DOI: 10.3901/JME.2020.02.098

基于多岛遗传算法的功率分流式双模混合动力客车参数优化*

曾小华 王振伟 宋大风 陈琴琴 杨南南
(吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130025)

摘要: 协调优化混合动力系统设计参数和控制策略参数是提高功率分流式双模混合动力系统综合性能的关键。针对现有多目标遗传算法、粒子群算法以及模拟退火等优化算法实施难度高、求解周期长的问题,以汽车动力性能和电池 SOC 平衡为约束条件,将油电转换系数引入目标函数,提出一种基于多岛遗传算法(Multi-island genetic algorithm, MIGA)的动力系统设计参数和控制参数集成优化方法。利用 Isight 仿真平台进行建模仿真,结果表明,在保持车辆动力性、车速跟随以及电池 SOC 平衡的基础上,相较于优化前,在中国典型城市公交工况下系统等效油耗降低了 0.21 L/100 km,对应节油比例为 1.3%。对参数优化后的经济性仿真结果分析发现,优化后发动机向着高负荷区域移动,工作情况得到改善;电机 MG1 和 MG2 效率均有不同程度的提高,较好的验证了所提出的参数优化方法的有效性。

关键词: 车辆工程; 功率分流式双模混合动力系统; Isight 仿真平台; 多岛遗传算法; 集成优化

中图分类号: U469

Parameter Optimization of Dual-mode Power-split Hybrid Electric Bus Based on MIGA Algorithm

ZENG Xiaohua WANG Zhenwei SONG Dafeng CHEN Qinqin YANG Nannan
(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025)

Abstract: Coordinated optimization for parameters of hybrid electrical vehicle(HEV) powertrain and control strategy is the key to improving overall performance of power-split dual-mode hybrid electric bus. Aiming at the problems of high difficulty and long solution period for the optimization algorithms such as multi-objective genetic algorithm, particle swarm optimization and simulated annealing, the vehicle dynamic performance and battery SOC balance are taken as constraints, and the fuel-electricity conversion factor is introduced into the objective function. An integrated optimization method for design parameters and control parameters using multi-island genetic algorithm(MIGA) is proposed. The simulation have been carried out based on the Isight software, and the results show that on the premise of ensuring the power performance of vehicle and balance of battery SOC, the equivalent fuel consumption of the system is reduced by 0.21 L/100 km in the cycle of typical Chinese city, and the corresponding fuel saving ratio is 1.3%. The engine operating points move to the high load areas, and the working condition is improved. The efficiency of motor MG1 and MG2 is improved to different degrees, which demonstrated the effectiveness of the optimization algorithm in this work.

Key words: vehicle engineering; dual-mode power-split hybrid electric system; Isight software platform; multi-island genetic algorithm; integrated optimization

0 前言

功率分流混合动力系统因其转速转矩双解耦的特点,在节能方面具有显著的优势。根据动力源与行星排连接位置关系的不同,功率分流混合动力系统可分为输入分流、输出分流和复合分流模式三种

模式^[1]。将上述三种功率分流模式两两组合,即可得到功率分流式双模混合动力系统^[2-3]。相比于单模功率分流混合动力系统,双模系统具有两个机械点,高效区传动比范围较广,可减少功率循环现象的产生,综合性能更优。功率分流式双模混合动力系统中,动力系统设计参数与控制策略参数相互耦合,共同决定了整车的动力性、经济性和排放性能。因此,为了实现系统的燃油经济性与动力性等设计目标,应同时对动力系统设计参数和控制策略参数进

* 国家重点研发计划资助项目(2018YFB0105900)。20190109 收到初稿,20190915 收到修改稿

行优化^[4]。

LONG 等^[5]以燃油消耗和排放加权综合最小为优化目标,利用蜜蜂算法对并联混合动力系统的关键部件参数与控制策略参数进行优化,选用 FTP、ECE-EUDC 与 UDDS 工况评估车辆性能。DESAI 等^[6]利用多目标遗传算法优化动力传动系统与控制策略参数,以实现相互冲突与制约的多优化目标。YILDIZ 等^[7]应用粒子群算法对动力部件尺寸等参数进行多目标优化,提高了车辆综合性能。刘永刚等^[8]提出一种采用模拟退火算法的基于多工况优化混合动力汽车动力系统与控制策略参数的方法,证明了优化出的参数在其他工况的通用性。以上学者利用优化算法对关键部件参数与控制策略参数进行了同时优化,取得了较好的燃油经济性。然而,以上的优化算法较为复杂,不仅增加了优化难度,难以寻找最优解,而且优化周期较长;此外,通常情况下,动力系统设计参数与控制参数建模时处于不同仿真平台上,如何实现两仿真环境下的集成优化也比较困难。

针对以上问题,以某款功率分流式双模混合动力客车为研究对象,搭建 Isight 集成仿真平台,采用具有快速随机搜索能力的多岛遗传算法,对行星排设计参数与控制策略参数进行集成多目标优化,实现优化区域内的快速寻优,以提升整车燃油经济性。

1 动力系统总体设计

1.1 动力系统构型和参数设计

所研究的功率分流式双模混合动力系统的构型如图 1 所示,该系统包括两个行星排,其中发动机输出轴通过扭转减振器与前行星排的行星架连接,电机 MG1 与前行星排的太阳轮连接,前后行星排共用齿圈,并与电机 MG2 相连,前后排太阳轮通过离合器 CL1 相连,后排太阳轮通过离合器 CL2 与固定机构相连,整个系统的动力通过后行星架输出到主减速器,最终传递到车轮。

图 1 功率分流式双模式混合动力系统构型简图

该功率分流式双模式混合动力系统由输入分流模式和复合分流模式组合而成,可通过控制离合器的结合与分离实现两种模式的切换,其系统杆模型如图 2 所示。当离合器 CL1 分离,离合器 CL2 结合时,系统能够实现输入功率分流模式。当离合器 CL1 结合,离合器 CL2 分离时,系统能够实现复合功率分流模式。

图 2 系统杆模型

图 2 中, T_e 表示发动机转矩; T_{out} 表示系统输出轴转矩; S1、C1、R1 分别表示前行星排的太阳轮、行星架和齿圈; S2、C2、R2 分别表示后行星排的太阳轮、行星和齿圈; k_1 、 k_2 分别表示前后行星排的特征参数; a 、 b 表示杆长,与前后行星排特征参数关系如式(1)所示

$$\begin{cases} a = \frac{1+k_1}{1+k_2} - 1 \\ b = k_2 \frac{1+k_1}{1+k_2} \end{cases} \quad (1)$$

忽略系统部件的转动惯量以及系统内部的摩擦转矩,利用杠杆法得到输入功率分流模式和复合功率分流模式下各部件的转速转矩关系,分别如式(2)和式(3)所示

$$\begin{cases} (1+k_1)\omega_e = \omega_{S1} + k_1\omega_{R1} \\ (1+k_2)\omega_{out} = k_2\omega_{R2} \\ T_{MG1} = T_e / (1+k_1) \\ T_{out} = \left(T_e \frac{k_1}{1+k_1} + T_{MG2} \right) \frac{1+k_2}{k_2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} T_{MG2}(1+a+b) + T_e(a+b) = T_{out}b \\ T_{MG1} + T_{MG2} + T_e = T_{out} \\ a\omega_{MG2} + \omega_{out} = (1+a)\omega_e \\ a\omega_{MG1} + b\omega_e = (a+b)\omega_{out} \end{cases} \quad (3)$$

式中, ω_e 表示发动机转速; ω_{out} 表示系统输出轴转速。

定义系统传动比为发动机转速与输出轴转速的比值,当电路功率为零时,发动机全部功率都经

由机械路径传递到车轮, 系统传动效率最高, 此时系统的传动比称为机械点(Mechanical point, MP)^[9]。本双模混合动力系统系统输入功率分流模式下只有一个机械点, 此时系统传动比为 $\frac{k_1(1+k_2)}{k_2(1+k_1)}$ 。复合功率分流模式下系统共有两个机械点, 第一个机械点的系统传动比为 $\frac{a+b}{b}$, 第二个机械点的系统传动比为 $\frac{1}{1+a}$ 。

根据所研究的功率分流式双模式混合动力系统的基本参数和技术要求(表 1), 进行了动力系统各部件主要参数初步匹配, 匹配结果如表 2 所示。

表 1 整车基本参数与技术要求

项目	参数
整车总质量 m_0 /kg	18 000
整车整备质量 m_a /kg	14 420
迎风面积 A /m ²	6.6
风阻系数 C_D	0.55
滚动阻力系数 f	0.006 5
轮胎滚动半径 r /m	0.51
驱动桥速比 i_0	4.88
最高车速 $v_{\max}$ /(km/h)	70
最大爬坡度 $i_{\max}$ (%)	15(10 km/h)
0~50 km/h 的加速时间 t /s	≤21

表 2 动力系统计算参数

项目	参数
发动机峰值功率 P_{e_max} /kW	147
发动机峰值扭矩 T_{e_max} /(N·m)	730
发动机最高转速 w_{e_max} /(r/min)	2 500
MG1 电机峰值功率 P_{MG1_max} /kW	90
MG1 电机峰值扭矩 T_{MG1_max} /(N·m)	300
MG1 电机最高转速 w_{MG1_max} /(r/min)	8 000
MG1 电机额定转速 w_{MG1_rat} /(r/min)	2 500
MG2 电机峰值功率 P_{MG2_max} /kW	150
MG2 电机峰值扭矩 T_{MG2_max} /(N·m)	1 500
MG2 电机最高转速 w_{MG2_max} /(r/min)	4 000
MG2 电机额定转速 w_{MG2_rat} /(r/min)	1 400
电池电压 U_{bat} /V	576
电池容量 C_{bat} /(A·h)	25
前行星排特征参数 k_1	3
后行星排特征参数 k_2	1.5

1.2 控制策略设计

功率分流式双模混合动力系统采用发动机最优工作曲线控制策略, 其基本控制思想为将发动机控制在当前功率下燃油消耗率最小的工作点上, 充分发挥功

率分流混合动力系统转速、转矩双解耦的优势, 可显著提升发动机的平均工作效率, 从而有效提高整车的燃油经济性^[10]。所设计控制策略流程如图 3 所示。

图 3 控制策略流程图

(1) 纯电动模式。汽车起动, 当整车需求功率 P_{req} 较低且电池荷电状态(State of charge, SOC)高于放电下限 SOC_{low} 时, 可由电池向驱动电机 MG2 供电, 电机 MG2 单独驱动以满足整车功率需求。

(2) 输入功率分流模式。当电池 SOC 低于放电下限 SOC_{low} 或者需求功率 P_{req} 高于发动机最优工作曲线功率下限值 P_{EngL} 时, 整车进入到输入功率分流模式, 起动发动机, 通过电机 MG1 的调速和电机 MG2 的调扭功能控制发动机工作在其最优工作曲线上。

(3) 复合功率分流模式。通过对功率分流式双模混合动力系统的效率特性分析^[11], 当传动比大于第一个机械点 i_{MP1} 时, 输入功率分流模式效率大于复合功率分流模式, 当传动比小于第一个机械点 i_{MP1} 时, 输入功率分流模式效率小于复合功率分流模式。因此, 在控制策略中定义模式切换在传动比达到第一个机械点 i_{MP1} 时进行。当车辆处于输入分流模式时, 如果系统的传动比小于系统第一个机械点 i_{MP1} , 则进入到复合功率分流模式, 其核心思想仍是控制发动机工作在最优曲线上。

(4) 再生制动模式。当驾驶员开始踩制动踏板, 电池 SOC 值低于充电上限 SOC_{high} , 且车速高于再生制动速度下限 v_{regen_min} 时, 由电机 MG2 进行再生制动能量回收, 不足的制动转矩由机械制动提供。

(5) 机械制动模式。制动模式下, 若系统不满足再生制动模式条件时, 进入到机械制动模式, 其具体实现方式与传统制动相同。

1.3 Cruise 整车模型搭建

有效和可靠的仿真分析软件对于车辆参数的优化和控制策略的设计验证发挥着关键的作用^[12-13]。文中利用正向建模仿真软件 Cruise 快速搭建整车动力系统仿真模型, 具体如图 4 所示。

图4 Cruise 整车仿真模型

2 混合动力系统参数集成优化

2.1 优化变量选取

在优化问题中, 优化变量的选取是优化设计的基础。行星排特征参数影响系统效率特性以及动力输出, 进而影响系统的动力性和经济性; 此外, 整车性能和控制策略参数密切相关, 需要充分考虑控制策略参数的影响来实现系统优化。控制策略中, 纯电动行驶功率上限值 P_{EV} 为纯电动模式与功率分流模式的切换条件, 影响到循环工况油耗和电耗之间的分配。因此文中选择对车辆性能影响较大的前后行星排特征参数 k_1 、 k_2 和纯电动行驶功率上限值 P_{EV} 作为优化目标变量, 进行集成优化。

2.2 目标函数确定

功率分流式双模混合动力系统的参数优化目标是在满足动力性能设计指标和各部件性能约束的前提下, 尽量使整车燃油经济性得到改善。因此, 参数优化的目标函数 $f(x)$ 为

$$\begin{cases} f(x) = \min(Fuel(x) + \alpha Ele(x)) & x \in \Omega \\ h_i(x) \leq 0 & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

式中, $Fuel(x)$ 为燃油消耗量; $Ele(x)$ 为电能消耗量; 为油电转换系数; x 为需要优化的行星排设计参数和控制策略参数的矢量; Ω 为可能的解空间; $h_i(x) \leq 0$ 为动力性约束条件; N 为约束条件的数量。

为了使系统在寻优过程中保证电池电量平衡, 设置式(5)所示的限制条件, 即寻优的参数要保证系统的电量变化较小, ε 为电量变化的上限值。

$$|Ele(x)| < \varepsilon \quad (5)$$

2.3 参数优化约束条件

在优化整车燃油经济性的同时要兼顾动力性能, 以整车动力性设计指标作为约束条件, 将混合动力汽车动力性和经济性的双目标优化问题转化为只考虑经济性的单目标问题, 从而提高了优化效率。

同时对行星排特征参数做一定的限制, 以保证各动力源的转速、转矩和功率均工作在合理的范围内。系统动力性约束条件主要包括最高车速约束, 最大爬坡度约束以及 $0 \sim 50 \text{ km/h}$ 加速约束。考虑行星排的装配条件与邻接条件, 特征参数的取值范围为 $1.5 \sim 3.0$ 。

(1) 最高车速。最高车速工况下, 特征参数 k_1 、 k_2 的变化对电机 MG1 和 MG2 转速影响较大。图 5、图 6 为不同 k_1 、 k_2 值所对应的电机 MG1 和 MG2 转速曲线, 参考表 2 中电机转速匹配结果, 电机 MG1 最高转速为 8000 r/min , 则需将 k_1 、 k_2 值限制在图 5 中矩形区域内; 电机 MG2 最高转速为 4000 r/min , 则图 6 中 k_1 、 k_2 值对应的电机 MG2 转速均满足要求。因此, 为了满足最高车速工况要求, k_1 的取值范围应为 $2.5 \sim 3$, k_2 的取值范围应为 $1.5 \sim 1.7$ 。

图5 电机 MG1 转速对特征参数的限制

图6 电机 MG2 转速对特征参数的限制

(2) 最大爬坡度。最大爬坡度工况下, 特征参数 k_1 、 k_2 的变化对电机 MG1 和 MG2 的转矩和功率影响较大。图 7~图 10 为不同 k_1 、 k_2 值所对应的电机 MG1 和 MG2 转矩与功率曲线, 参考表 2 中电机转矩和功率匹配结果, 为满足最大爬坡度工况要求, k_1 、 k_2 的取值范围为图 9 所示的黑色区域。即 k_1 的取值范围应为 $2.5 \sim 3$, k_2 的取值范围应为 $1.5 \sim 1.95$ 。

图7 电机 MG1 转矩对特征参数的限制

图8 电机MG1功率对特征参数的限制

图9 电机MG2转矩对特征参数的限制

图10 电机MG2功率对特征参数的限制

(3) 0~50 km/h 加速时间。通过以上分析,最高车速和最大爬坡度工况下的行星排特征参数 k_1 的取值范围为2.5~3, k_2 的取值范围为1.5~1.7。由式(1)、(2)可知,减小 k_1 值,增加 k_2 值,会降低系统的动力性。因此,只需要验证 $k_1=2.5$, $k_2=1.7$ 时系统能否满足极限加速工况需求即可,各动力源的转矩和功率曲线如图11、图12所示,参考表2中电机转矩和功率匹配结果,可以看出,系统仍然能够满足极限加速工况的需求。

图11 极限加速工况下各动力源需求转矩

综上所述,当前行星排特征参数 k_1 的取值范围为2.5~3,后行星排特征参数 k_2 的取值范围为1.5~1.7时,系统能够满足动力性约束条件。

图12 极限加速工况下各动力源需求功率

2.4 多岛遗传算法

多岛遗传算法是对并行分布遗传算法的改进,适用于单变量函数的全局优化设计,具有比传统遗传算法更优良的全局求解能力和计算效率^[14],其计算过程如图13所示。首先,随机生成一个初始种群 P_0 ,将该初始种群分成若干个子种群,这些子种群称之为“岛”。其次,在每个岛上进行传统遗传算法中的选择、交叉和变异等操作,若满足迁移条件,则可从一个子种群迁移到另一个子种群,继续进行遗传算法进化。多岛遗传算法的周期性迁移操作保持了优化解的多样性,提高了优化速度,在一定程度上可以解决传统遗传算法过早收敛,易陷入局部最优的问题^[15]。最后,通过不断的迭代收敛于最优参数,当遗传代数 n 达到最大值MaxGen时,结束寻优过程。

图13 多岛遗传算法计算过程

2.5 基于 Isight 的参数优化流程

进行行星排特征参数与控制策略参数优化时，可在 Isight 基础平台下将 Cruise 整车模型和 Matlab/Simulink 控制策略集成到同一环境自动完成优化过程，其具体优化流程和优化模型如图 14、图 15 所示。首先，将待优化参数 k_1 、 k_2 、 P_{EV} 的初始值输入到 Isight 优化模型；其次，根据 Optimization1 模块设置的约束条件以及多岛遗传优化算法，在 Calculator 计算模块中将重组得到的 k_1 、 k_2 值赋给 Cruise 行星齿轮模型；然后，在 Simcode 模块中利用批处理文件 matlab_simulink.bat 调用脚本文件，再利用该脚本文件调用 Simulink 环境下的整车控制策略，进行 Interface 联合仿真；最后，在 Calculator-1 模块中计算等效油耗，并将其输出值作为优化的目标函数值，如此循环往复，直至优化算法收敛或者优化次数达到最大值，得到最优的目标值。

图 14 Isight 优化流程

图 15 Isight 优化模型

3 仿真结果与分析

根据整车性能指标要求，选取能够反映城市市区道路特征的中国典型城市公交工况作为目标工况，在 Isight 软件中利用多岛遗传算法进行 300 次的迭代计算，得到最优的目标值。各优化参数的寻优过程分别如图 16~18 所示，图中正方形点代表满足优化约束条件的设计点。得到最优的一组行星排特征参数和控制策略参数，如表 3 所示。可以看到，优化之后特征参数 k_1 值降低、 k_2 值增加，且纯电动行驶的功率上限值 P_{EV} 由 60 kW 下降到 55 kW。

图 16 前行星排特征参数 k_1 寻优过程

图 17 后行星排特征参数 k_2 寻优过程

图 18 纯电动行驶功率上限 P_{EV} 寻优过程

表 3 参数优化结果

优化参数	优化前	优化后
前行星排特征参数 k_1	3	2.5
后行星排特征参数 k_2	1.5	1.64
纯电动行驶功率上限 P_{EV} /kW	60	55

表 4 列出了参数优化后的整车性能仿真结果，可以看出，基于多岛遗传算法进行双模混合动力系统参数优化后，整车动力性仍然满足设计指标要求；中国典型城市公交工况下，整车等效油耗较优化前降低了 0.21 L/100 km，对应节油比例为 1.3%。

表 4 参数优化后混合动力汽车性能

项目	仿真结果	设计指标
最高车速/(km/h)	70	70
最大爬坡度(%)	15.3	15
0~50 km/h 加速时间/s	17.0	21
优化前等效油耗/(L/100 km)	16.62	—
优化后等效油耗/(L/100 km)	16.41	—

中国典型城市公交工况下，车速跟随性与 SOC 变化结果如图 19 与图 20 所示。可以看到，车辆实

际车速完全跟随需求车速,且电池 SOC 始终在初始 SOC 附近变动,保证电池电量平衡。

图 19 工况跟随结果

图 20 电池 SOC 变化结果

对参数优化后经济性仿真结果进行分析,统计得到优化前后发动机负荷率如图 21a 和图 22a 所示。

(a) 优化前发动机负荷率

(b) 优化前电机 MG1 效率

(c) 优化前电机 MG2 效率

图 21 优化前发动机、MG1、MG2 电机分布情况统计

可以看出,优化后发动机向着高负荷区域移动,工作情况得到改善;优化前后电机 MG1 效率如图 21b 和图 22b 所示,优化后电机 MG1 高效区(效率大于 90%)比例增加 11%,而低效区(效率小于 70%)比例则有所下降,即电机 MG1 工作效率提高很多;优化前后电机 MG2 效率如图 21c 和图 22c 所示,优化前后效率分布情况变化不大,优化后高效区比例有了小幅度的提高,低效区的比例几乎无变化,即参数优化结果对 MG2 的工作点影响较少。

(a) 优化后发动机负荷率

(b) 优化后电机 MG1 效率

(c) 优化后电机 MG2 效率

图 22 优化后发动机、MG1、MG2 电机分布情况统计

4 结论

(1) 将整车动力性指标作为约束条件,得到优化变量的取值范围,将功率分流式双模混合动力系统动力性和经济性的双目标优化问题转化为只考虑经济性的单目标问题,节省大量优化时间成本。

(2) 利用多岛遗传算法对行星排特征参数和纯电动行驶的功率上限值进行集成优化,保持了优化解的多样性,提高了优化速度,在一定程度上可以解决传统遗传算法过早收敛,易陷入局部最优的问题。

(3) 在中国典型城市公交工况下进行仿真验证, 结果表明, 参数优化后的功率分流式双模混合动力系统不仅能够满足动力性指标要求, 而且燃油经济性得到改善。优化后的整车等效油耗较优化前降低了 0.21 L/100 km, 对应节油比例为 1.3 %。

文中所提出的 MIGA 优化方法对于耦合设计参数与控制参数的功率分流式双模混合动力系统优化具有参考价值。

参 考 文 献

- [1] JEROME M. Kinematic study of the GM front-wheel drive two-mode transmission and the Toyota Hybrid System THS-II transmission[J]. SAE International Journal of Engines, 2011, 4(1): 1020-1034.
- [2] BEHROOZ M, SEYED A. Dual-mode power-split transmission for hybrid electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(7): 3223-3232.
- [3] 张俊. 混合动力汽车双模 EVT 构型分析[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
ZHANG Jun. Analysis of configuration of two-mode EVT for hybrid electric vehicle [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [4] 曾育平, 秦大同, 苏岭, 等. 插电式混合动力汽车动力系统的成本、油耗和排放多目标参数优化[J]. 汽车工程, 2016, 38(4): 397-402, 434.
ZENG Yuping, QIN Datong, SU Ling, et al. Cost, fuel consumption and emission multi-objective parameter optimization for the powertrain of a plug-in HEV[J]. Automotive Engineering, 2016, 38(4): 397-402, 434.
- [5] LONG V, NHAN N. Bees-algorithm-based optimization of component size and control strategy parameters for parallel hybrid electric vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(7): 1177-1183.
- [6] DESAI C, BERTHOLD F, WILLIAMSON S. Optimal drivetrain component sizing for a plug-in hybrid electric transit bus using multi-objective genetic algorithm[C]// 2010 IEEE Electrical Power & Energy Conference, August 25-27, 2010, Halifax, NS, Canada. IEEE, 2011.
- [7] YILDIZ E, FAROOQI Q, ANWAR S. Nonlinear constrained component optimization for the power train configuration of a plug-in hybrid electric vehicle power train [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2012, 3(1): 64-70.
- [8] 刘永刚, 李杰, 秦大同, 等. 基于多工况优化算法的混合动力电动汽车参数优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53(16): 61-69.
- LIU Yonggang, LI Jie, QIN Datong, et al. Parameter optimization of hybrid electric vehicle based on multi-cycle optimization algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(16): 61-69.
- [9] 于永涛. 混联式混合动力车辆优化设计与控制[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
YU Yongtao. Optimization of design and control for power-split hybrid electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2010.
- [10] 杨南南. 双行星混联式客车的优化设计与动态控制[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
YANG Nannan. Optimal design and dynamic control of dual planetary hybrid electric bus[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [11] 宋瑞芳. 功率分流式双模式混合动力系统构型设计方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
SONG Ruifang. Research on configuration analyzing methodology of dual-mode power-split hybrid powertrain[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [12] XU Q, JIANG X, ZHAO M, et al. Research on parameters matching of hybrid electric vehicle with compound-structure induction machine[C]//Advanced Computational Methods in Energy, Power, Electric Vehicles, and Their Integration, September 22-24, 2017, Nanjing, China. Springer, Singapore, 2017: 339-350.
- [13] SHEN P, ZHAO Z, ZHAN X, et al. Particle swarm optimization of driving torque demand decision based on fuel economy for plug-in hybrid electric vehicle[J]. Energy, 2017, 123: 89-107.
- [14] 高建平, 位跃辉, 刘振楠. 并联混合动力公交车动力系统匹配优化[J]. 河南科技大学学报, 2014, 35(1): 30-35.
GAO Jianping, WEI Yuehui, LIU Zhennan. Matching optimization of power system for parallel hybrid electric bus[J]. Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 35(1): 30-35.
- [15] 李焱. 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.
LI Yao. The parameter matching and optimization of power source for parallel hybrid electric bus[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

作者简介: 曾小华, 男, 1977 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为混合动力汽车。

E-mail: zeng.xiaohua@126.com

宋大风(通信作者), 女, 1977 年出生, 教授。主要研究方向为车辆地面力学与底盘电子集成控制。

E-mail: songdf@126.com