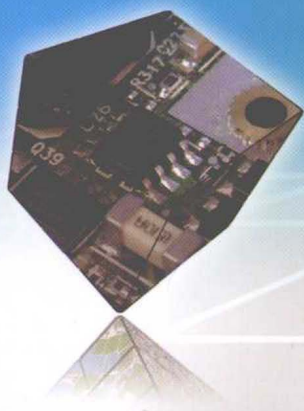


嵌入式技术与应用丛书



汽车FlexRay总线系统

开发实战

吴宝新 郭永红 等编著
曹毅 赵东阳

- ◎ 全面、系统地介绍了汽车FlexRay总线协议、主流开发工具、系统软件和硬件设计
- ◎ 通过实例介绍了汽车FlexRay总线系统的设计方法
- ◎ 围绕具体项目介绍系统的软件和硬件开发过程，以及系统的联调和测试



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

嵌入式技术与应用丛书

汽车 FlexRay 总线系统开发实战

吴宝新 郭永红 曹 毅 赵东阳 等编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

汽车 FlexRay 总线是一种用于汽车的高速、可确定性的、具备故障容错的总线标准。FlexRay 车载网络标准已经成为同类产品的标准，将在未来的很多年内，引导整个汽车电子产品控制结构的发展方向。

本书全面、系统地介绍了汽车 FlexRay 总线协议、主流开发工具、系统软件和硬件设计，并且通过实例介绍了汽车 FlexRay 总线系统的设计方法。本书首先介绍了 FlexRay 总线和汽车网络的相互关系，并对 FlexRay 总线标准包含的各个协议规范进行了概括性的总结；然后重点介绍了在开发实践中需要详细关注的 3 个协议规范——FlexRay 电气物理层规范、FlexRay 协议规范和 FlexRay 物理层电磁兼容性测试规范；接着对汽车 FlexRay 总线系统开发中的常用开发工具和核心芯片进行了介绍；最后以一个具体项目为例介绍了如何确定开发方案、如何规划网络结构和参数、如何进行项目软件和硬件开发及如何对项目进行联调和测试。

本书既可作为普通高等院校车辆工程、电子信息工程、电气工程、自动控制等专业师生及相关技术人员学习和开发应用 FlexRay 技术的参考资料，也可作为从事汽车电子系统特别是车载网络系统研究与开发人员的参考资料。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽车 FlexRay 总线系统开发实战/吴宝新等编著. —北京：电子工业出版社，2012.4

(嵌入式技术与应用丛书)

ISBN 978-7-121-15698-4

I. ①汽… II. ①吴… III. ①汽车—计算机控制系统—总线 IV. ①U463.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 002286 号

策划编辑：田宏峰

责任编辑：韩玉宏

印 刷：北京东光印刷厂

装 订：三河市鹏成印业有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：22 字数：556 千字

印 次：2012 年 4 月第 1 次印刷

印 数：4 000 册 定价：59.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前 言

FlexRay 总线是一种用于汽车的高速（10Mbps）、可确定性的、具备故障容错的总线标准，其目标是满足关键的汽车应用要求（如悬挂控制、换挡控制、刹车控制、转向控制等），以弥补目前汽车内主要标准（如 CAN、LIN、MOST 等）的不足之处。该标准由 FlexRay 联盟制定和推广，该联盟的 7 个核心成员是 BMW、DC、NXP、飞思卡尔、Bosch、GM、VW，涵盖了主要的汽车制造商和半导体制造商。除此之外，它还有超过 93 个的协作和发展成员。2004 年，联盟发布最初的 V0.4.3 协议规范，经过不断完善，到 2005 年发布了最终的 V2.1 协议规范。此后，FlexRay 总线进入大力推广时期。第一辆应用 FlexRay 总线的量产车 BMW X5 4.8i 已于 2007 年上市，其后其他半导体制造商和汽车制造商分别推出了大量的相关产品，FlexRay 逐渐成为汽车工业的事实标准并被推广到其他行业。2010 年，FlexRay 标准被 ISO 组织吸纳（标准号为 ISO 10681），从一个行业的通信标准演变成为国际通用标准。

本书全面、系统地介绍了汽车 FlexRay 总线协议、主流开发工具、系统软件和硬件设计，并且通过实例介绍了汽车 FlexRay 总线系统的设计方法。全书共 9 章，分为上、下两篇。上篇又分为绪论和协议介绍两个部分。绪论主要说明 FlexRay 总线和汽车网络的相互关系；协议介绍部分首先对 FlexRay 总线标准包含的各个协议规范进行了概括性的总结，然后重点介绍了在开发实践中需要详细关注的 3 个协议规范——FlexRay 电气物理层规范、FlexRay 协议规范和 FlexRay 物理层电磁兼容性测试规范。下篇首先介绍了当前业界的开发背景、常用的开发工具和核心芯片，然后围绕一个具体项目实例介绍了如何确定开发方案及如何规划网络结构和参数，接下来又分别介绍了项目硬件开发和软件开发过程，最后以项目的联调和测试收尾。

本书由北方信息控制集团（中国兵器工业计算机应用技术研究所）车辆电子综合系统研发部统一组织策划和统稿。其中，第 0 章由王巍、刘瑾编写；第 1 章由吴宝新、赵东阳编写；第 2 章由于丹、张天鹏编写；第 3 章由王凤臣、陈旭编写；第 4 章由赵东阳、王玮编写；第 5 章由郭永红、王巍编写；第 6 章由赵东阳、侯曾编写；第 7 章由于圳宁、王勇编写；第 8 章由曹毅编写。

此外，本书在编写和出版过程中得到了有关单位的大力帮助和支持。北方信息控制集团（中国兵器工业计算机应用技术研究所）的王少军副总经理在概念探讨和技术分析方面为本书的编著者提供了巨大的帮助，恒润科技有限公司为本书的编写提供了宝贵的素材，在此一并表示感谢。

本书着眼于帮助读者弄清概念、掌握协议、熟悉典型开发流程、了解相关软件实现和硬件电路设计。本书图文并茂，将基础知识和应用经验有机地结合在一起。本书既可作为普通高等院校车辆工程、电子信息工程、电气工程、自动控制等专业师生及相关技术人员学习和开发应用 FlexRay 技术的参考资料，也可作为从事汽车电子系统特别是车载网络系统研究与开发人员的参考资料。

限于本书的篇幅，对协议规范中的一些内容进行了取舍，摘取了对读者开发最有帮助的部分，而其他许多内容只能删减，读者若有兴趣可以翻看协议的原文进行补充。此外，限于编著人员的学识和时间，书中还存在许多不足之处，期待广大读者提出宝贵的建议和意见。

编著者

2012年4月

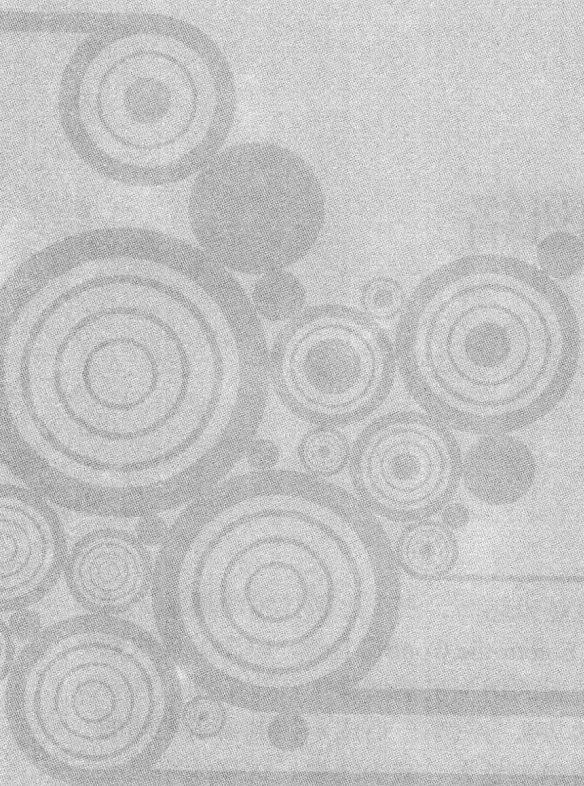
C 目录

o n t e n t s

上 篇 FlexRay协议

第 0 章 绪论: FlexRay 与汽车网络	2	1.1.5 冲突	18
0.1 汽车网络技术的发展	2	1.1.6 唤醒模式	18
0.2 汽车网络的分类	2	1.2 FlexRay 网络基本通则	19
0.3 汽车网络的新成员—— FlexRay	4	1.3 FlexRay 网络基本组成元素	20
0.3.1 FlexRay 的产生和发展	5	1.3.1 电缆	20
0.3.2 FlexRay 的基本原理与特点	6	1.3.2 连接器	21
0.4 FlexRay 协议总览	7	1.3.3 电缆端接	21
0.4.1 FlexRay 需求规范	7	1.3.4 共模扼流圈	22
0.4.2 FlexRay 协议规范	8	1.3.5 总线直流负载	23
0.4.3 FlexRay 电气物理层规范	8	1.4 网络拓扑	23
0.4.4 FlexRay 电气物理层应用注解	9	1.4.1 点对点连接	23
0.4.5 FlexRay 数据链路层一致性测试 规范	9	1.4.2 无源星形拓扑	24
0.4.6 FlexRay 电气物理层一致性 测试规范	9	1.4.3 线性无源总线型拓扑	24
0.4.7 FlexRay 物理层电磁兼容性 测试规范	9	1.4.4 有源星形拓扑	25
0.4.8 FlexRay 物理层共模扼流圈 电磁兼容性评估规范	10	1.4.5 级联的有源星形拓扑	25
0.4.9 初级中央总线监视器规范	10	1.4.6 混合型拓扑	26
0.4.10 初级节点总线监视器规范	11	1.4.7 双通道拓扑	26
0.5 术语和定义	12	1.5 电气信号	27
0.6 常用缩写	15	1.5.1 总线状态: Idle_LP 与 Idle	27
第 1 章 FlexRay 电气物理层规范	16	1.5.2 总线状态: Data_1 与 Data_0	27
1.1 通信通道基础	16	1.6 信号完整性	27
1.1.1 传播延迟	16	1.6.1 发送端眼图	28
1.1.2 非对称延迟	17	1.6.2 接收端眼图	28
1.1.3 截断	17	1.7 总线驱动器	29
1.1.4 特征符号长度的变化	18	1.7.1 工作模式	30
		1.7.2 工作模式转换	30
		1.7.3 总线驱动器接口	31
		1.7.4 总线驱动器在故障条件下的 行为	42

4.5.4	MultiLog	176	6.4	收发器芯片 TJA1080ATS/2.....	222
4.6	测量工具	176	6.4.1	结构说明.....	222
第 5 章	系统定义与验证	183	6.4.2	特性描述.....	223
5.1	确定项目方案.....	183	6.4.3	操作模式.....	223
5.2	总体规划与网络设计（网络 设计工具 DaVinci Network Designer FlexRay）	184	第 7 章	ECU 节点软件开发	229
5.2.1	定义网络（定义全局 参数）	184	7.1	飞思卡尔公司芯片驱动编程	229
5.2.2	定义节点（定义节点 参数）	187	7.1.1	内存映射和寄存器描述.....	229
5.2.3	定义信号.....	189	7.1.2	功能描述.....	264
5.2.4	定义数据帧及收发关系.....	190	7.1.3	芯片初始化.....	301
5.2.5	定义数据帧和信号对应 关系	190	7.2	飞思卡尔公司的 FlexRay 统一驱动	302
5.2.6	定义通信调度表.....	191	7.2.1	概述.....	302
5.2.7	Vector 公司的网络设计工具 DaVinci Network Designer FlexRay	192	7.2.2	应用示例.....	303
5.3	网络仿真验证（仿真验证工具 CANoe.FlexRay）	193	7.2.3	应用示例的项目结构.....	307
5.3.1	概述.....	193	7.3	Windows 系统下 FlexRay 驱动开发	308
5.3.2	CANoe.FlexRay 软件功能 模块介绍	194	7.3.1	驱动程序开发环境的建立	308
5.3.3	模型建立与仿真.....	202	7.3.2	建立一个 WDM 驱动程序的基本 框架.....	309
第 6 章	ECU 节点硬件开发	208	7.3.3	硬件资源访问类说明.....	313
6.1	硬件设备的分类.....	208	7.3.4	驱动程序主要模块的实现	317
6.2	基于 MFR4310 芯片的 PCI FlexRay 通信板设计	208	7.3.5	驱动程序的调用.....	318
6.2.1	板卡功能定义.....	208	7.4	VxWorks 系统下的 FlexRay 驱动开发	321
6.2.2	MFR4310 结构与 功能说明	208	7.4.1	嵌入式实时操作系统 VxWorks.....	321
6.2.3	电路系统设计.....	215	7.4.2	开发驱动程序前的 准备工作.....	323
6.3	基于 MC9S12XF512 单片机的独 立总线 FlexRay 通信板设计	218	7.4.3	定义 FlexRay 驱动程序 头文件.....	327
6.3.1	板卡功能定义.....	218	7.4.4	VxWorks 操作系统 驱动程序.....	328
6.3.2	MC9S12XF512 结构说明	219	第 8 章	项目联调与测试	332
6.3.3	MC9S12XF512 功能描述	220	8.1	节点功能验证.....	332
6.3.4	电路原理.....	221	8.1.1	概述.....	332
			8.1.2	验证过程.....	333
			8.2	系统集成测试.....	336
			8.2.1	概述.....	336
			8.2.2	测试过程.....	338
			参考文献	341	



◎ 上 篇

FlexRay 协议



第0章

绪论：FlexRay 与汽车网络

0.1 汽车网络技术的发展

随着汽车电子技术的不断发展，汽车电子化程度越来越高。汽车上新技术的增加无疑使车辆上电控系统的数量不断增加，电子控制单元（Electronic Control Unit, ECU）模块数量也随之增加，而且功能也越来越复杂。汽车电子装置的增加虽然增强了汽车的动力性、操控性和舒适性，但其占总成本的比例及持续增长的势头与汽车厂商成本控制需求之间的矛盾，线路复杂性与汽车可靠性、安全性之间的矛盾越来越大。减少线束、优化线路已经成为必须要解决的问题。因此，汽车网络技术作为解决汽车电子化中出现的线路复杂和线束增加问题及通过其通信和信息资源共享能力提高汽车整体驾驶操作水平、安全性和经济效益的主要技术途径，已经成为汽车电子系统的主要支撑。

自1980年起，众多国际知名汽车公司开始积极致力于汽车网络技术的研究及应用，希望通过汽车网络的使用解决点对点式车身布线带来的问题，使车身布线更加趋于规范化、标准化，降低成本，增强稳定性。迄今为止，已有BOSCH的CAN、SAE的J1850、ISO的VAN、Philips的D2B和LIN协会的LIN等多种网络标准广泛应用于车辆中，且随着汽车线控技术的发展，FlexRay总线、TTP/C等网络协议也将逐步得到应用，汽车网络技术已经成为汽车电子技术发展的重要增长点。但从长远来看，汽车网络还远没有达到成熟阶段。信息与电子技术的迅猛发展，必然会带来车辆上应用的提升，它们将对车载通信与控制网络提出一些新的需求，同时为新的车载网络技术提供技术支持。

0.2 汽车网络的分类

汽车网络的发展源于当时高档豪华汽车上的应用，缺少相应的标准化的通信协议的支持。随着越来越复杂、精密的功能单元外包给外部供应商，汽车制造商从定义各自的专门协议，发展到定义通用的标准化通信协议，为不同供应商的产品实现系统集成提供了可能性，使汽车网络迅速进入主流车型，到今天汽车网络已经成为现代车辆中的重要组成部分。

美国汽车工程协会按照汽车网络系统速率等性能，将汽车网络分为A、B、C3类。

A类总线标准主要应用于价格低廉且数据传输速率、实时性、可靠性要求较低的汽车应用，如TTP/A（Time Triggered Protocol/A）和LIN（Local Interconnect Network）。

(1) TTP/A 协议最初由维也纳工业大学制定, 为时间触发类型的网络协议, 主要应用于集成了智能变换器的实时现场总线。它具有标准的 UART 数据格式, 能自动识别加入总线的主节点与从节点, 节点在某段已知的时间内触发通信但不具备内部容错功能。

(2) LIN 协议是在 1999 年由欧洲汽车制造商 Audi、BMW、Daimler Chrysler、Volvo、Volkswagen、VCT 公司及 Motorola 公司组成的 LIN 协会的努力下推出的用于汽车分布式电控系统的开放式的低成本串行通信标准, 从 2003 年开始使用。LIN 是一种基于 UART 的数据格式、主从结构的单线 12 V 的总线通信系统, 主要用于智能传感器和执行器的串行通信。从硬件、软件及电磁兼容性方面来看, LIN 协议保证了网络节点的互换性, 极大地提高了开发速度, 同时保证了网络的可靠性。LIN 协议应用开发的热点集中在美国、欧洲和日本, 估计在未来 10 年, 平均每辆车将有约 20 个 LIN 节点。可见, LIN 总线的应用仍存在着巨大的潜在市场。LIN 总线已被世界上的大多数汽车公司及零配件厂商广泛接受, 有望成为事实上的 A 类网络标准。

B 类总线标准主要包括 J1850、VAN、低速 CAN。

(1) 1994 年, SAE 正式将 J1850 作为 B 类网络标准协议。最早, SAEJ1850 被用在美国 Ford、GM 及 Chrysler 公司的汽车中。现在, J1850 协议作为诊断和数据共享被广泛应用在汽车产品中。但是, J1850 并不是一个单一标准, 各汽车公司采用的 J1850 标准, 在物理层或数据消息协议上也不尽相同, 预计未来将被其他总线所替代。

(2) VAN 标准是 ISO 在 1994 年 6 月推出的, 它基于 ISO 11519-3, 主要为法国汽车公司所用。但目前就动力与传动系统而言, 甚至在法国也集中应用 CAN 总线。

(3) CAN 是德国 BOSCH 公司从 20 世纪 80 年代初为解决现代汽车中众多的控制与测试仪器之间的数据交换而开发的一种串行数据通信协议。它是一种多主总线, 通信介质可以是双绞线、同轴电缆或光导纤维, 通信速率可达 1 Mbps, 1991 年首次在奔驰 S 系列汽车中实现。同年, BOSCH 公司正式颁布了 CAN 技术规范, 版本为 2.0。该技术规范包括 A 和 B 两部分。1993 年 11 月, ISO 正式颁布了国际标准 ISO 11898, 为 CAN 的标准化、规范化铺平了道路。此后, 越来越多的北美和日本汽车公司也开始采用 CAN 网络。1994 年, 美国汽车工程师协会卡车和巴士控制与通信子协会选择 CAN 总线作为 SAEJ1939 标准的基础。低速 CAN 总线具有许多容错功能, 一般用在车身电子控制中; 而高速 CAN 总线则大多用在汽车底盘和发动机的电子控制中。CAN 总线凭借其突出的可靠性、实时性和灵活性已从众多总线中突显出来, 成为被世界所广泛接受的 B 类总线的主流协议。

C 类总线标准主要用于与汽车安全相关及实时性要求比较高的地方, 如动力系统, 所以其传输速率比较高, 通常为 125 kbps~1 Mbps, 必须支持实时的周期性参数传输。目前, C 类标准主要包括 TTP/C、FlexRay 和高速 CAN (ISO 11898-2)。

(1) TTP/C 协议由维也纳工业大学研发, 基于时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 的访问方式。TTP/C 是一个应用于分布式实时控制系统的完整的通信协议。它能够支持多种容错策略, 提供容错的时间同步及错误检测机制, 同时还提供节点的恢复和再整合功能。其采用光纤传输的工程化样品速率将达到 25Mbps。TTP/C 支持时间和事件触发的数据传输。TTP 管理组织 TTAGroup 成员包括 Audi、SA、Renault、NEC、TTChip、Delphi 等。

(2) FlexRay 是 BMW、Daimler Chrysler、Motorola 和 Philips 等公司制定的功能强大的

网络通信协议。它基于灵活时分多路访问（FTDMA）的确定性访问方式，具有容错功能及确定的通信消息传输时间，同时支持事件触发与时间触发通信，具备高速率通信能力。

(3) 欧洲的汽车制造商大多采用高速 CAN 总线标准 ISO 11898。总线传输速率通常为 125 kbps~1 Mbps。目前，CAN 协议仍然应用广泛，然而，作为一种事件驱动型总线，CAN 无法为下一代线控系统提供所需的容错功能或带宽，因为线控（X-by-wire）系统实时性和可靠性要求都很高，必须采用时间触发的通信协议，这样 TTP/C 或 FlexRay 等通信协议将显示优势。

同时，综合考虑功能和位传输速率等因素，现有的汽车总线还包括多媒体信息系统总线等。多媒体信息系统总线标准主要用于汽车娱乐和远程信息设备，特别是汽车导航系统、多媒体系统等。

(1) MOST 网络是由德国 Oasis Silicon System 公司开发的。MOST 技术针对塑料光纤媒体进行优化，采用环形拓扑结构，在器件层实现高可靠性和可扩展性。它可以传送同步数据（音频信号、视频信号等流动型数据）、非同步数据（访问网络及访问数据库等的数据包）和控制数据（控制报文及控制整个网络的数据）。MOST 得到包括 BMW、Daimler Chrysler、Harman/Becker 和 Oasis 公司的支持，已应用在多款车型上，如 BMW7 系列、Audi A8、Mercedes E 系列等。

(2) IDBC 和 IDB1394 总线及标准接口由 IDB 论坛负责管理。IDBC 基于 CAN 总线，目前已成为 SAE 的标准，即 SAE2366；而 IDB1394 则针对高速多媒体应用进行设计。IDB1394 网络采用光纤技术，允许 IDB1394 兼容的便携式消费电子设备连接到汽车内网络并实现互操作。与 MOST 相比，IDB1394 则最大限度地利用民用设备市场，将现有的部件应用到车载设备上，从而解决成本问题。

(3) D2B 是针对多媒体数据通信的一种网络协议，可集成数字音频、视频和其他高数据速率同步或异步信号，主要使用 Smart WireTM 非屏蔽双绞线或单光纤。这种通信网络由英国 C&CElectronics 公司推动，并得到 Jaguar 和 MercedesBenz 公司的支持。D2B 旨在保持后向兼容的情况下与新技术一起前进。D2B 基于一种开放式架构，仅使用一条聚合物光纤来处理车内多媒体数据和控制信息，简化了扩展，当在光纤环中增加一种新设备或功能时并不需要改变连接电缆。

(4) 蓝牙无线技术是一种用于移动设备和 WAN/LAN 接入点的低成本、低功耗的短距离射频技术。蓝牙标准描述了手机、计算机和 PDA 如何方便地实现互连，以及与家庭和商业电话及计算机设备的互连。

(5) ZigBeeTM 无线网络在汽车上应用的解决方案是针对蓝牙技术受车内电磁噪声影响的问题而提出的。ZigBeeTM 在 2.45 GHz 频段传输速率可以达到 250 kbps，主要应用范围包括工业控制、家庭自动化、消费类产品及潜在的汽车应用。

0.3 汽车网络的新成员——FlexRay

FlexRay 车载网络标准已经成为同类产品的基准，并将在未来很多年内，引领整个汽车电子产品控制结构的发展方向。FlexRay 是继 CAN 和 LIN 之后的最新研发成果，可以有效管理多重安全和舒适功能。例如，FlexRay 适用于 x-by-wire 操作。

FlexRay 是 Daimler Chrysler 公司的注册商标。FlexRay 联盟 (FlexRay Consortium) 推进了 FlexRay 的标准化, 使之成为新一代汽车内部网络通信协议。FlexRay 关注的是当今汽车行业的一些核心需求, 包括更高的数据速率、更灵活的数据通信、更全面的拓扑选择和更精准的容错运算。

因此, FlexRay 能够为下一代的车内控制系统提供所需的速度和可靠性。CAN 网络最高性能极限为 1 Mbps, 而 FlexRay 两个通道上的数据速率可达到 10 Mbps, 总数据速率可达到 20 Mbps, 因此, 应用在车载网络中, FlexRay 的网络带宽可能是 CAN 的 20 倍之多。

FlexRay 还能够提供很多 CAN 网络所不具有的可靠性特点。尤其是 FlexRay 具备的冗余通信能力可实现通过硬件完全复制网络配置, 并进行进度监测。FlexRay 同时提供灵活的配置, 可支持各种拓扑, 如总线型、星形、混合型。设计人员可以通过两种或两种以上的拓扑来配置分布式系统。

另外, FlexRay 可以进行同步 (实时) 或异步的数据传输, 来满足车辆中各种系统的需求。例如, 分布式控制系统通常要求同步数据传输。

为了满足不同的通信需求, FlexRay 在每个通信周期内都提供静态段和动态段。静态段可以提供有界延迟, 而动态段则有助于满足在系统运行时间内出现的不同带宽需求。FlexRay 帧的固定长度静态段用固定时间触发 (fixed-time-trigger) 的方法来传输信息, 而动态段则使用灵活时间触发的方法来传输信息。

FlexRay 不仅可以像 CAN 和 LIN 网络这样的单通道系统一样运行, 而且还可以作为一个双通道系统运行。双通道系统可以通过冗余网络传输数据——这也是高可靠系统的一个重要性能。

FlexRay 的各种特点均适合实时控制的功能。

0.3.1 FlexRay 的产生和发展

随着汽车电子技术的发展, 未来汽车发展将向 x-by-wire 操控方式转变, 将使传统的汽车机械系统变成通过高速容错通信总线与高性能 CPU 相连的电气系统, 从而提高汽车可靠性、安全性, 同时引入该技术可通过电子系统替代机械系统, 达到减轻重量的目的。但这些都将对电控单元和通信网络系统提出新的要求。基于这些事实, 事件触发的控制器局域网 CAN, 已不能满足进一步的需求, 于是产生了一批时间触发、容错、传输延迟小且固定、具有高的通信速率的总线, 其中, 就包括 FlexRay 总线系统。

1999 年 9 月, 由 BMW 公司和 Daimler Chrysler 公司开始着手进行 FlexRay 研究。2000 年, 它们联合 Philips 公司 (现 NXP 公司)、Motorola 公司 (现 Rescale 公司)、BOASH 公司、GM 公司和 VW 公司等创建了 FlexRay 联盟, 这 7 家公司集汽车、半导体和电子系统创造商于一体, 制定了满足未来车内控制应用通信需求的 FlexRay 通信协议。2001 年, 提出了硬件解决方案, 出现了第一个收发器原型。2002 年, 汽车工业宣布支持 FlexRay 通信协议, 并投入使用。2002 年, FlexRay 总线开始用于 x-by-wire 系统可行性鉴定。到 2006 年, FlexRay 网络投入量产 BMW X5 车中, 标志着 FlexRay 不再只处于开发阶段, 已进入实际应用中。

同时, FlexRay 通信协议逐步发展成熟, 目前几乎全球所有核心的汽车厂商和电子、半

导体公司都加入了该联盟，在为协议发展提供全方位技术支持的同时，也促进了 FlexRay 总线系统在全球的推广应用。2010 年，FlexRay 总线协议被国际标准协会组织纳入标准体系中，形成 ISO 10681-1:2010-道路车辆—FlexRay 车载网络通信标准—第 1 部分：基本资料和使用案例定义及 ISO 10681-2:2010-道路车辆—FlexRay 车载网络通信标准—第 2 部分：通信层服务等标准。

随着 FlexRay 通信协议的逐步完善和标准化应用，必将使 FlexRay 成为继 CAN、LIN、MOST 等车用总线之后未来汽车网络的主流标准。

0.3.2 FlexRay 的基本原理与特点

FlexRay 作为新一代汽车总线技术，它的出现使传统的控制系统结构产生了革命性的变化，并形成了新型网络化数字化分布式控制系统。

FlexRay 总线技术的特点主要有以下几个。

(1) 通信带宽。FlexRay 带宽不受协议机制的限制，可进行单通道最快 10 Mbps 速率的通信，当采用双通道冗余系统时，可达 2×10 Mbps 的速率，远高于 CAN 总线。

(2) 时间确定性。FlexRay 总线采用时分多路的数据传输方式，以循环通信周期为基础，数据在通信周期中拥有固定位置，确保消息到达的时效性。

(3) 分布式时钟同步。FlexRay 总线使用基于同步时基的访问方法，且同步时基通过协议自动建立和同步，时基的精确度达到 $1\mu\text{s}$ 。

(4) 容错数据传输。FlexRay 总线具有专用决定性故障容错协议，支持多级别的容错能力，包括通过单通道或双通道模式，提供传输所需要的冗余和可扩展系统容错机制，确保数据传输的可靠性。

(5) 灵活性。FlexRay 总线支持总线型、星形、级联星形及混合型等多种拓扑结构，支持时间触发和事件触发通信方式，具有消息冗余传输或非冗余传输方式，且提供大量配置参数供用户灵活进行系统调整、扩展。

对于 FlexRay 总线数据传输，根据应用申请，FlexRay 总线通信周期分为静态段和动态段，静态段数据传输采用时间触发方式，能够满足高可靠系统应用需求，动态段主要是基于事件触发方式的，允许每一个节点占用全带宽实现数据传输。FlexRay 总线通信周期结构如图 0-1 所示。

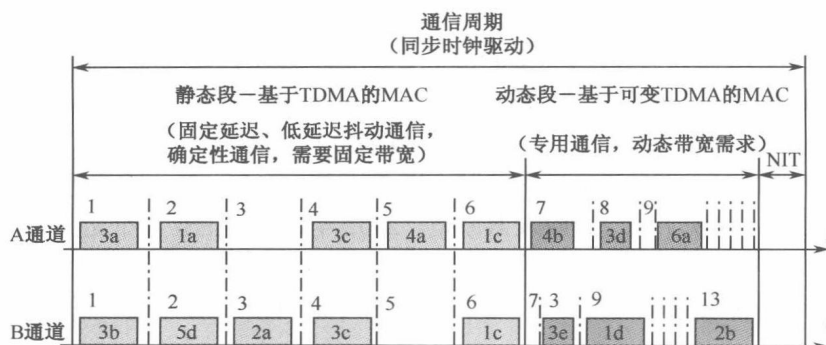


图 0-1 FlexRay 总线通信周期结构

基于上述特点，使 FlexRay 具有广泛的应用领域。

(1) 替代 CAN 总线。在数据速率要求超过 CAN 的应用中会采用两条或多条 CAN 总线来实现，FlexRay 将是替代这种多总线解决方案的理想技术。

(2) 用做“数据主干网”。FlexRay 具有很高的数据速率，且支持多种拓扑结构，非常适合于车辆骨干网络，用于连接多个独立网络。

(3) 用于分布式控制系统。分布式控制系统用户要求确切知道消息到达的时间，且消息周期偏差非常小，这使得 FlexRay 成为具有严格实时要求的分布式控制系统的首选技术，能够应用于如动力系统、底盘系统的一体化控制中。

(4) 用于高安全性要求的系统。FlexRay 本身不能确保系统安全，但它具备大量功能可以支持面向安全的系统（如 x-by-wire 系统）设计。

0.4 FlexRay 协议总览

FlexRay 协议族主要包含如下几份规范。

- FlexRay 需求规范；
- FlexRay 协议规范；
- FlexRay 电气物理层规范；
- FlexRay 电气物理层应用注解；
- FlexRay 数据链路层一致性测试规范；
- FlexRay 电气物理层一致性测试规范；
- FlexRay 物理层电磁兼容性测试规范；
- FlexRay 物理层共模扼流圈电磁兼容性评估规范；
- 初级中央总线监视器规范；
- 初级节点总线监视器规范。

在接下的章节中，将对每一份规范进行简要的介绍。

0.4.1 FlexRay 需求规范

FlexRay 需求规范是对 FlexRay 通信系统提出的要求 (requirement) 和限制 (constraint) 的集合。其中，要求和限制的区别在于：要求是可以通过测试系统进行测试的，从而判断 FlexRay 通信系统是否满足要求；而限制则是系统必须具备的先决条件，限制不需要用测试系统进行测试。

FlexRay 需求规范说明了 FlexRay 通信系统的如下内容。

- 设计目的、用户群、利益群；
- 要求（可以测试的）；
- 限制（不可测试的）；
- 功能需求；
- 性能需求；
- 运行需求；

- 维护性和技术支持性需求；
- 安全性需求。

在 FlexRay 需求规范中使用 VOLERE 模版来描述各种需求，该模版的一般形式如下。

- ID 编号：需求的顺序编号。
- 类型：Constraint（限制）或 Requirement（要求）。
- 描述：对需求的详细描述。

例 1

- ID : 285
- Type : Requirement
- → 'FlexRay' shall provide deterministic communication with bounded latency and small latency jitter.

例 2

- ID : 312
- Type : Constraint
- → The FlexRay communication subsystem shall work when powered by state of the art automotive power supplies within (for the system) specified min and max voltage ranges.

FlexRay 需求规范的主要读者是 FlexRay 组织、FlexRay 工具开发商、FlexRay 通用软件开发商等，普通设计人员并不需要深入地去阅读它。

0.4.2 FlexRay 协议规范

FlexRay 协议规范对位于电气物理层之上的数据链路层的基本特性进行了规定，其涉及以下内容。

- 通信控制器工作状态；
- 帧和特征符的编码、解码方式；
- 帧的具体格式；
- FlexRay 协议中通信周期的实现；
- 帧与特征符的定时准确性、语法正确性、语义正确性检查过程；
- 唤醒与启动过程；
- 时钟同步原理；
- 通信控制器与主机的通信接口。

FlexRay 协议规范是软件开发人员进行 FlexRay 应用开发前必须学习的基本材料，在后面会有专门的章节详细介绍 FlexRay 协议规范的具体内容。

0.4.3 FlexRay 电气物理层规范

FlexRay 的电气物理层规范规定了车辆 ECU 组网所需要的基本物理元素，含通信控制单元（CC）、总线驱动器（BD）、传输媒介、拓扑结构等。它规定了传输本身的电气特性，也对总线驱动器（BD）、总线监测（BG）和有源星形（AS）装置的基本功能进行了说明。另外，电气物理层规范规定了 FlexRay 系统时序约束。

0.4.4 FlexRay 电气物理层应用注解

该文档实际上并不是 FlexRay 标准化协议族中的一员,它是 FlexRay 标准化组织收集的对设计 FlexRay 系统有较大帮助的设计经验集合。该文档按照不同的应用主题对 FlexRay 系统设计过程中需要注意的内容进行描述。该文档对 FlexRay 系统设计人员进行系统和硬件设计都具有很强的参考价值,可以帮助设计人员避开许多前人犯下的错误。

0.4.5 FlexRay 数据链路层一致性测试规范

该规范描述了针对 FlexRay 通信系统数据链路层的一致性测试方法,这些测试方法都是基于 ISO 9646 标准和 FlexRay 协议规范进行设计的。

该规范的设计目的是提供一种标准化的验证方法,以确认 FlexRay 通信控制器类产品是否遵循 FlexRay 协议规范的要求。通过该规范的实施可以保证来自不同生产厂家的通信控制器类产品在同一个 FlexRay 系统中能够无差别地协同工作。

该规范提供了所有必需的技术信息,只要测试系统遵循了这些技术信息规定的特定测试条件,即使在不同的测试系统中进行测试,也可以保证产生的测试结果都是一致的。

在该规范中采用了如下的结构来描述每一个测试用例。

- 测试名称 (Test Name): 测试名称的简短描述。
- 测试目的 (Test Purpose): 测试目的的简短描述。
- 配置 (Configuration): 对测试环境需求的描述。
- 序言 [Preamble (setup state)]: 描述对测试环境的操作步骤,使之进入测试就绪状态。
- 测试执行 (Test Execution): 描述测试的具体执行步骤。
- 后记 (Postamble): 完成测试后,使测试环境退出测试就绪状态的步骤。
- 通过/失败标准 (Pass/Fail Criteria): 描述测试结果的评判标准。

0.4.6 FlexRay 电气物理层一致性测试规范

该规范描述了针对 FlexRay 通信系统电气物理层的一致性测试方法,这些测试方法都是基于 ISO 9646 标准和 FlexRay 电气物理层规范进行设计的。

该规范的设计目的是提供一种标准化的验证方法,以确认 FlexRay 总线驱动器和主动星形连接器类产品是否遵循 FlexRay 电气物理层规范的要求。通过该规范的实施可以保证来自不同生产厂家的总线驱动器和主动星形连接器类产品在同一个 FlexRay 系统中能够无差别地协同工作。

该规范提供了所有必需的技术信息,只要测试系统遵循了这些技术信息规定的特定测试条件,即使在不同的测试系统中进行测试,也可以保证产生的测试结果都是一致的。

0.4.7 FlexRay 物理层电磁兼容性测试规范

FlexRay 物理层电磁兼容性测试规范是一个常规等级的规范,用来评估应用于汽车有线通信 FlexRay 收发器的电磁兼容性。可以测量单收发器和集成收发单元(收发器和总线监控芯片)。FlexRay 物理层电磁兼容性测试规范包括测试步骤、失效标准、测试配置和测试