

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.04.008

4边封包装机送膜-横切协同控制方法

陆奇业¹, 彭来湖^{1,2*}

(1. 浙江理工大学 浙江省现代纺织装备技术重点实验室, 浙江 杭州 310018;
2. 浙江理工大学 龙港研究院, 浙江 温州 325000)

摘要:针对4边封包装机由于送膜轴和切刀轴的运动分离控制导致薄膜进给与切刀旋转不同步而影响了加工质量的问题,课题组基于EtherCAT技术原理搭建控制系统整体框架。设计一种电子凸轮曲线,实现追剪过程中执行机构间的速度与位置匹配;以EtherCAT为通信手段,满足执行机构间响应同步需求;另外对机械零位进行周期性补偿,弥补机械误差引起的加工误差。基于该系统实际加工袋长为200 mm的塑料薄膜,误差小于1 mm,且产品没有出现损坏情况。该控制方法能够满足4边封包装机的加工需求。

关键词:4边封包装机;多轴协同控制;电子凸轮;EtherCAT技术

中图分类号:TH132;TB486.3 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)04-0061-07

Research on Co-Control Method of Film Feeding and Crosscutting for Four-Side Sealing Packaging Machine

LU Qiye¹, PENG Laihu^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Modern Textile Equipment Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;
2. Research Institute of Zhejiang Sci-Tech University in Longgang, Wenzhou, Zhejiang 325000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the machining quality of four-side sealing packing was affected by the non-synchronous rotation of filming feeding and cutter due to the motion separation control of the film feeding shaft and the cutter shaft, the overall control system framework was built based on EtherCAT technology principle. An electronic cam curve was designed to match the speed and position of the actuator during chasing shear process. EtherCAT was used as the communication means to meet the needs of synchronization between the actuators. In addition, the mechanical zero position was periodically compensated to make up for the machining error caused by mechanical error. Based this system, the plastic film with a bag length of 200 mm was actually processed with an error of less than 1 mm and no damage. The proposed control method can meet the needs of the four-side sealing packaging machine processing.

Keywords: four-side sealing packing machine; multi-axis collaborative control; electronic cam; EtherCAT technology

4边封包装机是由6个伺服电机构成的一种联动装置,能够自动完成包装所需的一系列动作。在对包装袋进行横向切割的过程中,一般采用追剪的方式提升加工效率^[1]。追剪是一种对匀速运动物体进行垂直切割的技术,可实现执行机构周期性的往复运动,其难点在于送膜轴与横向切刀轴之间速度及位置的精准同步匹配^[2]。传统包装机控制系统中通常采用电子

凸轮编辑器生成凸轮曲线表,控制器根据凸轮曲线表的凸轮点输出相应脉冲控制伺服电机执行追剪任务。这种控制模式需要借助外部工具建立运动轨迹再导入控制器中,在控制精度、运行稳定性和产品适应性等方面具有一定的弊端,且采用脉冲控制的方式受限于脉冲信号可靠传输的最高频率,无法满足4边封包装机运动控制系统高速、高精的要求。

收稿日期:2022-12-07;修回日期:2023-05-10

第一作者简介:陆奇业(1996),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式系统、工业互联网通信。通信作者:彭来湖(1980),男,浙江苍南人,博士,副教授,研究生导师,主要研究方向为智能装备与嵌入式控制技术、机电一体化及智能制造。E-mail: laihip@zstu.edu.cn

因此,针对传统包装机在送膜-横切协同控制上的问题(要满足4边封包装机6轴联动的同步性),课题组引入 EtherCAT 技术^{[3]8},提出一种送膜-横切协同控制方法,并搭建系统进行可行性验证。

1 控制系统框架模型

1.1 4边封包装机追剪过程工艺要求

如图1所示,在4边封包装机追剪过程中,包装膜是以匀速进给的。当横向切刀旋转到需要切割的角度时,为了避免包装膜堆积或者拉扯的情况,包装膜的进给速度和横向切刀的旋转线速度要保持一致,这段工作时期称为同步区。即在同步区包装膜和横向切刀运行相同的长度。当追剪过程结束后,横向切刀需要精准快速回到下一次同步区的起点,使得刀轴与薄膜前后2次啮合所相距的长度正好是所需要的长度,且回到下一次同步区的起点时,送膜轴和横向刀轴要保持速度同步。

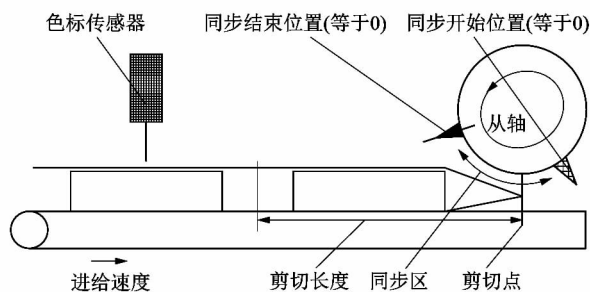


图1 追剪过程示意图

Figure 1 Schematic diagram of chasing shear process

1.2 基于 EtherCAT 的系统框架设计

EtherCAT 是德国倍福公司开发的一种实时工业以太网技术,采用一主多从的方式,支持多种设备同时连入^{[4]20},主、从站使用的分布式时钟能够确保同步的高精度,从站间数据响应延迟低于 $1\ \mu\text{s}$,因此这种通信方式便于主控制器与横向刀轴、送膜轴及其他轴之间的实时数据传递。课题组选择采用开源主站 SOEM 配合嵌入式平台实现主站功能的方案,成本更低,实时性更强。主站控制器采用 ST 公司微处理器 STM32H750,外部 PHY 芯片采用 Microchip 公司 LAN8720A 芯片^[5]。

4边封包装机控制系统框架如图2所示,由用户

层、控制层、物理层及硬件层组成^[6]。用户层包括一体化人机交互界面,通过 UI 界面实时显示工作速度、力矩等机器工况,也可以将实际工作参数传输给控制器。控制层包括对参数的获取及解析、电子凸轮曲线多项式计算及从站位置信息计算等,还通过 EtherCAT 协议栈的数据帧服务接口对数据帧进行封装,并与传输层对接。传输层及物理层负责将过程数据以以太网帧的方式进行接收与转发。硬件层包括横向切刀轴、送膜轴和送料轴等从站,接收到相应数据帧后处理并执行相应任务。

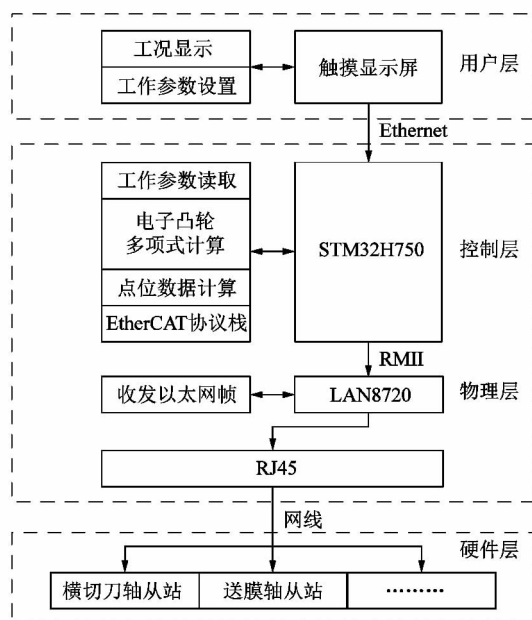


图2 4边封包装机控制系统框架

Figure 2 Control system framework of four-sided sealing packaging machine

1.3 同步工作模式

为保证系统各执行机构之间拥有良好的同步性能,课题组采用了分布时钟(distributed clock, DC)来确保系统中各从站设备任务的同步进行,从站设备在收到数据帧后触发产生同步信号。

如图3所示,主站工作在同步模式下,主站会在从站触发同步信号之前开启一个定时器信号,所设的提前量为数据帧在总线传输时的延迟时间;从站系统的初始偏差值以及各从站的时钟晶振频率之间存在微小差异,导致在运行过程中各从站时钟在运行过程中的抖动。为了保证送膜-横切协同控制,主站控制器计算

延迟对从站时钟进行周期性动态补偿。

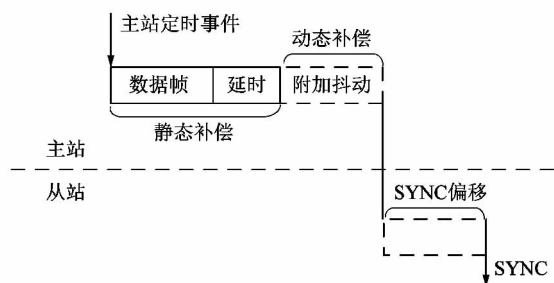


图3 主站同步模式示意图

Figure 3 Schematic diagram of master station synchronization mode

2 送膜-横切协同控制

根据上述4边封包装机横切过程工艺要求可知:在同步区实现横切刀轴和物料进给速度同步,在同步区完成剪切后通过调节横切刀轴的速度来适应不同的切割长度。送膜-横切协同控制为实现这一目标,需要解决在数量关系上将工艺信息转化为伺服电机的位置控制指令;而在通信上应满足2个机构对于控制指令的同时响应。

如图4所示,课题组根据工艺信息设计一种电子凸轮曲线,使得送膜轴与横向切刀轴建立耦合关系,保证相对运动同步;以EtherCAT为通信手段,保证数据帧指令分发的同步性;开发机械零位补偿,弥补机械误差导致的多轴之间机械位置偏差。通过以上3方面的控制设计,保证送膜-切割协同性。

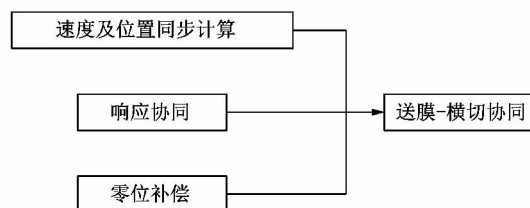


图4 送膜-横切协同控制框图

Figure 4 Film feeding-crosscutting collaborative control block diagram

2.1 电子凸轮曲线设计

课题组采用虚拟主轴控制策略,以虚拟轴为主轴,送膜轴和横向切刀轴为从轴。其中把虚拟主轴与送膜

轴设为同步比率,在电子凸轮曲线设计中,主要是要确定虚拟主轴和横向切刀轴的位置关系^[7]。在实际追剪运动中,为了适应不同材料的剪切长度,电子凸轮曲线的设计一般需要考虑如下3种情况:

1) 当横向切刀周长 G 与包装袋长 L 相差不大时,若横向切刀周长相对较长,在同步区运行相同长度外,非同步区横向切刀要运行到下一个同步点,并在下一个同步点之前做好速度同步。曲线设计如图5所示,在非同步区,横向切刀作减速-加速运动,切刀周长相对较短的情况则相反。

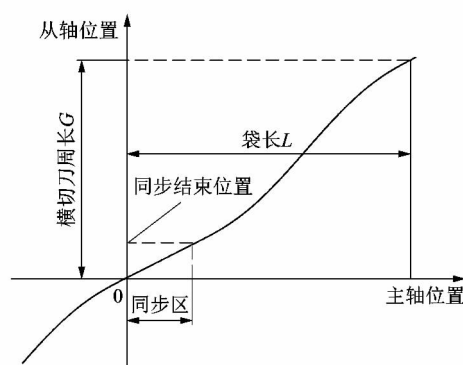


图5 横切刀周长与袋长相差不多

Figure 5 Little difference of girth of cutter and bag length

课题组采用五次多项式作为凸轮曲线方程,五次曲线在速度、加速度上实现连续,具有较好的柔性,同时数值运算量也不会很大,具有良好的性能。横切刀轴位移公式如下:

$$S(x) = \begin{cases} k_m x, & 0 \leq x \leq l_1; \\ a_5 x^5 + a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0, & l_1 < x \leq L. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S(x)$ 代表横切刀轴位置, x 代表虚拟轴位置, k_m 代表主轴和横向刀轴的同步比率, l_1 代表同步区结束时主轴位置, L 代表包装袋长。

2) 当横切刀周长 G 与包装袋长 L 相等时,包装膜的进给速度和横切刀的旋转线速度致始终保持一致,即横切刀作匀速运动,曲线设计如图6所示。

横切刀轴位移公式如下:

$$S(x) = x, \quad 0 \leq x \leq L. \quad (2)$$

3) 当横切刀周长 G 远小于包装袋长 L ,在同步区

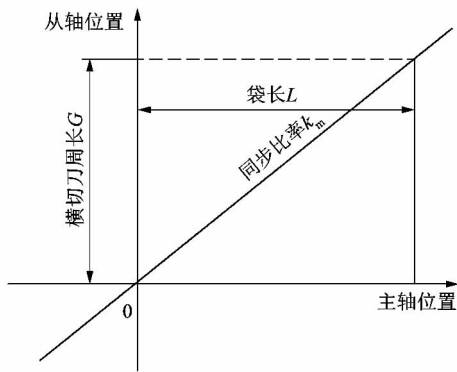


图 6 横切刀周长与袋长相等

Figure 6 Cutter circumference equal to bag length

运行相同长度外,在非同步区送膜轴要运行的距离较长,但是由于膜长度远大于切刀长度,这样就会造成横向切刀轴为了满足在非同步区运动符合要求的距离,会朝反方向进行旋转,这种方式会对机械结构等造成损坏。因此需要在原先曲线的基础上增加一段静止段,新的非同步区分为减速、静止和加速 3 部分,横切刀电子凸轮曲线图如图 7 所示。

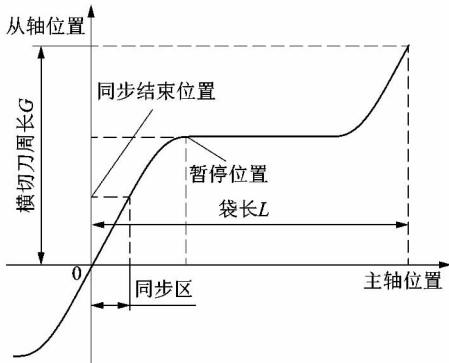


图 7 横切刀周长远大于袋长

Figure 7 Cutter circumference longer than bag length

横切刀轴位移公式如下:

$$S(x) = \begin{cases} k_m x, & 0 \leq x \leq l_1; \\ a_5 x^5 + a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0, & l_1 < x \leq l_2; \\ h_s, & l_2 < x \leq l_3; \\ b_5 x^5 + b_4 x^4 + b_3 x^3 + b_2 x^2 + b_1 x + b_0, & l_3 < x \leq L. \end{cases} \quad (3)$$

式中: l_2 代表从轴在进入等待位置时的虚拟轴位置, l_3 代表从轴离开等待位置时的主轴位置, h_s 代表横切刀

轴从同步区起点到停止等待区起点所经过长度。

以第 1 种情况举例实际应用过程,根据工艺需求要满足以下边界条件:

$$\left. \begin{aligned} x=0 &\Rightarrow S(x)=0, dS(x)/dx=k_m, d^2S(x)/dx^2=0; \\ x=l_1 &\Rightarrow S(x)=k_m \times l_1, dS(x)/dx=k_m, d^2S(x)/dx^2=0; \\ x=L &\Rightarrow S(x)=G, dS(x)/dx=k_m, d^2S(x)/dx^2=0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据边界条件得出电子凸轮曲线的系数通解式:

$$\left. \begin{aligned} a_5 &= \frac{6 \times h_s - 3 \times (L - l_1) \times k_m}{(L - l_1)^5}; \\ a_4 &= \frac{-15 \times h_s + 8 \times (L - l_1) \times k_m}{(L - l_1)^4}; \\ a_3 &= \frac{10 \times h_s - 6 \times (L - l_1) \times k_m}{(L - l_1)^3}; \\ a_2 &= 0; \\ a_1 &= k_m; \\ a_0 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

通过人机交互界面设置工艺参数,控制器接收到工艺参数后会根据式(5)计算出电子凸轮曲线的系数 $a_0 \sim a_5$ 。在每一条指令发送前,依据电子凸轮曲线求解出伺服从站的位置信息,使得送膜-横切协同。

2.2 响应协同

从站位置信息通过 EtherCAT 主站解析、计算和封装,再配合支持 DC 时钟的从站进行收发并执行,从站执行机构根据 DC 时钟触发的同步输出信号完成对控制指令的同时响应^[8]。

2.2.1 主站协同控制流程

该系统通过分层设计,依次进行以下 3 个步骤计算出从站周期性位置信息,然后通过 EtherCAT 协议栈将位置信息封装成数据帧传递给从站。

1) 准备阶段

主站运动控制软件通过 TCP 从人机交互界面获取工艺参数,将其代入上述电子凸轮曲线多项式系数通解中求出多项式的解,其目的是求解各个从站点位。主站与从站建立 EtherCAT 通信连接,初始化从站配置,实现与从站的数据交换。

2) 送料轴及横切刀轴位置信息计算

基于当前虚拟主轴位置信息,利用电子凸轮曲线

得到送膜轴及横切刀轴下一周期位置信息,保证送膜-横切速度及位置的同步匹配。

3) 数据帧封装

将送膜轴及横切刀轴位置信息以 EtherCAT 周期性通信的数据帧格式进行封装,通过主站发送数据的 API 函数,将数据帧报文下发给各个从站,从站通过光缆接收到数据后,等待 SYNC0 信号到达并开始执行指定任务。

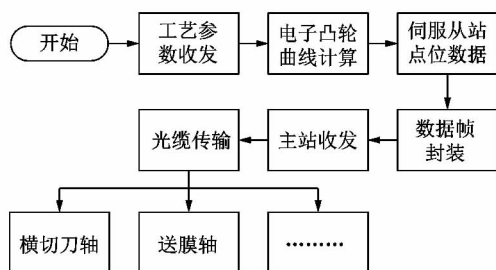


图 8 EtherCAT 主站协同控制流程

Figure 8 Cooperative control flow of EtherCAT master station

2.2.2 通信故障反馈

在控制系统通信过程中,EtherCAT 周期性通信能保证送膜-横切协同控制,但是由于不定个数的从站在物理上从网络中断开,或者没被数据帧寻址到等原因,导致后续从站数据丢包,从而无法精准完成横向切割任务。因此主站软件设计中,可以通过检查 EtherCAT 数据帧是否已成功处理 WKC 码(工作计数器)来表示子报文的处理情况。在 EtherCAT 协议中,PDO 通信数据发送采用的是 LRW 逻辑寻址读写命令,当数据帧经过某从站时,从站读数据成功则 WKC 加 1,从站写数据成功则 WKC 加 2,主站接收到返回的数据帧后,检查子报文中的 WKC,如果不等于预期值,则表示此子报文没有被正确处理。主站在周期性数据发送过程中循环检测 WKC,实现实时检测从站是否异常,并在发现异常后执行相应代码完成对从站的故障消除。

2.3 零位补偿

在包装机长时间运行过程中,由于机械结构上的误差,从轴之间的相对机械位置发生缓慢相对偏移,与虚拟主站耦合的理论位置存在 1 个偏差值,即在虚拟主轴周期起始零点时,从轴物理位置已越过零点或者

未达到零点,因此主站需要周期性地对从站进行零位补偿。因此在切刀轴机械零点位置装有 1 个接近开关,当切刀到达机械零点时,接近开关就会发出 1 个信号给控制器,控制器接收到信号后与虚拟主轴的理论位置进行比照,得到 1 个偏差值,将这个偏差值作为补偿来调整下一周期的横切刀电机的位置,达到零位补偿的作用。

3 实验测试

3.1 系统实现

基于以上送膜轴与横向切刀轴协同控制方法搭建 4 边封包装机追剪同步控制系统。

3.1.1 控制系统测试平台搭建

为验证本研究设计的协同方法能否达到预期效果,课题组搭建了测试平台对整体系统进行调试。测试平台如图 9 所示,整套测试平台硬件包括 1 块人机交互触摸屏、2 套支持 EtherCAT 总线通信的伺服驱动器以及配套电机、1 块 EtherCAT 主控板。EtherCAT 主控板通过 TCP 接口与 HMI 人机交互触摸屏相连接,通过 EtherCAT 接口依次与 2 套伺服驱动器相连接。主控板从 HMI 获取参数后,计算出从机位置信息,通过 EtherCAT 接口发送给伺服驱动器,由伺服驱动器完成任务。

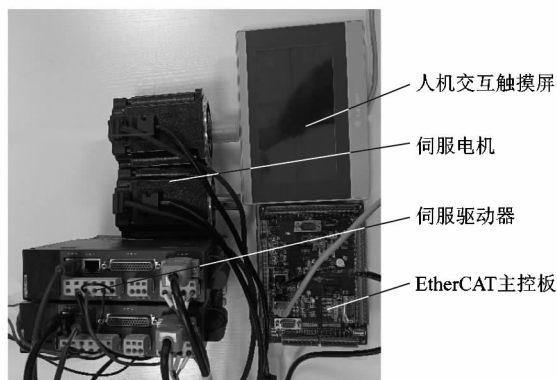


图 9 测试平台

Figure 9 Test platform

3.1.2 控制系统主站软件初始化

主站软件初始化流程如图 10 所示。EtherCAT 主站选用 SOEM 协议栈,基于协议栈各 API 接口函数编写主站初始化程序。主站首先初始化 EtherCAT 网口,与网卡建立 socket 连接。使用 SDO 通信方式设置从

站工作模式为 CSP 模式(循环同步位置模式),然后与从站建立 PDO 与内存地址 Iomap 映射,设置从站同步模式为 DC 同步模式。等待所有从站运行到安全状态后,发送 1 个有效过程数据实现从站切换到运行状态。当伺服从站的工作模式正常运行后,主站控制从站从状态 Sn01 跳转到状态 Sn05,使伺服从站电机上电并执行主站相应任务。

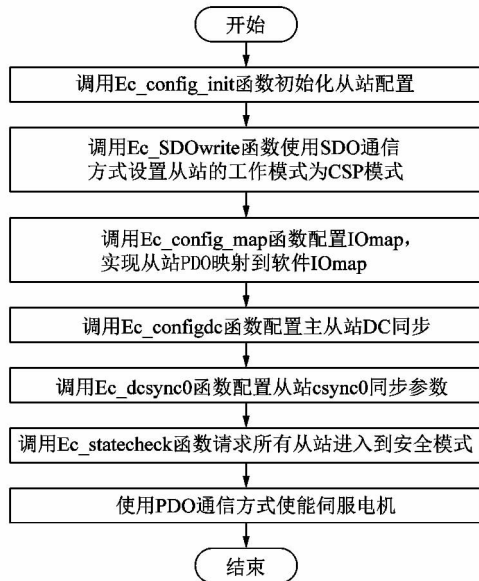


图 10 主站软件初始化

Figure 10 Initialization of master software

3.2 主站性能检测

EtherCAT 主站性能检测实验中采用 DC 分布时钟使所有伺服驱动器同步^[9]。系统采用主令式的同步控制策略,2 台电机之间没有耦合关系,主、从站通信周期时间设置为 1 ms。将交换机接入通信网络当中,通过电脑上的抓包软件 Wireshark 设置过滤规则(eth.type == 0x88a4) && (ecat.cnt == 0),捕获 EtherCAT 以太网帧检测其收发延迟,如图 11 所示。主站帧交互周期可以维持在 1 ms 左右,抖动维持在 $\pm 30 \mu\text{s}$ 左右,主站拥有良好的性能,可以在完成计算后分发新的指令。

3.3 切膜精度实验

如图 12 所示,将上述控制系统应用到实际加工,包装速度分别设置为 80,100 和 120 包/min,测量实际包装长度与设定包装袋长的偏差值。塑料薄膜实验工艺参数如表 1 所示。

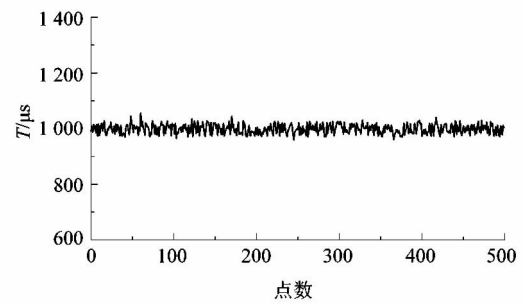


图 11 主站帧交互周期

Figure 11 Main station frame interaction cycle

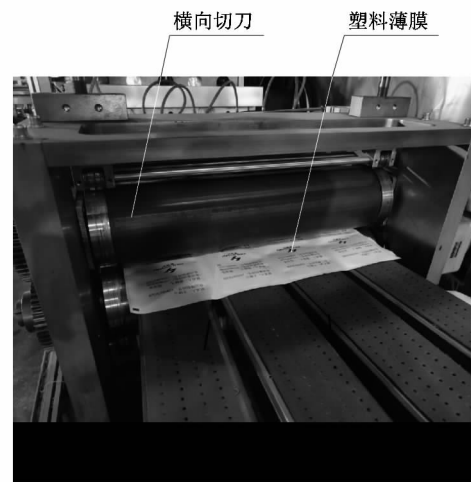


图 12 横向切割加工

Figure 12 Transverse cutting

表 1 塑料薄膜实验工艺参数

Table 1 Experimental process parameters of plastic film

包装袋 长/mm	制袋速度/ (包 · min ⁻¹)	横向切刀 周长/mm	切刀模式
200	80,100,120	311	三切

从图 13 可看出在不同包装速度下,包装的产品精度都能控制在 1 mm 以内,且横向刀轴在运动控制中无冲击。实验结果表明在高算力的控制器上采用上述算法设计的电子凸轮曲线可以显著提高切割精度,且设备运行平稳。

4 结语

针对 4 边封包装机横向切割过程送膜轴与横向刀轴协同性问题,课题组提出一种送膜-横切协同控制方法。结合虚拟主轴控制策略,依据工艺信息设计一种

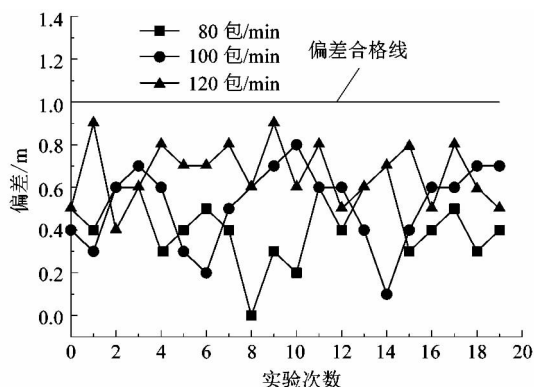


图 13 包装袋长偏差值

Figure 13 Packaging bag length deviation

横切电子凸轮曲线,使得送膜轴与横向切刀轴建立耦合关系,保证位置与速度同步匹配;引入 EtherCAT 技术,以 EtherCAT 为通信手段,保证数据帧指令分发的同步性;开发零位补偿功能,可以有效弥补机械装配导致的加工误差。基于此方法所搭建的控制系统具有高精度、高柔性和高稳定性的特点,可以满足产品多样性的包装需求。

后续可根据更多工艺要求利用 EtherCAT 技术的开放接口和功能拓展接入更多包装机拓展设备,同时

未来将利用该控制系统和算法拓展到更多类型包装机的应用。

参考文献:

- [1] 云善起,徐世许,王伟,等.基于电子凸轮飞剪的枕式包装机控制系统[J].控制工程,2020,27(10):1776-1780.
- [2] 张现忠,徐世许,王伟,等.基于电子凸轮追剪的切坯机控制系统设计[J].制造业自动化,2020,42(11):125-128.
- [3] 马志勋,刘思明,牛海川,等.基于 EtherCAT 的磁浮交通 PMLSM 驱动系统架构及控制研究[J].电气工程学报,2022,17(2):73-82.
- [4] 邱昌华,郭永杰,李宗坡,等.基于 Xenomai 的 EtherCAT 主站开发与实时性优化[J].自动化应用,2021(12):82-86.
- [5] 王惠娇.嵌入式平台 EtherCAT 主站的实现[J].计算机应用,2018,38(增刊1):165-169.
- [6] 杨亮亮,黄坤,张莉敏,等.基于嵌入式网络协议栈的多轴运动控制卡通信系统设计[J].软件工程,2021,24(5):13-16.
- [7] 蔡旺.枕式包装机电子凸轮曲线研究[J].包装与食品机械,2019,37(6):55-58.
- [8] 陈利君. EtherCAT 分布时钟技术及其工业应用[J].电气自动化,2019,41(3):4-6.
- [9] 施鲁强,马钧华.基于 EtherCAT 实时工业以太网的多轴系统同步控制[J].轻工机械,2022,40(3):66-73.

QC检测仪器网
WWW.QCTESTER.COM

QC检测仪器网
(www.QCtester.com)
您身边的仪器采购专家

