

纯电动汽车动力系统参数匹配与优化研究

查云飞, 宋金龙, 张庆永, 刘国晴, 郭荣辉

(福建工程学院汽车电子与电驱动技术重点实验室, 福建福州 350118)

摘要: 基于某款纯电动汽车整车性能要求进行了关键部件的参数匹配, 通过搭建 CRUISE 模型在 NEDC 工况下的仿真验证了参数匹配的合理性。基于 ISIGHT 和 CRUISE 联合仿真, 以续航里程为优化目标, 以主减速比和动力电池的并联电池组数为优化变量, 采用 NSGA-II 算法进行了优化分析, 优化结果显示, 此款纯电动汽车续航里程得到了有效提升, 且动力性也满足预定要求。

关键词: 纯电动汽车; 动力系统; 参数匹配; CRUISE 仿真; 优化

中图分类号: TP271; U462

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2017)06-0511-05

Research on parameters matching and optimization of powertrain system for a pure electric vehicle

Zha Yunfei, Song Jinlong, Zhang Qingyong, Liu Guoqing, Guo Ronghui

(Key Laboratory of Automobile Electrics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Based on the performance requirements of a pure electric vehicle, the parameters matching of key components was carried out, and its rationality was verified by the simulation of the CRUISE model under NEDC condition. Based on the co-simulation of ISIGHT and CRUISE, NSGA-II algorithm was adopted for optimized analysis, with the endurance mileage as the optimization objective, and the final ratio and the parallel battery's number in power batteries as the optimization variables. Results show that the pure electric vehicle's endurance mileage has been effectively improved, and the power can meet the predefined requirements.

Keywords: electric vehicle; powertrain system; parameters matching; CRUISE simulation; optimization

纯电动汽车与传动内燃机相比, 具有节能环保的优点, 发展纯电动汽车是解决当前面临的能源短缺和环境污染问题的重要途径之一。电机、电池和电控是纯电动汽车的 3 大核心, 当前制约纯电动汽车发展的主要问题是电池电荷量不足、循环寿命不足以及安全问题等^[1]。在电池技术取得突破之前, 尽可能合理地选择动力系统部件, 通过参数匹配与优化的方式, 可以使纯电动汽车在同等条件下获得更好的动力性和经济性^[2]。

本文以某款纯电动汽车为例, 根据整车的性能要求, 对动力系统参数进行匹配计算, 并通过 CRUISE 仿真软件搭建整车模型, 使用 ISIGHT 与 CRUISE 联合计算, 对动力系统的参数进行优化。

1 动力系统参数匹配计算

选取参考车型的整车满载质量为 1 600 kg, 迎风面积 1.97 m², 车轮半径 0.301 m, 风阻系数 0.28, 滚动阻力系数 0.01, 主减速比 6.06。

收稿日期: 2017-10-10

基金项目: 福建省自然科学基金面上项目(2016J01204); 福建省教育厅 A 类项目(JA13221)

通讯作者: 查云飞(1981-), 男, 安徽怀宁人, 副教授, 博士, 研究方向: 分布式电动车的驱动技术, 车轮驱动力与整车稳定性。

电动汽车的动力性指标为:最高车速大于 120 km/h、最大爬坡度大于 30%、0~100km/h 的加速时间小于 15 s;经济性指标为:在 NEDC 循环工况下,动力电池初始电荷量 90%、放电深度 70%时的续驶里程大于 80 km。

1.1 驱动电机参数匹配

驱动电机是纯电动汽车的唯一动力源,对驱动电机的匹配直接决定了整车的动力性和经济性。因此对驱动电机进行匹配时,需要考虑驱动电机的类型、功率、转速和转矩等^[3]。

(1) 驱动电机额定功率

汽车在平坦路面上,以最高车速行驶,可获得驱动电机的额定功率。此时电机只需克服滚动阻力和空气阻力,即需满足:

$$P_e = \frac{v_{\max}}{3\ 600\eta_1} \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right) \quad (1)$$

式中, v_{\max} 为最高车速,取 120 km/h; η_1 为传动效率,取 0.87; m 为整车满载质量; C_D 为空气阻力系数; g 为重力加速度; f 为滚动阻力系数; A 为迎风面积。

将相关参数代入式(1),可得额定功率为 20 kW。

(2) 驱动电机的峰值功率

电动汽车以 40 km/h 匀速爬坡 30%,此时驱动电机只需克服滚动阻力、爬坡阻力和风阻。电机功率应满足:

$$P_1 = \frac{v}{3\ 600\eta_1} \left(mgf\cos\alpha + mgsin\alpha + \frac{C_D A v^2}{21.15} \right) \quad (2)$$

式中, α 为爬坡度; v 为车速。计算得此时需求的电机功率为 60 kW。

电动汽车在平坦路面上由 0~100 km/h,其加速时间的设计指标小于 15 s,电机功率应满足:

$$P_2 = \frac{v}{3\ 600\eta_1} \left(mgf + \frac{\delta m v}{0.36} \left[1 - \left(\frac{t - 0.1}{t} \right)^x \right] + \frac{C_D A v^2}{21.15} \right) \quad (3)$$

式中, δ 为转动惯量系数,取 1.04; t 为加速时间 15 s; x 为拟合系数,取 0.5。计算得此时需求的电机功率为 57 kW。

除克服行驶阻力外,还要克服其他的功率需求和功率损失,驱动电机的峰值功率,综合可得

60.53 kW。

(2) 驱动电机的转速

电机转速与电动汽车车速的关系应满足:

$$v = 0.377 \frac{rn}{i_0} \quad (4)$$

式中, r 为车轮半径; i_0 为主减速比; n 为电机转速。驱动电机的最高转速应满足:

$$n_{\max} \geq \frac{v_{\max} \cdot i_0}{0.377r} \quad (5)$$

计算得驱动电机最高转速应大于 6 406 r/min。

综上所述,选取额定功率 20 kW、峰值功率 70 kW、额定转速 3 500 r/min、峰值转速 9 000 r/min、额定扭矩 85 N·m、峰值扭矩 240 N·m 的交流伺服电机作为驱动电机。采用高性能稀土永磁材料,长期运行能保持优良的工作性能。

1.2 动力电池匹配

选取锂离子电池,电池组电压 320~420 V,容量 10 A·h。对电池容量进行匹配时,主要考虑续驶里程。在 NEDC 工况下,设计的续驶里程应达到 80 km,本文采用计算和仿真的方式,确定电池组的并联个数。

电动汽车以 60 km/h 的速度匀速行驶 80 km,此时需要的能量:

$$W_n = P \cdot t \quad (6)$$

$$P = \frac{v}{3\ 600\eta_1\eta_m\eta_b} \left(mgf + \frac{C_D A v^2}{21.15} \right) \quad (7)$$

$$t = \frac{S}{v} \quad (8)$$

式(6)中, P 为电动汽车以 60 km/h 的速度行驶的需求功率;式(7)中, η_m 为电机效率,取值 0.9; η_b 为电池组的放电效率,取值 0.9;式(8)中, t 为行驶时间; S 为行驶里程。

若电池组发出的能量为 W ,则需 $W > W_n$ 。电池组能量计算公式为:

$$W = \frac{UC\xi}{1\ 000} \quad (9)$$

式中, U 为电池组的电压,取 320 V; C 为电池组的总容量; ξ 为电池组的放电深度,取值 0.7。

将相关参数代入式(6)~(9),可计算出总的电池组容量为 35 A·h。在 CRUISE 仿真模型中设置并联电池组数为 3 时,续驶里程为 86.2 km;并联电池组数为 4 时,续驶里程为 117.3 km。当并联电池组数为 3 时,已经满足续驶里程要求,所

以电池组的并联个数确定为 3, 容量为 $30 \text{ A} \cdot \text{h}$ 。

2 整车模型的搭建

2.1 CRUISE 仿真模型建立

CRUISE 是一款对车辆动力性和经济性正向仿真分析的软件, 它将车辆的各个部件集成模块化, 方便模型的搭建。图 1 为基于 CRUISE 建立的整车模型, 车型的主要模块包括: 整车模型、轮胎模型、电机模型、电池模型、驾驶室模型和控制模型等。将各个模块通过拖拉的方式放在工作窗口, 按照机械和电气规则建立相应的机械连接和信号连接^[4]。

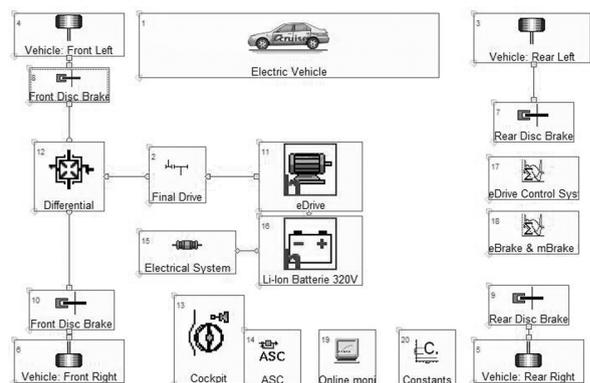


图 1 整车模型

Fig.1 Vehicle model

2.2 仿真结果分析

基于搭建的整车 CRUISE 模型, 选取 NEDC 循环工况的路谱图仿真车辆的行驶工况, 如图 2 所示。设置电池的放电深度为 70%, 初始电荷量为 90%。NEDC 循环工况下的续航里程 86.179 km , 满足经济性设计要求。

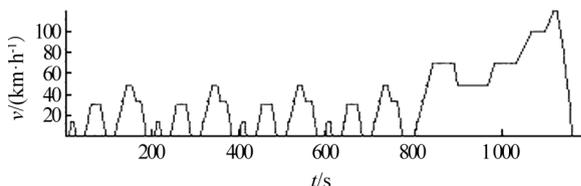


图 2 NEDC 的路谱图

Fig.2 Road spectrum of NEDC

根据仿真得到此款电动汽车的爬坡度结果如图 3, 加速曲线如图 4。由图 3 可知, 整车的最大爬坡度为 36.15%, 由图 4 可知, $0 \sim 100 \text{ km/h}$ 的加速时间为 8.33 s , 在图 3 中还可看出, 此款电动车

的最高车速达到了 188 km/h 。

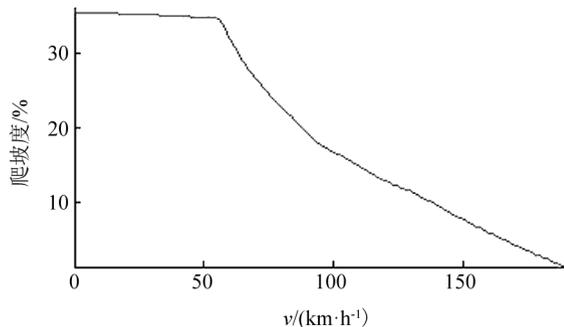


图 3 爬坡度仿真结果

Fig.3 Simulation results of climbing

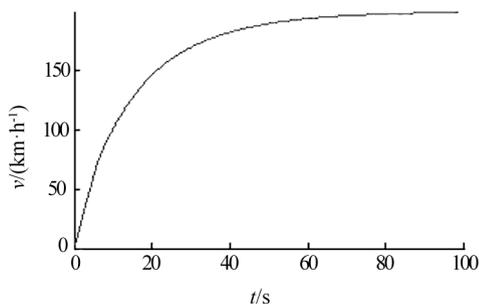


图 4 加速曲线

Fig.4 Acceleration curve

根据仿真结果可知, 在匹配的动力系统参数下, 整车的动力性和经济性均满足设计要求, 且在动力性方面具有优异的表现。

3 动力系统的优化

主减速比作为动力系统的重要组成部件, 其大小对整车的动力性和经济性有较大的影响。主减速比越大, 经济性较差, 加速和爬坡能力较强; 主减速比越小, 经济性较好, 最高车速更高, 但爬坡和加速性能变差^[5-6]。动力电池组数直接影响整车的行驶里程, 动力电池组数越大, 续航里程越远, 但对整车重量和空间会有一些影响。为使整车得到最优性能, 本文对其动力系统的关键参数进行优化。

3.1 ISIGHT 模型的建立

ISIGHT 作为一款软件机器人, 其内部集成了多种优化算法, 通过与其联合仿真可节省人力和时间。CRUISE 和 ISIGHT 的联合仿真主要通过 Simcode 模块调用 CRUISE 进行后台运算, 并通过

Simcode 解析模型参数。如图 5 为建立的 ISIGHT 模型,模型中建立优化任务夹 Optimization1,对参数进行优化。通过 Simcode 模块与 Cruise 进行信息交换。

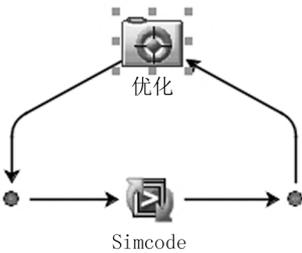


图 5 Isight 模型
Fig.5 Isight model

3.2 优化设置

选取 NSGA-II 作为优化算法,初始种群 12,迭代次数为 240。

选取的经济性优化目标为在 NEDC 循环工况下的续驶里程,NEDC 路谱图如图 2,可看做加减速和匀速两个过程,因此优化目标就是在 NEDC 工况下,加减速和匀速时的能量消耗最低,目标函数描述如下式:

$$\min f(x) = \sum W_1 + \sum W_2 \quad (10)$$

式中, $f(x)$ 为优化目标; W_1 为匀速时的能量消耗; W_2 为加减速时的能量消耗。

$$W_{1,2} = \frac{P_{j,a}}{3600\eta_t} t \quad (11)$$

式中, P_j 为电机在匀速时的输出功率; P_a 为电机在加减速时的输出功率。

$$P_j = \frac{v}{3600\eta_t} \left(mgf + \frac{C_D A v^2}{21.15} \right) \quad (12)$$

$$P_a = \int_{v_1}^{v_2} \frac{\left(mgf + \frac{C_D A v^2}{21.15} + \delta m a \right)}{3600\eta_t} v dv \quad (13)$$

式中, a 为加速度, v_1 和 v_2 分别为加减速度前后的速度。

$$E = n \cdot E_0 \quad (14)$$

式中, E 为动力电池的总能量; E_0 为单个电池的能量; n 为并联电池组数。

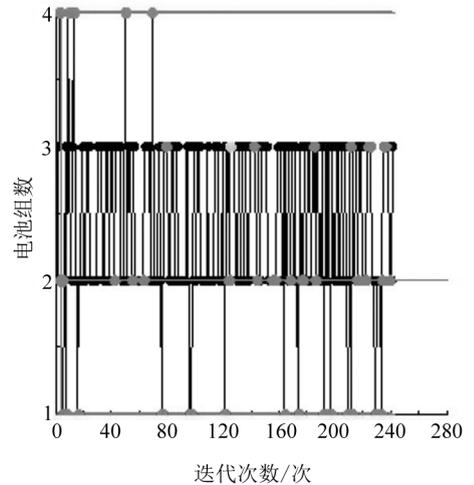
电池组总能量的 70% 即为整个续驶里程的能量消耗。

优化变量为动力电池并联电池组数和主减速器的主减速比,动力电池的取值范围为 $[2, 5]$,主减速比的取值范围为 $[5.3, 7.6]$ 。

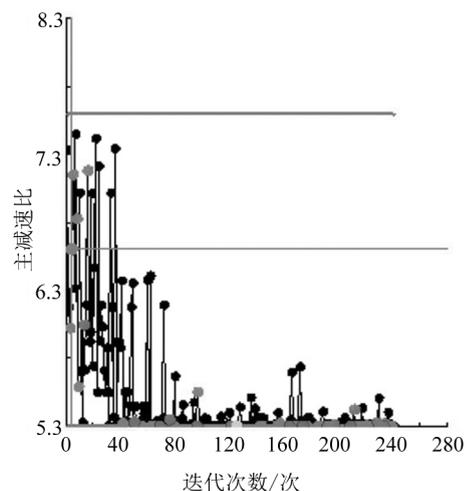
本文选取的约束条件为最高车速大于 120 km/h、最大爬坡度大于 30%、0~100 km/h 的加速时间小于 15 s。

3.3 优化结果分析

图 6 为优化变量、约束和优化目标的寻优历程。



a. 并联电池组数



b. 主减速比

图 6 寻优历程

Fig.6 Optimization process

并联电池组的优化结果为3,主减速比的优化结果为5.308。优化前后目标函数和约束的对比如表1所示。

表1 优化前后对比

Tab.1 Comparison of optimization results

项目	优化前	优化后
续驶里程/km	86.179	88.912
最大爬坡度/%	36.15	31.18
最大速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	188	204
0~100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 加速时间/s	8.33	10.52

由表1可知,经济性指标即续驶里程增加了3.2%,最大爬坡度降低了13.4%,0~100 km/h的加速时间增加了26.29%,最高车速增加了8.5%。这主要是因为主减速比降低造成的,主减速比越

小,最高车速越高,燃料经济性较好,但加速性和爬坡能力较差。虽然最大爬坡度和加速性能有所降低,但均在设计指标要求的范围内。可见优化后的整车性能在满足设计要求前提下得到提升。

4 结论

根据某款纯电动汽车的整车参数和经济性与动力学指标要求对关键的电机、电池进行了参数匹配,并通过搭建整车 CRUISE 模型在 NEDC 工况下进行了动力性和经济性仿真,验证了参数匹配的合理性。采用 ISIGHT 和 CRUISE 联合仿真,对此款纯电动汽车的主减速比和并联电池组数进行了优化,在保证整车加速时间和爬坡性能的情况下,车辆的续驶里程和最高车速均得到了有效提升,续驶里程的提升对纯电动车来讲具有较大的意义。

参考文献:

- [1] 董相军.基于 Cruise 的混合动力电动客车仿真研究[D].西安:长安大学,2014.
- [2] 郭孔辉,姜辉,张建伟.电动汽车传动系统的匹配及优化[J].科学技术与工程,2010,10(16):3892-3896.
- [3] 崔胜民.汽车理论[M].北京:北京大学出版社,2016.
- [4] 姜海斌,黄宏成. CRUISE 纯电动车动力性能仿真及优化[J].机械与电子,2010(4):61-65.
- [5] 李彬,高发华,罗明军,等.纯电动汽车动力系统参数匹配及试验研究[J].农业装备与车辆工程,2017,55(7):68-71.
- [6] 刘贵如,王陆林,张世兵,等.电动汽车电子机械制动系统的研究与设计[J].安徽工程大学学报,2013,28(1):23-26.

(责任编辑:陈雯)