

基于虚拟总轴的制袋机多轴同步控制系统设计

吕梦樊¹, 王景良², 陈丰明³, 傅启桃³, 朱龙彪¹

(1.南通大学, 江苏 南通 226019; 2.江苏海事职业技术学院, 南京 211199;

3.无锡鼎茂机械制造有限公司, 江苏 无锡 214107)

摘要: **目的** 为了提高制袋产品质量及同步控制精度, 实现产品技术升级, 设计一种基于虚拟总轴的多轴同步控制系统。**方法** 以三边封制袋机为研究对象, 介绍其工艺流程及工作原理, 搭建其运动控制系统拓扑结构, 基于虚拟总轴同步控制策略, 详细分析制袋机多轴同步控制基本原理, 设计一种浮辊补偿算法, 给出软件设计方法, 并通过实际运行采集实验数据进行验证。**结果** 该控制系统可以满足制袋机的运动控制要求, 补偿相邻两轴间的同步误差, 使得制袋系统两牵引轴间同步误差控制在 0.3% 左右。

结论 引入该策略的同步控制系统具有良好的同步性与稳定性, 提高了制袋质量、精度和效率, 降低次品率, 较好地满足了制袋机裁切精度要求。

关键词: 制袋机; 运动控制; 同步控制; 虚拟总轴

中图分类号: TP391.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)07-0197-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.07.028

Design of Multi-axis Synchronous Control System for Bag Making Machine Based on Virtual Shaft

LYU Meng-fan¹, WANG Jing-liang², CHEN Feng-ming³, FU Qi-tao³, ZHU Long-biao¹

(1.Nantong University, Nantong 226019, China; 2.Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211199, China;

3.Wuxi KING-MO Machinery Manufacturing Co., Ltd., Wuxi 214107, China)

ABSTRACT: The work aims to design a multi-axis synchronous control system based on virtual shaft to improve the quality of bag making products and accuracy of synchronous control and achieve product technology upgrades. Taking the three-side sealing bag making machine as the research object, its technological process and working principle were introduced, its motion control system topology structure was built, the basic principle of multi-axis synchronous control of bag making machine was analyzed in detail based on the synchronous control strategy of virtual shaft, and a floating roller compensation algorithm was designed. The software design methods were given, and the experimental data were collected through actual operation for verification. The proposed control system could meet the motion control requirements of the bag making machine, and compensate the synchronization error between the adjacent two axes, so that the synchronization error between the two traction axes of the bag making system was controlled at about 0.3%. The synchronous control system with this strategy has good synchronization and stability, improves the quality, accuracy and efficiency of bag making, reduces the defective rate, and better meets the cutting precision requirements of bag making machine.

KEY WORDS: bag making machine; motion control; synchronous control; virtual shaft

收稿日期: 2019-08-14

基金项目: 科技型中小企业技术创新基金 (G20193002)

作者简介: 吕梦樊 (1995—), 男, 南通大学硕士生, 主攻机电一体化和自动化控制。

通信作者: 朱龙彪 (1964—), 男, 南通大学教授, 主要研究方向为机电传动控制和故障诊断等。

近年来,国内对塑料软包装复合制袋机的市场需求发展迅猛,提高制袋效率和制袋精度,满足食品、化工、医药等众多国计民生的重大产业对包装袋的需求,有重要的现实意义^[1-2]。

在制袋机的工作过程中,各牵引胶辊在速度和加速度上应保持同步,否则各牵引胶辊之间将产生速度差,导致膜料张力不平衡,严重情况下会破坏膜料。对于传统的机械长轴传动的制袋设备来说,所有的动力由一个机械长轴输出,各执行机构采用齿轮、同步带轮等方式实现与长轴的啮合来传递动力^[3],以此来保证在制袋过程中各个牵引机构间的运动同步。由于层层链接使得机械误差不断被积累,从而造成同步控制精度不高且传动距离受到限制^[4]。

随着电子技术、计算机技术以及传感器技术的不断发展,制袋机的自动控制技术也得到了快速发展,其中无轴传动技术成为制袋机技术发展的新方向。在无轴驱动方式下,系统中的每个执行机构都配有独立的伺服电机来驱动。实现多电机传动系统的同步,就需要对系统进行相应控制,以减小多轴之间的同步误差。

目前多轴同步控制策略主要包括主从控制、交叉耦合控制、偏差耦合控制、电子虚拟总轴控制等^[5-6]。综合各种同步控制策略的结构特点,虚拟总轴同步运动控制结构恰恰在同步稳定性及控制算法的统一性方面具有其他同步控制方式所不具备的优势,而且虚拟总轴控制策略对理论分析要求不高,相对于耦合控制策略,其在计算机中实现起来更简单,并且具有明确的物理意义^[7-10],因此,虚拟总轴控制策略非常适合制袋机多轴之间的同步控制。

针对以上分析,文中在制袋机工艺及原理研究基

础上,设计一种基于虚拟总轴的制袋机多轴同步控制系统,结合相应软件进行实现,并通过实验数据验证该系统的精度与同步稳定性。

1 制袋机工艺流程及工作原理

1.1 工艺流程

以全自动高速三边封制袋机为研究对象,阐述制袋机工艺流程。制袋机主要由放料机构、出料机构、纠偏机构、热封/冷却机构、牵引机构、主传动机构、切刀机构、打孔机构及其他辅助装置组成^[11-12],其结构简图组成见图 1。

三边封制袋机的具体工艺流程为:将膜卷穿过气棒轴固定在放料机架上,通过恒张力机构对复合膜卷进行连续稳定的放料^[13],膜料经横向纠偏机构进行膜料纠偏,并通过储料机构过渡后由放料变频电机进行连续牵引^[14],送入纵封加热/冷却机构后,由牵引 2 伺服电机送料,接着通过横封加热/冷却机构,再由牵引 1 伺服电机进行定长、定位送料,牵引 1 和牵引 2 伺服电机之间通过浮辊进行张力补偿,最后经过分切、打孔及裁切工序后由输送台面送出,完成整个制袋过程。工艺流程见图 2。

1.2 工作原理

三边封制袋机主要由定长定位牵引和热封裁切两大基本动作组成^[15]。这 2 部分动作约各占 50%。控制系统主要由主电机控制、定长定位控制、温度控制、纠偏控制、恒张力控制等系统组成,实现对薄膜速度、位移、温度和张力等工艺参数的控制。

主电机经减速箱和偏心连杆机构后将其旋转运

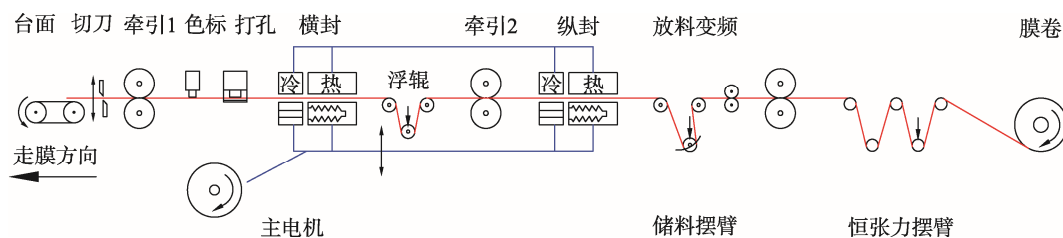


图 1 制袋机结构

Fig.1 Structure of bag making machine

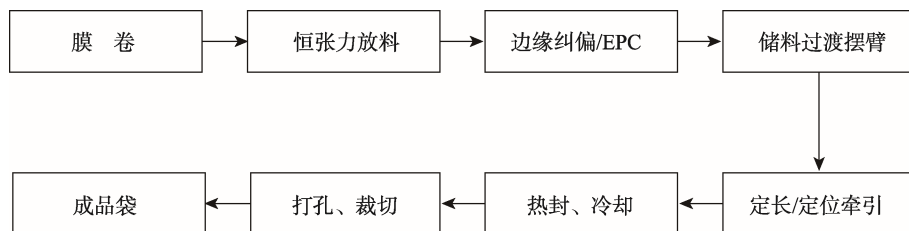


图 2 制袋机工艺流程

Fig.2 Technological process of bag making machine

动转换成热封/冷却机构的上下往复直线运动，即热封/冷却机构的抬起与压合。当处于抬起时，允许牵引电机进行定长、定位牵引动作；当处于压合时，则进行热封、冷却动作，即牵引伺服电机在 t_0 时间内动作，切刀和热封、冷却装置在 $t_0 \sim t_1$ 时间内动作。为了保证制袋成品的热封强度，在 1 个周期内热封时间应略大于牵引时间，因此热封阶段的主电机转速会略低于牵引阶段。时序见图 3。

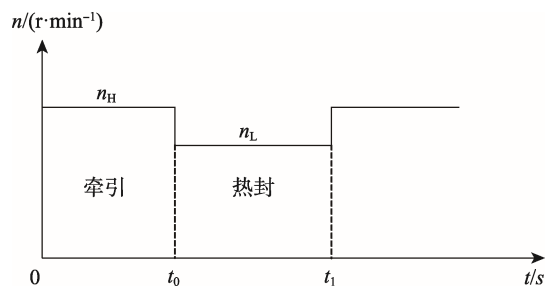


图 3 制袋机时序
Fig.3 Timing sequence of bag making machine

在牵引拉料阶段，牵引伺服电机根据制袋长度和工作模式进行定长/定位牵引动作，其中浮辊处接近开关的开关量信号用于补偿两牵引伺服间的速度同步，实现恒张力走料控制^[16]，当牵引长度，即设定袋长与色标窗口范围之差，进入色标窗口范围时，即点 A 至点 C 区域内，牵引电机减速运行，并开启色标中

断功能，即刻捕捉相应色标边缘触发信号，当色标传感器输出低电平时，即 B 区域内，控制器立即停止脉冲输出，牵引电机瞬间停机，即由色标信号控制牵引伺服停机，从而有效避免了累积误差，寻标过程见图 4。

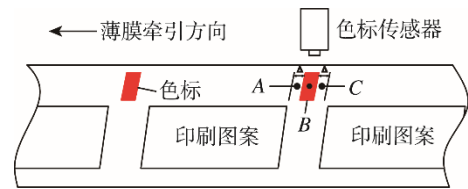


图 4 色标传感器寻标过程
Fig.4 Search process of color mark sensor

2 运动控制系统设计

高速三边封制袋机运动控制系统拓扑结构见图 5，采用汇川 AM401-1608TN 控制器作为主控制器，具有逻辑与运动控制功能；采用 EtherCAT 通信型 IS 系列伺服驱动器控制伺服电机；采用 MD200T0.75B-C 带有 CAN 总线通信型变频器，便于变频器与主控制器进行信息交互；采用 EtherCAT 连接器 AM600-RTU-RCT 作为远程 I/O 通信节点；采用 EtherCAT 作为现场总线，实现主控制器、伺服驱动器、EtherCAT 连接器及远程 I/O 之间的通讯。采用汇川 IT6100E 作为人机交互单元；采用汇川 InoProShop

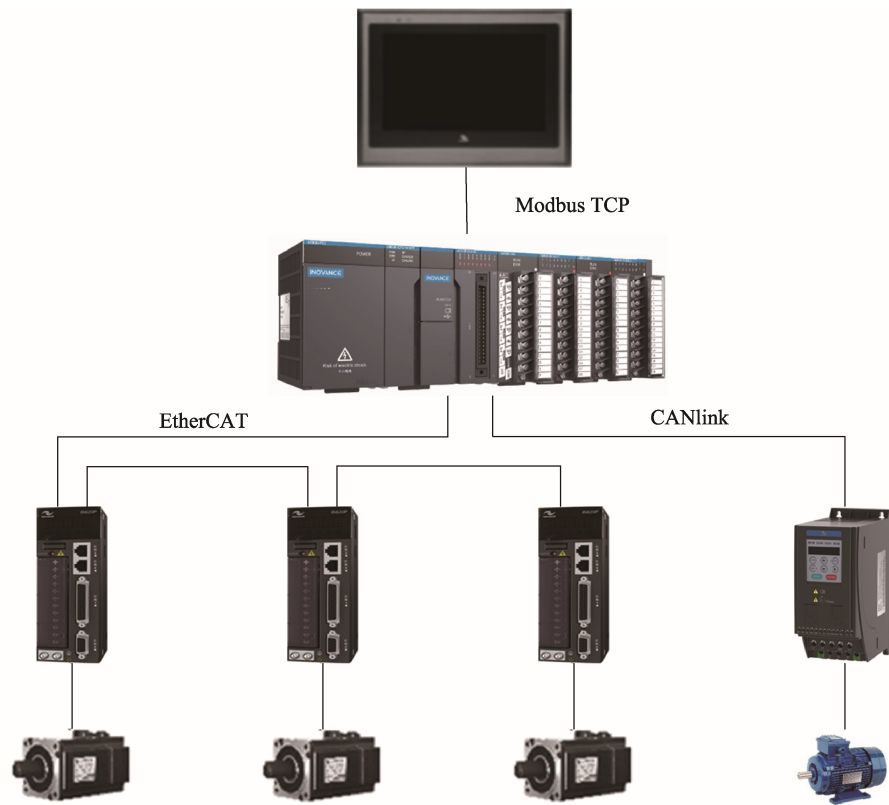


图 5 运动控制系统拓扑结构
Fig.5 Topological structure of motion control system

自动化软件进行统一管理；采用 EtherNet/IP 作为信息网络，实现人机界面、工业交换集线器及 InoProShop 软件与主控制器之间的通讯。

3 虚拟总轴同步控制策略的实现

3.1 主电机与牵引 1 电机同步控制

为实现制袋过程的平稳、快速运行，同时保障薄膜热封强度（即烫压时间），必须合理规划主电机与牵引伺服的运动关系。由于走料过程中要求薄膜线速度一致，即各牵引伺服胶辊的线速度相同，则需要保持各牵引电机的同步控制关系，所以，讨论主电机与牵引 1 电机的协调控制关系即可保证整个系统平稳、可靠运行。

在 InoProShop 软件中，建立主虚拟伺服轴和从虚拟伺服轴，分别作为同步控制的主电机实轴及牵引 1 实轴的主轴使用。通过 MC_CamIn 指令可实现主电机实轴与主虚拟伺服轴间的同步关系。MC_CamIn 功能块中的输入变量、输出变量及输入输出变量均可设置，MC_CamIn 指令可使主轴（相位）和从轴（位移）严格按照凸轮表进行同步凸轮动作。指令设定的凸轮表，必须先通过凸轮编辑器进行编制，并下载到控制器主体中，另外，可通过 MC_CamOut 指令解除相应凸轮动作。

主电机运动分为 2 个阶段，即热封阶段和进给阶段，膜料烫压、打孔、切刀等工序在热封阶段完成，牵引定长、定位工序在进给阶段完成，而主电机、边缘纠偏、温度控制、放料控制及恒张力等工序则工作在全周期。主电机运动规划见图 6，主电机旋转方向为顺时针方向，0°位置是主机高位，此处安装接近开关，采样高位信号，热封开始位置为 100°，热封结束位置为 260°，即 100°~260°范围内为热封阶段，而

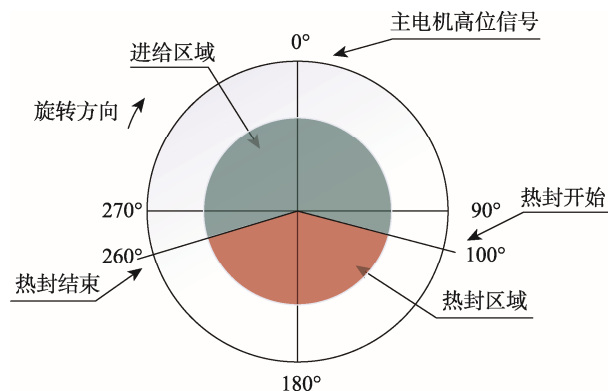


图 6 主电机运动规划

Fig.6 Main motor motion planning

260°~100°范围内为进给阶段。

主虚轴根据指定参数执行 MC_MoveVelocity 指令，即使用伺服驱动器的位置控制模式，进行模拟速度控制，其目标速度依据式（1）可得，加速度和减速度设置为 $60(^{\circ})/s^2$ 。当主虚轴依次进入凸轮表 CamIn，CamIn1 的启动范围内时，使相位（主虚轴 Virtual）和位移（主电机伺服轴）根据预先规划的凸轮表 CamHot，CamHot1 开始执行凸轮表动作。

$$\text{目标速度} = \text{制袋速度} / 60 \times 360 \quad (1)$$

从虚轴 Virtual1 与主虚轴 Virtual 的执行 1:1 的齿轮动作，当 InGear 齿轮比达到后，牵引 1 伺服轴（从轴）与从虚轴 Virtual1 执行 MC_MoveLink 指令，使牵引 1 伺服轴与从虚轴 Virtual1 同步，执行定位控制。主电机与牵引 1 电机同步控制策略见图 7。

对主电机的同步控制进行数据跟踪，主电机同步控制响应曲线见图 8，主电机实际速度曲线是一条直线，表示主电机运行在恒定速度下。主电机位置曲线是连续、相同的锯齿状，表示主电机的每转位置保持不变。

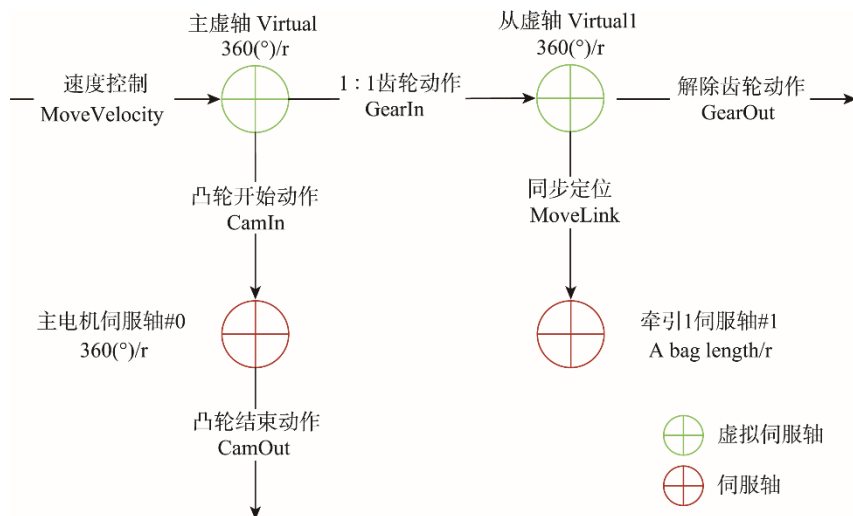


图 7 主电机与牵引 1 电机同步控制策略

Fig.7 Synchronous control strategy of main motor and traction motor 1

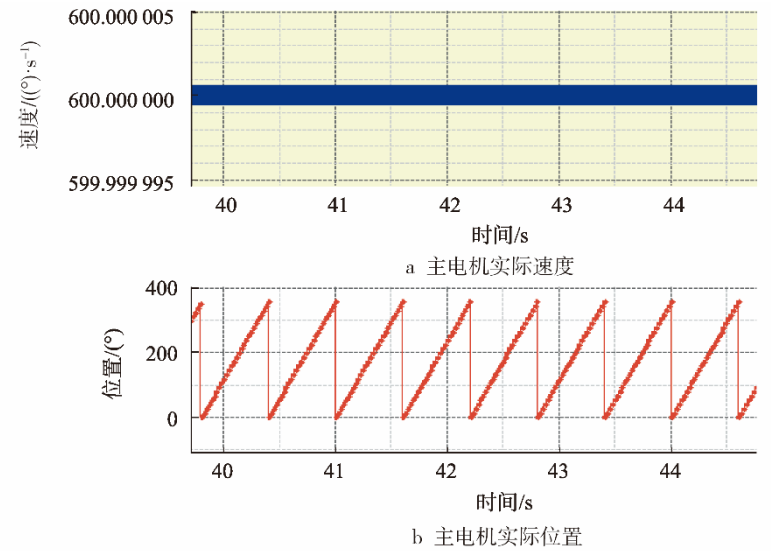


图 8 主电机同步控制响应曲线
Fig.8 Synchronous control response curve of main motor

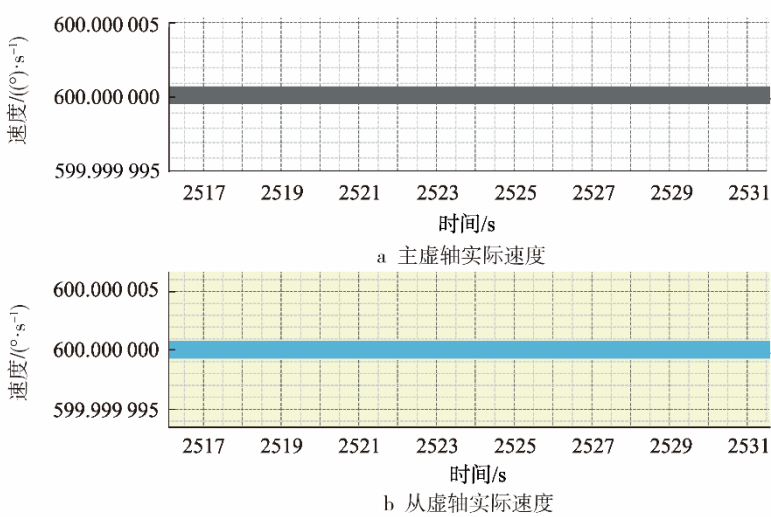


图 9 主、从虚轴实际速度响应曲线
Fig.9 Actual speed response curve of the main and the slave virtual axes

主、从虚轴的实际速度响应曲线见图 9，系统正常运行时，主电机与主虚轴执行电子凸轮控制，牵引 1 电机与从虚轴执行同步定位控制，由于主、从虚轴是执行 1 1 的电子齿轮动作，所以速度一致。

3.2 牵引电机轴同步控制与浮辊补偿控制

由于制袋机各工位的走料方式、加工工艺的不同导致走料张力的不断变化，这种走料张力的多变量控制要求各个电机的控制过程需要相互配合和协调，并且能够在变量发生偏差时做出相应补偿，维持原有的协调关系。系统基于 InoProShop 软件，采用多轴协调同步控制方式，在传统的多电机协同控制的基础上，引入速度补偿机制，以提高多牵引协同控制的精度和可靠性，实现平稳、可靠的走料浮

辊恒张力控制。

由图 1 可知，系统的走料控制主要就是实现牵引 1 电机、牵引 2 电机与放料电机间的协调控制，而浮辊 1 对牵引 1 电机、牵引 2 电机之间实时补偿膜料因张力变化导致的线速度不匹配问题，需设计一个合理的浮辊补偿机制。

牵引电机多轴同步控制与浮辊补偿控制策略见图 10，牵引电机 1 与牵引电机 2 之间通过 1 1 的齿轮动作进行同步控制，当浮辊 1 处的接近开关 ON 时，表明浮辊 1 向下偏移，牵引 1 胶辊与牵引 2 胶辊间的膜料长度增加，为保持膜料张力恒定，即需要使牵引 2 胶辊的线速度低于牵引 1 胶辊的线速度，即使两牵引胶辊间产生速度差，速度差会导致牵引 2 进给膜料长度减少，导致浮辊 1 向上偏移，直到浮辊 1 处的接

4 系统测试与分析

系统实验使用三层铝箔 (PET/AL/PE) 复合膜材料为测试对象, 实验工艺参数见表 1。

实验依据表 1, 分别在白袋、色袋模式下连续采样 2 个牵引伺服的编码器反馈值, 各 20 组数据, 并利用 Matlab 软件对数据进行处理, 绘制了白袋和色袋模式下的牵引伺服位置偏差曲线, 见图 12。

表 1 工艺参数
Tab.1 Process parameters

参数	设定值	参数	设定值
实验对象	PET/AL/PE	制袋速度/(个·min ⁻¹)	60
材料厚度/μm	12/10/50	热封温度/°C	110 ~ 180
尺寸(L/W)/mm	120×90	有效热封时间/s	0.2
制袋模式	白袋/色袋	浮辊 1 补偿率/%	1.5
切刀模式	单切	浮辊 1 压力值/MPa	0.2

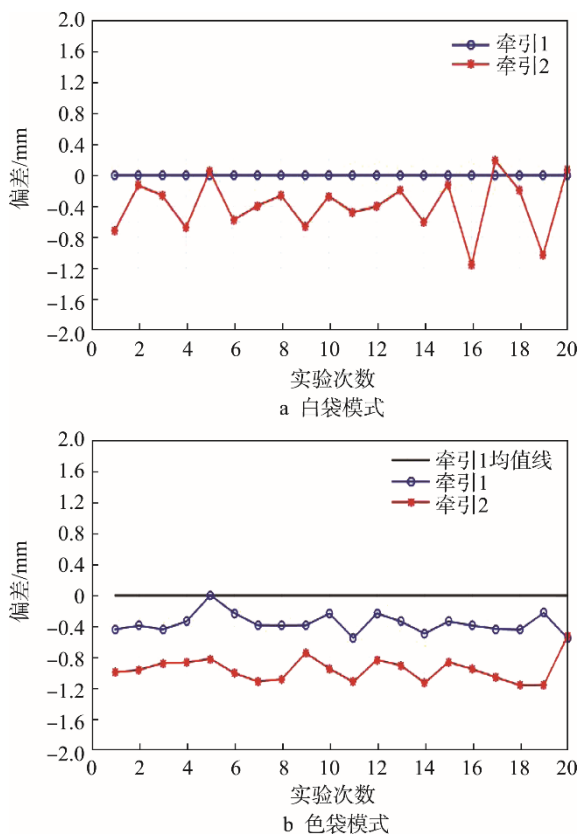


图 12 牵引伺服位置偏差曲线
Fig.12 Traction servo position deviation curve

当系统工作在白袋模式, 由制袋工艺可知, 牵引 1 伺服的位置偏差 (定位精度) 决定了袋长裁切精度; 牵引 2 伺服的位置偏差反映了浮辊 1 补偿控制的稳定性和协调性, 间接反映了薄膜材料拉伸、热封变形量的大小; 白袋模式下可设置偏差补偿量以提高袋长精度。从图

12 可以看出, 白袋模式下牵引伺服同步跟随性相比色袋模式要好, 但是其稳态误差相对较差, 符合实际情况。

当系统工作在色袋模式, 牵引 1 的偏差值基本呈现负值, 这是由于牵引 1 伺服的停止由色标中断信号决定, 而色标位置由膜料套色印刷的精度决定, 并受到薄膜的热封、拉伸变形及胶辊打滑等非线性、不可变因素的影响, 因此制袋长度会收缩 (拉伸) 一段距离, 该值大小取决于薄膜特性、热封温度、走料张力等影响因素, 因此袋长的裁切精度是由膜料的印刷套色精度决定, 牵引 1 伺服的定位精度可忽略不计; 牵引 2 伺服的位置偏差决定了自立烫刀跟标纠偏动作的精确度, 间接反映了该段薄膜材料拉伸、热封变形量的大小, 同时也反映了两牵引轴间的同步精度和稳定性。

由实验结果可知, 系统能以较稳定的同步控制保证自立烫刀和打孔纠偏等动作能够维持在一个较稳定的状态, 同时牵引 1 和牵引 2 电机位置偏差幅度稳定在一定范围内, 同步性好且波动较平缓。

5 结语

针对三边封制袋机的运动控制问题, 文中设计了一种基于虚拟总轴同步控制策略的制袋机控制系统, 主要从以下几个方面展开了工作: 以高速三边封制袋机为例, 介绍了其工艺流程及工作原理, 分析了制袋机的运动特点, 给出了相应的运动控制方案, 阐述其速度和位置的同步控制原理, 重点实现虚拟总轴同步控制策略在制袋机控制系统中的应用。实验结果表明, 引入同步控制策略的控制系统具有良好的同步性与稳定性, 两牵引轴间同步误差控制在 0.3% 左右, 对制袋机裁切精度要求有较好的促进作用。同时, 文中所述控制系统及实现方法具有广泛通用性, 对包装行业的大部分机械具有借鉴意义。

参考文献:

[1] 彭泽光, 彭杭, 辛少荣, 等. 全自动多功能多制式制袋机的创新与研究[J]. 中国包装工业, 2012(2): 58—59.
PENG Ze-guang, PENG Hang, XIN Shao-rong, et al. Innovation and Research of Automatic Multi-functional Multi-standard Bag Making Machine[J]. China Packaging Industry, 2012(2): 58—59.

[2] 邵栋梁. 塑料食品包装材料的卫生安全性分析[J]. 包装与食品机械, 2010, 28(1): 51—55.
SHAO Dong-liang. Analysis of Health and Safety of Plastic Food Packaging Materials[J]. Packaging and Food Machinery, 2010, 28(1): 51—55.

[3] 于尚平. 基于无轴传动技术的凹版包装印刷机套印控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 4—5.

- YU Shang-ping. Gravure Package Printing's Chromatography Control Based on Shaftless Transmission Technology[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 4—5.
- [4] 陈银环. 基于相邻交叉耦合的凹版印刷机多轴同步控制[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 226—230.
- CHEN Yin-huan. Multi-axis Synchronous Control of Gravure Press Based on Adjacent Cross Coupling[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(11): 226—230.
- [5] 肖园园. 基于虚拟总轴的同步控制技术及其应用研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2014: 15.
- XIAO Yuan-yuan. Electronic Line Shafting-based Synchronization Technology and Its Applications[D]. Zhuzhou: Hunan University Of Technology, 2014: 15.
- [6] PEREZ-PINAL, NUNEZ C, ALVAREZ R, et al. Comparison of Multi-motor Synchronization Techniques[C]// Industrial Electronics Society, IECON 2004, Conference of IEEE, 2004: 1670—1677.
- [7] 肖亮亮. 基于虚轴法的多轴同步运动控制系统设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2010: 5.
- XIAO Liang-liang. Design of Multi-Axis Synchronization Systems Based on Virtual line-shaft Control[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2010: 5.
- [8] 于泽浩. 无轴系统同步控制的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 29—30.
- YU Ze-hao. Synchronization Control Strategy of Shaftless System[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008: 29—30.
- [9] 李忠华. 高速包装设备的摆臂同步控制技术研究[J]. 山东工业技术, 2018(7): 63.
- LI Zhong-hua. Synchronous Control Technology of Swing Arm in High Speed Packaging Equipment[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(7): 63.
- [10] ZHANG Chang-fan, XIAO Yuan-yuan, HE Jing, et al. Improvement of Electronic Line-shafting Control in Multi-axis Systems[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(4): 474—481.
- [11] 肖波, 邵明, 黄林勇, 等. 双列多功能制袋机故障诊断系统的研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(3): 198—200.
- XIAO Bo, SHAO Ming, HUANG Lin-yong, et al. Fault Diagnosis System of Double Row and Multifunction Bag-making Machine[J]. Machine Tools & Hydraulics, 2016, 44(3): 198—200.
- [12] 彭杭, 张建桃, 张铁民, 等. 高效节能三列中封全自动制袋机开发[J]. 包装与食品机械, 2014(2): 37—40.
- PENG Hang, ZHANG Jian-tao, ZHANG Tie-min, et al. The Development of High Efficiency and Energy Saving Three-row-middle-envelope Plastic Bag Making Machine[J]. Packaging and Food Machinery, 2014(2): 37—40.
- [13] 彭泽光, 阎秋生, 魏庆. 新型高效塑料软包装复合袋制袋机开发[J]. 机电工程技术, 2012(5): 39—41.
- PENG Ze-guang, YAN Qiu-sheng, WEI Qing. The Development of New and High Efficient Plastic Bag Making Machine of Flexible Packaging Compound Bag[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2012(5): 39—41.
- [14] 刘洪志. 基于 ARM 嵌入式的制袋机控制系统设计[D]. 南京: 南京林业大学, 2012: 5.
- LIU Hong-zhi. The Design of Bag-making Machine Control System Based On ARM Embedded Technology [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012: 5.
- [15] 陈德传, 卢玲. 制袋机定长定位协调伺服控制[J]. 基础自动化, 1999(4): 42—45.
- CHEN De-chuan, LU Ling. Coordinate Servo Control of Dead Length and Fixed Position for Bag Making Machine[J]. Basic Automation, 1999(4): 42—45.
- [16] 毕楚瑜, 薛伟. 制袋机系统的伺服控制[J]. 自动化技术与应用, 2013, 32(1): 71—73.
- BI Chu-yu, XUE Wei. Servo System of Bag Making Machine[J]. Techniques of Automation and Applications, 2013, 32(1): 71—73.