

生物检测卡柔性热封系统的设计

陈曦, 张自力, 李永猛, 赵佳敏, 许雪
(河北工业大学, 天津 300130)

摘要: **目的** 设计一种用于实际生产的以 PLC 为控制器的生物检测卡柔性热封系统, 用于灌装检测液和玻璃微珠生物检测卡的自动封装。**方法** 用 SolidWorks 绘制热封系统零部件的机械结构, 并建立热封系统的装配体。对装配体进行干涉分析, 修改有干涉冲突的零部件。确认无干涉冲突后, 完成对热封系统机械结构的设计。根据工艺要求确定各执行机构运行的先后顺序, 画出程序流程图, 用顺序控制设计法编写程序。**结果** 在实际生产中, 热封系统封装单张生物检测卡需要 4.9993 s, 封装速度满足设计要求。**结论** 热封系统可以快速完成对生物检测卡的封装, 且封装密封性好、封膜边缘平整, 能够满足生产的要求。

关键词: 结构设计; 顺序控制设计法; 热封

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2018)23-0111-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.23.019

Design of Flexible Heat Sealing System for Bioassay Card

CHEN Xi, ZHANG Zi-li, LI Yong-meng, ZHAO Jia-min, XU Xue
(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

ABSTRACT: The work aims to design a flexible heat sealing system of bioassay card based on PLC for practical production and apply it to the automatic encapsulation of bioassay card filled with detection liquid and glass bead. SolidWorks was used to draw the mechanical structure diagram for the parts of the heat sealing system and the assembly of the heat sealing system was established. The assembly was subjected to interference analysis while parts with interference conflict were modified. The mechanical structure of the heat sealing system was designed when it was confirmed that there was no interference conflict. The order of actions of actuating mechanisms was determined according to technological requirements. The program flow chart was drawn and the program was written in the method of sequential control design. In actual production, it would take 4.9993 s for the heat sealing system to encapsulate a single bioassay card. The encapsulation speed met the design requirements. With the heat sealing system, the bioassay card can be quickly encapsulated. Moreover, the encapsulation tightness is good, and the sealing film edge is smooth, which can satisfy the production requirements.

KEY WORDS: structural design; sequential control design method; heat sealing

生物检测卡是一种柱凝集法检测卡, 长为 54 mm、高为 64 mm、宽为 9 mm。国内热封这种检测卡的方法为人工送热封膜然后加热加压, 完成封装后再人工切膜。在自动热封装置方面陈维佳等发明了一种微柱凝胶免疫检测卡热封机^[1], 该热封机通过传送带将卡送到封装处, 由拍片机构和热封结构完成热封, 但体积较大结构较为复杂。为实现热封装置的小型化和封装的柔性化, 文中设计出一种热封系统。其体积

小, 整个热封装置放在尺寸为 500 mm×300 mm 的支撑板上; 结构紧凑, 装置的主体结构为一个长 316 mm、宽 140 mm、高 100 mm 的长方体, 内部安装控制器、走纸步进电机、步进电机驱动器以及控制电路; 通过人机界面可以快速修改热封参数。热封材料为热封铝箔, 其宽度为 60 mm, 且一面含有塑胶, 具有无菌、抗腐蚀性强与药物兼容性好的特点, 对液体有很强的防护能力^[2-3]。根据多次试验结果, 选择以

收稿日期: 2018-08-20

作者简介: 陈曦 (1963—), 男, 博士, 河北工业大学教授, 主要研究方向为控制理论与工程、智能检测和智能仪表及自动化设备。

195℃作为热封温度的基准温度。用 SolidWorks 完成机械结构的设计后,加工出实际的机械机构并进行组装^[4]。

柔性热封系统用加热铜块将热封铝箔和检测卡热封面熔融,同时在其上方施加一定的压力使热封材料互相接触、渗透及扩散,导致热封材料表面的分子间距缩小,进而产生更大的分子间作用力,最终完成热封^[5-6]。影响热封质量的主要因素是热封时间、热封温度和热封压力,这3个因素是耦合的。当热封时间、热封温度和热封压力中某一个或多个因素过大时,会降低热封厚度,虽然表面热封强度高却会引起断根破坏现象,从而降低了封口的耐冲击性能;3个因素中一个或多个过小将使热封层熔融不充分从而影响密闭性能^[7-9]。为实现高质量密封设计的热封系统主要控制参数为热封时间、热封温度和热封压力。

1 热封装置原理

生物检测卡柔性热封系统的机械机构主要包括送卡机构、送热封铝箔机构、封膜工作台和切纸机构。热封温度由 XMT7100 智能 PID 温度控制仪控制,以 Pt100 为温度变送器,通过控制固态继电器(SSR)的通断来控制加热电路的通断,20~22 min 后铜块的温度稳定在 195℃。热封装置在开始封装检测卡前,首先将热封铝箔放到送热封铝箔机构的上下胶辊中,然后加热铜块,在铜块温度达到热封温度后开始热封。

1) 送卡环节。送卡机构将待封装的生物检测卡送入封膜工作台中;为保证送卡的精度和送卡电机能往复运动,在送卡的初始位置和终止位置安装光电传感器;其向控制器反馈卡的位置信号,从而控制电机的运行。

2) 走纸环节。检测卡送入封膜工作台后,走纸电机通过同步带使上胶辊运动;在摩擦力的作用下,热封铝箔向前移动 11 mm 到达检测卡的正上方。

3) 封装环节。加热铜块向下移动将热封铝箔和检测卡压实并将热封面熔融;1 s 后切刀将热封铝箔切断后复位,3 s 后加热铜块复位,热封动作完成。生物检测卡柔性热封系统见图 1。

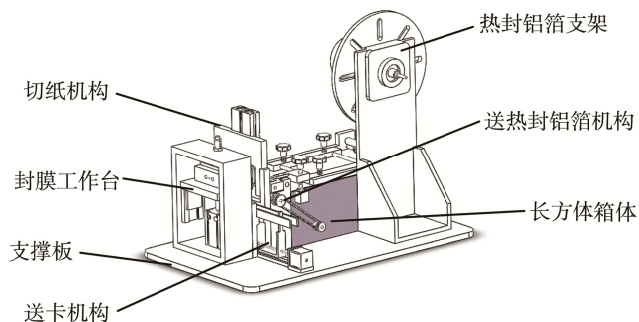


图 1 柔性热封系统

Fig.1 Flexible heat sealing system

2 热封系统硬件设计

2.1 自动送卡机构

自动送卡机构的主要功能是将待封装的生物检测卡送到封膜工作台中。其主要组成部分包括丝杠步进电机、2 个 NPN 型光电传感器、L 型卡托和长度为 240 mm 的轨道。轨道由 2 条长为 240 mm、高为 14 mm、厚为 3 mm 的不锈钢板组成,2 条不锈钢板之间相距 11 mm。丝杠步进电机的丝杠通过 T 型螺母与卡托相连,将步进电机的旋转运动转化为 L 型卡托的直线运动^[10]。L 型卡托底部支撑检测卡,另一边推动检测卡实现其在轨道上的移动。虽然控制器通过向步进驱动器发送固定脉冲数控制步进电机的角位移能实现位置控制,但长时间运行会积累误差,从而影响精度。为保证精度,在送卡的初始位置和终止位置分别安装光电传感器,与控制器构成闭环控制来控制精度。

2.2 送热封铝箔机构

送热封铝箔机构的主要组成部分是热封铝箔支架、防偏器、上下胶辊和走纸步进电机。主要功能是将热封铝箔送到生物检测卡的上方。走纸步进电机带动同步带使上胶辊旋转,在上胶辊、热封铝箔和下胶辊之间的摩擦力的作用下,热封铝箔将向前移动。实现这一功能的关键是选取合适的同步带传动副以及上下胶辊。同步带传动副的选型^[11-12]首先要确定设计功率 P_d :

$$P_d = K_A P \quad (1)$$

式中: P 为传递的功率; K_A 为载荷修正系数;根据设计功率和小带轮转速 n_1 ,依据同步带选型图^[11]选取带型、节距 P_b 。在带速 v 和安装尺寸允许时,小带轮 Z_1 应选取较大值。 i 为传动比则大带轮齿数 Z_2 :

$$Z_2 = i Z_1 \quad (2)$$

带轮节圆直径为:

$$d_1 = \frac{Z_1 P_b}{\pi} \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{Z_2 P_b}{\pi} \quad (4)$$

带速 v 与最大带速 $v_{\max}$ 的关系为:

$$v = \frac{d_1 n_1}{60 \times 1000} \leq v_{\max} \quad (5)$$

初定轴间距 a_0 为:

$$0.7(d_1 + d_2) \leq a_0 \leq 2(d_1 + d_2) \quad (6)$$

带长及其齿数为:

$$L_0 = 2a_0 + \frac{(d_1 + d_2)}{2} + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4a_0} \quad (7)$$

根据文献^[11]中同步带的节线系列表,选取标准节线长 L_0 及其齿数 Z 。

实际轴间距 a 为:

$$a = a_0 + \frac{(L_p - L_0)}{2} \quad (8)$$

带轮啮合齿数 z_m 为:

$$Z_m = \text{ent} \left[\frac{Z_1}{2} - \frac{P_b Z_1}{2^2 a} (Z_2 - Z_1) \right] \quad (9)$$

式中: ent 为向下取小的整数。

基本额定功率 P_0 为:

$$P_0 = \frac{(T_a - mv^2)v}{1000} \quad (10)$$

式中: P_0 为各带型基准宽度 b_{a0} 的额定功率; b_{a0} 为同步带的基准宽度; T_a 宽度为 b_{a0} 的同步带的许可工作应力; m 为宽度为 b_{a0} 的同步带的单位长度质量。

带宽 b_a 为:

$$b_a = b_{a0} \left[\frac{P_d}{K_x P_0} \right]^{\frac{1}{1.14}} \quad (11)$$

式中: K_x 为啮合齿数系数; b_a 为同步带带宽。

作用在轴上的力 F_r 为:

$$F_r = \frac{1000 P_d}{v} \quad (12)$$

综上, 同步带传动副中大轮选 36 齿, 小轮选 18 齿, 同步带节线长为 262 mm, 带轮宽度为 10 mm。上下胶辊与热封铝箔直接接触, 机构在运转时, 胶辊的刚体和弹性体受到挤压, 弹性体的表面会被挤长。为保证送热封铝箔的精度, 要求尽量增大刚体直径, 减小弹性体直径。为确定刚体直径, 选取包裹橡胶材料和厚度相同但刚体直径不同的弹性滚筒进行实验得到的包衬周长变化式为:

$$i_0 = \frac{L_1}{L_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{R_1 w_1}{R_2 w_2} = \frac{R_1 n_1}{R_2 n_2} \quad (13)$$

式中: i_0 为相对传动比; L_1, L_2 为相同时间内滚筒滚过的长度; R_1, R_2 为 2 个弹性滚筒的半径; v_1, v_2 为相同时间内 2 个弹性滚筒的线速度; w_1, w_2 为相同时间内 2 个弹性滚筒的角速度; n_1, n_2 为相同时间内 2 个弹性滚筒的转速。

为保证 2 个弹性滚筒的线速度相等即相对传动比 $i_0=1$ 。选取的弹性滚筒的直径需要相同, 最终选取的胶辊直径为 18 mm^[12-13]。为防止出现偏膜现象, 需要调节上胶辊两端的调压螺丝使胶辊左右两侧受力平衡, 同时在机箱的上方加装防偏器使热封铝箔在行进时保持平直。送热封铝箔机构见图 2。

2.3 封膜工作台

封膜工作台由是外部框架、阻尼器、隔热板、铜块、铜块支撑板、气缸、滑块、轨道和硬限位螺丝组成。在铜块侧面打 2 个大孔和一个小孔。大孔的直径为 11 mm、深度为 50 mm, 小孔位于 2 个大孔中间, 直径为 5 mm、深度为 30 mm。在大孔中安放规格为

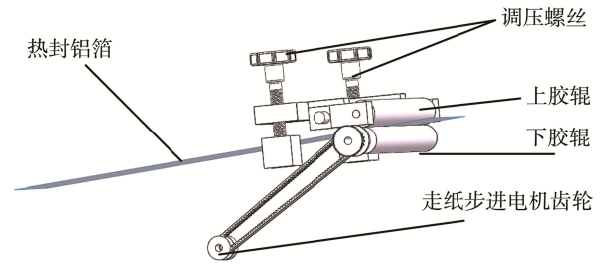


图 2 送热封铝箔机构

Fig.2 Feeding mechanism of heat sealing aluminum foil

10 mm×50 mm 的加热管, 直接加热铜块。小孔安装 Pt100 作为温度变送器向控制器传送铜块的实时温度。为固定加热管和 Pt100 在铜块的顶部, 即大孔和小孔的正上方打上直径为 2 mm 的孔与大孔和小孔相通, 在孔中放入顶丝。在铜块、隔热板、铜块支撑板的 4 角分别打孔攻丝, 用螺丝按照滑块、铜块支撑板、隔热板、铜块、隔热板的顺序依次连接。气缸放在外部框架的底部, 与铜块支撑板直接连接。气缸带动支撑板沿着滑块所在的轨道上下移动, 使铜块也上下移动完成热封动作中加热加压的功能。当铜块在下移的过程中碰到硬限位螺丝即停止移动, 而铜块在上移到最高点前先接触到阻尼器, 从而减缓铜块上移的速度起到保护滑块和导轨的作用。

2.4 切纸机构

切纸机构的主要组成部分是龙门式的外部框架、型号为 MD10×20 的气缸、刀具座和切刀。气缸安装在龙门式外部框架的中间, 与刀具座相连。切刀安装在刀具座上与水平面呈 30° 并与检测卡的边平行的位置。切刀下压将与检测卡粘结在一起的热封铝箔在生物检测卡的边缘处切断, 要求切边与生物检测卡的边缘平行且切口平整。

3 控制系统的设计

3.1 系统功能的实现

控制系统由人机界面、运动控制模块、气动模块、PID 温度调节模块组成。人机界面通过 RS422 与 PLC 通讯, 可以设定或修改热封参数, 包括送卡速度、送热封铝箔速度、封膜宽度和热封时间。运动控制模块主要由 PLC、步进电机驱动器、型号为 28BYGH-11HS3406 的送卡步进电机、型号为 57BYGH201 的走纸步进电机和作为限位开关的 2 个 NPN 型光电传感器组成。在送卡环节中, PLC、步进电机驱动器、步进电机、光电传感器组成一个闭环控制系统, 通过光电传感器限定生物检测卡的位置, 将其送到封膜工作台指定位置。走纸环节中, PLC 通过向步进驱动器发送固定脉冲数控制步进电机角位移来控制走纸宽度。发送脉冲数由以下步骤得出, 设 L 为每步走纸

宽度, D 为胶辊直径, θ 为步距角, M 为步进电机驱动器细分系数, A 为走纸宽度, N 为发送的脉冲数, N 值可由式 (14—16) 得出。

$$\frac{\pi D}{360^\circ} = \frac{LM}{\theta} \quad (14)$$

化简成:

$$L = \frac{\pi D \theta}{M 360^\circ} \quad (15)$$

发送的脉冲数为:

$$N = \frac{A}{L} = \frac{AM 360^\circ}{D \theta} \quad (16)$$

气动模块由 PLC、气动电磁阀和气缸组成。PLC 通过气动电磁阀来控制气缸, 使铜块和切刀可以快速升降。热封系统对热封温度的控制要求是能快速到达设定温度, 在存在干扰时可以将热封温度稳定在设定值, 且具体操作要简单可靠。为满足上述要求选取 XMT7100 智能 PID 温度控制仪独立控制热封温度, 并能将热封温度保持在期望值。

3.2 系统软件设计

首先分析工艺流程, 确定系统的输入输出量。将 PLC 的 I/O 地址分配如下, $X0$ 为启动按钮, 控制设备开始运行; $X1$ 为停止按钮, 控制设备停止运行; $X2, X3$ 为送卡初始位置和终止位置的光电传感器; $Y0, Y2$ 分别为送卡电机的脉冲输出和方向输出; $Y1$ 为走纸电机的脉冲输出; $Y3, Y4$ 对应气缸分别控制切刀、铜块的升降; $M10—M12, M100—M101$ 为内部辅助标志位; $T0—T4$ 为定时器对各阶段定时。其次将整个工艺划分为具体的步骤, 按照步骤顺序依次执行, 最终完成热封任务。根据工艺流程画出程序流程图见图 3, 用顺序控制设计法编写 PLC 程序使整个过程自动进行^[14—15]。

4 设备的调试和使用

设备安装完成后, 首先控制单个执行元件完成预定动作, 以此证明该元件受 PLC 控制。其次测试设备能否完成单一功能如: 送卡、走纸、封装。最后按整个工艺流程调试设备。理论上热封系统封装一张生物检测卡需要 5 s, 每小时能封装 720 张生物检测卡。选取 5 d, 每天 8 h, 共计 40 h, 统计每小时实际封装生物检测卡的数量, 波动曲线见图 4。根据生产数据计算得到平均每小时封装的检测卡数量为 720.1 张, 封装一张生物检测卡需要 4.993 s。

在封装的检测卡中以 1 h 封装的生物检测卡为一组共计 40 组, 以密封性良好、无偏膜、切口平整性为生物检测卡合格指标, 对封装检测卡的合格率进行统计。在统计时间内, 共封装 28 803 张生物检测卡, 封装合格生物检测卡共 28 766 张, 封装合格率为

99.87%。生物检测卡封装合格率曲线见图 5。生物检测卡热封实物见图 6。

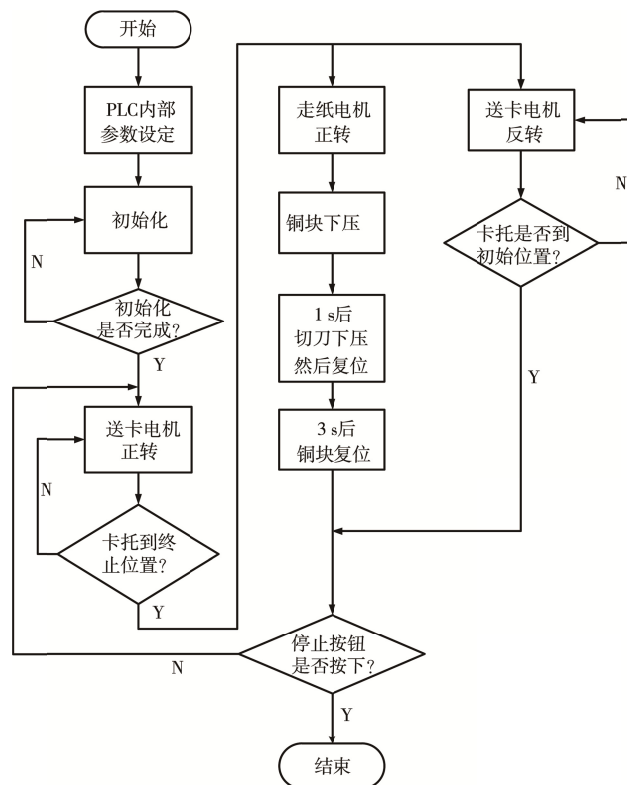


图3 程序流程

Fig.3 Program flow chart

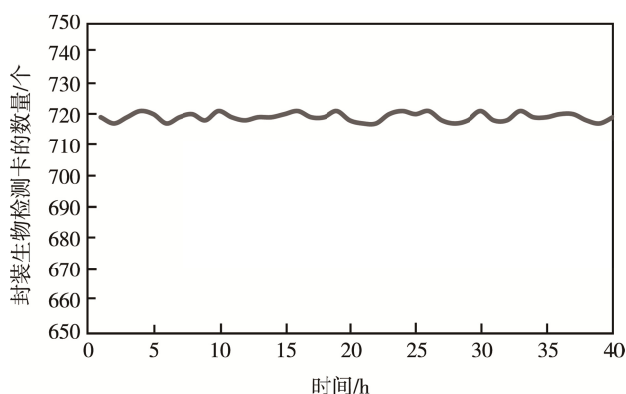


图4 生物检测卡生产数量曲线

Fig.4 Bioassay card production quantity curve

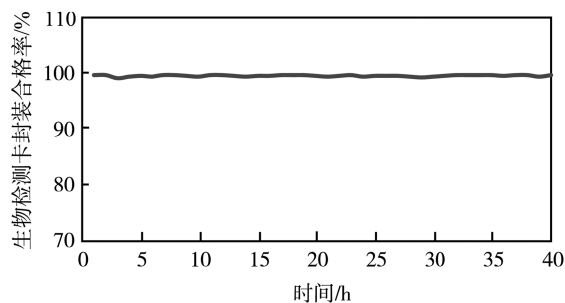


图5 生物检测卡封装合格率曲线

Fig.5 Encapsulation pass rate curve of bioassay card

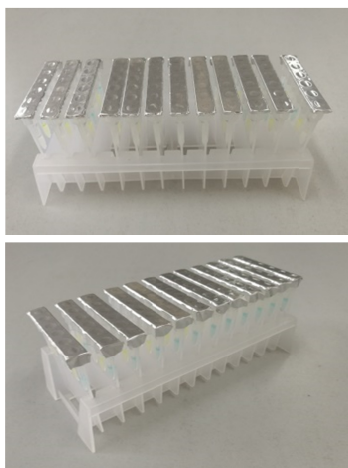


图6 生物检测卡热封实物

Fig.6 Bioassay card subject to heat sealing in kind

5 结语

生物检测卡柔性热封系统以热封铝箔为封装材料实现了对灌装了生物检测材料的生物检测卡的封装。当生产厂商使用物理尺寸存在微小差别的检测卡时,通过调节热封参数可以使设备适应生物检测卡物理参数的变化完成热封任务。系统封装的生物检测卡边缘平整,平均每小时能封装 720.1 张检测卡,合格率为 99.87%,封装的快速性、平整性、合格率均能满足实际的生产需求。

参考文献:

- [1] 陈维佳, 栾玉玺, 赵继岩, 等. 微柱凝胶免疫检测卡热封机: 中国, CN201592789U[P]. 2010-09-29.
CHEN Wei-jia, LUAN Yu-xi, ZHAO Ji-yan, et al. Microcolumn Gel Immunoassay Card Heat Sealing Machine: China, CN201592789U[P]. 2010-09-29.
- [2] 白文昌, 王祝堂, 毛书波, 等. 铝在包装中应用的几个问题[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(2): 1—6.
BAI Wen-chang, WANG Zhu-tang, MAO Shu-bo, et al. Some Questions about Application of Aluminium in the Canning & Other Packings[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2008, 36(2): 1—6.
- [3] DI X B, GAO Y M, BAO C G, et al. Optimization of Glass Fiber Based Core Materials for Vacuum Insulation Panels with Laminated Aluminum Foils as Envelopes[J]. Vacuum, 2013, 97(11): 55—59.
- [4] 杨正, 张红兵, 杨欣嘉, 等. SolidWorks 实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
YANG Zheng, ZHANG Hong-bing, YANG Xin-jia, et al. SolidWorks Practical Tutorials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [5] 赵漫漫. 软塑复合包装材料热封工艺及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- ZHAO Man-man. Research on Heat Seal Technology and Mechanism of Plastic Packing Laminated Materials[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [6] 马晓宇. 自动包装机热封温度自适应控制系统设计[J]. 包装工程, 2016, 37(21): 173—178.
MA Xiao-yu. Design of Temperature Adaptive Control System for Heating Sealing Mechanism of Automatic Packaging Machine[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(21): 173—178.
- [7] SLAWOMIR B. An Analytical Approach to Heat Transfer and Thermal Distortions in Non-contacting Face Seals[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 81(5): 90—102.
- [8] 陆佳平. 浅谈薄膜热封特性及热封效果[J]. 包装工程, 1996, 17(5): 14—17.
LU Jia-ping. Talking about Film Heat Sealing Characteristics and Heat Sealing Effect[J]. Packaging Engineering, 1996, 17(5): 14—17.
- [9] MIHINDUKULASURIYA S D, LIM L T. Heat Sealing of LLDPE Films: Heat Transfer Modeling with Liquid Presence at Film-film Interface[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(2): 532—540.
- [10] 王邦继, 刘庆想, 周磊, 等. 步进电机控制系统建模及加减速曲线优化[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(1): 37—42.
WANG Bang-ji, LIU Qing-xiang, ZHOU Lei, et al. Modeling of Stepper Motor Control System and Optimization of Acceleration and Deceleration Curve[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(1): 37—42.
- [11] 徐灏. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
XU Bin. Mechanical Design Manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.
- [12] 郭勇. 350 mm 快速诊断试纸切割机的研制[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
GUO Yong. 350 mm Rapid Diagnostic Test Strips Cutting Machine Design and Development[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [13] 鲍照, 郑百林, 张镨, 等. 送纸机构纸张控制方程及卡纸现象数值分析[J]. 力学季刊, 2015, 36(2): 307—315.
BAO Zhao, ZHENG Bai-lin, ZHANG Kai, et al. Governing Equation of Paper Control and Numerical Analysis of Paper Jam[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2015, 36(2): 307—315.
- [14] 廖常初. FX 系列 PLC 编程及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
LIAO Chang-chu. FX Series PLC Programming and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [15] ADIEGO B F, DARVAS D, VINUELA E B, et al. Applying Model Checking to Industrial-sized PLC Programs[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1400—1410.