

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703001



纯电动汽车动力系统匹配 与性能仿真

李军^{1,2}, 杨东徽¹, 束海波¹, 王占锐³, 隗寒冰^{1,2}

(1. 重庆交通大学 机电与车辆工程学院, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学 城市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室, 重庆 400074;

3. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122)

摘要: 兼顾纯电动汽车动力性与经济性指标,完成驱动电机、动力电池组和变速器的优化选型,然后,围绕电池组容量与质量之间对整车性能影响的矛盾关系,利用电涡流测功机测试不同电池质量等速行驶 200 km 的能量消耗,对动力电池进行优化选型.最后,采用区间优化设计方法对传动系参数进行优化设计.针对两挡电控机械式自动变速器(AMT)换挡过程中存在换挡冲击的影响,提出一种基于电机转矩控制的换挡策略及搭载电动汽车联合仿真模型,并对换挡控制策略和整车性能指标进行仿真分析.结果表明:动力系统优化匹配方法能很好地满足动力性和经济性行驶要求,续驶里程测试过程中变速器换挡冲击度小,换挡品质较高,验证了匹配方案、仿真模型与控制策略的有效性和准确性.

关键词: 电动汽车; 动力系统; 匹配优化; 控制策略; 仿真试验

中图分类号: U 462.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2017)03-0281-07

Matching and Performance Simulation of Dynamic Systems of Pure Electric Vehicles

LI Jun^{1,2}, YANG Donghui¹,
SHU Haibo¹, WANG Zhanrui³, WEI Hanbing^{1,2}

(1. College of Mechantronics and Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Key Laboratory of System Integration and Control for Urban Rail Transit Vehicle,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. China Automotive Engineering Research Institute Company Limited, Chongqing 401122, China)

Abstract: Taking into account the dynamic and economic indicators of pure electric vehicles, the optimized selection of drive motor, power battery and transmission was completed in this paper. Aiming at the contradictory influence on vehicle performance from the capacity and quality of batteries, the power battery selection was optimized considering the energy consumption of different battery quality for driving 200 km under constant speed using eddy current dynamometer, and an interval optimization method was used to design the parameters of the transmission system. In view of the shifting shock influence in two-stage automated mechanical transmission (AMT), a control strategy based on the motor torque control shift was proposed. Carrying the electric

收稿日期: 2016-11-16

通信作者: 李军(1964-),男,教授,博士,主要从事汽车发动机排放与控制、节能与新能源汽车的研究. E-mail: cqleejun@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51305472); 重庆市自然科学基金重大资助项目(cstc2015zdcy_zdxx60010); 重庆市重点实验室科研基金资助项目(cstc2015yfpt_zdsys3000); 重庆市教委科技计划项目(KJ120423)

vehicle joint simulation model the shift control strategy and performance indicators were analyzed. The results show that power system optimization matching method can satisfy the requirements on low power, low cost, and small transmission shift shock. The shift quality is higher in the process of continuous driving mileage test, which verified the effectiveness of proposed matching program, simulation model and control strategy.

Keywords: electric vehicle; dynamic system; matching optimization; control strategy; simulation experiment

电动汽车仍处于研发调试阶段,影响其推广的瓶颈主要有:研发高能蓄电池、提高驱动系统效率、建造快速充电站等^[1-3]. 动力驱动系统是电动汽车最重要的系统,其匹配选型决定了整车的动力性和经济性^[4]. 国内外众多学者都对纯电动汽车动力驱动系统进行了深入研究与样车试验^[5]. 本文以某企业纯电动汽车研发车型为对象,完成驱动电机、动力电池组、变速器的优化匹配与选型. 针对两挡电控机械式自动变速器(AMT)换挡冲击问题,制定一种电机转矩控制策略,对换挡策略、动力性及经济性进行仿真分析,并验证动力系统匹配方案、仿真模型及所设计的控制策略的有效性.

1 动力系统部件参数匹配

驱动电机和动力电池组的选择多样性导致了电动汽车布置方式的多样性^[6],因此,匹配方案的好坏将对电动汽车的整车性能产生重大的影响. 整车基本参数及性能指标,如表 1,2 所示. 表 1 中: m_0 为整备质量; m 为满载质量; A 为迎风面积; C_D 为风阻系数; r_d 为滚动半径; f 为滚阻系数; η_t 为传动效率. 表 2 中: t 为百公里加速时间; W 为新欧洲行驶循环(NEDC)百公里电耗; S 为 NEDC 续驶里程; u_{\max} 为最高车速; α_{\max} 为最大爬坡度; S 为 60 km · h⁻¹ 的续驶里程.

表 1 整车的基本参数
Tab.1 Basic parameters of vehicle

技术参数	m_0/kg	m/kg	A/m^2	C_D	r_d/mm	f	η_t
参数值	1 500	1 875	2. 517	0. 342	299	0. 016	0. 96

表 2 整车的性能指标要求
Tab.2 Vehicle performance target requirements

性能指标	t/s	$W/\text{kW} \cdot \text{h}$	S/km	$u_{\max}/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	$\alpha_{\max}/\%$	S/km
参数值	≤ 13	≤ 20	≥ 190	≥ 135	≥ 30	≥ 220

1.1 电机参数匹配及选型

1.1.1 驱动电机功率 驱动电机的最高功率需要同时满足最高车速、最大爬坡度及加速时间的要求^[7],即

$$P_1 = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgf}{3\,600} u_{\max} + \frac{C_D A}{76\,140} u_{\max}^3 \right), \tag{1}$$

$$P_2 = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgf \cos \alpha_{\max}}{3\,600} u_a + \frac{mg \sin \alpha_{\max}}{3\,600} u_a + \frac{C_D A}{76\,140} u_a^3 \right), \tag{2}$$

$$P_3 = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mu_b^2}{1\,296} \left(1 - \left(\frac{t-0.1}{t} \right)^{0.5} \right) + \frac{mgfu_b}{3\,600} + \frac{C_D A}{76\,140} u_b^3 \right). \tag{3}$$

式(1)~(3)中: $P_1 \sim P_3$ 分别为最高车速功率要求、最大爬坡度功率要求、加速时间功率要求; u_b 为加速车速; t 为加速时间; α_{\max} 为爬坡最大坡度; u_a 为汽车与空气相对速度, u_a 取 35 km · h⁻¹.

最大功率 $P_{\max} \geq \max(P_1 + P_2 + P_3)$, 可得 $P_{\max} \geq 80 \text{ kW}$, P_{\max} 取 98 kW;驱动电机的额定功率满足额定功率 $P_e \geq 90\% P_1 = 36.41 \text{ kW}$, P_e 取 49 kW;电机过载系数 λ 取 2.

1.1.2 驱动电机转速和转矩 选择电机的峰值转速 n_{\max} 为 9 700 r · min⁻¹;电扩大恒功率区系数 $\beta = n_{\max}/n_r$,取值范围为 2~4,取 β 为 2. 2;电机额定转速 $n_r \geq n_{\max}/3 \geq 3\,233.33$,取 n_r 为 4 400 r · min⁻¹. 计算可得峰值转矩 $T_{\max} = 212.7 \text{ N} \cdot \text{m}$,额定转矩 $T_e = 106.4 \text{ N} \cdot \text{m}$. 因此,取电机峰值转矩为 213 N · m,额定转矩为 107 N · m.

根据计算结果,并在分析电机效率、控制精度、调速性能及制动性能的基础上,驱动电机选型为某款永磁同步电机,基本性能参数,如表 3 所示. 表 3 中: U 为电压等级.

表 3 电机的匹配结果
Tab. 3 Motor matching results

电机参数	U/V	P_e/kW	P_{max}/kW	$T_e/N \cdot m$	$T_{max}/N \cdot m$	$n_r/r \cdot min^{-1}$	$n_{max}/r \cdot min^{-1}$
参数值	342	49	98	107	213	4 400	9 700

1.2 动力电池参数匹配及选型

综合考虑多种形式锂电池组的安全性能、存储性能及生产成本,选用三元锂离子电池组作为该车的储能装置^[8]. 车辆以等速 u_{ele} 行驶时,电池负载功率为

$$P_{bat} = \frac{u_{ele}}{3\,600\eta_i\eta_{con}\eta_{bat}}\left(mgf + \frac{C_D A u_{ele}^2}{21.15}\right).$$
 (4)

式(4)中: P_{bat} 为电池负载功率; η_{con} 为电机控制器效率(0.91); η_{bat} 为电池组放电效率.

等速 u_{ele} 条件下,行驶距离 S 所需能量为

$$E = 1\,000 \cdot P_{bat} S / u_{ele}.$$
 (5)

电池组放电容量、蓄电池单体放电电流与温度存在一定关系,电池组放电容量和蓄电池需求数量为

$$C_{ele} = E / (U_0 \xi(C)),$$
 (6)

$$n = C_{ele} / C_{rat}.$$
 (7)

式(6)中: C_{ele} 为电池组放电容量; U_0 为蓄电池单体电压; $\xi(C)$ 为放电过程温度与电流影响因数; C_{rat} 为蓄电池单体额定容量.

续驶里程随电池组容量增加而增大,但电池容量增加必将导致车辆总质量的增加,从而加大滚动阻力、坡度阻力及加速阻力,导致车辆能耗增大^[9]. 为了更好地研究电池组容量和质量两变量之间的相互矛盾关系,引入荷电状态(SOC)质量比系数,即

$$K_{SM} = SOC / M_{bat}.$$
 (8)

式(8)中: M_{bat} 为电池组总质量. 荷电状态质量比系数越大,表明单位电池组质量所消耗电量越小,越有利于提高电池利用率,节省能耗.

通过对蓄电池的计算分析,系数 K_{SM} 与电池组容量(C)关系曲线,如图 1 所示. 由图 1 可知:蓄电池 SOC 质量比系数随电池容量增大而减小,表明电池组容量较大不利于提高电池效率和能量利用率,与纯电动汽车电池组容量越大续驶里程越大的理论存在一定的实际应用冲突. 因此,在满足性能指标的前提下,应尽可能地降低电池组容量,即减少电池组质量,从而达到提高电池利用效率的目的.

基于底盘测功机,利用电涡流测功机施加阻力矩,设定相关参数,模拟车辆在实际道路行驶时,不同电池组质量对应的滚动阻力和空气阻力. 根据续驶里程目标,测试了车辆以 $60\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 等速行驶 200 km,不同电池组质量所需要的能量(E),测试结果,如图 2 所示. 图 2 中: M 为电池组质量. 由图 2 可知:考虑到车载附件电量消耗问题,选择电池容量为 $112\text{ A} \cdot \text{h}$. 最终确定储能装置总质量为 244 kg,电池标称总电压为 342 V,储能装置总电量为 $38.3\text{ kW} \cdot \text{h}$,单体总数量为 2 850 个,电池节数为 95 节.

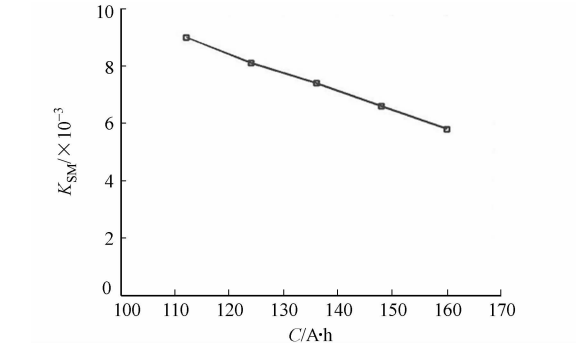


图 1 SOC 质量比系数与电池组容量的关系
Fig. 1 Relationship between SOC mass ratio coefficient and battery capacity

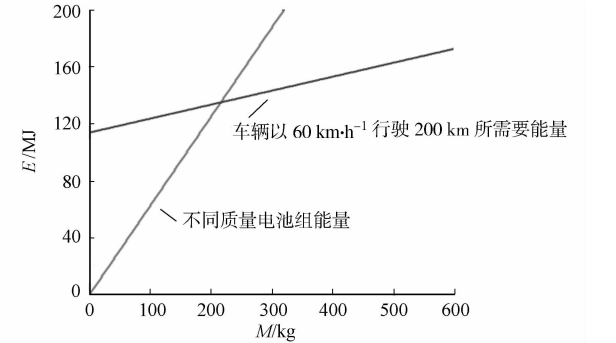


图 2 不同电池组质量携带的能量及对车辆能耗的影响
Fig. 2 Energy of mass carrying of different battery pack and its influence on vehicle energy consumption

1.3 变速器参数匹配及选型

电动汽车传动系统发展趋于两挡或多挡化^[10],多挡变速器可以通过控制传动比使驱动电机位于理

想的工作区域,提高整车动力性和经济性^[11].文中选用两挡 AMT 变速器.

最小传动比 $i_{g,2}$ 根据最高车速确定,此时,电机应达到最高转速;而最大传动比 $i_{g,1}$ 根据最大爬坡度确定,此时,电机达到最大转矩.传动比约束范围为

$$i_{g,2} \leqslant 0.377 \times \frac{n_{\max} r_D}{u_{\max}}, \tag{9}$$

$$i_{g,2} \geqslant \frac{F_{u_{\max}} r_D}{\eta_t T_{u_{\max}}} = (mgf + \frac{C_D A u_{\max}^2}{21.15}) r_D / (\eta_t T_{u_{\max}}), \tag{10}$$

$$i_{g,1} \geqslant \frac{mg(f \cos \alpha_{\max} + \sin \alpha_{\max}) r_D}{T_{\max} \eta_t}. \tag{11}$$

式(9)~(11)中: $F_{u_{\max}}, T_{u_{\max}}$ 为最高车速时的行驶阻力和电机输出转矩; $1.43 \leqslant i_{g,2} \leqslant 5.52; i_{g,1} \geqslant 9.01$.

采用区间优化方法对传动比进行优化设计,确定优化模型的设计变量为 $\mathbf{X}_i = [i_{g,1} \quad i_{g,2}]$,满足约束条件下的区间优化目标数学模型为

$$Q_{\max} = \alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 + \cdots + \alpha_i Q_i, \quad S(i_{g,1}, i_{g,2}) \geqslant s. \tag{12}$$

式(12)中: Q_{\max} 为目标函数; Q_i 为各目标变量对应的区间宽度函数; α_i 为加权函数;以动力性为约束条件,续驶里程为约束区间函数,即 $S(i_{g,1}, i_{g,2})$ 为不同传动比下的续驶里程; s 为目标续驶里程,采用多元微分法进行求解.以最初求解的传动比范围作为初始区间,求区间约束函数的条件极值点,即求得 $i_{g,1}, i_{g,2}$ 的最大可行域,变速器优化选型结果,如表 4 所示.

表 4 变速器的匹配结果

Tab. 4 Transmission matching results

变速器参数	m/kg	$T_{\max}/\text{N} \cdot \text{m}$	$\eta_{\max}/\text{r} \cdot \text{m}^{-1}$	$i_{g,1}/i_{g,2}$
参数值	30	230	9 000	9.26/5.28

1.4 两挡 AMT 变速器换挡策略

两挡 AMT 变速器在提升整车动力性和经济性时,还存在换挡冲击问题,需要对驱动电机和换挡电机进行协调控制.纯电动汽车整车换挡流程,如图 3 所示.

1.4.1 动力中断 换挡时,首先对电机进行卸载,使其处于空载转矩,驱动电机动力输出端至轮胎间动力学和运动学方程可表示为

$$\mathbf{I} \cdot \frac{d\boldsymbol{\omega}(t)}{dt} = \mathbf{T}(t), \tag{13}$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}(t) = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 - T_D/i_0 \end{bmatrix}, \tag{14}$$

$$\boldsymbol{\omega}(t) = [\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2]^T, \quad j = \frac{d\mathbf{T}_1}{dt} = J_1 \ddot{\boldsymbol{\omega}}_1. \tag{15}$$

式(13)~(15)中: \mathbf{I} 为转动惯量矩阵; J_1, J_2 分别为变速器输入轴和输出轴的转动惯量; T_1, T_2 分别为输入轴和输出轴的转矩; T_D 为地面阻力矩; $\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2$ 分别为输入轴和输出轴的角速度; i_0 为主减速器传动比; j 为换挡冲击度.

1.4.2 摘挡与转矩控制 AMT 控制器在电机卸载后,给换挡电机发送指令,换挡执行机构在换挡电机驱动下进行摘挡.电机在起步时,工作于恒转矩区;电机在换挡时卸载,无力矩输出;电机在高速时,工作于恒功率区.驾驶员需求功率 P_{req} 和需求转矩 T_{req} 分别表示为

$$P_{\text{req}} = \frac{1}{\eta_t} (\frac{mgf u_a}{3\,600} + \frac{mg i u_a}{3\,600} + \frac{C_D A u_a^3}{76\,140} + \frac{\delta m u_a}{3\,600} \alpha), \quad T_{\text{req}} = \frac{P_{\text{req}}}{n} \times 9\,550. \tag{16}$$

设最大转矩为 T_{\max} ,令 n_{th} 为阈值转速.当 $n < n_{\text{th}}$ 时, $T_{\text{req}} = T_{\max}$; 当 $n > n_{\text{th}}$ 时,则按照式(16)计算.

1.4.3 换挡同步 换挡时,负载转动惯量很大,近似认为车速不变,需对电机进行调速,使同步器转速对应相应挡位.当电机转速在起步后达到 n_1 时,AMT 控制器发出换挡命令,此时,车速不变;当变速器输入轴转速在换到 2 挡时,应降到 n_2 ,令换挡前车速为

$$v_1 = \pi m_1 / (30 i_{g,1} i_0), \quad n_2 = n_1 (i_{g,2} / i_{g,1}). \tag{17}$$

式(17)中: n_1 为电机换挡前转速; n_2 为电机换挡后转速.电子控制单元在每次换挡计算好同步转速,对电机转速精确控制,以解决换挡动力中断对换挡品质的影响.

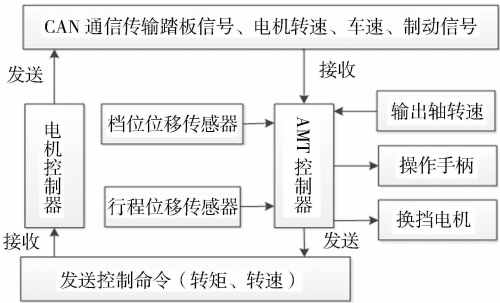


图 3 纯电动汽车换挡流程

Fig. 3 Electric vehicle shift process

1.4.4 动力恢复 电机控制器在换挡完成后,根据驾驶员需求功率计算好相应需求转矩,随后,转矩信息经控制器局域网络(CAN)发出,对电机由转速状态恢复到转矩状态进行控制。

2 整车性能仿真与分析

2.1 换挡控制策略仿真

运用 GT-DRIVE 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真,仿真工况为 NEDC 工况. 升挡控制策略程序流程图,如图 4 所示. 截取循环过程中,部分升挡动态过程,如图 5 所示. 由图 5 可知:车辆换挡过程中存在换挡重叠,换挡时间缩短,升挡所需时间约为 1.2 s.

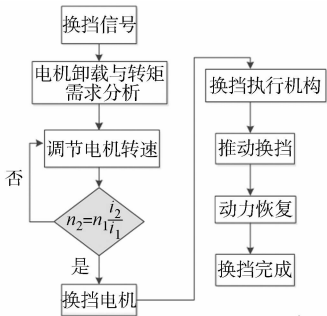
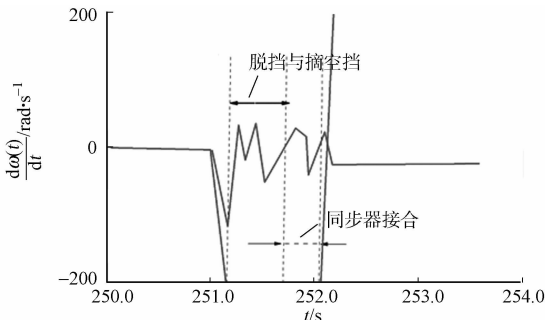
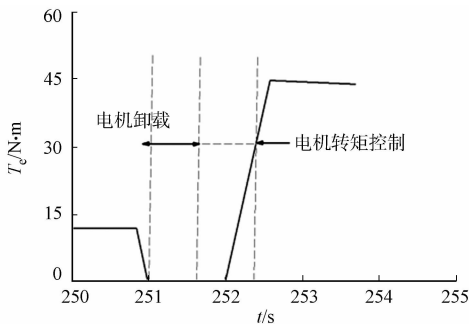


图 4 升挡控制策略

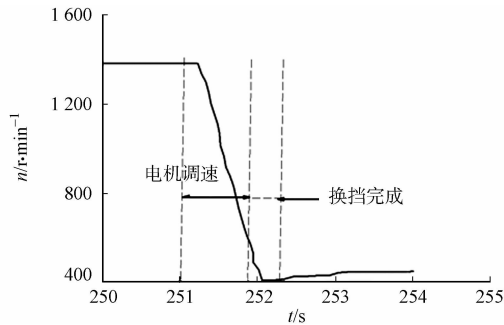
Fig. 4 Upshift control strategy



(a) 挡位状态和换挡冲击度



(b) 电机输出转矩



(c) 电机转速

图 5 循环过程中部分升挡动态过程

Fig. 5 Dynamic process of partial upshift during cycle

整车性能仿真模型,如图 6 所示. 由图 6 可知:换挡冲击数值很小,驱动电机和换挡电机协调状态良好,设计的基于转矩控制的换挡策略有效降低了驱动电机和变速器转速波动,得到很好的换挡品质。

2.2 动力性和经济性仿真分析

动力性建立的仿真任务有最高车速、加速时间、爬坡性能. 车辆在 0~100 km · h⁻¹ 的加速时间为 10.22 s,最高车速为 143 km · h⁻¹,最大爬坡坡度为 37%. 经济性建立的仿真任务为 NEDC 和 60 km · h⁻¹ 等速行驶工况的续驶里程. 在车辆运行完 18 个左右循环工况后, SOC 接近于 0,行驶里程为 200 km,

工况法的每千米能量消耗率为 0.19 kW · h. 动力电池模块循环过程中 SOC 随时间变化关系,如图 7 所示. 由图 7 可知:在循环工况的运行前期,车速较低,电机工作对功率需求较小, SOC 水平下降缓慢;在

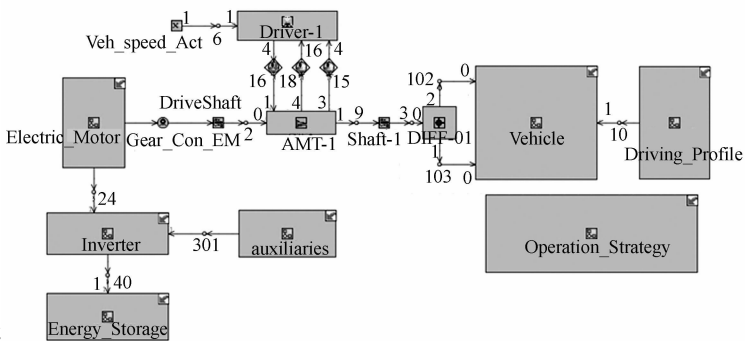


图 6 整车性能仿真模型

Fig. 6 Vehicle performance simulation model

工况法的每千米能量消耗率为 0.19 kW · h. 动力电池模块循环过程中 SOC 随时间变化关系,如图 7 所示. 由图 7 可知:在循环工况的运行前期,车速较低,电机工作对功率需求较小, SOC 水平下降缓慢;在

循环工况的运行后期,随着车速的增大,电机工作对功率需求增加,SOC 下降迅速.

等速法行驶里程为 240 km,60 km·h⁻¹等速法的仿真结果,如图 8 所示.综合动力性和经济性仿真结果,匹配选型的动力系统关键部件能够满足动力性及经济性指标.

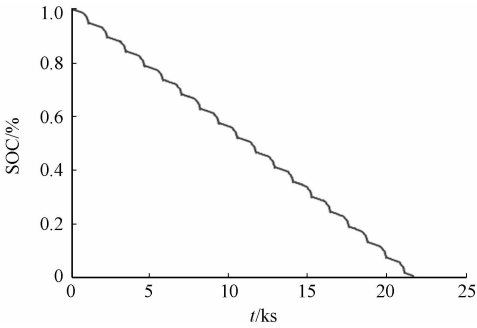


图 7 动力电池 SOC 与时间关系
Fig. 7 Relationship between SOC
and time of power battery

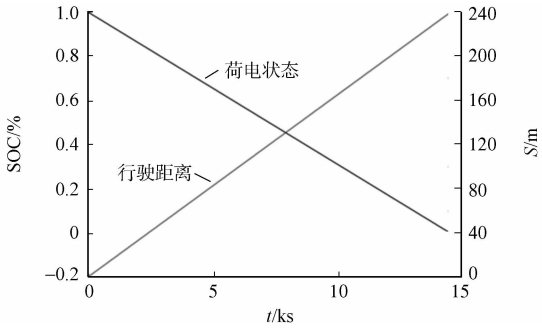


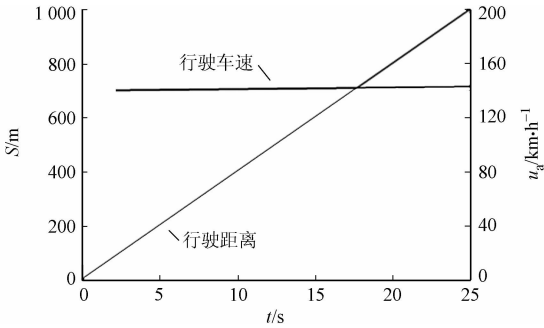
图 8 60 km·h⁻¹等速工况车辆运行情况
Fig. 8 60 km·h⁻¹ constant speed
operating conditions of vehicle

3 匹配方案试验验证

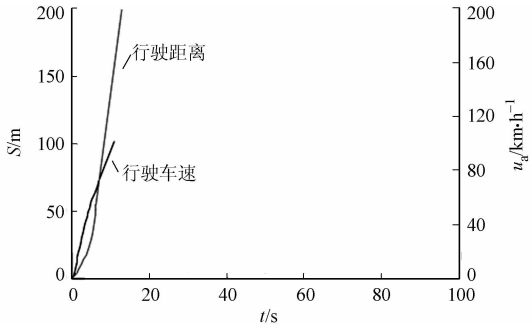
为了对设计车辆整车性能进行考核,实车测试采用的是 48"交流驱动底盘测功机系统.分别对最高车速、加速时间及 NEDC 工况续驶里程进行测试,并利用 CANoe 软件及 CAN 数据采集卡记录试验过程中电机运行报文数据,进行报文解析,以验证换挡策略.

3.1 动力性能测试

在动力性指标中,加速性能对电机功率要求最大,在底盘测功机上,对 0~100 km·h⁻¹加速过程进行测试^[12],测试时,SOC 初始值为 70%.最高车速及百公里加速时间(*t*)在测控系统显示的测试结果,如图 9 所示.



(a) 最高车速



(b) 百公里加速时间

图 9 最高车速和 0~100 km·h⁻¹加速时间测试结果

Fig. 9 Maximum speed and 0-100 km·h⁻¹ acceleration time test results

由图 9 可知:试验值与仿真值的偏差来自电机效率误差与传动效率误差,以及驾驶员在驾驶过程中不能完全按照工况驾驶行驶等多种因素,试验结果与仿真结果基本接近一致.整车的动力性指标、仿真结果和实车测试结果,如表 5 所示.

3.2 续驶里程性能测试

根据我国颁布的 GB/T 18386—2005《电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法》中的要求^[13]进行经济性测试.续驶里程试验结果,如图 10 所示.试验过程中,工况法的每千米能量消耗为 0.196 kW·h,与仿真结果 0.190 kW·h 基本一致.车辆能很好地满足工况行驶要求,速度跟随良好,换挡行驶平稳、无冲击,试验全程车辆无故障出现,续驶里程为 195 km.根据采集的电机运行报文数据,分析了车辆换

表 5 动力性仿真及测试结果

Tab. 5 Dynamic simulation and test results

动力性指标	$u_{\max}/\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$	$i_{\max}/\%$	t/s
最低指标	≥ 135	≥ 30	≤ 13.00
仿真值	143	37	10.22
转鼓试验	141	35	11.71

挡过程挡位状态、换挡冲击、电机转矩和转速情况,驱动和换挡过程中,电机协调性良好,换挡冲击很小,换挡品质较高。

在重庆市西部(垫江)汽车试验场有 4 辆样车进行可靠性路试试验,通过对行驶车速、电池单体电压、电池温度、电机实际转速和温度等项目进行全面实时监控。车辆平均百公里能耗 18.97 kW·h,电池满电状态下续驶里程可达 215 km,运行过程中故障出现率小,动力系统各部件运转状况良好。

4 结论

1) 以提高电池能量利用率为目的,提出一种电池容量和质量优化设计方法,结合电池组质量对车辆能耗影响的试验结果,完成动力电池组优化匹配选型。同时,采用区间优化设计方法对传动系统参数进行优化设计,完成动力系统参数优化与选型。

2) 针对两挡 AMT 变速器换挡冲击问题,提出一种基于转矩控制的换挡控制策略,并搭建了整车性能仿真模型;基于 GT-DRIVE 和 Matlab/Simulink 联合仿真平台对换挡控制策略、动力性和经济性进行仿真分析。

3) 由综合底盘测功机和重庆西部试验场路试结果可知:该动力系统优化匹配方案达到了整车动力性及经济性设计指标,电池利用率高,换挡策略降低了换挡冲击,提升了换挡品质,能很好地满足实车行驶要求。该系统为电动汽车的研发设计,动力性及经济性的预测分析,以及设计方案的验证提供了一种有效的方法和手段。

参考文献:

[1] 邱斌斌,朱绍鹏,马浩军. 电动车辆驱动控制系统仿真测试平台设计[J]. 浙江大学学报(工学版),2015,49(6):1154-1159.

[2] 邢忠义. 增程式电动汽车 RES 系统优化策略仿真分析[J]. 机械传动,2015,39(4):139-141.

[3] 熊璐,陈晨,冯源. 基于 Carsim/Simulink 联合仿真的分布式驱动电动汽车建模[J]. 系统仿真学报,2014,26(5):1143-1148.

[4] 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):58-61.

[5] Al-ADSANI A S,JARUSHI A M,SCHOFIELD N. An ICE /HPM generator range extender in a series hybrid electric vehicle[C]// 5th LET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. Brighton: IEEE Press,2010:1-6.

[6] HUSAIN L. 纯电动及混合动力汽车设计基础[M]. 林程,译. 北京:机械工业出版社,2012:45-47.

[7] 姜立标,吴斌,冯骁,等. 电动汽车动力性参数的仿真设计与试验验证[J]. 汽车工程,2011,33(12):1013-1017.

[8] 黄学杰. 电动汽车与锂离子电池[J]. 物理,2015,44(1):1-7.

[9] 朱曰莹,赵桂范,杨娜,等. 电动汽车动力系统参数匹配及优化[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(7):91-92.

[10] RAHIMI M M S,BOULET B. Modeling, simulation and control of a seamless two-speed automated transmission for electric vehicles[C]// American Control Conference. Portland: IEEE Press,2014:3826-3831.

[11] EBERLEH B,HARTKOPF T. A high speed induction machine with two speed transmission as drive for electric vehicles[C]// International Symposium on Power Electrical Drives, Automation and Motion. Taormina: IEEE Press,2006:249-254.

[12] 中国汽车技术研究中心. 电动汽车动力性能试验方法: GB/T 18385—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005:1-7.

[13] 中国汽车技术研究中心. 电动汽车能量消耗率和续驶里程试验方法: GB/T 18386—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005:1-4.

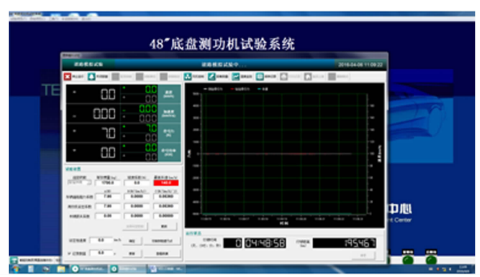


图 10 车辆 NEDC 工况续驶里程测试结果
Fig.10 Test results of NEDC driving range of vehicle

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 崔长彩)