0254-6124/2024/44(6)-1166-11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

HU Jiyingshuo, ZHU Yan, ZHOU Li. On-board Application of FlexRay Bus (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1166–1176. CSTR:32142.14.cjss.2023–0124. DOI:10.11728/cjss2024.06.2023–0124

FlexRay 总线的星载应用*

胡继英朔[1,2] 朱 岩[1] 周 莉[1]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 星载数据总线是卫星综合电子的重要组成部分. 随着空间探测任务的复杂化, 载荷对卫星综合电子数据传输的速率和实时性需求不断增加, 以 1553B 和 CAN 为代表的现有星载总线不能满足日益增长的星载数据传输需求, 需要开展地面应用成熟的高可靠高速 FlexRay 总线的星载应用研究. 分析 FlexRay 总线应用于卫星综合电子的技术优势, 开展 FlexRay 星载通信节点的软硬件设计; 考虑到 FlexRay 总线在轨应用时作为传统 CAN 总线的扩展或补充的应用场景, 采用轮转映射算法设计实现了 CAN 与 FlexRay 总线网关. 星载 FlexRay 总线系统经误码率测试, 连续地进行数据发送、接收, 组网中不同总线报文数据均交换正常, 未出现帧丢失或错误, 误码率低于 10^{-8}, 验证了其有效性与可靠性, 为后续以嫦娥、探火为代表的深空探测和空间科学探测卫星提供技术支撑.

关键词 FlexRay 总线, 星载 FlexRay-CAN 网关, 高速总线通信, 时间触发

中图分类号 TP336, V474

On-board Application of FlexRay Bus

HU Jiyingshuo[1,2] ZHU Yan[1] ZHOU Li[1]

1(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049)

Abstract With the increasing systematization and complexity of space exploration tasks, the transmission rate and real-time demand of scientific payloads for satellite integrated electronic data transmission are increasing. In response to the fact that the existing on-board buses represented by 1553B and CAN bus cannot meet the growing demand for on-board bus data transmission, this paper carries out the research on the satellite application of the ground-mature high-reliability and high-speed FlexRay bus. First of all, the technical advantages of FlexRay bus applied to satellite integrated electronics are analysed, and the hardware and software design of FlexRay on-board communication node is carried out. The static time is designed and applied to trigger the sending of the corresponding load data, and the dynamic segment of the highest priority event is applied to trigger the sending of regulatory commands, ensuring the system's real-time nature. Taking into account that FlexRay bus is used as an extension or supplement of traditional CAN bus in rail applications, the design realizes the gateway function of CAN

* 中国科学院国家重大科技专项项目资助 (E16505B31S)

2023-11-09 收到原稿, 2024-01-18 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

bus and FlexRay bus, and adopts the turn-by-turn mapping algorithm to realize the sequential exchange of telegram messages between CAN bus and FlexRay bus. The system is verified by Code Warrior integrated environment, and the feasibility assessment is completed by building the hardware platform with MC9S12XF512. After the BER test, the data are sent and received continuously, and the data of different bus messages in the network are exchanged normally without frame loss or frame error, and the BER is lower than 10^{-8}. The test results verify the validity and reliability of the design of the on-board FlexRay bus system, which will provide technological support for the subsequent deep-space exploration and space scientific exploration satellites represented by the Chang'E and the Fire Exploration Project.

Key words FlexRay bus, On-board FlexRay-CAN gateway, High-speed bus communication, Time triggered

0 引言

随着中国空间科学、深空探测、载人航天任务的深入发展, 空间探测任务也愈加系统化、复杂化[1], 航天器上携带的有效载荷种类、数量和复杂度跨越式增加, 众多图像类、高时间和空间分辨率的载荷例如合成孔径雷达、多光谱成像仪等对星载数据总线的数据传输速率的要求也不断提高[2,3]. 另外, 载荷正逐步向测试精细化、多载荷协同控制及集成化发展, 其进行精密测量、闭环控制时对总线的实时性要求高[4]. 传统星载总线 CAN 和 1553 B 等数据传输速率最高局限于 1 Mbit·s^{-1}, 且为保障负载数据的确定性及正确性, 数据传输的效率多限制在 30%～50%, 逐步不能满足后续深空探测计划及空间科学任务的数据总线传输要求[5]. 因此, 开展新一代总线通信协议的空间应用研究对于中国空间科学、深空探测任务的开展具有重要意义.

为开发一种以时间触发并兼容事件触发方式的新型通信技术, FlexRay 联盟于 2000 年成立, 并于 2005 年正式发布了 F1exRay V2.1 规范标准[6]. 该总线拓扑结构灵活, 支持多种类型故障计数及循环冗余校验 (Cyclic Redundancy Check, CRC), 具备自身电磁防干扰机制, 支持电缆和光纤多通道冗余传输, 最高速率支持 20 Mbit·s^{-1}, 可满足各类有效载荷的互连需求.

国外对于 FlexRay 总线的研究开展较早, 基础理论及应用的研究均较为完善. Jaouani 等[7] 针对 FlexRay 总线硬实时分布式系统的混合任务和报文调度问题提出了一种调度算法, 满足硬实时约束条件的情况下最小化总线利用率. Kumar 等[8] 将优先约束消息调度问题转化为最小时隙节拍利用率优先权规划问题, 对不同优先级的负载信息进行时序分析, 解决了静态段和动态段之间的时序问题.

中国对于 FlexRay 的研究起步较晚但发展迅速, 已将其广泛应用于车载、机载领域, 对于新一代航天总线技术也在积极开展研究. FlexRay 总线在航天领域的应用虽处于实验阶段, 但 FlexRay 具备自身独特的错误控制和故障恢复机制以及高带宽、低延迟的特性, 适合高速、大规模的实时可靠传输.

本文对 FlexRay 总线协议从物理层、数据链路层到软件应用层进行分层次深入调研, 分析协议星载应用可行性并开展预研工作, 将具备故障容错的高速时间触发式 FlexRay 总线应用于卫星综合电子数据总线, 实现传输带宽扩展 20 倍的同时, 将基于优先级调度的事件触发模式优化为事件及时间混合触发模式, 解决了动态数据传输时延不确定的问题. 考虑到 FlexRay 总线在轨应用时作为传统 CAN 总线的扩展或补充的应用场景, 设计实现了 CAN 总线与 FlexRay 总线的网关功能, 提供 FlexRay 总线与现主流 CAN 总线接口, 应用轮转映射算法, 实现了两种星载总线之间的可靠数据交换, 验证了 FlexRay 总线通信技术星载应用的可行性, 为后续以嫦娥、探火为代表的深空探测工程和空间科学探测卫星载荷数据处理系统提供了技术支撑.

1 星载 FlexRay 总线技术应用

1.1 FlexRay 媒体访问机制

FlexRay 的媒体访问控制原理与传统总线 CAN

和 1553 B 等有较大差别. FlexRay 协议通信循环周期分为静态段、动态段、符号窗和网络空闲 4 部分. 其中静态段由多个等长静态时隙构成, 以时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 的时间触发方式传输静态帧; 而动态段由多个动态时隙构成, 时隙长度可依据需求进行拓展, 其基于柔性时分多址机制 (Flexible Time Division Multiple Access, FT-DMA) 传输动态帧; 符号窗用来传输冲突避免符号、介质测试符号及唤醒符号; 网络空闲段用于同步本地时钟, 不进行数据通信.

应用上述机制, 可将星载轮询通信改为固定触发通信. 由于其独特的时间、事件混合触发机制, 网络节点均具备时隙分配表, 通信帧会被事先分配动态或静态时隙. 在通信过程中, 通信帧于自身时隙触发, 进而保障各星上节点有序进行信息交互, 从源头上解决了总线时间冲突问题, 降低了消息延迟时间. 同时, 其周期循环模式也较为符合遥测工程参数等数据类型周期性传输的特性.

1.2 FlexRay 时钟同步机制

FlexRay 的时间触发机制导致其对于时钟较为敏感, 协议网络采用基于同步时基的分布式通信访问方式, 进行相位偏差和频率偏差的修正, 同时执行最大时间节拍生成进程 (Macrotick Generation, MTG)、时钟同步进程 (Clock Synchronization Processing, CSP), CSP 在周期的起始阶段完成原始值的设置. 测量得出实际时间与预定时间之间的偏差, 应用容错平均算法计算出每个节点的偏移和速率校正值并完成记录工作. MTG 对通信的循环时间中期进行操纵, 利用 CSP 所计算的校正值, 在控制最大时间节拍计数器进行初值赋予的同时进行相位校正以及频率校正, 实现系统的时钟同步, 时钟精确度可达 1 μs. 因而利用 FlexRay 协议同步机制可以保障高精度的网络同步, 确保星上系统设备间数据传输和通信的同步性与一致性, 这对于其正常运行和协同工作尤为重要.

1.3 协议故障检测及容错技术

星载系统运行环境特殊, 不确定性因素多、人工干预能力弱, 必须对自身硬件故障或软件错误采取措施, 因而容错技术对于星载系统不可或缺. FlexRay 总线相较于其他总线具备自身故障检测及容错机制, 拥有多级别的错误管理及降级模式.

FlexRay 网络出现故障时, 系统抑制分布式辅助机制, 即系统会尽量限制网络中其他节点的辅助协作, 选择独立重启动故障失效节点通信, 意在持续尝试恢复系统正确状态的同时尽可能减少对正常节点的影响. 而在容错时钟同步机制的运行下, 系统不会因为故障节点, 而停止其他节点的数据传输.

协议特定的降级模式将故障错误的严重程度分为 4 个等级, 并对其故障错误管理做出相应规范, 各类错误依据外部事件进行转换. 当错误条件不复存在时, 错误管理机制将立即强制 FlexRay 通信网络恢复到正常操作状态.

1.4 FlexRay 网络拓扑结构

FlexRay 支持多种拓扑结构, 例如点对点型、有源星型、总线型、混合型等. 此外, 总线支持双通道传输, 信道可传输不同的报文信息, 也可以采用双通道进行冗余传输, 为星上电子系统的架构提供了多样选择的同时提高了数据可靠性. 其中点对点连接是数据传输系统中最基础的总线拓扑, 类似于原子对于物质的构成形式, 如图 1 所示.

而总线型拓扑结构将电子控制器单元 (Electronic Control Unit, ECU) 节点连接为一个系统, 任意载荷单元均可通过接口接入该拓扑结构, 所需拓展设备少、易于搭建, 不会因为某个 ECU 故障影响系统整体正常通信, 具备较高的可靠性, 如图 2 所示.

鉴于卫星综合电子系统对于可靠性、实时性的要求, 考虑设备连接的简洁及兼容性, 与 CAN 总线星上分布式架构保持基本一致, 以保障后续 CAN-FlexRay 网关的设计, 采取点对点连接以及总线型结构进行双通道冗余传输.

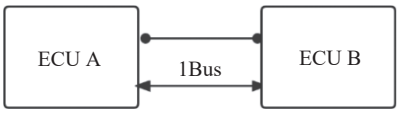


图 1 点对点网络拓扑结构

Fig. 1 Point-to-point network topology

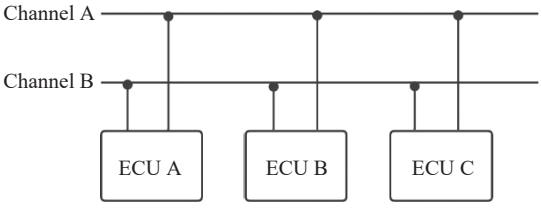


图 2 总线型网络拓扑结构

Fig. 2 Bus-based network topology

1.5 FlexRay 总线协议机制对比

综上所述, 相比 1553 B 和 CAN 总线, FlexRay 总线在传输带宽、通信性能、触发方式以及故障检测等方面均具备自身独特优势, 满足载荷系统可靠、实时性需求, 较为适用于卫星综合电子系统, 其性能对比见表 1.

2 FlexRay 星载通信节点软硬件设计

2.1 FlexRay 星载通信节点硬件架构

星载系统架构核心为 ECU 节点的设计, 如图 3 所示, 节点主要由主控制器 (Host)、通信控制器 (Communication Controller unit, CC)、可选总线监控器 (Bus Guardian, BG) 以及总线驱动器 (Bus Driver, BD) 组成.

Host 提供和产生数据, 借助 CC 向控制器主机接口 (Controller Host Interface, CHI) 发送主机命令控制协议运行状态; BD 连接 CC 及总线接口由 Host 对其进行监控; Host 依据时隙分配表控制 BD 和 CC 协作在特定时隙中进行帧传输.

Host 不仅需对节点搭载的模拟有效载荷模块进行运行管理及科学数据采集, 还需通过网络将数据上传至星载数据处理单元或其他单元节点. 本文对多款微处理器芯片进行了较为全面的调研[9–13], 最终确定选用高速率、低功耗、高稳定的 MC9 S12 X 微处理器作为主控制器.

其 ECU 节点中的 CC 直接内嵌于主控制器中, 由主机接口 CHI、协议引擎 (Protocol Engine, PE) 和时钟域交互接口 (Clock Domain Crossing, CDC) 组件构成, 如图 4 所示. 为报文传输、网络全局时钟控制、协议状态转换、数据帧帧头以及有效负载数据存储等提供硬件支持.

BD 选择 TJA1080 进行双通道冗余传输, ECU 节点 CC 访问 BD 进行物理层数据的解析, 实现电平信号与数据帧之间的编解码. ECU 节点硬件电路如

表 1 FlexRay 总线与 1553B 及 CAN 总线机制对比

Table 1 Comparison of FlexRay bus with 1553B and CAN bus mechanisms

序号	类别	FlexRay	CAN	1553B
1	速率	单通道即可达10 Mbit·s^{-1}	0.125～1 Mbit·s^{-1}	1 Mbit·s^{-1}
2	拓扑结构	总线型、点对点型、星型	总线型	总线型
3	物理层	电缆/光纤	电缆	双绞线、电缆
4	通信方式	时间触发和事件触发	事件触发	事件触发
5	有效负载	最大254 Byte	最大8 Byte	最大32 Byte
6	故障计数	任何状态转换计数	固定的状态转换计数	固定的状态转换计数
7	访问方式	TDMA、FTDMA	CSMA/CD	CSMA/CD
8	CRC校验	帧头CRC、帧CRC	帧CRC	帧CRC
9	可确定性	好	较差	好

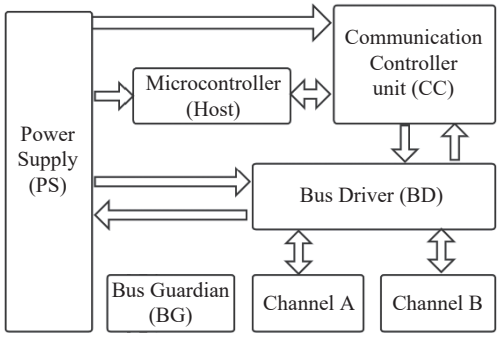


图 3 ECU 节点结构

Fig. 3 ECU node structure

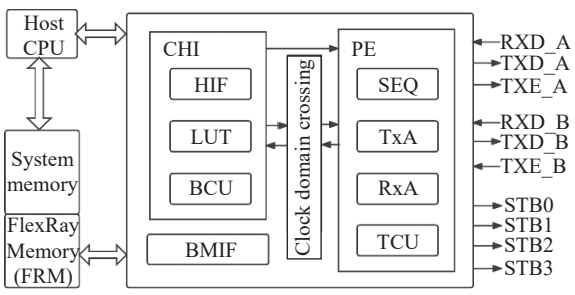


图 4 通信控制器结构

Fig. 4 Communication controller structure

图 5 所示, 该电路以 MC9 S12 XF512 为核心搭载, X1 主要连接 FlexRay 通道, 将节点接入星载总线.

针对系统灵活性及可靠性技术需求, 以 ECU 节点为基础构造双通道总线型拓扑结构, 搭载相应的模拟有效载荷完成硬件整体设计. 生成模拟科学数据及命令工参类指令进行传输测试, 验证所设计的 FlexRay 通信网络性能.

2.2 FlexRay 星载系统映射缓存配置

2.2.1 全局参数配置

FlexRay 协议共定义了 39 个全局底层参数, 在设置底层参数时, 需要满足严格的制约关系, 否则会直接影响协议网络的正常运行. 根据实际需求设置部分参数列于表 2.

针对星载系统的实时性及带宽速率要求, 在不影响时隙数量和数据段的前提下, 可将传输要求最快的星载数据更新周期作为整个 FlexRay 网络的通信周期, 设置 FlexRay 允许范围内最小全局位时间, 以此确保每一类星载数据的正常传输. 此处配置通信周期为 5000 最大时间节拍 (Macrotick, MT), 该节拍源于时钟同步算法的时间间隔, 表示全局时间的最小间隔单位, 最大时间节拍单位长度设为 0.1 μs. 考虑时隙传递的静态段、动态段有效负载长度, 参照 FlexRay 协议中静态段长度及动态段长度计算公式, 设置静态段长度为 3000 MT, 由 50 个 60 MT 的静态段时隙组成. 动态段长度 880 MT, 由 22 个 40 MT 的动态时隙组成.

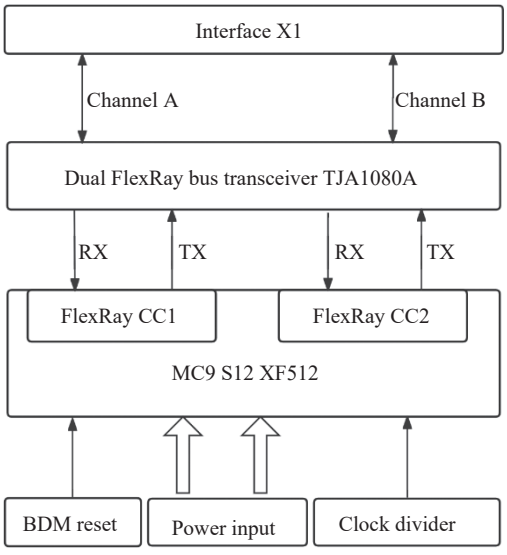


图 5 ECU 节点硬件连接电路

Fig. 5 ECU node hardware connection circuit

基于上述配置, 并充分利用所设计星载 FlexRay 总线系统独特的时间及事件双触发机制, 针对实时性、可靠性要求高的命令工参类数据, 采用时间触发的静态段进行传输; 针对数据量大的科学类数据, 采用事件触发的动态段进行传输, 解决总线时间冲突问题. 同时, 动态段还可针对外部异常触发事件信息进行传输, 例如故障、异常错误信息等, 提高星载总线带宽利用的规范性, 确保系统调控效率, 满足时序及实时性要求苛刻的星上场景.

2.2.2 时钟及内部锁相环

依据 Freescale 官方文档 S12 XF512 Reference Manual 中锁相环时钟部分所述, 在该星载系统, 为保证传输实时性及通信速率配置正确性, 需强制要求主控 Host 利用锁相环将系统时钟倍频, 为 CC 输入 80 MHz 时钟, 否则将导致网络的传输速率在原配置基础上分频.

锁相环时钟频率为

表 2 节点通信的全局变量部分参数设置值

Table 2 Global variable partial parameter setting values for node communication

序号	参数名称	设置数值
1	比特率	10 Mbit·s^{-1}
2	同步节点最大数目	5
3	最大时间节拍长度	1 μs
4	周期长度	5000 MT
5	静态段	3000 MT
6	动态段	880 MT
7	符号窗	13 MT
8	偏移修正起始	4920 MT
9	静态段数目	60
10	静态时隙长度	50 MT
11	动作点偏移量	3 MT
12	静态段负载长度	32 Byte
13	最小时隙的最大数量	22
14	最小时隙长度	40 MT
15	最小时隙动作点偏移量	3 MT
16	动态段最大负载长度	16 Byte
17	FlexRay通道	A&B
18	全局位时间	0.1 μs
19	周期时长	5000 μs

$$f_{\mathrm{PLL}}=\frac{f_{\mathrm{VCO}}}{2P}. \tag{1}$$

其中, f_{VOC}为 PLL 内部 VCO 所产生频率, 而当寄存器 P 配置为 0 时, 锁相环时钟频率为

$$f_{\mathrm{PLL}}=f_{\mathrm{VCO}}=2f_{\mathrm{OSC}}\frac{S+1}{R+1}. \tag{2}$$

其中, f_{OSC}为外部晶振频率 16 MHz, S 为时钟倍频系数, R 为时钟分频系数. 将 S 设置为 0x09, R 设置为 0x01, 计算锁相环时钟频率, 可得

$$f_{\mathrm{PLL}}=f_{\mathrm{VCO}}=2f_{\mathrm{OSC}}\frac{S+1}{R+1}=160\ \mathrm{MHz}. \tag{3}$$

内部锁相环频率为总线频率的 2 倍, 因而完成设置总线频率 80 MHz.

2.2.3 系统时序和定时

Host 应用程序为消息缓存开拓了两个独立的缓存段, 第一段 (segment1) 用于静态段收发通信帧的消息缓存, 第二段 (segment2) 用于动态段收发通信帧的消息缓存. 采用用户定义结构体或系统配置结构体进行参数映射的方法, 操作 Fr_buffer_cfg_00, Fr_buffer_cfg_set_00, Fr_rx_shadow_cfg 完成消息缓存数组索引、数据设置. 操作 Fr_timer_1_cfg 和 Fr_timer_2_cfg 系统结构体, 配置 FlexRay 通信控制器的片上定时功能, 保障绝对时钟 T1 及相对时钟 T2 调用相应的服务程序维持网络数据收发.

依据实际需求定义数据储存数组, 借助中断服务函数可以完成各星载节点的时隙分配表, 数据帧的接收、发送需要依据该带宽分配进行相应配置.

2.3 协议初始化及数据帧收发

2.3.1 FlexRay 协议初始化

FlexRay 协议初始化主要分为主控制器相关寄存器配置、协议引擎配置及消息缓存和 FIFO 配置. 首先, 对主控制器 Host 中的相关寄存器进行配置, 选择双通道模式, 设置系统内存基地址, 设定传输速率为 10 Mbit·s^{-1} 并使能 FlexRay 模块, 控制协议进入 Normal 状态. 通过协议操作控制寄存器 (Protocol Operation Control Register, POCR) 发送 CONFIG 指令, 检测到协议运行状态 (Protocol Operating Condition, POC) 达到 Config 状态时, 写入相应命令完成网络协议参数、节点参数、帧参数等通信控制器相关参数配置.

依次配置消息缓存数量及消息缓存分割, 定义消息缓存数据大小, 完成配置每个消息缓存, 以此确保对应星载节点在特定时隙正确收发帧. 在配置 FIFO 接收后 POCR 发送 COMPLETE 命令, POC 达到 Ready 状态后协议初始化配置结束, ECU 可作为一个星载节点加入 FlexRay 通信集群.

2.3.2 星载节点数据帧收发

各星载节点数据帧收发需设置对应中断, 依据时隙分配表进行静态、动态时隙分配. 数据帧发送流程如图 6 所示, 为防止信息缓冲器 (Message Buffer, MBn) 在帧发送时改变, 需对 MBn 锁存. 若检测到 MBn 未锁存, 系统清除发送缓存器中断标志位 (Message Buffer Interrupt Flag, MBIF) 后返回 FR_TXMB_NO_ACCESS, 指示帧发送失败. 若检测到 MBn 已锁存, 系统依据中断标志位进入函数并定位 MB 的头地址与数据区域地址, 读取数据长度并借助循环将数据写入 Fr_CC_data_ptr 数据域中, 置位 CMT 位启动发送进程. 发送结束后, 解锁发送 MBn 并返回 FR_TXMB_UPDATED, 指示帧数据更新.

星载节点数据帧接收也需对 MBn 锁存, 并根据

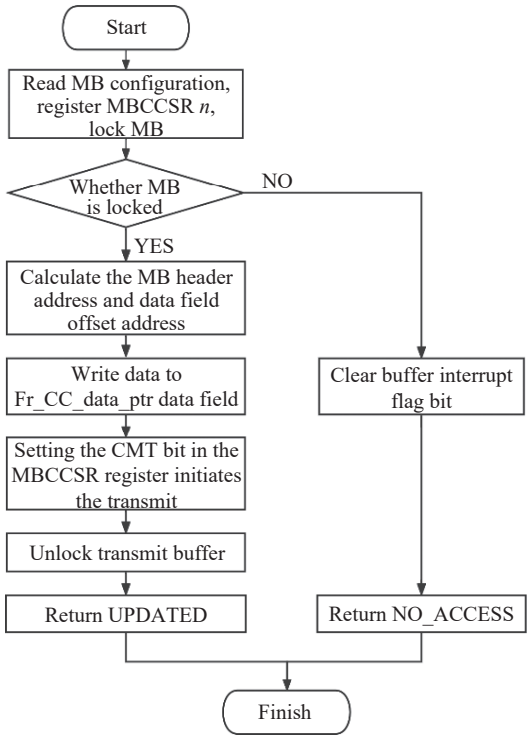


图 6 星载节点 FlexRay 数据帧发送流程

Fig. 6 On-board node FlexRay data frame sending process

当前 MB 计算头地址获得时隙状态. 数据帧接收需实时更新帧头, 若帧头无更新, 则判断其是否接收到有效数据帧, 若否, 判定节点未到相应时隙; 若是, 则其接收到的数据帧并未搭载负载数据. 若帧头部分更新, 计算 MB 中的数据偏移地址, 将读取数据存储于 Fr_data_ptr 数据域中, 检查错误信息后解锁缓冲器, 返回 FR_RXMB_RECEIVED, 指示报文数据接收完成, 数据帧接收流程如图 7 所示.

2.4 星载系统软硬件容错机制

针对系统容错性需求, 在星载总线系统正常通信的前提下, 添加一定的软硬件容错机制. 硬件容错机制主要采用硬冗余机制, 即 FlexRay 双通道冗余传输, 这是当前星上系统比较主流的设计方法. 设 FlexRay 总线通道的可靠性指数为

$$R(t) = \mathrm{e}^{-\lambda t}. \tag{4}$$

其中, e 为无限不循环小数, t 为通信时间; λ 为 FlexRay 总线通信的故障率, 根据故障统计及设计经验, λ 取值 2×10^{-5}. 在双通道传输下, 两条总线通道中只要有一条仍在正常工作通信即能维持, 因而其总

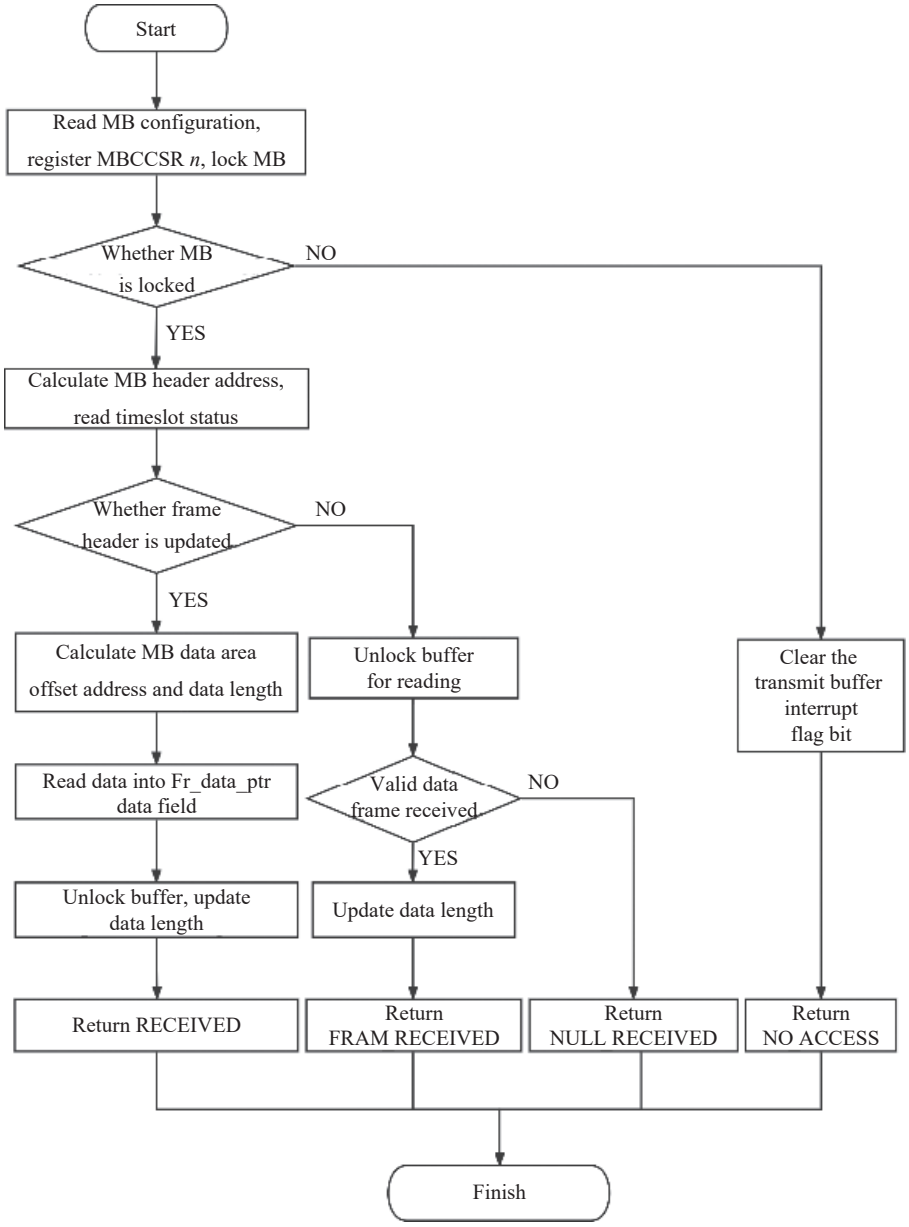


图 7 星载节点 FlexRay 数据帧接收流程

Fig. 7 On-board node FlexRay data frame reception process

线确定性为

$$R(t) = 1 - (1 - \mathrm{e}^{-\lambda t})^2. \tag{5}$$

依据上述公式及原理对单通道传输可靠性及双通道传输可靠性进行对比, 如图 8 所示. 相同情况下, 双通道冗余传输的可靠性高于单通道传输可靠性. 经验证, 在系统传输时人为破坏 A 与 B 任一传输通道, 系统通信状况依然正常, 该冗余机制对系统报文确定性起到了一定的作用.

软件容错机制借鉴传统星载总线系统的设计思路, 并应用 FlexRay 协议的故障错误机制. 当两条通道均故障时, 主控节点与该节点通信中断, 主控节点将对故障节点进行多次复位, 尝试重新建立通信关系, 若多次复位后总线通信仍无法恢复, 为防止该损坏节点对正常节点造成干扰, 系统弃用该节点; 若该过程中总线通道恢复, 则主控节点可以向节点发送唤醒符, 重新建立通信.

3 星载 CAN-FlexRay 网关设计

目前星载总线系统中应用较为广泛的仍然是 CAN 总线, FlexRay 总线首次在轨应用时一般会作为 CAN 总线的扩展或备份. 因而, 解决 CAN 总线与 FlexRay 总线之间的数据交互问题对于 FlexRay 总线的实际星上应用具有重要意义. 下面将从 CAN-FlexRay 网关硬件设计、CAN 总线与 FlexRay 总线差异性分析、路由设计等方面介绍 CAN-FlexRay 网关设计方法, 实现数据帧转换, 构成星载总线分布式转换网络.

3.1 FlexRay-CAN 协议转换节点

在 CAN-FlexRay 网关系统中, CAN 节点由 CAN 控制器和 CAN 收发器以及主控制器 Host 构成, FlexRay 节点由 CC, BD, BG 以及主控制器 Host 构成. 而 CAN-FlexRay 转换网关则是实现 CAN 总线子网与 FlexRay 总线子网间信息交互的核心, 既作为 CAN 节点也作为 FlexRay 节点, 实现 CAN 子网与 FlexRay 子网的物理连接与报文转换.

CAN-FlexRay 网关节点结构如图 9 所示. 主要包括微控制器单元、单通道 CAN 收发单元、双通道冗余 FlexRay 收发单元以及 BDM 调试电路、时钟电路等外围电路. 微控制器单元是 CAN-FlexRay 网关的核心, 其内部集成了 CAN 总线控制器及 FlexRay 通信控制器, 负责 CAN 数据帧与 FlexRay 数据帧的报文分解、映射及重组. FlexRay 收发单元作为 FlexRay 节点与 FlexRay 子网连接, 负责 FlexRay 子网报文的发送和接收; 同样, CAN 收发单元作为 CAN 节点与 CAN 子网连接, 负责 CAN 子网报文的发送和接收. 此外, 搭载 BDM 调试电路, 可并行调试多个应用程序, 获取系统底层数据; 借助时钟电路及内部锁相环实现系统的时钟同步.

3.2 FlexRay 及 CAN 协议差异性分析

FlexRay 总线与 CAN 总线协议差异较大, 要实现 CAN 子网和 FlexRay 子网之间的数据互传, 首先要明确 FlexRay 协议和 CAN 协议的不同, 进而针对

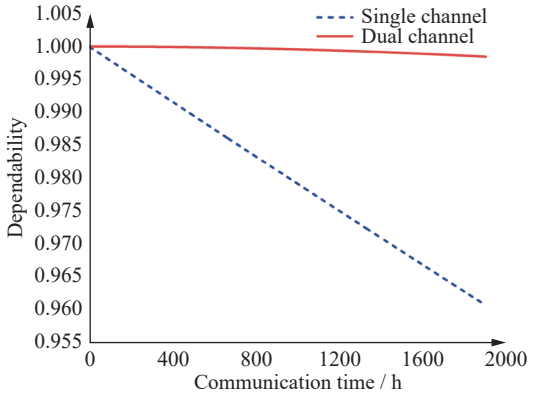


图 8 传输可靠性曲线对比

Fig. 8 Comparison of transmission reliability curve

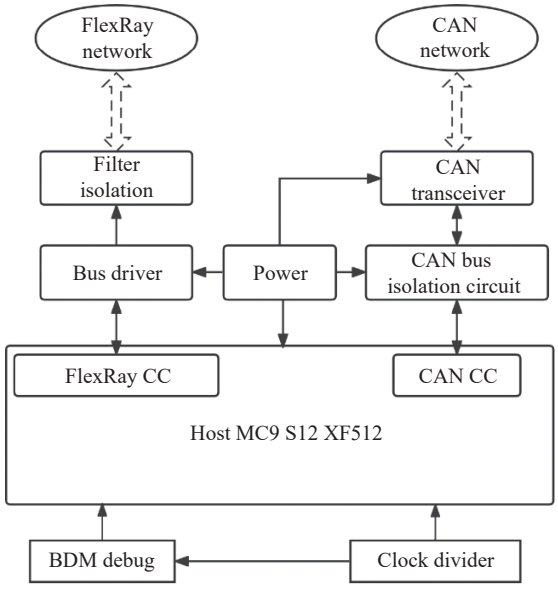


图 9 CAN-FlexRay 节点结构

Fig. 9 CAN-FlexRay node structure

两者差异进行设计, 两者协议的关系对比已在表 1 中列出.

负载数据长度方面, CAN 总线最大负载数据为 8 Byte, 而 FlexRay 总线最大负载数据为 254 Byte; 通信方式方面, CAN 总线基于事件触发, 而 FlexRay 总线基于时间触发同时兼容事件触发; 传输信道方面, CAN 总线仅有 1 条信道, 而 FlexRay 可以进行双通道冗余传输; 传输带宽方面, CAN 总线最大传输速率为 1 Mbit·s^{-1}, FlexRay 总线单通道即可达到 10 Mbit·s^{-1}; 总线拓扑结构, CAN 总线局限于总线型, FlexRay 则具备多种拓扑结构. 除此之外, 两者协议在物理层、故障计数机制、故障种类、时钟同步机制及通信确定性等方面均存在差异, 已在表中列出, 此处不展开介绍.

基于上述差异, FlexRay 报文数据帧格式拆分重组为 CAN 报文数据帧格式与 CAN 报文数据帧拆分重组为 FlexRay 数据帧在设计、转换方向以及应用程序等诸多方面均有较大的差别, 下面将从协议转换优先级、FlexRay-CAN 报文路由设计、CAN-FlexRay 报文路由设计进行介绍.

3.3 FlexRay-CAN 协议转换优先级

由于各子任务均运行于 CAN-FlexRay 节点中, 应用程序较为繁琐复杂, 因而需要对各任务中断添加限制条件并进行优先级设置, 防止低优先级任务打断高优先级任务造成系统紊乱, 维持报文数据转换的有秩性.

任务优先级如表 3 所示, 为防止报文数据丢失, 重写 FlexRay 发送缓冲区置位最高优先级, 进行该任务时, 其他任务均不允许执行, 以防止缓冲区数据写入失败; 为保证 FlexRay 时间触发机制的准确性, 将 FlexRay 报文发送任务设置为第二优先级, 保障数据传输的实时性; 其次是事件触发机制的 CAN 报文发送任务; FlexRay 总线及 CAN 总线的接收较其他任务占用资源较少, 因而将其设置为最低优先级.

3.4 CAN 报文映射 FlexRay 报文路由设计

应用轮转映射算法分别完成 CAN 总线与 FlexRay 总线之间的报文映射设计, 如图 10 所示为 CAN 路由 FlexRay 架构, 当 CAN 子网中对应数据帧发送至 FlexRay-CAN 网关节点并需要协议转换时, 网关节点进入 CAN 报文接收中断, 在中断中接收相应数据帧并将其存储于接收循环队列中, 网关对循环队列中的数据进行轮转发送. 报文接收处理任务对接收到的 CAN 总线数据帧进行解析, 将其中所搭载的负载数据重组映射于所对应的 FlexRay 目标数据帧中, 从而转发至 FlexRay 网络.

若 FlexRay 节点缓冲区处于时隙更新或发送状态, 则无法将路由的报文数据写入缓冲区. 此问题是由于 FlexRay 协议独特的时间触发机制造成的, 节点在路由数据时无法对报文缓冲区的状态进行实时查看, 因而此现象无法避免. 但系统可以通过检测缓冲区写入数据是否完成解决该问题, 若检测到失败, 则网关节点实时启动缓冲区重写任务, 再次向该缓冲区写入数据直到成功写入.

3.5 FlexRay 报文映射 CAN 报文路由设计

同理, 如图 11 所示, CAN-FlexRay 网关采用中断的方式接收 FlexRay 报文, 并将报文数据存储在对应的 FlexRay 接收循环队列中等待网关轮转发送. FlexRay 报文接收处理任务对接收到的 FlexRay 数据帧进行解析, 完成数据帧重组并映射至目标 CAN 子网.

系统中 CAN 数据帧数据为 8 Byte, 而 FlexRay 数据帧负载数据为 32 Byte. 因此 1 帧 FlexRay 数据应对应 4 帧 CAN 数据, 对 FlexRay 数据进行分段处

表 3 CAN-FlexRay 协议转换任务优先级

Table 3 CAN-FlexRay protocol conversion task prioritization

任务优先级	任务
0	FlexRay发送缓冲区重写
1	FlexRay报文发送任务
2	CAN报文发送任务
3	FlexRay报文接收处理任务
3	CAN报文接收处理任务

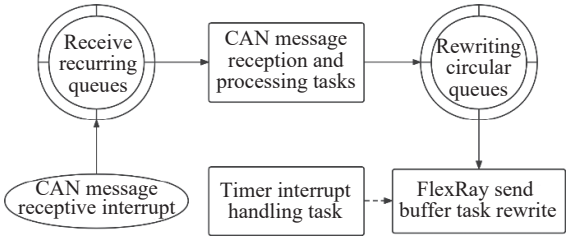


图 10 组网 CAN to FlexRay 架构

Fig. 10 Networking CAN to FlexRay architecture

理并采用基地址和偏移地址的数据定位方式将其依次复制到对应 CAN 数据帧, 保障数据传输的完整性.

4 系统测试

采用 FlexRay 控制器的在线调试器, 观察控制器的寄存器及数组获取系统底层数据; 通过串口将系统运行状态及传输数据发送到上位机显示并存储, 记录网络通信数据, 方便后续进行分析统计. 试验将对所设计的 FlexRay 星载通信节点以及 CAN-FlexRay 转换网关进行实时性和可靠性测试.

4.1 系统实时性测试

实时性测试试验由主从节点采用 FlexRay 总线替换 1553 B 总线对星上遥测进行采集发送. 应用静态段时间触发机制在静态时隙周期性发送模拟调控命令数据, 动态段事件触发传输数据量较大的模拟科学数据. 采取双通道冗余传输. 实现科学数据及时发送, 调控指令周期性优先传输.

如图 12 所示, 主控节点判断系统状态向从节点发送调控指令; 从节点采集模拟科学数据传输给主控节点; 从节点接收指令进行系统调节并返还相应数据. 经验证, 系统调控及软硬件运行正常, 当主控节点

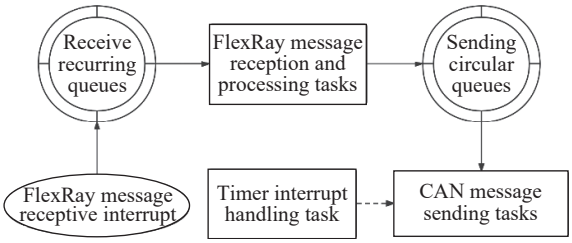


图 11 组网 FlexRay to CAN 架构

Fig. 11 Networking FlexRay to CAN architecture

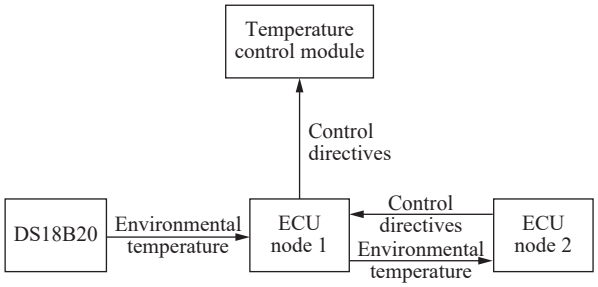


图 12 基于 FlexRay 的温度控制系统架构

Fig. 12 FlexRay-based temperature control system architecture

与从节点通信中断时, 主控节点即时对故障节点进行了多次复位, 复位期间若从节点恢复, 则重建通信关系.

如图 13 所示, 传输波形最小脉冲时间为 0.1 μs, 系统单通道带宽可达 10 Mbit·s^{-1}, 双通道冗余传输带宽达 20 Mbit·s^{-1} 时无丢包现象, 与 CAN 和 1553 B 总线相比, 传输速率及调控效率提高了 10 倍.

4.2 系统及网关可靠性测试

通过系统长时间通信测试对星载通信节点及 CAN-FlexRay 网关可靠性进行验证. 节点网络不间断传输模拟科学数据, 同时将 FlexRay 子网中的数据帧及 CAN 子网中的数据帧经 CAN-FlexRay 网关进行信息交互, 通过串口记录通信数据, 进行丢失帧计数以及错误帧计数, 观测对比 FlexRay 子网及 CAN 子网中的报文数据, 验证数据转换正确率. 经过长时间连续的数据发送、接收, 记录 FlexRay 网络数据帧及路由帧超 100 万帧, FlexRay 总线每帧含有 32 Byte 有效数据, CAN 总线每帧含有 8 Byte 有效数据, 未出现帧丢失或帧错误的现象, 误码率小于 10^{-8}, 组网中不同总线报文数据均转换正常.

5 结论

针对星载系统对数据传输带宽及可靠性的要求, 将事件触发的 1553 B、CAN 总线替换为时间、事件双触发的 FlexRay 总线, 从媒体访问机制、网络拓扑结构、时钟同步机制等方面分析了其应用于卫星综合电子的优势, 初步完成了 FlexRay 总线星载通信节点设计并对其进行了可行性及可靠性测试. 为保障 FlexRay 总线与传统 CAN 总线的兼容, 完成了 CAN-FlexRay 网关设计, 采用轮转映射算法实现了 CAN 总线与 FlexRay 总线之间的信息交互, 为后续

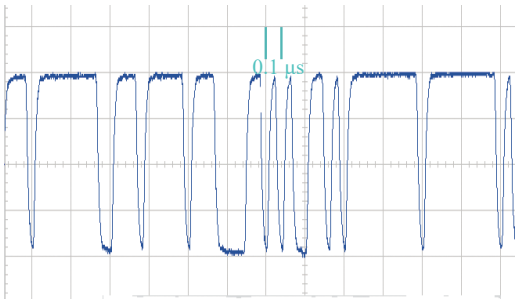


图 13 FlexRay 总线传输速率 10.0 Mbit·s^{-1}

Fig. 13 FlexRay bus transmission rate 10.0 Mbit·s^{-1}

FlexRay 总线在空间科学卫星及以嫦娥、探火为代表的深空探测任务中的实际应用奠定了技术基础.

参考文献

[1] ZHU Yan, BAI Yunfei, WANG Lianguo, *et al*. Integral technical scheme of payloads system for Chinese Mars-1 exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(6): 510-514,534 (朱岩, 白云飞, 王连国, 等. 中国首次火星探测工程有效载荷总体设计 [J]. 深空探测学报, 2017, **4**(6): 510-514,534)

[2] WANG C, SONG T T, SHI P, *et al*. China's space science program (2025–2030): strategic priority program on space science (Ⅲ)[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(4): 514-518

[3] WU Weiren, YU Dengyun. Development of deep space exploration and its future key technologies[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, **1**(1): 5-17 (吴伟仁, 于登云. 深空探测发展与未来关键技术 [J]. 深空探测学报, 2014, **1**(1): 5-17)

[4] SUN Huixian, LI Huijun, ZHANG Baoming, *et al*. Achievements and prospect of payloads technology in Chinese lunar and deep space exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(6): 495-509 (孙辉先, 李慧军, 张宝明, 等. 中国月球与深空探测有效载荷技术的成就与展望 [J]. 深空探测学报, 2017, **4**(6): 495-509)

[5] YAO Xintao, TAN Zhengguang, DING Yi, *et al*. Application of FlexRay bus in AHEAD ammunition gun control system[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, **42**(2): 152-155 (姚新涛, 谭争光, 丁毅, 等. FlexRay 总线在 AHEAD 弹药炮控系统中的应用 [J]. 兵器装备工程学报, 2021, **42**(2): 152-155)

[6] HE X W, WANG Q, ZHANG Z L. A survey of study of FlexRay systems for automotive net[C]//Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin: IEEE, 2011: 1197-1204

[7] JAOUANI H, BOUHOUCH R, NAJJAR W, *et al*. Hybrid task and message scheduling in hard real time distributed systems over FlexRay bus[C]//2012 International Conference on Communications and Information Technology. Hammamet: IEEE, 2012: 21-26

[8] KUMAR N, MONDAL A. Timing analysis of precedence constraint messages scheduled with slot multiplexing over dynamic segment of FlexRay[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, **17**(1): 222-236

[9] LEE T Y, LIN I A, LIAO R H. Design of a FlexRay/Ethernet gateway and security mechanism for in-vehicle networks[J]. *Sensors*, 2020, **20**(3): 641

[10] ZHANG Bin. Design of Communication Bus Controller Based on FlexRay Protocol[D]. Xi'an: Xidian University, 2022 (张斌. 基于 FlexRay 协议的通信总线控制器的设计 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022)

[11] CHEN Guang, GU Jinliang, LIU Qingguo, *et al*. Application of FlexRay bus in pulse source control system design[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, **38**(12): 135-139 (陈光, 顾金良, 刘庆国, 等. FlexRay 总线在脉冲源控制系统设计中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2019, **38**(12): 135-139)

[12] CHU Tian. Data Commission System of Microsatellite Position Control Based on FlexRay Bus[D]. Xi'an: Xidian University, 2014 (楚天. 基于 FlexRay 总线的微小卫星姿态控制数据传输系统 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014)

[13] ZHANG Zheyu. Research and Design of CAN-Flexray Bus Networking in Vehicle System[D]. Guiyang: Guizhou University, 2018 (张哲宇. CAN-FlexRay 总线在车载系统中的组网研究与设计 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2018)

作者简介



胡继英朔 男, 2000 年 5 月出生于山东省日照市, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 专业为计算机应用技术, 主要研究方向为空间综合电子技术.
E-mail: hujiyingshuo22@mails.ucas.ac.cn



朱 岩(通信作者) 男, 1973 年 1 月出生于江苏省连云港市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间综合电子技术, 空间数据智能处理、存储、传输技术等.
E-mail: zhuyan@nssc.ac.cn