

基于等效 BSFC 和电池 SOC 平衡的插入式混合动力汽车分段式能量分配策略研究

林 潇¹ 徐 晓² 管 成²

1. 上海捷能汽车技术有限公司, 上海, 201804 2. 浙江大学, 杭州, 310027

摘要: 基于所提出的插入式并联混合动力汽车系统结构, 对整车动力/传动系统(包括发动机、电机、电池、离合器、变速箱等子系统)进行了动态精确建模, 模拟了行车换挡过程中同步器切换、离合器接合/分离等瞬态过程。根据电池 SOC 值分段采用最大用电策略或效率优先策略, 提出了基于等效 BSFC 和电池 SOC 平衡的分段式能量分配策略, 兼顾了发动机 BSFC 和电机充/放电效率, 实现了系统在当前转速和输入轴需求转矩下的最佳转矩分配。结果表明, 所提出的能量分配策略在不牺牲汽车各项性能的前提下, 提高了动力系统工作效率和整车燃油经济性。

关键词: 混合动力汽车; 等效 BSFC; 分段控制; 转矩分配

中图分类号: U469.7

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2012.04.024

Subsection—typed Energy Management for a Plug—in Hybrid Electric Vehicle Based on Equivalent BSFC and Battery SOC Balancing

Lin Xiao¹ Xu Xiao² Guan Cheng²

1. Shanghai E—propulsion Auto Technology Co., Ltd., Shanghai, 201804

2. Zhejiang University, Hangzhou, 310027

Abstract: Based on the proposed system architecture of a plug—in parallel hybrid vehicle, a dynamics mathematical model of the whole vehicle’s powertrain/transmission system including engine, motor, battery, clutch, transmission box was put forward which was capable of simulating transit synchronizer progress and clutch engage or disengage progress during gear shift or mode change stage. In accordance with the battery SOC, the electricity max algorithm or powertrain efficiency algorithm was adopted. The energy distribution algorithm of powertrain efficiency based on equivalent BSFC and battery SOC balancing was brought forward which took engine’s BSFC and motor’s motor/generation efficiency into consideration. The optimal torque distribution can be realized under varying sets of vehicle speed and torque requests at the input shaft. Theoretical analysis and simulation results show that, the proposed energy distribution algorithm can increase powertrain system working efficiency and the whole system fuel economy without sacrificing any vehicle performance.

Key words: hybrid electric vehicle; equivalent BSFC(brake specific fuel consumption); subsectional control; torque distribution

0 引言

目前, 纯电动汽车产业化还面临技术不成熟、关键部件成本过高等问题, 混合动力汽车可作为其替代产品实现节能减排的目标。目前全球各大汽车集团已经研发且批量生产了数款混合动力汽车, 譬如丰田 Prius 混联式混合动力汽车, 本田 Insight 并联式混合动力汽车, 福特 Escape 混合动力汽车等。为了实现最佳的燃油效率和尾气排放特性, 高等院校、公司及研究机构开始研究配备了大容量电池和外部充电接口的插入式混合动力汽车。截止目前, 已有数款插入式(plug—in)混

合动力汽车面世, 包括通用 Volt 串联式插入式混合动力汽车、福特 Escape 插入式混合动力汽车、丰田 Prius 插入式混合动力汽车等。相比较于普通混合动力汽车, 插入式混合动力汽车具有如下几方面特点: ①能减少汽油或其他液体燃料的消耗量; ②能实现纯电动驱动, 显著减少尾气排放量; ③汽车充电功能提升电网的效率。

从 20 世纪 90 年代末期至今, 在混合动力汽车研究领域已有大量的文献出版, 这些文献主要关注于动力系统设计、部件选型及参数优化配置、转矩分配策略、控制系统设计等^[1-3], 而对插入式混合动力汽车的研究相对较少。插入式混合动力汽车的研究可追溯到 2005 年, 当年丰田公司在日本发布了全球第一款具备外部充电功能、部分实现纯电动行驶的插入式混合动力概念车。之后,

收稿日期: 2011—02—18

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA044401)

Rousseau 等^[4]基于不可导矩阵优化算法对插入式混合动力汽车控制参数进行了优化。Wu 等^[5]基于粒子群算法对插入式混合动力汽车控制参数进行了优化。Carlson 等^[6]对三款插入式混合动力汽车(Renault Kangoo、Hymotion Prius 和 EnergyCS Priu)进行了油耗、排放、电能消耗量的比较分析。Cao 等^[7]利用 PSAT 专业软件对插入式混合动力汽车 Hymotion Prius 进行了模型验证,并改进了发动机开关频率和工作状况。Karbowski 等^[8]采用基于全局优化的 Bellman 原理对插入式混合动力汽车的能量流进行了优化。Rousseau 等^[9]基于标准工况对电机/电池参数进行了优化匹配,并且研究了不同行驶工况对电池系统带来的影响。学者在插入式混合动力汽车的能量分配策略^[10]上开展了相应的研究工作并取得了一系列的研究成果。

本文建立了 plug-in 并联式混合动力汽车动力系统的数学模型,对离合器、同步器、电机、发动机以及液压油路系统的动态特性和控制过程进行了详细的建模。针对所提出的 plug-in 动力系统结构,进行了混合动力系统包括 CD(charge deplete)和 CS(charge sustain)模式的实时控制策略的开发和验证。结果表明,所提出的控制策略能实时决定动力系统运行模式,动态设定发动机、电机优化转矩值,提高系统工作效率。

1 混合动力汽车建模

笔者所设计的 plug-in 并联式混合动力汽车动力系统连接结构如图 1 所示,发动机与电机分别通过 C1 离合器和 C2 离合器连接到转矩耦

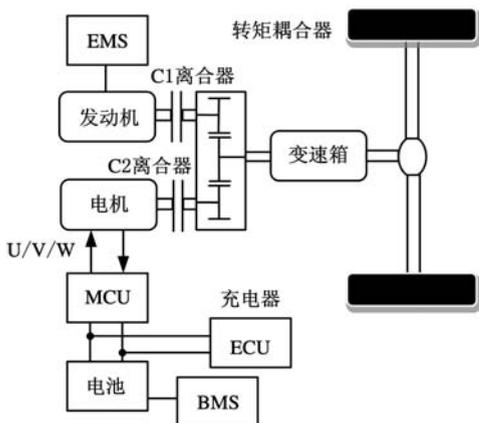


图 1 并联式 plug-in 混合动力汽车系统结构

合器。动力系统中配置了大容量的锂电池,可以用来储存发动机多余能量、制动能量或者作为电机的动力源。

并联式 plug-in 混合动力汽车控制系统结

构如图 2 所示。建模总体思路为:从驾驶员模块得到油门踏板信号和制动踏板信号,并将信号输入到混合动力控制单元(HCU)中,HCU 计算整车总需求转矩,综合电池 SOC 值,电机、发动机工作状态及能力,决定系统运行模式,优化分配总需求转矩,最终发送转矩指令等一系列控制指令给发动机控制器(EMS)、电机控制器(MCU)、电池管理系统(BMS)以及变速箱液压系统中压力/流量阀。

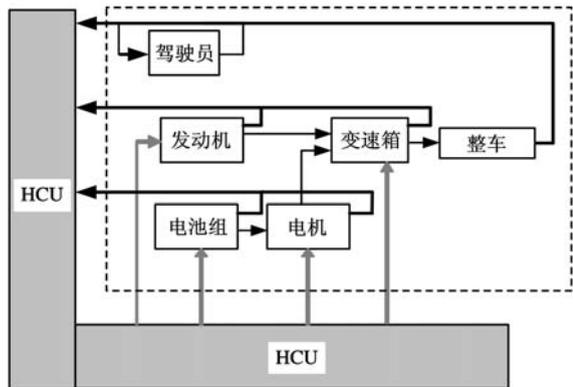


图 2 并联式 plug-in 混合动力汽车控制系统结构

转矩最终输出到变速箱输出轴上,并驱动车辆前进/后退,得到的转速反馈回变速箱输出轴,进而到 C1 离合器右盘和 C2 离合器右盘,可得到当前与 C1 离合器左盘相连的发动机转速以及与 C2 离合器左盘相连的电机转速。

驾驶员模块中输入量为需求车速 v_{req} 和实际车速 v_{act} ,经过 PI 控制器得到的输出量为油门踏板信号 ρ_{acc} 和制动踏板信号 ρ_{brk} ,且

$$\rho_{acc} = \rho_{brk} = G_P(v_{req}(t) - v_{act}(t-1)) + G_I \int (v_{req}(t) - v_{act}(t-1))dt \quad \rho_{acc}, \rho_{brk} \in [0, 1] \quad (1)$$

式中, G_P 、 G_I 分别为 PID 控制器 P、I 参数值。

发动机模块接收来自 HCU 的发动机转矩指令和开关指令,得到发动机输出轴到输入轴的指示扭矩、发动机转速、油耗率、排放等参数,且

$$\omega_e(t) = \omega_{e1_left}(t) + \int (\tau_{e_brk}(t) / J_e) dt \quad (2)$$

$$\tau_{e_indi}(t) = \tau_{e_brk}(t) + \tau_{e_fric}(t) \quad (3)$$

$$\int F_c(t) dt = \int F_c(\omega_e(t), \tau_{e_brk}(t)) dt \quad (4)$$

式中, τ_{e_brk} 、 τ_{e_fric} 、 τ_{e_indi} 分别为发动机制动转矩、发动机摩擦转矩、发动机指示转矩; ω_{e1_left} 、 ω_e 分别为 C1 离合器左盘速度、发动机实际转速; J_e 、 F_c 分别为发动机转动惯量、发动机油耗率。

电机模块接收来自 HCU 的电机工作模式指令、转矩指令/转速指令以及来自电池 BMS 的电压值,得到电机运行的实际转矩值及转速值,并通过查电机发电/电动效率表得到电池模块的充电/

放电电流值 $i_{\text{bat}}(t)$, 即

$$\omega_{\text{m_act}}(t) = \omega_{\text{c2_left}}(t) + \int (\tau_{\text{m_act}}(t)/J_{\text{m}}) dt \quad (5)$$

$$i_{\text{bat}}(t) = \frac{\omega_{\text{m_act}}(t)\tau_{\text{m_act}}(t)}{V_{\text{bat}}(t)\eta_{\text{m}}(\omega_{\text{m_act}}(t)\tau_{\text{m_act}}(t))^n} \quad (6)$$

式中, $\omega_{\text{c2_left}}$ 为 C2 离合器左盘转速; $V_{\text{bat}}(t)$ 为电池端电压; $\omega_{\text{m_act}}$ 为电机实际转速; $\tau_{\text{m_act}}$ 、 η_{m} 分别为电机实际转矩和电机工作效率; J_{m} 为电机转动惯量; n 为电机工作模式, $n=1$ 时为电动, $n=-1$ 时为发电。

电池模块主要根据电机模块中输出的实时电流值计算电池 SOC 值, 即

$$S(t) = S_{\text{mit}} + \frac{\int -i_{\text{bat}}(t) dt}{S_{\text{max}}} \quad (7)$$

$$u_{\text{oc}}(t) = u_{\text{oc}}(S(t), \text{temp}(t)) \quad (8)$$

$$r_{\text{bat}}(t) = r_{\text{bat}}(S(t), \text{temp}(t)) \quad (9)$$

$$V_{\text{bat}}(t) = u_{\text{oc}}(t) - r_{\text{bat}}(t)i_{\text{bat}}(t) \quad (10)$$

式中, $S(t)$ 为电池 SOC 值; $\text{temp}(t)$ 为与时间相关的函数; i_{bat} 为电池充/放电电流; u_{oc} 、 r_{bat} 分别为电池开路电压和电池内阻值; S_{max} 为电池最大电量值。

离合器模块:

$$\omega_{\text{c1_left}}(t) = \omega_{\text{c1_right}}(t) + \int [(\tau_{\text{e_brk}}(t) - \tau_{\text{c1_capa}})/(J_{\text{e}} + J_{\text{c1_left}})] dt \quad (11)$$

$$\omega_{\text{c2_left}}(t) = \omega_{\text{c2_right}}(t) + \int [(\tau_{\text{m_act}}(t) - \tau_{\text{c2_capa}})/(J_{\text{m}} + J_{\text{c2_left}})] dt \quad (12)$$

式中, $\tau_{\text{c1_capa}}$ 、 $\tau_{\text{c2_capa}}$ 分别为 C1、C2 离合器转矩传输能力; $J_{\text{c1_left}}$ 、 $J_{\text{c2_left}}$ 分别为 C1、C2 离合器左盘转动惯量; $\omega_{\text{c1_right}}$ 、 $\omega_{\text{c2_right}}$ 分别为 C1、C2 离合器右盘转速。

所设计的系统 C1 离合器常开, C2 离合器常闭。 $\tau_{\text{c1_capa}}$ 和 $\tau_{\text{c2_capa}}$ 与离合器摩擦片数目、静/动摩擦因子以及摩擦片上正向压力成线性关系, 其中摩擦片上压力与电磁阀电流指令信号相关。应保证发动机或电机输出的转矩值小于等于 C1/C2 离合器的最大转矩传输能力, 从而防止离合器出现打滑磨损。

最终计算车速公式如下:

$$m_{\text{veh}} \dot{v}_{\text{veh}}(t) = (\tau_{\text{e_brk}}(t) + \tau_{\text{m_act}}(t)) \cdot \vartheta_{\text{gear}}(t)/r_{\text{tire}} - f_r m_{\text{veh}} g + 0.5 \alpha C_d A v_{\text{veh}}^2(t) \quad (13)$$

式中, m_{veh} 、 r_{tire} 分别为整车质量和车轮半径; v_{veh} 为车速; f_r 、 α 分别为转动阻力系数和空气密度; $\vartheta_{\text{gear}}(t)$ 为传动系统的速比; C_d 为空气动力学阻力系数; A 为汽车迎风面积。

2 控制策略

2.1 系统状态

根据动力系统不同连接结构, 并联式混合动力汽车主要可分为 3 种工作模式: 纯电动模式、并联式驱动模式、纯发动机模式。

纯电动模式过渡到并联式模式需要经过发动

机点火启动、结合 C1 离合器两个瞬态模式。模式切换条件定义为

$$\tau_{\text{is}}(t) > \tau_{\text{m_max}}(\omega_{\text{m_act}}(t), S(t), \text{temp}(t)) \quad (14)$$

$$\tau_{\text{is}}(t) > \tau_{\text{ev2para}}(v_{\text{act}}(t)) \quad (15)$$

$$S(t) < S_{\text{low}} \quad (16)$$

式中, τ_{is} 为变速箱输入轴端转矩需求; $\tau_{\text{m_max}}$ 为驱动电机的峰值转矩; τ_{ev2para} 为纯电动切换到并联模式的临界转矩; S_{low} 为启动发动机的最低 SOC 值。

并联式模式经过 C2 离合器打开瞬态模式, 可进入纯发动机模式。纯发动机模式与传统车类似, 主要是考虑在车辆高速行驶且输入轴转矩需求较低时脱离电机, 有利于提高整车工作效率。模式切换条件定义为

$$\tau_{\text{is}}(t) < \tau_{\text{par2ice}}(v_{\text{veh}}(t)) \quad (17)$$

$$v_{\text{veh}}(t) > v_{\text{veh_par2ice}} \quad (18)$$

式中, τ_{par2ice} 为并联模式切换到纯发动机模式的临界转矩; $v_{\text{veh_par2ice}}$ 为并联模式切换到纯发动机模式的最低车速。

2.2 工作模式

plug-in 混合动力汽车的控制策略, 可根据电池 SOC 值分为两种主要工作模式: CD 模式和 CS 模式。为了延长 plug-in 混动车的纯电动行驶里程(all electric range, AER), 同时兼顾电池使用寿命等相关问题, 设计的工作模式切换策略如下:

If $S(t) < S_{\text{CD_low_limit}}$

$$\varphi_{\text{sys_state}} = \text{ENUM_SYS_STATE_CS}$$

Else if $S(t) > S_{\text{CD_high_limit}}$

$$\varphi_{\text{sys_state}} = \text{ENUM_SYS_STATE_CD}$$

end

上述 CD/CS 模式切换策略考虑了滞环比较, 其中 $S_{\text{CD_low_limit}}$ 参数比 $S_{\text{CD_high_limit}}$ 略小。 $S_{\text{CD_low_limit}}$ 参数值的设定决定了 CD 模式工作的电池 SOC 区间, 即决定了纯电动行驶能力。

CD 模式和 CS 模式工作侧重点有所不同: 在 CD 模式下, 在满足车辆动力性的前提下尽可能使用电机驱动, 从而实现更长的 AER 和零排放; 在 CS 模式下, 主要考虑提高车辆工作效率, 维持电池 SOC 在窄窗口波动。

2.2.1 CD 模式控制策略

CD 模式采用的最大用电策略规则定义如下: ①若输入轴端需求转矩大于当前电机实际转速和电池 SOC 下的电机最大转矩, 则电机转矩指令为当前状态下电机最大输出转矩, 余下差额部分由发动机补偿。②输入轴端需求转矩介于零与当前电机最大转矩之间。如果发动机处于当前的工作状态时间已达到要求的最小值或发动机已处于断油关停状态, 则电机转矩指令为当前输入轴

端需求转矩,发动机转矩指令为零。否则维持发动机转矩工作于一较小标定值,电机转矩需求指令为余下部分。③输入轴端需求转矩小于零。如果发动机处于当前的工作状态时间已达到最小值或发动机已处于断油关停状态,则电机转矩指令为当前输入轴端需求转矩,发动机转矩指令为零。否则维持发动机转矩工作于一较小标定值,电机转矩需求指令为输入轴需求转矩与发动机当前输出转矩之和。

2.2.2 CS 模式控制策略

CS 模式下采用效率优先策略,具体如下:根据油门踏板信号和制动踏板信号,查表并计算得到当前变速箱输入轴端转矩需求。按照当前系统连接状态,在纯电动/纯发动机状态下分别让电机/发动机单独实现输入轴端转矩需求。在并联式驱动状态时,动力系统并入的转矩源有发动机和电机,因此需制订合理的转矩分配策略实现系统效率最优、SOC 窄窗口维持等指标。

图 3 所示为 CS 模式并联式驱动下效率优先控制策略框图,其中, τ_{is_slow} 为变速箱输入轴转矩需求低频部分; τ_{is_fast} 为变速箱输入轴转矩需求高频部分; τ_{e_op} 为发动机优化所需求的转矩值; τ_{m_op} 为电机优化所需求的转矩值; τ_{e_req} 为发动机转矩指令; τ_{m_req} 为电机转矩指令; $\tau_{e_brk_max}$ 为发动机最大输出转矩值; $\tau_{m_mot_max}$ 为电机最大电动转矩值; $\tau_{m_gen_max}$ 为电机最大发电转矩值。

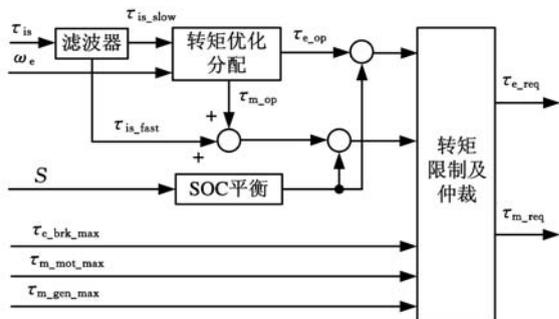


图 3 CS 模式并联式驱动下效率优先控制策略框图

输入轴端需求转矩经过一阶滤波,可分解为快速转矩需求和慢速转矩需求两部分,即

$$\tau_{is} = \tau_{is_fast} + \tau_{is_slow} \quad (19)$$

其中快速转矩需求部分全部由电机承担,慢速转矩需求部分需要在发动机和电机间进行分配。转矩优化模块见图 4。

图 4 中, $\tau_{e_op_mot}$ 为电动状态下发动机优化需求转矩值; $\tau_{m_op_mot}$ 为电动状态下电机优化需求转矩值; $\tau_{e_op_gen}$ 为发电状态下发动机优化需求转矩值; $\tau_{m_op_gen}$ 为发电状态下电机优化需求转矩值。

定义等效制动油耗率 (brake specific fuel

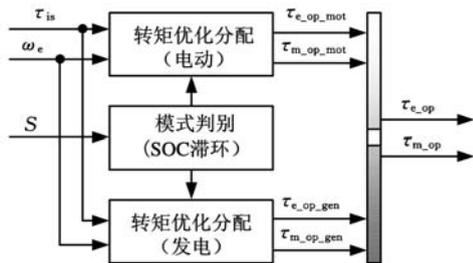


图 4 转矩优化分配策略框图

consumption, BSFC) 为 b^* :

$$b^* = b \frac{p_e}{p_t}$$

式中, b 为制动油耗率。

电机处于电动模式时:

$$b_{mot}^* = b \frac{\tau_{is} - \Delta\tau_{mot}}{\tau_{is}} \quad (20)$$

电机处于发电模式时:

$$b_{reg}^* = b \frac{\tau_{is} + \Delta\tau_{gen}}{\tau_{is} + \Delta\tau_{gen}(1-\eta)} \quad (21)$$

$$\forall \omega_e > 0$$

令

$$\frac{\partial b_{mot}^*}{\partial \tau_e} = 0 \quad \frac{\partial b_{reg}^*}{\partial \tau_e} = 0$$

式中, p_e, p_t 分别为发动机功率和总功率; $\Delta\tau_{mot}, \Delta\tau_{gen}$ 分别为电机电动转矩值和电机发电转矩值; η 为电机发电效率。

根据上述算法可得到电机分别处于电动和发电状态下时发动机的优化转矩点 $\tau_{e_op_mot}, \tau_{e_op_reg}$, 则

$$\tau_{m_op_mot} = \Delta\tau_{mot} = \tau_{is} - \tau_{e_op_mot} \quad (22)$$

$$\tau_{m_op_gen} = -\Delta\tau_{gen} = \tau_{is} - \tau_{e_op_reg} \quad (23)$$

通过遍历发动机 BSFC 曲线以及电机效率曲线各点,可以得到电动模式和发电模式下以发动机转速和输入轴需求转矩为输入量,发动机/电机优化工作点为输出量的转矩优化表。综上所述,根据发动机 BSFC,电机充/放电效率曲线,对每个转速和转矩需求进行处理,能得到兼顾发动机和电机系统优化的发动机目标优化工作点。即

$$\tau_{e_opt} = \tau_{e_opt}(\tau_{is_slow}, \omega_e) \quad (24)$$

模式判别模块根据当前电池 BMS 反馈回来的电池 SOC 值作滞环处理,选定采用发电模式或电动模式的转矩优化分配值,维持电池 SOC 稳定。SOC 平衡模块(图 3)主要实现的功能是:当 SOC 值低于目标 SOC 值时,则在发动机当前优化工作点上加上一额外的用于充电的充电扭矩;当 SOC 值高于目标 SOC 值时,则在发动机当前优化工作点上减去一额外的用于放电的放电扭矩。控制算法中设计了一以 SOC 实际值与 SOC 目标值差值为输入量、额外扭矩为输出量的 PI 控

制器,确保电池 SOC 值在窄范围内波动。

3 结果分析

将基于等效 BSFC 和电池 SOC 平衡的分段式 plug-in 混合动力汽车能量分配策略集成到所搭建的混合动力系统整车模型中,选用 UDSS 以及 NEDC 工况进行对比分析。整车及关键动力系统部件技术参数见表 1。

表 1 混合动力系统及动力部件参数

动力部件	参数明细
发动机	1.5L 57kW 1NZ-FXE 汽油发动机
电机	30kW 永磁同步电机
电池	A123 锂电池 40A·h,616 单体,280V
变速箱	AMT
车轮	半径 0.35m
整车	质量 1928kg

图 5~图 7 给出了一个 UDSS 工况下,电池初始 SOC 值为 80%时动力系统工作状态。当前处于 CD 模式,能量分配策略采用最大用电策略。反馈的实际车速能够与目标车速相吻合,加速、减速等动力性能得到满足。

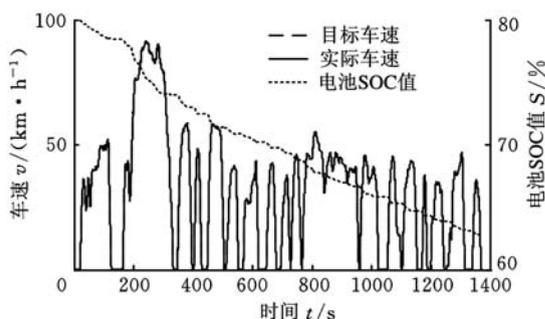


图 5 UDSS 工况下 CD 模式目标车速、实际车速及电池 SOC 值

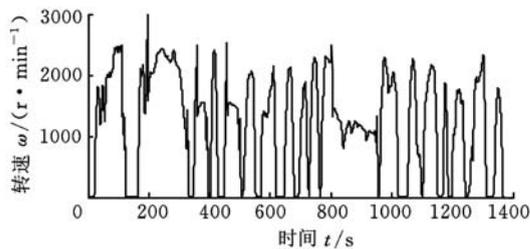


图 6 UDSS 工况下 CD 模式电机实际转速

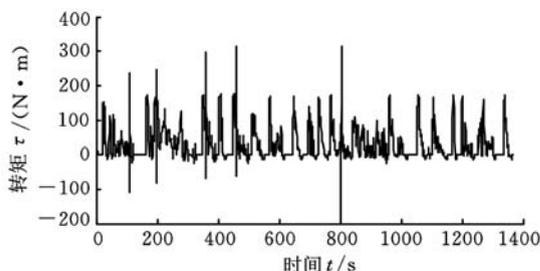


图 7 UDSS 工况下 CD 模式电机实际转矩

图 8~图 13 为初始电池 SOC 值为 30%,按照 UDSS 工况得到的动力系统参数工作状态。按照 CD 和 CS 模式切换定义,SOC 值小于 30%即进入 CS 模式,当 SOC 值大于 25%,若单独电机驱动能满足系统动力需求,则系统处于纯电动驱动状态,相应可见电池 SOC 值下降速率较快(图 8)。当电池 SOC 值到达 25%,则触发纯电动到并联驱动的模式切换,保持 C2 结合的同时结合 C1。此时需维持电池稳定于 25%的窄窗口(图 8),发动机开启频率明显加强(图 10),电机和发动机的转矩指令根据上文所提出的优化算法进行设定(图 11、图 12)。

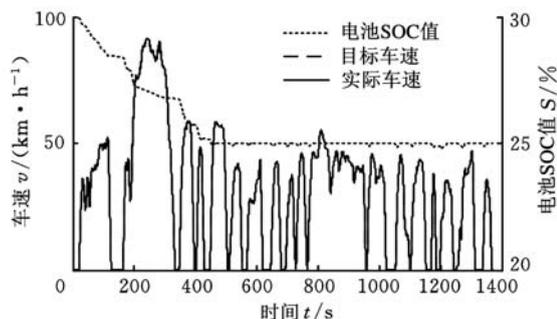


图 8 UDSS 工况下 CS 模式目标车速、实际车速及电池 SOC 值

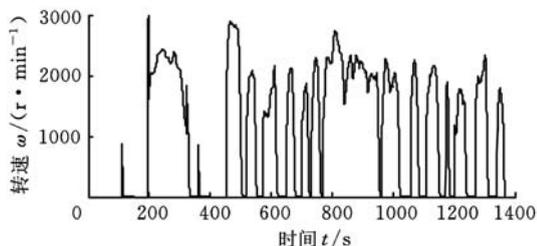


图 9 UDSS 工况下 CS 模式发动机转速

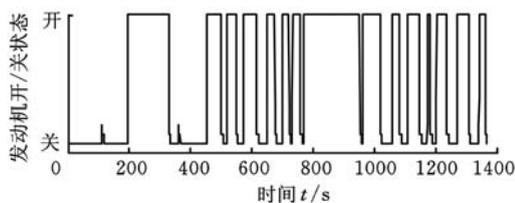


图 10 UDSS 工况下 CS 模式发动机开/关状态

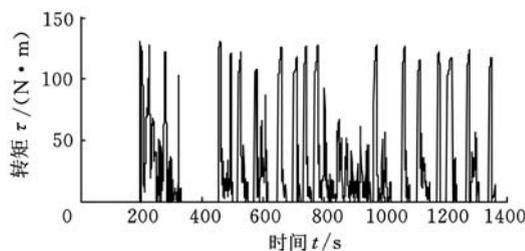


图 11 UDSS 工况下 CS 模式发动机转矩需求

图 13、图 14 所示为 UDSS 工况下电池 SOC 值变化、发动机开关状态变化以及发动机油耗值曲线。由图可见,电池 SOC 值在 CD 模式下迅速

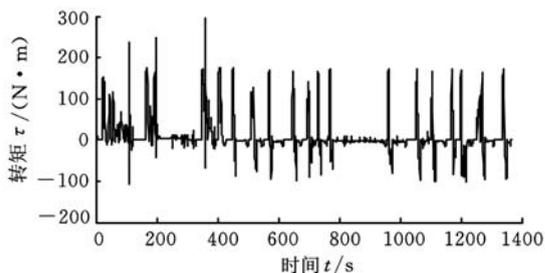


图 12 UDSS 工况下 CS 模式电机转矩

下降,发动机开启占比时间较短,电机作为主要驱动力;当电池 SOC 值降到一定值时,发动机开启频率增加,电池 SOC 值能维持稳定在目标水平,此时发动机作为主要驱动力,控制策略采用效率优化进行转矩的分配。

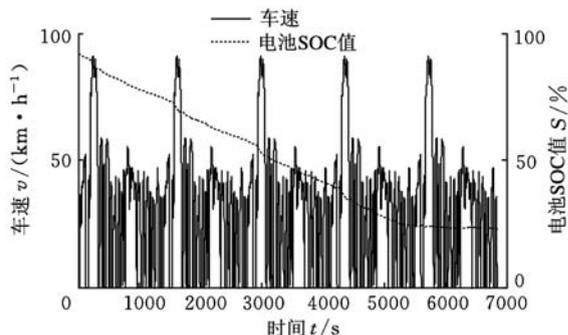


图 13 UDSS 工况下车速和电池 SOC 值

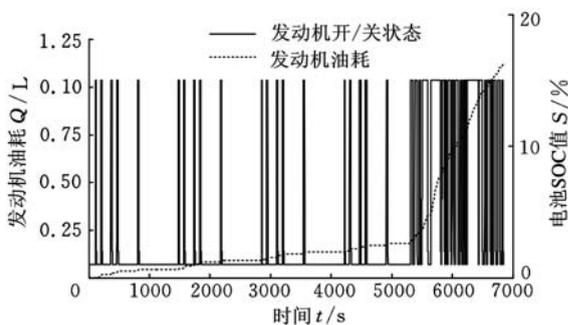


图 14 UDSS 工况下发动机油耗和开关状态

分别用连续 5 个 UDSS 工况和 NEDC 工况进行了控制策略的比较分析(表 2)。两种工况下,电池起始 SOC 值都为 92%,电池最终 SOC 值都能维持在 25% 附近。百公里电耗一项,NEDC 比 UDSS 高,是由于 5 个 NEDC 工况下,行车里程较短且 NEDC 功率需求较 UDSS 功率需求低,在所设计的控制策略中发动机并入的机会较少,因此电机驱动所消耗的电能较多。百公里油耗一项,NEDC 比 UDSS 小,是由于 5 个 NEDC 工况下整车处于 CS 模式且是并联式驱动的,时间较短,发动机开启总的占比较低。与采用最小油耗控制策略的相同动力系统及参数的基准车相比,能实现百公里油耗下降 10.95%,百公里电耗增加 6.73%。

表 2 混合动力系统能量分配策略分析

	UDSS	NEDC
周期数	5	5
行驶距离(km)	59.93	55.07
始末 SOC 值	0.92~0.232	0.92~0.247
油耗(kg)	0.811	0.3225
电耗(kW·h)	7.7	7.54
百公里电耗(kW·h)	12.85(12.04)	13.69
百公里油耗(L)	1.87(2.10)	0.808
发动机工作占比(%)	19.6	7.6

4 结论

(1)最大用电策略能保证 plug-in 混合动力汽车纯电动行驶里程较长,有益于减少城市工况下车辆尾气排放量。

(2)效率优先策略能在所有可能的电池 SOC 值和输入轴需求转矩值组合下进行优化转矩的分配计算,实现动力系统整体的效率优化,提升整车燃油经济性。

(3)实现了近似优化的转矩最佳分配算法的在线应用,查表速度快,无繁重的计算任务,从而克服了以往优化算法只能实现离线优化计算而不能在线实时应用的弊端。

参考文献:

- [1] 赵克刚,黄向东,罗玉涛. 混联式混合动力电动汽车动力总成的优化匹配与监控[J]. 汽车工程, 2005, 27(2):146-151.
- [2] 舒红,秦大同,杨为. 混合动力汽车动力传动系参数设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(1):19-22.
- [3] 潘双夏,王冬云,李贵海. 基于能量守恒和四线法的 SOC 估算策略研究[J]. 汽车工程, 2007, 29(5):415-419.
- [4] Rousseau A, Pagerit S, Gao D. Plug-in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Parameter Optimization[J]. Journal of Asian Electric Vehicles, 2008, 6(2):1125-1133.
- [5] Wu X L, Cao B G, Wen J P, et al. Particle Swarm Optimization for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Control Strategy Parameter [C]//IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC). Harbin, 2008:1-5.
- [6] Carlson R, Duoba M, Bohn T, et al. Testing and Analysis of Three Plug-in Hybrid Electric Vehicles [C]//SAE 2007 World Congress, 2007-01-0283.
- [7] Cao Q, Pagerit S, Carlson R B, et al. PHEV Hy-motion Prius Model Validation and Control Improvements[EB/OL]. <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/HV/455.pdf>.
- [8] Karbowski D, Rousseau A, Pagerit S, et al. Plug-

半承载式客车骨架有限元建模与轻量化研究

龙江启¹ 兰凤崇² 王金轮² 周斯加¹

1. 温州大学,温州,325035 2. 华南理工大学,广州,510640

摘要:采用薄板单元和梁单元相结合的方法,建立了某半承载式客车骨架的有限元模型,并通过试验对模型进行了验证。首先,对原车模型进行了强度分析,获得整车应力分布信息,结果表明大部分构件有足够裕量储备,可以通过改变结构、构件截面参数等方法来进行优化减重。其次,通过构件对整车重量的灵敏度分析,获知对整车重量影响较大的构件,提出了轻量化优化方案,该方案减重达7.35%,效果明显。最后,通过对优化前后整车强度、刚度、模态特性等的比对,验证了优化方案的可行性。

关键词:客车骨架;有限元模型;轻量化;强度

中图分类号:U463.831

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.04.025

Study on Lightweight Design and Finite Element Modeling of Semi-integral Coach Skeleton

Long Jiangqi¹ Lan Fengchong² Wang Jinlun² Zhou Sijia¹

1. Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang, 325035

2. South China University of Technology, Guangzhou, 510640

Abstract: A FE model of a semi-integral coach skeleton was established with shell elements and beam elements. The FE model was verified by experimental test. The strength of original coach skeleton model was computed and the stress distribution of the whole coach skeleton was obtained. Results show the potential for lightweight design through structure configuration modification and optimization. A sensitivity analysis was conducted to select the components which affect the structural performance mostly and a lightweight scheme was proposed, which shows the weight-saving is of 7.35% of the original model. The lightweight model is mainly developed on the basis of sensitivity analysis and topology optimization. Finally, the feasibility of the optimization scheme was verified by the comparison of strength, stiffness and modal parameters with the original model.

Key words: coach skeleton; finite element(FE) model; lightweight; strength

0 引言

除了采用新材料和新工艺外,车身轻量化主要是利用优化理论对车身结构进行优化设计。在车身轻量化的设计过程中,车身结构必须满足强度、刚度、振动特性等要求。

利用有限元方法进行汽车骨架结构轻量化设计已有许多研究成果。文献[1]对某型号半挂车车

架结构进行了轻量化设计。文献[2]研究了按内力调整截面尺寸的车身骨架设计方法。文献[3]建立了薄板单元和梁单元相结合的有限元分析模型,对车身骨架的强度和动态(模态)特性进行了分析。文献[4]提出了一种提高车身结构分析精度的方法,以T形铝合金冲压件为例研究了成形过程对静强度特性的影响。文献[5]以梁单元模型为基础,对复杂部件建立实体单元模型来生成梁体混合模型,建立了半承载式客车车身结构有限元模型。文献[6]利用刚度灵敏度分析确定优化设计变量,对客车骨架结构进行了骨架减重

收稿日期:2011-10-08

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(Y1110046);浙江省科技计划项目(2010C31094);温州市科技计划资助项目(G20100135,G20100162)

in Vehicle Control Strategy: from Global Optimization to Real-time Application[EB/OL]. <http://130.202.177.50/pdfs/HV/435.pdf>.

[9] Rousseau A P. Impact of Real-world Drive Cycles on PHEV Battery Requirements[C]//SAE World Congress & Exhibition. Detroit, 2009: 2009-01-1383.

[10] 张博,李君,高莹,等. Plug-in 混合动力汽车能量管理策略全局优化研究[J]. 中国机械工程,2010,

21(6):715-720.

(编辑 王艳丽)

作者简介:林 潇,男,1982年生。上海捷能汽车技术有限公司工程师、博士。主要研究方向为混合动力汽车控制策略、能量分配策略建模及优化研究。发表论文10余篇。徐 晓,女,1988年生。浙江大学机械设计研究所硕士研究生。管 成,男,1968年生。浙江大学机械设计研究所副教授、博士。