

纸护角打框机控制系统设计

蔡锦达, 鲍亮

(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 针对纸护角打框机在定长冲切的过程中, 速度和位置的双同步跟踪的控制要求, 优化纸护角打框机的控制系统。**方法** 介绍设备及其工作原理, 分析并优化控制模型与数学模型, 在非同步区引入 S 曲线进行加减速, 并使用外部中断模式进行跟踪控制, 最后用 Matlab 仿真控制曲线。**结果** 控制模型优化使刀具运动轨迹更加精确, 数学模型优化使刀具的位置与速度控制更加精确, 外部中断模式实现了跟踪控制。经 Matlab 仿真, 跟踪系数 K 的曲线是连续的, 没有产生阶跃变化。同时满足速度和位置的双同步跟踪的控制要求。**结论** 经实际使用, 纸护角打框机的控制精度高, 控制实时性好。使用设计的 S 曲线加减速控制方法后, 纸护角打框机在高速冲切时, 减小了噪音和振动, 提高了设备寿命和加工精度。

关键词: 飞剪; 纸护角; S 曲线加减速; 跟踪控制

中图分类号: TB486.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)17-0168-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.17.024

Design of Control System of Frame-making Machine of Paper Angle Bead

CAI Jin-da, BAO Liang

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

ABSTRACT: The work aims to optimize the control system of the frame-making machine of paper angle bead, regarding the control requirement of dual synchronous tracking of the speed and position in the fixed-length punching and cutting process of the frame-making machine. The equipment and working principle were introduced. The control model and mathematical model were analyzed and optimized. S curve was introduced in the asynchronous region for acceleration and deceleration, and the external interrupt mode for tracking control was used. Finally, Matlab was used to simulate the control curve. The control model optimization made the cutter track more accurate, the mathematical model optimization made cutter position and speed control more accurate, and the external interrupt mode realized tracking control. By Matlab simulation, the curve of the tracking coefficient K was continuous without any step change. The control requirements of dual synchronous tracking of speed and position were satisfied. Practical application shows that, frame-making machine of paper angle bead has high control precision and good real-time control. With the designed S-curve acceleration and deceleration control method, the noise and vibration are reduced when the frame-making machine of paper angle bead is punching and cutting at high speed, and the service life and processing accuracy of the equipment are improved.

KEY WORDS: flying shear; paper angle bead; S-curve acceleration and deceleration; tracking control

纸护角又叫护角板、边缘板、纸角钢、纸包角等, 是国际上最流行的包装产品之一, 最早出现于 20 世

收稿日期: 2019-03-20

作者简介: 蔡锦达 (1963—), 男, 上海理工大学教授、硕导, 主要研究方向为机械电子及自动化。

纪 70 年代，但直到 20 世纪 80 年代才普及，它被用来代替木料包装材料、金属护角板和其他笨重的包装方式^[1-2]。纸护角以纸材料为原料，通过粘合剂粘合压制而成，具有价格低、重量轻、耐压强度大、抗载荷力大、坚韧性好、不易破裂、可回收、无污染、强度和刚度高等特点^[3-4]。纸护角可以和大部分家产品如洗衣机、微波炉、冰箱等的包装组成一个整体，使产品在运输过程中，不产生位移和倾斜^[2]，并对产品的边缘和角落进行有效的保护，避免产品磕碰和撞击^[5-6]。

1 设备及工作原理

纸护角的生产设备主要包括 4 个部分：上胶、测量、进料、打框机。其中测量部分由测长编码器和测长轮组成，测长轮靠在进料的外表面，当进料时，通过测长轮旋转来计算纸护角运行的长度。进料部分主要由变频器、控制系统和滚轴组成，主要完成纸护角的连续平稳进料和压合成型。打框机是纸护角生产的重要组成部分，其可根据设定长度对连续送入的纸护角进行定长冲角和定长裁切，即纸护角的冲角和裁切动作在运行中完成，无停顿时间，并且运行中进料速度可快速提升或下降。其由控制板、2 台伺服电机及驱动器、人机界面和冲切机械机构组成，冲切机械机构由冲角机构和裁切机构组成。纸护角长度、纸护角厚度、设备参数等由人机界面输入^[7]。

纸护角打框机的工作原理和工业飞剪机相似，都是通过旋转刀具对产品进行剪切。在剪切瞬间，刀具与进料是同步运行的，因此称为动态剪切，一般也泛称为飞剪^[8]。飞剪是最常用的切割方式之一，广泛应用于金属条切割、印刷工业、纺织工业和造纸工业^[9-10]。因为采取的同步动态剪切，材料是连续进给的，加工效率高。工业飞剪机的机械结构复杂，且计算繁琐^[11]，而纸护角打框机的机械结构简单，传动链简洁。纸护角打框机采用偏心轮方式传动，伺服电机带动转轴，通过同步带带动偏心轮转动，冲角刀和裁切刀在各自偏心轮带动下，作平行于进料方向的圆周运动，这要求刀具在 1 个圆周运动轨迹内完成对纸护角的同步跟踪，同时分别完成定长冲角和定长裁切的动作，实现打框（即冲切）过程中刀具对纸护角的速度和位置的双同步跟踪^[12]。

2 控制模型建立

2.1 控制模型

冲角机构和裁切机构的控制原理相同，只是刀具结构不同。刀具的运行轨迹见图 1，在刀具的 1 个运动周期内，将其划分为 4 个区，分别为进刀区、同步区、退刀区、回刀区。其中 AB 弧段为进刀区， BC

弧段为同步区， CD 弧段为退刀区， DA 弧段为回刀区。 A 点为起始点，也是最高点； B 点为啮合点； C 点为切断点，也是最低点； D 点为退刀完成点。 AB 弧段要求当刀具到达 B 点前瞬间，刀具的水平速度要接近于进料速度，同时实现位置跟踪。 BC 弧段要求刀具的水平分速度时刻等于送料速度，刀具作变速运动。在此过程中，刀具的竖直分速度逐渐减小，当刀具运动到 C 点时，此时刀具所处位置位于圆周轨迹最低点，竖直分速度为 0。 CD 弧段要求刀具的水平分速度时刻大于等于送料速度，否则纸护角会碰到刀具。因为是连续进料，如果进料过程中遇到阻碍，即碰到刀具。较轻的阻碍将导致纸护角变形，较重的阻碍将导致纸护角挤成一团，无法继续生产，浪费大量的原料，降低生产效率。 DA 弧段要求刀具回到点 A 时，刀具完成 1 次完整的圆周运动。 AB 弧段和 DA 弧段的总和又称为补偿区，需要保证刀具在一个圆周运动轨迹内，冲切设定的长度，实现位置同步。 BC 弧段实现速度同步。由此刀具在一个圆周运动轨迹内完成对纸护角速度和位置的双同步跟踪，以实现纸护角的精确定长冲切^[13]。

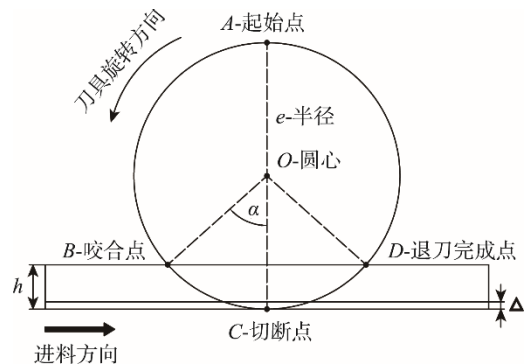


图 1 刀具运动轨迹
Fig.1 Motion track of the cutter

2.2 数学模型

2.2.1 速度同步

根据冲切时纸护角和刀台子的缝隙，以及纸护角的厚度，两者之和为 h ，刀具运动轨迹的半径（偏心距）为 e ，可以得出 BC 两点之间的圆心角 α （即“同步角”）：

$$\cos \alpha = \frac{e-h}{e} \tag{1}$$

打框机所采用的测长编码器每转脉冲数为 C ，测长编码器与物料相切的直径为 d ，则测长编码器 1 个脉冲所走的距离为 L_1 ：

$$L_1 = \pi d / C \tag{2}$$

如图 2 所示，当刀具运动到 B 点时，测长编码器发出的第 1 个脉冲对应刀具所走的长度设为 S_1 ，所对应的圆心角为 θ_1 ， BF 垂直 BO ，弧段 BE 的长度近似于 BF 的长度：

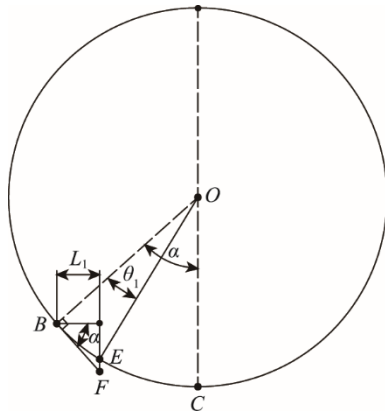


图2 速度同步计算

Fig.2 Speed synchronization calculation

$$S_1 = L_{\overset{\frown}{BE}} \approx L_{BF} = \frac{L_1}{\cos \alpha} = K_{21} \frac{2\pi e}{N} \quad (3)$$

式中： N 为刀具转1圈需要控制器发给伺服电机的脉冲总数； K_{21} 为刀具进入同步区的第1个跟踪系数。

第2个脉冲对应刀具所走的长度为：

$$S_2 = \frac{L_1}{\cos(\alpha - \theta_1)} = \frac{L_1}{\cos(\alpha - K_{21} \cdot 360^\circ / N)} = K_{22} \frac{2\pi e}{N} \quad (4)$$

式中， K_{22} 为刀具进入同步区的第2个跟踪系数。

第3个脉冲对应刀具所走的长度为：

$$S_3 = \frac{L_1}{\cos(\alpha - K_{21} \cdot 360^\circ / N - K_{22} \cdot 360^\circ / N)} = K_{23} \frac{2\pi e}{N} \quad (5)$$

式中， K_{23} 为刀具进入同步区的第3个跟踪系数。

根据参考文献[13]可知，在BC弧段内，第 n 个脉冲对应刀具所走的距离为：

$$S_n = \frac{L_1}{\cos\left(\alpha - 360^\circ / N \sum_{i=1}^{n-1} K_{2i}\right)} = K_{2n} \frac{2\pi e}{N} \quad (6)$$

式中， K_{2n} 为刀具进入同步区的第 n 个跟踪系数。

2.2.2 位置同步

设刀具转1圈需要控制器发给伺服电机的脉冲总数为 N ，测长编码器走过预设纸护角长度 L 发出的脉冲总数为 N' ， K 为跟踪系数，也称为比例系数：

$$N = K \cdot N' \quad (7)$$

$$N = N_{AB} + N_{BC} + N_{CD} + N_{DA} \quad (8)$$

$$N' = N'_{AB} + N'_{BC} + N'_{CD} + N'_{DA} \quad (9)$$

式中： N_{AB} ， N_{BC} ， N_{CD} ， N_{DA} 分别为刀具运动在对应弧段内需要控制器发给伺服电机的脉冲数；

N'_{AB} ， N'_{BC} ， N'_{CD} ， N'_{DA} 分别为刀具运动在相应弧段测长编码器发出的脉冲数^[13]。

由式(7—9)可得：

$$\begin{aligned} N &= K_1 \cdot N'_{AB} + K_2 N'_{BC} + K_3 N'_{CD} + K_4 N'_{DA} \\ &= \sum_{i=1}^{N'_{AB}} K_{1i} + \sum_{i=1}^{N'_{BC}} K_{2i} + \sum_{i=1}^{N'_{CD}} K_{3i} + \sum_{i=1}^{N'_{DA}} K_{4i} \end{aligned} \quad (10)$$

式中： K_{1i} ， K_{2i} ， K_{3i} ， K_{4i} 分别为各段的跟踪系数，不是固定值，每个编码器脉冲对应一个跟踪系数 K_{i0} 。

设伺服电机的频率为 f ，刀具旋转1圈的时间为 t_0 ，可得到如下关系式：

$$t_0 = \frac{N}{f} \quad (11)$$

设进料速度为 v ，测长编码器收到1个脉冲的时间为 T_0 ，纸护角走过预设长度为 L 的时间为 t_1 ，可得到如下关系式：

$$t_1 = N' T_0 = N' \frac{L_1}{v} \quad (12)$$

t_0 与 t_1 相等，通过式(11)与(12)可得：

$$\frac{N}{N'} = f \frac{L_1}{v} \quad (13)$$

若跟踪系数 K 恒定不变，通过式(7)与(13)，可以得到跟踪系数 K 与进料速度 v 的关系式：

$$K = f \frac{L_1}{v} \quad (14)$$

当跟踪系数 K 恒定时，伺服电机的频率 f 与进料速度 v 成正比。当进料速度 v 恒定时，伺服电机的频率 f 与跟踪系数 K 成正比。在1个圆周运动轨迹内，当跟踪系数 K 是连续的，伺服电机频率 f 也会是连续的，伺服电机脉冲速率又与刀具速度成正比^[14]。若跟踪系数 K 产生较大的阶跃变化，进料速度 v 越大，伺服电机的频率 f 的突变幅度也就越大。解决这一问题的方法是引入函数作为运动曲线，使曲线平顺、连续和光滑。伺服电机的频率 f 平顺地变化，可大大提高控制精度和系统的稳定性，从而延长系统的使用寿命。同时，由于消除了伺服电机瞬间的频率变化引起的过电流，扩大了电源设备的选型范围，降低了系统的成本^[15]。

由于进料速度 v 恒定时 f 和 K 成正比，因此伺服电机加减速的变化，就是跟踪系数 K 的变化。常用 S 曲线进行伺服电机加减速，所以引用 S 曲线加减速函数来计算补偿区域的跟踪系数 K 。根据速度与时间的函数^[16]，用跟踪系数 K 代替速度，编码器脉冲数 N' 代替时间，得到跟踪系数 K 与编码器脉冲数 N' 之间的计算式：

$$K(n) = \begin{cases} \frac{an^2}{2(K_m - K_s)} + K_s & n \in [0, N_1] \\ \frac{a(n - N_2)^2}{2(K_s - K_m)} + K_m & n \in [N_1, N_2] \\ K_m & n \in [N_2, N_3] \\ \frac{a(n - N_3)^2}{2(K_e - K_m)} + K_m & n \in [N_3, N_4] \\ \frac{a(n - N_5)^2}{2(K_m - K_e)} + K_e & n \in [N_4, N_5] \end{cases} \quad (15)$$

其中： K_s 是加速段的起点值； K_m 为给定的进给值； K_e 为减速段的终点值； N_1-N_5 是各阶段的编码器脉冲数； a 为加速度。

3 跟踪控制

控制器通过设定的长度、厚度和设备参数等计算跟踪系数 K 。每当测长编码器反馈给控制器脉冲，控制器的外部中断便累加一次跟踪系数 K ，即 $count=count+K_i$ ， $count$ 为跟踪系数 K 的累加和，若 $count < H$ ，控制器不发出驱动信号，若 $count \geq H$ ，控制器发出驱动信。跟踪系数 K 的基础值取值范围为 0~1。外部中断模式有单边沿触发和双边沿触发， H 分别取 0.5 和 1， K 值分别取 0.3 和 0.7。不同模式下控制器收到脉冲和发出的脉冲见图 3。

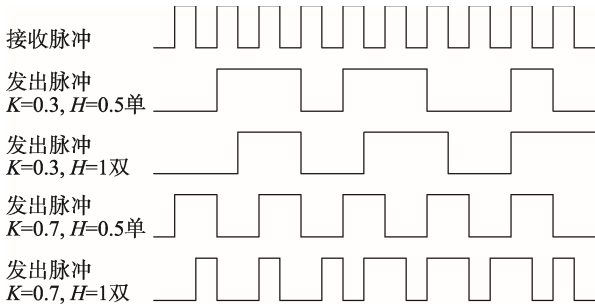


图 3 模拟输入输出
Fig.3 Simulation I/O

如图 3 所示， $K=0.3$ 时， $H=0.5$ ，单边沿触发，控制器接收 10 个脉冲，发出 3 个脉冲，跟踪正确； $K=0.3$ 时， $H=1$ ，双边沿触发，控制器接收 10 个脉冲，发出 3 个脉冲，跟踪正确； $K=0.7$ 时， $H=0.5$ ，单边沿触发，控制器接收 10 个脉冲，发出 5 个脉冲，跟踪错误； $K=0.7$ 时， $H=1$ ，单边沿触发，控制器接收 10 个脉冲，控制器发出 7 个脉冲，跟踪正确。由图 3 可知，当跟踪系数 K 的基础值范围为 0~0.5 时， H 可取 0.5 或 1，单边沿或双边沿触发都行。当 K 的基础值范围为 0.5~1 时， H 只能取 1，双边沿触发。当使用单边沿触发时，一个编码器脉冲对应的跟踪系数 K 使用 1 次；当使用双边沿触发时，一个编码器脉冲对应的跟踪系数 K 使用 2 次。

文中的中断触发模式为双边沿触发，当输入中断函数进入到上升沿中断函数或下降沿中断函数时， H 取 1， $count=count+K_i$ 。判断 $count$ 是否大于等于 1，若大于等于 1，控制器将对应的输出端口电平翻转，并作 $count-1$ 处理，等待下次中断触发。若小于 1，不作任何判断，等待下次中断触发。控制器内部输入输出流程见图 4。

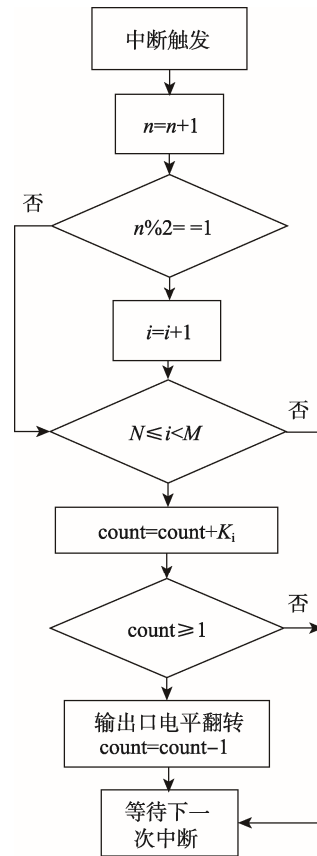


图 4 控制器内部输入输出
Fig.4 Controller internal I/O

4 Matlab 仿真

使用 Matlab 仿真得到的跟踪系数 K /编码器脉冲数 N' 图像。由于跟踪系数 K 与纸护角速度 v 成正比，而编码器脉冲数 N' 与时间相关，所以 Matlab 仿真得到的跟踪系数 K /编码器脉冲数 N' 图像就是电机速度/时间图像。

参数设置： d 为测长编码器与纸护角相切的直径； h 为纸护角和刀台子的缝隙与纸护角的厚度之和； e 为刀具运动轨迹半径（偏心距）； N 为刀具转一圈需要控制器发给伺服电机的脉冲总数； C 为测长编码器每转脉冲数； L 为纸护角的长度；跟踪系数 K 的基础值的范围为 0~1。

1) 设 $d=51\text{ mm}$ ， $h=7\text{ mm}$ ， $e=15\text{ mm}$ ， $N=750$ ， $C=2500$ ， $L=65\text{ mm}$ ，跟踪系数 K /编码器脉冲数 N' 关系曲线见图 5a，刀具的运动规律为：起步→同步跟踪→剪切→退刀→加速→匀速→减速→同步跟踪→……。

2) 设 $d=51\text{ mm}$ ， $h=7\text{ mm}$ ， $e=15\text{ mm}$ ， $N=750$ ， $C=2500$ ， $L=90\text{ mm}$ ，跟踪系数 K /编码器脉冲数 N' 关系曲线见图 5b，刀具的运动规律为：起步→同步跟踪→剪切→退刀→减速→匀速→加速→同步跟踪→……。

3) 设 $d=51\text{ mm}$, $h=7\text{ mm}$, $e=15\text{ mm}$, $N=750$, $C=2500$, $L=130\text{ mm}$, 跟踪系数 K /编码器脉冲数 N' 关系曲线见图 5c, 刀具的运动规律为: 起步→同步跟踪→剪切→退刀→减速→停止→加速→同步跟踪→……。

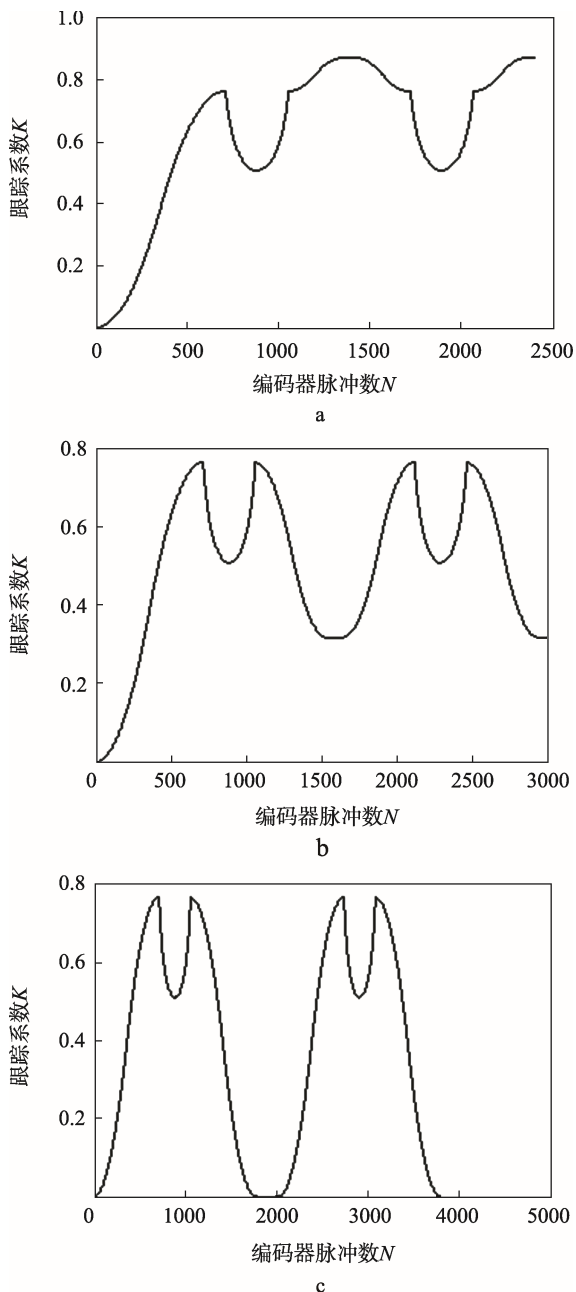


图 5 跟踪系数 K 曲线
Fig.5 Tracking coefficient K curve

跟踪系数 K 的基础值不能大于 1, 当剪切的长度、厚度超过一定范围时, 需要调整设备参数与纸护角进料速度^[17], 以实现不同规格的纸护角生产。

5 结语

纸护角打框机采用动态剪切、偏心轮方式传动和伺服技术进行控制。优化后的控制模型更精确, 每个

区域的功能更加明确, 有利于跟踪系数 K 的计算, 消除了控制误差, 从而提高了冲切精度。控制器通过设备参数, 设定厚度和长度等, 并引入 S 曲线计算跟踪系数 K , 最后采用外部中断模式进行实时地跟踪控制。要求跟踪系数 K 的基础值范围是 0~1, 在这个前提下确定设备参数和纸护角参数, 经 Matlab 仿真的跟踪系数 K /编码器脉冲数 N' 的曲线是连续的, 并在要求范围内。纸护角打框机能满足不同长度、不同厚度以及不同送料速度的纸护角生产。

现场测试时, 设备参数为 $d=51\text{ mm}$, $e=15\text{ mm}$, $N=750$, $C=2500$, 纸护角打框机的连续生产时间一般为 3 h, 最高进料速度为 35 m/min。控制器采用外部中断模式、双边沿触发, 因而实时性好, 纸护角送料检测的分辨率为 0.032 mm, 并判别编码器 AB 项来消抖, 冲切精度高, 工作稳定。经生产现场实际使用, 测试纸护角规格为围框, 测试尺寸为: 冲口 1=200 mm, 冲口 2=600 mm, 冲口 3=400 mm, 冲口 4=600 mm, 冲口 5=200 mm, 总长=2000 mm, 厚度=5 mm。进料速度为 25 m/min, 连续生产 3 h, 生产的 2250 根纸护角的尺寸误差均在 1 mm 范围内, 尺寸未产生波动。

参考文献:

- [1] 郭素梅, 赵鹏程. 助力绿色包装的新型材料——L 型纸护角的检测技术[J]. 上海包装, 2015(12): 58—61. GUO Su-mei, ZHAO Peng-cheng. The Help on Green Packaging of New Materials--Detection Technology of L-type Paper Corner Protector[J]. Shanghai Packaging, 2015(12): 58—61.
- [2] 陆银泉. 护角板——引人注目的包装材料[J]. 上海包装, 1997(4): 22. LU Yin-quan. Protect Horn Plate—Attractive Packing Material[J]. Shanghai Packaging, 1997(4): 22.
- [3] 楼雪飞. 新型包装材料——纸质护角板[J]. 上海包装, 2001(3): 34—35. LOU Xue-fei. New Packaging Material——Paper Corner Guard[J]. Shanghai Packaging, 2001(3): 34—35.
- [4] 韩春阳, 马步庄, 富瑶. 纸护角抗压性能研究[J]. 包装工程, 2009, 30(4): 21—23. HAN Chun-yang, MA Bu-zhuang, FU Yao. Study on Compression Resistance of Paper Corner Protector[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(4): 21—23.
- [5] 李沛生. 缠绕包装新产品[J]. 物流技术与应用, 2004, 9(8): 62—67. LI Pei-sheng. New Winding Packaging Products[J]. Logistics Technology and Application, 2004, 9(8): 62—67.
- [6] 汤志平. 浅谈纸护角在家电产品包装设计中的运用[J]. 家电科技, 2014(3): 83—85. TANG Zhi-ping. Discussion on Application of Paper Corner Protector in Packaging Design of the Electric

- Appliances Products[J]. China Appliance Technology, 2014(3): 83—85.
- [7] 董庆福. 飞剪在钢带剪切中的应用[J]. 科技视界, 2017(9): 309.
DONG Qing-fu. Application of Flying Shears in Steel Strip Cutting[J]. Science & Technology Vision, 2017(9): 309.
- [8] 杨文涛. 嵌入式定长剪切控制系统的研究及实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
YANG Wen-tao. The Research and Implementation of an Embedded and Constant Length Cut Control System [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [9] PERIC N, PETROVIC I. Flying Shear Control System[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(6): 1049—1056.
- [10] 张玉磊. 基于 ARM 的飞剪伺服系统的研究与实现[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
ZHANG Yu-lei. Research and Realization of Flying Shear Servo System Based on ARM[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [11] 金政宇, 蔡锦达, 王德铭. 基于 ARM9 的定长钢板切割机的研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2018(2): 41—44.
JIN Zheng-yu, CAI Jin-da, WANG De-ming. Reserch on Fixed-length Steel Cutting Machine Based on ARM9[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2018(2): 41—44.
- [12] 杨宝山, 蔡锦达, 刘劲阳. 基于 ARM 的纸护角定长剪切控制系统设计[J]. 包装工程, 2015, 36(11): 118—126.
YANG Bao-shan, CAI Jin-da, LIU Jin-yang. Design on Control System of Rotary Paper Angle Bead Machine Based on ARM[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(11): 118—126.
- [13] 刘劲阳, 蔡锦达, 杨宝山. 飞剪式纸护角定长剪切机系统的研制[J]. 包装工程, 2014, 35(15): 25—28.
LIU Jin-yang, CAI Jin-da, YANG Bao-shan. Development of Flying Shear Type Paper Corner Fixed-length Cutting Machine System[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(15): 25—28.
- [14] SHEPHERD R. A Computer-controlled Flying Shear [J]. Students Quarterly Journal, 2010, 34(135): 143—148.
- [15] WANG C, WANG X, ZHANG B. Design of the Flying Shear Servo Control System[C]// Chinese Automation Congress, IEEE, 2018.
- [16] 张碧陶, 高伟强, 沈列, 等. S 曲线加减速控制新算法的研究[J]. 机床与液压, 2009, 37(10): 27—29.
ZHANG Bi-tao, GAO Wei-qiang, SHEN Lie, et al. The Study of New-Curve Ccelaration/Decelaration Arithmetic[J]. Machine Tools and Hydraulics, 2009, 37(10): 27—29.
- [17] SONG Jin-chun, WANG Chang-zhou, XU Dong. Dynamic Simulation and Control Strategy of Centrifugal Flying Shear[J]. Applied Mechanics and Materials, 2009, 16/17/18/19: 278—282.