

两挡纯电动汽车动力传动系统参数设计与仿真

龚贤武^{1,2}, 唐自强², 吴德军¹, 马建²

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 提出将一款固定速比传动的纯电动汽车改为两挡传动的方案, 分析了满足整车性能指标要求的动力传动系统部件主要参数的匹配方法. 为了验证参数匹配的合理性, 分别制定了动力性换挡规律和经济性换挡规律, 通过 Matlab/Simulink 建立的整车性能仿真平台, 对不同换挡规律下的整车动力性和续驶里程进行了仿真. 仿真结果表明, 动力系统参数匹配合理, 满足整车动力性和续驶里程要求; 其中经济性换挡规律下的 NEDC 工况续驶里程比动力性换挡规律下高 0.14%; 动力性换挡规律下百公里加速时间比经济性换挡规律下缩短了 6.02%.

关键词: 纯电动汽车; 参数匹配; 换挡规律; 经济性; 动力性

中图分类号: U469.72 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2015.03.009

0 引言

纯电动汽车动力传动系统部件参数的合理设计是提高纯电动汽车续驶里程的有效手段之一. 目前小型纯电动汽车动力传动系统中多采用固定速比的减速器, 这种传动方式结构简单、制造成本较低^[1], 但电机效率低. 多档减速器可以通过控制速比使电机工作于高效区域^[2]. 由于驱动电机的全负荷特性曲线与汽车驱动理想特性场的轮廓相近, 因此实际减速器的挡位数设置一般不应超过 3 个挡位, 这样不仅可以降低对驱动电机性能的要求, 而且避免了减速装置体积和质量过大.

目前, 关于两挡纯电动汽车动力传动系统参数匹配研究以及两挡 AMT 变速器不同换挡规律下的整车性能分析较少. 文献[1]对两挡电动汽车动力传动系统部件参数进行了匹配, 并针对两挡自动变速器设计了经济性换挡规律, 与固定速比下整车经济性的差异进行了对比分析. 文献[3]分析了动力性换挡规律对纯电动汽车动力性的影响. 文献[4]中对纯电动汽车 AMT 变速器的两种换挡规律下经济性差异进行了分析.

笔者提出了将一款固定速比传动的纯电动汽车改为两挡传动的方案, 分析了满足整车性能指

标要求的动力传动系统部件主要参数的匹配方法; 并且根据目前常见的两种驾驶需求分别制定了 AMT 变速器的动力性换挡规律及经济性换挡规律; 在 Matlab/Simulink 建立的整车性能仿真平台上, 验证了参数匹配的合理性, 同时对比分析了两种换挡规律下整车动力性以及 NEDC 工况下的整车能耗及续驶里程.

1 整车基本参数及性能指标

某单速比微型纯电动汽车基本参数及主要性能指标见表 1.

表 1 整车基本参数及性能指标

参数名称	参数值
整车装备质量 + 附加质量 ^[4] / kg	1 324
汽车风阻系数 C_d	0.335
汽车迎风面积 A/m^2	2.1
汽车最高车速 $u_{\text{amax}}/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	130
百公里加速时间 t/s	< 15
最大爬坡度 i_{max}	30%
爬坡测试速度 $u_i/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	20
60 km/h 匀速续驶里程 S/km	> 120
滚动阻力系数 f	0.01
车轮半径 R/m	0.282

收稿日期:2015-02-02; 修订日期:2015-03-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA111106); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G3322009, 2014G1321040).

作者简介: 龚贤武(1978-), 男, 福建邵武人, 长安大学副教授, 博士, 主要从事现代电动汽车及汽车电子技术方面的研究, E-mail: xwgong@chd.edu.cn

2 动力系统部件参数匹配

2.1 电机主要参数匹配

在电机主要参数匹配的过程中,需要匹配的参数主要有峰值功率、额定功率、峰值扭矩、额定转矩、额定转速和最高转速.

2.1.1 电机峰值功率以及峰值扭矩的选取

电机峰值功率需要依据整车性能指标如最高车速、低速最大爬坡度、百公里加速时间来匹配.在水平路面高速行驶时,驱动电机输出的最大功率为

$$P_{e1} \geq \frac{1}{\eta_T} (\frac{mgf}{3\ 600} u_{amax} + \frac{C_d A}{76\ 140} u_{amax}^3). \quad (1)$$

式中: P_{e1} 为最高车速下的电机需求功率; η_T 为传动效率,值为0.96; g 为重力加速度,值为9.8 m/s².由式(1),解得 P_{e1} 约为21.2 kW.

车辆以稳定车速爬坡时,驱动电机输出的最大功率为

$$P_{e2} \geq \frac{1}{\eta_T} (\frac{mgf \cos \alpha_{max}}{3\ 600} u_i + \frac{mgsin \alpha_{max}}{3\ 600} u_i + \frac{C_d A}{76\ 140} u_i^3). \quad (2)$$

$$\alpha_{max} = \tan^{-1}(i_{max}). \quad (3)$$

式中: P_{e2} 为稳定车速爬坡时的电机需求功率; α_{max} 为最大坡道角,值为16.7°.由式(2)解得 P_{e2} 约为38.3 kW.

百公里加速时间要求下电机峰值功率的确定:根据电机的外特性,车辆加速过程可分为恒转矩区域和恒功率区域,同时两挡变速器还存在着换挡过程,为了简化计算,直接使用二挡速比作为整个加速过程中的速比,所以车辆百公里加速时间与电机的峰值功率之间的关系可表示为

$$t = \int_0^{v_b} \frac{mdv}{\frac{P_{e3} \eta_T}{v_b} - (mgf + \frac{C_d A v^2}{21.15})} + \int_{v_b}^{v_f} \frac{mdv}{\frac{P_{e3} \eta_T}{v} - (mgf + \frac{C_d A v^2}{21.15})}. \quad (4)$$
$$v_b = 0.377 \frac{R n_{nom}}{i_2}. \quad (5)$$

式中: P_{e3} 为满足加速能力要求下的电机峰值功率; v_f 为百公里加速末时刻车速,值为100 km/h; n_{nom} 为电机的额定转速,值为3 000 r/min; i_2 为二挡总传动比; v_b 为二挡总传动比下电机额定转速对应的车速值,km/h.

10%的车轮滑移率下,车辆达到最高行驶车速时,可选传动系统二挡总传动比为

$$i_2 = 0.377 \frac{0.9 R n_{max}}{u_{amax}}. \quad (6)$$

式中: n_{max} 为电机最高转速,值为10 000 r/min.考察现有电机产品技术参数,选择电机最高转速为10 000 r/min.

由式(6)得二挡总速比 i_2 约为7.36;联立式(4)~(6),解得 P_{e3} 为52 kW.

电机峰值功率需要同时满足以上3种动力性能指标的要求,所以电机峰值功率 P_{max} 取52 kW.

电机的峰值扭矩 T_{max} 为

$$T_{max} = 9\ 550 \frac{P_{max}}{n_{nom}}. \quad (7)$$

由式(7)解得电机峰值扭矩为166 N·m.

2.1.2 电机额定功率以及额定转矩选取

电机额定功率需根据最高稳定车速行驶时的功率需求选取,因此额定功率 P_e 为

$$P_e = \frac{1}{\eta_T} (\frac{mgf}{3\ 600} u_{amax} + \frac{C_d A}{76\ 140} u_{amax}^3). \quad (8)$$

由式(8)解得额定功率 P_e 约为21.2 kW.

额定转矩 T_e 为

$$T_e = 9\ 550 \frac{P_e}{n_{nom}}. \quad (9)$$

由式(9)解得额定转矩 T_e 约为67.5 N·m.

依据以上分析,电机匹配的主要参数见表2.

表2 电机主要参数

Tab.2 The main parameters of motor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
峰值功率/kW	52	额定转矩/(N·m)	67.5
额定功率/kW	21.2	额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
峰值扭矩/(N·m)	166	最高转速/(r·min ⁻¹)	10 000

2.2 电池主要参数匹配

在蓄电池参数匹配过程中,主要需考虑单体电池的类型、额定电压、容量以及单体电池的组数.结合电池的资源以及发展应用趋势,选择单体额定电压为3.2 V的磷酸铁锂电池,其标称容量为45 Ah.

2.2.1 依据电机峰值功率匹配电池组数

根据整车性能指标要求,电池的输出功率需满足电机峰值功率的要求.国家标准要求电动汽车加速性能、爬坡性能的动力性能试验需在蓄电池处于完全充电的50%~60%状态下进行,所以电池单体的组数 N_1 为

$$N_1 = (\frac{P_{max}}{\eta_b} + P_a) \frac{4R_{ess}}{U_{ess}^2}. \quad (10)$$

式中: η_b 为电池的放电效率,值为0.88; P_a 为车辆上其他附件的功率,值为4.5 kW; U_{ess} 为SOC达到50%时单体电池电压,值为3.2 V; R_{ess} 为50% SOC时单体电池内阻,值为0.002 3 Ω .

由式(10)解得单体电池的组数为57组.

2.2.2 依据续驶里程要求匹配电池组数

根据纯电动汽车续驶里程要求:纯电动汽车60 km/h匀速行驶的续驶里程应达到120 km. 据此匹配电池的组数 N_2 为

$$N_2 = \frac{S}{U_b C_b v D_b} \cdot \frac{P}{\eta_1 \eta_2}. \quad (11)$$

式中: v 为纯电动汽车的行驶车速,值为60 km/h; P 为纯电动汽车60 km/h匀速行驶时的整车需求功率,值为5.73 kW; U_b 为单体电池的工作电压,值为3.2 V; C_b 为单体电池的容量,值为45 Ah; D_b 为电池放电深度,值为0.8; η_1 为电池化学能与车辆动能之间的转换效率,值为0.912; η_2 为车辆其他附属部件的能耗比例,值为0.95.

由式(11),解得单体电池的组数为115组. 为同时满足电机峰值功率需求以及纯电动汽车续驶里程要求,取单体电池的组数为115组. 根据以上分析,电池匹配的主要参数:电池类型为磷酸铁锂,额定电压3.2 V,标称容量45 A·h,电池组数为115.

2.3 减速器总传动比参数匹配

2.3.1 传动系统二挡总传动比选取

根据电机最高转速对应的最大输出转矩 T_m 产生的驱动力应大于最高行驶车速下的行驶阻力,可知二挡总传动比 i_2 下限为^[5]

$$i_2 \geq \frac{(mgf + \frac{C_d A u_{amax}^2}{21.15}) R}{\eta_T T_m}. \quad (12)$$

由式(12)解得 i_2 大于或等于0.96.

在10%的滑移率下,车辆应能够达到最高行驶车速设计要求,可知二挡总传动比 i_2 上限为

$$i_2 \leq 0.377 \frac{0.9 R n_{max}}{u_{amax}}. \quad (13)$$

由式(13)解得 i_2 小于或等于7.36.

根据能量效率最优的选择原则^[6],最终选择 i_2 为7.36,同时也验证了由式(6)匹配的二挡总传动比是符合要求的.

2.3.2 传动系统一挡总传动比选取

根据整车低速爬坡时车轮获得的驱动力不小于纯电动汽车所受到的行驶阻力,可知一挡总传动比 i_1 下限为

$$i_1 \geq \frac{(mgf \cos \alpha_{max} + mg \sin \alpha_{max} + \frac{C_d A u_i^2}{21.15}) R}{T_{max} \eta_T}. \quad (14)$$

由式(14)解得 i_1 大于或等于3.39.

根据一挡下最大驱动力不大于地面对驱动轮的最大附着力 F_{xmax} ,可知一挡总传动比 i_1 上限为

$$i_1 \leq \frac{F_{xmax} R}{T_{max} \eta_T}. \quad (15)$$

由式(14)解得 i_1 小于或等于14.21.

根据相邻挡位比值过大会造成换挡困难以及齿轮寿命降低,可知一挡总速比 i_1 上限为

$$i_1 \leq 1.8 i_2. \quad (16)$$

由式(16)解得 i_1 小于或等于13.248.

根据能量效率最优的选择原则^[6],选择 i_1 为13.23.

3 换挡规律

变速器换挡规律分为动力性换挡规律和经济性换挡规律. 本文中两种换挡规律均采用加速踏板开度和车速这两个参数作为换挡控制参数^[7].

3.1 经济性换挡规律制定

纯电动汽车经济性换挡规律的原则是使得电机工作点始终处于最高效率区域. 经济性换挡规律换挡规则如下^[7]:同一加速踏板开度下,取两挡效率曲线的交点作为换挡点;当电机效率曲线不相交时,取同一加速踏板开度下,一挡速比的最高行驶车速点作为换挡点;为了防止循环换挡,设置升档曲线与降档曲线之间间隔5 km/h. 建立经济性换挡规律换挡曲线如图1所示.

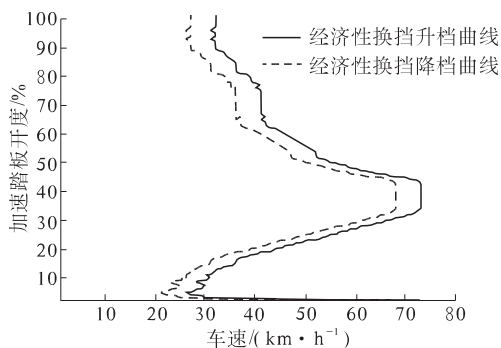


图1 经济性换挡曲线

Fig. 1 The curve of economic shift schedule

3.2 动力性换挡规律制定

动力性换挡规律的原则是使得车辆始终处于最佳加速性能状态. 动力性换挡规律规则如下^[7]:同一加速踏板开度下,取两挡驱动力曲线的交点处作为换挡点;为了防止循环换挡,设置升

档车速与降档车速之间间隔 5 km/h. 根据以上分析,建立动力性换挡规律换挡曲线如图 2 所示.

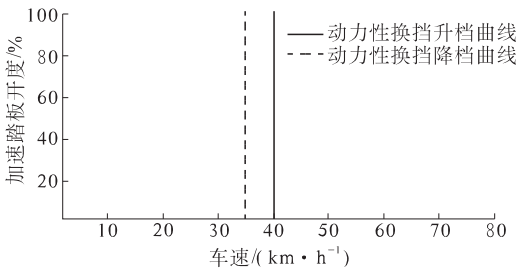


图 2 动力性换挡曲线
Fig. 2 The curve of dynamic shift schedule

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 下搭建了后向为主、前向为辅的整车动力学仿真平台^[8],如图 3 所示.

将经济性换挡与动力性换挡规律下的车速与 NEDC 工况进行对比,可以发现,两种换挡规律下的车速跟随情况良好.表 3 为不同换挡规律下的整车动力性及经济性仿真结果.由表 3 可见,两种换挡规律下均能满足整车性能设计要求,这表明动力传动系统部件参数匹配以及制定的换挡规律是合适的.

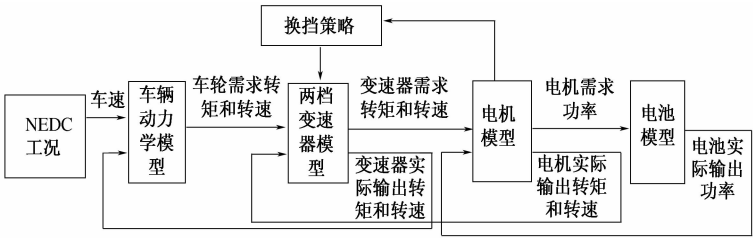


图 3 整车动力学仿真平台
Fig. 3 The vehicle performance simulation platform

表 3 仿真结果对比

项目	动力性	经济性
	换挡	换挡
百公里加速时间/s	13.75	14.63
最高车速/(km·h ⁻¹)	133	133
最大爬坡度	> 30%	> 30%
NEDC 工况能耗/kJ	4 923.58	4 916.93
NEDC 工况续驶里程/km	105.88	106.03
60 km/h 匀速续驶里程/km	128.62	128.62

在 NEDC 工况下,两种换挡规律下整车能耗情况如图 4 所示.经济性换挡规律下单循环工况能耗为 4 916.93 kJ,较动力性换挡规律下减少 0.14%.经济性换挡规律下 NEDC 工况续驶里程为 106.03 km,比动力性换挡规律下提高 0.14%.

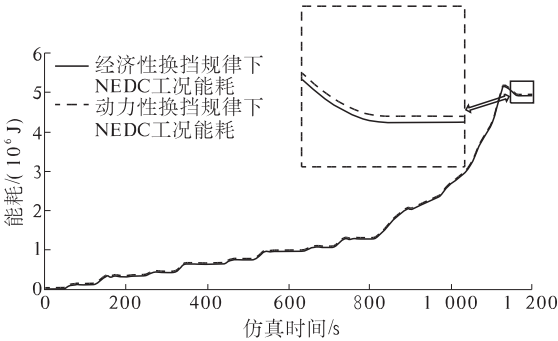


图 4 NEDC 工况下整车能耗
Fig. 4 The vehicle energy consumption under NEDC condition

图 5 为 NEDC 工况下两种换挡规律的换挡情况.可以看出,经济性规律下换挡次数多于动力性规律下的换挡次数,以使得电机工作点更多的处于高效率区域.

图 6 为两种换挡规律下百公里加速时间曲线.两种换挡规律下百公里加速时间都小于 15 s,其中动力性换挡规律下百公里加速时间为 13.75 s,比经济性换挡规律下缩短了 6.02%.

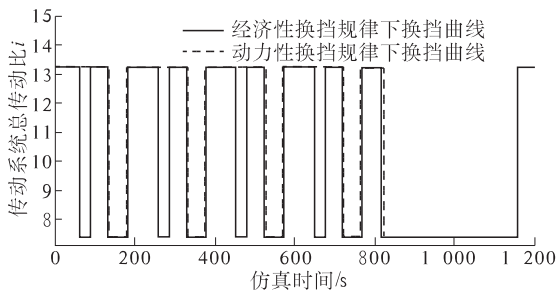


图 5 NEDC 工况下换挡情况
Fig. 5 The actual gear shift under NEDC condition

5 结论

(1)纯电动汽车选用两挡 AMT 变速器后,对整车动力传动系统部件的主要参数进行了匹配并制定了两种换挡规律,通过整车性能仿真结果验证了动力传动系统部件参数匹配以及换挡规律的有效性,这对两挡纯电动汽车动力传动系统参数设计及换挡规律的制定具有重要的理论意义.

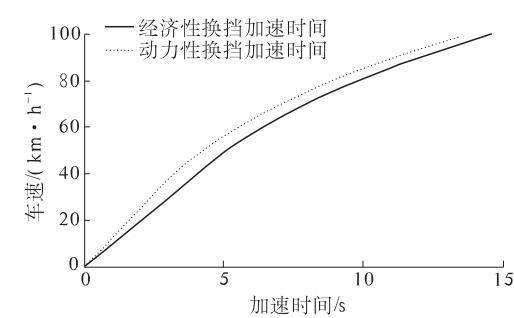


图 6 两种换挡规律下加速曲线

Fig. 6 The acceleration curve under two kinds of shift schedules

(2)NEDC 工况下,经济性换挡规律的换挡次数较动力性换挡次数多,以使得电机工作点更多地处于高效区;经济性换挡规律下纯电动汽车的续驶里程比动力性换挡规律下高 0.14%;动力性换挡规律下的百公里加速时间比经济性换挡规律缩短了 6.02%.

参考文献:

[1] 秦大同,周宝华,胡明辉.两挡电动汽车动力传动系统的参数设计[J].重庆大学学报,2011,34(1):1-6.

[2] 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.

[3] 杨易,江清华,周兵,等.纯电动汽车最佳动力性换挡规律研究[J].汽车技术,2011(3):1-4.

[4] 刘拂晓,赵韩,江昊.纯电动汽车 AMT 换挡规律及仿真研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2013,36(11):1281-1284.

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

[6] 黄康,罗时帅,王富雷.纯电动汽车动力系统传动比优化设计[J].中国机械工程,2011,25(5):625-629.

[7] 陈淑江,秦大同,胡明辉,等.兼顾动力性与经济性的纯电动汽车 AMT 综合换挡策略[J].中国机械工程,2013,24(19):2687-2692.

[8] 龚贤武,吴德军,高闯,等.混联型混合动力汽车建模及控制策略研究[J].郑州大学学报:工学版,2014,35(3):73-77.

Parameters Design and Simulation of Powertrain for Two-speed Pure Electric Vehicle

GONG Xian-wu^{1,2}, TANG Zi-qiang², WU De-jun¹, MA Jian²

(1. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: A pure electric vehicle with a fixed speed ratio was changed into two gear transmission scheme. The matching method of main parameters for powertrain components was analyzed based on specifications of vehicle performance. In order to prove that the parameter matching is reasonable, the dynamic shift schedule and the economy shift schedule were formulated. Through the vehicle performance simulation platform which was established under Matlab/Simulink, the vehicle dynamic performance and the driving range under the different shift schedule were simulated. The simulation results show that the parameter matching is reasonable, and the power performance and the driving range can meet the design requirements. The driving range of the NEDC condition under economy shift schedule is 0.14% higher than under the dynamic shift schedule. The acceleration time in 100km under the dynamic shift schedule decreased by 6.02% than under the economy shift schedule.

Key words: pure electric vehicle; parameter matching; shift schedule; economic performance; dynamic performance