

电动汽车动力系统参数匹配及优化

朱曰莹, 赵桂范, 杨娜, 王大方

(哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 264209 山东 威海)

摘要: 为了实现电动汽车动力系统系统参数的优化匹配, 根据电动汽车设计参数建立电动汽车整车性能仿真模型. 围绕电动汽车整车、开关磁阻驱动电机与蓄电池选择匹配问题, 研究蓄电池单体容量对电动汽车整车性能的影响规律. 基于电动汽车循环行驶工况, 提出一种以提高蓄电池利用效率为目标的电动汽车蓄电池参数优化匹配方案, 通过引入蓄电池荷电状态(SOC)质量比系数对蓄电池单体容量及组容量进行优化选择. 以同步提高电动汽车动力性能和经济性能为目标, 定义基于电动汽车循环工况的整车性能综合指标系数, 对车辆传动系比进行了优化设计, 并对该优化方案下电动汽车整车及开关磁阻电机动态性能进行了仿真分析. 结果表明: 提出的电动汽车驱动电机、蓄电池及整车传动系比的优化匹配方案能很好地满足ECE城市循环工况的行驶要求, 对改善整车动力性能, 提高电池效率, 增大续驶里程等都具有重要意义.

关键词: 电动汽车; 动力系统; 参数匹配; 优化; 电池效率

中图分类号: U469.72 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2013)07-0090-06

Parameters match and optimization for the drive system of electric vehicle

ZHU Yueying, ZHAO Guifan, YANG Na, WANG Dafang

(School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, 264209 Shandong, Weihai, China)

Abstract: An electric vehicle model is established based on the design parameters to match and optimize the drive system of the electric vehicle. Then the influence laws of the battery capacity for the vehicle performance are researched deeply, and a novel strategy for batteries optimization and match is proposed based on SOC-weight coefficient defined. To obtain the optimal transmission ratio and develop the vehicle dynamic performance, a new vehicle performance integration coefficient is proposed to select the most effective drive ratio for the vehicle based on the vehicle driving cycle. Finally, the motor and vehicle performance is analyzed and the simulation results show that the matched and optimized vehicle parameters greatly meet drive targets in the ECE drive cycle, and it is much significant for the electric vehicle to improve the vehicle power performance, battery efficiency and driving range.

Key words: electric vehicle; drive system; parameters match; optimization; battery efficiency

相比于传统燃油汽车, 电动汽车能降低能源消耗和减少尾气排放, 缓解世界能源危机和环境污染问题. 但是, 由于车辆行驶环境和所受负载特性的非线性和复杂性, 对驱动电机动态特性提出了严格而且苛刻的要求, 因此电动汽车驱动电机参数匹配

是一个急需解决的非常复杂的问题^[1-4].

针对电动汽车驱动电机参数匹配问题, 国内外很多学者进行了深入的研究. E. Hall等^[5]根据车辆实际行驶工况, 针对车用感应电机提出了一种确定电机最优基速比的方法, 从而确定电机各性能参数与特性. E. Hall^[6]以电动车辆动力性能约束为基础, 提出了一种确定电动汽车用开关磁阻电机峰值功率和额定功率的匹配设计方法. S. S. Williamson^[7]建立了混合动力汽车用感应电机效率模型, 并设计了其效率计算流程, 以城市循环工况为基础进行了仿真分析. 上海交大熊伟威博士^[8]针对混联式混合动力车辆牵引电机和ISG电机的参

收稿日期: 2012-07-05.

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20122302120087); 中国博士后科学基金(2012M520589); 哈尔滨工业大学(威海)校科学研究基金(HIT(WH).201217).

作者简介: 朱曰莹(1982—), 男, 博士, 讲师;
赵桂范(1962—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 朱曰莹, zyy@hitwh.edu.cn.

数匹配问题,以整车动力性能为目标进行了牵引电机功率参数匹配,并对其能量优化管理策略进行了研究.同济大学的孟铭等^[9]以上海市城市循环工况为基础,以整车动力性能为目标对牵引电机的工作区域进行了研究,并以仿真的手段对驱动电机性能参数匹配进行了研究.这些研究从动力性能或电机效率两个方面对电机参数匹配进行了描述,未考虑电动汽车续航里程这一指标以及蓄电池参数特性对电动汽车整体动力性及经济性的影响,因此具有一定的局限性.

本文在考虑电动汽车设计参数和开关磁阻电机转矩与功率特性基础上,建立了电动汽车整车性能仿真模型;针对电动汽车整车、开关磁阻电机与蓄电池选择匹配问题,在基于电动汽车循环工况基础上,研究了蓄电池单体容量对电动汽车整车性能的影响规律;提出了基于循环工况的电动汽车蓄电池参数匹配设计方案,对蓄电池容量参数进行了优化匹配;以同步提高电动汽车动力性能和经济性能为目标,对传动系比进行了优化设计,得到了最优传动系比;并对该方案下电动汽车整车性能及开关磁阻电机动态性能进行了分析.

1 电动汽车整车匹配模型建立

表1为电动汽车整车布置方案以及整车设计参数,在ADVISOR软件中建立蓄电池、主减速器、车轮、电器部件等关键部件模型,同时作者在文献[10]中利用开关磁阻电机转矩、功率动态特性曲线及其效率分布数值建立了开关磁阻电机模型并嵌入到整车模型中.

表1 整车参数

| 整备质量/ kg | 风阻系数 | 迎风面积/ m ² | 滚动阻力 系数 | 轮胎半径/ m |
|-------------|------|-------------------------|------------|------------|
| 550 | 0.3 | 1.7 | 0.01 | 0.282 |

另外,考虑到拟设计电动汽车为微小型电动汽车,行驶路面为城市平缓路面,所以整车性能指标为:最高车速 ≥ 55 km/h;最大爬坡度 $\geq 6\%$;加速性能 $0 \sim 40$ km/h;加速时间 ≤ 15 s;续航里程(循环工况条件下) ≥ 80 km.

2 电动汽车动力传动系参数匹配设计

很多文献^[11-12]对电动汽车传动系参数进行了匹配研究,但大都是在满足车辆动力性能指标条件下进行的参数匹配,并且对电动车用蓄电池与整车参数的匹配考虑不足.在驱动电机与车辆基本参数确定的前提下,电池参数、传动系比与电

机及车辆基本参数的参数匹配,对提高车辆动态性能,改善电动汽车经济性指标具有重要意义.

2.1 蓄电池参数设计与匹配

依据电动汽车的续航里程可以进行电池组容量参数的设计计算^[12].当电动汽车在平直路面上以最高车速匀速行驶时,电池负载的功率可以计算为

$$P_{\text{bat}} = \frac{1}{\eta_r \eta_{\text{con}} \eta_{\text{bat}}} \left(\frac{Mgf}{3\ 600} V_{\text{max}} + \frac{C_d A}{76\ 140} V_{\text{max}}^3 \right). \quad (1)$$

其中: M 为汽车质量, g 为重力加速度, f 为滚动阻力系数, V_{max} 为最高车速, C_d 为空气阻力系数, A 为迎风面积, P_{bat} 为蓄电池的负载功率, η_{con} 为电机控制器的效率, η_{bat} 为电池组的放电效率, η_r 为传动系效率.

由电动汽车续航里程的要求可以计算规定要求内的电池组输出能量:

$$E = 1\ 000 P_{\text{bat}} S / V_{\text{max}}. \quad (2)$$

其中, E 为满足续航里程时的电池组输出能量, S 为续航里程.

考虑到电池组的放电容量和蓄电池的温度与放电电流有一定的关系,因此电池组的放电容量为

$$C_{\text{bat}} = E / (U \xi(C)). \quad (3)$$

其中: C_{bat} 表示电池组的放电容量, U 表示电池单体电压, $\xi(C)$ 表示放电过程中温度与电流影响因子.

该电池组的蓄电池需求数量为

$$n = C_{\text{bat}} / C_{\text{sig}}. \quad (4)$$

其中 C_{sig} 为蓄电池单体的额定容量.

由式(1)~(4)可以看出,蓄电池单体容量的确定是计算电池组的蓄电池数量的基础,因此蓄电池单体额定容量的选取非常关键,为了研究蓄电池单体额定容量对电动汽车整车动力性和续航里程的影响,本文提出了一种基于电动汽车循环工况的电池组单体容量综合评价法,根据电动汽车动力性能和续航里程的性能指标来选择蓄电池单体容量和电池组蓄电池数目.

由于拟设计样车为微小型电动汽车,主要行驶路况为城市路况,车辆设计平均速度与最高速度不高,这和ECE城市循环工况相符合,所以在对拟设计样车进行循环工况测试时均选用该工况.

在初步计算选择电动汽车传动系比基础上,以电动汽车动力性和续航里程作为目标,在ECE循环工况下考察镍氢电池单体电池容量不同的条件下,不同电池组容量对目标参数的影响,其中单体电池容量分别选择了28、45、60和80 A·h等4种不同的电池型号.考察指标中加速时间为电动汽车起步加速至40 km/h时所需时间,最大爬坡度为车辆以10 km/h的速度所能达到的最大爬坡

度. 计算得到的整车性能指标如图 1 所示. 其中图 1(a) ~ 图 1(d) 分别为车辆最高速度、加速时间、最大爬坡度和续航里程.

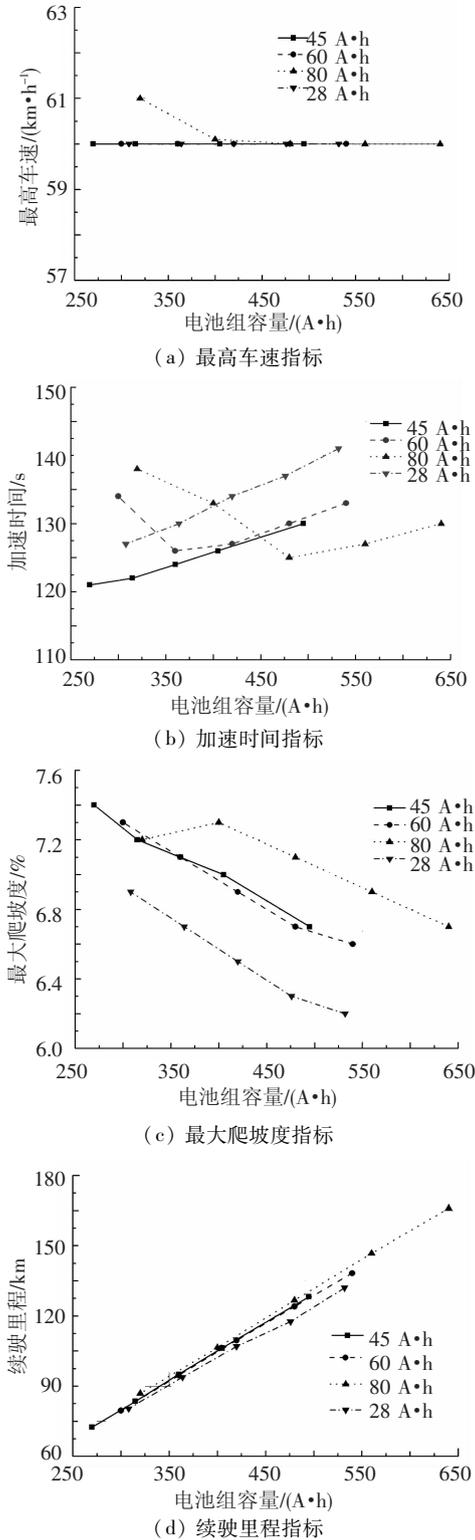


图 1 电池组容量对电动汽车整车性能的影响

从图 1 可以分析得到如下结论: 首先, 不同单体容量的蓄电池组合对电动汽车动力性能的影响大小不同, 同时从加速时间和最大爬坡度两个指标变化曲线的交叉可以看出影响规律是非线性的. 这是由于蓄电池容量的增加, 其总质量也在增

加, 而质量的增加会对整车动力性能起到一定的影响, 所以电池容量和质量两个变量对整车动力性能的耦合作用导致了影响大小的不同; 另外, 不同单体容量的蓄电池组合对电动汽车续航里程性能的影响基本相同, 电池组容量越大, 也就是电池组质量越大, 续航里程越大.

电池荷电状态 (S_{SOC}) 数值的变化显示了电动汽车能源的利用效率, 其对续航里程起到至关重要的作用, 因此 S_{SOC} 也是需要考虑的参数指标. 图 2 为电池组容量选择与电池 S_{SOC} 数值的关系, 该 S_{SOC} 数值是电动汽车在 ECE 城市循环工况下行驶 23.8 km 时刻的数值.

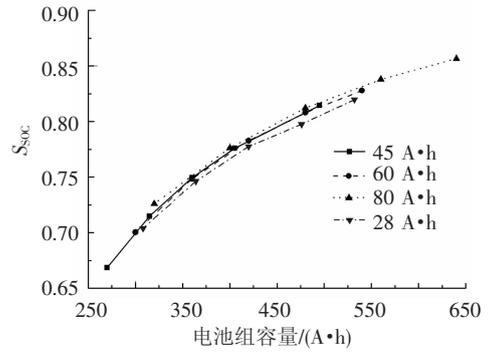


图 2 电池组容量与 S_{SOC} 的关系

由图 2 可以看出, 随着电池组容量的增大, 电池组 S_{SOC} 逐渐增大, 这和续航里程表现出来的趋势基本一致, 这是因为电池组剩余电量越多, 电动汽车所能达到的续航里程也就越大. S_{SOC} 反映出的只是电池组剩余电量, 为了研究电池组质量和电池组容量两个相互矛盾的变量与电池组容量之间的关系, 利用两个变量引入了 S_{SOC} 质量比系数, 如式(5):

$$K_{SM} = S_{SOC} / M_{bat} \tag{5}$$

其中 M_{bat} 表示电池组总质量.

S_{SOC} 质量比系数 K_{SM} 能反映单位电池组质量下 S_{SOC} 数值, 该系数越大, 说明单位电池组质量所消耗的电量越小, 因此越有利于提高电池效率, 节约能源.

同样地, 选择 4 种不同单体容量的蓄电池, 研究不同电池组电容对电池荷电状态质量比系数的影响规律, 对 4 种蓄电池分别进行计算分析, 得到该系数与电池组容量的关系曲线如图 3 所示. 由图 3 可以看出, 随着电池组容量的增大, 不同单体容量的蓄电池电池荷电状态质量比系数数值均逐渐减小, 这说明电池组容量较大不利于提高电池利用效率和节约能源. 这和前面分析得到的电池组容量越大, 电动汽车续航里程越大的理论之间存在着一定的应用冲突, 所以在满足电动汽车设

计续航里程的前提下应该尽可能的降低电池组的容量,即减小电池组的质量。

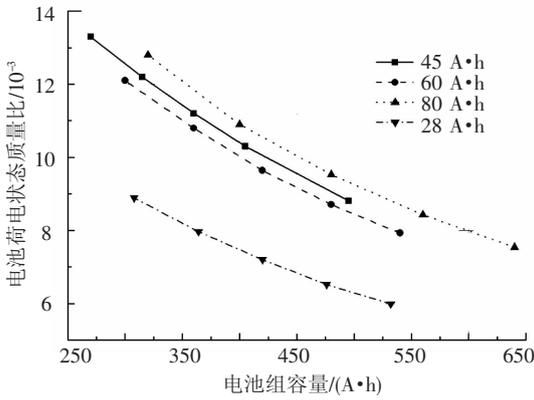


图3 电池组容量与 S_{soc} 质量比系数的关系

由拟设计电动汽车动力性能及续航里程性能要求指标,结合图1计算给出的不同电池组容量下整车性能指标数值,可以得到满足设计要求的单体电池容量和电池组容量。根据得到的满足要求的电池容量,与图3中电池荷电状态质量比系数数值相对照,以最佳电池利用率为目标,选择该系数数值最大的电池容量,通过分析比较可以得到所选最佳电池组容量为315 A·h,电池型号为容量45 A·h的镍氢蓄电池。

2.2 直接档驱动传动比优化设计

在传动系速比的选择方面,传统汽车主要根据整车的动力性能指标要求,也就是汽车最高车速、最大爬坡度和加速时间3个参数指标的要求,来对汽车传动系速比进行选择。

传动系速比的上限主要是根据发动机或者电动机最高转速和车辆的最高车速共同确定的,其计算公式如式为

$$\pi_i \leq \frac{0.377n_{max}R}{V_{max}}, \quad (6)$$

$$\pi_i = i_0 \cdot i_g. \quad (7)$$

其中, π_i 表示总传动系比。

对于传动系速比下限的计算主要是根据车辆设计最大爬坡度指标要求来计算,但是计算过程必须考虑路面附着率的限制要求。

根据最大爬坡度计算传动系速比为

$$\pi_i \geq F_{imax}R/(\eta_i T_{max}). \quad (8)$$

其中, F_{imax} 表示最大爬坡度行驶时车辆所受阻力, T_{max} 表示发动机或电动机最大输出转矩。

由于受到路面附着力极限数值的影响,附着力极限值对应的最大爬坡度为

$$\tan \alpha_{max} = b/(h_g + L/\varphi). \quad (9)$$

其中, α_{max} 表示最大爬坡度角, h_g 表示车辆质心高度, L 表示车辆轴距。

结合车辆设计参数与电动机参数,根据式(6)~(9)可以计算得到传动系速比取值范围应在3.15~4.05。

由于计算得到的理论传动系速比数值范围较小,而这样的小的传动比范围,使电动汽车采用直接档驱动成为一种可能,这样可以省去变速器,利用主减速器实现直接档驱动,从而大大降低整车的质量,提高能源的利用率。

为了充分提高电动汽车整车传动效率,增大续航里程,改善整车动力性能,提高牵引电机及传动系的使用寿命,以ECE城市循环工况为基础,提出了一种基于循环工况的电动汽车传动比选择与优化策略。

结合选定的电池模型以及建立的开关磁阻电机及整车模型,选择传动比范围从3.15~4.05,步长为0.1,共选择10个传动比数值,对这些传动比数值分别进行整车循环工况仿真,考察整车动力性能指标和续航里程指标,得到数据如表2所示。

表2 不同传动比下整车性能参数

| 传动系比 | 最高速度/ (km·h ⁻¹) | 最大爬坡度/ % | 加速时间/ s | 续航里程/ km |
|------|--------------------------------|-------------|------------|-------------|
| 3.15 | 66.3 | 6.4 | 13.2 | 83.89 |
| 3.25 | 64.3 | 6.6 | 12.9 | 83.80 |
| 3.35 | 62.4 | 6.9 | 12.6 | 83.71 |
| 3.45 | 60.5 | 7.1 | 12.3 | 83.56 |
| 3.55 | 58.9 | 7.4 | 12.1 | 83.28 |
| 3.65 | 57.2 | 7.6 | 11.9 | 82.96 |
| 3.75 | 55.6 | 7.8 | 11.7 | 82.63 |
| 3.85 | 54.2 | 8.1 | 11.6 | 82.30 |
| 3.95 | 52.8 | 8.3 | 11.5 | 81.91 |
| 4.05 | 51.5 | 8.5 | 11.4 | 81.53 |

由表2计算数据可以看出,在直接档驱动的不同传动比条件下,传动比数值选择对最高速度、最大爬坡度、加速时间和续航里程均产生较大影响。

在直接档驱动条件下,最高车速指标、加速时间指标和续航里程指标随着传动系比的增大而减小,而最大爬坡度指标却为逐渐增大的趋势;另外,加速时间和续航里程的变化趋势均为非线性关系。所以各传动系比条件下,最高车速、最大爬坡度、加速时间和续航里程的最优值对应的传动系比是不相同的,即4个性能指标不能达到同步最大化,因此为了权衡4个性能指标之间的关系,最大限度的提高整车性能,基于权重系数定义整车性能综合指标系数,其表达式为

$$K(\pi_i) = \frac{k_1 \cdot V_{max}}{(V_{max})_{max}} + \frac{k_2 \cdot i_{max}}{(i_{max})_{max}} + \frac{k_3 \cdot S_{DR}}{(S_{DR})_{max}} + \frac{k_4 \cdot (1/T_A)}{(1/T_A)_{max}}$$

其中, k_1 表示最高车速权重系数, k_2 表示最大爬坡度权重系数, k_3 表示续驶里程权重系数, k_4 表示加速时间权重系数, i_{\max} 表示该方案下电动汽车最大爬坡度, S_{DR} 表示该方案下电动汽车续驶里程, T_A 表示该方案下电动汽车加速时间, $(V_{\max})_{\max}$ 表示所有方案中最大车速数值, $(i_{\max})_{\max}$ 表示所有方案中最大爬坡度数值, $(S_{DR})_{\max}$ 表示所有方案中最大续驶里程数值, $(1/T_A)_{\max}$ 表示所有方案中加速时间倒数的最大数值。

权重系数的选取可以根据性能指标要求进行设定选取. 在满足整车动力性能的前提下, 希望电动汽车续驶里程越大越好, 所以考虑续驶里程所占比例应该较大, 本文取其权重系数为 55%; 而最高车速权重系数、最大爬坡度权重系数和加速时间权重系数分别取 15%. 在确定各指标权重系数和目标函数的基础上, 利用得到不同传动比条件下整车性能参数数值, 计算不同传动比下整车性能综合指标系数, 将其以图像的形式表示, 如图 4 中圆形点所示。

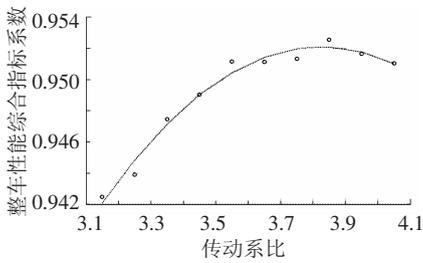


图 4 不同传动比下整车性能综合指标系数

利用多项式拟合方法对 10 组数据进行拟合运算, 如图 4 中曲线所示. 以电动汽车设计指标为约束条件, 通过求解拟合多项式在传动比区间的最大值, 可以得到整车性能综合指标系数最大值对应的传动比为 3.80。

为了验证传动比优化前后电动汽车各性能参数指标结果, 分别以优化前传动比与优化后传动比为基础, 进行 ECE 城市循环工况整车性能模拟仿真, 得到仿真对比结果如表 3 所示。

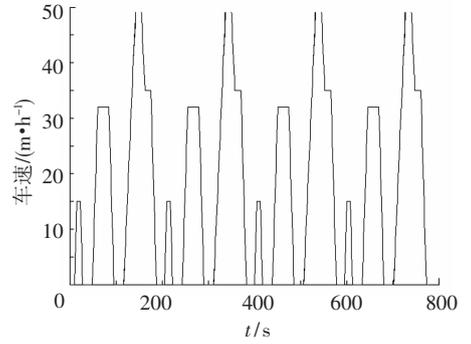
表 3 直接档驱动时各参数指标对比

| 状态 | 最高车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | 最大爬坡 度/% | 加速时间/ s | 续驶里程/ km | 综合指标 系数 |
|-------|--|-------------|------------|-------------|------------|
| 优化前 | 60 | 7.2 | 12.2 | 83.45 | 0.950 1 |
| 优化后 | 55 | 8.0 | 11.6 | 82.46 | 0.953 6 |
| 变化量/% | -8.33 | 11.11 | 5.17 | -1.19 | 0.37 |

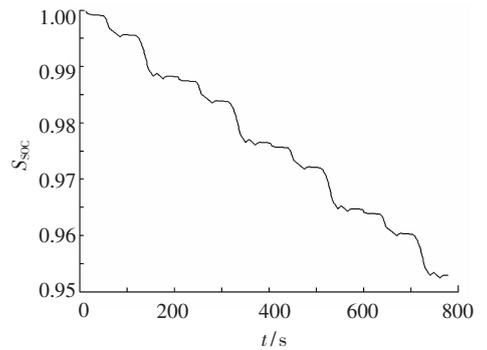
由表 3 中对比数据可知, 虽然优化后最高车速指标出现 8.33% 的降低量, 但是最大爬坡度、加速时间指标均增大, 增幅最大的最大爬坡度增加了 11.11%, 综合指标系数增加量为 0.37%, 这些都说明优化后达到了提高整车综合性能的目的。

3 匹配方案整车性能仿真

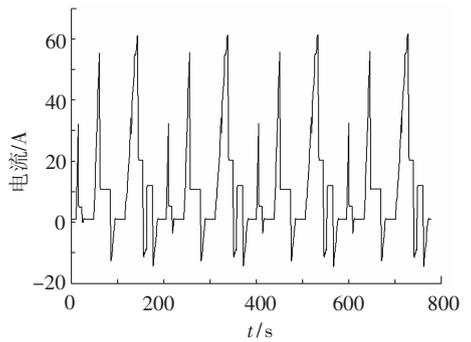
根据提出的基于循环工况的电动汽车蓄电池选择和传动系比优化设计方案, 得到了拟设计电动汽车最优匹配方案. 根据最优方案, 在 ECE 城市循环工况下, 对建立电动汽车仿真模型进行仿真分析, 仿真得到的主要参数指标以曲线的形式表示, 如图 5 所示。



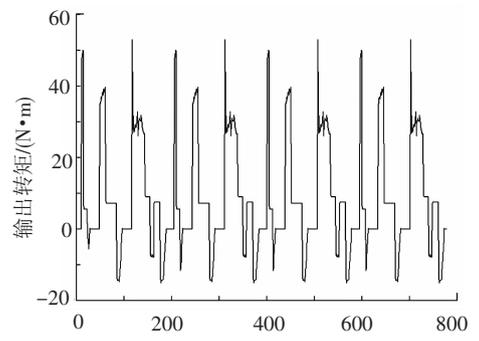
(a) 车速响应



(b) S_{soc} 数值



(c) 开关磁阻电机电流



(d) 开关磁阻电机输出转矩

图 5 ECE 城市循环工况下电动汽车仿真结果

由图5可以看出,电动汽车动力系统的匹配方案能很好地满足ECE城市循环工况的行驶要求,跟随速度良好,行驶平稳, S_{soc} 变化也较为稳定;驱动电机电流与输出转矩均处于设计指标范围内,这对改善整车动力性能,提高电池效率,增大续驶里程等都具有十分重要的意义.

4 结 论

1)在电动汽车设计参数基础上建立了电动汽车整车性能仿真模型;基于电动汽车行驶循环工况,研究了电池单体容量对电动汽车整车性能的影响规律,通过引入蓄电池电池荷电状态质量比系数对蓄电池容量参数进行了优化匹配;

2)为实现同步提高循环工况下电动汽车动力性能和经济性能的目标,定义了整车性能综合指标系数,对电动汽车传动系比进行了优化设计;

3)利用建立的电动汽车整车性能仿真模型,仿真分析了匹配优化后电动汽车整车性能特性,仿真结果表明:本文提出优化匹配方案能很好地满足ECE城市循环工况的行驶要求,这对改善整车动力性能,提高电池效率,增大续驶里程等都具有十分重要的意义.

参 考 文 献

- [1] CHAN C C, CHAU K T. Modern electric vehicle technology [M]. New York: Oxford University Press, 2001:165 - 168.
- [2] PAGANELLI G, GUERRA T M, DELPRAT S. Simulation and assessment of power control strategies for a parallel hybrid car [J]. Journal of Automobile Engineering, 2000, 214(7):705 - 718.
- [3] CHAU K T, CHAN C C, CHUNHUA L. Overview of permanent magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2008, 55(6): 2246 - 2257.
- [4] EMADI A, YOUNG J L, RAJASHEKARA K. Power electronics and motor drives in electric, hybrid electric and plug-in hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2008, 55(6): 2237 - 2245.
- [5] HALL E, RAMAMURTHY S S, BALDA J C. Optimum speed ratio of induction motor drives for electric vehicle propulsion [C]//Proceedings of the 2001 Applied Power Electrical Conference. California: [s. n.], 2001: 371 - 377.
- [6] HALL E. Electric propulsion with emphasis on switched reluctance motor and the motor optimum speed ratio [D]. [S. l.]: George Washington University, 2002: 20 - 120.
- [7] WILLAMSON S S, EMADI A, RAJASHEKARA K. Comprehensive efficiency modeling of electric traction motor drives for hybrid electric vehicle propulsion applications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56: 1561 - 1571.
- [8] 熊伟威. 混联式混合动力客车能量优化管理策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [9] 孟铭, 杜爱民, 吴晓栋. 基于上海市路况的混合动力汽车电机参数的确定[J]. 同济大学学报, 2005, 33(5): 668 - 672.
- [10] 朱曰莹. 开关磁阻电机动态特性优化及与整车匹配研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 100 - 103.
- [11] 史文库, 吕冬慧, 梁天也. 太阳能电动车动力传动系参数匹配的基础研究[J]. 太阳能学报, 2008, 29(8): 959 - 964.
- [12] 何洪文, 余晓江, 孙逢春. 电动车辆设计中的匹配理论研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(4): 704 - 707.

(编辑 杨 波)