增程式电动汽车动力系统参数匹配及控制策略优化

李永亮,黄英,王绪,郭汾

(北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081)

摘 要:针对增程式电动汽车动力系统参数匹配的问题,在 Simulink-Cruise 联合仿真平台上建立了用于匹配设计的整车 初始模型,提出了基于典型工况统计分析的匹配设计方法,对增程式动力系统进行了稳态匹配。为了进一步验证设计参 数的合理性,采用恒温式定点控制策略和 CD-CS 型最优曲线功率跟随控制策略进行了仿真对比分析,验证了匹配参数 的合理性。以燃油经济性、发动机启停次数和平均充电电流为目标,基于粒子群算法对控制参数进行了多目标优化。优 化结果表明,优化后的控制策略使整车在目标工况下的百公里综合油耗下降了 7.2%,平均充电电流下降了 3.1%,优化 后的控制参数使整车性能和电池寿命都有所提升,为进一步的控制策略制定和优化奠定了基础。

关键词: 增程式电动汽车; 动力系统; 参数匹配; Cruise/Simulink 联合仿真; 粒子群 中图分类号: U462.3 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2021.03.04

Parameter Matching and Control Strategy Optimization for Power System of Extended Range Electric Vehicles

LI Yongliang, HUANG Ying, WANG Xu, GUO Fen

(School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Aiming at studying the parameter matching for power system of the extended-range electric vehicle, a vehicle model for matching design was established on the Simulink-Cruise joint simulation platform, and a matching design method based on statistical analysis of typical operating conditions was proposed. The fixed-point control strategy at a constant temperature and the CDCS control strategy based on the power track method were used for simulation and comparative analysis to verify the correctness of the powertrain parameter matching. Then, taking fuel economy, engine start-stop times and the average charging current as targets, the particle swarm optimization algorithm was used for multi-objective optimization of control parameters. The results show that the optimized control strategy reduces both the overall fuel consumption per 100 km by 7.2% under the target operating conditions and the average charging current by 3.1%. The optimized control parameters have improved the overall vehicle performance and battery life, laying a foundation for further formulation and optimization of control strategies.

Keywords: extended-range electric vehicle; powertrain system; parameters matching; Cruise/Simulink cosimulation; partical swarm



李永亮,黄英,王绪,等. 增程式电动汽车动力系统参数匹配及控制策略优化 [J]. 汽车工程学报,2021,11(3):177-190. LI Yongliang, HUANG Ying, WANG Xu, et al. Parameter Matching and Control Strategy Optimization for Power System of Extended Range Electric Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(3): 177-190. (in Chinese)

收稿日期: 2020-02-06 改稿日期: 2020-02-17 基金项目: 国家重点研发计划"高效一体化油冷增程器总成开发及整车集成应用"(2018YFB0106000) 参考文献引用格式:

新能源汽车实现纯电驱动的趋势不可逆转,汽车 电动化正受到世界各国政府和企业的高度重视^[1-2], 但是由于当前车用动力电池技术水平和充电基础设 施的限制,纯电动汽车与燃油车相比,有着续驶里 程短,成本高昂,充电时间过长的短板,无法满足 人们的需求。为了解决"里程焦虑",增程式电动 汽车(Extended-Range Electric Vehicle, E-REV)作 为混合动力汽车和纯电动汽车的一种过渡车型,既 能实现清洁电能的利用,又能保证续驶里程,逐渐 成为研究热点^[3]。

增程式电动汽车动力系统结构主要由驱动电 机、动力电池、增程系统(小功率发动机-发电机 组)、主减速器以及差速器组成,各部件参数的合 理匹配是整车开发和控制策略制定的必要基础,对 于提高整车动力性能和续驶里程具有重要意义。文 献[4]~[6]基于车辆动力学原理,对增程式电动 汽车电机、电池和发动机的功率选取进行了数值计 算和仿真研究,文献[7]从电机工作特性和汽车驱 动特性的合理匹配出发,对 E-REV 动力系统的参 数设计进行了分析,上述设计方法^[4-7]多是沿用传 统汽车匹配流程,参数选择缺乏对实际工况的考虑。

在对匹配参数仿真验证的过程中,增程式电动 汽车控制策略的选取同样影响其性能优劣,常用的 控制策略有基于规则的定点控制策略和功率跟随控 制策略^[8] 以及包括神经网络控制、模糊控制等在内 的智能控制策略。智能控制策略在燃油经济性方面 优于基于规则的控制策略,但是基于规则的控制策 略简单可行,在工程上应用较多。文献 [9] 根据不 同的发动机功率,选取了不同的增程器控制策略, 优化了整车空间布置和功率分布。文献 [10] 在有 利于增程式发动机小型化的前提下,对比了4种 不同的规则型控制策略在燃油经济性上的差异及原 因,确定了最优曲线控制策略用于增程式电动汽车 的优越性。文献 [11] 以 E-REV 为研究对象,利用 模糊控制算法设计了以动力电池 SOC 和驱动电机需 求功率为输入, 增程系统功率为输出的能量管理策 略,获得了较好的控制效果。对于模糊控制和规则 型控制策略控制参数的制定方法,以上文献根据经 验分析给出,这使控制效果具有一定的随机性,降 低了控制策略的鲁棒性和整车性能。文献 [12]引 入遗传寻优算法,以发电机总发电量和燃油经济性 为优化目标,对所提出的三点控制策略进行参数优 化,优化后的控制效果明显提升。

综上所述,目前的研究在增程式动力系统参数 匹配以及相关参数的优化制定过程中仍然存在一些 对驾驶工况因素考虑不够、对控制策略的优化方法 研究不足的问题。本文首先在 Simulink-Cruise 联合 仿真平台上利用整车基本参数建立了动力系统初始 模型,针对增程式电动汽车匹配问题,提出了结合 典型工况统计分析的参数匹配方法和流程;然后根 据整车动力性指标和续驶里程要求,对增程式电动 汽车驱动电机、动力电池和增程系统的参数进行了 系统的稳态匹配设计;紧接着对比分析了 CD-CS 型最优曲线功率跟随控制策略和定点控制策略在燃 油经济性、增程系统效率以及动力电池平均充电电 流等方面的控制效果,确定了 CD-CS 型最优曲线 功率跟随控制策略更适合当前匹配参数。对于动力 系统参数优化问题,本文对部件参数和控制参数解 耦优化进行了说明,在纯电模式下,优化了主减速 比,在增程模式下,采用了更易实现的粒子群寻优 算法,对所采用的功率跟随控制策略的控制参数进 行优化,给出了控制策略在指定工况下的最优控制 参数,为增程式电动汽车基于规则的控制策略控制 参数的制定提供一种方法,也为后续复杂控制策略 的完善奠定基础。

1 E-REV 动力系统建模

1.1 E-REV 性能指标和基本参数

本研究是在某混合动力汽车已有基本参数的基础上进行,其整车质量、风阻系数等基本参数见表1,动力性和经济性等性能指标见表2。

参数	值
整备质量 m ₀ /kg	1 440
总质量 m/kg	1 815
旋转质量转换系	系数δ 1.05
主减速比 i ₀	7.555

续	表	1
绥	쥯	1

~		
	参数	值
	风阻系数 CD	0.345
	迎风面积 A/m²	2.36
	滚动阻力系数 f	0.007 2
	轮胎半径 r/m	0.315
	传动系效率 η_t	0.95
	车载用电器功率 P _{Ac} /W	180

表 2 整车性能指标

参数	值
最高车速 $v_{max}/(\mathbf{km} \cdot \mathbf{h}^{-1})$	≥ 140
百公里加速时间 t _a /s	≤ 12
最大爬坡度 amax	30
纯电动续驶里程 d1/km	80
增程式续驶里程 d2/km	400

1.2 基于 Cruise 的整车模型

根据表1中的整车基本参数,在Cruise中建立 整车仿真模型,建模的关键部分有驾驶员模型,电 机模型,电池模型和发动机模型,相关参数采用初 始值,并在后续匹配过程中不断修正。其中,驾驶 员模型模拟驾驶员控制车辆跟随目标车速行驶的状态,根据车速偏差给出踏板信号,如式(1)所示:

$$\beta_{\rm m} = f_{\rm PID} \left(v^* - v \right) \circ \tag{1}$$

式中: β_{m} 为车辆踏板信号, $\beta_{m} > 0$ 为驱动信号, $\beta_{m} < 0$ 为制动信号; v^{*} 为目标车速;v为实际车速。

Cruise 中驱动电机模型根据驾驶员给出的踏板 信号、当前电机转速以及当前总线电压下的电机外 特性转矩线查表得出电机的输出转矩,再结合电机 转速和总线电压可求出电机效率和电机电流,如式 (2)~(4)所示:

$$\begin{cases} T_{\rm m} = f_{T_{\rm m}} \left(n_{\rm m}, \beta_{\rm m}, U_{\rm net} \right), \\ T_{\rm m_out} = T_{\rm m} - J_{\rm m} \omega_{\rm m} \circ \end{cases}$$
(2)

 $\eta_{\rm m} = f_{\eta_{\rm m}} \left(n_{\rm m}, T_{\rm m}, U_{\rm net} \right) \,. \tag{3}$

$$I_{\rm m} = \begin{cases} (1\,000T_{\rm m}n_{\rm m})/(9\,550\eta_{\rm m}U_{\rm net}), & \text{电动模式}, \\ (1\,000T_{\rm m}n_{\rm m}\eta_{\rm m})/(9\,550U_{\rm net}), & \text{发电模式}.(4) \end{cases}$$

式中: $T_{\rm m}$ 为电机查表转矩; $T_{\rm m-out}$ 为电机输出转矩; $\eta_{\rm m}$ 为电机效率; $I_{\rm m}$ 为电机电流; $n_{\rm m}$, $U_{\rm net}$ 分别为电机 转速和母线电压。 动力电池采用等效电路模型,母线电压由电池 电压和电池电流计算,电池电压随电池 SOC 变化, 电池内阻随电池的温度和 SOC 变化,具体计算如式 (5)~(6) 所示:

$$U_{\text{net}} = U_{\text{Batt}}(\text{SOC}) - I_{\text{Batt}} \cdot R(T, \text{SOC}) \, . \tag{5}$$

$$SOC = SOC_{int} - \frac{1}{3\,600Q_{imax}} \int_0^t I_{batt} dt \ \circ \tag{6}$$

式中: U_{Batt} 为电池开路电压; I_{Batt}, R, SOC 分别为 电池电流、电阻和荷电状态; Q_{imax} 为电池最大容量。

发动机在转速小于怠速转速时输出转矩为0,在 转速大于怠速转速时输出转矩由发动机实际转速和 节气门开度查表得到,发动机转矩输出模型如式(7) 所示。发动机油耗的计算则是根据发动机功率和燃 油质量流量计算得出,发动机油耗模型如式(8)所示。

$$T_{e} = \begin{cases} T_{f}(n_{e}) + \alpha_{e} \left[T_{e-\max}(n_{e}, \alpha_{e}) - T_{f}(n_{e}) \right], & n_{e} \ge n_{idle}, \\ 0, & \notin \mathbb{H}_{e} \end{cases}$$
(7)

$$\begin{cases} b_{\rm e} = f_{\rm b} \left(n_{\rm e}, T_{\rm e} \right) ,\\ Q = \frac{1}{3\,600\rho_{\rm fuel}} \int_{0}^{T} \frac{P_{\rm ice}b_{\rm e}}{1\,000} dt \, . \end{cases}$$
(8)

式(7)中: T_e 为发动机输出转矩; T_f 为发动机摩 擦转矩; n_e , n_{idle} , α_e , T_{e-max} 分别为发动机转速、 怠速转速、节气门开度和峰值转矩。式(8)中:Q为发动机油耗,L; P_{ice} 为发动机功率,kW; b_e 为 燃油消耗率,g/kWh; ρ_{fuel} 为燃油密度,kg/L。

2 E-REV 动力系统参数匹配

2.1 驱动电机匹配

2.1.1 驱动电机的峰值功率

驱动电机的峰值功率由整车的性能指标确定, 峰值功率应该达到最高车速 v_{max}、最大爬坡度 a_{max} 及 百公里加速时间 t_a分别对应的最大功率需求 P_{m1}, P_{m2}, P_{m3},下面对上述 3 个功率需求进行计算分析, 如式 (9)~ (11)所示:

$$P_{\rm m1} = \frac{v_{\rm max}}{3\,600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_{\rm D}Av_{\rm max}^2}{21.15} \right) \circ$$
(9)

$$P_{\rm m2} = \frac{v_{\rm p}}{3\,600\eta_t} \left(mgf\cos\alpha_{\rm max} + mg\sin\alpha_{\rm max} + \frac{C_{\rm D}Av_{\rm p}^2}{21.15} \right) \circ (10)$$

$$t_{a} = \frac{1}{3.6} \int_{0}^{v_{b}} \frac{m\delta}{F_{t} - mgf - \frac{C_{D}Av^{2}}{21.15}} dv + \frac{1}{3.6} \int_{v_{b}}^{v_{f}} \frac{m\delta}{F_{t} - mgf - \frac{C_{D}Av^{2}}{21.15}} dv \quad \circ \qquad (11)$$

$$\left[3\,600 \frac{P_{m3}\eta_{t}}{V_{t}}, \ v \leq v_{b} \right],$$

$$F_{t} = \begin{cases} 8000 & v_{b} \\ v_{b} \\ 3600 & \frac{P_{m3}\eta_{t}}{v}, v > v_{b} \\ \end{cases}$$
(12)

式 (9) 中: g为重力加速度, g = 9.8 m/s²。式 (10) 中: v_p 为增程式电动汽车爬坡车速, $v_p = 25$ km/h; α_{max} 为增程式电动汽车最大爬坡度, $\alpha_{max} = \arctan(i_{max}/100)$ 。式 (11) 中: t_a 为 0-100 km/h 加速时间, 由于电机的工作特性,所以加速时间为恒转矩加 速时间和恒功率加速时间之和,取基速处车速 $v_b =$ 45 km/h。式 (12)表示不同车速时驱动力 F_t 的大小, 将其代入式 (11) 便可得到 t_a 和 P_{m3} 的关系。

将相关参数代入式(9)~(12),分别计算 得到如图1所示的最高车速-峰值功率曲线、最大 爬坡度-峰值功率曲线以及0-100 km/h 加速时间-峰值功率曲线。





图 1 动力性与驱动电机峰值功率

由图 1 可知,要满足表 2 中的整车动力性指标,则 驱动电机峰值功率 $P_{m1} \ge 36.13 \text{ km}, P_{m2} \ge 38.43 \text{ kW},$ $P_{m3} \ge 84 \text{ kW}。驱动电机的峰值功率满足:$

$$P_{\rm m} \ge \max\left(P_{\rm m1}, P_{\rm m2}, P_{\rm m3}\right) \circ \tag{13}$$

因此,匹配一台峰值功率为90kW的驱动电机为宜。

2.1.2 驱动电机的额定功率和额定转速

$$P_{\rm me} \ge \max\left\{P_{\rm ml}, \frac{P_{\rm m}}{\lambda}\right\} \circ$$
(14)

式中: P_{me} 为驱动电机的额定功率; λ 为电机的过载 系数,按照过载系数 1.8 进行功率匹配,可得电机 的额定功率为 $P_{me} = 50 \, \text{kW}$ 。

对于额定转速的选择, 文献 [13] 提出通过分 析驾驶员习惯的增程式电动汽车匹配方法, 相比传 统方法有所改进, 但是对于驾驶员习惯的统计数据 量庞大, 且难以保证数据的准确性。因此, 本文 基于4种确定的典型循环工况(NEDC、WLTC、 UDDS、JC08) 在 Avl-Cruise 中计算出驱动电机运 行工作点的工作时间分布, 如图2所示, 横轴为电





图 2 各工况电机工作点时间分布图

机转速(r/min),纵轴为电机转矩(N),图中等 线为对应工作点的工作时间(s)。由图可知,驱动 电机大部分工作点都分布在2500~3500r/min之 间,而电机在额定转速附近效率最高,因此,以电 机工作高频区和高效区重合为原则,综合考虑给定 驱动电机的额定转 n_{me}为3000r/min。

2.1.3 驱动电机最高转速

$$n_{\max} = \frac{i_0 v_{\max}}{0.377 r} \circ$$
(15)

将相关参数代入式中,求解计算得电机最高转速为 8 906 r/min,取整为 9 000 r/min。

最终确定驱动电机的基本参数,见表3。

表	3	驱动电	1.机:	参数
~~~	-	7 27 - 0		~~~

参数	值
峰值功率 P _m /kW	90
额定功率 $P_{me}/kW$	50
峰值转速 n _{max} /(r・min ⁻¹ )	9 000
额定转速 $n_{me}/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	3 000

#### 2.2 动力电池匹配

#### 2.2.1 电压匹配

电池电压的匹配原则是在满足峰值功率和附件功 率需求的情况下,电池电压不低于额定电压的要求。

$$U_{\text{Bat}} \ge U_{\text{Mc}} + \frac{\left(P_{\text{m}} + P_{\text{Ac}}\right)}{U_{\text{Mc}}}R \quad (16)$$

式中: $U_{Bat}$ 为电池电压; $P_{Ac}$ 为附件功率; $P_{m}$ 为驱动电 机峰值功率; $U_{m}$ 为驱动电机额定电压;R为电池内阻。 代入前文驱动电机匹配参数,得到 $U_{Bat} \ge 345.34$  V。 参考 GB/T18488.1—2015 中有关电源电压等级的规 定,选择动力电池的额定电压 $U_{Bat}=350$  V。

2.2.2 功率匹配

电池功率匹配的原则是电池额定功率满足电机 和附件的功率需求,以保证纯电模式下的整车性能。

$$\begin{cases} P_{\text{b-max}} = kC_p U_{\text{Bat}} / 1\,000 , \\ P_{\text{b-max}} \ge \frac{P_{\text{m}}}{\eta_{\text{Mc}}} + P_{\text{Ac}} & (17) \end{cases}$$

等价于:

$$C_{p} \ge \frac{1000}{kU_{\text{Bat}}} \left( \frac{P_{\text{m}}}{\eta_{\text{Mc}}} + P_{\text{Ac}} \right) \circ \tag{18}$$

式中: k 为电池的最大放电倍率;  $C_p$  为功率要求的 电池容量;  $\eta_{Mc}$  为电机和电机控制器的平均效率,  $\eta_{Mc} = 0.92$ ,其余参数见表 1 和表 2 。 2.2.3 能量匹配

电池能量的匹配原则是电池总能量需要满足整 车的纯电续驶里程,根据 GB/T18386—2017 中的规 定,应用 90 km/h 等速法进行电动汽车续驶里程试 验,动力电池的总能量  $E_{\rm b} = U_{\rm Bat}C_{\rm E}$  /1000 满足纯电 动续驶里程  $d_{\rm l}$  的能量要求,即:

$$E_{\rm b} \ge \frac{mgf + \frac{C_{\rm D}Av_{\rm a}^2}{21.15}}{3\,600 \text{DOD}\eta_{\rm t}\eta_{\rm Mc}\eta_{\rm b}\left(1-\eta_{\rm a}\right)} \times d_{\rm l} \circ \qquad (19)$$

等价于:

$$C_{E} \ge \frac{mgf + \frac{C_{\rm D}Av_{\rm a}^{2}}{21.15}}{3.6\text{DOD}\eta_{\rm t}\eta_{\rm Mc}\eta_{\rm b}(1-\eta_{\rm a})U_{\rm Bat}} \times d_{\rm l} \circ (20)$$

式中:  $C_{E}$ 表示能量要求下的动力电池容量; DOD 为动力电池的放电深度, DOD = 0.8;  $\eta_{b}$ 为动力电池 的平均放电效率,  $\eta_{b}$  = 0.95;  $\eta_{a}$ 为汽车附件能量消 耗比例系数,  $\eta_{a}$  = 0.008; 其余参数见表 1 和表 2。 将相关参数代入式(16) ~ (19), 可得图 3 所示 的动力电池最大放电倍率 – 安时容量曲线。

动力电池容量 C, 按下式进行选取:



图 3 电池最大放电率 - 安时容量曲线

由式(21)得到图3中的点2,对应动力电池 容量为42.386 Ah,最大放电率为6.6 h⁻¹。但考虑到 E-REV 动力电池容量较大,实际车用电池的最大放 电倍率范围通常不超过5 h⁻¹,选择点1处最大放电 倍率为5 h⁻¹,容量为56 Ah 更为合理。

最终确定动力电池的主要参数见表 4。

夜4 嗨酸钛性电池(LifePO4)电池多	衣 4	4 %%酸铁锂电池	$\mathbb{C}$ (LifePO ₄ )	电池梦贺
-----------------------	-----	-----------	-------------------------------------	------

参数	值
电池组额定电压 /V	350
电池组额定容量 /Ah	56
单体电压 /V	3.65
单体个数	96*1
最大放电电流 /C	5
最大充电电流 /C	3

# 2.3 增程系统匹配

增程系统由发动机、发电机及其控制器组成, 发动机和发电机串联耦合,其参数匹配决定了整车 的续驶里程长短和燃油经济性好坏。

#### 2.3.1 发动机功率匹配

发动机的功率匹配原则是在增程模式下发动 机输出功率满足驱动电机和附件的功率要求,同时 兼顾发动机效率,即典型城市工况或常用巡航车速 时的功率需求与发动机高效工作区域尽量重合,式 (22)为等速巡航时发动机的功率计算。

$$P_{\rm el} \ge \frac{v_{\rm a}}{3\,600\eta_{\rm t}\eta_{\rm Mc}\eta_{\rm g}} \left( mgf + \frac{C_{\rm D}Av_{\rm a}^2}{21.15} \right) + \frac{P_{\rm Ac}}{\eta_{\rm g}} \circ (22)$$

式中: $\eta_{Mc}$ 为驱动电机及其控制器的平均效率, $\eta_{Mc}$ = 0.92; $\eta_{g}$ 为发电机及其控制器的平均效率, $\eta_{g}$ =0.92; $v_{a}$ 为等速巡航时的车速, $v_{a}$ =90 km/h,代入参数计算得 $P_{el} \ge 11.78$  kW。

此外,考虑到典型城市工况对整车功率匹配 的影响,增程系统需要满足大多数行驶工况下的动 力性要求。基于整车基本参数对增程式电动汽车在 各行驶工况下的整车需求功率进行统计分析,利用 AVL-Cruise 计算得到 NEDC、WLTC、JC08、UDDS 工况下整车需求功率及区间分布如图(4)~(5)所示。



图 4 NEDC、WLTC、JC08 和 UDDS 工况整车需求功率

由图可知,4种典型工况下整车需求功率大部 分时间都小于 60 kW,功率需求集中于 0 ~ 20 kW, 占比达到了 0.7 左右。WLTC 工况的峰值功率最大, 为 63 kW, JC08 工况的峰值功率最小,为 25 kW。 WLTC 工况下整车平均需求功率达到了 17.23 kW, 其余典型工况的平均需求功率均小于此值。



图 5 各工况整车需求功率区间分布

由于增程式电动汽车发动机驱动功率不需要满 足整车的峰值功率需求,所以允许选择较小的发动 机,其功率只需满足增程模式下指定工况的持续功 率需求。以WLTC工况的平均需求功率为计算标准, 根据式(22)~(24)计算得到发动机常用工作点 功率需求*P* = 21.62 kW。

$$P_{\rm e2} = \frac{\overline{P}_{\rm WLTC}}{\eta_{\rm t}\eta_{\rm m}\eta_{\rm g}} + \frac{P_{\rm Ac}}{\eta_{\rm g}} \, . \tag{23}$$

$$P_{\rm e} = \max\left(P_{\rm e1}, P_{\rm e2}\right) \, \circ \tag{24}$$

2.3.2 发电机匹配

发电机参数匹配时,需要综合考虑发动机和发电 机间的总体动力传递方式,本文中发动机与发电机同 轴连接构成一体化结构,发电机与发动机的工作转速 及机械输出功率等应尽可能保持一致,以满足工作平顺 性要求。发电机额定输出功率应和发动机高效区相匹 配,由此计算发电机额定功率为Pg=Pe×ηg=19.89kW。

根据匹配计算的各部件相关参数选择合理的试 验数据对动力系统模型进行完善和修正,为了保证 发动机效率,实际选择的发动机高效区功率至少需 要大于前文计算得到的常用工作点功率,过小的功 率选择会使发动机长期处于高负荷状态,效率降低, 过大的功率选择会对整车成本和布置安装空间有影 响,合适的发动机功率选择有助于整车综合性能的 提升。本文选择的发动机和发电机功率较匹配计算 值偏大,在增程模式下能够提供充足的充电功率, 对于发动机效率和动力电池寿命等关键因素的影响 可通过控制策略的合理设计达到较优水平,选择的 驱动电机效率、发电机效率以及发动机万有特性曲 线如图 6 所示,其中发动机在 160 Nm, 2 500 r/min 时比油耗最低,为 216.5 g·kWh。





2.4 动力性验证

增程式电动汽车动力性仿真结果如图 7 所示, 仿真结果表明车速为 25 km/h 时,最大爬坡度为 38.14%,0-100 km/h 的加速时间为 11.05 s,最高车 速为 141.51 km/h,满足增程式电动汽车动力性能指 标,表明驱动电机参数匹配合理。



# 3 控制策略设计

由于动力电池容量充足,且整车动力性与发动 机机械解耦,为了达到更好的燃油经济性和排放性, E-REV 控制策略区别于传统发动机控制,可以使发 动机持续工作在其高效区域,常用的方法有基于规 则的恒温式定点控制策略和功率跟随控制策略。恒 温式定点控制策略根据动力电池 SOC 控制发动机 的启停,使发动机一直工作在其效率最高点,输出 功率恒定且不随驱动电机需求功率而改变,SOC变 化为CD-CS型。功率跟随控制策略则是根据需求 功率的不同随时改变发动机的工作点,以使增程系 统输出功率跟随整车需求功率,发动机工作点分布 于增程系统效率最优曲线上某一连续范围,或者该 曲线上多个固定的功率输出点上^[12,14],动力电池 SOC变化可以为CD-CS型,也可以为 BL型^[15]。

## 3.1 CD-CS 型最优曲线功率跟随策略

为了进一步验证匹配参数在增程模式下的合理 性,并且简化计算过程,采用 CD-CS 型功率跟随控 制策略作为增程系统控制策略。其控制逻辑如图 8 所示,当动力电池 SOC 处于高位时,执行 CD 模式, 整车需求功率 *P*_{req} 由动力电池提供,增程系统输出 功率 *P*_{APU} = 0;当电池 SOC 低于 SOC 下限值或者需 求功率高于电池额定放电功率 *P*_{batt}时,进入 CS 模式, 此时增程系统开启,发动机工作在增程系统效率最 优曲线上,发动机输出功率在一定范围内跟随整车 需求功率。



图 8 功率跟随控制策略

## 3.2 控制策略仿真分析

动力电池 SOC 初始值越高,则 E-REV 纯电续 驶里程越长。为了便于研究增程模式下的整车性能, 可将初始 SOC 值设定为一个相对较低值,而 SOC 上限值一般由具体策略决定,下限值则是由电池本 身特性决定,当电池 SOC 过低,电池内阻会急剧 增加,降低电池放电效率,所以 SOC 下限值不应 低于某一特定值。根据本文得到的电池特性数据, 仿真中设置 SOC 初始值为 0.6,设置控制参数 SOC 上限值为 0.4,下限值为 0.3,由发动机万有特性设 置功率跟随上限值为 60 kW,下限值为 10 kW,在 WLTC 工况下进行仿真,以确定前文匹配参数是否 符合实际工况要求。

仿真结果如图9所示。由图9a和d可知,仿 真初期,随着工况车速变化,整车需求功率消耗由 动力电池提供,电池电量不断减少,当 SOC 到达 SOC 下限 0.3 后, 增程系统开启, 发动机-发电机 组输出功率,跟随整车需求功率,使电池 SOC 在 0.3~0.4 间规律波动。从图 9b 局部 SOC 变化可以 看出 CD-CS 型最优曲线功率跟随控制策略使动力 电池 SOC 在增程模式下变化缓慢,有效地避免了电 池充电和放电过程的频繁切换。母线电流变化曲线 如图 9c 所示,动力电池最大充电电流为 72.71 A, 不超过3C,最大放电电流为172.05A,不超过 5C, 符合匹配设计的电池工作特性, 发动机工作 点分布如图 9e 所示,保证了整车综合效率。与定 点控制策略相比,如表5所示,CD-CS型最优曲线 控制策略由于发动机转速变化,虽然在各个转速点 效率最优,但是总体效率略差,使得燃油经济性不 如定点控制策略,但在此控制策略下平均充电电流 降低了 40.46%, 在目标工况发动机启停次数减少了 50%, 说明 CD-CS 型最优曲线功率跟随控制策略更 适合当前整车设计参数。





表 5 与定点控制策略对比

参数	定点控制策略	综合效率最优控制策略
综合油耗 / (L•100 km ⁻¹ )	4.21	4.44
增程器平均效率 /%	30.31	28.74
发动机启停次数(目标工况)	8	4
平均充电电流 /A	90.65	53.97

# 4 E-REV 动力系统参数优化

增程式电动汽车的参数优化是多目标非线性优 化问题,影响因素众多。本文在稳态匹配的基础上, 结合试验数据,使电机和发动机的参数得以确定, 缩小了优化范围,主要对部件参数主减速比和相关 控制参数进行优化。

#### 4.1 主减速比优化

增程式电动汽车传动系统对整车动力性能影响 较大,主减速比 *i*₀ 的大小决定了整车动力性和驱动 电机工作效率,因此,首先对主减速比进行优化。

由于增程式电动汽车前后功率链没有机械耦 合,对于主减速比的优化可以单独考虑。以纯电模 式下驱动电机电耗作为评价指标,主减速比在其可 取范围内满足动力性指标即可。

主减速比上限由电机最高转速和最高车速决定, 下限由车辆的最大爬坡度和电机的最大转矩确定:

$$\frac{\left(mgf\cos\alpha_{\max} + mg\sin\alpha_{\max} + \frac{C_{\rm D}Av_{\rm p}^2}{21.15}\right)r}{\eta_t T_{\max}} \leqslant i_0 \leqslant \frac{0.377n_{\max}r}{v} \circ$$
(25)

在该范围内设置控制参数与上节相同,在单个 WLTC 和 NEDC 工况下的仿真结果如图 10 所示。



#### 图 10 电耗随主减速比 i 变化曲线

随着主减速比的增加,在目标工况下的耗电逐渐增加,最大爬坡度也逐渐增加,100 km/h 加速时间逐渐减少,在符合动力性的情况下,主减速比为6.2时,驱动电机电耗最少,所以取最佳的主减速比为6.2。

# 4.2 控制参数优化

4.2.1 控制参数优化变量

CD-CS型功率跟随控制策略,SOC控制增程 系统的启停且决定了动力电池的工作效率,当SOC 低于下限值时,电池效率降低,无法输出额定功 率,而SOC上限值决定了电池放电水平并影响增程 系统的启停次数,所以将SOC上下限值SOC_{max}和 SOC_{max}作为优化变量。功率跟随范围决定了发动机 输出功率大小,进而影响发动机油耗,因此,可以 将功率跟随上下限值P_{max}和P_{min}作为优化变量。综 上所述,选取的优化变量为:

$$X = [x_1, x_2, x_3, x_4] = [SOC_{max}, SOC_{min}, P_{min}, P_{max}] \circ (26)$$

(1) 目标函数

根据汽车实际用途选取目标函数,本文研究对 象为增程式城市 SUV,对整车经济性和舒适性有较 高要求,并且控制策略应该考虑电池寿命,因此, 匹配优化的过程中以百公里综合油耗、发动机启停 次数和平均充电电流为目标函数。

$$J_{1} = \frac{100}{S_{\text{cycle}}} \left( G \frac{\int_{t_{0}}^{t_{f}} I \, dt \cdot U \cdot C_{\text{b}}}{1 \ 000} + \frac{1000 \cdot \int_{t_{0}}^{t_{f}} q \, dt}{\rho_{\text{fuel}}} \right) \circ (27)$$

式中:  $J_1$  为百公里综合油耗;  $S_{\text{cycle}}$  为目标工况行驶 里程; G 为电耗转换为油耗的换算系数,以当前每 kWh 电价比上每升油价,取G = 0.232;  $t_0$  为工况开 始时刻,  $t_f$  为工况结束时刻; I 为电池电流; U 为电 池电压;  $C_b$  为动力电池容量; q 为燃油质量流量;  $\rho_{\text{fucl}}$ 为燃油密度。

发动机的频繁启停会严重影响整车舒适性和排 放,因此,将发动机启停次数也作为目标函数。

$$J_2 = N_{\text{eng_switch } \circ}$$
(28)

式中: N_{eng switch} 为目标工况下发动机的启停次数。

电池充电电流的大小会影响电池寿命,所以将 充电电流的平均大小列为第3个指标:

$$J_3 = \operatorname{Ave}(I_{\text{charge}}) \circ \tag{29}$$

式中: Ave (*I*_{charge})为目标工况电池的平均充电电流。

(2) 确定约束方程

SOC_{min} 是一个相对的范围,超出此范围后电 池内阻急剧增大,会导致效率大幅降低,根据本文 已选动力电池的固有特性,最终确定下限值范围为 0.15~0.4。SOC_{max}应使电能较多地被利用,同时 不会导致 APU 频繁启停,可取范围为 0.2~0.5 且 大于 SOC_{min}。

$$\begin{cases} 0.15 \leq \text{SOC}_{\min} \leq 0.4 ,\\ 0.2 \leq \text{SOC}_{\max} \leq 0.5 ,\\ \text{SOC}_{\min} < \text{SOC}_{\max} & \circ \end{cases}$$
(30)

对于功率跟随控制策略,功率跟随范围应包括 发动机高效区功率,具有一定的功率可调范围,并 且避免让发动机工作在低负荷区,由前文各工况下 整车需求功率初步确定范围:

$$\begin{cases} 10 \leqslant P_{\min} < P_{\max} \leqslant 60 , \\ P_{\max} \geqslant P_{\min} + 5 . \end{cases}$$
(31)

动力电池充放电电流应符合电池工作特性,母 线电压波动不超过额定电压的10%。

$$\begin{cases} I_{\text{charge}_{\text{max}}} \leqslant 3C \\ I_{\text{discharge}_{\text{max}}} \leqslant 5C \\ 315 \leqslant U \leqslant 385 \end{cases} , \qquad (32)$$

综上所述,利用加权法得到关于控制参数的优 化目标函数和约束方程为:

$$\min J = u \cdot J_{1}(X) / J_{1}^{*} + w \cdot J_{2}(X) / J_{2}^{*} + v \cdot J_{3}(X) / J_{3}^{*} \circ$$
(33)  
$$\int_{0.15 \leq x_{1} \leq 0.4; 0.2 \leq x_{2} \leq 0.5; x_{2} \geq x_{1} \\10 \leq x_{3} \leq 55; 15 \leq x_{4} \leq 60; x_{4} \geq x_{3} + 5 \\g_{1}(x) \leq 3C \\g_{2}(x) \leq 5C \\315 \leq g_{3}(x) \leq 385 \end{cases}$$

式中: u, v, w为各目标的加权系数, 取u=0.6, v=0.2, w=0.2;  $J_1^*$ ,  $J_2^*$ ,  $J_3^*$ 为各目标参考值,  $J_1^*$ =4,  $J_2^*$ =4, ,  $J_3^*$ =54;  $g_1(x)$ 为最大充电电流;  $g_2(x)$ 为最大放电 电流;  $g_3(x)$ 为母线电压。

4.2.3 粒子群算法

粒子群算法是一种简单可行的进化算法,其灵 感来自于鸟类、蚁类等动物种群的捕食行为,在整 个搜寻的过程中,通过相互传递各自的信息,判断 是否找到最优解,同时也将最优解的信息传递给整 个种群,最终实现问题收敛^[16]。控制参数优化时粒 子群算法的计算流程如图 11 所示。



图 11 粒子群算法计算流程

本文中粒子的初始位置和速度定义为:

$$\begin{cases} p^{(i,j)} = \left[ x_1^{(i,j)}, x_2^{(i,j)}, x_3^{(i,j)}, x_4^{(i,j)} \right], \\ v^{(i,j)} = \left[ v_1^{(i,j)}, v_2^{(i,j)}, v_3^{(i,j)}, v_4^{(i,j)} \right] \end{cases}$$
(34)

式中:*i*代表粒子序号,*i*=[1,2,3,…,*m*];*j*代表 算法迭代次数,*j*=[1,2,3,…,*N*]。在每次迭代找 到个体极值和群体极值后,粒子位置和速度更新遵 循下式:

$$\begin{cases} v^{(i,j+1)} = \omega v^{(i,j)} + \beta \operatorname{rand}(*) (P_{i} - p^{(i,j)}) + \\ \gamma \operatorname{rand}(*) (P_{g} - p^{(i,j)}), \\ p^{(i,j+1)} = p^{(i,j)} + v^{(i,j+1)} \end{cases}$$
(35)

式中:  $\omega$ 为惯性常数;  $\beta$ 和 $\gamma$ 为加速常数; rand(*)为 0 ~ 1 的随机数。本文中种群粒子数 m=10, 迭代 次数 N=40,  $\omega=0.8$ ,  $\beta=0.9$ ,  $\gamma=0.9$ 。

4.2.4 优化结果分析

选取的优化工况仍为 5 个 WLTC,控制策略为 CD-CS 型最优曲线功率跟随控制策略,由于动力电 池初始值会影响车辆进入增程模式的时刻,所以设 置动力电池 SOC 初始值和前文一致为 0.6。图 12 为 优化过程中 4 个控制参数和优化目标之间的二维散 点图。





图 12 优化变量和目标函数变化

其中最优粒子的 4 个控制参数和目标函数随迭 代次数的变化如图 13 所示,由图可知,目标函数 最终仍在一定范围内波动,这是由于多目标优化问 题的解不可能是某单一解,而是一组满足约束条件 的非劣解即 Pareto 最优解集。选取图中标出位置为 最优择衷解,优化前后 SOC 随车速变化对比如图 14 所示,优化前后性能对比见表 6。



表 6 优化前后性能对比

参数	优化前	优化后	变化率
控制参数	[30, 40, 10, 50]	[20.34, 41.19, 10, 56.36]	-
综合油耗 / (L・100 km ⁻¹ )	4.44	4.12	-7.2%
发动机启停次数 (目标工况)	4	1	-75%
平均充电电流 /A	53.97	52.3	-3.1%

优化后的控制参数使整车百公里油耗下降了 7.2%,发动机在目标工况下的启停次数减少了3次, 平均充电电流减少了3.1%,对于整车节能减排和电 池寿命的延长具有重要意义。为了找到各个控制参 数对于目标函数J的影响规律,将仿真得到的粒子 位置线性拟合,得到控制参数对于目标函数的全局 影响因子,如图15所示。由图可知,SOC_{max}对于 目标函数的影响最大,在允许范围内 SOC_{max} 越大, 目标函数J越小;SOC_{min}和*P_{min}*对于目标函数的影 响次之,且与目标函数J正相关;*P_{max}*的影响因子 最小,其值越大,目标函数J越小。



图 15 控制参数对目标函数的全局影响因子

# 5 结论

(1)针对增程式电动汽车参数匹配问题,在 Matlab/Simulink和 Cruise 联合仿真平台上搭建了整 车准稳态模型,根据整车基本参数和性能设计指标, 完成了增程式电动汽车动力系统的选型和匹配,提 出了基于典型工况统计分析的增程式电动汽车参数 设计方法,该方法考虑了实际工况特征对于整车匹 配的影响,使整车参数设计具有一定的工况适应性。

(2) 采用 CD-CS 型最优曲线功率跟随控制策略和定点控制策略分别对匹配参数进行验证,对比分析了两种控制策略在燃油经济性、增程系统效率和动力电池平均电流等方面的控制效果,确定了CD-CS型最优曲线控制策略更适用于当前匹配参数。

(3)通过纯电模式的仿真完成了部件参数主减 速比的优化,并提出了表征 E-REV 动力系统综合 性能的目标函数。在此目标函数下,基于粒子群算 法对 CD-CS 型最优曲线功率跟随控制策略的控制 参数进行了优化求解,优化后的参数使整车燃油经 济性提升 7.2%,发动机启停次数大幅减少,平均充

#### 参考文献 (References)

- [1] 甄文媛. 2017 新能源汽车技术趋势展望:从三化到六 化[J].汽车纵横, 2017(2): 39-40.
  ZHEN Wenyuan. 2017 New Energy Vehicle Technology Trend Prospects: From Sanhua to Liuhua [J]. Autocross, 2017(2): 39-40. (in Chinese)
- [2] TATE E D, HARPSTER M O, SAVAGIAN P J. The Electrification of the Automobile: From Conventional Hybrid, to Plug-in Hybrids, to Extended-Range Electric Vehicles [J]. SAE International Journal of Passenger Cars Electronic and Electrical Systems, 2008, 1(1): 156–166.
- [3] 王永富,陈泽宇,周楠.新能源汽车概论 [M].北京: 科学出版社,2018: 3-26.
  WANG Yongfu, CHEN Zeyu, ZHOU Nan. Introduction to New Energy Vehicles [M]. Beijing: Science Press, 2018: 3-26. (in Chinese)
- [4] 宋珂,章桐. 纯电动和串联式混合动力汽车电机传动系参数匹配 [J]. 汽车工程,2013,35(6):87-92.
  SONG Ke, ZHANG Tong. Parameter Matching of Motor Driveline for Pure Electric and Series Hybrid Electric Vehicles [J]. Automotive Engineering, 2013, 35(6):87-92. (in Chinese)
- [5] 阳洋,王傅忠,黄菊花.增程式电动汽车动力系统仿真 匹配分析 [J]. 机械设计与制造, 2014(9): 65-68.
   YANG Yang, WANG Fuzhong, HUANG Juhua. Simulation and Matching Analysis of Extended Range Electric Vehicle Power System [J]. Machinery Design and Manufacturing, 2014(9): 65-68. (in Chinese)
- [6] 周苏,牛继高,陈凤祥,等.增程式电动汽车动力系统 设计与仿真研究 [J].汽车工程,2011,33(11):14-19. ZHOU Su, NIU Jigao, CHEN Fengxiang, et al. Design and Simulation of Extended Range Electric Vehicle Power System [J]. Automotive Engineering, 2011, 33 (11): 14-19.(in Chinese)
- [7] 龚贤武,吴德军,马建,等.增程式电动汽车动力系
   统参数匹配与仿真研究 [J]. 机械科学与技术, 2014, 33(6):147-151.
   GONG Xianwu, WU Dejun, MA Jian, et al. Parameter

Matching and Simulation of Extended-Range Electric Vehicle Power System [J]. Journal of Mechanical Science 电电流降低了 3.1%, 该优化方法为增程式电动汽车 规则型控制策略控制参数的制定提供了理论参考。

(4)由于基于规则的控制参数会随着工况特征和 行驶里程发生变化,针对不同的行驶工况和行驶里程 以及不同的控制策略的优化是下一步的研究重点。

and Technology, 2014, 33 (6): 147-151. (in Chinese)

- [8] GAO Jianping, SUN Fengchun, HE Hongwen, et al. A Comparative Study of Supervisory Control Strategies for a Series Hybrid Electric Vehicle[C]//2009 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, March 27–31, 2009, Wuhan, China. Piscataway NJ: IEEE, c2009: 1–7.
- [9] 牛继高,司璐璐,周苏,等.增程式电动汽车能量控制策略的仿真分析[J].上海交通大学学报,2014,48(1):144-149.
  NIU Jigao, SI Lulu, ZHOU Su, et al. Simulation Analysis of Energy Control Strategy for Range-Extended Electric Vehicles [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48 (1): 144-149.(in Chinese)
- [10] 牛继高,徐春华,牛丹彤,等.增程式电动汽车规则型 能量管理策略对比 [J].江苏大学学报(自然科学版), 2018,39(3):23-29,52.
  NIU Jigao, XU Chunhua, NIU Dantong, et al. Comparison of Regular Energy Management Strategies for Extended Range Electric Vehicles [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2018, 39 (3): 23-29, 52. (in Chinese)
- [11] YANG Lei, MARKERT E, HEINKEL U. Fuzzy Logic Based Energy Management Algorithm of a Hybrid Electric Vehicle with Range-Extender[C]//2014 IEEE 11th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD14), Feb. 11–14, 2014, Barcelona, Spain. Piscataway NJ: IEEE, c2014: 1–5.
- [12] 尹安东,董欣阳,张冰战,等.基于 Isight 的增程式电动汽车控制参数多目标优化 [J].合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(3): 289-294.
  YIN Andong, DONG Xinyang, ZHANG Bingzhan, et al. Multi-Objective Optimization of Control Parameters of Range-Extended Electric Vehicles Based on Isight [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2015, 38 (3): 289-294. (in Chinese)
- [13] 申彩英,王婷,胥帆.基于驾驶员驾驶习惯的增程式
   电动汽车参数匹配研究[J].现代车用动力,2015(4):
   57-60,82.

SHEN Caiying, WANG Ting, XU Fan. Research on

- [14] 张昕,吴建政,宋雯,等.基于阿特金森发动机的增程 式电动汽车控制策略匹配设计[J].北京交通大学学报, 2017,41(4):101-106.
  ZHANG Xin, WU Jianzheng, SONG Wen, et al. Matching Design of Control Strategy of Range-Extended Electric Vehicle Based on Atkinson Engine [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2017,41 (4): 101-106. (in Chinese)
- [15] 周维,张承宁,李军求. 增程式电动车 BL 和 CD CS

#### 作者介绍



**责任作者**: 李永亮 (1995-), 男, 重庆梁 平人, 硕士研究生, 主要研究方向为混合 动力车辆系统建模与控制。

Tel: 18301095709 E-mail: lylbit@163.com 型最优能量管理策略比较研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(12): 5-12.

ZHOU Wei, ZHANG Chengning, LI Junqiu. Com-Oparative Study of Optimal Energy Management Strategies for Extended Range Electric Vehicles BL and CD_CS [J]. Automotive Engineering, 2016, 38 (12): 5–12. (in Chinese)

 [16] CHEN Zeyu, XIONG Rui, WANG Kunyu. Optimal Energy Management Strategy of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on a Particle Swarm Optimization Algorithm
 [J]. Molecular Diversity Preservation Inter-national, 2015, 8(5): 3661-3678.



通信作者:黄英(1967-),女,陕西城固 人,博士,教授,博士生导师,主要研究 方向为车辆动力传动系统控制、内燃机建 模及控制和混合动力系统控制。

Tel: 010-68913228 E-mail: hy111@bit.edu.cn

#### (上接第 176 页)

- [9] 杨蔚华,李友荣,方子帆,等.新型轮边驱动电动车平 顺性仿真分析 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(3): 177-182.
  YANG Weihua, LI Yourong, FANG Zifan, et al. Ride Comfort Simulation Analysis of New Type Motorized Wheel Driven Electric Vehicle [J]. Computer Simulation, 2015, 32(3): 177-182. (in Chinese)
- [10] 马英,邓兆祥,谢丹.电动车轮轮内主动减振系统研究
  [J].系统仿真学报,2014,26(4):874-880.
  MA Ying, DENG Zhaoxiang, XIE Dan. Study on Active Vibration Control System for in-Wheel Motor [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(4):874-880. (in Chinese)
- [11] 王骏骋,何仁.电动轮轮内主动减振器的非线性最优滑 模模糊控制 [J].汽车工程,2018,40(6):719-725.
  WANG Juncheng, HE Ren. Nonlinear Optimal Sliding Mode Fuzzy Control for in-Wheel Active Vibration Damper of Electric Wheel [J]. Automotive Engineering, 2018, 40(6):719-725. (in Chinese)
- [12] 谷盛丰, 顾久, 郑玲玲, 等. 基于 BP 神经网络的路面

不平度识别 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(4): 252-259. GU Shengfeng, GU Jiu, ZHENG Lingling, et al. Road Roughness Identification Based on BP Neural Network [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(4): 252-259.(in Chinese)

- [13] 余志生.汽车理论 [M].北京:机械工业出版社,2000.
   YU Zhisheng. Automobile Theory [M]. Bejing: China Mechine Press, 2000. (in Chinese)
- [14] 伊鑫,曲爱华.基于 Welch 算法的经典功率谱估计的 Matlab 分析 [J].现代电子技术,2010,33(3):7-9.
  YI Xin, QU Aihua. Matlab Simulation Analysis of Power Spectrum Estimation Based on Wheel Method [J]. Modern Electronics Technique, 2010,33(3):7-9. (in Chinese)
- [15] GB/T4970—2009. 汽车平顺性试验方法 [S]. 北京:中国标准出版社,2009.
  GB/T4970—2009.Method of Running Test—Automotive Ride Comfort [S]. Beijing: China Standard Press, 2009. (in Chinese)





**责任作者:**成林海(1995-),男,山东汶 上人,硕士研究生,主要研究方向为汽车 仿真与控制。

Tel: 17808084806 E-mail: 1010508136@qq.com



通信作者:周淑辉(1967-),女,黑龙江 甘南人,硕士,高级工程师,主要研究方 向为电动汽车节能与控制技术。

Tel: 13104300638 E-mail: shzhou@jlu.edu.cn