

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.017

基于 CAN 总线的电动汽车中继站研究*

李霁霁, 陈阳生, 章 玮*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对纯电动汽车电机控制器开发环境大多独立于整车系统造成的两者间通信报文和传输速率不相同的问题,对 CAN 总线多节点分布技术在纯电动汽车通信中的应用进行了研究,提出了一种基于瑞萨 SH72A2 单片机以及 CAN 总线技术的通信中继站设计方法。在分析电机控制器和整车报文的基础上,推导了通信报文转换的格式,建立了中继站的硬件模型和总体功能结构,并结合现场总线多节点通信技术的相关理论,提出了中继站与电机控制器和整车控制器的双通道 CAN 通信方法,实现了基于 J1939 协议的 CAN 通信中继站的软件设计。在搭建的 CAN 通信平台和整车控制平台上,分别进行了报文转换和 CAN 通信稳定性实验。研究结果表明,该中继站能够实现数据采集和报文转换功能,双通道 CAN 通信响应迅速、可靠性高。

关键词:电动汽车;CAN 总线;中继站;瑞萨 SH72A2

中图分类号:U469.72;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0379-05

Electric vehicle relay station based on CAN bus

LI Ji-fen, CHEN Yang-sheng, ZHANG Wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at solving different communication messages and transmission rate between electric vehicle motor drive and vehicle system, multi-node distribution technology of CAN bus for electric vehicle communication was researched, and a design of CAN communication relay station based on Renesas SH72A2 integrated controller was proposed. On basis of analyzing messages of motor drive and vehicle system, the communication format of message conversion was set up, and functional structure of the relay station with hardware circuit was built. Combining field-bus communication scheme, the two channels CAN communication between the motor drive and electric vehicle system was presented to realize software design of the relay station based on J1939 protocol. The functions of messages conversion and the reliable of CAN communication were tested in the laboratory. The results indicate that the relay station can real-time transfer messages and convert messages' format based on CAN bus between two nodes, and it has fast response and high reliability.

Key words: electric vehicle; CAN bus; relay station; Renesas SH72A2

0 引 言

近年来,传统内燃机汽车所面临的能源紧缺问题和环境污染问题日益凸显,具有高效节能特点的电动汽车已成为汽车产业的发展趋势。随着电机控制性能和电池材料蓄能能力的提升,电动汽车的技术已日渐成熟,迎来了发展的高峰期^[1]。

电机控制系统作为电动汽车驱动系统,需要保证

其与整车通信的高速性和可靠性。CAN 总线作为汽车领域广泛使用的现场总线,具有传输速度快、可靠性高的特点^[2]。J1939 协议作为 CAN 总线应用层协议,大量应用在嵌入式网络中,成为汽车 CAN 总线的通用高层协议^[3]。由于电机控制系统开发环境大多独立于整车控制系统,不同的电机控制器与整车控制系统在 CAN 通信报文格式、传输速率设置方面不同,这就限制了电机控制系统的通用性。

收稿日期:2014-11-28

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”计划)资助项目(2013CB035604);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130101110112)

作者简介:李霁霁(1990-),女,江苏徐州人,主要从事电动汽车电机 CAN 通信方面的研究。E-mail:lijifen0201@163.com

通信联系人:章 玮,女,副教授,硕士生导师。E-mail:weizhang@zju.edu.cn

本研究提出一种 CAN 通信中继站设计,可以在不改变电机驱动器和整车控制系统情况下实现两者间 CAN 通信功能。该中继站主要完成数据采集、报文格式转换、双通道 CAN 通信等功能。本研究基于 CAN 通信的整车控制实验,进行数据采集和报文转换,以验证中继站双通道通信的可靠性。

1 电动汽车 CAN 通信中继站系统

1.1 中继站与整车控制系统关系

电动汽车整车控制系统由整车控制器主控。传统电动汽车控制系统包括电池管理系统、充电机模块、显示仪表、错误监控和电机控制器等。为了提高兼容性,作为原电机控制器节点的替代,本研究设立了通信的中继站,整车控制器和电机控制器分别与中继站相连,中继站主要完成报文转换和双通道通信功能。

中继站 CAN 通信软件设有配置文件,可以根据不同电机驱动器和整车控制器的通信地址、报文格式、传输速率更改配置文件。中继站将换转换后的报文通过两个独立的 CAN 通信通道分别与电机控制器、整车控制器进行通信,从而在不改变电机控制器和整车控制器的情况下实现电动汽车 CAN 通信。整车控制系统结构如图 1 所示。其中虚线框部分为中继站 CAN 通信模块,主要完成与电机控制器节点双向通信以及与显示仪表节点单向通信功能。

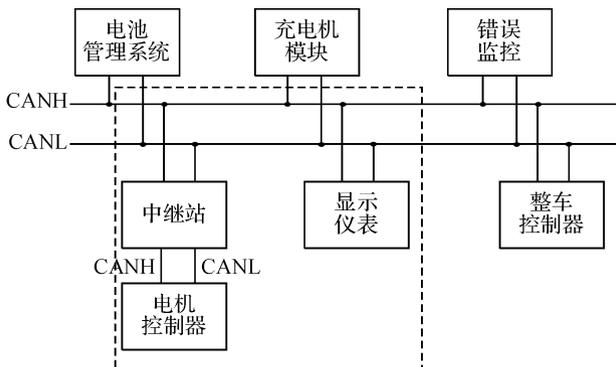


图 1 整车控制系统与中继站 CAN 通信模块结构图

1.2 中继站结构与功能

中继站主要完成数据采集,转换报文格式并实现 CAN 双通道通信。中继站结构如图 2 所示,包括与电机控制器双向 CAN0 通信模块,与汽车仪表单向 CAN1 通信模块,数据采集模块和报文转换模块。本研究将电机驱动器控制器命名为 MCU(motor control unit),中继站控制器为 VCU(vehicle control unit)。

中继站 VCU 每次接收电机控制器电机运行数据

报文 3 条。中继站采集的电动汽车人为控制指令包括油门、刹车模拟信号,挡位等数字信号。经过数据处理和报文转换,中继站向电机控制器发送电机控制指令报文 1 条,同时向汽车显示仪表发送电机状态数据报文 3 条。

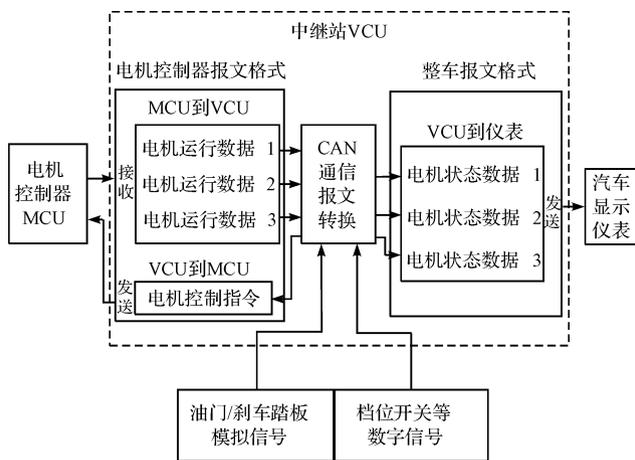


图 2 中继站结构图

中继站 VCU 以瑞萨 32 位微处理器 SH72A2 为核心,实现双通道 CAN 通信及报文转换。SH72A2 具有 32 位 RISC 处理器、最高工作频率达到 100 MHz、ROM 达到 512 KB、具有 12 位 A/D 转换器、三相 PWM 输出计时器、2 个 CAN2.0 通道,因此 SH72A2 能满足中继站设计需求,并降低了硬件设计复杂度^[4]。

VCU 功能如图 3 所示。外部接口包括电源接口、信号接口、辅助功能接口。信号接口:CAN0 接口实现与电机驱动器双向通信,CAN1 接口实现与汽车仪表只发不收通信。扩展 I/O 口用于采集油门、制动踏板模拟信号和挡位等数字信号。辅助功能接口:重置开关 SW1 用于 VCU 复位重启。测试开关 SW2 的置位用于测试 CAN 端口自发自收功能。模式转换开关 SW3 实现通信模式和程序加载模式转换。测试 LED 用于辅助显示 CAN 通信是否收发成功。中继站 VCU 需要检测的报文数据信号如表 1 所示。

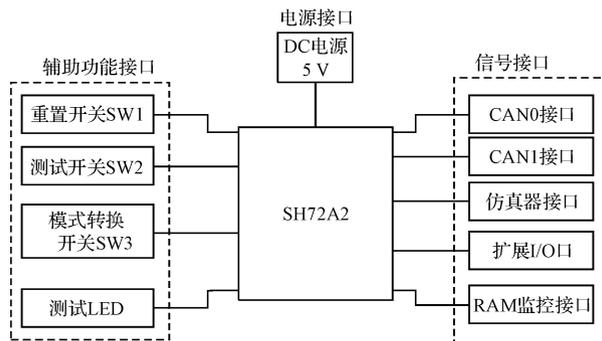


图 3 中继站 VCU 功能图

表1 中继站VCU主要检测信号

信号	类型	范围
ACC12 V 上电	数字输入	0,5 V
ON 挡开关	数字输入	0,5 V
手刹开关	数字输入	0,5 V
点火开关	数字输入	0,5 V
后退开关	数字输入	0,5 V
制动开关	数字输入	0,5 V
前进开关	数字输入	0,5 V
电扇开关	数字输出	0,5 V
油门踏板信号	模拟输入	0~5 V
刹车踏板信号	模拟输入	0~5 V

2 中继站CAN通信软件设计

中继站软件设计基于瑞萨 SH72A2 的 32 位微处理器,在 HEW 编译环境下进行编写。中继站 CAN 通信软件包括 CAN 通信初始化、模数信号采集报文转换程序、CAN0/CAN1 发送程序、CAN0 接收程序 4 个部分。考虑到 CAN 通信高速环境下的准确性,笔者采用 1 ms 定时检测油门模拟信号和挡位数字信号。同时 CAN 通信计时器累加,报文收发周期为 50 ms,计时器每累加 50 次后触发 CAN0/CAN1 通道完成一次收发。

2.1 CAN 应用层 J1939 协议与报文格式

中继站 CAN 通信应用层遵循 J1939 协议。CAN 总线数据由帧起始、仲裁场、控制场、数据场、CRC 场、应答场和帧结尾组成^[5]。仲裁场中 IDE 位为显性位(0)时表示该帧是标准帧,为隐性位(1)时表示该帧是扩展帧。在标准帧中,仲裁场包括 11 位标识符和 RTR 位;在扩展帧中,仲裁场包括 29 位标识符、SRR 位、IDE 位以及 RTR 位。该设计中所有报文标识符均是 29 位扩展帧。根据 J1939 协议,29 位标识符包括优先级(P)3 位、保留位(R)1 位、数据页(DP)1 位、PDU 域(PF)8 位、特定 PDU 域(PS)8 位、源地址(SA)8 位^[6-8]。29 位标识符具体分配如图 4 所示。

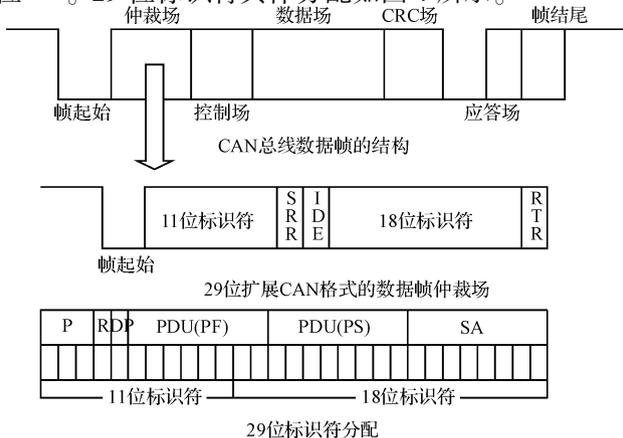


图4 29 位标识符分配图

中继站总共处理 7 个报文,其中发送电机控制指令到电机驱动器,记为报文 1,优先级为 2。接收电机驱动器发送的电机运行数据报文 3 条,记为报文 2,3,4,优先级为 3。发送电机状态数据报文 3 条到仪表控制器,记为报文 5,6,7,优先级为 6。优先级数值越小表示优先级别越高。所有报文标识符如表 2 所示。其中电机控制器节点地址为 0x01;仪表控制器的节点地址为 0x05。

表2 报文 29 位标识符定义

编号	发送方向	P	DP	PF	PS	SA	CAN ID
1	VCU -> MCU	2	0	0xF0	0x05	01	0x08F00501
2	MCU -> VCU	3	0	0xF1	0x01	05	0x0CF10105
3	MCU -> VCU	3	0	0xF2	0x01	05	0x0CF20105
4	MCU -> VCU	3	0	0xF3	0x01	05	0x0CF30105
5	VCU -> 仪表	6	0	0xF1	0x1F	05	0x18F11F05
6	VCU -> 仪表	6	0	0xF1	0x8D	05	0x18F18D05
7	VCU -> 仪表	6	0	0xF1	0x20	05	0x18F12005

2.2 CAN 通信初始化

瑞萨 SH72A2 处理器 CAN 通信模块具有符合 ISO11898-1 协议的双通道,最高传输速率达到 1Mbps,具有 CAN 总线错误监测功能。64 个邮箱可工作在两种模式下:一次全部读写模式和 FIFO 模式。标准帧和远程帧均可被传输。CAN 通信初始化包括 CAN 管脚配置,控制寄存器配置,波特率设置和邮箱选择等^[9]。该系统的 CAN 通信波特率为 250 Kbps。CAN 通信初始化流程图如图 5 所示。

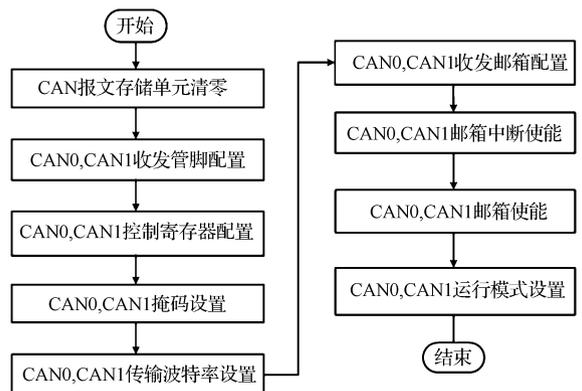


图5 CAN 通信初始化流程图

2.3 报文收发

考虑到 CAN 总线的高速性和电机系统的干扰,CAN 通信不适合采用中断模式。报文的收发采用定时调度方式,收发周期为 50 ms。双通道通信提高了 CAN 通信的稳定性。

发送报文的流程为:CAN0 报文数据打包,到定时

周期,如果总线有报文正在发送,则报文写入发送队列等待下一周期发送。如果总线空闲,CAN0 向电机驱动器 MCU 连续发送 3 个报文。同理,CAN1 向仪表控制器连续发送 3 个报文。通过查询控制寄存器确认是否发送成功。发送程序流程图如图 6(a)所示。

接收报文的流程为:接收邮箱不设掩码,均读入邮箱,采用写覆盖模式。到定时周期,系统将邮箱中 MCU 发回的 1 个与 ID 匹配的报文读入队列。如果没有与 ID 匹配的报文则放弃读入,等待下一周期数据。邮箱采用写覆盖模式,无用报文会被后面的报文覆盖,无需释放邮箱数据。接收程序流程图如图 6(b)所示。

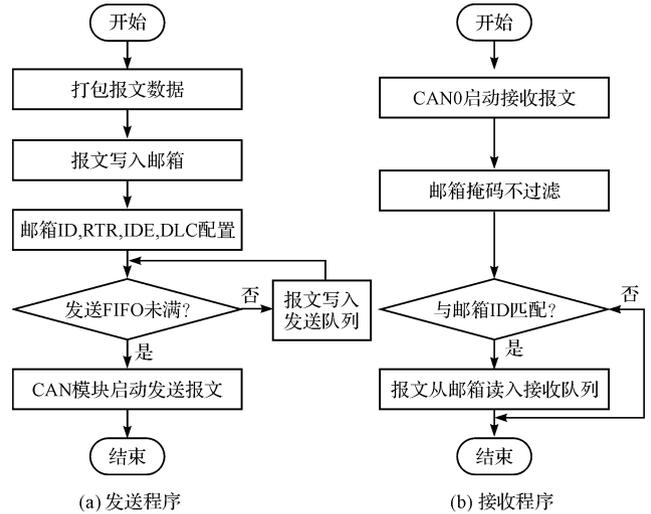


图 6 CAN 模块发送、接收程序流程图

3 实验

为了验证中继站 VCU 的 CAN0 通道与电机控制器收发双向通信和 CAN1 通道与仪表控制器只发不收单向通信的可靠性,本研究利用周立功的 CAN-USB 板卡在上位机中监控通信,分别监听 CAN0, CAN1 通道^[10]。CAN0 与 CAN1 通道收发,发送监测分别如图 7、图 8 所示。

序号	传输方向	时间/标识	帧ID	帧格式	帧类型	数据长度	数据(HEX)
00002800	接收	0x0142...	0x0c110105	数据帧	扩展帧	0x08	00 69 00 00 09 4b 88 00
00002801	接收	0x0142...	0x0c201005	数据帧	扩展帧	0x08	51 00 69 28 00 04 74 00
00002802	接收	0x0142...	0x0c301005	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
00002803	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002804	接收	0x0142...	0x0c110105	数据帧	扩展帧	0x08	00 69 00 00 09 4b 88 00
00002805	接收	0x0142...	0x0c201005	数据帧	扩展帧	0x08	51 00 69 28 00 04 74 00
00002806	发送	无	0x08301005	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002807	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002808	接收	0x0142...	0x0c110105	数据帧	扩展帧	0x08	00 69 00 00 09 4b 88 00
00002809	接收	0x0142...	0x0c201005	数据帧	扩展帧	0x08	51 00 69 28 00 04 74 00
00002810	接收	0x0142...	0x0c301005	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
00002811	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002812	接收	0x0142...	0x0c110105	数据帧	扩展帧	0x08	00 69 00 00 09 4b 88 00
00002813	接收	0x0142...	0x0c201005	数据帧	扩展帧	0x08	51 00 69 28 00 04 74 00
00002814	接收	0x0142...	0x0c301005	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
00002815	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002816	接收	0x0142...	0x0c110105	数据帧	扩展帧	0x08	00 69 00 00 09 4b 88 00
00002817	接收	0x0142...	0x0c201005	数据帧	扩展帧	0x08	51 00 69 28 00 04 74 00
00002818	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002819	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002820	接收	0x0142...	0x0c110105	数据帧	扩展帧	0x08	00 69 00 00 09 4b 88 00
00002821	接收	0x0142...	0x0c201005	数据帧	扩展帧	0x08	51 00 69 28 00 04 74 00
00002822	接收	0x0142...	0x0c301005	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
00002823	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002824	接收	0x0142...	0x0c201005	数据帧	扩展帧	0x08	00 69 00 00 09 4b 88 00
00002825	接收	0x0142...	0x0c301005	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 00 00 00 00 00 00
00002826	接收	0x0142...	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07
00002827	发送	无	0x08000801	数据帧	扩展帧	0x08	00 01 02 03 04 05 06 07

图 7 CAN0 通道收发监测

序号	传输方向	时间/标识	帧ID	帧格式	帧类型	数据长度	数据(HEX)
00000008	接收	0x0009e16	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000009	接收	0x0009e16	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000010	接收	0x0009e22	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000011	接收	0x0009f08	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000012	接收	0x0009f08	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000013	接收	0x0009f04	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000014	接收	0x0009f21b	0x18f110b	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000015	接收	0x0009f21	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000016	接收	0x0009f227	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000017	接收	0x0009f414	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000018	接收	0x0009f43	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000019	接收	0x0009f429	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000020	接收	0x0009f600	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000021	接收	0x0009f626	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000022	接收	0x0009f62c	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000023	接收	0x0009f622	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000024	接收	0x0009f628	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000025	接收	0x0009f62e	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000026	接收	0x0009f604	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000027	接收	0x0009f62a	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000028	接收	0x0009f630	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000029	接收	0x0009f627	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000030	接收	0x0009f624	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff
00000031	接收	0x0009f633	0x18f12005	数据帧	扩展帧	0x08	00 45 09 80 00 06 ff ff
00000032	接收	0x0009f62a	0x18f1f05	数据帧	扩展帧	0x08	00 00 34 56 12 34 ff ff
00000033	接收	0x0009f630	0x18f1805	数据帧	扩展帧	0x08	ff 02 01 ff ff ff ff ff

图 8 CAN1 通道发送监测

图 7 中,CAN0 通道每隔 50 ms 向 MCU 发送 3 个报文,同时接收 1 个报文。报文 29 位标识符与上文所述相同。图 7 中显示,每 4 个报文一个循环,无遗漏报文或超载报文,证明了 CAN0 通道收发速率的稳定性。图 8 中,监控软件观测到 CAN1 通道每隔 50 ms 向仪表控制器发送 3 个报文。报文内容已根据仪表报文协议更改,与图 7 中 CAN0 发送报文内容不同。监测数据显示 CAN1 通道报文无遗漏或超载。

为验证中继站 VCU 报文转换的正确性,本研究采用 EV loader 监控软件对转矩曲线进行采集。实验环境为电动汽车坡道驻车情况。根据电机控制逻辑,在坡道驻车时,为防止汽车溜车下行,会在检测到电机反转时控制调节电机输出与运行方向相反的转矩。中继站作为电机控制数据采集交换中心,其报文转换的准确性会直接影响电机控制性能。

从坡道驻车开始到踩刹车停车过程如图 9 所示。电机实际转矩值是对仪表显示的转矩报文的解包,转矩计算值是对电机驱动器转矩控制报文的解包。图 9 中转矩值以与当前转向相同为正,相反为负。数据点

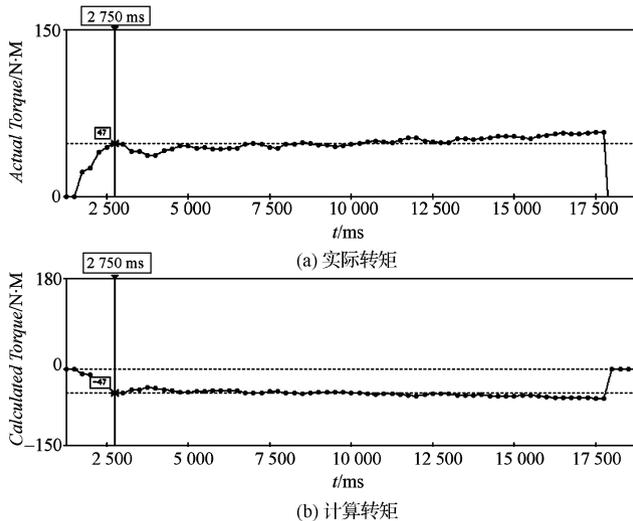


图 9 坡道驻车转矩数据图

显示,当实际转矩 47 N(下行反转)时,转矩控制计算值为 -47 N(正向转矩,与实际运行方向相反,为负值)。两条转矩曲线趋势为反向等值。证明系统实现了电机控制逻辑,从而验证了驱动器报文和仪表报文在中继站 VCU 中进行了正确的报文转换,为电机控制提供了准确的数据。

4 结束语

本研究提出了一种基于瑞萨 SH72A2 单片机以及 CAN 总线技术的通信中继站设计手法。

该电动汽车 CAN 通信中继站,实现了中继站与电机驱动器双向通信,与整车仪表单向通信的 CAN 双通道通信功能。同时中继站 VCU 完成了对油门、刹车模拟信号和挡位等数字信号的数据分析和报文转换。实验验证了中继站双通道 CAN 通信的稳定性和报文转换的准确性。

CAN 通信中继站具有良好的可移植性,可以根据不同电机驱动器和整车系统灵活更改设置,实现不同电机驱动器与整车系统快速、高效的 CAN 通信。

参考文献(References):

- [1] 沈 瑶,李小清,周云飞.基于CAN总线的电动车控制系统设计[J].电子设计工程,2010,18(11):143-145.
- [2] 葛 林,周文华,徐 航.CAN通信网络在汽车中的应用研究[J].汽车技术,2000(11):1-4.
- [3] 邬宽明.CAN总线原理和应用系统设计[M].北京:北京航空航天大学出版社,1996.
- [4] RENESAS. SH72A2 Group, SH72A0 Group User's Manual: Hardware, Rev1.00[S]. Renesas Inc., 2012.
- [5] ISO 11898-1 Controller area network (CAN). Part 1: Data link layer and physical signaling[S]. [s. n.], 2003.
- [6] 王梓桐.基于CAN总线的电动汽车控制系统的研究[D].杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
- [7] 车兵辉,张 鹏,巍 然.基于CAN总线的风词试验模型电动舵机系统[J].兵工自动化,2014(11):79-82.
- [8] 盘 龙,林光春,任德均,等.基于CAN总线的设备监控系统设计[J].机电工程技术,2014(3):56-58.
- [9] 王黎明,夏 立,邵 英,等.CAN现场总线系统设计技术[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [10] ZELTWANGER H.现场总线CANopen设计与应用[M].周立功,黄晓清,严寒亮译.北京:北京航空航天大学出版社,2011.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

李霖霖,陈阳生,章 玮.基于CAN总线的电动汽车中继站研究[J].机电工程,2015,32(3):379-383.

LI Ji-fen, CHEN Yang-sheng, ZHANG Wei. Electric vehicle relay station based on CAN bus[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(3):379-383.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第372页)

5 结束语

基于Pro/E与AWE的结构参数化优化方法设计的家用救生舱,其整体强度和刚度均有提高。通过优化,家用救生舱舱体稳定性得到满足,有效减小了在地震中舱体断裂和破坏的可能性,增强了抵抗地震载荷的能力。

由于地震波的形式和传播方式千变万化,每一次的地震情况都是偶然的,很难模拟具体到每一次的情况。本研究只是选取其中一种情况进行分析,分析结果具有一定的参考价值,但是对更多复杂的情况则需要利用更多的地震数据进行更加深入的研究。

参考文献(References):

- [1] 杨福芹,丁中敏,常德功.家用救生舱的概念设计[J].机电工程,2014,31(1):12-20.
- [2] 李 准,葛宜文,尹 侠.地震载荷下氢球罐的瞬态动力学响应分析[J].纯碱工业,2009(1):13-16.
- [3] 苏宇龙,黄松和,江小亮,等.挖装机工作装置瞬态动力学

仿真与分析[J].机械设计与制造,2013(2):144-146.

- [4] 李福海,张宏文,李 勇,等.摘锭式采棉机凸轮机构的瞬态动力学分析[J].机械设计与制造,2013(4):128-130.
- [5] 苏 猛,刘春亭.煤矿井下救生舱壳体的动态响应[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2013,32(3):357-361.
- [6] 樊智敏,高 亮.基于ANSYS的驱动桥壳瞬态动力学和疲劳寿命分析[J].机械设计与研究,2012,28(4):70-72.
- [7] 熊传志.带肋各向异性壁耐压壳体的有限元仿真和试验验证[J].机电工程技术,2013(7):143-146.
- [8] 田增强,郑德聪,郭玉明,等.变速箱壳体静力分析及模态分析[J].中国农机化学报,2013,34(4):178-181.
- [9] 韩 静,方 亮,孙甲鹏,等.基于Pro/E与ANSYS WORKBENCH的复杂装配协同仿真及优化[J].机械设计与制造,2010(1):190-192.
- [10] 文 周,陈婵娟,彭 彪.基于Pro/E和ANSYS的输送辊有限元分析[J].包装与食品机械,2013(3):38-40.
- [11] 贾吉林.基于Pro/E和ANSYS的减速器箱体的有限元分析[J].煤矿机械,2011,32(10):256-257.

[编辑:洪炜娜]