

基于 EtherCAT 的关节机器人控制器实现

黄钦宁

广州致远电子股份有限公司

DOI:10.12238/acair.v2i4.10344

[摘要] 随着工业自动化技术的飞速发展,关节机器人在制造业中的应用越来越广泛。EtherCAT(Ethernet for Control Automation Technology)作为一种高性能的工业以太网协议,因其高实时性、灵活性和高精度,成为关节机器人控制系统中的理想选择。本文旨在设计并实现一个基于EtherCAT的关节机器人控制器,以满足现代工业对高效率、高精度和高灵活性的需求。通过对EtherCAT通信协议的研究和关节机器人运动控制算法的设计,本文提出了一种高效的控制器实现方案,并通过实验验证了其性能。

[关键词] EtherCAT总线通讯; 关节机器人

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Implementation of joint robot controller based on EtherCAT

Qinning Huang

Guangzhou Zhiyuan Electronics Co., Ltd.

[Abstract] With the rapid development of industrial automation technology, the application of joint robot in the manufacturing industry is more and more extensive. EtherCAT (Ethernet for Control Automation Technology), as a high-performance industrial Ethernet protocol, is an ideal choice for joint robot control system because of its high real-time, flexibility and high precision. The purpose of this paper is to design and implement a joint robot controller based on EtherCAT to meet the needs of high efficiency, high precision and high flexibility in modern industry. Based on the research of EtherCAT communication protocol and the design of motion control algorithm of joint robot, an efficient controller implementation scheme is proposed in this paper, and its performance is verified by experiments.

[Key words] EtherCAT bus communication; Joint robot

引言

全球机器人产业的发展,最早可追溯至20世纪40年代后期,彼时美国橡树岭国家实验室和美国阿贡国家实验室开始研制控制式机械手,用于搬运放射性材料,算起来至今已有七十多年的演变轨迹。当前,机器人已被广泛应用于生产、生活的各个领域,且随着技术创新的不断迭代,机器人产业发展尽显蓬勃之势,工业和信息化部等印发了《“十四五”机器人产业发展规划》,这加速了我国机器人产业的发展,以应用分类来看,尤以工业机器人、服务机器人等领域发展更为繁荣。

关节机器人以其多自由度、可编程性等特点,在焊接、喷涂、装配、搬运等领域发挥着重要作用。而传统控制系统受限于通信速率、成本和布线复杂性,EtherCAT则以其独特的优势成为关节机器人控制系统的理想选择。随着电子电路及计算机技术的快速发展,机器人控制的集成度要求也越来越高。本文结合机器人控制的发展趋势,探讨EtherCAT在关节机器人控制器中的实现及其实时性要求。

1 EtherCAT技术概述

随着工业控制领域中对智能运动控制技术要求的不断提高,传统的现场总线发展至今已在该领域取得巨大成功,但随着工业控制领域对同步性、实时性、可扩展性、安全性和可靠性要求的日益提高,迫切需要一种能够满足高性能要求的工业控制技术,实时工业以太网中EtherCAT技术的出现对于工业控制领域有着十分重要的意义。EtherCAT总线技术凭借低成本、高性能的优势已广泛应用于工业控制领域。其高带宽利用率,低堆栈延迟,低交换机延迟等特点,近些年被广泛应用于数控机床系统和机器人系统。

EtherCAT通信协议的核心是数据帧的处理。每个数据帧包含多个从站的数据,主站通过发送数据帧来读取或写入从站的数据。数据帧在传输过程中,每个从站都会根据自己的地址和命令对数据进行处理,然后将数据帧传递给下一个从站。这种方式大大减少了通信开销,提高了通信效率。

2 控制器设计与实现

基于EtherCAT的关节机器人控制器设计包括硬件设计和软件设计两个方面。

2.1 硬件设计。关节机器人硬件设计主要包括主站硬件设计和从站硬件设计, 本文主要讲解主站控制器的实现。

关节机器人主控系统的硬件架构设计涵盖了处理器选择、内存配置以及硬件接口规划等关键环节。本文选用了多核异构应用处理器作为核心组件, 该处理器集成了4个64位Arm®Cortex®-A55核心, 运行频率为2GHz, 以及3个Cortex®-R5F核心, 主频达到800MHz。此外, 系统板载了4GB LPDDR4内存、8GB eMMC存储以及32KB FRAM, 这些配置共同确保了系统的高效运作与强大的数据处理能力。

为了满足多样化的自动化应用场景需求, 控制器在硬件接口设计上进行了精心规划:

配备了1个EtherCAT主站接口, 能够实现ms级周期任务控制, 抖动控制在 $\pm 1.5 \mu s$ 以内, 精准驱动伺服设备;

提供了2个以太网接口, 全面支持TCP/IP、ModbusTCP、OPC UA等多种协议, 便于与示教器及服务器进行数据交换;

设有1个RS485接口, 支持ModbusRTU协议;

1个CAN接口, 兼容CANOpen协议;

32个用户I/O端口, 包括16个数字输入(DI)和16个数字输出(DO), 其中输入端口还支持最多2路正交编码或两路脉冲计数功能;

8个系统I/O端口, 分为4路DI和4路DO;

2个USB3.0接口, 提升数据传输速度;

系统采用高稳定性隔离电源设计, 具备掉电检测功能;

实施了多重程序加密措施, 有效保护用户的应用软件知识产权。

系统整体架构图示请参见图1。

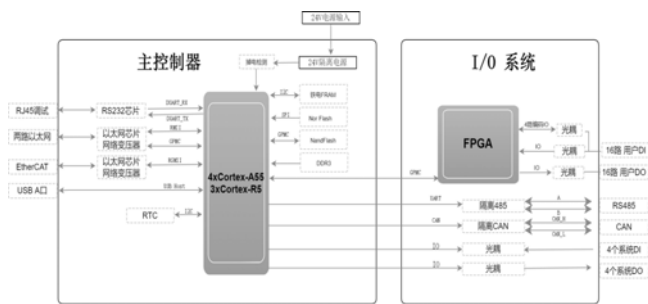


图1 系统框图

2.2 软件设计。运动控制系统负责将编程指令转换为精确的机械动作, 实现对速度、位置和转矩的准确调节。软件的设计涵盖了通信协议的构建、运动控制算法的开发以及用户交互界面的规划。本文聚焦于通信协议构建的具体内容, 特别是关节型工业机器人如何在主控端与从属端之间实施EtherCAT通信协议。对于这类工业关节机器人的控制器而言, EtherCAT的实时性能要求极为严格, 它依赖于一系列复杂的计算公式与参数设置, 这些数学工具和参数协同作用, 确保EtherCAT通信协议能够满足关节机器人对于精确度和即时响应性的高标准要求。以下是一

些关键的算式和参数:

2.2.1 EtherCAT通信周期算式。EtherCAT通信周期(T_{cycle})是评估实时性的关键指标, 它表示主站与从站之间完成一次完整数据交换所需的时间。通信周期越短, 实时性越好。

算式: $T_{cycle} = \text{数据帧传输时间} + \text{数据处理时间}$

其中, 数据帧传输时间取决于网络带宽和拓扑结构, 而数据处理时间则取决于从站的硬件性能和软件设计。

2.2.2 时钟同步精度算式。EtherCAT采用分布式时钟(Distributed Clock, DC)技术, 通过主站发送的广播命令使所有从站的本地时钟与参考时钟同步。时钟同步精度(T_{sync})是评估同步性能的关键指标。

算式: $T_{sync} = |T_{master} - T_{slave}|$

其中, T_{master} 表示主站的时钟, T_{slave} 表示从站的时钟。时钟同步精度要求达到微秒级甚至纳秒级, 以确保各从站能够精确同步执行任务。

2.2.3 传输延迟补偿算式。EtherCAT协议包含补偿和修正传输延迟的机制, 以确保从站时钟的精度。传输延迟(T_{delay})主要包括物理传输延迟和从站处理延迟。

算式: $T_{delay} = T_{phy} + T_{pro}$

其中, T_{phy} 表示物理传输延迟, 即数据包在网络中传输所需的时间; T_{pro} 表示从站处理延迟, 即从站接收到数据包到处理完毕所需的时间。通过测量和补偿这些延迟, 可以确保从站时钟的精度和实时性。

2.2.4 抖动算式。抖动(Jitter)是指通信周期内的微小时间变化, 它会影响实时系统的稳定性和精度。对于关节机器人控制器来说, 抖动越小越好。

算式: $Jitter = \sigma (T_{cycle_i} - T_{cycle_{avg}})$

其中, T_{cycle_i} 表示第*i*个通信周期的时间, $T_{cycle_{avg}}$ 表示平均通信周期时间, σ 表示标准差。通过计算抖动值, 可以评估通信周期的稳定性。

2.2.5 带宽和负载算式。EtherCAT的实时性还受到网络带宽和负载的影响。网络带宽决定了数据包的传输速率, 而负载则决定了网络资源的占用情况。

带宽算式: $Bandwidth = \text{数据量} / T_{cycle}$

其中, 数据量表示每个通信周期内需要传输的数据量。通过计算带宽, 可以评估网络是否能够满足实时性要求。

负载算式: $Load = \text{数据包数量} / \text{总数据包容量}$

其中, 数据包数量表示每个通信周期内发送的数据包数量, 总数据包容量表示网络能够容纳的最大数据包数量。通过计算负载, 可以评估网络的拥塞情况。

综上所述, 关节机器人控制器的EtherCAT实时性能要求涵盖了一系列复杂的算式与精密参数, 这些因素协同作用, 确保EtherCAT通信协议能够充分满足关节机器人对于高精度和高实时性的严苛需求。因此, 通讯系统的架构设计显得尤为重要。本系统的EtherCAT协议栈架构巧妙地融合了64位Arm® Cortex®-A55处理器与Cortex®-R5F异构处理器, 框图如图2所示。其

中, Cortex®-A55凭借其卓越的计算效能, 为RT-Linux应用环境提供了坚实的运算支撑, 保障了复杂控制指令的高效实施。而 Cortex®-R5F则以其针对实时处理深度优化的低延迟特性, 为系统赋予了出众的实时响应能力, 精准契合了EtherCAT通信中对于超高速度和高精度的严格要求。这一处理器配置策略不仅显著增强了系统的综合性能, 更确保了即便在极端高负载条件下, 系统依然能够维持卓越的稳定性与实时响应能力。

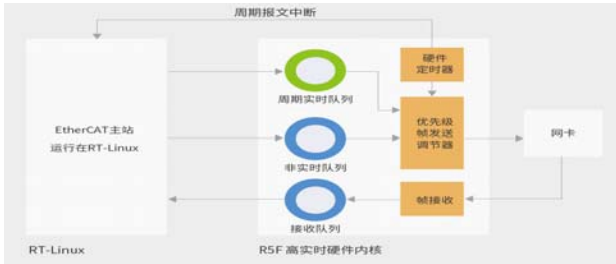


图2 EtherCAT实现框图

3 实验验证

为了验证本文设计的EtherCAT的关节机器人控制器的性能, 进行了以下实验:

3.1 通信性能测试

使用EtherCAT分析仪工具抓包工具对EtherCAT总线通信进行抓包实验, 测试了数据帧的通信周期和时延。实验结果表明, 刷新周期可以小于250 μs, 运行调度周期保证在1ms内, 满足实时性的要求, 并且各个从站节点的同步精度小于1 μs, 满足同步性能的要求。

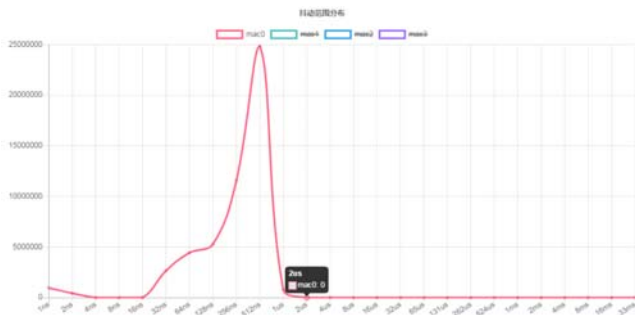


图3 时序图

3.2 运动控制系统性能测试

使用cyclicttest工具, 对关节机器人控制器系统抖动性测试, 验证RT-Linux的系统抖动情况。测试方法:

先在后台执行压力测试, 使用stress-ng工具, 使CPU满负荷, 非实时线程。

```
./stress-ng -c 4 --cpu-method all --pthread 4 &
```

a. 然后执行cyclicttest

```
./cyclicttest-p98-t1-n
```

查看cyclicttest的输出结果, 最大抖动为76微秒。抖动值越小越好。

3.3 实际应用测试

将本文设计的控制器应用于实际的关节机器人系统中, 进行了搬运、装配等任务的测试。实验结果表明,

控制器能够稳定、可靠地控制关节机器人完成各种任务, 提高了生产效率和产品质量。

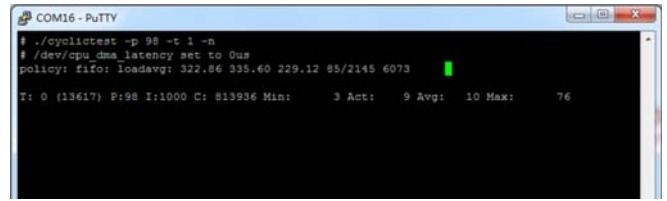


图4 cyclicttest 输出结果

使用htop查看CPU的使用率, 4个核均为满负荷

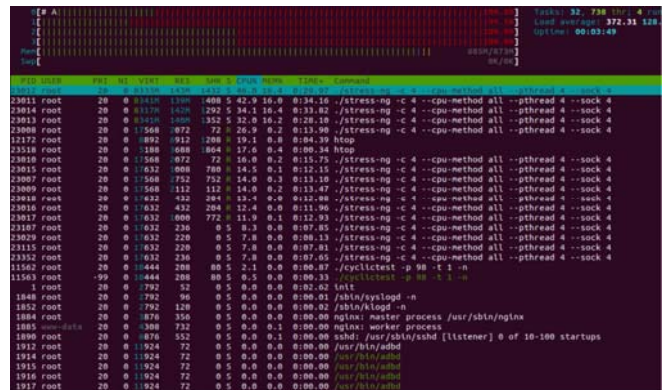


图5 htop输出结果

4 结论

工业以太网是工业互联网的通信部分的实现, 是工业互联网的关键的核心技术和智能制造自动化的基石。本文首先研究了工业以太网在国内外的发展现状以及市场需求, 并分析工业机器人控制系统的基本框架以及主流的控制方案, 在吸取现有方案优点的基础上, 提出了一种高效的控制器实现方案。通过对EtherCAT通信协议的研究和关节机器人运动控制算法的设计, 实现高性能的关节机器人控制器。实验结果表明, 该控制器具有通信速度快、实时性好、定位精度高、响应速度快等优点, 能够满足关节机器人对高效率、高精度和高灵活性的需求。

【参考文献】

[1]周立功.ARM嵌入式系统基础教程[M].北京航空航天大学出版社,2005.
[2]李正军.EtherCAT工业以太网应用技术[M].机械工业出版社,2020.
[3]陈利君.TwinCAT3.1从入门到精通[M].机械工业出版社,2020.
[4]陈在平.现场总线及工业控制网络技术[M].北京电子工业出版社,2008.
[5]陈贇.ARM嵌入式技术原理与应用[M].北京航空航天大学出版社,2011.

作者简介:

黄钦宁(1982--),男,汉族,广西钦州人,工程师,本科,研究方向为工业通讯,工业控制。