

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.04.005

# 压力机多轴同步驱动的虚拟轴改进型 偏差耦合控制方法

王勇<sup>1</sup>, 邢亮<sup>1</sup>, 吴焱明<sup>1</sup>, 胡延平<sup>1</sup>, 胡火根<sup>2</sup>, 方唐利<sup>2</sup>

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽耐科装备科技股份有限公司, 安徽 铜陵 244000)

**摘要:**为实现多轴伺服驱动压力机的同步控制,文章基于传统偏差耦合控制提出一种虚拟轴改进型偏差耦合同步控制方法,并搭建同步控制实验平台进行现场验证。基于压力机结构和控制模型实现模糊比例积分微分(proportional integral derivative, PID)位置跟踪控制;在传统偏差耦合控制结构中添加评价误差模块,搭建一种改进型偏差耦合同步控制方法,提高同步系统的抗扰动能力和同步精度;将虚拟轴引入改进型偏差耦合控制结构中,从而解除多轴间的直接耦合关系,简化改进型同步位移补偿结构。实验结果表明,该方法有效提高了压力机同步抗扰动能力和稳态同步精度。

**关键词:**伺服压力机;多轴同步控制;偏差耦合;同步误差;虚拟轴

**中图分类号:** TM341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2025)04-0462-07

## Multi-axis synchronous drive for servo press based on improved relative coupling control method with a virtual axis

WANG Yong<sup>1</sup>, XING Liang<sup>1</sup>, WU Yanming<sup>1</sup>, HU Yanping<sup>1</sup>, HU Huogen<sup>2</sup>, FANG Tangli<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Nextool Equipment Technology Co., Ltd., Tongling 244000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of synchronization control of multi-axis driving servo press, this paper proposes a virtual axis improved relative coupling synchronous control method based on traditional relative coupling control. An experimental platform is also presented to validate the synchronization precision. Firstly, a fuzzy proportional integral derivative (PID) position tracking control is realized based on the press structure and control model. Then, an evaluation error module is added to the traditional relative coupling control structure to build an improved relative coupling control structure, which improves the anti-disturbance ability and synchronization accuracy of the synchronization system. Finally, a virtual axis is introduced to the improved relative coupling control structure, which decouples multiple axes directly and simplifies the improved synchronous displacement compensation structure. The experiment shows that this method effectively improves the synchronous anti-disturbance ability and steady-state synchronization accuracy of the servo press.

**Key words:** servo press; multi-axis synchronous control; relative coupling; synchronization error; virtual axis

伺服压力机在电子封装等精密塑封成型领域中凭借其高精度、柔性化等特点,显示出比传统压力机更大的优势。目前针对伺服压力机控制的研

究主要集中于传动结构研究<sup>[1]</sup>、滑块运动曲线优化<sup>[2]</sup>和轨迹跟踪<sup>[3]</sup>,而对多轴驱动的精密伺服压力机同步控制研究仍然不足。

收稿日期:2023-06-14;修回日期:2023-07-18

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202003a05020041)

作者简介:王勇(1969—),男,安徽无为,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

多轴驱动伺服压力机为保证运行安全可靠,必须确保各驱动轴严格同步加载,以满足塑封成型产品的精度要求。目前多轴同步运动控制的研究主要集中于跟随控制器和同步控制器<sup>[4]</sup>。跟随控制器采用滑模<sup>[5]</sup>、模糊<sup>[6]</sup>、神经网络<sup>[7]</sup>、自适应<sup>[8]</sup>以及比例积分微分(proportional integral derivative, PID)<sup>[9]</sup>等算法提高跟踪精度和同步性能;同步控制器采用主从<sup>[10]</sup>、主令、交叉耦合<sup>[11]</sup>、偏差耦合<sup>[12]</sup>以及虚拟总轴等控制策略,并利用现代控制理论设计合适的算法。文献<sup>[13]</sup>基于传统偏差耦合控制引入“虚拟电机”概念,改善了传统偏差耦合控制起动同步误差以及简化同步补偿结构,但未对同步补偿算法作进一步优化;文献<sup>[14]</sup>针对双电机系统提出了一种基于二阶全局快速终端滑模控制的交叉耦合控制策略,以提高在外部负载干扰下的同步精度,但是主要针对单轴控制精度和扰动响应,并且缺乏实际应用的复现能力。

由已有的文献分析可知,目前国内外面向精密电子封装的多轴伺服驱动压力机同步控制研究仍显不足,同时传统偏差耦合同步控制策略包括同步补偿结构仍有待优化。因此,本文拟根据多轴驱动伺服压力机结构特点,基于传统偏差耦合控制,针对同步补偿提出一种虚拟轴改进型偏差耦合控制策略,并通过仿真分析和现场试验测试验证所提同步方法的可行性与有效性。

## 1 多轴位置控制

### 1.1 多轴驱动伺服压力机结构

面向高精密塑封成型的多轴伺服驱动压力机选择“伺服电机+减速机构+螺杆”传动方式直接

驱动滑块。为解决滑块底面受力不均匀的问题,选择4组滚珠丝杠带动滑台并通过同步加压实现稳定合模。本文设计的多轴伺服驱动压力机三维模型如图1所示。

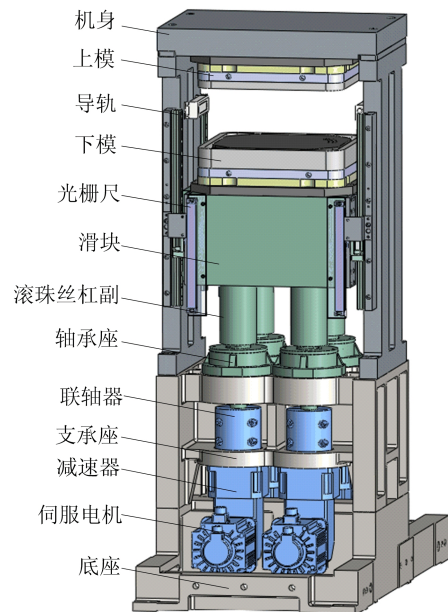


图1 多轴驱动伺服压力机三维模型

### 1.2 全闭环控制系统

为保证伺服压力机的位置精度,多轴伺服驱动压力机拟使用全闭环运动控制系统。4组光栅尺和压力传感器分别安装在压力机滑块四周,采集实时位置和压力信号反馈至运动控制器,再通过伺服系统和传动结构推动滑块,实现精密的四轴全闭环控制。

运动控制系统结构如图2所示。

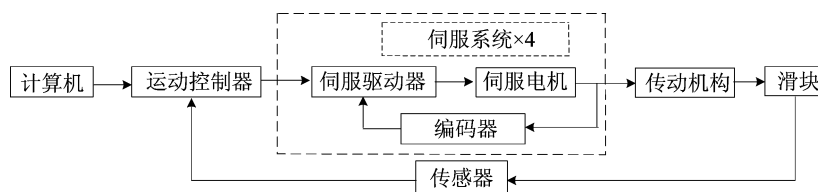


图2 运动控制系统结构图

### 1.3 模糊PID控制器

因为伺服压力机运动控制系统是一个耦合性较强的非线性复杂系统,运行时可能存在参数时变、非线性、延迟等现象,所以使用常规PID难以实现理想的位置控制效果。模糊PID控制是在常规PID控制的基础上结合了模糊控制的优点,无需获取精确被控对象的数学模型,且控制器鲁棒性能与动态响应性能比常规PID更好,因此本

文拟使用模糊PID控制器来满足单轴位置跟踪的要求。

模糊PID控制是通过模糊理论在线调节常规PID控制器参数的控制方法,其控制系统结构如图3所示。

选择伺服压力机滑块的位置偏差 $e$ 和偏差变化率 $e_c$ 作为模糊规则的语言输入变量;选择PID控制器3个参数变化值 $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$ 作为模糊

规则的语言输出变量。设置相应的模糊论域、模糊集合以及隶属度函数,确定模糊推理方法和去模糊化方法,并通过建立的模糊规则,使模糊控制器可以实时调整 PID 3 个参数。

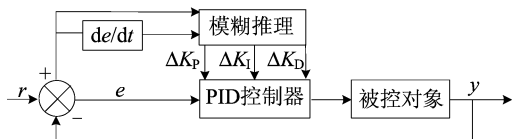


图 3 模糊 PID 控制系统结构

设  $K_{P0}$ 、 $K_{I0}$ 、 $K_{D0}$  分别为 PID 控制器的 3 个初始参数,则模糊 PID 控制器输出参数  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  的计算公式为:

$$\begin{cases} K_P = K_{P0} + \Delta K_P, \\ K_I = K_{I0} + \Delta K_I, \\ K_D = K_{D0} + \Delta K_D \end{cases} \quad (1)$$

为了直观体现出模糊 PID 控制器优点,根据单轴位置控制结构,在 MATLAB/Simulink 中分别搭建基于模糊 PID 和常规 PID 的位置跟踪控制模型,并给出 2 种控制器的仿真位移对比图。仿真时设置仿真时间为 1.5 s,参考位移为 3 mm,则 2 种控制器位置控制效果的对比如图 4 所示。

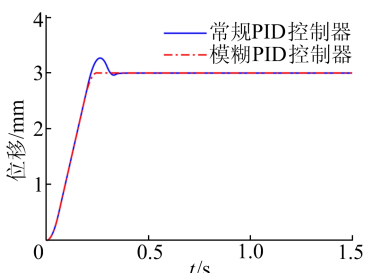


图 4 2 种控制器位置控制效果的对比

根据上述仿真实验得到 2 种控制方法的时域性能指标,仿真结果见表 1 所列。

表 1 2 种控制方法的仿真结果分析

控制方法	上升时间/s	调整时间(±2%)/s	超调量/%
常规 PID	0.219	0.304	8.972
模糊 PID	0.225	0.225	0.107

从图 4 和表 1 可以看出,当给定相同的参考位移时,模糊 PID 位置控制器的上升时间略高于常规 PID 控制器,但有效降低了超调量并缩短了调整时间。

因此与常规 PID 控制相比,模糊 PID 控制对于本文的伺服压力机具有更好的位置跟踪控制性能。

## 2 多轴同步控制

### 2.1 传统偏差耦合控制

传统偏差耦合控制的主要思想是将系统中任一轴的输出与其余轴的输出都分别作一次对比,然后将这些差值通过每台电机控制器的输入环节加入同步补偿器进行补偿求和,并将其重新作为该轴的同步反馈信号,从而实现所有轴的耦合控制,以此改善系统的同步性能。

为了简化结构分析,不考虑电流环的延迟和测速延迟,忽略电机阻尼系数并将电机系统视作积分环节,同时忽略机械传动以及变形所产生的误差。传统偏差耦合  $n$  轴同步控制结构如图 5 所示。

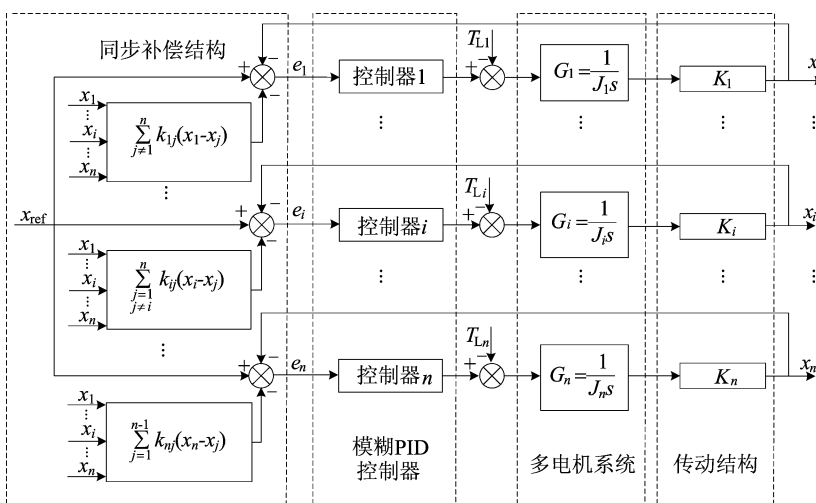


图 5 传统偏差耦合控制结构

图5中: $x_{\text{ref}}$ 为给定的参考位移; $e_i$ 为*i*轴的位置控制器输入; $n$ 为轴的总个数; $x_i$ 为*i*轴的实际位移; $J_i$ 为第*i*台电机的转动惯量; $k_{ij}$ 为第*i*台电机与第*j*台电机之间的耦合系数, $k_{ij} = J_i/J_j$ ; $T_{Li}$ 为电机负载转矩; $G_i$ 为电机等效传递函数; $K_i$ 为机械传动机构产生的理想*i*轴增益。

从图5可以看出,同步补偿结构是偏差耦合控制结构的核心部分,为各轴提供位置同步补偿信号。

偏差耦合控制的同步补偿值 $e_i$ 的计算公式为:

$$e_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{ij}(x_i - x_j) \quad (2)$$

传统偏差耦合控制中每个补偿器都要考虑所有轴的位置信息。当系统中轴数量增多时,补偿器的数量和复杂程度也在增加,从而整体的运算量也会极大地增加。

## 2.2 改进型偏差耦合控制

由传统偏差耦合控制结构可知,其同步补偿仅根据轴间输出差和耦合系数进行计算,并没有考虑外部因素的影响。当多轴同步系统中某个轴突然受负载扰动从而产生较大信号波动时,若其余轴不能及时调整补偿量跟随此轴,则会使系统突然产生较大的同步误差。

因此针对负载扰动问题,添加评价误差模块对传统偏差耦合控制结构的同步补偿器进行优化,使该误差模块与多轴同步控制系统中每个轴的位置都有关,从而增强系统中各轴间的耦合性。

定义*i*轴的评价误差为*i*轴的实际位置与评价位置之差。*i*轴评价误差的计算公式为:

$$\varepsilon_i = x_i - \bar{x} \quad (3)$$

其中: $\varepsilon_i$ 为*i*轴的评价误差; $x_i$ 为*i*轴的实际位置; $\bar{x}$ 为评价位置,即各轴实时位置的均值。评价位置 $\bar{x}$ 的计算公式为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4)$$

优化后*i*轴补偿器的同步补偿值 $e_i$ 的计算公式为:

$$e_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n k_{ij}(x_i - x_j) + \varepsilon_i \quad (5)$$

通过优化后的同步补偿值可知,当系统中任一轴出现较大的位置波动时,同步补偿器可使其余轴跟踪位置波动轴,从而有效提高多轴同步系统的抗扰动能力和同步精度。但由于评价误差模块的添加,改进后的偏差耦合同步补偿结构更加

复杂,同步系统计算量也变得更大。

## 2.3 虚拟轴改进型偏差耦合同步控制

由传统偏差耦合控制策略可知,当系统的总轴数为*n*时,每个轴的位置同步补偿器均包含*n*-1个位置差,则系统内所有轴的位置同步补偿器共包含*n*(*n*-1)个位置差;当系统轴数增加到*n*+1时,则系统内所有轴的位置同步补偿器共包含*n*(*n*+1)个位置差。因此当系统轴数较多时,传统偏差耦合控制的位置同步补偿器结构就会较为复杂,同步系统计算量变大,并且每次增减轴数时,都需对原有每个轴的同步补偿器进行调整,操作繁琐。而相较于传统偏差耦合控制,改进型偏差耦合控制虽然通过添加评价误差提高了系统的抗干扰能力和同步精度,但也进一步加大了同步补偿器的复杂程度。因此本文在改进型偏差耦合控制的基础上进一步提出一种虚拟轴改进型偏差耦合控制,其控制结构如图6所示,其中下方虚线框为本文所述虚拟轴结构。

图6中: $x_{\text{vir}}$ 为虚拟轴的位置输出; $e_{\text{vir}}$ 为虚拟轴控制器输入; $\delta_{\text{vir}}$ 为虚拟轴的同步补偿值; $G_{\text{vir}}$ 为虚拟电机的传递函数; $J_{\text{vir}}$ 为虚拟电机转动惯量; $K_{\text{vir}}$ 为虚拟轴传动机构的理想增益。各组实际电机型号参数相同,虚拟电机转动惯量可设置,则电机间耦合系数均为*k*。

虚拟轴改进型偏差耦合同步补偿值 $\delta_{\text{vir}}$ 的计算公式为:

$$\delta_{\text{vir}} = \sum_{j=1}^n k(x_{\text{vir}} - x_j) + x_{\text{vir}} - \bar{x} \quad (6)$$

图6中的虚拟轴改进型偏差耦合控制是以虚拟电机为核心添加了1条虚拟轴,首先通过实轴输出的实际位移值和式(6)的虚拟轴同步补偿值计算虚拟轴补偿后输出的同步位移值,并以此作为实轴的同步补偿参考位移,进一步实现所有实轴的同步补偿。因此,该结构实轴位移同步补偿器较为简单,仅包括实轴与虚拟轴间的位移差,并且当系统同步轴数为*n*时,系统内所有轴的同步补偿器仅包含2*n*个位移差,远小于传统偏差耦合结构。

综合以上分析,虚拟轴改进型偏差耦合控制策略基于传统偏差耦合结构将改进型评价误差模块与虚拟轴结合,不仅提高了多轴同步控制精度和抗扰动能力,并且用虚拟轴的输出与实轴分别作比较,实现了1次计算多次利用,大幅度减少了同步系统的计算量。当同步系统需要再次添加实轴时,仅需在虚拟轴同步补偿器中加入新增轴与虚拟轴的位置差。

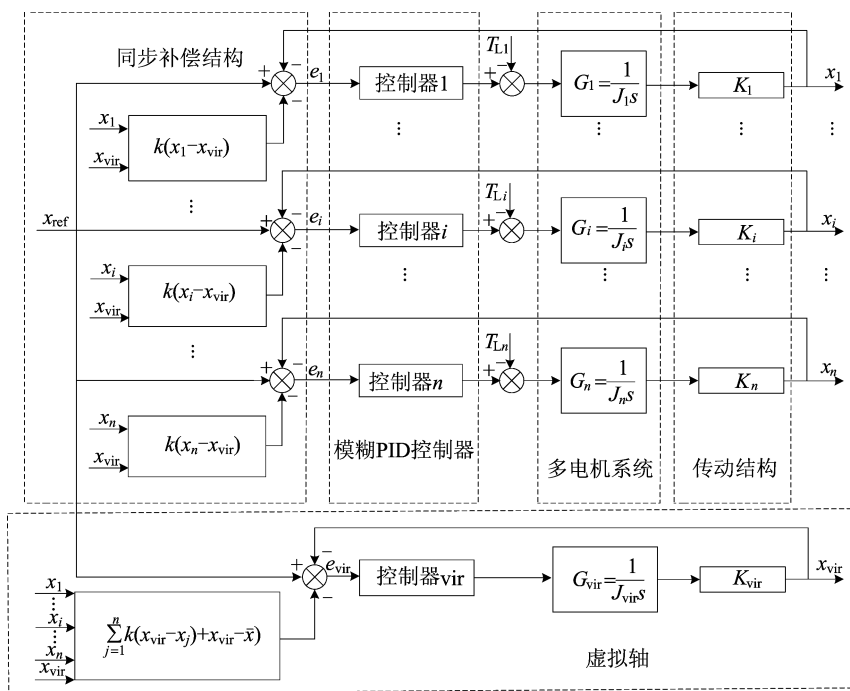


图 6 虚拟轴改进型偏差耦合控制结构图

### 3 实验与分析

#### 3.1 多轴扰动同步误差仿真实验

为验证本文提出的虚拟轴改进型偏差耦合同步控制结构相对于传统偏差耦合控制结构所具优势的可行性,采用由 4 组同型号的台达 ECMA-LA 三相永磁同步电机及 ASDA-A2 伺服驱动器组成的同步控制系统并参考电机参数进行仿真实验。

永磁同步电机主要参数见表 2 所列。

表 2 永磁同步电机参数

$p$	$J/(10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2)$	$P_N/\text{kW}$	$n_N/(\text{r}/\text{min})$	$T_N/(\text{N} \cdot \text{m})$
5	7.775	4.5	1 500	28.65

表 2 中:  $p$  为电机极对数;  $J$  为电机转子惯量;  $P_N$  为电机额定功率;  $n_N$  为电机额定转速;  $T_N$  为电机额定扭矩。

由于使用同型号电机和控制器,轴上零件型号均相同,并且设定虚拟电机转动惯量与实际电机相同,因此电机间耦合系数  $k$  均为 1。4 轴机械传动机构的增益  $K$  值相同。

根据传统偏差耦合控制结构并结合伺服压力机单轴位置控制模型,在 MATLAB\Simulink 中搭建伺服压力机 4 轴同步控制系统仿真模型。仿真时设置仿真时间为 3 s,参考位移为 10 mm,偏差耦合控制仿真结果如图 7 所示。

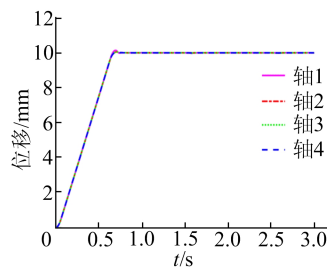


图 7 传统偏差耦合控制仿真结果

由图 7 可知,在无负载扰动的情况下,传统偏差耦合同步控制在启动阶段具有良好的同步性能,稳定后各轴间误差较小。然而在实际中很难实现完全无负载扰动,因此在同样的仿真条件下,进行负载突变仿真实验。

分别在  $t=1.5 \text{ s}$  时给轴 1 加  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$  的负载扰动,在  $t=2.5 \text{ s}$  时给轴 3 加  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$  的负载扰动,得到传统偏差耦合控制下各轴间的同步误差如图 8 所示。

从图 8 可以看出,传统偏差耦合控制的最大同步误差为  $0.016 \text{ mm}$ ,调节时间为  $0.274 \text{ s}$ 。并且由于 4 轴间通过同步补偿器耦合,当某个轴受到负载扰动时,其余轴都能在一定程度上作出响应,因此具有一定的抗扰动能力。

同样根据虚拟轴改进型偏差耦合控制结构图搭建伺服压力机 4 轴同步控制系统仿真模型,并进行负载突变仿真实验。仿真时仿真参数和加载方式同传统偏差耦合控制仿真实验相同,得到各

轴间的同步误差如图 9 所示。

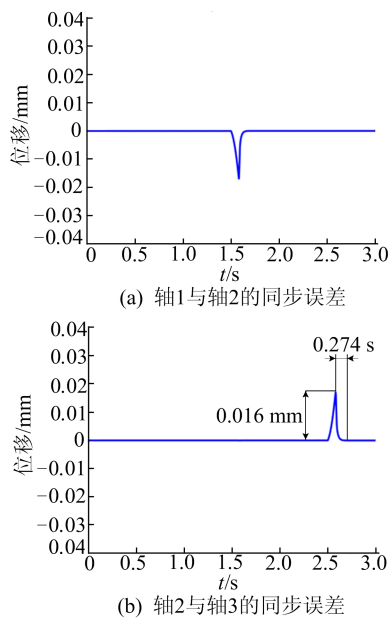


图 8 传统偏差耦合控制扰动同步误差

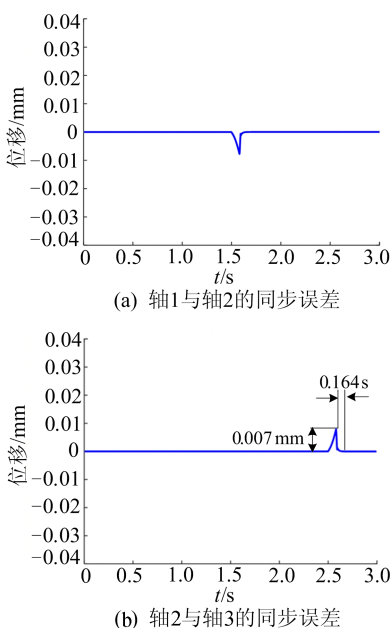


图 9 虚拟轴改进型偏差耦合控制扰动同步误差

从图 9 可以看出,虚拟轴改进型偏差耦合控制的最大同步误差为 0.007 mm,同步调整时间为 0.164 s。

将 2 种同步策略对比可知,虚拟轴改进型偏差耦合控制的扰动同步误差降低了 0.009 mm,同步调节时间也缩短了 0.110 s,因此抗扰动同步性能明显优于传统偏差耦合控制。

### 3.2 多轴稳定同步误差实验

根据上述多轴伺服压力机同步控制的理论分析,搭建相应的实验平台和样机,对该同步控制方

法的同步精度和可行性进行实验分析论证。

同步控制实验台采用 DVP50MC 作为控制核心,并基于 EtherCAT 总线协议通信利用上位机软件 CANopen Builder 实现对伺服系统的控制。同步控制实验台现场如图 10 所示。

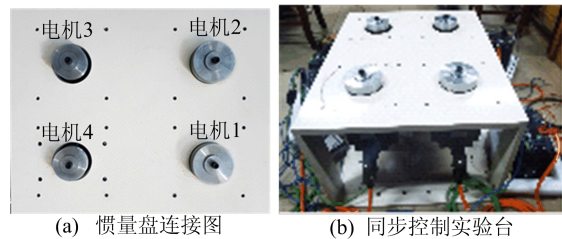


图 10 同步控制实验台现场图

将电机 1 和电机 2 连接同型号惯量盘,电机 3 和电机 4 连接另一型号惯量盘,如图 10b 所示。设置目标位移后,分别使用传统偏差耦合控制和虚拟轴偏差耦合控制进行同步误差实验。

利用数据示波器将实验数据导出,然后经 MATLAB 数据处理后将其可视化。因为搭载不同惯量盘的电机间同步误差曲线相似,所以只显示电机 1 与电机 3 之间的稳定同步误差曲线,如图 11 所示。

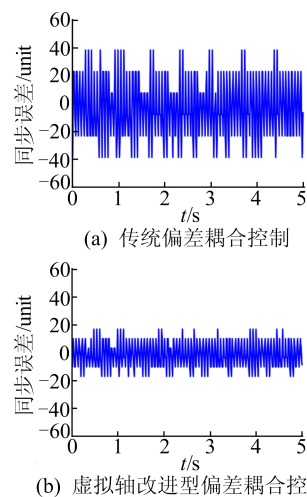


图 11 2 种偏差耦合控制下的稳定同步误差曲线

实验时设置 10 000 unit 表示伺服电机输出轴旋转 1 周(1 unit=1/10 000 r)。

图 11a 为传统偏差耦合控制下的同步误差曲线(提取运行稳定后的 5 s 时长),同步误差最大值为 39 unit;图 11b 为虚拟轴改进型偏差耦合控制下的同步误差曲线(提取运行稳定后的 5 s 时长),同步误差最大值为 17 unit。

搭建多轴伺服驱动压力机样机,进行现场同步精度测试。样机实物图如图 12 所示。

样机测试中,上位机命令伺服系统驱动滑块首先由原点上升到滑台上方安装的压力传感器显示的首次带压位置,此后每步上升 0.2 mm,直至上升到传感器表显带压 80 t 左右的位置。不考虑机械结构变形影响,记录表显带压后每步的 4 台电机编码器反馈位移值,并基于此建立 4 轴间最大同步误差点线图,如图 13 所示。



图 12 样机实物图

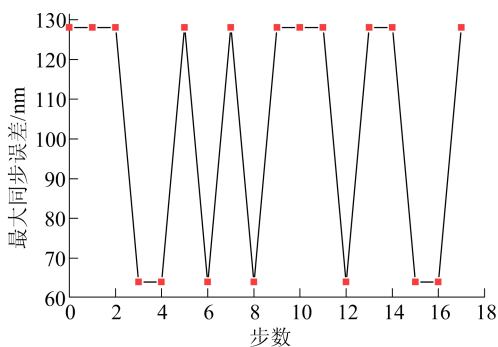


图 13 最大同步误差点线图

由图 13 可知,4 轴带压运行的最大同步误差保证在  $1 \mu\text{m}$  内,具有较好的同步控制效果。

## 4 结 论

1) 本文提出的虚拟轴改进型偏差耦合同步控制方法基于传统偏差耦合控制,将评价误差模块引入传统同步补偿结构,并通过添加虚拟轴解除轴间位置的直接耦合,简化了同步补偿结构,提高了同步抗扰动能力;仿真结果表明,本文方法将最大扰动同步误差由 0.016 mm 降到 0.007 mm,调整时间由 0.274 s 缩短至 0.164 s。

2) 将本文方法实际应用于高精度电子封装的成型精度问题,实验测试表明,该同步方法将稳定同步误差由 39 unit 降至 17 unit,最大同步稳定运行误差保持在  $1 \mu\text{m}$  以内,充分证明了本文

所提同步方法的可行性与有效性。

## [参 考 文 献]

- [1] 孙友松,章争荣. 伺服成形技术及其若干发展动向[J]. 锻压技术,2022,47(1):1-16.
- [2] 彭发忠,王传英,柴恒辉,等. 基于分层结构的伺服压力机滑块轻量化设计[J]. 清华大学学报(自然科学版),2020,60(12):1016-1022.
- [3] 孙海洋,魏明. 伺服压力机滑块位置检测装置[J]. 机械设计,2020,37(增刊1):190-191.
- [4] 叶宇豪,彭飞,黄允凯. 多电机同步运动控制技术综述[J]. 电工技术学报,2021,36(14):2922-2935.
- [5] 金鸿雁,赵希梅. 基于互补滑模控制和迭代学习控制的永磁直线同步电动机速度控制[J]. 控制理论与应用,2020,37(4):918-924.
- [6] WANG R M, ZHANG Y N, CHEN Y Q, et al. Fuzzy neural network-based chaos synchronization for a class of fractional-order chaotic systems: an adaptive sliding mode control approach [J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 100 (2): 1275-1287.
- [7] SHI P, SUN W, YANG X. RBF neural network-based adaptive robust synchronization control of dual drive gantry stage with rotational coupling dynamics[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2023, 20(2): 1059-1068.
- [8] LEE C R, KIM S K, AHN C K. Auto-tuning proportional-type synchronization algorithm for DC motor speed control applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II (Express Briefs), 2019, 67(3): 521-525.
- [9] ELTAG K, ASLAM M S, ULLAH R. Dynamic stability enhancement using fuzzy PID control technology for power system[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(1): 234-242.
- [10] 王立新,赵丁选,刘福才,等. 电液比例位置同步线性自抗扰控制[J]. 控制理论与应用,2018,35(11):1618-1625.
- [11] 周颖,孙超,王冬生,等. 网络化电机同步的改进型交叉耦合预测控制[J]. 电机与控制学报,2019,23(12): 101-107, 115.
- [12] 耿强,王少炜,周湛清,等. 改进型偏差耦合多电机转速同步控制[J]. 电工技术学报,2019,34(3):474-482.
- [13] SHI T N, XIN X, XIA C L. Multi-motor speed synchronous control based on improved relative coupling structure with a virtual motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23):7004-7013.
- [14] ZHU C L, TU Q Z, JIANG C M, et al. A cross coupling control strategy for dual-motor speed synchronous system based on second order global fast terminal sliding mode control[J]. IEEE Access, 2020, 8: 217967-217976.

(责任编辑 胡亚敏)