



孔朔琳, 贺磊磊, 史宇飞, 刘国良, 李瑞, 武振超, 薛云飞, 傅隆生. 猕猴桃小型就地分级系统开发与试验[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(09): 196-205.
KONG Shuolin, HE Leilei, SHI Yufei, LIU Guoliang, LI Rui, WU Zhenchao, XUE Yunfei, FU Longsheng. A compact and on-site kiwifruit grading system[J].
Journal of China Agricultural University, 2025, 30(09): 196-205.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.09.18

猕猴桃小型就地分级系统开发与试验

孔朔琳¹ 贺磊磊¹ 史宇飞¹ 刘国良¹ 李瑞¹ 武振超² 薛云飞³ 傅隆生^{1*}

(1. 西北农林科技大学 机械与电子工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 安徽农业大学 工学院, 合肥 230000;

3. 眉县农业机械技术推广服务中心, 陕西 宝鸡 722300)

摘要 针对现有猕猴桃分级设备体积大, 难以移动, 无法就地应用等问题, 开发一种猕猴桃小型就地分级系统。该系统由猕猴桃小型就地分级装置和手机控制程序组成, 装置长、宽、高分别为 114.3、30.4、62.8 cm, 质量 7.63 kg。运用 Box-Behnken 试验设计原理, 以输送单元倾角、输送速度和入料口进果量为影响因素, 分级耗时为响应值, 使用 Design-Expert 软件建立分级耗时回归模型, 进行响应曲面优化试验; 以分级耗时最短为目标值, 通过响应面进行优化求解。优化结果表明: 当输送单元倾角为 32.86°, 输送速度 13.35 mm/s, 进果量 5.18 个/次时, 分级耗时最短; 在该优化参数下进行田间验证试验, 分级系统分级耗时为 1.89 s/个, 分级准确率达 98%。该猕猴桃小型就地分级系统具有体积小、质量轻等优势, 分级准确率较高, 可以满足猕猴桃田间就地分级需求。

关键词 猕猴桃; 就地分级; 小型分级系统; 手机控制

中图分类号 TP32

文章编号 1007-4333(2025)09-0196-10

文献标志码 A

A compact and on-site kiwifruit grading system

KONG Shuolin¹, HE Leilei¹, SHI Yufei¹, LIU Guoliang¹, LI Rui¹, WU Zhenchao²,
XUE Yunfei³, FU Longsheng^{1*}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230000, China;

3. Meixian Agricultural Machinery Technology Extension Service Center, Baoji 722300, China)

Abstract The current traditional grading equipment and system for kiwifruit is large in size, poor in mobility, and unsuitability for on-site application in field. A compact and field-deployable kiwifruit grading system is thus developed to overcome these limitations. The system comprises a compact small size kiwifruit grading device and a smartphone-based control application. The device has dimensions of 114.3 cm in length, 30.4 cm in width, and 62.8 cm in height, with a total weight of 7.63 kg. Employing the Box-Behnken experimental design, the transport tilt angle, conveying speed, and fruit intake were identified as influencing factors, with grading time established as the response variable. A regression model for grading time was developed using Design-Expert software, and response surface methodology was utilized for optimization. The optimal results indicated that the minimum grading time was achieved when the transport unit tilt angle was set at 32.86°, the conveying speed was 13.35 mm/s, and the fruit intake was 5.18 fruits/cycle. Field experiments conducted under these optimized parameters verified that the developed grading system attained a grading time of 1.89 s/ fruit with a

收稿日期: 2025-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(32371999); 陕西省重点研发计划(2024NC-YBXM-195); 陕西省重点研发计划(2023JBGS-21)

第一作者: 孔朔琳(ORCID:0000-0002-2029-8954), 博士研究生, E-mail: kslberich@nwafu.edu.cn

通讯作者: 傅隆生(ORCID:0000-0003-3253-2637), 教授, 博士生导师, 主要从事智慧农业技术与装备研究, E-mail: fulsh@nwafu.edu.cn

grading accuracy of 98%. Due to its small size, light weight, and high grading precision, the compact on-site kiwifruit grading system satisfies the practical requirements for on-site kiwifruit grading in field.

Keywords kiwifruit; on-site grading; compact grading system; mobile phone control

猕猴桃采摘后,客商异地收购猕猴桃需运输至果品公司进行分级,才能运往加工企业、农贸市场和零售商等处^[1]。收购后分级无法直接过滤不合格果实,间接提高了收购成本,造成不必要的浪费^[2-4]。收购猕猴桃时在田间地头分级一方面可以将分级后的果实直接运往目标市场,减少运输流程,同时能够提升效率;另一方面还能及时剔除不合格果实,从而节约装筐、运输资源^[5]。鉴于此,开发一种可就地应用的猕猴桃质量分级设备显得尤为迫切。

目前市场上的猕猴桃质量分级设备虽然在分级效率上表现出色,但因其体积庞大,就地应用受限^[6],如山东龙口凯祥有限公司研发的分级设备分级效率较高(7 200个/h),但尺寸较长(5.5 m),难以在田间移动^[7]。近年来,一些知名果实分级设备厂商,如江西绿萌科技股份有限公司、深圳道创智能创新科技有限公司、挪威 TMORA Systems 有限公司等,推出具有清洗、烘干、称重、卸果等多功能的大型分级设备,这些设备专为提升工厂化分级效率而设计,而非满足就地分级需求^[8]。

猕猴桃就地质量分级设备应具有小型化、准确度高、便于操作的特点以满足田间地头分级使用需求,同时还应记录果实个数及质量分布信息等,方便后续收购商分析果实收购整体情况。目前广泛采用电子式称重,传感器采集质量信息,具有体积小和称重精度高等特点^[9-11]。Chakraborty等^[12]采用悬臂梁式传感器检测柑橘质量,并将其分为大、中、小3个等级,准确率分别为96%、87%、92%。Pawlowski等^[13]利用平衡梁式传感器研制了一种适合直径45~100 mm的球形水果环形分选机,分选误差在2%左右。上述研究表明使用质量传感器可以满足称重准确度要求,但无法对果实质量进行记录。事实上,记录果实数据信息可以帮助收购商分析当地产量情况,优化收购策略^[14-15]。

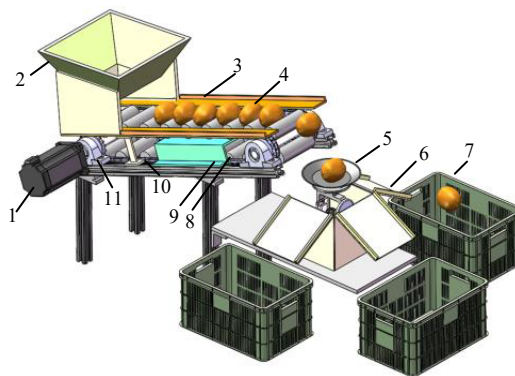
为解决现有猕猴桃质量分级设备因体积较大导致无法实现灵活就地分级的问题,本研究将立足于田间就地分级需求,设计一种猕猴桃小型就地分级系统,采用Box-Behnken试验设计与多元回归分析确定主要工作参数,并结合实际田间试验进行效果验证,以为猕猴桃小型就地分级装置的研制提

供参考。

1 材料与方法

1.1 分级装置结构及基本工作原理

本研究开发的猕猴桃小型就地分级系统由猕猴桃小型就地分级装置和手机控制程序共同组成。分级装置长、宽、高分别为114.3、30.4、62.8 cm,质量7.63 kg,由猕猴桃辊轮输送单元和单托盘三向旋转式分级单元组成,整机结构见图1。猕猴桃辊轮输送单元作业流程如下:首先通过手机程序选择分级猕猴桃品种以及控制分级装置启停;之后将多个猕猴桃一次性放入入料口,利用由辊轮和柔性摩擦板等组成的输送单元从入料口处输出猕猴桃,实现猕猴桃的单个连续输送;最后利用由单托盘和两组步进电机-同步带等组成的分级单元对猕猴桃进行称重,并用无线蓝牙模块HC-05将质量值传输至程序进行显示和保存,以实现猕猴桃的分级。



1. 86 步进电机; 2. 入料口; 3. 输送单元; 4. 猕猴桃; 5. 分级单元; 6. 泡沫滑道; 7. 果实收集箱; 8. 辊轮; 9. 柔性摩擦板; 10. 链; 11. 链轮

1. 86 Stepper motor; 2. Feeding port; 3. Conveying unit; 4. Kiwifruit; 5. Grading unit; 6. Foam slide; 7. Fruit collection box; 8. Roller; 9. Flexible friction plate; 10. Chain; 11. Sprocket

图1 猕猴桃小型就地分级装置整体结构

Fig.1 Illustration of the compact on-site kiwifruit grading device structure

1.2 输送单元设计

1.2.1 输送单元结构设计

为满足猕猴桃就地分级对设备小型化与便捷性的要求,采用2条1.5 m长的单侧直板单孔带耳

链条进行传动,动力源为86步电机,通过链条中间固定的辊轮构建输送单元。输送单元倾斜安装于型材上,以便在运动过程中,将位于间隙中稳定的猕猴桃向上输送,同时让定位不稳的猕猴桃下滚并重新定位;输送单元的中段下方装有柔性摩擦板,摩擦板与辊轮接触产生摩擦力,由于辊轮内置

有轴承,会促使辊轮旋转;猕猴桃在通过该区域时,辊轮的旋转将驱动猕猴桃自转;如果间隙中存在多个猕猴桃,相互转动产生的摩擦将使其不稳定并沿输送单元下滚,直至找到稳定的位置,保证最终猕猴桃逐个输入分级单元^[16],输送单元结构见图2。

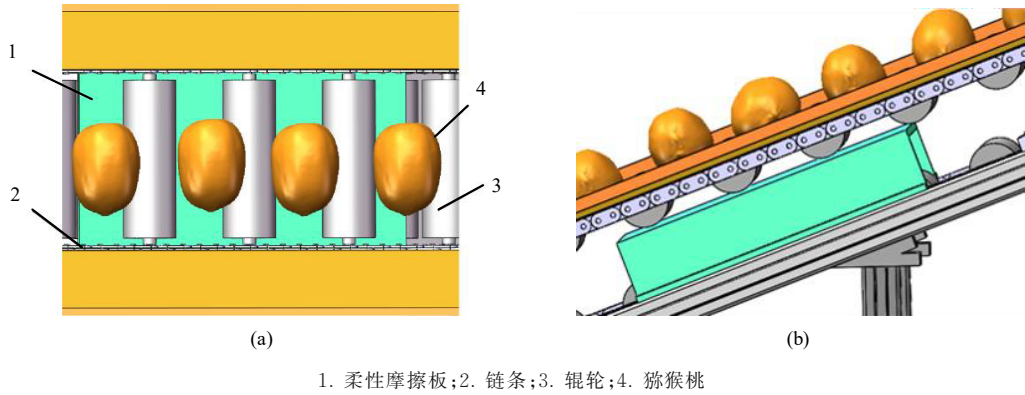


图2 输送单元结构俯视(a)和正视(b)示意图

Fig.2 Schematic diagrams of the conveying unit top view (a) and front view (b)

1.2.2 输送单元辊轮间隙分析

辊轮间隙过大易导致猕猴桃从间隙掉落,造成漏检现象发生。为确定合适大小的辊轮间隙,本研究选取大果类型的‘徐香’和小果类型的‘海沃德’2种猕猴桃各500个作为代表样本,并于2023年7月在杨凌现代农业创新园(108°05′(E),34°26′(N))进行测量。测量时,将卡尺外侧测量面置于其赤道

处,并对每个猕猴桃最小直径分别测量3次取平均值,测量结果见图3。猕猴桃的最小直径呈正态分布;‘徐香’猕猴桃的平均最小直径为45.57 mm;‘海沃德’猕猴桃的平均最小直径为53.49 mm。因此,辊轮间隙应<37.05 mm,同时为保证传动稳定性,链条节距为12.7 mm。综上,确定辊轮直径为40 mm,长度95 mm,辊轮间隙36.2 mm。

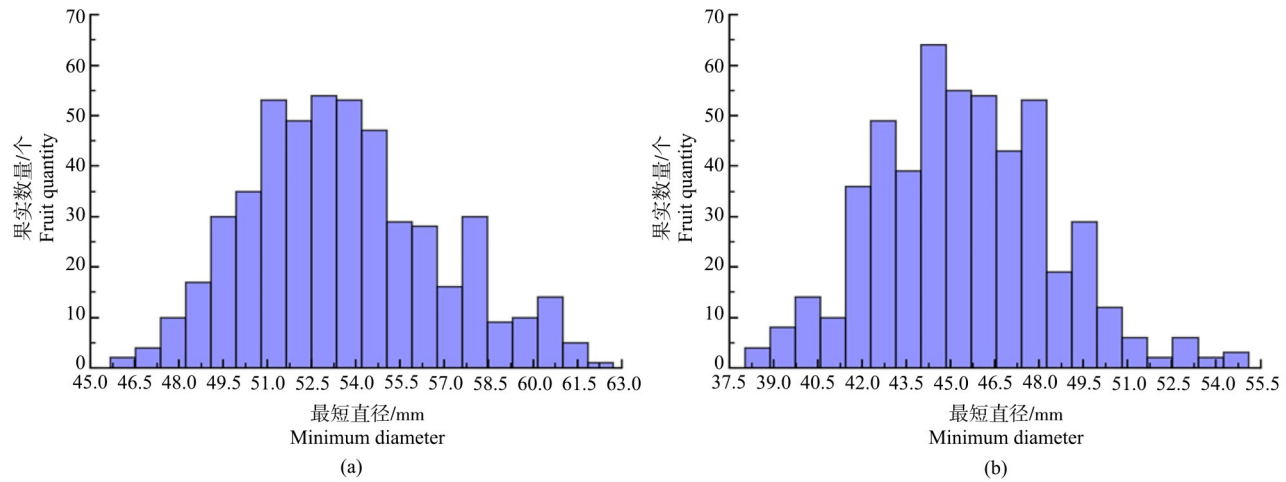


图3 ‘徐香’(a)和‘海沃德’(b)猕猴桃最短直径分布

Fig.3 Minimum diameter distribution of ‘Xuxiang’ (a) and ‘Hayward’ (b) kiwifruits

1.2.3 输送单元倾斜角度分析

输送单元的倾斜角度影响猕猴桃运输过程中的稳定性,单个猕猴桃的稳定运输需保证辊轮间隙外的不稳定猕猴桃可以沿辊轮自然下滚,同时还要满足当猕猴桃到达摩擦板位置时,若辊轮间隙内恰有多个较小的猕猴桃,应使不稳定的猕猴桃沿输送单元向下滚动^[17]。因此,当猕猴桃处于摩擦板位置的辊轮间隙时,猕猴桃与上方辊轮接触但相互之间没有作用力,猕猴桃与两辊轮均相切,此时视猕猴桃的长轴恰好在猕猴桃中心与下部辊轮中心连线上。综合上述条件,输送单元极限倾角 θ 应符合:

$$\begin{cases} G \sin \theta = G \mu \cos \theta \\ \frac{y^2}{a^2} + \frac{x^2}{b^2} = 1 \\ (x^2 - x_0)^2 + (y - y_1)^2 = r^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r^2 \end{cases} \quad (1)$$

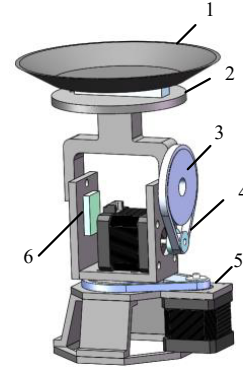
式中: G 为猕猴桃垂直向下的作用力,N; μ 为猕猴桃与辊轮面的摩擦因数,本研究取 $\mu=0.26$; θ 为辊轮输送单元倾斜角度, $(^\circ)$; a 为猕猴桃长轴,取 $a=33\text{ mm}$; b 为猕猴桃短轴,取 $b=23\text{ mm}$; x 、 y 为猕猴桃中心坐标; x_1 、 y_1 为下部辊轮中心坐标; x_2 、 y_2 为上部辊轮中心坐标; r 为辊轮半径,取 $r=20\text{ mm}$ 。由式(1)计算得 θ 为 $26^\circ \sim 34^\circ$ 。

1.3 称重分级单元设计

1.3.1 分级单元结构设计

分级单元是实现单颗果实进行称重分级的核心部件,为兼顾分级效率与装置小型化特点,设计单托盘三向旋转结构,以2个步进电机为基础,采用同步带传动方式。上步进电机利用同步带带动支架及托盘旋转,实现猕猴桃的倾倒。下电机也利用同步带带动底座以上部分旋转,实现转向。装置底座和部分材料采用3D打印PLA材料加工而成,而对精度要求高的同步带轮则为数控机床加工铝合金而成,猕猴桃分级单元结构见图4。

分级单元作业时,猕猴桃首先从输送单元逐一掉落至分级单元的称重托盘上。称重托盘表面设计有轻质防滑橡胶垫,有助于吸收猕猴桃运动时的冲击力,减少果实损伤,同时增加其稳定性,保障质量检测的精确性。分级时,一旦猕猴桃在称重托盘上,质量传感器立即测量其质量,并等待质量数值稳定后,将数据传递给Arduino开发板,通过开发板



1. 称重托盘;2. 质量传感器;3. 同步带轮;4. 同步带;5. 42步进电机;6. Arduino开发板

1. Weighing tray; 2. Weight sensor; 3. Timing pulley; 4. Timing belt; 5. 42 Stepper motor; 6. Arduino development board

图4 猕猴桃分级单元结构示意图

Fig. 4 Illustration of the kiwifruit grading unit structure

发送信号控制分级单元进行作业。由于分级单元作业速度远大于输送单元运输速度,因此可以避免误分问题。猕猴桃分级单元依据GB/T 40743—2021《猕猴桃质量等级标准》^[18]进行分级,开发板调控步进电机的运作,使猕猴桃从3个方向经泡沫滑道进入收集箱。对于达到特级和一级标准的猕猴桃,仅需上方的电机转动,即可引导它们进入方向相对的2个收集箱;针对数量较少、符合二级标准的猕猴桃,则需上、下2个电机协同工作,确保它们进入对应的收集箱;每次分级完成后,步进电机反向旋转,将分级装置恢复至初始位置,以保证连续作业。

为确定合适的步进电机,将猕猴桃看成圆柱体,计算电机转动惯量。由于猕猴桃及PLA材料质量小,因此只需考虑电机加速转矩(T),计算公式为:

$$T = \frac{1.2}{i^2} m \left(\frac{1}{8} D^2 + d_k^2 \right) W \quad (2)$$

式中: m 为猕猴桃质量,本研究取 $m=100\text{ g}$; D 为猕猴桃截面圆直径,取 $D=50\text{ mm}$; d_k 为猕猴桃质点到电机轴距离,取 $d_k=100\text{ mm}$; i 为齿数比,取 $i=19/76$; W 为角加速度, rad/s^2 ;安全系数取1.2。由式(2)计算得 $T=0.28\text{ N}\cdot\text{m}$,因此,选择步进电机型号为42BYGH34S即可满足传动需求。

分级单元同步带型号为MXL型单面带,大、小同步带轮直径分别为60和15 mm,带轮中心距为40 mm,上步进电机前后转动 30° 时猕猴桃可抛至泡

沫滑道。

1.3.2 分级单元元件选择

分级单元的称重传感器采用平衡梁式压力传感器,其核心在于固定安装的电阻应变片,该元件能够捕捉微小位移变化,将其转换为电阻值的相应变动,从而产生电压信号发送给ADS1256芯片^[19-20]。为降低分级耗时,传感器应具备精度高、响应速度快的特点。本研究采用HBM生产的PW6D称重传感器,量程为3 kg,灵敏度为 (2 ± 0.2) mV/V,该传感器有良好的线性度,能满足称重需求。

分级单元托盘采用弧度设计,使猕猴桃能够沿着托盘的内壁平稳滑到底部,可减少猕猴桃的运动偏移、弹跳情况。另外,称重托盘表面覆有防滑橡胶垫,称重托盘表面覆有轻质泡沫垫片,能够减小猕猴桃对托盘的冲击^[21]。在使用称重传感器前需要计算传感器校准系数,校准系数与称重传感器信号值相乘得到猕猴桃实际质量。校准系数(k)的计算公式为:

$$k = \frac{d}{s} \quad (3)$$

式中: d 为称重传感器信号值; s 为标注质量值,本研究取 $s=100$ g。由式(3)计算得 $k=951$ 。

1.4 分级装置电控系统设计

猕猴桃输送单元的速度控制由86步进电机及普费德DMA860H控制,猕猴桃分级系统控制流程见图5。猕猴桃进入分级单元时,托盘下的质量传感器检测到质量信号后,发送给ADS1256,其能将来自传感器的电压信号放大并进行A/D转换,并发送给Arduino开发板。开发板对数字信号进行读取和非线性校正后,HC-05蓝牙模块将质量值发送至手机程序进行显示和保存;同时开发板向2个Emm42_V4.2步进电机驱动器发送控制信号,首先控制下部的电机转动,使分级单元转动到位;然后控制上部的电机,使托盘向下转动倾倒入猕猴桃。完成倾倒后,电机顺序回转,恢复初始位置,准备下一次分级。分级单元采用5 V和24 V锂电池对开发板和42步进电机进行供电。

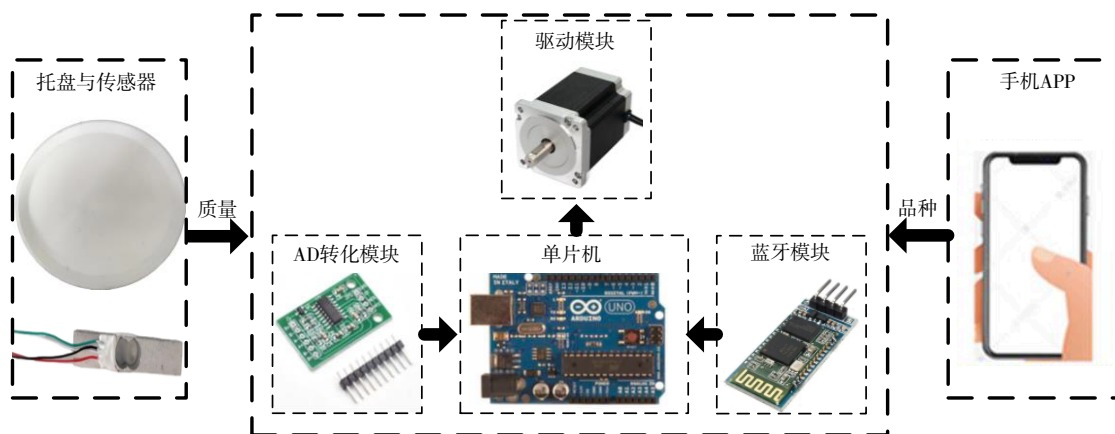


图5 猕猴桃分级系统控制流程示意图

Fig.5 Schematic diagram of the control process for the kiwifruit grading system

在传感器获取信号、控制器对传感器采集的质量数据进行处理时,由于试验系统采用动态采样方式,所采集的质量数据呈现为一条具有明显振动的类抛物线形曲线^[22]。具体而言,当猕猴桃初次接触传感器时,采集的质量数据逐渐增加;当猕猴桃与托盘完全接触后,采集的质量信号呈现上下反复振动并趋于平稳波动;当猕猴桃完全离开托盘时,质量信号开始下降。为获得较为准确的猕猴桃质量值,应选择质量曲线趋于稳定的平稳段作为数据采集区间。

为减少机械振动引起的干扰信号,本研究设计‘限幅滤波法’和‘极大极小值滑窗均值滤波法’对单片机获取的A/D采样值进行数字滤波处理。当A/D采样值即质量信号出现时,以0.05 s为间隔截取0.8 s质量信号,之后将每次截取的质量信号进行对比,当质量信号波动 <1 g时视为猕猴桃处于稳定状态,并以当前质量信号值作为最终猕猴桃质量值。在间隔截取质量信号时当2次采样的差值 <1 g时,保留当前值;当差值 >1 g时,剔除当前值,并以上一次采集值替代,实现限幅滤波。完成限幅滤波后,选

取稳定状态的质量信号,设置最长为 0.25 s 的滤波窗口,即获取 5 次质量信号,之后计算窗口内质量信号的最大值和最小值,并将窗口中心的质量信号和最大值与最小值相加并求均值,得到更加稳定的质量信号,进一步平滑数据,实现滑窗均值滤波,具体计算公式如下:

$$y(n_i) = \frac{1}{L_f} \left(u(n_i) + \max(u(n_i - 2) \sim u(n_i + 2)) + \min(u(n_i - 2) \sim u(n_i + 2)) \right) \quad (4)$$

式中: $y(n_i)$ 为 n_i 时刻滤波器的输出值; L_f 为滤波的窗口长度; u 为单片机获取的 A/D 采样值。

1.5 分级装置参数优化

猕猴桃从输送单元掉落至分级单元会导致质量传感器获取的信号振荡,需要等待猕猴桃在分级单元托盘内稳定后获取质量值。为确保猕猴桃分级系统在动态称重过程中能够快速获得高精度的质量数据,减少因果实下落冲击等因素引起的质量数值变化,进而提高分级效率。本研究利用 Design-Expert 13 软件对分级装置的输送单元倾斜角度、输送速度和入料口进果量 3 个自变量因素进行 Box-Behnken 试验分析,以分级耗时为试验指标进行因素水平分析。分级装置参数优化试验因素与水平见表 1,参数优化试验方案及结果见表 2。

表 1 分级装置参数优化试验因素与水平

Table 1 Factors and levels for the parameter optimization experiment of the grading device

水平 Level	A, 倾斜角度/(°) Tilt angle	B, 输送速度/(mm/s) Convey speed	C, 进果量/(个/次) Fruit intake
-1	26	12	2
0	30	14	4
1	34	16	6

表 2 分级装置参数优化试验方案及结果

Table 2 Programme and results for grading device parameter optimization

编号 Number	因素水平 Factor level			Y/(s/个)	编号 Number	因素水平 Factor level			Y/(s/个)
	A_f	B_f	C_f			A_f	B_f	C_f	
1	-1	-1	0	3.22	10	0	-1	1	2.65
2	1	-1	0	3.50	11	0	1	1	2.78
3	-1	1	0	2.61	12	0	0	0	2.56
4	1	1	0	3.12	13	0	0	0	2.35
5	-1	0	-1	3.14	14	0	0	0	2.33
6	1	0	-1	3.28	15	0	0	0	3.28
7	-1	0	1	2.40	16	0	0	0	2.31
8	1	0	1	3.31	17	0	-1	1	2.42
9	0	-1	-1	3.21					

注: A_f , B_f , C_f 分别为倾斜角度、输送速度和进果量的水平值;Y 为装置分级耗时。

Note: A_f , B_f and C_f are the level values of tilt angle, conveying speed, and fruit intake, respectively; Y is the grading time.

1.6 控制程序设计

为方便用户能够快速查看各猕猴桃质量,设计猕猴桃就地分级系统的手机控制程序。相比于安装在装置上的交互显示界面,手机程序的成本更低,用户体验更加友好^[23]。为实现这一功能,本研究使用 Android Studio 开发分级系统手机控制程序。手机程

序共设计有 4 个模块,分别是蓝牙模块、文件模块、品种选择模块和显示模块。工作时首先利用蓝牙模块建立手机和开发板之间的通信连接,从而控制装置启停。蓝牙连接后,用户可以使用品种选择模块选择所需要分级的猕猴桃品种。选择完成后,装置即进入工作状态。当猕猴桃落入称重托盘时,利用开发板传输

的质量将实时显示在界面上,并同时存储在建立的文件中,方便导出数据,为后续分析提供决策^[24-25]。

1.7 评价指标

采用质量相对误差和绝对误差评价分级装置的性能。相对误差指测量质量的绝对误差值与真值之比,绝对误差指平均测量值与真实值之差。其中相对误差越小,准确度越接近于1,分级准确度越高。质量相对误差(e)和绝对误差(δ)计算公式如下:

$$e = \frac{m' - m}{m} \times 100\% \tag{5}$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n m'}{n} - m \tag{6}$$

式中: m' 为猕猴桃质量测量值,g; m 为猕猴桃质量真实值,g; n 为猕猴桃测量数,个。

2 结果与分析

2.1 分级装置性能试验结果

分级装置性能试验在室内进行。选择单果质量为56~152 g,且果实坚硬无外部损伤,符合采摘后的果实特征的猕猴桃作为试验样本。试验时随机选取5个‘徐香’猕猴桃,首先用精度为0.01 g的电子秤(住虎WV11)对编号后的猕猴桃进行静态称重,获取猕猴桃真实质量。然后调整输送单元速度至16 mm/s,对落下的猕猴桃进行称重分级。连续测量同一个猕猴桃3次,5个猕猴桃3次称重的准确率试验结果见表3。测量结果表明,每次测量值和真实值相对误差<0.5%,绝对误差在-0.21~0.07 g范围内,证明该系统称重精度较高,满足分级作业精度需求。

表3 猕猴桃分级装置称重准确率试验结果

Table 3 Results of weighing accuracy for the kiwifruit grading device

编号 Number	实际质量/g Actual quality	测量质量/g Measurement quality			相对误差/% Relative error	绝对误差/g Absolute error
		第一次 First time	第二次 Second time	第三次 Third time		
1	86.3	86.1	86.2	86.1	0.28	-0.21
2	118.5	118.7	118.2	118.4	0.25	-0.07
3	89.8	89.6	89.7	89.7	0.26	-0.16
4	98.3	98.5	98.3	98.4	0.23	0.07
5	57.2	57.2	57.0	57.2	0.33	-0.06

2.2 参数优化结果及分析

采用Design-Expert 13软件对输送单元倾斜角度(A)、输送速度(B)、入料口进果量(C)和分级耗时数据进行多元回归拟合,并对相关因素交互作用进行相关性分析,结果见表4。回归模型的 $P<0.0001$,模型拟合程度高,与实际值相差较小。

去除不显著影响因素后,建立分级耗时(Y)与输送单元倾角(A),输送速度(B)和进果量(C)之间的二次多项式回归方程,如下:

$$Y = 2.34 + 0.23A - 0.2213B - 0.1538B + 0.1925AC + 0.085BC + 0.5005A^2 + 0.268B^2 + 0.188C^2 \tag{7}$$

三因素对分级耗时影响的主次顺序为:输送单元倾角、输送速度和进果量。交互因素 AC 显著性水平 $P<0.01$,影响极其显著。当输送速度为14 mm/s时,进果量一定,分级耗时随输送单元倾角

的增加呈现先下降后上升的趋势;输送单元倾角一定,分级耗时随进果量的增加呈现先下降后上升的趋势(图6(a))。当输送单元倾角为30°时,进果量一定,分级耗时随输送速度的增加呈现先下降后上升的趋势;输送速度一定,分级耗时随进果量的增加呈现先下降后上升的趋势(图6(b))。

以分级耗时最低为最终优化目标,结合各相关因素边界条件,对建立的二次回归模型进行多因素优化求解,其约束条件为:

$$\begin{cases} 26^\circ \leq A \leq 34^\circ \\ 12 \text{ mm/s} \leq B \leq 16 \text{ mm/s} \\ 2 \text{ 个/s} \leq C \leq 6 \text{ 个/s} \end{cases} \tag{8}$$

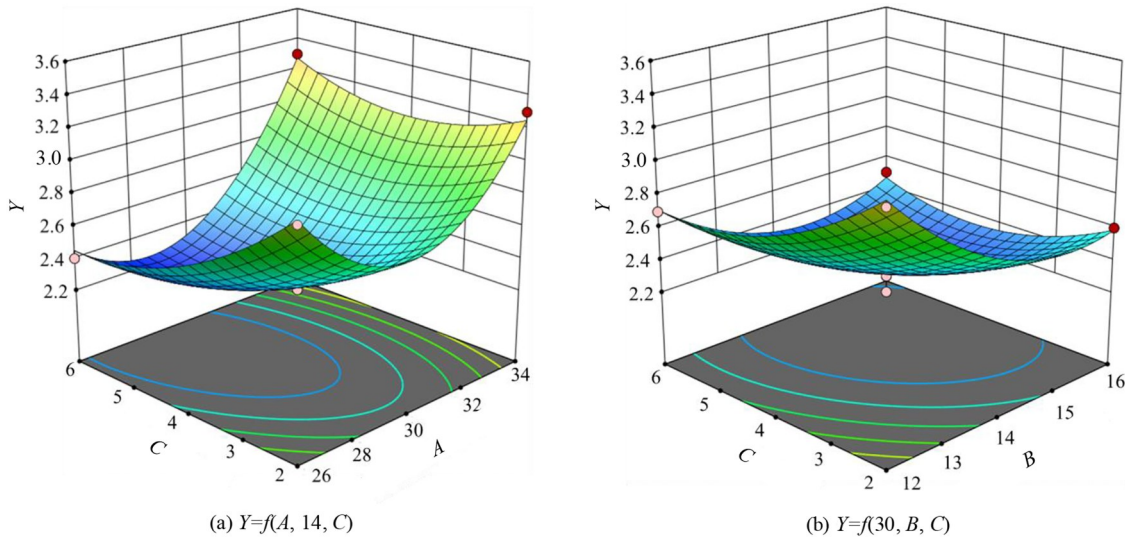
运用Design-Expert优化模块对约束条件进行优化求解得,当输送单元倾角为28.74°,输送速度14.65 mm/s,进果量5.18 个/次时,分级耗时最低,为2.38 s/个。

表 4 分级耗时回归模型相关性分析结果

Table 4 Correlation analysis of the grading time regression model

来源 Source	平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	2.84	9	0.315 6	82.44	<0.000 1
<i>A</i>	0.42	1	0.423 2	110.56	<0.000 1
<i>B</i>	0.39	1	0.391 6	102.31	<0.000 1
<i>C</i>	0.19	1	0.189 1	49.41	0.000 2
<i>AB</i>	0.01	1	0.013 2	3.45	0.105 4
<i>AC</i>	0.15	1	0.148 2	38.72	0.000 4
<i>BC</i>	0.03	1	0.028 9	7.55	0.028 6
<i>A</i> ²	1.05	1	1.050 0	275.54	<0.000 1
<i>B</i> ²	0.30	1	0.302 4	79.00	<0.000 1
<i>C</i> ²	0.15	1	0.148 8	39.88	0.000 4
残差 Residual	0.03	7	0.003 8		
失拟 Lack of fit	0.02	3	0.006 2	2.96	0.160 8
纯误差 Pure error	0.01	4	0.002 1		
总和 Summation	2.87	16			

注： $P<0.01$ 表示影响极显著， $0.01<P<0.05$ 表示影响显著。
Note: $P<0.01$ indicates highly significant effect and $0.01<P<0.05$ indicates significant effect.



A 为输送单元倾斜角度, ($^{\circ}$); B 为输送速度, mm/s; C 为进果量, 个/次; Y 为分级耗时, s/个。
 A, B, C are the transport unit tilt angle ($^{\circ}$), conveying speed (mm/s), and fruit intake (fruits/cycle), respectively; Y is the grading time (s/fruit).

图 6 因素交互作用对分级耗时影响的相应曲面

Fig.6 Response surface showing the effect of factor interactions on grading time

2.3 田间试验

田间试验在杨凌现代农业创新园(108°05′(E), 34°26′(N))进行。输送单元倾角设定为 29°, 输送速度调节至 14.65 mm/s, 同时控制进果量为 5 个/次, 选取 100 个‘徐香’猕猴桃作为试验样本, 进行猕猴桃小

型分级系统田间试验。试验结果表明, 猕猴桃分级系统的分级正确率为 98%, 单个果实分级耗时平均为 1.89 s, 与人工分选对比耗时减少 0.55 s, 受限于单通道输送结构, 整体分级效率尚有提升空间。若在后续研究中改进为多通道输送结构, 可显著提升分级效率^[26]。

3 结 论

本研究针对现有猕猴桃分级设备体积大,无法就地分级等问题,开发了一种由分级装置和手机控制程序组成的猕猴桃小型就地分级系统,分级装置长、宽、高分别为114.3、30.4和62.8 cm,质量7.63 kg。对分级装置进行参数优化,运用Box-Behnken试验设计原理,以输送单元倾角、输送速度和入料口进果量为影响因素,分级耗时为响应值,探究各因素对响应值的影响规律,得到最优参数组合为:输送单元倾角 32.86° ,输送速度13.35 mm/s,进果量5.18个/次。在该优化参数下进行田间试验结果表明,分级系统分级耗时为1.89 s/个,分级准确率达98%。本研究开发的猕猴桃小型就地分级系统具有尺寸小、质量轻、速度快等优势,且分级准确率较高,可以满足猕猴桃田间就地分级需求。

参考文献 References

- [1] 齐飞,李恺,李邵,何芬,周新群.世界设施园艺智能化装备发展对中国的启示研究[J].农业工程学报,2019,35(2):183-195
Qi F, Li K, Li S, He F, Zhou X Q. Development of intelligent equipment for protected horticulture in world[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(2): 183-195 (in Chinese)
- [2] Yang Y Y, Peng J Z, Fan P H. A non-destructive dropped fruit impact signal imaging-based deep learning approach for smart sorting of kiwifruit[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 202: 107380
- [3] Benelli A, Cevoli C, Fabbri A, Ragni L. Ripeness evaluation of kiwifruit by hyperspectral imaging[J]. *Biosystems Engineering*, 2022, 223: 42-52
- [4] 林家豪,张元泽,梁千月,陈耀晖,朱明,李善军.基于视觉与深度学习的猕猴桃无损硬度检测方法[J].农业机械学报,2023,54(10):390-398
Lin J H, Zhang Y Z, Liang Q Y, Chen Y H, Zhu M, Li S J. Non-destructive firmness testing of kiwifruit based on vision-based tactile sensor and fusion learning[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(10): 390-398 (in Chinese)
- [5] Xu L J, Feng Y, Fan Z K, Yun D. Research into the grading method of kiwi fruit based on volume estimation and surface defect[J]. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 2014, 44(3): 93-102
- [6] Mu L T, Liu H Z, Cui Y J, Fu L S, Gejima Y. Mechanized technologies for scaffolding cultivation in the kiwifruit industry: A review[J]. *Information Processing in Agriculture*, 2018, 5(4): 401-410
- [7] Wang J H, Lin Y Q, Li Q C, Lu Z L, Qian J J, Dai H, Pi F W, Liu X D, He Y. Non-destructive detection and grading of chilling injury-induced lignification of kiwifruit using X-ray computer tomography and machine learning[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 218: 108658
- [8] Fu L S, Sun S P, Li R, Wang S J. Classification of kiwifruit grades based on fruit shape using a single camera[J]. *Sensors*, 2016, 16(7): 1012
- [9] Wang F Y, Lv C X, Dong L Z, Li X L, Guo P F, Zhao B. Development of effective model for non-destructive detection of defective kiwifruit based on graded lines[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1170221
- [10] 李光梅,魏新华,李法德,颜世涛,刘果玲.水果综合分选机称重模块的设计与实现[J].农业工程学报,2009,25(2):96-100
Li G M, Wei X H, Li F D, Yan S T, Liu G L. Design and implementation of weighing module for fruit integrative grader[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(2): 96-100 (in Chinese)
- [11] 孙建英,宣传忠,于文波,郝敏,朱晓波.规模化养殖场的羊只智能称重分栏系统设计[J].中国农业大学学报,2020,25(9):64-71
Sun J Y, Xuan C Z, Yu W B, Hao M, Zhu X B. Design of intelligent sheep weighing and grouping system for large-scale sheep farms[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(9): 64-71 (in Chinese)
- [12] Chakraborty S K, Subeesh A, Dubey K, Jat D, Chandel N S, Potdar R, Rao N R N V G, Kumar D. Development of an optimally designed real-time automatic citrus fruit grading - sorting machine leveraging computer vision-based adaptive deep learning model[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 120: 105826
- [13] Pawlowski A, Rodriguez F, Sánchez-Hermosilla J, Dormido S. Fast nonstationary filtering for adaptive weighing system[C]. In: 2015 IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Luxembourg: IEEE, 2015: 1-6
- [14] Wu Z C, Li G, Yang R Z, Fu L S, Li R, Wang S J. Coefficient of restitution of kiwifruit without external interference[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 327: 111060
- [15] 任潇,朱孟东,王立平,宫雅姝,王军,任滨,朱大洲.苹果特征性营养品质指标筛选[J].中国农业大学学报,2024,29(11):12-22
Ren X, Zhu M D, Wang L P, Gong Y S, Wang J, Ren B, Zhu D Z. Screening study of apple nutritional quality indexes[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(11): 12-22 (in Chinese)
- [16] 王松磊,刘民法,何建国,贺晓光,吴龙国.红枣自动快速无损检测分级机研究[J].农业机械学报,2014,45(9):79-83,95
Wang S L, Liu M F, He J G, He X G, Wu L. Study of rapid and automatic non-destructive testing grader for red jujubes[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 79-83, 95 (in Chinese)
- [17] 姜松,王国江,漆虹,吕日琴,朱婷,蒋玉香.禽蛋大小头自动定向排列系统设计[J].农业机械学报,2012,43(6):113-117
Jiang S, Wang G J, Qi H, Lü R Q, Zhu T, Jiang Y X. Design of automatic orientation system of blunt and tip sides of eggs[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(6): 113-117 (in Chinese)
- [18] GB/T 40743—2021 猕猴桃质量等级[S].北京:中国标准出版社,2021
GB/T 40743—2021 Quality grades of kiwifruit[S]. Beijing: China Standard Press, 2021 (in Chinese)
- [19] 展小云,赵军,税军峰,赵向辉,郭明航.全自动称重式雨量计的研制及性能分析[J].农业工程学报,2021,37(19):122-128
Zhan X Y, Zhao J, Shui J F, Zhao X H, Guo M H. Development and performance analysis of an automatic weighing rain gauge[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(19): 122-128 (in Chinese)
- [20] 王树才,吴曼琳,吴闯.鸡蛋电子称量分级包装生产线自动控制系统设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(3):265-271
Wang S C, Wu M L, Wu C. Design and test of automatic control system for egg electronic weighing and grading packaging production line[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(3): 265-271 (in Chinese)
- [21] Huang Z, Benyoucef M. A systematic literature review of mobile application usability: Addressing the design perspective[J]. *Universal Access in the*

Information Society, 2023, 22(3): 715-735

- [22] Zhou Z X, Song Z Z, Fu L S, Gao F F, Li R, Cui Y J. Real-time kiwifruit detection in orchard using deep learning on Android™ smartphones for yield estimation[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 179: 105856
- [23] Massah J, Vakilian K A, Shabanian M, Shariatmadari S M. Design, development, and performance evaluation of a robot for yield estimation of kiwifruit[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 185: 106132
- [24] 武振超, 杨睿哲, 王文奇, 傅隆生, 崔永杰, 张昭. 异常水培生菜自动分选系统设计及试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(7): 282-290
- Wu Z C, Yang R Z, Wang W Q, Fu L S, Cui Y J, Zhang Z. Design and experiment of sorting system for abnormal hydroponic Lettuce [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(7): 282-290 (in Chinese)
- [25] 陈小冬, 胡志超, 王冰, 游兆延, 彭宝良, 胡良龙. 单垄单行甘薯联合收获机薯秧分离机构设计与参数优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(14): 12-21
- Chen X D, Hu Z C, Wang B, You Z Y, Peng B L, Hu L L. Design and parameter optimization of sweet-potato-stalk separator for single row sweet potato combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 12-21 (in Chinese)
- [26] 左兴健, 武广伟. 猕猴桃自动分级设备设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(S1): 287-295
- Zuo X J, Wu G W. Design and experiment on automatic grading machine for kiwi[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(S1): 287-295 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 孔朔琳, 博士研究生, 就读于西北农林科技大学机械与电子工程学院。主要研究方向为猕猴桃与葡萄果园农机与感知模型优化应用与研究。



通讯作者简介: 傅隆生, 教授, 博士生导师。从事智慧农业技术与装备研究, 主持国家自然科学基金3项、国际合作项目5项, 第一作者/通讯SCI论文34篇(ESI高被引8篇), 授权国际专利2项、中国发明专利14项, 制定标准2项, 获省部级科技奖2项。中国科学院一区Top期刊 *Computers and Electronics in Agriculture* 主编。入选 World Top 2% Scientists(全球前2%科学家榜单)、爱思唯尔“中国高被引学者”榜单、中国知网高被引学者Top1%。