

柔性时间触发控制器局域网络(CAN)系统 动态规划应用与性能分析*

曹万科 张天侠 闻邦椿 王永富 张超
(东北大学机械工程与自动化学院 沈阳 110004)

摘要: 为满足汽车进一步智能化的需要,同时支持时间触发与事件触发服务兼具设计与调度灵活性成为汽车总线发展的方向,针对当前现有车上控制器局域网络(Controller area network, CAN)总线不能有效处理时间触发的周期性信息,时间触发的控制器局域网络(Time-triggered CAN, TTCAN)协议具有时间触发功能但缺乏信息调度的灵活性等问题,分析基于动态规划的柔性时间触发控制器局域网络(Flexible time-triggered CAN, FTTCAN),研究 FTTCAN 双相基本周期结构。分别推导出双相内基于动态规划调度的信息传输时间特性参数分析方法,并基于 FTTCAN 原理具体设计出纯电动汽车 FTTCAN 总线控制系统。采用动态规划方法设计出信息调度策略,对信息传输特性进行分析及与 CAN 方案对比。最后在 CAN 总线开发系统上进行 FTTCAN 协议运行试验。对比与试验结果验证了采用 FTTCAN 的方案兼具时间触发与事件触发服务功能,且具有较好灵活性特点,是汽车总线系统优化设计的好方法。

关键词: 动态规划 柔性时间触发控制器局域网络 电动汽车 实时分析

中图分类号: U463.5 TP339

Application and Performance Analysis of Dynamic-planning-based Flexible Time Triggered Controller Area Network

CAO Wanke ZHANG Tianxia WEN Bangchun WANG Yongfu ZHANG Chao
(School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract: To meet the requirement of automotive intelligentizing, the next step in the direction of automotive bus is to support both time-and event-triggered communication services and to attain more flexible of design and scheduling. But controller area network (CAN) protocol is inefficient for time-triggered messages, while time-triggered controller area network (TTCAN) can efficiently fulfill joint support for both event- and time-triggered traffic but lacks flexibility in message scheduling. To these questions, a new dynamic planning-based protocol that is flexible in time-triggered controller area network (FTTCAN) is analyzed. And the elementary cycle comprising of two phases and real-time analysis method for communications of messages in the two phases are explained. Then an FTTCAN-bus system of electric vehicle based on FTTCAN protocol is designed, and the scheduling strategy of signals based on dynamic planning is adopted. And performance analysis of the new system is carried out by comparing with CAN system. Finally, operation test of FTTCAN protocol is carried out on CAN bus development system. The comparison and test results verify that FTTCAN is a good way to design automotive bus system, which can meet the requirements of supporting both time-and event-triggered communication services and being flexible in design and scheduling.

Key words: Dynamic planning Flexible time triggered controller area network(FTTCAN) Electric vehicle Real time analysis

0 前言

随着汽车电子化和智能化的提高,汽车总线不仅要能够高速、稳定和正确处理时间触发和事件触

发信息共网实时性通信,还必需具有足够的设计与信息调度灵活性^[1-2],但现有汽车总线系统,即使是被认为最成功的车载总线控制器局域网络(Controller area network, CAN),都未能满足这个要求,有必要进一步研究信息调度机理,寻找更为优化的协议调度方案。

目前车上广泛采用的互连方案是由德国

* 国家自然科学基金(50535010)和沈阳市科技基金(63287-1-00)资助项目。20070620 收到初稿,20080121 收到修改稿

BOSCH 公司等^[3]于 20 世纪 80 年代推出的 CAN 系统，其本质是基于 CSMA 机制，采用优先权竞争处理事件触发信息，但不支持时间触发信息服务^[4]。LEEN 等^[5-6]2004 年前后推出的 TTCAN 协议，采用在 CAN 基础上增加一个基于时分多路复用(TDMA)机制的会话层，为时间触发信息提供了基于系统矩阵的发送管理功能；同时采用 CAN 本身的仲裁机制来传递随机性信息，实现了两种不同触发机制驱动信息的同网共存通信。但在线运行时，其静态表不允许实时更新，限制了新信息的加入与根据应用需求进行信息调度功能，配置灵活性较差^[2]。ALMEIDA 等^[2]则采用了基于动态规划的方案，即柔性时间触发 CAN(FTTCAN)协议，有效解决了通信调度与设计的灵活性问题。基于动态规划原理，本文提出采用 FTTCAN 代替 CAN 构建汽车总线系统，利用动态规划调度汽车系统信息通信，并给出性能分析方法，经过分析对比与硬件系统试验验证了该方案兼具时间与事件触发服务且同时具有较大调度与设计灵活性。

1 时间触发的控制器局域网 (Time-triggered CAN, TTCAN)协议

FTTCAN 在 1998 年于西班牙召开的第 19 届 IEEE 实时系统国际年会上被首次提出便受到极大关注^[2]。

1.1 原理

FTTCAN 可以理解为基于动态规划的时间触发协议，FTTCAN 在时间同步与主节点容错机制等方面与 TTCAN 完全相同，其基于动态规划的双相基本周期，不再基于静态表^[5]，而是对如图 1 所示的基本周期(T_{EC})进行动态规划调度。基本周期由时间意义上的主节点发送触发信息(M_{TR})启动，到下一次触发信息出现截止，其长度为 T_{EC} 。触发信息窗(大小为 T_{Tri})后的时间段被划分为两个大的窗口：长度为 T_A 的异步相和长度为 T_S 的同步相，如图 1， M_{Ai} 与 M_{Si} ，其中 $i \in \{a, b, c\}$ 分别表示异步相内随机性信息和同步相内周期性信息。两相之间保留长度为 T_α 的空闲时间段 α ，且各类信息严格在各自相内进行传输^[2]。

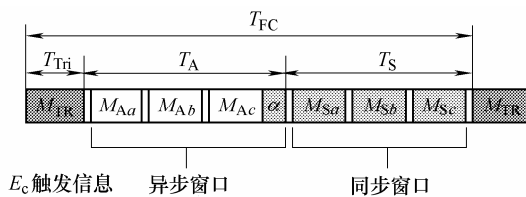


图 1 FTTCAN 的基本周期

基本周期动态规划的具体实现由主节点发送的触发信息数据域内的数据编码完成，如图 2 所示。

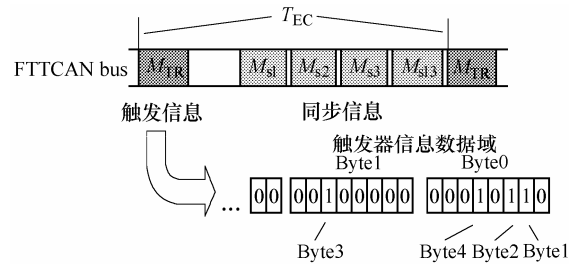


图 2 基本周期触发信息数据域

在时间同步的基础上，FTTCAN 系统中除主节点(包括后备主节点)之外的各节点仅保留与自身有关的生产者/消费者(P/C)信息表，各个节点在接收到触发信息后，读取其数据域内的数据进行解码，搜索各自的 P/C 信息表，等待进入同步相后立即进行周期性信息的申请发送，各节点间的冲突仍采用 CAN 本身的 MAC 仲裁机制解决。

与此同时，随机性信息可以在异步相内基于事件触发进行随机性通信，冲突的解决与同步相相同。异步相位于同步相前保证了各节点能够及时解码触发信息，且解码的同时可以传送随机性信息以提高带宽。

FTTCAN 中负责调度的触发信息数据域内容，由驻留于主节点的另一个表即同步需求表(T_{SRT})管理。同步需求表属性为

$$T_{SRT} = \{M_{Si}(L_{Di}, T_{Ci}, P_{hi}, T_i, T_{Di}, P_i), i = 1, \dots, N_S\}$$

对于同步信息 M_{Si} ， L_{Di} 为数据长度， T_{Ci} 为最大传输时间， P_{hi} 为相对相位， T_i 为发送周期， T_{Di} 为截止期限， P_i 为优先级。

1.2 实时性分析

FTTCAN 在两相内仍采用 CAN 自身的 MAC 仲裁机制，系统信息的通信实时性沿用原有的方法进行分析。

对于任意基本周期 n ，FTTCAN 可调度的必要条件^[2]满足

$$T_{Tri} + T_S + T_A \leq T_{EC} \tag{1}$$

各信息的实时性参数须满足^[7]

$$T_R \leq T_D - T_J \tag{2}$$

对于任意信息的通信， T_R 为最坏响应时间， T_D 为截止期限， T_J 为软件发送抖动。

1.2.1 同步相内周期性信息

假设周期性信息总集合为 S ，第 n 个基本周期内被规划周期性信号的子集合 $S(n) \subset S$ ，则对于周期性信息 i 的最坏响应时间 T_{SRTi} 计算公式^[8-9]为

$$T_{SRi} = T_{SBi} + T_{SWi} + T_{SCi} \quad (3)$$

对于周期性信息 i , T_{SBi} 为阻塞时间, T_{SWi} 为等待较高优先级信息传输的时间, L_{Si} 为信息的数据长度, T_{SCi} 为最坏情况下的传输时间。

最坏条件下各时间参数计算^[8]如式(4)所示

$$\begin{cases} T_{SCi} = 8L_{Si} + g + 10 + \left\lfloor \frac{g + 8L_{Si} - 1}{4} \right\rfloor \\ T_{SBi} = 0 \\ T_{SWi} = \sum_{j \in hp(i) \subset S(n)} (T_{CSj} + 3\tau_{bit}) \end{cases} \quad (4)$$

式中 $\lfloor x/y \rfloor$ 表示对 x 除以 y 的商进行去尾取整运算, 下同; g 为帧格式管理位, $g \in \{34, 54\}$ 。

1.2.2 异步相内随机性信息

异步相内随机性信息的行为无法事先规划, 在分析时需要考虑最坏情况(即所有的随机性信息同时出现), 设随机性信息集合为 A , 对于随机性信息 i , 最坏响应时间^[8-9]

$$T_{ARi} = T_{ABi} + T_{AWi} + T_{ACi} \quad (5)$$

式中 T_{ABi} 为阻塞时间, T_{AWi} 为等待较高优先级传输时间, L_{Ai} 为信息的数据长度。同理, 时间参数计算如式(6)所示

$$\begin{cases} T_{ACi} = 8L_{Ai} + g + 10 + \left\lfloor \frac{g + 8L_{Ai} - 1}{4} \right\rfloor \\ T_{ABi} = T_{\alpha} + T_{Si} + T_{Trii} \\ T_{AWi} = \sum_{\forall j \in hp(i) \subset A} (T_{ACj} + 3\tau_{bit}) \end{cases} \quad (6)$$

1.3 网络带宽利用率

FTTCAN 的网络带宽利用率由触发信息、所有周期性信息和随机性信息的带宽占用率之和描述^[5, 9]。令随机性信息周期为两次连续触发时刻之间最小时间间隔(T_{min}), 得网络带宽峰值

$$U_{FTTCAN} = \frac{T_{Tri}}{T_{EC}} + \sum_{\forall i \in S} \frac{T_{SCi}}{T_i} + \sum_{\forall j \in A} \frac{T_{ACj}}{T_{minj}} \quad (7)$$

2 实例分析

2.1 纯电动汽车总线信息模型

由文献[9]中纯电动汽车消息模型, 总线系统主要包括: 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。三大系统之间通过总线系统互连, 具体的通信的信息如表 1 所示。

2.2 FTTCAN 总线系统设计

根据 FTTCAN 协议, 本文设定动力总成控制器为系统时间意义上的主节点, 其他节点为从节点,

表 1 纯电动汽车总线信息

消息类型	消息名称	编号	周期 T/ms	截止期 T_D/ms	数据长度 L_D/B	
周期性消息	电动机控制指令	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	
	电动机状态 1	m_5	50	50	7	
	电动机状态 2	m_6	50	50	4	
	电动机状态 3	m_7	50	50	7	
	电动机故障	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	
	非周期消息	整车故障	m_{12}	偶发	200	8
		总线故障	m_{13}	偶发	200	2
		驾驶开关	m_{14}	偶发	200	4

得节点的 P/C 信息表如表 2 所示。

表 2 节点的 P/C 信息表

电动机控制器	动力电池管理系统	动力总成控制器
电动机状态 1 m_5	电池状态 1 m_9	电动机控制指令 m_1
电动机状态 2 m_6	电池状态 2 m_{10}	电池控制指令 m_2
电动机状态 3 m_7	电池故障 m_{11}	驾驶需求 m_3
电动机故障 m_8	—	制动踏板 m_4

主节点动力总成控制器内的同步需求表 T_{SRT} 负责动态规划 3 个节点周期性信息的传输。设置网络波特率为 250 kB/s, 由构建系统矩阵的算法确定基本周期长度为 10 ms, 采用触发信息的标号 m_{Tri} 作为周期性信息相对相位 P_{bi} 的值。主节点在发送标号为 m_{Tri} 的触发信息前搜索 T_{SRT} , 把相对位与 m_{Tri} 相同的信息安排在本次基本周期同步相内传送。由此可得周期性信息传输时间分布如表 3 所示。系统按照表 3 动态调度循环运行, 周而复始。

表 3 FTTCAN 中 T_{SRT} 的动态规划信息分布表

基本周期序列			基本周期序列		
触发号	异步相	同步相	触发号	异步相	同步相
$m_{Tri 1}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5	$m_{Tri 11}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5
$m_{Tri 2}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_6	$m_{Tri 12}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_6
$m_{Tri 3}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7	$m_{Tri 13}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7
$m_{Tri 4}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8	$m_{Tri 14}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8
$m_{Tri 5}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_9	$m_{Tri 15}$	A	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_{11}$
$m_{Tri 6}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5	$m_{Tri 16}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_5
$m_{Tri 7}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_6	$m_{Tri 17}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_6
$m_{Tri 8}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7	$m_{Tri 18}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_7
$m_{Tri 9}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8	$m_{Tri 19}$	A	m_1, m_2, m_3, m_4, m_8
$m_{Tri 10}$	A	$m_1, m_2, m_3, m_4, m_{10}$	$m_{Tri 20}$	A	$m_1, m_2, m_3, m_4,$

2.3 FTTCAN 网络实时性分析

采用实时性分析软件分别得到 FTTCAN 和 CAN 协议下的信息通信时间参数对比如表 4。

表4 FTTCAN与CAN信息实时性分析结果对比

消息名	ID	周期 T /ms	截止期 T_D /ms	数据 L_D /B	传输时间 T_C /ms		最坏响应时间 T_W /ms		软件抖动裕度 T_R /ms		节点号
					CAN	FTTCAN	CAN	FTTCAN	CAN	FTTCAN	
电机控制	0C010001	10	10	8	0.628	0.628	2.988	1.468	7.012	8.532	1
电池控制	08040001	10	10	1	0.348	0.348	1.468	0.348	8.532	9.652	1
驾驶需求	18070001	10	10	8	0.628	0.628	3.628	2.108	6.372	7.892	1
制动踏板	08080001	10	10	4	0.468	0.468	1.948	0.828	8.052	9.172	1
电机状态1	18100002	50	50	7	0.588	0.588	4.868	2.708	45.132	47.292	2
电机状态2	18110002	50	50	4	0.468	0.468	5.348	2.588	44.652	47.412	2
电机状态3	18120002	50	50	7	0.588	0.588	5.948	2.708	44.052	47.292	2
电机故障	18170002	50	50	8	0.628	0.628	6.588	2.748	43.412	47.252	2
电池状态1	18200003	200	200	8	0.628	0.628	7.288	2.748	192.712	197.252	3
电池状态2	18220003	200	200	6	0.548	0.548	7.788	2.668	192.212	197.332	3
电池故障	18290003	200	200	8	0.628	0.628	7.800	2.748	192.200	197.252	3
整车故障	180C0001	偶发	200	8	0.628	0.628	4.268	4.668	195.732	195.332	1
总线故障	080D0001	偶发	200	2	0.388	0.388	2.348	4.028	197.652	195.972	1
驾驶开关	00000003	偶发	200	4	0.468	0.468	1.108	3.628	198.892	196.372	3

由表3可知：FTTCAN比CAN中11个周期性信息的最坏响应时间有了明显缩短，软件抖动裕度增加，系统稳定性得到增强，周期性信息在最坏情况下的发送时刻延时也有了显著改善。如图3所示，从而确保了周期性信号的时间特性；FTTCAN较之CAN中3个随机性信息的最坏传输时间略大，但增量最大值2.52ms远小于其截止期200ms，随机性信息的实时延迟裕度 T_R 均接近延迟期限，如图4所示，信息传输的实时性得到充分保证。

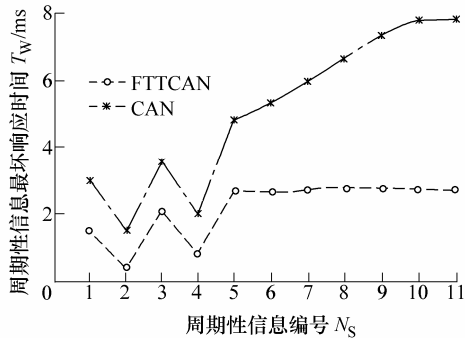


图3 11个周期性信息的最坏发送时刻延时特征

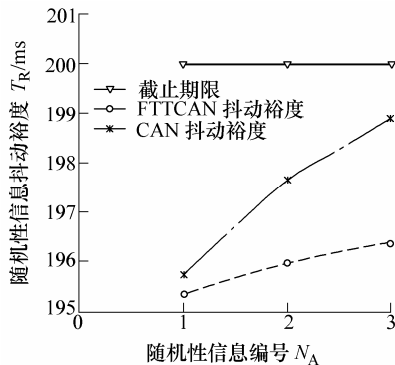


图4 三个随机性信息的实时延迟裕度

网络带宽峰值计算，考虑最坏情况下根据式(7)得：CAN总线为26.91%，FTTCAN为30.79%。

3 FTTCAN系统仿真运行与台架试验

采用图5所示的CAN总线开发试验系统，对设计的FTTCAN系统信息的动态调度进行仿真运行与台架试验。三个内部集成CAN通信控制器的MCU(P87C591)节点分别模拟电动机控制系统、动力电池管理系统和动力总成控制器；在PC机上利用VECTOR公司的CANoe集成开发环境测试与监控总线的活动^[10-11]。

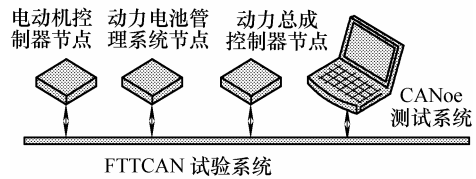


图5 FTTCAN 试验系统

波特率设为250kB/s。随机性信息按最小时间间隔需求进行发送，则总线系统从起始到稳定状态的统计曲线如图6、7所示。

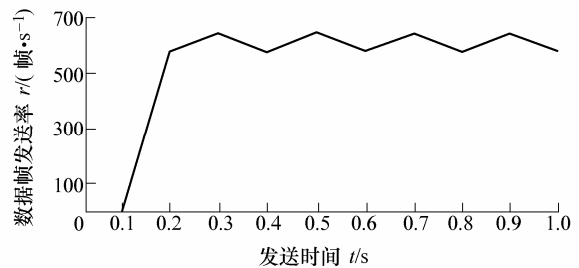


图6 总线的信息平均发送率

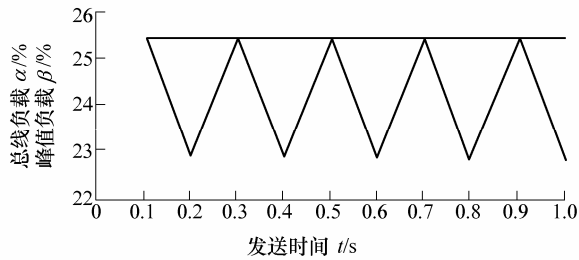


图 7 总线的负载及负载峰值曲线

如图 6 实测发送率在 580 与 640 帧/s 之间波动, 平均发送率为 610 帧/s, 与理论设计值完全相同。如图 7 实测负载率在 22.94% 与 25.53% 之间波动, 实测负载峰值 25.53% 小于理论计算值 30.79%, 这是因为理论值是按最坏情况计算的。

4 结论

(1) FTTCAN 协议能够满足时间触发和事件触发信息同网共存需求, 为汽车电子控制系统的进一步综合化、集成化提供了合理互连方案。

(2) FTTCAN 协议具有通信信息动态规划调度功能, 能够灵活实现双相内信息的实时传输, 同时可以根据应用需求, 灵活调节双相的相对长度。

(3) FTTCAN 系统在增加节点或去除节点时, 由于各节点仅保留自身相关信息的调度表, 因此只要改变调度节点的动态调度需求表, 即可实现改变, 具有系统配置、改良适应灵活性好, 系统维护、升级性价比高等特点。

(4) FTTCAN 能与当前 CAN 系统理想兼容, 可充分利用当前车辆的 CAN 网络系统。

(5) 随着电子控制技术的推广, 总线系统正越来越多应用于车辆、机床等与国民经济相关的机械工程系统, 随着应用系统的综合性提高, 作为集成系统的通信基础, 总线系统既要功能完善, 配置灵活, 同时也要保证系统的稳定与安全, 特别是对于汽车、机床以及大型医疗设备如智能 CT 机等, 与人身安全严格相关且关乎重大经济价值的重要机电一体化系统, 控制系统的不稳定性导致的损失尤其惨重。因此有关 FTTCAN 在应用中稳定与安全性方面的保障工作还有待作进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] CENA G, VALENZANO A, VITTURI S. Advances in automotive digital communications[J]. Computer Standards & Interfaces 2005, 27: 665-678.
- [2] ALMEIDA L, PEDREIRAS P, ALBERTO J G. The FTTCAN Protocol: Why and How[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2002 49(6): 1 189-1 201.

- [3] The International Organization for Standardization, TC 22/SC 3/WG 1. ISO/CD 11898 Road Vehicles—Interchange of Digital Information—Controller Area Network (CAN) for High—Speed Communication[S]. Geneva: ISO, 1995.
- [4] KOPETZ H. A comparison of CAN and TTP[J]. Annual Reviews in Control, 2000, 24: 177-188.
- [5] LEEN G, HEFFERNAN D. TTCAN: a new time-triggered controller area network[J]. Microprocessors and Microsystems, 2002 26: 77-94.
- [6] The International Organization for Standardization, TC 22/SC 3/WG 1. ISO/CD 11898-4 Road vehicles—Controller area network (CAN) — Part 4: Time—Triggered communication[S]. Geneva: ISO, 2004.
- [7] TINDELL K, BURNS A, WELLINGS A J. Calculating controller area network (CAN) message response times[J]. Control Eng. Practice, 1995, 3(8): 1 163-1 169.
- [8] NOLTE T, HANSSON H, NORSTRÖM C. Probabilistic worst-case response-time analysis for the controller area network[C]//The Institute of Electrical and Electronics Engineers. Computer Society Technical Committee. The 9th IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, may 27-30, 2003, Toronto, Canada. New York: IEEE, 2003: 200-207.
- [9] 吕伟杰, 刘鲁源, 王毅新. 基于 CAN 总线的 TT-FPS 调度算法研究及其性能分析[J]. 中国工程科学, 2006, 8(5): 45-48.
LV Weijie, LIU Luyuan, WANG Yixin. Study and performance analysis of TT-FPS based on CAN bus[J]. Chinese Engineering Science, 2006, 8(5): 45-48.
- [10] 郭宽明. 现场总线技术应用选编 2[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
WU Kuanming. Part 2 of fieldbus technology applications [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2004.
- [11] 陈益平, 胡德安, 邓子飞, 等. 基于 CAN 总线的电阻焊网络控制系统[J]. 机械工程学报, 2006, 42(4): 147-151.
CHEN Yiping, HU Dean, DENG Zifei, et al. Resistance welding network control system based on CAN bus[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(4): 147-151.

作者简介: 曹万科, 男, 1980 年出生, 博士研究生。主要研究方向为基于 CAN 总线的汽车电子化与智能化技术, 发表论文 10 余篇。

E-mail: wankecao10000@sina.com.cn

张天侠, 男, 1945 年出生。教授, 博士生导师。主要研究方向为汽车系统动力学与智能控制系统。

闻邦椿, 男, 1930 年出生, 教授, 中国科学院院士。主要研究方向为机械系统动力学与机械电子工程等。