

苹果采收平台输送装置设计与优化试验

王金星^{1,2} 陈子旭¹ 范国强^{1,3} 杨化伟^{1,4} 孙经纬¹ 芦明旻¹

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省农业装备智能化工程实验室, 泰安 271018;
3. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018; 4. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250010)

摘要: 针对国内苹果园人工采收效率低和损伤率高的问题,设计了一种苹果采收平台输送装置,实现苹果自动输送作业。首先通过对苹果输送过程进行运动学分析,确定影响苹果机械损伤的主要因素及各因素的试验取值范围。其次根据 Box - Behnken 试验设计原理,以输送速度、果托倾角、果托形状为试验因素,以损伤率为试验指标,对苹果采收平台输送装置的作业参数进行试验研究,建立试验指标与试验因素之间的回归模型。最后分析了各因素对试验指标的影响规律,并根据回归模型对试验因素进行综合优化。试验结果表明:当输送速度为 0.2 m/s、果托倾角为 30°、果托形状为圆台体时,苹果损伤率为 3.69%,苹果机械损伤明显低于未经参数优化的苹果采收平台输送装置,输送作业效果最好。研究结果可为苹果园采收平台的结构优化和输送作业参数控制提供参考。

关键词: 苹果; 采收平台; 作业参数; 损伤率; 优化试验

中图分类号: S225.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0176-09

Design and Optimization Test of Conveying Device for Apple Harvesting Platform

WANG Jinxing^{1,2} CHEN Zixu¹ FAN Guoqiang^{1,3} YANG Huawei^{1,4} SUN Jingwei¹ LU Mingyang¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence, Taian 271018, China
3. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Taian 271018, China
4. Shandong Academy of Agricultural Machinery Science, Ji'nan 250010, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and high damage rate of artificial harvesting in domestic apple orchards, an apple harvesting platform conveying device was designed to realize the automatic conveying of apples. Firstly, through the kinematic analysis of apple conveying process, the main factors affecting apple mechanical damage and the test value range of each factor were determined. Secondly, according to the Box - Behnken test design method, taking the conveying speed, the dip angle of the fruit tray and the shape of the fruit tray as the test factors and the damage rate as the test index, the operating parameters of the conveying device of the apple harvesting platform were tested and studied, and the regression model between the test index and the test factors was established. Finally, the influence law of each factor on the test index was analyzed, and the test factors were comprehensively optimized according to the regression model. The results showed that when the conveying speed was 0.2 m/s, the dip angle of the fruit tray was 30°, and the shape of the fruit tray was a circular platform, the apple damage rate was 3.69%, which was significantly lower than the mechanical damage of the apple conveying device without parameter optimization, and the conveying effect was the best. The results could provide a reference for the structural optimization of apple orchard harvesting platform and the control of transportation parameters.

Key words: apple; harvesting platform; operation parameters; damage rate; optimization test

0 引言

现阶段,随着我国苹果产业的栽培面积和产量不断提高,苹果产业发展过程中的很多问题也日渐凸显。果园机械化程度低等因素严重制约果业经济的发展,其中苹果机械化采摘是苹果果园机械化管理的关键环节,可以大幅度提高采摘效率和采摘安全系数^[1-3]。但在机械化收获过程中,苹果与采收平台输送装置碰撞造成的机械损伤也随着增加,影响采摘后苹果的储存、销售等一系列问题,从而直接影响苹果园种植经济效益。因此,减少苹果园机械化采摘过程中苹果损伤是增加果园种植效益的重要方面。国内学者对苹果损伤进行了不同程度的试验研究,卢立新等^[4]针对苹果减损包装开展了振动强度、缓冲包装结构和放置层数对苹果损伤影响研究,提出非线性黏弹性动态流变模型和多层果实跌落冲击模型;李小昱等^[5]对苹果损伤机理进行了研究;冯哲等^[6]进行了苹果力学特性对苹果损伤的影响研究;杨贞等^[7]对机械化采收中苹果损伤原因进行分析归类,并提出改进措施。目前多数学者对苹果损伤的研究多集中在苹果动态力学特性及损伤机理等方面^[8],对机械化采收过程中由采收平台输送装置碰撞所造成的机械损伤研究较少。苹果机械化采收过程中产生机械损伤的原因主要是装置机械结构设计和工作参数配置不合理。

针对以上苹果机械损伤产生原因,本文对采收平台输送装置输送过程苹果机械损伤机理进行分析,确定影响苹果机械损伤的主要因素,并选定影响因素的合理取值范围,建立仿真试验模型,进行采收平台输送装置优化试验,以期为苹果园采收平台的结构优化和输送作业参数控制提供参考。

1 整体结构与工作原理

1.1 果园采摘农艺要求

目前,渤海湾、西北黄土高原等地区新建的现代果园多采用矮砧宽行密植种植模式。现代化果园果树株距 L_c 一般为1~1.2 m,定植行距 L_r 为3.5~4 m,密度为0.24~0.33 株/ m^2 ,树高 L_h 为2.5~3.5 m,冠幅 L_b 为1~1.5 m,主枝开张角度 α_r 为110~130°,种植模式^[9-12]如图1所示。果树多采用高纺锤形修剪方式,行间作业空间大,适宜机械作业。根据矮砧宽行密植种植模式苹果园果树实际生长状况和园艺特点,一般在秋季中后期苹果成熟,在10月下旬—11月上旬进行苹果的采摘,期间昼夜温差在10℃以上有利于糖分积累和果实着色,使得采摘苹果品质更佳^[13-16]。

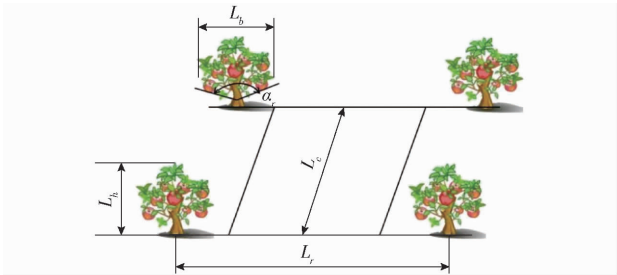


图1 现代化果园种植模式

Fig.1 Planting model of modern orchard

1.2 整机结构

为提高苹果采收作业效率,降低采收损伤率,结合矮砧宽行密植种植模式苹果园的数据分析,对苹果采收平台输送装置进行了设计与优化试验,整机结构如图2所示,主要由机架、苹果输送装置、采摘工作台、驱动底盘等构成,其中苹果输送装置包括末端输送带,汇集输送带和垂直输送带。苹果采收平台主要技术参数如表1所示。

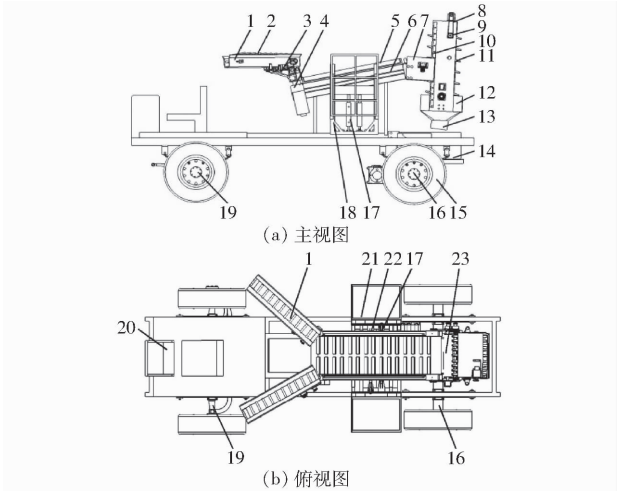


图2 苹果采收平台输送装置结构示意图

Fig.2 Structural diagrams of conveying device for apple harvesting platform

- 1.末端输送装置 2.果托 3.单活塞液压缸 4.旋转机构 5.挡板 6.汇集输送装置 7.提升装置 8.链条 9.链轮 10.提升齿条 11.圆台果托 12.收集箱 13.输果管 14.果箱 15.车轮 16.后驱动桥 17.纵向液压缸 18.机架 19.前驱动桥 20.驾驶台 21.采摘工作台 22.横向液压缸 23.滚筒

1.3 工作原理

采摘作业前,根据果园果树行距及生长状态,通过机架的液压伸缩装置调整采摘工作台的开度及高度,并预设各输送带的输送速度范围。采摘作业时,驾驶员驾驶采摘装备控制行进速度及方向,两侧采摘工位上的采摘工作人员将采摘下的苹果放到末端输送带上,经两侧末端输送带输送集中到汇集输送带,沿倾斜固定角度的汇集输送带输送到垂直输送带,在垂直输送带果托托举下垂直向下输送到果箱,同时随着箱内果实堆积,提升装置通过齿轮齿条

表 1 主要技术参数
Tab.1 Main technical parameters

技术参数	数值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 700×1 390×1 900
底盘离地高度/mm	800
作业速度/(m·s ⁻¹)	0~1.2
配套动力/kW	25
输送效率/(个·min ⁻¹)	35~50
果箱容积/L	384
工作台延伸开度/mm	0~800
工作台抬升高度/mm	0~800
垂直输送装置提升高度/mm	0~1 500
末端输送带线速度/(m·s ⁻¹)	0~0.2
汇集输送带线速度/(m·s ⁻¹)	0~0.6
垂直输送带线速度/(m·s ⁻¹)	0~0.6

啮合传动将垂直输送带向上提升,防止输送带刮伤苹果,装箱完成后再将输送带复位进行新一轮装箱作业,实现自动输送作业。

通过液压系统来控制采摘工作台的开度及高度。液压系统由 2 个横向和 2 个纵向的单活塞杆液压缸构成,横向液压缸控制工作台的开度范围,纵向液压缸控制工作台的高度范围。采摘作业人员可以在工作台上完成不同高度苹果的采摘作业,具有可靠性高、安全系数高的特点。

2 关键部件设计优化

2.1 汇集输送装置

汇集输送装置是苹果输送系统的主要组成部分。主要由输送带、直流电机、辊筒、果托、机架等组成,如图 3 所示。汇集输送带的工作内容是将两侧采摘的苹果进行汇集并输送到垂直输送带上,进行下一步装箱作业。

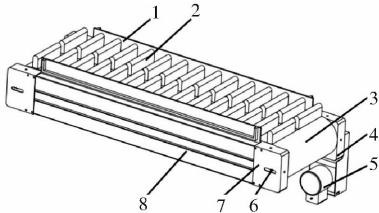


图 3 汇集输送装置结构图

Fig.3 Structure diagram of collecting and conveying device
1. 挡板 2. 果托 3. 输送带 4. 电机保护罩壳 5. 电机 6. 滚筒 7. 机架 8. 套头

根据对矮砧宽行密植种植模式苹果园的数据分析,结合采摘工作台的设计尺寸,设计确定汇集输送带宽度为 300 mm、厚度为 6 mm,两端辊筒轴间距为 1 742 mm,汇集输送带与水平面倾斜夹角为 13°。为避免输送过程中苹果的滑落和降低输送过程中苹果的损伤率,设定以质量 250 g、直径 80 mm 的苹果为

标准样品,在汇集输送带上热熔果托,果托高度为 40 mm、间距为 90 mm。

汇集输送带将两侧采摘的苹果进行汇集,输送过程中输送带会受到不同运行阻力的影响,所以电机选型是汇集输送带的一项重要设计,电机功率直接影响输送带输送速率,进而影响采摘效率。根据汇集输送带结构参数对其动力装置进行计算选型^[17-18]。

主动辊转速 n 计算公式为

$$n = \frac{60L}{\pi Dt} \tag{1}$$

式中 L ——运输机长度,mm

D ——主动辊直径,mm

t ——输送带运输机输送时间,s

将运输机长度 $L = 1\,900\text{ mm}$ 、主动辊直径 $D = 160\text{ mm}$ 、输送带运输机最小输送时间 $t = 3\text{ s}$ 代入式(1),求得主动辊转速 n 为 76 r/min,综合考虑苹果与输送带之间的摩擦损耗等因素,所以主动辊额定转速最小为 90 r/min。

汇集输送带输送过程中所受的运行阻力为

$$F_U = F_H + F_N + F_{S1} + F_{S2} + F_{ST} \tag{2}$$

式中 F_U ——传动辊筒所需圆周驱动力,N

F_H ——主要阻力,N

F_N ——附加阻力,N

F_{S1} ——主要特种阻力,N

F_{S2} ——附加特种阻力,N

F_{ST} ——倾斜阻力,N

汇集输送带装置向上倾斜安装,求出 F_{ST} 为负值,此处正负表示倾斜阻力的方向。将数值代入后,分别求得 F_H 为 768.23 N, F_N 为 130.95 N, F_{S1} 为 131.56 N, F_{S2} 为 71.62 N, F_{ST} 为 94.08 N,输送带匀速转动,输送苹果加速区域较短,其他阻力忽略不计。因此需要输送带运输机总拉力 F_U 为 1 196.44 N。

汇集输送带电机需要输出动力为

$$P = F_U v_1 \tag{3}$$

式中 P ——电机功率,W

v_1 ——输送带速度,取 0.6 m/s

计算所得电机需要输出最大功率 P 为 718 W,所以选用东洋 M 系列 M7YK-750S 型三相直角减速电机,电机相关参数如表 2 所示。

2.2 垂直输送装置

垂直输送装置主要由机架、皮带、果托、辊筒、驱动电机、齿条、提升装置、收集箱、输果管等组成,提升装置主要由减速电机、输送滚筒、动力输入轴、侧板、链条、齿轮轴、齿轮等组成,分别如图 4 所示。

垂直输送带与汇集输送带通过提升装置相连

表 2 M7YK-750S 型三相直角减速电机相关参数

Tab.2 Relevant parameters of M7YK-750S three-phase right angle reduction motor

参数	电机长度/ mm	额定转速/ (r·min ⁻¹)	额定电压/ V	额定电流/ A	额定功率/ W	额定扭矩/ (mN·m)	减速比
数值	243	1 350	220	3.7	750	5 000	1:30

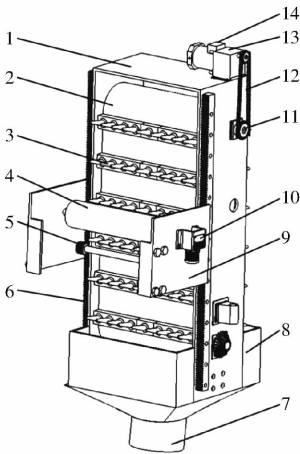


图 4 垂直输送装置结构图

Fig.4 Structure diagram of vertical conveyor

1. 机架 2. 输送皮带 3. 果托 4. 滚筒 5. 齿轮 6. 齿条 7. 输
果管 8. 收集箱 9. 提升装置 10. 提升电机 11. 链轮 12. 链
条 13. 减速器 14. 输送电机

接,垂直输送带由提升装置一侧电机驱动滚轮,通过链条转动驱动齿轮齿条啮合传动提升,在控制系统控制下使垂直输送带随果箱内苹果增多沿直线导轨向上提升,实现自动化落果作业。为降低苹果采摘后输送过程中的损伤率,在垂直输送带上热熔有成排的锥形果托,考虑到苹果经汇集输送带输送后受惯性作用做斜向上抛物线运动,所以与汇集输送带相比,垂直输送带上果托之间间距较大,果托高度较高。当苹果由汇集输送带输送到垂直输送带过程中,由提升装置侧板、输送滚筒和锥形果托组成密闭空间使得苹果不易滚落。以质量 250 g,直径 80 mm 的苹果作为标准样品,经过分析设计后,设定垂直输送带两端辊筒轴间距为 940 mm,输送带宽度为 350 mm,果托间距为 120 mm,高度为 105 mm。

垂直输送带通过提升装置由一侧电机驱动完成提升,提升装置采用齿轮齿条啮合传动,工作过程中两侧齿轮通过齿轮轴固定不动,齿条通过啮合齿轮的转动进行上下移动,垂直输送装置依靠两侧齿轮齿条啮合传动。所以齿轮齿根处应力最大,最容易断裂;齿轮齿顶处位移量最大,最容易发生变形。

齿根处弯曲应力 σ_F 计算公式为

$$\sigma_F = \frac{2K_F T_1 Y_{Fa} Y_{sa} Y_{\varepsilon}}{\phi_d m_1^3 z_1^2}$$

(4)

其中

$$Y_{\varepsilon} = 0.25 + \frac{0.75}{\varepsilon_{\alpha}}$$

(5)

式中 K_F ——弯曲疲劳强度载荷系数,取 1.6
 T_1 ——齿轮传递的转矩,N·mm
 Y_{Fa} ——齿形系数,取 2.24
 Y_{sa} ——齿轮应力修正系数,取 1.77
 Y_{ε} ——弯曲疲劳强度重合度系数,取 0.72
 ε_{α} ——齿轮端面重合度,取 1.61
 ϕ_d ——齿宽系数,取 0.6
 m_1 ——齿轮模数,取 4 mm
 z_1 ——齿轮齿数,取 23

代入数值计算可得齿轮齿根处弯曲应力为 12.41 MPa。

齿顶处接触应力 σ_H 计算公式为

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{2K_H T_1}{\phi_d d^3} \frac{u \pm 1}{u} Z_H Z_E Z_{\varepsilon}}$$

(6)

式中 Z_H ——区域系数,取 0.87
 Z_E ——弹性影响系数,MPa^{1/2}
 Z_{ε} ——接触疲劳强度重合度系数,取 0.89
 K_H ——接触疲劳强度载荷系数,取 1.25
 d ——齿轮分度圆直径,取 92 mm
 u ——传动比,由于是齿轮齿条啮合传动机构,取无穷大

将所有计算结果代入得齿顶处接触应力 σ_H 为 56.48 MPa。齿轮齿条采用 40Cr 钢锻造,[σ_F] 为 365.7 MPa,[σ_H] 为 548.6 MPa,热处理方法为调质后中频淬火加低温回火,热处理后齿面硬度在 48 ~ 55 HRC,齿芯部硬度在 241 ~ 286 HBS,满足平台工作较高可靠性要求。齿面接触强度高、耐磨性能好;齿芯保持调质后的韧性、耐冲击能力好、承载能力较高。

2.3 苹果输送过程运动学分析

由于苹果输送的运动学分析与损伤率密切相关,以输送过程中的苹果为研究对象,对其整个运动过程进行运动学分析尤为重要。苹果在输送过程中出现 2 种运动状态,一种是苹果在果托固定下相对静止输送,称为固定输送过程;另一种是苹果经过滚筒滚落到垂直输送带果托上,称为运动输送过程。

在运动输送过程中,苹果在汇集输送带输送下获得初始速度,速度方向沿输送带方向,大小与输送带线速度一致,当苹果输送到汇集输送带末端后,苹果在重力作用下经过滚筒滚落到垂直输送带果托

上,随垂直输送带转动继续进行输送作业。当苹果的初始速度一定时,在重力作用下作斜向上抛物线运动,这个过程中苹果产生主要碰撞损伤,一部分是苹果与滚筒碰撞滚落到果托上,另一部分是苹果与果托发生碰撞。由于滚筒采用密度为 941 kg/m^3 的 HDPE 材料,材质较松软,苹果与滚筒撞击产生的应力相比于苹果与果托撞击产生的应力较小,因此本文对苹果与滚筒的碰撞不做分析,只选取苹果与果托碰撞过程做运动分析。在苹果运动输送的整个过程中,将其看作一个质点,以即将与汇集输送带分离的苹果为研究对象进行运动学分析,如图 5、6 所示。

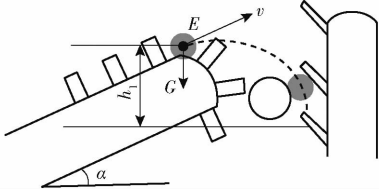


图 5 苹果运动输送过程的运动学模型
Fig. 5 Kinematic model of apple conveying process

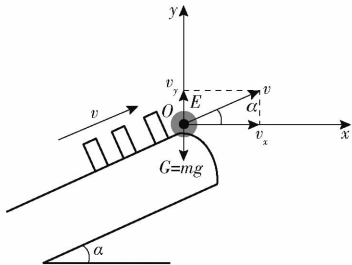


图 6 苹果离开输送带瞬时受力分析图
Fig. 6 Analysis diagram of instantaneous stress of apple leaving conveyor belt

以苹果与汇集输送带分离点为原点,水平方向的正方向为 x 轴正方向,重力方向的反方向为 y 轴正方向建立平面直角坐标系,其中设苹果质点为点 E 。假设苹果在原点 O 处脱离开输送带作斜向上抛物线运动,则在苹果即将脱离点 O 的瞬间,苹果的线速度与输送带点 O 处的绝对速度相等。

此时,苹果与果托间碰撞应力为(不考虑能量损耗情况下)

$$F = \frac{m}{r} \left(\frac{1}{2} v_2^2 + gh_1 \right) \tag{7}$$

式中 F ——苹果与果托间碰撞应力, N
 m ——单个苹果平均质量, kg
 r ——果托径向形变量, m
 v_2 ——点 E 苹果瞬时速度, m/s
 g ——重力加速度, m/s^2
 h_1 ——原点与苹果落点垂直距离, m

综合分析苹果的运动输送过程,苹果与果托的碰撞应力主要由 v 和 h_1 决定,所以影响苹果碰撞应力的因素主要有汇集输送带输送速度、垂直输送带

果托倾角及果托形状,进而影响苹果损伤率。因此,基于 ADAMS 运动学仿真,采用正交试验方法,研究输送速度、果托倾角及果托形状对苹果损伤率的影响。

3 仿真试验设计与分析

3.1 仿真试验设计

在 SolidWorks 软件中建立苹果采收平台输送装置三维模型,并导入 ADAMS 仿真软件中进行运动学仿真,首先定义模型中各个零部件的材料属性,添加模型的驱动和约束,然后对苹果模型设定运动参数,并在苹果模型质点处建立标记点,获得苹果输送过程中标记点的运动轨迹和碰撞受力情况。输送仿真试验如图 7 所示。

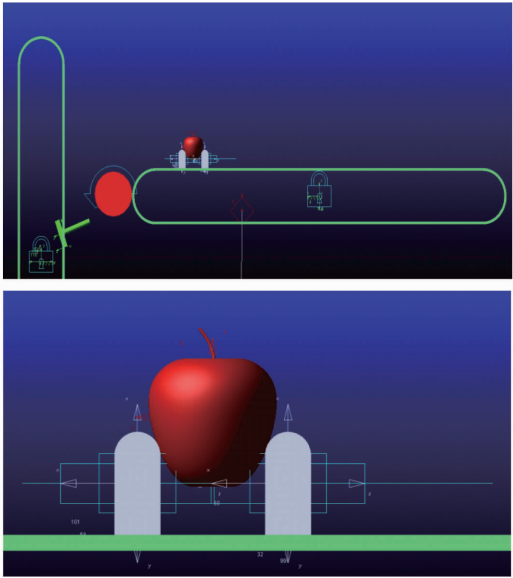


图 7 ADAMS 仿真模型图
Fig. 7 ADAMS simulation model

对苹果硬度进行标定,苹果硬度是果实表面单位面积上所能承受的压力,是果肉受压时的抗力,其大小主要决定于果肉细胞壁所含果胶的多少。苹果内部由于光照、水分等环境条件的影响,果胶分布不均,造成同一个苹果不同位置硬度也不同^[19-22]。所以对选用苹果的顶部、肩部、中部分别进行独立试验,避免试验结果相互影响。试验地点为山东农业大学 8 号楼 321 实验室,选用 GY-3 型硬度计作为试验设备,选择大小均匀,无伤完整的烟台红富士苹果作为试验材料,将 30 个苹果按 10 个一组分为 3 组,每组单独测量,测量完成后取每个部位硬度数据平均值。硬度计压缩应力计算公式为

$$Q = \frac{F_1}{S} \tag{8}$$

式中 Q ——被测水果硬度
 F_1 ——测力弹簧对果实的压力, N

S ——果实的受力面积, mm^2

根据硬度计测量结果进行等量代换(结果保留到小数点后一位), 压头直径为 $\phi 7.9_0^{+0.02} \text{ mm}$, 得到苹果的屈服应力。通过试验数据分析得出, 大致相同生长环境下同种苹果不同位置硬度也不同, 顶部和肩部硬度相近, 大于中部。测量结果中最高屈服应力 49.3 N , 最低屈服应力 38.7 N 。标定 38.7 N 为苹果输送过程中的应力损伤界限。

对苹果在相同参数模型输送过程进行多次重复仿真试验, 改变模型参数重复进行, 得到不同条件下苹果所受碰撞应力, 计算苹果输送过程中的损伤率, 苹果损伤率计算公式为

$$\eta = \frac{Z_1}{Z} \times 100\%$$

(9)

式中 η ——苹果损伤率, %
 Z ——相同模型参数条件下试验次数, 取 130
 Z_1 ——相同模型参数条件下大于标定应力试验次数

3.2 回归模型建立与检验

为研究汇集输送带线速度、垂直输送带上果托倾角及果托形状三因素对苹果损果率的影响, 采用正交试验方法进行试验^[23-27], 试验因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Test factors level and coding

编码值	因素		
	输送速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	果托倾角 $\beta/(\circ)$	果托形状
-1	0.2	10	正方体
0	0.3	20	圆柱体
1	0.4	30	圆台体

使用 Design-Expert 8.0.6 Trial 软件, 根据 Box - Behnken 试验设计原理, 设计三因素三水平的响应面试验。试验共 17 个试验点, 具体试验设计方案及响应值如表 4 所示, 表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为编码值。

通过 Design-Expert 8.0.6 Trial 软件对数据样本进行多元回归分析, 得到最优碰撞应力的回归方程为

$$Y = 7.84 + 2.61X_1 - 0.39X_2 - 0.67X_3 - 0.19X_1X_2 - 0.39X_1X_3 + 0.19X_2X_3 + 0.29X_1^2 - 0.27X_2^2 - 0.46X_3^2$$

(10)

由表 5 分析和各因素 P 值得, 各因素对碰撞应力的影响由大到小依次为: 输送带线速度 X_1 、果托形状 X_3 、果托倾角 X_2 。响应面模型中的苹果损伤率模型的 P 小于 0.01, 说明该回归模型高度显著; 失拟项均大于 0.05, 说明无失拟因素存在, 表明回归方程拟合度高, 可用该回归模型替代真实试验结

果进行分析; 决定系数 R^2 为 0.888 4, 说明有 11.16% 的变异不能由该模型解释, 模型拟合程度好, 可用来进行试验预测。

表 4 试验设计方案及响应值

Tab. 4 Test design scheme and response value

序号	因素			苹果损伤率/%
	输送速度 X_1	果托倾角 X_2	果托形状 X_3	
1	-1	1	0	5.34
2	-1	0	-1	5.34
3	0	0	0	7.69
4	0	1	-1	7.50
5	-1	0	1	4.61
6	1	-1	0	10.77
7	-1	-1	0	5.34
8	0	1	1	6.15
9	1	0	-1	11.54
10	0	0	0	8.46
11	0	0	0	7.69
12	0	0	0	7.69
13	0	-1	1	6.92
14	0	-1	-1	8.46
15	1	0	1	9.23
16	0	0	0	7.69
17	1	1	0	10.00

表 5 回归方程方差分析

Tab. 5 Analysis results of variance of regression equation

方差来源	自由度	平方和	均方	P
模型	9	73.84	8.20	<0.000 1 **
X_1	1	63.79	63.79	<0.000 1 **
X_2	1	0.03	0.03	0.549 1
X_3	1	7.86	7.86	<0.000 1 **
X_1X_2	1	0.00	0.00	0.784 0
X_1X_3	1	0.04	0.04	0.489 2
X_2X_3	1	0.00	0.00	1.000 0
X_1^2	1	2.03	2.03	0.001 4 **
X_2^2	1	0.00	0.00	0.742 7
X_3^2	1	0.02	0.02	0.628 5
残差	7	0.55	0.08	
失拟值	3	0.52	0.17	0.008 2 **
误差	4	0.04	0.00	
综合	16	74.39		

注: ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

3.3 模型交互项解析

根据回归模型做出苹果损伤率与各因素之间关系的响应面图, 响应曲面的形状能够反映出交互因素作用的强弱关系。

图 8a 显示了输送速度及果托倾角对苹果损伤率的交互影响, 由图 8a 可以看出, 果托倾角对苹果损伤率影响较小, 随着输送速度减小, 苹果损伤率呈现降低的变化趋势, 当输送速度控制在 0.2 m/s 、果

托倾角在 30° 时,苹果损伤率呈现较低水平。这主要是由于随着输送速度减小,苹果经过汇集输送带时获得更小的初速度,获得的动能更小,在自身重力作用下与果托发生碰撞时应力更小,苹果损伤率也

更低。由响应曲面形状及其等高线密度可以看出,输送速度和果托倾角的交互作用对苹果损伤率影响较显著,输送速度对苹果损伤率的影响程度大于果托倾角,与方差分析结果相同。

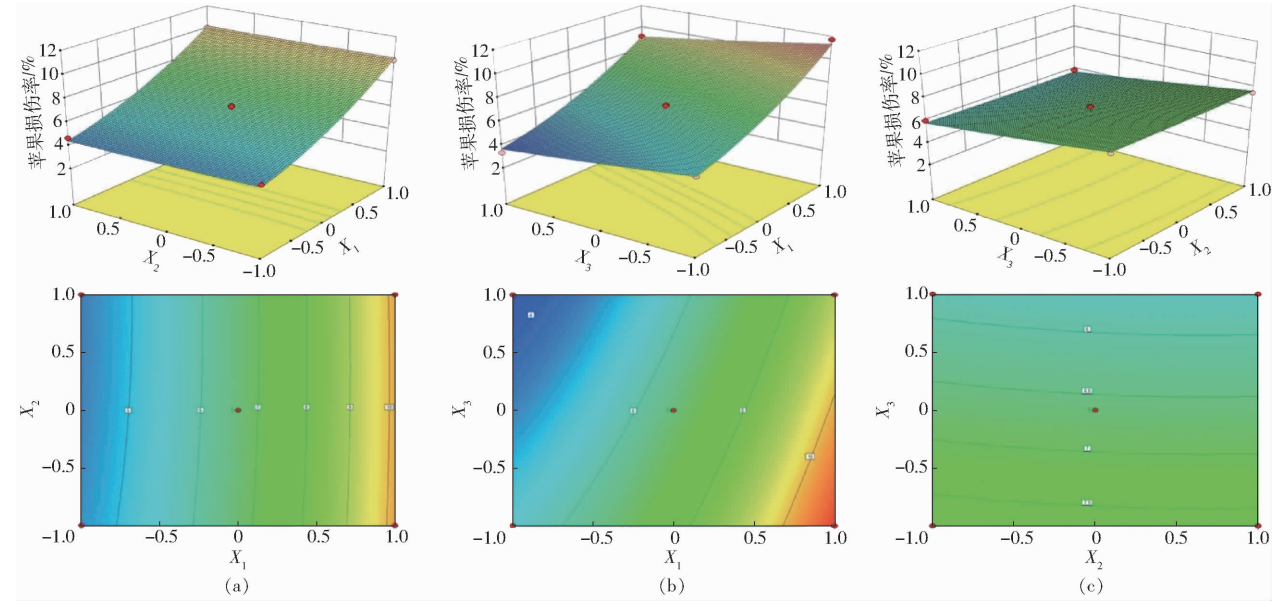


图 8 各因素对苹果损伤率的影响
Fig. 8 Influence of various factors on apple damage rate

图 8b 显示了输送速度及果托形状对苹果损伤率的交互影响,当输送速度固定在低水平时,苹果损伤率随着果托形状水平的增加而增大,当果托形状水平为圆台体时,苹果损伤率小于 5%。分析原因主要是由于果托形状采用圆台体,苹果经过斜抛运动落到果托上,受两侧果托反方向支持力作用,受力更加平衡,减少苹果横向滚动,苹果损伤率更低。由响应曲面形状及其等高线密度可以看出,输送速度对苹果损伤率的影响程度大于果托形状,与方差分析结果相同。

图 8c 显示了果托形状及果托倾角对苹果损伤率的交互影响,由图 8c 可以看出,随着果托倾角的增加,苹果损伤率的变化较小,有略微下降趋势。随着果托形状水平的增加,苹果损伤率有降低趋势,变化较为明显。两因素对苹果损伤率影响权重有所差异,果托形状对苹果损伤率的影响大于果托倾角,这与方差分析结果相同。

3.4 试验参数优化与验证

为最大程度降低改进后平台输送苹果的损伤率,提升平台作业性能,应用 Design-Expert 8.0.6 Trial 软件的寻优功能,对影响因素与性能指标的回归方程模型进行优化求解,计算最优参数值:输送速度为 0.2 m/s 、果托倾角为 29.97° 、果托形状为圆台体,在此参数条件下苹果损伤率为 3.85%。

根据苹果园采收平台输送作业参数优化结果,

对最优作业参数组合开展 ADAMS 仿真验证试验,检验回归模型及最优组合的可靠性,为了便于实际应用,对优化参数进行适当圆整,设定输送速度为 0.2 m/s 、果托倾角为 30° 、果托形状为圆台体。仿真试验进行 5 次重复试验取平均值,结果如表 6 所示。对比结果表明,验证试验的苹果损伤率平均值为 3.69%,较优化前苹果损伤率 4.61% ~ 11.54% 有明显降低。

表 6 优化结果与试验值对比
Tab.6 Comparison of optimization results with actual values

项目	输送速度 $v/(m\cdot s^{-1})$	果托倾角 $\beta/(^{\circ})$	果托 形状	损伤率/ %	相对 误差/%
预测值	0.2	29.97	圆台体	3.85	4.16
试验值	0.2	30.00	圆台体	3.69	

试验结果表明,试验值与预测值相对误差为 4.16%,实测值与预测值较为吻合,说明回归模型可靠。

4 结论

(1) 针对于矮砧宽行密植种植模式苹果园苹果采摘后的输送作业,设计一种配合人工采摘的苹果采收平台输送装置作业方案,设计了采收平台的整机结构,对关键部件进行了选型和校核优化,对苹果输送过程中的碰撞损伤进行了仿真试验。

(2) 为获得苹果采收平台输送装置的最佳作业

参数,根据 Box - Behnken 试验设计原理,采用三因素三水平响应面分析方法,将输送速度、果托倾角、果托形状设为自变量,将苹果损伤率设为响应值,建立了自变量与响应值之间的多元二次多项式回归方程。通过对模型交互作用及响应曲面分析,得出影响损伤率的因素由大到小依次为:输送速度、果托形状、果托倾角。

(3)建立了苹果采收平台输送装置作业参数优化模型,得到了寻优后输送速度、果托倾角、果托形状的最佳参数组合:输送速度为 0.2 m/s、果托倾角 30°、果托形状为圆台体。仿真验证试验表明,该参数条件下苹果损伤率为 3.69%,苹果机械损伤明显低于未经参数优化的苹果采收平台输送装置,满足苹果收获作业需求。

参 考 文 献

[1] 郑永军,江世界,陈炳太,等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报,2020,51(11):1-20.
ZHENG Yongjun, JIANG Shijie, CHEN Bingtai, et al. Research progress of orchard mechanization technology and equipment in hilly and mountainous areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):1-20. (in Chinese)

[2] 韩振浩,朱立成,苑严伟,等. 山地果园履带底盘坡地通过性能分析与优化设计[J]. 农业机械学报,2022,53(5):413-421,448.
HAN Zhenhao, ZHU Licheng, YUAN Yanwei, et al. Performance analysis and optimization design of track chassis on sloping ground in mountain orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):413-421,448. (in Chinese)

[3] 刘志杰,刘恒,毛文菊,等. 面向多机器人的传统苹果园无线通信信号传播特性研究[J]. 农业机械学报,2022,53(8):283-293.
LIU Zhijie, LIU Heng, MAO Wenju, et al. Wireless signal propagation characteristics of traditional apple orchard for multi-robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):283-293. (in Chinese)

[4] 卢立新,王志伟. 多层苹果刚性跌落冲击模型与冲击响应研究[J]. 包装工程,2007(3):27-29,50.
LU Lixin, WANG Zhiwei. Research on rigid fall impact model and impact response of multilayer apple[J]. Packaging Engineering,2007(3):27-29,50. (in Chinese)

[5] 李小昱,王为,朱俊平,等. 苹果机械损伤应力松弛特性的研究[J]. 农业机械学报,1997,28(增刊):70-74.
LI Xiaoyu, WANG Wei, ZHU Junping, et al. Study on stress relaxation characteristics of mechanical damage in apple[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1997,28(Supp.):70-74. (in Chinese)

[6] 冯哲,吴杰. 基于感压胶片测量技术的苹果静压接触应力及损伤分析[J]. 食品与机械,2015,31(5):186-189.
FENG Zhe, WU Jie. Analysis of electrostatic contact stress and damage of apple based on pressure-sensitive film measurement technology[J]. Food and Machinery,2015,31(5):186-189. (in Chinese)

[7] 杨贞,韩冰,靳红玲,等. 果园采摘平台传送装箱系统设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(11):115-119.
YANG Zhen, HAN Bing, JIN Hongling, et al. Design and test of conveyor packing system for orchard picking platform[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(11):115-119. (in Chinese)

[8] 吕昊曦,胡召田,于泳超,等. 果园高位作业平台自动调平前馈 PID 控制方法[J]. 农业工程学报,2021,37(18):20-28.
LÜ Haotun, HU Zhaotian, YU Yongchao, et al. Feedforward PID control method for automatic leveling of orchard high-level operation platform[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(18):20-28. (in Chinese)

[9] 郑永军,陈炳太,吕昊曦,等. 中国果园植保机械化技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2020,36(20):110-124.
ZHENG Yongjun, CHEN Bingtai, LÜ Haotun, et al. Research progress on mechanization technology and equipment of orchard plant protection in China[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(20):110-124. (in Chinese)

[10] 朱新华,李旭东,高翔,等. 自走式果园有机肥条铺机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):136-146.
ZHU Xinhua, Li Xudong, GAO Xiang, et al. Design and test of self-propelled orchard organic fertilizer spreader[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):136-146. (in Chinese)

[11] 张宏建,徐春保,刘双喜,等. 自动调节深度式果园双行开沟施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(1):62-72.
ZHANG Hongjian, XU Chunbao, LIU Shuangxi, et al. Design and test of double row furrow fertilizer applicator with automatic depth adjustment in orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(1):62-72. (in Chinese)

[12] 邱海飞,吴松林. 传动滚筒承载能力计算与分析[J]. 机械传动,2013,37(3):76-77,87.
QIU Haifei, WU Songlin. Calculation and analysis of bearing capacity of transmission drum[J]. Mechanical Transmission, 2013,37(3):76-77,87. (in Chinese)

[13] 欧阳玉平,孙哈,洪添胜,等. 果园运输机钢丝绳损伤试验平台设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(7):118-128.
OUYANG Yuping, SUN Han, HONG Tiansheng, et al. Design and test of orchard conveyor steel wire rope damage test platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(7):118-128. (in Chinese)

[14] 郝朝会,杨学军,刘立晶,等. 果园多功能动力底盘设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(12):66-73,92.
HAO Chaohui, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Design and test of orchard multifunctional power chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):66-73,92. (in Chinese)

[15] 周俊,胡晨. 密植果园作业机器人行间定位方法[J]. 农业机械学报,2015,46(11):22-28.
ZHOU Jun, HU Chen. Inter row positioning method for dense orchard operation robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(11):22-28. (in Chinese)

[16] 丁素明,傅锡敏,薛新宇,等. 低矮型自走式果园喷雾机动力底盘设计[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊1):100-106.
DING Suming, FU Ximin, XUE Xinyu, et al. Design of low self-propelled orchard spray power chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.1):100-106. (in Chinese)

- [17] 朱余清, 洪添胜, 吴伟斌, 等. 山地果园自走式履带运输车抗侧翻设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 19-23.
ZHU Yuqing, HONG Tiansheng, WU Weibin, et al. Anti rollover design and simulation of self-propelled crawler transporter in mountain orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 19-23. (in Chinese)
- [18] SAEYA W, ENGELEN K, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow manure injection, part 1: modelling of the depth control system[J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(2):146-154.
- [19] SAEYA W, WALLAYS C, RAMON H, et al. An automatic depth control system for shallow slurry injection, part 2: control design and field validation[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(2):161-170.
- [20] 李善军, 邢军军, 张衍林, 等. 7YGS-45 型自走式双轨道山地果园运输机[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8):85-88.
LI Shanjun, XING Junjun, ZHANG Yanlin, et al. 7YGS-45 self-propelled double track mountain orchard conveyor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 85-88. (in Chinese)
- [21] 冯娟, 刘刚, 王圣伟, 等. 采摘机器人果实识别的多源图像配准[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3):197-203.
FENG Juan, LIU Gang, WANG Shengwei, et al. Multi-source image registration for fruit recognition of picking robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 197-203. (in Chinese)
- [22] 姜红花, 牛成强, 刘理民, 等. 果园多风管风送喷雾机风量调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2):298-307.
JIANG Honghua, NIU Chengqiang, LIU Limin, et al. Design and test of air volume control system for orchard multi duct air spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 298-307. (in Chinese)
- [23] 刘双喜, 徐春保, 张宏建, 等. 果园开沟施肥机机架优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1):113-122.
LIU Shuangxi, XU Chunbao, ZHANG Hongjian, et al. Optimization design and test of orchard furrow fertilizing machine frame [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 113-122. (in Chinese)
- [24] 束怀瑞. 苹果学[M]. 北京:中国农业出版社, 1999:514-518.
- [25] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007:235-243.
- [26] 景亮, 王瑞, 刘慧, 等. 基于双目相机与改进 YOLOv3 算法的果园行人检测与定位[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 34-39, 25.
JING Liang, WANG Rui, LIU Hui, et al. Pedestrian detection and location in orchard based on binocular camera and improved YOLOv3 algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 34-39, 25. (in Chinese)
- [27] 朱新华, 赵伟, 伏胜康, 等. 自解捆式果园秸秆覆盖机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10):223-232.
ZHU Xinhua, ZHAO Wei, FU Shengkang, et al. Design and test of self unbundling orchard straw mulcher[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 223-232. (in Chinese)

(上接第 117 页)

- [23] 缪小花. 穴盘苗移栽机新型取苗装置的设计与参数优化[D]. 镇江:江苏大学, 2014.
MIAO Xiaohua. Design and parameter optimization of a new type of seedling picking device for plug seedling transplanter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2014. (in Chinese)
- [24] 杨传华, 方宪法, 杨学军, 等. 基于 PLC 的蔬菜钵苗移栽机自动输送装置[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1):19-23, 18.
YANG Chuanhua, FANG Xianfa, YANG Xuejun, et al. Automatic delivery mechanism of potted-seedling for vegetable transplanter based on PLC[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 19-23, 18. (in Chinese)
- [25] 袁挺, 王栋, 文永双, 等. 蔬菜移栽机气吹振动复合式取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10):80-87.
YUAN Ting, WANG Dong, WEN Yongshuang, et al. Design and experiment of air-blowing combined with vibration type seedlings unloading mechanism of vegetable transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10):80-87. (in Chinese)
- [26] 郭林强. 穴盘苗全自动移栽机气动取苗装置的设计与试验[D]. 镇江:江苏大学, 2016.
GUO Linqiang. Design and experiment of pneumatic seedling picking device for automatic plug seedling transplanter[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2016. (in Chinese)
- [27] 董哲. 蔬菜穴盘苗自动取苗装置的设计与研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2015.
DONG Zhe. Design and research of automatic seedling picking device for vegetable pot seedlings[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [28] 徐静云. 基于苗钵-根系综合分析的取苗末端执行器设计及育苗工艺优化[D]. 镇江:江苏大学, 2015.
XU Jingyun. Design of pick-up end-effector and optimization of seedling cultivation based on seeding-bowl-root multiple properties[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2015. (in Chinese)
- [29] 韩绿化, 毛罕平, 严蕾, 等. 穴盘育苗移栽机两指四针钳夹式取苗末端执行器[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7):23-30.
HAN Lühua, MAO Hanping, YAN Lei, et al. Pincette-type end-effector using two fingers and four pins for picking up seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7):23-30. (in Chinese)
- [30] 胡建平, 潘杰, 陈凡, 等. 基于 EDEM-RecurDyn 的指夹式取苗爪仿真优化与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5):75-85, 301.
HU Jianping, PAN Jie, CEHN Fan, et al. Simulation optimization and experiment of finger-clamping seedling picking claw based on EDEM-RecurDyn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 75-85, 301. (in Chinese)