

DOI: 10.7652/xjtuxb201507004

复合电源系统功率分配策略研究

高建平, 葛坚, 赵金宝, 郗建国

(河南科技大学车辆与交通工程学院, 471003, 河南洛阳)

摘要: 从复合电源系统数学模型出发,选取电机需求功率、电量消耗模式与电量维持模式切换时动力电池的荷电状态、超级电容补电上限及动力电池恒放电功率这 4 个因子,提出了基于 4 因子法的复合电源系统功率分配策略。在分析超级电容能量利用率、插电式混合动力汽车运行环境及用电机制的基础上,采用控制变量法分别建立了基于离合器结合转速和混合驱动时超级电容充电状态的 2 种不同分配策略。试验表明,与基于电机平均功率分配策略相比,全程处于电量消耗模式下的策略其燃油经济性最好且提升了 3.15%,从而验证了该策略的有效性。基于模拟退火算法的优化结果,得出了各因子对综合油耗的影响机理,以期为建立复合电源系统功率分配策略提供理论基础。

关键词: 复合电源;4 因子法;模拟退火算法;插电式混合动力汽车

中图分类号: U469.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)07-0017-08

Power Allocation Strategy for Hybrid Power System

GAO Jianping, GE Jian, ZHAO Jinbao, XI Jianguo

(Vehicle and Transportation College, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China)

Abstract: Four-factor power allocation strategy for the hybrid power system is proposed by selecting the motor required power, the battery state of charge (SOC) as switching between charge-depleting (CD) and charge-sustaining (CS), the super-capacitor upper limit of SOC, and the battery maximum constant discharge power from the point of hybrid power system model. Analyzing the super-capacitor energy efficiency and the plug-in hybrid electric vehicle operating environment and electric mechanism, and adopting control variable method, two different kinds of allocation strategies are established by combining clutch and speed and judging charging states of the super-capacitor in hybrid drive on CD. Compared with the control strategy based on the average motor power, the fuel economy of the strategy fully on CD reaches the most efficiency, which rises by 3.15%. The trend curves of influence of each factor on the integrated fuel consumption are drawn with the optimization results of SA to guide to construct power allocation strategy for hybrid power system.

Keywords: hybrid power system; method of four factors; simulated annealing algorithm; plug-in hybrid electric vehicle

插电式混合动力汽车(PHEV)、纯电动汽车(EV)是未来汽车行业发展的必然趋势^[1-3]。鉴于目前动力电池的发展状况,单一动力电池系统无法满

足能量和功率的双重需求,因此由动力电池与超级电容组成的复合电源系统(hybrid power system, HPS),是新能源汽车最佳储能方案之一^[4-5]。然而,

收稿日期: 2014-10-09。 作者简介: 高建平(1976—),男,副教授。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2012AA111603);河南省自然科学基金资助项目(132300410151)。

网络出版时间: 2015-04-27 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150427.1754.006.html>

复合电源系统功率分配策略直接影响着整车的使用性能,因此功率分配策略是 HPS 的研究重点。

王庆年等人采用基于车速的超级电容期望荷电状态(SOC)平衡方法建立了功率分配策略,但其在计算期望 SOC 时将超级电容提供的能量直接视为整车的动能,且未考虑行驶阻力及转动惯量引起的能量损失,故所得的期望 SOC 存在误差^[6]。E. Schaltz 等人通过采用模糊滑模控制算法来控制能量回收,由此提高了能源利用效率,发挥了复合电源的特性,但模糊控制是一种智能算法,应用于硬件在环或者实车时会导致实时性不佳,也不能保证控制效果最优^[7]。北京理工大学研制开发的“绿色奥运”电动低地板公交车 EV863,通过采用速度控制和电流约束的方法建立了复合电源功率分配策略,其能有效避免动力电池的过电流充放电,1 km 平均电耗降低到 676.4 W·h,但并未对试验样车的超级电容采取任何控制,功率分配策略还有待进一步完善^[8]。

针对上述问题,根据 HPS 数学模型,本文提出了基于 4 因子法的 PHEV 复合电源功率分配策略,以提高超级电容电量利用率、纯电续航里程及整车燃油经济性。

1 PHEV 复合电源系统建模

研究对象为一款双电机同轴混联插电式混合动力汽车,结构如图 1 所示,其主要包括两大系统,分别是车载电源系统和驱动系统。车载电源系统是采用动力电池先与双向 DC/DC 转换器串联、再与超级电容并联的拓扑结构,这利于超级电容快速提供启动、加速、爬坡时的功率和回收制动时的能量;驱动系统采用了简洁的纯电直驱传动、串并结合的工作模式,即离合器 1 断开时驱动电机工作,实现串联纯电驱动,离合器 1 闭合时发动机、汽车起动发电于一体(ISG)的电机、驱动电机混合工作,实现并联混合驱动。

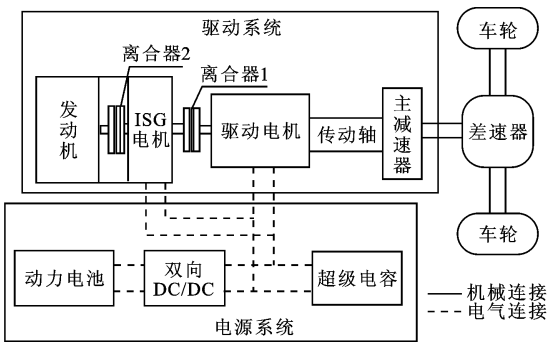


图 1 插电式混合动力汽车结构示意图

1.1 复合电源系统

HPS 建模的目的是利用数学模型对分配策略进行分析和验证。通过参数匹配^[9],获得动力电池与超级电容的匹配结果如表 1 所示。

表 1 HPS 参数匹配结果

类型	节数	额定电压/V	电量/kW·h
Maxwell 超级电容	8	48.0	0.37
锰酸锂 动力电池	121	3.8	13.80

HPS 的核心是将动力电池与超级电容之间的功率进行合理分配,电机直流端对 HPS 要求的功率为 $P_m(t)$,HPS 允许输出的功率为 $P_{allow}(t)$ 且由动力电池功率 $P_{bat}(t)$ 、超级电容功率 $P_{cap}(t)$ 和系统损耗功率 $P_{loss}(t)$ 组成,它们之间关系式如下

$$P_m(t) = P_{allow}(t) - P_{loss}(t) = P_{cap}(t) + \eta P_{bat}(t) - P_{loss}(t) \quad (1)$$

式中: η 为双向 DC/DC 转换器的效率。若忽略系统内部的损耗功率得

$$P_m(t) = P_{cap}(t) + \eta P_{bat}(t) \quad (2)$$

1.2 动力电池建模

目前,PHEV 的动力电池一般采用锂离子动力电池,常见的电池组模型主要有 Rint 模型、Thevenin 模型及神经网络模型等。Rint 模型基于了充放电试验数据,简单、可靠,因此本文采用这一模型。该模型等效电路图如图 2 所示,其中包括一个直流(DC)电压源和一个内阻,开路电压 $U_{bat}(t)$ 和内阻 $R_{bat}(t)$ 都是电池荷电状态 $S_{bat}(t)$ 、电池箱温度 T 的函数,但与 $S_{bat}(t)$ 相比, T 的影响相对较小,为了简化模型,忽略 T 对 $U_{bat}(t)$ 和 $R_{bat}(t)$ 的影响。所以,开路电压 $U_{bat}(t)$ 、内阻 $R_{bat}(t)$ 及 $S_{bat}(t)$ 的函数关系式如下

$$U_{bat}(t) = U_{bat,SOC}(t) \quad (3)$$

$$R_{bat}(t) = R_{bat,SOC}(t) \quad (4)$$

$$S_{bat}(t) = \frac{C_N - \int_0^t \eta_{bat} i_{bat}(t) dt}{C_N} \quad (5)$$

式中: C_N 为动力电池的标称容量; η_{bat} 为电池充放电系数; $i_{bat}(t)$ 为动力电池母线电流。

由式(5)推得 $i_{bat}(t)$ 与 $S_{bat}(t)$ 的关系式如下

$$i_{bat}(t) = -\frac{C_N}{\eta_{bat}} S'_{bat}(t) \quad (6)$$

$P_{bat}(t)$ 的计算式为

$$P_{bat}(t) = [U_{bat}(t) - R_{bat}(t) i_{bat}(t)] i_{bat}(t) \quad (7)$$

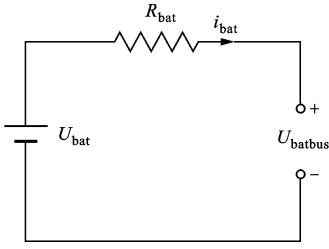


图 2 Rint 模型中的动力电池等效电路

将式(3)、式(4)、式(6)代入式(7), $P_{\text{bat}}(t)$ 的最终计算式为

$$P_{\text{bat}}(t) = -\frac{C_{\text{N}}^2}{\eta_{\text{bat}}^2} R_{\text{bat}} S_{\text{bat}}(t) (S'_{\text{bat}}(t))^2 - \frac{C_{\text{N}}}{\eta_{\text{bat}}} U_{\text{bat}} S_{\text{bat}}(t) S'_{\text{bat}}(t) \quad (8)$$

1.3 超级电容建模

为了准确模拟超级电容的性能,本文采用了一种常用的改进型超级电容动态等效电路模型(RC模型),如3所示,图中 C 为超级电容的理想电容量, $Q_{\text{sc}}(t)$ 为超级电容的电量, C_{sc} 为电容量, $i_{\text{sc}}(t)$ 为通过电容的电流, R_{leak} 为漏电阻(模拟自放电时的漏电损失), $i_{\text{leak}}(t)$ 为通过漏电阻的漏电流, R_{ESR} 为等效串联电阻(模拟超级电容在充放电过程中的热损失和瞬间电压突变^[10]), $U_{\text{capbus}}(t)$ 为超级电容的端电压; $i_{\text{cap}}(t)$ 为通过超级电容的电流。

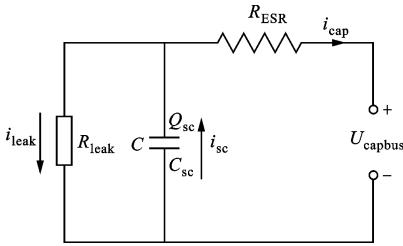


图 3 RC 模型中的超级电容等效电路

根据电容特性及基尔霍夫电流定理,当超级电容放电时,超级电容的端电压、电流如下

$$U_{\text{capbus}}(t) = \frac{Q_{\text{sc}}(t)}{C_{\text{sc}}} - R_{\text{ESR}} i_{\text{cap}}(t) \quad (9)$$

$$i_{\text{cap}}(t) = i_{\text{sc}}(t) - i_{\text{leak}}(t) \quad (10)$$

$$i_{\text{sc}}(t) = \frac{dQ_{\text{sc}}(t)}{dt} = Q'_{\text{sc}}(t) \quad (11)$$

$$i_{\text{leak}}(t) = \frac{Q_{\text{sc}}(t)}{C_{\text{sc}} R_{\text{leak}}} \quad (12)$$

超级电容 SOC 定义如下

$$S_{\text{cap}}(t) = \frac{Q_{\text{sc}}(t)}{Q_{\text{max}}} = \frac{Q_{\text{sc}}(t)}{C_{\text{sc}} U_{\text{max}}} \quad (13)$$

式中: U_{max} 为超级电容的最高电压。由式(13)推算出 $Q_{\text{sc}}(t)$ 与 $S_{\text{cap}}(t)$ 的关系式如下

$$Q_{\text{sc}}(t) = C_{\text{sc}} U_{\text{max}} S_{\text{cap}}(t) \quad (14)$$

对式(14)两边求导得

$$Q'_{\text{sc}}(t) = C_{\text{sc}} U_{\text{max}} S'_{\text{cap}}(t) \quad (15)$$

将式(14)、式(15)代入式(11)、式(12)得 $i_{\text{sc}}(t)$ 、 $i_{\text{leak}}(t)$ 的新的计算式如下

$$i_{\text{sc}}(t) = C_{\text{sc}} U_{\text{max}} S'_{\text{cap}}(t) \quad (16)$$

$$i_{\text{leak}}(t) = \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{leak}}} S_{\text{cap}}(t) \quad (17)$$

再将式(16)、式(17)代入式(10)得到 $i_{\text{cap}}(t)$ 的新的计算式如下

$$i_{\text{cap}}(t) = C_{\text{sc}} U_{\text{max}} S'_{\text{cap}}(t) - \frac{U_{\text{max}}}{R_{\text{leak}}} S_{\text{cap}}(t) \quad (18)$$

根据图3,超级电容输出功率

$$P_{\text{cap}}(t) = U_{\text{capbus}}(t) i_{\text{cap}}(t) \quad (19)$$

将式(9)、式(14)、式(18)代入式(19)得到 $P_{\text{cap}}(t)$ 的最终计算式如下

$$P_{\text{cap}}(t) = \left(C_{\text{sc}} U_{\text{max}}^2 + 2 \frac{R_{\text{ESR}}}{R_{\text{leak}}} C_{\text{sc}} U_{\text{max}}^2 \right) S_{\text{cap}}(t) S'_{\text{cap}}(t) - \left(\frac{U_{\text{max}}^2}{R_{\text{leak}}} + \frac{U_{\text{max}}^2 R_{\text{ESR}}}{R_{\text{leak}}^2} \right) S_{\text{cap}}^2(t) - R_{\text{ESR}} C_{\text{sc}}^2 U_{\text{max}}^2 (S'_{\text{cap}}(t))^2 \quad (20)$$

2 基于4因子法的功率分配策略设计

2.1 4因子选取

由式(2)可知,驱动电机需求功率 P_{m} 是实时存在的, P_{m} 的大小影响着 HPS 功率的分配形式,因此选取 P_{m} 作为功率分配策略的设计因子之一。

由式(8)所示, $P_{\text{bat}}(t)$ 与 $S_{\text{bat}}(t)$ 、 $S'_{\text{bat}}(t)$ 有关,当 $S_{\text{bat}}(t)$ 下降到某一门限值时,整车会由电量消耗(CD)模式切换到电量保持(CS)模式,所以门限值会影响 CD 模式的行驶里程,从而影响整车经济性,为此选取模式切换的目标门限值 S_{shift} 作为设计因子之一。

当超级电容 $S_{\text{cap}}(t)$ 较低时,动力电池需给超级电容充电,且一直补充到设定的 SOC 上限值 S_{high} 为止。补充的能量计算式如下

$$E = \frac{1}{2} C_{\text{sc}} (U_{\text{high}}^2 - U_{\text{low}}^2) \quad (21)$$

$$E = \frac{1}{2} C_{\text{sc}} U_{\text{max}} (S_{\text{high}}^2 - S_{\text{low}}^2) \geq \int_0^t P_{\text{bat}}(t) dt \quad (22)$$

式中: U_{high} 为超级电容在充电达到 SOC 上限值 (S_{high}) 时的电压; U_{low} 为超级电容在最低 SOC (S_{low}) 时的电压; t 为动力电池给超级电容充电的时间。

由式(22)可知, S_{high} 的高低决定着动力电池释

放能量的多少,因此选取 S_{high} 作为设计因子之一。

由式(22)还可知,动力电池的输出功率一部分用于超级电容充电,另一部分用于电机需求。若 $P_{\text{bat}}(t)$ 小,则难以保证超级电容充电功率需求;若 $P_{\text{bat}}(t)$ 大,则会损伤动力电池。为了避免动力电池功率出现过放、过充,可以利用双向 DC/DC 转换器、采用恒功率充放电来解决。所以,电池最大恒放功率 P_{dischg} 也作为设计因子之一。

2.2 功率分配策略总体结构

在 S_{shift} 、 S_{high} 、 P_{dischg} 确定的前提下,随着 P_{m} 的变化,会形成图 4 中所示的曲线段,各曲线段描述及 HPS 对应的工作模式如表 2 所示。

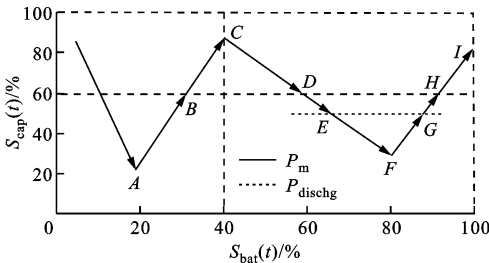


图 4 复合电源功率分配策略原理图

表 2 图 4 曲线段描述及 HPS 工作模式

图 4 曲线段	描述	工作模式
AB	$S_{\text{bat}}(t) < S_{\text{shift}}$ $S_{\text{cap}}(t) < S_{\text{high}}$	离合器 1 闭合,动力电池、 超级电容充电
BC	$S_{\text{bat}}(t) < S_{\text{shift}}$ $S_{\text{cap}}(t) \geq S_{\text{high}}$	仅超级电容放电
CD	$S_{\text{bat}}(t) \geq S_{\text{shift}}$ $S_{\text{cap}}(t) \geq S_{\text{high}}$	仅超级电容放电
DE	$S_{\text{bat}}(t) \geq S_{\text{shift}}$ $S_{\text{cap}}(t) < S_{\text{high}}$ $P_{\text{m}} > P_{\text{dischg}}$	动力电池按设定 功率放电,不足部分 由超级电容补充
EG	$S_{\text{bat}}(t) \geq S_{\text{shift}}$ $S_{\text{cap}}(t) < S_{\text{high}}$ $P_{\text{m}} < P_{\text{dischg}}$	动力电池按设定 功率放电,多余部分 给超级电容充电
GH	$S_{\text{bat}}(t) \geq S_{\text{shift}}$ $S_{\text{cap}}(t) < S_{\text{high}}$ $P_{\text{m}} \geq P_{\text{dischg}}$	动力电池按设定 功率放电,不足部分 由超级电容补充
HI	$S_{\text{bat}}(t) \geq S_{\text{shift}}$ $S_{\text{cap}}(t) \geq S_{\text{high}}$	仅超级电容放电

在 HPS 拓扑结构下配置了双向 DC/DC 转换器,其控制方式有两种,分别是理想电压控制和电流控制。考虑到直流母线中电压是随时变化的,并且需要通过调节双向 DC/DC 转换器输出端电压来调

节 HPS 的功率分配,所以本文选择电流控制方法。采用电流控制最关键的参数是 BUCK(降压型的 DC/DC)模式下的电流限制系数 $\alpha_{\text{DC,BUCK}}$ 和 BOOST(升压型的 DC/DC)模式下的电流限制系数 $\alpha_{\text{DC,BOOST}}$ 。 $\alpha_{\text{DC,BUCK}}$ 、 $\alpha_{\text{DC,BOOST}}$ 计算式如下

$$\alpha_{\text{DC,BUCK}} = \frac{P_{\text{dischg}}}{P_{\text{DC,max}}} \times 100\% \tag{23}$$

$$\alpha_{\text{DC,BOOST}} = \frac{P_{\text{chg}}}{P_{\text{DC,max}}} \times 100\% \tag{24}$$

式中: P_{chg} 为动力电池充电功率; $P_{\text{DC,max}}$ 为双向 DC/DC 最大转换功率,为 50 kW。如式(23)、式(24)显示,在仿真环境下,若要改变设定的动力电池恒放功率,直接调节 $\alpha_{\text{DC,BUCK}}$ 即可。

3 PHEV 分析及验证

3.1 超级电容能量利用率分析

存储在超级电容中的能量计算式如下

$$E_0(t) = \frac{1}{2} C_{\text{sc}} U_{\text{max}}^2 S_{\text{cap}}^2(t) \tag{25}$$

由此可知,当 S_{cap} 降低到 50% 时,能量将变为原来的 25%,如果继续让超级电容放电,能量利用率会骤然降低。因此,为了使超级电容高效工作,电容的 SOC 应保持在一个相对较高的状态。

3.2 PHEV 运行环境分析

线路全长约 17.5 km 时,PHEV 运行 2 个来回后需充电 1 次,一天需要充电 2 次才能保证 200 km 左右的运行里程。在充电前,PHEV 需运行 70 km 左右,而中国典型城市公交循环工况的运行里程约 5.8 km,由此可知仿真时需要运行 12 个循环工况。

PHEV 运行之前(充电完成),电池、电容的 SOC 初始值均为 100%。现有 PHEV 动力电池放电深度能达到 20%,据此将 S_{shift} 定为 30%,从而有 10% 的空间进行电量维持。

根据统计,车速在 20 km/h 和 25 km/h 时,电机转速分别在 875 r/min 和 1 000 r/min 左右,此时结合离合器 1 能实现混合驱动,发动机处于高效工作区域,由纯电驱动完成起步,且处于低速行驶模式,因此本文选择这 2 种转速进行分析。

3.3 PHEV 用电机制分析

整车能量需求

$$E_{\text{req}} = \int_0^T P_{\text{req}}(t) dt = \int_0^T P_{\text{eng}}(t) + P_{\text{m}}(t) dt = \int_0^T P_{\text{eng}}(t) + P_{\text{cap}}(t) + \eta P_{\text{bat}}(t) dt \tag{26}$$

式中: $P_{\text{req}}(t)$ 为整车实时需求功率; $P_{\text{eng}}(t)$ 为发动机

实时输出功率。

当超级电容和动力电池储能一定时,发动机何时启动,混合驱动时是否给超级电容充电,都将影响 PHEV 的用电机制。采用控制变量法从这 2 个角度进行分析,分别建立了对应的策略 2 和策略 3。令基于电机平均功率的分配策略为策略 0,原有的基于 4 因子法的功率分配策略为策略 1,4 种策略的参数设置如表 3 所示。

表 3 4 种策略的参数设置

策略	结合离合器 1 时转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$		CD 模式混合驱动时
	CD 模式	CS 模式	
0	875	700	否
1	875	700	否
2	1 000	700	否
3	875	700	是

3.4 PHEV 半实物仿真及实车试验验证

3.4.1 半实物仿真验证 半实物仿真^[11]环境中的

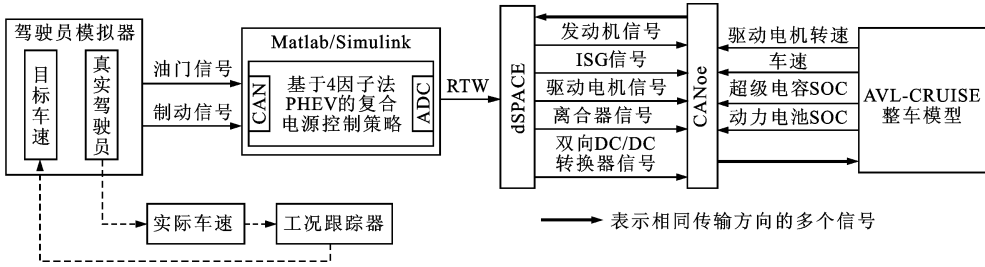


图 5 半实物仿真试验方案

主要硬件系统包括 dSPACE 实时仿真系统、CANoe 和驾驶员模拟器,主要软件系统包括 Matlab/Simulink、AVL-CRUISE 及 dSPACE 自带的 数据监测软件 ControlDesk。dSPACE 具有丰富的 I/O 接口,仿真试验需采用两路模拟数字转换器(ADC)模数转换通道来采集油门信号和制动信号,采用一路控制器局域网(CAN)通道来接收与发送数据,在底层驱动与上层控制策略配置完成后利用实时工作间(RTW)将数据自动下载到 dSPACE 板卡中。CANoe 为 CAN 控制器,可真实模拟实车时数据间的 CAN 传输。驾驶员模拟器可实现人机试验,驾驶员根据目标车速操作油门踏板和制动踏板,该仿真结果更接近实际。本文在 Matlab/Simulink 环境中进行接口配置、建立 4 因子法功率分配策略,在 AVL-CRUISE 环境中建立 PHEV 整车模型。半实物仿真试验方案如 5 所示,半实物仿真试验平台如图 6 所示。

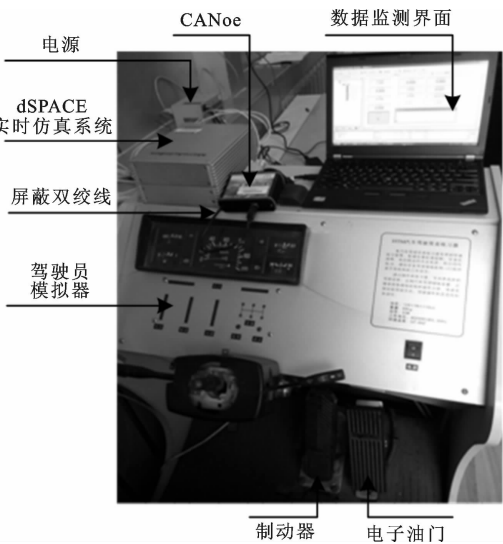


图 6 半实物仿真试验平台

4 因子下 PHEV 仿真结果如图 7 所示,其中策略 0 与策略 1 的仿真结果见图 7a。由图可见,策略 1 进入 CS 模式的时间(11 012 s)要比策略 0(8 410 s)多

了 2 602 s,CD 模式行驶里程提高了 32.7%,表明策略 1 能有效增加纯电续驶里程。策略 1 中超级电容 SOC 基本维持在 50%以上,策略 0 为 40%,可见策略 1 提高了能量利用率。

300~400 s 期间整车的功率分配情况见图 7b。需要说明的是,为了防止超级电容在 S_{high} 门限处出现振荡,认为超级电容的功率输出/输入状态在区间 $[S_{\text{high}} - 0.5, S_{\text{high}} + 0.5]$ 是一致的。因此,图 4 中:在 A 点超级电容 SOC 低于下限值时动力电池输出功率;在 B 点电机的制动功率达到最大,这些功率全部由超级电容回收;在 C 点整车处于制动工况,动力电池停止输出功率,由制动能量对超级电容进行充电;在 D 点前超级电容 SOC 低于上限值,此时动力电池输出功率,其中一部分满足电机需求,多余部分对超级电容进行充电;在 D 点超级电容 SOC 到达上限值,动力电池停止输出功率,超级电容开始输出功率。

策略 2、策略 3 的仿真结果见图 7c、图 7d。由图

可见,策略 2 在 7 014 s 进入 CS 模式,且在 CD 模式行驶了 31 000 m,而策略 3 在整个循环工况下一直处于 CD 模式, S_{cap} 保持在较高水平。PHEV 燃油经济性指标(油耗、电耗、综合油耗)的对比如图 8 所示。由图可见,基于 4 因子法的分配策略实现了多用电、少用油的控制目标,策略 3 提高了纯电续航里程,较策略 0 的燃油经济性提高了 3.15%。由此说明,在 CD 模式混合驱动时,超级电容充电对 PHEV 的纯电续航里程及燃油经济性具有重要的影响。

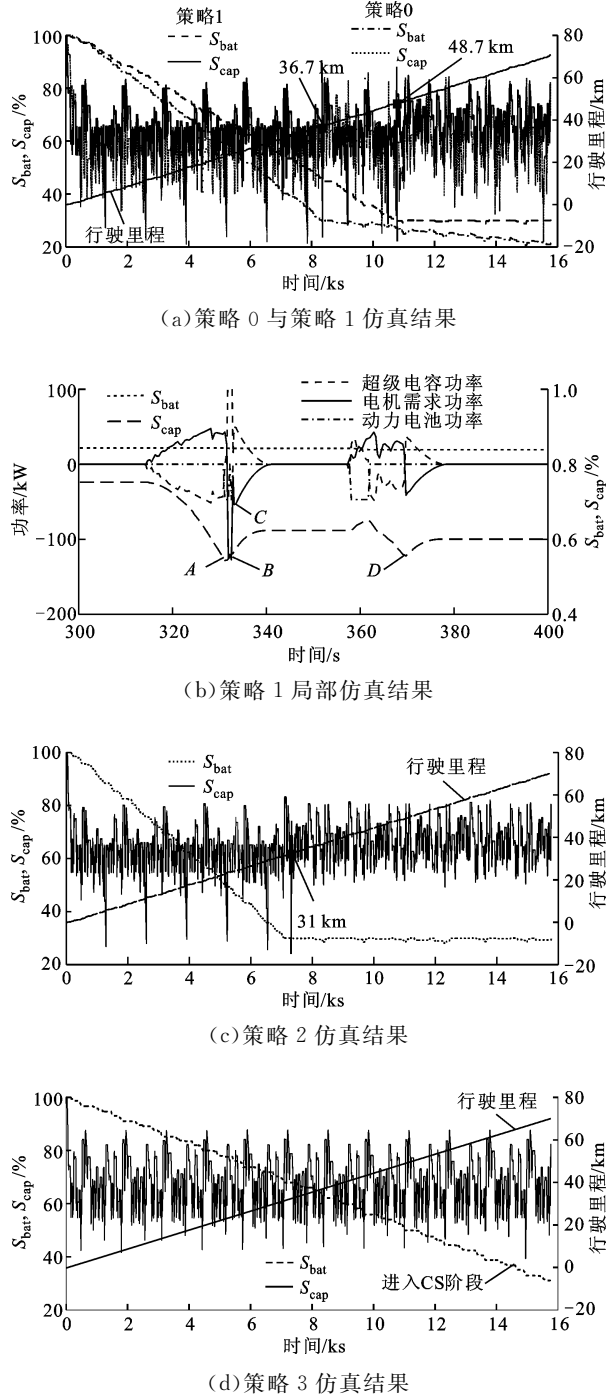


图 7 4 因子下 PHEV 仿真结果

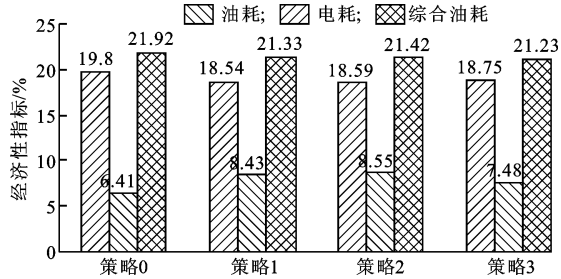


图 8 PHEV 燃油经济性对比

3.4.2 实车试验验证 对一辆具有相同混合动力系统的插电式公交车进行了试验,同时将策略 3 下载到试验车辆的控制器中,试验样车如图 9 所示。



图 9 插电式混合动力公交试验样车

试验样车运行了 1 314 s,行驶里程约为 5.82 km,100 km 油耗为 19.54 L,100 km 电耗为 8.32 kW·h,100 km 综合油耗为 22.27 L,车速时间历程如图 10 所示。部分动力电池、超级电容各自的 SOC 及功率的时间历程如图 11 所示。采用 4 因子法的功率分配策略后,车辆在运行的过程中超级电容承担了大部分的输出功率,减缓了动力电池电量的消耗,加之必要时动力电池给超级电容进行充电,动力电池 SOC 上限值由 90.05% 增加到 93.24%,由此增加了纯电续航里程,使得 100 km 综合油耗

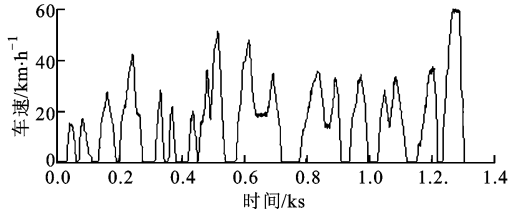


图 10 采用 4 因子分配策略的样车车速时间历程

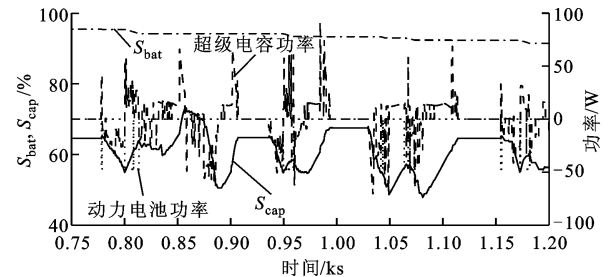


图 11 复合电源 SOC 及相应功率的时间历程

降低了 3%。

3.5 因子优化

由于策略 1、策略 2、策略 3 的综合油耗差别不大,所以折衷考虑选择策略 1 进行优化。优化参数具有非线性、多目标性,所以求解的目的是使相互冲突的多目标函数在可行域内得到最优解。优化的数学模型为

$$\begin{aligned} \min_{x \in \Omega} \quad & f(x) = \{Q_{\text{fuel}}\} \\ \text{s. t.} \quad & g_i(x) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m \\ & x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (27)$$

式中: $f(x)$ 为目标函数; Q_{fuel} 为循环工况下车辆 100 km 综合油耗; $g_i(x) \geq 0$ 为约束条件; m 为约束条件个数; x_i 为优化变量参数; n 为优化变量个数; x_i^l 与 x_i^u 分别为第 i 个优化变量参数的上限和下限。优化变量、约束条件等内容如表 4 所示。

表 4 优化参数及内容

优化变量	约束条件	优化算法
S_{shift}	0~18 km/h 加速时间 ≤ 3 s	模拟退火 算法 ^[12-13]
S_{high}	0~50 km/h 加速时间 ≤ 20 s	
P_{dischg}	15 km/h 最大爬坡度 $\geq 12\%$; 跟踪车速差的最大绝对值 ≤ 3 km/h	

优化寻优过程如图 12 所示。由图可见,寻优初期具有明显的方向性,且收敛速度快,当迭代步数为

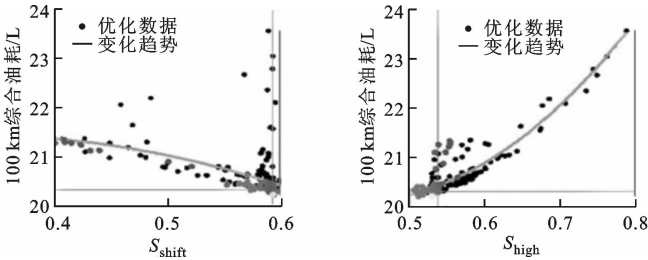


图 13 各优化变量与综合油耗的关系

4 结 论

(1)3 种不同的基于 4 因子法的功率分配策略都达到了期望的控制效果,与基于电机平均功率策略相比,均提高了超级电容的能量利用率,降低了整车综合油耗,其中策略 3(全程处于 CD 模式的策略)整车综合油耗降低了 3.15%。

(2)不同用电机制对 PHEV 的纯电行驶里程和燃油经济有着重要的影响,在 CD 模式混合驱动时对超级电容进行充电,不仅使 PHEV 能在 CD 模式下完成整个行驶里程,增加纯电行驶里程,也能提高整车的燃油经济性。

200 时收敛进入较优区域,在第 223 步时出现最优解,此时 100 km 综合油耗 20.23 L,较优化前燃油经济性提高了 5.16%。优化前后参数变化如表 5 所示。

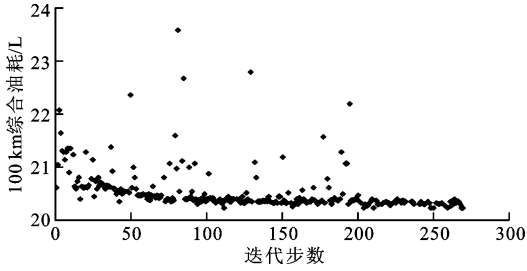


图 12 优化寻优过程

表 5 优化前后参数变化

状态	S_{shift}	S_{high}	$P_{\text{dischg}}/\text{kW}$	100 km 综合油耗/L
优化前	0.30	0.6	40	21.33
优化后	0.32	0.51	45	20.23

综合油耗与各优化变量的分布如图 13 所示。由图可见: S_{shift} 、 P_{dischg} 与综合油耗近似呈线性递减关系,随着它们的逐渐增加,综合油耗呈减少的趋势; S_{high} 与综合油耗近似呈线性递增关系,说明 S_{high} 设置得越高,在 CS 模式需要补充的电量越多,发动机的燃油消耗就越高。

(3)控制策略优化后,燃油经济性提高了 5.16%,综合油耗与 S_{shift} 、 P_{dischg} 都近似呈线性递减关系,与 S_{high} 近似呈线性递增关系,该结果对建立 HPS 功率分配策略具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 陈全世. 先进电动汽车技术 [M], 北京: 化学工业出版社, 2013.

[2] 张京明, 任殿波, 崔淑梅, 等. 并联混合动力汽车复合电源控制策略的研究 [J]. 高技术通讯, 2010, 20 (3): 298-302.

ZHANG Jingming, REN Dianbo, CUI Shumei, et al. The research on a strategy for control of composite

- power in parallel hybrid electric vehicles [J]. Chinese High Technology Letters, 2010, 20(3): 298-302.
- [3] KRUPA J S, RIZZO D M, EPPSTEIN M J, et al. Analysis of a consumer survey on plug-in hybrid electric vehicles [J]. Transportation Research: Part A, 2014, 64(31): 14-31.
- [4] 张丹红, 汪江卫, 刘开培, 等. HEV 车载复合电源系统控制策略优化研究 [J]. 电源技术, 2012, 136(5): 650-654.
ZHANG Danhong, WANG Jiangwei, LIU Kaipei, et al. Optimization of hybrid power system control strategy for HEV [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2012, 136(5): 650-654.
- [5] LU S, CORZINE K A, FERDOWS M, et al. A new battery/ultracapacitor energy storage system design and its motor drive integration for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(4): 1516-1523.
- [6] 王庆年, 曲晓冬, 于远彬, 等. 复合电源式混合动力公交车功率分配策略研究 [J]. 汽车工程, 2014, 36(4): 389-425.
WANG Qingnian, QU Xiaodong, YU Yuanbin, et al. A study on the power allocation strategy for hybrid electric bus with compound electric powers [J]. Automotive Engineering, 2014, 36(4): 389-425.
- [7] SCHALTZ E, KHALIGH A, RASMUSSEN P O. Influence of battery/ultracapacitor energy-storage sizing on battery lifetime in a fuel cell hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(8): 3882-3891.
- [8] 南金瑞, 王建群, 孙逢春. 电动汽车能量管理系统的研究 [J]. 北京理工大学学报, 2005, 25(5): 384-389.
NAN Jinrui, WANG Jianqun, SUN Fengchun. Study of energy management system of electric vehicle [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005, 25(5): 384-389.
- [9] 朱福顺, 何洪文, 林逸, 等. 基于 CRUISE 的复合电源能量管理系统研究 [J]. 计算机仿真, 2013, 30(1): 219-222, 253.
ZHU Fushun, HE Hongwen, LIN Yi. Study on energy management system for hybrid power system based on CRUISE [J]. Computer Simulation, 2013, 30(1): 219-222, 253.
- [10] 胡春花. 纯电动大客车复合电源系统能量管理关键技术研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
- [11] GANS N R, DIXON W E, LIND R, et al. A hardware in the loop simulation platform for vision-based control of unmanned air vehicles [J]. Mechatronics, 2009, 19(7): 1043-1056.
- [12] 高建平, 刘振楠, 郭志军, 等. 基于组合优化算法的混合动力客车控制策略优化 [J]. 客车技术与研究, 2013, 35(6): 1-4.
GAO Jianping, LIU Zhennan, GUO Zhijun, et al. Optimization of hybrid electric bus control strategy with combined optimization algorithm [J]. Bus & Coach Technology and Research, 2013, 35(6): 1-4.
- [13] 万鲁河, 刘万宇, 崔金香, 等. 基于模拟退火算法的空间度量物化选择 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(7): 1100-1102.
WAN Luhe, LIU Wanyu, CUI Jingxiang, et al. Selective materialization of special measures based on simulated annealing algorithm [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(7): 1100-1102.

[本刊相关文献链接]

- 袁希文, 文桂林, 周兵. 考虑侧向稳定性的分布式电驱动汽车制动滑移率控制. 2015, 49(5): 43-48. [doi:10.7652/xjtuxb201505007]
- 许建, 张政, 李翔, 等. 独立驱动电动汽车横摆力矩的模糊控制算法. 2014, 48(7): 83-89. [doi:10.7652/xjtuxb201407015]
- 续丹, 王国栋, 曹秉刚, 等. 独立驱动电动汽车的转矩优化分配策略研究. 2012, 46(3): 42-46. [doi:10.7652/xjtuxb201203008]
- 陈鹏, 邱乐德, 王宇. 卫星认知无线电检测门限与功率分配联合优化算法. 2013, 47(6): 31-36. [doi:10.7652/xjtuxb201306006]
- 官丰奎, 叶鹏. 重叠 Nakagami-m 信道协作通信最优功率分配方案. 2012, 46(10): 78-82. [doi:10.7652/xjtuxb201210014]
- 宋婧, 丛犁, 葛建华, 等. 双层网络中一种协作博弈的动态资源分配方法. 2012, 46(10): 89-94. [doi:10.7652/xjtuxb201210016]

(编辑 苗凌)