

一种基于 SPC584CE70 芯片的车载以太网网关控制器的设计与应用

明杰婷, 杨杰君, 文健峰, 彭兴宇, 刘逸群, 张利新

(中车时代电动汽车股份有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘要:针对车载以太网与传统 CAN 网络不能直接通讯的问题,设计一款基于 SPC584CE70 MCU 主芯片的车载以太网网关控制器。该控制器具有 4 路以太网和 3 路 CAN 网络同时通讯的功能,可较好地实现以太网与以太网、CAN 网络与以太网、CAN 网络与 CAN 网络之间的信息交互。

关键词:车载以太网; 网关; 控制器; SPC584CE70 芯片

中图分类号:U463. 67

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)02-0026-06

Design and Application of Vehicle Ethernet Gateway Controller Based on SPC584CE70 Chip

MING Jieting, YANG Jiejun, WENG Jianfeng, PENG Xingyu, LIU Yiqun, ZHANG Lixin

(CRRC Electric Vehicle Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problem that vehicle ethernet and traditional CAN networks can not communicate directly, this paper designs a vehicle ethernet gateway controller based on the SPC584CE70 MCU main chip. The controller has the function of 4-way ethernet and 3-way CAN network communication at the same time, which can realize the information interaction between the ethernet and ethernet, ethernet and CAN, CAN and CAN network.

Key words: vehicle ethernet; gateway; controller; SPC584CE70 chip

汽车的智能化、电动化、网联化、共享化时代已经到来,车载网络数据传输需求迎来爆发式增长^[1]。CAN 网络传输速率有限且有短帧传播的缺点,使得 CAN 总线在信息传输数量和实时性方面面临巨大挑战^[2]。而车载以太网以传输速率快、安全性高、实时性好、组网灵活等特点,有望发展成新一代车载骨干网络,从而满足更多车载数据传输的需求^[3-5]。现阶段,在信息量少、实时性要求低的控制器模块之间还是采用 CAN 通讯,但在信息量大、实时性高的模块之间已经采用以太网通讯^[6-10]。为适应传统 CAN 网络与以太网并存的网络架构,本文开发一款车载以太网网关控制器。该控制器既具有交换机功能,又肩负整

车 CAN 与以太网协议转化的功能,实现以太网网关控制器与人机交互域、车载终端(T-BOX)、远程诊断等模块之间采用以太网通讯,与底盘域、车身域、动力域等模块之间采用 CAN 通讯的功能,从而有效实现 CAN 网络与以太网网络的信息交互^[11]。

1 车载以太网网关硬件选型

该网关控制器的主芯片选用 ST 32 位单片机 SPC584CE70。该单片机为 ST 40 nm 工艺的 PowerPC 最新系列,专门用于车载网关。其性能强劲,资源丰富,具有 180 MHz 主频、4 MB Flash、392 KB RAM 及 Ethernet 以太网接口,支持硬件安全模块(HSM)、锁

收稿日期:2023-10-10。

第一作者:明杰婷(1989—),女,硕士;工程师;主要从事新能源车辆整车控制及车辆动力学仿真分析相关的工作。E-mail: mingjieting@163.com。

步(Lockstep)功能,满足 ISO 26262 标准要求。

该以太网网关控制器共支持 4 路以太网通讯,3 路 100BASE-T1 和 1 路 100BASE-Tx,以太网路由芯片和收发器芯片分别选用 NXP SJA1105 Switch 系列和 TJA110x 系列的芯片,支持 TC10 以太网唤醒。

3 路 100BASE-T1 的 PHY 芯片选用具有 1 通道的 TJA1101 芯片和具有双通道的 TJA1102 芯片,且符合 IEEE 100BASE-T1 的汽车以太网通讯标准。TJA1102 芯片是专为汽车应用而设计的,在长达 15 m 的非屏蔽双绞线(UTP)上,每个端口可提供 100 Mbit/s 的收发能力,集成度高,能有效节省 MDI 路径中的外部滤波器和 ESD 保护组件。TJA110x 系列的 PHY 芯片与 NXP SJA1105P/R/S 路由芯片相结合,可构建高效的小端口计数以太网网关解决方案。

100BASE-Tx 主要用于诊断系统,与 100BASE-T1 相比,100BASE-Tx 物理层多包括以下两个子层:物理媒介相关子层(PMD)和自动协商子层(AUTONEG),故 1 路 100BASE-Tx 选用 TI DP83848 芯片,用作以太网故障诊断接口。该网关控制器的硬件原理如图 1 所示。

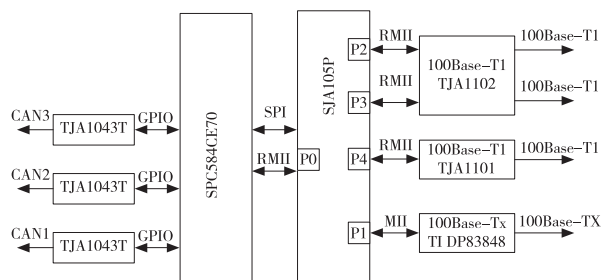


图 1 网关控制器硬件原理图

2 车载以太网网关软件设计

车载以太网网关控制器的软件应兼顾硬件资源、开发成本。基础软件层(BSW)应用 FreeRTOS 操作系统,并集成 TCP/IP 协议栈(LwIP);应用软件层(ASW)创建客户端任务(Client Task)、服务端任务(Service Task)、CAN 通讯任务(CAN Task),以实现客户端通讯、服务端通讯、CAN 通讯功能。软件架构如图 2 所示。

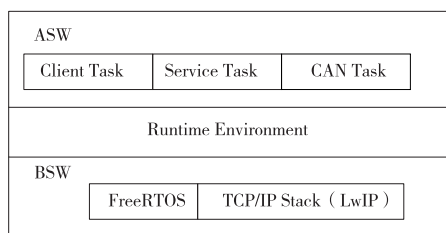


图 2 软件架构

2.1 FreeRTOS 介绍

FreeRTOS 是一个可裁减的小型实时操作系统(RTOS)。由于 FreeRTOS 小巧且易用,通常情况下内核只占用 4 KB~9 KB 的空间,非常适合在资源有限的微控制器中运行,已经在 30 多种架构的芯片上进行了移植^[12-13]。此外,FreeRTOS 还具有以下优点:

- 1) 支持实时任务,系统任务调度是可预测的,这正是嵌入式实时操作系统所需要的。
- 2) 可移植性高,代码主要用 C 语言编写。
- 3) 系统组件创建时支持动态或者静态的 RAM。
- 4) 任务数量不限,可同时创建若干任务。
- 5) 具有堆栈溢出检测功能。

正是由于 FreeRTOS 的优异性能,所以本文选择 FreeRTOS 作为操作系统,通过创建多客户端和服务端的任务来实现客户端、服务端的通讯功能。

2.2 LwIP 介绍

LwIP 是一个小型开源的 TCP/IP 协议栈,其设计初衷就是用尽可能少的资源消耗实现一个较为完整的 TCP/IP 协议栈。LwIP 的流畅运行大约需要 40 KB 的 ROM 和十几 KB 的 RAM,因此非常适合在内存受限的嵌入式设备中应用^[14-15]。LwIP 还有以下优点:

- 1) 资源开销小,拥有自己的内存管理策略和数据包管理策略,内核处理数据包效率高。
- 2) 支持较完整的 TCP/IP 协议,如以太网地址解析协议(ARP)、控制报文协议(ICMP)、用户数据包协议(UDP)、传输控制协议(TCP)、域名解析协议(DNS)、动态主机配置协议(DHCP)、网际互连协议(IP)等。
- 3) 提供 3 种编程接口:RAW API、NETCONN API、Socket API,Socket API 编写的程序可读性好,易

维护,该网关控制器采用 Socket API 的编程方式。

4) 可移植性强,源代码全部用 C 语言,便于实现跨处理器、跨编译器、跨操作系统的移植。

2.3 CAN 通讯设计

为提高软件的可读性、可移植性,每路 CAN 都共用一个 CAN 发送任务、CAN 接收任务,并为每帧报文创建一个接收或发送函数,供 CAN 主接收或发送函数调用。

1) CAN 接收。CAN 网络以总线方式通讯,CAN 网络上的所有节点都可以接收到其他节点的报文。为减小系统开销,可从硬件层过滤掉无关报文。每一支路 CAN 报文的接收都是在 CAN 接收回调函数中被处理,只有报文标志符与过滤器中对应的位匹配才能被接收。CAN 接收流程如图 3 所示。

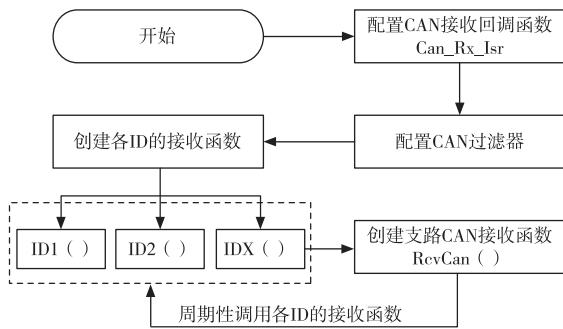


图3 CAN 接收流程

2) CAN 发送。CAN 网络的报文都是按照一定的发送周期向总线发送,故先创建一个 Veh_1msRun_task 任务。该任务使用任务通知 xTaskNotifyWait() 来实现 1 ms 周期性的调度。按照自上而下的程序设计原则,为每一功能创建子函数,提高程序的可读性和可移植性;为每一个报文创建一个发送函数 IDX(),在该函数内填充报文数据帧、帧类型、帧长度,指定 CAN 驱动通道和缓存区;为每一支路创建调度函数 SendCan(),在各支路的 CAN 调度函数中调度每一帧报文的发送函数 IDX()。最后,创建 CAN 发送的总调度函数 CANNet_Manage1ms(),在该函数中实现各支路调度函数的调用。因此,Veh_1msRun_task 任务中只需要调度 CANNet_Manage1ms()即可。按照上述架构设计原则,可充分实现报文的增加或删除,可读性好、可移植性强。CAN 发送流程如图 4

所示。

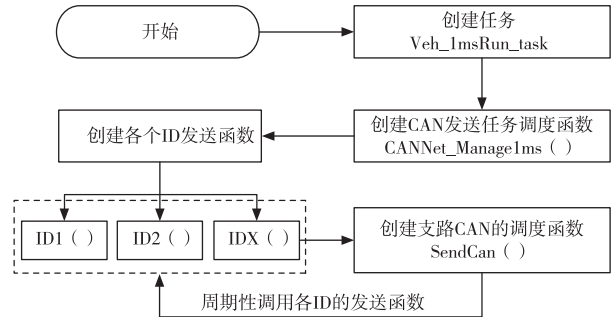


图4 CAN 发送流程

2.4 以太网通讯设计

1) 客户端通讯设计。在嵌入式开发中,客户端主要用于向服务端建立连接,并周期性地向网络中传输数据。所有通讯的建立都是基于 FreeRTOS 操作系统,该操作系统提供一系列的 API 接口函数用来建立连接和发送数据。该网关控制器的开发主要采用 Socket API 接口编程的方法,客户端先确定服务端的 IP 地址和端口号,调用 Socket() 函数创建一个文件描述符,再对文件描述符进行操作,调用 Connect() 函数建立连接,连接成功后即可调用 Write() 函数周期性地向服务端发送数据。客户端通讯流程如图 5 所示。

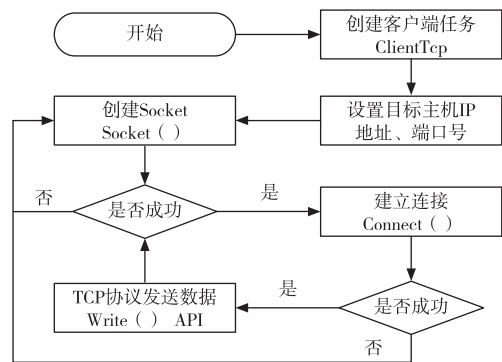


图5 客户端通讯流程

2) 服务端通讯设计。网关控制器作为服务端需同时与多个客户端建立连接,服务端通讯的建立仍采用 Socket API 接口编程的方法。首先创建服务端的任务 vSelectServerTask,调用 Socket() 函数创建文件描述符,并使用 bind() 函数绑定 IP 地址和端口号。由于是服务端,IP 地址的属性设置为 INADDR_ANY

(任意地址)。绑定 IP 地址和端口号后,服务端就处于监听状态,当有客户端请求与服务端建立连接,服务端即调用 `accept()` 函数与客户端建立连接,如果某一客户端已经与服务端建立连接,则不重复建立连接,即连接只能建立一次,建立好连接后,客户端与服务端即可进行数据交互。此外,服务端可同时连接多个客户端,其流程如图 6 所示。

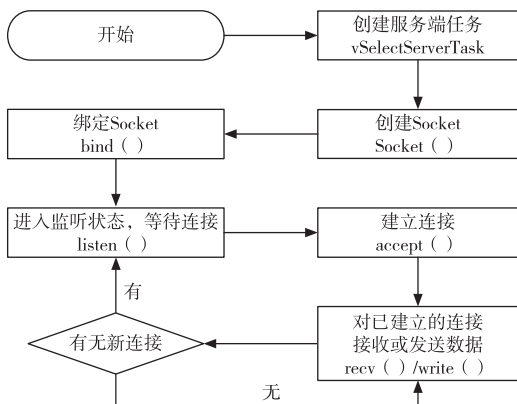


图 6 服务端通讯流程

3 测试验证

3.1 测试环境搭建

为了验证该网关控制器各项功能是否正常,搭建了 HIL 台架测试环境。网关控制器作为网关,通过网线与客户端 1、客户端 2、客户端 3 连接,客户端 1、客户端 2 为笔记本电脑使用网络调试助手模拟;客户端 3 为人机交互域控制器,支持串口调试,因此可通过串口来观测程序运行是否正常。测试环境的原理如图 7 所示。

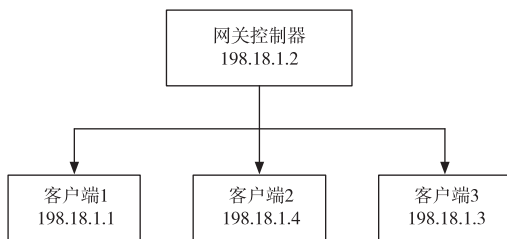


图 7 测试原理

3.2 CAN 通讯测试验证

该网关控制器的每一通道拥有 22 个 CAN 报文接收缓存,可同时接收标准帧和扩展帧,根据使用需

求,配置 15 个扩展帧的缓存通道,7 个标准帧的缓存通道。为验证 CAN 收发功能是否正常,以 CAN1 为例,在 CAN1 上周期性发送一帧报文, ID 为 0x18FC1100。同时使用 CANPro 工具模拟发送报文,扩展帧 ID 为 0x0C09A7F4,标准帧 ID 为 0x215,并且将这两帧报文增加到 CAN1 的 CAN 滤波器中。当网关控制器正常接收到 0x0C09A7F4、0x215 时,报文 0x18FC1100 的第一字节和第二字节都为 1,如果未接收到报文,则为 0。应用 CANPro 采集原始报文,如图 8 所示。

帧ID	周期/s	帧数量	CAN类型	方向	长度	数据
0x18FC1100	0.019 803	7 486	CAN	Rx	8	01 01 00 00 00 00 00 00
0xC09A7F4		1 826	CAN	Tx	8	11 11 11 11 11 11 11 00
0x215		688	CAN	Tx	8	22 22 22 22 22 22 22 00

图 8 CAN 通讯测试结果

分析报文可知,0x18FC1100 的第一字节和第二字节都为 1,表明网关控制器正常接收到了 0x0C09A7F4、0x215 报文。由此验证了网关控制器可正常发送报文,也可正常接收标准帧和扩展帧报文,确认 CAN 通讯功能正常。

3.3 以太网通讯测试验证

网关控制器作为服务端,需同时与多个客户端建立连接,并进行数据交互,因此,需对网关控制器进行组网测试。客户端 1、客户端 2、客户端 3 同时连接网关控制器,客户端 1、客户端 2 为笔记本电脑使用网络调试助手模拟;客户端 3 为人机交互域控制器,支持串口通信。该人机交互域控制器也可同时作为服务器和客户端,作为客户端,主动与网关控制器建立连接;作为服务器,可与网关控制器的客户端任务建立连接。

为验证各客户端与网关控制器的以太网通讯是否正常,设计测试用例进行验证。客户端 1、客户端 2、客户端 3 同时与网关控制器建立连接,如果网关控制器接收到客户端 3 的以太网报文,将该报文转发至客户端 1;如果网关控制器接收到客户端 1 的以太网报文,将该报文转发至客户端 2。网关控制器以 100 ms 为周期给客户端 3 发送报文,客户端 1、客户端 2、

客户端3都以1 000 ms为周期向网关控制器发送报文。通讯连接测试示意图如图9所示。

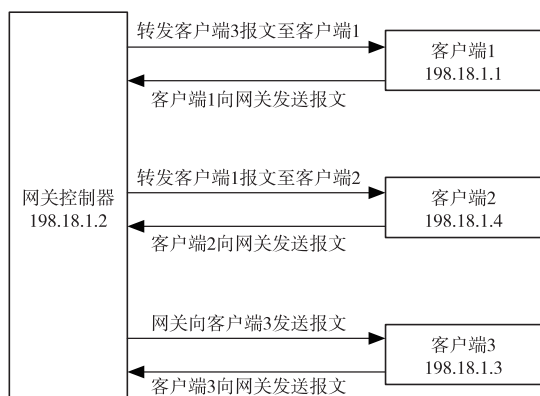


图9 以太网通讯测试示意图

观察网络调试助手窗口,确认网关控制器与各客户端的通讯连接是否合理。

1) 客户端3以1 000 ms为周期向客户端1发送报文,报文内容为“Hello, this is client 3!”。通过观察网络调试助手,可知客户端1可正常接收到客户端3的报文,验证了网关控制器转发客户端3报文至客户端1功能是正常的,如图10所示。



图10 客户端3向客户端1转发结果

2) 客户端1以1 000 ms为周期向客户端2发送报文,报文内容为“Client 1:Hello, client 2!”。通过观察网络调试助手,可知网关控制器可转发客户端1的报文至客户端2,如图11所示。



图11 客户端1向客户端2转发结果

3) 网关控制器作为服务器,同时也可作为客户端与服务器建立连接,并发送数据。网关控制器作为客户端任务以100 ms为周期向客户端3发送数据,报文内容为“this is a client from gateway...”,观察网络调试助手的结果可知,网关控制器作为客户端时,可与客户端3建立通讯,从而验证了网关控制器同时作为服务端和客户端功能是正常的,如图12所示。

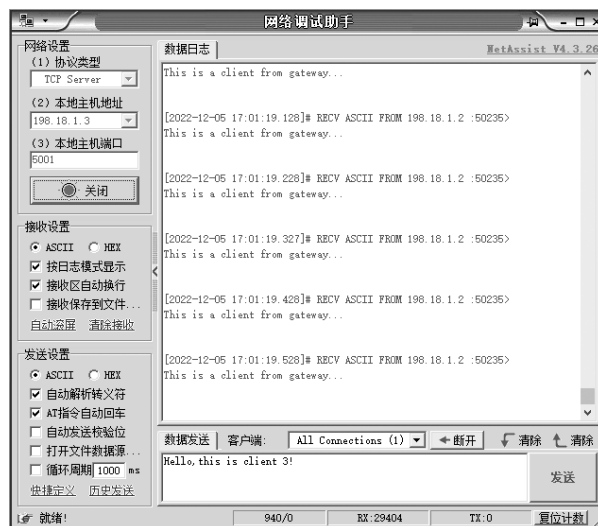


图12 网关控制器与客户端3通讯

4 结束语

本文设计了一款基于SPC584CE70 MCU主芯片的车载以太网网关控制器,有效解决了以太网与CAN网络不能直接进行信息交互的问题。在硬件

上,基于TJA110x系列的PHY芯片与NXP SJA1105P路由芯片的组合实现以太网通讯功能;在软件上,基于FreeRTOS+LwIP软件架构,兼顾了硬件资源与运行效率。通过搭建测试台架,将该网关控制器与其他客户端进行以太网组网测试验证。结果表明,该网关控制器可较好地实现以太网与以太网、CAN网络与以太网、CAN网络与CAN网络之间的信息交互。该网关控制器暂未在样车真实的网络环境中开展通讯速率、网络稳定性等方面的测试,这也是该网关控制器后续研究的重要内容。

参考文献:

- [1] 尹荣彬,陈博,孔祥明. 智能网联汽车车载以太网技术应用研究[J]. 汽车文摘,2019(11):1-5.
- [2] 张宝宝,张友兵,兰建平,等. 基于LPC1768的车载以太网网关设计[J]. 湖北汽车工业学院学报,2020,34(4):11-15.
- [3] International Organization Standardization. Road vehicles Diagnostic communication over Internet Protocol (DoIP) Part 2: Transport protocol and network layer services;ISO 13400-2:edition 2[S]. Geneva:International Organization Standardization,2019:18-48.
- [4] 顾春艳. 基于TLS的车载以太网诊断通信技术研究与应用[D]. 上海:华东师范大学,2022.
- [5] 王远波,陈姿霖,武萌. 基于ISO 13400标准的车载以太网DOIP技术应用浅析[J]. 汽车电器,2022(2):31-33.
- [6] 甄海川,牛玉娇,路哲,等. 车载以太网通信开发及应用[J]. 汽车文摘,2022(1):40-44.
- [7] 符丹丹,赵杰,美少楠,等. 基于商用车的车载以太网通信技术应用[J]. 汽车电器,2021(7):34-35.
- [8] 孟祥振,韩坤,李桂虎. 列车车载以太网设备自动化测试系统研究[J]. 控制与信息技术,2021(3):93-98.
- [9] 郑子健,张殿明,丁光林,等. 浅析基于车载以太网的总线拓扑结构[J]. 汽车电器,2016(12):66-68.
- [10] 焦育成,王硕,李长龙,等. 车载以太网网关原型浅析[C]//中国汽车工程学会. 2016 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2016:3.
- [11] 马剑,张炳力,黄振峰,等. 基于车载以太网的专用车架结构设计[J]. 汽车实用技术,2023,48(4):60-64.
- [12] 李坤明. 基于ARM和FreeRTOS的车用网关系统设计与实现[D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [13] 张文亮,田沛,刘晖,等. 基于FreeRTOS的lwip协议栈的移植与测试[J]. 自动化技术与应用,2015,34(11):25-29.
- [14] 史先传,殷帅,许议元. 基于LwIP和Modbus TCP协议的网络控制器设计[J]. 自动化与仪表,2023,38(2):19-24.
- [15] 黄岩峰,王天林,刘国安. 基于LwIP协议栈和交换机芯片的多网口扩展系统设计[J]. 中国仪器仪表,2021,364(7):19-23.