

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.11.018

# 面向伺服运动控制的实时 EtherCAT 主站开发\*

庆鹏展<sup>1,2</sup>, 刘建群<sup>1,2</sup>, 李 强<sup>1,2</sup>, 高伟强<sup>1,2</sup>

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广东工业大学 广东省微纳加工技术与装备重点实验室, 广东 广州 510006)

**摘要:**针对实时工业以太网 EtherCAT 在伺服运动控制中的应用问题,对嵌入式 Linux 系统实时化、EtherCAT 主站的构建、伺服电机控制模式等方面进行了研究,提出了将 Linux + Xenomai 实时系统和 IGH EtherCAT 主站协议栈相结合的主站软件方案。基于 AM4377 的硬件平台,构建了嵌入式 EtherCAT 主站,开发了主站应用程序,阐述了总线配置流程,实现了周期性实时任务;设计了基于 EtherCAT 的伺服运动控制系统,实现了主站对多轴伺服的运动控制,并进行了主站周期性实时任务处理性能测试,以及机床加工实验。研究表明:构建的嵌入式实时 EtherCAT 主站能准确执行周期性实时任务,具有良好的实时性,可以满足伺服运动控制系统的性能要求。

**关键词:** EtherCAT; 实时工业以太网; 嵌入式系统; 伺服运动控制

中图分类号: TH16; TH-39

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2019)11-1216-05

## Real-time EtherCAT master development for servo motion control

QING Peng-zhan<sup>1,2</sup>, LIU Jian-qun<sup>1,2</sup>, LI Qiang<sup>1,2</sup>, GAO Wei-qiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory for Micro/Nano Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Aiming at the application problems of real-time industrial Ethernet EtherCAT in servo motion control, the real-time embedded Linux system, the construction of EtherCAT master and the servo motor control mode were studied. The master software solution combining Linux&Xenomai real-time system and IGH EtherCAT master protocol stack was put forward. The embedded EtherCAT master was built based on the AM4377 hardware platform, the application program of the master was developed, the bus configuration flow was expounded, and the periodic real-time task was realized. The servo motion control system based on EtherCAT was designed and the multi-axis servo motion control was realized. Moreover, the master periodic real-time task performance test and machine tool processing experiments were carried out. The results indicate that the embedded real-time EtherCAT master can accurately perform periodic real-time tasks, and has good real-time performance, which can meet the performance requirements of servo motion control system.

**Key words:** EtherCAT; real-time industrial Ethernet; embedded system; servo motion control

## 0 引 言

EtherCAT 是一种将以太网与现场总线技术相结合的工业总线,具有带宽利用率高、实时性能强、拓

扑结构灵活、传输速率高、成本低等优势,并且满足伺服运动控制系统对稳定性、快速响应、同步性和精度等方面的要求,被越来越多地应用到了运动控制领域<sup>[1]</sup>。

收稿日期:2019-03-22

基金项目:广东省科技计划资助项目(2016B090911001);广东省联合培养研究生示范基地项目(2017XJJD-06)

作者简介:庆鹏展(1989-),男,河南平顶山人,硕士研究生,主要从事基于 EtherCAT 的多轴运动控制系统方面的研究。E-mail:zpzsky@163.com

与此同时,嵌入式微处理器正朝着高性能、智能化的方向发展,其主频越来越高,接口功能越来越丰富,而价格则越来越低<sup>[2]</sup>。从软件层面看,实现 Linux 系统实时化以及构建 EtherCAT 主站的开源软件发展越来越成熟,使得在嵌入式 Linux 系统上构建实时 EtherCAT 主站变得很容易实现。文献[3-4]研究了基于 Xenomai 的嵌入式 Linux 系统,可以满足 1 ms 以内的实时性要求,但是没有开发 EtherCAT 主站;文献[5]基于 EtherCAT 的多轴运动控制系统,实现了 2 ms 的数控插补周期,但是还不能满足高速高精度数控加工的系统响应时间要求。

本文将结合 Linux + Xenomai 实时系统与 IGH EtherCAT 主站协议栈,基于高性能 AM4377 处理器 (ARM Cortex A9) 的硬件平台,开发嵌入式实时 EtherCAT 主站,并将其应用于基于 EtherCAT 的多轴伺服运动控制系统。

## 1 实时 EtherCAT 主站设计

Linux 系统本身实时性较差,需要对其进行实时性改进,以满足多轴伺服运动控制的实时性要求。本文采用 Xenomai 实时拓展对 Linux 进行实时化改造,然后在实时化的 Linux 系统上利用 IGH EtherCAT Master 开源组件构建了实时 EtherCAT 主站。

实时 EtherCAT 主站软件结构如图 1 所示。

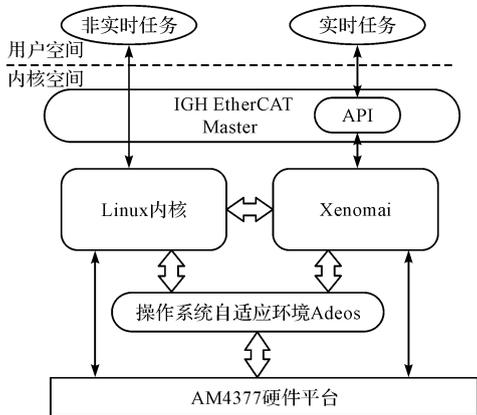


图 1 实时 EtherCAT 主站软件结构

Xenomai 是基于 Linux 内核构建的一个实时辅助内核,实时辅助内核与 Linux 内核作为 ADEOS (adaptive domain environment for operating system) 系统中的两个不同的域,每个域有独立的地址空间和类似于进程、虚拟内存等的软件抽象层,这些资源可以由不同的域共享<sup>[6]</sup>。

实时辅助内核优先级高于 Linux 内核,在实时辅助内核工作期间, Linux 不能运行,而如果在 Linux 运行期间,

发生需要实时辅助内核处理的事件,实时辅助内核可以抢占 linux 运行,使实时辅助内核的实时性得到保障<sup>[7-8]</sup>。

IGH EtherCAT Master 是一套基于 Linux 的开源 EtherCAT 主站组件,包括网卡驱动、内核空间的主站模块和应用程序、用户空间的 EtherCAT 工具和支持库<sup>[9]</sup>。其支持 Xenomai 实时扩展,并提供了 Xenomai 应用程序接口,易于编写实时应用程序。

## 2 主站应用程序设计

### 2.1 应用程序流程

主站应用程序主要包括系统配置模块和任务运行模块,如图 2 所示。

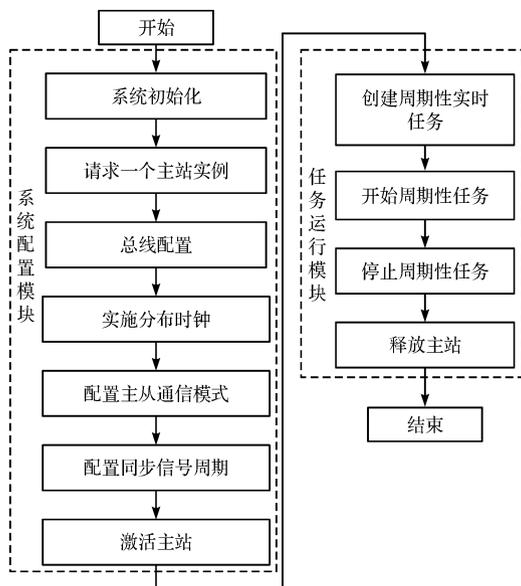


图 2 主站程序流程

首先要对系统初始化,请求一个主站实例进行实时任务操作。总线配置需要调用申请的主站实例,在主站与从站之间建立数据交换的通道。实施分布时钟的目的是使各个从站设备的时间同步,以实现控制各个从站设备任务同步执行。EtherCAT 协议规定了主站和从站有多种通信模式,可以根据不同应用需求选择相应的主从站通信模式。同步信号用于触发从站任务的执行,本研究伺服控制系统采用周期性过程数据通信模式,所以需要设置合适的同步信号周期以满足控制需要。

系统配置完成之后,主站可以创建并运行周期性实时任务,实现周期性实时控制各从站设备执行任务。

### 2.2 总线配置流程

总线配置主要包含周期性过程数据 PDO 配置和非周期性过程数据 SDO 配置两个部分,可以通过调用主站软件提供的应用程序接口实现,如图 3 所示。

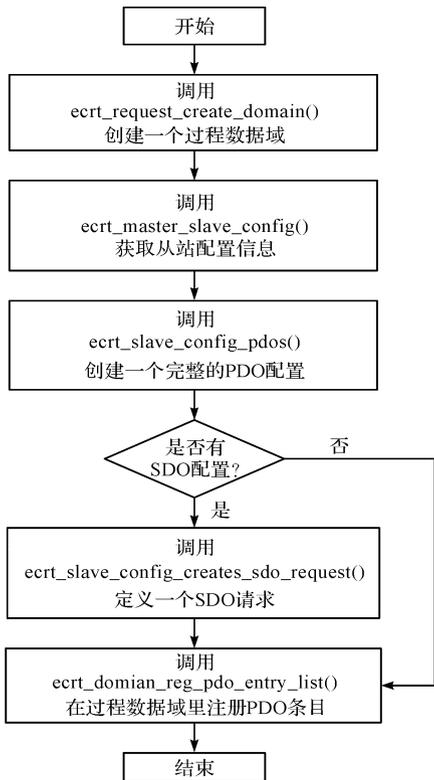


图3 总线配置流程

在周期性任务运行过程中,应用程序可以通过 PDO 映射实现主站与从站之间的数据交换,创建过程数据域可以实现对 PDO 映射的集中管理。主站需要获取从站设备厂商提供的从站配置信息,按照 EtherCAT 主站协议栈要求的数据格式创建 PDO 配置数据,以便在过程数据域进行注册使用。

进行周期性实时数据传输任务需要对 PDO 进行配置,如果系统需要进行非周期性数据通信,可以通过接口函数定义 SDO 请求,例如读取从站配置信息。

### 2.3 周期性实时任务实现

周期性实时任务包括主站周期性实时生成控制指令,数据控制从站设备执行周期性任务,以及实现主从站周期性过程数据交换。

总线配置完成后激活主站,通过调用 Xenomai 应用程序接口函数 `rt_task_create(...)` 创建周期性实时任务;调用 `rt_task_start(...)` 开始执行实时任务;调用 `rt_task_delete(...)` 可以结束实时任务。

## 3 伺服运动控制应用

多轴伺服运动控制系统采用一主多从的网络拓扑结构,一个主站通过 RJ45 网线线性连接多个从站,每个从站(伺服控制器)控制一个伺服电机,伺服运动控制系统架构如图 4 所示。

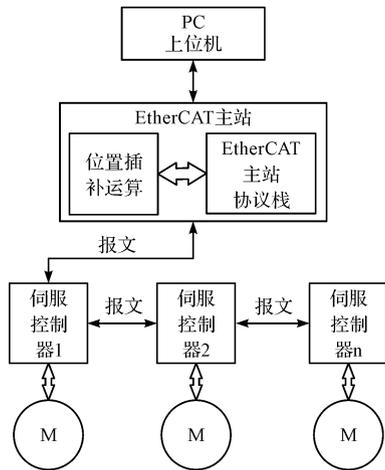


图4 伺服控制系统架构

PC 用于运行上位机软件,提供人机交互界面。构建的嵌入式 EtherCAT 实时主站作为系统主站模块,使用支持 EtherCAT 协议通信的的台达 ASDA-A2-E 系列伺服驱动单元作为从站模块。系统采用周期性过程数据通信模式。主站设置为 DC 模式,DC 模式下主站本地时间以及所有从站设备的本地时钟时间均同步于参考时钟时间,保证了总线上各个设备的时间一致性。从站设置为同步于分布时钟同步信号(SYNC)模式,主站运行周期与从站 SYNC 信号周期相等<sup>[10]</sup>。

设置伺服电机运行模式为周期性同步位置(csp)运行模式。上位机将输入位置控制数据进行预处理,发送给嵌入式 EtherCAT 主站。主站位置插补模块计算出的各个伺服电机的目标位置控制数据,主站协议栈负责将目标位置控制数据按照 EtherCAT 协议打包成 EtherCAT 报文形式,通过 EtherCAT 总线网络发送给各个从站(伺服控制器),伺服控制器对 EtherCAT 报文数据进行解析,将位置控制指令发送给伺服电机,驱动伺服电机运动到目标位置。

## 4 实验及结果分析

### 4.1 主站周期性任务性能分析

伺服运动控制系统的实时性主要体现在对数据进行快速而准确的处理,并及时作出响应上。高速高精度的数控加工领域,要求系统的响应时间在 1 ms 及以下<sup>[11]</sup>。这就要求伺服控制器连续位置命令的周期应该保持固定,且周期越小实时性能越好。

然而由于 EtherCAT 数据帧的传输需要一定的时间,这个周期必须大于数据帧周期,本文采用台达 ASDA-A2 E 系列伺服控制器的默认插补周期 1 ms,作为主站周期性任务周期。

EtherCAT 主站任务周期时间分为两个部分:一部分用于控制运算(如位置控制插补运算),另一部分用于 EtherCAT 数据帧的传输,即过程数据帧周期。EtherCAT 主站周期性的发送和接受过程数据通过调用函数 `ecrt_master_send(...)` 和 `ecrt_master_receive(...)` 实现。设计程序,在发送数据帧时打印出当前时间为  $T_0$ ,接收数据帧时打印出当前时间为  $T_1$ ,则数据帧周期可以由  $T_1 - T_0$  计算得出,通过多次测量可计算出数据帧周期的平均值。

在主频为 1 GHz 的 AM4377 开发板的嵌入式主站,测得过程数据帧周期平均值约为  $(34 \pm 1) \mu\text{s}$ ,占整个插补周期的 0.34%。在 1 ms 主站实时任务运行周期下,理论上还剩余约 966  $\mu\text{s}$  时间可用于控制运算,使用 TI AM4377 处理器(ARM Cortex A9)芯片,主频 1 GHz,2 500 DMIPS,理论上 966  $\mu\text{s}$  可以处理约  $2.4 \times 10^6$  ( $966 * 2 500 *$ ) 条指令,可满足常规位置模式的实时插补运算要求。

#### 4.2 实时任务周期抖动测试

实时任务周期抖动是指系统周期性实时任务的实际任务周期与预设任务周期之间的时间偏差,其可以反映系统周期性执行任务在时间上的准确性和稳定性。

编写测试程序,在周期性实时任务主循环中,每次在实时任务运行的开始时刻打印出当前时间值,采样 100 个数据点进行离线分析。将前、后两次打印的实时任务开始时间相减,可以得到采样实时任务周期,将采样实时任务周期时间值减去预设的实时任务周期时间值(1 ms),即可得到抖动值。

实时任务周期抖动如图 5 所示。

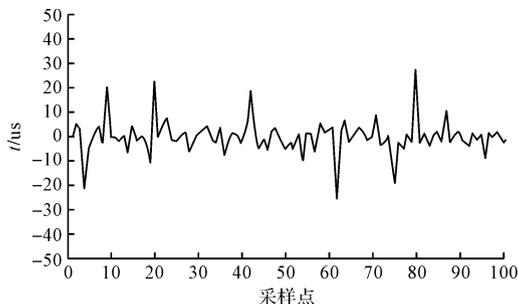


图 5 实时任务周期抖动

从图 5 可以看出:

实时任务周期抖动范围在  $\pm 30 \mu\text{s}$  之间,抖动时间小于整个任务周期的 0.3%,数值很小;说明主站性具有良好的周期性任务执行准确性和稳定性,满足伺服运动控制的实时性要求。

#### 4.3 机床加工试验

本文将开发的嵌入式实时 EtherCAT 主站以及多

轴伺服运动控制系统应用于三轴雕铣机床。

实验采用透明亚克力板作为加工材料,在亚克力板上雕铣出一条正弦曲线,曲线长度为 100 mm,高度为 10 mm,周期长度为 5 mm,铣削深度为 2 mm。

设定刀具转速为 4 000 r/min,加工样品如图 6 所示。

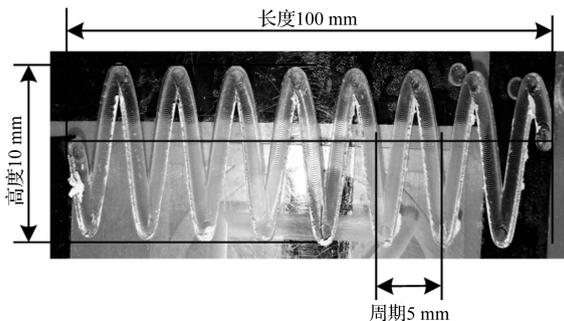


图 6 加工样品

由图 6 可以看出:

实验加工得到的正弦曲线轮廓光滑完整,且实际加工尺寸与设定参数一致。经过设定不同的正弦参数和刀具转速,加工结果均能达到预期的正弦曲线,且加工曲线轮廓平滑完整。这表明开发的主站具有良好的实时性,能够满足三轴雕铣机床的加工性能要求。

## 5 结束语

本研究介绍了嵌入式实时 EtherCAT 主站的实现方式,并将其应用于伺服运动控制系统中,进行了主站周期性任务实时性测试和数据分析。

分析结果显示:在 1 ms 的系统控制任务周期内,数据帧传输周期只占整个任务周期的 0.34% 左右,有足够时间可以完成位置插补运算;系统实时任务周期抖动小于整个任务周期的 0.3%,可以满足伺服运动控制系统的准确性和稳定性要求。

数控机床加工实验结果显示:加工样品轮廓曲线完整光滑,说明开发的 EtherCAT 主站具备良好的实时性能,可以满足伺服运动控制功能的要求。

#### 参考文献(References):

- [1] 李春木,章明众,郑新武,等. EtherCAT 总线在伺服运动控制系统中的应用[J]. 机电工程,2011,28(11):1336-1338.
- [2] 葛科勇,陈坚,傅正财. 基于直接中断触发的 OMAP-L138 双核通信设计[J]. 现代电子技术,2018,41(21):16-20.
- [3] 韩守谦,裴海龙,王清阳. 基于 Xenomai 的实时嵌入式 Linux 操作系统的构建[J]. 计算机工程与设计,2011,32

(1):96-98.

[4] 赵明印,黄道平,刘少君. 基于 Xenomai 的嵌入式 Linux 数控系统平台研究[J]. 测控技术,2013,32(8):119-122.

[5] 谢 锴,颜钢锋. 基于 EtherCAT 的多轴运动控制系统设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2017(2):68-72.

[6] 杨丰瑞,王 兵. 基于 Adeos 的 Linux 实时性改造的研究与实现[J]. 微电子学与计算机,2015,32(3):50-53,58.

[7] PHILIPPE G. Xenomai-implementing a RTOS emulation framework on GNU/ Linux[EB/OL]. [2004-4-1]. <http://www.xenomai.org>.

[8] CEREIA M, BERTOLOTTI I C, SCANZIO S. Performance of a real-time EtherCAT master under Linux [J]. **IEEE**

Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(4): 679-687.

[9] ETHERLAB T. IgH EtherCAT master for Linux[EB/OL]. [2012-12-15]. <http://www.etherlab.org/download/EtherCAT/EtherCAT-1.5-2.pdf>.

[10] 郇 极,刘艳强. 工业以太网现场总 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.

[11] 张克华,马佳航,田林晓,等. 开源 IgH EtherCAT 主站在 LinuxCNC 开放式数控系统中的应用研究[J]. 制造技术与机床,2018(6):191-195.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

庆鹏展,刘建群,李 强,等. 面向伺服运动控制的实时 EtherCAT 主站开发[J]. 机电工程,2019,36(11):1216 - 1220.

QING Peng-zhan, LIU Jian-qun, LI Qiang, et al. Real-time EtherCAT master development for servo motion control[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2019,36(11):1216 - 1220.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1211 页)

推拉( $r$  方向变化)的结构和传动机构进行了分析;对托架进行了优化设计;对 3 种方案的三角支撑架进行了结构设计及成本分析。

结果表明:该柜体结构灵活,柜体占地面积小,空间分配合理,场地利用率可提高 75%,具有较高的实用性,在零售行业的前景看好。

参考文献 (References):

[1] 邓剑云. 无人售卖柜:市场潜力巨大,技术仍有提升空间[J]. 电器,2018(6):38-39.

[2] 刘自成,牟世刚,刘 松. 新型可旋转智能储物柜的研究与设计[J]. 河南科技,2015(21):21.

[3] 柏利春,游有鹏,罗福源. 一种垂直横移式智能立体货柜的设计[J]. 机械与电子,2017,35(3):42-46.

[4] 徐 阳,赵金阳,陈永祥,等. 国产膜片联轴器的技术及应用进展[J]. 流体机械,2010,38(11):30-35.

[5] 卜忠红,刘 更,吴立言. 行星齿轮传动动力学研究进展[J]. 振动与冲击,2010,29(9):161-166,250.

[6] 付稣昇. ANSYS Workbench 17.0 数值模拟与实例精解[M]. 北京:人民邮电出版社,2017.

[7] 孟令新. 设计阶段产品成本控制应对措施[J]. 企业技术开发,2006,25(9):37-39.

[8] 曹 菁. 传统成本核算方法反思与改进[J]. 财会通讯,2010(17):114-115.

[编辑:周昱晨]