

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201812055



单行星排客车混动系统控制策略对比

孙贵斌^{1,2}, 卓文得¹, 李英¹, 马腾腾³

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 厦门理工学院 福建省新能源与安全技术研究院, 福建 厦门 361024;
3. 福建省福工动力技术有限公司, 福建 厦门 361000)

摘要: 为了提高混合动力汽车的燃油经济性及降低汽车的尾气排放,从中国城市典型工况的动力需求出发,以单行星排 10.5 m 城市公交客车为研究对象,采用 MATLAB 软件建立整车经济性计算模型;然后,对比分析客车在单一目标控制策略和双层筛选全局优化控制策略下的节油效果. 研究结果表明:在中国城市典型工况下,客车采用双层筛选全局优化控制策略比采用单一目标控制策略节油效果更为显著,节油率高达 4.4%.
关键词: 混合动力; 全局优化; 控制策略; 单行星排

中图分类号: U 469.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)04-0464-06

Comparative Study of Control Strategies for Hybrid System of Single-Planet Bus

SUN Guibin^{1,2}, ZHUO Wende¹, LI Ying¹, MA Tengmeng³

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Fujian Institute of New Energy Vehicle and Safety Technology, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
3. Fujian Fugong Engineering Technology Limited Company, Xiamen 361000, China)

Abstract: In order to improve the fuel economy and reduce the exhaust emissions of hybrid vehicles, a single planetary row 10.5 m city bus was taken as the object to conduct the research. Starting from the dynamic demand of typical urban conditions in China, the MATLAB software was used to establish the economic calculation model of the whole vehicle. The fuel economy effect of the passenger car was comparatively analyzed under the single target control strategy and the double-layer screening global optimization control strategy. The analysis results showed that the fuel saving of the double-layer screening global optimization control strategy in typical urban conditions in China is 4.4%, which is more distinct than that of single target control strategy.
Keywords: hybrid power; global optimization; control strategy; single-planet

在不同工况下,合理地运用混合动力汽车的两套动力系统,不仅可以降低汽车的排放和改善燃油经济性,也可以提高汽车的动力性能和增加续航里程^[1]. 为此,国内外学者对混合动力汽车的控制策略进行了大量研究. Pisu 等^[2]从混合动力汽车的规则控制策略、自适应等油耗最小控制策略、鲁棒控制策略和动态规划法方面进行对比研究,得出自适应等油耗最小控制策略的节油效果. Ahn 等^[3]应用帕累托最优理论,提出多目标能量管理控制策略. 李垚^[4]提出解决混合动力汽车多目标匹配问题的方法,即权重法和非归一法. 张松等^[5]通过对遗传算法和粒子群算法进行改进,提出一种对混合动力汽车控制策略的混合优化算法. 林潇等^[6]分析和对比了基本型优化控制算法、改进型优化控制算法和规则控制算法的

收稿日期: 2018-12-21
通信作者: 孙贵斌(1964-),男,副教授,主要从事新能源汽车动力系统的研究. E-mail:sgbzxx@163.com.
基金项目: 福建省科技创新平台资助项目(2016H2003)

控制效果和燃油经济性. 张岩^[7]利用 CRUISE, Stateflow 等构建一条能够反映实际运行情况的行驶工况. 方华^[8]开发了典型的上海城市道路工况及典型市区、郊区混合动力系统台架试验循环工况. 李军等^[9]完成了驱动电机、变速器和动力电池组在纯电动方面的动力性和经济性之间的优化匹配. 上述研究在燃油经济性方面都取得了较好的成果, 但都是从单一控制策略出发的. 本文从研究双层筛选全局优化控制策略出发, 通过建模分析, 以实现混合动力汽车更好的燃油经济性.

1 模型分析

1.1 系统结构分析

单行星排系统 (ECVT) 构型, 如图 1 所示. 图 1 中: 发动机通过减震器与行星齿轮系行星架 PC 进行连接, ISG 电机 M1 与行星轮系太阳轮 S 相连, 驱动电机 M2 与行星轮系齿圈 R 相连, 整个系统通过齿圈 R 连接后桥进行输出动力^[10]. ECVT 系统始终满足线性关系为

$$\left. \begin{aligned} (1+k)N_{PC} &= N_S + N_R \cdot k, \\ T_S + T_R + T_{PC} &= 0, \quad T_S \cdot k = T_R. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: N_S, T_S 分别为太阳轮的转速和转矩; N_R, T_R 分别为齿圈的转速和转矩; N_{PC}, T_{PC} 为分别行星架的转速和转矩; $k=R_R/R_S$ ^[11], 其中, R_R 为齿圈的半径, R_S 为太阳轮的半径.

以单行星排 10.5 m 城市公交客车为例展开研究, 整车的主要参数如下: 轮胎半径 r 为 478 mm; 最大总质量 m 为 16 500 kg; 主减速器比 i_0 为 6.14; 迎风面积 A 为 7 m²; 风阻系数 C_D 为 0.65; 滚动阻力系数 f 为 0.085; 传动效率 η_t 为 0.95; 旋转质量系数 δ 为 1.05.

1.2 路况需求分析

依据 GB/T 19754—2015《重型混合动力电动汽车能量消耗量试验方法》对重型商用混合动力车进行燃油经济性考核时, 其考核工况为中国城市典型工况, 为了便于研究, 去除工况中车速为 0 的点, 得到路谱如图 2 所示. 图 2 中: t 为时间; v 为车速.

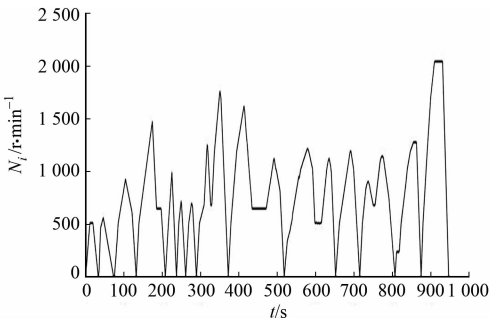
对于同一工作状态下的车辆, 同一路况下的扭矩需求是相同的, 将上述典型工况以 1 s 为步长进行采样化, 求出每个步长下车辆行驶需求的扭矩 T_i 和转速 N_i , 即

$$T_i = (mgf u_i \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u_i^2 + mg u_i \sin \alpha + \delta m \frac{du_i}{dt_i}) r / (i_0 \eta_t),$$

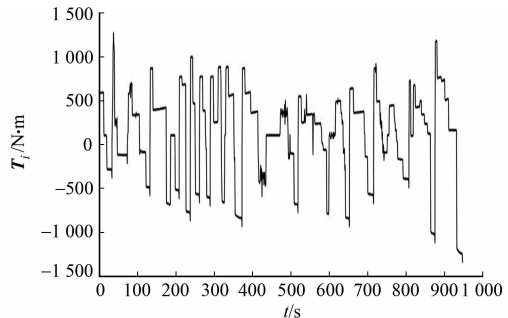
$$N_i = \frac{u_i i_0}{0.377 r}, \quad i \in (0, t_{\max}).$$

上式中: g 为重力加速度常数; u_i 为行驶速度; α 为坡度角; t_{\max} 为上述路谱的时长.

求解出目标工况的全部需求扭矩 T_i 和转速 N_i , 结果如图 3 所示.



(a) 工况驱动需求转速



(b) 工况驱动需求转矩

图 3 中国城市典型工况下转速和转矩需求图

Fig. 3 Demand diagram of revolving speed and torque under typical working conditions in Chinese cities

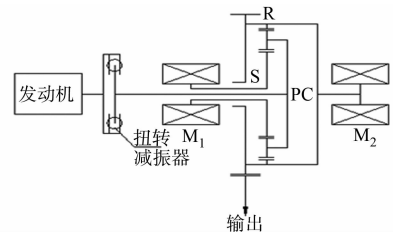


图 1 单行星排系统构型

Fig. 1 Configuration of single planetary system

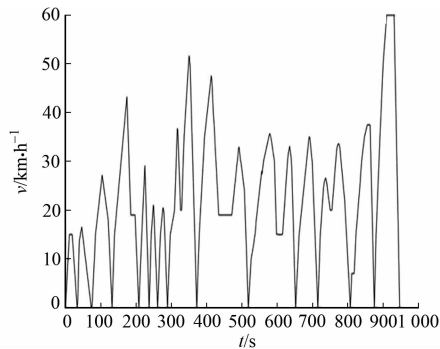


图 2 中国城市典型工况

Fig. 2 Typical working conditions of Chinese cities

2 优化策略

2.1 单一目标优化策略

在同一时刻,整车的转速和转矩需求是一定的,ECVT 系统的优势在于可以控制此需求的提供,既可以选择用纯电动和混动二者其中之一的模式进行驱动,又可以在混动模式时,分配发动机和驱动电机二者参与驱动和回收能量的比例.由于电机和发动机本身都有自己工作的高效率区间,因此,合理协调各部件进行有效工作是进行控制优化的重点.当系统采用纯电动模式时,系统需要(含驱动和制动)的 N_i 和 T_i 完全由驱动电机提供,可以表示为

$$N_i = N_{mot,i}, \quad T_i = T_{mot,i}. \tag{2}$$

式(2)中: $N_{mot,i}$, $T_{mot,i}$ 分别表示驱动电机实际提供给车辆驱动的转速和扭矩.

当系统切换为混动模式时,发动机启动并参与提供系统需求,但参与的程度与整车控制策略有关^[12].单一目标优化策略主要以发动机为优化目标,将发动机始终置于高效工作区,优先参与驱动,动力不足的部分由驱动电机补充,可以表示为

$$N_i = N_{mot,i}, \quad T_i = T_{mot,i} + T_{eng,i} \cdot k/(1+k). \tag{3}$$

2.2 双层筛选全局优化策略

全局优化策略就是综合考虑所有可能存在的工作点,通过大量计算求解最佳的工作点^[13-14].ECVT 属于三元件运动系统,单一的发动机优化并不能保证整车系统的最优经济性,且没有考虑驱动电机和发电机的效率.为此,提出一种双层筛选全局优化策略,兼顾三者的效率,实现以中国城市典型工况为例的燃油经济性最优化.

2.2.1 确定发动机的转速工作范围 根据式(1)和 NGW 型行星轮系原理可知,发动机转速 N_{eng} 的工作范围除了受自身的物力特性约束外,还受系统需求转速 N_i 和 ISG 电机的转速 N_{isg} 限制,可表示为

$$\left. \begin{aligned} N_{eng,max} &\geq N_{eng} \geq N_{eng,min}, \\ N_{eng} &= (N_{isg} + kN_i)/(1+k), \\ N_{isg,max} &\geq N_{isg} \geq N_{isg,min}, \\ N_{i,max} &\geq N_i \geq 0. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

式(4)中: $N_{eng,max}$, $N_{eng,min}$ 分别为发动机最高转速和最低工作转速(怠速); $N_{isg,max}$, $N_{isg,min}$ 分别为 ISG 电机最高工作转速和最低工作转速(一般为 0).最后,得出发动机的可利用转速范围为 $N_{eng,low} \sim N_{eng,high}$.

2.2.2 确定发动机的扭矩工作范围 在该行星轮系中,发动机转矩 T_{eng} 的工作范围除了受自身物力特性限制外,由式(1)可知,主要受 ISG 电机转矩 T_{isg} 工作范围的影响,可表示为

$$\left. \begin{aligned} T_{eng,max} &\geq T_{eng} \geq T_{eng,min}, \\ T_{eng} &= T_{isg}(1+k), \\ T_{isg,max} &\geq T_{isg} \geq T_{isg,min}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式(5)中: $T_{eng,max}$, $T_{eng,min}$ 分别为发动机的最大工作扭矩和最低工作扭矩(一般为 0); $T_{isg,max}$, $T_{isg,min}$ 分别为 ISG 电机的最大工作扭矩和最低工作扭矩(一般为 0);变量均取绝对值.

2.2.3 能耗的折算规则 由于上述已对工况进行 1 s 步长的统一采样化,所以在求解最小能耗时,只需得出每个采样时刻的最小需求能耗即可.为了统一评价标准,将驱动电机和 ISG 电机的能耗统一折算为油耗,能耗计算式为

$$\left. \begin{aligned} V_{eng,i} &= f(T_{eng,i}, N_{eng,i}, E_{eng,i}, C_{eng}), \\ V_{mot,i} &= f(T_{mot,i}, N_{mot,i}, E_{mot,i}, C_{mot}), \\ V_{isg,i} &= f(T_{isg,i}, N_{isg,i}, E_{isg,i}, C_{isg}). \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

式(6)中: i 表示当前采样时刻; C_{mot} 和 C_{isg} 中,涵盖油耗转电耗的转换系数,该系数主要由柴油的热值、柴油密度和柴油机的热机效率决定^[15-16].

2.2.4 策略设计 上述基础设定后,进行第一次筛选,选出满足要求的子集 $(T_{eng,i}, N_{eng,i})$,其思路为

$$(T_{eng,i1}, N_{eng,i1}), \quad V = \min(V_{eng,i} + V_{mot,i} + V_{isg,i}), \quad N_{eng,low} \leq j \leq N_{eng,high}. \tag{7}$$

以 $1 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 为步长,从 $N_{eng,low}$ 循环到 $N_{eng,high}$,第一次筛选后,得出的 $(T_{eng,i1}, N_{eng,i1})$ 值并非是唯一值,

需要进行第二次筛选. 因为每个步长时长仅为 1 s, 且相对转速响应来说, 转矩响应较快, 为了防止相邻步长发动机转速跳动过大, 第二次筛选选取步长内转速相对变化最小值, 即

$$(T_{eng,i2}, N_{eng,i2}), \quad \min(|N_{eng,i} - N_{eng,i+1}|), \quad i \in (0, t_{max}). \tag{8}$$

二次筛选后, 发动机的最佳工作点为 $(T_{eng,i2}, N_{eng,i2})$.

3 优化结果与分析

3.1 单一目标优化结果

整个过程发动机转速设置为 $1\,100\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$, 根据需求动态调整发动机扭矩, 运用 MATLAB 仿真技术, 建立整车仿真计算模型, 可求解出中国城市典型工况行驶过程中, 发动机的转速 (N)、转矩 (T) 在其效率 Map 图中的分布, 如图 4 所示. 图 4 中: 曲线为有效燃油消耗等值线; 点为发动机的工作点. 由图 4 可知: 在该状况下, 发动机的工作点都落在相对高效的工作区域里面, 起到较好的节油作用.

运用 MATLAB 仿真技术对该工况行驶过程中, ISG 发电机和驱动电机的转速、转矩在其效率 Map 图中的分布进行求解, 结果如图 5, 6 所示. 图 5, 6 中: 黑色细实线为电机的驱动效率曲线; 数据标签代表电机当前转速下的驱动效率值; 点分别为 ISG 发电机和驱动电机的工作点; 粗虚线代表电机的外特性曲线, 电机的转速和转矩不会超过此曲线范围, 由于电机在驱动状态时, 其转矩随着转速的增加而减少, 因此, 外特性曲线随着转速增加呈下降的趋势.

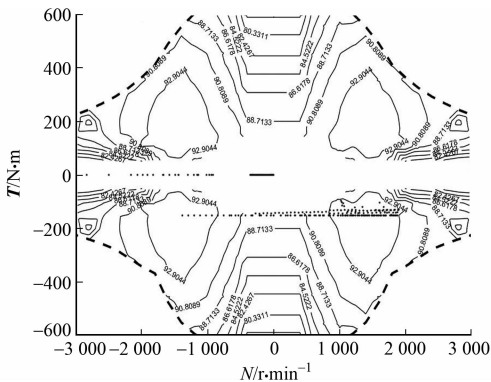


图 5 基础策略 ISG 电机工作点分布

Fig. 5 Operating points distribution of ISG electromotor under basic strategy

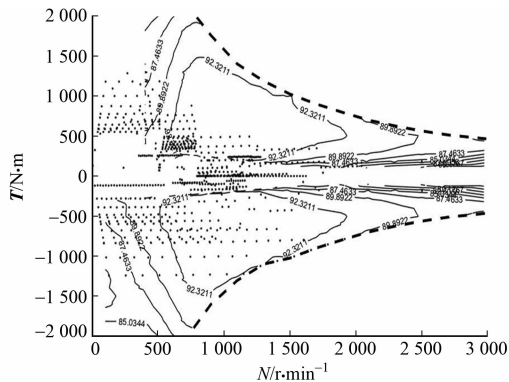


图 6 基础策略驱动电机工作点分布

Fig. 6 Operating points distribution of drive electromotor under basic strategy

由图 5, 6 可知: 虽然发动机的大多数工作点都落在相对高效的工作区域内, 但是 ISG 发电机和驱动电机的工作点有少数没有落在相对高效的工作区域内, 由此可见, 只以发动机为优化目标, 并不能兼顾 ISG 电机和驱动电机的能耗优化, 该策略并不能实现较好的整车经济性, 还需要进一步对各部件之间的协调工作进行优化.

3.2 双层筛选全局优化结果

求解出发动机的最佳工作转速和转矩后, 导入典型工况需求, 通过仿真计算出发动机、ISG 电机和驱动电机的转速、转矩在其 Map 图中的分布, 结果如图 7~9 所示.

对比图 4 和图 7 可知: 双层筛选全局优化后, 发动机的工作点仍然大部分都落在相对高效工作区内, 但是分布较为分散. 对比图 5 和图 8, 图 6 和图 9 可知: 优化后, ISG 电机与驱动电机都有更多工作点落在相对高效工作区内, 这

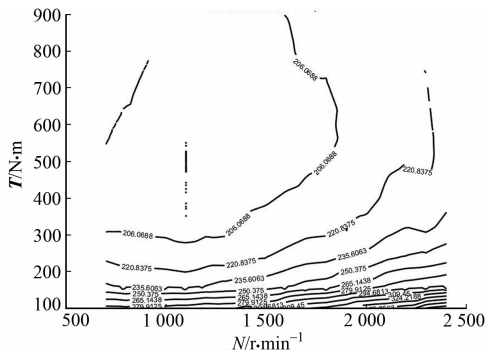


图 4 基础策略发动机工作点分布

Fig. 4 Operating points distribution of engine under basic strategy

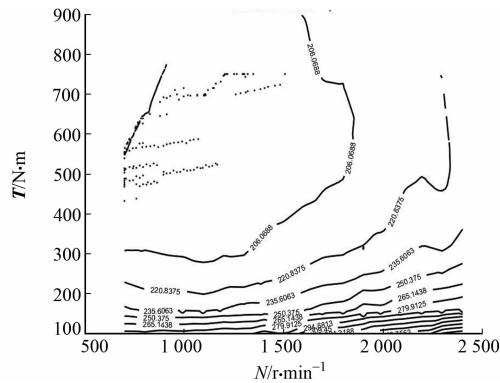


图 7 优化策略发动机工作点分布

Fig. 7 Operating points distribution of engine under optimization strategy

表明双层筛选全局优化后,发电机和驱动电机的工作效率要明显优于单一目标控制策略.

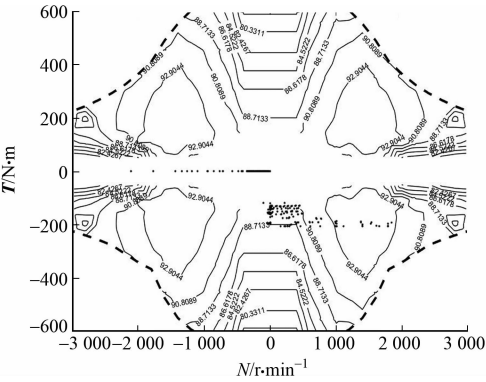


图 8 优化策略 ISG 电机工作点分布
Fig. 8 Operating points distribution of ISG electromotor under optimization strategy

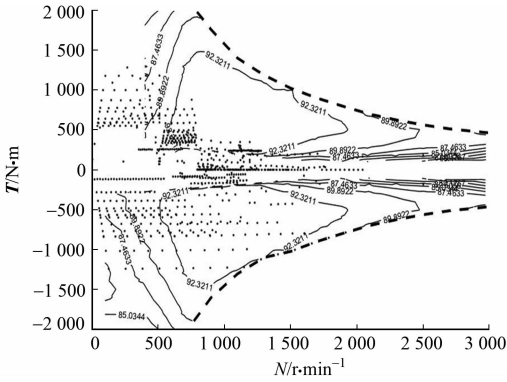


图 9 优化策略驱动电机工作点分布
Fig. 9 Operating points distribution of drive electromotor under optimization strategy

3.3 结果对比分析

为了更加直观地对比两种策略对经济性的影响效果,将整个典型工况下,发动机的油耗和系统折合油耗进行曲线化对比,如图 10,11 所示. 图 10,11 中:V 为油耗.

由图 10 可知:基础策略发动机的实时油耗曲线峰值相对稳定,起伏较小,而优化策略发动机的实时油耗曲线峰值起伏较大,显然,两种策略下,发动机的启动时刻和同一采样时刻下发动机的实时油耗差别较大,表明二者的控制策略思想具有明显的不同.

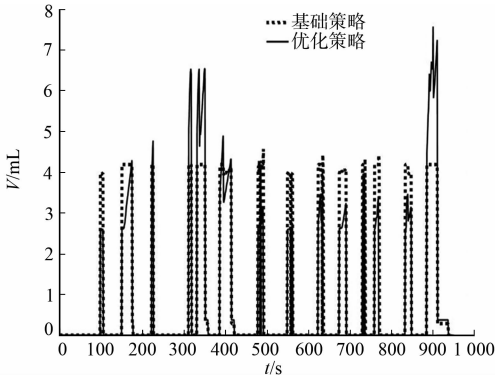


图 10 发动机油耗实时对比
Fig. 10 Real-time comparison of engine fuel consumption

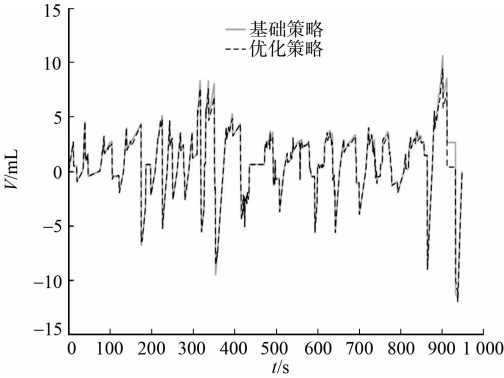


图 11 系统折合油耗实时对比
Fig. 11 Real-time comparison of system equivalent fuel consumption

由图 11 可知:优化策略的实时折合油耗在每个采样时刻下均低于基础策略,从而证明优化策略对提高整车燃油经济性效果更好. 另外,通过仿真对比两种策略下的油耗,得到基础策略下的每 100 km 综合油耗为 15.14 L,优化策略下的每 100 km 综合油耗为 14.47 L,每 100 km 油耗降低了 0.67 L,证明了优化策略的可行性.

为了更好地指导实际车辆的程序设计,根据上述优化结果,将典型工况按照时间变量进行工作模式划分,结果如图 12 所示. 由图 12 可导出相应时刻的三元件推荐转速、转矩数据,供程序设计参考.

4 结束语

通过对单行星排客车混动系统控制优化策略的研究,提出一种双层筛选全局优化策略方法. 相比于

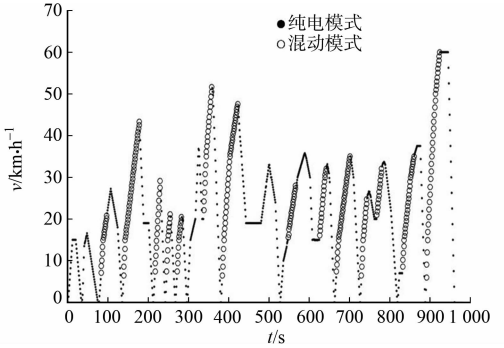


图 12 ECVT 系统工作模式推荐划分
Fig. 12 Recommended partition for operating mode of ECVT system

单一控制策略,该方法兼顾了发动机、驱动电机和 ISG 电机的效率,从而使研究更具真实性和运用性.通过 MATLAB 建立的整车经济性计算模型,对两种策略的结果进行详细地对比分析,结果表明:相较于单一控制策略,双层筛选全局优化控制策略节油显著,节油率高达 4.4% 以上,可显著提高整车的燃油经济性.

参考文献:

- [1] DU Jiuyu, OUYANG Danhua. Progress of chinese electric vehicles industrialization in 2015: A review[J]. Applied Energy, 2017, 188: 529-546. DOI: 10. 1016/j. apenergy. 2016. 11. 129.
- [2] PISU P, ROZZONI G. A comparative study of supervisory control strategies for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions Control System Technology, 2007, 15(3): 506-518. DOI: 10. 1109/tcst. 2007. 894649.
- [3] AHN K, CHO S, CHA S W. Optimal operation of the power-split hybrid electric vehicle powertrain[J]. Journal of Automobile Engineering, 2008, 222(5): 789-800. DOI: 10. 1243/09544070jauto426.
- [4] 李垚. 并联混合动力客车动力源参数匹配和优化[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
- [5] 张松, 吴光强. 插电式混合动力汽车能量管理策略多目标优化[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 1035-1039, 1044. DOI: 10. 3969/j. issn. 0253-374x. 2011. 07. 017.
- [6] 林潇, 张君鸿. 基于粒子群算法的 Plugin 混合动力汽车能量管理策略优化研究[J]. 上海汽车, 2011(5): 12-18. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-4554. 2011. 05. 03.
- [7] 张岩. 基于运行工况的混合动力系统控制策略研究[D]. 天津: 天津职业技术师范大学, 2016.
- [8] 方华. 混合动力客车动力系统经济性仿真与试验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [9] 李军, 杨东徽, 束海波, 等. 纯电动汽车动力系统匹配与性能仿真[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 281-287. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201703001.
- [10] 钱庆辉. ECVT 混合动力客车动力系统匹配计算[J]. 客车技术与研究, 2017, 39(3): 13-15, 30.
- [11] 王晨, 郭明林, 刘国志. 新型功率分流混合动力汽车的动力性优化[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 96-104. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-565X. 2015. 11. 014.
- [12] 王晓闯. 混合动力客车用双排行星齿轮机构研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [13] 彭浩, 杨耀权, 刘春雨. 混合动力汽车能量管理全局优化算法仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(5): 148-151, 206.
- [14] 高建平, 李晓林, 郭志军. 改进型混合动力汽车工况预测算法的应用仿真[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2013, 34(2): 34-38. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-6871. 2013. 02. 009.
- [15] 林歆悠, 冯其高, 张少博. 等效因子离散全局优化的等效燃油瞬时消耗最小策略能量管理策略[J]. 机械工程学报, 2016, 52(20): 102-110. DOI: 10. 3901/JME. 2016. 20. 102.
- [16] 叶明, 任洪, 李鑫. 基于调速能量的 EMCVT 电动汽车全局优化[J]. 中国机械工程, 2016, 27(9): 1257-1262. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-132X. 2016. 09. 019.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 崔长彩)