

增程式电动汽车参数匹配及仿真验证分析

孙 蕾¹, 林歆悠², 林国发³

- (1. 华侨大学 机电与自动化学院, 厦门 361021;
2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350002;
3. 上汽集团技术中心, 上海 201804)

摘 要: 基于加速能力、爬坡能力、最高车速和变速器挡位数、驱动电机参数之间的耦合关系分析, 开展增程式电动汽车驱动系统关键动力部件的参数匹配及选型确定。采用 Matlab/simulink 建立增程式电动汽车整车仿真模型, 对纯电动模式下的动力性和经济性进行仿真验证, 动力性表现为 0~50km/h 加速时间为 4.24 秒, 50~80km/h 超车加速时间为 7.16 秒, 纯电动状态下行驶里程约为 83.86km, 车辆百公里能耗约为 14.516kwh, 表明所确定的关键动力部件满足动力性及经济性的匹配要求。

关键词: 增程式电动车; 参数匹配; 控制策略; 仿真

中图分类号: U469.72 文献标识码: A 文章编号: 1674-4969(2017)03-0288-07

前言

由于能源危机, 汽车制造商很早就开始了对纯电动汽车的研究。和传统内燃机汽车相比, 续航里程仍然是纯电动汽车发展的最大障碍。统计表明, 纯电动汽车单次充电可以满足 90% 的日常行驶需求^[1-2]。但是, 用户可能会遇到用车时已超出电动车可用行驶里程或者在紧急使用电动车时电池没电的情况。基于此, 增程式电动汽车应运而生^[3-4]。其工作原理为: 在电池电量充足时, 动力电池驱动电机, 提供整车驱动功率需求, 此时发动机不参与工作。当电池电量消耗到一定程度时, 发动机启动, 发动机为电池提供能量对动力电池进行充电。当电池电量充足时, 发动机又停止工作, 由电池驱动电机, 提供整车驱动。

增程式电动汽车与纯电动汽车和混合动力汽车相比有许多优势, 但是不匹配的动力系统不仅

无法降低能耗, 反而增加车重, 对整车的成本、能耗、排放产生不利影响, 违背新能源汽车的设计初衷^[5]。因此, 有必要对增程式电动车的动力系统参数匹配进行研究。

本文以增程式电动车动力性为研究目标, 分析加速能力、爬坡能力、最高车速和变速器挡位数、驱动电机参数之间的耦合关系, 基于 Simulink 整车模型对纯电动模式下增程式电动车的动力性和经济性进行仿真验证。

1 RE-EV 设计目标及驱动特性分析

1.1 RE-EV 设计目标

对于增程式动力系统的参数匹配提供基本的设计依据^[6], 即具体的参数匹配目标, 详见表 1。

1.2 RE-EV 驱动特性分析

在实际行驶中, 增程式电动汽车的驱动电机

表 1 增程式电动汽车参数匹配设计目标

参数	数值
最高车速	180km/h
30 分钟最高车速	100km/h
0~50km/h 加速时间	$\leq 5s$
50~80km/h 加速时间	$\leq 8s$
4%坡度爬坡车速	60km/h
12%坡度爬坡车速	30km/h
最大爬坡度	$\geq 30\%$
最大爬坡度爬坡车速	15km/h
纯电动续航里程	$\geq 80km$ (90km/h)
总续航里程	$\geq 400km$

输出转矩受轮胎与地面之间的最大附着力制约, 在不考虑电机扭矩波动及高速区扭矩的衰减情况下, 驱动电机恒定扭矩输出有利于爬坡, 高速状态下恒定功率输出符合大功率需求^[7]。

本文引入 1 挡额定点车速和电机峰值功率来表征增程式电动车驱动特性的外特性曲线, 如图 1 所示。

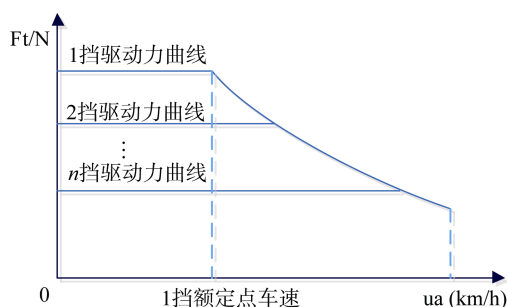


图 1 增程式电动车驱动外特性

$$F_{t\max} = \begin{cases} \frac{3600P_{\max}\eta_t}{u_e}, u_a \leq u_e \\ \frac{3600P_{\max}\eta_t}{u_a}, u_a > u_e \end{cases} \quad (1)$$

式中, $F_{t\max}$ 为整车最大驱动力; $P_{\max}$ 为电机峰值功率; u_a 为车速; u_e 为 1 挡额定点车速; η_t 为传动系统效率。

由图 1 和公式 (1) 可得: 当车速小于 1 挡额定点车速时, 电机工作在恒转矩区, 驱动力由电机峰值功率和 1 挡额定点车速的比值决定; 当车速大于 1 挡额定点车速时, 电机工作于恒功率区, 驱动力由电机峰值功率决定。

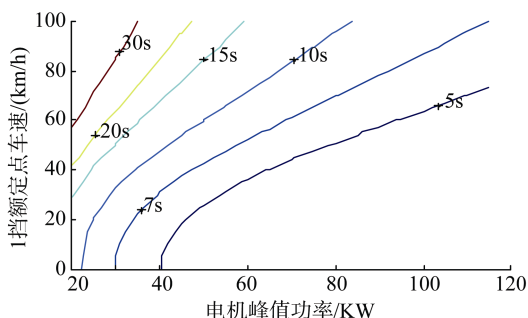
2 RE-EV 关键部件参数匹配

2.1 驱动电机参数匹配

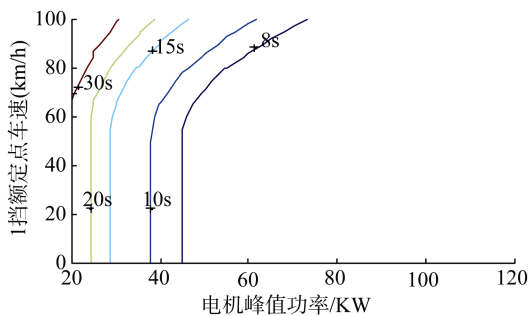
驱动电机的工作特性包括低速恒转矩和高速恒功率, 由以上分析可知增程式电动车的动力性由 1 挡额定点车速和电机峰值功率决定。

(1) 基于加速能力的功率分析

增程式电动汽车的加速能力包含 0~50km/h 和 50~80km/h 两项加速能力。满足加速能力的指标区域为图 2(a)5s 以下区域和 2(b)8s 以下区域。由图可看出 0~50km/h 加速时间受驱动电机峰值功率和 1 挡额定点车速影响均较大; 50~80km/h 加速时间受驱动电机峰值功率影响较大, 受 1 挡额定点车速影响较小。



(a) 0~50加速时间与动力系统参数之间的关系



(b) 50~80加速时间与动力系统参数之间关系

图 2 加速能力与驱动电机峰值功率关系曲线

(2) 基于爬坡能力的功率分析

增程式电动汽车爬坡能力包括 4%坡度爬坡车速、12%坡度爬坡车速和最大爬坡度。引入 1 挡额定点车速, 当 1 挡额定点车速大于或等于爬坡车速时, 电机峰值功率要满足爬坡转矩需求; 当 1 挡额定点车速小于爬坡车速时, 电机峰值功

率要满足爬坡需求功率。

$$P_{\max} \geq \begin{cases} \frac{u_x}{3600\eta_t} (mgf \cos \alpha_x + mg \sin \alpha_x + \frac{C_D A u_x^2}{21.15}), u_e < u_x \\ \frac{u_e}{3600\eta_t} (mgf \cos \alpha_x + mg \sin \alpha_x + \frac{C_D A u_x^2}{21.15}), u_e \geq u_x \end{cases}, x \in \{4, 12, 30\} \quad (2)$$

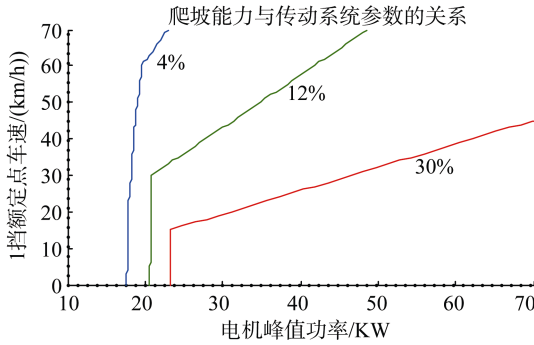


图3 爬坡能力与电机峰值功率关系曲线

由图3可得，30%坡度爬坡能力取决于驱动电机峰值功率；在4%坡度上以60km/h车速爬坡时，驱动电机峰值功率基本不受1挡额定车速的影响；在12%坡度上以30km/h车速爬坡和在30%坡度上以15km/h车速爬坡时，驱动电机峰值功率受1挡额定车速影响较大。

(3) 基于最高车速的功率分析

最高车速包含1km的最高车速、30分钟内的最高车速两项内容。最高车速发生于电机的恒功率区，电机峰值功率要满足最高车速功率要求；30分钟最高车速发生于电机的恒功率区，且其工作特性为持续性，因此电机额定功率要满足30分钟最高车速功率需求：

$$\begin{cases} P_{\max} \geq \frac{u_{\max}}{3600\eta_t} (mgf + \frac{C_D A u_{\max}^2}{21.15}) \\ P_e \geq \frac{u_{30}}{3600\eta_t} (mgf + \frac{C_D A u_{30}^2}{21.15}) \end{cases} \quad (3)$$

(4) 驱动电机峰值功率与变速器挡位数匹配

由相邻两挡的驱动力曲线应该至少有一个交点的原则，可得到：

$$\frac{u_{\max}}{u_e} \leq \beta^n \quad (4)$$

式中， β 为电机扩大恒功率区系数； n 为挡位数。

$$n \geq f_n(u_e, \beta) = \frac{\log(\frac{u_{\max}}{u_e})}{\log(\beta)} \quad (5)$$

式中， $f_n(u_e, \beta)$ 为挡位数阈值函数。

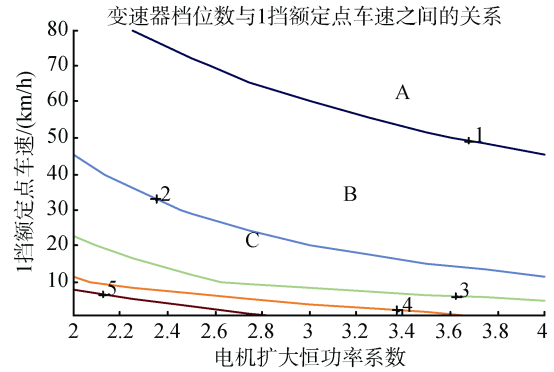


图4 变速器挡位数与1挡额定车速关系

图4中，由挡位数阈值1、2、3、4、5分成6个区域，由于电机的调速特性，除非动力性要求极高，否则挡位数不可能太高，所以重点研究A、B、C三个区域。

A区域内（包括 $f_n(u_e, \beta)=1$ 界线）， $n \geq 1$ ，变速器可采取固定挡，也可采取两挡及两挡以上方案；B区域内 $n \geq 2$ ，变速器可采取两挡及两挡以上方案；C区域同理。

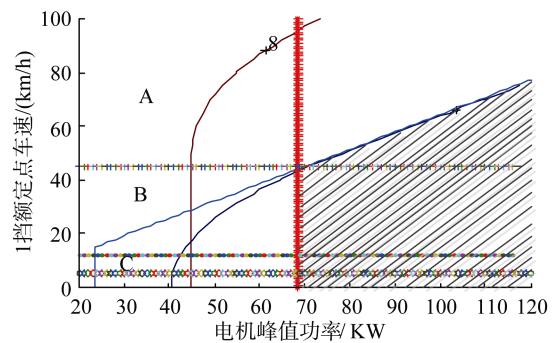


图5 电机峰值功率与变速器挡位数匹配关系

将图2~图4置于一张图中得到图5。图5中阴影部分为各项动力性指标都满足的区域，可看出最高车速对电机峰值功率的决定性作用。采用固定挡、2挡、3挡均能满足动力性指标，其中固定挡对电机峰值功率需求略大于采用2挡、3挡时。

从动力性出发, 兼顾成本因素, 选择固定挡变速器, 电机峰值功率会在上图所匹配的基础上增加 5%~10%, 取 $P_{\max} = 75 \text{ kW}$, 1 挡额定点车速 $u_e = 50 \text{ km/h}$, 驱动电机参数如表 2 所示, 驱动电机效率如图 6 所示。

表 2 驱动电机参数

参数	数值	参数	数值
最高转速	12000	峰值功率	75
额定转速	3600	额定功率	30
最大转矩	198.96	额定转矩	79.6

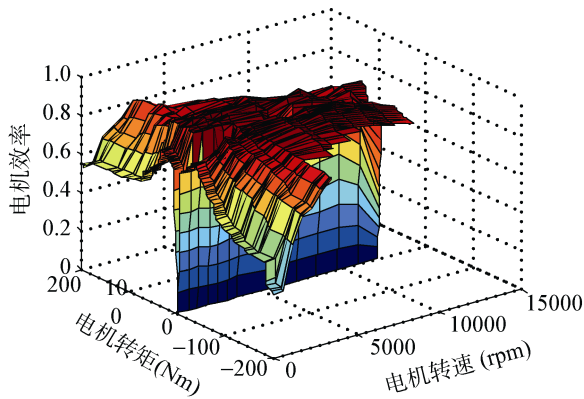


图 6 驱动电机效率

2.2 传动比参数匹配

选择固定挡变速器即可满足动力性要求, 且固定挡变速器结构简单, 体积小, 在运行过程中不会出现多挡变速器动力中断的现象。

RE-EV 驱动力满足最高车速和爬坡度要求, 见式 (6)。

$$\begin{cases} \frac{T_{\max} i_g i_0 \eta_t}{r} \geq mgf + \frac{C_D A u_{\max}^2}{21.15} \\ \frac{T_{\max} i_g i_0 \eta_t}{r} \geq mgf \cos \alpha_{\max} + \frac{C_D A u_{\alpha}^2}{21.15} + mg \sin \alpha_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

将三个不同车速和对应的爬坡度分别代入公式 (6) 中, 和最高车速相比, 限制传动比的为最大爬坡度: 即 $i_g i_0 \geq 8.24$ 。

驱动电机转速和车辆速度间的关系如式 (7)。

$$i \leq \frac{0.377 \cdot n_{a\max} \cdot r}{u_{a\min}} \quad (7)$$

式中, $n_{a\max}$ 为 90% 的电机最高转速, r/min ; $u_{a\min}$

为 RE-EV 稳定行驶速度, 一般为 90 km/h ; r 为车轮滚动半径, m 。

轿车最大传动比根据加速能力来确定^[8], 见式 (8)。

$$t \geq \frac{1}{3.6} \int_{u_0}^{u_t} \frac{\delta m}{(T i_g i_0 \eta_t) / r - mgf - C_D A u^2 / 21.15} du \quad (8)$$

式中, t 为加速时间, s ; T 为驱动电机转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; u_0 为加速初速度, km/h ; u_t 为加速末速度, km/h 。

参考设计要求得: $8.24 \leq i_g i_0 \leq 13.62$ 。按原型车取 $i_0 = 4.3$, 则 $1.916 \leq i_g \leq 3.167$, 综合电机的高效率点和车速取 $i_g = 2.0$ 。

2.3 动力电池组参数匹配

当电池电量不足时, 可以开启增程器 (APU) 来满足车辆能量需求, 故匹配电池容量时只考虑车辆纯电动里程设计目标的能量需求。

(1) 动力电池的电压等级

当电池电压高时, 输出功率相同的情况下电流损耗就小, 提高了电池充放电效率。但是, 高电压意味着电池数目增多, 各单体电池间的均衡性变差, 影响电池寿命。

电池的额定电压比所有用电器的额定电压略大, 可得出式 (9)。

$$U_b = U_m + \frac{P_m + \Delta P}{U_m} \cdot R \quad (9)$$

式中, U_b 为动力电池电压, V ; U_m 为电机额定电压, V ; P_m 为电机峰值功率, W ; ΔP 为附件功率, 取 3.6 kW ; R 为动力电池内阻, 取 0.18Ω 。根据上式计算得 U_b 约为 375.4 V , 参考电压等级标准得 $U_b = 384 \text{ V}$ 。

(2) 动力电池能量需求

(a) 电池能量能够满足纯电动巡航设计里程:

$$C_{EV} \geq \frac{mgf + C_D A V_a^2 / 21.15}{3.6 \times DOD \eta_t \eta_m \eta_b (1 - \eta_a)} S_{EV} \quad (10)$$

式中, C_{EV} 为满足纯电动巡航设计目标里程的能量需求, $\text{A} \cdot \text{h}$; S_{EV} 为纯电动巡航设计目标里程,

km; DOD 为动力电池放电深度, 取为 0.7; η_l 为车辆传动系统效率, 取为 0.95; η_m 为驱动电机效率, 取为 0.9; η_b 为动力电池放电效率, 取为 0.95; η_a 为附件消耗的能量系数, 取为 0.1。

(b) 电池能量能够满足城市循环工况中纯电动行驶一定里程:

$$C_{CYC} \geq 1000 \times \left(\frac{E_{CYC} \cdot S_{EV}}{L_{CYC}} + E_a \right) / U_b \quad (11)$$

式中, C_{CYC} 为 NEDC 循环工况下纯电动行驶达到设计目标里程的能量需求, $A \cdot h$; E_{CYC} 为循环工况下能耗, $kw \cdot h$; L_{CYC} 为 NEDC 循环工况的实验距离, 为 11.022 km; E_a 为附件能耗, $kw \cdot h$ 。

(3) 动力电池功率需求

动力电池最大放电功率:

$$P_{bmax} \geq \frac{P_{mmax}}{\eta_m} + \Delta P \quad (12)$$

式中, P_{bmax} 为动力电池最大放电功率, kw ; P_{mmax} 为驱动电机峰值功率, kw 。

$$C_p \geq \frac{1000 \times P_{bmax}}{k \cdot U_b} \quad (13)$$

式中, C_p 为最大放电功率对应的电池容量, $A \cdot h$; k 为最大放电率, h^{-1} 。

由以上三式计算得到电池容量和最大放电率关系曲线, 如图 7 所示。

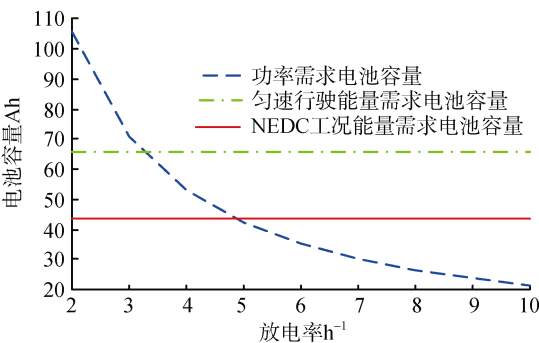


图 7 电池容量-放电率曲线

由于能够满足纯电动巡航设计里程的电池容量远大于能够满足 NEDC 循环工况纯电设计里程的电池容量, 故选择电池容量为 $65.5 A \cdot h$, 电池组能量为 $25.2 kw \cdot h$, 最大放电率为 $3.3 h^{-1}$ 。

表 3 动力电池主要参数

参数	数值	参数	数值
单体电池电压 (V)	3.2	额定电压 (V)	384
单体电池个数	120	容量 (A · h)	65.5
电池组能量 (kw · h)	25.2	SOC 工作范围	100%~30%
最大放电电流 (A)	3.3C	最大充电电流 (A)	3C

2.4 APU 参数匹配

增程器 (APU) 由发动机和 ISG 电机组成。增程式电动汽车 APU 和车轮间无直接机械连接, 当动力电池组的 SOC 减少到下限值时, APU 启动。本文 APU 输出功率应满足车辆匀速行驶到 400km 以上。

$$P_{eng} = \frac{mgfV_0 + C_D A V_0^3 / 21.15}{3600 \eta_l \eta_m \eta_{ge}} + \frac{\Delta P}{\eta_{ge}} \quad (14)$$

式中, P_{eng} 为发动机输出功率, kw ; η_{ge} 为 ISG 电机效率, 取为 0.88; V_0 为车辆巡航车速。

油箱容积可表示为:

$$V_g = \frac{P_{eng} b_e S}{102 V_0 g \rho} \quad (15)$$

式中, b_e 为车辆高效区燃油消耗率, g/kwh ; ρ 为燃油的密度, kg/L ; S 为增程模式下行驶里程, km ; V_g 为油箱容积, L 。

对于与发动机直接连接的 ISG 电机, 应尽可能与发动机的高效区相吻合, 从而使 APU 系统损失能量最少。计算得 $P_{eng} = 23.3kw$, $V_g = 26.90L$ 。APU 参数匹配结果如表 4 所示, 所选发动机效率曲线如图 8 所示。

表 4 APU 参数匹配结果

参数	数值
发动机经济功率 (kw)	15~25
发动机经济转速 (r/min)	3500~4500
油箱容积 (L)	27
ISG 电机经济转速区间 (r/min)	3500~4500
ISG 电机工作电压 (V)	384

3 仿真验证及分析

为了验证参数匹配方法的正确性, 以某款增

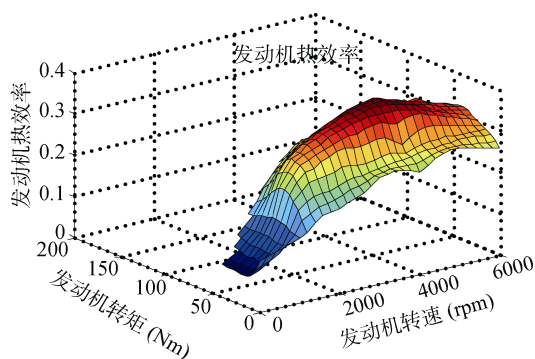


图 8 发动机效率图

程式电动车为基础，基于 Matlab/Simulink 仿真平台，根据台架试验建立了子系统（发动机、ISG 电动机、锂离子电池）数值模型，利用控制理论和汽车动力学建立了车辆动力学模型，基于逻辑

门限的整车控制器等理论模型建立了整车仿真模型，如图 9 所示。基于上述模型分别进行动力性和经济性的仿真验证（整车参数：质量 M 为 2095kg，迎风面积 $A=2.15\text{m}^2$ ，风阻系数 $C_d=0.3$ ，车轮半径 $r=0.3\text{m}$ 等）。

3.1 动力性验证

在纯电动模式下，动力性能主要评价指标为加速时间、爬坡度和最高车速。表 5 分别为匹配功率仿真实验所获得的加速度时间，爬坡度和最高车速的数据，例如 0~50km/h 加速时间为 4.24 秒，50~80km/h 超车加速时间为 7.16 秒，表明满足整车动力性要求。

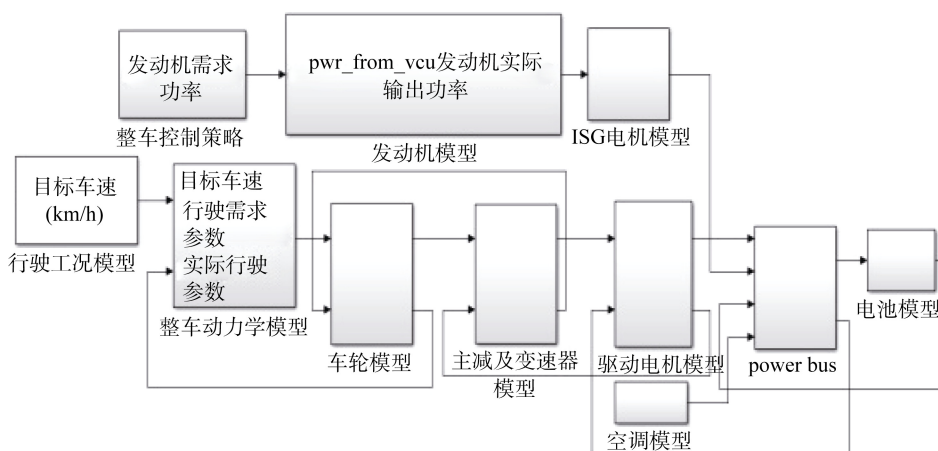


图 9 整车系统仿真模型

表 5 整车动力性仿真结果

项目	指标
最高车速	最高车速 186.23km/h
加速能力	0~50km/h 加速时间 4.24s
	50~80km/h 加速时间 7.16s
爬坡能力	最大爬坡度 33%
	最大爬坡度爬坡车速 17.5km/h

3.2 经济性验证

燃油经济性指的是在保证动力性的条件下，汽车以尽量少的燃油消耗经济行驶的能力^[9]，经济性仿真结果如图 10 所示。

增程式电动车以电为主能源，当长途行驶动力电池不足时，APU 启动为车辆提供电能。选取

NEDC 循环工况来测试增程式电动车经济性，如图 10 所示，依次为车速、充放电功率、SOC、能量消耗、行驶距离随时间的变化曲线。初始设定 SOC 为 0.8，循环工况结束 SOC 约为 0.708，下降 0.092，行驶距离为 11.022km，由此估算，该增程式电动汽车从满电状态下到 APU 开启时的 SOC 限值，纯电动行驶里程约为 83.86km。纯电动状态下，车辆百公里能耗约为 14.516kwh。

4 结语

通过对增程式电动汽车驱动系统关键动力部件的参数匹配及选型后，基于 Matlab/Simulink 对纯电动模式下的动力性和经济性进行仿真验证。

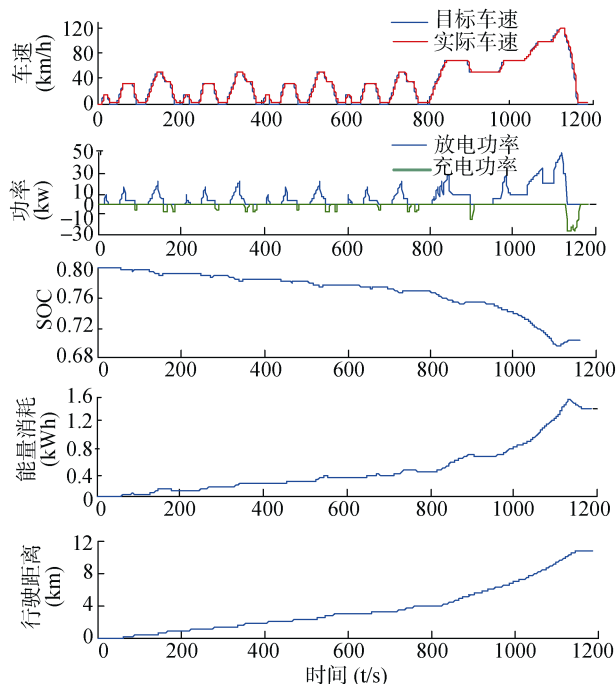


图 10 RE-EV 纯电动模式下经济性仿真结果

增程式电动车在纯电动模式下的仿真验证结果如下: 0~50km/h 加速时间为 4.24 秒、50~80km/h 超车加速时间为 7.16 秒、车辆的百公里能耗约为 14.516kwh。结果表明所确定的关键动力部件满足动力性及经济性的匹配要求。

参考文献

- [1] Maradona Rodrigues, Steve King, et al. Advanced Energy Management Strategies for Range Extended Electric Vehicle[C]// SAE International, 2015.
- [2] Patrick Walsh, Douglas Nelson. Impact of Supervisory Control on Criteria Tailpipe Emissions for an Extended-Range Electric Vehicle[C]// SAE International. 2012.
- [3] Bo-Chiuan Chen, Yuh-Yih Wu, Hsien-Chi Tsai. Design and Analysis of Power Management Strategy for Range Extended Electric Vehicle Using Dynamic Programming[J]. Applied Energy, 2014, 113: 1764-1774.
- [4] Rong Guo, Yi Mi, Chong Cao. Subjective and Objective Evaluation of APU Start-Stop NVH for a Range-Extended Electric Vehicle[C]// SAE International. 2015.
- [5] 王 冰. 增程式电动汽车动力系统参数匹配[D]. 大连理工大学, 2014.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T18385-2005 电动汽车动力性能试验方法[S]. 2005.
- [7] 陈淑江. 纯电动汽车动力传动系统参数匹配与综合控制研究[D]. 重庆大学, 2013.
- [8] 周保华. 电动汽车传动系统参数设计及换挡控制研究[D]. 重庆大学, 2010.
- [9] 杨胜兵, 徐 锋, 等. 基于 Stateflow 的电动汽车再生制动控制策略[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(3): 301-304.
- [10] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.

Study on Parameters Matching for Range Extended Electric Vehicles Based on Statistic Law of Driving Conditions

Sun Lei¹, Lin Xinyou², Lin Guofa³

(1. College of Mechatronic and Automation, Huaqiao University, Xiamen, 361021, China;

2. College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;

3. SAIC Motor Corporation Limited (SAIC Motor) technical center, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on analysis of coupling relationship among acceleration ability, climbing ability, maximum speed, transmission gears and driving motor parameters, key power components parameters matching and selection of Extended-range Electric Vehicles (e-revs) drive system is carried out. Finally e-revs vehicle simulation model is established with Matlab/simulink to simulate and verify the dynamic and economy performance under electric mode. The dynamic performance of the 0-50km/h acceleration time was 4.24 seconds, overtaking 50-80km/h acceleration time is 7.16 seconds, pure electric mode mileage is about 83.86km, the vehicle energy consumption per hundred kilometers is about 14.516kwh. The results show that key power components meet the dynamic performance and economy matching requirement.

Keywords: range extended electric vehicle; parameters matching; control strategy; optimizing