基于 OPNET的 CAN网络建模与仿真

李晓汀 丁 凡 熊华钢

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100191)

摘 要: 为分析控制器局域网 (Controller Area Network, CAN)协议,评价 CAN网络性能,提出在 OPNET网络仿真环境中 CAN网络模型的建模方法. 采用网络层次化建模方法构建节点模型. 介质访问控制 (Medium Access Control, MAC)子层中设计 MAC、错误处理和帧间空间模块,保证系统结构清晰. 通过进程设计,MAC模块中实现了网络实时性模型;错误处理模块中实现了连续错误下网络不可用模型. 定义和编辑链路及数据帧模型. 根据实例模型进行网络模型的配置和仿真. 仿真结果与实例测试结果一致,验证了网络模型的有效性. 通过分析具体网络仿真环境下的仿真结果,对 CAN网络性能进行了讨论. 该模型提供了独立可编辑的节点模型,链路模型和数据帧模型,可实现灵活的网络配置,用于不同网络拓扑分析.

关 键 词: 控制器局域网; OPNET; 建模; 仿真

中图分类号: TP 393. 03

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1003-5965(2009)03-0284-04

CAN modeling and simulation based on OPNET

Li Xiaoting Ding Fan Xiong Huagang

(School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To analyze controller area network (CAN) protocol and evaluate CAN network performance, the CAN network modeling method was developed, based on the OPNET network simulation environment. Layered modeling method was adopted to implement CAN node model. Medium access control (MAC) module, error module and deference module were proposed based on function in the MAC sublayer of node model in order to ensure clear system structure. Network response time analysis model and inaccessibility analysis model were implemented using process design separately in MAC module and in error module. Link model and data model were defined and edited. CAN network was configured and simulated according to example model. The agreement of the simulation results with the example model testing results prove this model is valid. Through results analysis of specifically-configured network, CAN network performances were discussed. Independent and editable node model, link model and data model were provided, indicating these models could be used to carry out varied network configuration flexibly and analyze varied network topologies.

Key words: centroller area network; OPNET; model building; simulation

CAN (Controller Area Network)协议是 80年代初 BOSCH公司为了解决汽车实时通信中成本、可靠性和维修性等问题而提出的一种串行数据通信协议. CAN现场总线被公认为几种有前途的现场总线之一,其协议也发展成为国际标准[1]. 在 CAN发展的二十多年的历史中,它不断完善,其应用范围也从汽车业扩展到航空航天、船舶工业等各个领域.

随着 CAN总线技术的发展,其网络结构日趋复杂,规模日趋庞大,所以对用于网络规划和设计的网络仿真技术的需求也日趋强烈. 对复杂的通信系统进行有效、逼真的建模仿真,才能对网络进行综合分析与评价,提出性能价格比择优的解决方案. 目前,对于 CAN网络建模与仿真的研究已

收稿日期: 2008-03-10

作者简介: 李晓汀 (1983 -),女,北京人,硕士生, icewatertt@gmail com.

取得了一定成果. 文献 [2]提出了一种利用 UML (Unified Modeling Language)的建模方法,实现了 CAN总线建模;文献 [3]利用 FPGA (Field Programmable Gate Array)模拟了 CAN控制器和总线模型,并进行了相应的仿真;文献 [4]提出了 TLM (Transaction Level Models)建模方法,有效提高了仿真效率;文献 [5]针对文献 [4]中牺牲仿真准确性换取仿真效率的问题提出了 CAN的不追踪仿真过程直接面向结果的 ROM (Result-Oriented Modeling)建模方法. 但是,目前的研究缺乏基于网络层次化建模的 CAN模型和整个 CAN网络系统的仿真与性能分析.

目前 OPNET公司所提供的模型库中没有针对 CAN协议构建的模型,缺乏对 CAN网络仿真平台的系统的搭建方法和分析. 本文将利用 OPNET对 CAN网络进行建模,可以有效地根据协议分层实现建模,建立包括节点模型、链路模型和数据帧模型的系统的仿真平台,进行典型网络结构的仿真,根据仿真结果进行协议和网络性能的分析.

1　CAN网络模型的设计

1.1　网络模型

CAN总线非常适合工业过程控制中实现各控制设备之间的互连. 设计 CAN构成的分布式监测、控制网络的典型结构[6]如图 1所示.

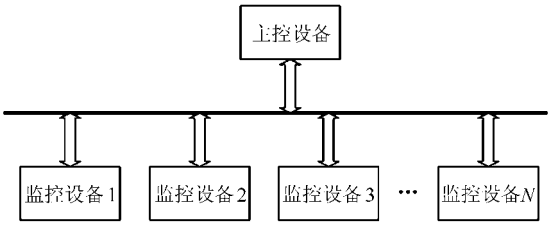


图 1　CAN测控网络典型结构

1.2　节点模型

CAN网络协议中定义了数据链路层和物理层,根据 ISO7498《信息处理系统 -开放系统互连 (OSI)基本模型》的参考模型,设计节点模型为三层网络模型,自上而下分别为应用层、逻辑链路层和物理层,如图 2所示.

在图 2中,消息源 (src)和接收器 (sink)模块组成最简单的应用层. 逻辑链路控制 (Logical Link Control, LLC)、介质访问控制 (Medium Access Control, MAC)、错误处理 (Error, ERR)和帧间空间 (DEFERENCE)模块组成数据链路层. rx和 tx分别为总线型收发信机,组成物理层.

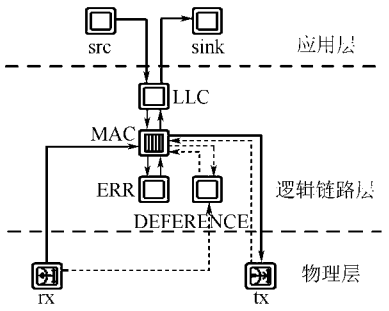


图 2　CAN节点模型

设计 MAC子层由 MAC模块、ERR模块及 DEFERENCE模块共同组成. 3个模块分别建模的优点是将不同功能的模块分开,使系统结构更加清晰;同时可以避免在同一模块内过于复杂的进程设计而导致时序混乱.

1.2.1　MAC模块

MAC子层的通信处理进程模型包含两个通信过程. 数据发送过程由 WAIT, FRM_STAR, DEF_WAIT, TX_STAR, XMI_WAIT, ACK_WAIT及 FRM_END组成一个发送环;数据接收过程由 WAIT, RX_WAIT, CHECK及 TO_LLC组成接收环. 两个过程构成整个 MAC子层通信处理的基本结构,如图 3所示.

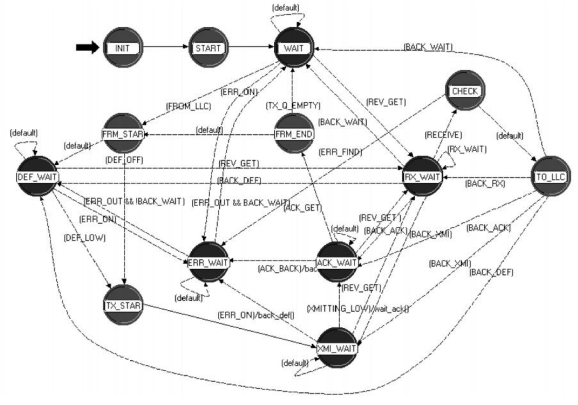


图 3　MAC子层进程模型

Pinho和 Vasques在文献 [7]中提出了 CAN网络的实时性计算模型,如式 (1)、式 (2)所示. 该模型在图 3所示 MAC进程模型中实现, R_m 为最坏情况下消息延时, I_m 为最坏情况下消息排队延时. 式 (1)中最长消息传输时间 C_m 在图 4的 XMI_WAIT状态中实现;式 (2)中最坏情况阻塞延时 B_m 在图 3的 FRM_STAR状态中通过队列实现; τ_{bit}为传输速率, T为消息周期, $hp(m)$为优先级较高的消息集.

$$R_m = I_m + C_m \tag{1}$$

$$I_m = B_m + \sum_{\forall j \in hp(m)} \left(\left\lceil \frac{I_m + \tau_{bit}}{T_j} \right\rceil \times C_j \right) \tag{2}$$

1.2.2 ERR模块和 DEFERENCE模块

帧间空间模块如图 4a所示.

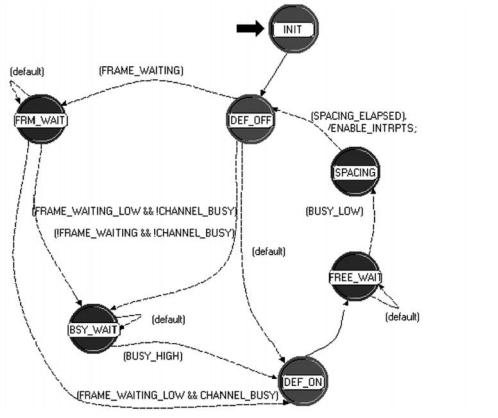
对 CAN网络错误处理过程进行近似处理.通过协议分析总结出错误处理的两个特点:

1) 错误处理过程在总线中会形成一个间隔;

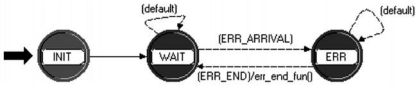
2) 一个节点检测到错误时,会进行错误标记通知所有节点进行错误处理.

错误处理模块如图 4b所示.文献[8]中表明在通信过程中更关注最坏情况,主动错误时取值 12 bit的传输时间作为错误标志,被动错误时取值 20 bit的传输时间作为错误标志,考虑 8 bit的错误界定符[1],则在图 4b的 ERR状态中实现错误间隔 T_{ERR} (s),具体计算方法如下式:

$$T_{\mathrm{ERR}}=\begin{cases}\dfrac{1}{v_{\mathrm{tx}}}\times(12+8) & \text{主动错误}\\ \dfrac{1}{v_{\mathrm{tx}}}\times(20+8) & \text{被动错误}\end{cases} \tag{3}$$



a MAC子层帧间空间进程模型



b MAC子层错误处理进程模型

图 4 MAC子层帧间空间及错误处理进程模型

文献[7]中提出的连续错误下的网络不可用模型如式 (4)所示.该模型在图 4所示的进程模型中实现,t_{n_ina}为连续 n个错误数据帧传输时产生的延时,C_{MAX}为数据帧最长延时,错误帧传输 C_{error}在图 4b的 ERR状态中实现;帧间间隔 C_{IFS}在图 4a中的 SPACING状态中实现.

$$t_{n_\mathrm{ina}}=n\times(C_{\mathrm{MAX}}+C_{\mathrm{error}}+C_{\mathrm{IFS}}) \tag{4}$$

1.3 链路模型

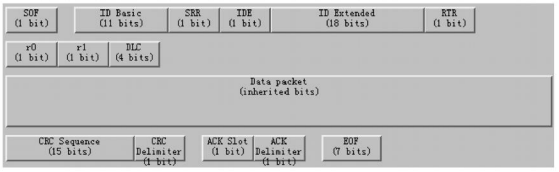
CAN链路模型设定为总线型,传输速率可以设定为 250 kbit/s, 500 kbit/s和 1Mbit/s

1.4 数据帧模型

设计标准帧和扩展帧,其具体字段及相应属性如图 5所示.



a 标准帧模型



b 扩展帧模型

图 5 数据帧模型

2 CAN网络仿真验证

2.1 仿真网络配置

本小节主要研究一个 CAN网络的仿真实例用来验证本文中所构建的仿真模型,该实例模型来自文献[9]的实例模型,是一个基于 SAE (Society of Automotive Engineers)标准的简化模型,通过该标准可以对本文中网络模型的仿真结果进行全面的分析.网络配置请参考文献[9].

2.2 仿真验证

对上述网络进行仿真,并采用文献[9]中错误模型.仿真结果如表 1所示,其中 ETE (End-To-End)为端到端延时,通过对比表中数据可以看出,仿真结果与文献[9]所得结果一致,说明本文搭建的基于 OPNET的 CAN网络模型符合 CAN总线协议.

表 1 仿真结果与文献结果比较

信息	最差情况 ETE/ms			
	0个错误 /100ms		3个错误 /100ms	
	文献[9]	仿真结果	文献[9]	仿真结果
A	0.684	0.679	2.256	2.135
B	0.976	0.976	2.546	2.432
C	1.228	1.226	2.800	2.682
D	1.520	1.518	3.092	2.974
E	1.772	1.772	3.344	3.228
F	2.064	2.061	3.636	3.517
G	2.432	2.312	4.004	3.676
H	2.684	2.567	4.256	3.920
I	2.976	2.846	4.548	4.219
J	3.268	3.148	4.840	4.507
K	3.520	3.152	5.092	4.763
L	3.848	3.519	6.800	5.132
M	4.100	3.772	7.052	6.761
N	4.352	4.023	7.304	7.006
O	4.604	4.352	7.556	7.346
P	4.856	4.603	7.808	7.596
Q	4.868	4.855	7.820	7.842

3　CAN网络性能仿真

本小节利用基于 OPNET搭建的 CAN网络模型进行仿真,并通过仿真结果对其网络性能进行基本分析.本文主要考虑消息传输率、消息优先级和消息误码率对网络性能的影响.

3.1　仿真环境设置

搭建 OPNET网络拓扑模型如图 6所示.网络通信速率可设置为 250 kbit/s, 500 kbit/s和 1Mbit/s配置该 CAN网络,每条消息可进行优先级设置,消息长度可在 0～8数字之间选择.消息的具体配置如表 2所示.

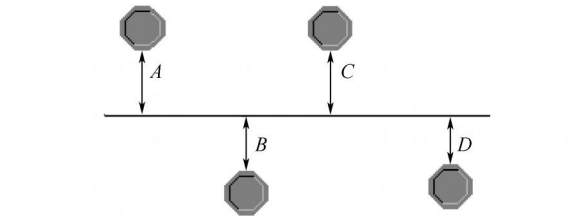


图 6　基于 OPNET的 CAN测控网络模型结构

表 2　CAN仿真网络信息配置

消息	优先权	数据域长度 / Byte	发送周期 / ms	最大允许延时 / ms
A	0	1	5	5
B	1	2	10	10
C	2	4	10	10
D	3	8	100	20

3.2　仿真结果分析

3.2.1　仿真试验 1

该试验用于检验链路传输速率对网络性能的影响.在 250 kbit/s, 250 kbit/s和 1Mbit/s条件下对 3.1节中的网络分别进行仿真.

消息 ETE延时结果表明 (图 7上):在 1Mbit/s传输率条件下,消息的 ETE平均延时分别为 500 kbit/条件下和 250 kbit/s条件下的 49.0%和 24.2%,说明消息传输率越大,网络实时性越好.网络实时性的改善可以通过提高消息传输率来实现.网络负载率结果表明 (图 7下):在 1Mbit/s传输率条件下,网络负载率分别为 500 kbit/s条件下和 250 kbit/s条件下的 49.9%和 25.0%,说明较小的消息传输率将导致较大的网络负载.

3.2.2　仿真试验 2

试验 2用于检验消息优先级对网络性能的影响.在 500 kbit/s下,对 3.1节网络进行仿真.

消息 ETE延时结果表明 (图 8):对于不同优先级的消息,消息的归一化端对端延时随着消息的优先级降低而增加.在设计网络时,对于需要保证实时性的消息应设置高优先级.

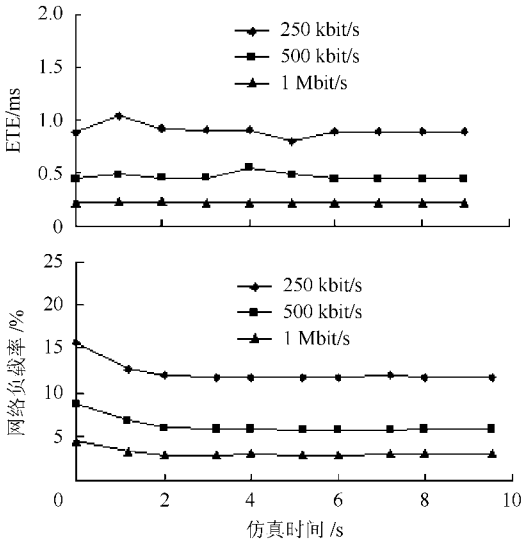


图 7　试验 1

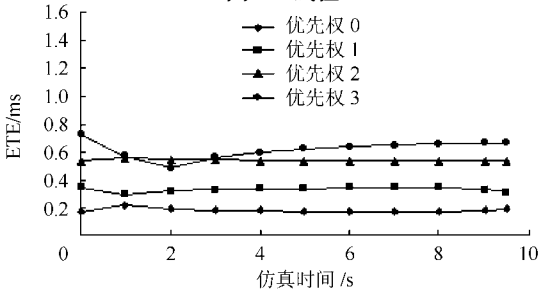


图 8　试验 2

3.2.3　仿真试验 3

该试验用于检验消息误码率对网络性能的影响.在 250 kbit/s传输速率下,分别对无误码、误码率为 4×10^{-5}和误码率为 1.2×10^{-4}三种情况进行仿真.

消息 ETE延时结果表明 (图 9上):随着误码率的增加,消息延时增加.消息误码成为影响网络

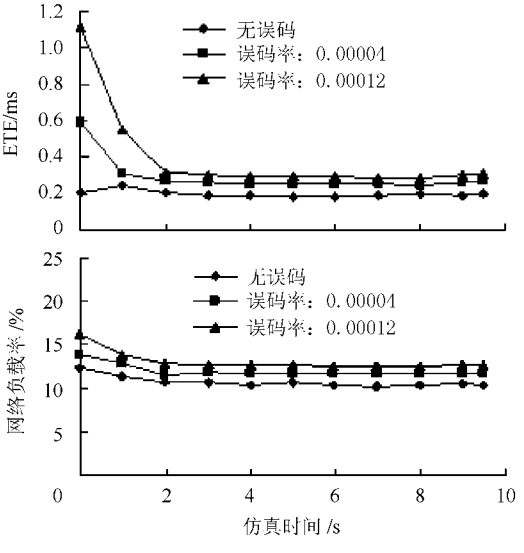


图 9　试验 3

(下转第 346页)

参考文献 (References)

[1] Plaza A, Valencia D, Plaza J, et al. Commodity cluster-based parallel processing of hyperspectral imagery[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2006, 66(3): 345 - 358

[2] Ifarraguerri A, Chang Chein-I. Unsupervised hyperspectral image analysis with projection pursuit[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(6): 2529 - 2538

[3] Chiang S S, Chang C I, Ginsbern IW. Unsupervised target detection in hyperspectral images using projection pursuit[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(7): 1380 - 1391

[4] 崔恒建, 陈广雷. 带有误差变量的偏度和峰度正态性检验[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2000, 36(1): 9 - 13
Cui Hengjian, Chen Guanglei. Skewness and kurtosis statistics for testing normality in ev model[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2000, 36(1): 9 - 13 (in Chinese)

[5] 胡冰, 周海芳, 王攀峰. 遥感图像 PCA 融合并行算法研究与实现[J]. 微电子学与计算机, 2006, 23(10): 153 - 161
Hu Bing, Zhou Haifang, Wang Panfeng. A parallel algorithm of PCA image fusion in remote sensing and its implementation[J]. Microelectronics and Computers, 2006, 23(10): 153 - 161 (in Chinese)

[6] 陈国良, 安虹, 陈崚, 等. 并行算法实践[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 294 - 317
Chen Guoliang, An Hong, Chen Ling, et al. Practice of parallel algorithm[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 294 - 317 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)

(上接第 287页)

实时性的重要因素. 在目前误码率为 1.2×10^{-4} 的情况下,所有消息的最差延时仍小于其最大允许延时,说明在发生一定的误码率的情况下,网络仍可以保证实时性. 网络负载率结果表明(图 9下):随着误码率的增加,网络负载率增加. 这是由于误码导致增加了网络恢复通信的链路占用开销和消息的重传开销,这些额外开销均导致负载增加.

4 结束语

本文实现了在 OPNET仿真环境下 CAN仿真系统的构建,完成了节点模型、链路模型和数据帧模型的设计与实现. 并通过文献[9]中的网络模型和数据验证本文所建模型的真实性. 在该仿真环境下,对典型的 CAN网络拓扑模型进行仿真,通过分析和对比仿真结果,讨论了 CAN网络的性能特点. 本文所构建模型真实地反映了 CAN协议的特点,具有一定的通用性,并测试了 CAN网络的性能特点,从而为 CAN网络更广泛的应用提供了宽阔的新舞台.

参考文献 (References)

[1] ISO 11898, Road vehicles—interchange of digital information—controller area Network for high-speed communication ISO[S]

[2] Kotzian J, Srovnal V. CAN based distributed control system modeling using UML[C]//2003 IEEE International Conference on Industrial Technology. Maribor, Slovenia: IEEE, 2003, 2: 1012 - 1017

[3] Acle J P, Reorda M S, Violante M. Early, accurate dependability analysis of CAN-Based networked systems[J]. Design & Test of Computers, 2006, 23(1): 38 - 45

[4] Donlin A. Transaction level modeling: flows and use models[C]//Proceedings of the 2nd IEEE/ACM/IFIP International Conference on Hardware/Software Codesign and System Synthesis. Stockholm, Sweden: CODES + ISSS, 2004: 75 - 80

[5] Schirner G, Dorner R. Result-oriented modeling-a novel technique for fast and accurate TLM[J]. IEEE Trans on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2007, 26(9): 1688 - 1699

[6] 孙松, 孙川. 测控网络中 CAN总线及其实现[J]. 计量与测试技术, 2004, 31(07): 23 - 25.
Sun Song, Sun Chuan. CAN bus in measuring and controlling system and its implementation[J]. Metrology and Measurement Technique, 2004, 31(07): 23 - 25 (in Chinese)

[7] Pinho L M, Vasques F. Reliable real-time communication in CAN networks[J]. IEEE Trans on Computers, 2003, 52(12): 1594 - 1607

[8] Punnekkat S, Hansson H, Norstrom C. Response time analysis under errors for CAN [C]//2000 Proceedings of Real-Time Technology and Applications Symposium. Washington: IEEE, 2000: 258 - 265

[9] Pinho L M, Vasques F, Tovar E. Integrating inaccessibility in response time analysis of CAN networks[C]//2000 Proceedings of Factory Communication Systems. Porto, Portugal: IEEE International Workshop, 2000: 77 - 84

(责任编辑:娄 嘉)