

高集成度 EtherCAT 从站设计与多轴控制的研究

党选举, 谢桢宝, 姜 辉, 伍锡如

(桂林电子科技大学 电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004)

摘 要: EtherCAT 是目前最高速的实时工业以太网技术, 逐渐应用于工业控制领域. 为满足复杂运动控制系统高集成度需求, 文章采用高集成度的 EtherCAT 从站芯片 LAN9252 设计了一种新的从站方案, 同时面向多关节机械臂运动控制, 设计了一个从站控制两个轴的控制方案. 针对一个从站控制两个轴时引起的数据传输量加大的问题, 在应用层对运动控制协议 CiA402 进行了裁剪、移植, 节省了成本并能达到很快的数据刷新周期. 该文分析了软硬件设计流程, 通过实验对该从站进行一系列测试, 实验结果证明该从站 I/O 通信正常, 同步性能良好, 一个从站在控制两个轴的情况下能正常稳定工作.

关键词: EtherCAT; 工业以太网; 高集成度; 同步; CiA402

中图分类号: TH166; TG659

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)06-0097-04

Design of Highly Integrated EtherCAT Slave and Research on Multi-axis Control

DANG Xuan-ju, XIE Hui-bao, JIANG Hui, WU Xi-ru

(School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: EtherCAT is the most high-speed real-time industrial Ethernet technology, and is gradually used in industrial control field. In order to meet the high integration requirements for complex motion control systems, 1) a new slave scheme is designed for using a highly integrated EtherCAT slave chip LAN9252, 2) For the multi-joint manipulator motion control, a control scheme of two-axis controlled by slave station is designed. In order to solve the problem of the increasing transmission data caused by the control of two-axis, the motion control protocol CiA402 is cut and transplanted at application layer, saves the cost and achieves a fast data refresh cycle. The design process of hardware and software are analyzed. A series of tests are carried out on the slave station through experiments. The experimental results show that the I/O communication of the slave station is normal and the synchronization performance is good. A slave station can operate normally and stably under the control of two-axis.

Key words: EtherCAT; industrial Ethernet; highly integrated; synchronize; CiA402

1 引言

随着自动化技术的高速发展, 传统的现场总线技术已经不能满足工业通信的需求, 将实时以太网技术应用于工控领域是一个重要的发展方向. 为满足复杂工业系统的要求, 对工业以太网的实时性提

出了更高的要求. EtherCAT 是由德国倍福公司提出的最新工业以太网技术与协议, 它通过修改底层以太网协议, 由实时 MAC(Media Access Control)接管通信控制, 彻底避免报文冲突, 有较高的实时性^[1-2]. EtherCAT 因其配置简单、拓扑结构灵活、良好的实时性和稳定性、传输速度快等优势受到了广

收稿日期: 2017-09-09; 修回日期: 2017-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(61263013, 61603107); 广西信息科学试验中心项目(20130110); 广西自然科学基金(2016GXNSFDA380001; 2015GXNSFAA139297)

大厂商的青睐。

文章设计了基于 LAN9252 和 STM32 的 EtherCAT 从站控制板, 在应用层实现了一个从站控制两个轴的设计, 通过所搭建的测试平台进行测试分析。

2 EtherCAT 简介

EtherCAT 运行原理如图 1 所示, 由主站主动发起下行报文开启网络通信, 当数据帧流经从站时, 从站利用双端口存储器完成与主站的数据交换, 从报文中提取出发给自己的输出数据并将输入数据写到对应的位置, 当完成数据交换后把报文转发给下一个从站设备。从站按各自在环路上的顺序读写报文, 最后一个从站处理完毕后将数据帧返回给主站, 主站读取子报文中的工作计数器, 通过与预期值比较来判断该子报文是否被正确操作。

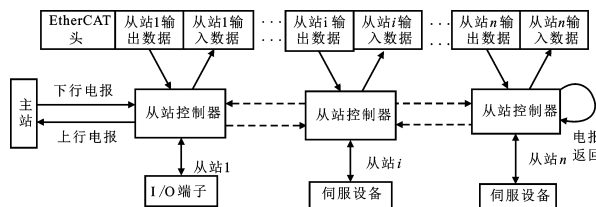


图 1 EtherCAT 运行原理

当多个从站接入 EtherCAT 网络时, 让所有从站采用相同的系统时间从而达到同步控制的效果显得尤其重要。EtherCAT 采用分布时钟技术 (DC), 以第一个接入网络的从站作为参考时钟同步其它从站和主站, 对各从站的时钟漂移、偏移和数据传输延时进行严格计算并进行补偿, 并产生同步输出信号控制各从站进行同步执行。

3 EtherCAT 从站硬件设计

EtherCAT 从站主要由两部分组成, 从站协议控制器 (ESC) 和应用层微处理器^[3,4]。该文采用高集成度的从站协议芯片 LAN9252 实现数据链路层和物理层通信, 选用 STM32F407ZET6 作为主控芯片完成应用层功能。

3.1 高集成度从站控制器 LAN9252

LAN9252 是美国 Microchip 公司设计的 EtherCAT 从站控制器, 这款芯片高度集成化, 仅有 64 个管脚。LAN9252 内部集成了两路以太网 PHY, 不需要外部单独接 PHY 芯片, 节省了硬件成本, 带有 3 个现场存储器管理单元 (Fieldbus Memory Management Unit, FMMU)、4 个 SyncManager (同步

管理器)、4KB 的双端口 RAM (DPRAM), 同时芯片支持分布式时钟 (DC)^[5,6] 和看门狗, 可提供精准的不同步信号。

3.2 从站硬件接口设计

LAN9252 支持 3 种过程数据接口 (PDI 接口), 16 位数字量 I/O 接口、SPI 串行通信接口、8/16 位 HBI 接口 (主机总线接口), 为提高通信速度, 该设计方案采用 STM32F407 特有的新型存储器扩展技术 (FSMC) 与 ESC 进行 16 位并行数据传输。从站整体结构如图 2 所示, 由从站控制器和微处理器两个模块组成, 两模块之间通过 FSMC 和 16 位 HBI 接口相连^[7]。为进一步满足应用层的需求, 设计了 AD、DA、LCD、串口等硬件接口。

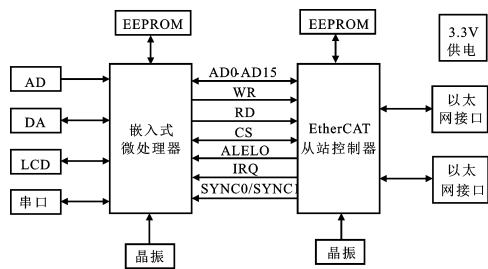


图 2 EtherCAT 从站系统框图

4 EtherCAT 从站程序设计

从站程序设计主要包括两个部分, 从站微处理器程序设计和从站控制器程序设计。从站控制器程序设计就是将写好的硬件配置文件 XML 脚本烧录到对应的 EEPROM 中^[8]。从站微处理器程序设计首先要完成底层驱动设计, 完成 STM32 和 LAN9252 之间的通信, 并在此基础上实现 EtherCAT 协议, 完成应用层任务。

4.1 从站驱动程序设计

在 EtherCAT 应用程序之间有两种数据交换形式, 周期性过程数据通信和非周期性数据通信, 它们分别采用缓冲区和邮箱的方式进行数据传输。在非周期性通信模式下, 主要处理邮箱通信和运行状态改变两件非周期性事件。在从站程序设计中, 采用中断的方式处理周期性事件, 以查询的方式处理非周期性事件, 从站程序总体流程图如图 3 所示。

4.2 状态机设计

EtherCAT 状态机负责整个程序运行状态的切换, 整个状态转换图如图 4 所示, 共有五种工作状态, 从图中可知, 每进行一次状态切换就代表开启或关闭一项服务, 各状态之间的切换只能按顺序进行,

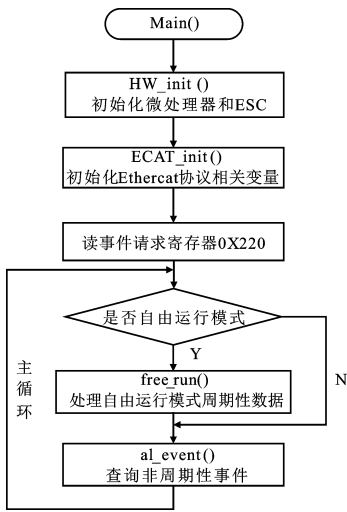


图 3 从站程序流程图

不可越级转换。

主站发起状态转换请求,从站根据程序运行状态响应主站请求,如果状态切换成功,将转化结果保存在从站状态变量中,若转换失败,从站会报错并给出错误代码^[9]。

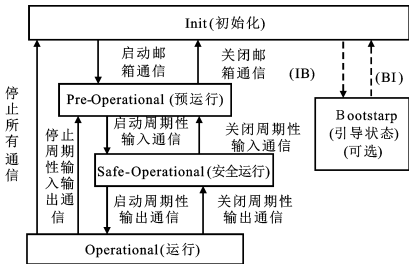


图 4 EtherCAT 状态转化关系

5 一个从站控制两轴设计

5.1 伺服控制行规 CiA402

CANopen 是为基于 CAN 总线系统所制定的应用层协议,是主流的运动控制协议. EtherCAT 作为一种新型的网络通信技术,为实现一定的兼容性, EtherCAT 在应用层支持 CANopen 协议,并对此协议进行了一定的扩充,形成了现在的伺服控制协议 CoE(CANopen over EtherCAT)^[2]. 同时 CoE 也沿用了 CANopen 标准应用行规, CiA402 是多种标准应用行规中的一种,面向伺服和运动控制. 该文在基于 CiA402 控制协议的基础上设计了一个从站控制两个轴的方案.

5.2 一个从站控制两轴方案

在关节机器人等运动控制中,大都采用一个从站控制一个轴,该文设计了一个从站控制两个轴的

方案,同时保证从站正常运行,该文设计的一个从站控制两轴的工作原理如图 5 所示.

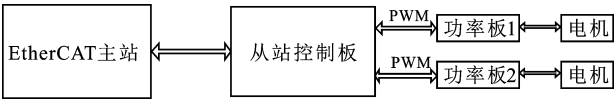


图 5 一个从站控制两轴的工作原理

5.2.1 CiA402 协议的裁剪

一个从站控制多个轴时对应的数据传输量定会成倍的增加,势必引起数据传输时间的延长,为解决这个问题,在 CiA402 框架的基础上对该协议进行了一定的裁减并移植到程序中. 根据运行模式和需求配置必须的数据对象,裁减用不到的数据对象,使得整个协议更加精简,通信效率大幅度提高,更小的同步周期也能完成数据的刷新和输出操作.

5.2.2 DC 同步的优化

当有多个从站设备相连时, EtherCAT 采用分布时钟技术使所有 EtherCAT 设备采用相同的系统时间,从而控制所有设备同步执行. 从站 DC 同步运行模式是在同步信号到达时从站开始进行数据的拷贝,然后再执行输出操作. 为提高从站的同步性能,该从站在程序设计中 DC 同步进行了优化,如图 6 所示, T_1 为本地微处理器从 ESC 复制数据并计算输出数据的时间, T_2 为输出硬件延时, T_3 为输入锁存偏移时间. 数据帧必须比 SYNC 信号提前 T_1 时间到达,从站在数据收发事件到来时进行数据的拷贝,等到 DC 同步信号到来时直接执行应用层输出操作,提高从站同步性能,同时为防止在执行应用层输出的过程中被外部中断打断,在同步中断处理函数中屏蔽所有外部中断信号.

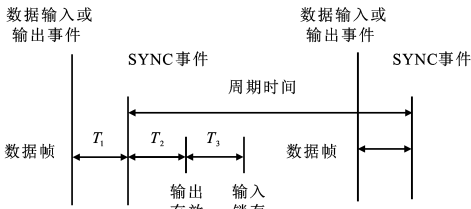


图 6 优化的同步于 SYNC 事件的本地周期

5.3 一个从站控制两轴的程序设计

为保证各轴独立运行互不干扰,在程序中分别为每个轴设置不同的状态变量,并分配独立的过程数据对象(PDO)和服务数据对象(SDO).

程序在完成硬件和 EtherCAT 协议初始化后会调用 CiA402_Init() 函数初始化各个轴的状态变量及数据对象,并为对象词典分配入口地址. 每一个轴

最多可以分配 0X800 个数据对象,在对第二个轴进行分配时会自动在第一个轴的基础上偏移 0X800.当 EtherCAT 在安全运行或者运行状态时会调用 402 状态机完成各轴工作状态的转化,将各轴切换到工作状态.

在 Mainloop() 函数中通过查询的方式处理非周期性事件,采用中断的方式处理周期性事件.在数据收发事件到来时(PDI 中断)立刻执行数据的拷贝,在 DC 信号来之前完成主从站间的数据交换,当 DC 同步信号到来时执行应用层输出,整个流程框图如图 7.

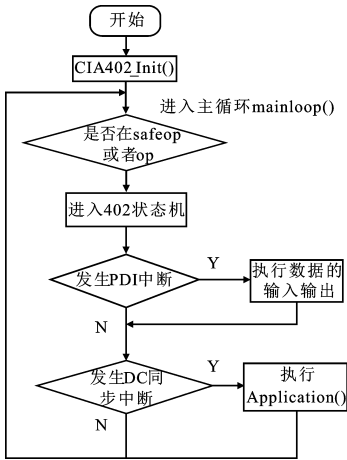


图 7 402 控制框图

6 从站性能测试分析

为测试该从站工作性能,采用德国倍福公司的 TwinCAT 软件和该公司的 CX2020 主站搭建本次实验测试平台,分别进行 I/O 通信测试、从站间同步性能测试、一个从站控制两个轴测试.

6.1 I/O 开关量测试

在 TwinCAT 软件上运行一个 DC 周期为 200 μ s 的任务,周期性的对某开关量写入高电平和低电平,用示波器观察到的从站板对应的 I/O 电平值如图 8 所示.反复按动从站 I/O 开关量,可从 TwinCAT 软件中看到 IO 口电平变化,如图 9 所示.由此可知主从站之间 I/O 通信正常.

6.2 同步性能测试

为对从站板的同步性能进行测试,在上述测试平台下,采用一主两从的拓扑结构,采用两块自行设计的 LAN9252 从站板接入到 EtherCAT 网络中,主站 DC 周期设置为 250 μ s,利用示波器观察从站 1 和从站 2 的同步信号 SYNC0,并对该信号保存如图 10 所示,从图中可看到两从站间同步信号误差约为

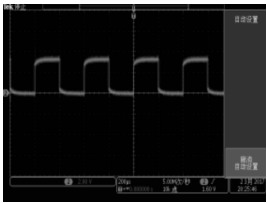


图 8 示波器中电平变化图

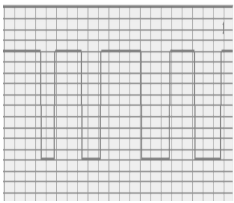


图 9 TwinCAT 中电平变化

5 ns,信号抖动在 10 ns 以内,可见该从站板的同步性能良好.

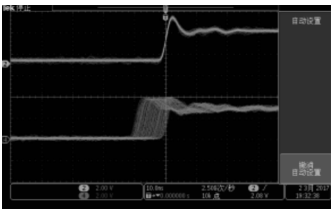


图 10 同步信号

6.3 一个从站控制两轴测试

对从站控制两轴进行测试,模拟电机实际运行过程,在 DC 同步周期为 200 μ s 的条件下,轴一和轴二使用周期性同步速度模式,对两轴目标位置均设为 10 000 mm,速度设为 50mm/s,经实验表明各自的 PDO 和 SDO 通信良好,工作正常.

7 结束语

该文详细介绍了 EtherCAT 原理;设计了一种基于高集成度从站控制芯片 LAN9252 的 EtherCAT 从站,节省了硬件空间,为 EtherCAT 从站开发提供了一个新方案,并分析了该从站软硬件设计流程;面向多关节机械臂,在应用层对运动控制协议 CiA402 进行了裁剪、移植,设计了一个从站控制两个轴的方案.采用倍福公司的 CX2020 主站搭建了实验平台,测试分析了从站的工作性能,实验证明一个从站控制两个轴能够正常稳定工作.在 250 μ s 的 DC 同步运行周期下,该从站 I/O 通信正常,同步信号误差约为 5 ns,抖动在 10 ns 以内,证明该从站性能良好.

(下转第 105 页)

准方法[J]. 微电子学与计算机, 2017, 34(2): 123-127.

[3] Shamir A. Segmentation and shape extraction of 3D boundary meshes(state of the art report), [C] // In Eurographice, Vienna,Austria,2006;137-149.

[4] Anand A, Koppula H S, Joachims T, Saxena AContextually guided semantic labeling and search for three-dimensional point clouds. InI J R R,2012(0):1-16.

[5] A. J. Trevor, S. Gedikli, R. B. Rusu, and H. I. Christensen, "Efficient organized point cloud segmentation with connected components," Semantic Perception Mapping and Exploration (SPME), 2013.

[6] 朱晓鑫, 谢翔, 李国林. 一种大场景有序点云的快速、准确分割方法[J]. 微电子学与计算机, 2016,33(11): 45-49.

[7] R. B. Rusu, S. Cousins, 3D is here: Point Cloud Library (PCL), in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Shanghai, China, 2011.

[8] Richtsfeld A, Mrwald T, Prankl J, et al. Learning of perceptual grouping for object segmentation on RGB-D data[J]. Journal of visual communication and image representation, 2014, 25(1): 64-73.

[9] Choi C, Christensen H I. RGB-D object tracking: A particle filter approach on GPU[C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013; 1084-1091.

[10] ückermann A, Haschke R, Ritter H. Realtime 3D segmentation for human-robot interaction[C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2013; 2136-2143.

作者简介:

周炳南 男,(1992-),硕士研究生.研究方向为嵌入式系统及智能机器人. E-mail:13260564932@163.com.

闵华松 男,(1969-),博士,教授,博士生导师.研究方向为嵌入式系统及智能机器人.

康雅文 女,(1992-),硕士研究生.研究方向为嵌入式系统及智能机器人.

(上接第 100 页)

参考文献:

[1] 繆学勤. 论六种实时以太网的通信协议 [J]. 自动化仪表, 2005 , 26 (4) ;1-6.

[2] 郇级,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.

[3] 李文虎,李叶松,王江城. 伺服驱动器 EtherCAT 接口设计[J]. 电气传动,2011,41(7):51-55.

[4] 邹靖波,熊皑. EtherCAT 从站硬件设计方法[J]. 微型机与应用, 2015, 34(07):27-29.

[5] Cena G, Bertolotti I C, Scanzio S, et al. Evaluation of EtherCAT Distributed Clock Performance[J]. Industrial Informatics IEEE Transactions on, 2012, 8(1): 20-29.

[6] 李伟光, 李晓曦, 余漳,等. 基于 EtherCAT 实时以太网的伺服运动控制系统设计[J]. 现代制造工程, 2014 (3):100-104.

[7] Rostan M, Stubbs JE, Dzilno D. EtherCAT enabled advancedcontrol architecture[C]// Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. IEEE Xplore, 2010;39-44.

[8] 刘喆, 郇极, 刘艳强. 基于 XML 的 EtherCAT 工业以太网协议解析技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(9): 1086-1090.

[9] 左振领, 何方, 李霄. 基于 STM32 的 EtherCAT 从站的设计与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016 (7):1-3.

作者简介:

党选举 男,(1965-),博士,教授,博士生导师.研究方向为非线性系统建模、工业现场总线. E-mail:xjd69@163.com.

谢桧宝 男,(1992-),硕士研究生.研究方向为工业现场总线.

姜辉 男,(1987-),硕士,讲师.研究方向为非线性系统建模与智能控制.

伍锡如 男,(1981-),博士,副教授.研究方向为机器人控制、神经网络、智能控制.