

汽车控制系统 CAN 总线的网络演算建模及分析

单桂军^{1,2}, 王国俊³, 戴永前³, 王玉周³

(1 江苏科技大学 电信学院, 江苏 镇江 212003; 2 镇江高等专科学校 电子与信息系, 江苏 镇江 212003;

3 江苏捷诚车载电子信息有限公司, 江苏 镇江 212028)

摘 要: 针对汽车控制系统 CAN 总线的实时性问题, 提出一种汽车控制系统 CAN 总线的网络演算模型. 利用网络演算分别建立了汽车控制系统 CAN 总线的达到曲线和服务曲线模型, 有效地模拟了汽车控制系统 CAN 总线的确定性行为特性. 最后, 以某汽车控制系统 CAN 总线为例, 计算得到了各个消息帧的最大延迟, 验证了所提方法的有效性, 该方法可用于汽车控制系统 CAN 总线的设计与性能评价.

关键词: 网络演算; 汽车控制系统; CAN 总线; 最大延迟

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)11-0123-03

Modeling and Analysis of the CAN Bus in Automotive Control System Using Network Calculus

SHAN Gui-jun^{1,2}, WANG Guo-jun³, DAI Yong-qian³, WANG Yu-zhou³

(1 School of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2 Department of Electronic and Information, Zhenjiang College, Zhenjiang 212003, China;

3 Jiangsu Jiecheng Automobile Electronic Information Co., Ltd. Zhenjiang 212028, China)

Abstract: To solve the problem of the CAN bus real-time performance evaluation in automotive control system (ACS), a new model of the CAN bus in ACS with network calculus (NC) is proposed. The arrival curve and service curve of the CAN bus in ACS are built with NC, which can describe the certainty behavior of the CAN bus in ACS. Finally, these maximum delays of every message frame are obtained by a case study of one CAN bus in ACS, and the proposed method is validated and it can be used for design and performance evaluation of the CAN bus in ACS.

Key words: network calculus; automotive control system; CAN bus; maximum delay

1 引言

近年来,随着汽车控制系统中的子系统和设备日益增多和复杂,其内部需要交换的消息流的规模也日趋庞大,且消息流对实时性和确定性的要求越来越严格,给汽车控制系统 CAN 总线的设计带来了极大的困难. 文献[1]采用排队论分析了 CAN 总线的消息响应时间;文献[2]主要采用 Petri 网作为理论工具分析了 CAN 总线的吞吐量和消息的平

均延迟时间;文献[3]利用 OPNET 软件分析了 CAN 总线的网络利用率等,以上文献主要是针对 CAN 总线在平均意义上的性能指标进行的评估,没有关注 CAN 总线在最差条件下的最大延迟时间.

网络演算^[4]是一种以最小加代数为基础的可以用于求解总线最大延迟时间的理论方法,已经在飞机、船舶等领域得到了广泛研究与应用^[5-6]. 本文的目的在于应用网络演算建立汽车控制系统 CAN 总线的模型,分析其消息流的最大延迟,以期对相关研究提供有益参考.

收稿日期: 2013-01-06; **修回日期:** 2013-02-22

基金项目: 江苏省高校实验室研究会研究课题(JS2012-2);江苏省现代教育技术研究课题(16866);镇江市科技支撑计划项目(GY2012041)

2 网络演算

在网络演算理论框架中,通过到达曲线和服务曲线可以求解网络的最大延迟^[4].

定义 1 广义递增函数集 F

$$F = \{f(t) \mid f(t) \geq 0, \forall u \leq t, f(u) \leq f(t), t \in [0, +\infty)\}$$

$f(\cdot)$ 连续且存在一阶导数.

定义 2 最小加运算

$$(f \oplus g)(t) = \min\{f(t), g(t)\}, \forall f, g \in F.$$

定义 3 最小加卷积运算

$$(f \otimes g)(t) = \begin{cases} \inf_{0 \leq s \leq t} \{f(s) + g(t-s)\} & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

$$\forall f, g \in F$$

定义 4 最小加反卷积运算

$$(f \oslash g)(t) = \sup_{s \geq 0} \{f(t+s) - g(s)\}, \forall f, g \in F.$$

定义 5 到达曲线. 给定一个函数 $\alpha(t)$, 且 $\alpha \in F, t \geq 0$, 若消息流输入函数 $R(t)$ 满足 $R(t) \leq (R \otimes \alpha)(t)$ 时, 则称 α 是 R 的到达曲线.

定义 6 服务曲线. 给定一个消息流的输入函数 $R(t)$, 对于函数 $\beta(t) \in F, \beta(0) = 0$, 若该消息流输出函数 $R^*(t)$ 满足 $R^*(t) \geq (R \otimes \beta)(t)$ 时, 则称该系统为消息流提供服务曲线 $\beta(t)$.

定理 1 最大延迟. 若以 $\alpha(t)$ 为到达曲线的消息流通过一个服务曲线为 $\beta(t)$ 的系统时, 其最大延迟为 $h(\alpha, \beta)$ ($h(\alpha, \beta)$ 为 $\alpha(t)$ 和 $\beta(t)$ 的水平偏差) 满足:

$$h(\alpha, \beta) \leq \sup_{t \geq 0} \{\inf_{d \geq 0} \{d : \alpha(t) \leq \beta(t+d)\}\}.$$

以图 1 为例, 横轴为时间 t , 纵轴为数据量 Data, 则该消息流的最大延迟为 $h(\alpha, \beta)$ 为到达曲线 $\alpha(t)$ 和服务曲线 $\beta(t)$ 的最大水平距离.

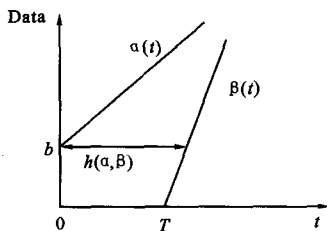


图 1 曲线之间关系

3 汽车控制系统 CAN 总线的网络演算建模

3.1 汽车控制系统 CAN 总线消息流分析

图 2 所示为某汽车控制系统 CAN 总线拓扑结构^[1-2]. 该系统中通过 CAN 总线彼此连接进行信息

交换的设备分别为: 自动变速箱、发动机控制器、防抱死制动系统、车轮角度传感器、车身网络网关及其他设备等. 汽车控制系统 CAN 总线网络中, 消息流可以分为同步消息流和异步消息流两类. 其中: 同步消息流是系统消息流的主体, 主要包括传感器的周期采样消息流、车辆状态监控消息流等; 而异步消息流的数量与同步消息流相比较少, 主要包括操作事件消息流和报警消息流等.

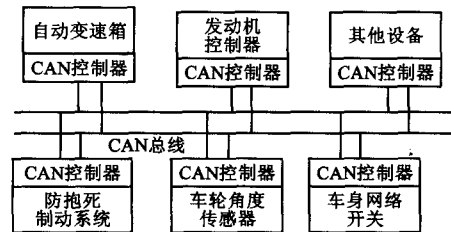


图 2 汽车控制系统 CAN 总线拓扑结构

3.2 汽车控制系统 CAN 总线的网络演算模型建立

3.2.1 到达曲线建模

设汽车控制系统 CAN 总线采用静态固定优先级的方法, 各个消息帧的优先级依次为 0 至 N . 在汽车控制系统 CAN 总线中要发送优先级为 n 的消息帧, 必须等优先级大于 n 的消息帧 (优先级为 0 至 $n-1$) 发送完毕, 才能开始发送优先级为 n 的消息帧.

设优先级为 n 的消息帧的产生周期为 C_n , 则其输入函数为: $R_n(t) = \left\lfloor \frac{t}{C_n} \right\rfloor \cdot L$, 其中: L 为消息帧的最大长度 (即发送 8 个数据字节, 共计 136 bits).

根据漏桶模型^[4], 则优先级为 n 的消息帧的到达曲线为: $\alpha_n(t) = L + \frac{L}{C_n} \cdot t$, 其中: 突发量 $b_n = L$,

$$\text{平均速率 } r_n = \frac{L}{C_n}.$$

同理, 优先级大于 n 的消息帧集合的到达曲线为: $\alpha'_n(t) = \sum_{m=0}^{n-1} \alpha_m(t) = nL + \sum_{m=0}^{n-1} \frac{L}{C_m} \cdot t$, 其中: 突发量 $b'_n = nL$, 平均速率 $r'_n = \sum_{m=0}^{n-1} \frac{L}{C_m}$.

3.2.2 服务曲线建模

设汽车控制系统 CAN 总线的通讯速率为 R (一般取 125 kbps, 250 kbps 和 500 kbps), 则优先级为 n 的消息帧在最差条件下的等待时间为: $T_m = \frac{L}{R}$.

根据速率等待时间模型^[4], 则优先级为 0 的消息帧的服务曲线为: $\beta_0(t) = \max\{R \cdot (t - T_m), 0\}$.

进一步, 优先级为 n 的消息帧的服务曲线为:

$$\begin{aligned}\beta_n(t) &= \max\{(\beta_0(t) - \alpha'_n(t)), 0\} \\ &= \max\{(R \cdot (t - T_m) - (b'_n + r'_n \cdot t)), 0\} \\ &= \max\left\{(R - r'_n) \cdot \left(t - \frac{b'_n + L}{R - r'_n}\right), 0\right\}\end{aligned}$$

则优先级为 n 的消息帧获得的服务速率为 R'_n
 $= R - r'_n$,最差时延为 $T'_n = \frac{b'_n + L}{R - r'_n}$.

3.2.3 计算最大延迟

在确定汽车控制系统 CAN 总线的到达曲线和服务曲线的基础上,计算优先级为 n 的消息帧的最大延迟:

$$\begin{aligned}h_n(\alpha'_n, \beta_n) &\leq \sup_{t \geq 0} \{ \inf_{d \geq 0} \{ d : \alpha'_n(t) \leq \beta_n(t + d) \} \} \\ &= \frac{L}{R'_n} + T'_n \\ &= \frac{(n + 2) \cdot L}{R - \sum_{m=0}^{n-1} \frac{L}{C_m}}\end{aligned}$$

4 实例

表1给出了某汽车控制系统CAN总线中的5个消息帧的基本参数,设定该汽车控制系统CAN总线的通信速率为 $R = 500 \text{ kbps}$.

表 1 实例分析结果

消息帧		到达曲线 $\alpha'_n(t)$		服务曲线 $\beta(t)$		最大延迟
优先级 n	C_n/ms	b'_n/bits	r'_n/bps	R'_n/bps	T'_n/ms	$h_n(\alpha'_n, \beta_n)/\text{ms}$
0	10	0	0	500 000	0.272	0.544
1	20	136	13 600	486 400	0.559	0.839
2	40	272	20 400	479 600	0.851	1.134
3	50	408	23 800	476 200	1.142	1.428
4	30	544	26 520	473 480	1.436	1.723

基于 Matlab 2011a 仿真环境实现了该汽车控制系统 CAN 总线的网络演算模型,计算得到优先级大于 n 的消息帧集合的达到曲线、服务曲线和优先级为 n 的消息帧的最大延迟,如表 1 所示.其中:优先级为 n 的消息帧的最大延迟与优先级关系,如图 3 所示.可见,本文方法具有以下优点:

- (1)该方法可以快速求解汽车控制系统 CAN 总线的最大延迟时间.
- (2)该方法通用性良好,需要的已知参数少,计算公式清晰简明,便于软件实现.
- (3)该方法可以为汽车控制系统 CAN 总线的分析与设计提供了理论依据.

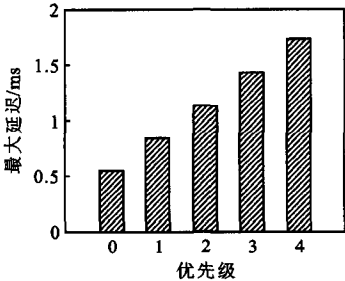


图 3 消息帧的最大延迟与优先级关系

5 结束语

本文以网络演算为工具,提出了一种新的汽车控制系统 CAN 总线的最大延迟计算方法.采用网络演算建立的汽车控制系统 CAN 总线的到达曲线和服务曲线模型,有效地刻画了汽车控制系统 CAN

总线的行为特性.实例分析验证了本文方法的有效性.下一步将进一步研究多级总线互联模式下的消息流的最大延迟时间.

参考文献:

[1] 陈曦,刘鲁源,吕伟杰,等. 基于排队论的 CAN 总线消息响应时间建模与分析[J]. 天津大学学报,2012,45(3):228-235.

[2] 吴晨,王忠,许化龙,等. CAN 总线形式化建模方法研究[J]. 微计算机信息,2009,25(12):21-23.

[3] 钱美,韩江桂,吴正国,等. 电力系统过程网络 CAN 总线实时性仿真与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):103-107.

[4] Boudec J Y L, Thiran P. Network calculus: a theory of deterministic queuing system for the internet[M]. Online Version; Springer-Verlag,2011.

[5] Ulrich K, Thomas H, Kai-Steffen H, et al. Delay bounds for CAN communication in automotive applications[C]// Proc 14th GI/ITG Conference Measuring Modelling and Evaluation of Computer and Communication System. Portmund, Germany: IEEE,2008:1-15.

[6] 周立,赵然,于航,等. 航空电子 WDM 网络的实时性能分析[J]. 北京航空航天大学学报,2009,35(11):1408-1412.

作者简介:

单桂军 男,(1969-),硕士,副教授.研究方向为计算机应用与网络安全、车载网络技术等.