

快递包装夹持装置的设计与研究

李丰延, 成铭, 王瑞, 毕天滋, 郭聪, 隋明君

(广西大学 机械工程学院, 南宁 530004)

摘要: **目的** 设计一种快递包装夹持装置, 以实现机器辅助快递包装的功能。**方法** 分析快递包装的现状, 研究与快递包装夹持装置相应的工艺流程, 设计出一种能起到夹持、升降与旋转快递复合功能的装置。推导并建立装置的运动和力学模型, 确定关键参数, 通过 Adams 与 Matlab 进行仿真实验, 最后研制实物并试验。**结果** 快递包装夹持装置运动轨迹与速度符合要求, 包装速度大约为 16 s 左右, 缩短了 63.3% 的工作时间, 包装成功率为 95.1% 左右, 包装连续率在 96.0% 以上。**结论** 通过设计的快递包装夹持装置, 即可实现快递的夹持、升降与旋转功能, 性能稳定且高效。

关键词: 快递包装; 设计; 夹持升降; 运动与力学模型; 仿真实验

中图分类号: TB486 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)13-0123-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.13.021

Design and Research of Express Package Clamping Device

LI Feng-yan, CHENG Ming, WANG Rui, BI Tian-zi, GUO Cong, SUI Ming-jun

(School of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

ABSTRACT: The work aims to design an express package clamping device to achieve the function of machine-assisted express packaging. After analyzing the current status of express package, the corresponding process of express package clamping device was researched, and a device with complex functions of clamping, lifting and rotating was designed. After movement and mechanics model of the device was deduced and established, the key parameters were determined. The simulation experiment was carried out by Adams and Matlab, and finally the physical object was developed and tested. Motion trajectory and speed of express package clamping device met the requirements. The packaging speed was about 16 s, shortening 63.3% of the working time. The packaging success rate was around 95.1% and the package continuous rate was over 96.0%. Through the design of express package clamping device, the clamping, lifting and rotating functions of the express can be achieved, with stable and efficient performances.

KEY WORDS: express packaging; design; clamping and lifting; movement and mechanics model; simulation experiment

随着电商行业的蓬勃发展, 网购逐渐成为民众的主要购物方式。纸箱快递是包装快递中占比极大的部分, 它主要负责承载体积较大、质量较大的快递物件。现行的用于纸箱包装的机械中, 国外的包装机械自动化程度高, 但是造价高昂, 维护费用高; 国内的包装机械质量大、占地面积大且普及率低, 因而在快递、物流站点等地仍普遍采取人工操作方式, 即将快递抬起后进行包装, 在包装时需要不停将封装胶带环绕快递, 这种人工包装方式往往耗费大量的人力, 对于大

体积、大质量快递物件甚至需要多人抬举, 工作量大并且效率不高^[1]。

基于上述原因, 文中针对这种纸箱快递包装工艺流程的特征, 研究并设计一种结构精巧、机电一体、功能稳定的快递包装夹持装置, 以实现纸箱快递的抬起功能, 并在空中停留进行旋转动作, 缩短纸箱快递包装用时, 提高快递物流链传递效率, 减轻劳动者的劳动强度, 具有一定的经济效益和社会效益^[2]。

收稿日期: 2017-12-03

基金项目: 广西大学国家级大学生创新创业训练计划 (201710593014)

作者简介: 李丰延 (1981—), 男, 硕士, 广西大学讲师, 主要研究方向为工业设计。

1 总体技术与结构设计

1.1 快递包装工艺需求分析

设计的快递包装夹持装置的具体工艺流程见图1。其具体操作过程：将一个装完货物的纸箱快递放于夹持位置；启动夹持电机，使拉伸主臂闭合到适当程度，夹持快递；启动升降电机，使拉伸主臂带动纸箱快递提升到适当位置；启动旋转电机，使得纸箱快递旋转；对快递进行包装封装等操作；再次升降和夹持电机，降落实箱快递到原位置并松开拉伸主臂；此时的快递已完成包装，将快递拿开后，便完成一次快递包装工作，重复以上动作可实现工作流程^[3-4]。

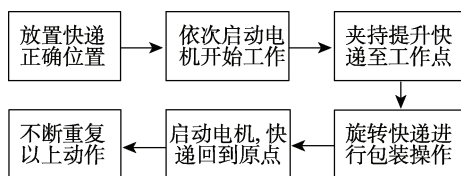


图1 工艺流程

Fig.1 Technological process

1.2 总体技术设计

为实现快递包装辅助夹持功能，设计一种快递包装夹持装置。以直流电机作为驱动源，通过丝杆螺母的配合传递动力，实现整个装置的运转。为实现“夹持-提升-停留”功能，将整个运动拆分成2种分运动，即设计2种机构。剪叉夹持机构通过对心曲柄滑块的传动，实现夹具在 $x-y$ 平面上的运动；高度调节机构通过偏置曲柄滑块的传动，实现夹具在 $x-z$ 平面上的运动。为实现“停留-旋转”功能，在夹具两边安装有电机，通过电机轴控制夹具转动，从而带动纸箱快递的旋转。

1.3 整体结构与工作原理

快递包装夹持装置见图2。这种快递包装夹持装置，包括支撑机构、剪叉夹持机构、高度调节机构以及快递旋转机构。支撑机构作为底座，高度调节机构安装在支撑机构上，剪叉夹持机构安装在高度调节机构上，快递旋转机构安装在剪叉机构上，剪叉夹持、高度调节与快递旋转机构中分别安装有驱动电机提供驱动力，实现以下功能。

1) 快递夹紧/松开。在后方的夹持电机的驱动下，通过剪叉夹持机构中的对心曲柄滑块机构的传动，拉伸主臂随之闭合与张开，进而夹紧或是松开快递。

2) 快递抬高/放下。在上方的升降电机的驱动下，通过高度调节机构中的偏置曲柄滑块机构的传动，带动安装在旋转机架上的剪叉夹持机构的上下运动。

3) 快递旋转。在夹具侧方旋转电机的控制下，电机轴和夹具相连接，可使夹具做旋转运动，使快递在空中旋转，使操作者可以轻松地进行包装操作^[5-6]。

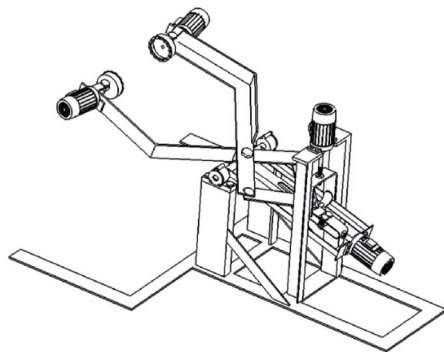


图2 总设计图

Fig.2 Diagram of overall design

1.4 主要机构结构设计

1.4.1 剪叉夹持机构

电机提供动力，通过电机输出丝杆旋转，和螺母配合传递动力。滑块被定位在旋转机架上的滑槽中，拉伸辅臂一端被定位在滑块上，一端与拉伸主臂铰链相连，拉伸主臂上有一点被限位在旋转机架上。拉伸主臂的末端为夹具。整体为一对心曲柄滑块机构。当辅臂随着滑块的前后移动而张开与闭合，带动主臂运动，使得拉伸主臂随之闭合与张开，夹具能对纸箱快递夹紧或是松开。剪叉夹持机构见图3。

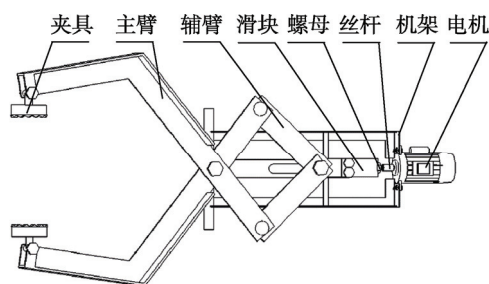


图3 剪叉夹持机构

Fig.3 Scissors clamping mechanism

1.4.2 高度调节机构

电机提供动力，通过电机输出丝杆旋转，和螺母配合传递动力。连接板一端与螺母相连，被定位为竖直运动，另一端与调向片用铰链连接。调向片另一端与旋转机架用铰链连接。旋转机架用铰链定位在底座上。整体为一偏置曲柄滑块机构。当连接板竖直上下运动时，调向片及旋转机架随之转动，实现整个机构绕轴承座旋转的运动，带动安装在旋转机架上的剪叉夹持机构的上升或下降。高度调节机构见图4。

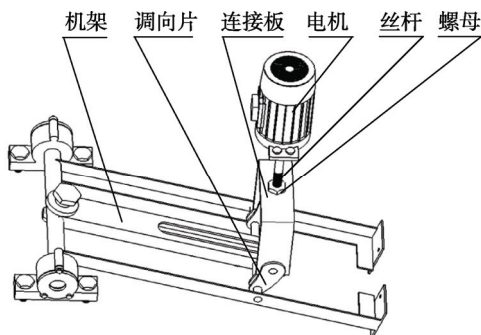


图 4 高度调节机构结构

Fig.4 Structure of height adjustment mechanism

2 运动与力学模型

在快递包装夹持装置的工作过程中,将运动独立地分为 3 个部分:夹持、提升、翻转。每部分所用时间分别以 t_1 , t_2 , t_3 独立地表示,同时设定在电机转速不变情况下,滑块速度恒为 v_1 , v_2 。

由于翻转部分的位移较为简单,为单一的绕轴心旋转运动(轴心为夹具中心),速度由于恒速电机而恒定,便不再做分析。在运动力学模型中,文中着重分析夹持与提升工况下的运动特征与力学分析,研究了纸箱快递在被夹持提升的过程中,位移、速度的情况,由于位移与速度公式较为复杂,不易直接用公式表达,文中采用复合函数的方式进行表达。同时深入研究了夹持力的大小以及它与纸箱大小的具体关系^[7]。

2.1 运动分析

通过剪叉夹持机构的机构运动简图(图 5),可将其分析为对心曲柄滑块机构,进行公式推导。通过三角变换和积分变换的方法,根据三角形特征求得在 x - y 平面上的曲柄转角与转速^[8-9]:

$$x = r \cos \theta + \sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta} \quad (1)$$

$$v_1 = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = \frac{dx}{d\theta} \cdot \omega_1 \quad (2)$$

$$\omega = \frac{v_1}{-r \sin \theta - \frac{r^2 \sin \theta \cos \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}}} \quad (3)$$

$$\cos \theta = \frac{x^2 + r^2 - l^2}{2x \cdot r} = \frac{v_1^2 t_1^2 + 2v_1 c t_1}{2v_1 r t_1 + 2cr} \quad (4)$$

$$\theta = \arccos \left(\frac{v_1^2 t_1^2 + 2v_1 c t_1}{2v_1 r t_1 + 2cr} \right) \quad (5)$$

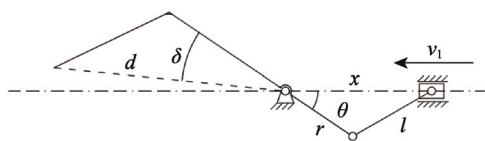


图 5 剪叉夹持机构运动简图

Fig.5 Diagram of scissors clamping mechanism motion

式中: x 为滑块与铰链间距离; r 为曲柄长度; l 为连杆(辅臂)长度; θ 为曲柄转角; ω_1 为曲柄转速; v_1 为滑块移速; $c = \sqrt{l^2 - r^2}$ 。

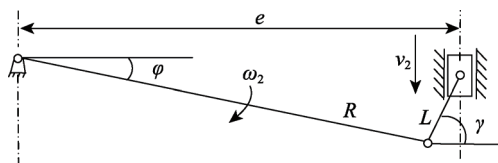


图 6 高度调节机构运动简图

Fig.6 Diagram of height adjustment mechanism motion

通过高度调节机构的机构运动简图(图 6),可将其分析为偏置曲柄滑块机构,进行公式推导。这里由于转角公式较简单,可采用直接求导法。文中根据三角形特征求得在 x - z 平面上的曲柄转角与转速:

$$e = R \cos \varphi + L \cos \gamma \quad (6)$$

$$v_2 t_2 = R \sin \varphi + L \sin \gamma \quad (7)$$

$$v_2 t_2 \sin \varphi + e \cos \varphi = \frac{v_2^2 t_2^2 + e^2 + R^2 - L^2}{2R} \quad (8)$$

式中: 由于 $e \cos \varphi$ 远大于 $v_2 \sin \varphi$, 后者可忽略。

$$\varphi = \arccos \left(\frac{v_2^2 t_2^2 + e^2 + R^2 - L^2}{2R \cdot e} \right) \quad (9)$$

$$\omega_2 = \varphi' = \frac{-2v_2^2 t_2}{\sqrt{4R^2 \cdot e^2 - (e^2 + R^2 - L^2)^2}} \quad (10)$$

式中: e 为滑块偏距; R 为曲柄长度; L 为连杆长度 φ , γ 分别为曲柄、连杆与水平轴夹角; v_2 为滑块移速; ω_2 为曲柄转速。在图 5 中,由于拉伸主臂的各部分在确定情况下,可视为刚体,即虚拟的夹具臂 d 的转速与曲柄转速 φ 一致。接着,通过复合函数的方式进行位移、速度的表达:

$$\begin{cases} x = d \cdot \cos[\theta(t_1) - \delta] \sin \varphi(t_2) \\ y = d \cdot \sin[\theta(t_1) - \delta] \sin \varphi(t_2) \\ z = d \cdot \cos \varphi(t_2) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} v_{ax} = d \cdot \omega_1 [\theta(t_1)] \cos[\theta(t_1) - \delta] \\ v_{ay} = d \cdot \omega_1 [\theta(t_1)] \sin[\theta(t_1) - \delta] \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} v_{bx} = d \cdot \omega_2(t_2) \cos \varphi(t_2) \\ v_{bz} = d \cdot \omega_2(t_2) \sin \varphi(t_2) \end{cases} \quad (13)$$

式中: x , y , z 分别为各方向上的位移(当 t_2 存在时, t_1 为最大值;当 t_1 不为最大值时, t_2 为 0), v_{ax} , v_{ay} 为夹持运动时的 x , y 方向速度; v_{bx} , v_{bz} 为提升运动时的 x , z 方向速度; d 为夹具与中心铰链距离; δ 为夹具臂与曲柄的夹角; $\theta(t_1)$ 为剪叉夹持机构倾角关于时间的中间函数。

2.2 夹持力分析

通过剪叉夹持机构的受力分析图,可将其分析为对心曲柄滑块机构^[10],进行公式推导。首先以 O 作为原点,建立力矩平衡方程:

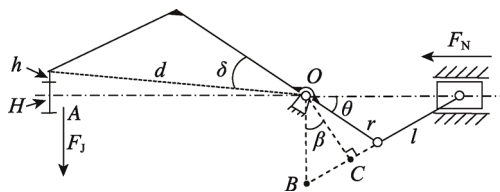


图7 剪叉夹持机构受力分析

Fig.7 Force analysis of scissors clamping mechanism

$$\frac{F_N}{2\cos\beta} \cdot OC = \frac{F_J}{2} \cdot OA \quad (14)$$

式中： F_J 为夹具的输出夹持力； F_N 为电机传递到丝杆的轴力。接着，通过丝杆轴力公式与三角形特征，得到纸箱宽度与夹持力大小的关系方程：

$$F_N = \frac{2\pi T \cdot \eta}{P} - \mu mg \quad (15)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{0.5H + h}{d}\right) + \delta \quad (16)$$

$$F_J = \frac{OB}{OA} \cdot F_N = i \cdot F_N \quad (17)$$

$$\begin{cases} OB = \frac{0.5r^2 \sin 2\theta_{(H)} + \sqrt{l^2 r^2 \sin^2 \theta_{(H)} - r^4 \sin^4 \theta_{(H)}}}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta_{(H)}}} \\ OA = \sqrt{d^2 - (0.5H + h)^2} \end{cases} \quad (18)$$

式中： T 为电机输出转矩； η 丝杆工作效率； P 为丝杆导程； μ 为摩擦因数； m 为滑块质量； H 为纸箱宽度； h 为夹具宽度； i 可视为是电机丝杆组合的传动比，其具体计算可由式(18)算得； $\theta_{(H)}$ 为主臂转角关于时间的中间函数。

3 仿真实验

为验证快递包装夹持装置的工作是否具有可靠性，文中通过3点进行验证：装置的运动轨迹是否符合要求；装置的速度是否连续且符合要求；装置的夹持力是否满足夹持并提升的工况的要求。

3.1 关键参数的确定

结合机械设计的计算，确定关键参数^[11]。文中设计的包装快递夹持装置，取 r 为16.5 cm， l 为18.5 cm， e 为17.4 cm， R 为16.5 cm， L 为3.6 cm， d 为44.3 cm， δ 为30°， η 为0.95， m 为0.3 kg， μ 为0.9， h 为2 cm， P 为10 mm。

初步设计了包装快递夹持装置，机器工作每阶段时间 t_1 ， t_2 均为2 s，求得后方电机的转速为1200 r/min，功率为0.5 kW，转矩为3.98 N·m，上方电机的转速为1600 r/min，功率为0.5 kW，转矩为5.31 N·m。相应的 F_N 为1193.8 N。

3.2 运动仿真

通过三维软件NX UG10.0进行三维建模，再将

实体模型导入运动仿真软件Adams2015中，再添上各机构间与内部的运动副。

设定装置夹持的机构为长、高均为500 mm，宽为300 mm的纸箱，质量为10 kg。其具体夹持位置在 y 方向靠近中心对称位置。其具体仿真动作分为2次，第1次为夹持动作，第2次为提升动作^[12-13]。

设定原点为剪叉夹持机构与地面平行时，拉伸主臂交叉点(即被定位在机架上的点)在地面的投影点。设定 x 方向正方向为从纸箱到后方电机的方向； y 方向正方向为从纸箱中心到夹具的方向； z 方向正方向为纸箱到地面的反向。通过前述的参数与工况条件进行运动仿真。其具体的运动轨迹和速度曲线见图8—9。

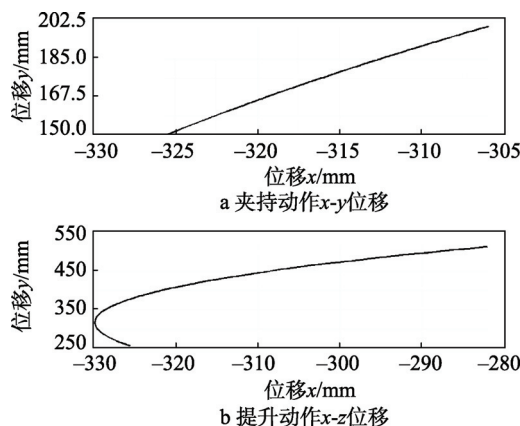


图8 运动轨迹

Fig.8 Motion trajectory

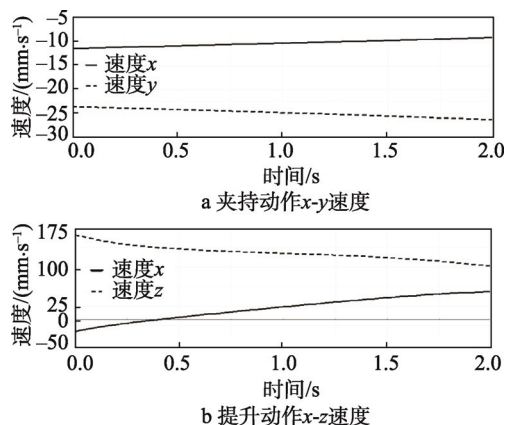


图9 速度曲线

Fig.9 Speed curve

通过运动轨迹图可知，快递包装夹持装置的运动轨迹和预期的轨迹一致，将纸箱抓取点从250 mm提升到520 mm，此位置纸箱可以翻转，达到工作要求。通过速度曲线图可见，快递包装夹持装置的运动速度总体连续且稳定，能满足工作要求，且具有稳定性和安全性。

3.3 数学仿真

由于影响夹持力的因素太多，不容易仿真，这里采取数学仿真的方法直接模拟函数，将式（16—18）分别在 Matlab2014 中建立方程，采用 compose 复合方程联立得电机丝杆组合的传动比 i ，再获得具体拟合线见图 10^[14]。

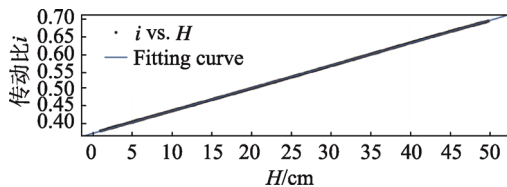


图 10 传动比拟合曲线
Fig.10 Transmission ratio fitting curve

由图 10 易知此曲线接近于一次线性方程，其具体拟合方程为：

$$i = 0.006484H + 0.372 \tag{19}$$

用 Matlab 软件进行回归检验，式（19）中方差和 SSE 为 0.000 109 7，接近于 0，说明拟合的结果理想。

通过拟合，获得了纸箱宽度与夹持力大小的关系方程，能更精确地考虑此装置的传力性能。考虑到机械设计的原则，传动比应在 0.5 以上，此快递包装夹持装置适宜夹持的纸箱大小应在 20~50 mm 间。

4 实物研制与试验

通过理论推导与仿真实验，文中设计的这种快递包装夹持装置能够有效地实现各项功能要求，其性能具有可靠性。研制该装置的实物样机，其实物拍摄见图 11。



图 11 装置实物
Fig.11 Physical object of the device

在实际试验中，以高度为 40 mm，长度和宽度接近 30 mm 和 50 mm 的 2 组纸箱快递，分为大和小 2 组，反复通过人力和机器的方式进行包装试验。以 2 种方式在连续包装 20, 40, 60 只快递的情况下记录所用时间、包装成功率和包装连续率作为指标进行分析，其具体试验结果见表 1^[15]。

表 1 实际试验结果
Tab.1 Actual test results

包装数量 (规格)	人力试验 时间/s	机器试验 时间/s	包装成功 率/%	包装连续 率/%
20 (小)	323	220	100.0	100.0
40 (小)	852	442	100.0	100.0
60 (小)	1303	691	96.7	99.2
20 (大)	507	302	99.2	99.5
40 (大)	1516	726	97.6	97.2
60 (大)	3181	1167	95.1	96.0

通过实际试验可见，文中提出的快递包装夹持装置具备大大缩减包装时间的功能，在长期连续包装的情况下，包装速度大约为 16 s 左右，缩短了 63.3% 的工作时间；同时包装成功率维持在 95.1% 以上，且该装置的包装连续率（即装置故障导致的包装工作中断时间占总时间的比）维持在 96.0% 以上。

5 结语

研制的快递包装夹持装置夹持、提升、旋转动作稳定迅速，包装成功率在 95.1% 左右，实现了快递夹持提升的功能，满足了纸箱快递包装的特定需求；机器包装的包装连续率保持在 96.0% 以上，装置在工作时具有可靠性。使用机器后包装速度大约为 16 s 左右，相对于人工包装方式，相比传统的人力包装流程，包装时间缩短了 63.3%，提高了包装效率，并节约了人力，减少了劳动强度。装置整体结构简单，易于制造和使用，具有较高的经济价值。文中基于快递包装夹持装置的研究，有助于包装机械的自动化、多用途、多方向发展。

参考文献：

[1] ANONYMOUS. New Study Projects World Demand for Packaging Machinery to 2017[J]. Modern Materials Handling, 2013, 68(10) : 1—5

[2] 徐锋, 纪杨建, 祁国宁, 等. 基于低碳与成本约束的机电产品包装概念设计[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 199—205.
XU Feng, JI Yang-jian, QI Guo-ning, et al. Packaging Conceptual Design of Mechanical and Electrical Products Based on Low-carbon and Cost Constraint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(10): 199—205.

[3] 常勇, 杨富富, 李延平. 糖果包装机中凸轮连杆—组合机构的尺寸综合研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(17): 2023—2030.
CHANG Yong, YANG Fu-fu, LI Yan-ping. Research on Size Synthesis of Cam-linkage Mechanism in a Candy Pacaging Machine[J]. China Machaniacal Engineering,

- 2012, 23(17): 2023—2030.
- [4] ZHANG H. Design and Implementation of the Clamping Device for the Underwater Blast Shoveling[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 77, 5(1): 68—72.
- [5] 孟彩茹, 张高青, 李夏楠, 等. 夹持机械手爪机构的设计与优化[J]. *机械设计与制造*, 2016(6): 70—74.
MENG Cai-ru, ZHANG Gao-qing, LI Xia-nan, et al. Design and Optimization on Clamping Gripper Mechanism[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2016(6): 70—74.
- [6] 高德. 包装机械设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
GAO De. *Packaging Machinery Design*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [7] ZOU T A, PAN C Y, XU X J, et al. Kinematics Analysis of the Wedge Clamping Device of PET Bottle Blowing Machines[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(199/200): 341—347.
- [8] WANG H, ZHANG R R, XIAO S L, et al. Analysis of Kinematics and Dynamics of Crank-rocker Mechanism[J]. *Advanced Materials Research*, 2014(945/946/947/948/949): 690—695.
- [9] 陶德华, 王英, 陈建能, 等. 脉动血流发生器非圆齿轮-曲柄滑块式驱动机构设计与分析[J]. *中国机械工程*, 2017, 28(16): 1914—1920.
TAO De-hua, WANG Ying, CHEN Jian-neng, et al. Design and Analysis of Non-circular Gear Slider Crank Mechanisms Used as Driver for Pulsating Blood Flow Generators[J]. *China Mechanical Engineering*, 2017, 28(16): 1914—1920.
- [10] 蔡泰信, 和兴锁, 朱西平. 理论力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
CAI Tai-xin, HE Xing-suo, ZHU Xi-ping. *Theoretical Mechanics*[M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 濮良贵, 陈国定, 吴立言. 机械设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
PU Liang-gui, CHEN Guo-ding, WU Li-yan. *Machinery Design*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [12] GAO B, ZHANG X G, CAI J F, et al. An Exploration on the Innovation Methods of the Printing and Packaging Machinery Based on Simulation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 201(401/402/403): 26—30.
- [13] 刘伟达, 刘剑雄, 毕世英, 等. 基于 ADAMS 的夹钳动力学仿真分析[J]. *机械设计与制造*, 2005(11): 52—54.
LIU Wei-da, LIU Jian-xiong, BI Shi-ying, et al. Dynamic Simulation Analysis of Clamp Based on ADAMS[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2005(11): 52—54.
- [14] 杨晋, 朱学亮, 张起樑, 等. 近恒力输出的锻造操作机夹持装置研究[J]. *机械工程学报*, 2017(22): 50—56.
YANG Jin, ZHU Xue-liang, ZHANG Qi-liang, et al. Clamping Device Study of the Approximate Constant Force Output Forging Manipulator[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017(22): 50—56.
- [15] 卢煜海, 毕伟, 马彦杰, 等. 气动书籍连动装袋装置设计[J]. *包装工程*, 2017, 38(7): 146—150.
LU Yu-hai, BI Wei, MA Yan-jie, et al. Designing and Researching on Pneumatic Interlock Book Packaging Device[J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(7): 146—150.