

DOI: 10.3901/JME.2014.08.102

电池管理系统 CAN 信号不同步对于插电式混合动力电动汽车控制策略与安全性的影响分析*

符兴锋¹ 周斯加² 翟艳霞¹ 赵小坤¹ 何国新¹

(1. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院 广州 510640;

2. 温州大学机电工程学院 温州 325035)

摘要: 针对电池管理系统的控制器局域网络(Controller area network, CAN)总线信号存在不一致性,可能会影响到插电式混合动力电动汽车控制策略和安全防护性的问题,通过分析电池管理系统 CAN 总线信号不一致性产生的根源,建立整车仿真计算模型,从理论上分析电池管理系统不同 CAN 总线信号通信的不同步对于整车控制策略和安全性的影响,以理论分析的结果为指导,电池管理系统进行针对性的设计改进和处理,并引入电动力能力动态监控方法(Dynamic monitor and management power, DMMP)对于动力电池的荷电状态(State of charge, SOC)算法进行修正,提高 SOC 的计算精度,使得不同 CAN 总线信号通信的不同步对于整车控制策略和安全性的影响降低到可以接受的范围内。仿真计算和试验的结果表明,采取有效的处理措施,电池管理系统 CAN 总线信号通信的不同步情况可以不影响到整车的安全性。

关键词: 插电式混合动力电动汽车; 电池管理系统; 信号不一致; 控制策略; 安全性

中图分类号: U467

Analysis on the Influence of Battery Management System CAN Message Asynchronous for PHEV Control Strategy and Safety Performance

FU Xingfeng¹ ZHOU Sijia² ZHAI Yanxia¹ ZHAO Xiaokun¹ HE Guoxin¹

(1. Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Automotive Engineering Institute, Guangzhou 510640;

2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035)

Abstract: In order to solve the influence of vehicle control strategy and safety performance for battery management system controller area network(CAN) message asynchronous, the source of CAN signal inconsistency is analyzed and plug-in hybrid electric vehicle(PHEV) simulation model is build. Battery management system CAN message asynchronous is analyzed and modified by theory method. Battery management system(BMS) is designed based on theory analysis result and dynamic monitor and management power(DMMP) method is applied in state of charge(SOC) modify calculation procedure in order to improve accuracy. The influence of vehicle control strategy and safety performance can be limited and accepted. The simulated and test result are shown as vehicle control strategy and safety performance can't be affected hardly by vehicle control strategy and safety performance after improved design method is used.

Key words: plug-in hybrid electric vehicle(PHEV); battery management system(BMS); message asynchronous; control strategy; safety performance

0 前言

动力电池的性能在很大程度上制约着节能与新能源汽车的性能,对于整车动力性、经济性和安

全性有着重大的影响。动力电池管理系统(Battery management system, BMS)是用来对电池组进行安全监控和有效管理的装置,可以有效地保护动力电池^[1]。准确地检测动力电池参数,估算动力电池的性能,与整车控制器(Hybrid control unit, HCU)进行通信,并接收来自 HCU 的指令执行相应的处理措施是 BMS 设计的核心内容之一^[1-2]。

目前的 BMS 多采用基于控制器局域网络

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2011AA11A218)、广东省重大科技专项(00191350136655018)和浙江省自然科学基金(LQ13E070003)资助项目。20130613 收到初稿, 20131223 收到修改稿

(Controller area network, CAN)总线的分布式结构设计, 发送给 HCU 的 CAN 总线信号按照重要程度以不同的通信周期发送和接收, 以降低 CAN 总线的负载率, CAN 总线信号的采样周期和通信周期不同步以及通信信号存在干扰都有可能对节能与新能源汽车的使用和安全性造成影响^[2-7]。但是目前国内外对于这方面的研究内容还不多, 相关研究也仅仅集中在信号的不同步对于电池系统本身的影响方面, 因此系统的研究 BMS 信号的不同步对于整车安全性影响方面的研究是很有必要的。

本文选取广汽集团自主研发的某款 B 级插电式混合动力电动汽车(Plug-in hybrid electric vehicle, PHEV)作为研究对象, 通过理论研究和试验对比的方式, 来研究 BMS 的 CAN 总线信号的不同步对于 PHEV 安全性能的影响, 从而为节能与新能源汽车 BMS 硬件设计、软件开发和整车控制策略配置提供有益的参考。

1 BMS 的信号不同步的问题

1.1 BMS 的 CAN 信号不同步问题的产生

分布式结构的 BMS 方案中, 有多个电池单体组成一个电池模组, 一个 BMS 从板管理一个或者多个电池模组, 采集电池单体的电压信息和电池模块的温度信息或其他信息, 发送给 BMS 主板进行计算处理, 高压从板则采集高压信号并监控绝缘状态, BMS 的从板和主板通过内部的 CAN 网络进行数据的交换, BMS 的主板则通过 CAN 总线方式和 HCU 进行交互式通信。

由于电压、电流和电池温度等信号由不同的传感器和处理单元完成, 电池系统的总电压、绝缘阻值和 SOC 等信息的计算原理和采样要求也不尽相同, 不同模块单元之间的通信也存在差异性, 因此 BMS 和 HCU 之间的通信信号不同步是必然存在的, 势必会对整车控制策略和安全防护控制措施产生影响。分析和研究 BMS 信号的不同步对于整车控制策略和安全防护措施的影响, 并采取有效的措施将这些信号不同步的影响控制在合理的范围内是非常必要的。

1.2 BMS 的信号采样要求

根据奈奎斯特采样定理, 如果连续信号 $f(t)$ 的频谱函数为 $F(j\omega)$, 则采样信号 $f_s(t) = f(t)\delta_T(t)$ 的频谱函数

$$F_s(j\omega) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} F[j(\omega - n\omega_s)] = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(kT)\exp(jk\omega T) \quad (1)$$

$$F(\exp(j\Omega)) = F_s(j\omega) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} f(kT)\exp(-j\omega T) \quad (2)$$

式中 T ——采样周期;

$\delta_T(t)$ ——离散采样间隔;

ω ——角频率;

ω_s ——采样角频率, $\omega_s = 2\pi/T$;

Ω ——离散采样频率。

若带限信号 $f(t)$ 的最高角频率信号频率为 ω_m , 则抽样信号恢复为原信号需要满足的条件如下所述。

(1) 抽样信号如果是带限信号, 即频谱函数在 $|\omega| > \omega_m$ 各处为零。

(2) 抽样间隔 T 满足 $T \leq \pi/\omega_m = 1/(2f_m)$, 或抽样频率 f_s 满足 $f_s \geq 2f_m$, $f_s = 2f_m$ 为奈奎斯特采样频率。

1.3 应用于 PHEV 的 BMS CAN 信息不同步问题

本文研究的该款 PHEV 车辆的动力电池箱采用多箱体布置结构, 不同箱体之间采用高压接插件和高压线缆连接, 每个电池箱体上都设计有手动维修开关(Manual service device, MSD)以保障动力电池箱的运输、安装和维修安全。基本原理如图 1 所示。

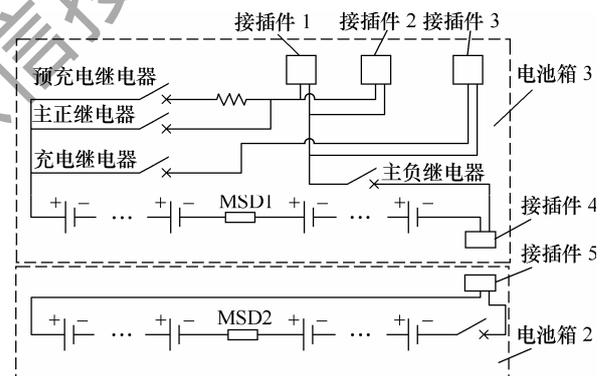


图 1 PHEV 动力电池箱原理图

在该款动力电池箱的设计中, 与车身线束连接的接插件都设计在动力电池箱 1 中, 与 HCU 通信的 BMS 主板也设计安装在动力电池箱 1 中, 有两块从板采集动力电池箱 1 的动力电池组参数信号。动力电池箱 2 中的动力电池组信号由安装在箱体内的另外两块从板采集, 并通过内 CAN 发送给 BMS 处理, 高压从板安装在动力电池箱 1 中。接插件 1 和接插件 2 连接高压用电负载, 接插件 3 连接充电回路, 动力电池箱 1 和动力电池箱 2 通过接插件 4 和接插件 5 连通。

在该款 PHEV 的 BMS 设计中, 从板主要采集电池单体电压信息和电池模块的温度信息; 高压从板采集总电压和电流等高压信号并计算绝缘阻值, 并发送给 BMS 主板处理。

由 PHEV 车辆 BMS 的设计方案中可以知道,存在着以下主要的信息不同步问题。

(1) 动力电池总电压信号与电池单体最高最低电压信息不同步。动力电池总电压由电压传感器直接测量并滤波处理得到,而电池单体电压由 BMS 从板采集每个电池单体电压,并汇总计算最高电压和最低电压值后得到。

(2) 电流值和电池 SOC 计算值信息不同步。电流值由电流传感器测量并滤波处理后得到, SOC 值则需要通过安时积分法计算得到,同时需要进行实时动态校验处理进行修正。

(3) 动力电池充放电功率值与动力电池总电压和单体电池电压不同步。动力电池的充放电功率值由 BMS 主板查询充放电功率值 map 图得到,同时电池的功率值还受到温度和 SOC 值等因素的影响。

(4) 绝缘阻值和电池电压信号的不同步。绝缘阻值测量电路参考 GB/T 18384.1-2001 附录 A 的测量原理设计,需要频繁检测电池正极对地和负极对地的电压值计算绝缘阻值^[8]。

这些 BMS 关键信号不同步问题的产生都是不可避免的,有可能对于整车控制策略和安全保护措施产生重大影响,需要进一步分析。

2 BMS 信号不同步问题对于 PHEV 控制策略和安全保护措施的影响分析

在 BMS 可能影响到整车性能的通信信号中,与安全性相关的有电池单体电压和总电压、电池温度、电流、高压互锁回路(High voltage interlock, HVIL)、绝缘阻值和外接充电信号;与整车动力性、经济性、静肃性(Noise vibration harshness, NVH)和驾驶舒适性相关的是电池的充放电功率值信号和 SOC 信号。

以 SOC 信号为例,对于 PHEV 控制策略和安全性的影响如表 1 所示。

表 1 SOC 信号值对于 PHEV 控制策略和安全性的影响

| SOC 值(%) | 整车相关性影响 | |
|----------|--|-----------------|
| | 控制策略 | 安全性 |
| <5 | 纯电动和混动功能被禁止, DC/DC 关闭, 电动助力转向和电子制动功能很快消失 | 车辆进入跛行模式, 安全性较低 |
| 5~15 | 纯电动空调被禁用, 电动爬行模式被禁止 | 车辆舒适性差, 车辆可能溜车 |
| 15~25 | 取消换挡助力和加速助力, 启停功能被禁止 | 车辆动力性差, 安全性降低 |
| 25~95 | 驾驶性能、经济性、NVH 和驾驶舒适性最佳 | 车辆动力性、经济性和安全性最佳 |
| >95 | 电动机发电功能和制动能量回收功能被禁止 | 制动踏板感觉不同, 安全性降低 |

在该款 PHEV 车辆设计中, BMS 主板和 HCU 进行交互式通信的主要信号和通信周期如表 2 所示。

表 2 主要的 BMS 信号和通信周期

| 参数 | 单体电压和总电压 | 主要的 BMS 信号 | | | |
|-------|----------|------------|------|-------|--------|
| | | 电池温度 | 绝缘电阻 | 充放电功率 | 外接充电信号 |
| 周期/ms | 20 | 100 | 20 | 10 | 200 |

由表 2 可知, 对于采样频率较快、整车控制策略影响较大并且对于车辆安全防护设计有重大影响的信号, 要求的通信周期都较短, 需要密切监控, 比如单体电压、动力电池系统总电压、绝缘阻值和功率值等; 对于一些信号变换较慢、采样频率要求不高的信号, 则要求的通信周期较长, 比如电池温度和外接充电电动机通信信号。电池的故障代码信息通信周期为 500 ms; BMS 的版本和厂家标识信息通信周期为 1 000 ms。根据 CAN 总线信号重要性的不同合理的设置信号的通信周期, 一方面可以有效地降低 CAN 总线负载率, 减少错误帧的产生, 保证通信质量; 另一方面可以使得重要的 CAN 总线信号得到优先处理, 降低安全隐患。

接下来依次分析 BMS 信号不同步对于 PHEV 控制策略和安全保护措施影响。

2.1 动力电池总电压和电池单体最高最低电压不同步的影响

动力电池的总电压对于 HCU 控制整个 PHEV 高压回路的正常运行、保护高压用电设备不被损坏起着非常重要的作用。电池的单体最高最低电压是 BMS 保护动力电池的重要设计参数。动力电池是容性负载, 正常使用情况下电压变化频率较慢, 按照奈奎斯特采样定理, 并考虑到采样芯片采样时间(每个通道不低于 400 μ s)和处理器计算主频(不低于 8 MHz)的硬件限制, 电压采样周期小于 50 ms 已经足够满足测量要求。

在 BMS 的上电过程中, 在 BMS 收到从板上来的真实测量值之前, 从板发送给 BMS 主板的动力电池总电压值和电池单体最高最低电压值都选取初始的默认值。

PHEV 车辆动力电池系统预充电电阻值为 50 Ω , 电动机控制器的预充电电容为 880 μ F, 设计要求的预充电完成总时间 $t \leq 500$ ms。当继电器用电设备侧的电压超过到电池总电压的 85% 时判定预充电完成。

因此, 必须严格地限定上电时, BMS 主板得到从板发送电池单体最高最低电压真实值和动力电池总电压真实值信号不同步的时间。参考到 BMS 唤

醒、初始化和自检完成时间(≤ 200 ms)限制与总的预充电时间要求,动力电池总电压和电池单体最高最低电压信号不同步时间不能超过 150 ms。如果在规定的设计时间内, BMS 得到动力总电压值和电池单体最高最低电压值均不在正常值范围内,则 BMS 上报对应的故障。电池电压对于电池使用的安全性有影响,和整车控制策略影响不大,而且电池安全主要由 BMS 自行负责,因此电池电压信号的不同步对于整车安全性没有直接的影响。

2.2 动力电池温度信号与充放电功率信号不同步的影响

相比电池电压,电池温度变化频率较慢,因此电池温度传感器的测量精度和采样频率不需要太高,但是电池的充放电功率计算值则必须有较短的通信周期。电池温度的变化受到电池充放电功率值的影响较大,需要及时地反映出电池在不同的充放电功率下电池温度变化的情况,以便于 BMS 及时采取措施启动电池温控系统控制电池温度的变化,保护电池。电池温度信号和充放电功率信号的不同步时间也需要控制在允许的范围内。由前面的分析可以知道,动力电池温度信号的不同步会影响到电池的使用寿命和电池安全性,但是对于整车控制策略和安全性的没有直接的影响。

2.3 动力电池电流和功率信号不同步的影响

PHEV 在行驶过程中,动力电池的电流有着较快的变化频率,因此选用的电流传感器精度和采样频率都较高,电池电流信号的通信周期与电压相同,均为 20 ms。动力电池电流信号和功率信号的不同步会影响到 SOC 的计算精度,从而会对整车控制策略和安全性产生影响。

为避免电流信号和电池充放电功率信号的不同步可能影响到 SOC 的计算精度,引入了 DMMP 法对 BMS 的 SOC 的计算方法进行了修正^[9]。

在车辆行驶过程中,动力电池的输出功率 $P_i(t)$ 是随着控制策略提供的需求功率 P_0 非单调性变化的,因此将整个行驶过程分为 m 个段区($1 \leq i \leq m$),则每个不同段区的剩余电量

$$\Delta W_i = W_N \prod_{j=1}^i \eta_{ij} \eta_{vj} - \sum_{j=1}^i W_j \prod_{k=j}^i \eta_{ik} \eta_{vk} \quad (3)$$

式中 W_N ——动力电池的额定电能;

$$W_N = P_N T_N = I_N E_0 T_N;$$

P_N ——动力电池组的额定功率;

T_N —— P_N 下的持续放电时间;

I_N ——动力电池组的额定电流;

E_0 ——动力电池组的额定电动势;

η_{ij} ——电流系数,表示放电电流 $I_i(t)$ 对 W_N 的影响;

$$\eta_{ij} = \left(\frac{I_i(t)}{I_N} \right)^{1-n};$$

η_{vj} ——电压系数,不仅能够直接反映出端电压 $V_i(t)$ 对于 W_N 的影响,而且能够间接表示动力电池组的工作温度、电化学极化、浓度极化和欧姆过电势对于 W_N 的作用;

$$\eta_{vj} = \left(\frac{V_i(t)}{E_0} \right);$$

$\overline{I_i(t)}$, $\overline{V_i(t)}$ ——第 i 段的放电电流和端电压的平均值。

在 Δt_i 时间内动力电池组的输出功率

$$P_i(t) = \int_{\Delta t_i} I_i(t) V_i(t) dt \quad (4)$$

输出电能

$$W_i = \int_{t_{i-1}}^{t_i} P_i(t) dt \quad (5)$$

$$k_i = \frac{\Delta W_i}{W_s} = \frac{W_N \prod_{j=1}^i \eta_{ij} \eta_{vj} - \sum_{j=1}^i W_j \prod_{k=j}^i \eta_{ik} \eta_{vk}}{W_N \prod_{j=1}^i \eta_{ij} \eta_{vj}} \quad (6)$$

式中 ΔW_i ——动力电池组相对剩余电能。

按照整车的控制要求,车辆运行模式禁止频繁跳转,动力电池的充放电功率不允许在很短的时间内大范围跳变,充放电的功率值预估要受到温度、电压和充放电电流等因素不一致性的影响,因此选用卡尔曼滤波器来预估动力电池的充放电功率值。

假设目前的系统状态为 k ,可以基于上一个的状态预估目前出现的状态

$$P(k, k-1) = AP(k-1, k-1) + BU(k) \quad (7)$$

$$C(k, k-1) = AC(k-1, k-1)A' + Q \quad (8)$$

式中 $P(k-1, k-1)$ ——上一个状态的预估结果;

$U(k)$ ——现状态的控制量;

A, B ——系统的控制矩阵参数;

A' ——系统控制矩阵 A 的转置矩阵。

式(8)是 $P(k, k-1)$ 对应的系统变量, Q 为系统过程变量值,设为 1×10^{-6} 。

现状态的最优估算值为

$$P(k, k) = P(k, k-1) + K_g(k)(Z(k) - HP(k, k-1)) \quad (9)$$

$$K_g(k) = \frac{C(k, k-1)H'}{HC(k, k-1)H' + R} \quad (10)$$

$$C(k,k) = (I - K_g(k)H)C(k,k-1) \quad (11)$$

式中 K_g ——卡尔曼增益;

$C(k,k)$ ——更新状态下的 $P(k,k)$ 变量;

I ——单位矩阵;

H, H' ——测量系统的参数矩阵和参数转置矩阵;

R ——高斯白噪声的协方差参数。

按照上述的方法可以估算出不同温度、电压和电流条件下的电池充放电功率的最优估计值, 将信号的不同步对于充放电功率估算的影响降到最低。

2.4 动力电池绝缘阻值信号不同步的影响

绝缘阻值信号是 BMS 唤醒后自检的一个重要内容, BMS 主板必须在进入预充电状态前得到准确的绝缘阻值信号。PHEV 车辆在上电前, 如果高压回路存在着绝缘故障, 则 BMS 不允许预充电成功; 如果在行车过程中出现绝缘问题, 则 BMS 必须在规定的时间内采取有效的措施保护高压回路, 必要时切断高压继电器。绝缘阻值信号的不同步对于整车控制策略和安全性有着直接的影响。

2.5 高压回路状态监测信号不同步的影响

该款 PHEV 选用 HVIL 来监控整个高压回路的连接情况, 安装在动力电池箱 2 上的中间继电器接入了 HVIL 回路, BMS 监控 HVIL 回路状态的同时, 接收由 HCU 发送给 BMS 的 HVIL 回路监控信号, 进行对比判断, 执行相应的控制动作。如果 BMS 对比中间继电器闭合状态、HCU 发送的 HVIL 回路监控信号和继电器控制信号不一致, 则 BMS 会立即上报对应的故障等级并采取相应的保护措施。HCU 控制小继电器闭合来接通或断开 HVIL 回路, 由于 CAN 总线传送信号时间远远小于小继电器的动作时间, 因此 BMS 检测到 HVIL 状态要晚于接收到来自于 HCU 发送过来的 HVIL 状态信号, 容易让 BMS 产生误判产生误动作, 带来安全隐患。HVIL 信号的不同步对于整车控制策略和安全性有着直接的影响, 因此要采取有效措施处理 HVIL 信号不同步所造成的影响。

3 BMS 信号不同步对于 PHEV 控制策略和安全保护措施的影响仿真计算

按照 PHEV 的设计结构方案, 建立整车控制仿真模型, 对模型在一定的运行工况下进行仿真计算, 可以得到工况下 PHEV 对于电池系统的充放电功率和电流等关键参数的需求。通过硬件在环(Hardware in the loop, HIL)试验台模拟整个系统的仿真测试,

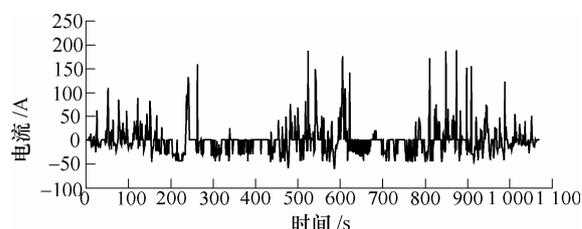
在 Matlab/Simulink 中建立被控对象模型及系统运行环境模型(HIL 模型), 再通过自动代码生成工具将上述模型转化为实时代码下载至 Simulator 设备中的处理板卡中, 从而完成测试环境的搭建。

将 PHEV 对于电池系统的需求信号进行相应的延时处理后发送给 HCU, 可以将 BMS 信号的不同步问题转化成模拟 BMS 反馈信号给 HCU 输入信号的不同步问题, 仿真计算结果和原计算模型比较就可以量化地分析 BMS 信号不同步对于 PHEV 控制策略和安全保护措施的影响。

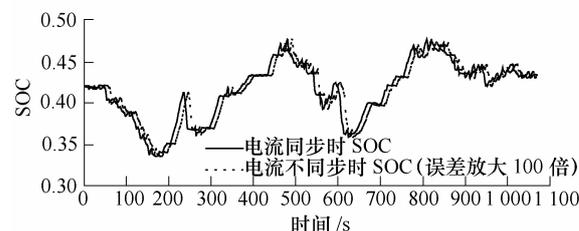
限于篇幅, 本文重点分析电流不同步、绝缘阻值和高压回路状态检测信号不同步的仿真计算问题。

3.1 动力电池电流和充放电功率信号的不同步

图 2 是 PHEV 在高速路工况下, 整车对于电池系统的电流输入输出需求, 图 2b 为将 BMS 发送给 HCU 的电流信号延时 150 ms 后, 计算 SOC 偏差放大 100 倍后得到的 SOC 偏差图, 由仿真计算可知, 电流信号的不同步对于 SOC 的计算影响较小, 最大误差仅为 0.27%, 加上 SOC 本身的计算精度误差, 基本上对于 SOC 计算没有影响。同样仿真计算得到的电池功率值变化较为平缓, 信号同步与不同步得到的估算值曲线几乎完全重合, 估算误差非常小, 最大误差不大于 0.03%, 几乎可以忽略不计。



(a) 高速工况下动力电池电流不同步于时间曲线



(b) 高速工况下动力电池 SOC 计算误差曲线

图 2 高速工况下动力电池电流不同步与 SOC 计算误差曲线

3.2 动力电池绝缘阻值信号不同步

动力电池的绝缘阻值检测是 PHEV 整车高压安全的核心设计内容, 直接关系到驾乘人员的触电防护安全问题。GB/T 19751-2005 对于绝缘阻值的测量要求有严格的规定^[10]。

PHEV 车辆的 BMS 设计中, 要求 BMS 初始化自检到进入等待状态之前必须得到绝缘阻值的准确测量值, 即 BMS 得到准确的绝缘阻值信号的时间必须不大于 150 ms。如果在上电前 PHEV 高压回路已经存在绝缘阻值过低现象(例如短路), 则 BMS 必须在自检后能够及时发现绝缘故障并且不允许进入等待 HCU 闭合继电器指令上电状态, 否则容易造成高压元器件的损坏或驾乘人员的触电风险, 决不允许 BMS 上电成功后再发现绝缘故障导致紧急断电。

图 3 是将 BMS 的绝缘状态信号发送给 HCU 的时间延长至 750 ms 后的仿真情况。由图 3 中仿真结果可见, 在“key on”以后 500 ms 内, BMS 未能及时发现绝缘故障, 进入了等待状态, HCU 迅速就发送了闭合继电器指令给 BMS, 开始预充电过程, 预充电完成并进入工作状态后, BMS 才检测到绝缘状态发生了变化, 紧急下电, 稍后 HCU 也发送了断开继电器指令给 BMS, 切断了高压回路。高压回路切断后, 绝缘检测电路无法检测到继电器外部的绝缘状况, 在动力电池系统内部没有绝缘故障的情况下, 绝缘状态回到正常值。仿真结果表明, 如果绝缘阻值信号的不同步时间过长, 会有严重的安全隐患, 可能对驾乘人员造成伤害^[11]。

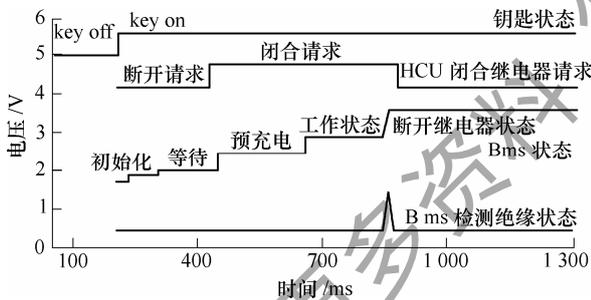


图 3 动力电池系统绝缘阻值信号不同步仿真

需要特别注意的是, 在钥匙打到“key off”的时候, 图 1 中的中间继电器断开, 此时 BMS 检测到电池正极对地和负极对地的电压均为零, 绝缘状态已经无法正确判断, 因此在钥匙“key off”后, BMS 不允许再进行绝缘阻值判断, 以免误报绝缘故障。

3.3 高压回路状态监测信号不同步

高压回路状态监控信号不同步的仿真与前面类似, 考虑到 HVIL 回路的两个小继电器闭合响应时间分别为 20 ms 左右, HVIL 状态信号通信周期为 20 ms, BMS 的处理时间约为 10 ms, BMS 检测 HVIL 状态信号比接收到 HCU 发送的 HVIL 状态信号不同步时间差为 70 ms。将 BMS 的 HVIL 状态检测信号延时 70 ms 发出代入仿真模型进行计算, 得到图 4

所示的结果。

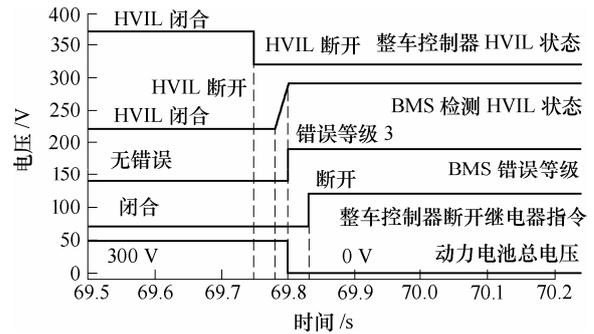


图 4 “key off”情况下 HVIL 监测信号不同步仿真

由图 4 可知, 在钥匙“key off”的情况下。等待一段时间后, HCU 发送了 HVIL 回路断开状态信号给 BMS, BMS 在约 79 ms 后检测到 HVIL 回路断开, HVIL 状态连续比较确认 10 次后, 确认状态不一致, BMS 断开继电器同时发送故障等级 3 信号。该过程属于 BMS 判定故障情况下非正常途径下电, 继电器带负载断开, 很容易损坏电气设备。因此需要重新调整 BMS 启动 HVIL 状态比较判断程序的时间, 避免非正常下电流程。重新调整后的软件将“key off”情况下, HVIL 回路状态比较时间延长至 200 ms, 再次仿真就没有再出现紧急下电情况, BMS 遵循正常下电流程接收到 HCU 下电指令后断开继电器, 此前高压回路的所有高压负载已经降为 0。

综上所述, 将 BMS 信号的不同步对于整车控制策略和安全性的影响结果可以整理如下。

(1) 电池的电压、电流、温度和充放电功率信号的不同步对于整车控制策略的影响很小, 几乎可以忽略不计^[12], 其中电压、电流和温度对于电池 SOC 的影响可以通过动态校验法或其他优化算法的方式进行调整, 将 SOC 的计算误差控制在很小的范围内。

(2) 动力电池绝缘阻值信号和 HVIL 状态信号的不同步对于 PHEV 整车控制策略和安全性有较大的影响。

接下来将对这两个信号的不同步情况对于整车控制策略的影响进行针对性的改进。

(1) 动力电池绝缘阻值信号必须在 BMS 进入预充电状态之前得到检测的准确值, 因此必须想办法提高绝缘阻值的检测速度和检测精度。同时由于预充电继电器闭合后 BMS 可以检测到整个高压回路的绝缘阻值, 因此 PHEV 车辆可以在电动机控制侧和 HCU 硬件部分取消绝缘检测电路, 完全依赖于 BMS 的绝缘电阻检测值判断高压回路的绝缘情况。这样既可以保证车辆的使用安全性, 也能明显地降低零部件的成本。

(2) 在将钥匙打到“key on”上电时, HCU 必须接收到来自 BMS 的 HVIL 回路闭合状态信号才能发送闭合继电器指令, 因为 BMS 检测得到的 HVIL 回路状态更加准确和真实。

(3) 在将钥匙打到“key off”正常下电时, HCU 必须让电动机控制器离开转矩控制模式的同时发送断开继电器指令, 并在延时 20 ms 左右, 才允许断开 HVIL 回路, 以免发生危险; 如果“key off”后, 电动机控制器侧电压小于 25 V 或等待时间大于 20 s, HCU 和 BMS 等控制器进入休眠状态。

(4) 在紧急情况需要立即断电的情况下, HCU 断开 HVIL 回路的同时发送断开继电器指令给 BMS, 接着需要发送高压放电指令给电机控制器, 立即进行快速放电。

将以上主要的影响分析结果, 在 PHEV 车辆的整车控制策略中进行适当的调整, 在 HIL 试验台上重新进行了模拟验证, 结果发现采取了合理的处理措施后, 尽量将 BMS 的绝缘阻值信号和 HVIL 状态信号的不同步时间差控制在较小的范围内。在无法完全消除两个信号不同步的情况下, 整车控制策略采取合理的处理措施, 可以使得 BMS 信号不同步对于整车安全性造成的影响控制在可以接受的范围内。

接下来通过实车试验来验证前面的仿真分析结果。

4 试验验证

电池管理系统信号的不一致对于整车控制策略的影响分析试验通过实车试验的方式进行。按照前面的仿真结果, 改进 BMS 计算程序, 提高信号的处理速度, 将获得准确信号的不同步时间控制在表 3 所示的时间内, 即将信号的不同步对于整车控制策略和安全性的影响控制在可以接受的范围内。

表 3 BMS 主要信号获得准确值的不同步时间 ms

| 单体最高/最低电压 | 电池温度 | 绝缘阻值 | 电流 | 外接充电信号 |
|-----------|------|------|----|--------|
| 100 | 500 | 200 | 30 | 100 |

接下来按照仿真试验结果进行针对性的实车试验验证。通过 PHEV 的 OBD 口连接 CAN oe 设备记录试验过程中的 CAN 信息。

4.1 动力电池电流和充放电功率信号的不同步试验

试验前, 将试验的 PHEV 车辆的动力电池系统 SOC 值调整到和仿真计算试验一致的范围内, 初始

SOC 值调整到 48%, 然后按照高速循环工况进行重复试验。从记录的 CAN 信息中得到 BMS 计算的不同 SOC 值, 将动力电池在电池模拟器测试得到的 SOC 值进行对比, 可以得到 BMS 计算的 SOC 值与实测 SOC 的误差, 见表 4。

表 4 高速循环工况下 SOC 值计算值和实测值

| (有动态校验修正) | | % |
|-----------|------|-----|
| 实测值 | 计算值 | 偏差 |
| 29.9 | 34.0 | 4.1 |
| 32.4 | 36.0 | 3.6 |
| 35.8 | 38.0 | 2.2 |
| 37.5 | 40.0 | 2.5 |
| 40.2 | 42.0 | 1.8 |
| 42.4 | 44.0 | 1.6 |
| 44.3 | 46.0 | 1.7 |

由表 4 中的测量数据可知, SOC 计算值和实测值的误差均在 5% 以内, 去除 SOC 本身计算误差的影响, 可以判断电流信号和充放电功率信号的延迟对于 SOC 计算精度的影响非常小, 试验分析结果和仿真分析结果一致。

4.2 动力电池绝缘阻值信号不同步试验

动力电池绝缘阻值信号不同步试验分两部分进行。首先将一个 24.8 k Ω 的电阻(按照 GB18384.1-2001 的要求, 绝缘阻值不大于 30 k Ω 判定为严重的绝缘故障)串入 PHEV 高压回路的高压空调接插件正极和车身地之间, 然后将钥匙打到“key on”进行试验, 得到图 5 所示的结果。由图 5 可知, BMS 完成初始化后及时检测到了绝缘故障, 上报绝缘故障和相应故障等级给 HCU, 同时电池状态进入了断开继电器状态, HCU 没有发送闭合继电器指令给 BMS, 不允许高压上电。

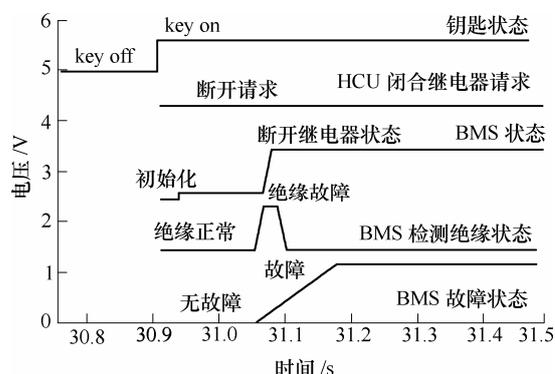


图 5 上电过程绝缘阻值信号不同步试验

图 6 为将钥匙“key on”上电并起动发动机后, 迅速将 24.8 k Ω 的电阻串入 PHEV 高压回路的高压空调接插件正极和车身地之间, 检测得到的 BMS 绝缘阻值检测结果。由图 6 可知, 在 BMS 检测并

确认到发生绝缘故障后, BMS 切断了高压继电器并及时上报绝缘故障, HCU 在稍后发送断开继电器指令, 整个绝缘故障触发和保护过程符合设计流程。串入 24.8 k Ω 电阻 BMS 准确判断绝缘故障也证明了 BMS 绝缘阻值计算的准确性。图 5 和图 6 的试验结果与设计要求和仿真结果完全一致。

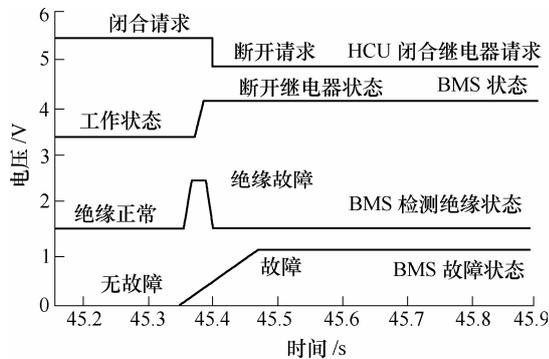


图 6 运行中电池系统绝缘阻值信号不同步试验

4.3 高压回路状态监测信号不同步试验

按照前面仿真试验的结果, 修改 BMS 软件, 将 BMS 比较 HVIL 状态延时 200 ms 启动, 同时 HCU 软件也考虑到 HVIL 信号的延迟问题进行针对性的处理。修改后对 PHEV 进行反复的上下电试验, 得到图 7 所示的结果。

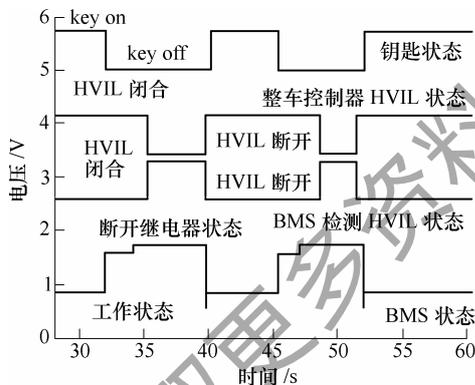


图 7 钥匙反复开关情况下 HVIL 回路监测信号不同步试验

由图 7 可知, 在反复的“key on”和“key off”试验中, BMS 发送的 HVIL 状态检测信号与接收到的来自于 HCU 检测的 HVIL 状态信号基本上可以做到同步, BMS 的 HVIL 状态比较判断也不会有误判现象发生。

PHEV 实车试验的结果说明根据 BMS 信号不同步的情况针对性调整整车控制策略和信号的判断比较方法, 使得对于整车控制策略和安全性影响较大的信号对于整车安全性的影响降到可以接受的范围内。采取修正算法和动态校验方法能够有效地提高 SOC 的计算精度, 可以对整车控制策略几乎不产生大的影响。加快绝缘电阻值的计算速度和控制得

到真实绝缘电阻值的信号不同步时间在合适的范围内, 能够避免高压触电风险和整车控制策略产生误判导致损坏用电设备。调整 HVIL 回路信号的比较策略和整车控制策略中相应的控制信号的发送时序, 可以有效地提高控制的效果, 不影响 PHEV 车辆使用的安全性。

综上所述, 在 BMS 信号存在不同步的情况下, 对于信号的不同步对于整车控制策略和安全性的影响进行针对性的分析, 并采取相应的处理措施, 可以满足 PHEV 整车使用和安全性的要求, 使得 BMS 信号不同步对于整车使用和安全性的影响控制在可以接受的范围内。实车验证的结果与仿真分析的结果完全一致。

5 结论

针对国内某款 PHEV 的 BMS 信号存在不同步的特点, 对于 BMS 关键信号的采样周期进行了划分, 建立了仿真计算模型, 分析了 BMS 信号不同步情况下对于整车控制策略和安全性的影响。采取有效措施对于整车安全性影响较大的两个不同步的信号进行了针对性的处理, 修改了相应的控制策略, 使得 BMS 的信号不同步现象对于整车控制策略和安全性的影响降低到可接受的范围内。仿真和试验的结果表明, 采取合理有效的软硬件措施, 在允许一定程度信号不同步现象的前提下, 采取有效的控制策略方法能够有效地降低整车安全性风险, 使得 PHEV 车辆仍然可以保证良好的操作性和足够的安全性。

研究内容和结果可以为 PHEV 和其他节能与新能源车辆的 BMS 硬件设计、软件开发和整车控制策略配置提供有益的参考和借鉴。

参 考 文 献

- [1] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2002.
CHEN Qingquan, SUN Fengchun, ZHU Jianguang. Modern electric automobile[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology University Press, 2002.
- [2] 张鑫, 马兹林, 冒晓建, 等. 混合动力车用蓄电池管理系统设计与研究[J]. 车用发动机, 2010(6): 46-49.
ZHANG Xin, MA Zilin, MAO Xiaojian, et al. Battery management system for hybrid electric vehicle[J]. Vehicle Engine, 2010(6): 46-49.
- [3] 徐玮, 魏学哲, 沈丹. 电池管理系统中电压电流检测不同步对电池内阻辨识影响的分析[J]. 汽车工程, 2009,

- 31(3): 228-231.
- XU Wei, WEI Xuezhe, SHEN Dan. An analysis on the influence of asynchronous measurement of voltage and current on battery internal resistance identification[J]. *Automotive Engineering*, 2009, 31(3): 228-231.
- [4] 叶明, 秦大同, 刘振军. 基于 AMT 的轻度混合动力系统再生制动控制[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(10): 156-160.
- YE Ming, QIN Datong, LIU Zhenjun. Regenerative braking control strategy in mild hybrid electric vehicle equipped with automatic manual transmission[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(10): 156-160.
- [5] 于秀敏, 曹珊, 李君, 等. 混合动力汽车控制策略的研究现状及其发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(11): 10-16.
- YU Xiumin, CAO Shan, LI Jun, et al. Present study situation and developing trend of control strategies for hybrid electric vehicle[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11): 10-16.
- [6] 胡明辉, 秦大同, 杨亚联, 等. 轻度混合动力汽车巡航工况总工作效率分析和优化[J]. *机械工程学报*, 2008, 44(9): 148-153.
- HU Minghui, QIN Datong, YANG Yalian, et al. Optimization and analysis of system efficiency for the mild hybrid electric vehicle under the cruise conditions[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(9): 148-153.
- [7] SUN Dongye, QIN Datong, WANG Hongyan. Control strategy of a parallel hybrid car with a metal belt-planetary gear continuously variable transmission system[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 15(3): 16-22.
- [8] 赵静炜, 孙惠, 孙林, 等. GB/T18384.1-2001 《电动汽车 安全要求 第 1 部分: 车载储能装置》[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- ZHAO Jingwei, SUN Hui, SUN Lin, et al. GB/T18384.1-2001. Electric vehicle-safety specification part 1: On-board energy storage[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2001.
- [9] 李礼夫, 符兴锋. HEV 电动力能量计算机动态监控系统研究[J]. *机械与电子*, 2004(5): 35-37.
- LI Lifu, FU Xingfeng. Study of the computer dynamic monitor system of electricity energy for hybrid electric vehicle[J]. *Machinery and Electronics*, 2004(5): 35-37.
- [10] 赵静炜, 陈全世, 杨孝纶, 等. GB/T 19751-2005 混合动力电动汽车安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- ZHAO Jingwei, CHEN Quanshi, YANG Xiaolun, et al. GB/T 19751-2005. Hybrid electric vehicles safety specification[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2006.
- [11] 叶子波, 符兴锋, 周斯加. HEV 后碰撞安全性仿真和试验研究[J]. *华南理工大学学报*, 2011, 39(11): 138-143.
- YE Zibo, FU Xingfeng, ZHOU Sijia. The safety simulation of rear-end collision and experimental study of HEV[J]. *Journal of South China University of Technology*, 2011, 39(11): 138-143.
- [12] 李哲, 韩雪冰, 卢兰光, 等. 动力型磷酸铁锂电池的温度特性[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(18): 115-120.
- LI Zhe, HAN Xuebing, LU Languang, et al. Temperature characteristics of power LiFePO₄ batteries[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(18): 115-120.

作者简介: 符兴锋, 男, 1977 年出生, 博士。主要研究方向为节能与新能源汽车电池系统开发与设计、整车高压安全系统开发。

E-mail: fuxingfeng@gaeci.cn