

工艺与装备

高效重载码垛机器人末端执行器力学特性分析

贾继光, 刘送永, 陈毅, 赵明

(中国矿业大学 机电工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: **目的** 为了提高码垛生产线的效率, 实现高效重载码垛的功能, 设计一种具有大负载能力的末端执行器。**方法** 详细分析该末端执行器的结构设计及原理, 并完成其三维模型的建立与设计。对快速定位机构、重载夹紧机构进行运动学分析及计算, 并建立机构的运动学参数模型。利用 ADAMS 对不同楔块斜角的重载夹紧机构进行动力学仿真分析。**结果** 获得了 45° , 30° , 15° 楔块斜角对应的楔块和顶板的力、位移、速度、加速度特性曲线; 分析得知楔块斜角在 15° 左右时, 末端执行器具有较好的力学特性。**结论** 该末端执行器能够满足工作要求, 对木板有较小的冲击破坏, 能够提高码垛的效率及稳定性。

关键词: 码垛机器人; 末端执行器; 结构设计; 动力学仿真

中图分类号: TB486⁺.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)09-0155-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.09.023

Mechanical Characteristics of End-effector of High-efficiency Heavy-load Palletizing Robot

JIA Ji-guang, LIU Song-yong, CHEN Yi, ZHAO Ming

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

ABSTRACT: The work aims to design an end-effector with large load capacity, in order to improve the efficiency of palletizing production line and realize the function of high-efficiency heavy-load palletizing. The structural design and principle of the end-effector were analyzed in detail, and its 3D model was established and designed. Kinematics analysis and calculation of fast positioning mechanism and heavy-load clamping mechanism were carried out, and the kinematics parameter model of the mechanism was established. ADAMS was used to simulate and analyze the dynamics of heavy-load clamping mechanism with different wedge angles. The force, displacement, velocity and acceleration characteristic curves of wedge and roof corresponding to wedge angle of 45° , 30° and 15° were obtained. The analysis showed that the end-effector had good mechanical properties when the wedge angle was about 15° . The end-effector can meet the working requirements and has little impact damage to the wood slab, which can improve the efficiency and stability of palletizing.

KEY WORDS: palletizing robot; end-effector; structural design; dynamic simulation

现代木工生产流水作业过程中,通常需要对板材进行转线、码垛等操作。目前较多采用工人辅助器械完成搬运工作,但是其成本高、效率低,已经不能满足自动化工厂发展的要求^[1]。

作为自动化搬运过程中的核心部件——末端执行器达到高效、可靠、稳定等性能状态是实现搬运自动化的前提条件。目前码垛机器人末端执行器大多采用铲式和吸附式。李晓刚等^[2]对铲式末端执行器进行

收稿日期: 2019-09-17

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB13080300)

作者简介: 贾继光(1995—),男,中国矿业大学硕士生,主攻特种机器人。

通信作者: 刘送永(1981—),男,中国矿业大学机教授、博导,主要研究方向为特种机器人。

设计研究,主要针对一些轻质货物的码垛工作,不适用于木门类重载码垛,铲式执行器一方面对受力铲的强度要求较高,另一方面在码垛过程中需要人工辅助隔离货物间隙,不能完全实现生产线的自动化;梅江平等^[3]对吸附式末端执行器进行了研究,但吸附系统的设计过于繁杂,稳定性差,生产成本低,不足以满足重载码垛可靠性要求。

文中对一种夹持式的末端执行器进行设计研究,建立其三维模型,对快速定位机构和重载夹紧机构进行力学特性分析计算,并利用动力学软件对重载夹紧机构进行仿真研究,获取楔块斜角的最优取值范围。拟实现结构简单、传动平稳、负载大、冲击小等功能特点。

1 末端执行器的结构原理

该末端执行器主要由快速定位机构和重载夹紧机构等部分组成,快速定位机构由双输出直流伺服电机、梯形螺杆、法兰型螺杆套筒、直线导轨、支撑板、横板等组成;重载夹紧机构由双作用气缸、楔块、楔块顶板、橡胶垫等组成^[4]。

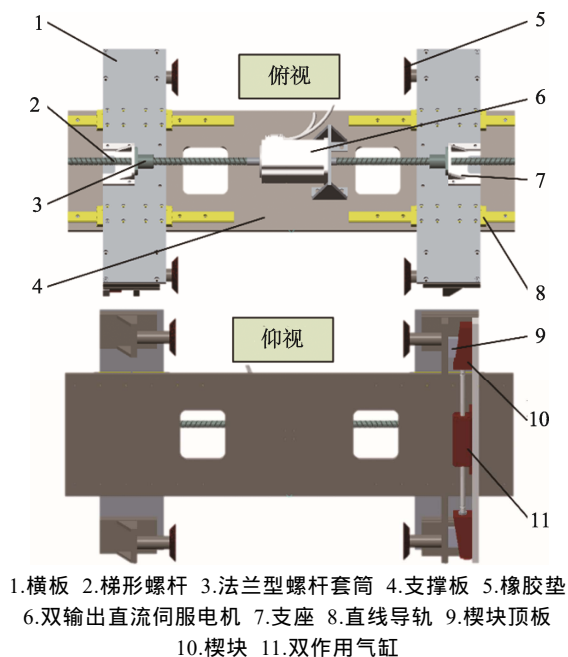


图1 末端执行器三维模型
Fig.1 3D model of end-effector

末端执行器安装在码垛机器人机械臂末端,码垛机器人通过位姿调整,将末端执行器预调整在待搬运的木板处。双输出直流伺服电机通过支架固定在支撑板上,双反螺旋升角的梯形螺杆通过联轴器分别固定在两螺杆上,螺杆上的法兰型套筒安装在两侧横板上,横板安装在直线导轨上,伺服电机通电,基于螺旋传动原理,横板快速横移,夹紧橡胶垫处设置压力

传感器。当末端执行器对木板有一定的预紧力时,双输出电机停止工作,螺杆与套筒之间具有自锁能力,快速定位工作完成。双作用气缸固定在一横板上,楔块固定在双作用气缸两端,楔块顶板安装在梯形滑槽内,夹紧橡胶垫固定在楔块顶板上,当双输出电机停止工作后,双作用气缸开始工作,两楔块向两侧移动,推动楔块顶板夹紧木板,斜楔机构可以产生较大的增力比,从而满足重载夹持的作业需求。

2 力学特性分析

2.1 快速定位机构

该末端执行器的快速定位机构通过螺旋传动^[5-6]实现电机的旋转运动转变为直线移动,具体传动原理见图2。

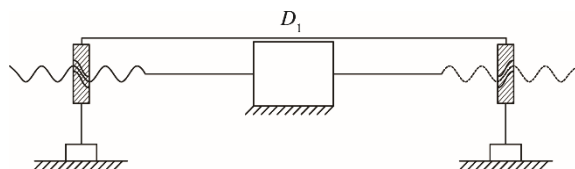


图2 快速定位机构

Fig.2 Quick positioning mechanism

为了实现快速定位机构运行的高效性以及稳定性,传动机构采用将两反螺旋升角的梯形螺杆同时连接在双输出电机的两侧输出轴上,电机通电高速旋转,固定在两横板上的法兰型套筒实现相向运动,对木板定位预紧。

根据图2,设其搬运的木板宽度为 D_2 ,两橡胶垫预留间距为 D_1 ,电机转速为 n ,梯形螺杆的导程为 p ,实现夹紧的时间为 t ,不同规格的木板尺寸不同,因此该装置实现快速定位的时间就会有相应的差别,实现夹紧的时间和木板尺寸参数之间的具体关系式为:

$$t = \frac{D_1 - D_2}{2np} \quad (1)$$

快速定位机构在定位过程中,横板横向移动过程中,梯形螺杆所受负载为横板与支撑板之间的摩擦阻力,采用滚动导轨连接, μ 为导轨的摩擦因数,查表得 $\mu=0.04$ 。已知所设计横板的重量为 G_1 ,木板的重量为 G_2 ,则定位过程摩擦阻力为:

$$F_Q = \mu(G_1 + G_2) \quad (2)$$

在电机的转动下,螺杆、套筒相对运动,具体受力分析简化模型见图3,将梯形螺杆沿中径 d_2 处展开,得到一个倾斜角为 λ 的斜面,斜面上的滑块代表法兰型套筒,法兰型套筒、梯形螺杆之间的相对运动可以看成滑块与斜面之间的相对运动。

在预紧定位过程中,斜面相对于滑块向左匀速运动,滑块受到导轨的摩擦阻力 F_Q ,斜面所受作用力包括滑块对斜面的法向反力 F_N 以及摩擦力 F_f ,电机

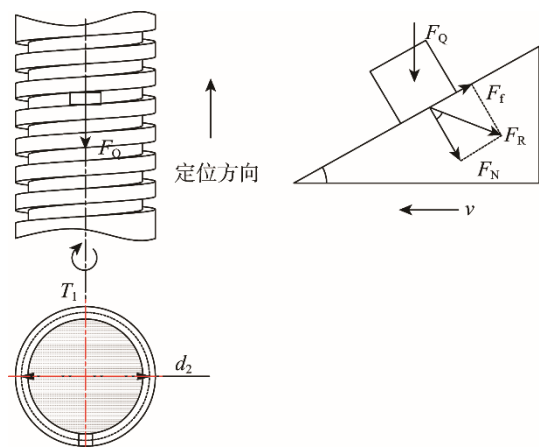


图 3 梯形螺杆受力分析

Fig.3 Stress analysis of trapezoidal screw

转矩为 T_1 。 F_N 与 F_f 的合力为 F_R ， $F_f = \mu F_N$ ， μ 为摩擦因数， F_N 与 F_R 的夹角为摩擦角 ρ ，由受力平衡可得电机转动螺杆所需的转矩为：

$$T_1 = \frac{d_2}{2} \frac{F_Q \cos \lambda \sin(\rho + \lambda)}{\cos \rho} \quad (3)$$

螺杆传动的效率 η 指有用功与输入的总功之比。螺杆旋转 1 周所需要的输入总功为： $W_1 = 2\pi T_1$ ，有用功 $W_2 = F_Q S$ ，其中 $S = \pi d_2 \tan \lambda$ 。梯形螺杆的传动效率为：

$$\eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{F_Q \pi d_2 \tan \lambda}{F_Q \pi d_2 \tan(\lambda + \rho)} = \frac{\tan \lambda}{\tan(\lambda + \rho)} \quad (4)$$

由式 (4) 可以得知，传动效率 η 与螺纹升角 λ 和摩擦角 ρ 有关，螺旋线的线数越多、升角越大，则螺杆传动的效率越高，反之亦然。当摩擦角 ρ 一定时，对式 (4) 求极值可以得知，当螺纹升角 $\lambda \approx 45^\circ$ 时，效率最高。螺纹升角越大，螺纹制造越困难，当 $\lambda > 30^\circ$ 后，传动效率增长不明显，因此，通常螺纹升角不超过 30° 。

当快速定位机构完成对木板的预紧后，重载夹紧机构开始夹紧工作，此时螺杆受到与预紧方向相反的轴向拉力，大小等于重载夹紧机构对木板的夹紧力 $F_{夹}$ ，由受力分析易知，沿斜面方向上有 $F_{夹} \sin \lambda$ 和 $F_{夹} \cos \lambda \tan \rho$ ，在夹紧力 $F_{夹}$ 的作用下，欲让定位机构不产生滑移，则梯形螺杆的受力情况应满足 $F_{夹} \sin \lambda \leq F_{夹} \cos \lambda \tan \rho$ 。通常所说的螺杆自锁现象，由公式可得 $\lambda \leq \rho$ 时，无论重载夹紧机构对木板的夹紧力 $F_{夹}$ 多大，梯形螺杆相对于法兰型套筒都不会产生相对运动（滑移），因此所设计的机构能够自锁的条件是： $\lambda \leq \rho$ 。

选用螺杆强度能够满足的前提下，该末端执行器可以搬运较大重量范围的木板。

2.2 重载夹紧机构

快速定位机构完成预紧后，气缸带动重载夹紧机

构工作，重载夹紧机构依靠楔块机构将气缸的推力放大传递给带有橡胶垫的楔块顶板，重载夹紧机构的示意图见图 4。

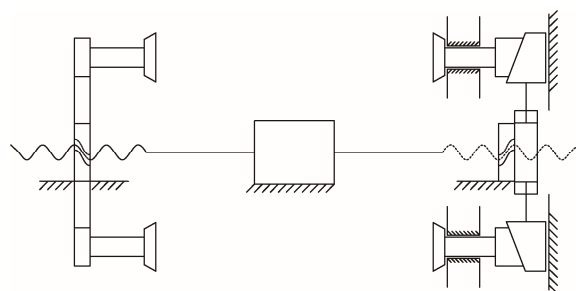


图 4 重载夹紧机构示意

Fig.4 Schematic diagram of heavy-load clamping mechanism

为了防止末端执行器在夹紧过程中将木板夹坏，在楔块顶板处安装橡胶垫，一方面橡胶的柔软可以有效保护木板，防止木板边缘破损，另一方面利用橡胶与木板之间较大的摩擦因数，以保证木板被夹持而不掉落，则夹持器所需要输出的夹紧力要满足：

$$F_{夹} \geq \frac{G}{\mu} \quad (5)$$

式中： μ 为橡胶垫与木板之间的滑动摩擦因数； G 为木板的重力 (N)。

重载夹紧机构在夹紧过程中主要构件的受力分析^[7-9]见图 5。图 5 中 1 为楔块， θ 为楔块斜角， φ_1 ， φ_2 ， φ_3 为摩擦角， l 为楔块顶板在滑槽中的长度， b 为楔块顶板的悬臂长度， d 为滑槽的宽度。设 $F_{驱}$ 为主动力， $F_{夹}$ 为阻力， R_{21} 为楔块顶板 2 对楔块 1 的总反力， R_{31} 为横板对楔块的总反力，则可由楔块的力三角形分别求得 R_{31} ， R_{21} 为：

$$\begin{aligned} R_{31} &= F_{驱} \cos(\theta + \varphi_2) / \sin(\theta + \varphi_1 + \varphi_2) \\ R_{21} &= F_{驱} \cos \varphi_1 / \sin(\theta + \varphi_1 + \varphi_2) \end{aligned} \quad (6)$$

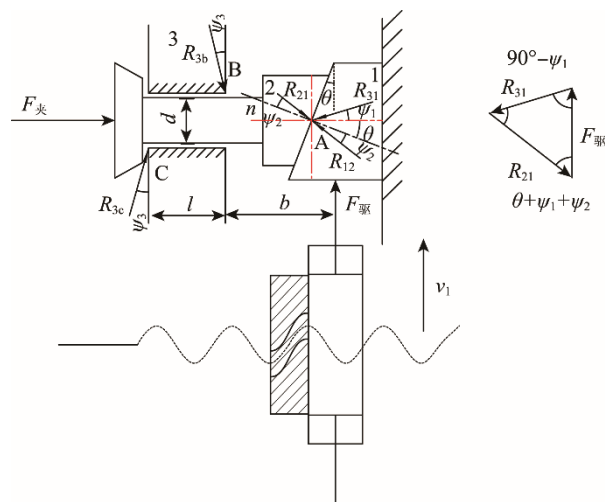


图 5 重载夹紧机构受力分析

Fig.5 Stress analysis of heavy-load clamping mechanism

设 R_{3b} , R_{3c} 为横板对楔块顶板的支反力; R_{21} 为楔块对楔块顶板的总反力, 则由楔块顶板的力平衡和力矩平衡条件求得 3 个平衡方程为:

$$\begin{aligned}\sum F_{\text{纵}} &= (R_{3b} - R_{3c}) \cos \varphi_3 - R_{12} (\sin \theta + \varphi_2) = 0 \\ \sum F_{\text{横}} &= R_{12} \cos (\theta + \varphi_2) - (R_{3b} + R_{3c}) \sin \varphi_3 - F_{\text{夹}} = 0 \\ \sum M_c &= R_{3b} l \cos \varphi_3 + R_{3c} d \sin \varphi_3 + F_{\text{夹}} d / 2 - \\ &R_{12} (b + l) \sin (\theta + \varphi_2) - R_{12} d \cos (\theta + \varphi_2) / 2 = 0\end{aligned}\quad (7)$$

化简后得 $F_{\text{夹}}$, R_{3b} , R_{3c} 分别为:

$$\begin{aligned}F_{\text{夹}} &= \frac{F_{\text{驱}} \cos \varphi_1}{\sin (\theta + \varphi_1 + \varphi_2)} [\cos (\theta + \varphi_2) - \tan \varphi_3 \times \\ &\sin (\theta + \varphi_2) (l + 2b / l - d \tan \varphi_3 / l)] \\ R_{3b} &= \frac{1}{l \cos \varphi_3 + d \sin \varphi_3} [R_{21} (b + l) \sin (\theta + \varphi_2) + \\ &0.5 R_{21} d \cos (\theta + \varphi_2) - 0.5 F_{\text{夹}} d]\end{aligned}\quad (8)$$

该重载夹紧机构工作状态下的增力比为:

$$i = \frac{F_{\text{夹}}}{F_{\text{驱}}} = \frac{\cos \varphi_1}{\sin (\theta + \varphi_1 + \varphi_2)} [\cos (\theta + \varphi_2) - \tan \varphi_3 \times \sin (\theta + \varphi_2) (l + 2b / l - d \tan \varphi_3 / l)] \quad (9)$$

重载夹紧机构完成夹紧工作时, 在气缸 $F_{\text{驱}}$ 主动力的作用下, 可以得知该重载夹紧机构^[11]的夹紧力 $F_{\text{夹}}$ 与气缸 $F_{\text{驱}}$ 的关系为:

$$F_{\text{夹}} = F_{\text{驱}} \times \tan \theta \quad (10)$$

3 仿真分析

对重载夹紧机构进行动力学仿真分析, 仿真选取木板质量 110 kg, 查表得木板与橡胶之间的静摩擦因数为 0.4, 计算出末端执行器所需要输出的夹紧力约为 2695 N。在 Creo4.0 软件中建立好不同斜角的重载夹紧机构模型并导入 Adams 软件, 模型中 $b=40$ mm, $l=40$ mm, $d=40$ mm, 根据 $F_{\text{驱}}=F_{\text{夹}} \times \tan \theta$ 计算出不同斜角对应的驱动力 $F_{\text{驱}}$ 。在 Adams 软件^[11-14]中定义约束, 气缸处添加 $F_{\text{驱}}$, 楔块顶板处添加柔性连接弹簧^[15-16] $K=500$ N/mm, $C=300$ (N·s)/mm, 运行仿真模型后, 通过测量弹簧力获取末端执行器输出夹持力的变化情况, 具体仿真分析结果见图 6。

楔块斜角为 45° 时, 楔块与顶板对应的参数变化曲线情况见图 6。从图 6 中可以分析出, 在气缸施加 $F_{\text{驱}}$ 为 2695 N 时, 夹持器末端的夹持力迅速上升, 顶板的瞬时加速度达到 95.3 mm/s², 工作 1.8 s 后, 输出夹持力稳定在 2750 N, 顶板加速度趋于 0, 木板被稳定夹紧。气缸和顶板均移动了约 5.6 mm。

当楔块斜角为 30° 时, 添加驱动力为 1556 N 进行仿真分析, 初始时顶板的加速度为 36.9 mm/s², 较 45° 时, 顶板对木板的冲击减弱了约 2.5 倍, 在 2.5 s 后夹持力稳定在 2670 N, 相比斜角为 45° 达到夹持稳定状

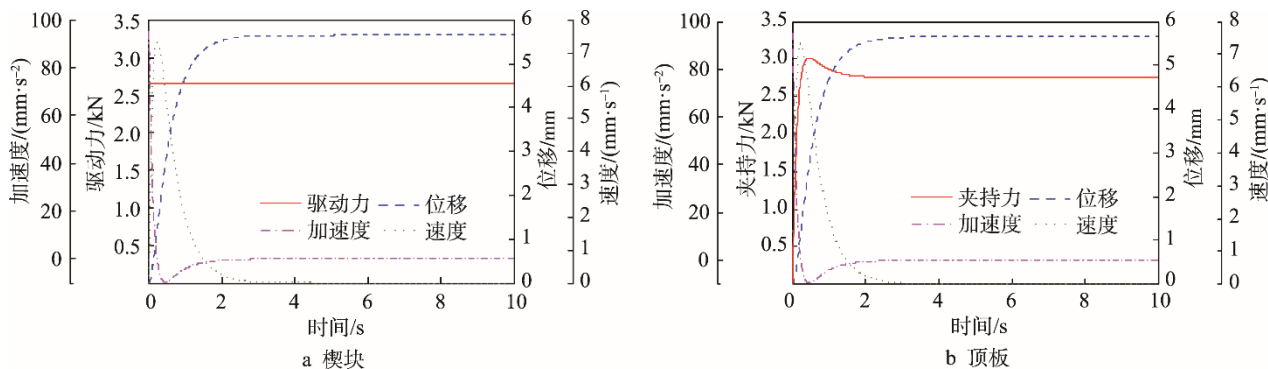


图 6 45° 斜角楔块、顶板仿真曲线
Fig.6 45° wedge and roof simulation curve

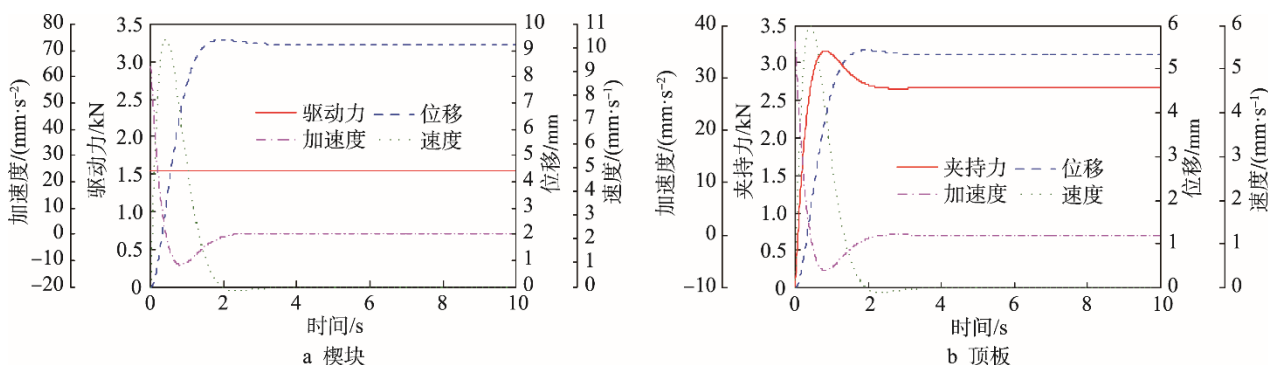


图 7 30° 斜角楔块、顶板仿真曲线
Fig.7 30° wedge and roof simulation curve

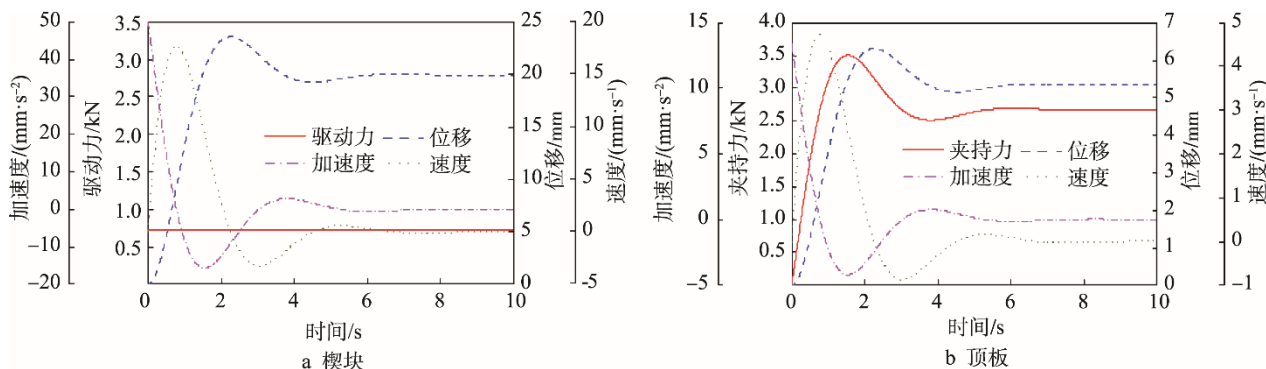


图 8 15°斜角楔块、顶板仿真曲线
Fig.8 15° wedge and roof simulation curve

态推迟了 0.7 s，气缸伸长量增加了 3.6 mm，顶板移动了 5.3 mm，较 45°时没有较大变化。

当楔块斜角为 15°时，添加驱动力 722 N 进行仿真分析，夹持力达到稳定状态需要 5.5 s，相比斜角为 45°的夹持稳定状态延迟了 3.7 s，顶板的最大加速度为 13.4 mm/s²，较 45°时减小了 7 倍多，能够有效减小夹持器对木板的冲击破坏，顶板移动了 5.4 mm，与 45°时没有发生太大变化。

通过仿真可以分析得知，在误差允许的范围内，重载夹紧机构夹紧木板稳定后，夹紧力 $F_{夹}$ 与气缸的 $F_{驱}$ 满足 $F_{驱} = F_{夹} \times \tan \theta$ ，在模型尺寸参数、所需夹持力一定的条件下，驱动力随着斜角的减小而减小；气缸的伸长量随着斜角的减小而增大，橡胶垫的压缩量不随斜角的变化而变化；随着楔块斜角的减小，顶板对木板的冲击破坏程度越小。由于现代化木工生产线对效率有较高的要求，因此机构的夹持力达到稳定状态所需时间越短越好，顶板对木板的冲击破坏程度越小越好，所以对于重载夹紧机构的设计斜角范围应在 15°~30°之间。由分析可知当斜角为 15°时，夹持力所需稳定时间、机构的增力比、顶板对木门的冲击加速度、气缸的伸长量等均能较好地满足高效、重载码垛的要求。

4 结语

针对现有末端执行器不足以满足木门生产线搬运需求的现状，设计了一种高效重载码垛机器人末端执行器。该末端执行器采用双向梯形螺杆传动机构实现对木板的快速定位预紧；采用具有大增力比的楔块机构可以满足码垛工作过程中的重载工况。通过仿真研究，当楔块斜角为 15°左右时，末端执行器具有较好的力学特性。该末端执行器与现有的铲式末端执行器相比，它无需人工垫高作业辅助码垛机器人工作；与吸盘式相比，它无需严格复杂的气动系统设计。其具有结构简单、传动平稳、负载大、冲击小、稳定可靠等优点，能适用于自动化生产线的码垛需求，具有

良好的应用前景。

参考文献：

- [1] 胡洪国, 高建华, 杨汝清. 码垛技术综述[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2000(6): 9—11.
HU Hong-guo, GAO Jian-hua, YANG Ru-qing. Review of Stacking Technology[J]. Modular Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2000(6): 9—11.
- [2] 李晓刚, 刘晋浩. 码垛机器人多功能末端执行器的设计[J]. 包装工程, 2011, 32(7): 80—84.
LI Xiao-gang, LIU Jin-hao. Design of Multi-functional End-effector for Stacking Robot[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 80—84.
- [3] 梅江平, 张新. 一种新型码垛装置末端执行器的设计[J]. 现代制造工程, 2014(5): 27—30.
MEI Jiang-ping, ZHANG Xin. Design of A New End-effector for Stacking Device[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2014(5): 27—30.
- [4] 刘送永. 一种高速重载堆垛机器人自锁式末端执行器: 中国, 110154067A[P]. 2019-08-23.
LIU Song-yong. Self-locking End-effector of a High-speed Heavy-load Stacking Robot: China, 110154067A[P]. 2019-08-23.
- [5] 李营, 杨传民, 王东爱, 等. 码垛机器人多箱抓取末端执行器设计与实现[J]. 包装工程, 2017, 38(23): 152—156.
LI Ying, YANG Chuan-min, WANG Dong-ai, et al. Design and Implementation of Multi-box Grab End-effector of Stacking Robot[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(23): 152—156.
- [6] 姜阳, 辛世杰, 吕鸣, 等. 双螺纹副伸缩式千斤顶研究[J]. 森林工程, 2013, 29(1): 57—60.
JIANG Yang, XIN Shi-jie, LYU Ming, et al. Double Thread Vice Telescopic Jack Study[J]. Forest Engineering, 2013, 29(1): 57—60.
- [7] 王洪欣, 高谦, 付顺玲. 斜楔机构的受力分析和设计[J]. 机械制造, 1999(3): 19—20.
WANG Hong-xin, GAO Qian, FU Shun-ling. Force Analysis and Design of Wedge Mechanism[J]. Ma-

- chinery Manufacturing, 1999(3): 19—20.
- [8] 张月锋, 丛建华, 韩基石. 一种气动平推楔形夹具的设计与研制[J]. 工程与试验, 2017, 57(3): 97—100.
ZHANG Yue-feng, CONG Jian-hua, HAN Ji-shi. Design and Development of a Pneumatic Flat-push Wedge Clamp[J]. Engineering and Test, 2017, 57(3): 97—100.
- [9] 王智礼. 斜楔机构中构件的运动和受力分析[J]. 机械研究与应用, 2006(3): 18—19.
WANG Zhi-li. Analysis of Motion and Force of Members in Inclined Wedge Mechanism[J]. Mechanical Research and Application, 2006(3): 18—19.
- [10] 曹明通, 王嫦娟, 魏军英, 等. 可转位密齿铣刀新型夹紧机构的设计[J]. 机械设计与制造, 2004(1): 69—70.
CAO Ming-tong, WANG Chang-juan, WEI Jun-ying, et al. Design of New Clamping Mechanism for Indexable Fine-tooth Milling Cutter[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2004(1): 69—70.
- [11] 刘松柏, 邓华, 何竞飞. 巨型重载夹持装置动态夹持力建模与承载能力分析[J]. 现代制造工程, 2010(1): 107—111.
LIU Song-bai, DENG Hua, HE Jing-fei. Dynamic Clamping Force Modeling and Bearing Capacity Analysis of Large Heavy-load Gripper[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(1): 107—111.
- [12] 盖小涛. 高速超越离合器楔合性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 34—45.
GAI Xiao-tao. Wedging Performance of High-speed Overrunning Clutch[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 34—45.
- [13] 刘佳, 李娜, 郝子岩, 等. 柔性机械手设计与夹取力动态特性仿真分析[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 119—125.
LIU Jia, LI Na, HAO Zi-yan, et al. Simulation Analysis of Dynamic Characteristics of Flexible Manipulator Design and Clamping Force[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2018, 38(2): 119—125.
- [14] 王博, 汤伟, 董继先, 等. 直行程电动调节阀机械传动间隙软件补偿策略研究[J]. 流体机械, 2019, 47(7): 1—5.
WANG Bo, TANG Wei, DONG Ji-xian, et al. Mechanical Backlash Software Compensation Strategy for Linear Type Electric Valve Actuators[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(7): 1—5.
- [15] 姚志英, 吴梦委, 姚滢滢. 一种瓶装药品抓取末端执行器的研究[J]. 制造业自动化, 2019, 41(2): 65—69.
YAO Zhi-ying, WU Meng-wei, YAO Ying-ying. Bottled Drug Grasping End-effector[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(2): 65—69.
- [16] 董其维. 采摘机器人机械手夹紧装置优化设计——基于 Pro/E 和 ADAMS 联合仿真[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 226—230.
DONG Qi-wei. Optimal Design of Clamping Device of Picking Robot Manipulator-Based on Pro/E and ADAMS Joint Simulation[J]. Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 226—230.