

三自由度苹果采摘机械臂动力学分析与轻量化设计

赵雄^{1,2} 曹功豪¹ 张鹏飞³ 马锃宏¹ 赵立军⁴ 陈建能^{1,2}

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 浙江省种植装备技术重点实验室, 杭州 310018;

3. 杭州职业技术学院, 杭州 310018; 4. 重庆文理学院智能制造工程学院, 重庆 402160)

摘要: 针对工业机械臂苹果采摘时运动规划复杂、自由度多、控制难等问题, 本文研制了一款轻量化结构的三自由度苹果采摘机械臂。首先, 针对苹果采摘工作要求完成了机械臂的结构设计与运动学分析。机械臂采用平行四边形结构, 通过后置动力源减小整机转动惯量, 且臂展长, 工作空间大, 运动时树枝干扰小, 更适用于苹果采摘。其次, 采用牛顿-欧拉方程建立动力学模型, 完成机械臂苹果采摘仿真, 通过动力学模型的理论数据, 以减轻机械臂自身质量为优化目标, 对臂及其关键部件应力及应变进行分析, 计算不同轻量化方案下的应力、应变, 从而选取最优的轻量化方案。通过对比轻量化前后机械臂仿真数据, 骨棒型轻量化方案驱动力矩峰值分别降低 21 N·m 和 15 N·m, 均降低约 20%, 整机质量下降 1.8 kg, 降低 32.1%, 且轻量化后机械臂保持良好工作能力。根据优化结果, 搭建了三自由度苹果采摘机械臂物理样机, 通过试验得到大、小臂最大驱动力矩为 92.63 N·m, 基本符合仿真结果, 验证了动力学模型的正确性。

关键词: 苹果; 采摘; 三自由度机械臂; 轻量化设计; 动力学模型

中图分类号: S225.93; TP34

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)07-0088-11

OSID:



Dynamic Analysis and Lightweight Design of 3-DOF Apple Picking Manipulator

ZHAO Xiong^{1,2} CAO Gonghao¹ ZHANG Pengfei³ MA Zenghong¹ ZHAO Lijun⁴ CHEN Jianneng^{1,2}

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

2. Key Laboratory of Transplanting Equipment and Technology of Zhejiang Province, Hangzhou 310018, China

3. Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China

4. College of Intelligent and Manufacturing Engineering, Chongqing University of Arts and Sciences, Chongqing 402160, China)

Abstract: Aiming at the problems of complex motion planning, multiple degrees of freedom and difficult control of industrial manipulator apple picking, human hand picking was simulated and a lightweight 3-DOF apple picking manipulator was developed. Firstly, the structural design and kinematic analysis of the manipulator were completed for the requirements of apple picking. The mechanical arm adopted a parallelogram structure, which reduced the rotational inertia of the whole machine through a rear power source, and had a long arm span, a large working space, and small branch interference during movement, which was more suitable for apple picking. Secondly, the Newton-Euler equation was used to establish the dynamic model, and the apple picking simulation of the manipulator was completed. Through the theoretical data of the dynamic model, the stress and strain of the arm and its key components were analyzed to reduce the mass of the manipulator itself. The stress and strain under different lightweight schemes were calculated to select the optimal lightweight scheme. By comparing the simulation data of the manipulator before and after lightweight, the peak driving torque of the bone rod lightweight scheme was reduced by 21 N·m and 15 N·m, respectively, both of which were reduced by about 20%. The weight of the whole machine was reduced by 1.8 kg, which was reduced by 32.1%, and the lightweight manipulator maintained good working ability. According to the optimization results, a

收稿日期: 2022-11-21 修回日期: 2022-12-30

基金项目: 浙江省重点研发计划项目(2021C02021)、浙江省“三农九方”科技协作计划项目(2022SNJF017)、重庆市科学技术局农业农村领域重点研发项目(cstc2021jsex-gksbX0003)和杭州市农业与社会发展科研一般项目(202203B08)

作者简介: 赵雄(1982—),男,教授,博士,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: zhaoxiong@zstu.edu.cn

通信作者: 陈建能(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备与技术研究,E-mail: jiannengchen@zstu.edu.cn

physical prototype of a 3-DOF apple picking manipulator was built. The maximum driving torques of the large and small arms were 92 N·m and 63 N·m through experiments, which basically conformed to the simulation results and verified the correctness of the dynamic model.

Key words: apple; picking; 3-DOF manipulator; lightweight design; dynamic modeling

0 引言

中国为苹果种植大国,产量位居世界第一。苹果采摘环节作业量占整个生产环节作业量的50%~70%^[1]。目前,采摘环节主要依靠人工完成,而由于果树较高,果实成熟期较短,使得采摘劳动强度大,危险性高^[2]。随着科技的不断进步,劳动力的短缺,采用机械臂代替人工从事繁琐危险的工作已经成为发展的趋势^[3]。日益增长的市场需求对机械臂的采摘效率也提出了更高的要求^[4]。

在苹果采摘实际应用中,多自由度工业机械臂^[5-7]运动规划复杂,采摘作业时运动学逆解约束过多,导致可采摘空间狭小,并且电机与减速器安装于关节上存在机械臂笨重、转动惯量大、刚度低、动态性能不佳等缺点^[8]。三自由度苹果采摘机械臂在关节型机械臂基础上,采用平行四边形结构,使得末端执行器在机械臂运行过程中始终保持水平,引入多个平行可控四连杆结构,将动力后置使机械臂关节处的转动惯量降低,增加了整个机械臂的结构刚度,便于轻量化设计,且臂展长工作空间大,自由度少,运动规划简单^[9-11]。在实际工作中三自由度采摘机械臂引入平行可控杆组,依靠各个杆件之间协调运作完成动作,各个杆件直接影响机械臂的性能,且对整个机械臂动作的完整性及安全性都至关重要。目前设计三自由度苹果采摘机械臂采用类比和经验的方法,通常存在结构笨重、体积大、负载较小等问题^[12-13]。

本文使用牛顿-欧拉法建立动力学模型,通过ADAMS动力学仿真验证其正确性,通过计算各个关节最大扭矩,对机械臂结构进行优化,获得最优结构方案,并为电机选型及电机的精确控制奠定基础,为最优控制方法提供可靠的理论依据,提升工作性能^[14-15]。本文基于动力学分析结果,运用有限元方法,在保证机械臂刚度与强度的前提下,通过改变结构形状或尺寸,降低机械臂质量,实现轻量化设计。

1 机械臂结构与运动学分析

1.1 任务空间分析

为了适应我国苹果复杂的、非结构化^[16]的作业环境,在设计采摘机械臂臂长时要充分考虑苹果的果实分布,且采摘机械臂要有较大的采摘空间。采

摘空间的形状、大小是决定工作能力的关键因素^[17-19]。

在果园里随机选取50棵苹果树,果园结构如图1所示,对苹果树的行距、树高、枝叶伸展宽度进行测量,得到果树高度为3.0~3.8 m,树枝的伸展宽度为1.1~1.7 m,行距为3.0~4.0 m。记录了每棵苹果树的果实纵向分布与果实横向分布情况,如表1所示。纵向分为4个区(H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4),分别为0~0.8 m、0.8~1.6 m、1.6~2.0 m和2.0~3.2 m。横向分为3个区域(L_1 、 L_2 和 L_3),分别为距树干0~0.2 m、0.2~0.6 m和大于0.6 m。



图1 果园结构

Fig. 1 Orchard structure

表1 不同区域具有不同苹果分布密度的苹果树数量
Tab. 1 Number of apple trees with different apple distribution densities in different regions 棵

苹果密度/(个·棵 ⁻¹)	H_1	H_2	H_3	H_4	L_1	L_2	L_3
0~10	10	3	22	50	14	0	34
10~20	15	11	12	0	21	7	14
>20	25	36	16	0	15	43	2

从表1可看出,约75%果实分布低于1.8 m,70%以上的果实集中分布在树枝横向宽度0.5~1.2 m,即机械臂前后臂展至少达到1.2 m,才能对果树深处果实进行采摘,考虑到底盘车可将机械臂基座前后伸展,行程为0.8 m,机械臂末端位置伸出最远与最近距离差值大于0.4 m时,就能满足苹果采摘要求。同时由于底盘车的限制,苹果树果实距地面0.3 m时,底盘车会干涉机械臂运动,此时机械臂姿态怪异,采摘困难,因此综合考虑距离地面0.3 m以下的苹果不进行采收,机械臂上下极限位置差为1.4 m左右,才能覆盖苹果树的大部分果实结果位置。

分析表1可知,机械臂的任务空间^[20]要能覆盖75%果实分布区域,尺寸为1 200 mm×1 000 mm×

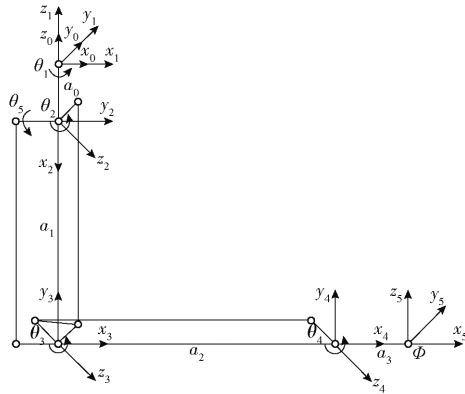


图5 三自由度苹果采摘机械臂 D-H 连杆坐标系

Fig. 5 D-H linkage coordinate system of 3-DOF apple picking manipulator

根据 D-H 法, 连杆之间的位移长度为 a_{i-1} ; 连杆之间相对位置距离为 d_i ; 参数 α_{i-1} 表示关节轴 z_{i+1} 与关节轴 z_i 之间的扭转角; 参数 θ_i 表示关节 i 由初始值绕关节轴 z 旋转的角度。由于最后一个连杆始终保持水平, 最终三自由度采摘机械臂的 D-H 连杆参数表如表 2 所示。

表 2 三自由度苹果采摘机械臂 D-H 连杆参数
Tab. 2 Parameters of D-H connecting rod of 3-DOF apple picking manipulator

连杆序号 i	a_{i-1}/mm	$\alpha_{i-1}/(^{\circ})$	d_i/mm	$\theta_i/(^{\circ})$	关节变量
1	0	0	0	θ_1	θ_1
2	0	90	0	θ_2	θ_2
3	a_1	0	0	θ_3	θ_3
4	a_2	0	0	θ_4	θ_4
5	a_3	-90	0	0	0

各个相邻的连杆坐标系间的转换矩阵为

$$\begin{aligned}
 {}^0_1\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^1_2\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} s_2 & c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -c_2 & s_2 & 0 & -a_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2_3\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} -s_3 & -c_3 & 0 & a_1 \\ c_3 & -s_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^3_4\mathbf{T} = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_2 \\ s_4 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4_5\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$${}^0_5\mathbf{T} = {}^0_1\mathbf{T} {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T} {}^4_5\mathbf{T} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned}
 r_{11} &= c_1 c_{234} & r_{12} &= -s_1 & r_{13} &= -c_1 s_{234} \\
 P_x &= c_1 (a_2 c_{23} + a_3 c_{234} + a_1 s_2) \\
 r_{21} &= s_1 c_{234} & r_{22} &= c_1 & r_{23} &= -s_1 s_{234} \\
 P_y &= s_1 (a_2 c_{23} + a_3 s_{243} + a_1 s_2) \\
 r_{31} &= s_{234} & r_{32} &= 0 & r_{33} &= c_{234} \\
 P_z &= a_3 s_{234} - a_1 c_2 - a_0 + a_2 s_{23}
 \end{aligned}$$

式中 c_i 表示 $\cos\theta_i$, s_i 表示 $\sin\theta_i$, c_{ij} 表示 $\cos(\theta_i + \theta_j)$, s_{ij} 表示 $\sin(\theta_i + \theta_j)$, c_{ijk} 表示 $\cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, s_{ijk} 表示 $\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$, i, j, k 取 1, 2, 3, 4。

由于连杆 i_5 始终保持水平状态且随连杆 i_1 转动, 即末端连杆坐标系 O_5 相对于基座坐标系 $O_0x_0y_0z_0$ 的位姿变换矩阵为 ${}^0_5\mathbf{T}$ 。为了校核结果的正确性, 计算当 $\theta_1 = 0^{\circ}, \theta_2 = 0^{\circ}, \theta_3 = 0^{\circ}$ 时, 变换矩阵 ${}^0_5\mathbf{T}$ 为

$${}^0_5\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_2 + a_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -a_0 - a_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

与图 5 所示的情况完全一致。

1.4 逆运动学分析

逆运动学求解实现了任务空间的轨迹映射到关节空间, 为实现伺服驱动电机的控制奠定基础。

(1) 求解 θ_1

式(3)两边同乘 ${}^0_1\mathbf{T}^{-1}(\theta_1)$ 得

$${}^0_1\mathbf{T}^{-1}(\theta_1) {}^0_5\mathbf{T} = {}^1_2\mathbf{T}(\theta_2) {}^2_3\mathbf{T}(\theta_3) {}^3_4\mathbf{T}(\theta_4) {}^4_5\mathbf{T}(0)$$

$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1_5\mathbf{T} \quad (5)$$

$${}^1_5\mathbf{T} = {}^1_2\mathbf{T} {}^2_3\mathbf{T} {}^3_4\mathbf{T} {}^4_5\mathbf{T} \quad (6)$$

令式(5)、(6)两端元素(2,4)对应相等, 得

$$-P_x s_1 + P_y c_1 = 0$$

利用三角代换得

$$\theta_1 = \pm \arctan \frac{P_y}{P_x}$$

正负号对于 θ_1 有两种可能的解, 由于对 θ_1 限定了关节变量的转动角度与方向, 故只能选定其中唯一的解, 故

$$\theta_1 = \arctan \frac{P_y}{P_x} \quad (7)$$

(2) 求解 θ_2 与 θ_3

令式(5)、(6)两端元素(1,3)与(3,3)对应

相等

$$\begin{cases} r_{13}c_1 + r_{23}s_1 = -s_{234} \\ r_{33} = c_{234} \end{cases}$$

由式(1)、(2)解得

$$\theta_2 + \theta_3 = \arctan \frac{-r_{23}c_1 - r_{13}s_1}{r_{33}} \quad (8)$$

令式(5)、(6)两端元素(1,4)与(3,4)对应相等

$$\begin{cases} P_x c_1 + P_y s_1 = c_{23} a_2 + s_2 a_1 + a_3 s_{234} \\ P_z = a_3 s_{234} - c_2 a_1 - a_0 - s_{23} a_2 \end{cases}$$

得出

$$\theta_2 = \arctan \frac{a}{b} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} a &= P_x c_1 + P_y s_1 - a_2 c_{23} - a_3 s_{234} \\ b &= a_3 s_{234} - P_z - a_2 s_{23} - a_0 \end{aligned}$$

联立式(8)、(9)解得

$$\theta_3 = \arctan \frac{-r_{23}c_1 - r_{13}s_1}{r_{33}} - \theta_2 \quad (10)$$

三自由度苹果采摘机械臂的运动学反解为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ，由 θ_2 、 θ_3 与 θ_4 、 θ_5 之间的关系可得出关节电机

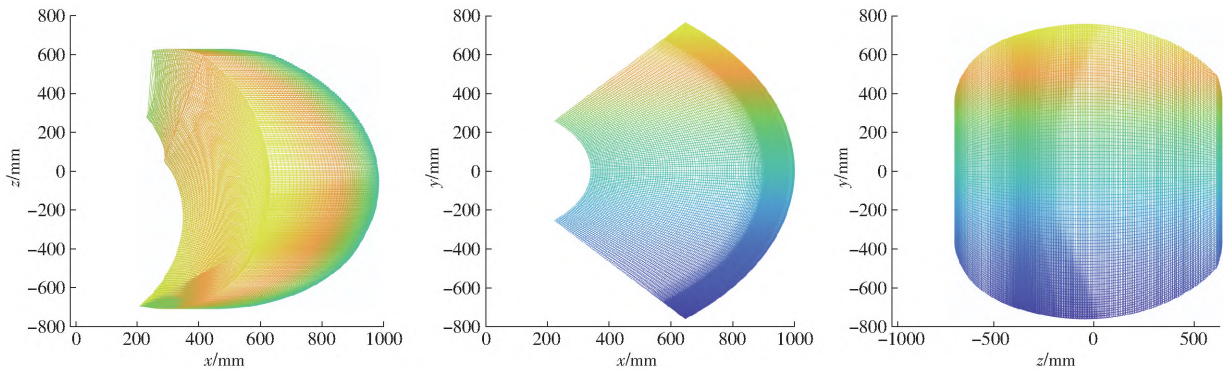


图6 三自由度苹果采摘机械臂工作空间平面图

Fig.6 3-DOF apple picking manipulator working space plan

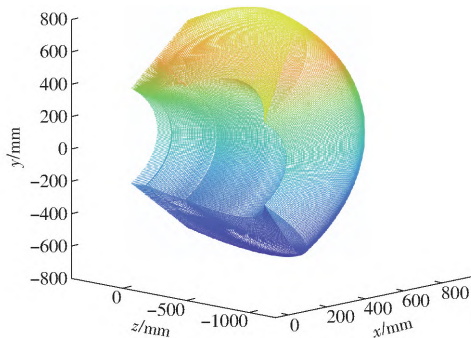


图7 三自由度苹果采摘机械臂三维工作空间

Fig.7 Three-dimensional workspace of 3-DOF apple picking manipulator

该工作空间为考虑安装结构约束限制与自身结构尺寸限制后的实际工作空间,覆盖了苹果采摘所需求的目标工作空间,满足实际采摘要求。

转角 θ_1 、 θ_2 、 θ_5 与末端空间坐标之间的关系,为后续控制机械臂提供理论依据。

1.5 工作空间绘制

根据苹果树的生长状况,果实大部分生长在中间区域,顶部与底部有少量果实,需将机械臂工作空间大范围布置在中间区域,便于苹果采摘。由于结构尺寸与连杆之间关节转角的限制,根据关节转角实际工作范围的边界,在 Matlab 软件中设置旋转关节、大臂关节、小臂关节角度的范围如表3所示。

表3 各关节极限转角

Tab.3 Limit angle of rotation of each joint (°)

关节	最大值	最小值
腰部旋转	50	-50
大臂	115	-15
小臂	101	30

根据机械臂各个关节的角度限制,运用 Matlab 软件编程绘制出机械臂的平面工作空间与三维工作空间如图6、7所示。

2 机械臂动力学分析与建模

2.1 机械臂动力学分析

三自由度苹果采摘机械臂动力学仿真过程中,视模型为刚体。在旋转关节上施加驱动力,视旋转关节做定轴转动^[22]。

在质量与角速度一定的情况下,应使机械臂各零部件受力最大时机械臂臂展达到最长,臂的力矩最大。

运动时大臂和小臂关节一般联合运动,机械臂的臂展尽可能长且关节驱动力矩达到最大值的情况下,才能得到在联合仿真时的受力曲线。而大臂和小臂关节联合加减速运动,机械臂的臂展和驱动力矩产生的合加速度都不断变化。因此,需要在二者协同作用下找到动态力和力矩的最大值。

为了模拟真实采摘路径,3 个电机同时驱动且在某时刻机械臂处于臂展最长时的运动状态,将牛顿欧拉法建立的模型与 ADAMS 建立的仿真模型都在此轨迹下进行仿真运算,得出每个关节电机的扭矩图,进行对比分析。

2.2 基于牛顿欧拉法机械臂动力学建模

机械臂动力学是研究机械臂运动过程中,各个关节受力情况。对三自由度采摘机械臂的动力学研究方法很多,主要有牛顿欧拉法、凯恩法、高斯原理法和拉格朗日法^[23-24],这些方法都是用来描述机械臂的动态特性,主要是运用公式进行推导,利用 Matlab 编程计算^[25]。但需要简化设置质心转动惯量与质心位置,与实际情况有一定差距。本文采用牛顿欧拉法推导三自由度采摘机械臂动力学方程。为了计算简便,增大安全系数,假定机械臂的各个连杆的质量集中在连杆的末端,加上各个轴承部件与螺栓等其他部件,质量分别为 $m_1、m_2、m_3$ 。机械臂在工作空间内无负载时运动,则令⁴ $f_4 = {}^4n_4 = 0$,另外连杆与臂及其它部件考虑重力影响,则⁰ $\dot{v}_0 = g$ (重力加速度),方向向上,即底座以加速度 g 做向上加速运动,从而抵消重力造成的影响。

由关节运动计算关节力矩的完整算法由两部分组成。第 1 部分是对每个连杆应用牛顿-欧拉方程,从连杆 1 到连杆 n 向外迭代计算连杆的速度和加速度。第 2 部分是从连杆 n 到连杆 1 向内迭代计算连杆间的相互作用力和力以及关节驱动力矩。对于转动关节来说,这个算法归纳如下:

(1) 计算速度加速度向外迭代($i:0 \rightarrow 3$)

$$\begin{aligned}
 {}^{i+1}\omega_{i+1} &= {}^i T^i \omega_i + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} \\
 {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} &= {}^i T^i \dot{\omega}_i + {}^i T^i \omega_i + \ddot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} + \dot{\theta}_{i+1} {}^{i+1}\dot{\hat{Z}}_{i+1} \\
 {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^i T^i (\omega_i \times {}^i P_{i+1} + \dot{\omega}_i \times ({}^i \omega_i \times {}^i P_{i+1}) + {}^i v_i) \\
 {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} &= {}^i T^i (\omega_{i+1} \times {}^{i+1} P_{C_{i+1}} + \\
 & {}^{i+1}\omega_{i+1} \times ({}^{i+1}\omega_{i+1} \times {}^{i+1} P_{C_{i+1}}) + {}^{i+1}v_{i+1}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 {}^{i+1}F_{i+1} &= m_{i+1} {}^{i+1}\dot{v}_{i+1} \\
 {}^{i+1}N_{i+1} &= C_{i+1} I_{i+1} {}^{i+1}\dot{\omega}_{i+1} + {}^{i+1}\omega_{i+1} \times C_{i+1} I_{i+1} {}^{i+1}\omega_{i+1} \\
 \text{其中 } {}^{i+1}\hat{Z}_{i+1} &= [0 \quad 0 \quad 1] \\
 \text{(2) 末端到基座递推关系}(i:4 \rightarrow 1) \\
 {}^i f_i &= {}^i T^{i+1} f_{i+1} + {}^i F_i \\
 {}^i n_i &= {}^i N_i + {}^i T^{i+1} n_{i+1} + {}^i P_{C_i} \times {}^i F_i + {}^i P_{i+1} \times {}^i T^{i+1} f_{i+1} \\
 \tau_i &= {}^i n_i^T {}^i \hat{Z}_i
 \end{aligned}$$

- 式中 ${}^i \omega_i$ ——关节坐标系角速度
- ${}^i \dot{\omega}_i$ ——关节坐标系角加速度
- ${}^{i+1} T$ ——由旋转矩阵 ${}^{i+1} T$ 变换得到的矩阵
- $\dot{\theta}_i$ ——关节 i 角速度
- $\ddot{\theta}_i$ ——关节 i 角加速度
- ${}^i \dot{v}_i$ ——关节坐标系线加速度
- ${}^i P_{C_i}$ ——质心位置矢量
- $C_i I_i$ ——连杆的质心转动惯量
- ${}^i P_{i+1}$ ——坐标系原点坐标矢量
- τ_i ——关节 i 的力矩
- ${}^i f_i$ ——连杆间相互作用力
- ${}^i n_i$ ——连杆间相互作用力矩

将机械臂动力学数学模型编写成 Matlab 程序,在 Matlab 的 Simulink 中通过搭建的逆运动学求解模型求解关节力矩。Simulink 搭建的三自由度机械臂动力学求解模型如图 8 所示。

根据苹果采摘的实际要求,将苹果采摘中一条路径的三维坐标数组输入到动力学模型中,且运动过程中,各个关节的角速度和角加速度是变量,设 3 个关节的峰值角速度为 $60(^\circ)/s$,角加速度为 $600(^\circ)/s^2$,速度特性为梯形速度曲线,可计算出每个关节的驱动力矩曲线。

2.3 机械臂 ADAMS 仿真模型建立

在 SolidWorks 中建立机械臂各个部件的三维实体模型并且完成对各个部件的装配关系,将模型简化,去除非必要零件,将电机与减速器简化成质量

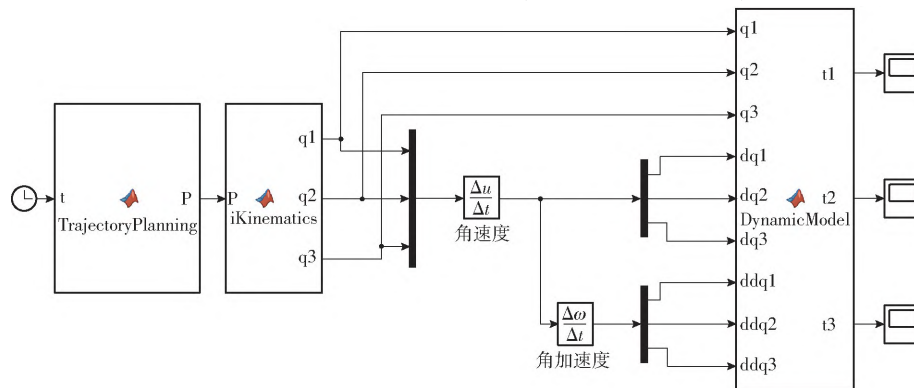


图 8 Simulink 动力学仿真模型
Fig. 8 Simulink dynamics simulation model

点,导入到 ADAMS 中,在 ADAMS 中添加各个部件的材料属性,添加各个关节处运动副,施加载荷设置仿真参数。如图 9 所示,对机械臂采摘苹果过程中不同姿态运动进行仿真分析,分析其在危险姿态下各个关节在加减速运动过程中的受力情况。

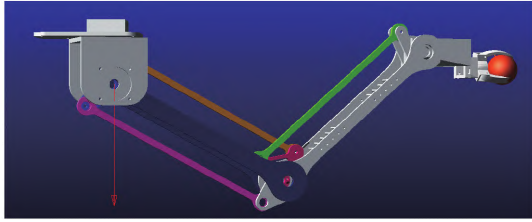


图 9 ADAMS 动力学仿真模型

Fig. 9 ADAMS dynamics simulation model

将 ADAMS 中得到的仿真结果与牛顿欧拉法理论递推得出的数值曲线进行对比,如图 10 所示,可以得到:两者分析结果的曲线趋势相同,在峰值上存在细微差别,两种方法得出的驱动力矩存在 $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 左右的差距,证明了理论仿真模型的正确性。存在 $7 \text{ N}\cdot\text{m}$ 左右驱动力矩差距,是由于 ADAMS 仿真模型是经过简化的,理论仿真模型设置的转动惯量数值也有细微的差别导致,且误差在合理范围内。从曲线分析结果可知,在苹果采摘过程中,机械臂处于危险姿态时大臂所受的驱动力矩为最大驱动力矩,最大力矩为 $105 \text{ N}\cdot\text{m}$,符合实际情况,从曲线上还可以得出其余两个电机的最大扭矩,可为后续电机选型与轻量化设计提供理论依据。

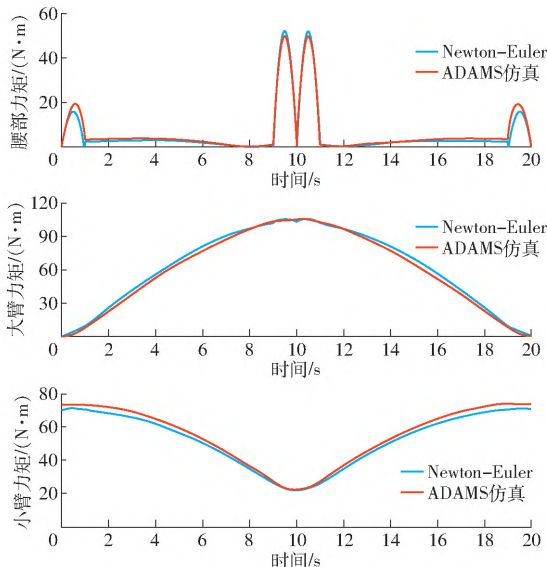


图 10 Newton-Euler 与 ADAMS 动力学仿真模型对比曲线

Fig. 10 Newton-Euler and ADAMS dynamic simulation model comparison curves

3 机械臂有限元分析与轻量化设计

3.1 有限元分析

机械臂作为典型的悬臂梁结构,自身质量对机

械臂有重要影响,减小机械臂质量,并且同时满足机械臂刚度与动态性能的要求,是机械臂设计研究的重要内容,一般通过设计合理的整机结构与选择高强度轻量的材料两方面来实现机械臂的轻量化。

根据在 ADAMS 中机械臂苹果采摘过程中各关节加减速阶段,零件受力和力矩最大值导入到 ANSYS 软件中进行有限元分析。分析步骤如图 11 所示。

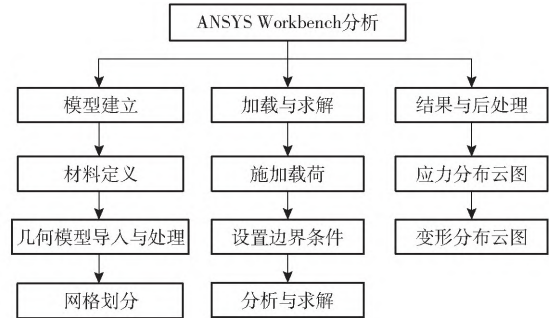


图 11 有限元分析步骤

Fig. 11 Finite element analysis steps

机械臂的设计过程中,各个臂长、壁厚决定整个机械臂的运动空间与运动性能,其质量在整个机械臂中所占比重较大,为尽可能地减小机械臂质量,需对大臂小臂进行优化设计。在满足刚度与强度条件下,大臂、小臂和底座选用铝合金,其具有密度小、加工性能和导热性好的优点。针对满载作用下的机械臂在各关节处于最大扭矩的情况下进行 ANSYS 仿真,大臂、小臂应力云图如图 12 所示。大臂最大应力为 29.2 MPa ,小臂最大应力为 73.4 MPa ,远小于材料的许用应力 280 MPa ,此时机械臂双臂质量为 5.6 kg 。

3.2 轻量化方案优化

为研究不同轻量化方案对构件力学性能的影响,本文通过改变孔的位置和形状对如图 13a 所示原始结构进行轻量化设计,分别建立了 3 种小臂模型,如图 13b ~ 13d 所示,模型 2 为骨棒型方案,模型 3 是矩形孔,模型 4 为大小相等的圆形孔,经过轻量化模型搭建的 3 组机械双臂总质量为 3.8 kg 。

在保证外部载荷和材料一致的情况下,对以上 4 种模型分别在 ANSYS 环境下进行静力学分析,分别提取不同模型应力和应变的最大值,绘制曲线如图 14 所示。

分析 4 种模型的仿真结果,在外部载荷和材料一致的情况下,各轻量化方案具有以下特征:

(1)轻量化会改变构件刚度、强度等性能,不同轻量化方案对构件的力学性能产生不同的影响。

(2)相同条件下,经过上述最大应力和最大应变计算,小臂中模型 2 对最大应力与最大应变都最

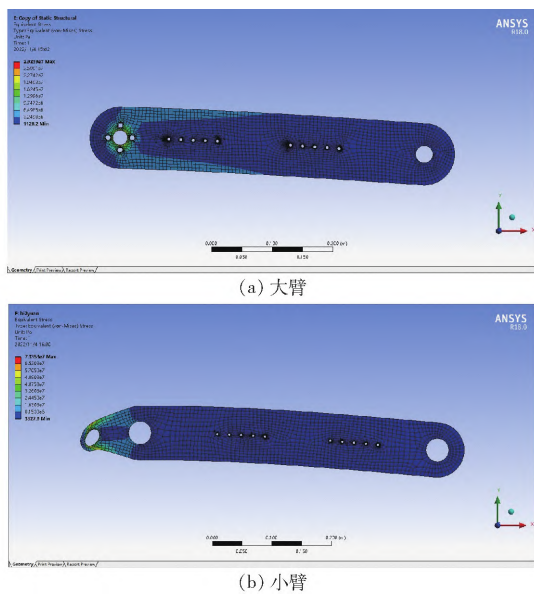


图 12 原始结构机械臂应力云图

Fig. 12 Stress cloud diagrams of original structure manipulator

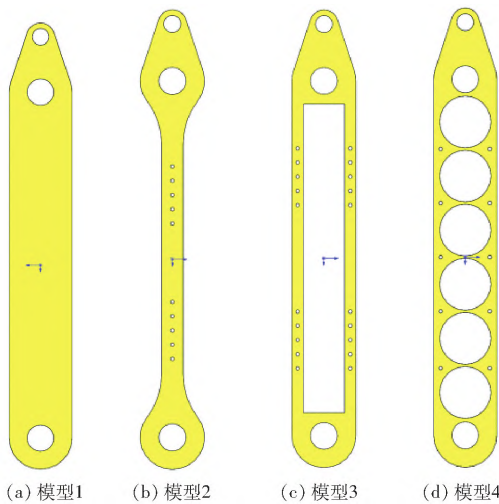


图 13 小臂原始结构与轻量化方案

Fig. 13 Original structure and lightweight scheme of forearm

小,即上述各轻量化方案对小臂来说,模型 2 方案与其他轻量化方案相比更具有优越性。

其中模型 2 中的大臂与小臂轻量化后受到的最大应力为 35.6 MPa 与 72.3 MPa。如图 15 所示。

将轻量化后的各个臂的质量重新输入到建立的牛顿欧拉动力学模型中,保持轻量化前后添加的速度、加速度一致,在相同的路径下得到各个关节的驱动力矩曲线,如图 16 所示,对比可知优化前后大、小臂的最大扭矩与总质量都有所下降,静态特性对比结果如表 4。

4 样机试验

4.1 苹果采摘机器人样机搭建

苹果采摘机械臂需要在非结构果园环境中进行

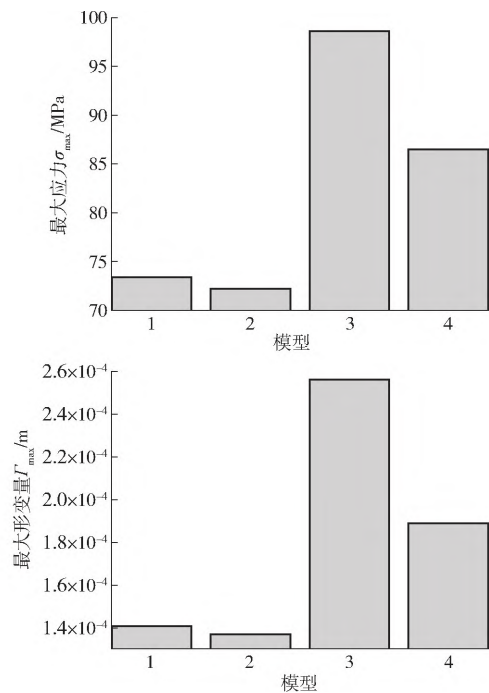


图 14 小臂模型 1~4 应力与应变

Fig. 14 Maximum stress and deformation of forearm model 1 ~ 4

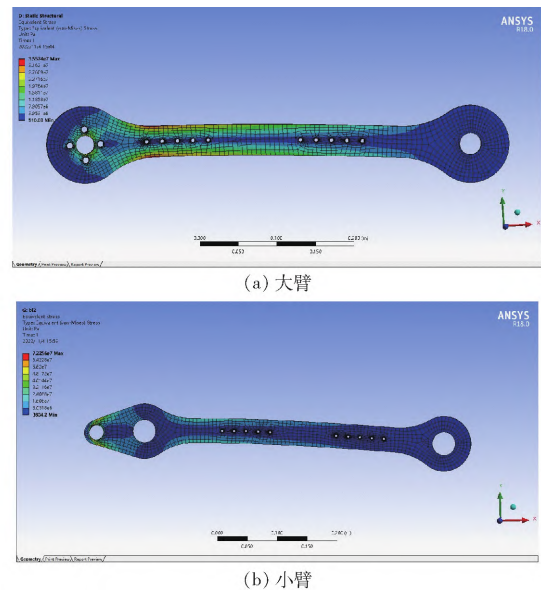


图 15 轻量化模型 2 机械臂应力云图

Fig. 15 Lightweight model 2 mechanical arm stress cloud diagram

果实定位与采摘,对其控制系统与智能化的要求较高,控制系统较为复杂^[26-27],对苹果采摘机器人各个模块进行集成,如图 17 所示。

4.2 采摘控制流程

当摄像机检测到视野范围内有成熟的苹果时,系统会进入机械臂控制流程,如图 18 所示。上位机在相机坐标系下将识别出的果实中心坐标保存为相机坐标系下的空间位置坐标,上位机将果实坐标从相机坐标系下向机械臂基坐标系下进

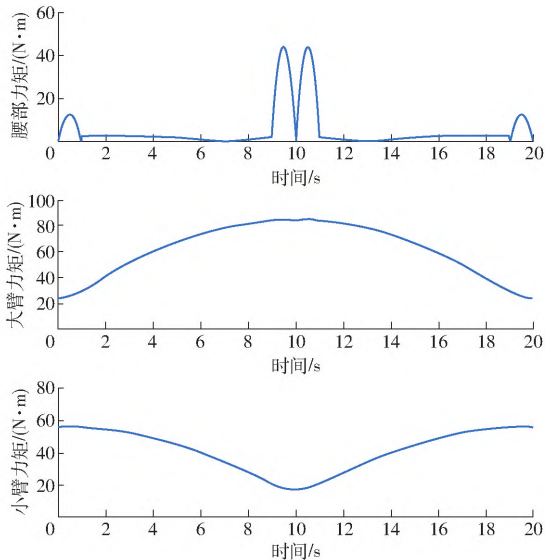


图 16 轻量化后各关节驱动力矩曲线

Fig. 16 Driving torque curves of each joint after lightweighting

表 4 轻量化前后静态特性对比

Tab. 4 Comparison of static characteristics before and after lightweight

参数	优化前	优化后
大臂最大扭矩/(N·m)	105	84
小臂最大扭矩/(N·m)	73	58
大臂最大应力/MPa	29.2	35.6
小臂最大应力/MPa	73.4	72.3
总质量/kg	5.6	3.8

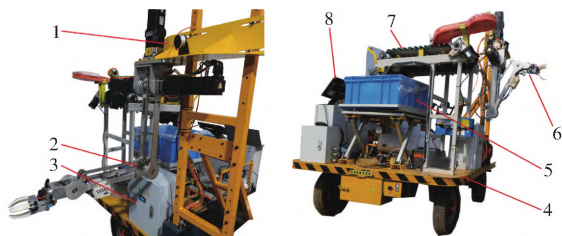


图 17 苹果采摘机器人

Fig. 17 Apple picking manipulator

- 1. 深度相机 2. 机械臂 3. 机械臂控制器 4. 底盘车 5. 收集装置 6. 末端执行器 7. 输送装置 8. 工控机

行转换。坐标转换完成后,通过对采摘机械臂进行路径规划和逆运动学求解,采用串口向 CAN 卡发送 3 个电机的目标角度,3 个电机在一个通讯周期内与下位机进行接收目标位置和反馈当前的位置进行循环通讯。通过 PID 算法准确快速地到达目标位置,上位机向下位机发送采摘指令,末端执行器开始抓取果实。末端执行器执行旋转动作,将果实树枝与果柄脱离,机械臂通过反馈的当前位置生成接近回收点轨迹,将苹果放置到落果输送装置中,进行装箱处理。当视觉范围内的苹果采摘完毕后,机械臂回到初始位置,底盘小车向下

一个采摘区域移动,循环重复以上操作,直至指定区域内的成熟苹果采摘完毕。实验室机械臂测试如图 19 所示。

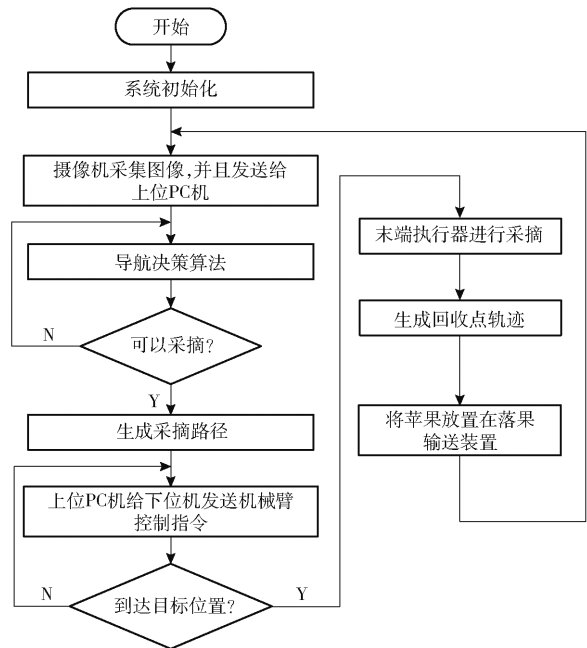


图 18 采摘机械臂控制流程图

Fig. 18 Picking manipulator control flowchart



图 19 实验室测试图

Fig. 19 Laboratory test diagram

完善搭建控制系统,集成优化苹果采摘整机系统,对苹果采摘进行现场果园试验,试验场景如图 20 所示。



图 20 采摘机械臂现场作业图

Fig. 20 Picking manipulator field operation diagram

试验结果显示轻量化后的三自由度苹果采摘机械臂在苹果采摘过程不同姿态时与仿真计算时 3 个电机角速度、角加速度一致,机械臂实际试验路径对比仿真路径的单程时,大臂、小臂力矩曲线图如

图 21 所示,试验记录在腰部旋转、大臂、小臂 3 个电机所受到的最大扭矩分别为 53、92、63 N·m,与通过 ADAMS 仿真与动力学建模分别进行计算得到各个臂所受最大扭矩结果相似,对比情况如表 5 所示,进一步证明理论计算的正确性,也为动力学理论模型对轻量化的理论计算提供了有力的依据。

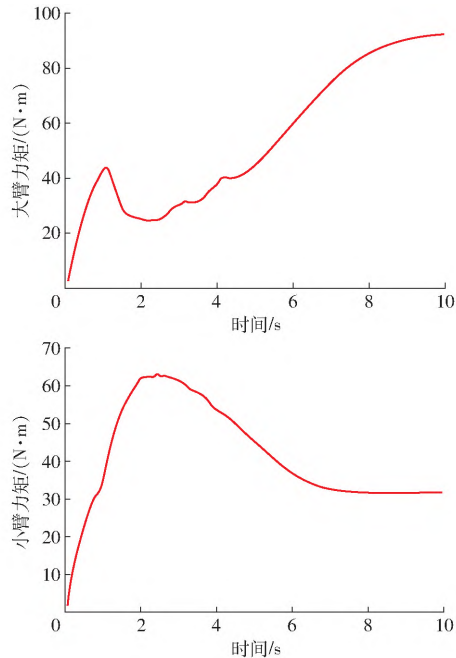


图 21 机械臂实际力矩曲线

Fig. 21 Actual torque curves of manipulator

表 5 动力学理论建模与实测最大扭矩对比

Tab. 5 Comparison of dynamic theory modeling

参数	and measured maximum torque		N·m
	牛顿-欧拉方程建模	ADAMS 仿真	
腰部最大扭矩	44	46	53
大臂最大扭矩	84	78	92
小臂最大扭矩	58	53	63

5 结论

(1)根据非结构化的作业环境,研制一款三自由度苹果采摘机器人,利用平行四边形结构,实现末端始终保持水平向下,机械臂大臂长度为 500 mm,小臂长度为 500 mm,工作空间符合实际苹果采收要求。

(2)分析 3 种轻量化设计方案,对照初始机械臂方案,选定骨棒型结构作为最优轻量化优化结果,轻量化使整机质量减轻 1.8 kg,降低 32.14%,大、小臂驱动力矩分别减小 21、15 N·m,均降低约 20%,实现机械臂轻量化设计。

(3)根据轻量化优化结果,进行三自由度苹果采摘机械臂物理样机搭建与试验,试验得到大、小臂最大驱动力矩为 92、63 N·m,基本符合仿真结果,验证了动力学模型的正确性。

参 考 文 献

- [1] 梁喜凤, 苗香雯, 崔绍荣, 等. 番茄收获机械手运动学优化与仿真试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 96-100. LIANG Xifeng, MIAO Xiangwen, CUI Shaorong, et al. Experiments of optimization and simulation on kinematics of a tomato harvesting manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 96-100. (in Chinese)
- [2] 李小斌, 吴宏岐, 陈渭红, 等. 一种苹果采摘机器人关节伺服控制系统设计及仿真[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(3): 129-134. LI Xiaobin, WU Hongqi, CHEN Weihong, et al. Design and simulation of a joint servo control system for an apple-picking robot [J]. Computer Measurement & Control, 2021, 29(3): 129-134. (in Chinese)
- [3] 李占坤. 果树采摘机器人控制系统研究与设计[D]. 镇江: 江苏大学, 2010. LI Zhankun. Research and design on fruit picking robot control system[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- [4] 卜令昕. 结构化果园苹果收获机器人关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. BU Lingxin. Key technologies of robotic apple harvester in constructed orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
- [5] SARIY Y. Robotics of fruit harvesting: a state-of-the-art review [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1993, 54(4): 265-280.
- [6] SAFEEA M, NETO P, BEAREE R. Robot dynamics: a recursive algorithm for efficient calculation of christoffel symbols[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 142:1-9.
- [7] WANG X, ZHANG D, ZHAO C, et al. Optimal design of lightweight serial robots by integrating topology optimization and parametric system optimization[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 132: 48-65.
- [8] 余亮, 张龙, 王鹏. 局部闭链码垛机器人运动学分析及轨迹规划[J]. 机床与液压, 2020, 48(11): 31-37. YU Liang, ZHANG Long, WANG Peng. Kinematics analysis and trajectory planning of locally closed-chain palletizing robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2020, 48(11): 31-37. (in Chinese)
- [9] TAO Y, CHEN F, XIONG H. Kinematics and workspace of a 4-DOF hybrid palletizing robot[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 6: 125973.

- [10] YU H, SUN Q, WANG C, et al. Frequency response analysis of heavy-load palletizing robot considering elastic deformation [J]. *Sci. Prog.*, 2020, 103(1): 0036850419893856.
- [11] WANG J, ZHANG Y, LIU X. Control system of 4-DOF palletizing robot based on improved R control multi-objective trajectory planning[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, 13(4): 16878140211002705.
- [12] 张良安,马寅东,单家正,等. 4 自由度含局部闭链式码垛机器人动力学优化设计[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 336-341.
ZHANG Liang'an, MA Yindong, SHAN Jiazheng, et al. Optimal dynamic design of 4-DOF palletizing robot with closed-chain [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 336-341. (in Chinese)
- [13] 李爱成,唐火红,冯宝林,等. 关节式码垛机器人运动学分析与动力学仿真[J]. *机械设计*, 2013, 30(10): 16-20.
LI Aicheng, TANG Huohong, FENG Baolin, et al. Kinematics analysis and dynamics simulation of the joint type stacking robot[J]. *Journal of Machine Design*, 2013, 30(10): 16-20. (in Chinese)
- [14] 陈亚梅. 基于 ADAMS 的码垛机器人动力学刚柔耦合分析[J]. *包装工程*, 2021, 42(17): 261-265.
CHEN Yamei. Rigid-flexible coupling dynamics analysis of stacking robot based on ADAMS [J]. *Packaging Engineering*, 2021, 42(17): 261-265. (in Chinese)
- [15] 李学威,王富刚,张鹏. 码垛机器人整机的有限元分析与优化[J]. *机械设计*, 2014, 31(7): 29-32.
LI Xuewei, WANG Fugang, ZHANG Peng. FEA analysis and optimization of the palletizing robot [J]. *Journal of Machine Design*, 2014, 31(7): 29-32. (in Chinese)
- [16] SILWAI A, DAVIDSON J R, KARKEE M, et al. Design, integration, and field evaluation of a robotic apple harvester [J]. *Journal of Field Robotics*, 2017, 34(6): 1140-1159.
- [17] 陈超,陈贺贺. 基于正交试验的工业机器人机械臂的结构优化和轻量化[J]. *机床与液压*, 2021, 49(5): 20-24.
CHEN Chao, CHEN Hehe. Structural optimization and lightweight of industrial robot manipulator based on orthogonal test [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(5): 20-24. (in Chinese)
- [18] LIU Y, LIANG L, HAN H, et al. A method of energy-optimal trajectory planning for palletizing robot [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, 2017: 1-10.
- [19] RENA X, YU R, GUO C. Dynamic simulation analysis of palletizing manipulator based on ADAMS [J]. *International Core Journal of Engineering*, 2018, 4(5): 142-145.
- [20] 康鹏贵. 袋装物料搬运机器人动力学研究[D]. 济南: 济南大学, 2009.
KANG Penggui. Dynamic research on load-unload bagged materials robot [D]. Ji'nan: University of Jinan, 2009. (in Chinese)
- [21] 王从浩,朱旭旭,刘本奇,等. 绳索驱动仿人机器人下肢设计与仿真分析[J]. *机械设计与制造*, 2020(5): 261-264.
WANG Conghao, ZHU Xuxu, LIU Benqi, et al. The design and simulation analysis of humanoid robot lower limbs driven by rope [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(5): 261-264. (in Chinese)
- [22] 马质璞,张抗,谭骥,等. 一种新型单果采摘器的设计[J]. *机械设计与制造*, 2017(5): 252-255.
MA Zhipu, ZHANG Kang, TAN Ji, et al. Design of picking device for single fruit [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2017(5): 252-255. (in Chinese)
- [23] 武杰文. 码垛机器人静力学及动力学研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2015.
WU Jiewen. Statics and dynamics of palletizing robot [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [24] 张利敏,梅江平,赵学满,等. Delta 机械手动力学尺度综合[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(3): 1-7.
ZHANG Limin, MEI Jiangping, ZHAO Xueman, et al. Dynamic dimensional synthesis of Delta robot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(3): 1-7. (in Chinese)
- [25] 闫彬,樊攀,王美茸,等. 基于改进 YOLOv5m 的采摘机器人苹果采摘方式实时识别[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(9): 28-38, 59.
YAN Bin, FAN Pan, WANG Meirong, et al. Real-time apple picking pattern recognition for picking robot based on improved YOLOv5m [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(9): 28-38, 59. (in Chinese)
- [26] 崔鹏,陈志,张小超. 苹果采摘机器人仿生机械手静力学分析与仿真[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(2): 149-153.
CUI Peng, CHEN Zhi, ZHANG Xiaochao. Statics analysis of apple-picking robot humanoid manipulator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(2): 149-153. (in Chinese)
- [27] 方建军. 采摘机器人开放式控制系统设计[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(5): 83-86.
FANG Jianjun. Open architecture control system of harvesting robot [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(5): 83-86. (in Chinese)