

四轮独立驱动电动车控制系统 FlexRay 通信网络的设计与实现

王荣刚, 王欢, 单荣明, 何正义

(中国汽车工程研究院股份有限公司 电动汽车工程技术研发中心, 重庆 401122)

摘要: 四轮独立驱动电动汽车控制系统对通信确定性有更高的要求。基于汽车总线开发 V 模式流程, 从四轮独立驱动控制系统通信需求出发, 设计其 FlexRay 通信网络; 采用 Network Designer 生成网络数据库, 导入到 CANoe. FlexRay 软件对网络进行了全仿真、半实物仿真, 验证了所设计的 FlexRay 通信网络的协议参数的正确性, 最后将该网络用于样车中; 实验结果表明, 所设计的 FlexRay 通信网络完全可用于四轮独立驱动电动车控制系统, 具有较高的可靠性、确定性及实时性, 能够满足控制系统的通信需求。

关键词: 四轮独立驱动; FlexRay; CANoe. FlexRay

Design and Implementation of FlexRay Communication Network for Four—Wheel Independent Drive Control System

Wang Ronggang, Wang Huan, Shan Rongming, He Zhengyi

(EV Research and Development Center, China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China)

Abstract: Four—wheel independent drive electric vehicle control system have higher requirements on certainty of communication. The FlexRay communication network was designed based on the vehicle bus development V pattern process and the needs of four—wheel independent drive control system communication. The network database was created by using the Network Designer, then it was imported to CANoe. FlexRay for network simulation and hardware—in—the—loop simulation, so the designed network was verified. Finally, the network was used in a prototype vehicle. Experiments results show that the designed FlexRay communication network can be used in four—wheel independent drive control system, and it has higher reliability and certainty, and it can satisfy the communication requirements of the control system.

Keywords: Four wheel independent Drive; FlexRay; CANoe; FlexRay

0 引言

随着人类可利用能源的不断减少以及大气污染的日益加剧, 零排放的纯电动汽车越来越受到各个国家的重视。虽然电动汽车已经经历了一百多年的发展历史, 但由于其续航里程短、成本高等原因一直没有被大规模应用^[1]。

新型纯电动车动力系统采用传动效率较高、便于整车性能控制的四轮独立驱动方式。4 个驱动电机直接安装在轮毂上, 每个电机由一个电机控制器控制, 整车控制器通过车辆总线接收轮毂电机的状态信息, 发送控制命令, 以实现 4 个轮毂电机的协调控制^[2]。

武汉理工大学^[3]将 CAN (Controller Area Network) 网络应用于四轮独立驱动电动车控制系统, 然而 CAN 是一种基于事件触发的总线通信协议, 报文延迟时间不定。实际经验也表明, 当 CAN 网络的负载率高于 30% 时, 报文延迟的概率将会增大^[4]。报文延迟将会导致控制命令及电机状态信息传递不及时, 会对车辆产生不可估量的严重后果。

而对于 FlexRay 通信协议而言, 其通信延迟在网络参数确定后, 通信延迟将会始终确定^[5], 并且报文可以在指定的时间发送。

因此本文研究基于时间触发的 FlexRay 通信协议在四轮独立驱动控制系统中的应用。

1 四轮独立驱动电动车控制系统

四轮独立驱动控制系统是一种分布式控制系统, 主要是整车控制器 Vehicle Control Unit (VCU) 通过传感器采集加速踏板开度、制动踏板开度、方向盘转角, 以及当前的 4 个电机的状态信息, 通过一定的控制策略及算法, 得出 4 个轮毂电机的目标转矩及转速^[6]。四轮独立驱动电动车控制系统如图 1 所示。

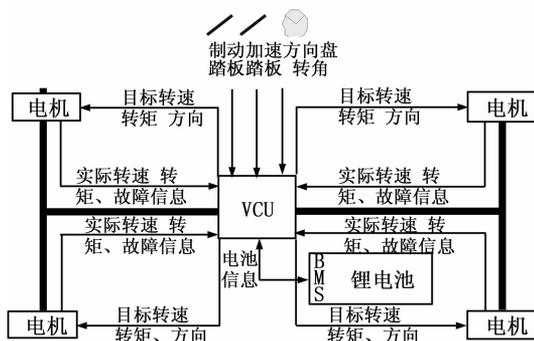


图 1 四轮独立驱动电动车控制系统

收稿日期: 2014-03-12; 修回日期: 2014-04-12。

基金项目: 国家 863 课题 (2011AA11A253)。

作者简介: 王荣刚 (1987-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事汽车车载网络方向的研究。

2 FlexRay 通信网络设计

根据四轮独立驱动电动车控制系统, 结合 FlexRay 通信协

议, 设计其 FlexRay 网络。

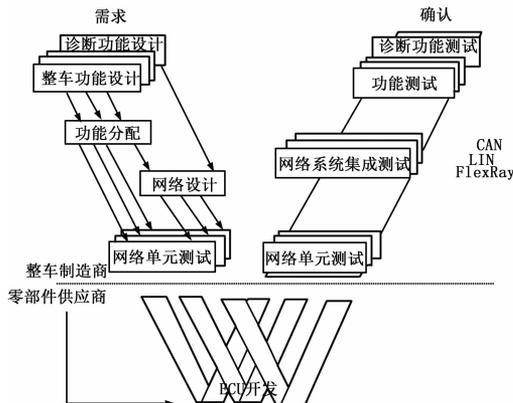


图 2 V 模式开发流程

在网络设计中采用汽车电子设计普遍采用的开发到验证的 V 模式开发流程^[7], 如图 2 所示。首先根据整车功能需求, 设计 FlexRay 网络。设计好的网络需要进行网络仿真来对网络进行验证, 以提早发现问题。接着通过半实物仿真, 对网络中的节点进行通信功能单元测试, 最后所有网络节点进行系统集成, 交付整车使用。

2.1 网络拓扑设计

网络拓扑方式都多种, 可以有总线型和星型^[8]。根据系统的结构, 网络上一共有 5 个节点, 即整车控制器节点和四个轮毂电机控制器节点, 采用总线式拓扑结构, 双通道冗余通信。系统 FlexRay 网络拓扑结构如图 3 所示。

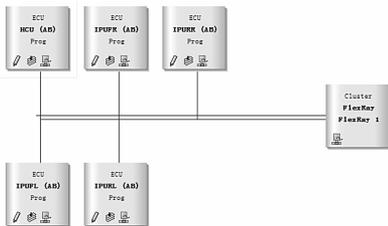


图 3 FlexRay 网络拓扑

2.2 网络协议参数设计

设计一个 FlexRay 网络必须设计合理的参数以保证网络的正常通信。网络参数分为局部参数和全局参数^[9]。参数值的确定主要依靠 FlexRay 通信协议本身的约束以及协议应用实际情况共同确定, 部分参数是需要通过公式计算得出的。表 1 列举了部分参数值。

表 1 部分网络参数

参数名称	数值	单位
<i>gdCycle</i>	5 000	μs
<i>gMacroPerCycle</i>	5 000	MT
<i>gdMacrotick</i>	1	μs
<i>gNumberOfStaticSlots</i>	80	个
<i>gdStaticSlot</i>	65	MT
<i>NumberOfMiniSlots</i>	49	个
<i>gdDynamicSlot</i>	10	MT

2.3 信号 (Signal) 与报文 (Frame) 设计

FlexRay 网络上的数据都是以信号的形式存在并代表一定的意义, 信号由源节点发送, 接收节点收到数据后解析读取数

据从而实施控制。四轮独立驱动电动汽车控制系统 FlexRay 网络上主要传输的是 VCU 节点发送到四个轮毂电机控制器的控制命令及 4 个轮毂电机控制器反馈的电机状态信息。如表 2 所示。

表 2 信号列表

发送节点	接收节点	信息类别
VCU	电机控制器	控制命令
电机控制器	VCU	反馈电机状态信息

FlexRay 通信协议分为静态段和动态段, 将有严格周期的信号封装成静态报文在静态段发送, 将事件触发的信号封装成动态报文在动态段传输。

静态段报文 (Static Frame) 设计的时候应该尽可能多的提高网络带宽利用率, 带宽利用率公式为^[10]

$$u = \frac{\text{all_signal_length}}{\text{all_message_length}} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^L \text{data_signal}_{n,l}}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{data_message}_{n,m}} \quad (1)$$

当一个网络确定后, 信号的总数是确定的, 因此, 为了提高带宽利用率, 在设计 FlexRay 网络的时候, 则需要降低静态报文的总数。

$$\text{即 } \min \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \text{data_message}_{n,m}$$

装载到同一条报文的信号应该具备以下两个条件:

- (1) 信号具备相同的周期;
- (2) 信号源节点相同。

对于动态段而言, 主要考虑的是所有的报文能够在其截止期 (Deadline) 前被发送。

2.4 通信调度表设计

FlexRay 是基于调度表的通信, 所有报文都是按照离线设计好的通信调度表进行发送的。因此, 设计合理的调度表才能保证报文准确和有效地发送^[11]。

根据报文的周期, 可以选择在一个通信循环周期 (Cycle) 内多次发送一条报文, 也可以选择多个循环周期发送一次通信报文。那么报文的周期就是通信循环周期的倍数。

本系统所传输的信号都是周期性的信号, 因此都是静态段发送。所有信号的周期都是 5 ms, 因此每个通信循环周期报文都发送一次, 设计的通信调度表如表 3 所示。

表 3 FlexRay 网络通信调度表

报文名称	时隙	发送节点	循环周期(ms)
4 个电机的目标转矩、转速	1	VCU	0~63
4 个电机的运行模式、方向	3	VCU	0~63
左前电机实际转速、转矩	5	FLIPU	0~63
左前电机故障信息	6	FLIPU	0~63
右前电机实际转速、转矩	7	FRIPU	0~63
右前电机故障信息	8	FRIPU	0~63
左后电机实际转速、转矩	9	RLIPU	0~63
左后电机故障信息	10	RLIPU	0~63
右后电机实际转速、转矩	11	RRIPU	0~63
右后电机故障信息	12	RRIPU	0~63

3 FlexRay 通信网络仿真

对总线网络进行仿真的目的一般为以下几个方面：

- (1) 验证所设计的网络是否正确；
- (2) 验证编辑的网络描述文件 (Fibex) 是否正确；
- (3) 为总线系统搭建半实物仿真测试环境。

对于上述所设计的网络是否能够通信，我们首先需要对网络进行验证。验证的方式主要是通过建立网络模型，进行仿真。本文的网络仿真主要利用德国 Vector 公司的 CANoe. FlexRay 软件，软件运行在 Simulation 模式下。

3.1 网络数据库设计

上述所设计的网络所有参数已经确定，应用层的信号和报文也已经确定，利用德国 Vector 公司 FlexRay 通信协议网络数据库编辑软件 Network Designer 创建四轮独立驱动电动车控制系统的 FlexRay 通信网络数据库^[12]，软件导出 Fibex 文件。该文件类似于 FlexRay 网络的电子档，文档中涵盖网络中的所有数据，可以直接发布给供应商作为对 ECU 的通信需求规范，也可导入到 CANoe. FlexRay 软件中进行网络仿真和测试。

3.2 网络全仿真

FlexRay 网络的全仿真是指网络中都是虚拟节点，利用 CAPL 语言 (Communication Application Programming Language) 编程实现整个网络中各节点的信号发送与接收并进行相应的逻辑处理，利用 Panel 面板设计人机交互面板，模拟节点外部信号的变化，显示节点数据实时变化情况，使通信网络的仿真更加的逼近真实系统。

在上述搭建好的 FlexRay 仿真平台上对整个网络进行仿真，仿真软件 CANoe. FlexRay 的 Trace 窗口中，ID 为 5 和 ID 为 7 的两条报文之间的时间差 0.000 13 s，因此计算出一个时槽的实际时间长度为 65 μs，而实际设置的 gdStaticSlot 的时间长度 65MT，一个 MT 为 1 μs，即 gdStaticSlot=65 μs，说明静态段报文发送时间的确定性。

错误帧的个数、帧的传输频率、总线上的帧个数、帧频率、空帧个数、错误帧个数、帧语法错误个数、时隙超出次数以及总线负载率等，是判断所设计的网络能否正常通信的重要参数。

仿真结果表明，网络中没有错误帧，信号发送正常，所设计的网络完全可用，所搭建的 FlexRay 通信模型的正确。

4 半实物仿真

半实物仿真主要目的是测试已经开发好的网络节点通信功能是否正确实现，由 CANoe 模拟网络上的一些节点，测试真实节点的通信功能。如图 4 所示，VCU 节点为真实节点，其他控制器节点以 CANoe 仿真实现。CANoe. FlexRay 软件运行在 RealBus 模式下，使用 FlexRay 硬件接口卡，屏蔽 VCU 节点。

经半实物仿真对 VCU 通信功能进行测试，VCU 通信功能符合设计要求。

5 样车测试

通过对整个网络以及网络上节点的通信功能的全仿真和半

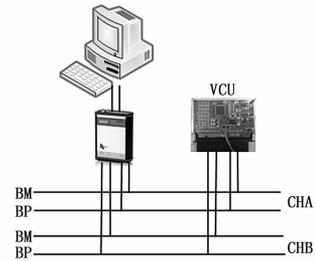


图 4 半实物仿真

实物仿真验证，证明设计的网络满足通信需求，可以进行实车组装。

以某小型汽车进行改装，组装样车。将 CANoe. FlexRay 硬件接口卡接入 FlexRay，读取总线上节点发送的信号数据。

通过 CANoe. FlexRay 读取电机的转速信号，用 Graphics 绘制转速变化曲线，分别采集加速情况及右转弯情况下左前电机及右前电机转速变化情况。如图 5、6 所示。

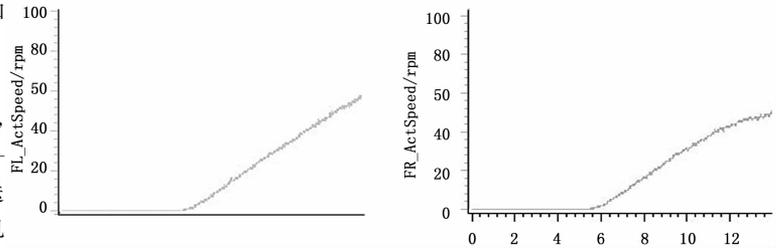


图 5 右转时电机转速

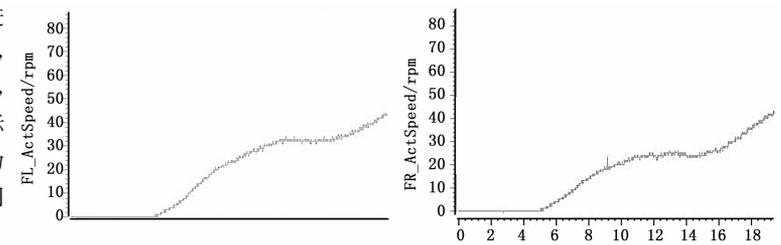


图 6 加速电机转速

可以看出，车辆在加速和右转弯过程平稳，车速变化平稳，没有出现较大的波动和高频抖振，表明车辆动力系统运转正常，所设计的 FlexRay 通信网络能够很好的满足四轮独立驱动电动汽车动力系统的控制需求。

6 小结

本文设计了四轮独立驱动电动汽车 FlexRay 通信网络。对网络的详细参数进行定义，并用 CANoe 软件进行仿真，和进行实际测试。该网络的设计过程是汽车网络设计的整个过程。结果表明，所设计的 FlexRay 网络参数和调度表完全正确可行，FlexRay 网络能够完全满足四轮独立驱动电动汽车控制系统的通信需求。

参考文献：

[1] 程益川. 电动汽车的现状及其发展趋势 [J]. 汽车零部件, 2013, 7: 89 - 90.

- [2] 靳立强, 王庆年, 岳巍强, 等. 基于四轮独立驱动电动汽车的动力学仿真模型 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (12): 3053-3055.
- [3] 吴敦福. 四轮独立驱动电动车控制系统设计 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [4] 李 佳, 朱 元, 田光宇. CAN 与 TTCAN 通信延迟时间的分析 [J]. 清华大学学报, 2006, 46 (2): 26-265.
- [5] 李 佳, 田光宇, 钮 翔, 等. FlexRay 网络通信延迟时间分析 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2007, (8): 1343-1346.
- [6] 廖凌霄. 四轮独立驱动电动汽车控制策略的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [7] 魏学哲, 戴海峰, 孙泽昌. 汽车嵌入式系统开发方法、体系架构和流程 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2012, 40 (7): 1064-1070.
- [8] FlexRay Consortium. FlexRay _ Electrical _ Physical _ Layer _ Specification _ V2. 1 _ Rev. B [Z]. 2005.
- [9] FlexRay Consortium. FlexRay Communications System Protocol Specification. Version 2. 1, Revision A [Z].
- [10] Kang M, Park. K, Kim. B. A static message scheduling algorithm for reducing FlexRay network utilization [A]. Proc of IEEE International Symposium on Industrial Electronics [C], 2009: 1287-1291.
- [11] 严浙平, 于金冶, 张 伟, 等. 基于 FlexRay 总线的 UUV 通信系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (7): 1914-1916.
- [12] Vector Network Designer Manual [EB/OL]. <http://www.vector.com>.

(上接第 2239 页)

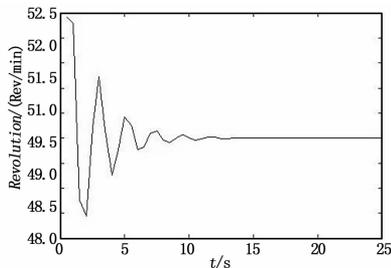


图 4 基于 RBF 模糊神经网络控制的风力机转速阶跃响应

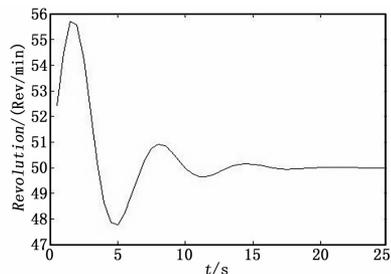


图 5 基于传统增量式数字 PID 控制的风力机转速阶跃响应

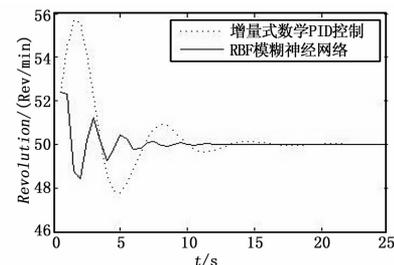


图 6 RBF 模糊神经网络控制与传统 PID 控制阶跃响应比较

由图 6 可得: 采用基于 T-S 模型的 RBF 模糊神经网络控制算法, 风力机转速阶跃响应的调节时间为 13 s, 超调量为 5%; 而采用优化后的传统 PID 控制算法, 其调节时间为 23 s, 超调量为 11%。可见, 采用基于 RBF 模糊神经网络控制算法, 其控制效果要明显优于传统的数字 PID 控制算法。

4 结论

本文垂直轴风力机恒转速控制是通过步进电机调整风力机叶片桨距角来实现的, 从保护步进电机的角度考虑, 调节时间越短越好。通过仿真比较, 采用基于 RBF 模糊神经网络控制能够较好地缩短调整过程所需的时间, 同时超调量也较传统 PID 控制小的多。因此, 在垂直轴风力机恒转速控制中, 采用基于 T-S 模型的 RBF 模糊神经网络控制算法具有一定的优越性。

参考文献:

- [1] 田海蛟, 王铁龙, 王 颖. 垂直轴风力发电机概述 [J]. 应用能源技术, 2006, 11: 22-27.
- [2] 田 德. 国内外风力发电技术的现状与发展趋势 [J]. 新能源产业, 2007, 1: 51-56.
- [3] 杨风利, 吴 静, 代泽兵, 等. 格构式垂直轴风力发电机组结构力学特性分析 [J]. 电力建设, 2008, 29 (11): 67-70.
- [4] 双叶片立轴风力机公开说明书 [Z/OL]. <http://www.qiyan.biz/Patent-Display/200810024858.html>.
- [5] 韩晓霞, 谢克明. RBF 模糊神经网络在刚性机械臂控制中的应用 [J]. 测试技术学报, 2007, 21 (6): 481-487.
- [6] Roger Jang J S, Sun C T. Functional Equivalence between Radial Basis Function Networks and Fuzzy Inference System [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1993, 4 (1): 156-159.
- [7] Hunt K J. Extending the Functional Equivalence of Radial Basis Function Network and Fuzzy Inference System [J]. IEEE Transaction on Neural Networks, 1996, 7 (3): 776-781.
- [8] 李国勇. 神经模糊控制理论及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.