

一种新型模切机间歇机构的设计与运动学

吕方梅

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 设计一种新型的固定凸轮连杆间歇运动机构, 以实现高速模切机的间歇输纸功能。**方法** 首先, 分析间歇机构的工作原理及组合框图; 然后, 在对固定凸轮五杆机构的运动连续性进行研究之后, 根据运动连续性条件确定间歇机构的杆长尺寸; 接着, 应用 ADAMS 软件中相对轨迹曲线生成实体的方法设计固定凸轮轮廓曲线; 最后, 对基于简谐运动、摆线运动和五次多项式运动的间歇机构分别进行运动学分析。**结果** 基于五次多项式的固定凸轮连杆间歇机构不但可以实现预期的动静比, 而且在高速运转下运动性能平稳。**结论** 固定凸轮连杆间歇机构具有良好的运动性能, 能够满足高速模切机的工作要求。

关键词: 模切机; 固定凸轮连杆; 间歇机构; 运动学

中图分类号: TB486; TH112 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)13-0204-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.13.029

Design and Kinematics of a New Intermittent Mechanism for Die Cutting Machine

LYU Fang-mei

(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The work aims to design a new intermittent motion mechanism of fixed cam linkage to fulfill the intermittent paper feeding function of high-speed die cutting machine. Firstly, the working principle and the combination block diagram of the intermittent mechanism were analyzed. Secondly, after the motion continuity of a fixed cam five-bar mechanism was studied, the bar length of the intermittent mechanism was determined according to motion continuity conditions. Thirdly, a profile curve of fixed cam was designed by generating the entity with relative trajectory curves in ADAMS software. Finally, the kinematics analysis on the intermittent mechanism based on simple harmonic motion, cycloid motion and quintic polynomial motion was carried out separately. The intermittent mechanism of fixed cam linkage based on quintic polynomial not only fulfilled the expected dynamic and static ratio, but also was stable in high-speed operation. The intermittent mechanism of fixed cam linkage has good kinematic performance and can meet the working requirements of high-speed die cutting machine.

KEY WORDS: die cutting machine; fixed cam linkage; intermittent mechanism; kinematics

随着包装工业的快速发展, 对模切机的速度、精度和稳定性等性能要求越来越高^[1-3]。作为模切机中的关键部件之一, 间歇输纸机构运动性能的好坏对于模切机的速度、精度和稳定性具有很大影响。目前印刷包装行业生产应用的模切机主要采用平行分度凸

轮式和共轭凸轮串联扇形齿轮式间歇机构^[4-5]完成间歇输纸功能。这 2 种间歇机构具有以下特点: 齿轮副、凸轮副的制造、装配要求高, 导致间歇机构制造成本增大; 机构中存在较多的高副接触, 一旦磨损会影响模切机精度; 在高速模切工况下, 间歇机构不能

收稿日期: 2019-11-01

作者简介: 吕方梅 (1972—), 女, 硕士, 上海理工大学讲师, 主要研究方向为现代机构学与包装机械设计。

达到要求的平稳运动,从而影响模切机的性能和精度。

近年来,一些学者对连杆式间歇运动机构的运动综合与分析进行了研究。董惠敏等^[6]基于平面机构连杆曲线局部自适应拟合方法,建立了 Stephenson III 型六杆间歇机构近似函数综合的数学模型。Gogate^[7]对 Watt 型六杆机构中输入构件的转动特性进行了分析。Bulatović 等^[8]应用布谷鸟搜索算法解决六杆双停歇间歇机构的优化设计问题。Ümit^[9]基于弹性理论研究柔顺精确长停歇间歇机构的综合方法。由于完全低副式间歇机构在实现任意运动规律时存在局限。邹慧君等^[10-11]对凸轮-连杆组合间歇机构的设计进行了研究。WU Jing^[12]对凸轮-连杆机构中的 5 次多项式凸轮轮廓设计进行了研究。CHANG Wen-Tung^[13]对凸轮-连杆组合机构的误差分析进行了研究。

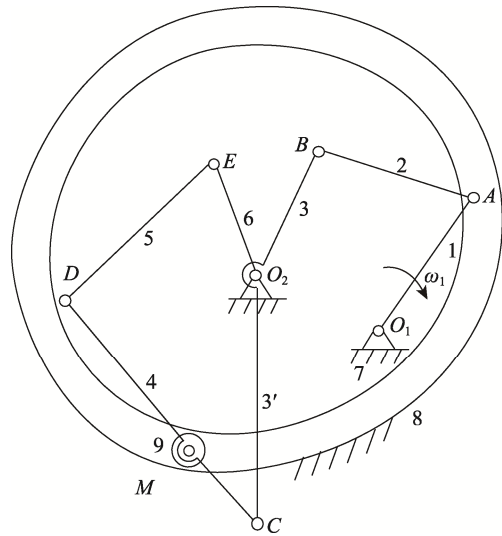
低副机构具有制造简单、耐磨损、承载能力强等独特优点,而高副约束能实现复杂运动。文中针对高速模切机的间歇运动要求设计一种新型的固定凸轮连杆间歇运动机构。由于组合机构中杆数较多,同时含有高副凸轮轮廓,使设计复杂度增大。文中应用 Adams 虚拟样机软件对机构进行动力学仿真^[14-16],实现新型模切机间歇机构的设计,并对基于简谐运动、摆线运动和五次多项式运动的间歇机构进行运动分析。

1 固定凸轮连杆间歇机构的工作原理

模切机间歇输纸机构由前置双曲柄机构和后置固定凸轮五杆机构串联组合而成,其工作原理见图 1。前置双曲柄机构的输入轴为 O_1 ,曲柄 1 在驱动力矩作用下绕着轴 O_1 匀速转动,通过连杆 2 驱动曲柄 3 绕轴 O_2 转动,曲柄 3 转动为后置五杆机构提供一个输入运动。后置机构是输入轴和输出轴同轴的回环式固定凸轮五杆机构,在连杆 4 上的 M 点处安装滚子 9,滚子 9 与固定于箱体上的凸轮槽 8 构成一高副约束。当输入曲柄 3' 转动时,连杆 4 上的 M 点受到凸轮槽的高副约束作用,通过合理设计凸轮槽的轮廓曲线,连杆 4 即可带动连杆 5 驱动输出构件 6 和输出轴 O_2 作不连续的间歇转动。

该间歇机构的组合框图见图 2,当考虑模切机的工艺特性给定输出构件 O_2E (或输出轴 O_2) 在一个运转周期内的动静比时,合理设计后置固定凸轮五杆

机构的杆长尺寸和凸轮轮廓可以实现预期的间歇运动规律,完成间歇输纸功能。



1.曲柄 2.连杆 3(3').曲柄 4.连杆 5.连杆 6.曲柄 7.机架 8.凸轮槽 9.滚子

图 1 间歇机构的工作原理

Fig.1 Working principal of intermittent mechanism

2 固定凸轮连杆间歇机构的尺度综合

2.1 固定凸轮五杆机构的运动连续性和杆长尺寸

在间歇机构的后置五杆机构中(图 1), O_2C 受前置机构驱动, C, E 之间的 l_{CE} 以及 O_2, D 之间的距离 l_{O_2D} 随固定凸轮的轮廓而变,实现输出构件 O_2E 的间歇往复摆动。在机构运转 1 周的过程中后置机构依次出现图 3 所示的 4 个特殊位置。在位置 1 曲柄 O_2E 与连杆 DE 拉直共线时, l_{O_2D} 的最大值 $(l_{O_2D})_{max} = l_5 + l_6$; 在位置 2 曲柄 O_2E 与 O_2C 重叠共线时, l_{CE} 的最小值 $(l_{CE})_{min} = l_3 - l_6$; 在位置 3 曲柄 O_2E 与连杆 DE 重叠共线时, l_{O_2D} 的最小值 $(l_{O_2D})_{min} = l_5 - l_6$; 在位置 4 曲柄 O_2E 与 O_2C 拉直共线时, l_{CE} 的最大值 $(l_{CE})_{max} = l_3 + l_6$ 。为了保证机构运动的连续性条件,若取 $l_3 > l_4, l_4 > l_5$, 则根据两边之差小于第 3 边, 两边之和大于第 3 边, 各杆长尺寸须满足式(1—4)。

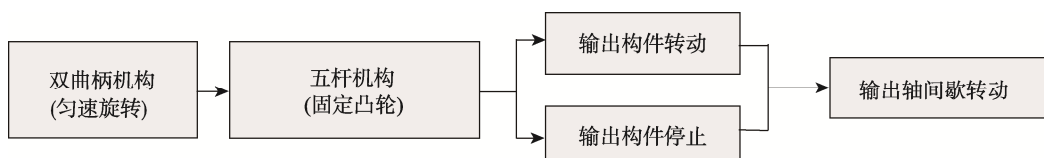


图 2 间歇机构的组合框图

Fig.2 Combination block diagram of intermittent mechanism

- (1) $l_5 + l_6 < l_3 + l_4$
- (2) $l_3 - l_6 > l_4 - l_5$
- (3) $l_5 - l_6 > l_3 - l_4$
- (4) $l_3 + l_6 < l_4 + l_5$

由式(1—4)推导出 $l_6 < l_5 < l_4 < l_3$ 。得到后置五杆机构实现运动连续性的杆长条件为： l_6 为最短杆；最长杆与最短杆之和小于其余两杆长度之和；最长杆与最短杆之差大于其余两杆长度之差。

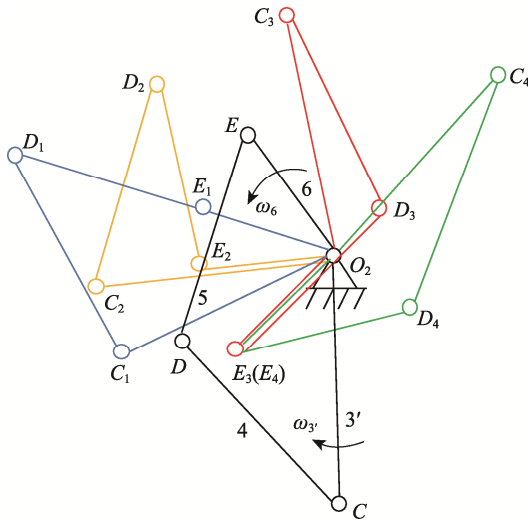


图3 五杆机构的4个特殊位置
Fig.3 Four special positions of five-bar mechanism

参照某企业 EX102 型自动模切机的结构布局和基本数据，确定机架上固定铰链中心 O_1O_2 的距离为 200 mm，然后考虑前置双曲柄机构与后置五杆机构的运动连续性条件，在尺寸范围内确定前置机构中各杆的尺寸 $l_1 = 250$ ， $l_2 = 225$ ， $l_3 = 300$ ， $l_{O_1O_2} = 200$ ，以及后置机构中各杆的尺寸 $l_3 = 550$ ， $l_4 = 500$ ， $l_5 = 460$ ， $l_6 = 300$ ，单位为 mm。

2.2 基于 ADAMS 软件的凸轮轮廓曲线设计

只有在合理的凸轮轮廓约束下，才能够保证模切机间歇机构实现确定的间歇运动要求。应用 ADAMS 软件中相对轨迹曲线生成实体的方法设计间歇机构

中固定凸轮廓的轮廓曲线。

根据各杆长尺寸建立间歇机构的三维模型，输入零件的材料属性，在各连杆之间添加运动副属性，并在输入曲柄 O_1A 和输出曲柄 O_2E 上添加旋转驱动和相应的驱动函数。通常，间歇机构的动/静比以及输出构件的升程角由模切机的工艺和安装结构确定。自动平压平模切机的工作速度普遍为 7500 ~ 9000 张/h，若以模切机的工作效率 8000 张/h 计算，则每个运动循环时间为 0.45 s。根据模切机的工艺特性，设定间歇机构的预期动静比为 $220^\circ/140^\circ$ 。图 1 间歇机构中，当输入构件 O_1A 自初始位置以角速度 ω_1 转动 φ_t 时，输出构件 O_2E 从初始位置转动一个升程角 θ_0 ；当输入构件继续转动 φ_s 时，输出构件 O_2E 停歇；当输入构件继续转动 φ_h 时，输出构件返回初始位置，对应的位移曲线见图 4。推程和回程阶段的运动规律决定了凸轮的轮廓曲线，也决定了间歇机构的运动特性，文中分别研究了简谐运动、摆线运动和五次多项式 3 种不同运动规律下的凸轮连杆间歇机构设计。根据模切机的工作效率，输入轴驱动函数为 $800 \text{ d} \cdot \text{time}$ ，输出轴驱动函数按照表 1 对应运动规律添加。

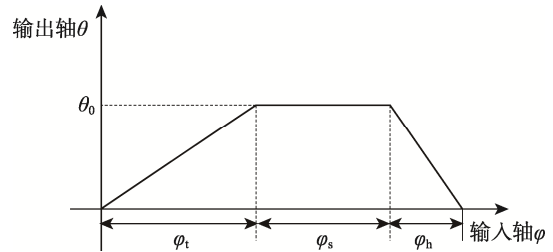


图4 输出构件的运动规律
Fig.4 Motion rule of output component

输入仿真时间和步长参数，进行运动仿真后选择 Create Trace Spline 功能，连杆 CD 上 M 点的轨迹即为凸轮轮廓曲线，见图 5。为了避免凸轮轮廓出现奇点现象，在仿真之前可以在连杆上建立多个 Mark 点，选取没有奇点的凸轮轮廓，同时确定 M 点的位置。

表 1 输出轴的驱动函数
Tab.1 Driving function of output shaft

运动规律	驱动函数
简谐运动	$IF(\text{time}-0.1875: 45d \cdot (1 - \cos(\pi/150 \cdot 800 \cdot \text{time})), 90d, IF(\text{time}-0.3625: 90d, 90d, 45d \cdot (1 + \cos(\pi/70 \cdot (800 \cdot \text{time} - 290)))))$
摆线运动	$IF(\text{time}-0.1875: 90d \cdot ((800 \cdot \text{time}/150) - 0.5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 800 \cdot \text{time}/150)/\pi), 90d, IF(\text{time}-0.3625: 90d, 90d, 90d \cdot (1 - ((800 \cdot \text{time} - 290)/70) - 0.5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot (800 \cdot \text{time} - 290)/70)/\pi))$
五次多项式	$IF(\text{time}-0.1875: 10 \cdot (90d) \cdot (800 \cdot \text{time})^{**3}/150^{**3} - 15 \cdot (90d) \cdot (800 \cdot \text{time})^{**4}/150^{**4} + 6 \cdot (90d) \cdot (800 \cdot \text{time})^{**5}/150^{**5}, 90d, IF(\text{time}-0.3625: 90d, 90d, 90d - (10 \cdot (90d) \cdot ((800 \cdot \text{time}) + 290)^{**3}/70^{**3} - 15 \cdot (90d) \cdot ((800 \cdot \text{time}) - 290)^{**4}/70^{**4} + 6 \cdot (90d) \cdot ((800 \cdot \text{time}) - 290)^{**5}/70^{**5}))$

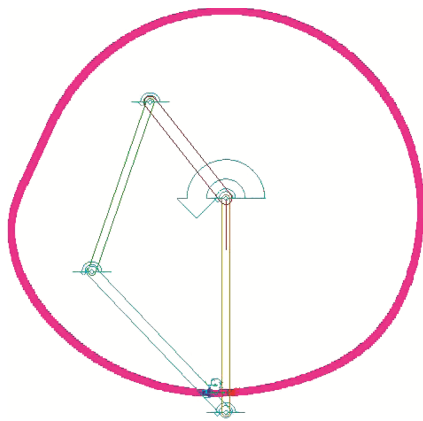


图 5 间歇机构的凸轮轮廓曲线
Fig.5 Cam profile curves of intermittent mechanism

3 固定凸轮连杆间歇机构的运动仿真与分析

间歇机构的运动平稳性是影响模切机运动性能的最重要因素，决定了模切机的加工精度，因此需要分析新型间歇机构的运动学和动力学特性。在间歇机构的凸轮盘与 CD 杆的 M 点处添加凸轮高副，在曲柄 1 的转动中心 O_1 处添加旋转驱动 $800.0 \text{ d} \cdot \text{time}$ 。

应用 ADAMS 软件对间歇机构进行运动学仿真，得到输出构件的角位移、角速度和角加速度曲线，简谐运动、摆线运动和五次多项式规律下的凸轮连杆间歇机构的运动曲线见图 6a, b, c。最大角位移、最大角速度和最大角加速度特征值见表 2。

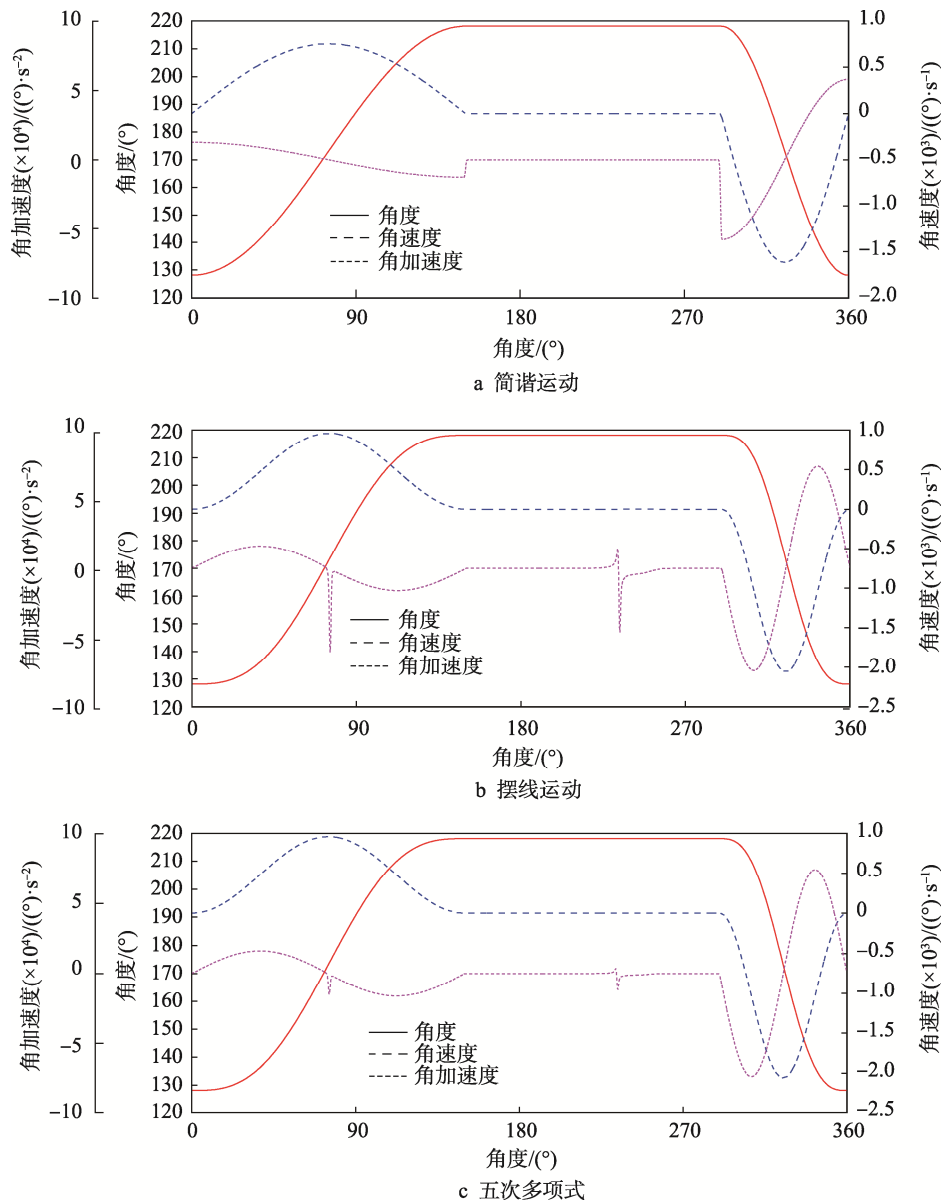


图 6 间歇机构的运动曲线
Fig.6 Kinematic curves for intermittent mechanism

表2 间歇机构的运动特征值
Tab.2 Kinematic eigenvalue of intermittent mechanism

运动规律	最大角位移/(°)	最大角速度/(°·s ⁻¹)	最大角加速度/(°·s ⁻²)	冲击与瞬时突变
简谐运动	90	1615	58 009	存在柔性冲击
摆线运动	90	2056	73 843	瞬时突变大
五次多项式	90	2057	73 840	瞬时突变小

分析图6中的角位移曲线,间歇机构在128°~218°范围内做升-停-回往复间歇转动,升程角为144°,回程角为73°,停歇角为143°,动静比为217°/143°,与理论预期动静比220°/140°相比,工程误差小于5%,满足模切机的动静工作要求。分析角速度曲线,间歇机构在升程与回程阶段都是先加速再减速,且升程阶段速度慢,回程阶段速度快,能够保证模切机的工艺要求与工作效率。比较表2中最大角速度数值,基于简谐运动的间歇机构最大角速度小于摆线运动和五次多项式。

由间歇机构的角加速度曲线看出,在升程阶段最大角加速度数值较小,但在回程阶段最大角加速度数值较大。间歇机构若采用简谐运动,虽然最大角加速度数值较小,但在运动的起点和终点角加速度存在有限值突变,因此会导致柔性冲击,而采用摆线运动和五次多项式时曲线连续,没有柔性冲击。进一步分析,基于摆线运动的间歇机构运动周期中出现2次较大的角加速度瞬时突变,最大数值达到86 675(°)/s²,导致高速模切机有较大的瞬时冲击,产生振动、噪音等;而基于五次多项式的间歇机构角加速度瞬时突变较小,最大数值只有21 884(°)/s²(即381.9 rad/s²)。目前EX102型自动模切机采用共轭凸轮-扇形齿轮式间歇机构,最大角加速度数值为1.2×10⁵(°)/s²,瞬时突变达到2.2×10⁵(°)/s²,与之比较,基于五次多项式的固定凸轮连杆间歇机构最大角加速度数值为73 840(°)/s²(即1288.7 rad/s²),最大角加速度和瞬时突变加速度数值更小,说明固定凸轮连杆间歇机构运动性能平稳,能够满足高速模切机的工作要求。

4 结语

针对高速模切机的间歇运动要求给出了一种新型的固定凸轮连杆间歇机构的设计方法。在分析后置五杆机构的运动连续性并确定各杆长尺寸后,应用ADAMS软件中相对轨迹曲线生成实体的方法设计了凸轮轮廓,对基于间歇运动、摆线运动和五次多项式规律的固定凸轮连杆间歇机构分别进行了运动分析。根据分析结果,基于五次多项式的固定凸轮连杆间歇机构能实现高速模切机的动静比运动输出,具有角速度高、角加速度及冲击小、运动性能平稳的优点,且结构与制造简单,能够满足高速模切机的运动要

求。设计方法提高了复杂间歇机构的设计效率,为开发低副结构的高速模切机间歇机构提供了理论参考。

参考文献:

- [1] GENG Wu-shuai, QI Yuan-sheng, XUE Chao-zhi, et al. The Design-Manufacturing Technology and the Trends of the Development of Full Automatic Plane Die-Cutting Machine[C]// International Conference on Advanced Technology of Design and Manufacture, Changzhou, 2011: 3—5.
- [2] WEN Shang, QIN Yan. Vision-based Automatic Die-cutting System with High-precision[C]// Proceeding of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, 2015: 1127—1131.
- [3] SU C H, LIN H H, LIU Y S. Hardware and Software Cooperative Control System for Die-cutting Machine Tool[C]// Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Applied System Innovation, Japan, 2017: 1789—1792.
- [4] 李艳莉. MW1050型模切机间歇机构创新设计与研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008: 2—10.
LI Yan-li. The Innovative Design of Intermittent Mechanism in MW1050 Die Cutting Machine[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008: 2—10.
- [5] 杨波. EC106自动模切机间歇机构的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 9—14.
YANG Bo. Study on Intermittent Mechanism of EC106 Die Cutting Machine[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 9—14.
- [6] 董惠敏, 王德伦. Stephenson III型六杆间歇机构近似函数综合自适应方法[J]. 大连理工大学学报, 2012, 52(4): 529—535.
DONG Hui-min, WANG De-lun. An Adaptive Approach of Approximate Function Generation for Stephenson III Six-bar Dwell Linkage[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2012, 52(4): 529—535.
- [7] GOGATE G R. Input Link Rotatability Analysis of Four-bar Based Watt Mechanisms with Revolute and Prismatic Joints[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 79: 94—108.
- [8] BULATOVIĆ R R, ĐORĐEVIĆ S R, ĐORĐEVIĆ V S. Cuckoo Search Algorithm: A Metaheuristic Approach to Solving the Problem of Optimum Synthesis of a Six-bar Double Dwell Linkage[J]. Mechanism and

- Machine Theory, 2013, 61(1): 1—13.
- [9] ÜMIT S. Synthesis Methodology of a Compliant Exact Long Dwell Mechanism Using Elastica Theory[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2006, 3: 73—90.
- [10] 邹慧君, 殷鸿梁. 间歇运动机构设计与应用创新[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 238—269.
ZOU Hui-jun, YIN Hong-liang. Design and Application Innovation of Intermittent Motion Mechanism[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 238—269.
- [11] 吕庸厚, 沈爱红. 组合机构设计与应用创新[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 46—89.
LYU Yong-hou, SHEN Ai-hong. Design and Application Innovation of Combined Mechanism[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 46—89.
- [12] WU Jing, YAN Rui-jun, SHIN K. Design of a 5th-polynomial High Speed Cam-based Intermittent Four-bar Linkage Mechanism[C]// 2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Korea, 2013: 584—586.
- [13] CHANG Wen-tung, WU Long-long. Tolerance Analysis and Synthesis of Cam-modulated Linkages[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 57: 641—660.
- [14] 彭斌, 方圆力. 运动副间隙对涡旋压缩机动力特性的影响[J]. 流体机械, 2019, 47(5): 1—6.
PENG Bin, FANG Yuan-li. Effect of Clearance of Motion Pair on Dynamic Characteristics of Scroll Compressor[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(5): 1—6.
- [15] 吴同喜, 仲梁维, 黄一晴, 等. 基于 ADAMS 模切机新型间歇机构的性能分析[J]. 包装工程, 2012, 33(7): 85—91.
WU Tong-xi, ZHONG Liang-wei, HUANG Yi-qing, et al. Performance Analysis of New Intermittent Mechanism of Die-cutting Machine Based on ADAMS[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(7): 85—91.
- [16] 杨仁民, 张学昌, 韩俊翔. 铝箔卷装盒机封口机构动力学仿真及参数优化[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 85—91.
YANG Ren-min, ZHANG Xue-chang, HAN Jun-xiang. Dynamics Simulation and Structural Parameter Optimization of Sealing Mechanism of Aluminum Foil Cartoning Machine[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(7): 85—91.