

基于 FlexRay 的分布式测控系统设计

范恩随¹ 王世瑞¹ 张 钊¹
FAN Ensui WANG Shirui ZHANG Mao

摘要

为解决传统分布式测控系统中存在的通信实时性差、节点扩展性受限和系统安全防护能力不足的问题,文章设计了一种基于 FlexRay 的分布式测控系统。该系统由 4 个节点组成,每个节点包含微控制器和总线收发器,节点间的通信速率高达 10 Mbit/s,通信链路硬件上采用双通道冗余设计,软件上采用 FlexRay 的帧头和帧数据 CRC 校验以及安全管理模块进行安全防护,实现了多节点间的数据通信。实验结果表明,该系统数据通信实时性强、扩展性高,具有较强的安全防护能力。

关键词

FlexRay; 分布式测控系统; 多机通信; 安全管理

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.02.026

0 引言

工业现场常面临测量节点分散、测量范围广以及环境复杂的问题。但工业现场对数据传输实时性有着严格的要求^[1]。传统分布式测控系统存在实时性差,扩展节点能力不足,缺乏主动防护机制的问题,难以满足现代工业场景对测控系统的要求。多节点、低延迟、安全防护能力强已经成为现代测控系统的核心要求。

FlexRay 是一种用于汽车网络通信的高速、实时、分布式总线系统。在汽车电子领域,主要应用于对实时性能和可靠性要求极高的主动安全系统,例如线控转向和线控制动系统^[2-3],不仅可以简化系统的通信线路,还能提高实时性和可靠性,是现代总线的发展方向^[4]。国内对该技术在航空航天、武器火控和民用工业控制领域进行了广泛的研究^[5]。文献[6]研究了 FlexRay 总线在通用飞机航空电子系统中的应用,具有较高的应用价值。文献[7]将 FlexRay 总线技术应用于 AHEAD 弹药炮控系统,提高了系统的可靠性和实时性。文献[8]设计了基于 FlexRay 总线的车载安全驱动采集板,解决了驱动命令下发延迟的问题。

因此,本测控系统选用 FlexRay 作为系统通信总线,弥补了传统测控系统实时性差、扩展节点少和可靠性不足的缺点,满足了现代工业场景对测控系统的要求。

1 FlexRay 总线

FlexRay 总线是时间触发式的通信总线,时间触发是将一个周期的时间划分成多个时隙,需要传输的数据帧会分配到固定的时隙,符合 TDMA (time division multiple access)

的原则^[9]。FlexRay 支持双通道通信,当其中一个通道出现硬件故障或者数据传输失败时,另一个通道可以继续传输,通过这种冗余设计大大提高了系统的安全性,满足了现代分布式测控系统的安全要求。FlexRay 单个通道的数据传输速率可以达到 10 Mbit/s,满足了测控系统的实时性要求。同时 FlexRay 支持 3 种网络拓扑结构,总线型、星型和混合型,可以根据测控系统后续的升级要求,灵活扩展通信节点。

1.1 FlexRay 通信周期

FlexRay 完整的通信周期包含静态段、动态段、符号窗口和网络空闲时间^[10],如图 1 所示。

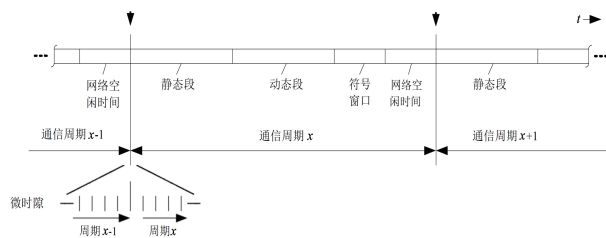


图 1 通信周期图

总线启动后,该通信周期循环运行。静态段用于传输确定性的数据,静态段由若干静态时隙组成,静态时隙可传输帧数据,也可为空。动态段用于传输基于事件的数据,动态段由最小时隙组成,动态段可配置为零。通信网络中的所有节点的静态时隙数、最小时隙数必须配置一致。符号窗口用于传输特征符号。网络空闲时间用于节点间进行时钟同步。

1.2 FlexRay 帧格式

FlexRay 报头段由 5 个字节组成。这些字节包含保留位、有效载荷前导码标识符、空帧标识符、同步帧标识符、启动帧标识符、帧 ID、有效载荷长度、报头 CRC 和周期计数器^[11]。

1. 中国电子科技集团公司第五十八研究所 江苏无锡 214122

有效载荷前导码标识符表示可选向量是否包含在传输帧的有效载荷段，空帧标识符表示该帧是否为空帧，同步帧标识符表示该帧是否为同步帧，启动帧标识符表示该帧是否为启动帧，帧 ID 定义了发送帧的时隙，有效载荷长度表示该帧的有效数据长度，报头 CRC 用于在传输过程中校验报头段，周期计数器用于每个通信周期开始时计数器的值加 1^[12]。有效载荷段包含传输的帧数据，可配置为 0~254 字节，帧尾 CRC 由 3 个字节组成，用于校验帧数据，如图 2 所示。

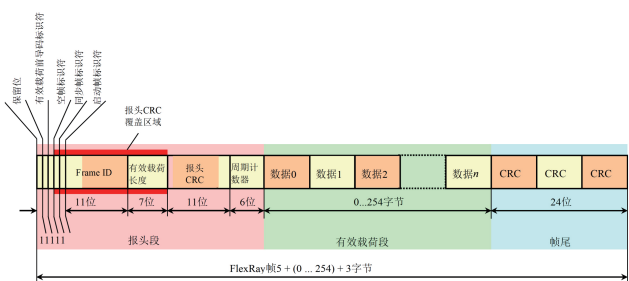


图 2 帧结构图

2 分布式测控系统方案设计

2.1 硬件设计

本文设计的分布式测控系统采用总线型拓扑结构，所有节点共享一对差分总线，节点可以灵活选择接入总线的方式，既可以只接入单个通道，也能同时接入两个通道实现冗余传输。该拓扑结构无需中心节点，节点发生故障仅影响节点自身，不影响总线中的其他节点，扩展节点数量时，无需大幅改动系统布线，只需要将新增节点接入现有系统总线，硬件扩展成本较低。系统总线拓扑结构如图 3 所示。

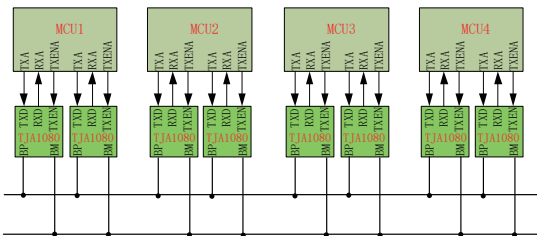


图 3 系统总线拓扑结构图

该系统由 4 个节点组成，每个节点由自研 Cortex-R5F 核功能安全类 MCU 和 2 个 TJA1080A 节点收发器组成，该微控制器包含 1 路双通道 FlexRay 控制器和专用传输单元 FTU。FlexRay 控制器支持 128 个消息缓冲区，CPU 可以直接通过 FlexRay 控制器的 IBF（输入缓冲区）和 OBF（输出缓冲区）来访问消息缓冲区。FTU 类似 DMA 的功能，不需要 CPU 的直接访问就可以实现系统内存数据与 FlexRay 消息缓冲区之间的传输，FTU 的 4 kB RAM 支持 ECC 错误校验和 PBIST（可编程内置自检）。FlexRay 模块框图如图 4 所示，TBF 是静态缓冲 RAM，存储两条完整消息的数据

部分，PRT 是通道协议控制器，负责实现 FlexRay 总线的物理层通信功能。

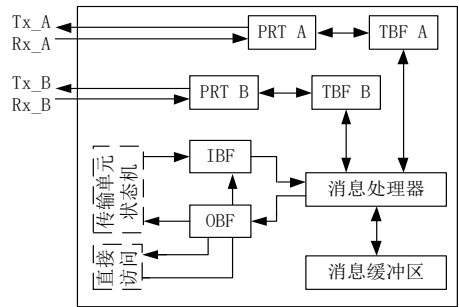


图 4 FlexRay 模块框图

NXP 的 TJA1080A 作为 FlexRay 网络协议控制器与物理总线间的收发器，支持双向差分通信，有效提升了总线的电磁抗干扰能力；该收发器支持最高 10 Mbit/s 的高速通信，满足了通信实时性要求；该收发器可灵活适配总线型和星型拓扑结构，在本系统中作为总线型拓扑结构的节点收发器来进行通信。TJA1080A 的外围电路如图 5 所示。

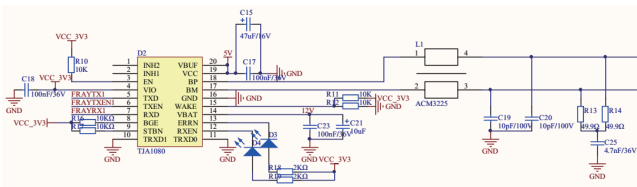


图 5 TJA1080A 外围电路

2.2 软件设计

首先上电初始化 MCU，配置系统时钟，对 FlexRay 控制器进行硬件底层配置，包括模块时钟源选择，引脚复用功能配置，通信参数配置，消息缓冲区的大小以及时隙分配，中断是否使能，是否启用 FTU，相关配置如图 6 所示。

系统中各个节点完成硬件底层配置后，对 FlexRay 通信控制器的状态机进行初始化，初始化结束后节点进入 READY 状态，各个节点的控制器启动冷启动，进行时钟同步，同步成功后，开启 FlexRay 通信，若同步失败，重新回到 READY 状态，检查同步失败的节点硬件底层配置是否合理。通信启动后，静态时隙用于传输需要周期性发送的数据，

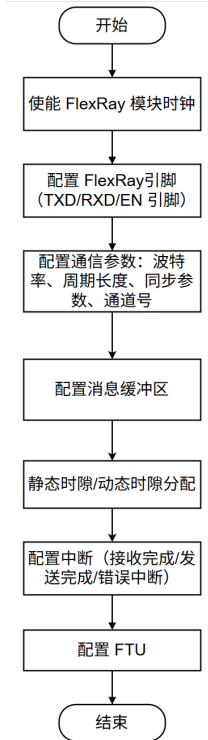


图 6 硬件底层配置流程图

动态时隙灵活性较高, 可根据实际情况按需分配, 一般用于偶发性或者事件触发类型数据传输, 同时使能发送完成中断, 数据发送后, 更新状态标志。当接收到帧数据时, 根据帧 ID, 帧头 CRC, 数据校验和等判断帧是否有效, 对有效数据进行解析, 存入系统内存, 留给应用层处理。数据若无效, 记录错误计数, 传给应用层, 错误计数超限后, 启动切换通道通信。数据通信流程如图 7 所示。

作为功能安全类 MCU, Flex-Ray 通信异常处理可根据异常类型进行分级处理, 多个节点抢占动态时隙导致的临时冲突或者同步时钟偏差导致的时隙错位, 都会触发控制器重新同步, 重新校准时钟。帧传输过程中出现 CRC 错误、时隙 ID 不匹配和帧格式错误时, 丢弃错误帧, 等待下一轮次的传输。事先启用双通道冗余配置, 当其中一个

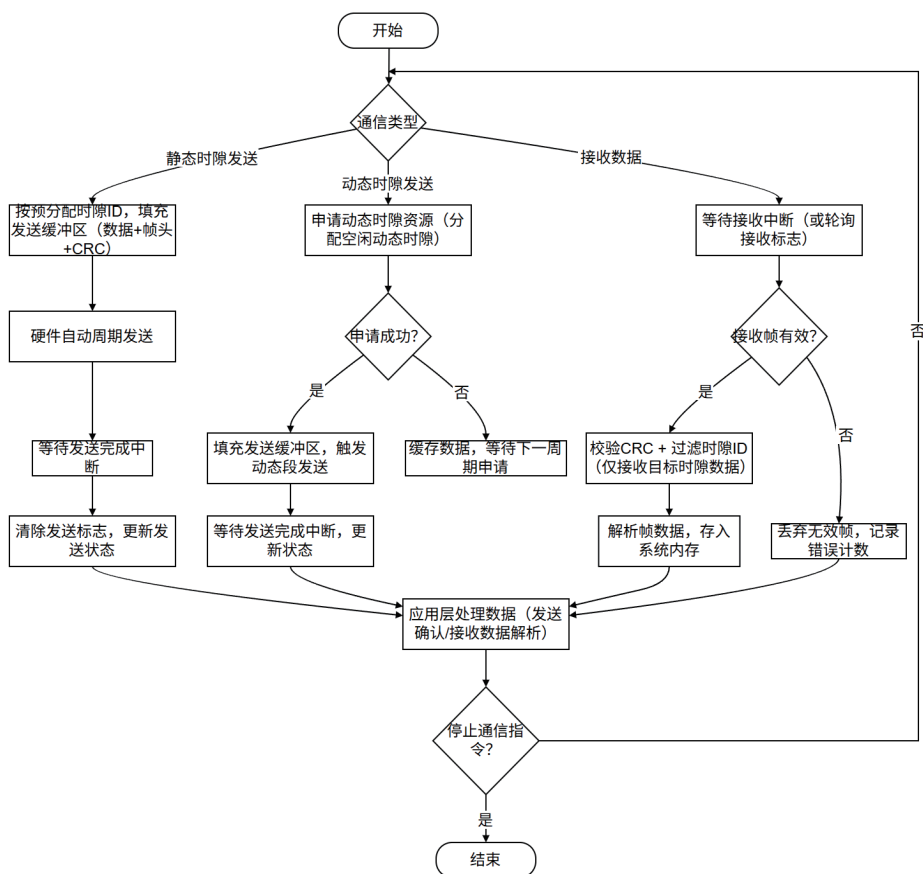


图 7 数据通信流程图

通道出现硬件故障时, 切换至另一个通道进行通信。以上几种错误都可以恢复通信, 但是错误次数需要累加, 当错误次数超过上限时, 对错误升级。当 FlexRay 专用 RAM 出现 ECC 校验错误、PBIST 错误和 MPU 错误 (内存保护错误) 时, 上报故障到 ESM (安全管理模块), 触发系统安全降级。异常处理流程如图 8 所示。

3 系统测试

配置一个通信周期为 5 ms, 由 2 帧静态时隙数据和 13 帧动态时隙数据组成, 通过逻辑分析仪抓取波形, 如图 9 所示, 经测量通信周期为 5 ms。还可以通过 VN7640 监测 Flexray 总线, VN7640 是 Vector 公司推出的具有 FlexRay 总线接口的通信接口卡, 总线监测结果如图 10 所示, 每秒传输 3 000 帧数据, 总计传输约 102 万帧数据, 在此期间未出现无效帧, 帧错误, 结构错误, 帧数据错误。对静态时隙 1 传输的数据进行解析, 解析如图 11 所示, 该帧为静态帧, 同时也是同步帧, 帧数据长度为 254 字节, 数据头 CRC 值为 1 775, 数据帧 CRC 值为 6 856 031。

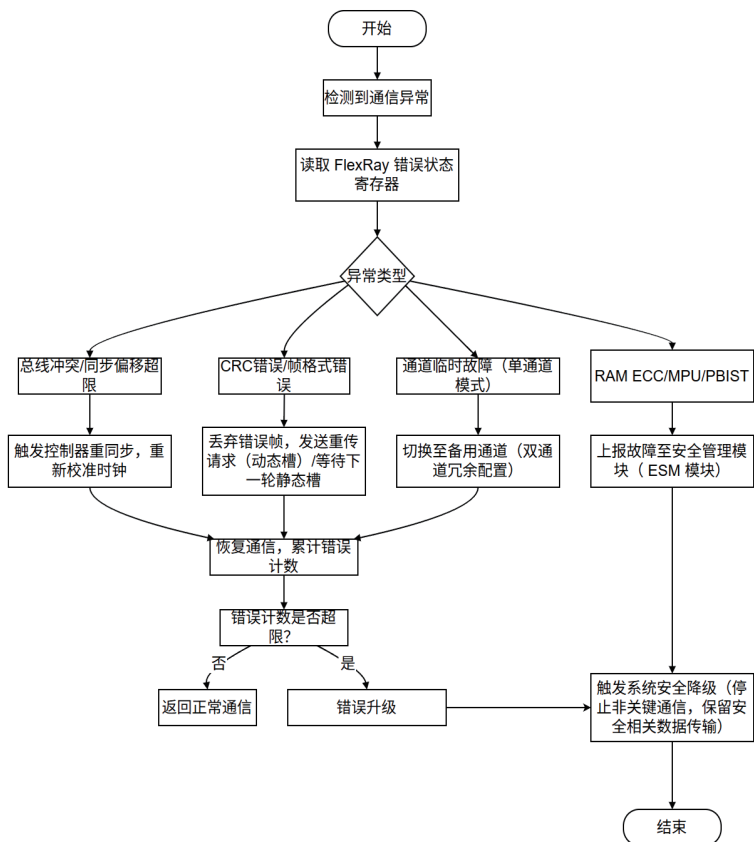


图 8 异常处理流程图

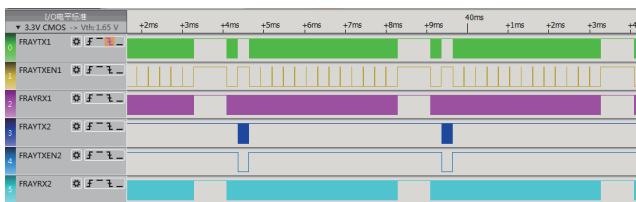


图 9 通信波形图

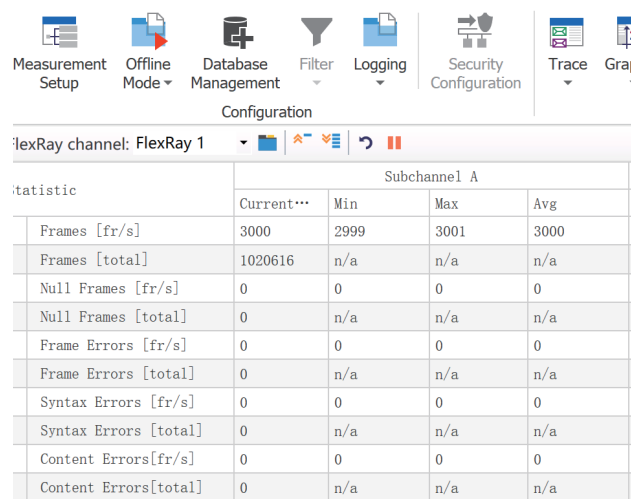


图 10 总线监测结果图

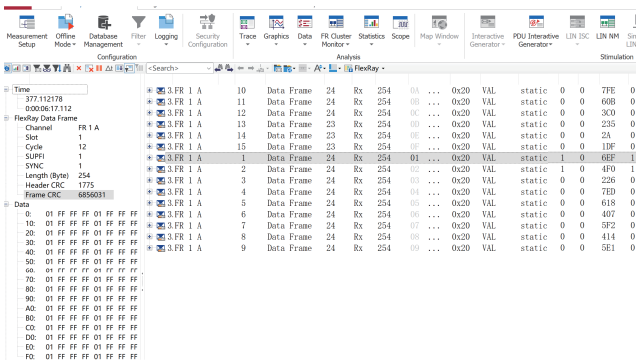


图 11 静态时隙 1 数据解析图

4 总结

本文设计了基于 FlexRay 的分布式测控系统，实现了多节点间的高速通信，功能安全类 MCU 的安全管理模块对通信异常的处理大幅提升了测控系统的数据安全性。该系统相比于传统分布式测控系统，数据通信实时性强，扩展性高，具有较强的安全防护能力，硬件成本较低，后期可根据需求灵活添加测量节点。

参考文献：

[1] 孟另伟, 郑永军. 基于 EtherCAT 的分布式测控系统设计与实现[J]. 仪表技术与传感器, 2020(6):73-78.

[2] Mathias Rausch. 车载网络通信技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2024.

[3] 周伟, 陈旭乾, 葛成华. 汽车电子电气架构的发展及趋势[J]. 电子与封装, 2024, 24(1):82-89.

[4] 黄丰保, 安德宇, 张春晓. 基于 FlexRay 总线设计的弹上分布式点火控制系统[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(4):69-73.

[5] 曹玉翠, 刘钊, 汪小勇, 等. 车规电子零缺陷质量管理在航天领域的启发与推广[J]. 电子与封装, 2024, 24(4):94-99.

[6] 刘绚, 杨佳. 基于 FlexRay 的航电总线的设计和实现[J]. 信息技术与信息化, 2022(5):145-148.

[7] 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.

[8] 张昊凡, 邢东峰, 石建强, 等. 基于 FlexRay 总线的车载安全驱动采集板设计[J]. 仪表技术与传感器, 2024(1):52-56.

[9] 郭俊幸, 吴杰, 张桐豪, 等. 基于 FlexRay 总线的多节点通信设计[J]. 计量与测试技术, 2023, 50(10):75-79.

[10] 阎一豪. 基于 FlexRay 总线的车联网应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2019.

[11] 李韵. FlexRay 总线控制器的设计与实现[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.

[12] FlexRay Consortium. FlexRay communications system protocol specification version 2.1A[S]. Berlin: FlexRay Consortium, 2005.

【作者简介】

范思随(1994—), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 芯片应用开发。

(收稿日期: 2025-12-16 修回日期: 2026-02-06)