

包装机械多轴相邻交叉耦合同步控制

田素娟¹, 肖俊生²

(1.包头职业技术学院, 包头 014030; 2.内蒙古科技大学, 包头 014010)

摘要: 目的 为提高包装机械的同步控制性能, 以实现高速、高精度的包装过程。**方法** 以三伺服全自动枕式包装机械的速度同步控制为研究对象, 分析了三伺服枕式包装机的工作过程。针对主从同步控制的精度不高等问题, 提出一种基于相邻交叉耦合控制算法的包装机械三轴同步控制方法。详细论述三轴同步控制的基本原理, 并给出具体的控制模型。**结果** 该控制方法不仅考虑各轴自身的跟踪误差, 而且还包括与相邻两轴之间的同步误差, 可以弥补主从控制方式的不足。**结论** 仿真和实验结果表明该控制策略不仅同步性高、稳定性好, 而且收敛速度较快。

关键词: 多轴同步控制; 相邻交叉耦合; 跟踪误差; 同步误差

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2016)13-0140-07

Multi-axis Synchronous Control for Packaging Machinery Based on Adjacent Cross-coupling

TIAN Su-juan¹, XIAO Jun-sheng²

(1.Baotou Vocational & Technical College, Baotou 014035, China;

2.Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

ABSTRACT: In order to promote the speed and precision of packaging process, the synchronous control performance of packaging machinery should be improved firstly. In this paper, the speed synchronization control of three-servo automatic pillow packing machine was considered as the research object and its working process was analyzed. Considering the imprecision of master-slave synchronization control method, a three-axis synchronous control method for packaging machinery was put forward based on adjacent cross coupling control algorithm. The basic principle of three-axis synchronous control was discussed in detail. Meanwhile, the specific control model was also given. The control method did not only consider the tracking error of each axis itself, but also considered the synchronization error between the two adjacent axes. It could make up the deficiency of the master-slave control mode. Simulation and experimental results showed that the proposed control strategy had high synchronicity, good stability and fast convergence speed.

KEY WORDS: multi-axis synchronous control; adjacent cross-coupling; tracking error; synchronization error

在现代工业中, 包装机械的应用十分广泛, 如食品、制药、化工、电子等行业。某种意义上, 包装机械对许多行业的发展起着至关重要的作用, 因此近些年来全自动包装机械的研发、使用和推广备受关注, 许多高新技术和智能控制算法在包装机械中得以应用, 包装机械的智能化、自动化、多功能

化水平也得到不断提高^[1-3]。另外, 为适应行业发展的需求, 当前我国普遍使用的包装机械在可靠性、稳定性、生产效率等方面都需要提高^[4-6]。

作为一个复杂的多轴协调工作系统, 影响包装机械精度、效率、包装质量的关键因素在于多轴的同步控制^[7-8]。以三伺服枕式包装机为例, 其包装

收稿日期: 2016-03-23

基金项目: 内蒙古教育厅自然科学一般项目 (NJZC18686)

作者简介: 田素娟 (1982—), 女, 山东成武人, 硕士, 包头职业技术学院讲师, 主要研究方向为控制理论与控制工程。

过程需满足“2个匹配”,即时间匹配,送膜轴完成单位包装长度的时间、送料轴完成单个送料的时间、横封轴旋转一周的时间相等;速度匹配,在切点处,横封轴的封切速度与包装膜的进给速度相等。多轴同步控制作为一个广泛的问题,不仅存在于包装机械中,而且涉及到工业控制中的方方面面,如加工中心、机器人等^[9],因此,多轴同步控制受到国内外众多学者的普遍关注。

目前,比较常用的多轴同步控制技术包括主/从控制、“虚拟总轴”控制、交叉耦合控制、相邻交叉耦合控制、偏差耦合控制等^[10~13]。概括地讲,多轴同步控制方法可分为:主从式同步控制,主要包括“虚拟主轴”控制、主/从控制等,即选定“任意轴”或“虚拟轴”作为主轴,剩余轴作为从动轴,每个控制周期所有从动轴根据主动轴的位置信号调整自身位置偏差,各从动轴之间互不影响,而且主动轴不受从动轴影响;平衡式同步控制,主要包括偏差耦合、交叉耦合等,系统中每根轴既是主动轴又是从动轴,即无固定主动轴,各轴之间相互同步^[14~15]。

二者相比,主从同步控制结构简单,比较容易实现,但是控制精度不高;平衡式同步控制则具有相对较高的控制精度,但算法比较复杂。相邻交叉耦合控制是基于最小相关轴数目的控制思想,每一轴的控制仅仅考虑相邻两轴的状态,因此控制结构简单,且具有较好的同步性能^[16]。

鉴于同步控制在包装机械中的应用相对较小,文中基于相邻交叉耦合控制提出一种三伺服枕式包装机械的三轴速度同步控制方法,并进行仿真实验验证。

1 包装过程分析

以三伺服枕式包装机为例进行分析,其系统结构见图1。包装工艺流程可简要描述为:包装薄膜经主动辊、压紧辊和导向辊,由制袋成型器卷成筒状,送料机构的拨叉将被包装物推入已成型的筒状包装膜内,同时纵封机构对纵缝进行封合,经抚平装置整理后,由横封机构完成横封与切断工序,实现块状物料的枕型袋包装,最后由成品输出装置输出成品。

由包装工艺流程可知,三伺服枕式包装机械主要包括3个工作轴,各轴由伺服电机直接驱动,分别定义为轴1(送膜轴)、轴2(送料轴)、轴3(横封横切轴)。轴1主要负责包装材料的整理和供给,轴2主要负责被包装物品的计量与供给,轴3主要负责封合与切断。要实现高速、高精度的包装过程,保证包装产品的质量,必须对三轴进行同步控制。目前,三伺服枕式包装机械的同步控制多采用主从式结构,以其中的一个轴或“虚拟轴”作为主轴,其它轴跟随主轴运转。当主轴存在扰动,导致其电机速度变化时,其余从动轴电机会发生速度跟随,在一定程度上提高了系统的同步性。由于无论从动轴存在多大的扰动,都无法将反馈信号传递给主轴电机,因此导致主轴电机与从动轴电机之间产生同步误差,而且采用主从式控制结构无法消除各从动轴之间的同步误差。文中所采用的相邻交叉耦合控制不仅考虑了各轴自身的跟踪误差,而且还包括与相邻两轴之间的同步误差,弥补了主从同步控制方式的不足,有效地提高了各轴电机之间的同步性和稳定性。

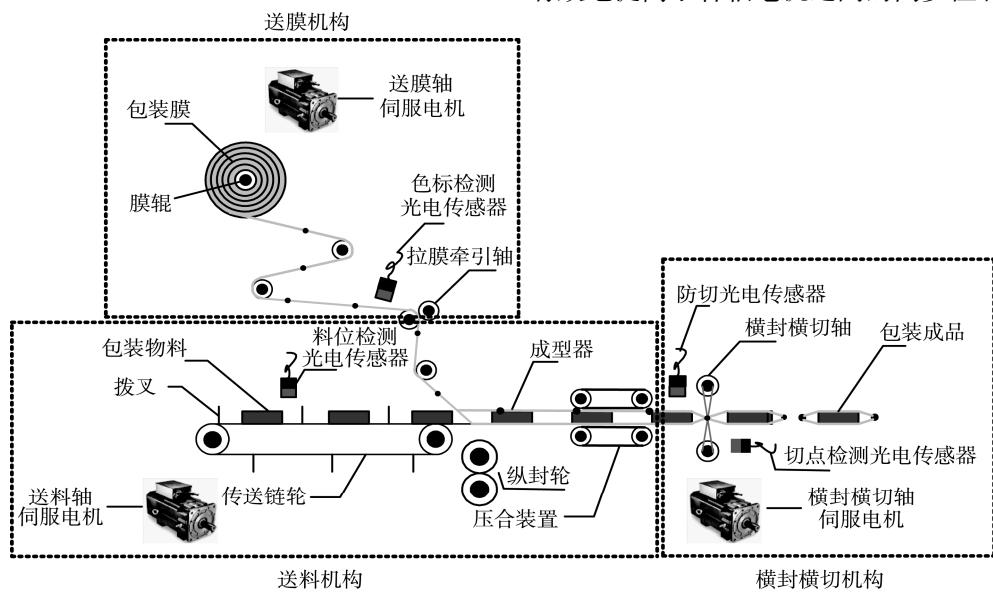


图1 三伺服枕式包装机系统结构

Fig.1 The system structure of the three-servo pillow packaging machine

2 包装机械三轴同步控制

2.1 三轴同步控制基本原理

永磁同步电机运动方程可表示为:

$$\begin{aligned} M_i &= J_i(\omega_i)\dot{\omega}_i(t) + C_i(\omega_i, \dot{\omega}_i)\omega_i(t) + \\ F_i(\omega_i, \dot{\omega}_i), \quad i &= 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $\omega_i(t)$ 为第 i 轴角速度; $J_i \omega_i$ 为第 i 轴转动惯量, $C_i(\omega_i, \dot{\omega}_i)$ 为第 i 轴非线性特性, 二者之间满足 $\frac{1}{2}J_i(\omega_i) = C_i(\omega_i, \dot{\omega}_i)$; $F(\omega_i, \dot{\omega}_i)$ 为外部干扰; M_i 为输入转矩。

定义同步函数为:

$$\begin{aligned} f(\omega_1, \omega_2, \omega_3): \\ r_1(t)\omega_1(t) = r_2(t)\omega_2(t) = r_3(t)\omega_3(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $r_1(t), r_2(t), r_3(t)$ 分别为送膜轴、送料轴、横封横切轴的轮径; $\omega_1(t), \omega_2(t), \omega_3(t)$ 分别为送膜轴、送料轴、横封横切轴的电机角速度。

对于期望角速度 $\omega^d_i(t)$, 可定义其对应的同步函数为:

$$\begin{aligned} f(\omega_1^d, \omega_2^d, \omega_3^d): \\ r_1(t)\omega_1^d(t) = r_2(t)\omega_2^d(t) = r_3(t)\omega_3^d(t) \end{aligned} \quad (3)$$

定义第 i 轴角速度跟踪误差为:

$$\Delta\omega_i(t) = \omega_i^d(t) - \omega_i(t) \quad (4)$$

根据式(2)–(4)可得同步目标为:

$$r_1(t)\Delta\omega_1(t) = r_2(t)\Delta\omega_2(t) = r_3(t)\Delta\omega_3(t) \quad (5)$$

定义第 i 轴线速度跟踪误差为:

$$e_i(t) = r_i(t)\Delta\omega_i(t), \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

为实现包装机械的三轴同步控制, 对应电机的运动关系应满足当 $e_i(t) \rightarrow 0$ 时, 存在:

$$e_1(t) = e_2(t) = e_3(t) \quad (7)$$

为实现相邻交叉耦合控制, 可定义相邻两轴之间的线速度同步误差为:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = e_1(t) - e_2(t) \\ \varepsilon_2(t) = e_2(t) - e_3(t) \\ \varepsilon_3(t) = e_3(t) - e_1(t) \end{cases} \quad (8)$$

很明显, 对包装机械来说, 当 $\varepsilon_i(t) = 0$ 时, 即可满足式(7), 实现三轴同步控制。综上所述, 三轴同步控制问题可描述为: 设计控制器以控制转矩, 使跟踪误差 $e_i(t)$ 和同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 均收敛于 0。

2.2 相邻交叉耦合同步控制算法设计

通过上述分析, 结合相邻交叉耦合控制算法可知: 对第 i 轴的控制, 不仅要考虑该轴自身的跟踪误差, 而且还要考虑其与第 $i-1$ 轴和第 $i+1$ 轴的同步误差, 所以需要定义一个同时包含跟踪误差 $e_i(t)$ 、同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 等信息量的相邻交叉耦合同步误差 $e_i^*(t)$:

$$\begin{cases} e_1^*(t) = e_1(t) + \alpha \int_0^t (\varepsilon_1(\tau) - \varepsilon_3(\tau)) d\tau \\ e_2^*(t) = e_2(t) + \alpha \int_0^t (\varepsilon_2(\tau) - \varepsilon_1(\tau)) d\tau \\ e_3^*(t) = e_3(t) + \alpha \int_0^t (\varepsilon_3(\tau) - \varepsilon_2(\tau)) d\tau \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 α 为耦合系数且大于 0。对时间求导可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1^*(t) = \dot{r}_1(t)\Delta\omega_1(t) + r_1(t)\Delta\dot{\omega}_1(t) \\ \quad + \alpha(\varepsilon_1(t) - \varepsilon_3(t)) \\ \dot{e}_2^*(t) = \dot{r}_2(t)\Delta\omega_2(t) + r_2(t)\Delta\dot{\omega}_2(t) \\ \quad + \alpha(\varepsilon_2(t) - \varepsilon_1(t)) \\ \dot{e}_3^*(t) = \dot{r}_3(t)\Delta\omega_3(t) + r_3(t)\Delta\dot{\omega}_3(t) \\ \quad + \alpha(\varepsilon_3(t) - \varepsilon_2(t)) \end{cases} \quad (10)$$

另外, 控制量 $u_i(t)$ 可表示为:

$$\begin{cases} u_1(t) = r_1(t)\omega_1^d(t) + \dot{e}_1^*(t) \\ \quad + \alpha \int_0^t (\varepsilon_1(\tau) - \varepsilon_3(\tau)) d\tau \\ u_2(t) = r_2(t)\omega_2^d(t) + \dot{e}_2^*(t) \\ \quad + \alpha \int_0^t (\varepsilon_2(\tau) - \varepsilon_1(\tau)) d\tau \\ u_3(t) = r_3(t)\omega_3^d(t) + \dot{e}_3^*(t) \\ \quad + \alpha \int_0^t (\varepsilon_3(\tau) - \varepsilon_2(\tau)) d\tau \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)可以看出: 变量 $h_i(t)$ 的具体表达式为:

$$\begin{aligned} h_i(t) &= u_i(t) - r_i(t)\omega_i(t) \\ &= e_i^*(t) + \dot{e}_i^*(t), \quad i = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (12)$$

如上所述, 通过设计控制转矩 M_i 可使变量 $h_i(t)$ 中的 $e_i^*(t)$ 、 $\dot{e}_i^*(t)$ 收敛于 0, 可以消除各轴的跟踪误差 $e_i(t)$ 以及各轴之间的同步误差 $\varepsilon_i(t)$, 进而实现三伺服枕式包装机械的同步控制。

在枕式包装机械的伺服系统中, 各电机的控制转矩 M_i 可设计为:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_1 = J_1(\omega_1)(\dot{u}_1(t) - \dot{r}_1(t)\omega_1(t))\frac{1}{r_1(t)} \\ \quad + \frac{C_1(\omega_1, \dot{\omega}_1)u_1(t)}{r_1(t)} + F_1(\omega_1, \dot{\omega}_1) \\ \quad + k_r \frac{h_1(t)}{r_1(t)} + k_s r_1^T(t)(\varepsilon_1(t) - \varepsilon_3(t)) \\ M_2 = J_2(\omega_2)(\dot{u}_2(t) - \dot{r}_2(t)\omega_2(t))\frac{1}{r_2(t)} \\ \quad + \frac{C_2(\omega_2, \dot{\omega}_2)u_2(t)}{r_2(t)} + F_2(\omega_2, \dot{\omega}_2) \\ \quad + k_r \frac{h_2(t)}{r_2(t)} + k_s r_2^T(t)(\varepsilon_2(t) - \varepsilon_1(t)) \\ M_3 = J_3(\omega_3)(\dot{u}_3(t) - \dot{r}_3(t)\omega_3(t))\frac{1}{r_3(t)} \\ \quad + \frac{C_3(\omega_3, \dot{\omega}_3)u_3(t)}{r_3(t)} + F_3(\omega_3, \dot{\omega}_3) \\ \quad + k_r \frac{h_3(t)}{r_3(t)} + k_s r_3^T(t)(\varepsilon_3(t) - \varepsilon_1(t)) \end{array} \right. \quad (13)$$

式中: k_r , k_s 为正系数。由式(11)和式(13), 伺服系统转矩闭环动态模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_1 \dot{h}_1(t) + C_1 h_1(t) + k_r h_1(t))\frac{1}{r_1(t)} + \\ k_s r_1^T(t)(\varepsilon_1(t) - \varepsilon_3(t)) = 0 \\ (J_2 \dot{h}_2(t) + C_2 h_2(t) + k_r h_2(t))\frac{1}{r_2(t)} + \\ k_s r_2^T(t)(\varepsilon_2(t) - \varepsilon_1(t)) = 0 \\ (J_3 \dot{h}_3(t) + C_3 h_3(t) + k_r h_3(t))\frac{1}{r_3(t)} + \\ k_s r_3^T(t)(\varepsilon_3(t) - \varepsilon_1(t)) = 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

综上所述, 包装机械第 i 轴控制框图见图 2。控制器的设计步骤可大体描述如下。

- 1) 建立永磁同步电机的运动方程。
- 2) 求解相邻交叉耦合误差 $e^*(t)$, 其同时包含跟踪误差 $e_i(t)$ 、同步误差 $\varepsilon_i(t)$ 等信息量。
- 3) 求解控制量 $u_i(t)$, 其同时包含第 i 轴的跟踪误差, 第 i 轴与第 $i-1$ 轴、第 $i+1$ 轴之间的同步误差, 以及相关的积分量等。
- 4) 设计电机控制转矩 M_i 。
- 5) 设计控制系统的闭环动态模型。

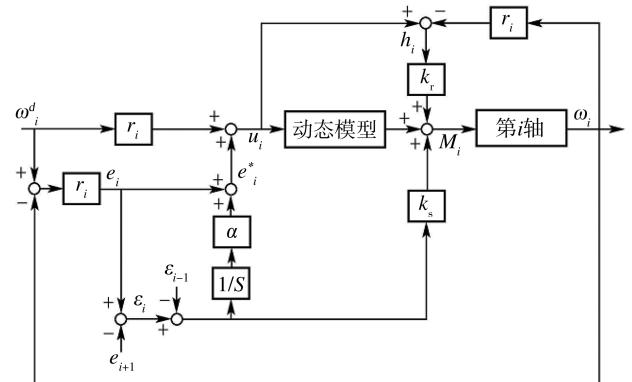


图 2 第 i 轴控制框图
Fig.2 The control block diagram of i -th axis

3 控制系统设计

针对三伺服枕式包装机的多轴同步控制, 文中基于 ARM 微控制器设计了其控制系统, 具体结构见图 3。

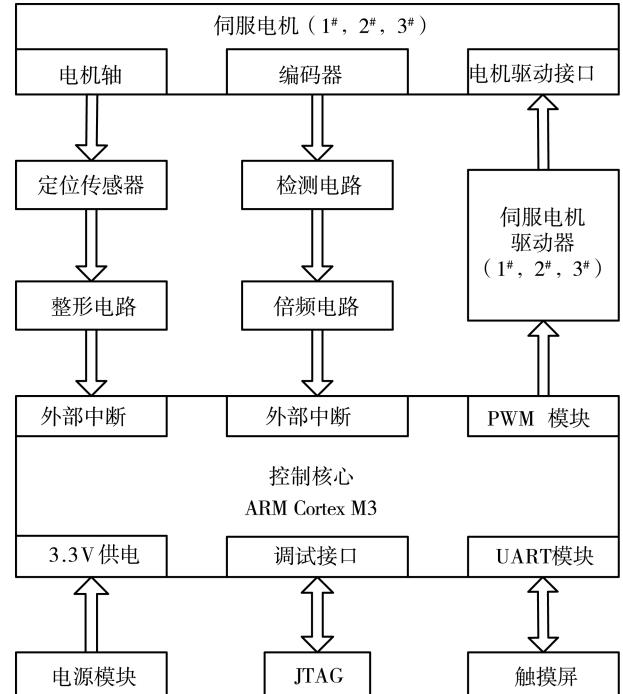


图 3 控制系统结构
Fig.3 Structure diagram of the control system

由图 3 可知, 控制系统由主控制器、伺服驱动器、伺服电机、触摸屏、外围电路组成。其中主控制器选用 ARM 微控制器 LPC1752, 其具有较高的运算能力和中断响应能力。另外, 该控制器内部资源比较丰富, 例如: 电机控制 PWM 模块、正交编码器接口、UART 模块以及中断接口等。

电机控制 PWM 模块(MCPWM)非常适合伺服

电机的控制。该模块具有3个通道，可同时控制3台电机。另外通用PWM也可用于电机的控制，因此LPC1752具有较丰富的脉宽调制接口。该控制系统采用MCPWM功能，伺服电机工作在位置模式下，脉冲信号的输入采用集电极开路的方式。

编码器的5V差分信号经由AM26LS32和SN74LVC4245组成的电路处理后，转换成3.3V的单端信号，输入到外部中断口，可用于检测电机编码器信号。定位传感器信号经高速光耦处理后，同样输入到外部中断口，可以实现包装机械三轴位置的确定。

基于Modbus协议，通过UART串口，可实现LPC1752与触摸屏的通信，用于控制指令输入和实时监测；通过JTAG接口可实现系统的在线调试。

控制器获取设定参数后，首先规划各轴轨迹并离散化处理得到关键点处的位置、速度指令；然后，将位置或速度指令发送给伺服驱动器，控制电机按设定轨迹运转；同时，编码器或传感器将实时反馈电机的实际位置、速度等信息；控制器通过比较设定值和实际值，基于文中所述算法实现各轴的同步控制。

4 仿真和实验

4.1 仿真

在三伺服枕式包装机中，伺服电机速度控制系统的数学模型可以等效为一阶惯性环节，仿真过程中送膜轴、送料轴、横封横切轴电机的数学模型可分别定义为：

$$P_1(s) = \frac{1.4}{0.06s + 1}$$

$$P_2(s) = \frac{1}{0.08s + 1}$$

$$P_3(s) = \frac{1.2}{0.04s + 1}$$

如上所述系统输入量为转矩 M_i ，输出量为角速度 $\omega_i(t)$ 。结合文中所述三轴相邻交叉耦合控制算法，建立包装机械三轴同步控制模型，进而验证三轴同步控制算法在包装机械中应用的可行性和有效性，相关参数如下：轴1，转动惯量 J_1 为 $0.0429 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，非线性特性 C_1 为 $0.7143 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ；轴2，转动惯量 J_2 为 $0.08 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，非线性特性 C_2 为 $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ；轴3，转动惯量 J_3 为 $0.0333 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，非线性特性

C_3 为 $0.8333 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ；耦合系数 α 为 90；正系数 k_r 和 k_s 分别为 1.2 和 1.1。

通常情况下，枕式包装机三轴的运动形式如下：送膜轴和送料轴作匀速圆周运动，而横封横切轴则作凸轮运动。在实际控制过程中，各轴位置是由脉冲数目决定的，各轴速度则由脉冲频率决定。由上述同步控制算法可知，跟踪误差、同步误差与各轴运动形式无关，因此实际控制效果基本不会受到各轴运动形式的影响。基于此前提，为便于分析，仿真过程中设定参考速度为 750 m/min ，并假设三轴的运动形式相同。阶跃响应下，系统仿真结果见图4。由仿真结果可知，电机的响应速度较快；大约在 0.7 s 左右，三轴同步控制系统的跟踪误差会收敛于 0；大约在 0.9 s 左右时，三轴同步控制系统的同步误差收敛于 0。另外，系统最大同步误差为 5 m/min ，同步控制精度相对较高。仿真结果表明，文中所述三轴同步控制算法可以较好地实现包装机械的速度同步控制。

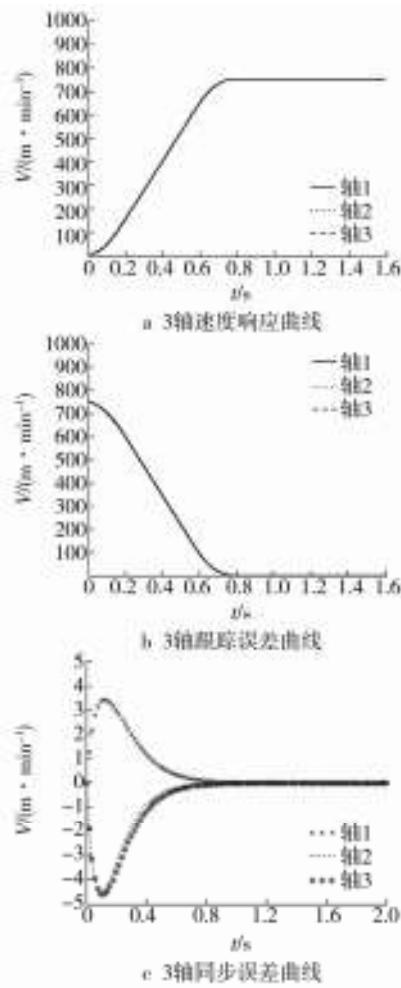


图4 仿真结果
Fig.4 Simulation results

4.2 实验

为进一步验证上述多轴同步控制算法的有效性, 文中进行了具体实验。采用台达伺服系统测试包装机械三轴速度的同步控制效果, 设定运动形式: 最大参考速度为 1000 r/min 的往复运动。由实验结果(见图 5)可知, 稳定运行过程中, 三轴同步误差非常小, 可以忽略不计; 在加速和减速阶段, 三轴同步误差相对较明显, 不过最大同步误差依旧比较小, 大约为 10 r/min。实验结果表明, 多轴速度同步性能较好, 能够满足包装机械三轴同步控制的要求。

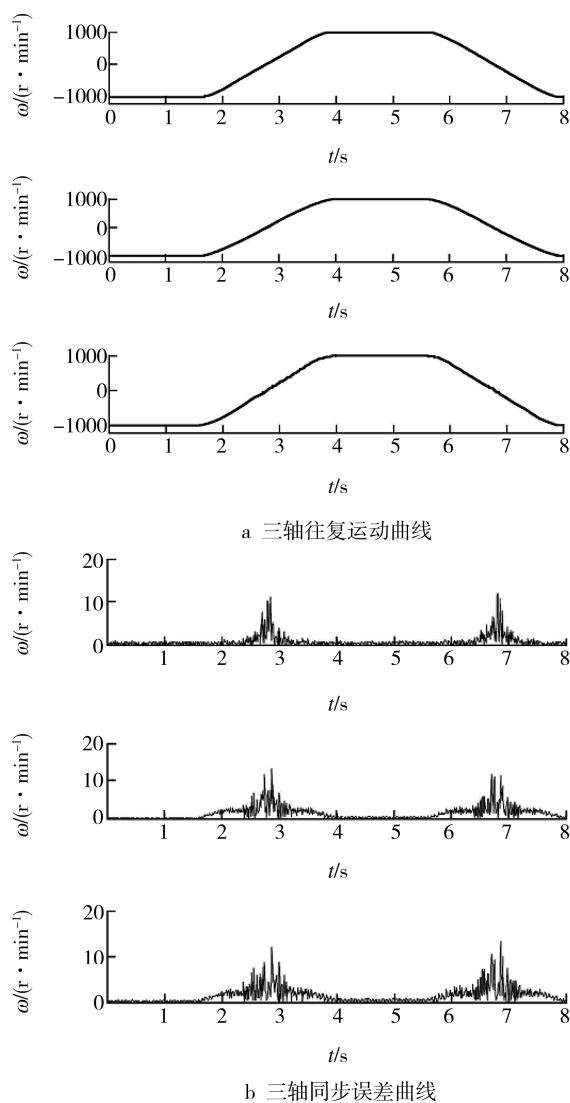


图 5 实验结果

Fig.5 Test results

综上所述, 通过仿真和实验验证了文中所述基于相邻交叉耦合的多轴同步控制算法的可行性和有效性, 电机响应速度较快, 跟踪误差和同步误差

均较小, 可以满足包装工艺的要求。

5 结语

以三伺服全自动枕式包装机械为例, 详细分析了包装机械的速度同步控制问题, 主要在以下几个方面展开了工作。

1) 分析了枕式包装机的工作过程, 阐述了速度同步控制的必要性, 以及“主从”同步控制的不足。

2) 基于相邻交叉耦合控制, 提出了一种三轴同步控制方法, 论述了同步控制的基本原理并提出了相关控制模型。

3) 为验证文中所述多轴同步控制方法的有效性, 进行了仿真和实验研究。结果表明: 基于相邻交叉耦合的多轴同步控制算法具有可行性和有效性, 电机响应速度较快, 跟踪误差和同步误差均较小, 可以满足包装工艺的要求。

参考文献:

- [1] 刘祎, 李虹, 李瑞琴, 等. 现代包装机械设计质量综合评价体系研究[J]. 包装工程, 2015, 36(21):75—78.
LIU Yi, LI Hong, LI Rui-qin, et al. Comprehensive Evaluation System for the Design Quality of Modern Packaging Machinery[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(21):75—78.
- [2] 杨祖彬, 曾莉红. 基于食品安全的我国食品包装机械技术发展路径探讨[J]. 包装工程, 2011, 32(13):117—121.
YANG Zhu-bin, ZENG Li-hong. Discussion on Technical Development Path of China's Food Packaging Machine Based on Food Safety[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(13):117—121.
- [3] 罗少锋, 刘振华, 闫济军, 等. 对军用包装机械建设发展的思考[J]. 包装工程, 2015, 36(7):149—153.
LUO Shao-feng, LIU Zhen-hua, YAN Ji-jun, et al. Consideration on Construction and Development of Military Packaging Machinery[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(7):149—153.
- [4] 杜巧连, 陈旭辉, 舒柏和. 自动化包装机械控制系统的设计方法研究[J]. 机械管理开发, 2015(6):27—32.
DU Qiao-lian, CHEN Xu-hui, SHU Bai-he. Study on the Design Method of Packaging Machinery Automation Control System[J]. Mechanical Management and Development, 2015(6):27—32.
- [5] 唐宗美, 杨光友, 马志艳, 等. 包装设备控制系统综述[J]. 包装工程, 2013, 34(5):107—110.
TANG Zong-mei, YANG Guang-you, MA Zhi-yan, et al. Summarization of Packaging Equipment Control

- System[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(5):107—110.
- [6] 戴宏民, 戴佩燕, 周均. 世界包装机械的发展趋势及中国包装机械的发展对策[J]. *包装学报*, 2012, 4(2): 46—51.
DAI Hong-min, DAI Pei-yan, ZHOU Jun. Trend of Word Packaging Machinery Development and the Countermeasure of China Packaging Machinery Development[J]. *Packaging Journal*, 2012, 4(2):46—51.
- [7] 韩占华, 郭飞. 自动化在包装机械中的应用和展望[J]. *包装与食品机械*, 2011, 29(3):49—52.
GUO Zhan-hua, GUO Fei. Application and Prospects of the Automation in the Packaging Machinery[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2011, 29(3):49—52.
- [8] 卫光, 郭坤. 三伺服枕式包装机电子凸轮控制系统的研究与应用[J]. *包装与食品机械*, 2012, 30(6):57—59.
WEI Guang, GUO Kun. The Research and Implementation of Electronic Cam of Three-servo Pillow Packaging Machine[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2012, 30(6):57—59.
- [9] 王吉岱, 张兆健, 梁存仙, 等. 包装机械电子凸轮关键技术研究与应用[J]. *包装工程*, 2013, 34(7):48—51.
WANG Ji-dai, ZHANG Zhao-jian, LIANG Cun-xian, et al. Research and Application of Electronic CAM Key Technology in Packaging Machine[J]. *Packaging Engineering*, 2013, 34(7):48—51.
- [10] LIU Ran, SUN Jian-zhong, LUO Ya-qin, et al. Research on Multi-motor Synchronization Control Based on the Ring Coupling Strategy for Cutter-head Driving System of Shield Machines[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 52/54:65—72.
- [11] CHEN Chin-Sheng, CHEN Li-Yeh. Cross-coupling Position Command Shaping Control in a Multi-axis Motion System[J]. *Mechatronics*, 2011(21):625—632.
- [12] ZHANG Peng, ZHANG Jian-hua, HE Dong-sheng, et al. Based on Adjacent Cross-coupling of Multi-motor Synchronous Drive[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 201/203:1093—1097.
- [13] ZHANG Yong, DENG Hua, ZHANG Yi. Synchronization Control of Space Voltage Vector Controlled Multi-PMSM Based on Adjacent Cross-coupling[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 383/390:6931—6937.
- [14] 曹玲芝, 李春文, 牛超, 等. 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制[J]. *电机与控制学报*, 2008, 12(5):586—592.
CAO Ling-zhi, LI Chun-wen, NIU Chao, et al. Synchronized Sliding-mode Control for Multi-induction Motors Based on Adjacent Cross-coupling[J]. *Electric Machines and Control*, 2008, 12(5):586—592.
- [15] 程斯一, 纪文刚, 王志俊. 基于模糊 PID 的多伺服电机交叉耦合同步控制[J]. *北京石油化工学院学报*, 2014, 22(4):54—57.
CHENG Si-yi, JI Wen-gang, WANG Zhi-jun. The Cross-coupled Synchronous Control of Multi Servo Motors Based on Fuzzy-PID[J]. *Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology*, 2014, 22(4):54—57.
- [16] 张承慧, 石庆升, 程金. 一种基于相邻耦合误差的多电机同步控制策略[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(15):59—63.
ZHANG Cheng-hui, SHI Qing-sheng, CHENG Jin. Synchronization Control Strategy in Multi-motor Systems Based on the Adjacent Coupling Error[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2007, 27(15):59—63.