

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.03.023

增程式电动车参数匹配与分析*

蒋建华, 范 港, 张 翀

(浙江大学 动力机械及车辆工程研究所, 浙江 杭州 310007)

摘要: 针对增程式电动车研发中动力系统的参数匹配问题, 以整车动力性和续航里程为设计目标, 从电驱动系统、动力电池系统、内燃式增程器系统等方面出发, 设计了增程式电动车动力系统参数, 并以软件 AVL CRUISE 为仿真平台, 采用增程器恒功率控制策略搭建了整车模型, 验证了所设计的增程式电动车的整车动力性和续航里程。研究表明, 车辆的最高车速、加速性能和爬坡性能满足车辆动力性能要求; 车辆在 10 km/h 和 15 km/h 匀速工况下纯电动续航里程和增程模式的续航里程也满足车辆续航里程要求。

关键词: 增程式电动车; 动力系统; 参数匹配; 仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)03-0368-05

Match and analysis of range-extended electric vehicle's parameters

JIANG Jian-hua, FAN Gang, ZHANG Chong

(Power Machinery & Vehicle Engineering Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Aiming at the problem of powertrain parameter matching in the research and production of the range-extended electric vehicle (REEV), the powertrain parameter of REEV was designed based on the targets of the vehicle dynamic performance and the driving range. Especially, the motor system, the battery system and the engine-generator system were studied. And the model with a constant-power management strategy was made on the AVL CRUISE simulation platform to verify the vehicle dynamic performance and the driving range. The simulation results of the maximum velocity, the acceleration performance and the climbing performance indicate that the powertrain parameter matching meet the goal of vehicle dynamic performance. In addition, the simulation results of the of pure electric and extended-range driving range at the speed of 10 km/h and 15 km/h indicate that the powertrain parameter get the goal of the driving range.

Key words: range-extended electric vehicle; powertrain system; parameters match; simulation

0 引 言

目前纯电动车受到动力电池比能量小, 价格高等因素的影响, 并且充电设施复杂充电时间过长, 就存在续航里程短不能满足远距离行驶的问题。为延长 EV 的续航里程, 将燃油发动机和电机组成的发电机作为增程器, 与动力蓄电池一起构成动力源, 是一种可供选择的方案。增程式电动车是一种以蓄电池为主动力的

电动汽车, 只是在车上装了另一个较小功率的车载发电机(增程器)并配置合适大小的油箱, 以增加续航里程^[1]。增程式电动车跟串联式电动车的结构相似, 发动机仅有的功能是发电。在串联式混合动力车中, 动力电池实际上起到平衡发动机输出功率和电动机输入功率的作用, 使发动机一直工作在最佳稳定区, 致使电池的电能主要来自发动机而且发动机基本在车辆运行时都在工作。但是增程式电动车的设计目标是尽量使用电网给蓄电池充电的能量, 当蓄电池的 SOC 低于限

收稿日期: 2015-12-04

基金项目: 浙江省重点科技创新团队资助项目(2011R50008-4)

作者简介: 蒋建华(1991-), 男, 浙江金华人, 硕士研究生, 主要从事增程式电动车方面研究工作. E-mail: 395039412@qq.com

定限值后,发动机启动给蓄电池充电的同时又给车辆供给动力,所以发动机的启动频率很低。

增程式电动车有两种形式模式,一种是纯电动模式,另一种是增程模式。在纯电动模式下,动力系统设定只有动力电池供电,消耗的电能都来自电网,这种模式下能够在零油耗和零排放的情况下满足日常的行驶续航里程要求。在当蓄电池电量低于限值后,增程器开始工作,产生的电能可用于驱动汽车行驶和给动力电池充电,从而增加增程式电动车的续航里程。跟传统的纯电动车相比,增程式电动车在不明显增加车辆尺寸的基础上,尽量增加车辆的续航里程。

动力系统是增程式电动车研究的重点内容之一。目前已发表了许多有关混合动力汽车动力系统参数匹配的研究结果。同济大学的余弢等人^[2]提出一种功率平衡性的增程式公交客车动力系统设计方案。长安大学以一款增程式商用车为研究对象,对发动机与发电机的匹配对整车经济性的影响情况做了详细的研究^[3]。辽宁工业大学的申彩英^[4]在基于驾驶员的驾驶习惯分析了增程式电动车的性能,并对动力系统参数进行匹配。文献^[5]在对 ADVISOR 仿真软件进行二次开发后,建立了后轮驱动式增程式电动校车仿真模型,并对整车动力系统验证进行了验证。文献^[6-7]以油耗和加速性能为目标,设计了多目标遗传算法对增程式电动汽车动力系统参数匹配进行了优化研究。

本研究以整体动力性和续航里程为设计目标,从电池系统、动力电池系统、内燃式增程器系统等方面出发,设计增程式电动车动力系统参数。

1 REEV 系统构成与工作模式

增程式电动车是在纯电动的基础上增加一套由“发电机+发动机”组成的车载发电机组,可随时可为车辆补充电能,其简化结果如图 1 所示。

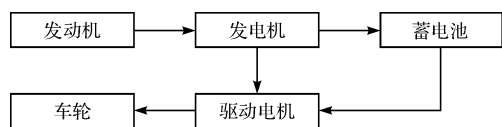


图 1 增程式电动车动力系统框图

动力电池作为增程式电动车的主要的动力源与驱动电机直接相连,为驱动电机提供能量。只有当蓄电池的电量低于限值后,启动发动机,由发动机

与发电机组成的增程器给驱动电机提供能量,同时也可以给动力电池充电,以增加续航里程达到长途行驶的目的。

增程式电动车有两种工作模式:纯电动模式和增程模式。在纯电动模式下,动力电池提供增程式电动车全部能量,即增程器不工作的状态。而在蓄电池电量低于某个限定值时,车辆进入增程模式启动发动机和发电机给整车提供电能带动驱动电机工作。

增程式电动车的动力系统主要由动力电池系统,增程器和电力驱动系统组成,有燃油发动机发电及电网充电两种方式提供动力。

所研究的增程式电动车是某款增程式电动自行车,根据一般日常应用需求,整车的参数及性能如表 1、表 2 所示:

表 1 整车基本参数

参数	数值
整车整备质量 m_1/kg	40
总质量 m_2/kg	150
轮胎滚动半径 r/mm	200
滚动阻力系数 f	0.03
迎风面积 A/m^2	1
风阻系数 C_D	0.25

表 2 动力性能指标

参数	数值
最高车速 $V_1/\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$	20
(0~15)km/h 加速时间 t_1/s	4
纯电动行驶里程 d_1/km	≥ 18
15 km/h 最大续航里程 d_2/km	≥ 50
最大爬坡度 i	$\geq 9\%$

2 动力系统参数匹配

2.1 电力驱动系统

增程式电动车行驶时驱动电机提供动力源,所以在整车动力系统参数匹配与设计驱动电机的参数设计与匹配就十分重要。驱动电机的参数包括:电机额定功率 P_m ,电机的峰值功率 $P_{m\max}$,电机的峰值转速 n_m ,电机最大转速 $T_{m\max}$ 。

2.1.1 电机额定功率 P_m 及峰值功率 $P_{m\max}$

考虑驱动电机功率时需要同时考虑驱动电机的额定功率和峰值功率。驱动电机的峰值功率 $P_{m\max}$ 一般

是根据车辆的加速及爬坡性能确定,驱动电机的额定功率 P_m 一般根据车辆的最高车速确定的。

满足车辆满载最高速度的电机峰值功率计算公式为:

$$P_{m\max 0} = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{m_2 g f}{3.6} V_1 + \frac{C_D A}{76.14} V_1^3 \right) \quad (1)$$

式中: η_t —效率系数,取 0.95;是车辆部分负载时的质量,取 100 kg; g —重力加速度,取 9.8 m/s²; f —路面的滚动阻力系数,取 0.03; V_1 —车辆的最大速度,取 20 km/h; A —迎风面积,取 1 m²。

满足车辆部分负载最大爬坡度的电机最大功率计算公式是:

$$P_{m\max 1} = \frac{1}{\eta_t} \left(\frac{m_3 g f \cos \alpha}{3.6} V_1 + \frac{m_3 g \sin \alpha}{3.6} V_1 + \frac{C_D A V_1^3}{76.14} \right) \quad (2)$$

式中: α 是最大爬坡度,这里取 9%; m_3 —部分负载,取 110 kg。

满足车辆部分负载时最大加速性能的电机最大功率计算公式是:

$$P_{m\max 2} = \frac{1}{\eta_t} \left[\frac{2m_3 g f V_1}{3} + \frac{1}{5} \rho_a C_D A V_1^3 + \frac{\delta m_3}{2t_a} (V_1^2 + V_0^2) \right] \quad (3)$$

式中: δ —质量换算系数,取 1.25; ρ_a —空气密度,取 1.205 kg/m³; V_0 —加速初始速度,取 0 m/s。

驱动电机的峰值功率放要同时满足最大爬坡、最大功率和最大加速度性能的要求。则驱动电机的峰值功率^[8]:

$$P_{m\max} = \max \{ P_{m\max 0}, P_{m\max 1}, P_{m\max 2} \} \quad (4)$$

则根据式(4)驱动电机的峰值功率 $P_{m\max}$ 为 875 W。

驱动电机的额定功率则可以根据式(5)确定:

$$P_m = \frac{P_{m\max}}{\lambda} \quad (5)$$

式中: λ —驱动电机的负载系数,一般为 2~3,则得 P_m 为 350 W。

2.1.2 电机峰值转速 n_{\max} 和峰值扭矩 T_{\max}

由于本研究中的增程式电动车的选用的驱动电机为轮毂电机,则电机峰值转速是根据车辆的最高行驶速度确定^[9]。其中的关系式为:

$$n_{\max} \geq \frac{V_1}{2\pi r} \quad (6)$$

最后确定驱动电机的峰值扭矩 T_{\max} ,可以式(7)计算:

$$T_{m\max} = \frac{9550 P_{m\max}}{n_{\max} / \beta} \quad (7)$$

式中: β —速比,取 2.5;计算结果为 $n_{m\max}$ 为 500 r/min; $T_{m\max}$ 为 25 N·m。

2.2 动力电池匹配设计

动力电池给车辆提供主能源,要保证车辆的动力性能,纯电动续航里程和最大续航里程。本研究中增程式电动车的动力电池类型为铅酸蓄电池。最大放电功率需满足下面关系式:

$$P_{\text{bat_dis_max}} > \frac{P_{\max}}{\eta_{mc}} + P_A \quad (8)$$

式中: P_{\max} —驱动电机的最大功率; η_{mc} —电机效率系数,取 0.98; P_A —车辆附件的功率,取 20 W。根据式(8)得 $P_{\text{bat_dis_max}}$ 大于 950 W。在本研究中增程式电动车蓄电池 $SOC_{\min} = 20\%$, $SOC_{\max} = 80\%$ 。

动力电池组还需要满足增程式电动车性能指标中的纯电动续航里程 d_1 , C_p 为功率要求蓄电池容量, C_E 为能量要求蓄电池容量。则应该满足如下关系式:

$$C_E \geq \frac{m_2 g f + \frac{C_D A V^2}{21.15}}{3.6 \times DOD \eta_t \eta_{mc} \eta_{\text{discharge}} (1 - \eta_a)} \times d_2 \quad (9)$$

$$C_p \geq \frac{1000}{k U_m} \left(\frac{P_{\max}}{\eta_{mc}} + P_A \right) \quad (10)$$

式中: C_E —能量要求蓄电池容量; $\eta_{\text{discharge}}$ —蓄电池充电效率,取 0.98; η_a —辅助电力设备消耗电能比例,取 0.95; k —最大放电率,单位是 1/h。

蓄电池容量为:

$$C = \min_{k^* = \min(k)} \{ \max [C_p(k), C_E(k)] \} \quad (11)$$

根据式(9~11)选取蓄电池容量为 5 A·h。

2.3 增程器参数匹配设计

由于本文中的增程式电动车尺寸原因,最终结构紧凑的 2 冲程发动机。增程式电动车增程器采用恒功率控制模式,则增程器要保证能够单独提供车辆以 20 km/h 速度匀速行驶电机所需功率和蓄电池充电功率。

$$P_{RE} = \frac{1}{3600 \eta_t \eta_{mc}} (m_2 g V_1 f + \frac{C_D A V_1^3}{21.15}) + \frac{P_{\text{charge}}}{\eta_{\text{charge}}} \quad (12)$$

式中: P_{charge} —给动力电池充电功率,取 100 W; P_{RE} —增强器的额定功率,380 W,则增程器的额定功率 P_{RE} 为 380 W。

结合整车性能中的续航里程要求,油箱的容积大小 V 如下计算:

$$V = \frac{P S b_e}{1000 V_2 \rho} \quad (13)$$

式中: P —内燃机的输出功率,取 200 W; S —增程模式行驶里程,取 30 km; b_e —最优燃油消耗率,取 400 g/(kw·h); V_2 —巡航车速,取 15 km/h; ρ —汽油密度,取 0.75 g/ml;根据式(13)得容积为 1.2 L。

3 增程式电动车的仿真分析

本研究中的增程式电动车的模型基于 AVL CRUISE 仿真软件^[10-11],依次选择整车模块、驾驶员模块、发动机模块、发电机模块、电池模块、刹车模块等模块,依次输入确定整车动力系统参数。软件 AVL Cruise 仿真任务有:Constant Drive; Climbing Performance; Full Load Acceleration; Maximum Traction Force; Brake/Coast/Thrust; Cycle Run; Cruising。本研究中的增程式电动车为两轮模型,是在 Cruise 里面的模型如图 2 所示。

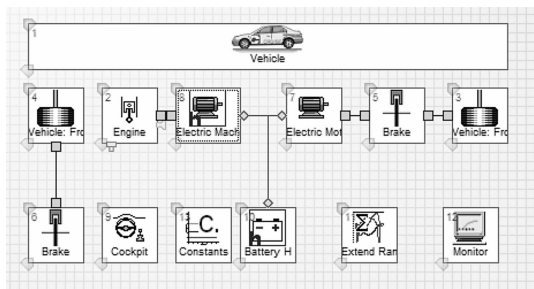


图 2 增程式电动车 Cruise 模型

3.1 整车动力性能仿真分析

整车动力性仿真分析为将得到的增程式电动车动力系统的关键参数输入软件 Cruise 中,通过仿真验证。基于 Cruise 建立的模型得到的加速性能仿真结果如图 3 所示^[12]。

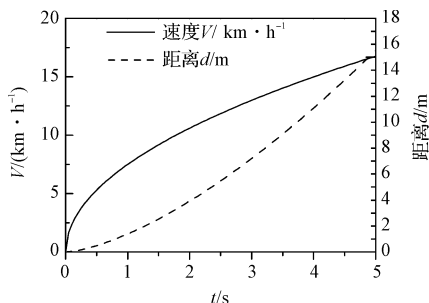


图 3 加速时速度、距离与时间关系

笔者通过软件 AVL Cruise 仿真分析整车动力系统参数匹配情况。设计的增程式电动车动力性能仿真结果如表 3 所示,对比表 2 可见,动力系统的参数能够满足整车动力性能设计要求。

表 3 动力性能仿真结果

参数	数值
最高车速/km·h ⁻¹	25
(0~15 km/h)加速时间/s	4
最大爬坡度/%	12

3.2 整车续航里程性能分析

本研究中增程器的控制策略为恒功率控制策略,增程器启动后,发动机在预设的工作点按恒定功率输出,输出功率不随工况的变化而变化^[13]。当电池组的荷电状态高于设定值时,增程器关闭并使用动力电池组为车辆提供能量,从而使电池组的 SOC 维持在一个合理的区间^[14]。

在本研究中增程式电动车的控制方式为当蓄电池 SOC 值在 20%~80% 之间时,增程器保持上一工作状态;当蓄电池的 SOC 值低于 20%,发动机启动,车辆进入增程模式;当蓄电池 SOC 值大于 80% 后,发动机关闭,车辆进入纯电动模式。

增程式电动车的续航里与其行驶的工况和行驶模式有关。本研究中对整车仿真采用了 10 km/h 和 15 km/h 的匀速车速行驶。

车辆以 10 km/h 行驶中蓄电池 SOC,发动机功率及行驶路程的变化如图 3 所示。车辆以 15 km/h 行驶中蓄电池 SOC,发动机功率及行驶路程的变化如图 4 所示。

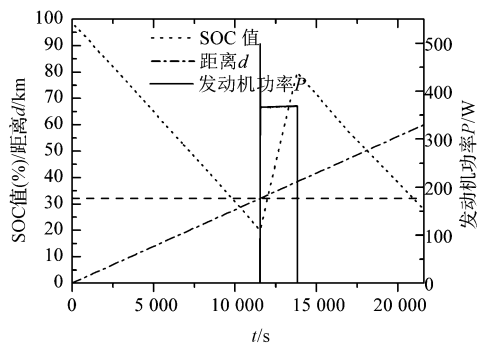


图 4 SOC 值、发动机功率、行程与时间的关系(10 km/h)

如图 4 所示增程式电动车在 10 km/h 匀速行驶,从图 4 中可以得到车辆纯电动模式下的续航里程超过 30 km,满足预期的纯电动续航里程要求。并且可以从图 4 中可见车辆的总续航里程明显大于 60 km,满足预期总续航里程要求。

如图 5 所示增程式电动车在 15 km/h 匀速行驶下,在 SOC 值降到 20% 之前是纯电动模式,从图 5 中可以得出纯电动续航里程超过 30 km,满足预期的设计目标。并且 15 km/h 的总续航里程超过 60 km,也

能满足续航里程的与其设计目标。

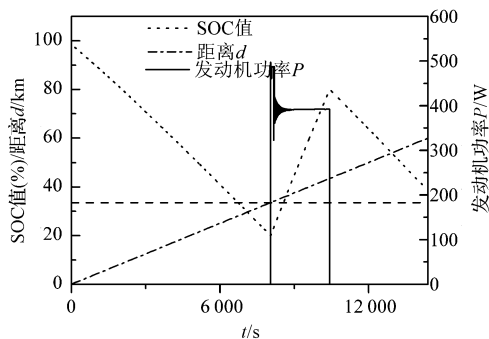


图5 SOC值、发动机功率、行程与时间的关系(15 km/h)

4 结束语

本研究首先根据整车动力性能指标和续航里程目标理论计算得到增程式电动车电力驱动系统、动力电池系统、内燃机增程系统主要参数。然后在软件 AVL Cruise 建立增程式电动车模型,通过仿真得到整车动力性能指标和续航里程能力,验证在理论计算得到的动力系统参数的合理性。

本研究直接通过软件 AVL Cruise 建立逆向仿真模型,能够直接得到整车动力性能参数和经济性能参数,大大能够减少实验的工作量,降低研发成本。

但是本研究中增程式电动车的控制方法为恒功率控制策略,将发动机的工作点一直控制在最佳经济运行工况点。其中没有考虑蓄电池充电功率,影响了蓄电池的使用寿命。

参考文献 (References):

[1] TATE E D, HARPSTER M O, SAVAGIAN P J. The electrification of the automobile: from conventional hybrid, to plug-in hybrids, to extended-range electric vehicles [J]. *SAE international journal of passenger cars-electronic and electrical systems*, 2008(1):156-166.

- [2] 余 毅,王 哲,尹兆雷,等. 增程式公交客车动力系统设计及仿真研究[J]. *汽车工程学报*, 2015(1):57-65.
- [3] 解少博,刘玺斌,李司光,等. 基于增程式电动商用车的增程器匹配和能耗分析[J]. *郑州大学学报:工学版*, 2015, 36(4):82-86.
- [4] 申彩英,王 婷,胥 帆. 基于驾驶员驾驶习惯的增程式电动汽车参数匹配研究[J]. *现代车用动力*, 2015(4):33-37.
- [5] 闻 健,陈 勇. 增程式电动校车动力系统参数匹配与仿真研究[J]. *计算机仿真*, 2015(10):172-176.
- [6] 黄 欣,陈凌珊,程 伟,等. 基于多目标遗传算法的增程式电动汽车动力系统参数匹配优化研究[J]. *计算机测量与控制*, 2015(10):3539-3542.
- [7] 武从猛,王公宝. 遗传-蚁群算法在国标分配问题中的应用研究[J]. *兵工自动化*, 2014, 33(4):12-15. 25.
- [8] 胡明寅. 增程式电动车动力系统设计及能效优化研究[D]. 北京:清华大学汽车工程学, 2011.
- [9] 谢 星,周 苏,王廷宏,等. 基于 Cruise/Simulink 的车用燃料电池/蓄电池混合动力的能量管理策略仿真[J]. *汽车工程*, 2010(5):373-378.
- [10] 邓湘滨. CF7454 转阀式动力转向器力特性曲线的优化设计[J]. *机电工程技术*, 2014, 43(2):93-95.
- [11] 解少博,刘玺斌,王 佳,等. 增程式电动环卫车动力系统匹配与仿真[J]. *公路交通科技*, 2014(9):145-153.
- [12] 阮晓东,牛礼民,叶李军. 基于 Cruise 的 PHEV 动力总成集成控制研究[J]. *机电工程*, 2014, 31(12):1604-1609.
- [13] 秦 昀. 增程式电动汽车动力传动系统参数匹配及性能仿真[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学汽车工程学院, 2012.
- [14] FRAIDL G K, BESTE F, KAPUS P E, et al. Challenges and solutions for range extenders—from concept considerations to practical experiences[R]. Graz: SAE Technical Paper, 2011.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

蒋建华,范 港,张 翀. 增程式电动车参数匹配与分析[J]. *机电工程*, 2016, 33(3):368-372.

JIANG Jian-hua, FAN Gang, ZHANG Chong. Match and analysis of range-extended electric vehicle's parameters[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(3):368-372.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>