

摘要

自进入“工业 4.0”时代以来，制造业的智能化、信息化改革推动了工业自动化市场的快速发展，工业现场对工业控制系统的网络传输延迟和同步精度提出了越来越高的要求。目前市场上有多种工业通信网络，EtherCAT 作为一种具有高传输速率、强实时性能和高同步精度的工业以太网在工业控制领域受到了广泛关注。因此，本文旨在对 EtherCAT 通信协议和分布时钟同步算法进行研究，并基于 Linux 系统和 STM32 嵌入式平台开发一种具有较高时钟同步精度的 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统。本文的主要研究内容如下：

首先，通过对 EtherCAT 通信原理及其通信协议的研究，提出 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统的整体设计方案，并针对 EtherCAT 主从控制系统的时钟同步问题，提出一种 EtherCAT 分布时钟同步算法的优化方案。该优化方案为在传统分布时钟同步算法的基础上设计一种测量主站与参考从站之间的传输延时的方法，并利用该传输延时对各从站的初始时钟偏移量进行补偿。

其次，基于 Linux 系统和 SOEM 主站协议完成 EtherCAT 主站各个功能模块的设计，主要包括系统初始化配置模块、状态机监测模块以及 IO 数据通信模块，并通过移植 Xenomai 实时内核实现对主站的实时性改造。

再次，基于 STM32 和 AX58100 完成 EtherCAT 从站的硬件设计，其中主要包括从站控制器的接口设计以及从站微处理器的电源模块、外部接口模块和 IO 模块的设计。同时，对 EtherCAT 从站协议栈软件设计进行研究，完成 EtherCAT 从站的应用层软件设计，以实现从站与主站之间的 IO 通信功能。

最后，搭建 EtherCAT 主从控制系统测试平台以完成系统的通信功能测试和性能测试。测试结果验证了本文所提出的分布时钟同步算法的优化方案具有一定的可行性和有效性，系统的实时性能能够满足工业现场的实际需求。

关键词：EtherCAT；分布时钟同步；实时性；Linux

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 EtherCAT 国内外研究现状	2
1.2.1 EtherCAT 发展概述.....	2
1.2.2 EtherCAT 主从站设计研究现状.....	3
1.2.3 实时性和同步性问题研究现状	4
1.3 主要研究内容.....	5
1.4 论文结构安排.....	6
第二章 EtherCAT 通信协议以及系统整体设计方案的研究	7
2.1 EtherCAT 通信原理	7
2.2 EtherCAT 通信网络结构	8
2.2.1 物理层	10
2.2.2 数据链路层	10
2.2.3 应用层	10
2.3 寻址方式.....	10
2.3.1 网段寻址	12
2.3.2 设备寻址	12
2.3.3 逻辑寻址	14
2.4 EtherCAT 通信模式	15
2.4.1 周期性过程数据通信	15
2.4.2 非周期性邮箱通信	16
2.5 实时 IO 主从控制系统的整体设计方案.....	18
2.6 本章小结.....	19
第三章 系统时钟同步实现方法的研究与优化.....	21
3.1 系统运行模式简介	21
3.1.1 自由运行模式	21
3.1.2 SM 同步运行模式.....	22
3.1.3 分布时钟同步运行模式	22
3.2 分布时钟同步算法的研究与优化.....	23

3.2.1 传输延时测量	24
3.2.2 初始时钟偏移补偿	26
3.2.3 时钟漂移量补偿	27
3.3 主从系统时钟同步的实现	28
3.4 本章小结	29
第四章 EtherCAT 实时主站的设计与实现	31
4.1 主站开发环境的搭建	31
4.1.1 Xenomai 系统架构	32
4.1.2 Xenomai 实时内核的移植	34
4.1.3 任务调度方案	35
4.1.4 主站协议的选择	36
4.2 主站软件整体设计方案	38
4.3 系统初始化配置模块	39
4.3.1 网络拓扑发现	39
4.3.2 运行模式初始化	40
4.3.3 分布时钟初始化	40
4.4 状态机监测模块	41
4.5 IO 数据通信模块	43
4.6 本章小结	44
第五章 EtherCAT 从站的设计与实现	45
5.1 从站硬件整体设计方案	45
5.2 从站控制器设计	46
5.2.1 AX58100 概述	47
5.2.2 MII 接口设计	48
5.2.3 I ² C 接口设计	48
5.2.4 PDI 接口设计	48
5.3 从站微处理器设计	49
5.3.1 电源模块	50
5.3.2 外部接口模块	50
5.3.3 IO 模块	51
5.4 从站软件设计整体方案	52
5.5 从站协议栈软件设计	52

5.5.1 EtherCAT 状态机.....	52
5.5.2 邮箱数据通信	53
5.5.3 过程数据通信	54
5.6 从站应用层软件设计	56
5.6.1 主函数模块	56
5.6.2 从站初始化模块	56
5.6.3 主应用循环模块	57
5.7 本章小结	58
第六章 实时 IO 主从控制系统测试与分析.....	61
6.1 系统测试平台的搭建	61
6.2 系统功能测试.....	61
6.2.1 IO 通信功能测试	62
6.2.2 周期性过程数据通信测试	62
6.2.3 非周期性邮箱通信测试	63
6.3 系统性能测试.....	64
6.3.1 系统时钟同步性能测试	64
6.3.2 系统同步性能测试	66
6.3.3 系统抖动测试	67
6.3.4 系统实时性能测试	69
6.4 本章小结	70
第七章 总结与展望.....	71
7.1 总结	71
7.2 展望	72
参考文献.....	73
发表论文和参加科研情况.....	77
致 谢.....	79

第一章 绪论

1.1 课题研究背景及意义

随着经济全球化以及互联网的快速发展，全球制造业的竞争日益激烈，德国于 2013 年 4 月提出了“工业 4.0”国家战略以巩固其制造业的传统优势^[1]，至此，“工业 4.0 时代”已经到来。为了应对以智能制造为主的新一轮科技革命所带来的挑战，我国于 2015 年提出了“中国制造 2025”战略，以推动我国制造业的智能化改革进程，实现由制造大国到制造强国的战略转变^[2]。自 2020 年以来，为了克服疫情对工业生产所带来的严重影响，国内外众多企业纷纷加大了对自动化、信息化产业的投资力度。与此同时，物联网和工业互联网技术的高速发展也为工业自动化市场的发展提供了强大动力。

工业通信网络是实现工业自动化的网络基础，因此，为了推动智能化工业生产的快速发展，工业通信网络的实时可靠传输问题已经成为了目前国内外各大企业和科研人员的一项重点研究内容^[3]。当今世界主要有三种主流的工业通信技术，分别为现场总线、工业无线通信和工业以太网^[4]。以 CAN 总线为代表的现场总线结构简单且成本较低，但是其通信传输速度较慢、传输延迟较高，难以满足市场上的高实时性要求；相较于现场总线，以蓝牙、WIFI 为代表的工业无线通信技术更加灵活，结构更加简单，但是无线通信易受到工业现场中的各种电磁波和干扰信号的影响，对工业现场环境有着较高的要求^[5]；工业以太网作为一种兼容了普通标准以太网技术的工业通信网络，不仅克服了现场总线和工业无线通信的缺点和不足，而且解决了传统以太网在网络载荷较大的情况下难以满足工业控制的高实时性需求的问题。近年来，工业以太网技术凭借其较强的实时性、可靠性和开放性在工业自动化控制领域获得了广泛关注和快速发展。

2003 年由德国倍福自动化公司提出的 EtherCAT(Ethernet for Control Automation Technology)工业以太网是一种具有强实时性和高同步精度的工业以太网，其传输速率可以达到 100Mbps，其扩展版本 EtherCAT G 技术甚至可以达到 1Gbps 的传输速率，在周期性过程数据通信过程中，1000 个 I/O 的更新时间仅需 30 μ s，每 300 μ s 可以实现 1486 字节的过程数据的传输，且每个 EtherCAT 通信周期的响应时间小于 1ms，完全可以满足运动控制系统中数据传输延迟的高确定性和低抖动性的需求。而且，EtherCAT 工业以太网的拓扑结构灵活，在 EtherCAT 网络的搭建过程中不需要交换机、集线器等设备。因此，EtherCAT 在工业领域具有广阔的应用市场。2007 年，EtherCAT 通过了 SEMI 标准协议，被

IEC61158 和 IEC61784 定义为第十二种通信协议标准，目前已经称成为了市场上主流的实时工业以太网之一。在不断提高工业以太网的市场份额的同时，进一步满足工业现场对自动化控制设备的高实时性和高同步精度需求仍是目前工业控制领域需要研究的重要课题。因此，本文对 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统的设计方案及其性能的研究具有一定的应用价值和实际意义。

1.2 EtherCAT 国内外研究现状

1.2.1 EtherCAT 发展概述

目前市场上主要有五种主流的实时工业以太网，分别为 EtherNet/IP、ProfiNet、Modbus-TCP、PowerLink 和 EtherCAT，表 1-1 对这五种工业以太网的组织机构、拓扑结构、传输模式、实时性和同步精度进行了介绍。

表 1-1 五种工业以太网特点

工业以太网	EtherNet/IP	ProfiNet	Modbus-TCP	PowerLink	EtherCAT
开发公司	罗克韦尔 (美国)	西门子 (德国)	施耐德 (法国)	贝加莱 (奥地利)	倍福 (德国)
公布时间	2000 年	2001 年	1999 年	2001 年	2003 年
组织机构	ODVA	PROFIBUS	Modbus-IDA	EPSG	ETG
拓扑结构	星型	环型、线型、 星型、树型	星型	环型、线 型、星型、 菊花型	灵活
传输模式	全双工	全双工	全双工	半双工	全双工
传输速率	10/100Mbps	100Mbps	100Mbps	100Mbps	100 Mbps
实时性	100ms	10ms	100ms	10ms	1ms
同步精度	1us	1us	1us	1us	100ns

其中，EtherNet/IP 和 Modbus-TCP 主要基于标准的以太网硬件和 TCP/IP 协议栈来实现数据通信，由于 TCP/IP 协议为非实时性通信协议，这两种工业以太网的实时性最低，在工业控制领域只能实现 100ms 级别的实时网络通信；ProfiNet 和 PowerLink 仍然使用标准的以太网硬件来实现数据通信，但是在进行数据通信的过程中，对应用数据进行了分类处理，使用 TCP/IP 协议和一种特定的过程数据传输协议来分别实现对非实时性应用数据和实时性应用数据的传输，因此，这两种工业以太网可以实现 10ms 级别的实时网络通信；EtherCAT 在标准以太网的基础上修改了数据帧结构，使用修改后的以太网协议和专用从站控制器芯片来实现数据通信，修改后的协议只具有三层结构，分别为物理层、数据链路层和应用层，可以实现对实时性过程数据与非实时性应用数据的并行传

输，同时，EtherCAT 支持分布时钟。因此，在这五种实时工业以太网协议中，EtherCAT 协议的实时性能和同步精度最高，而且能够实现 1ms 级别的实时网络通信，适用于具有强实时性要求和高同步性要求的工业应用场景，比如运动控制、伺服控制等工业控制领域。

EtherCAT 工业以太网自 2003 年由德国倍福公司在德国汉诺威工业博览会上首次发布以来便获得了快速发展。2003 年 11 月国际性的技术组织协会 ETG 成立，该协会主要由 EtherCAT 工业设备制造商、最终用户和技术提供商组成，主要负责 EtherCAT 通信技术在全球工业控制领域的推广和免费的实施支持。截至 2017 年，全球提供 EtherCAT 主站产品的供应商有 201 家，EtherCAT 的采用率在欧洲、亚洲和美国已经超过了其他工业以太网技术，ETG 组织已经成为了全球规模最大的现场总线和工业以太网组织。

历经多年的飞速发展，EtherCAT 以其超高速、低成本、灵活易用和开放性的特点，获得了工业控制领域的广泛认可与支持，基于 EtherCAT 协议的系统、伺服驱动、运动控制等解决方案与产品不断被推出。其中，EtherCAT 的开放性是指对 EtherCAT 主从站技术的全面对外开放，在提供免费的实施支持的同时，提供各种的研发指导文档、主从站的实施方案和规范的应用接口标准。2014 年 10 月，EtherCAT 通信协议正式成为了中国推荐性国家标准 GB/T31230，自此，EtherCAT 技术在国内工业市场获得了更加快速的发展与应用，国内众多企业和高校对 EtherCAT 在工业控制领域的应用和设计方案展开了研究。

1.2.2 EtherCAT 主从站设计研究现状

目前市场上有多种 EtherCAT 商业化主站软件和开源协议栈，比如德国倍福公司研发的 EtherCAT 主站控制软件 TwinCAT、RT-LAB 组织开发的开源主站 SOEM 和 EtherLab 公司开发的开源协议栈 IGH EtherCAT Master^[6]。无论是主站设备还是从站设备均可以通过移植 EtherCAT 协议栈来实现 EtherCAT 数据通信，因此，EtherCAT 主站和从站的硬件开发平台具有较大的灵活性。虽然 EtherCAT 从站需要专用通信控制器芯片来实现数据链路层的功能^[7]，但是通信控制器芯片的开发接口广泛，通过 FPGA 或 STM32、ARM 等嵌入式开发平台均可以实现其应用层的开发。EtherCAT 主站的实现更加简单，既可以在携带标准通信网卡的 PC 机上实现也可以基于 FPGA 或嵌入式开发平台实现，并且可以搭载 Windows 操作系统或 Linux 操作系统以提高 EtherCAT 主站应用开发的灵活性。

2014 年 5 月，中国科学院光电技术研究所的任计羽基于 AM3359 ICE 开发板完成了 EtherCAT 从站的开发^[8]；2016 年 4 月，中国科学院沈阳计算技术研究所的左振领基于 ET1100 和 STM32 完成了 EtherCAT 从站的硬件设计和软件设计^[9]；2016 年 5 月，广东工业大学李俊杰基于 TI 的 Beaglebone 开发板完成了

EtherCAT 嵌入式主站的硬件开发，并完成了 EtherCAT 协议栈层和服务层的软件设计^[10]；2017 年 1 月，浙江大学的高恩博基于搭载 Linux 系统的嵌入式开发平台和 IgH EtherCAT Master 协议栈完成了 EtherCAT 主站的开发^[11]；2018 年 5 月，郑州大学的王慧娇针对利用搭载 Windows 系统的 PC 机平台开发的 EtherCAT 主站的数据帧发送周期较长且不稳定性的问题，提出了基于以 Cortex-M7 为内核的 STM32F767 和 SOEM 主站协议开发 EtherCAT 主站的设计方案^[12]；2018 年 11 月，为了提高数据处理速度，韩国釜山国立大学的 Sung-Mun Park 等人基于倍福公司的 ET1100 和多核 DSP 完成了 EtherCAT 从站的开发^[13]；2020 年 5 月，浙江理工大学的吴超为了解决对国外专用控制器芯片的依赖问题，提出了一种基于 FPGA 的 EtherCAT 主从站设计方案^[13]。

1.2.3 实时性和同步性问题研究现状

为了提高主从控制系统的实时性能，2019 年 1 月华南理工大学的程天亨设计了一套 EtherCAT 主站协议栈的完整方案，分别使用 RTX 和 Xenomai 实时扩展内核提升了 Windows 和 Linux 两个系统平台下主站系统的实时性能，并对两种主站的实时改造方案进行了分析和对比^[15]，验证了 Xenomai/Linux 的实时性能更高；2019 年 5 月，华中科技大学的饶阿龙针对 Windows 系统在工业化应用中的实时性不足问题，提出了一种采用 I/O APIC、DPC 定时器、非分页内存的实时性优化方法^[16]，但是该方法目前仍无法达到商用实时系统 RTX 和 Intime 的实时效果；2020 年 6 月，长春工业大学的戚小莎针对工业以太网在数据传输过程中实时性不高、链路利用率较低等问题，提出了一种基于自适应调度算法的列车工业以太网实时性优化算法^[17]，该算法达到了良好的实时效果，但是尚未完成该算法在实际工业应用环境中的应用效果测试。

同时，国内外的众多研究人员对 EtherCAT 分布时钟同步技术进行了研究，通过提高 EtherCAT 主站和从站的时钟同步精度，以提高主从控制系统的同步性能。2011 年 3 月，北京交通大学的汪雅楠等人对 EtherCAT 三种基本拓扑结构的时钟同步误差进行了仿真分析^[18]，为实际工业现场布线规则提供了理论参考，但并未对时钟同步算法及其实现过程展开详细的研究；2015 年 7 月瑞士的 David Ganz 等人将 PTCP 协议引入到了 EtherCAT 数据帧中，验证了 PTCP 协议对于主从站之间同步精度的提高具有一定的有效性^[19]。2016 年 9 月，中国科学院沈阳计算技术研究所的李备备等人对 EtherCAT 分布时钟机制的同步方法进行了研究^[20]，但是在时钟同步的过程中忽略了主站与参考从站之间的传输延时；2020 年 5 月，广东工业大学的刘胜旺为提高 EtherCAT 主站系统的同步性能，基于 IGh EtherCAT Master 开源主站提出了一种同步机制中的同步误差的补偿方法，经过同步性能测试，两个从站间时钟同步精度在 70ns 以内^[21]，但并未对

EtherCAT 主站与参考从站之间的同步误差进行研究和优化。因此，本课题针对以上研究经验和不足，主要对主站和各从站之间的系统时钟偏差进行分析和研究，提出一种 EtherCAT 分布时钟同步算法的优化方法。

1.3 主要研究内容

基于对 EtherCAT 主站和从站的国内外研究现状的分析，并考虑到 Linux 系统内核代码开源、API 丰富、性能稳定、维护成本低的特点以及 STM32 高性能、低成本、低功耗、可裁剪的优势，本文旨在基于 Linux 系统和 STM32 嵌入式平台设计一种 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统，对主从控制系统目前存在的实时性问题和同步性问题展开研究，并提出完整的优化方案。本文的主要研究内容如下：

(1)对 EtherCAT 通信协议及其通信原理进行分析和研究，提出 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统的整体设计方案，将 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统主要分为 EtherCAT 主站和具有 IO 模块的 EtherCAT 从站两部分进行设计和研究。

(2)深入研究 EtherCAT 主从控制系统分布时钟同步模式的工作原理及时钟同步方法，对 EtherCAT 主站和各从站之间产生时钟偏差的主要来源进行分析，针对传统的分布时钟同步算法忽略了主站与各从站之间的传输延时的问题，提出一种分布时钟同步算法的优化方案以提高主站与各从站之间的时钟同步精度，进而改善主从控制系统的同步性能。

(3)针对 Linux 系统难以满足工业控制系统高实时性需求的问题，对 Linux 系统的实时性改造方案和任务调度方案进行研究，完成对 EtherCAT 主站开发环境的实时性改造。之后，移植主站协议以实现主站的 EtherCAT 数据通信功能。最后，深入分析 EtherCAT 主站的功能需求，提出 EtherCAT 主站软件的整体设计方案，并完成 EtherCAT 主站各个功能模块的软件设计，其中主要包括数据帧收发模块、系统初始化配置模块、状态机监测模块和 IO 数据通信模块。

(4)深入分析 EtherCAT 从站控制器和从站微处理器的功能需求，提出一套 EtherCAT 从站的硬件部分和软件部分的整体设计方案，对从站的各硬件模块、协议栈软件和应用层软件的设计方案进行研究，完成 EtherCAT 从站的各个功能模块的硬件设计和软件设计以实现 EtherCAT 从站与主站之间的 IO 通信。

(5)利用上述设计的 EtherCAT 主站和 EtherCAT 从站完成 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统的搭建工作，并搭配示波器、抓包软件 Wireshark 等工具搭建系统测试平台，主要完成对 EtherCAT 实时主从控制系统的通信功能、时钟同步性能和实时性能的测试，以检测本文所设计的 EtherCAT 主站和各从站之间是否能够实现 IO 通信数据、过程数据和邮箱数据的可靠传输，并验证本文所提出的分

布时钟同步算法的优化方案的可行性以及主站实时性改造的有效性。

1.4 论文结构安排

本论文共七章，各章节内容的结构安排如下：

第一章：绪论。主要对课题的研究背景、研究意义和国内外研究现状进行了介绍，阐述了本论文的主要研究内容和论文结构。

第二章：通信协议研究和系统整体设计方案。主要对 EtherCAT 通信原理、网络结构、寻址方式以及周期性过程数据通信、非周期性邮箱通信两种通信模式的工作原理进行详细分析和研究，并基于以上理论研究提出 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统的整体设计方案。

第三章：系统时钟同步实现方法的研究与优化。首先对主从控制系统所支持的三种运行模式的工作原理、功能特点和应用场景进行分析和介绍；之后，从传输延时测量、初始时钟偏移补偿、时钟偏移补偿三个方面对分布时钟同步模式下的时钟同步算法进行研究，提出一套分布时钟同步算法的优化方案；最后对主从控制系统时钟同步的实现方案进行详细介绍。

第四章：EtherCAT 实时主站的设计与实现。首先，对主站实时改造的必要性、具体实施方案和任务调度方案进行研究，通过移植 Xenomai 实时内核和 SOEM 主站协议完成实时主站开发环境的搭建；之后，根据主站的功能需求分析，提出主站软件的整体设计方案，并对系统初始化配置模块、状态机监测模块和 IO 数据通信模块的具体设计方案展开介绍。

第五章：EtherCAT 从站的设计与实现。确定 EtherCAT 从站硬件的整体设计方案，基于 AX58100 和 STM32 分别完成从站控制器和从站微处理器的硬件设计，其中，主要对从站控制器的三个通信接口以及从站微处理器的电源模块、外部接口模块和 IO 模块的硬件设计展开介绍；之后，根据 EtherCAT 从站的功能需求分析，提出从站软件的整体设计方案，从 EtherCAT 状态机、邮箱数据通信、过程数据通信三个方面对从站的协议栈软件设计方案进行分析和介绍，并完成从站应用层软件的设计。

第六章：实时 IO 主从控制系统测试与分析。搭建 EtherCAT 实时 IO 主从控制系统测试平台，完成系统的功能测试和性能测试，并对测试结果进行分析和总结。其中，功能测试包括 IO 通信功能测试、周期性过程数据通信测试和非周期性邮箱通信测试，性能测试包括系统时钟同步性能测试、系统同步性能测试、系统抖动测试和系统实时性能测试。

第七章：总结与展望。对本文主要完成的工作内容和研究成果进行总结，并对后续的进一步研究进行规划和展望。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/007033025031006155>