

# 平面模切机的模切过程优化

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2022.01.011

禹新路<sup>1</sup> 周敏<sup>1</sup>  
彭晓波<sup>2</sup>

1. 固高派动(东莞)智能科技有限公司  
广东 东莞 523808
2. 湖南工业大学  
电气与信息工程学院  
湖南 株洲 412007

**摘要:** 针对印后包装设备模切机在高低速模切时的不同要求及模切速度快速变速规划的需要, 优化模切过程。首先, 分析伺服驱动模切凸轮机构的运动过程; 然后, 优化模切驱动电机的整体运动规划, 实现不同模切节拍下, 切刀模切瞬间的速度不变, 使下压阶段和提升阶段的电机最大扭矩保持平衡; 随后, 进一步对模切加减速段进行优化, 设计非等腰三角形规划, 以高效发挥模切驱动电机的性能。该控制策略能提高切刀寿命, 提升模切整体效率。

**关键词:** 模切机; 运动规划; 模切效率

**中图分类号:** TB486<sup>+</sup>.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2022)01-0081-05

**引文格式:** 禹新路, 周敏, 彭晓波. 平面模切机的模切过程优化 [J]. 包装学报, 2022, 14(1): 81-85.

## 0 引言

随着印刷包装行业的发展, 印后包装设备模切机的研究越来越受到关注<sup>[1-2]</sup>。相较于传统的印刷包装机械共轴传动技术, 无轴传动技术具有更高的灵活性和传动效率<sup>[3]</sup>。无轴传动印刷包装机械的伺服控制系统开发也日渐成熟<sup>[4-5]</sup>。在实际模切过程中, 低速节拍模切时, 切刀切断物料产生的压力形变时间过长; 高速模切时, 切刀的冲击对切刀和模切机构寿命的影响尤为突出; 同时, 现有市场上模切设备控制系统多由 PLC+ 伺服电机组成, 而通用 PLC 的控制周期限制了模切机构的快速变速规划。因此, 如何优化模切速度以提高切刀寿命、提升模切效率显得尤为重要。

平面模切机凭借低成本、高灵活度、宽加工范围等优势, 成为应用最广泛的机型<sup>[6]</sup>。为提高我国平面模切机机械部分的可靠性, 学者们对模切设备的运动精度、运动协调性及动态特性进行了大量的研究,

并取得了一定的成果<sup>[7-9]</sup>。从结构优化角度, 北京印刷学院<sup>[10-11]</sup>设计的凸轮传动机构可有效提高模切机的模切速度; 吕方梅等<sup>[12]</sup>进一步设计了一种固定凸轮连杆间歇运动机构; 江爱民、秦培亮等<sup>[13-14]</sup>采用一种左右及上下完全对称的双肘杆机构, 可有效降低模切冲击, 提高工作效率。从控制算法优化角度, 张金标等<sup>[15]</sup>采用模糊 PID 控制器对模切拱速度实现闭环控制, 以提高模切效率。刘永钦<sup>[16]</sup>研究了新型速度场控制算法, 实现多轴联动的轮廓控制功能, 以提高模切精度。然而, 考虑不同模切节拍和实际模切加减速阶段等影响因素的研究尚不多见。

因此, 为实现驱动电机的高利用率及模切的高效率, 本文分析实际模切运动过程, 根据不同模切节拍进行整体运动规划, 同时考虑模切加减速阶段的重力和最大饱和电流的影响, 对模切速度进行优化设计, 并用固高科技的高速运动控制器连续速度规划功能 (PVT) 验证本优化设计的有效性。

收稿日期: 2021-10-16

作者简介: 禹新路 (1983-), 男, 河南郑州人, 固高派动 (东莞) 智能科技有限公司工程师, 硕士, 主要从事高速高精度运动控制技术和力位控制技术研究, E-mail: yu.xl@googletech.com

通信作者: 彭晓波 (1974-), 男, 湖南株洲人, 湖南工业大学讲师, 博士, 主要从事工业过程优化研究, E-mail: pengxiaobo88@126.com

## 1 模切运动过程分析

平面模切机的模切机构如图1所示。电机通过曲轴连杆机构带动模切头做高速上下运动，运动过程可分为自由运动阶段（空程部分）和模切阶段（接触物料部分）。

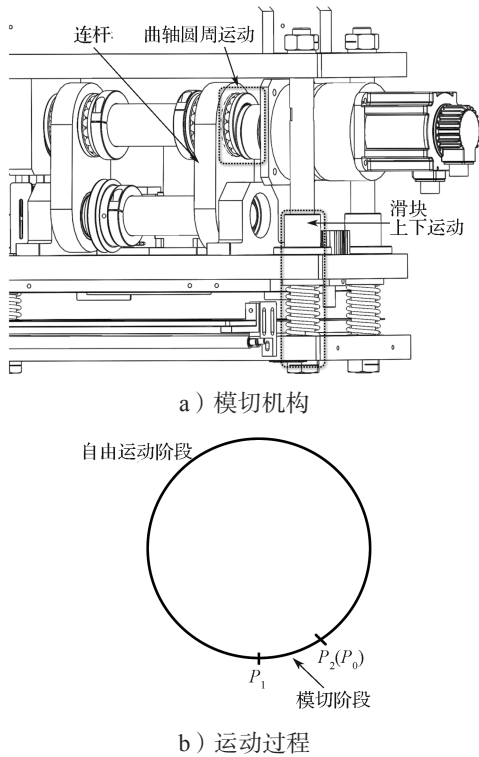


图1 模切机构及运动过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of die cutting mechanism and movement process

根据模切机构的运动特性，模切运动的数学建模如图2所示。

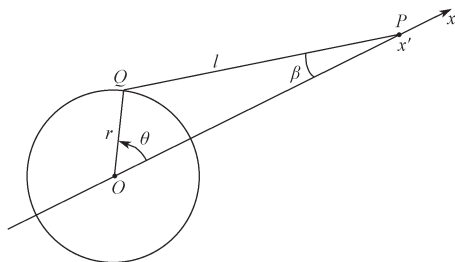


图2 模切运动建模

Fig. 2 Die cutting motion modeling

记曲柄  $OQ$  的长为  $r$ ，连杆  $QP$  的长为  $l$ 。当曲柄绕固定点  $O$  以角速度  $\omega$  旋转时，连杆带动滑块  $P$  在水平槽内作往复直线运动。假设初始时刻曲柄的端点  $Q$  位于水平线段  $OP$  上，曲柄从初始位置起转动角度

为  $\theta$ 。取  $O$  点为坐标原点， $OP$  方向为  $x$  轴正方向， $P$  的坐标为  $x'$ ，那么可用  $x'$  表示滑块的位移，可得

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

对式(1)进行求导，可得

$$v = \frac{dx'}{dt} = \frac{dx'}{d\theta} \times \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{dx'}{d\theta} = -\omega r \sin \theta \left[ 1 + \frac{r \cos \theta}{\sqrt{l^2 - r^2 \sin^2 \theta}} \right] \quad (2)$$

由式(2)可知，末端滑块的速度  $v$  与角速度  $\omega$ 、转动角度  $\theta$  有关，即模切机切刀的末端速度与电机的转速存在一定的关系。依据式(2)，绘制电机不同角速度时，末端速度  $v$  与转动角度  $\theta$  的关系，如图3所示。

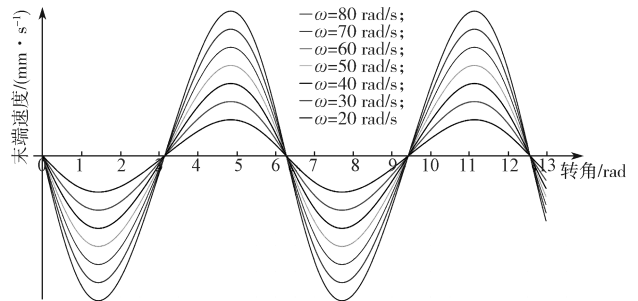


图3 不同角速度下末端速度与转角的关系

Fig. 3 The relationship between end speed and rotation angle at different angular velocities



彩图

由图3可知，电机角速度不同，进入模切位置的刀具末端速度也不同；角速度越大，刀具末端与砧板接触的速度越大。即若电机角速度小，则模切完成后回程速度小，时间长，影响刀具寿命；若电机角速度大，则模切时冲击噪音大，影响操作者使用体验及机台寿命。

## 2 模切速度规划

根据切刀进入模切阶段的速度保持恒定可保障切刀寿命达到使用要求，以及提高自由运动阶段的速度可提高节拍，本文做如下速度规划：

- 1) 从起始点（最高点）开始，模切电机启动，并高速运转，加速到最高速度；
- 2) 切刀进入模切位置之前，将模切电机速度减小到模切速度；
- 3) 模切完成以后，立即提高模切电机速度，并使模切电机以最高速度持续运转；
- 4) 当模切电机进入下一个模切位置时，将模切

电机减速到模切速度;

5) 接收到停止信号, 从模切完成位置开始, 模切电机减速直到最高点停止。

PVT 模式是用一系列数据点的位置、速度、时间参数来描述运动规律。用运动控制器高速连续速度规划功能定义数据点的位置、速度、最大速度、加速度、减速度、百分比, 不指定数据点的时间。运动控制器根据数据点参数, 自动将相邻 2 个数据点之间拆分为加速段、匀速段和减速段<sup>[17]</sup>。整体运动规划如图 4 所示。

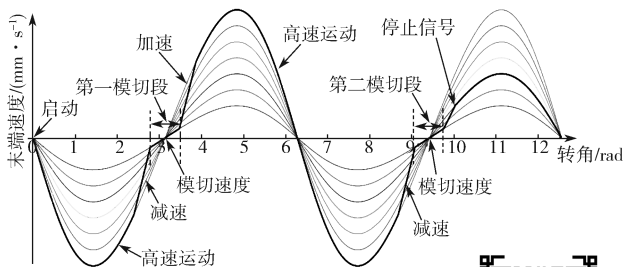


图 4 调整后的运动规划

Fig. 4 Adjusted motion planning



已知边界条件, 对自由运动阶段和模切阶段进行如下运动规划:

- 1) 根据模切阶段的节拍, 推算模切阶段角速度  $\omega_1$ ;
  - 2) 模切阶段位移为  $s_1$  ( $P_0$  到  $P_1$  段位移);
  - 3) 根据整体节拍, 推算整体节拍时间  $T$ ;
  - 4) 自由运动阶段位移为  $s_2$  ( $P_1$  到  $P_2$  段位移);
  - 5) 点  $P_2$  与  $P_0$  重合, 模切阶段角速度也为  $\omega_1$ 。
- 可得模切阶段位移为

$$s_1 = \omega_1 \times t_1, \quad (3)$$

则模切阶段的运动时间为

$$t_1 = s_1 / \omega_1, \quad (4)$$

自由运动阶段的运动时间为

$$t_2 = T - t_1. \quad (5)$$

为提高模切效率, 尽可能缩短时间, 提高整体节拍, 自由运动阶段的电机角速度按照等腰三角形规划, 如图 5 所示。

由图 5 可以得到自由运动阶段的位移为

$$s_2 = \frac{1}{2} \times (v_{\max} - v_1) \times t_2 + v_1 \times t_2. \quad (6)$$

已知  $v_1 = \omega_1$ ,  $v_{\max} = \omega_2$ , 则

$$\omega_2 = \frac{2s_2}{t_2} - \omega_1. \quad (7)$$

进一步可以求出加速度, 即

$$a_2 = \frac{2(v_{\max} - v_1)}{t_2} = \frac{2(\omega_2 - \omega_1)}{t_2}. \quad (8)$$

可得连续模切时自由运动阶段的参数 (最大速度和加减速度), 同时已知边界条件  $P_1$  和  $P_2$  的位置, 因此, 本运动规划的条件均可满足。

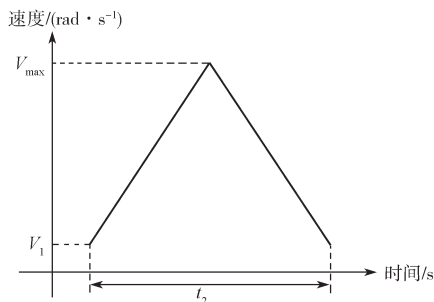


图 5 自由运动阶段的速度规划示意图

Fig. 5 Sketch of speed planning for free motion

### 3 模切加减速阶段的速度优化

根据上述速度规划做相应模切阶段实验, 模切阶段的速度等同于整体节拍 100 pcs/min 时的速度。整体节拍提升到 160 pcs/min 时模切电机电流和速度曲线如图 6 所示。

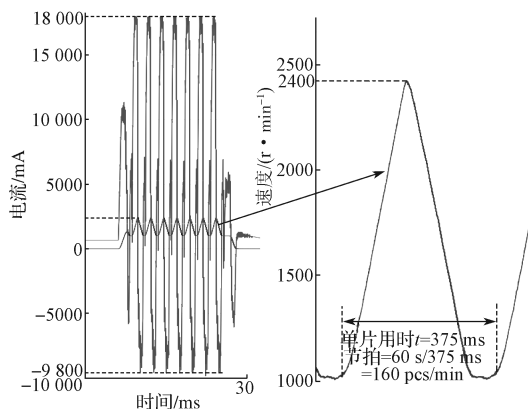


图 6 整体节拍 160 pcs/min 时模切电机电流及速度曲线

Fig. 6 Current and speed curve of die-cutting motor at overall beat 160 pcs/min

自由运动阶段角速度按等腰三角形规划, 即角加速度和角减速度相等, 当整体节拍达到 160 pcs/min 时, 电机模切之后空程加速段电流达到电机最大饱和电流 18 A。考虑到实际模切之后空程段整体负载向上运动, 模切电机需要提供加速扭矩和克服重力的扭矩, 而接近模切位置的减速段, 电机不需要提供克服重力的扭矩, 将角速度规划调整为非等腰三角形规

划,如图7所示。

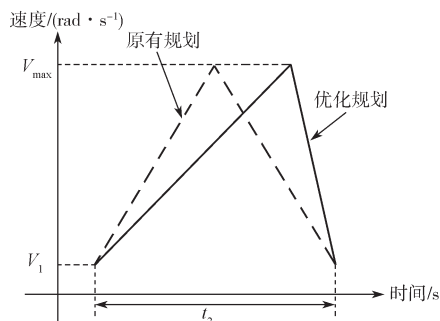


图7 非等腰三角形速度规划

Fig. 7 Non-isosceles triangle speed planning

根据负载质量,将角速度按非等腰三角形规划,模切阶段的角速度仍等同于整体节拍 100 pcs/min 时的角速度。整体节拍提高到 180 pcs/min 时模切电机电流及速度曲线如图8所示。

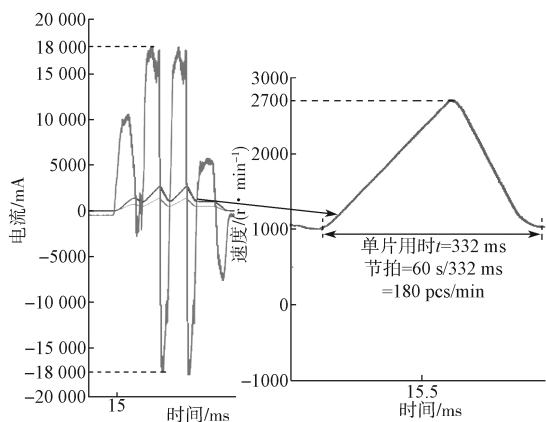


图8 整体节拍 180 pcs/min 时模切电机电流及速度曲线

Fig. 8 Current and speed curve of die-cutting motor at overall beat 180 pcs/min

由图8可知,通过合适的加速度和减速度规划,电机在加速段和减速度段的电流均达到饱和值,能更加高效地发挥电机性能,同时提高模切效率。

## 4 结语

本文通过分析平面模切机模切机构的运动过程,使用运动控制器高速连续速度规划功能,对模切运动的自由运动阶段和模切阶段进行合理的速度规划,并结合不同阶段重力的影响,优化速度规划曲线,从而满足在不影响切刀寿命下,最大限度提高整体模切节拍的需求。本控制策略对凸轮驱动的其他运动机构效率优化均有一定参考意义。

后续工作中,结合运动规划和模切机运动机构进

行一体化设计,进一步提升模切过程不同速度段的执行效率,优化运动曲线的平滑性,使模切速度和刀具寿命进一步提升。

## 参考文献:

- [1] SU C H, LIN H H, LIU Y S. Hardware and Software Cooperative Control System for Die-Cutting Machine Tool[C]//2017 International Conference on Applied System Innovation (ICASI). Sapporo: IEEE, 2017: 1789-1792.
- [2] 黄天涛. 异形袋加工工艺分析[J]. 包装学报, 2013, 5(3): 59-62.  
HUANG Tiantao. Analysis on Processing Technology of Special-Shaped Bag[J]. Packaging Journal, 2013, 5(3): 59-62.
- [3] 苏 钟. 印刷机无轴传动(连载三)[J]. 印刷世界, 2007(5): 50-51.  
SU Zhong. Shaftless Transmission of Printing Press[J]. Print World, 2007(5): 50-51.
- [4] 刘建华. 数字式高速多轴印刷模切机伺服控制系统设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.  
LIU Jianhua. The Design of Numerical High Speed Multi-Axis Printing and Die Cutting Machine Servo Control System[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [5] 赵凯辉, 何 静, 李祥飞, 等. 包装印刷用永磁同步电机控制及无速度传感器控制技术综述[J]. 包装学报, 2017, 9(1): 13-20.  
ZHAO Kaihui, HE Jing, LI Xiangfei, et al. Review of Permanent Magnet Synchronous Motor Control and Sensorless Technology for Packaging and Printing[J]. Packaging Journal, 2017, 9(1): 13-20.
- [6] 刘 帅. 自动模切机新技术的应用与发展[J]. 印刷技术, 2018(11): 16-20.  
LIU Shuai. Application and Development of New Technology of Automatic Die-Cutting Machine[J]. Printing Technology, 2018(11): 16-20.
- [7] 成刚虎, 王西珍. 全自动平压平模切机肘杆机构运动精度可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(15): 1786-1789.  
CHENG Ganghu, WANG Xizhen. Reliability Analysis for Kinematics Accuracy on Elbow-Bar Mechanism of Automatic Die Cutting Machine[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(15): 1786-1789.
- [8] 李桂红, 成刚虎. 平压模切机构及其运动协调性的分析研究[J]. 包装与食品机械, 2003, 21(5): 5-7.  
LI Guihong, CHENG Ganghu. Analysis and Research of Die Cutting Platen Press Mechanism and Its Motion



- Compatibleness[J]. Packaging and Food Machinery, 2003, 21(5): 5-7.
- [9] 韩应敏. 大幅面平压平模切机下平台运动系统动态特性分析 [D]. 北京: 北京印刷学院, 2017.  
HAN Yingmin. Dynamic Characteristics Analysis of the Lower Platform Motion System of Large-Format Flat-Pressure Die-Cutting Machine[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2017.
- [10] 韩雪, 王佳琪, 鲁楠. 一种新型平压平模切机的动平台驱动机构 [J]. 山东工业技术, 2017(18): 45.  
HAN Xue, WANG Jiaqi, LU Nan. A New Type of Drive Mechanism of the Moving Platform on Die-cutting Machine[J]. Shandong Industrial Technology, 2017(18): 45.
- [11] 郭宁宁. 平压平模切机动平台传动系统的分析研究 [D]. 北京: 北京印刷学院, 2017.  
GUO Ningning. Analysis and Research of the Mobile Platform Transmission System on Die-Cutting Machine[D]. Beijing: Beijing Institute of Graphic Communication, 2017.
- [12] 吕方梅. 一种新型模切机间歇机构的设计与运动学 [J]. 包装工程, 2020, 41(13): 204-209.  
LÜ Fangmei. Design and Kinematics of a New Intermittent Mechanism for Die Cutting Machine[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(13): 204-209.
- [13] 江爱民, 章争荣, 李杰, 等. 伺服压力机双动肘杆机构的设计与研究 [J]. 锻压技术, 2018, 43(2): 133-140.  
JIANG Aimin, ZHANG Zhengrong, LI Jie, et al. Design and Research on Servo-Press with Dual-Drive Toggle Mechanism[J]. Forging & Stamping Technology, 2018, 43(2): 133-140.
- [14] 秦培亮, 陈行行, 王帅. 基于肘杆机构双输出轴电机驱动的双工位卧式冲压机设计与仿真 [J]. 装备制造技术, 2020 (5): 17-20.  
QIN Peiliang, CHEN Xingxing, WANG Shuai. Double-Station Horizontal Press Based on Toggle Mechanism Driven by the Motor Which Has Double Output Axes[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(5): 17-20.
- [15] 张金标, 姬泽学, 周飞翔, 等. 基于模糊PID的模切机系统的设计与实现 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(2): 129-133.  
ZHANG Jinbiao, JI Zexue, ZHOU Feixiang, et al. Design and Realization of Die-Cutting Machine System Based on Fuzzy PID[J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(2): 129-133.
- [16] 刘永钦. 基于速度场算法的模切机控制系统设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.  
LIU Yongqin. Design of Die-Cutting Machine Control System Based on Velocity Field[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [17] 固高科技. GTS-VB 运动控制器编程手册: 基本功能\_R1.5.[EB/OL]. [2021-05-11]. [http://www.googoltech.com.cn/pro\\_view-3.html](http://www.googoltech.com.cn/pro_view-3.html).  
GoogolTech. GTS-VB Motion Controller Programming Manual: Basic Functions\_R1.5.[EB/OL]. [2021-05-11]. [http://www.googoltech.com.cn/pro\\_view-3.html](http://www.googoltech.com.cn/pro_view-3.html).

(责任编辑: 邓彬)

## Optimization of Die-Cutting Process of Plane Die-Cutting Machine

YU Xinlu<sup>1</sup>, ZHOU Min<sup>1</sup>, PENG Xiaobo<sup>2</sup>

(1. Googol Paradox (Dongguan) Intelligent Technology Co., Ltd., Dongguan Guangdong 523808, China;  
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** For the die-cutting machine of post-press packaging equipment, according to the different requirements of high and low-speed die-cutting and the need for rapid variable-speed planning of die-cutting speed, the optimization strategy of the die-cutting process was studied. First, the motion process of the servo-driven die-cutting cam mechanism was analyzed. Then, the overall motion planning of the die-cutting drive motor was optimized to realize that under different die-cutting beats, the speed of the cutter at the moment of die-cutting remained unchanged, and the maximum torque of the motor was balanced in the pressing stage and the lifting stage. subsequently, the die-cutting acceleration and deceleration phase was further optimized, and a non-isosceles triangle plan was designed, which efficiently played the performance of the die-cutting drive motor. This control strategy can improve the service life of the cutter and the overall efficiency of die cutting.

**Keywords:** die-cutting machine; motion planning; die-cutting efficiency