

# 基于 EtherCAT 通信的双直线电机位置联动控制系统设计\*

苏明垢<sup>1</sup>, 鲁文其<sup>1</sup>, 纪科辉<sup>1</sup>, 王秀锋<sup>2</sup>, 董汉卿<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018;

2. 杭州琦星机器人科技有限公司, 浙江 杭州 310010)

**摘要:** 针对传统脉冲、模拟量控制系统在实时性、稳定性和同步性方面的不足, 提出了一种基于 EtherCAT 工业实时以太网通信的双直线电机位置联动控制方案。设计了 3 种位置联动控制模式, 详细分析了 EtherCAT 的分布时钟补偿算法, 并搭建了联动控制试验平台, 对所设计的控制系统进行了试验验证。试验结果表明, 采用 EtherCAT 通信的双直线电机位置联动控制系统实时性高, 双轴同步、交替响应性能良好, 适用于同步精度和响应速度要求都较高的应用场合。

**关键词:** 联动控制; 直线电机; EtherCAT; 同步; 分布时钟

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)04-0048-09

## Design of Dual-Linear-Motor Position Linkage Control System Based on EtherCAT Communication\*

SU Minggou<sup>1</sup>, LU Wenqi<sup>1</sup>, JI Kehui<sup>1</sup>, WANG Xiufeng<sup>2</sup>, DONG Hanqing<sup>1</sup>

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

2. Hangzhou Qixing Robot Technology Co., Ltd., Hangzhou 310010, China)

**Abstract:** In view of the shortcomings of traditional pulse or analog control systems in terms of real-time performance, stability and synchronization, a dual-linear-motor position linkage control scheme based on EtherCAT communication was proposed. Three position linkage control modes were designed. Moreover, the distributed clock mechanism of EtherCAT was analyzed in detail. The linkage control experiment platform was built. The experiment results showed that the dual-linear-motor position linkage control system based on EtherCAT communication had the advantages of fast response, good dual-axis synchronization and good alternating performance. It was suitable for applications which required high synchronization accuracy and high speed response.

**Key words:** linkage control; linear motor; EtherCAT; synchronization; distributed clock

## 0 引言

联动控制系统在伺服拉床、机器人、模具加工、汽车工业等诸多领域得到了广泛应用<sup>[1-4]</sup>。随着工业自动化的不断发展, 对联动控制系统也提出了更高的要求。传统脉冲、模拟量控制系统, 通常会出现接线复杂、抗干扰能力差、响应滞后等

问题<sup>[5]</sup>。这些问题制约了联动控制系统的进一步发展。因此, 研究一种实时性好、控制精度高的联动控制系统显得尤为重要。

为了解决上述问题, 学者们将现场总线技术引入联动控制系统, 并取得了一定的效果。文献[6]通过 Modbus 总线设计了一种具有工程实用性的四辊轴交流传动控制系统, 但该总线拓扑灵

\* 基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY18E070006); 浙江省科技厅重点研发项目(2018C01074, 2018C01061)

作者简介: 苏明垢(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机控制。

鲁文其(1982—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电机驱动和运动控制。(通信作者)

活性还有待提升。文献[7]引入 Profibus-DP 通信总线,设计了一种运行稳定的矫直机电气拖动系统,但该总线所支持的网络节点数目较少。文献[8]采用 CAN 总线技术,设计了一种能够同步稳定运行的双电机雨刷系统,但其最大传输速率仅为 1 Mb/s。相比而言,EtherCAT 总线技术在实时性能、从站节点数目、同步性能等方面优势明显,具有传输速率快、同步精度高、拓扑灵活等优点<sup>[9]</sup>。其修改了以太网的通信结构模型、变更了数据链路层通信协议,并且采用了精确的分布时钟机制,是一种实时性较高的工业以太网技术<sup>[10-11]</sup>,因此逐渐应用于电机控制领域<sup>[12-15]</sup>。

针对 EtherCAT 通信下的电机控制,文献[16]设计了一种可靠性较高的电机驱动控制系统,但是没有研究多电机的情况。文献[17]分析了 EtherCAT 的分布时钟算法,且对所提算法进行了仿真研究,可是并没有进行具体的实物验证。文献[18]成功将 EtherCAT 通信应用在 6 自由度的运动控制系统中,并验证了其实时性能,然而该系统需要较高的硬件成本,且所设计的控制算法较为复杂,不易实现。文献[5]利用 TwinCAT 组态软件设计了 3 种基于 EtherCAT 通信的速度联动控制模式,并进行了试验测试分析,但是没有给出位置控制模式下的试验情况,且其作用对象主要是旋转电机,未必适用于直线伺服系统。基于此,本文选用 EtherCAT 工业以太网技术,取代原有的脉冲、模拟量控制方式,设计了一种以永磁直线同步电机为控制对象的双轴位置联动控制系统。主站与从站、从站与从站之间均通过普通以太网线连接,简化了传统脉冲、模拟量控制方式下的复杂布线模式,且主站采用通用型工业控制计算机(工控机)实现,无需附加额外的硬件设备,大大降低了开发成本。同时,通过并行同步的控制策略,研究了直线电机的单轴控制与双轴同步、交替控制性能,并对同步模式下的负载工况进行了试验测试。

## 1 双直线电机位置联动控制系统方案设计

### 1.1 联动系统整机方案设计

基于 EtherCAT 通信的双直线电机联动控制

系统所设计的整机方案结构框图如图 1 所示。主要由工控机、EtherCAT 总线、伺服驱动器和 2 台永磁直线同步电机等 4 部分组成。其中,工控机上安装有 TwinCAT 组态软件,以“软 PLC”来实现硬件 PLC 的功能。然后通过 EtherCAT 总线与集成 EtherCAT 从站控制芯片(ESC)的伺服驱动器连接,上位机主控制器给从站驱动器发送报文指令,完成直线同步电机的运动控制。

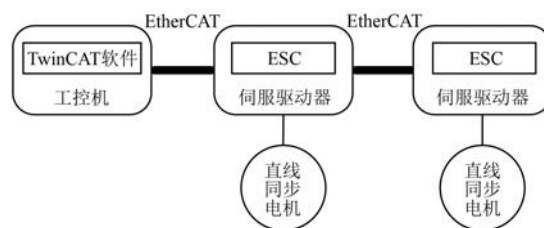


图 1 联动控制系统整机方案

EtherCAT 主站作为核心控制单元,主要通过 TwinCAT 组态软件来实现其功能,提供了 System Manager、PLC Control、ScopeView 等工具。System Manager 主要负责主站的硬件配置,包括过程数据对象(PDO)、服务数据对象(SDO)的初始化、硬件设备初始参数设置等。PLC Control 主要负责控制程序的编写与调试、人机交互界面的开发等。ScopeView 则用于数据采集与波形显示。

与 EtherCAT 主站相比,从站也是控制系统的重要组成部分,主要包括物理层、数据链路层以及应用层器件。其功能主要通过 ESC 实现。ESC 将读取到的有用数据进行处理,最终返回主站,实现 EtherCAT 通信系统的构建。

此外,该系统所采用的拓扑结构为线性拓扑结构,主站与伺服驱动器线形连接,通过驱动器上的 EtherCAT 通信接口,只需标准网线就可以将新的伺服设备加入到网络中,充分发挥了 EtherCAT 网络的拓扑灵活性。

### 1.2 联动系统通信方案设计

为了实现联动控制系统的通信,采用 EtherCAT 进行设计。作为一种开放的实时以太网,其最早由德国倍福公司开发,并且遵循 IEC 61158 标准<sup>[19]</sup>。EtherCAT 通信原理示意图如图 2 所示,采用一主多从结构,最多支持 65 535 个从站节点。

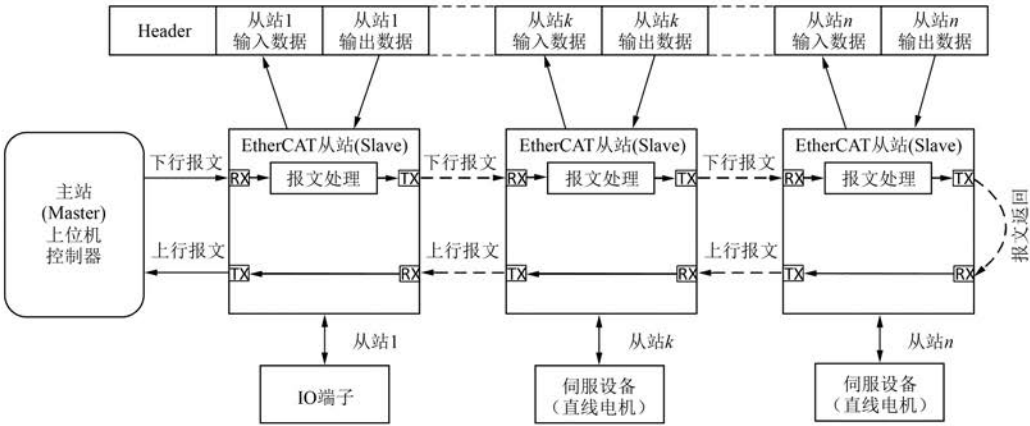


图 2 EtherCAT 的通信原理示意图

主站首先发出下行报文,经过第一个从站节点,从站设备高速动态地寻址到属于该节点的数据并完成读取操作。紧接着将处理过的输出数据插入到数据帧的指定位置,同时将报文中的工作计数器(WKC)的值加1,即子报文数据已经被正确处理。此后将数据帧依次传递至下一个从站节点,直到数据帧经过最后一个从站设备 $n$ 并且当某一个网段或者分支上的最后一个节点检测到开放端口时,开始发挥以太网的全双工特性返回上行报文,最终经主站处理所返回的数据,完成主从站之间的通信。在这个过程中,主站发出的数据帧均经过每一个从站节点。该方式改善了带宽的利用率,一个数据帧就能完成数据通信,因此无需附加交换机和集线器,缩小了成本。由于主站主要负责时间控制与数据发出,主站需要保证足够的实时性能,以确保周期性数据传输的有效性。

1.3 位置联动控制策略与同步补偿

为了实现双直线电机的联动控制,设计了其并行控制方案与3种位置联动控制模式。并行控制原理框图如图3所示。2台伺服驱动器同时接收来自主站的给定位置指令 $x^*$ ,并同时驱动2台直线电机。直线电机将实际位置 $x_1$ 、 $x_2$ 反馈回主站形成闭环控制。当某一从站受到负载扰动 $FL$ 时,因为没有耦合作用,其影响将不传递至另一从站,所以联动系统的控制性能主要取决于各个从站的控制精度。

针对联动控制系统在实际应用中的不同需求,设计了单轴位置控制、双轴位置同步控制与双

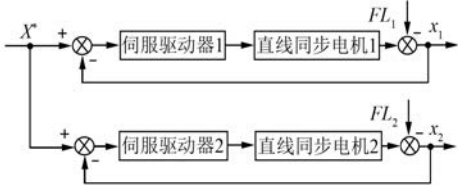


图 3 并行控制框图

轴位置交替控制3种模式。其控制流程图如图4所示。

对于所设计的联动系统,联动控制性能一方面取决于控制器,另一方面则主要依赖于网络的时钟同步性能。传统的以太网由于采用的是载波监听多路访问/冲突检测(CSMA/CD)的介质访问控制(MAC)方法<sup>[20]</sup>,会产生较大的网络延时,很难在同一时间发送数据到多个从站设备;同时,随着联动系统轴数的增加,网络的负担将不断加重,其实时性能将无法保证。因此,需要引入一种高实时性的时钟同步方案。

该同步方案主要基于EtherCAT工业实时以太网实现。其高精度同步性能主要源于EtherCAT总线的分布时钟(DC)机制<sup>[21]</sup>。EtherCAT DC基本原理如图5所示。

由图5可知,每个从站上的从站控制器在上电以后会有一个在本地运行的时钟作为从站的本地时间。该时间主要依靠晶体振荡器等元件产生。此后在拓扑位置上距离主站最近并且使能DC的从站时钟被选为参考时钟,因此其本地时间将被定义为DC的系统时间。EtherCAT主站的任务则是发送所需的EtherCAT报文,以便在初始化阶段

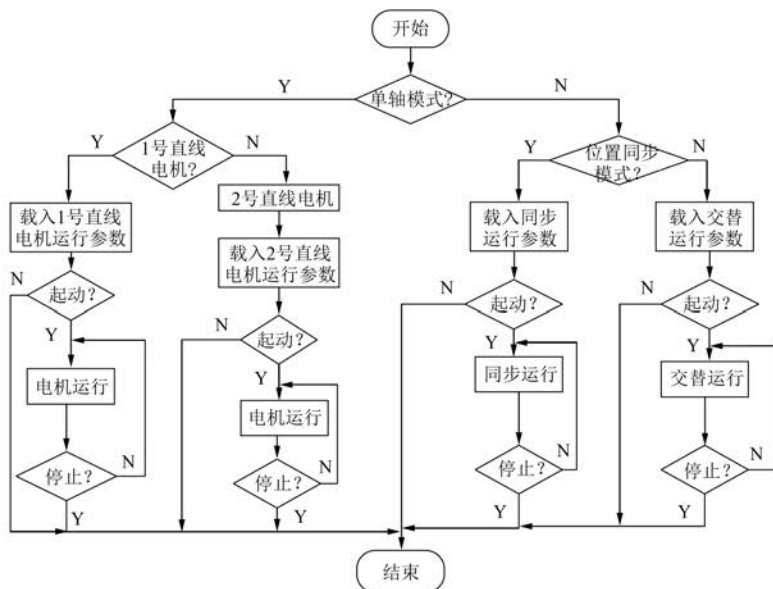


图4 双直线电机位置联动控制模式流程图

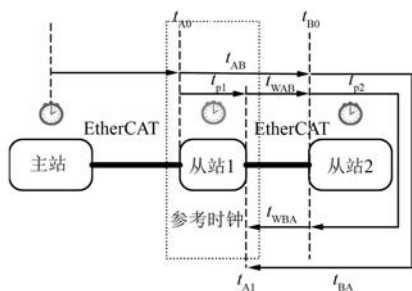


图5 EtherCAT DC 基本原理

将所有其他从时钟(S)与参考时钟(M)同步到此DC系统时间,并在运行阶段保持时钟同步。

在同步过程中,不可避免地会产生同步误差。误差主要来源于3个方面:

(1) 以太网帧通过设备和线缆等产生的传输延时误差;

(2) 给定从站设备的本地时钟与参考时钟的初始偏移误差;

(3) 晶体振荡器频率的微小偏差等因素而产生的从站设备间的本地时间动态漂移误差。

针对上述3种误差,需要引入误差补偿算法以达到高精度的时钟同步功能。其中补偿算法主要包括传输延时补偿和初始偏移补偿、动态漂移补偿。数据帧只由主站发出,因此补偿算法主要通过EtherCAT主站实现。同步补偿算法流程如图6所示。

首先,主站设备通过广播的方式发送测试报

文至从站进行传输延时测试,从站将数据帧到达的时间锁存,等数据帧返回后,主站读取时间戳并计算传输延时时间,然后写入从站的传输延时寄存器。此即为延时补偿。由图5可以看出,将从站1到从站2的传输延时分为数据处理延时与线缆延时两部分,同时假定通过线缆的延时是对称的,即:

$$t_{WAB} = t_{WBA} \quad (1)$$

则从站1与从站2的传输延时为

$$\begin{aligned} t_{AB} &= t_{p1} + t_{WAB} = t_{B0} - t_{A0} \\ t_{BA} &= t_{p2} + t_{WBA} = t_{A1} - t_{B0} \end{aligned} \quad (2)$$

若假定报文处理延时相等,即:

$$t_{p1} = t_{p2} \quad (3)$$

则由式(2)可推出从站1与从站2之间的传输延时为

$$t_{AB} = t_{BA} = (t_{A1} - t_{A0})/2 \quad (4)$$

式中:  $t_{AB}$ 、 $t_{BA}$ ——从站1至从站2和从站2至从站1的传输延时;

$t_{p1}$ 、 $t_{p2}$ ——数据帧在从站1和从站2的处理延时;

$t_{WAB}$ 、 $t_{WBA}$ ——数据帧由从站1至从站2和从站2至从站1产生的线缆延时;

$t_{A0}$ ——数据帧首次到达从站1的时刻;

$t_{A1}$ ——从站1接收数据帧的时刻;

$t_{B0}$ ——数据帧首次到达从站2的时刻。

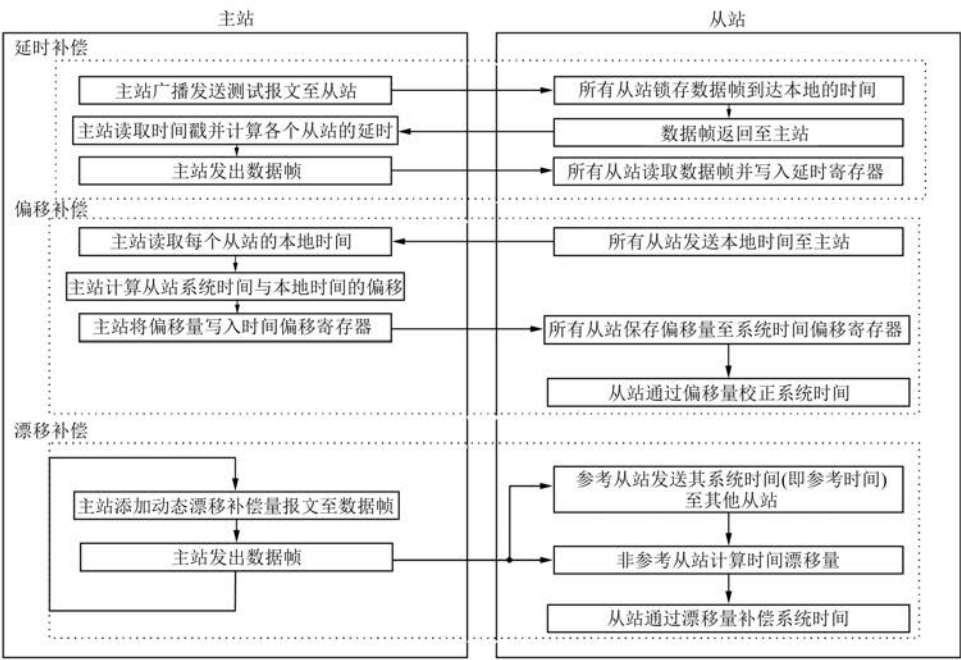


图6 同步补偿算法流程图

从站设备上电后,所有从站发送本地时间至主站,主站读取每个从站的本地时间,并计算出时间偏差,补偿值写入时钟偏移寄存器;然后通过数据帧发送至从站,从站从数据帧中读取补偿值并写入本地时钟偏移寄存器;最后通过该寄存器校正本地时钟,即为偏移补偿。偏移量由式(5)计算:

$$t_{\text{offset}} = t_{\text{sys}} - t_{\text{local}} \tag{5}$$

式中:  $t_{\text{offset}}$ ——偏移量;  
 $t_{\text{sys}}$ ——非参考从站的系统时间;  
 $t_{\text{local}}$ ——从站的本地时间。

因为漂移误差是一个连续的过程,所以漂移补偿也是一个动态过程。主站循环读取和写入漂移量至数据帧,然后循环发送至从站。从站设备读取漂移量,计算出漂移补偿值然后通过更改本地时钟的增加速度(即修改本地速度计数寄存器)来校正本地时钟。由于从站的本地时钟每10 ns增加一次,所以当增量为9时表示从站的本地时钟快于主站,减小从站的增速。当增量为10时,表示时钟相等。增量为11时表示从站时钟小于主站时钟。非参考从站的漂移量由式(6)计算:

$$t_{\text{drift}} = t_{\text{sys}} - (t_{\text{ref}} + t_{\text{pd}}) \tag{6}$$

式中:  $t_{\text{drift}}$ ——动态漂移量;  
 $t_{\text{ref}}$ ——参考从站的系统时间;  
 $t_{\text{pd}}$ ——传输延时时间。

2 试验测试

2.1 试验平台搭建

为了评估双直线电机位置联动控制系统在EtherCAT通信下的性能,搭建了试验平台,如图7所示。

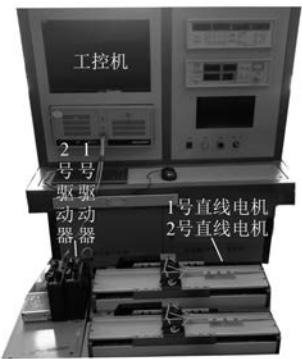


图7 试验平台

在该平台中,上位机软件搭载在1台具有intel网卡的通用型工控机上作为主站。该计算机

与驱动器之间通过串口数据线和网线连接,通信方式采用的是 EtherCAT 模式。EtherCAT 网络的时钟同步性能由计算机上安装的 Wireshark 软件分析。2 台驱动器分别驱动 2 台永磁直线同步电机,同时构成 2 个从站。位置反馈采用的是分辨率为  $1\text{ }\mu\text{m}$  的直线光栅尺。光栅尺将位置信号反馈到驱动器中,解码后转换成电机当前的速度值和位置值,然后上位机通过串口和 EtherCAT 网络从驱动器中读取这些数据,并显示于 TwinCAT ScopeView 软件中,最终构成闭环反馈控制系统。

## 2.2 分布时钟同步性能测试

为了验证 EtherCAT 分布时钟的同步性能,分别采用 Wireshark 软件和 TwinCAT 软件对 EtherCAT 数据帧的 DC 系统时间进行对比测试,所得试验波形如图 8、图 9 所示。由图 8、图 9 可知, Wireshark 软件获取的 EtherCAT 帧数据与 TwinCAT 软件的数据基本一致。通过 Wireshark 软件显示的 EtherCAT 报文,如图 10 所示,可以看出 0x910 即为从站系统时间所在地址。在执行 ARMW (Auto increment physical read multiple write) 命令后,工作计数器 (working cnt) 的值由 0 变为 2,说明已经成功完成了读、写操作。

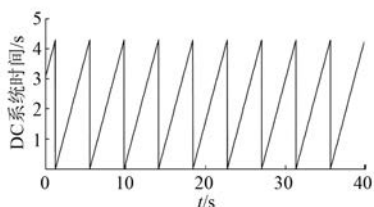


图 8 Wireshark 软件提取的 DC 系统时间数据图

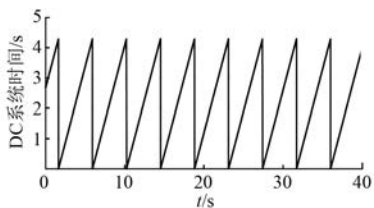


图 9 TwinCAT 软件提取的 DC 系统时间数据图

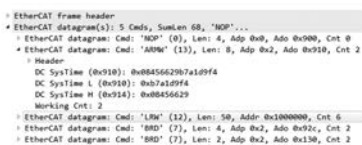


图 10 Wireshark 软件的 EtherCAT 报文截图

通过读取 EtherCAT 帧数据中的“BRD”命令的参数,获取了 75 097 组连续的分布时钟控制误差数据,如图 11 所示,可见分布时钟的系统时间差维持在 30 ns,远小于 100 ns,因此时钟同步性已经达到了系统要求,能够保证双直线电机具有较高的同步控制精度。

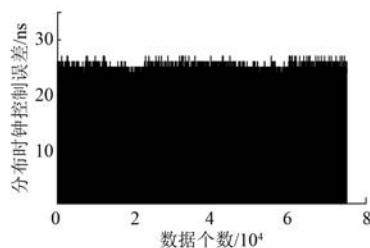


图 11 系统时间差数据图

## 2.3 单轴位置控制模式测试

在单轴位置控制模式下,直线电机给定位置信号为  $\pm 100\text{ mm}$ ,其中正负表示电机的运行方向,运行时间为 30 s。用虚线表示给定位置指令,实线表示实际位置信号,对单台电机响应性能进行测试,可得电机位置波形如图 12 所示。由图 12 可知,电机实际位置能够高精度跟随给定位置,超调量较小,且电机运行平稳,几乎没有波动,即位置误差较小。

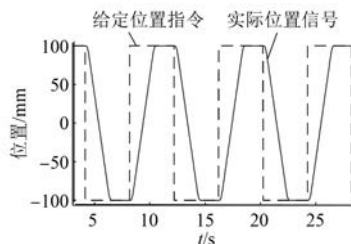


图 12 单轴控制模式电机位置波形

单轴控制模式电机速度波形如图 13 所示。由图 13 可以看出,电机的最大运行速度为  $100\text{ mm/s}$ ,且在 3 个周期的正反向运行过程中,电机的速度波动小于  $1\text{ mm/s}$ ,误差较小,达到了一定的速度跟随性能。

## 2.4 空载下双轴位置同步控制模式测试

在双轴位置同步控制试验中,2 台直线电机初始位置相同,空载运行,给定相同的目标位置,即  $\pm 100\text{ mm}$ 。运行时间为 30 s。经过测试得到 2 台直线电机同步运行的位置波形及其局部放大图如

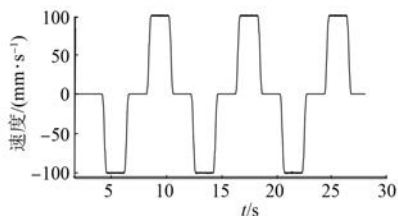


图 13 单轴控制模式电机速度波形

图 14 所示。由图 14 可知,双轴位置波形几乎重合,说明同步控制下位置误差较小,且由局部放大图可以看出,2 台直线电机位置跟随误差小于1 mm,说明通过 EtherCAT 通信的方式,2 台直线电机能够保持较好的同步运行状态,且实时性能较好。

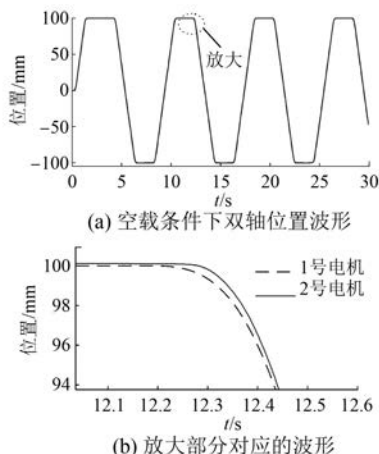


图 14 空载条件下双轴位置波形及其局部放大图

对应的速度波形及其局部放大图如图 15 所示。由图 15 可知,电机达到峰值速度后,速度波

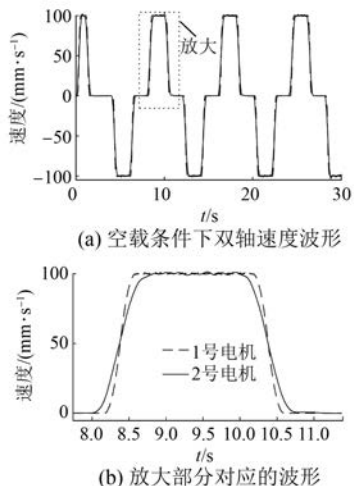


图 15 空载条件下双轴速度波形及其局部放大图

动较小。同时,在正反向切换的过程中,2 台直线电机的速度偏差小于 $\pm 1$  mm/s,可见速度也保持着较好的同步运行状态。

## 2.5 带负载条件下双轴位置同步模式测试

直线电机运行的过程中,负载扰动的存在不仅会对单轴的位置控制精度产生影响,也会使得双轴的同步控制误差增大。为了验证带负载条件下的性能,对 2 台直线电机的同步模式进行了测试。试验中双轴所带负载力矩均为 $50\text{ N}\cdot\text{m}$ 。给定位置为 $\pm 100\text{ mm}$ ,带负载条件下双轴位置波形及其局部放大图如图 16 所示。由图 16 可知,双轴位置响应迅速,最大位置误差峰值依然小于1 mm,说明在带负载条件下,该系统达到了较高的定位精度,且具有一定的抗扰性能。

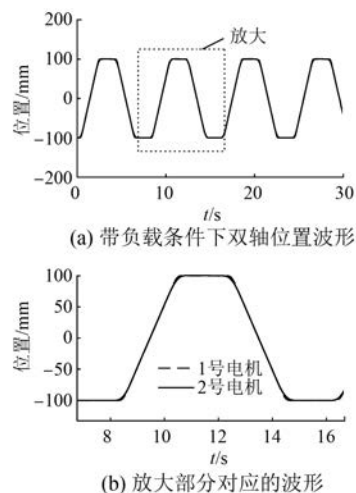


图 16 带负载条件下双轴位置波形及其局部放大图

对应的速度波形及其局部放大图如图 17 所示。由图 17 可知,在加载条件下,双轴的速度同步精度较高,整体跟踪性能较好。往复运行过程中速度超调量很小,稳态下速度波动小于 $1\text{ mm/s}$ 。由此可见,在带载过程中,虽然有摩擦力及反馈误差等非线性因素的影响,但是 2 台电机依然能够保持较高的速度跟踪精度,达到了较高的同步控制性能。

## 2.6 双轴交替运行模式测试

为了进一步验证双轴联动控制性能,对交替模式下的位置与速度响应进行了分析。该模式下,2 台电机给定信号均为 $\pm 100\text{ mm}$ ,交替运行时间为 $30\text{ s}$ ,可得交替运行模式下双电机位置波形如图 18 所示。由图 18 可知,2 台电机在交替运

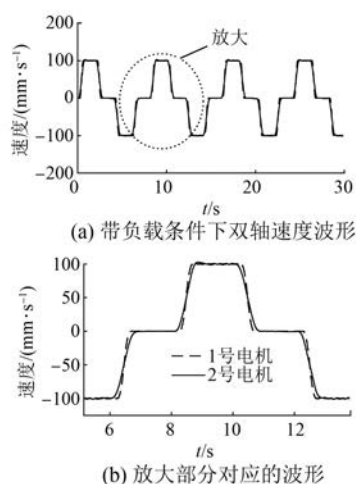


图 17 带负载条件下双轴速度波形及其局部放大图

行过程中均能实时接收 EtherCAT 指令信号,没有产生较大的位置响应滞后问题,且定位误差较小,说明交替响应性能良好。

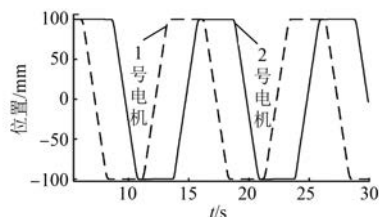


图 18 交替运行模式双电机位置波形

交替运行模式下双电机速度波形如图 19 所示。由图 19 可知,1 号直线电机在达到给定速度、停止运行后,2 号直线电机能够迅速响应。同时,稳态下的速度波动较小。由此可见,通过 EtherCAT 通信,双电机达到了较好的联动控制效果。

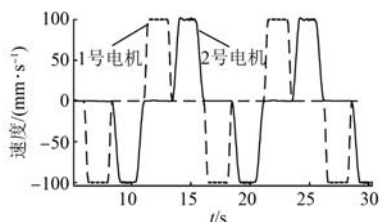


图 19 交替运行模式下双电机速度波形

### 3 结 语

针对传统脉冲、模拟量控制系统存在的问题,本文设计了一种采用 EtherCAT 通信的双直线电

机位置联动控制系统。分析了 EtherCAT 通信的基本原理及其分布时钟补偿算法,同时搭建了基于直线电机的位置联动控制试验平台,对 3 种位置联动控制模式进行了测试与分析。试验结果表明,采用 EtherCAT 通信的控制系统能够获得较好的同步、交替控制效果。所设计的控制系统能够满足对同步精度与响应速度要求较高的场合。

### 【参考文献】

- [1] LU W Q, JI K H, DONG H Q, et al. Double position servo synchronous drive system based on cross-coupling integrated feedforward control for broacher [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(2): 272.
- [2] CHEN S, CHOU C. Contouring control of robot manipulators based on equivalent errors [J]. Asian Journal of Control, 2014, 16(3): 904.
- [3] WAN M, LIU Y, XING W J, et al. Singularity avoidance for five-axis machine tools through introducing geometrical constraints [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2018, 127: 1.
- [4] ZHONG G Y, WANG C Q, YANG S F, et al. Position geometric error modeling identification and compensation for large 5-axis machining center prototype [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015, 89: 142.
- [5] 董汉卿,周建华,鲁文其,等.基于 EtherCAT 通信的双电机速度联动控制系统设计[J].浙江理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 585.
- [6] 王彦,左为恒,李昌春.基于变频器和 PLC 的四辊轴交流传动控制系统设计[J].电机与控制应用, 2010, 37(4): 54.
- [7] 王小博,祖龙起,刘顺利,等.基于西门子 S120 的矫直机控制系统设计[J].大连工业大学学报, 2017, 36(2): 151.
- [8] 闫达,王旭东,孙彦成.采用 CAN 总线的双电机同步控制雨刷系统控制器[J].哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(3): 117.
- [9] LEE D E, NGUYEN Q V, KIM T, et al. Development of independent EtherCAT slave module and application to closed loop step motor drive with multi-axis [C] // 2006 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCA), 2016: 912.

- [10] LANGLOIS K, HOEVEN T V D, CIANCA D R, et al. EtherCAT tutorial: an introduction for real-time hardware communication on windows [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2018, 25(1): 22.
- [11] CHEN X, LI D, WAN J F, et al. A clock synchronization method for EtherCAT master [J]. Microprocessors & Microsystems, 2016, 46: 211.
- [12] 张淑珍, 于子然, 孔民秀, 等. 基于 RTX 弧焊机器人控制系统的设计与实现[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(10): 1540.
- [13] CHEN Z Y, SHENG B Y, YANG H Y, et al. Tile cut synchronization control and compensation design and implement for multi-wire saw [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97: 3493.
- [14] KIM I, KIM T. Guaranteeing isochronous control of networked motion control systems using phase offset adjustment[J]. Sensors, 2015, 15(6): 13945.
- [15] LUO Y, JIAO X D, ZHOU C F, et al. Welding robot system applied in sub-sea pipeline-installation [J]. Industrial Robot, 2015, 42(1): 83.
- [16] 林梦云, 马文礼, 熊皑, 等. 基于 EtherCAT 实时通信的电机驱动控制[J]. 微型机与应用, 2017, 36(10): 1.
- [17] LIU J M, YANG L, XU D, et al. A high precision clock synchronization algorithm for the EtherCAT[C] // 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics & Applications (ICIEA), 2017: 1369.
- [18] LI N N, MA H B, FEI Q, et al. Motion control of 6-DOF manipulator based on EtherCAT[J]. Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, 2018, 22(4): 415.
- [19] IEC. Industrial communication networks-fieldbus specifications-part 1: overview and guidance for the IEC 61158 and IEC 61784 series IEC 61158: 2014 [S]. Geneva: 2014.
- [20] WANG S Y, OUYANG J, LI D, et al. An integrated industrial Ethernet solution for the implementation of smart factory[J]. IEEE Access, 2017, 5: 25455.
- [21] PARK S, KIM H, KIM H, et al. Synchronization improvement of distributed clocks in EtherCAT networks[J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(6): 1277.

收稿日期: 2018-12-18

(上接第 47 页)

- [3] 张磊, 张俊杰, 葛鸿昌, 等. 某型引风机变频改造后电机断轴原因分析[J]. 华北电力技术, 2013(12): 50.
- [4] 徐甫荣, 崔力. 发电厂辅机电机变频调速节能方案探讨[J]. 电气传动自动化, 2003, 25(2): 3.
- [5] 李明, 黄丕维, 朱光明, 等. 火电厂泵与风机变频改造技术及应用[J]. 华电技术, 2008, 30(8): 55.
- [6] 李文, 赵慧敏, 邓武. 变频器驱动异步电机振动频谱特征分析[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(8): 67.
- [7] 李年仔, 郭玉杰, 张晓斌, 等. 变频电机驱动轴系扭矩脉动特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2014, 34(9): 731.
- [8] WANG Q, FEESE T D, PETTINATO B C. Torsional natural frequencies: measurement vs. prediction [C] // Proceedings of the Forty-First Turbomachinery Symposium, 2012.
- [9] HUTTEN V, BEER C, KRAUSE T, et al. VSDS motor inverter design concept for compressor trains avoiding interharmonics in operating speed range and verification [C] // Proceedings of the 42nd Turbomachinery Symposium, 2013: 15.

收稿日期: 2018-12-18