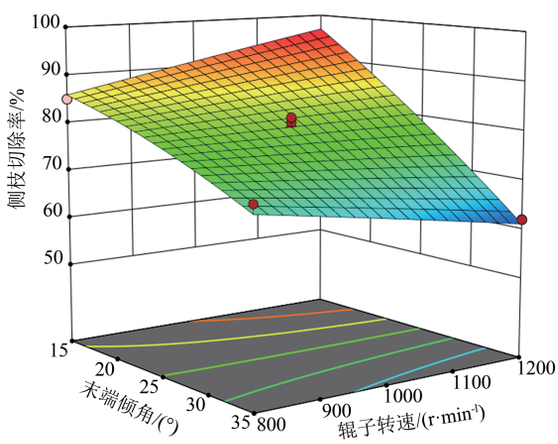

图10 BC响应曲面(A=0)

Fig. 10 BC response surface

侧枝切除率是衡量辣椒整枝打杈末端作业效果的重要指标，因此利用Design-Expert 13.0数据分析软件Optimization模块中的Numerical组件，以侧枝切除率为优化目标，对3个主要影响因素参数进行优化。其中最优参数为进给速度1.499 2 m/s、末端倾角15.024 6°、辊子转速1 187.68 r/min，此时侧枝切除率达到最大，为95.796 9%。但由于进给速度、末端倾角、转速的精度控制不能准确的取到小数点后4位，因此将其取整，即进给速度为1.5 m/s，末端倾角为15°，辊子转速为1 187 r/min。

2　基于模糊PID控制的自主调平系统设计

2.1　调平机构结构设计

本文设计的调平机构可以实现打杈末端左右与前后的实时调平。为了能够更加简易高效地实现所需的操作，最终选择属于串联机构的异面垂直两转动机构。利用三维建模软件Solidworks构建调平机构的三维模型，如图11所示。

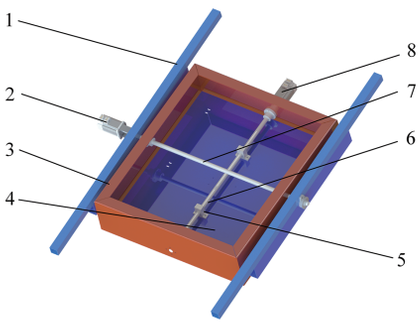

图11　调平机构三维模型

Fig. 11　3D model of leveling mechanism

1. 车体框架　2. 伺服电机2　3. 外框架　4. 工作平面　5. 紧固支座　6. 转轴1　7. 转轴2　8. 伺服电机1

2.2　调平控制系统设计

2.2.1　调平控制策略选择

PID控制算法是利用感知误差进行反馈的线性控制算法[22-24]，对于具有简单结构且属于线性控制的系统，能表现出很强的鲁棒性。其原理是通过获得的误差，以K_p(比例)、K_i(积分)、K_d(微分)3种处理方法将误差整合，形成一个控制量再输出至执行机构，最终实现所需要的操作。但该算法具有一定的局限性，针对结构较为复杂、非线性且时间变化等系统，控制效果就会大打折扣。

因此引入模糊PID控制算法[25-26]，在原有PID控制算法的基础上增添了模糊控制器，用于调整传统的PID控制参数。该算法能够很好地适配非线性的控制系统且无需精确的数学模型，因此本文选择模糊PID控制算法对调平系统进行控制解算，使系统兼顾鲁棒性的同时具有较好的控制精度。

调平机构需要适应丘陵山地辣椒种植地形，实现实时调平作业，因此该工作环境处于实时变化状态下，具有不确定性。结合上述调平机构的结构设计方案，确定调平动作控制策略。如图12所示，首先在水平面将调平机构的工作平面调节为水平，通过双轴角度传感器感知前后与左右的倾角变化，并将信息输出给PID控制器，利用模糊PID控制算法将偏差值通过比例、积分和微分的处理方式整合成一个控制量，进而控制直流伺服电机转动所需角度，最后通过角度传感器反馈，实现工作平面的调平作业。

2.2.2　传递函数确定

本文所选择的调平机构左右调平轴与前后调平轴的驱动电机为伺服电机，其本质属于直流电机，因此将

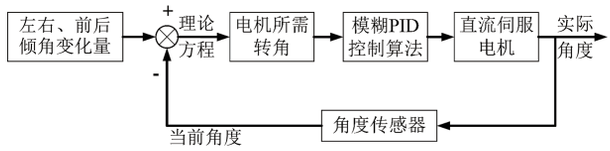

图12　调平机构控制策略

Fig. 12　Leveling mechanism control strategy

其视为直流电机进行理论解算。而直流电机的电压平衡方程可以通过基尔霍夫定律[27-28]得到，公式为

$$\begin{cases} u_a(t) = L_a\dfrac{\mathrm{d}i_a(t)}{\mathrm{d}t} + R_a i_a(t) + E_a(t) \\ E_a(t) = C_e\omega_m(t) \end{cases} \tag{8}$$

式中　u_a——电路电压，V

L_a——电路电感，H

i_a——电路电流，A

R_a——电路电阻，Ω

E_a——电枢旋转产生的反电动势，V

C_e——比例系数

ω_m——电机轴旋转角速度，rad/s

根据电流产生的电磁转矩和转矩平衡方程，得到

$$M_m(t) = C_m i_a(t) = J_m\frac{\mathrm{d}\omega_m(t)}{\mathrm{d}t} \tag{9}$$

式中　M_m——电流产生的电磁转矩，N·m

C_m——电机的转矩系数

J_m——转子的转动惯量，kg·m^2

因此由式(8)和式(9)得到电压与转速之间的二阶线性微分方程

$$\frac{C_m u_a(t)}{L_a J_m} = \frac{\mathrm{d}\omega_m^2(t)}{\mathrm{d}t^2} + \frac{R_a C_m}{L_a J_m}\frac{\mathrm{d}\omega_m(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{C_s C_m}{L_a J_m}\omega_m(t) \tag{10}$$

对式(9)和式(10)进行拉普拉斯变换可得

$$\begin{cases} \dfrac{\omega(s)}{M_m(s)} = \dfrac{1}{J_m s} \\ G(s) = \dfrac{\omega(s)}{u_a(s)} = \dfrac{C_m}{L_a J_m s^2 + R_a C_m s + C_e C_m} \end{cases} \tag{11}$$

由于直流电机的电感与电阻难以直接测得，因此引入电机电气时间常数T_e，并对传递函数$G(s)$进行简化

$$\begin{cases} T_e = \dfrac{L_a}{R_a} \\ G(s) = \dfrac{C_m/R_a}{T_e J_m s^2 + C_m s + C_e C_m/R_a} \end{cases} \tag{12}$$

由于伺服电机控制采用改变PWM信号占空比实现，因此根据文献[29-30]，引入PWM变换器并将其简化为

$$u_a = DK_a \tag{13}$$

式中　D——PWM信号占空比

K_a——PWM信号占空比与电压比例系数

通过查阅选用直流伺服电机的技术手册，最终得到该系统的传递函数为

$$G(s) = \frac{60}{0.03s^2 + 6s + 10} \tag{14}$$

2.2.3 模糊PID控制器设计

结合实际工作环境，设定工作平台前后、左右倾角为-15°~15°，倾角变化率不超过15(°)/s。因此，模糊控制的基本论域建立如下：倾角偏差E基本论域为[-15°，15°]，倾角变化率E_C基本论域为[-15(°)/s，15(°)/s]，K_p、K_i、K_d基本论域为[-15，15]。

根据模糊控制器的一般设计原则[31]，将系统输入和输出的数值进行离散化处理，并将该模糊子集均设置为{NB，NM，NS，ZO，PS，PM，PB}，即负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。模糊状态隶属函数的选择一般有等腰梯形、高斯型、正态型和等腰三角形，而等腰三角形隶属函数图形更加简洁并且函数图像变化与其直线的斜率相关，计算更简便[32]。因此，本文选用等腰三角形隶属函数作为语言变量的隶属函数。以Matlab软件作为仿真工具，运用其自带的Fuzzy模块设置以E和E_C为输入，K_p、K_i、K_d为输出的模糊控制器。

选择最常用的Mamdani方法对模糊推理规则进行添加。因此，需要建立关于K_p、K_i、K_d 3个参数模糊规则库[33-35]，如表6~8所示。

表6 参数K_p模糊规则

Tab. 6 Parameter K_p fuzzy rule

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表7 参数K_i模糊规则

Tab. 7 Parameter K_i fuzzy rule

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	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

表8 参数K_d模糊规则

Tab. 8 Parameter K_d fuzzy rule

E	E_C						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.2.4 调平控制系统仿真

利用Matlab/Simulink模块进行调平控制系统仿真[36]，将模糊控制器导入并搭建一系列控制模块，形成模糊PID调平控制系统。同时将传统PID调平控制系统作为对比。

首先选用试凑法对K_p、K_i、K_d三者进行初始值的设定。由于增大K_p能够加速系统响应但容易产生超调，而K_p过小会导致系统响应时间变长影响系统调节的精度。K_i用于消除静差提高系统的无差度，但积分作用过强会影响系统的稳定性。K_d起到加快系统动作速度减少调节时间的作用，但过大会引起系统振荡。因此，根据调平系统快响应、低延迟设计要求先调节K_p，再调节K_i，后调节K_d，再结合临界比例度法初步确定3个参数初始值为K_p=20，K_i=1.3，K_d=0.9。针对模糊PID控制系统，设定偏差E=0.8，偏差变化率E_C=0.2，输出的比例因子分别为2、0.5、0.05。设置仿真采样时长为1 s，输入振幅为1.5°的阶跃信号，最后通过示波器展示仿真模拟结果如图13所示。

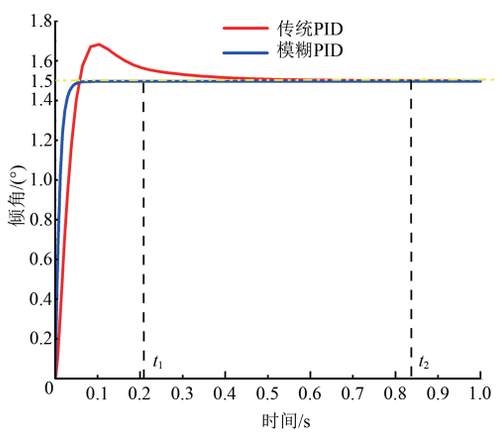

图13 两种算法的阶跃响应波形曲线

Fig. 13 Step response waveform diagrams of two algorithms

由图13较为直观看出，传统PID调节完成时间滞后，其完成调节耗时0.84 s并且产生了一定的超调量。而模糊PID控制系统完成调节耗时0.22 s且无超调量产生，同时响应速度更快。

因此，相较于传统PID控制，引入模糊控制算法后形成的模糊PID控制具有响应速度快、调节时间短以及更小的超调量。所以模糊PID控制系统能够更好地满足调平控制需要。

3 样机试验

3.1 打杈末端性能测试

3.1.1 末端加工与装配

根据前文对辣椒整枝打杈末端的结构设计以及离散元仿真分析对各关键参数进行优化，对末端实体进行

加工制作。弹性防护罩的主体结构采用3D打印技术进行加工，如图14所示。其余零部件均采用机加工方式进行加工，加工完毕后对弹刀辊子进行装配，如图15所示。



图14　弹性防护罩实物

Fig. 14　Physical elastic protective cover

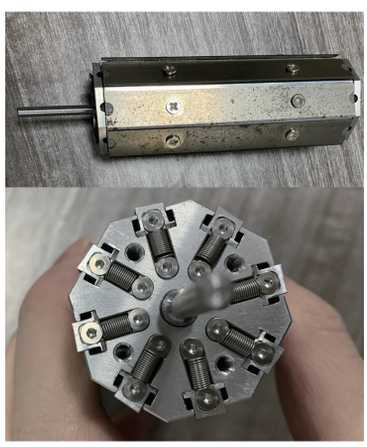

图15　弹刀辊子实物

Fig. 15　Physical object of knife roller

将各个零部件按前文所构建的整枝打杈末端结构进行装配，同时装配上末端的旋转电机，该电机选用金刚系列型号为2 435~6 100 kV的直流无刷电机，额定功率为300 W，通过遥控手柄、接收器、继电器等对电机转速进行调整，同时通过格氏2 200 mAh-3 s-11.1 V直流电池供电，装配完成后如图16所示。

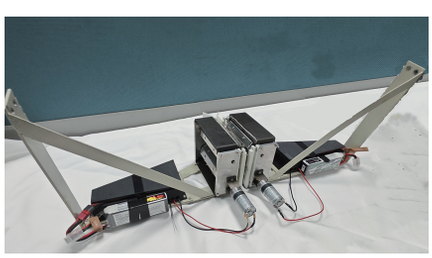

图16　整枝打杈末端实物图

Fig. 16　Physical object at end of pruning and branching process

3.1.2　手持打杈试验

为了验证加工完成后的整枝打杈试验是否能满足前文所研究的打杈效果，手持整枝打杈末端进行了打杈试验，实现对整枝打杈末端实际工作性能的验证。

图17为手持式打杈试验过程，图18为打杈前辣椒植株状态，图19为打杈后辣椒植株状态，通过对比可以看出侧枝基本上被去除完毕，同时没有对上方斗枝、辣椒主茎产生损伤，因此，验证了辣椒整枝打杈末端的有效性和可行性。



图17　手持打杈试验过程

Fig. 17　Handheld branching test process



图18　打杈前辣椒植株状态

Fig. 18　Status of pepper plants before branching



图19　打杈后辣椒植株状态

Fig. 19　Status of pepper plants after branching

3.2　调平系统性能测试

完成对调平机构加工装配以及其控制系统设计后，对调平系统作业性能进行测试，主要分为静态测试和动态测试以验证调平机构实时调平可行性与稳定性。

3.2.1　静态测试试验

静态测试是将调平系统安装至行走系统框架上，停于水平地面，通过角度传感器收集双轴的姿态角，观察其是否始终稳定在0°，并实时记录左右调平轴与前后调

平轴的姿态角数据用于计算各自的稳态误差，如图20所示，通过试验得到左右调平轴姿态角与前后调平轴姿态角，如图21所示。通过计算得到左右调平轴的最大稳态误差约为0.03°，前后调平轴最大稳态误差约为0.08°，因此可视为调平机构在静止时具有良好的稳定性。



图20 调平机构静止测试

Fig. 20 Static testing of leveling mechanism

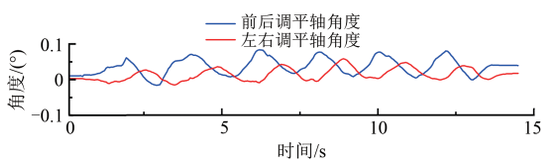

图21 双轴姿态角变化曲线

Fig. 21 Dual axis attitude angle variation curves

3.2.2 动态测试试验

动态测试是将调平机构附加扰动，使双轴均产生一定的倾角使工作平面失去平衡，以此模拟在实地作业中行走系统行驶经过坡地路段，并记录其恢复稳定的时间，以计算其响应时间和稳态误差。首先将左右调平轴进行旋转，如图22所示，并得到左右调平轴旋转时左右角度变化曲线，如图23所示。根据角度变化曲线可知，调平机构在左右调平轴旋转过程中并未发生明显抖动，能够在0.5 s内重新回到稳定状态，结果表明调平机构左右调平轴稳定性较好。



图22 左右调平轴测试

Fig. 22 Left and right leveling axis test

采用相同方式对调平机构的前后调平轴进行测试，如图24所示，同时得到前后调平轴的角度变化曲线，如图25所示。根据前后调平轴角度变化曲线可知，调平机构在前后调平轴旋转过程中并未发生明显抖动，能够在

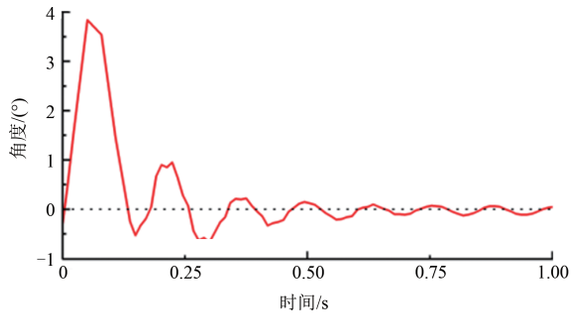

图23 左右调平轴姿态角变化曲线

Fig. 23 Left and right leveling axis attitude angle change curve

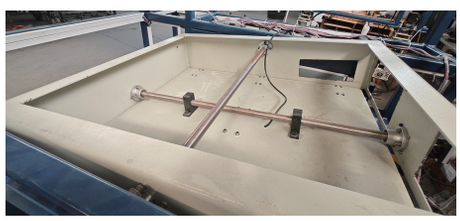

图24 前后调平轴测试

Fig. 24 Front and rear leveling shaft test

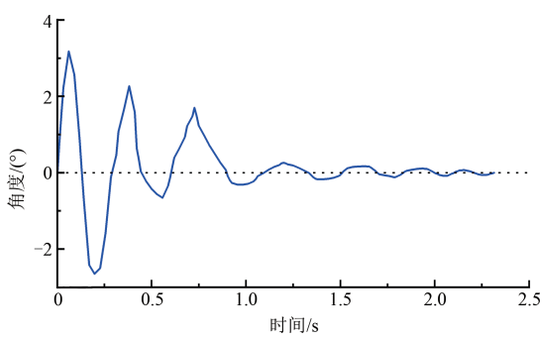

图25 前后调平轴姿态角变化曲线

Fig. 25 Change curve of front and rear leveling axis attitude angle

0.9 s内重新回到稳定状态，结果表明调平机构前后调平轴稳定性较好。

通过以上静态测试与动态测试试验，调平机构的左右调平轴与前后调平轴最大误差均在合理范围内，静态测试试验双轴姿态角变化角度均控制在±0.1°范围内，动态测试试验中双轴姿态角变化角度控制在±4°范围内，且响应速度较快，具有较好的稳定性。

3.3 实地作业试验

基于各主要部件样机的加工装配和性能测试，确认各主要部件工作性能良好，因此将各主要部件进行装配集成辣椒整枝打杈机，装配完成后辣椒整枝打杈样机如图26所示。装配完各主要部件机械结构后，对平台各线路进行连接规整，并将所有主要控制元器件和48 V锂电池置于电控箱内，方便统一控制。

3.3.1 试验条件

基于本文的设计要求，对辣椒整枝打杈的调平和打杈性能进行试验，试验环境在室外丘陵山地农田中进行，试验环境和试验对象如图27所示。

其中起垄垄宽为100 cm，垄高设置为30 cm。试验所用辣椒为定植后30 d“杭椒1号”植株，植株高度为

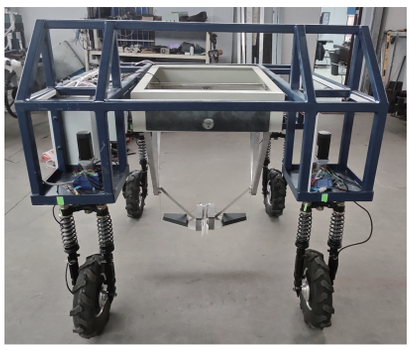

图 26　辣椒整枝打杈实物样机

Fig. 26　Physical prototype of pepper pruning and branching



图 27　试验环境及试验对象

Fig. 27　Test environment and test subjects

25~30 cm，所需修剪的侧枝分布高度为 15~20 cm，种植株距为 30 cm。

3.3.2　评价指标

辣椒整枝打杈试验的评价指标选用侧枝去除率、辣椒主茎损伤率和打杈成功率。针对辣椒主茎损伤判定，本文将打杈后辣椒主茎产生损伤、辣椒植株倒伏均视为辣椒主茎损伤。计算式为

$$P_c = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \tag{15}$$

$$P_s = \frac{B_1}{B_0} \times 100\% \tag{16}$$

式中　P_c——侧枝去除率

A_0——所有辣椒植株需要去除的侧枝数量

A_1——所有辣椒植株打杈后残留侧枝数量

P_s——辣椒主茎损伤率

B_0——所有辣椒植株数量

B_1——受到损伤的辣椒植株数量

由于对辊式离心多刀打杈末端在进行作业时，存在侧枝生长方向与行进方向平行的情况，导致不能将一株辣椒植株上的所有侧枝切除完毕。因此引入打杈成功率，结合辣椒种植技术规范，确定单株辣椒植株的侧枝切除率大于 60% 视为对该植株侧枝打杈成功，反之则失败。此外，若打杈过程中产生了主茎损伤也视为植株侧枝打杈失败。

3.3.3　试验方法

针对打杈作业开展实地试验，为了试验的准确性，进行了 3 组试验，试验过程如图 28 所示。每一组参与试验的辣椒植株数量为 10 株，对试验前后每株辣椒植株侧枝进行统计并记录。



图 28　实地试验过程

Fig. 28　Field testing process

3.3.4　试验结果与分析

对打杈前后辣椒植株数量、侧枝数量、主茎损伤数量进行统计，并根据前文所提出的评价指标计算打杈成功率，其结果如表 9 所示。

表 9　打杈试验结果统计

Tab. 9　Statistical analysis of branching test results

试验序号	打杈作业前		打杈作业后		成功率/%
	植株数量	侧枝数量	损伤数量	侧枝数量	
1	10	33	1	5	80
2	10	29	0	4	70
3	10	42	1	5	80

实地辣椒整枝打杈试验结果表明，所研制的辣椒整枝打杈机对辣椒侧枝切除率达到 86.3%，其中对辣椒主茎损伤率低于 6.7%，辣椒打杈成功率达到 76.7%。在作业过程中遇到坡地行驶状态时，调平系统能够实现实时调平。

4　结论

（1）根据辣椒种植过程中的打杈农艺，设计了适用于辣椒整枝打杈的末端执行器，采用 EDEM 离散元仿真软件建立了辣椒植株-打杈末端互作模型，选取进给速度、打杈机构倾角、辊子转速设计了三因素三水平正交试验，得到末端倾角对打杈作业的工作性能影响最为显著，而辊子转速对末端工作性能的影响程度最低。最终得到最优的参数组合为：进给速度 1.5 m/s、末端倾角 15°、辊子转速 1 187 r/min。

（2）设计了以两个伺服电机作为执行元件，角度传感器作为信号源的调平机构。根据调平控制的要求设计了模糊 PID 算法作为调平系统的控制算法。

（3）对加工装配完成的打杈末端、调平系统进行了实地性能测试，验证了二者的有效性。最后将整枝打杈末端、调平系统集成搭建了辣椒整枝打杈试验样机，农田环

境下实地辣椒整枝打杈试验结果表明，当作业速度为1.5 m/s时，侧枝切除率达到86.3%，辣椒植株损伤率控制在6.7%以内，最终辣椒打杈成功率为76.7%，验证了本文所设计的辣椒整枝打杈机构的可行性。

参 考 文 献

[1] 邢泽农，辛鑫，刘亚忠，等. 我国辣椒产业机械化现状及展望[J]. 农业科技通讯，2021(6)：229－230，259.
XING Zenong，XIN Xin，LU Yazhong，et al. The current status and prospects of mechanization in China's chili industry[J]. Agricultural Science and Technology Bulletin，2021(6)：229－230，259.(in Chinese)

[2] 甘果. 露地辣椒高产种植技术研究[J]. 种子科技，2022，40(16)：64－66，69.
GAN Guo. Research on high-yield cultivation techniques for open-field chili peppers[J]. Seed Science and Technology，2022，40(16)：64－66，69.(in Chinese)

[3] 刘卫. 辣椒种植技术与发展现状[J]. 时代农机，2018，45(5)：20.

[4] 王文霞. 辣椒的生产现状及发展[J]. 北京农业，2014(18)：58－59.

[5] 徐杰. 辣椒产业发展现状与种植技术[J]. 乡村科技，2021，12(3)：69－70.

[6] 袁雷，杨涛，张国儒，等. 辣椒果实中辣椒素的研究进展[J]. 中国瓜菜，2021，34(11)：1－9.
YUAN Lei，YANG Tao，ZHANG Guoru，et al. Research progress on capsaicin in pepper fruits[J]. China Vegetables，2021，34(11)：1－9.(in Chinese)

[7] 饶卫华，敖礼林，余增刚. 辣椒整枝打杈的作用与方法[J]. 科学种养，2017(8)：27－28.
RAO Weihua，AO Lilin，YU Zenggang. The role and methods of pruning and branching in chili pepper[J]. Scientific Farming，2017(8)：27－28.(in Chinese)

[8] 王学良. 丘陵山地四履带底盘及自动调平装置的设计与试验[D]. 泰安：山东农业大学，2019.
WANG Xueliang. Design and experiment of four-track chassis and automatic leveling device forhilly mountainous areas[D]. Taian：Shandong Agricultural University，2019.(in Chinese)

[9] YOU A，PARAYIL N，KRISHNA J G，et al. An autonomous robot for pruning modern，planar fruit trees[J]. arXiv Preprint，arXiv：2206.07201，2022.

[10] FU G H，LIU X M，CHEN Y F，et al. Fast-growing forest pruning robot structure design and climbing control[J]. Advances in Manufacturing，2015，3(2)：166－172.

[11] FAVIER J F，ABBASPOUR F，KREMMER H，et al. Shape representation of axisymmetrical，non-spherical particles in discrete element simulation using multielement model particles[J]. Engineering Computations，1999，16(4)：467－480.

[12] ABBASPOUR F. Theoretical validation of a multi-sphere，discrete element model suitable for biomaterials handling simulation[J]. Biosystems Engineering，2004，88(2)：153－161.

[13] KRUGGEL E H，RICKELT S，WIRTZ S，et al. A study on the validity of the multisphere discrete element method[J]. Powder Technology，2008，188(2)：153－165.

[14] ZHOU Y，ZHOU B，LI J，et al. Study on the multi-sphere method modeling the 3D particle morphology in DEM[C]//International Conference on Discrete Element Methods. Springer Singapore，2016.

[15] MONTELLANO C，FUENTES J M，AYUG T，et al. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations[J]. Journal of Food Engineering，2012，111(4)：553－562.

[16] 刘文政，何进，李洪文，等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报，2018，49(5)：132－142，149.
LIU Wenzheng，HE Jin，LI Hongwen，et al. Calibration of simulation parameters for mini potatoes based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(5)：132－142，149.(in Chinese)

[17] 刘凡一，张舰，李博，等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报，2016，32(12)：247－253.
LIU Fanyi，ZHANG Jian，LI Bo，et al. Analysis and calibration of discrete element parameters for wheat based on stacking tests[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(12)：247－253.(in Chinese)

[18] LI D，WANG R，ZHU Y，et al. Calibration of simulation parameters for fresh tea leaves based on the discrete element method[J]. Agriculture，2024，14(1)：148.

[19] 周宇. 饲料油菜切碎过程离散元仿真模型参数确定及验证[D]. 武汉：华中农业大学，2019.
ZHOU Yu. Determination and validation of discrete element simulation model parameters for the chopping process of fodder rapeseed[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University，2019.(in Chinese)

[20] O'DOGHERTY M J，GODWIN R J，DEDOUSIS A P，et al. A mathematical model of the kinematics of a rotating disc for inter-and intra-row hoeing[J]. Biosystems Engineering，2007，96(2)：169－179.

[21] 张莉. 新型仿生玉米摘穗机构理论分析与仿真研究[D]. 长春：吉林大学，2015.
ZHANG Li. Theoretical analysis and simulation study of a novel bionic corn ear picker mechanism[D]. Changchun：Jilin University，2015.(in Chinese)

[22] 齐磊. 倾转四旋翼飞行器短舱倾转过程控制技术研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.
QI Lei. Research on the control technology of the tilting process for tiltrotor of tilting quad rotor aircraft[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2015.(in Chinese)

[23] 周志艳，周铭杰，陈羽立，等. 喷杆喷雾机旋翼悬浮式喷杆自动调平控制系统研究[J]. 农业机械学报，2022，53(12)：70－79.
ZHOU Zhiyan，ZHOU Mingjie，CHEN Yuli，et al. Research on the automatic leveling control system for suspension booms of spinning-wing sprayers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(12)：70－79.(in Chinese)

[24] 史家顺，董金龙，刘聪，等. 随五轴加工轨迹变抛光力的控制策略与方法[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2020，41(1)：89－94.
SHI Jiashun，DONG Jinlong，LIU Cong，et al. Control strategy and method for variable polishing force following the five-axis machining trajectory[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science)，2020，41(1)：89－94.(in Chinese)

(下转第209页)

[24] 丁幼春，何志博，夏中州，等. 小型履带式油菜播种机导航免疫PID控制器设计[J]. 农业工程学报，2019，35(7)：12－20.
DING Youchun，HE Zhibo，XIA Zhongzhou，et al. Design of navigation immune controller of small crawler-type rape seeder[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(7)：12－20.(in Chinese)
[25] 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 Xiwen，ZHANG Zhigang，et al. Side-shift offset identification and control of crop row tracking for intra-row mechanical weeding[J]. Transactions of the CSAE，2013，29(14)：8－14.(in Chinese)
[26] 焦俊，陈靖，乔焰，等. 直流电机驱动农用履带机器人轨迹跟踪自适应滑模控制[J]. 农业工程学报，2018，34(4)：64－70.
JIAO Jun，CHEN Jing，QIAO Yan，et al. Adaptive sliding mode control of trajectory tracking based on DC motor drive for agricultural tracked robot[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(4)：64－70.(in Chinese)
[27] 唐小涛，陶建峰，李志腾，等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J]. 农业机械学报，2018，49(1)：29－34.
TANG Xiaotao，TAO Jianfeng，LI Zhiteng，et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(1)：29－34.(in Chinese)
[28] 翟丽，孙逢春，谷中丽. 电子差速履带车辆转向转矩神经网络PID控制[J]. 农业机械学报，2009，40(2)：1－5，31.
ZHAI Li，SUN Fengchun，GU Zhongli. Neural networks PID control of steering torque for electronic differential tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2009，40(2)：1－5，31.(in Chinese)
[29] GUYONNEAU R，MERCIER F，OLIVEIRA F G. LiDAR-only crop navigation for symmetrical robot[J]. Sensors，2022，22：8918.
[30] 候志伟. 轮式果园作业平台性能分析与仿真[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2016.
HOU Zhiwei. Performance analysis and simulation of wheel rochard work platform[D]. Yanglin：Northwest A&F University，2016.(in Chinese)
[31] 韩长杰，郑康，赵学观，等. 大田甘蓝作物行识别与对行喷雾控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(6)：89－101.
HAN Changjie，ZHENG Kang，ZHAO Xueguan，et al. Design and experiment of row identification and row-oriented spray control system for field cabbage crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(6)：89－101.(in Chinese)
[32] BIGLIA A，ZAMAN S，GAY P，et al. 3D point cloud density-based segmentation for vine rows detection and localisation[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，199：107166.

(上接第144页)

[25] 王梓藤. 四旋翼无人机驱动器闭环对姿态稳定性影响的研究[D]. 银川：宁夏大学，2016.
WANG Ziteng. Research on the impact of closed-loop actuators on the attitude stability of quad rotor unmanned aerial vehicles[D]. Yinchuan：Ningxia University，2016.(in Chinese)
[26] 申珊颖. 斜十字四旋翼飞行器实验建模与控制技术研究[D]. 南京：南京航空航天大学，2013.
SHEN Shanying. Experimental modeling and control technology research of the skewed cross quad rotor unmanned aerial vehicle[D]. Nanjing：Nanjing University of Aeronautics and Astronautics，2013.(in Chinese)
[27] CHEN G，LI Z，ZHANG Z，et al. An improved ACO algorithm optimized fuzzy PID controller for load frequency control in multi area interconnected power systems[J]. IEEE Access，2019，8：6429－6447.
[28] 姬帅生. 农用无人机云台关键技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2020.
JI Shuaisheng. Research on key technologies of gimbals for agricultural unmanned aerial vehicles[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2020.(in Chinese)
[29] 杨飞，刘刚，刘寅，等. 基于机器视觉的农机具自动导航系统[C]//中国农业工程学会2011年学术年会论文集，2011.
[30] 张漫，季宇寒，李世超，等. 农业机械导航技术研究进展[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：1－18.
ZHANG Man，JI Yuhan，LI Shichao，et al. Research progress on agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：1－18.(in Chinese)
[31] 李健. 基于模糊PID的无人水下机器人运动控制研究[D]. 大连：大连理工大学，2016.
LI Jian. Research on the motion control of unmanned underwater robots based on fuzzy PID[D]. Dalian：Dalian University of Technology，2016.(in Chinese)
[32] 孙铭. 基于模糊PID控制的供热系统优化研究[D]. 长春：吉林化工学院，2022.
SUN Ming. Optimization study of heating system based on fuzzy PID control[D]. Changchun：Jilin Chemical Industry College，2022.(in Chinese)
[33] CHEN P Y，CHEN G Y. The design of a TLD and fuzzy-PID controller based on the autonomous tracking system for quad rotor drones[J]. Intelligent Automation & Soft Computing，2020，26(3)：25－27.
[34] 齐文超，李彦明，张锦辉，等. 丘陵山地拖拉机车身调平双闭环模糊PID控制方法[J]. 农业机械学报，2019，50(10)：17－23，34.
QI Wenchao，LI Yanming，ZHANG Jinhui，et al. Dual closed-loop fuzzy PID control method for leveling of tractor body in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2019，50(10)：17－23，34.(in Chinese)
[35] 张雪飞，袁鹏，谭俊哲，等. 基于模糊PID的无人帆船航向控制方法[J]. 中国舰船研究，2019，14(6)：15－21.
ZHANG Xuefei，YUAN Peng，TAN Junzhe，et al. Course control method for unmanned sailboat based on fuzzy PID[J]. Chinese Journal of Ship Research，2019，14(6)：15－21.(in Chinese)
[36] 随何虎. 巡检四旋翼无人机的自主飞行研究及应用[D]. 武汉：武汉理工大学，2018.
SUI Hehu. Research and application of autonomous flight for patrol quad rotor unmanned aerial vehicles[D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2018.(in Chinese)