

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209710

基于树莓派的 EtherCAT 主站设计与性能分析^{*}

赵 纯^{1,2,3} 杨志家^{1,2,3} 谢 闯^{1,2,3} 王 剑^{1,2,3}(1. 中国科学院网络化控制系统重点实验室 沈阳 110016; 2. 中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016;
3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院 沈阳 110169)

摘要: 本文设计了一种基于树莓派的轻量化 EtherCAT 主站及其测试系统。在测试系统上,通过多通道侦听器,测量了多个并行运行主站的性能参数;借助于软硬件时间戳,测量了轮询/中断、单/多核等多种模式下的时延抖动;还测量了数据帧在协议各层的时延与抖动。基于树莓派的 EtherCAT 主站采用 VxWorks 操作系统,在实现过程中重点对系统内核配置、网卡驱动、报文处理、应用层软件等方面进行了优化。经测试,该主站性能稳定,在 125 μs 循环周期下的抖动约 6 μs ,可满足工业现场数据采集、楼宇自动化、AGV 控制等需求。

关键词: EtherCAT; VxWorks; 树莓派; 实时以太网; 抖动测试

中图分类号: TP319 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Design and performance analysis of EtherCAT master based on raspberry pi

Zhao Chun^{1,2,3} Yang Zhijia^{1,2,3} Xie Chuang^{1,2,3} Wang Jian^{1,2,3}(1. Key Laboratory of Networked Control Systems, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;
3. Institutes for Robotics and Intelligent Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110169, China)

Abstract: This paper designs a lightweight EtherCAT master and its test system based on Raspberry Pi. On the test system, the performance parameters of several parallel running masters are measured by multi-channel listeners, the delay jitters in polling/interrupt and single/multi-core modes are measured by means of software and hardware timestamp, and the delays and jitters of frame at each protocol layers are also measured. The EtherCAT master station based on Raspberry Pi adopts VxWorks operating system, the main optimization direction includes system kernel configuration, network adapter driver, message processing, application layer software, etc. By testing, the master has stable performance, the period jitter is about 6 μs under 125 μs period, which can meet the requirements of industrial field data acquisition, building automation, AGV control and so on.

Keywords: EtherCAT; VxWorks; raspberry pi; real time ethernet; jitter test

0 引 言

EtherCAT 作为一种支持多种拓扑结构的高性能低成本工业以太网技术,在工业机器人、工业控制网络、激光通信、分布式仿真等领域均得到应用^[1-6]。EtherCAT 是 IEC-61158 协议族中定义的一种工业以太网标准,可满足工业通信中的确定性通信需求。通过其特有的高速动态插入过程数据的数据帧处理方式,相比其他工业以太网技术具有更高的带宽利用率和更好的网络性能^[7];通过引入分布式时钟及低压差分信号接口,可以为运动控制等应用提供高精度同步性能^[8]。在网络部署中,其良好的线性特征^[9]可

以为网络性能估计提供重要参考。其物理层采用标准 IEEE802.3 以太网帧格式,应用层支持常见的 FTP、HTTP、TCP/IP 等协议,是未来智能制造中 IT/OT 融合的关键。

EtherCAT 主站采用标准以太网 MAC,无需额外的通信处理器,相对于 EtherCAT 从站,主站实现相对简单,仅需标准网卡即可实现硬实时网络解决方案。目前常见的 EtherCAT 主站有基于多种操作系统及多种硬件平台的多种解决方案,包括成熟的商用方案,如: TwinCAT、CODESYS、Acontis、KPA 等;以及个性化的开源方案,如: IgH、SOEM 等。在实际的工程应用中,往往需要结合目标

收稿日期:2022-04-22

^{*} 基金项目:国家重点研发计划(2018YFB1702000)项目资助

应用的特点选择主站解决方案。EtherCAT 等工业以太网协议的性能指标主要包括通信时延抖动、通信循环周期、指定通信循环周期下可支持的从节点数量等。通信时延抖动的缩小,可以使从节点应用层拥有更多的数据处理时间;通信循环周期的缩短,可以使得从站及终端响应更加及时,典型的通信循环周期为 1 ms。目前 EtherCAT 及其他工业以太网性能测试,大多是利用工控机,并在各类商用操作系统上编写测试软件来实现^[10-12],占用资源多、自主性低、灵活性差,而实际工程中的趋势是灵活性高、开源、轻量化。

树莓派是一种基于 ARM 处理器、只有信用卡大小的微型电脑,具有性能强、体积小、成本低等特点,在智能交通、电力自动化等多个领域均得到应用^[13-14]。

本文在降低测试硬件成本及资源占用的基础上,设计了一种基于树莓派的轻量化 EtherCAT 主站及其测试系统。该套测试系统既可以通过更换 MicroSD 卡的方式对单个主站性能进行单独测试,也可以同时对多个主站性能进行并行测试。本文实现了在开源硬件平台树莓派上部署基于 VxWorks 系统的 EtherCAT 主站,并分析了多种影响主站性能的因素。经长时间连续运行测试,该系统运行稳定,是工业以太网主站系统轻量化、开源化设计的一种有益探索与尝试。

1 系统硬件设计

整个 EtherCAT 主站及测试系统主要包含四部分:一个或多个 EtherCAT 主站、一套测试系统、多通道侦听器、一个或多个 EtherCAT 从站集合。整个系统硬件架构如图 1 所示。

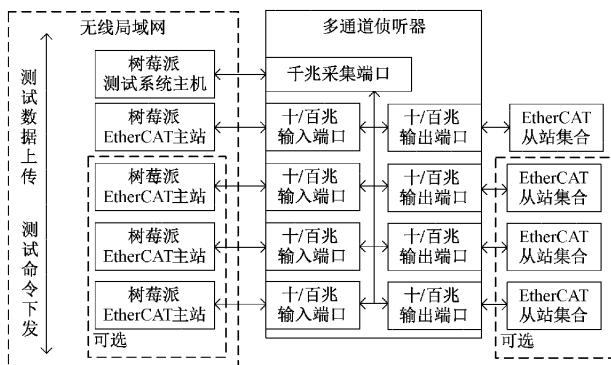


图 1 系统硬件设计

1.1 主站模块

典型的 EtherCAT 主站结构如图 2 所示,主站硬件需求为集成标准以太网卡计算机系统,在此我们选取集成千兆以太网的树莓派开发板进行实现。

树莓派 EtherCAT 主站采用标准 Raspberry Pi 4B 开发板,采用基于 ARM Cortex A72 的 BCM2711 处理器,主频 1.5 GHz,通过 MicroSD 卡作为机身硬盘,采用 Micron LPDDR4 内存芯片,容量 4 GB。有线网络接口采用千兆

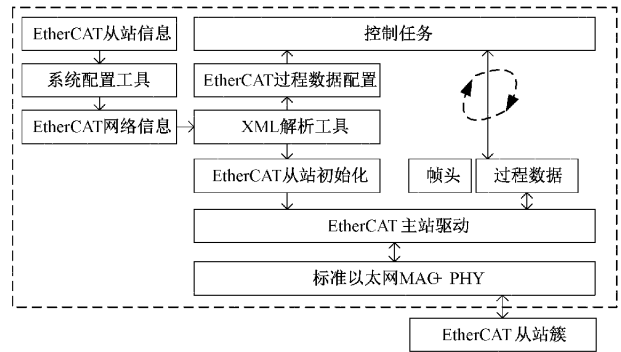


图 2 典型的 EtherCAT 主站结构

PHY 芯片 BCM54213PE,与 BCM2711 处理器之间通过 RGMII 接口连接;无线网络采用 BCM4345 芯片。开发板外部接口包括:用于外接显示器的 Micro HDMI 接口,用于连接鼠标、键盘的 USB 接口。考虑到主站的轻量化,实验中主站并没有接入鼠标、键盘及外部显示器,而是通过串口或无线局域网以终端或远程桌面等方式与测试系统主机交互。

1.2 测试系统模块

树莓派 EtherCAT 测试系统与 EtherCAT 主站模块在硬件上采用相同配置,区别在于其 MicroSD 卡内装载基于 Debian 的操作系统 Raspbian OS,而其他 EtherCAT 主站模块搭载不同的 MicroSD 卡,运行其他实时操作系统。该开发板支持多达 6 个 UART,可最多与 6 个主站通过串口终端交互,或通过网络终端方式与更多主站连接。

1.3 多通道侦听器模块

多通道侦听器 ET2000 支持同时侦听四路百兆以太网接口,收集多路以太网报文,并通过千兆以太网上行端口向测试系统主机发送数据包。侦听器可提供 1 ns 分辨率的高精度时间戳。利用侦听器的多路侦听通道可完成多组对照实验,如在各通道分别接入相同的从站节点和不同的主站,用于测试各种主站的性能;或者在各通道分别接入相同的主站和不同的从站节点,为从站设备开发验证或选型提供依据。

1.4 从站模块

从站模块采用标准的符合 ETG1000 协议的 EtherCAT 从站节点,为确保主站性能测试的一致性,多套从站节点采用相同型号、相同拓扑结构。为便于测试,统一采用倍福的 EL2008 设备,该设备为八通道数字量输出,设备上搭载的 LED 阵列可直观看到测试开始或结束状态。

2 测试系统软件设计

测试系统软件方案主要包括:PLC 代码的编辑、编译与下载;多线程监控各主站;数据采集系统管理;采集数据预处理等方面。程序代码采用 Python 语言编写。测试系统软件的整体流程图如图 3 所示。

系统还需配置相应的软件环境,包括以太网数据采集

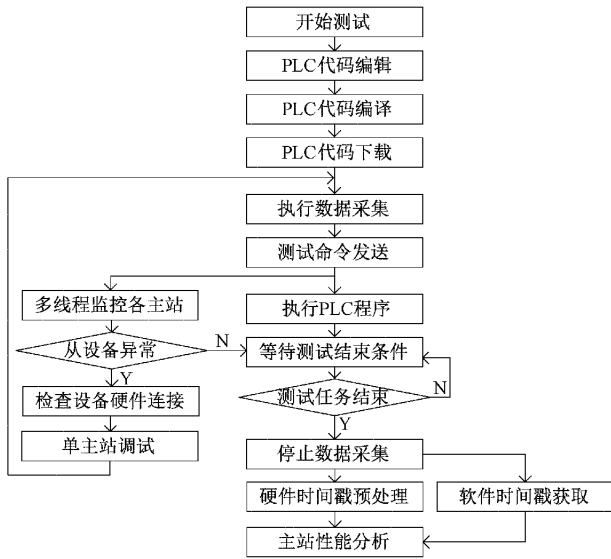


图 3 测试系统软件设计

软件 Wireshark 及科学计算软件 Matlab 等。

在 PLC 编辑与 PLC 编译模块中,定义了适用于主站测试的 PLC 代码数据结构;在 PLC 代码下载模块中,集成了无线局域网内的主站扫描、终端交互服务等功能;在数据采集模块中,通过调用 Wireshark API 进行采集控制;测试命令包括主站运行、结束控制,运行时间控制等;多线程监控模块中,每个线程负责监控一个主站的运行状态,以确保整个测试的完整性,当任一主站状态异常时,能够及时做出响应并终止测试;在数据预处理模块中,主要实现分离不同通道的数据包、存储成易处理的报文文件、提取硬件时间戳、获取主站软件时间戳等功能;性能分析模块包含循环周期计算、循环周期统计、主站抖动分析等实时性能分析功能及日志生成功能。

本文采用软硬件时间戳结合的方式进行测量,并引入时间补偿系数对软硬件时间戳系统进行时间补偿。在一个循环周期内的主站耗时如图 4 所示,其中包括主站 MAC 层及 PHY 层的链路双向传输时延、驱动层的报文处理时延、应用层时延、以及实时系统时间抖动等。评价主站系统性能的关键指标就是要求在给定循环周期内,留给应用层的时间要足够长,而其余各部分的时间抖动要相对小。

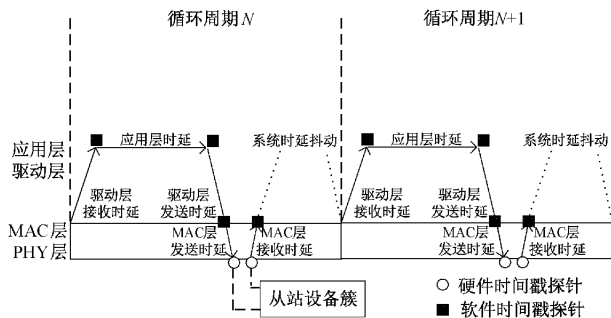


图 4 循环周期内部各部分耗时

3 主站软件设计

基于树莓派的易用性特点,可以通过一台树莓派配置多个 MicroSD 卡,分别搭载不同操作系统及不同主站,通过更换 MicroSD 卡快速部署不同主站;也可基于本测试系统的高集成度特点,分别在多台树莓派中单独配置不同主站,同时进行多主站测试。各种主站在实现过程中均需完成以下设计工作:实时系统优化、网卡驱动、报文处理、应用层软件。

3.1 操作系统选择

由于各操作系统的差异,不同的主站方案性能存在差异,以往的主站大多是基于安装了不同实时补丁^[15-16]的 Linux 系统,或是基于微控制器和专用主站芯片下的裸机^[17]。例如:典型的 1 ms 通信循环周期下,使用 X86 架构 2.66 GHz 主频 CPU,采用 Linux+RTAI 实时补丁,测得的抖动在 10 μs 以下;Linux+Preempt RT 实时补丁,测得的抖动在 10 μs 以上^[18];使用 X86 架构 2.2 GHz 主频 CPU,采用 Linux+Xenomai 实时补丁,测得的抖动在 10 μs 以上^[19]。基于嵌入式 Linux 平台的 EtherCAT 主站受限于其处理器工作频率,抖动相对更大^[20]。

相比于基于 Linux 的实时操作系统,VxWorks 系统在内核架构、任务管理、内存管理、组件管理、网络管理等方面均存在差别,特别是在多任务同步控制中的系统开销更小^[21],更适用于工业以太网应用场景。两个操作系统的具体特点如表 1 所示。

表 1 VxWorks 系统与基于 Linux 的实时操作系统对比

操作系统	VxWorks	Linux+实时补丁
内核架构	整体式内核,内核进程和用户进程共享空间,操作速度快、系统性能高	微内核,内核进程和用户进程分布在独立空间,用户进程间访问需经内核
任务管理	任务即进程,无线程概念,强抢占模式	进程、线程、内核线程,内核抢占和用户抢占模式
内存管理	行在同一内存空间,用户程序可直接操作物理地址	虚拟存储,通过内存管理单元进行虚拟地址映射
组件管理	基于图形化的组件配置及冲突管理,系统裁剪方便	基于命令行的组件配置及裁剪设置,步骤冗长
网络接口	基于 MUX 层,可移植性强	传统 TCP/IP 网络协议栈

综合以上考虑,本文采用 VxWorks 7 系统,并分别在两张 MicroSD 卡中烧录 VxWorks 7 系统,通过不同的内核配置、网卡驱动、系统调度等,进行主站性能对比测试。

主站软件需要考虑的部分包括网卡驱动、任务抢占、内核配置等。当前已有基于 Linux 系统的主站协议代码,在进行移植到 VxWorks 系统时需考虑 Linux 与 VxWorks 系统的差异,主要包括内存管理,任务/进程管理等方面。由于 VxWorks 系统在内存保护上采用实地址,因此对各任务代码的健壮性提出了更高的要求。在进程管理方面,基于 Linux 的多线程需要改写成 VxWorks 下的多任务。

3.2 实时系统优化

当前 Windows、Linux 等众多操作系统都已经支持多核系统;但 VxWorks 对于任务与内核的分配则更加简单高效,可在运行时通过 kernelCpuEnable、taskCpuAffinitySet 等函数来对内核进行实时分配管理。在 Windows、Linux 上运行的商用 EtherCAT 主站,其任务只能在固定的内核上运行,无法由用户根据优先级分配内核;VxWorks 则可以根据需求调整任务与内核,即用户可固定绑定任务与内核,根据算法分配任务与内核,或依用户需求动态调整任务与内核。

VxWorks 系统在主站任务管理方面同样可以进行相应优化。在实现中可以根据网卡驱动、报文处理、应用层软件等任务的时延抖动特征进行合理匹配,例如在报文处理任务中分配较大栈空间,设立预存储数据结构,减小报文处理时延及抖动。

VxWorks 系统在组件剪裁时可以更加精确灵活,可以只剪裁主站系统使用的系统组件,更合理地利用硬件资源及系统资源。基于本测试系统的特点,还需要包含 TSC (Timestamp Counter, 时间戳计数器)的高精度时间戳组件,用于插入软件时间戳探针。

3.3 网卡驱动

相比于 Linux 操作系统,VxWorks 系统在数据链路层之上加入了 MUX 层,将数据链路层和网络层隔离,驱动程序和网络协议彼此独立,因此发送和接收数据帧来说变得简单许多:当上层发送数据帧时,只需调用库函数将数据包发给 MUX 层;当要接收一个数据包时,位于数据链路层的 END(Enhanced Network Driver, 增强型网络驱动)从网络上接收数据并把它发给 MUX 层,MUX 层根据不同的服务类型与上层进行通信。典型的 MUX 接口函数与网络层及数据链路层 END 接口的接口函数交互关系如表 2 所示。

表 2 MUX 层与数据链路层接口函数

网络层	MUX 层	数据链路层
SetupNic	muxBind	—
CloseNic	muxUnbind	—
FrameOut	muxSend	geiEndSend
FrameIn	muxReceive	—
LoadNic	muxDevLoad	geiEndLoad
UnloadNic	muxDevUnload	geiEndUnLoad
StartNic	muxDevStart	geiEndStart
StopNic	muxDevStop	geiEndStop
—	muxIoctl	geiEndIoctl

因此在 VxWorks 系统上实现主站功能,需要完成初始化网卡、管理发送缓存/接收缓存、发送数据帧、阻塞/非阻塞接收数据帧等几个关键函数。在 VxWorks 内核编译时,需要包含与 MUX 层相关的编译选项,包括 INCLUDE_MUX_COMMON、INCLUDE_MUX 等,网卡驱动中的主要函数用到了 muxBind、muxUnbind、muxSend 等函数。

3.4 报文处理

为减少主站抖动,需要对现有的报文处理流程进行改进,包括:减少代码中的分支跳转,增加临界区控制;将状态轮询更新、处理异步请求、运行检查、组装报文等步骤置于一循环周期的末尾,使得各循环周期中只有报文发送部分的代码分支跳转可以影响整个系统性能;将发送报文任务的优先级设为最高优先级,将网络状态监控等任务设为相对较低的优先级。

3.5 应用层软件

应用层软件部分主要实现了 PLC 代码解析、过程数据映射、软件时间戳数据缓存等功能。应用层将 PLC 代码与自定义的数据结构进行映射,并与实际应用中的数据结构进行映射,随后进行过程数据处理,并将处理后的过程数据下发至驱动层,同时还需进行软件时间戳提取及缓存。总体来说,主站应用层代码对于实时性要求相对较弱,主站其余部分在优化后应确保在循环周期内为应用层保留尽可能多的时间,从而方便外部用户进行应用层开发。

4 测试结果与分析

基于上述设计,本文实现并优化了基于树莓派及 VxWorks 的 EtherCAT 主站,对不同报文发送方式、不同内核配置进行对比测试,同时通过软硬件时间戳综合测量主站各部分时延抖动。

4.1 轮询与中断发送测试

首先测试主站在典型的通信循环周期 1 ms 条件下,主站发送端整体时延及抖动。分别采用系统时钟轮询和辅助时钟中断两种方式定时发送 1 万帧报文,并同时测试了基于 SMP(Symmetric Multi-Processors, 对称多核处理器)和 UP(Uni-Processor, 单核处理器)模式下的时延抖动,测试结果如图 5 所示。图 5(a)、(b)分别为多核模式下采用轮询、中断方式进行发送时的时延抖动;图 5(c)、(d)分别为单核模式下采用轮询、中断方式进行发送时的时延抖动。在多核模式下,发送端的抖动最低可达 $\pm 3 \mu\text{s}$,单核模式下,发送端抖动最低可达 $\pm 2.5 \mu\text{s}$ 。对比轮询和中断下的实现可见,采用中断方式进行数据帧发送的抖动较小。

4.2 内核配置测试

测试在多核模式和单核模式下,使用辅助时钟中断进行数据帧发送的抖动,并给出统计数据。表 3、4 分别给出了多核及单核模式下 1 ms、500 μs 、250 μs 、125 μs 通信循环周期下的抖动数据,每次实验均发送 10 万帧 EtherCAT 报文,其中 J_{MAX} 及 J_{MIN} 分别表示抖动的最大值和最小值, J

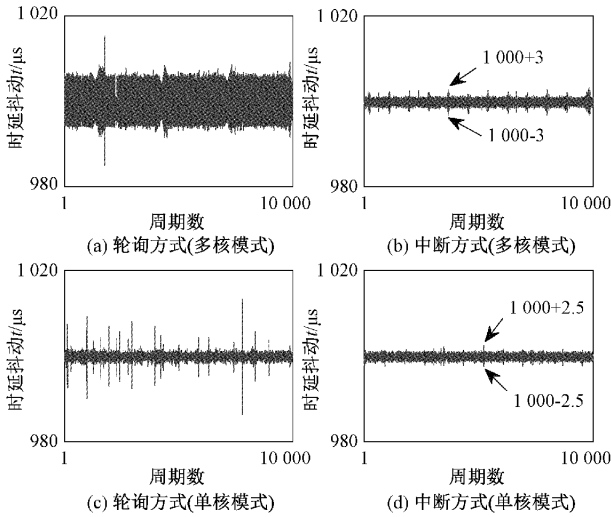


图 5 轮询与中断发送测试时延抖动

表示所有报文抖动的峰峰值, J_{99} 表示 99% 报文抖动的峰峰值, R_J 表示抖动占通信循环周期的百分比。

表 3 多核模式下主站抖动

循环周期	1 ms	500 μ s	250 μ s	125 μ s
J_{MAX}/μ s	+8.20	+8.08	+8.72	+7.64
J_{MIN}/μ s	-9.60	-8.32	-8.00	-7.64
J_{99}/μ s	6.72	12.80	12.96	12.72
J/μ s	17.8	16.40	16.72	15.28
$R_J/\%$	1.78	3.28	6.69	12.22

表 4 单核模式下主站抖动

循环周期	1 ms	500 μ s	250 μ s	125 μ s
J_{MAX}/μ s	+2.40	+2.88	+2.24	+2.52
J_{MIN}/μ s	-2.80	-3.36	-2.16	-3.16
J_{99}/μ s	3.64	3.52	3.40	3.04
J/μ s	5.20	6.24	4.40	5.68
$R_J/\%$	0.52	1.25	1.76	4.54

由实验结果可知,多核模式下,所有报文抖动的峰峰值没有明显变化,随着通信循环周期变小,其抖动与通信循环周期的比值逐渐升高,当通信循环周期降至 125 μ s 时,该比值超过 10%。单核模式下,所有报文抖动的峰峰值相对来说更小,随着通信循环周期变小,所有报文抖动的峰峰值没有明显的变化趋势,而抖动与通信循环周期的比值逐渐升高,但始终未超过 5%。在同一通信循环周期下,单核模式的抖动与通信循环周期比值均要小于多核模式下的比值。相比于多核模式中需要进行核间同步及多核间处理器间中断(interrupt processor interrupt, IPI)通信,单核模式下去除了这些不确定性。因此最好采用单核模式实现主站,或者在多核模式下采用独占单核、将关键任务绑定至单

核等方式是提高主站实时性能的较好选择。注意到单核模式下在 125 μ s 循环周期时,主站抖动为 5.68 μ s,满足工业现场数据采集、楼宇自动化、AGV 控制等应用场景中抖动小于 10 μ s 的需求^[22]。

4.3 主站各部分时延抖动测试

随后基于单核模式,使用中断并结合 VxWorks 系统高精度时间戳进行测试。分别测试在通信循环周期 1 ms、500 μ s、250 μ s、125 μ s 时,主站整体时延抖动 J 及各部分时延抖动,包括定时器中断到 CPU 跳转到主站通信程序的时延抖动 J_{SYS} 、主站进行组帧的时延抖动 J_{SW} 、MUX 层的时延抖动 J_{MUX} 。表 5 为各部分时延、抖动的测试结果。

表 5 单核模式下主站各部分时延及抖动

循环周期	1 ms	500 μ s	250 μ s	125 μ s
J/μ s	5.20	6.24	4.40	5.68
J_{MAX}/μ s	+2.40	+2.88	+2.24	+2.52
J_{MIN}/μ s	-2.80	-3.36	-2.16	-3.16
J_{SYS}/μ s	2.39	3.21	2.71	2.77
J_{SW}/μ s	1.1	0.83	0.84	0.70
J_{MUX}/μ s	0.87	0.85	0.89	0.85

分析测试结果,可得出如下结论:随着循环通信周期的变小,数据帧经过 MUX 层的时延抖动保持在一个稳定的范围,约 0.85 μ s;计算过程数据及组帧的抖动变化稍大一些,最高抖动约 1.1 μ s;而任务切换、定时器中断响应时延抖动较大,最高抖动约 3.2 μ s。因此造成主站抖动的主要因素是系统调度、任务切换、定时器中断,而计算过程数据、组帧、数据帧通过 MUX 层的影响相对较小。

随后通过软硬件时间戳结合,可测量主站 MAC 层时延抖动。在此需要考虑软硬件时间戳计时起始时间差异及采样误差两方面问题。需要对首次采样的时间戳值进行归零,并计算软硬件时间戳时钟之间的时间补偿值。定义时间补偿系数 k :

$$k = \frac{T_h(N) - T_s(N)}{N} \quad (1)$$

其中, $T_h(N)$ 和 $T_s(N)$ 分别为第 N 个采样点的硬件及软件时间戳值。经过测试,10 万次采样时间戳共计相差约 25 ms,因此时间补偿系数 $k = 250$ ns/采样点,则:

$$T_{mac}(i) = T_{h0}(i) - T_{s0}(i) - k \times i, (i = 1 \sim N) \quad (2)$$

其中, $T_{mac}(i)$ 为第 i 个循环周期下数据帧经过 MAC 层的时延, $T_{h0}(i)$ 及 $T_{s0}(i)$ 分别为做归零化处理后的第 i 个循环周期下的时间戳。

通过对软硬件采集到的时间戳进行补偿,最终得出了不同通信循环周期下的 MAC 层抖动,测试数据如表 6。

由测试结果可知,数据帧在 MAC 层的抖动相对比较稳定,约 4 μ s,该数值大于数据帧处理、组帧及数据帧经过

表 6 单核模式下网卡 MAC 层抖动

循环周期	1 ms	500 μ s	250 μ s	125 μ s
J_{MAX}/μ s	+2.24	+1.93	+2.10	+2.31
J_{MIN}/μ s	-2.33	-2.08	-2.16	-2.28
J_{99}/μ s	3.16	3.00	3.11	2.55
J/μ s	4.57	4.01	4.26	4.59
$R_j/\%$	0.46	0.80	1.70	3.67

MUX 层的抖动。此时 MAC 层的时延抖动已经满足多数现场需求。若想进一步提升性能,则需后续在 MAC 层实现上进行深度优化。

5 结 论

本文实现的基于树莓派的 EtherCAT 主站及其测试系统,具有轻量化、易部署、成本低等优势。通过测试系统中软硬件时间戳结合的方式,完成了主站各部分的时延抖动数据测量,分析了引起主站各部分抖动的因素,辅助完成主站优化。本文为自主开源 EtherCAT 主站及从站节点的开发提供了设计依据,也为工业以太网性能分析提供了方法。基于树莓派的 EtherCAT 主站经长时间连续运行测试,系统稳定性高,在 125 μ s 循环周期下主站抖动约 6 μ s,在降低成本的同时可满足工业现场数据采集、楼宇自动化、AGV 控制等应用需求。

参考文献

- [1] 许世浩,徐淑静,郭弘扬,等. 基于 EtherCAT 的 ATP 系统架构设计[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 161-167.
- [2] 张少坡,陆文高,赵川,等. EtherCAT 在编队卫星动力学仿真测试中的应用研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(3): 80-83.
- [3] 刘聪俊,何岭松. EtherCAT 架构的 PC 型多机器人控制方案[J]. 制造业自动化, 2020, 42(8): 51-57.
- [4] 孟另伟,郑永军. 基于 EtherCAT 的分布式测控系统设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2020(6): 73-78.
- [5] 张春涛,王勇. 工业机器人六维力传感器在线标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 161-168.
- [6] 张春涛,王勇,穆春阳,等. 基于快速动力学辨识的机器人力/位混合控制碰撞检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6): 161-171.
- [7] WU X, XIE L, LIM F. Network delay analysis of EtherCAT and PROFINET IRT protocols [C]. IECON 2014-40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, IEEE, 2014: 2597-2603.
- [8] 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.
- [9] 黄敏,马飞扬,刘广哲,等. 应用于飞机测试的 EtherCAT 测试系统实时性测试及分析[J]. 电子测量

技术, 2018, 41(20): 93-97.

- [10] 屠奕仁. 基于 IGH 开源框架的 EtherCAT 主站设计[J]. 自动化应用, 2020(5): 65-66, 69.
- [11] 邱昌华,郭永杰,李宗坡,等. 基于 Xenomai 的 EtherCAT 主站开发与实时性优化[J]. 自动化应用, 2021(12): 82-86.
- [12] 李国辉,韩利峰,李丹清,等. 基于国产操作系统的 EtherCAT 的控制系统开发[J]. 计算机应用, 2020, 40(S1): 238-242.
- [13] 宋宝玉,王波涛. 基于树莓派嵌入式平台的车道线检测算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 93-98.
- [14] 张鑫,张家洪,许晓平,等. 计量检定实验室仪表读数自动识别系统设计[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 173-177.
- [15] AN C J, YI H C, KIM H W, et al. Preventing data loss in linux-based EtherCAT master[J]. International Journal of Future Computer and Communication, 2015, 4(4): 246-249.
- [16] YI H C, CHOI J Y. Performance analysis of Linux-based EtherCAT DC synchronization [C]. IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM), 2015: 549-552.
- [17] 杨亮亮,陶之源,彭自良,等. 基于 EC-01M 的嵌入式 EtherCAT 主站设计[J]. 机械与电子, 2022, 40(1): 8-13.
- [18] 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.
- [19] SUNG M, KIM I, KIM T. Toward a holistic delay analysis of EtherCAT synchronized control processes [J]. International Journal of Computers Communications & Control, 2013, 8(4): 608-621.
- [20] 刘豪志,刘凯,王欢,等. 基于嵌入式 Linux 平台 EtherCAT 主站设计[J]. 机械与电子, 2020, 38(3): 44-47, 52.
- [21] 周俊杰,何攀峰. 基于 VxWorks 的实时多任务软件框架设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(4): 80-82.
- [22] 朱瑾瑜,陈洁,段世惠. 确定性工业网络架构与关键技术分析[J]. 邮电设计技术, 2022(3): 8-13.

作者简介

赵纯, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为嵌入式系统, 工业实时以太网。

E-mail: zhaochun@sia.cn

杨志家, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为系统级芯片与嵌入式系统等。

E-mail: yang@sia.ac.cn

谢闯, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为系统级芯片建模、设计与仿真。

E-mail: xiechuang@sia.ac.cn

王剑, 博士, 副研究员, 主要研究方向为工业通信网络、集成电路与片上系统设计等。

E-mail: wangjian710@sia.cn