

基于双核模型的 PROFINET IO 从站设备设计^{*}

梁嘉伟¹ 宁博文¹ 陈志勇²

(1. 武汉科技大学信息科学与工程学院 武汉 430081; 2. 深圳市亿维自动化技术有限公司 深圳 518000)

摘要:为解决分布式 I/O 设备的串行接口与外部系统进行通信时实时性较差、可靠性较低的问题,设计了一种基于 PROFINET 实时工业以太网的 IO 从站设备。提出了一种基于 PROFINET 通信核芯片和 RS485 应用核芯片的双核模型方案,其中 PROFINET 通信核芯片采用专业集成电路芯片,RS485 应用核芯片采用 STM32 微控制器芯片,双核一同完成 PROFINET 协议与 RS485 协议之间的转换工作。分析了主站控制器和 IO 模块通过从站设备进行非循环数据和循环数据交互的流程,设计了从站设备和 IO 模块的通用站描述文件,通过在从站设备中集成 PROFINET 网络通信接口和 RS485 通信接口,搭建了一套完整的 PROFINET IO 通信测试平台并完成了系统组态,测试结果表明,设计的从站设备实现了从 PROFINET 协议到 RS485 协议的跨网通信,为传统分布式 I/O 设备连接 PROFINET 工业以太网的技术领域提供了一个可行、可靠的解决方案。

关键词:双核模型;PROFINET IO;从站设备;跨网通信

中图分类号: TP393.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5010

Design of PROFINET IO slave device based on dual-core model

Liang Jiawei¹ Ning Bowen¹ Chen Zhiyong²

(1. School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China;

2. Shenzhen Unimat Automation Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: To address the issue of poor real-time performance and low reliability in communication between the serial interface of distributed I/O devices and external systems, a design for an IO station device based on PROFINET real-time industrial Ethernet has been proposed. A dual-core model is presented, utilizing the PROFINET communication core chip and RS485 application core chip. The PROFINET communication core chip is an application-specific integrated circuit (ASIC), while the RS485 application core chip is based on the STM32 microcontroller. The dual-core model collectively handles the conversion between the PROFINET protocol and the RS485 protocol. The process of non-cyclic and cyclic data interaction between the main station controller and IO modules through the IO station device is analyzed. A generic station description (GSD) file for the IO station device and IO modules is designed. By integrating PROFINET network communication interfaces and RS485 communication interfaces into the IO station device, a complete PROFINET IO communication test platform is established, and system configuration is completed. The test results indicate that the designed IO station device achieves cross-network communication from PROFINET to RS485, providing a feasible and reliable solution for connecting traditional distributed I/O devices to the PROFINET industrial Ethernet in the field of technology.

Keywords: dual-core model; PROFINET IO; substation device; cross-network communication

收稿日期:2023-11-05

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51975433,51975430)项目资助

0 引言

随着国内现场总线技术的进步和工业控制系统结构由集中式向分布式转变^[1],将以太网和信息技术应用到传统现场总线系统已成为工业自动化领域的热门趋势^[2-3]。工业以太网中的 PROFINET 标准,为系统扩展组态、可诊断以及整个网络范围的服务功能提供了更好更安全的通信选择。

PROFINET 是 PROFIBUS&PROFINET 国际组织 (PI)推出的用于自动化的通信标准^[4],PROFINET 标准基于工业以太网,具有显著优势,能够实现工厂、工程自动化、安全以及包括运动控制在内的整个驱动技术的应用^[5-6]。PROFINET IO 是 PROFINET 概念中的技术内容之一,从 I/O 数据视角来描述分布式 I/O,而目前工业上广泛开发应用的分布式 I/O 设备大多通过单片机的串行接口与外部系统进行通信,存在传输速率低下、实时性较差的问题^[7],因此为了保护原有投资和节约开发成本,可以设计开发出一种能够将 PROFINET 实时工业以太网技术接入到分布式 I/O 设备中的从站设备。

随着 PROFINET IO 通信的推广创新,对 PROFINET 协议的分析与研究逐渐深入,从站设备的应用也逐渐广泛,目前从站设备的实现方式主要分为基于软核、基于单核和基于双核 3 种。文献[8]基于 STM32 通信软核实现了 PROFINET 的软实时通信,这种方式节约了硬件成本,但存在着协议栈移植困难,实时性较差的问题。文献[9-10]基于单核系统设计了 PROFINET IO 工业以太网接口,这种方式保证了通信的实时性,但在复杂应用的实现上具有一定的限制。文献[11-12]基于双核系统实现了 PROFINET 协议与其他协议之间的跨网通信,这种方式既保证了通信的实时性,也提升了处理复杂应用的能力,因此应用较其他方式更为广泛。

本文提出一种基于 PROFINET 通信核芯片和 RS485 应用核芯片的双核模型方案,采用瑞萨公司 TPS-1 芯片作为 PROFINET 通信核芯片,采用 STM32 微控制器芯片作为 RS485 应用核芯片,通过硬件设计和软件实现,设计了一种具有 PROFINET 网络接口和 RS485 接口的从站设备。基于该从站设备方案搭建了一套完整的 PROFINET IO 通信测试平台并完成了系统组态,测试结果表明了该从站设备能够实现从 PROFINET 协议到 RS485 协议的跨网通信,验证了所提出方案的有效性。

1 PROFINET IO 通信基本原理

一个基本的 PROFINET IO 通信系统具有控制器、监视器和 IO 设备 3 种设备类型。本文设计方案采用可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 作为控制器,对接入设备进行参数化和组态,采用 PC 作为监视器,进行调试和故障诊断的工作,采用数字量和模拟量 IO 模块作为 IO 设备,报告诊断和组态等状态信息。控制器

和 IO 设备之间通过从站设备进行数据交换。

PROFINET 具有 3 种性能等级的通信类型,分别为非实时 (non-real time, NRT) 通信、实时 (real time, RT) 通信^[13]和等时同步 (isochronous real time, IRT) 通信^[14],3 种通信的数据通道如图 1 所示。

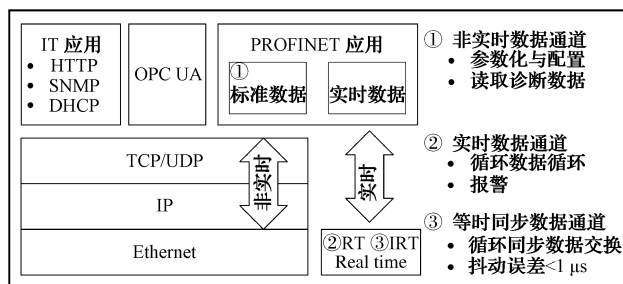


图 1 PROFINET 通信类型和数据通道

Fig. 1 PROFINET communication types and data channels

NRT 通信基于 TCP/UDP 和 IP 技术进行通信交互,响应时间约为 100 ms,适用于对实时性要求较低的通信;RT 通信对实时性要求较严格,该通道同时传输 NRT 数据与 RT 数据,响应时间约为 10 ms。IRT 通信对实时性要求最严格,响应时间小于 1 ms,抖动误差小于 1 μ s,适用于运动控制领域中的高速通信,且需要专用设备的硬件支持^[15]。

2 PROFINET IO 从站硬件设计

2.1 总体设计

本文设计方案提出的双核芯片模型中“双核芯片”分别为专用集成电路 (application specific integrated circuit, ASIC) 芯片和 STM32 微控制器 (micro control unit, MCU) 芯片,基于该模型完成 PROFINET IO 从站设备的硬件设计,其结构如图 2 所示。由于 TPS-1 芯片内部具有丰富的资源配置,内部集成了 CPU、支持最新 PROFINET

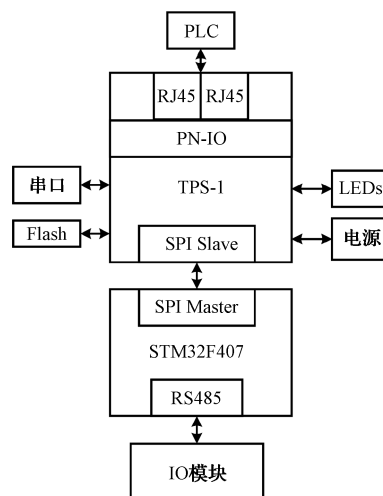


图 2 从站设备方案结构

Fig. 2 Structure diagram of slave device scheme

规范的 2 端口交换机、以太网 PHY 和外围模块,其内部结构满足 IRT 协议的要求,所集成组件实现了完整的接口功能^[16],因此采用 TPS-1 作为 ASIC 芯片,与主站 PLC 进行 PROFINET 通信,其内部结构如图 3 所示。采用 STM32F407 作为 MCU 芯片,与 TPS-1 和 IO 模块分别进行 SPI 通信和 RS485 通信。

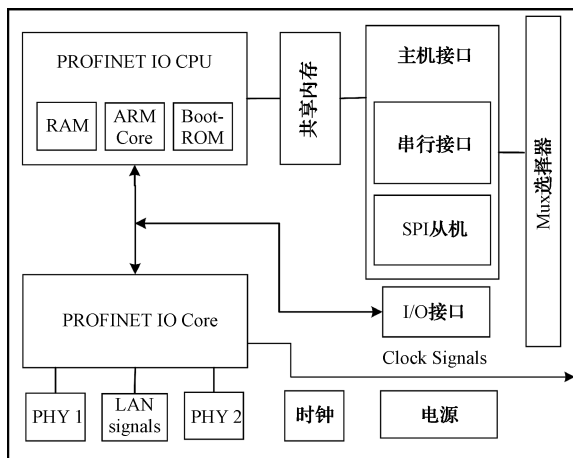


图 3 TPS-1 内部结构

Fig. 3 Internal structure diagram of TPS-1

2.2 通信接口

由于 TPS-1 内置了 IRT 交换机和以太网 PHY,因此只需要采用普通的以太网网口作为 PROFINET 通信接口。对于从站设备,采用带隔离变压器的 RJ45 网口,从站设备通过 RJ45 网口与主站 PLC 进行连接。将 STM32 微控制器内部的 USART1 串口作为 RS485 通信接口,IO 模块通过 RS485 通信接口与从站设备进行连接,并由背板总线上传交互数据。

2.3 串口和 Flash

TPS-1 通过串口与 PC 机进行通信。首先在 PC 上的配置软件设置厂商信息、操作模式和 MAC 地址等与设备有关的配置等信息,然后将上述配置信息通过串口传输至 TPS-1 外接的存储器,同时 PC 作为监视器,通过串口显示设备间通信的实时状态信息。TPS-1 通过 SPI 接口与外部 Flash 进行通信,并获取 Flash 内部存储的信息,采用支持 SPI 通信的串行 Flash,大小为 8 Mbyte,内部的 SPI 接口作为从机与 TPS-1 相连。

2.4 LED 和电源

LED 指示灯能够指示通信状态并进行错误诊断,通过故障指示灯可以判断故障类型,如 PROFINET 通讯出现故障,未检测到网络,软件组态与硬件组态不一致、模块数量为 0 和供电是否正常等。TPS-1 芯片需要 1.0、1.5 和 3.3 V 的供电电压,其中 1.5 V 由 TPS-1 内部电压调节器提供,1.0 和 3.3 V 由外部 220 V 电源和电源转换电路提供。

3 PROFINET IO 从站软件设计

PROFINET IO 从站的软件设计包括 PROFINET 通信核、双核通信和 RS485 应用核 3 个部分。PROFINET 通信核负责处理解析 PROFINET 协议栈和主站 PLC 与从站设备之间 PROFINET 数据交互的工作;双核通信负责处理双核之间协议转换的工作;RS485 应用核负责处理从站设备与 IO 模块之间 RS485 数据交互的工作。

3.1 双核通信

双核通信中 TPS-1 芯片作为 PROFINET 通信核,STM32 微控制器芯片作为 RS485 应用核,STM32 微控制器通过 SPI 对 TPS-1 内部的共享内存进行访问。

3.2 PROFINET 通信核

PROFINET 通信核的核心处理芯片是 TPS-1,负责解析 PROFINET 协议栈。在 TPS-1 对 PROFINET 协议栈进行解析之前,需要进行一系列的准备工作,包括初始化外设和双核,配置 TPS-1 的启动参数和组态信息等。待准备工作完成后,TPS-1 内部的 PROFINET 协议栈开始周期性地调入并处理 PROFINET 数据。

PROFINET 数据包括非循环数据和循环数据。对于非循环数据的交互,PROFINET 协议栈通过接受邮箱和发送邮箱分别记录“读”事件和“写”事件进行数据交互。当主站控制器向从站设备发送“读取数据”操作请求时,接受邮箱记录“读”事件,从站设备根据该事件的索引在驱动程序的实现情况进行相应的操作,最后通过记录“回复”事件回复读取操作请求并给主站控制器发送记录数据,流程如图 4 所示。

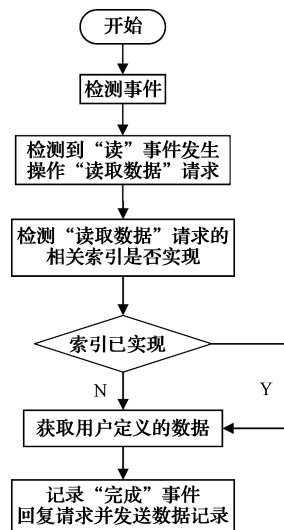


图 4 非循环数据交互流程

Fig. 4 Flow chart of non-cyclic data interaction

对于循环数据的交互,TPS-1 遵循生产者和消费者模型,具有多个输入或输出缓冲区,在数据收发方向上提供一个三重缓冲机制,当数据存放到某个缓冲区时,下一个

缓冲区开始刷新并准备接收数据。当主站控制器申请下发循环数据,主站控制器与IO模块的应用关系建立完成时,TPS-1的输出缓冲区开始刷新并接收输出数据,此时输出数据存放在TPS-1共享内存的IO RAM中,下一个输出缓冲区即STM32微控制器输出缓冲区开始刷新并检测IO模块的类型(输入型或输出型),若该模块为输出型模块,IO模块的接口输出缓冲区开始刷新并与STM32微控制器进行输出数据的交互,上述流程中需要将TPS-1设置成消费者状态,流程如图5所示。IO模块上传的循环数据与上述流程相反,且需要刷新输入缓冲区。

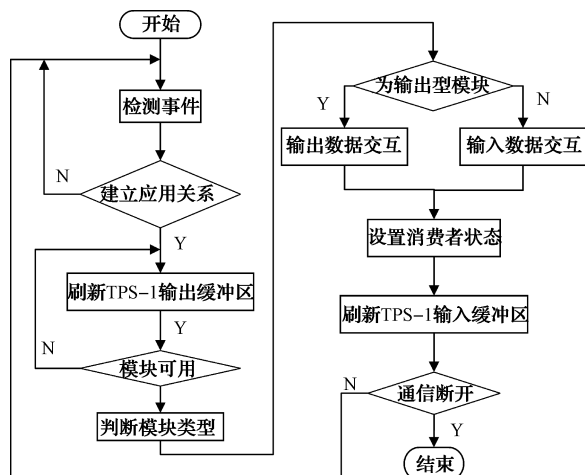


图5 循环数据交互流程

Fig. 5 Flow chart of cyclic data interaction

3.3 RS485 应用核

RS485应用核通信的核心处理芯片是STM32微控制器。STM32微控制器通过RS485接口与IO模块进行周期性的数据交互,并处理IO模块上报的诊断信息,具体流

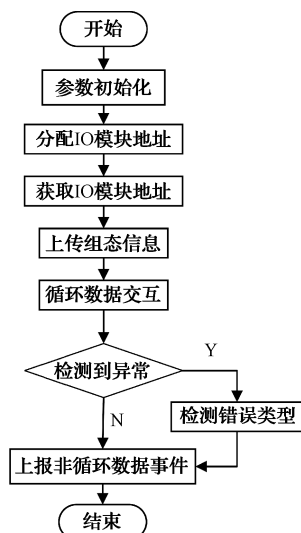


图6 RS485数据交互流程

Fig. 6 Flow chart of RS485 data interaction

程如图6所示。RS485通信主站按顺序分别为连接的IO模块分配地址、获取IO模块类型,并将模块的地址和类型等组态信息上传到STM32微控制器,STM32微控制器通过解析组态信息与PLC建立连接,并与IO模块进行循环数据的交互。PLC每隔一段时间要对从站设备进行异常检测以确认其工作状态,若检测到异常,STM32微控制器首先判断错误类型,然后重新分配设备地址等组态信息并上传给TPS-1。

3.4 通用站描述(GSD)文件

GSD文件主要用于描述从站设备和IO模块的功能信息。在软件组态前,需要将相应的GSD文件下载安装到组态软件以实现设备的描述^[17]。图7所示为一种IO模块的GSD文件示例,IO模块的所有信息通过<ModuleList>进行描述,其中<ModuleInfo>描述了模块的名字和信息;<VirtualSubmoduleList>描述了模块的输入和输出数据和记录数据;<IOData>定义了输入和输出数据的长度;<RecordData>定义了子模块的记录参数,可根据具体需求进行修改。

```
<ModuleItem ID="ID_Mod_1" ModuleIdentifier="0x100C" >
  <ModuleInfo CategoryRef="ID_IN">
    <Name TextId="TOK_TextId_Module_1"/>
    <InfoText TextId="TOK_InfoTextId_Module_1"/>
    <OrderNumber Value="UN 221-18F22-0XA0"/>
  </ModuleInfo>
  <VirtualSubmoduleList>
    <VirtualSubmoduleItem ID="IDS_1" SubmoduleIdentifier="0x04" API="0">
      <IOData>
        <Input Consistency="Item consistency">
          <DataItem TextId="F_R_IN_1BITS" DataType="OctetString" Length="1" UseAsBits="true"/>
        </Input>
      </IOData>
      <RecordDataList>
        <!-- Example for using record parameters. Change it for your own needs. -->
      </RecordDataList>
      <ModuleInfo>
        <Name TextId="TOK_TextId_Module_1"/>
        <InfoText TextId="TOK_InfoTextId_Module_1"/>
      </ModuleInfo>
    </VirtualSubmoduleItem>
  </VirtualSubmoduleList>
</ModuleItem>
```

图7 IO模块的GSD文件描述示例

Fig. 7 Sample of GSD description for IO module

4 PROFINET IO从站通信测试

4.1 测试平台搭建和组态

根据本文所提出的设计方案,搭建测试平台如图8所示,包括1台装载了TIA Portal V15.1工程软件的PC机、1台CPU型号为1214C AC/DC/Rly的西门子S7-1200 PLC、1台PROFINET IO从站设备和2个数字量IO模块、1个模拟量IO模块等,其中PLC、PC与从站设备之间通过PROFINET网线相连,从站设备与IO模块之间通过背板总线相连。硬件组态完成后,还需要在PC的TIA Portal工程软件中进行软件组态,包括下载安装GSD文件、完善PLC、从站设备的IP地址和IO模块的输入、输出地址等组态信息,软件组态界面如图9所示。

4.2 通信功能测试

1) 数字量IO模块测试

选取的2个数字量IO模块分别支持16点数字量输出和8点数字量输出和输入。分别设置2个数字量IO模块的输出地址为QB4、QB5和QB9,其中QB9对应的输出

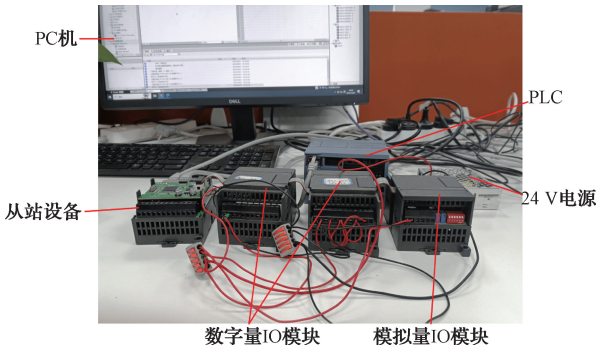


图 8 测试平台实物

Fig.8 Physical diagram of test platform

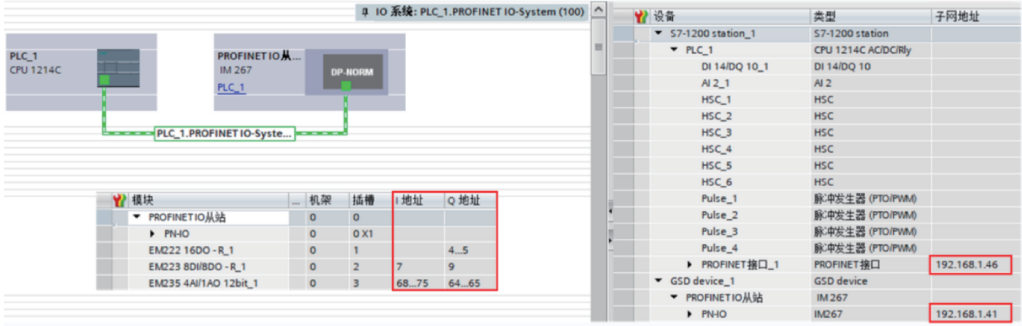


图 9 软件组态界面

Fig.9 Software configuration interface

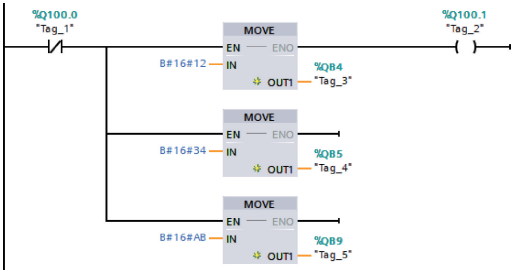


图 10 LAD 梯形图测试程序

Fig.10 LAD ladder diagram test program

名称	地址	显示格式	监视值	修改值
Tag_3	%QB4	十六进制	16#12	
Tag_4	%QB5	十六进制	16#34	
Tag_5	%QB9	十六进制	16#AB	
Tag_8	%IB7	十六进制	16#AB	

图 11 变量监控表显示图

Fig.11 Variable monitoring table display diagram

拟量 IO 模块的电压输出地址为 QB64, 电流输出地址为 QB65, 通过测试程序设定一定数值由 PLC 下发, 使用万用表测量模拟量 IO 模块输出端口的电压和电流, 测量结果如表 1 所示, 其中电压输出范围为 0~10 V, 电流输出范围为 0~20 mA。经量程换算与设定一致, 表明 PLC 和模拟量 IO 模块之间通过从站设备能够进行正常无误的循环数据交互。

通道连接至 IB7 对应的输入通道。在 TIA Portal 软件编写 LAD 梯形图测试程序如图 10 所示, 将程序编译下载到 PLC 后, 建立在线监控表监测输出和输入地址中存放的数据, 如图 11 所示, 其中输出地址 QB4、QB5 和 QB9 存放的数值为 0x12、0x34 和 0xAB, 输入地址 IB7 存放的数值为 0xAB, 与测试程序设定一致。同时, 观察到两个数字量 IO 模块的指示灯 (指示灯从左到右对应字节数据从低到高) 显示的数值分别对应 0x12、0x34 和 0xAB, 显示结果如图 12 所示。上述结果均表明了 PLC 和 IO 数字量模块间能够通过从站设备进行正常无误的循环数据交互。

2) 模拟量 IO 模块测试

选取的模拟量 IO 模块支持电压和电流输出。设置模

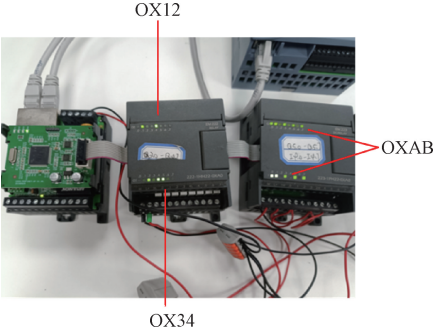


图 12 通信测试实物

Fig.12 Physical diagram of communication test

表 1 电压和电流测量

Table 1 Voltage and current measurement

QB64、QB65 设定数值	0	8 191	16 383	24 575	32 767
电压/V	0	2.5	5	7.5	10
电流/mA	0	5	10	15	20

4.3 数据帧抓包测试

将 1 台支持端口镜像的 TAP 交互机接入测试平台, PC 端的 Wireshark 软件可以通过此交互机进行捕捉 PROFINET 通信报文, 进而可以诊断主、从站间通信的组

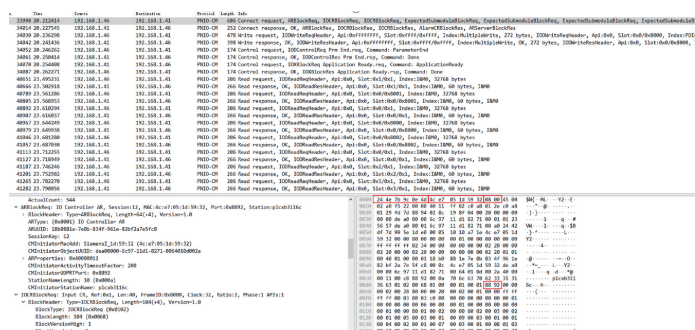


图 13 启动数据帧抓包测试

Fig. 13 Startup data frame capture test

态和故障。主、从设备启动过程中捕捉到的一串 PROFIBUS 数据帧,其中包含连接请求/回复帧,读取请求/回复帧、控制请求/回复帧和写入请求/回复帧。选中某个连接请求帧,获取到相关数据如图 13 所示,其中 PLC 为请求方,MAC 地址为 0x24、0x4e、0x7b、0x9c、0x0e、0x4d;从站设备为接收方,MAC 地址为 0x4c、0xe7、0x05、0x1d、0x59、0x32;PROFIBUS 协议帧的标识为 0x88、0x92。通过数据帧抓包测试,表明主站 PLC 与从站设备能够正常启动并进行 PROFIBUS 数据交互。

5 结 论

本文提出了一种基于 PROFIBUS 通信芯片和 RS485 应用芯片的双核模型方案,其中 TPS-1 芯片为 PROFIBUS 通信芯片,用以完成 PROFIBUS 协议栈的解析,采用 STM32 微控制器芯片作为 RS485 应用芯片,用以完成 PROFIBUS 协议与 RS485 协议间的转换。设计了一种具有 PROFIBUS 网络接口和 RS485 接口的从站设备,通过从站设备与控制器、IO 模块的连接,搭建了一套完整的 PROFIBUS IO 通信系统测试平台,测试了主站 PLC 和 IO 模块之间进行数据交互的通信功能。测试结果表明设计的从站设备实现了从 PROFIBUS 协议到 RS485 协议的跨网通信,为传统工控分布式 I/O 设备连接实时以太网的领域提供了一个可行、可靠的解决方案。

参 考 文 献

- [1] 张芬,蔚腾. S7-1200 PLC 在物料混合控制系统中的应用[J]. 电子测量技术, 2021, 44(1): 88-91.
ZHANG F, WEI T. Application of S7-1200 PLC in material mixing control system[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(1): 88-91.
- [2] 冯昊天,王红军,常城,等. 基于数字孪生的柔性生产线状态感知[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 17-24.
FENG H T, WANG H J, CHANG CH, et al. State perception of flexible production line based on digital

twin[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 17-24.

- [3] 罗峰,马逸飞,郭怡,等. 车载时间敏感网络链路冗余调度性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(2): 278-287.

LUO F, MA Y F, GUO Y, et al. Analysis of time-sensitive network link redundancy scheduling performance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 278-287.

- [4] TURCATO C A, NEGRI L B H L, DIAS L A, et al. A cloud-based method for detecting intrusions in PROFIBUS communication networks based on anomaly detection[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2021, 32(5): 1-12.

- [5] 孙蓉,苏丽,吕淑平,等. PROFIBUS 控制系统设计研究[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(4): 103-107.

SUN R, SU L, LV SH P, et al. The Design and research of PROFIBUS control system[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(4): 103-107.

- [6] 刘双龙,金晓怡,范瑜,等. 基于 TIA 博途的 S7-1500 PLC 与 SEW 变频器 Profibus 通信实现[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(7): 122-127.

LIU SH L, JIN X Y, FAN Y, et al. Implementation of profibus communication between S7-1500 PLC and SEW frequency inverter based on TIA portal[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(7): 122-127.

- [7] 郭翠娟,李中原,荣锋. PROFIBUS-Modbus 通信网关的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2020(9): 121-126.

GUO C J, LI ZH Y, RONG F. Design of PROFIBUS-modbus communication gateway[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(9): 121-126.

- [8] 周侗,张哲睿,于洋. 基于 STM32 的 PROFIBUS IO 协议栈框架的实现[J]. 沈阳理工大学学报, 2019, 38(3): 61-66.

- ZHOU T, ZHANG ZH R, YU Y. Implementation of PROFINET IO protocol stack framework based on STM32[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2019, 38(3): 61-66.
- [9] 邓梧鹏,于丽丽.基于赫优讯 netX 芯片 PROFINET IO 设备的开发[J].中国仪器仪表,2013(S1):87-90,102.
- DENG W P, YU L L. The Design of PROFINET IO device based on hilscher netX controller[J]. China Instrumentation, 2013 (S1):87-90,102.
- [10] 闫菲,李腾,韩松,等.基于 ERTEC200P 芯片的 PROFINET IO 工业以太网接口开发[J].电气传动,2021,51(4):76-80.
- YAN F, LI T, HAN S, et al. Development of PROFINET IO industrial ethernet interface based on ERTEC200P ASIC[J]. Electric Drive, 2021, 51(4): 76-80.
- [11] 崔可夫,刘世昌,张磊,等.基于 SoC 的工业以太网远程 I/O 系统设计与实现[J].仪表技术与传感器,2022(12):62-66,79.
- CUI K F, LIU SH CH, ZHANG L, et al. Design and realization of industrial ethernet remote I/O system based on SoC[J]. Instrument Technique and Sensor, 2022 (12): 62-66,79.
- [12] 管意军.基于 PROFINET 的远程 IO 系统设计[D].杭州:浙江工业大学,2021.
- GUAN Y J. Design of remote IO system based on PROFINET[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2021.
- [13] CHEN Y, ZHANG D, JI J, et al. Design of PROFINET I/O real-time communication system between PLC Based on S7-1200[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2569(1):12-13.
- [14] 张国栋,王有春. PROFINET 的实时性及其协议分析[J].计算机测量与控制,2017,25(03):187-190.
- ZHANG G D, WANG Y CH. Analysis of real-time performance and protocol based on PROFINET[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25 (03): 187-190.
- [15] 杨德奇. PROFINET 通信中 RT 与 IRT 辨析[J].中国仪器仪表,2022(7):17-21.
- YANG D Q. Analysis of RT and IRT in PROFINET communication[J]. China Instrumentation, 2022 (7): 17-21.
- [16] 王超怡. PROFINET 总线在长距离胶带机故障定位系统中的应用研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2022.
- WANG CH Y. Application of PROFINET bus in fault locating system of long-distance belt conveyor[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [17] 曹永祯.基于 PROFINET 协议的安全 IO 设备设计与实现[D].沈阳:辽宁大学,2023.
- CAO Y ZH. Design and implementation of secure IO device based on PROFINET protocol[D]. Shenyang: Liaoning University, 2023.

作者简介

梁嘉伟,硕士研究生,主要研究方向为伺服电机控制、PLC 自动化控制等。

E-mail: 202104703071@wust.edu.cn

宁博文,博士,讲师,主要研究方向为运动控制等。

E-mail: ningbowen@wust.edu.cn