

混合动力汽车 CAN 网络优先级动态分配方法*

张利¹ 王跃飞^{1,2} 严刚³ 韩江洪² 张建军²

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 合肥 230009;
3. 江淮汽车股份有限公司, 合肥 230009)

【摘要】 在混合动力汽车网络结构和消息实时性分析的基础上,将最早截止期优先算法(EDF)引入到网络集成协议设计中,提出基于 EDF 调度的优先级分配策略,给出了实现该策略的非均匀分区编码方法及可调度判定条件,指出了该判定条件下的分区因子无关性。仿真结果表明该方法能够满足截止期变化范围较大的 CAN 消息集传输要求,使网络具有较高的利用率。

关键词: 混合动力汽车 CAN 总线 动态优先级 最早截止期优先算法 截止期编码

中图分类号: U463.61; TP273+.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0020-04

Method of Priority Dynamic Distribution of CAN Network in HEV

Zhang Li¹ Wang Yuefei^{1,2} Yan Gang³ Han Jianghong² Zhang Jianjun²

(1. School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China
2. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Hefei 230009, China 3. Anhui JAC Automobile Co., Ltd., Hefei 230009, China)

Abstract

Designing message priority is one of the key problems in terms of CAN network integrating in hybrid electric vehicle (HEV). Based on the analysis of structure of automotive network and real-time of message, the EDF algorithm was introduced into the design of system integrating, and the policy of priority designing based on EDF was built. Furthermore, the non-uniform code method and its schedulability condition were described, and the conclusion that before it was presented the partition factor had nothing to do with the schedulability was put forward. The result of the simulation indicated that the method could not only schedule the message set in which the deadline changed a large-scale range, but also had the low network utilization.

Key words Hybrid electric vehicle, CAN bus, Dynamic priority, Earliest deadline first scheduling, Deadline encoding

引言

CAN 总线因具有可靠性高、抗干扰能力强、实时性好等优点,被广泛应用于混合动力汽车(hybrid electric vehicle,简称 HEV)中。常用 CAN 协议只规定了 OSI 模型中的物理层和数据链路层功能,HEV 生产商需要制定各自的应用层规范来满足电控系统集成需要。由于 CAN 消息优先级直接决定着传

输的实时性与可靠性,因此它的分配是整车集成协议制定的关键内容之一^[1~2]。目前集成协议中消息优先级大多是静态优先级,主要是依据经验或者是速率单调(RM)等静态调度算法进行分配的。这些方法灵活性不足,网络利用率较低。

本文提出一种面向整车集成协议的 EDF 动态优先级分配方法,给出基于非均匀分区的编码实现方法。

收稿日期: 2010-11-15 修回日期: 2011-01-04
* 国家自然科学基金资助项目(60873003)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070359028)和广东省教育部产学研结合项目(N2008B090500226)
作者简介: 张利,教授,主要从事机电一体化、网络控制系统研究,E-mail: 77zhangli@hfut.edu.cn

1 CAN 网络及其数据实时性

针对国内某款自主品牌的 HEV 系统的控制需要,构建 7 个电控单元 (ECU) 控制节点,并通过 CAN 网络相互连接,该车的整车 CAN 网络结构如图 1 所示。根据系统分层控制的原则,VMS 模块根据控制策略发送指令给各个系统,同时 VMS 模块接收各个模块反馈信息,以获得整车实际运行状态。各个模块之间也通过 CAN 网络共享信息。各个子模块以及模块之间需要传输大量的实时信息和数据^[2]。例如,VMS 与各个子模块之间的通信信息如表 1 所示。

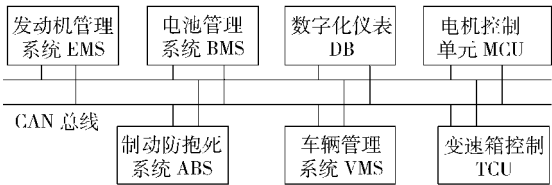


图 1 HEV 中的 CAN 网络结构
Fig. 1 CAN network in HEV

表 1 VMS 与各个子模块通信的信息

Tab.1 Communication information between VMS with each sub-module

通信方向	发送模式	通信方向	发送模式
EMS1→VMS	周期发送	MCU→VMS	周期发送
ABS1→VMS	周期发送	VMS→MCU	周期发送
ABS2→VMS	周期发送	VMS→DB	周期发送
BMS1→VMS	周期发送	VMS→EMS	中断触发
BMS2→VMS	周期发送	VMS→ABS	周期发送
TCU1→VMS	中断触发	VMS→TCU	中断触发
TCU2→VMS	中断触发	VMS→BMS	周期发送
EMS2→VMS	周期发送	VMS→VMS	周期发送

根据整车通信特点,可将 HEV 中的信息分为:报警信息(如 VCU 的报警信息)、控制信息(如 ECU 的控制命令信息)、广播信息和状态信息(如发动机工作温度、转速、转矩)。报警信息是出现紧急情况时发出的,因此实时性要求最高,必须在规定时间内发送成功。控制信息实时性要求次之,广播信息再次之,状态信息最低。

2 CAN 集成协议设计与 EDF 调度

为保证消息传输的实时性,CAN 消息的优先级分配是整车集成协议设计的重要内容。整车网络集成协议是网络中各电控系统协同工作的基础,它定义了常用物理参数的格式,包括数据长度、分辨率、取值范围和类型。物理参数包括控制参数(如发动

机转速)、驱动状态参数(如发动机状态)、驱动系控制(如转矩控制)、驱动系配置参数(如变速器配置)、信息参数(如发动机温度)、信息状态参数(如驻车制动力开关位置)^[3]。本文制定了 HEV 通信矩阵,如表 2 所示的 VMS 与 BMS 之间通信报文。

表 2 VMS 与 BMS 报文

Tab.2 Message between VMS with BMS

相关参数		数据域内容	
帧发送方	BMS	Byte 1	保留
帧接收方	VMS	Byte 2	充电状态
标识符 ID	可变区	Byte 3	电池电流
	固定区	Byte 4	保留
通信周期/ms	300	Byte 5	电池电压
数据帧类型	标准帧	Byte 6	最大放电量
数据域长度/Byte	8	Byte 7	最大充电量
		Byte 8	保留

根据 CAN 协议特点,各消息的优先级主要体现在 ID 上。本文将报文 ID 划分为两个部分,分别为固定分区和可变分区,如图 2 所示。固定分区中包括消息类型和帧标识符。消息实时性要求越高,消息类型值越小,帧标识符被节点用来标识和过滤消息。可变区中放入的是消息截止期编码,根据 EDF 算法动态变化。

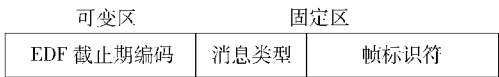


图 2 CAN 标识符区
Fig. 2 Identifier of CAN

由于消息在网络传输中不能被终止,EDF 算法使用时需要考虑不可抢占带来的阻塞问题^[4-6]。设任何消息可以用四元组 $\{T, e, d, D\}$ 来表示,其中 T 为传输周期, e 为传输时间, d 和 D 分别为相对截止期, $T = D$ 。则对于一组使用非抢占 EDF 算法分配优先级的消息集合能否满足实时性要求,可用下面引理来判定。

引理 n 个周期性的消息 $M_1, M_2, \dots, M_N$ 传输,如果满足不等式

$$\sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j} + \frac{b_i}{T_i} \leq 1 \quad (i=1,2,\dots,n) \tag{1}$$

则每个消息都可在各自截止期内被传输完毕。式中 b_i 是消息 i 因为传输不可抢占而导致的最大阻塞时间。

在网络传输过程中,每隔一固定时间重新计算消息的相对截止期 $J = d - T_{sl}$ 后更改 ID 的可变分区,其中 T_{sl} 为每次仲裁开始时刻。由于 CAN 标识符位数有限,如果利用传统平均分区编码法对于该截止期编码,其表示范围难以满足实际需要。为扩

大表示范围,本文采用了非均匀分区编码方法。

3 非均匀分区编码方法

3.1 截止期不均匀分区编码

设 a 是分区因子(a 为整数), $J_{\max}$ 为最大的当前相对截止期,整个区间分成 $k+1$ 个大区间,如图3所示。如果从第1区开始每个大区都被等分成 q 个子区(编号为 $0, 1, \dots, q-1$),则系统将有 $1+kq$ 个优先级。这些优先级如果能够在 CAN 帧中完全被表示出来,则需 $2^m \geq (1+kq)$ 成立,其中 m 是 CAN 消息帧中可变分区的位数。

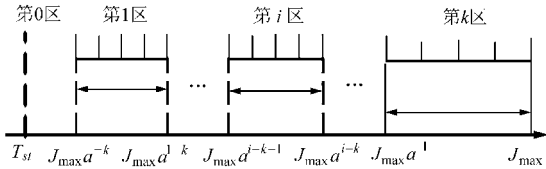


图3 截止期不均匀分区

Fig.3 Uneven partition of the deadline

在整个分区中,第0个分区为 $[0, J_{\max} a^{-k}]$,第1个分区为 $(J_{\max} a^{-k}, J_{\max} a^{1-k}]$,第 k 个分区为 $(J_{\max} a^{i-1}, J_{\max}]$ 。依此类推,第 i ($1 \leq i \leq k$) 个分区可以表示为 $(J_{\max} a^{i-k-1}, J_{\max} a^{i-k}]$ 。显然,第 i 个分区各子区大小 $U_i = (a-1)J_{\max}/(a^{k-i+1}q)$ 。

设当前相对截止期小于 $J_{\max} a^{-k}$ 消息的优先级均为0,则计算任意当前相对截止期为 J_b ($J_b > J_{\max} a^{-k}$) 消息的优先级 p 时,需要找到该截止期对应的分区及子区。假设 J_b 落入到第 i 区中,则该优先级计算步骤为:

(1) 计算 J_a 所对应的分区号 i 。由于 J_b 在第 i 区中,则必有 $J_{\max} a^{i-k-1} < J_b \leq J_{\max} a^{i-k}$ 成立。整理该不等式,可计算出

$$i = k - \left\lfloor \log_a \frac{J_{\max}}{J_b} \right\rfloor \quad (a^{-k} J_{\max} < J_b \leq J_{\max}) \quad (2)$$

其中, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为下限取整函数。

(2) 计算 J_b 所对应第 i 分区中的子分区号 h 。因为子分区大小 U_i 容易计算,因此有

$$h = \left\lfloor \left(J_b - \frac{J_{\max}}{a^{k-i+1}} \right) / U_i \right\rfloor = \left\lfloor \frac{J_b a^{k-i+1} - J_{\max}}{(a-1)J_{\max}} \right\rfloor q \quad (3)$$

(3) 计算 J_b 所对应的优先级 p ,并将其映射成可变分区中标识符。根据前两步结果,可有

$$p = iq + \left\lfloor \frac{J_a a^{k-i+1} - J_{\max}}{(a-1)J_{\max}} \right\rfloor q \quad (4)$$

3.2 误差分析

采用上述不均匀分区编码,存在着量化误差。设任意消息的相对截止期落入第 i 区 ($J_{\max} a^{i-k-1}, J_{\max} a^{i-k}$) 中,子区间大小 $U_i = (a-1)J_{\max}/(a^{k-i+1}q)$

是最大的编码误差。显然该误差随着分因子 a 的变化而变化。因此需要研究分析 a 的选取对 EDF 调度的影响。

令 $Z_i = U_i/T_i, Z_j = U_j/T_j$, 则有

$$\sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j - U_j} + \frac{b_i}{T_i - U_i} = \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j(1-Z_j)} + \frac{b_i}{T_i(1-Z_i)} \quad (5)$$

因 $T_i > J_{\max}/a^{k-i+1}, T_j > J_{\max}/a^{k-j+1}$,可验证 $Z_j \leq 3/q, Z_i \leq 3/q$,故可知

$$\sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j(1-Z_j)} + \frac{b_i}{T_i(1-Z_i)} < \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j(1-3/q)} + \frac{b_i}{T_i(1-3/q)}$$

$$\text{如有} \quad \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j(1-3/q)} + \frac{b_i}{T_i(1-3/q)} \leq 1 \quad (6)$$

$$\text{则} \quad \sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j - U_j} + \frac{b_i}{T_i - U_i} \leq 1 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

根据引理可知,该消息使用 EDF 算法是可调度的。也就是说,只要满足条件

$$\sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j} + \frac{b_i}{T_i} \leq (1-3/q) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

则不均匀分区编码能够保证消息在截止期内被传输,而与分区因子 a 及编码误差没有关系。因此,式(8)也可以作为 EDF 算法使用非均匀编码的可调度性判定条件。

4 试验仿真

利用 Vector 公司 CANoe 对图1所示的7个电控单元(ECU)网络进行仿真。每个 ECU 采用 CANoe 的通信访问编程语言 CAPL (communication access programming language) 编程来实现。设 CAN 网络传输速率为 250 kb/s,传输使用标准帧,数据域长度为 8 Byte,EDF 平均及非均匀分区因子均为 2。

选取 HEV 的一组 CAN 消息作为 CANoe 仿真对象,它们分别是 $\{(EMS4(10 \text{ ms}), TCU1(16 \text{ ms}), ABS(20 \text{ ms}), VMS1(40 \text{ ms}), BMS3(80 \text{ ms}), MCU1(160 \text{ ms}), DB(640 \text{ ms})\}$, $()$ 内为消息周期。如果采用平均分区编码,则各消息的最大编码及相应可变分区位数为 $\{5, 8, 10, 20, 40, 80, 320\}$ 和 $\{3, 3, 4, 5, 6, 7, 9\}$ 。采用本文非平均分区编码,则各消息的最大编码及相应可变分区位数 $\{4, 7, 8, 12, 14, 20, 28\}$ 和 $\{2, 3, 3, 4, 4, 5, 5\}$ 。由此可见,非均匀编码的截止期表示空间较大,它最多只需 5 位标识符即可满足要求,而平均分区编码需要 9 位标识符才能满足要求。同时平均分区编码的截止期分辨率是固定的,而不均匀分区编码的截止期分辨率是变化的。

对于较小的截止期,显然其有更好的截止期分辨率。

在一个超周期内,各个信息网络传输的最大响应时间和网络利用率如图4所示。从图中可知,消息的最大响应时间分别为{0.54,1.08,1.62,2.16,2.70,3.24,3.78}。所有消息响应时间均没有超过其截止期,因此该消息集是可以调度的,即均可在其截止期内完成传输,网络传输的实际情况如图5所示。而利用式(8)进行计算可以得出

$$\sum_{j=1}^n \frac{e_j}{T_j} + \frac{b_i}{T_i} \leq 0.25 \quad (i=1,2,\cdots,n)$$

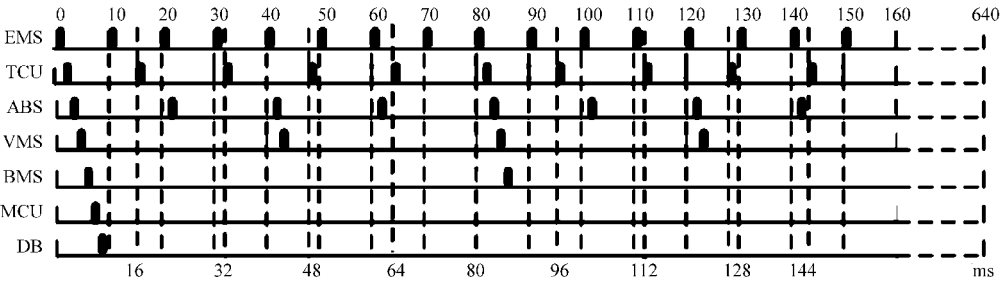


图5 消息的传输时序

Fig.5 Time sequence of message transmission

可判定消息集合是可调度的。因此在集成协议制定时,可利用该条件调整消息周期等参数来确保各消息传输的实时性。

图4中还列出了各消息的网络利用率,分别为{0.0540,0.0338,0.0270,0.0135,0.0068,0.0034,0.0008}。网络利用率之和为0.1393,考虑到不可抢占带来的阻塞因素

$$\max \left(\frac{b_i}{T_i} \right) = 0.054$$

根据式(8)有网络利用率尚有空闲5.67%,因此网络协议集合中可进一步增加消息。但值得注意的

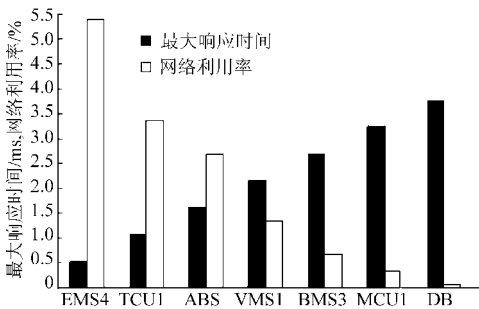


图4 响应时间与网络利用率

Fig.4 Response time and network utilization

是,式(8)判定条件是充分条件,而非必要条件。即当该判定条件不能成立时,该判定条件失效,一般可以通过仿真试验或其他方法来验证消息集合是否可调度。在实际应用中,不能因式(8)条件不成立,就判定消息集合为不可调度集合。

5 结束语

针对混合动力汽车中CAN网络内传输数据量大、实时性要求高等特点,研究了HEV网络集成协议,提出了协议设计中消息优先级动态分配及编码方法,并基于网络可调度性分析了该编码方法的误差。

参 考 文 献

1 张杰,阳富民,卢炎生. EDF 实时调度算法中的关键问题求解[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2009,37(10):2~4.
Zhang Jie, Yang Fumin, Lu Yansheng. Solving a key problem of EDF scheduling algorithm [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 37(10):2~4. (in Chinese)

2 王跃飞,张伟伟,严刚,等. CAN 消息的动态调度截止期选取研究[J]. 合肥工业大学学报,2010,33(5):644~651.
Wang Yuefei, Zhang Weiwei, Yan Gang, et al. EDF scheduling coding in CAN network [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2010, 33 (5): 644~651. (in Chinese)

3 张新波. 燃料电池汽车动力系统网络通信协议的实现[D]. 上海:同济大学,2004.
Zhang Xinbo. Research of network, bus and communication protocol of fuel cell vehicle [D]. Shanghai: Tongji University, 2004. (in Chinese)

4 李芳,张俊智,王丽芳,等. 电动汽车动力总成系统控制器局域网(CAN)总线通信协议[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5):102~107.
Li Fang, Zhang Junzhi, Wang Lifang, et al. Controller area network for powertrain system of electric vehicle [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5):102~107. (in Chinese)

态模拟及水量平衡计算。应用 SWAP 模型对六道沟流域 4~10 月坡耕地(豆地)、长芒草地和苜蓿草地水分传输过程模拟结果表明,3 种植被类型利用方式下 SPAC 系统中水分的收入均为 401.3 mm,而坡耕地、长芒草地和苜蓿草地的水分支出分别为 304.7、401.2 和 420.3 mm。苜蓿草地的水分支出是

坡耕地的 1.38 倍,其中苜蓿的蒸腾耗水量是坡耕地绿豆蒸腾耗水的 3.88 倍,这是引起苜蓿草地群落过度消耗土壤储水而呈现负补偿现象的主要原因。可见,农地退耕后还林还草后会增加 SPAC 系统水分支出,如果植被群落耗水过大很可能使土壤干化。

参 考 文 献

- 1 陈洪松,邵明安,王克林. 黄土区荒草地和裸地土壤水分的循环特征[J]. 应用生态学报,2005,16(10):1 853~1 857.
Chen Hongsong, Shao Ming'an, Wang Kelin. Water cycling characteristics of grassland and bare land soils on Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(10):1 853~1 857. (in Chinese)
- 2 Li Yushan, Huang Mingbin. Pasture yield and soil water depletion of continuous growing alfalfa in the Loess Plateau of China [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2008, 124(1~2):24~32.
- 3 Kimura Reijin, Fan Jun, Zhang Xingchang, et al. Evapotranspiration over the grassland field in the Liudaogou basin of the Loess Plateau, China [J]. Acta Oecologica, 2006, 29(1):45~53.
- 4 苏宏新,桑卫国. 宏观植物生态模型的研究现状与展望[J]. 植物生态学报,2002,26(增刊1):98~106.
Su Hongxin, Sang Weiguo. Review on the current state and future development of the macro-scale plant ecological models [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2002, 26(Supp.1):98~106. (in Chinese)
- 5 余冬立,邵明安,俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. 农业机械学报,2010,41(7):57~63.
She Dongli, Shao Ming'an, Yu Shuang'en. Spatial variability of soil water content on a cropland-grassland mixed slope land in the Loess Plateau, China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(7):57~63. (in Chinese)
- 6 Kroes J G, van Dam J C, Groenendijk P, et al. SWAP version 3.2. theory description and user manual [M]. Wageningen: Alterra, 2008.
- 7 胡良军,邵明安. 黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J]. 应用生态学报,2002,13(8):1 045~1 048.
Hu Liangjun, Shao Ming'an. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8):1 045~1 048. (in Chinese)
- 8 刘艳伟,朱仲元,乌云,等. 浑善达克沙地天然植被蒸散量两种计算方法的比较[J]. 农业机械学报,2010,41(11):84~88.
Liu Yanwei, Zhu Zhongyuan, Wu Yun, et al. Comparison of evapotranspiration of the natural vegetation in the Otindag sandy area using two calculation methods [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11):84~88. (in Chinese)
- 9 Oliveira R S, Bezerra L, Davidson E A, et al. Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil [J]. Functional Ecology, 2005, 19(4):574~581.
- 10 Wang Yunqiang, Shao Ming'an, Shao Hongbo. A preliminary investigation of the dynamic characteristics of dried soil layers on the Loess Plateau of China [J]. Journal of Hydrology, 2010, 381(1~2):9~17.
- 11 She Dongli, Shao Ming'an, Timm Luis Carlos, et al. Temporal changes of an alfalfa succession and related soil physical properties on the Loess Plateau, China[J]. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 2009, 44(2):189~196.

(上接第 23 页)

- 5 曹万科,张天侠,刘应吉,等. 基于 TTCAN 的汽车控制系统信息调度设计与分析[J]. 农业机械学报,2007,38(12):41~44.
Cao Wanke, Zhang Tianxia, Liu Yingji, et al. Design and analysis on scheduling of messages in automotive control system based on TTCAN [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12):41~44. (in Chinese)
- 6 张新丰,杨殿阁,陆良,等. LIN 总线的动态调度算法设计与应用 [J]. 农业机械学报,2009,40(3):21~25.
Zhang Xinfeng, Yang Diange, Lu Liang, et al. Dynamic scheduling algorithm for local interconnect network and its application [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):21~25. (in Chinese)