

# 双系统冗余热备 EtherCAT 主站的设计与实验

胡鑫明<sup>1,2</sup>, 蒋大海<sup>1</sup>, 任艳兵<sup>2</sup>, 巩芈芳<sup>2</sup>, 魏超<sup>1</sup>

(1. 西安西电数字科技有限公司, 陕西 西安 710075;

2. 西安西电电力系统有限公司, 陕西 西安 710075)

**摘要:** 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。针对目前 EtherCAT 主站产品普遍无法同时满足线缆冗余和热备份运行, 设计了一种双系统冗余热备主站方案。该主站设备由 2 个主站模块与 1 个冗余控制模块协同工作, 主站模块负责控制网络中的从站设备, 冗余控制模块在监视主站模块并仲裁其激活/备用状态的同时还通过其内部网口切换组件控制仅激活的主站模块接入网络。方案中主站模块基于龙芯微处理器设计, 冗余控制模块基于意法半导体微控制器设计, 所选用的主要软件如实时操作系统 (SylixOS, RT-Thread) 以及协议栈 (SOME, libmodbus) 均为开源产品。最后对所设计的主站设备进行测试验证, 结果证明该主站功能完整性能优秀, 既保留了线缆冗余机制还实现了双系统冗余热备份运行, 能够在激活系统故障后毫秒级时间完成系统切换, 可靠性满足大多数工业控制应用场景对主站控制器的要求。

**关键词:** EtherCAT 主站; 双系统; 冗余; 热备份; SylixOS; RT-Thread; SOEM

中图分类号: TP23; TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2024)04-0001-06

doi: 10. 20165/j. cnki. ISSN1673-629X. 2024. 0001

## Design and Experiment of Dual-system Redundant Hot-standby EtherCAT Master

HU Xin-ming<sup>1,2</sup>, JIANG Da-hai<sup>1</sup>, REN Yan-bing<sup>2</sup>, GONG Yuan-fang<sup>2</sup>, WEI Chao<sup>1</sup>

(1. Xi'an XD Digital Technology Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

2. Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

**Abstract:** EtherCAT bus technology has been widely used in the field of industrial control with the advantages of low cost and high performance. In view of the current EtherCAT master products generally can not meet the cable redundancy and hot backup operation at the same time, a dual system redundant hot backup master scheme was designed. The host module is responsible for controlling the slave devices in the network, and the redundant control module not only monitors the host module and arbitrates its active/standby state, but also controls the activated host module to access the network through its internal network interface switching components. The host module is based on the Loongson microprocessor design, and the redundancy control module is based on the ST Microcontroller design. The selected main software such as real-time operating system (SylixOS, RT-Thread) and protocol stack (SOME, libmodbus) are open source products. Finally, the designed master equipment is tested and verified, and the results show that the master has complete function and excellent performance, not only retains the cable redundancy mechanism, but also realizes the dual system redundant hot backup operation, and can complete the system switch in milliseconds after the activation system failure, and the reliability meets the requirements of the master station controller in most industrial control application scenarios.

**Key words:** EtherCAT master; dual system; redundancy; hot-standby; SylixOS; RT-Thread; SOEM

## 0 引言

随着以太网技术的不断发展, 以太网凭借稳定可靠、高速传输的优势, 越来越多地应用到工业自动化领域, 取代了大量传统工业现场总线的市场份额。标准以太网的一个特定版本是实时以太网, 它确保网络数

据交换的延迟非常低, 从而获得传输时间确定性<sup>[1]</sup>。EtherCAT 完全符合以太网标准, 具有 100 Mbps 的传输速率, 还实现了分布式时钟机制, 使网络节点的同步精度达到 1  $\mu$ s<sup>[2]</sup>。EtherCAT 广泛应用于工业领域, 如伺服控制系统、机器人、数控机床等<sup>[3-4]</sup>。此外 Ether-

收稿日期: 2023-06-08

修回日期: 2023-10-09

基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2019B111109001)

作者简介: 胡鑫明 (1988-), 男, 研究方向为电力系统控制保护、工业自动化控制系统、嵌入式系统设计等。

CAT 的特点还包括可选线缆冗余和功能性安全协议 (SIL3)<sup>[5]</sup>。工业领域对系统可靠性要求越来越高,解决系统可靠性的常用方法是冗余<sup>[6]</sup>。EtherCAT 线缆冗余采用环形拓扑网络结构,在某一点线缆断开后,在断点两端的帧将分别被处理,以保证网络的继续运行<sup>[7]</sup>。虽然线缆冗余技术有效提高了网络的可靠性,但对于一些要求严苛的应用场景,还需要考虑主站掉线的情况,避免因主站发生故障而对系统造成重大影响。该文介绍一种具备双系统冗余热备功能的 EtherCAT 主站设计。

## 1 系统结构及硬件设计

### 1.1 系统结构

所设计的双系统冗余热备主站的系统结构主要由 2 台软硬件配置完全相同的主站模块和 1 台冗余控制模块组成。如图 1 所示,主站模块 A 和主站模块 B 互为备用分别作为主站设备的 A 系统和 B 系统运行,冗余控制模块负责监视主站模块并仲裁其激活/备用状态。每个主站模块设计网口 1 和网口 2 作为 EtherCAT 接口,网口 R 实现两台主站模块之间的数据同步。冗余控制模块提供 2 组 2 选 1 网口切换组件。主站模块既可以作为双系统主站的一部分,也可以独立作为单系统主站工作,具备很高的灵活性。

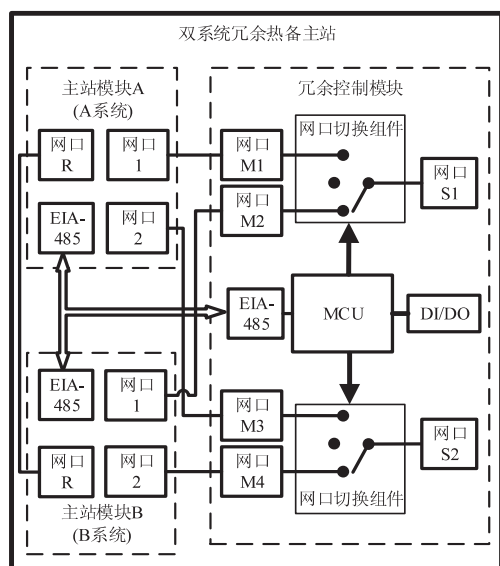


图 1 主站系统硬件结构

冗余控制模块的 S 侧网口与 EtherCAT 从站连接组成环网, M 侧网口与主站模块 A、B 的 EtherCAT 网口连接,内部微控制器同步控制这 2 组网口切换组件。上述设计允许冗余控制模块的 S 侧网口在 EtherCAT 网络处于运行状态时同步切换所连接的 M 侧网口,进而控制所有 EtherCAT 从站改变与主站模块 A 或 B 的连接关系,最终可使主站模块由备用状态切换为激活状态后立即完全获得网络控制权驱动从站继续工作,

实现主站的冗余热备份。主站模块和冗余控制模块均配置 EIA-485 (曾命名为 RS-485) 总线接口,并通过 EIA-485 总线组成网络。EIA-485 总线通过差分信号方式传输数据,有效大幅减少通讯过程中的共模干扰,显著提高数据传输的稳定性<sup>[8-9]</sup>。为简化设计,在 EIA-485 总线上使用 Modbus-RTU 通讯协议,冗余控制模块作为 Modbus Master,主站模块作为 Modbus Slave,冗余控制模块监视主站模块并控制其激活/备用状态。

### 1.2 主站模块硬件设计

主站模块选用龙芯中科推出的 2K1000LA (简称龙芯 2K1000) 国产处理器作为主芯片,该处理器在工控领域被广泛使用,其性能和可靠性被多项产品验证<sup>[10]</sup>。龙芯 2K1000 采用 LoongArch 指令系统 (龙架构),主频最高可达 1 GHz,内部集成了 2 个 LA264 处理器核,64 位 DDR3 控制器,并集成各种系统 IO 接口。如图 2 所示,龙芯 2K1000 通过片内集成的 2 个 RGMII 以太网控制器实现符合 100BASE-TX 标准的网口 1 和网口 2 作为 EtherCAT 接口;搭配网讯芯片 WX1860AL4 通过 PCIe 扩展 1 路千兆以太网接口 R,实现模块 A 和模块 B 之间的数据同步;基于 UART 控制器实现 EIA-485 接口,与冗余控制模块通讯。

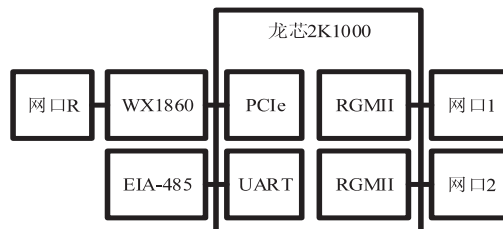


图 2 主站模块硬件结构

WX1860AL4 是网讯 WX1860 系列中一款千兆专用类以太网控制器芯片,具有 4 个完全集成的千兆位以太网媒体访问控制 (MAC)、物理层 (PHY) 模块和 4 个可以连接到外部 PHY 的 RGMII 接口,兼容 1000Base-T/100Base-T/10Base-T 接口类型。该芯片支持 PCIe Gen2x4 主机接口和最多 4 个 GbE 网络接口,具备网络协议加速、流量控制、隧道协议等功能,能够满足主站模块之间数据同步的性能要求。

### 1.3 冗余控制模块硬件设计

冗余控制模块选用意法半导体基于 ARM Cortex-M3 内核的 32 位精简指令集微控制器 STM32F107VC 作为主芯片。该微控制器的工作频率最高可达 72 MHz,片上集成了 256 KB 的 Flash 存储器和 64 KB 的 SRAM 作为运行内存,主要面向需要连接功能和实时性能,且低功耗、低成本的应用场景。STM32F107VC 选用 1 路 UART 控制器实现 EIA-485 接口,与主站模块通讯;通过数字量电平输出信号同时控制 2 组网口

切换组件实现网络接口同步切换以及支持 DI/DO 信号。切换组件的内部主要由模拟开关芯片组成。模拟开关芯片选用沁恒微电子的 CH440G, CH440G 具备高带宽和低导通电阻特性,可以支持 3.3 V 或更低电压,如图 3 所示,包含了 4 路可同步切换的 2:1 低阻宽带双向模拟开关。

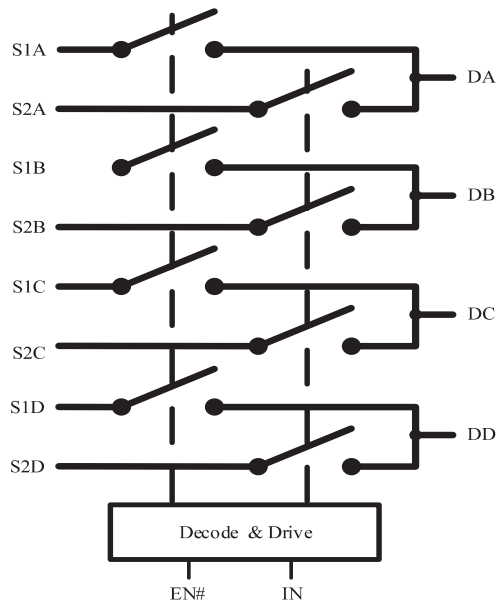


图3 CH440G 原理

通过控制 CH440G 的 EN#, IN 管脚电平即可决定其内部的连接关系, EN# 管脚控制实现统一使能, IN 管脚选择进行统一切换。如表 1 所示,若向 EN# 管脚输入高电平,则 D 端与 S 端完全断开;若向 EN# 管脚输入低电平, D 端与 S 端的连接关系由 IN 管脚电平决定, IN 管脚为低电平则 D 端连接 S1 侧,反之则 D 端连接 S2 侧。

表1 CH440G 连接控制表

EN#	IN	DA	DB	DC	DD
0	0	连 S1A	连 S1B	连 S1C	连 S1D
0	1	连 S2A	连 S2B	连 S2C	连 S2D
1	X	断开	断开	断开	断开

因为 EtherCAT 使用 100BASE-TX 的以太网物理层,而 100BASE-TX 标准实际使用 TD+, TD-, RD+, RD- 共 4 根信号线,所以每组网络接口切换组件使用 1 个 CH440G 即可完成对网络接口选择的控制。如图 4 所示,在冗余控制模块内部, CH440G 的 1 组公共端连接 S 侧 RJ45 网口; CH440G 的 2 组选择端分别连接 M 侧 RJ45 网口。微控制器使用 2 路数字量电平输出信号 DO1, DO2 同步控制所有网口切换组件的 CH440G,其中 DO1 作为使能信号控制 CH440G 的 EN# 管脚电平, DO2 作为选择信号控制所有 CH440G 的 IN 管脚电平。微控制器还实现了冗余控制模块对外

的 DI/DO 信号,用来捕获外部信号及对外发送本机信号,以支持与其他设备的交互。

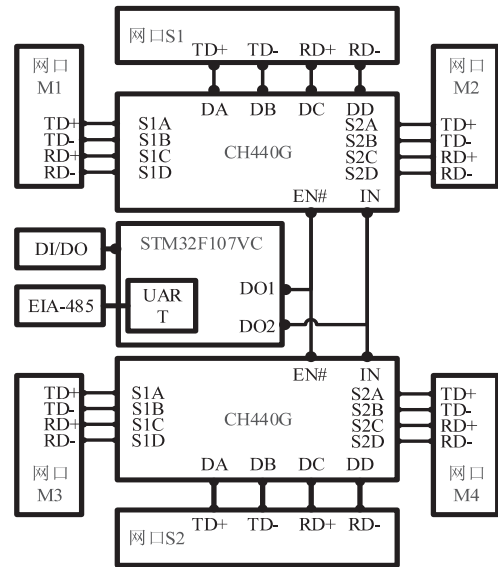


图4 冗余控制模块硬件结构

## 2 软件设计

随着嵌入式的发展和更多复杂任务的出现,嵌入式领域的软件复杂性也迅速增加<sup>[11]</sup>。为保证控制系统能够长期稳定可靠运行并具备实时处理性能,主站模块和冗余控制模块的软件方案均基于确定性嵌入式实时操作系统来设计。嵌入式实时操作系统作为抢占式操作系统,其内核是可中断、可抢占的,可支持基于时间片轮转或优先级抢占的任务调度。实时操作系统除了提供确定性的多任务并发,还提供信号量、消息队列、内存管理、网络协议栈、文件系统等组件。系统内置的这些功能可简化软件设计工作,大幅降低软件开发的工作难度,缩短产品开发周期。操作系统作为软件系统的核心,其安全性与可靠性是构造高可信软件的最为关键的一步<sup>[12]</sup>。与闭源的实时操作系统(如 VxWorks, QNX, ReWorks 等)相比开源操作系统技术透明度高,能够有效提高系统可靠性,降低使用风险且便于故障定位和性能优化。基于上述优点,开源实时操作系统被越来越多地应用到航空、军事、工业控制等领域产品中。本设计方案中主站模块和冗余控制模块均选用国产主流嵌入式实时操作系统进行开发。

### 2.1 主站模块软件设计

主站模块操作系统选用翼辉信息公司的 SylixOS, 这是一款支持对称多处理器的大型开源实时操作系统,采用抢占式、多任务、硬实时的方式来设计,具有功能完善、性能卓越、可靠稳定的特点<sup>[13-14]</sup>。SylixOS 操作系统作为一款完全自主的国产操作系统,其内核自主化率达 100%,支持多种架构处理器,并适配了大量的主流国产通用处理器。开发环境选用 RealEvo-

IDE,这是一个强大的开发工具,可以创建和管理工程,调试应用程序<sup>[15]</sup>。

EtherCAT 主站协议栈软件按授权方式可分为付费的商业软件和免费的开源软件,其中开源软件主要是 RT-LAB 的 SOEM (Simple Open Source EtherCAT Master) 和 EtherLab 的 IgH。两款协议栈进行对比发现 SOEM 更简单易用,而 IgH 复杂但功能更完整<sup>[16-17]</sup>。原单系统 EtherCAT 主站设计方案已经完成了 SOEM 在 SylixOS 上的移植,该文所设计的双系统冗余主站模块软件在此基础上进行迭代开发。以太网协议软件包已在操作系统中集成,直接使用网络套接字即可实现以太网通信功能。Modbus 协议栈选用 libmodbus,这是一款非常优秀且简单易用的基于 C 语言编写跨平台开源软件库,用于支持设备使用串行端口或以太网连接遵循 Modbus 协议传输数据。为实现主站冗余,主站模块软件设计主要增加如下内容:

(1) 运行状态分为激活和备用,并能够在运行过程中切换;

(2) 激活状态下执行控制逻辑并收发 EtherCAT 报文驱动从站工作,备用状态则不执行;

(3) 搭建 Modbus-RTU Slave,与冗余控制模块通讯,接收激活/备用指令;

(4) 在内存中创建双系统同步数据区,需要同步的重要数据均分配到此区域;

(5) 基于 UDP 协议实现主站模块重要运行数据的同步。

软件框图如图 5 所示。

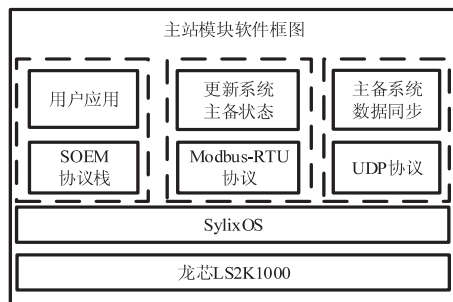


图 5 主站模块软件框图

主站模块操作系统启动完成后依次执行 SOME, Modbus-RTU Slave 及 UDP 传输初始化;创建主备系统数据同步任务;创建主备系统仲裁任务;创建用户应用任务。主站模块的各任务创建成功后即开始并发运行,每个控制周期重复如下工作:

(1) 更新状态任务自检并更新 Modbus 数据,报告设备状态并获得激活/备用指令;

(2) 应用任务读取系统状态,若为激活系统则执行逻辑并向备用系统发送同步数据,否则不执行;

(3) 数据同步任务通过 UDP 套接字接收数据并

读取本模块系统状态,若为备用状态则解析并更新同步数据,否则不处理。

各主要任务的流程如图 6 所示。

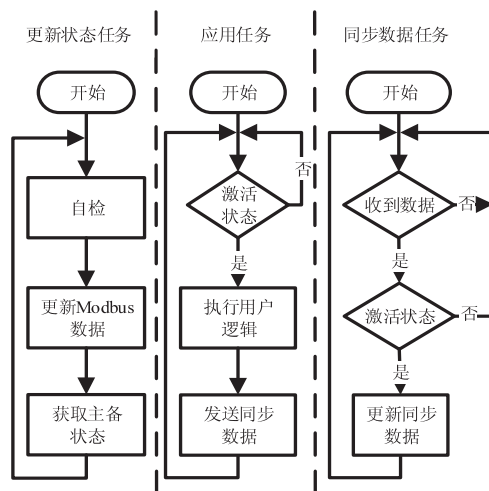


图 6 主站模块任务流程

## 2.2 冗余控制模块软件设计

冗余控制模块的操作系统选用上海睿赛德负责开发维护的 RT-Thread。该操作系统采用宏内核的设计方式,以其可靠、安全、易裁剪和组件丰富等优势满足了市场需求,已被广泛应用于航空、军工、能源、轨道交通、工业控制、消费电子等众多行业领域。开发环境选用 RT-Thread Studio,集成了工程创建和管理,代码编辑,系统配置,程序下载和调试等功能,结合图形化配置系统以及软件包和组件资源<sup>[18-20]</sup>。

冗余控制模块的 Modbus 协议同主站模块一样选用 libmodbus 软件库实现,且该软件库已经作为第三方组件集成在 RT-Thread Studio 中,简单设置即可添加到项目代码中。软件框图如图 7 所示,冗余控制模块的软件主要实现以下功能:

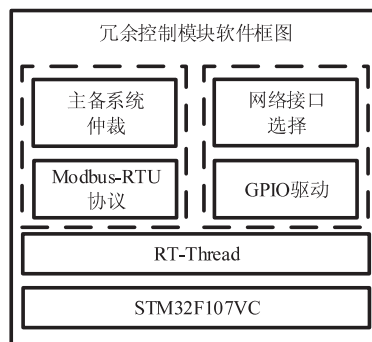


图 7 冗余控制模块软件框图

(1) 搭建 Modbus-RTU Master,与主站模块通讯,监视其运行状态,并控制激活/备用状态;

(2) 通过控制 2 路 GPIO 电平信号,控制模拟开关工作状态,进而控制网络接口的选择。

冗余控制模块操作系统启动完成后依次执行 GPIO 配置和 Modbus-RTU 主站初始化,再创建主备



系统仲裁任务。

如图8所示,软件配置GPIO阶段驱动模拟开关的EN#管脚为高电平,控制S侧网口与M侧所有网口断开,使所有主站模块在确定主备状态前均无法控制网络。主备系统仲裁任务通过Modbus-RTU协议监视主站模块的状态,依次读取主站模块A和B的状态,将监测到的第1个就绪状态主站模块设置为激活状态,先控制其网口与从站连接,再向该主站模块发送激活指令。系统运行过程中若处于激活状态的主站模块发生故障,则断开从站与主站的网络连接,重新仲裁主站模块的激活状态。系统切换时冗余控制模块先控制备用主站模块网口与从站连接,再向备用系统发送激活指令。

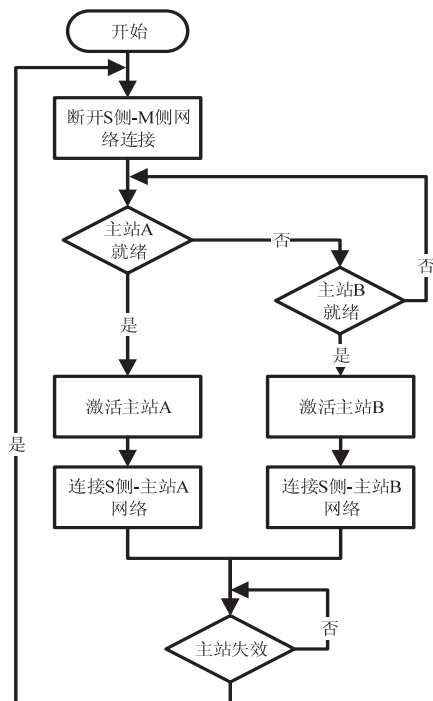


图8 仲裁任务流程

### 3 实验验证

为了说明所设计的双系统冗余热备 EtherCAT 主站容错技术的可靠性,对其开展了线缆冗余实验和系统切换实验。搭建实验平台如图9所示,配置5个EtherCAT数字量输出从站与被测主站组网,主站设备网口S1和S2分别与起始从站的网口IN和末尾从站的网口OUT连接,相邻从站的网口OUT和IN相连,网线依次命名为L1~6;实验计算机的EIA-485接口接入主站设备内部的EIA-485总线,并运行集成了Modbus-RTU Slave和录波功能的监视程序;启用被测主站冗余控制模块软件内置的测试功能,访问实验计算机上运行的Modbus-RTU Slave;设置被测主站冗余控制模块在切换系统时通过DO通道输出上升沿信

号,作为录波启动信号接入录波装置;被测主站设置EtherCAT的PDO数据传输周期为50ms;被测主站应用任务驱动每个从站第1个数字量输出通道输出频率10Hz、占空比50%的方波信号;配置一台录波装置,监测每个从站第1个数字量输出通道,录波触发条件为上升沿触发,采样率50Hz,录波时长5秒。

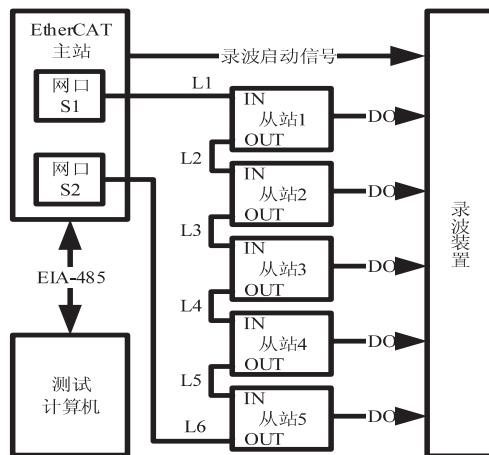


图9 实验平台示意图

#### 3.1 线缆冗余实验

所设计的主站应保证其线缆冗余功能与原有的单系统方案保持一致,因此首先进行了线缆中断的实验。首先设置主站的A系统处于激活状态控制从站输出方波信号,运行过程中每次断开网线L1,L3,L6其中之一,然后手动触发录波,最后将主站B系统设置为激活状态重复上述实验。通过查看主站告警信息和录波文件,判断断开网线后从站是否继续保持工作状态,以检验被测主站的线缆冗余功能。如表2所示,将EtherCAT网络中一段网线断开后,所有从站依然在主站设备的控制下继续运行,按所设计节拍同步输出10Hz频率的方波信号,主站设备并未报告从站设备掉线的告警信息。

表2 线缆冗余实验记录

激活系统	断开网线	从站 DO 信号	主站告警
A	L1	正常	无
A	L3	正常	无
A	L6	正常	无
B	L1	正常	无
B	L3	正常	无
B	L6	正常	无

以上实验结果表明所设计的主站保留了线缆冗余的功能。

#### 3.2 系统切换实验

为了说明所设计的主站双系统冗余热备的可靠性,进行了模拟主站模块故障引发系统切换的实验。该实验需要在主站激活系统失效后将原备用系统切换

为激活系统继续控制从站工作。首先设置主站 A 系统处于激活状态控制从站输出方波信号;然后在系统运行过程通过向其操作系统的 shell 程序(命令解析器)发送指令使其重启系统,冗余控制模块监测到 A 系统失效随即将 B 系统切换为激活状态并产生录波启动信号;最后待 A 系统重新进入就绪状态后再次通过 shell 指令重启 B 系统,将 A 系统恢复为激活状态。实验结果表明主站设备在激活系统发生重启后,原备用系统在毫秒级时间内切换为激活状态,获得网络控制权继续驱动从站执行设定任务。由此可以看出,通过 2 套主站模块和冗余控制模块协同工作,所设计的主站具备双系统冗余热备份的能力。

从以上实验可以看出,双系统冗余 EtherCAT 主站在保留了线缆冗余功能的同时,还实现了双系统冗余热备份,并能够在毫秒级时间完成系统切换。因此,所设计的双系统主站与单系统主站相比能够提供更高的可靠性。

#### 4 结束语

该文提出了一种基于高性能处理器主站模块与低成本微控制器冗余控制模块协同,切换网络接口的双系统冗余热备 EtherCAT 主站方案。方案中设计了主站的硬件,选择 SylixOS,RT-Thread 分别作为主站模块和冗余控制模块的操作系统,并在原 EtherCAT 单主站运行基础上设计了热备切换软件功能,最后搭建了主站测试平台对整体设计方案进行了验证。

实验结果证明,所设计的双系统 EtherCAT 主站功能完整、性能优秀,兼具线缆冗余和双系统冗余热备,实时性和稳定性符合工业控制系统对主控制器装置的要求。下一步的工作方向是用国产器件替换部分进口器件以提高设备的国产化率;并优化主备状态仲裁机制,进一步缩短系统切换的时间,减少对控制系统的扰动。

#### 参考文献:

- [1] MARCIN P, KRYSTIAN E. Laboratory stand for multi-axis control of stepper drives via EtherCAT fieldbus[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1140(1): 012021.
- [2] MUN P S, YOUNGWOON K, YOUNG C J. Time synchronization between EtherCAT network and external processor[J]. IEEE Communications Letters, 2021, 25(1): 103-107.
- [3] HUA Qiang, YAO Yunchang, ZHOU Weigang, et al. Design of the servo control system based on EtherCAT P[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1924(1): 012009.
- [4] WANG Song, YANG Xudong, VAN DER GEER J. Development of EtherCAT real-time control system for robot based on Simulink real-time[J]. Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2021, 21(1): 49-57.
- [5] 史步海, 王超. 基于 LinuxCNC 的 EtherCAT 主站研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(21): 17-20.
- [6] JACEK S. Cost-effective hot-standby redundancy with synchronization using EtherCAT and real-time ethernet protocols[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 18(4): 2035-2047.
- [7] MARUYAMA T, YAMADA T. Spatial-temporal communication redundancy for high performance EtherCAT master[C]//2017 22nd IEEE international conference on emerging technologies and factory automation (ETFA). Limassol: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] KRISHNA M S R, DINESH K, SHANBOG N S. Low cost remote monitoring of solar plant through RS485 communication[J]. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 2019, 8(9): 3034-3037.
- [9] 陈航, 严帅, 刘胜, 等. 基于 RS485 总线的分布式高精度数据采集系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021(2): 71-74.
- [10] LI Yan, ZHANG Shiran, LI Jian, et al. Research on operating system migration method based on domestic embedded devices[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2171(1): 012067.
- [11] 张美玉, 张倩颖, 孟子琪, 等. 实时嵌入式双操作系统架构研究综述[J]. 电子学报, 2018, 46(11): 2787-2796.
- [12] 郭建, 丁继政, 朱晓冉. 嵌入式实时操作系统内核混合代码的自动化验证框架[J]. 软件学报, 2020, 31(5): 1353-1373.
- [13] 程文博, 屈艺, 吴盘龙, 等. SylixOS 平台下的火控实时解算与实现[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10): 29-34.
- [14] ZHANG Jianwei, YANG Xiaoyu, Dong Xueyi, et al. Design and implementation of graphical interface of vehicle display and control system based on SylixOS[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1678(1): 012024.
- [15] 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.
- [16] 马平, 刘胜旺, 苏攀杰, 等. IGH EtherCAT 主站分布式时钟机制的应用与研究[J]. 机械设计与制造, 2022(1): 262-265.
- [17] 孙跃祥, 郭锐锋, 尹震宇, 等. 基于 Zynq 平台的 EtherCAT 主站系统设计与实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(11): 112-115.
- [18] QIU Yi, XIONG Puxiang, ZHU Tianlong. RT-thread RTOS design and implementation[M]. Boca Raton: CRC Press, 2020.
- [19] 张正, 贾小林. 面向 NB-IoT 的微内核 RTOS 的设计与实现[J]. 计算机技术与发展, 2022, 32(10): 76-81.
- [20] 张帝, 权悦, 国海, 等. 基于 LoRa 与 RT-Thread 的多功能矿灯设计[J]. 工矿自动化, 2021, 47(6): 96-102.