

# 基于 EtherCAT 通信的双电机速度联动控制系统设计

董汉卿<sup>1</sup>,周建华<sup>2</sup>,鲁文其<sup>1,3</sup>,汪全伍<sup>1</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018;2. 西子奥的斯电梯有限公司,杭州 310019;3. 浙江大学电气工程学院,杭州 310027)

**摘要:**针对目前采用脉冲模拟量方式设计的多轴运动控制系统中存在的响应速度不高、稳定性和同步性不好等问题,提出了一种基于 EtherCAT 通信的双电机速度联动控制方案。通过 TwinCAT2 软件设计了 3 种速度联动控制模式,搭建了基于 EtherCAT 通讯的双电机速度联动控制实验平台,对所设计的 3 种速度控制模式进行了实验测试与性能分析。实验结果表明:该控制系统控制响应速度快,双轴同步控制性能良好,适合需要速度联动的装备应用。

**关键词:** EtherCAT;TwinCAT;速度控制;多轴联动;控制系统

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-3851(2016)04-0585-07 **引用页码:** 070503

## 0 引言

随着工业自动化的不断发展,多轴运动控制系统已日渐被人们所熟悉,其应用范围越来越广,不仅在数控加工、纺织制造、工业自动化设备等传统行业中得到了大量应用,还在机器人控制行业中有着广泛地应用,已经发展为现代工业控制中不可或缺的一部分。研究和开发高精度、高响应、高性能的多轴运动控制系统是现代工业自动化控制的发展主流<sup>[1-3]</sup>。现在市场上的多轴运动系统大多采用脉冲模拟量的控制方式,但这种以脉冲模拟量控制的系统,其布线距离长而且布线复杂,所以灵活性不高,同时系统对走线方式要求高,稍有不妥就会引入干扰,出现响应滞后以及控制力不够等问题<sup>[1]</sup>。因此,传统脉冲模拟量方式控制的多轴系统不适合应用于高精度、快响应、同步性能要求高的工业场合。

目前,工业以太网(ethernet for control automation technology,EtherCAT)因可靠性高、速度响应快、拓扑结构灵活、使用简单、产错少以及易

掌握等优点,在现代控制领域得到了广泛应用<sup>[4-5]</sup>。国外库卡、新时达、发那科等企业已将 EtherCAT 技术应用到多轴运动控制系统中,生产出高精度、高性能的机器人产品<sup>[6-7]</sup>。国内沈阳机床有限公司研发出采用 EtherCAT 通讯的 i5 智能数控机床,利用 EtherCAT 的“on the fly”通讯机制大大提高了数控机床的加工速度和精度,解决了采用脉冲模拟量方式的接线多而复杂,抗干扰能力差的问题<sup>[8]</sup>。

本文针对传统脉冲模拟量控制方式存在的不足,采用 EtherCAT 通信代替传统脉冲模拟量的控制方式,以标准以太网线代替脉冲模拟量控制方式中多而复杂的接线,设计了一种基于 EtherCAT 通信的双电机速度联动控制系统。在 Windows7 操作系统下,利用 TwinCAT 软件和实时内核,采用软 PLC 编程的方式,实现对双电机速度联动的控制;并搭建双电机实验平台,进行控制模式测试与性能分析,为研发适合高精度、快响应、同步性能要求高的工业场合应用的多轴速度联动系统提供参考依据。

收稿日期:2015-08-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51307151);浙江省自然科学基金项目(LY13E070005);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2015C31078);浙江省博士后科学基金(BSH1402065)

作者简介:董汉卿(1991-),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事多轴同步驱动系统方面的研究。

通信作者:鲁文其,E-mail:luwenqi@zstu.edu.cn

### 1 EtherCAT 通信原理

EtherCAT 系统主要由主站和从站两个部分构成,采用主从站数据交换的方式进行数据通信,其通信原理如图 1 所示。主站是 EtherCAT 通信系统的控制端和发起端,在每个网络周期中为各个节点处理、发送和接收数据帧,实现主站与各个从站之间的通信以及各从站相互间的通信<sup>[9]</sup>。在 EtherCAT 系统中,控制周期从主站开始,主站发出一个下行报文,其中包含各个从站所需的 I/O 数据,报文会经

过所有的从站节点。每个 EtherCAT 从站设备在报文经过时,高速动态地(on the fly)读取寻址到该节点的数据,并在数据帧继续传输的同时在指定位置插入数据。与此同时,从站的硬件会将该报文中的工作计数器(working counter, WKC)的值加 1,表示子报文数据已经被正确处理。当某一网段或者分支上的最后一个节点检测到开放端口时,由于以太网技术的全双工特性,会把经过处理的数据帧作为上行报文发送回主站。主站接收到上行报文后,对返回的数据帧进行处理,结束一次通信。<sup>[10-11]</sup>

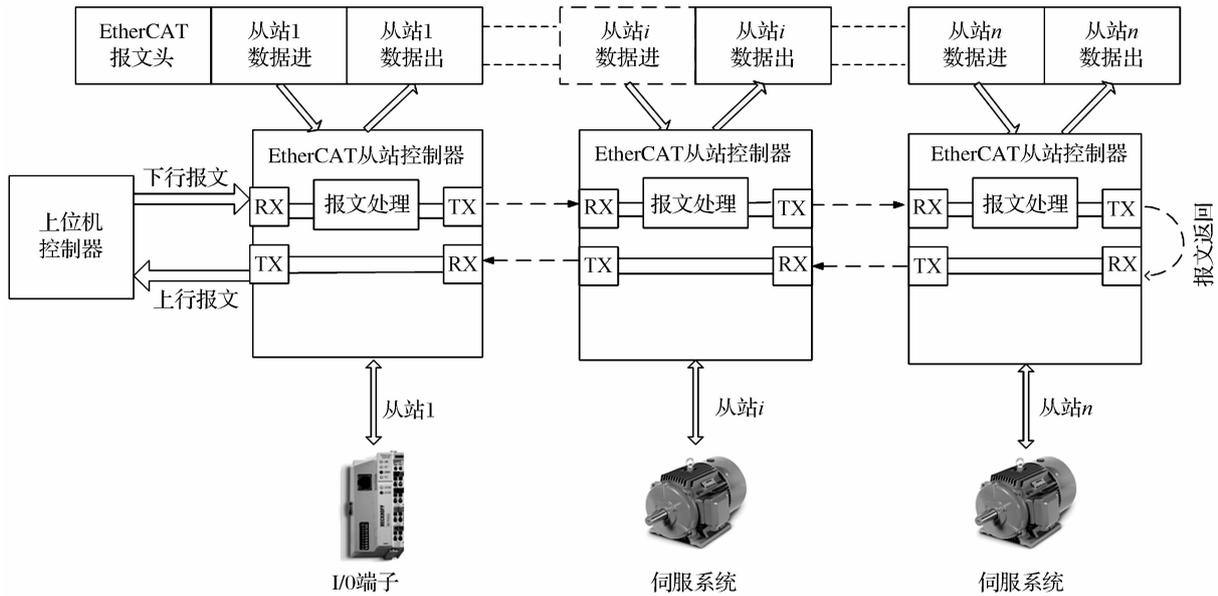


图 1 EtherCAT 通信原理

### 2 双电机速度联动系统设计

#### 2.1 系统整体方案设计

基于 EtherCAT 以太网通信的双电机速度联动控制系统主要由上位机主控制器、EtherCAT 总线、下位机伺服驱动器和伺服电机 4 部分组成,其系统结构如图 2 所示。EtherCAT 主站采用个人 PC,并使用德国 Beckhoff 公司开发的组态软件(the

windows control and automation technology, TwinCAT)作为主站软件,从站由 EtherCAT 从站控制器(EtherCAT slave controller, ESC)来实现<sup>[12]</sup>。系统采用线型拓扑结构,主站 PC 与伺服驱动器线型串联,结构简单,同时也能够保证网络达到较高的实时控制精度,而且驱动器上集成 EtherCAT 通信所需要的接口,无需再附加交换机。

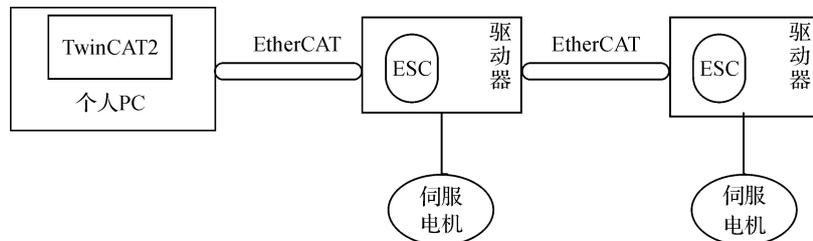


图 2 系统结构

在该控制系统中,个人 PC 运用 TwinCAT 2 软件的组态配置构成 EtherCAT 系统主站,通过

EtherCAT 总线与集成 EtherCAT 从站控制芯片的伺服驱动器连接,上位主控制器通过 EtherCAT 总线给

从站驱动器发送报文指令,控制伺服电机的运动。

### 2.2 系统联动控制方案设计

为了实现双轴同步驱动,本文目前采用了并行方式进行同步控制,其原理框图如图 3 所示。两个伺服驱动器的给定速度都来自于同一个信号  $\omega^*$ , 每个运动轴在该信号的控制下并行工作,互不干扰。负载扰动作用在电机这一侧,当两电机侧出现负载扰动不平衡的情况时,采用该方式一般会出现同步误差。本文采用的伺服驱动器在传统通用伺服方案的基础上,引入了扰动辨识及前馈补偿的算法<sup>[13]</sup>,由于负载扰动不平衡而产生的同步运行误差可以通过伺服驱动器内部的扰动辨识及前馈补偿算法来减小,从而提高双轴运行的同步精度。

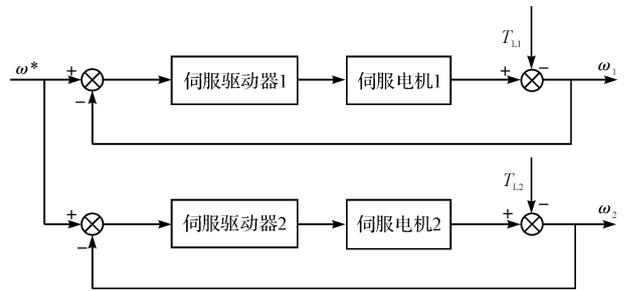


图 3 并行同步控制原理

针对实际应用中中对双电机协同运动的不同需求,本文设计了单轴速度运行,双轴速度同步运行以及双轴速度交替运行 3 种控制模式,并用 TwinCAT PLC Control 软件编写 PLC 控制程序,其 PLC 程序的流程图如图 4 所示。

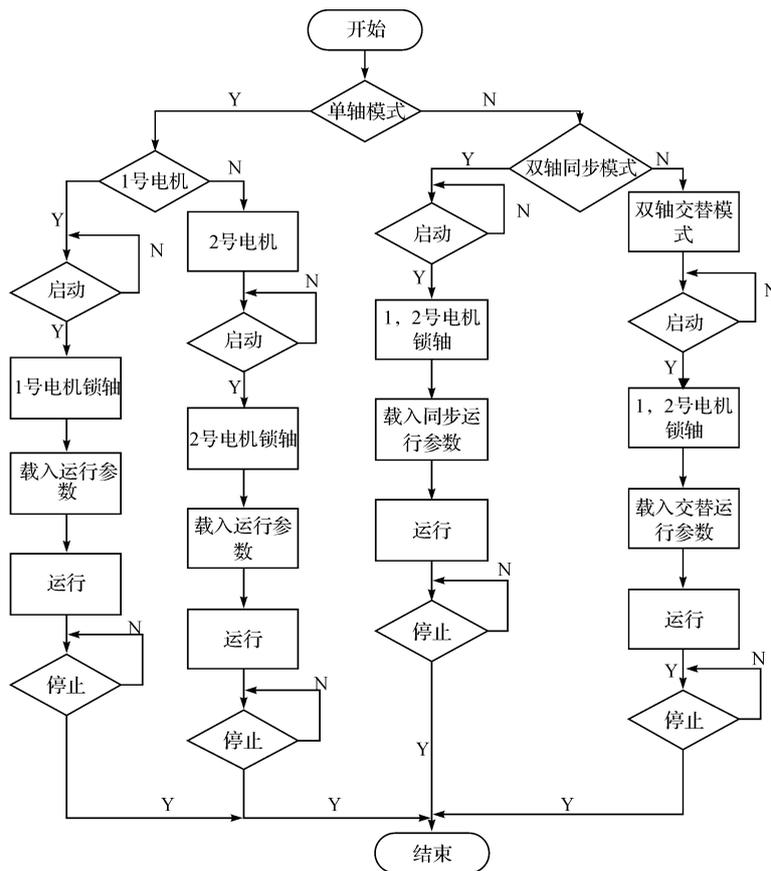


图 4 双电机速度联动控制流程

### 3 实验平台搭建

本文根据设计的系统整体方案,搭建了基于 EtherCAT 通信的双电机联动实验平台,并对所设计的系统进行功能测试,验证系统设计的可行性。系统实验平台如图 5 所示。

在系统实验平台中,主站采用具有 NIC 网卡的笔记本电脑,安装 TwinCAT2 软件,操作系统为

Windows7。从站部分采用某品牌的两个伺服驱动器,该驱动器集成了赫优讯公司的 netX50 从站控制芯片和 EtherCAT 标准接口,能够通过网线直接与个人 PC 相连接。其中 1 号伺服驱动器作为 EtherCAT 从站 1,其型号是 PRONET-04A,配套电机采用的是额定功率为 400 W 的 EMJ-04ASA22 型电机,其额定扭矩为 1.27 N·m,最大转速可达 3000 r/min,编码器是分辨率为 131072 P/R 的 17 位绝对

值编码器。2号伺服驱动器作为 EtherCAT 从站 2，其型号是 PRONET-02A，配套电机采用的是额定功率为 200 W 的 EMJ-02ASA22 型电机，其额定扭矩为 0.64 N·m，最大转速同样可以达到 3000 r/min；编码器也是分辨率为 131072 P/R 的 17 位绝对值编码器。个人 PC 与两台伺服驱动器之间都通过网线相连接，个人 PC 通过网线同时给两个驱动器发送报文指令，控制双轴伺服联动运行。编码器的信号通过 485 总线反馈到驱动器中，经过 CPLD 模块处理、解码后转换成电机当前的速度值和位置值，通过串口通信以数据地址的形式存入 DSP 中，然后上位机通过串口和 EtherCAT 网络从 DSP 中读取这些数据。

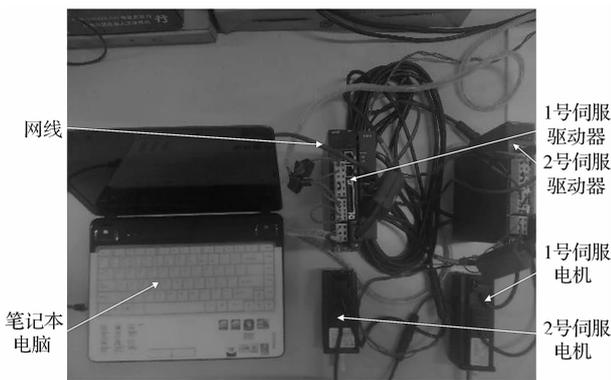


图 5 系统实验平台

### 4 软件系统设计

TwinCAT 软件是德国 Beckhoff 公司开发的基于 PC 平台和 Windows 操作系统的自动控制软件。它能够把工业 PC 或者嵌入式 PC 变成一个功能强大的 PLC 或者 Motion Controller 控制生产设备。本文设计了一种基于 TwinCAT 2 软件的系统控制平台，其整体结构如图 6 所示。TwinCAT 2 软件运行在 Windows 系统下，占用 CPU 的一个实时内核，把 PC 转变成一个实时控制器，实现硬件 PLC 的功能<sup>[12]</sup>。

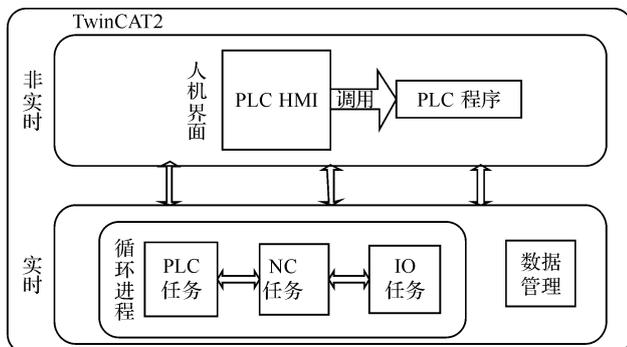


图 6 基于 TwinCAT2 的系统控制平台

系统控制平台中 PLC 任务采用 ST 语言和 LD 语言编写电机的使能模块和双轴速度控制模式程序，并将控制指令发给 NC 任务。NC 任务实现变量与实际电机轴的对应关系，执行 PLC 发出的运动控制指令，从而控制电机的运动。IO 任务是进行 EtherCAT 从站的扫描和管理，发送控制信号，采集电机编码器的反馈信息<sup>[11]</sup>。人机界面是通过 PLC HMI 编写的可视化界面，主要用于轴运动指令的发送以及各轴运动信息直观地显示，本系统设计的可视化界面如图 7 所示。

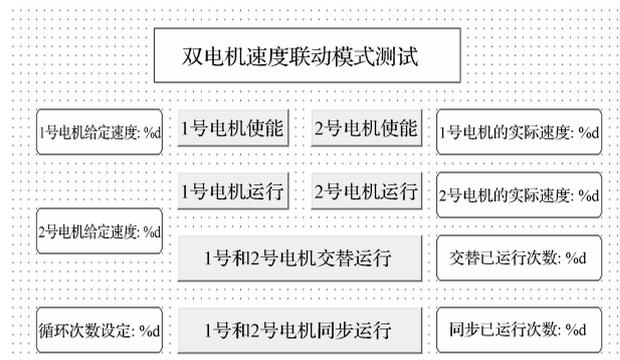


图 7 可视化界面

### 5 实验测试与分析

在实验中，首先对驱动器的参数进行设定，通过驱动器上的面板操作器进入参数设定模式，分别将两个伺服驱动器的 EtherCAT 通讯节点参数 Pn704 设置为 1 和 2；EtherCAT 通讯波特率设置为 1Mbps，总线类型设置为 EtherCAT 总线；并且将 EtherCAT 从站信息文件“ProNetsz.xml”放入 TwinCAT2 软件安装目录下 EtherCAT 文件夹中，完成对从站信息的配置。然后运行 TwinCAT2 软件，对 3 种速度控制模式进行测试，并使用 TwinCAT Scope View 软件采集速度反馈波形进行分析。由于实验条件的限制，本文仅对伺服电机在未接负载的情况下进行了测试，没有进行带载或更复杂工况下的测试。

#### 5.1 单轴速度控制模式波形分析

在单轴速度控制实验中，运动轴的给定速度设为 1000 r/min，运行时间设为 10 s，分别对两运动轴进行了单轴速度控制模式测试。单轴速度模式中 1 号轴的实际运行速度波形如图 8 所示。从图 8 波形中可以看出，电机的实际反馈速度曲线在 1000 r/min 处波动，瞬态最大转速是 1030 r/min，瞬态最小转速是 980 r/min，超调量是 3.00%，转速波

动率是 2.49%,波动很小,运行时间为 10 s,说明该驱动器在 EtherCAT 总线通信的情况下能够稳定地

接收来自 TwinCAT2 上位机软件的控制命令并驱动电机平稳运行,速度误差小。

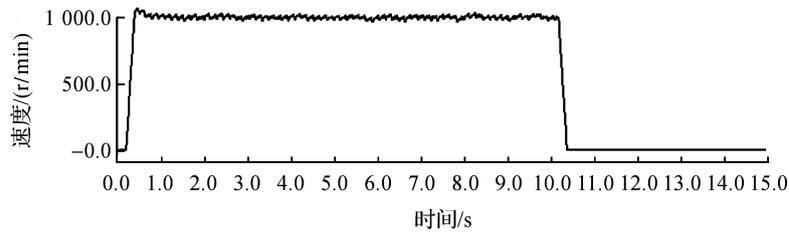
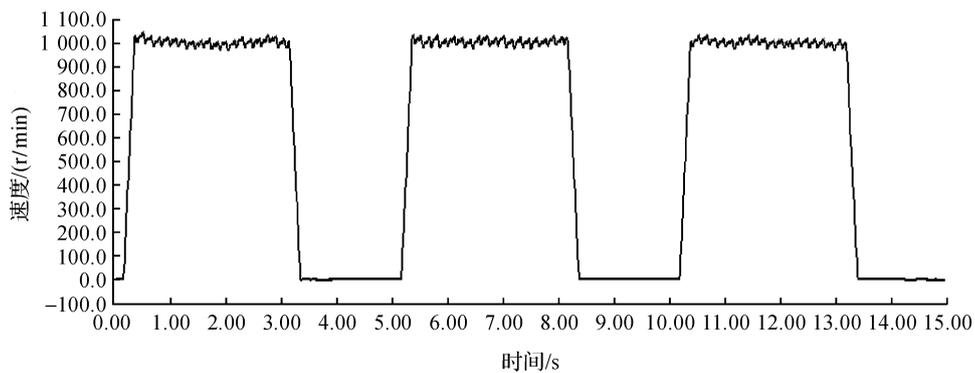


图 8 1 号轴实际运行速度波形

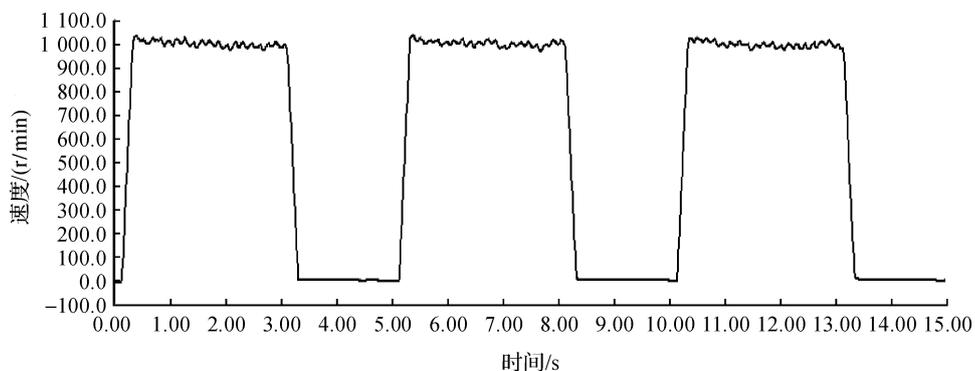
### 5.2 双轴速度同步模式波形分析

在双轴速度同步实验中,1 号轴和 2 号轴的同步速度是 1000 r/min,同步运行 3 s,停止 2 s,如此循环运行 3 次。1 号轴和 2 号轴同步运行时的实际运行速度波形如图 9 所示。从图 9 波形中可以看出,1 号轴和 2 号轴均能够迅速地同时达到同步给定速度 1000 r/min,并且以 1000 r/min 的速度同

步运行 3 s,然后快速停止,循环运行 3 次。1 号轴的瞬态最大速度是 1038 r/min,瞬态最小速度是 983 r/min,超调量是 3.80%,转速波动率是 2.66%;2 号轴的瞬态最大速度是 1025 r/min,瞬态最小速度是 978 r/min,超调量是 2.50%,转速波动率是 2.34%,两轴转速波动较小,两轴能够同时运行,同时停止而且之间的响应时间短,约为 48 s,说明双轴速度同步响应性能良好。



(a) 1号轴实际运行速度波形



(b) 2号轴实际运行速度波形

图 9 双轴同步速度反馈波形

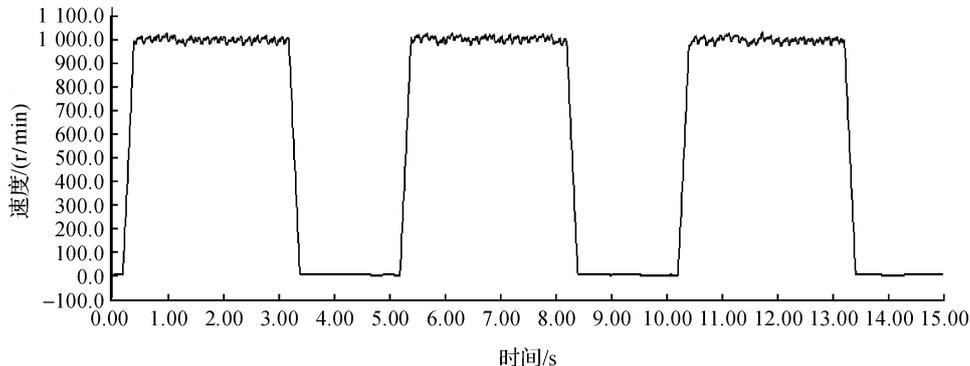
### 5.3 双轴速度交替模式波形分析

在双轴速度交替实验中,1 号轴和 2 号轴的给定速度都是 1000 r/min,1 号轴运行 3 s,2 号轴运行 2 s,两轴交替运行 3 次。1 号轴和 2 号轴交替

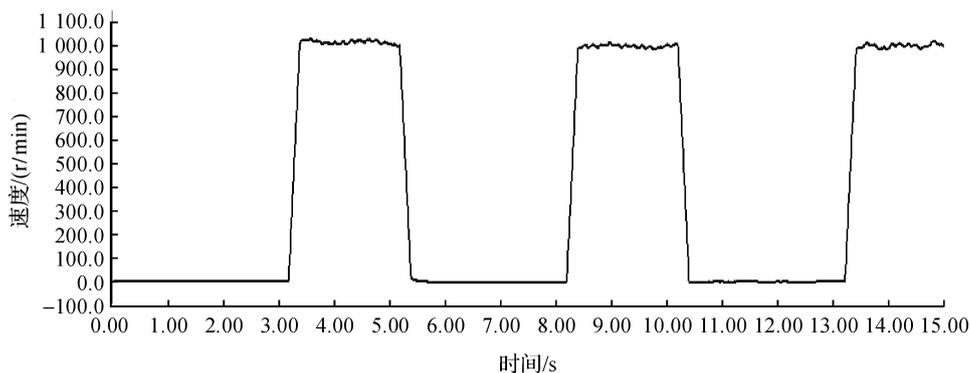
运行时的实际运行速度波形如图 10 所示。从图 10 波形中可以看出,1 号轴和 2 号轴在启动后都能迅速地达到给定转速,1 号轴的瞬态最大速度是 1028 r/min,瞬态最小速度是 985 r/min,超调量是 2.80%,转速波动率是 2.14%;2 号轴的瞬态最大

速度是 1020 r/min,瞬态最小速度是 980 r/min,超调量是 2.00%,转速波动率是 2.00%,两轴的实际速度波动较小,能够平稳运行。两轴的交替

运行 3 次。在交替变化时,一轴停止到另一轴运行中间的响应时间极短,约为 90 s,说明双轴速度交替响应性能良好。



(a) 1号轴实际运行速度波形



(b) 2号轴实际运行速度波形

图 10 双轴交替速度反馈波形

## 6 结 语

本文设计了一种基于 EtherCAT 以太网通信的双电机驱动控制系统。阐述了 EtherCAT 的工作原理,根据 EtherCAT 通信原理构建了主站系统和从站系统;在 TwinCAT2 软件上设计编写了 3 种双电机速度联动控制程序,并根据系统方案搭建了双电机速度联动的实验平台,进行了速度联动控制模式下的性能测试与分析。实验结果表明:在本系统设计的速度联动控制模式下,电机的运行状态平稳,能够按照给定的时间和速度运行,响应时间短,速度误差小,较适合应用于响应时间要求较高的工业场合。该系统结构简单,拓扑灵活,可以在 EtherCAT 总线上增加多个伺服驱动器,从而实现对多台伺服电机的速度联动控制。本文由于条件限制,没有对系统在带载工况下进行分析,还有待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 徐杰,金海,鲁文其. 基于 CAN 总线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,2015,33(2):209-213.

- [2] 周炎涛,张舜,黄庆,等. 基于 EtherCAT 多轴伺服运动控制系统的同步性能研究[J]. 科技导报,2012(30):28-29.
- [3] 张楨,赵君,刘卫华,等. EtherCAT 总线分布式多电机控制研究[J]. 电子科技,2014,27(6):106-112.
- [4] EtherCAT 技术组. EtherCAT: 技术介绍及发展概貌[J]. 国内外机电一体化技术,2006,9(6):17-22.
- [5] 魏亚鹏,韩卫光. 实时工业以太网技术的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2013(7):49-53.
- [6] 于小玉,李钟琦. EtherCAT 技术的蓬勃发展: 访 EtherCAT 技术协会主席 MartinRostan 先生[J]. 中国仪器仪表,2014(11):32-33.
- [7] 姚胜东. 工业以太网现场总线 EtherCAT 的应用[J]. 仪表技术,2014(8):4-6.
- [8] 毕孚自动化设备贸易(上海)有限公司. EtherCAT 助力沈阳机床实现 i5 智能数控机床[J]. 国内外机电一体化技术,2015(3):45-46.
- [9] 王维建. 工业以太网 EtherCAT 技术的原理及其实现[J]. 微计算机信息,2010(13):51-52.
- [10] 刘艳强,王健,单春荣. 基于 EtherCAT 的多轴运动控制器研究[J]. 制造技术与机床,2008(6):100-103.
- [11] 林思引. 基于 EtherCAT 工业以太网的伺服运动控制系统设计[D]. 广州:华南理工大学,2013:12-14.

- [12] 刘文涛,张杰,翁正新. 基于 EtherCAT 总线的多轴运动控制系统[J]. 测控技术,2014,33(10):79-81. 主溜板双伺服同步驱动控制策略[J]. 机械工程学报,2013,49(21):31-37.
- [13] 鲁文其,胡旭东,史伟民,等. 基于扰动补偿算法的拉床

## Design of Double-motor Speed Linkage Control System Based on EtherCAT Communication

DONG Hanqing<sup>1</sup>, ZHOU Jianhua<sup>2</sup>, LU Wenqi<sup>1,3</sup>, WANG Quanwu<sup>1</sup>

(1. Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Xizi Otis Elevator Co., Ltd., Hangzhou 310019, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of multi-axis motion control system designed with the pulse simulation method such as low response speed, bad stability and synchronicity, this paper puts forward a double-motor speed linkage control system scheme based on EtherCAT communication. we design three kinds of speed linkage control modes by TwinCAT2 software, set up an experiment platform for double-motor speed linkage control experiment platform based on EtherCAT communication and carry out test and analysis of the three kinds of speed linkage control modes. The experimental results show that the control system has fast response speed and good dual-axis synchronous control performance, which can meet the requirements of the devices needing speed linkage.

**Key words:** EtherCAT; TwinCAT; speed control; multi-axis linkage; control system

(责任编辑:康 锋)