

基于双电子凸轮算法的枕式包装机控制系统

doi:10.20269/j.cnki.1674-7100.2025.1008

陈坤龙¹ 彭来湖^{1, 2}
陈伟杰¹ 杨平闯²

1. 浙江理工大学
机械工程学院
浙江 杭州 310018
2. 浙江理工大学
龙港研究院有限公司
浙江 温州 325802

摘 要: 针对枕式包装机三轴协同控制时, 刀轴和膜轴、料轴和膜轴出现运动不同步影响包装质量的问题, 以自研运动控制器 (Motion-Control-V-3.3) 为控制核心, 设计基于双电子凸轮算法的枕式包装机控制系统。根据凸轮运动规律, 建立数学模型, 并对 5 次多项式电子凸轮曲线进行优化, 以解决膜轴、料轴、刀轴三轴协调同步问题。同时, 对三轴零位进行周期性补偿, 以弥补机械误差的影响。实验结果表明, 在加工膜长为 80~320 mm 的薄膜、工作速度小于 120 包/min (线速度约 9600 mm/min) 时, 系统误差在 ± 0.5 mm 之间, 且包装产品没有出现破损情况。本双凸轮控制系统是有效和可行的。

关键词: 双凸轮; 电子凸轮; 枕式包装机; 多轴协同控制; 校准函数

中图分类号: TB486; TP273

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2025)01-0061-10

引文格式: 陈坤龙, 彭来湖, 陈伟杰, 等. 基于双电子凸轮算法的枕式包装机控制系统 [J]. 包装学报, 2025, 17(1): 61-70.

随着工业自动化技术的不断进步, 人们对包装设备的自动化水平、生产效率和稳定性提出了更高的要求。传统的手工包装方式已经无法满足现代生产的需要, 因此, 智能化包装机械的研发和应用成为提升包装行业整体水平的关键^[1]。

电子凸轮控制系统能够通过软件来模拟传统凸轮机械的运动规律, 实现对机械运动的精准控制, 因而广泛应用于自动化包装机械。康瑞芳等^[2]提出了一种基于 DSP (digital signal processing) 的电子凸轮控制系统。该系统利用 DSP 的高速处理能力, 实现了对包装机械运动的快速响应和高精度控制, 有效提高了包装速度和质量。有研究者采用 PLC 与伺服系统相结合的方式设计电子凸轮控制系统。PLC 负责逻辑控制和过程监控, 而伺服系统则提供精确的位置

和速度控制^[3-8]。这种组合保证了控制系统的可靠性和稳定性, 但存在不可定制化工作任务的缺陷。有研究者采用欧姆龙 NJ 运动控制器, 对枕式包装机的凸轮曲线进行 3 次曲线优化, 以减少包装机的振动和冲击^[9-12]。这种优化方法不仅提高了包装机的包装精度和稳定性, 还有助于延长设备的使用寿命, 降低维护成本。陆奇业^[12]基于 EtherCAT 工业以太网通信技术, 设计了一款 4 边封包装机的控制系统。该系统通过实时采集和处理包装机各部件的状态信息, 实现了对刀轴、膜轴等关键部件的精确控制, 提高了包装机的整体运行效率和包装质量。

现有系统缺少针对包装机料膜 (料轴和膜轴) 和刀膜 (刀轴和膜轴) 的双凸轮协同控制系统^[13-20], 故本研究将自研运动控制器 (Motion-Control-V-3.3)

收稿日期: 2024-09-11

基金项目: 浙江省“尖兵领雁+X”研发攻关计划项目 (2024C01124)

作者简介: 陈坤龙, 男, 硕士生, 主要研究方向为多轴运动控制、嵌入式 MCU 开发, E-mail: kunlong0528@163.com

通信作者: 彭来湖, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能针织设备控制、智能制造与工业互联网标准化、智能仪器仪表研究, E-mail: Laihup@zstu.edu.cn

应用于枕式包装机。通过深入分析膜轴、料轴、刀轴的运动特性，设计 5 次凸轮曲线作用于料膜、刀膜的双凸轮控制系统，同时，添加零点对 3 轴零位进行周期性补偿，弥补机械误差的影响，旨在进一步提升枕式包装机的包装精度和生产效率。

1 枕式包装机结构与包装过程控制分析

1.1 枕式包装机的机械结构

基于双电子凸轮算法的枕式包装机是一种 3 轴协同控制的自动化设备，它融合了机械硬件设计与自动化控制技术。图 1 为枕式包装机结构示意图，其核心执行机构包括料轴、膜轴、袋成型装置、中封以及端封装置（刀轴）。

1) 刀膜协同控制

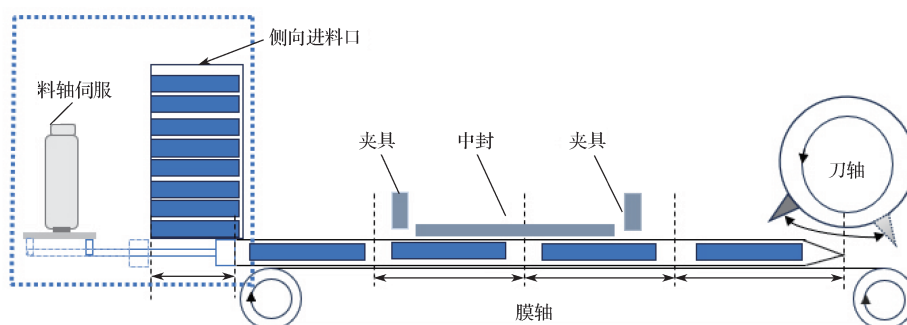


图 1 枕式包装机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pillow packaging machine structure

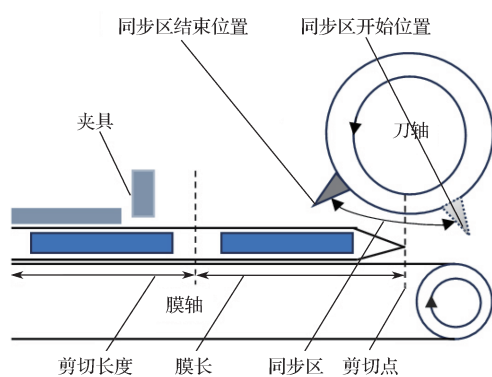


图 2 刀膜协同示意图

Fig. 2 Schematic diagram of knife film synergy

2) 料膜协同控制

料膜在包装过程中的张紧、输送也非常关键。利用电子凸轮算法，实现对料膜张紧、输送速度的精准控制，使得料轴准确推料到固定膜轴位置，保证包装

图 2 为刀膜两轴协同示意图。刀膜协同控制是为了确保在包装过程中切割膜的精准性和及时性。通过电子凸轮曲线的设计，实现刀轴和膜轴的协同运动，提高切割的准确度和速度，从而提高包装效率。

在枕式包装机的刀轴和膜轴追剪作业中，为了防止包装膜在剪切时发生堆积或被拉拽，包装膜的匀速进给与横向切刀的旋转线速度需完全匹配，即形成同步区。在此区域内，包装膜和横向切刀移动的距离相同，从而确保切割包装袋口平整。追剪完成后，横向切刀需根据主动轴和从动轴的实际长度，快速而准确地返回到下一个同步区的起始位置。该操作旨在保证刀轴与薄膜在前后两次咬合时，两者间的距离恰好等于所需的袋长。此外，切刀返回同步区起点的同时，膜轴和刀轴的速度也须保持一致，以维护后续切割过程的准确性和稳定性。

的质量和准确性。图 3 为料膜协同示意图。

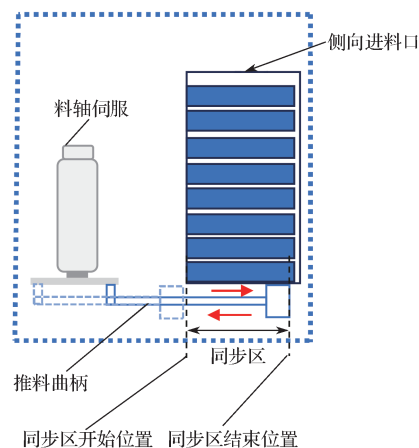


图 3 料膜协同示意图

Fig. 3 Schematic diagram of material film synergy

相较于常见枕式包装机控制系统，本双凸轮枕式包装机控制系统，不仅对刀膜进行 5 次凸轮曲线规划

外, 而且对料膜进行 5 次凸轮曲线规划, 以实现料轴与膜轴的同步工作。料轴采用推料曲柄实现送料过程。在推料曲柄最左侧到达侧向进料口最右侧的区域为同步区, 反之则为非同步区。在同步区, 膜轴和料轴的速度必须保持同步, 以保证送料的准确性和稳定性。曲柄到达同步区结束位置后, 需快速准确地回到下一个同步区开始位置。

通过上位机交互界面, 本双凸轮枕式包装机控制系统可以实现 3 轴任意相邻两轴凸轮曲线和直线运动之间的切换。根据具体情况选择合适的工作模式, 系统的适用性和灵活性得到提高。

1.2 控制系统硬件结构

根据包装精度和稳定性的需求来确定包装机硬件组成。图 4 为控制系统整体结构图。开关作为系统的数字量控制接口。在料轴和刀轴各添加一个接近开关 J2-D4NK-M, 在膜轴添加色标传感器 GDJ-211BG, 作为 3 轴校准零点。运动控制器采用自

研运动控制器 Motion-Control-V-3.3。该控制器采用 ARM (advanced risc machines) 和 FPGA (field programmable gate array) 架构, ARM 进行逻辑控制, FPGA 进行系统高速信号的采集和处理。触摸屏采用 繁易 FE7070WE 触摸屏作为人机交互界面, 提供直观的操作界面和多种功能选项。用户可以通过触摸屏设置参数、监控设备状态、发送控制命令。伺服系统选用 3 套东菱 XDQ1 系列作为动力输出单元, 以确保机械执行机构的精确定位和快速响应。

综上, 基于双电子凸轮算法的枕式包装机不仅在硬件设计上体现了高效性和精密性, 而且在控制系统的配置上展现了易用性。

1.3 包装过程控制分析

图 5 为枕式包装机工作简易流程图。

料轴: 负责将待包装物料准确填充至薄膜的指定位置。膜轴: 将卷状薄膜通过袋成型装置转换成筒状, 同时, 安装的色标传感器周期性采集薄膜上色标的位

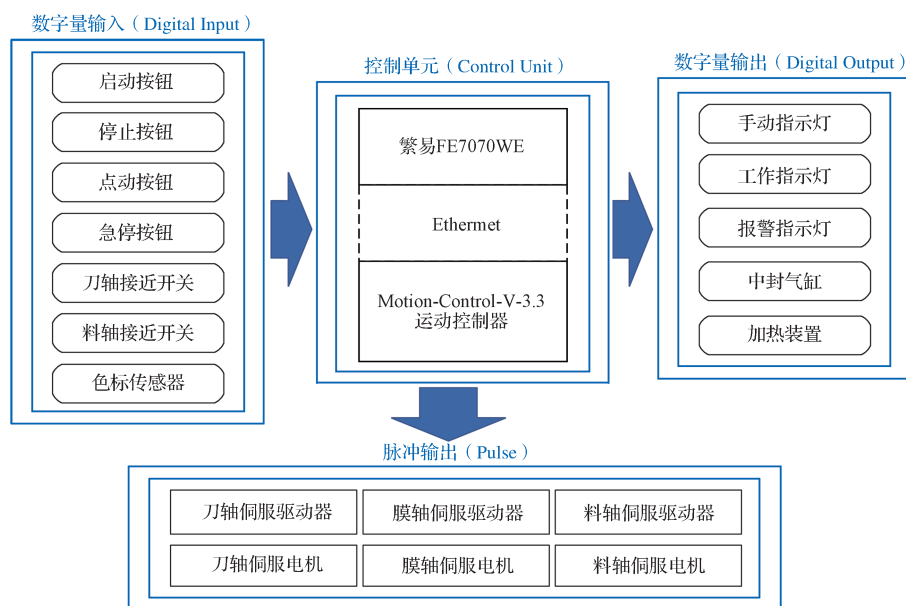


图 4 控制系统整体结构图

Fig. 4 Overall structure of control system

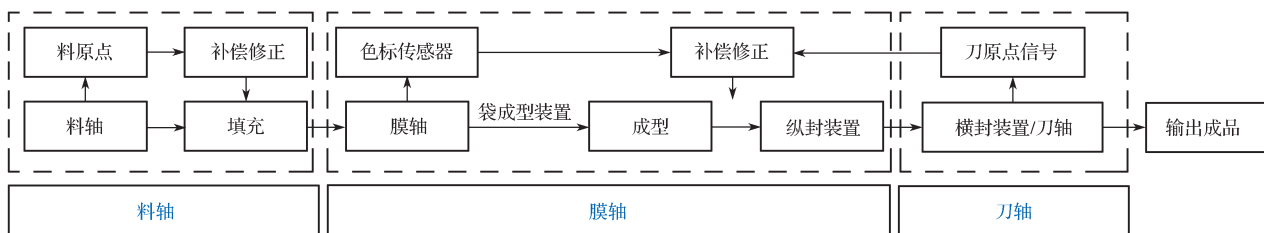


图 5 枕式包装机运行简易图

Fig. 5 Simple operation diagram of pillow packaging machine

置信息作为膜轴原点，以协同系统进行准确的物料填充和封口。纵封装置：利用加热元件将筒状薄膜的中间边缘封合，形成一个封闭的包装袋。横封装置即刀轴：与膜轴协同工作，完成包装袋的封口和切割。另外，接近开关安装在端封装置和料轴伺服电机上，用作料轴和刀轴的校准原点，确保料轴的送料动作及刀轴的切割动作协调一致。

通过上述流程，双凸轮枕式包装机能确保包装过程的精确性和可靠性，实现高效率、高质量的自动化包装。

2 电子凸轮运动控制算法

电子凸轮是源于传统机械凸轮设计的一种创新算法，它通过在控制器中设置特定的关键点来建立主轴位置与从轴位置之间的对应关系，形成了电子凸轮曲线。电子凸轮的本质是一种函数映射关系，以主轴的位置变化作为输入变量、从轴的位置变化作为输出变量。通常情况下，电子凸轮的关系是线性。然而，在速度切换时，理想中的1次方曲线意味着从一个速度瞬间过渡到另一个速度，这会导致加减速过程非常迅速，并在拐点产生冲击，从而引起设备震动。为了解决这一问题，多采用傅里叶级数对曲线进行拟合替换，以实现更为平滑的速度过渡，减少设备震动。为了便于分析凸轮曲线性质，引用 $L(x)$ 函数，即

$$L(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + \cdots + c_nx^n, \quad (1)$$

式中： L 为从轴位移； x 为主轴运动位移。

参考文献[21]，对3次、5次、7次多项式进行分析。5次多项式因其较低的最大加速度和良好的柔性，成为本电子凸轮设计中的优选方案。

2.1 电子凸轮曲线设计

在工业自动化领域，多轴同步控制技术是实现复杂运动控制任务的关键技术之一，其主要技术包括主从控制、虚拟总轴控制、交叉耦合控制、相邻交叉耦合控制以及偏差耦合控制等。考虑实际生产需求以及自研运动控制器Motion-Control-V-3.3的开发复杂性，通常采用主从同步虚拟轴控制策略。

虚拟轴是指一个实际不存在的轴。本研究在电子凸轮曲线的设计过程中主要关注虚拟主轴与刀轴和膜轴的位置关系，将料轴、膜轴和刀轴定义为从轴，并将虚拟主轴与膜轴设定为固定的电子齿轮比率。使用刀轴和膜轴的协同进行电子凸轮过程叙述，料膜协同机理相同。

电子凸轮曲线的设计需要综合考虑以下情况：

1) 当横向切刀轴周长(L_1)大于包装袋长(X)即 $L_1 > X$ 时，刀轴与虚拟主轴的位置关系如图6所示。非同步区的横向切刀轴必须运行至下一个同步区开始位置，并在到达该点之前完成速度的同步^[12]。为此，曲线设计常见两种情况：一种是在刀轴周长较长的情形下，在非同步区内先将横向切刀轴加速至所需速度，然后在接近下一个同步区开始位置之前减速；另一种是在刀轴周长较短的情形下，在非同步区内横向切刀轴先减速后加速，以确保运动的顺畅和同步。

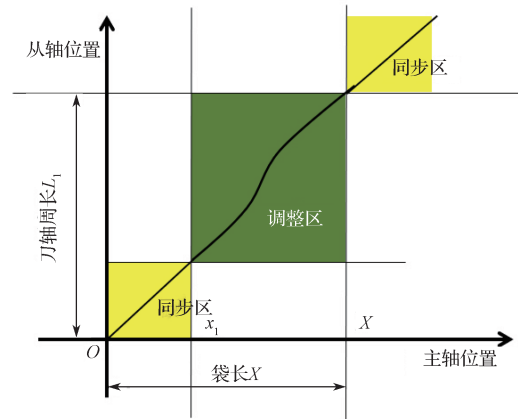


图6 $L_1 > X$ 时主从轴关系图

Fig. 6 Master-slave relationship diagram for $L_1 > X$

采用5次多项式作为凸轮曲线方程，横向切刀轴位移公式为

$$L(x) = \begin{cases} k_m x, & 0 \leq x \leq x_1; \\ c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + c_5x^5, & x_1 < x \leq X. \end{cases} \quad (2)$$

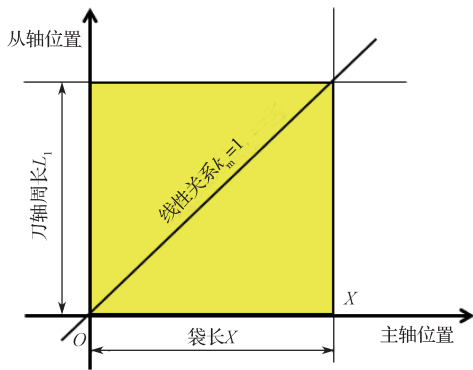
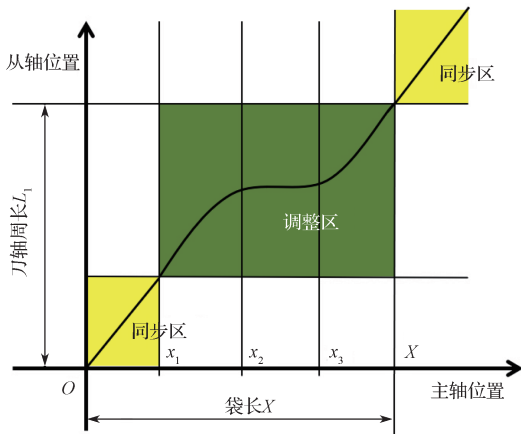
式中： x 为虚拟主轴位置； k_m 为虚拟主轴和横向切刀轴的同步比率； x_1 为同步区结束时虚拟主轴位置。

2) 当横向切刀轴周长与包装袋长相等即 $L_1 = X$ 时，刀轴与虚拟主轴的位置关系如图7所示。包装袋的进给速度和横向切刀轴的旋转线速度始终保持一致，即横向切刀轴相对膜轴作匀速运动^[12]。

横向切刀轴位移公式为

$$L(x) = x, \quad 0 \leq x \leq X. \quad (3)$$

3) 当横向切刀轴周长远小于包装袋长即 $L_1 < X$ 时，主从轴的位置关系如图8所示。额外移动可能导致刀轴为了满足非同步区的运动要求而反向旋转，这易对机械结构造成损害。为了避免这种情况的发生，在原有运动曲线中加入一个静止阶段，即将非同步区分成减速、静止和加速3个阶段^[12]。

图 7 $L_1=X$ 时主从轴关系图Fig. 7 Master-slave relationship diagram for $L_1=X$ 图 8 $L_1<X$ 时主从轴关系图Fig. 8 Master-slave relationship diagram for $L_1<X$

横向切刀轴位移公式为

$$L(x) = \begin{cases} k_m x, & 0 \leq x \leq x_1; \\ c_0 + c_1 x + c_2 x^2 + c_3 x^3 + c_4 x^4 + c_5 x^5, & x_1 < x \leq x_2; \\ h_s, & x_2 < x \leq x_3; \\ e_0 + e_1 x + e_2 x^2 + e_3 x^3 + e_4 x^4 + e_5 x^5, & x_3 < x \leq X. \end{cases} \quad (4)$$

式中: x_2 为横向切刀轴进入等待位置时的虚拟主轴位置; x_3 为横向切刀轴离开等待位置时的虚拟主轴位置; h_s 为横向切刀轴从同步区开始位置到等待区起点所经过的长度。

2.2 5次凸轮曲线求解

以横向切刀轴周长大于包装袋长为例, 根据临界条件可得:

$$x=0 \text{ 时}, L(0)=0, L'(0)=k_m, L''(0)=0;$$

$$x=x_1 \text{ 时}, L(x_1)=k_m x_1, L'(x_1)=k_m, L''(x_1)=0;$$

$$x=X \text{ 时}, L(X)=L_1, L'(X)=k_m, L''(X)=0.$$

故 5 次电子凸轮曲线的系数通解式为:

$$\begin{aligned} c_0 &= 0, c_1 = k_m, c_2 = 0, c_3 = \frac{10h_s - 6(X - x_1)k_m}{(X - x_1)^3}, \\ c_4 &= \frac{-15h_s + 8(X - x_1)k_m}{(X - x_1)^4}, c_5 = \frac{6h_s - 3(X - x_1)k_m}{(X - x_1)^5}. \end{aligned} \quad (5)$$

通过上位机人机交互界面设置机械参数及相关工艺参数, 控制器接收到工艺参数后, 利用电子凸轮算法计算出电子凸轮曲线的系数 $c_0 \sim c_5$ 。在每一条指令发送之前, 控制器会根据电子凸轮曲线求解出伺服驱动器从站的位置信息, 实现送膜 - 横切协同运动。

3 运动控制系统开发

图 9 为双凸轮控制系统中运动控制系统示意图。通过上位机人机交互界面输入参数并下发至底层运动控制器 Motion-Control-V-3.3 生成电子凸轮曲线, 获取虚拟主轴位置, 将其代入电子凸轮曲线中计算从轴目标位置, 换算脉冲信号下发硬件层交流伺服驱动器实现工作。同时, 色标传感器上传 3 轴零点信号给软件层, 根据位置反馈, 执行机构实施位置控制。

3.1 运动控制系统运行流程

运动控制系统的运行流程如图 10 所示。枕式包装机的启动过程中, 系统首先接收上位机人机交互界面上设定的生产工艺参数和机械结构等参数, 运动控制器 Motion-Control-V-3.3 在软件层根据参数规划出周期性规律的从轴电子凸轮曲线。软件层完成参数初始化及电子凸轮曲线参数计算后, 通过硬件层工控按键实现枕式包装机的启动、点动、暂停和急停等信号下发。

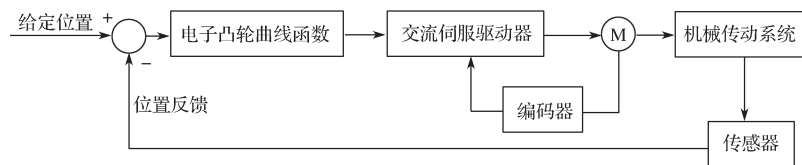


图 9 运动控制系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of motion control system

根据实际生产指令,系统周期性地读取虚拟主轴的实时位置数据,将其代入电子凸轮曲线,计算得到从轴应达到的目标位置。通过机械结构特点和伺服电子齿轮的传动比,将目标位置换算为输出脉冲信号并通过梯形插补方式进行加速。最终,运动控制器 Motion-Control-V-3.3 将脉冲信号通过 FPGA 发送给硬件层的从轴伺服驱动器,驱动伺服电机,并借助相关的外部机械机构来实现精确的运动控制。同时,利用硬件传感器设置零点,周期性检测零点位置,同时将实际测量位置与理论位置差值作为误差代入插补校准函数完成零点位置补偿,以实现校准。

3.2 误差校准函数

枕式包装机在实际生产中经过上料、纵封、横切时,易产生机械传动、膜轴送膜打滑等问题,故本系统设计 3 轴零点检测,即在料轴和刀轴添加接近开关 J2-D4NK-M,在膜轴添加色标传感器 GDJ-211BG。将实际测量位置与理论位置差值作为误差,在底层运动控制器开发误差校准函数实现对料轴和

刀轴的位置校准。

在实际的控制系统中,直接将误差信号换算脉冲信号完整地下发给从轴伺服驱动器,可能会导致在电机速度变化时,机械传动系统产生较大的冲击力,从而引起设备的异常振动或损坏,且随着时间的累积,产品的加工精度也会受到影响。为了避免此类问题,本研究采用误差校准函数,通过软件定时器来对误差值进行离散化处理,并逐步地补偿到从轴,以实现更加平稳的速度过渡,提高控制系统的稳定性和可靠性。

在实际测量位置小于理论位置时,速度控制策略一般采用加速-匀速-减速 3 阶段;当所需补偿距离较短时,采用加速-减速形式。

加速阶段:

$$P_1 = \frac{V_{\max}^2 - V_0^2}{2A_{\max}}, \quad (6)$$

$$P_{n1} = A_{\max} n t_1. \quad (7)$$

式中: P_1 为加速阶段总脉冲; $V_{\max}$ 为需要追赶的最大运行速度; V_0 为初始速度; P_{n1} 为每个延时阶段的

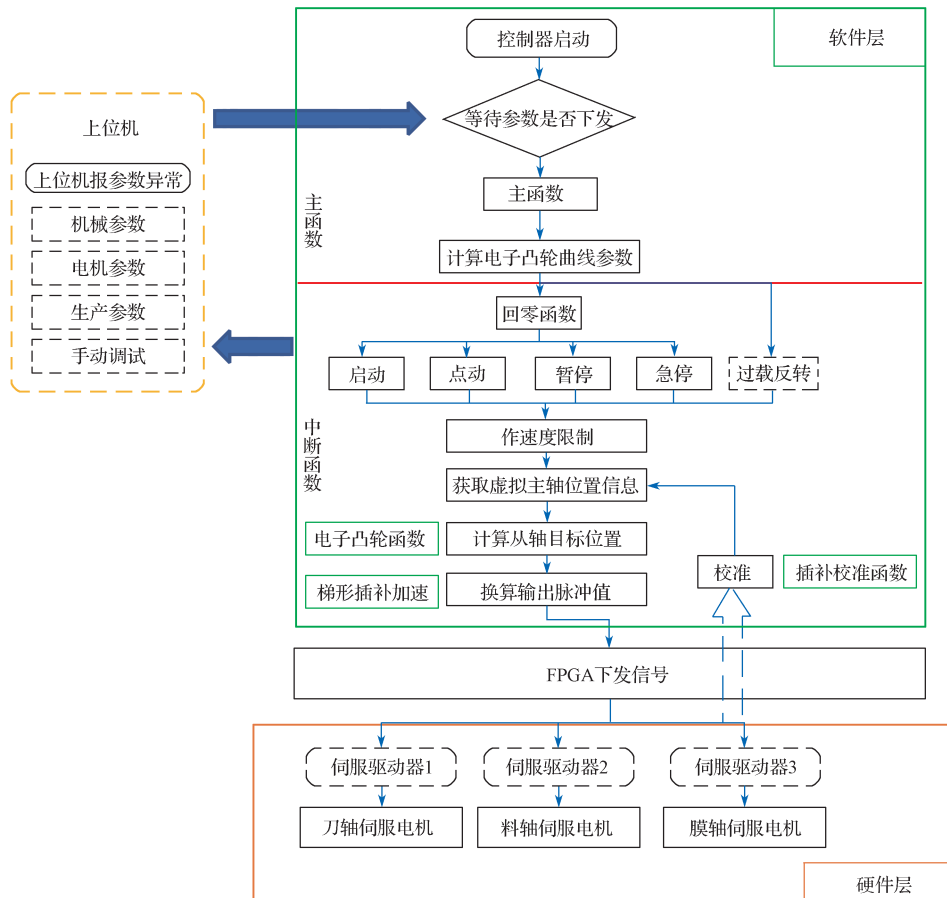


图 10 运动控制系统的程序运行流程图

Fig. 10 Operation flowchart of motion control system

脉冲数; $A_{\max}$ 为匀加速和匀减速阶段加速度; n 为周期数; t_1 为加速阶段的周期时间。

减速阶段:

$$P_3 = \frac{V_{\max}^2 - V_t^2}{2A_{\max}}, \quad (8)$$

$$P_{n3} = (V_{\max} - A_{\max}n)t_3. \quad (9)$$

式中: P_3 为减速阶段总脉冲; V_t 为末速度; P_{n3} 为每个延时阶段的脉冲数; t_3 为减速阶段的周期时间。

计算需要追赶的加速-减速阶段之后, 剩下的为匀速阶段:

$$P_2 = P - P_1 - P_3, \quad (10)$$

$$P_{n2} = V_{\max}t_2. \quad (11)$$

式中: P 为校准的总脉冲数; P_2 为匀速阶段总脉冲; P_{n2} 为每个延时阶段的脉冲数; t_2 为匀速阶段的周期时间。

补偿距离短时, 无匀速阶段即 $P_2=0$, 采用加速-减速形式。

加速阶段:

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{2A_{\max}P + V_0^2 + V_t^2}{2}}, \quad (12)$$

$$P_1 = \frac{2A_{\max}P + V_t^2 - V_0^2}{4A_{\max}}. \quad (13)$$

减速阶段:

$$P_3 = P - P_1. \quad (14)$$

同理, 在实际测量位置超过理论位置时, 为了确保伺服驱动器从一个速度平稳过渡到另一个速度, 避免对机械传动机构造成过大的冲击力, 通常会采用本文上述阶段类似的速度控制策略: 一般用减速-匀速-加速3阶段; 在所需补偿距离较短时, 用减速-加速形式。

4 实验测试

4.1 平台搭建

为了验证基于双电子凸轮算法控制系统的可行性和有效性, 搭建如图 11 所示实验平台。图中, 控制核心为采用 ARM+FPGA 架构的自研运动控制器 Motion-Control-V-3.3, 1 为 HMI 工控屏幕, 2 为数字量输入单元, 5 为模拟量输入, 3 为刀膜料 3 轴的伺服系统, 4 为实现轴位置反馈的 3 轴零位传感器, 6 为数字输出单元。通过 HMI 屏幕下发参数, 以及输

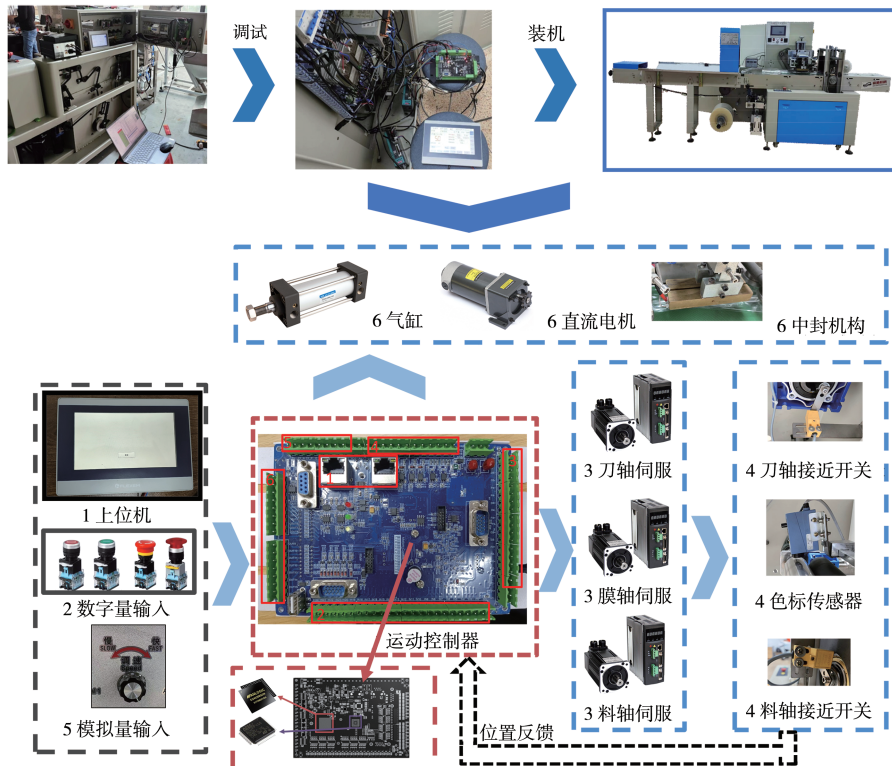


图 11 实验平台

Fig. 11 Experimental platform

入数字量 / 模拟量启停、点动、急停、旋钮调速等，实现自研运动控制器 Motion-Control-V-3.3 对伺服驱动器的控制。实验主要检测料膜和刀膜变化是否满足协同需求，以及通过零位传感器能否实现料膜和刀膜的校准需求。

4.2 精度和稳定性实验

刀膜和料膜的协同精度测试实验如图 12 所示。实验结果显示，料轴曲柄推料至薄膜位置固定，刀轴与膜轴同步动作一致，切割完成后包装袋切口平整，包装材料上图案和文字准确有序。可见，本系统能满足工艺需求。

同时，在双凸轮枕式包装机平台上，对 80, 150, 320 mm 袋长下，包装速度分别在 50, 80, 120 包/min 下进行多组实验。包装机精度通过两个误差得到，即在料膜测量的物料和薄膜色标距离与其理论值的偏差，在刀膜测量的切口与薄膜色标的偏差。料膜和刀膜的误差值分别如图 13~14 所示。测试结果显示，料膜处物料与色标距离的偏差、刀膜处切口与色标的偏差值均分布在 ± 0.5 mm 之间。由此可见，在高算力的控制器上采用上述算法设计的双电子凸轮控制系统可以显著提高推送和切割精度，且设备运行平稳。

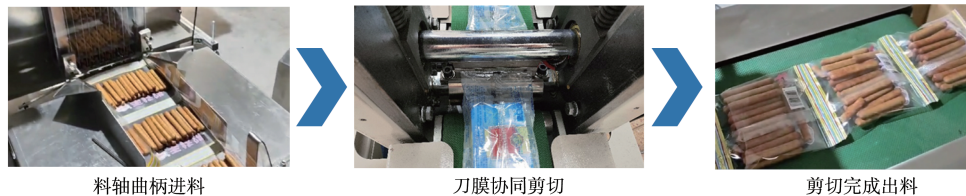


图 12 系统测试流程图

Fig. 12 System testing flowchart

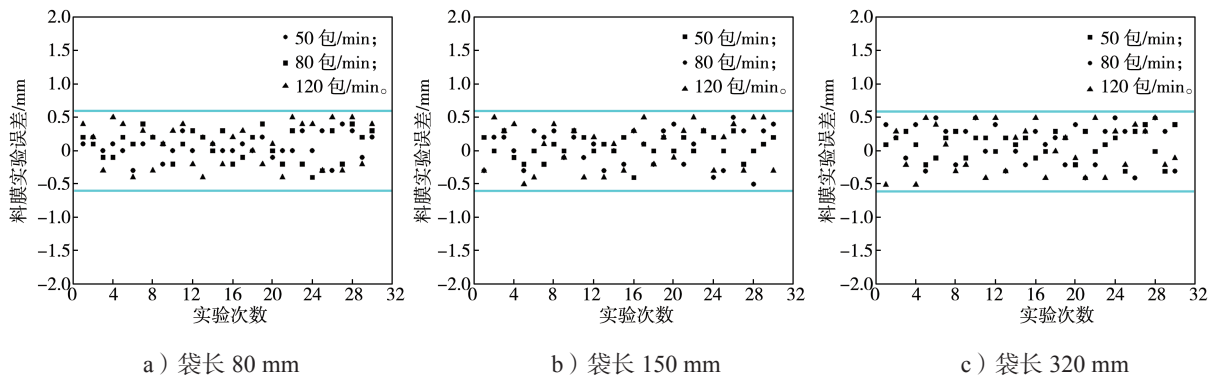


图 13 不同速度、袋长下料膜误差

Fig. 13 Film error for different speeds and bag lengths of discharge

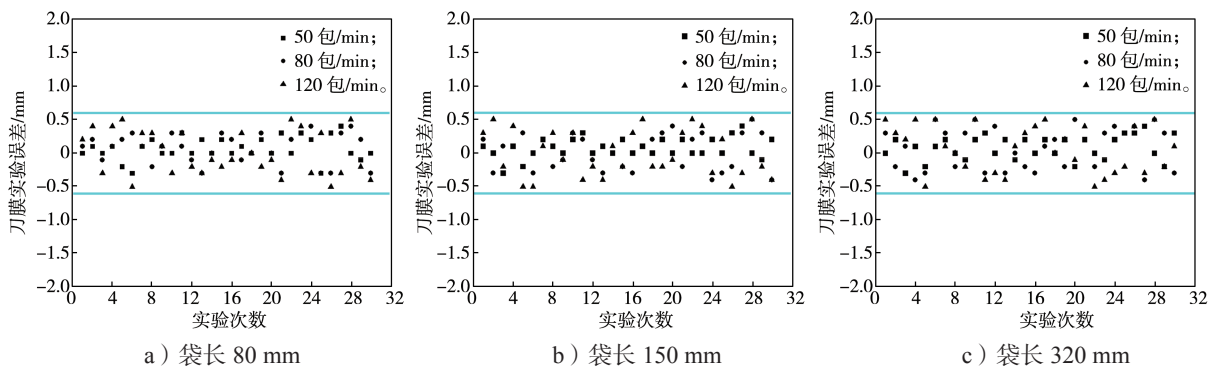


图 14 不同速度、袋长下刀膜误差

Fig. 14 Film cutter error at different speeds and bag lengths

5 结论

本研究针对枕式包装机在料轴送料和刀轴追剪过程中料轴和膜轴、膜轴和刀轴的协同性问题, 提出了一种协同控制策略。该策略采用虚拟主轴控制方法。此外, 在硬件层添加传感器作零位点, 在软件层设计插补校准函数, 对误差即测量值和理论值差值进行插补校准。最后, 通过搭建实验平台, 上机实验分析, 验证本系统的有效性和可靠性。

主要结论如下:

1) 枕式包装机主要包括: 送料机构、送膜机构、端封机构。基于双电子凸轮算法的控制系统实现了料膜及刀膜的同步区和非同步区的协同。

2) 通过添加零位补偿功能有效校正了机械误差, 误差在 ± 0.5 mm 内。

本控制系统展现出高精度、高柔性和高稳定性的显著优势, 能满足多变产品包装需求。系统的可扩展性也为未来工艺要求的变更和新技术的集成提供了可能。

参考文献:

- [1] 张勇, 曾广胜, 陈一, 等. 食品智能包装机械标准化体系框架研究[J]. 包装学报, 2023, 15(1): 81-85.
- [2] 康瑞芳, 刘鑫. 基于DSP全自动食品包装机控制系统设计[J]. 控制工程, 2017, 24(2): 336-340.
- [3] 姜宇翔. 基于PLC与伺服系统控制的电子凸轮应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [4] 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.
- [5] 刘英会, 张宗彩. 基于双传感器的枕式包装机速度自动调节系统[J]. 传感技术学报, 2024, 37(1): 177-182.
- [6] 姜自燃, 徐世许, 张浩琳. 基于电子凸轮飞剪的枕式包装机控制系统设计[J]. 包装工程, 2023, 44(13): 197-207.
- [7] 邱巧迪, 徐世许, 王伟. 基于电子凸轮追剪的排序机控制系统设计[J]. 控制工程, 2022, 29(11): 2138-2144.
- [8] 杜瑞涛, 冯振华. 枕式包装机变频调速控制系统设计[J]. 包装工程, 2022, 43(21): 260-265.
- [9] 肖述文. 基于EtherCAT的多轴机器人3D打印控制协同性研究与系统实现[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
- [10] 张帆, 肖述文, 涂一文, 等. 多轴机械臂3D打印的运动-挤料协同控制方法[J]. 机械设计与研究, 2021, 37(6): 141-147, 154.
- [11] 沈孟锋, 羊荣金, 陈敏捷, 等. 基于FPGA的数控系统圆弧插补控制模块化设计[J]. 机床与液压, 2021, 49(8): 88-92.
- [12] 陆奇业. 基于EtherCAT的四边封包装机控制系统设计[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2023.
- [13] 黄迪, 黄云鹰, 王宇翔. 电子凸轮曲线生成及使用方法研究[J]. 制造技术与机床, 2021(3): 154-157.
- [14] MASATO O, ATSUSHI S, NAOKI Y, et al. An Experiment Demonstrating the Capability of a Symmetrical Layout Type Double Crystal Monochromator Controlled Using Electronic Cam Technology[C]//14th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation(SRI 2021). [S. l.]: Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2380: 012054.
- [15] CUI J J, ZHANG Y H, LEI Z, et al. Research on the Linkage of Dual Servo Motors Based on Electronic Cam Curves[C]//3rd International Conference on Mechatronics Technology and Intelligent Manufacturing(ICMTIM 2022). Hangzhou: Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2296: 012025.
- [16] XU J T, GUO T J. Application and Research on Digital Twin in Electronic Cam Servo Motion Control System[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(3): 1145-1158.
- [17] BI J X, FAN W Z, HUANG H Z, et al. Reliability Design of an Electronic Cam Curve for Flying Shear Machine in Short Materials Cutting[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2020, 25(2): 246-252.
- [18] ANDERT J, SOHN C, KLEIN S, et al. Influence of Sensor and Communication Setup on Electric Cam Phaser Control Quality[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2019, 233(3): 687-696.
- [19] LI H, WU X. Motion Control of the Pressing Rollers in the Paper Tape Crimping Machine Based on Servo Control[C]//3rd Annual International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI2018). Suzhou: Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1069: 012109.
- [20] QI S Q, MA G S, MA L J. The Design of Pipe

Dynamic Chase Cut Control System[J]. Key Engineering
Materials, 2016, 693: 1632-1637.

科技大学, 2012.

[21] 李俊美. 轮切电子凸轮的研究与开发 [D]. 武汉: 华中

(责任编辑: 邓 彬)

Design of Pillow Packaging Machine Control System Based on Dual Electronic Cam Algorithm

CHEN Kunlong¹, PENG Laihu^{1,2}, CHEN Weijie¹, YANG Pingchuang²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. Research Institute of Zhejiang Sci-Tech University in Longgang, Wenzhou Zhejiang 325802, China)

Abstract: Aiming at the problem that the movement of the knife axis and the film axis, the material axis and the film axis appear to be out of synchronisation which affects the quality of packaging when the three axes of pillow packaging machine are controlled in coordination, the pillow packaging machine control system based on the double electronic cam algorithm is designed with the self-developed motion controller (Motion-Control-V-3.3) as the control core. According to the cam movement law, the mathematical model is established and the 5th polynomial electronic cam curve is optimised to solve the problem of coordinated synchronization of three axes, namely the film axis, material axis and knife axis. At the same time, the three-axis zero position is periodically compensated to make up for the influence of mechanical error. The experimental results show that the system error is between ± 0.5 mm and there is no breakage of packaged products when processing films with a film length of 80~320 mm and a working speed of less than 120 packages/min (line speed of about 9600 mm/min). This double cam control system is effective and feasible.

Keywords: double cam; electronic cam; pillow packaging machine; multi-axis cooperative control; calibration function