

# 基于 EtherCAT 多轴伺服运动控制系统的同步性能研究

周炎涛, 张舜, 黄庆, 周亚明

湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082

**摘要** 随着现代科技的发展, 工业领域中应用多轴伺服联动的场合越来越多, 对其同步性能的要求将会越来越高。将 EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) 技术引进到多轴伺服控制系统中可进一步提高系统的同步性能。为使 EtherCAT 技术更好地应用到多轴伺服运动系统中, 本文阐述了 EtherCAT 的基本通信原理, 介绍了基于 EtherCAT 的多轴伺服运动控制系统的基本结构以及从站工作原理, 并从延迟计算、偏移补偿和漂移补偿 3 个方面重点分析了 EtherCAT 的同步性能, 最后试验表明其同步性能可很好地满足多轴伺服运动控制领域的应用。

**关键词** EtherCAT; 多轴; 伺服运动控制系统; 同步性能

**中图分类号** TP273

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.h1.009

## Synchronization of the Multi-axis Servo Motion Controller System Based on the EtherCAT

ZHOU Yantao, ZHANG Shun, HUANG Qing, ZHOU Yaming

College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

**Abstract** The multi-axis servo linkage sees more and more applications in the industrial field, and its synchronization is an urgent issue. The introduction of the EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology) into the multi-axis servo motion system could improve the synchronization of the system. In order to enhance the performance of a multi-axis servo motion system with the EtherCAT, this paper first discusses the EtherCAT's basic communication theory, and the basic structure of a multi-axis servo motion controller system, based on the EtherCAT, and the theory of the slave. Then, we analyze the synchronization of the EtherCAT by calculating the delay, the compensating offset and the compensating drift. At last, an experiment is carried out, which shows that, the EtherCAT's synchronization can satisfy the requirements of the multi-axis motion controller system very well.

**Keywords** EtherCAT; multi-axis; servo motion controller system; synchronization

### 0 引言

德国倍福自动化有限公司 (Beckhoff Automation GmbH) 基于标准的以太网技术提出了 EtherCAT 技术。该技术是一种开放式的以太网协议, 集成了现场总线的通讯优势和以太网资源的资源优势, 创新地将两者结合起来, 并成为国际标准 (IEC/PAS62407)。灵活的拓扑结构、简易的使用方法和低成本的研发, 使 EtherCAT 成为目前工业自动化新技术和伺服控制领域的一个亮点。在多轴伺服运动系统中, 各运动轴之间同步性能的好坏直接关系到项目的成败, 而 EtherCAT

技术使之可以在该领域发挥极其重要的作用。现阶段国内外对 EtherCAT 技术的研究应用还处于起步阶段, 而对其最重要特征之一的时钟同步性能也没有充分开发。本文针对 EtherCAT 技术的时钟同步性能进行了研究分析, 以期今后相关技术的研究应用提供参考。

### 1 EtherCAT 工作原理

EtherCAT 是一种采用主从式结构的实时工业以太网技术, 与其他自动化网络技术相比, EtherCAT 具有弹性的拓扑

收稿日期: 2012-06-25; 修回日期: 2012-08-23

基金项目: 广东省部产学研结合项目 (2011b090400628)

作者简介: 周炎涛, 教授, 研究方向为数字化系统设计理论及应用、数控技术与装备信息化, 电子信箱: yantao\_z@hnu.cn

结构、简单的配置和突出的性能,几乎可以无限制地利用网络资源,同时由于其极佳的兼容性和开放性,所有因特网设备可以通过一个转换开关得以在 EtherCAT 网络里进行整合。

EtherCAT 没有重新定义新的以太网帧结构,而是在标准以太网帧结构中使用了一个特殊的标准类型 0x88A4,采用这种方式可以使控制数据直接写入以太网帧内,并且可以与遵循其他协议的以太网帧在同一网络中并行<sup>[1]</sup>。一个 EtherCAT 数据帧由 EtherCAT 数据帧头和若干个 EtherCAT 子报文组成,数据帧结构如图 1 所示。

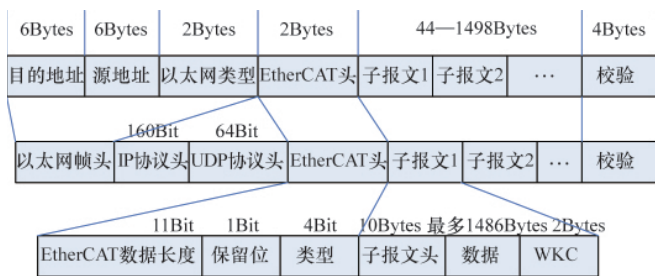


图 1 EtherCAT 帧结构

Fig. 1 Structure of EtherCAT frame

数据帧首先由主站控制发出,遍历所有从站,而从站在数据帧经过时分析寻址到本站报文,根据报文头中的命令读入数据或者写入数据到报文中的指定位置,并把该报文的工作计数器(WKC)加 1,表示该数据已处理。数据帧在访问位于整个系统逻辑位置的最后一个从站后,按照原来路径的反方向依次经过所有从站最后回到主站。

## 2 基于 EtherCAT 的多轴伺服运动控制系统

本文采用一主多从结构的多轴伺服运动控制系统,实现多轴之间的同步协调控制。该设计以 PC 机为主站,由从站接口控制器和微处理器 DSP 芯片构成从站的线型结构网络。图 2 是基于 EtherCAT 网络的高实时性多轴伺服运动控制系统框图。其中,主站 PC 利用 EtherCAT 网络周期性地发送电流、速度、位置等指令给微处理器 DSP,从而控制伺服驱动设备;伺服设备的工作状态信息由检测机构送回 DSP,然后通过 EtherCAT 网络反馈给 PC 机主站,从而实现对伺服驱动设备

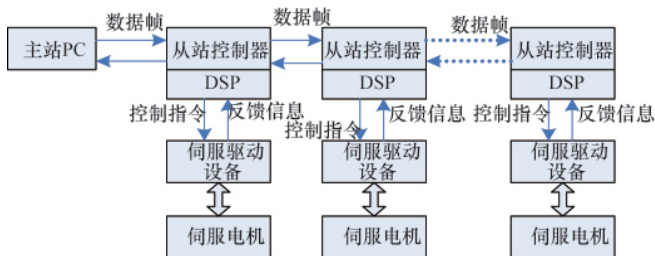


图 2 基于 EtherCAT 的多轴伺服运动控制系统框图

Fig. 2 Block diagram of multi-axis servo motion controller system based on EtherCAT

的控制。由于 EtherCAT 技术具有良好网络性能和数据传输能力,系统能够有效地对伺服系统状况进行实时监控,从而大大提高了系统的数据传输效率<sup>[2]</sup>。图 3 为多轴伺服运动控制系统的从站工作原理。



图 3 多轴伺服运动控制系统从站工作原理

Fig. 3 Slave working principle of multi-axis servo motion controller system

## 3 同步性能分析

主站完全掌控所有从站的同步进程<sup>[3]</sup>。EtherCAT 拥有的一个非常重要的功能就是分布时钟(Distributed Clock, DC)机制。分布时钟可以使所有 EtherCAT 设备使用相同的系统时间,从而控制各设备任务的同步执行。

网络中具备 DC 时钟功能的从站在主站的控制下同步于一个参考时钟<sup>[4]</sup>。一般来说,将主站之后的首个拥有 DC 时钟功能的从站作为参考时钟从站,参考时钟提供整个网络的系统时钟,其他从站时钟和主站都要同步于参考时钟。在分析时钟同步时,要计算数据帧的传播延迟时间、从站本地时钟漂移和本地时钟偏移。

### 3.1 延迟时间的计算

延迟计算中需要考虑的要素见表 1。传输延迟计算分析见图 4。

表 1 延迟计算参数

Table 1 Delay calculation parameters

参数	描述
$T_{PX}$	从站 X 的处理延迟时间
$T_{EX}$	从站 X 的转发延迟时间
$T_{DIFF}$	处理时间与转发时间差,即 $T_{PX}-T_{EX}$
$T_{WXY}$	从站 X 和从站 Y 之间的线传输延迟时间
$T_{X0}, T_{X1}$	从站 X 端口 0、端口 1 接收时间
$T_{Offset, AX}$	从站 X 时钟与参考时钟之间的初始偏移
$T_{XY}$	从站 X 到从站 Y 之间的传输延时

从站 C 和从站 D 之间的传输延迟时间为从站本身处理延迟时间和线传输延迟时间的累加,即

$$T_{CD} = T_{rc} + T_{wcd}$$

$$T_{DC} = T_{rc} + T_{wcd}$$

认为各从站的处理延迟时间都是相等的,大约有 10ns,即

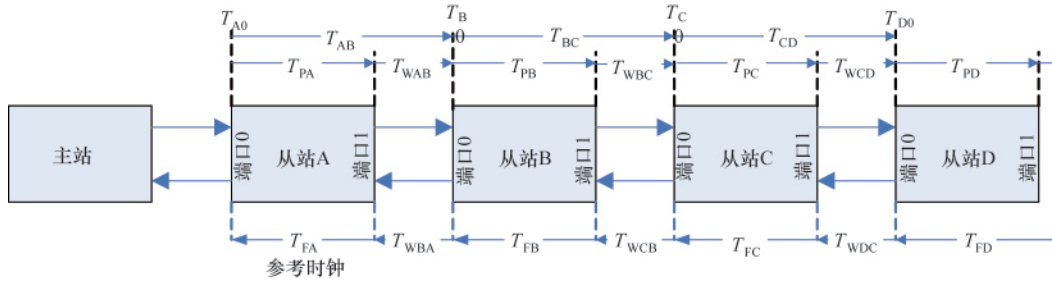


图4 传输延迟计算分析

Fig. 4 Propagation delay calculation and analysis

$$T_{CD} = T_{DC} = T_P + T_{WCD}$$

从站 C 端口 1 接收帧的时间为

$$T_{C1} = T_{CD} + T_{DC} + T_{DC}$$

所以从站 C 和从站 D 之间的延迟时间为

$$T_{CD} = (T_{C1} - T_{D0}) / 2$$

从站 B 与从站 C 之间的延迟时间为

$$T_{BC} = T_{PB} + T_{WBC}$$

$$T_{CB} = T_{PC} + T_{WCB}$$

由于各从站的处理时间是相等的(即  $T_{PB} = T_{PC} = T_{PD}$ ), 又有  $T_{Diff} = T_{PC} - T_{PB}$ , 所以可以得到

$$T_{CB} = T_{BC} - T_{Diff}$$

从站 B 端口 0 和端口 1 接收时间的关系为

$$T_{B1} = T_{B0} + T_{BC} + T_{CD} + T_{DC} + T_{CB}$$

最后得到从站 B 和从站 C 之间的延迟时间为

$$T_{BC} = ((T_{B1} - T_{B0}) - (T_{C1} - T_{D0}) + T_{Diff}) / 2$$

同理, 可以得出从站 A 和从站 B、C、D 之间的延迟时间为

$$T_{AB} = ((T_{A1} - T_{A0}) - (T_{B1} - T_{B0}) + T_{Diff}) / 2$$

$$T_{AC} = T_{AB} + T_{BC}$$

$$T_{AD} = T_{AB} + T_{BC} + T_{CD}$$

### 3.2 偏移补偿

系统启动时, 各从站的本地时钟和参考时钟的初始状态是不一致的, 为了在所有设备中实现同样的系统时间, 必须由主站计算参考时钟和各从站之间的时钟偏移

$$T_{Offset\_AB} = T_{B0} - T_{A0} - T_{Delay\_AB}$$

同理, 可以求出

$$T_{Offset\_AC} = T_{C0} - T_{A0} - T_{Delay\_AC}$$

$$T_{Offset\_AD} = T_{D0} - T_{A0} - T_{Delay\_AD}$$

偏移时间被写入到各从站的系统时钟偏移寄存器。每个 DC 从站利用本地时间和本地偏移时间值计算本地系统时钟副本, 即

$$T_{Local\ Copy\ of\ SysTem\ Time} = T_{Local\ Time} + T_{Offset}$$

这个时间可以用作产生同步信号以及锁存信号的时间戳。

### 3.3 漂移补偿

在系统运行过程中, 由于各 DC 从站和参考时钟所使用的时钟源不一样, 会导致时钟运行的不同步, 也就是它们的计时周期会存在一定的漂移。

在计算完传输延迟和进行偏移补偿后, 主站利用 ARMW 命令或 FRMW 命令周期性地控制并将参考时钟内的系统时间  $T_{Sys\_ref}$  分配到各从站时钟<sup>[5]</sup>。每个从站的时钟控制环在数据帧的 SOF (帧首位) 到达时锁存本地时钟时刻  $T_{Local\ Time}$ , 结合前面得出的传输延迟时间和偏移时间计算出漂移量, 即

$$\Delta T = (T_{Local\ Time} + T_{Offset} - T_{Delay}) - T_{Sys\_ref}$$

如果  $\Delta T$  为正数, 说明本地时间比系统时间快, 需要调慢运行; 如果  $\Delta T$  是负数, 说明本地时间比系统时间慢, 需要调快运行。本地时钟寄存器每 10ns 更新 1 次, 当  $\Delta T > 0$  时, 每 10ns 增加 9, 反之则是每 10ns 增加 11, 最后实现时钟漂移补偿, 调整原理如图 5 所示。在整体实现实时性过程中, 首先主

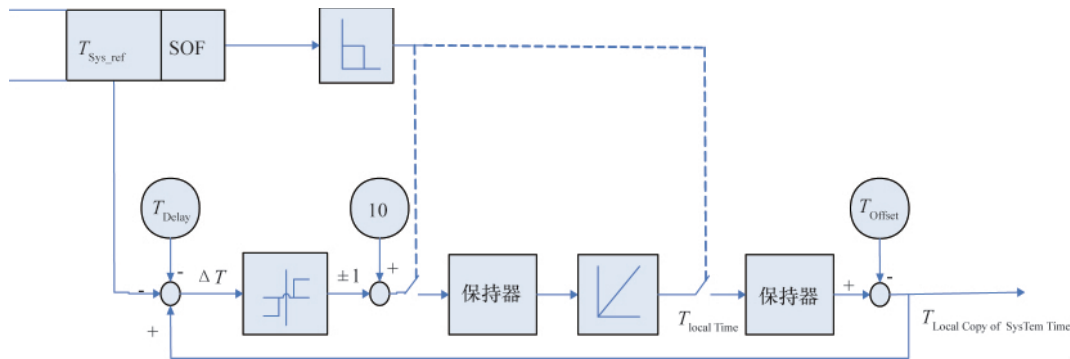


图5 时钟漂移补偿示意图

Fig. 5 Schematic diagram of clock drift compensation

站通过读数据链路层状态寄存器得到整个网络的拓扑结构,然后计算线路的延迟时间,把偏离值写到从站的系统偏离寄存器中,最后利用 ARMW 和 FRMW 命令字周期性地来进行漂移补偿。分布时钟单元又可以产生 2 个同步信号输出 SYNC0 和 SYNC1 或 2 个输入信号 (LATCH0 和 LATCH1),同步输出信号可以用来启动数据采样或者执行某个程序,输入信号可以对外部事件进行精确的时间锁存,最后实现同步过程。

#### 4 试验分析

图 6 为试验系统图, EtherCAT 主站与工业控制计算机相连,也可以将控制计算机直接作为主站, EtherCAT 从站接收来自主站的控制指令,并控制变频器的 2 个驱动接口控制伺服电机按照主站的指令正常工作,同时把位置值及参数通过 EtherCAT 网络传回主站。其中,永磁同步电机 PMSM (Permanent Magnet Synchronous Moto) 为立式安装,并通过扭矩功率测量仪最终与磁粉加载器相连,通过调节负载扭矩可实现电机负载运行。

本文基于 EtherCAT 的多轴伺服运动控制系统的本站采用 Windows XP 系统的 PC 机,使用 TwinCAT 软件,通信数据

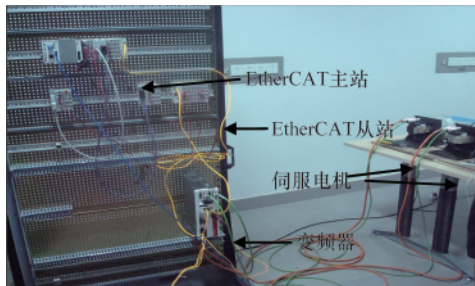


图 6 试验系统

Fig. 6 Test system

线采用 100BASE-TX 双绞线,从站使用 AX5203 伺服驱动器,2 个电机为 0.56kW 的 AM3041 交流永磁同步电机(轴 3 为虚拟轴)。

图 7 显示的是驱动器的配置,其中可以看到设定有位置、速度和电流控制,实际应用中采用位置控制方式的情况最多,这里采用位置控制的方式进行试验。

图 8 为试验结果数据曲线图,其中纵坐标为速度(rad/s)、位置(rad),横坐标为时间(s)。图 8 中分别显示了速度曲线、位置曲线和测量标尺线,可以看到约在 5.37s 之前,系统在读

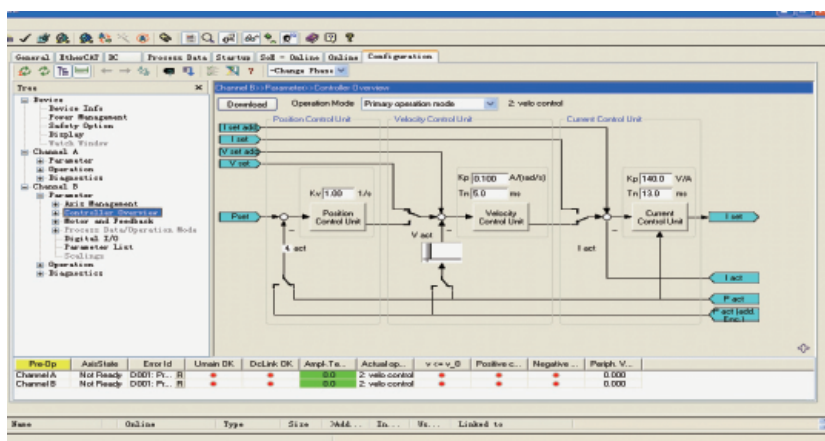


图 7 驱动器配置

Fig. 7 Drive configuration

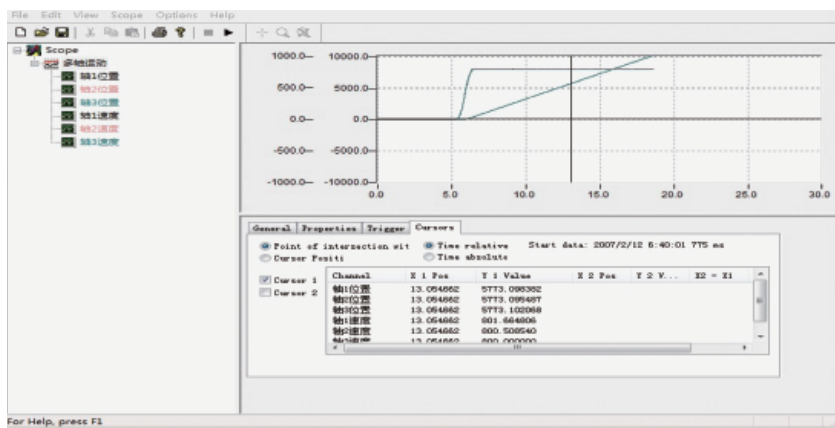


图 8 试验结果

Fig. 8 Test results

取数据,速度为 0,之后到 6.42s 时电机开始运转,速度逐渐上升,到达 800rad/s 时保持恒定。在测量过程中,选取最大误差时刻横坐标为 13.054662s,轴 1 即时位置为 5773.098382rad,轴 2 即时位置为 5773.095487rad,误差为 0.000050148%。由于采用的是位置控制方式,通过反馈功能,主机能够根据从站的轴位置实时情况调整速度值进而实现位置同步。

## 5 结论

本文提出了基于 EtherCAT 的多轴伺服运动控制系统,着重通过分析 EtherCAT 数据传输的时间延迟、偏移补偿和漂移补偿的过程阐述了其高同步性能原理。试验证明将 EtherCAT 技术引入到多轴伺服运动控制系统中能够实现伺服系统高精度同步功能,从而为实现伺服系统的同步协调,研究伺服系统同步协调控制策略,实现同步协调的高速网络技术和网络控制产生数据传输时延、数据包时序错乱、数据包丢失等问题的研究提出了解决方法,为提高性能的控制算法提供了条件,为在印刷机械、火炮传动等领域中发挥技术优势提供了进一步的参考。

## 参考文献 (References)

- [1] 单春荣,刘艳强,郇极.工业以太网现场总线 EtherCAT 及驱动程序设计[J].制造业自动化,2007,29(11):79-82.  
Shan Chunrong, Liu Yanqiang, Huan Ji. *Manufacturing Automation*, 2007, 29(11): 79-82.
- [2] Rehnman M, Gentzell T. Synchronization in a force measurement system using EtherCAT [C]// Automation Networks Department, ABB Emerging Technologies and Factory Automation. Hamburg: ABB Corporate Research, 2008: 1023-1030.
- [3] 郇极,刘艳强.工业以太网现场总线 EtherCAT 驱动程序设计及应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.  
Huan Ji, Liu Yanqiang. Design and application of industry internet fieldbus EtherCAT drive program [M]. Beijing: Beihang University Press, 2010.
- [4] Cena G, Bertolotti I C, Scanzio S, et al. Evaluation of EtherCAT distributed clock performance [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 20-29.
- [5] 阮倩茹,王辉,施大发,等.基于 EtherCAT 的高性能交流伺服控制系统设计[J].科技导报,2010,28(20):58-61.  
Ruan Qianru, Wang Hui, Shi Dafa, et al. *Science & Technology Review*, 2010, 28(20): 58-61.

(责任编辑 孙秀云,马骁骁)

·学术动态·



# “第八届全国仿真器学术年会”征文

中国系统仿真学会仿真器专业委员会与中国航空学会自控分会仿真技术专业委员会拟于 2013 年 8 月中上旬在昆明联合召开“第八届全国仿真器学术年会”,同时召开专业委员会全体会议。

征稿范围:(1) 仿真系统体系结构;(2) 仿真系统建模理论与方法;(3) 仿真系统环境(包括视景、运动、仪表、声音等)仿真技术;(4) 仿真系统控制技术;(5) 仿真系统支撑环境;(6) 仿真系统标准及规范;(7) 仿真系统的应用及维护;(8) 仿真系统的可信度研究;(9) 半实物仿真技术;(10) 嵌入式仿真技术;(11) 自然环境(SNE)仿真技术;(12) 虚拟现实、可视化技术;(13) 仿真支撑平台技术;(14) 仿真模拟训练系统相关技术;(15) 体系对抗仿真及评估技术;(16) 作战仿真系统及应用;(17) 仿真标准化技术;(18) 其他。

摘要提交日期:2013 年 4 月 15 日

论文提交日期:2013 年 5 月 15 日

联系电话:13552328963

电子信箱:fzqhy2013@126.com

大会网站:www.china-simulation.com/xueshudongtai/huiyizhengwen/

2012-05-30/364.html