

PHEV 电动轿车动力系统配置的关键问题与优化设计

李玉芳 吴炎花

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016)

摘要:插电式混合动力汽车(Plug-in hybrid electric vehicles,PHEV)被认为是电动汽车在目前动力电池瓶颈状态下最具发展潜力的混合驱动型式,而成本控制是其发展的关键。以减小PHEV 动力系统尺寸、实现有效成本控制为目的,对影响PHEV 动力系统配置的关键问题进行了系统分析,提出动力系统有限分级配置方法以及设计目标和边界条件的确定依据;搭建以设计目标和边界条件为输入、以获取满足条件的最小化PHEV 动力系统设置为目标的优化选型平台;基于此平台对国内一线城市某PHEV 进行动力系统设计和仿真验算,结果验证了系统配置的合理性和优化平台的有效性。

关键词:插电式混合动力汽车; 动力系统配置; 成本控制; 关键问题; 优化设计

中图分类号:U463.52 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2012)02-0273-06

Key Issues and Optimization Design of PHEV City Car Power System Configuration

Li Yufang, Wu Yanhua

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Plug-in hybrid electric vehicle (PHEV) is considered to be the most promising hybrid driving type of electric vehicles while power battery being in the current bottleneck state, and cost control is the key to its development. For reducing the size of PHEV power system and realizing effective cost control, key issues influencing PHEV power-train configuration are studied systematically. The classification of PHEV power-train configuration and the deterministic bases for the boundary conditions and design goals are proposed. And the optimization platform to obtain the minimum PHEV power-train system is built taking the design objectives and boundary conditions as the input variables. And based on this platform, the power-train of PHEV used in the first-tier cities in China is designed and simulated, the results validate the rationality of the system configuration and optimization platform effectiveness.

Key words: plug-in hybrid electric vehicle (PHEV); power-train configuration; cost control; key issues; optimization design

插电式混合动力汽车(Plug-in hybrid electric vehicle,PHEV)的系统配置介于纯电动汽车(Electric vehicle,EV)和混合动力汽车(Hybrid electric vehicle,HEV)之间,相比前者具有更强的远程行驶能力,而相对后者又具有更多的纯电行驶能

力^[1],非常适于对于日常多数情况在城市低速行驶而少数情况又有远距离需求的城市居民。而其实用化程度主要取决于动力系统的配置成本。

以有效成本控制、最小化PHEV 动力系统配置为目标,通过对其关键问题的系统分析,得出其设计

目标和边界条件的确定方法和依据,提出根据城市工况等因素对动力系统进行有限分级设计是控制成本的有效方法,并进行了优化平台搭建和仿真验算。

1 影响 PHEV 动力系统设计的 key 问题

PHEV 动力系统优化设计指的是通过合理确定设计目标和边界条件,进行选型配置优化才能实现 PHEV 成本的有效控制^[2]。其中 key 问题主要包括行驶工况、纯电行驶里程、动力性能等设计目标和动力电池寿命和系统配置型式及工作模式选择等边界条件。

1.1 设计目标

PHEV 的设计目标包括 3 层含义:①适合 PHEV 的使用工况及行驶工况确定;②此行驶工况下的纯电行驶能力;③动力性能目标。前两者一般用以计算动力电池的能量,参见式(1)^[3],而后者则用于计算发动机功率、电机功率及动力电池组的功率。

$$E = \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{\eta_{T_i}} \left(\frac{Gf u_i}{3\ 600} + \frac{C_D A u_i^3}{76\ 140} + \frac{\delta m u_i}{3\ 600} * \frac{u_{i+1} - u_i}{3.6(t_{i+1} - t_i)} \right) * \frac{(t_{i+1} - t_i)}{3\ 600} \right] \quad (1)$$

式中: E 为所需能量; N 为工况离散点数量; η_{T_i} 为系统效率; u_i 为工况 i 点车速; t_i 为工况点时刻; G , f 等其他参数含义及单位参见文献^[3]。

1.1.1 行驶工况

根据式(1),PHEV 在一定日常行驶工况下的纯电行驶能力决定了其动力电池的能量配置,选取具有能够反映该城市实际道路行驶状况的代表性工况,是合理设计 PHEV 动力系统及其性能测试的前提。目前国内采用欧洲 ECE15+EUDC 测试工况,工况特性见图1。ECE15 工况由 4 个 ECE 工况组成,用来模拟城市行驶过程中车辆经常碰到红灯、频繁停车、低速行驶、经常制动、减速等情况,近年为了考虑汽车的城郊高速公路工况加入了 EUDC 工况。

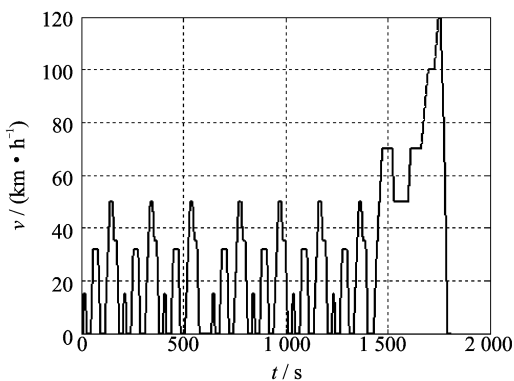


图1 ECE15+EUDC 工况特性

但是需要指出的是此工况主要是欧洲用于轻型车辆排放测试,并不适于像 PHEV 这样的新能源车辆的设计与性能测试。因此,美国再生能源实验室在 2006 年通过对 PHEV 特性的分析提出 SAE J1711 推荐规程的修改意见^[4]。修改意见对于各种模式下的燃料消耗测量测试方法为:部分荷电情况下以荷电维持(Charge sustaining, CS)模式运行,燃料消耗量按式(2)计算,而全电状态以荷电消耗(Charge deplete, CD)模式运行,燃料消耗量按式(3)计算。

$$\rho_{CS} = \frac{D}{G_{gas}} \quad (2)$$

$$\rho_{CD} = \frac{D}{G_{gas} + \frac{E_{elec}}{33.44}} \quad (3)$$

式中: ρ 为燃料消耗率; D 为测试行驶距离,CS 模式测试采用两个 UDDS 标准工况或两个 HWFET 标准工况,而 CD 模式测试采用 4 个 UDDS 标准工况或 3 个 HWFET 标准工况,其中 UDDS 为低负荷城市工况、HWFET 为乘用车高速路工况测试; G_{gas} 为燃料消耗量; E_{elec} 为测试结束后充电到满电状态所需电能。

对国内上海、北京这样的一线城市,PHEV 动力系统选型配置可以借鉴上述方法。而国内不同城市规模行驶状况差异很大,文献^[5~7]对涵盖直辖市、省会城市、地级市和县级市 4 种规模 8 个典型城市的机动车行驶工况进行研究。结果表明,不同层次的城市规模行驶工况差别很大,单一工况对特别强调动力系统尺寸的电动汽车研发非常不利。

1.1.2 纯电行驶能力

日常行驶距离一般取决于城市规模和居住习惯,是城市 PHEV 电动轿车设计纯电行驶能力的关键,直接决定了车载动力电池的配置数量和系统成本。图 2 给出美国 1995 年国家个人交通调查情况,显示大多数居民的日常行驶里程都很短,50% 的时间是少于 48 km^[8]。通用公司 Chevrolet Volt Concept 的电池容量配置就是依据美国有 78% 的人居住在离单位 32 km 以内的范围内而设定的。图 3 给出国家统计局 2010 年网上调查得出上海居民超过 70% 的人上下班来回距离在 40 km 以内,而零点研究 2006 年调查数据显示北京人均上班距离只有 19.3 km。所以,目前国内城市 PHEV 电动轿车纯电行驶能力设计在 40 km 之内能够满足如北京、上海等一线城市的居民日常出行要求。

由此考虑到国内不同城市规模的行驶工况和纯电行驶能力需求对 PHEV 动力系统配置的影响

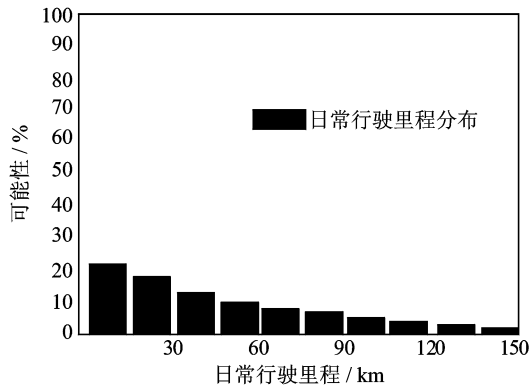


图2 日常的行驶里程分布(美国,1995年)

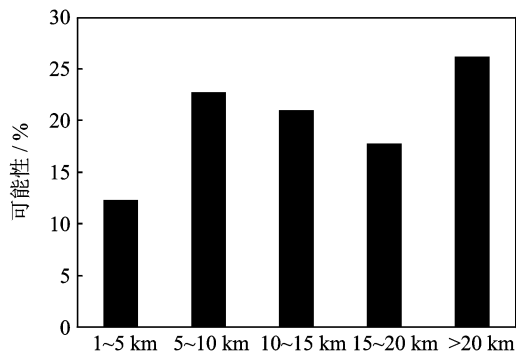


图3 调查数据基本分布(上海,2010年)

响,根据对不同级别城市交通工况、居民实际居住习惯和日常行驶距离的调查统计数据,提出PHEV动力系统有限分级配置的方法。

1.1.3 动力性能目标

PHEV多在城市中低速行驶、高速公路行驶较少,所以动力性能设计目标不宜过高,可控制在130 km/h以内。汽车驱动需求功率和最高车速所需功率计算参见式(4,5)^[3]。由于PHEV是混合系统,需要确定发动机功率、电池组及电机功率,三者功率的确定需要根据PHEV混合型式、不同使用工况下的驱动模式等确定。如并联PHEV,如果设定在蓄电池荷电状态(State of charge, SOC)满足情况下城市工况采用纯电驱动,可按式(4)确定电机及蓄电池组功率需求;而城郊或高速路高速行驶采用纯发动机驱动,可根据最高车速按式(5)确定发动机功率需求。所以,合理确定动力性能指标是动力系统的设计的关键。

$$P_e = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{Gfu_a}{3600} + \frac{Giu_a}{3600} + \frac{C_D Au_a^3}{76140} + \frac{\delta mu_a}{3600} \frac{du}{dt} \right) \quad (4)$$

$$P_e = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{Gfu_{amax}}{3600} + \frac{C_D Au_{amax}^3}{76140} \right) \quad (5)$$

式中参数含义参见文献[3]。

1.2 边界条件

1.2.1 动力电池组使用寿命

PHEV普遍选择锂电池作为车载能源,但其成组使用其寿命目前不超过1000次,即蓄电池最多维持2~3 a时间,而汽车使用寿命一般超过10 a,电池更换带来PHEV使用成本的大幅提升。当前的公开文献支持电池使用寿命和放电深度的反向关系,如:与工作在30%到70%的荷电状态之间(利用40%的规定容量)电池相比,工作在10%荷电状态到90%荷电状态之间(利用80%的规定容量)的电池,其循环寿命将减少到前者的1/3或更低^[9]。据此,为使电池寿命延长到原来的3倍并保证可用容量,单体电池数量和初始成本必须增大1倍。所以,合理确定蓄电池组使用寿命是PHEV动力系统设计的关键因素之一,目的是在保证有效电池容量和电池寿命的前提下最小化蓄电池系统配置,主要设计内容包括SOC边界设置和电池的容量配置。

综合考虑锂电池成本、寿命和技术进步等因素,PHEV动力电池配置时只需保证延长其使用寿命在5 a以上,对应其有效电池容量利用在50%,即SOC大约工作在[0.3,0.8]区间基本上能满足。

1.2.2 配置形式与工作模式

配置形式指的是PHEV动力系统主要包括串联、并联和混联3种形式^[10]。其中并联PHEV可兼顾市郊高速行驶具有较高的效率,系统混合结构和控制比混联PHEV简单。所以,城市PHEV宜选择并联结构。

工作模式主要指的是根据汽车行驶功率需求控制PHEV动力系统功率分配和输出,主要包括CD模式和CS模式,见图4。行驶过程中一般根据动

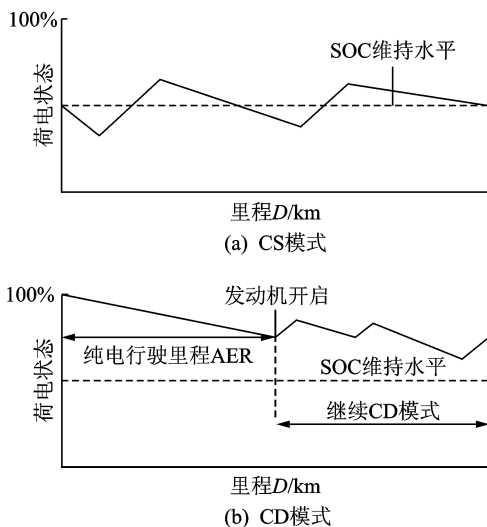


图4 PHEV工作模式

动力电池处于部分充电还是完全充电状态选择其一或者两者组合使用。而同一种控制策略,选择不同的控制逻辑参数及控制范围也会影响到最终的控制结果,主要的控制参数与控制逻辑包括:

(1) 发动机开关控制逻辑。只要满足以下条件之一: $K \leq K_{\text{eng-on}}$ 或 $P_r \geq P_b(K)$, 发动机启动, 其中 K 为 SOC 值, $K_{\text{eng-on}}$ 为发动机开启 K 的限值, P_r 为汽车行驶需求功率, $P_b(K)$ 为当前 SOC 为 K 值时动力电池所能输出的最大功率。

(2) 发动机输出功率。根据图4所示, 发动机启动后输出功率按如下控制规则输出

$$\begin{aligned} & \text{while} \dots K_s < K \leq K_{\text{eng-on}} \dots \text{then} \dots P_e = \\ & f(P_r, n) \\ & \text{while} \dots K < K_s \dots \text{then} \dots P_e = P_r + P_c \end{aligned}$$

式中: K_s 为 SOC 值维持水平值; P_e 为发动机输出功率; $f(P_r, n)$ 为当前发动机转速下, 不高于汽车行驶需求功率 P_r 的最高效率点所对应功率; P_c 为给电池充电的功率。

(3) 动力电池 SOC 值范围。主要指 SOC 工作区间设置及其 CS 模式下的维持水平 K_s 设置。根据前面对电池寿命部分的讨论, SOC 工作区间设置为 $[0.3, 0.8]$ 。考虑到 SOC 在维持水平上下波动时仍有较好的功率输出能力, K_s 设定在 0.4 左右。

控制策略的选择及逻辑参数确定主要受混合动力系统配置、蓄电池性能要求、实际行驶工况和行驶里程等因素的限制^[11]。一般情况下, 如果城市内短途行驶, 只要 SOC 允许, 更多的选择 CD 模式, 而如果是长途行驶, 为了保证急加速或爬坡等大功率输出需求, 则选择采用 CS 模式。

2 优化方法

PHEV 动力系统的优化设计即在现有技术水平下求取满足以上设计目标和边界条件的最小动力系统配置, 主要包括发动机功率 P_e 、电动机功率 P_m 和蓄电池数量 n 。

建立 PHEV 动力系统最小化优化程序, 程序包括目标函数、边界函数和优化函数, 见式(6~8)。目标函数输入变量为设计变量和行驶工况, 返回值为行驶工况结束时的 SOC 值。边界函数输入变量为设计变量和动力性能等设计目标, 返回设计变量最小边界值, 而优化主函数见式(8)。

$$D = f_{\text{obj}}(X_i, V_i) \quad (6)$$

$$S_i = f_{\text{con}}(X_i, d_v) \quad (7)$$

$$[X] = f_{\text{mincon}}(f_{\text{obj}}, X_0, f_{\text{con}}, X_i) \quad (8)$$

式中: f_{obj} 为目标函数; X_i 为设计变量; V_i 为行驶工况; f_{con} 为边界函数; d_v 为动力性能设计目标; X_0 为初始值; X 为返回最优设计变量 $[P_e, P_m, n]$ 。调用整车仿真模型, 返回最优设计变量值。

3 仿真实验

根据国内一线城市的行驶工况要求进行某 PHEV 车型的动力系统进行优化设计, 设计目标和边界条件按前文所述的选取依据确定, 关键元件及部分整车参数见表1。优化对象描述如下:

(1) 系统描述。并联、变速箱前混合驱动系统, 变速箱、发动机和电机模型采用查表; 电池模型采用开路电压模型。

表1 元件规格参数

元件	规格参数
发动机	可变功率, 基于 PRIUS 发动机特性
电机功率	可变功率, 基于 PRIUS 电机特性
蓄电池	可变容量和可变功率, 基于 Saft Li-ion 电池特性
变速比	[3.43, 2.01, 1.42, 1.0, 0.83] ZF 五档自动变速箱
迎风面积	1.746 m ²
主减速比	3.58
风阻系数	0.3
滚动阻力系数	0.009
车轮半径	0.287 m
整车质量	918 kg + 电机质量 + 发动机质量 + 蓄电池质量
电附件功率	700 W

(2) 状态变量。蓄电池 SOC 值为 $[0.3, 0.8]$ 。

(3) 行驶工况。选取 3UDDS+FTP1015 组成的合成工况, 工况特性见表2。

(4) 动力性能。最高车速 130 km/h。

(5) 工作模式。 $K_s = 0.4$, 模式切换见前文。

(6) 设计与最小化变量。发动机功率 P_e 、电机功率 P_m 、蓄电池数量 n 。

(7) 初始条件。SOC 初始值为 0.8。

(8) 终止条件。城市工况纯电行驶里程 40 km。

(9) 边界条件。根据不同车速使汽车行驶需求功率和 SOC 值进行工作模式切换。

由前文建立的优化计算程序调用 Advisor /

表2 3UDDS+FTP1015 合成工况特性

时间/ s	里程/ km	最高车速/ (km · h ⁻¹)	平均速度/ (km · h ⁻¹)	最大加速度/ (m · s ⁻²)
4 769	40.17	91.25	30.32	1.48

Simulink 建立的 PHEV 系统性能仿真模型进行优化仿真计算,得到动力系统关键元件参数见表3。若计算得到的单体数量使电池组端电压大于电机输入电压,蓄电池容量计算采用两个并联单体等效为一个2倍容量单体的折算方法。以下从两个方面进行验证分析:

(1) 纯电行驶里程验证

由3UDDS+FTP1015组成的合成工况里程,用以城市工况下的纯电行驶能力设计与验证。仿真

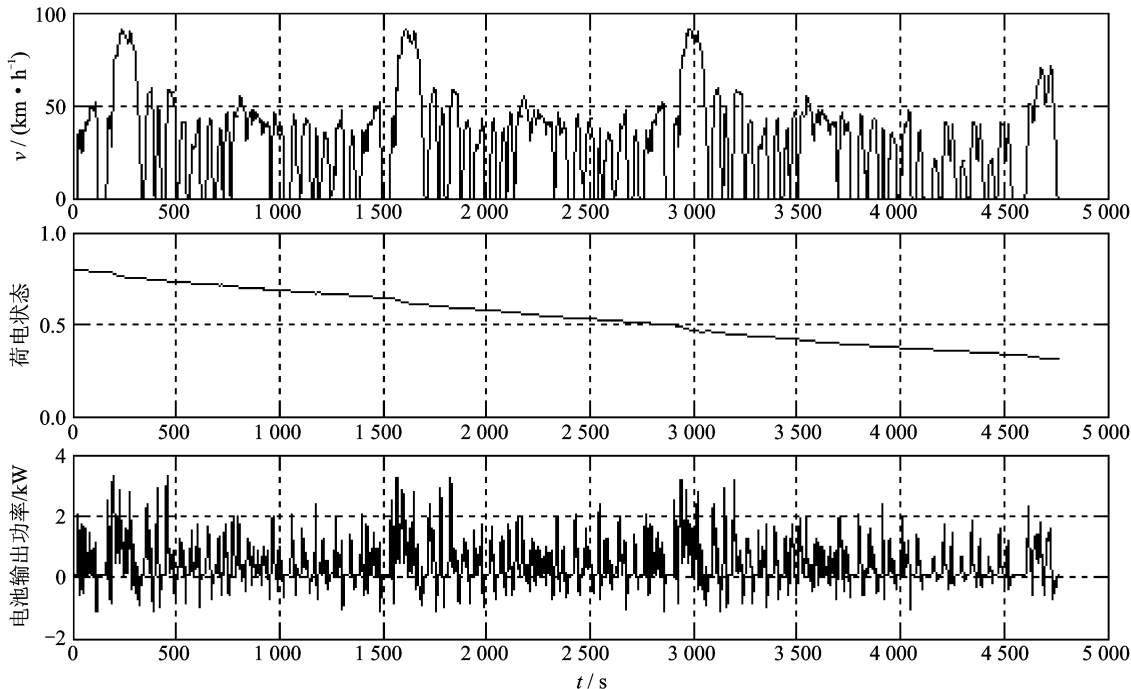


图5 城市工况纯电行驶里程仿真验证

(2) 动力性能验证

为了验证PHEV优化车型的高速公路行驶时的动力性能,选用US06_HWY标准工况进行高速路仿真验算,工况特性见表4,此工况源于US06标准工况,最高车速基本与PHEV最高设计一致,但是最大加速度偏大,仿真计算结果见图6,满足最高车速设计要求,但是刚启动部分急加速区段不能满足测试工况的大功率需求,原因在于工况开始当汽车行驶需求功率大于蓄电池组提供功率时发动机启动,到功率输出存在一定滞后性,所以初始急加速阶段没有满足行驶工况加速性能要求。

表4 合成工况US06_HWY特性

时间/ s	里程/ km	最高车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	最大加速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
368	10.04	129.23	97.91	3.08

验算结果见图5,可以看出PHEV在SOC初始值为0.8时,合成工况行驶都采用纯电行驶,里程结束SOC值略大于0.3,恰在SOC控制范围,蓄电池配置满足纯电行驶里程初始设计要求。

表3 PHEV动力系统选型结果

发动机额定功率/ kW	Li-ion 蓄电池参数	电机额定功率/ kW
32	容量36 A·h,单体电池 数量75,端电压267 V	38

4 结束语

以减小动力系统尺寸、有效控制配置成本为目标,对影响PHEV动力系统配置尺寸的关键问题进行了系统的分析,得到合理边界条件和设计目标的选择方法和确定依据,并提出根据城市工况水平和居住习惯等对PHEV动力系统进行有限分级配置的方法;建立以边界条件和设计目标为输入、以最小化PHEV动力系统配置为目标的优化设计平台;利用此优化设计平台对国内一线城市某PHEV电动轿车进行了动力系统选型计算和仿真验证,城市工况的纯电行驶里程验证和高速路行驶的动力性能验证分别表明动力系统配置结果满足设计要求,验证了最小化优化选型设计平台的有效性。

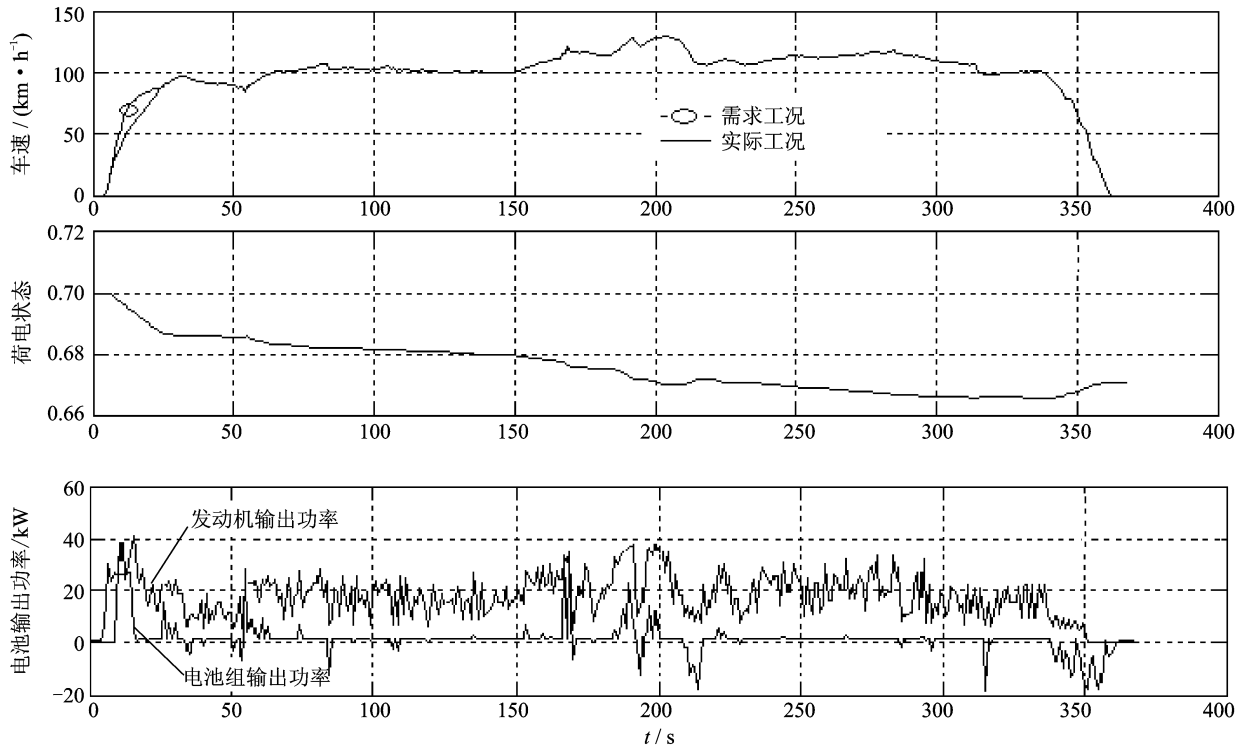


图6 高速工况行驶工况US06-HWY仿真验证

参考文献:

- [1] Ishitani H. Overview-potential and issues of PHEV [C]//EVS-22, The 22nd World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition. Yokohama:[s. n.], 2006.
- [2] Ishitani H, Baba Y. Evaluation of plug-in hybrid vehicles and their technical issues [C]//Proceeding of 23rd Conference on Energy System, Economy & Environment. Tokyo:[s. n.], 2007:35-39.
- [3] 余志生. 汽车理论[M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2004:15-30.
Yu Zhisheng. Automobile theory [M]. Third Edition. Beijing: Mechanical Industry Press, 2004:15-30.
- [4] Markel T, Brooker A, Gonder J, et al. Plug-in hybrid vehicle analysis [R]. NREL/MP-540-40609. Battelle:[s. n.], 2006.
- [5] 张富兴. 城市车辆行驶工况的研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2005.
Zhang Fuxing. Study on driving cycles of city vehicle [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2005.
- [6] 李孟良,朱西产,张建伟,等. 典型城市车辆行驶工况构成的研究[J]. 汽车工程,2005(5):558-560.
Li Mengliang, Zhu Xichan, Zhang Jianwei, et al. A study on the construction of driving cycle for typical cities in China [J]. Automobile Engineering, 2005 (5):558-560.
- [7] 王岐东. 基于工况的城市机动车排放因子研究[D]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 2005.
Wang Qidong. A study on urban motor vehicle emission factors based on conditions [D]. Beijing: Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, 2005.
- [8] Simpson A. Cost-benefit analysis of plug-in hybrid electric vehicle technology [C]//EVS22, The 22nd World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition. Yokohama, Japan:[s. n.], 2006.
- [9] 林成涛,李腾,田光宇,等. 电动汽车用锂离子动力电池的寿命试验[J]. 电池,2010,40(1):23-26.
Lin Chengtao, Li Teng, Tian Guangyu, et al. The life test of Li-ion power battery for electric vehicle [J]. Battery Bimonthly, 2010,40(1):23-26.
- [10] Szumanowski A. Hybrid electric vehicle drives design [M]. Warsaw: Publishing and Printing House of Institute for Sustainable Technologies, 2006.
- [11] Li Yufang, Zhou Lili. Impact of driving cycles and all-electric range on plug-in hybrid vehicle component size and cost [C]//IEEE VPPC. Dearborn: IEEE, 2009:1708-1711.