

纯电动汽车动力匹配计算与仿真*

查鸿山, 宗志坚, 刘忠途, 伍庆龙
(中山大学工学院, 广东 广州 510006)

摘要: 针对电动汽车设计动力性能指标, 从车辆动力学出发建立了驱动电机功率计算模型, 给出了系统传动比、最高车速、加速时间等电动汽车动力性能参数计算一般公式。结合开发实例进行电动汽车动力电池匹配优化, 并在 Matlab/Simulink 下进行系统续驶里程仿真计算, 仿真结果表明, 系统动力特性满足整车的动力性能设计要求。

关键词: 纯电动汽车; 最高车速; 加速时间; 续驶里程; 仿真

中图分类号: U462.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2010)05-0047-05

Matching Design and Simulation of Power Train Parameters for Electrical Vehicle

ZHA Hongshan, ZONG Zhijian, LIU Zhongtu, WU Qinglong

(Engineering school of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Based on the requirement of dynamic performance, as combined with the design of ECUV developed by Sun Yat-sen University, the method and principle of parameters design for tract motor, reduction ratio and batteriees' capacity of electric vehicles were explored and discussed. A performance simulation is carried out by applying Matlab/Simulink, and the simulation results show design requirement is fulfilled.

Key words: battery car; maximum speed; acceleration time; driving range; simulation

出于对能源危机和环境保护的关注及占领未来世界汽车市场的考虑, 电动汽车的发展越来越受到人们的重视^[1]。实现电动汽车动力性能优化的关键在于适当设计其动力驱动系统, 即实现动力电池组、电机和电机控制器的优化匹配^[1-3]。本文以中山大学 ECUV 纯电动汽车为开发为例, 在动力参数匹配中首先确定驱动电机资源, 然后合理匹配传动系统参数和选择动力电池容量以实现整车综合性能优化设计的目标。

1 电动汽车动力性能指标及其分析

1.1 性能指标

评价电动汽车动力性能的主要指标有:

- 1) 最高车速 v_{\max} (km/h);
- 2) 加速时间 t_r (s);
- 3) 最大爬坡度 i_{\max} ;
- 4) 续驶里程 S (km)。

1.2 行驶阻力

和一般车辆行驶过程中受力一样, 电动汽车在行驶过程行驶阻力有滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、加速阻力 F_j 和坡度阻力 F_i ^[4-5], 在行驶过程中, 驱动力总是等于上述阻力之和。和普通汽车不一样的是, 电动汽车的驱动力来自驱动电机而非发动机, 电动汽车的驱动力 F_t 由驱动电机产生的转矩 T_m 经传动系统传递到驱动轮上。

* 收稿日期: 2010-02-26

基金项目: 粤港关键领域重点突破资助项目(2006B80406001, 2007A010301010); 广东省工业公关资助项目(2007A010300012); 广东省国际合作项目(2008A050200008); 广东省高新技术产业项目(2009A010200007)

作者简介: 查鸿山(1974年生), 男, 讲师, 博士生; E-mail: zhahsh@mail2.sysu.edu.cn

$$F_i = \sum F \quad (1)$$

电动汽车行驶动力方程式为

$$F_i = F_f + F_w + F_i + F_j \quad (2)$$

或

$$\frac{T_m i_g i_0 \eta_t}{r} = mgf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} v_a^2 + G \sin \alpha + \delta m \frac{dv}{dt} \quad (3)$$

式中, 变速器传动比 i_g , 主减速器传动比 i_0 , 传动系统效率 η_t , 汽车质量 m , 车轮滚动阻力系数 f , 空气阻力系数 C_D , 迎风面积 A , 道路坡度 α , 汽车旋转质量转换系数 δ , 车速 v , 汽车与空气相对速度 v_a (风速为零时 $v_a = v$)。

1.3 电机功率

在电动汽车行驶过程中, 不仅驱动力和行驶阻力互相平衡, 电机功率和行驶阻力功率也总是平衡的。电动汽车所受运动阻力所消耗的功率有滚动阻力功率 P_f 、空气阻力功率 P_w 、坡度阻力功率 P_i 及加速阻力功率 P_j 。假定风速为零, 将 (3) 式两边乘以行驶速度, 经单位换算整理可得电动汽车功率平衡方程式 (式中功率单位为 kW) 如下

$$P_m = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgfv}{3600} + \frac{Giv}{3600} + \frac{C_D A v^3}{76140} + \frac{\delta m v}{3600} \frac{dv}{dt} \right) \quad (4)$$

设计中通常从保证预期的最高车速来初步选择驱动功率。电动汽车在水平上匀速行驶时, 驱动力用于克服滚动阻力和空气阻力^[6], 驱动电机功率应大体等于但不小于以设计最高车速行驶时行驶阻力功率之和, 即

$$P_m = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgfv_{\max}}{3600} + \frac{C_D A}{76140} v_{\max}^3 \right) \quad (5)$$

电机的瞬时功率 P_m 应满足车辆爬坡性能要求, 为

$$P_m = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{mgfv}{3600} + \frac{Giv}{3600} + \frac{C_D A v^3}{76140} \right) \quad (6)$$

1.4 最高车速

最高车速是指在无风条件下, 在水平、良好的沥青或水泥路面上, 汽车所能达到的最大行驶速度。最高车速越高, 要求的驱动电机功率也越大, 电动汽车的后备功率也就越大, 所以电动汽车的最高车速实质上反映了汽车的加速能力和爬坡能力。在设计过程中, 电动汽车的最高车速计算公式为^[7]

$$\begin{cases} v_{\max} = 0.377r \cdot n_{\max} / i_{\min} \\ n_m \leq n_{\max} \\ F_i(n_m) \geq \sum F(v) \end{cases} \quad (7)$$

其中: 系统最小传动比 i_{\min} , 驱动电动机的工作转速 n_m (r/min), 驱动电动机以最大限流工作时车

辆获得的驱动力 F_i (N), 主驱动电动机的最高工作转速 n_{\max} (r/min)。满足上式的车速最大值即为车辆最高车速 v_{\max} 。

1.5 加速时间

电动汽车加速时间包括汽车的原地起步加速时间和超车加速时间。加速时间越短, 汽车的加速性就越好, 整车的动力性也就提高。

1) 原地起步加速时间: 指汽车从静止状态下, 由第一档起步, 并以最大的加速强度 (包括节气门全开和选择最恰当的换挡时机) 逐步换至高挡后, 达到某一预定的车速或距离所需要的时间。目前, 常用 0 ~ 100 km 所需的时间来评价。

2) 超车加速时间, 对提高汽车的平均行驶中由某一车速开始, 用最高挡或次高挡全力加速至某一高速所需要的时间, 用来表示汽车超车时的加速能力。目前常用 48 ~ 112 km/h 所需的时间来评价。

电动汽车加速时间计算式为

$$\begin{cases} t_f = \frac{1}{3.6} \int_{v_1}^{v_2} \frac{\delta m}{F_i - mgf - C_D A v^2 / 21.15} dv \\ = \frac{1}{3.6} \int_{v_0}^{v_n} \frac{\delta m}{F_i - mgf - C_D A v^2 / 21.15} dv \\ + \frac{1}{3.6} \int_{v_n}^{v_2} \frac{\delta m}{F_i - mgf - C_D A v^2 / 21.15} dv \\ v_n = 0.377 n_n r / i_0 \\ F_i = \begin{cases} T_{am} \eta_t i_0 / r & v \leq v_n \\ T v \eta_t i_0 / r & v_n \leq v \leq v_2 \end{cases} \\ n = v i_0 / (0.377 r) \end{cases} \quad (8)$$

式中: 加速行驶起始车速 v_1 , 电机额定转速对应车速 v_n , 加速行驶终止车速 v_2 , 单位均为 km/h。

1.6 最大爬坡度

电动汽车的最大爬坡度, 是指满载时在良好路面上用第一档克服的最大爬坡度。爬坡度用坡度的角度值正切值的百分数来表示。电动汽车最大爬坡度是指在满载, 在干燥硬实路面的条件下, 以最低档所能通过的最大爬坡度。车辆爬坡度计算^[8-9]:

$$i_{\max} = \tan \alpha_{\max} = \tan \left[\arcsin \frac{F_i - C_D A v_a^2}{mg \sqrt{1 + f^2}} - \arcsin f \right] \quad (9)$$

1.7 传动比

传动比对电动汽车的动力性能和耗电经济性有较大的影响。一般来说, 传动比越大, 加速性能和爬坡能力较强, 而耗电经济性变差。但如果过大, 则不能发挥驱动电机的全部功率而达到应有的车速。传动比越小, 最高车速较高, 耗电经济性较

好，但加速性和爬坡能力较差。

车辆传动比 i_t 为

$$i_t = i_g i_0 \quad (10)$$

i_0, i_g 分别为主减速器速比和变速器速比。电动汽车以最高车速行驶时，以最小传动比的档位行驶，在最大爬坡度时以最大传动比的档位行驶。电动汽车最小传动比可由最高车速求取^[10-12]，为

$$i_{tmin} = 0.377 \frac{n_{max} r}{v_{max}} \quad (11)$$

式中， n_{max} 为电机最高转速。

确定最大传动比时，要考虑三方面的问题：最大爬坡度、附着率和车辆最低稳定车速。当主减速器 i_0 已知时，确定最大传动比也就是确定变速器 1 档传动比 i_{g1} 。

$$i_{g1} \geq \frac{mg(f \cos \alpha_{max} + \sin \alpha_{max})r}{T_{tqmax} i_0 \eta_T} \quad (12)$$

一般电动汽车应具有爬上 30% 坡道的能力，即 $\alpha \geq 16.7^\circ$ 。

2 电动汽车设计实例

电动汽车在结构和动力系统放方面和传动汽车有很大的不同，为进一步降低电动汽车能耗，在确定方案时便明确了采用轻量化设计的铝合金底盘。以中山大学工学院 ECUV 纯电动汽车的研制为例，整车的动力性能指标设计要求：①最高车速 $v_{omax} \geq 120$ km/h；②最大爬坡度 $i \geq 30\%$ ；③续驶里程 $S \geq 150$ km；④100 km 加速时间 $t_f \leq 15$ s。下表是 ECUV 电动汽车整车参数：

表 1 ECUV 整车参数
Table 1 Parameters of ECUV

满载质量 m	1 150 kg
迎风面积 A	1.6 m ²
车轮半径 r	0.305 m
车轮滚动阻力系数 f	0.015
风阻系数 C_D	0.3
质量转换系数 δ	1.04
传动效率 η_i	0.92

2.1 电机选型

当最高车速为 120 km/h 时，根据式 (5)，可得 $P_m = 17.2$ kW。根据式 (6)，坡度较大时，驱动电机输出主要用于克服爬坡阻力做功 P_i 。电机的瞬时功率应满足爬坡性能的要求，根据式 (6) 可得在不同车速和爬坡度是电动汽车牵引电机需求

功率，如图 (1) 所示，车速为 40 km/h，爬坡度为 30% 时所需功率根据式 (6) 确定， $P_m = 43.04$ kW。选择专为电动汽车设计的 22 kW 永磁同步电机，其主要参数：额定电压 288 V，额定功率 22 kW，瞬时最大功率 49 kW，额定转速 3 000 r/min，最高转速 5 000 r/min，额定扭矩 70.8 Nm，最大扭矩 237 Nm。电机的额定功率满足最高车速要求，电机的瞬时最大功率，满足最大爬坡性能要求。

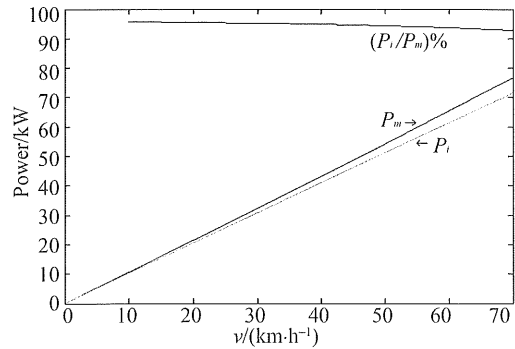


图 1 坡度为 30% 时驱动电机功率

Fig. 1 Traction power demanded at gradability 30% under varying vehicle speed

本款电动汽车的设计针对于城市交通，对于经常在城市和良好公路上行驶的汽车，最大爬坡度在 10° 左右即可，亦即 18% 的爬坡度。图 2 为坡度为 18% 时驱动电机驱动功率，车速为 60 km/h， $P_m = 33.01$ kW。该驱动电机功率完全可以满足城市交通车速和爬坡度性能要求。

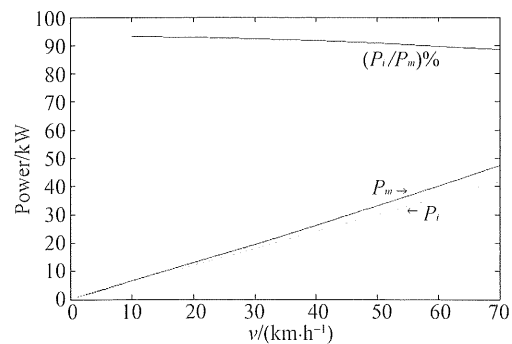


图 2 坡度为 18% 时对应不同车速的驱动电机功率

Fig. 2 Traction power demanded at gradability 18%

2.2 传动比

最小传动比由公式 (11) 求得 $i_{min} = 4.6$ ；由公式 (12) 求得变速器 1 档传动比 $i_{g1} = 1.8$ 。一般驱动电机最高转速比都大于等于 2，出于结构简化考虑及电机可控性，采用速比为 4.1 的主减速器，

无需单独配置变速器。

2.3 加速时间

由式 (8) 计算 100 km 加速时间 $t_f = 6.75 + 7.13 = 13.88$ s, 其中 6.75 s 和 7.13 s 分别是恒转矩区和恒功率区的加速时间。

3 动力电池匹配与续驶里程仿真计算

电池组容量的选择一方面影响车辆行驶的续驶里程, 另一方面也影响到车辆的整车质量和行驶动力性。在初步设计中, 采用匀速法进行续驶里程初步计算, 在后续设计中应用国标中规定的工况来仿真校核续驶里程^[13]。

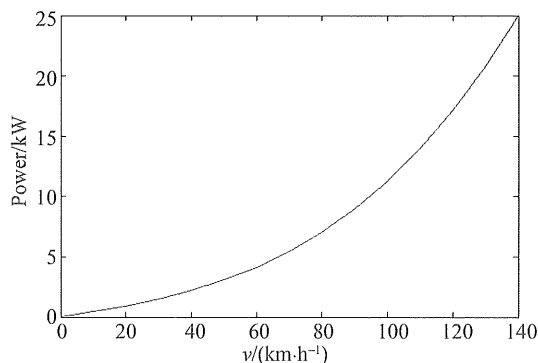


图 3 车辆匀速行驶在水平路面的电机驱动功率

Fig. 3 Traction power demanded on smooth road under varying vehicle speed

3.1 匀速工况下续驶里程仿真计算

车辆在水平路面以 v_a 匀速行驶功率需求为 $P_a = 2.08$ kW, 考虑电机效率和传动效率, 驱动电机输出功率应为

$$P_m = F_t v / (3.6 \eta_m) \quad (13)$$

式中, 电机控制器输入功率 P_m , 车轮驱动力 F_t , 电机与电机控制器总效率 η_m 。测试平台上测得对应该转速及负载的 $\eta_m = 0.80$ 。动力电池数 n_{cell} 依下式求得

$$n_{\text{cell}} = \frac{1\,000 P_m}{C_{\text{bat}} U_{\text{cell}} \eta_{\text{dis}}} \cdot \frac{S}{v} \quad (14)$$

式中: 动力电池数 n_{cell} , 续驶里程 S (km), 电池额定容量 C_{bat} (AH), 单体动力电池平台工作电压 U_{cell} , 动力电池允许放电深度 η_{dis} 。

动力电池采用 80 AH 的磷酸铁锂电池, 平台工作电压为 3.2 V, 允许放电深度为 0.9。图 4 为 Matlab/Simulink 环境下, 与不同车速和续驶里程相匹配的动力电池数仿真结果。

由图可知, 车速为 60 km/h, 续驶里程为 250 km 时所需动力电池数为 78。综合考虑电池的老化

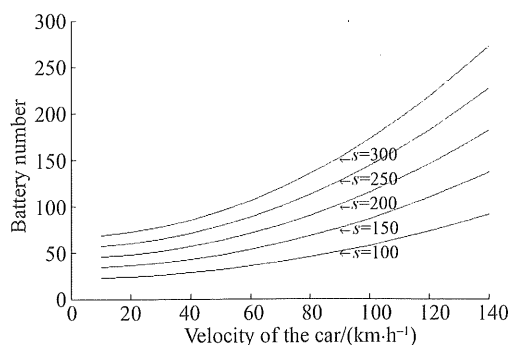


图 4 不同续驶里程所需动力电池数目

Fig. 4 Battery number varies with the driving range

及其不均衡性, 以及电池包结构设计和电机额定电压的匹配, 确定电池包单体动力电池总数为 88 块。

3.2 NEDC 工况下的续驶里程仿真计算

国标采用 NEDC (欧洲循环工况) 来进行续驶里程的测试^[11]。在 Matlab/Simulink 下建立仿真模型, 应用 NEDC 循环工况进行仿真计算, 在暂不考虑能量回馈时的仿真结果如图 5, 图中给出了瞬时车速、扭矩、功率、行驶里程与行驶时间的关系, 该工况循环下的续驶里程为 170 km。

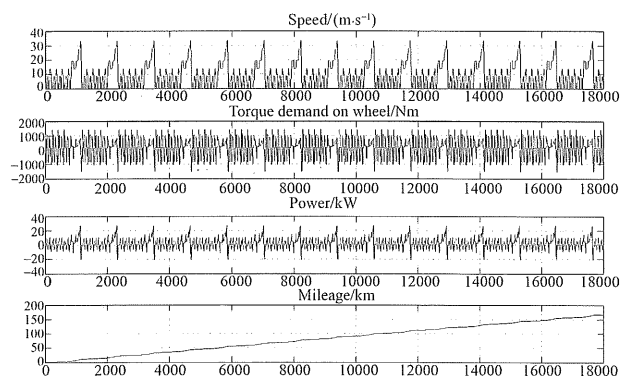


图 5 NEDC 工况仿真

Fig. 5 Simulation results on NEDC cycle

4 结 论

结合中山大学工学院 ECUV 电动汽车的研制, 根据整车动力性能要求, 通过理论仿真计算, 对机电传动系统进行匹配计算, 使电机输出、动力电池容量与整车动力特性合理匹配。计算结果表明, 以锂离子电池为能源的电动汽车的加速性爬坡能力、最大车速、续驶里程等动力性指标满足设计要求, 验证了仿真模型的正确性和有效性, 为电动汽车的设计、动力性能预测和分析提供了一种有效方法和手段。

参考文献:

- [1] 陈清泉,路甬祥,詹宜巨. 21 世纪的绿色交通工具[M]. 广州:暨南大学出版社. 2000.
- [2] CHAN C C. Engineering philosophy of electric vehicles [J]. *Electric Machines and Drives*, 1999(5):255 - 257.
- [3] WYCZALEK F A. Hybrid electric vehicles: year 2000 status[J]. *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, 2001, 16(3):15 - 25.
- [4] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,1990
- [5] MEHRDAD Ehsani, YIMIN Gao, SEBASTIEN E Gay, et al. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles fundamentals, theory and design[M]. Boca Raton FL: CRC, 2004.
- [6] 刘清虎,郭孔辉. 动力参数的选择对纯电动汽车性能的影响[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2003,30(3):62 - 64.
- [7] 杜荣荣. 姬芬竹电动汽车动力传动系统评价体系参数[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2008,27(2):272 - 275.
- [8] 任国军,杨久青. 电动汽车动力性能分析与计算[J]. 汽车科技,2006(3):18 - 20.
- [9] 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(6):704 - 706.
- [10] 陈清泉,孙逢春,祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002:178 - 180.
- [11] 李国良,初亮. 采用交流感应电机的电动汽车动力传动系统的合理匹配[J]. 吉林工业大学自然科学学报,2001,31(4):6 - 11.
- [12] 何仁,商高高. 汽车动力传动系参数的优化方法[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版,2000,21(6):61 - 64.
- [13] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 18358 - 2005 电动汽车、动力性能及试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
- [7] CHAN H S Y, CHUNG K W, XU Z. Stability and bifurcation of limit cycles by the perturbation-incremental method [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 206: 589 - 604.
- [8] CHAN H S Y, CHUNG K W, XU Z. Calculation of limit cycles, in Proceedings of the 3rd International Conference on Nonlinear Mechanics [C] // Shanghai: Shanghai University Press, 1998:597 - 601.
- [9] CHEN G, LI C, LIU C, et al. The cyclicity of period annuli of some classes of reversible quadratic systems, DISC [J]. *Cont in Dyn Sys*, 2006(16):157 - 177.
- [10] GASULL A, GUILLAMON A. Viladelprat[J]. J the Period Function for Second-order Quadratic ODEs is Monotone, *Qual Th Dyn Sys*, 2004(4):329 - 352.
- [11] BONORINO L, BRIETZK E, LUKASZCYK J P. Properties of the period function for some hamiltonian systems and homogeneous solutions of a semilinear elliptic equation[J]. *J Diff Eqns*, 2005(214):156 - 175.
- [12] HUANG Chengbiao, LIU J. The limit cycles and homoclinic orbits and their Bifurcation of the Bogdanov-Takens system [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*. 2008: 29(9): 1195 - 1202.
- [13] 黄赅彪, 邬华东. 平面二次系统极限环及其稳定与分岔的计算[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2008, 47(2):28 - 31.
- [14] 秦元勋, 索光俭, 杜星福. 关于平面二次系统的极限环(II)[J]. *中国科学:A 辑*, 1983(4):417 - 425.

(上接第46页)