

基于 CAN 总线的 TT - FPS 调度算法研究及其性能分析

吕伟杰, 刘鲁源, 王毅新

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

[摘要] 针对 CAN 总线中消息在固定优先级调度 (FPS) 算法下传输不可预知、低优先级消息容易被阻塞的问题, 提出了一种基于时间触发机制的固定优先级调度 (TT - FPS) 算法, 给出了最糟糕响应时间的计算方法。然后以纯电动汽车消息系统为例进行了 TT - FPS 的性能分析, 验证了 TT - FPS 较 FPS 有更好的性能。

[关键词] CAN 总线; TT - FPS; 最糟糕响应时间

[中图分类号] TP336 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009 - 1742 (2006) 05 - 0045 - 04

目前在 CAN 总线上消息的传输通常采用基于事件触发机制的固定优先级调度算法 (FPS)^[1], 它有额外开销小和实现简单的优点。但是在最差条件下存在着传输不可预知、容错能力差、低优先级消息容易被阻塞、总线负荷不平均等不足。尤其是当系统迸发消息较多, 即在短时间间隔中出现较多的连续消息时, 某些低优先级的消息会由于高优先级消息长时间占用总线而被阻塞, 使得整个系统性能遭到破坏。因此, 提出了基于时间触发机制的固定优先级调度 (TT - FPS) 算法, 可有效地防止消息的阻塞, 使总线负荷均匀分布。

1 TT - FPS 算法

TT - FPS 调度实质上是将时间触发机制引入 CAN 总线, 基于时分多路访问 (TDMA), 将消息的传输分配在特定的时间窗口内完成。TT - FPS 调度运行的前提条件是网络中各个节点达到一定精度的时钟同步, 在系统运行之前, 按照系统消息的截止期用基于表的静态调度算法^[2], 将各个消息分配到矩阵周期中的各个基本周期中 (见图 1), 每个消息按照截止期单调 (DM) 算法^[3]分配消息的优先级。系统运行时, 以主节点发出的同步消息作为基本周期的起始, 被规划在同一基本周期内的消息同时发送, 并按 CAN 总线的自身仲裁机制传输。



图 1 TT - FPS 消息传输结构图

Fig.1 Messages transfer construction of TT - FPS

为实现 TT - FPS, 首先需要对消息的周期进行优化。由于 TT - FPS 中固定优先级调度算法选用的是 DM, 从而消息的截止期可以小于消息周期, 即 $D < T$ 。因此, 将所有消息的周期向下收缩不会影响实时性, 可以使各消息的周期成倍数关系, 为基于表的静态调度的实现带来了极大便利。TT - FPS 将时间轴划分为由基本周期组成的矩阵周期, 矩阵周期是优化后所有消息周期的最小公倍数, 基本周期是优化后所有消息周期的最大公约数。

2 TT - FPS 算法可调度分析

在 TT - FPS 中, 系统的总体性能分析分解到各个基本周期中进行, 各个基本周期中消息的可调度分析方法与固定优先级调度算法类似。

[收稿日期] 2005 - 02 - 02; 修回日期 2005 - 04 - 19

[基金项目] 天津市重大攻关资助项目 (023183611)

[作者简介] 吕伟杰 (1975 -), 女, 石家庄市人, 天津大学博士后

2.1 TT-FPS 算法最糟糕响应时间

消息 m 的最糟糕响应时间 R_m 是指从该消息进入发送节点排队窗口到它被目的节点正确接收所用的最长时间。消息的最糟糕响应时间由消息的抖动时间 J_m 、排队延迟 q_m 和传输延迟 C_m 构成, 即

$$R_m = J_m + q_m + C_m \quad (1)$$

在固定优先级调度算法中 q_m , 包括正在占用总线的低优先级消息的阻塞时间 B_m 和高优先级消息抢占总线的等待延迟 I_m 。对 TT-FPS 而言, 由于同步消息被节点接收后, 处在当前基本周期内的消息会同时发出并竞争总线, 这不仅不会出现固定优先级算法中由于随机发送而引起高优先级消息被低优先级消息所阻塞的问题, 而且每个基本周期内的消息只会被发送一次。于是得到

$$B_m = 0$$

$$I_m = \sum_{j \in \text{hpb}(m)} (C_j + S) \quad S = 3\tau_{\text{bit}} \quad (2)$$

其中 S 为帧间隙时间, τ_{bit} 为每一位的传输时间, 集合 $\text{hpb}(m)$ 只包含了基本周期内优先级高于 m 的消息。扩展帧格式的最糟糕传输时间为^[4]

$$C_m = (8S_m + 67 + [(54 + 8S_m)/4])\tau_{\text{bit}} \quad (3)$$

综合上述公式, 可以得到 TT-FPS 算法下消息 m 的最糟糕响应时间为

$$R_m = J_m + I_m + C_m = J_m + \sum_{j \in \text{hpb}(m)} (C_j + S) + (8S_m + 67 + [(54 + 8S_m)/4])\tau_{\text{bit}}$$

可见在 TT-FPS 算法下消息的最糟糕响应时间有了明显减少, 这是由于时间触发机制的引入使得消息的发送不再是一种随机性的行为, 系统的有序性大大增加, 使消息响应时间的不确定性大为减少。

2.2 总线使用率

在 TT-FPS 调度算法中, 由于对消息系统的消息模型按照基于表的静态调度算法进行过规划以及同步机制的引入, 其带宽利用率会得到提高。设矩阵周期由 k 个基本周期组成, 矩阵周期传输的消息总个数为 n 个, 则矩阵周期总的消息传输时间长度 $t_{\text{TR}} = kC_s + \sum_{m=1}^n C_m$, 其中 C_s 为同步消息传输时间, 因此 TT-FPS 算法的带宽利用率为

$$U_{\text{TT-FPS}} = t_{\text{TR}}/T_{\text{MC}} = (kC_s + \sum_{m=1}^n C_m)/T_{\text{MC}}$$

其中 T_{MC} 为矩阵周期的时间。该算法的最大带宽利用率在理想情况下可以达到 100%, 一般情况下其

总线利用率通常可以达到 80% ~ 90%。而对于通常的 CAN 协议, 为了保证消息传输的正确性和实时性, 在非严格实时的控制系统中, CAN 的带宽利用率通常推荐为 50%, 而在严格实时的控制系统中, 推荐的最大带宽利用率为 20% ~ 30%^[5]。

经上述分析得到 TT-FPS 算法可调度分析的充分条件, 只要系统中任意消息 m 的最糟糕响应时间小于系统的截止期即 $R_m < D_m$, 并且总线利用率 $U_{\text{TT-FPS}} < 1$, 则系统是可调度的。

3 实例分析

3.1 纯电动汽车总线消息模型

纯电动汽车主要包括: 动力总成控制器、电机控制器、动力电池组管理系统和监控终端, 它们之间通过 CAN 总线交换消息。其中电机 ECU 对电机状态进行监测和控制, 电池 ECU 对电池的电气参数和热参数测量, 完成电量计算和安全管理, 两者都向动力总成控制器发送自身的状态参数。动力总成控制器对纯电动汽车系统中的各个环节进行管理、协调和监控, 以提高纯电动汽车整车能量利用效率, 确保车辆的安全性和可靠性。优化后的纯电动汽车的消息传输系统所承载的主要消息如表 1 所示, 其中 $m_1 \cdots m_4$, $m_{12} \cdots m_{13}$ 为动力总成控制器消息, $m_5 \cdots m_8$ 为电机控制器消息, $m_9 \cdots m_{11}$, m_{14} 为动力电池管理系统消息。设传输消息的波特率为 250 kb/s, 按照基于表的静态调度算法对消息进行规划, 确定基本周期的长度, 矩阵周期的长度及每个消息在矩阵周期的传输位置, 静态调度表如表 2 所示。其中基本周期为 10 ms, 矩阵周期为 200 ms。

表 1 纯电动汽车总线消息

Table 1 Bus messages of electric vehicle

消息类型	消息名	周期/ms	截止期/ms	数据/B	
周期性消息	电机控制指令 m_1	10	10	8	
	电池控制指令 m_2	10	10	1	
	驾驶需求 m_3	10	10	8	
	制动踏板 m_4	10	10	4	
	电机状态 1 m_5	50	50	7	
	电机状态 2 m_6	50	50	4	
	电机状态 3 m_7	50	50	7	
	电机故障 m_8	50	50	8	
	电池状态 1 m_9	200	200	8	
	电池状态 2 m_{10}	200	200	6	
	电池故障 m_{11}	200	200	8	
	非周期性消息	整车故障 m_{12}	偶发	200	8
		总线错误 m_{13}	偶发	200	2
		驾驶开关 m_{14}	偶发	200	4

表 2 纯电动汽车总线消息调度表

Table 2 Message scheduling of electric vehicle

序列	m_i	序列	m_i
1	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_{13}$	11	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_{14}$
2	m_1, m_2, m_3, m_4, m_6	12	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_6,$
3	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7	13	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7
4	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8	14	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8
5	m_1, m_2, m_3, m_4, m_9	15	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_{11}$
6	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5	16	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5
7	m_1, m_2, m_3, m_4, m_6	17	m_1, m_2, m_3, m_4, m_6
8	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7	18	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7
9	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8	19	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8
10	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_{10}$	20	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_{12}$

3.2 FPS 与 TT - FPS 性能比较

用开发的 CAN 总线 FPS, TT - FPS 性能分析软件对纯电动汽车消息系统进行可调度分析, 结果如表 3、表 4 所示。可以看出, TT - FPS 总线负载率为 33.56%, 略大于 FPS 的相应值, 是由于加入同步消息所致, 但是消息的响应时间大大减小, 系统冗余度提高到 3.023, 因为 TT - FPS 算法对消息按基本周期进行规划, 避免了消息竞争的无序性。

在开发的 CAN 总线实验系统上, 用 3 个节点分别模拟电动汽车的动力总成控制器、电机控制

表 3 FPS 算法纯电动汽车消息系统性能参数*

Table 3 Electric vehicle messages performance parameter of FPS

消息名	ID	周期 /ms	截止期 /ms	数据 /b	阻塞时间 /ns	传输时间 /ms	等待时间 /ms	响应时间 /ms	允许最大抖动时间/ms	负载率 /%	节点号
驾驶开关	00000003	200	200	4	0.640	0.480	0.640	1.120	198.880	0.240	3
电池控制	08040001	10	10	1	0.640	0.360	1.120	1.480	8.520	3.600	1
制动踏板	08080001	10	10	4	0.640	0.480	1.480	1.960	8.040	4.800	1
总线错误/状态	080D0001	200	200	2	0.640	0.400	1.960	2.360	197.640	4.000	1
电机控制	0C010001	10	10	8	0.640	0.640	2.360	3.000	7.000	6.400	1
驾驶需求	18070001	10	10	8	0.640	0.640	3.000	3.640	6.360	6.400	1
整车故障	180C0001	200	200	8	0.640	0.640	3.640	4.280	195.720	0.320	1
电机状态 1	18100002	50	50	7	0.640	0.600	4.280	4.880	45.120	1.200	2
电机状态 2	18110002	50	50	4	0.640	0.480	5.360	5.360	44.640	0.960	2
电机状态 3	18120002	50	50	7	0.640	0.600	5.960	5.960	44.404	1.200	2
电机故障	18170002	50	50	8	0.640	0.640	6.600	6.600	43.400	1.280	2
电池状态 1	18200003	200	200	8	0.640	0.640	7.240	7.240	192.760	0.320	3
电池状态 3	18220003	200	200	6	0.640	0.560	7.800	7.800	192.200	0.280	3
电池故障	18290003	200	200	8	0	0.640	7.800	7.800	192.200	0.320	3

* 系统总线的平均负载率为 31.32%, 系统冗余度为 2.583

表 4 TT - FPS 算法纯电动汽车消息系统性能参数*

Table 4 Electric vehicle messages performance parameter of TT - FPS

消息名	ID	周期 /ms	截止期 /ms	数据 /b	阻塞时间 /ns	传输时间 /ms	等待时间 /ms	响应时间 /ms	允许最大抖动时间/ms	负载率 /%	节点号
电池控制	08040001	10	10	1	0	0.360	0	0.360	9.640	3.600	1
制动踏板	08080001	10	10	4	0	0.480	0.360	0.840	9.160	4.800	1
电机控制	0C010001	10	10	8	0	0.640	0.840	1.480	8.520	6.400	1
驾驶需求	18070002	10	10	8	0	0.640	1.480	2.120	7.880	6.400	1
电机状态 1	18100002	50	50	7	0	0.600	2.120	2.720	47.280	1.200	2
电机状态 2	18110002	50	50	4	0	0.480	2.120	2.600	47.400	0.960	2
电机状态 3	18120002	50	50	7	0	0.600	2.120	2.720	47.280	1.200	2
电机故障	18170002	50	50	8	0	0.640	2.120	2.760	47.240	1.280	2
驾驶开关	00000003	200	200	4	0	0.480	2.720	3.200	196.800	0.240	3
总线错误/状态	080D0001	200	200	2	0	0.400	2.600	3.000	197.000	0.200	1
整车故障	180C0001	200	200	8	0	0.640	2.720	3.360	196.640	0.320	1
电池状态 1	18200003	200	200	8	0	0.640	2.780	3.400	196.600	0.320	3
电池状态 3	18220003	200	200	6	0	0.560	2.720	3.280	196.720	0.280	3
电池故障	18290003	200	200	8	0	0.640	2.600	3.240	196.760	0.320	3

* 系统总线的平均负载率为 33.56%, 系统冗余度为 3.032

器、动力电池组管理系统, 利用 IXXAT 公司的 USB-to-CAN 智能接口卡与 PC 机相连, 监测总线上传送的全部消息并记录相关信息。在实验系统中分别运行 FPS 算法和 TT-FPS 算法, 从测得的总线负载率可以看出, TT-FPS 算法的总线负载率平稳, 在 29.92% 与 31.04% 之间波动, 而 FPS 则在 26.2% 与 29.44% 之间波动。这是由于消息按照严格时序划分后, 总线上消息分布均匀的结果; 另外 FPS 与 TT-FPS 实测总线平均负载率分别为 28.2% 与 30.56% 均低于理论计算值, 这是由于理论计算值是按最坏情况下得到的。

4 结论

TT-FPS 在基本周期中传送的所有消息不仅在运行前经过了规划, 而且在运行时进入排队窗口的消息在接收到同步消息后才同时竞争总线, 并按优先顺序占用总线。这使得 TT-FPS 具有了消息传输可预知, 实时性强, 带宽利用率高, 总线负载平稳等优点。而且, 当错误产生时能将其限制在某个基本周期内, 不会影响下一个基本周期中消息的传输。随着时间触发通信需求的增长, 具有时间触发方式的总线将在未来汽车网络中起着重要的作用。

TT-FPS 综合了时间触发机制与 CAN 的 MAC 层非破坏性仲裁机制, 是对固定优先级调度的有意义延伸, 在 CAN 总线上将会有很好的应用前景。

参考文献

- [1] Harbour M G, Klein M H, Lehoczky J P. Timing analysis for fixed-priority scheduling of hard real-time systems [J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1994, 20(1): 3~28
- [2] Hong S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1995, 3(2): 225~230
- [3] Tovar E, Vasques F. Non pre-emptive scheduling of messages on SMTV token-passing networks [A]. 12th Euromicro Conference on Real-Time Systems [C], Stockholm, Sweden, IEEE Comput Soc, 2000. 209~218
- [4] Lee H H, Ui-Hum Jeong. Design of distributed scheduler on CAN for real-time networking [A]. Proceedings The Fifth Russian-Korean International Symposium [C]. Tomsk, Russia, IEEE, 2001, (3): 22~25
- [5] Leen G, Heffernan D. TTCAN: a new time-triggered controller area network [J]. Microprocessors and Microsystems, 2002, 26(2): 77~94

Study and Performance Analysis of TT-FPS Based on CAN Bus

Lu Weijie, Liu Luyuan, Wang Yixin

(School of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] Message transmission of CAN bus fixed priority static scheduling algorithm (FPS) is unpredictable, and low priority message is easily blocked. To solve these problems, a new fixed priority scheduling based on time-triggered architecture (TT-FPS) is presented, and the approach for calculating the worst-case response time of TT-FPS is given. The performance analysis of TT-FPS based on electric vehicle message model is given, and the experiment results prove that the TT-FPS is superior to FPS.

[Key words] CAN bus; TT-FPS; the worst-case response time