

doi: 10.7690/bgzdh.2016.06.009

## FlexRay 总线在运载火箭电气系统的应用

姜 威, 张 倩, 张 鹏

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对传统的“点对点”通信在测试性、维修性、拓展性和安全性方面不能满足使用要求的问题, 设计一种基于 FlexRay 总线的运载火箭电气系统。分析了 FlexRay 总线在箭上电气系统应用的适用性, 并给出了电气系统设计方案及应用思路。分析结果表明: FlexRay 总线能够适用于箭上电气系统, 提高系统的智能化水平。

**关键词:** FlexRay 总线; 总线火箭; 电气系统

**中图分类号:** TJ71   **文献标志码:** A

## Application of FlexRay Bus in Electrical System of Launch Vehicle

Jiang Wei, Zhang Qian, Zhang Peng

(Beijing Institute of Space System Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** According to the traditional point to point communication cannot meet the usage requirement in testability, maintainability, expansibility and safety, the launch vehicle electrical system based on FlexRay Bus was designed. The adaptability of FlexRay bus for the electrical system application is analyzed, the electrical system design and application are presented. The results show that: the FlexRay bus can be applicable in the electrical system and improve the level of intelligence.

**Keywords:** FlexRay bus; bus launch vehicle; electrical system

### 0 引言

运载火箭电气系统是火箭供电和用电各系统、设备的总称, 是火箭的重要组成部分。根据现代运载火箭技术的发展和需要, 箭上电气系统又由不同的分系统组成, 如: 用于监测火箭飞行过程中工作状态和火箭飞行轨道的测量系统; 用于控制火箭发射、按预定轨道稳定飞行和精确入轨的控制系统。

传统的箭上电气系统通信体制是面向仪器的, 即所有仪器的信息交换基本上采用“点对点”方式, 其实时性和可靠性能得到保证; 但箭上拓扑结构较为复杂, 随着箭上电气系统逐步迈向智能化, 传统的“点对点”通信在测试性、维修性、拓展性和安全性方面已不满足要求。

近年来, 箭上电气系统开始探索 1553B 总线和 CAN 总线的应用。1553B 总线具有很高的可靠性和良好的实时性的特点, 但其带宽仅为 1 Mbit/s, 考虑到总线帧格式和空闲开销, 1553B 总线的实际负载率不超过 80%。CAN 总线具有实时性好、成本低等特点, 但 CAN 总线一帧数据仅有 8 字节, 最高通信速率也只有 1 Mbit/s。随着箭上电气系统响应更加迅速和控制功能更加灵活, 箭上系统之间的数据传输量也在增大, 1553B 总线和 CAN 总线传输速率已不能满足要求, 且 CAN 总线为单总线, 物

理层没有冗余功能, 工作可靠性偏低。

FlexRay 作为一种时间触发型总线, 具有通信速率高、精确性高、可靠性强、灵活性高<sup>[1]</sup>等特点, 基于此, 笔者对 FlexRay 总线在运载火箭电气系统上的应用进行了探讨。

### 1 FlexRay 总线及其适用性分析

FlexRay 总线是由多家知名汽车制造商(宝马、奔驰、通用)和芯片制造商(飞思卡尔、飞利浦)针对新一代汽车电子的实时控制及容错要求而研发的总线网络标准, 已经在宝马 X5、X7 等多款高档汽车上得到了成功应用。其主要特点<sup>[2]</sup>如下:

1) 高码率: FlexRay 总线有 2 个传输通道, 单通道传输最大速率为 10 Mbit/s, 双通道传输最大速率为 20 Mbit/s。

2) 高可靠性: 可以采用双通道冗余传输, 并且 2 个通道之间的传输相互不受影响。

3) 实时性好: 支持时间触发和事件触发 2 种模式, 可确保消息在指定时间段传递。

4) 网络时间同步精度高: 具有网络时间同步机制, 同步精度达到微秒量级。

#### 1.1 高码率适用性分析

运载火箭电气系统由控制系统和测量系统等多

收稿日期: 2016-03-18; 修回日期: 2016-04-20

作者简介: 姜 威(1986—), 男, 河南人, 硕士, 工程师, 从事运载火箭电气总体设计研究。

个子系统组成，数据具有多样性、数据量大的特点。以某型运载火箭测量系统数据为例，主要包括高频振动、冲击、噪声等力学环境数据，温度、热流等热环境数据，压力、过载等载荷数据，飞行视频等图像数据，数据量达到了 10 Mbit/s。

FlexRay 总线支持 A 和 B 双通道。每个通道的速率可达 10 Mbit/s。双通道主要用于冗余和故障容错的信息传输，但在容错功能要求不高的系统中，2 个通道可用于传输不同的信息，使得通信速率扩大 1 倍。

因此，测量系统总线可工作在非冗余模式，A、B 总线分别传送不同的信息，最大传输码率为 20 Mbit/s，有效容量大于 14 Mbit/s，满足测量系统的负载要求。

### 1.2 高可靠性分析

运载火箭电气系统是运载火箭中枢神经，控制数据的通信要求具备高可靠性、可用性以及完整性，能够适应箭上高低温变化、冲击、振动等比较苛刻的工作环境，并在有电磁干扰和低电位差的情况下能正常工作。

FlexRay 总线设计上具有的 2 个通道可以作为冗余备份来提高通信的可靠性。每个 FlexRay 总线节点都包括一个控制器和一个驱动器部件。控制器部件包括主机处理器和通信控制器。驱动器包括总线驱动器 (BD) 和总线监控器 (BG)，总线驱动器将通信控制器与总线相连接，总线监控器监视接入总线的连接。当某个节点发生故障而不能正常工作时，总线监控器会将通信控制器与总线断开，从而不会影响到总线上其他节点的工作<sup>[2]</sup>。在双通道系统中，还可通过冗余备份的方法来实现容错，即在 2 个信道上传输相同的信息，当一个信道出现故障而无法正常工作，另一个信道上的数据就可以保

证系统的正常运行，而不会因为某一个信道上的数据丢失影响到系统的稳定性。

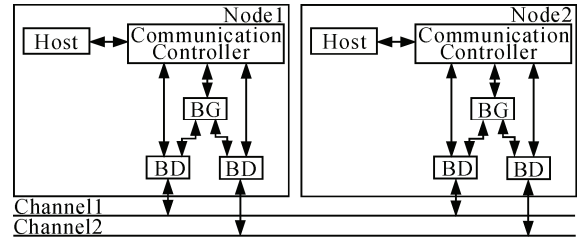


图 1 FlexRay 总线节点结构

FlexRay 总线的双通道通信机制可以实现箭上电气系统控制数据的冗余传输，提高系统通信的可靠性。

### 1.3 实时性分析

运载火箭对实时性具有非常严格的要求。对用于制导和姿控的关键数据，如果实时性不能保证，很可能导致姿态失稳或者增大控制算法设计难度。运载火箭延迟一般控制在亚毫秒以下量级。随着运载火箭速度进一步提高，未来对通信实时性的要求可能会更加严格。

FlexRay 总线在访问方式上，提供了时间触发和事件触发 2 种传输方式。FlexRay 总线的访问方式是把一个通信循环分为静态段 (static segment) 和动态段 (dynamic segment)，如图 2<sup>[3]</sup>所示。静态段采用时分复用 (TDMA) 的时间触发总线访问方式，部件和信息都被分配了确定的静态时隙，在这期间它们可以唯一地访问总线。信息在总线上的时间是可以完全预测出来的，因而对总线的访问是确定性的。动态段则采用灵活时分多址 (FTDMA) 的事件触发总线访问，可根据需要在某个小时隙内访问总线，且小时隙的时间长度可以根据总线访问的需要进行扩展。这样既保证了数据传输的实时性，又充分地利用了总线的带宽<sup>[4]</sup>。

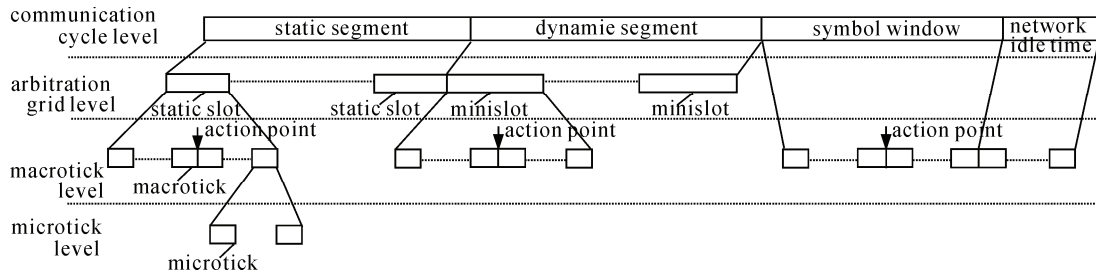


图 2 FlexRay 总线访问机制

因此，FlexRay 总线访问机制可以很好地满足箭上电气系统对实时性的要求，各个系统可以根据事先分配好的时间接点有序的进行信息交互。

### 1.4 网络时间同步精度分析

运载火箭电气系统数据的时间同步对事后数据处理尤为重要，统一的时间基准能够提高分析数据

的有效性。

FlexRay 总线协议使用分布式的时钟同步机制,在总线网络上没有绝对的全局时间,网络上节点的本地时间均是由节点自身的时钟获得<sup>[5]</sup>。节点可根据对网络上的同步帧的观察获得本地时间与网络时间的偏差,一方面通过动态调整通信周期的时间长度确保与整个网络通信周期相同,另一方面通过在通信周期的网络空闲时间段插入微时间片来调整通信周期长度。整个网络上的时间同步误差为一到几微秒。

FlexRay 总线网络时间同步机制能够实现箭上电气系统更高精度的信息同步。

## 2 基于 FlexRay 总线的箭上电气系统设计

FlexRay 总线支持多种总线拓扑结构,包括总线型、星型和混合型(总线型+星型),节点间最大网络长度为 24 m。由于运载火箭由多级组成,通信距离在百米量级;因此,箭上电气系统适合采用混合型拓扑结构。

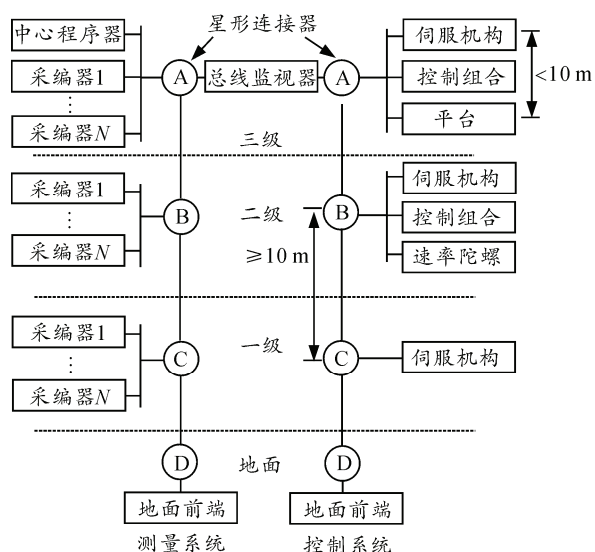


图 3 基于 FlexRay 总线的箭上电气系统拓扑结构

以某型运载火箭为例,箭上电气系统可设计成图 3 所示拓扑结构。该结构通过星型连接器提高节点通信距离,通过总线简化同一部段内的设备连接。为保证总线在 10 Mbit/s 码率下可靠工作,总线上的最远节点距离最好不超过 10 m,当 2 个节点间距离大于 10 m 时,需要使用星型连接器(使用星型连接器后,最远可靠距离超过 20 m)。如果降低工作码率,总线通信距离还可增加(与码率成反比,系统可根据实际负载量选择码率)。控制系统和测量系统分别在火箭一级、二级和三级布置了 3 个星

型连接器,每个部段内的设备采用了总线连接。

控制系统和测量系统分别使用了独立的 FlexRay 总线,考虑到控制系统对可靠性要求较高,而测量系统的数据传输量较大,各系统可使用不同的通信策略。

控制系统总线采用 A、B 双总线冗余工作模式,发送端同时将数据通过 A、B 总线发送,接收端通过比较 A、B 总线数据是否一致,确定该组数据是否有效,如果出现比较错误,可向发送端发送重传请求,重复数据传输。当任何一路总线发生故障时,控制系统可只使用另一组总线进行传输数据,确保控制系统功能不受影响。在双总线冗余工作模式下,控制系统的最大传输码率为 10 Mbit/s,有效数据容量大于 7 Mbit/s。

测量系统总线工作在非冗余模式,A、B 总线分别传送不同的信息,最大传输码率为 20 Mbit/s,有效容量大于 14 Mbit/s。测量系统除了采集本系统数据,还要采集控制系统总线数据;因此测量系统通过总线适配器监测控制系统通信,并将监测数据发送到测量系统总线。

基于 FlexRay 总线的箭上电气系统在设计时还需重点考虑以下几个方面:

1) 数据通信时段配置:箭上电气系统之间的信息传递以周期性信息为主,结合 FlexRay 总线机制,在应用中将数据配置在 FlexRay 总线通信周期的静态段,以确保信息传递的实时性和时序的稳定性。对于箭上周期性的信息传递,在 FlexRay 总线的通信周期的静态段划分出静态时隙,为相应的数据发送节点分配固定的时隙。

2) 通信周期:根据箭上电气系统的通信周期的需求来进行设计, FlexRay 总线协议规定的通信周期  $T$  最大为 16 ms,当箭上通信周期小于  $T$ ,则可直接配置通信周期;当通信周期大于  $T$ ,则对 FlexRay 总线的通信周期进行整数倍的拓展。

3) 节点通信架构选取: FlexRay 总线接点的实现方案主要有 2 种形式,一种是采用集成 FlexRay 协议处理模块的微处理器+总线驱动器实现,另一种是采用微处理器+独立的 FlexRay 协议处理模块的微处理器+总线驱动器实现。鉴于箭上电气系统数据处理量大、实时性要求高的特点,考虑采用第 2 种方案实现箭上电气系统通信接点。

4) 总线接口电路设计:总线接口电路是箭上电气系统各个设备间连接的枢纽,良好的接口设计能

够使系统间阻抗匹配, 增强系统抗电磁干扰能力, 并增大通信距离。

### 3 结束语

笔者针对运载火箭电气系统的具体需求, 提出一种基于 FlexRay 总线的箭上电气系统设计。FlexRay 总线的数据传输码率、工作可靠性、拓扑结构灵活性的特点能够满足当前箭上电气系统技术升级要求, 其在高档汽车上的成功应用表明: 该总线的技术较成熟, 为其在箭上电气系统中的推广应用提供了条件。

\*\*\*\*\*  
(上接第 38 页)

### 参考文献:

[1] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009: 166.

[2] Teunissen P J G. A new method for fast carrier phase ambiguity estimation[C]//Proceedings of IEEE PLANS'94. Las Vegas: IEEE Computer Society, 1994: 562-573.

[3] Teunissen P J G, P J De Jonge, Tiberius C C J M. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: its performance on short GPS baselines and short observation spans[J]. Journal of Geodesy, 1997, 71(10): 589-602.

[4] 李易峰, 沈云中. 顾及基线先验信息的 GPS 模糊度快速解算[J]. 测绘学报, 2008, 37(4): 423-428.

[5] 李豹, 许江宁. 改进 LAMBDA 算法实现单频 GPS 整周模糊度快速解算[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(3): 365-368.

[6] 孙同贺, 向南平. 浅谈大地测量中的病态问题[J]. 测绘与空间地理信息, 2008, 31(5): 205-206.

[7] 王乐洋, 于冬冬. 病态总体最小二乘问题的虚拟观测解法[J]. 测绘学报, 2004, 43(6): 575-581.

[8] 叶松林, 朱建军. 矩阵奇异值分解与广义岭估计及其在测量中的应用[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(1): 160-164.

### 参考文献:

[1] 章勇, 陈欣, 吕迅. 无人机飞行控制计算机中的 FlexRay 总线节点设计[J]. 兵工自动化, 2013, 32(3): 42-46.

[2] FlexRay Consortium. FlexRay communications system protocol specification, Version 2.1, Revision[EB/OL]. 2005.www.flexray.com.

[3] 章勇. 基于 FlexRay 飞行控制计算机总线设计与研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

[4] 徐志俊, 钟再敏, 孙泽昌. FlexRay 总线的实现及其在汽车上的应用研究[J]. 工业控制计算机, 2018, 21(5): 1-3.

[5] 何浩洋, 王晨, 穆建成, 等. 时间触发现场总线时钟同步的研究[J]. 中国铁路, 2012(6): 70-72.

[9] 孔令杰, 黄观文. 基于 TIKHONOV 正则化的短基线单历元模糊度解算方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 148-155.

[10] Huming Wu. On-The-Fly GPS Ambiguity Resolution with Inertial Aiding[D]. Canada: the University of Calgary, 2003: 60-73.

[11] Scott M. Martin. Closely Coupled GPS/INS Positioning For Automated Vehicle Convoys[D]. Auburn: Auburn University, 2011: 45-56.

[12] 谢宏飞, 郝金明. INS 辅助 GPS 整周模糊度解算方法研究[C]//第四届中国卫星导航学术年会论文集-S9 组合导航与导航新方法. 武汉: 中国卫星导航学术年会组委会, 2013: 1-4.

[13] 张晓安, 何晓峰, 王荔斌. 惯性信息辅助的载波相位模糊度求解算法[J]. 计算机工程与设计, 2010, 31(13): 3081-3087.

[14] 赵伟, 万德均, 刘建业. 一种用 INS 辅助 GPS 周跳检测和求解整周模糊度的方法[J]. 中国空间科学技术, 2004, 4(2): 13-18.

[15] 王振杰. 大地测量中不适宜问题的正则化解法研究[D]. 武汉: 中国科学院, 2003: 13-15.

[16] 冯遵德. II 类病态系统分析理论及其应用研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2006: 8-9.