

增程式电动汽车能量分配策略研究

张 勇, 董鑫涛, 仝 猛

(长安大学工程机械学院, 西安 710064)

摘要: 传统的纯电动汽车面临续航里程不足和里程焦虑的问题, 为解决动力电池组电池荷电状态 (state of charge, SOC) 快速下降和过放电的问题, 采用模糊控制策略弥补这一缺陷。与传统的恒温器控制策略相比, 模糊控制策略能将动力电池组的 SOC 控制在设计的阈值内, 延长电池组的使用寿命并增加行驶里程。最后在特定行驶工况下, 通过仿真软件验证结论的有效性, 结果证明电池使用寿命和燃油利用效率得到了有效提高。

关键词: 公路运输; 增程式电动汽车; 动力电池; 模糊控制; 能量管理

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2017)14-1595-07

Power distribution strategy research of range extended electric vehicles

ZHANG Yong, DONG Xintao, TONG Meng

(Construction Machinery College, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: Traditional electric vehicles are facing the problem of driving distance which is far less than expected and mileage anxiety. In order to solve the rapid loss of state of charge (SOC) and over discharge problem, the fuzzy control strategy is used to make up the defect. Compared with the traditional thermostat control strategy, the fuzzy control strategy proposed in this paper for power battery group, keeps the SOC of batteries in the designed threshold. It also prolongs the battery life and driving distance. Finally, in the specific driving conditions, the validity of the conclusion is verified by simulation software. The results show that battery life and fuel efficiency have been effectively improved.

Key words: road transport; range extended electric vehicles; power battery; fuzzy control; energy management

0 引言

当今社会面临一系列问题, 例如化石燃料资源的日益枯竭, 生态环境破坏的日益加重, 汽车保有量的不断增加, 这些因素促进了新能源汽车的发展^[1]。动力电池依然存在造价昂贵、能量密度低、续航里程短、过放电等一系列不完善的问题。而增程式电动汽车 (range extender electric vehicle, REEV) 作为纯电动汽车的过渡车型, 能有效解决这些不足^[2-3]。

REEV 的结构相对纯电动汽车只多了一个辅助动力装置 (auxiliary power unit, APU), 它是一个发电模块, 这样使得车身结构更加简单, 成本更低。增程器在电池供电不足的情况下为其充电。因此, 此种方式能让电池 SOC 维持在一个较高的水平。与混合动力汽车 (hybrid electric vehicle, HEV) 不同的是, 增程器不与驱动电机直接相连, 因此能使发动机保持在最佳工作效率点, 燃油效率得到极大提高^[4]。

基金项目: 国家科技支撑项目 (2011BAG04B02); 长安大学基础研究支持计划专项基金 (310825161010)

作者简介: 张勇 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 新能源汽车建模与仿真

通信联系人: 仝猛, 讲师, 主要研究方向: 锂离子电池、新能源汽车研究与开发. E-mail: 2185163424@qq.com

传统的增程式电动汽车采用恒温器控制的方式来控制增程车的充电^[5]。一般的控制策略是当 SOC 低于警戒水平时, 增程器为电池组充电, 使其尽快达到规定的上限阈值, 然后增程器停止工作。此种控制策略虽然能使电池组 SOC 维持在一定的范围内, 但仍然有其固有的一些缺点, 例如动力电池长时间处于过放电状态以及踏板指令反馈的迟滞性较突出。

为协调增程器、动力电池组之间的能量分配关系, 提出一种以模糊控制理论为基础的能量管理策略。基于特定的行驶工况, 提高增程车燃油利用效率的同时也考虑动力电池的使用寿命和续航里程。

1 REEV 系统结构选型与建模

1.1 REEV 动力系统结构

REEV 的结构常采用串联式, 串联型 REEV 更接近于纯电动汽车, 可以在原有车型基础上进行改装。并且其燃油经济性与并联和混联两种驱动方式相比更高。本文所采用的 REEV 驱动形式为串联式, 既保证了整车性能, 也提高了整车的燃油经济性。REEV 动力结构如图 1 所示。

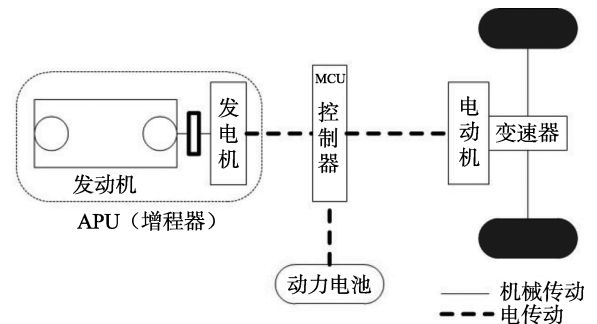


图 1 REEV 动力系统结构

Fig. 1 Power system structure of REEV

由上述增程车的动力系统结构可知, REEV 有以下 3 种工作模式:

1) 纯电动行驶模式。由电池组提供能量, 增程车靠电机驱动。

2) 增程模式。当增程车所需功率较小时, 增程器同时为驱动电机提供能量以及给动力电池充电; 当增程车所需功率较大时, 增程器与动力电池同时为车辆提供行驶所需的功率; 当停车时间较短、电池 SOC 低于设定下限值时, 发动机继续给动力电池组充电。

3) 能量制动回收模式。在刹车制动过程中, 通过制动反馈回收的能量重新为增程车所用, 提高能量利用率。

1.2 增程器模型

增程器的 APU 是 REEV 的辅助动力单元, 对于串联式混合动力车辆而言是主要的能量补充来源。本文的汽油发动机采用转速控制方法^[6], 并建立简易发动机模型, 求出发动机的输出转矩。通过查阅相关资料可以得出输出转矩为

$$T_e = f_{en}(\theta_t, n_e), \quad (1)$$

本文采用的发电机为永磁无刷直流电机, 其电磁转矩满足如下关系式:

$$T_g = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r, \quad (2)$$

其中, T_e 为发动机转矩; f_{en} 为拟合函数; θ_t 为发动机喷油嘴开度; n_e 为发动机转速; T_L 为负载转矩; J 为发电机输出惯量; B 为黏性阻力系数; ω_r 为转子角速度。

由式 (1)、式 (2) 可知, 建立所需要的 APU 模型, 必须满足发动机和发电机组的动态平衡, 即

$$T_g = T_e. \quad (3)$$

由于增程器中的发动机不是直接与驱动电机相联, 因而能一直在最佳工况点运行, 输出转矩带动发电机发电。同时, 发电机在 APU 启动阶段提供转矩拖动发动机转动, 将增程器的转速稳定在较优转速阶

段, 因而对发动机有启动的功能。如图 2 所示, 在 Matlab/Simulink 中建立 APU 模型。

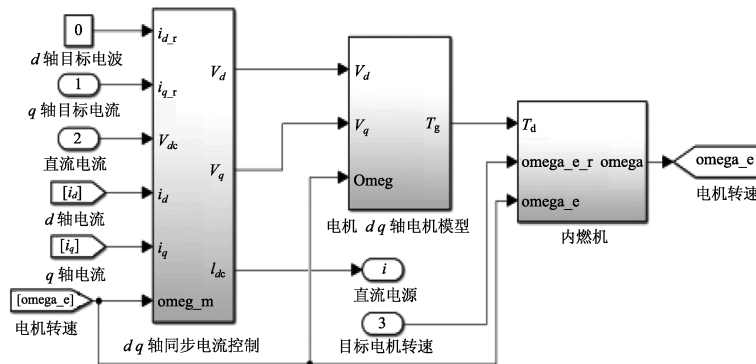


图 2 增程器模型

Fig. 2 Range extender model

1.3 动力电池模型

电池模型在本文仿真研究中简化为电压和电阻的等效电路, 如图 3 所示, 采用安时积分法, 忽略电池组发热散热的影响。在等效电路图 3 中, V_{oc} 为电路开路电压, R_{int} 为电池内部电阻, I 为电路电流。结合电池充放电要求, 假设电池充放电起始状态为 $SOC(t_0)$, 那么当前电池组 SOC 为

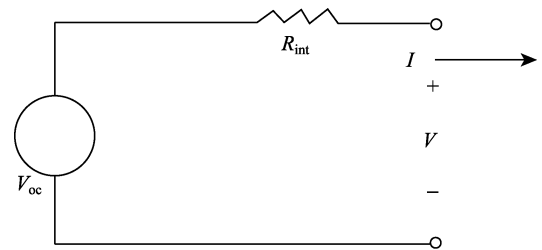


图 3 等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau, \tag{4}$$

$$\Delta q = \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau, \tag{5}$$

其中, C_N 为额定容量; $i(\tau)$ 为某一时刻的电池放电电流, 减少的 Δq 可以通过增程器给电池充电来补充。基于电池组充放电特性, 增程器能保持电池组 SOC 的动态平衡。但电路任意时刻的电流 $i(\tau)$ 是一个非线性函数, 并受室内温度、材料疲劳等特性的影响。

2 模糊逻辑控制策略

2.1 行驶循环工况分析

相比于实际工况, 行驶循环工况是模拟工况, 用来模拟不同工况下电车的燃油经济性。行驶循环工况的建立基于大量测试, 并且逐渐在燃油效率评估方面成为标准指标。在世界范围内, 电动汽车测试用行驶工况分为 3 种: 美国行驶工况 (United States driving conditions, USDC)、欧洲行驶工况 (Europe driving conditions, EDC) 和日本行驶工况 (Japan driving conditions, JDC)。以美国联邦认证程序 (Federal Test Procedure, FTP) 为代表的瞬态工况 (FTP72) 和以联合国欧洲经济委员会汽车法规 (Economic Commission for Europe, ECE) 为代表的模态工况——新欧洲汽车法规循环工况 (New Europe Driving Cycle, NEDC) 为世界各国采用^[7]。

如图 4 所示, NEDC 工况测试由市区运转循环和市郊运转循环两部分组成, 其中市区运转循环又由 4 个小的市区运转循环单元组成, 每个循环单元测试时间为 195 s, 包括怠速、启动、加速及减速停车等

几个阶段。最高车速 50 km/h，平均车速 18.35 km/h，最大加速度 1.042 m/s²，平均加速度 0.599 m/s²。市郊运转循环时间为 400 s，最高车速 120 km/h，平均车速 62.00 km/h，最大加速度 0.833 m/s²，平均加速度 0.354 m/s²。整个循环工况的行驶里程为 10.93 km，循环测试时间为 1 220 s^[8]。

一个 NEDC 循环工况里程为 10.93 km，这显然不能代表整个城市的行驶工况。本文采用 10 个循环工况（109.3 km）为一个实验周期。在此基础上，综合考虑 REEV 的燃油经济性与行驶可靠性。

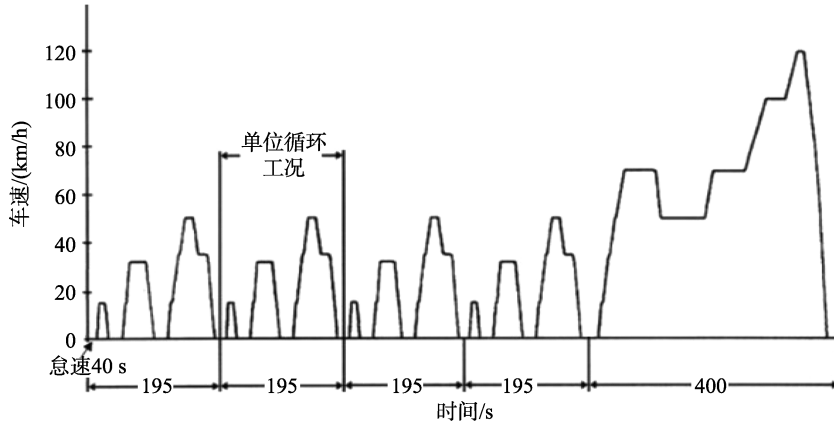


图 4 NEDC 循环工况
Fig. 4 NEDC driving cycles

2.2 模糊控制策略

传统的 REEV 能量控制策略有恒温器模式和功率跟随模式^[9]，在一定范围内使增程车的续航里程得到提升。但动力电池经常出现过放电，导致动力电池 SOC 出现较大的波动，同时导致增程器出现反复启动的状况，影响整车的驾驶性能和燃油经济性。因此，增程器作为辅助动力单元，在能量控制管理中必须高效、稳定。

本文采用模糊控制 (fuzzy control) 规则控制动力电池的 SOC，如图 5 所示，由动力电池相关参数的关系可以看出，当动力电池 SOC 维持在[0.3, 0.9]区间内时，充放电内阻较小，充放电效率较高。并且电路中的开路电压 V_{oc} 较高，能满足行车需求。因此，本文将动力电池的上下极限阈值定为 0.3 和 0.9，由于增程器是在动力电池 SOC 值较低时开启，本文设定的 SOC 值取上下限阈值的平均值，即当 $SOC \leq 0.6$ 时增程器启动，且此时电路的开路电压 V_{oc} 依然较高，能够使电池 SOC 维持在中线附近，保持一种动态的相对平衡状态。

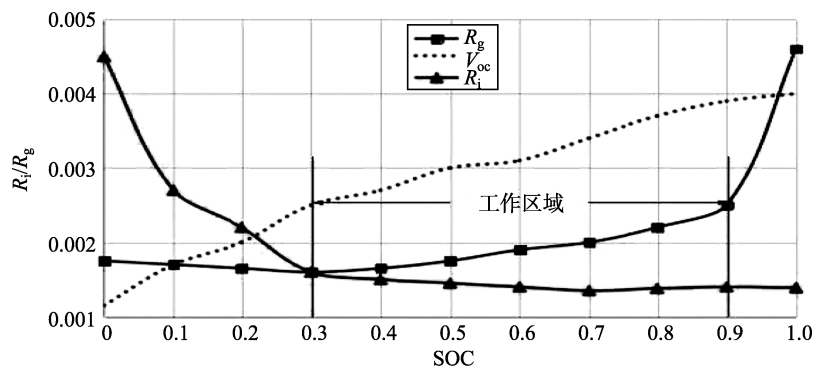


图 5 电池开路电压和内阻特性
Fig. 5 Open circuit voltage and internal resistance of battery

SOC 和行驶里程 (distance) 模糊集隶属度函数区间基于以下定义规则:

1) T0: $SOC \geq 60\%$; T1: $50\% \leq SOC < 60\%$; T2: $40\% \leq SOC < 50\%$; T3: $30\% \leq SOC < 40\%$; T4: $SOC < 30\%$.

2) D0: distance=0; D1: distance $\leq 30\%$; D2: $30\% < \text{distance} \leq 60\%$; D3: distance $> 60\%$.

模糊控制器先将输入模糊化, 再通过知识库的数据库和规则库, 将模糊规则数值化, 根据输入模糊量, 由模糊控制规则完成相关模糊推理过程, 并获得模糊控制量的功能部分^[10]。如图 6 所示, 本文以 SOC 与初始值的比值以及行驶里程与设定里程的比值为模糊输入量, 以增程器分别给动力电池组充电的能量占总能量的百分比以及提供车辆行驶的能量占总能量的百分比为输出量。

基于 NEDC 工况, 增程车的行驶里程可以通过剩余电量的 SOC 估计以及平均每 km 能源消耗来获得。将增程车的燃油燃烧转化的化学能和动力电池组换算成总的电能。假设总能量为 30 kW·h, 平均每 km 日常消耗为 150 W, 那么增程车总的续航里程则为 200 km。基于特定的工况, 动力电池组充电以及踏板加速所需能量占增程器输出能量的百分比是可调的。在规定的循环工况下, 根据模糊控制规则, 使动力电池组 SOC 维持在一个相对稳定的高水平, 在增加续航里程的同时, 有效地保护电池寿命, 防止动力电池组频繁过放电现象的发生。

3 策略比较

通过相关仿真数据分析验证本文提出的模糊控制方法, 如图 7 所示, 比较不同控制策略下 SOC 值的变化。

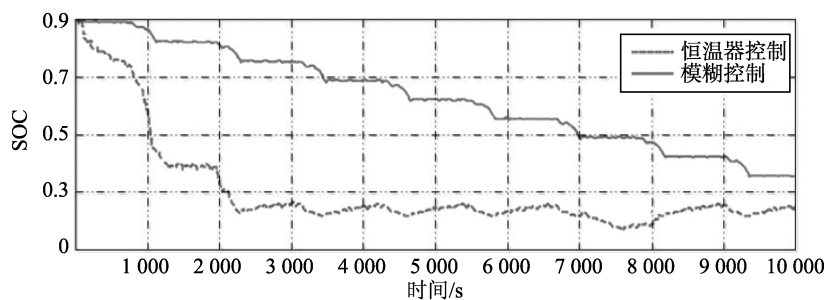


图 7 SOC 仿真结果对比

Fig. 7 Comparison of SOC simulation results

由图 7 可以看出, 在传统的恒温器控制策略下, SOC 下降很快, 在循环工况初期, SOC 就降低在设定的下限阈值之下, 导致增程器长时间处于开启状态, 燃油消耗较大。且 SOC 值很难恢复到设定阈值之上, 长时间过放电会导致电池寿命降低, 大大增加驾驶员的里程焦虑。在同等驾驶循环工况下, 模糊控制策略能维持动力电池 SOC 在一个较高的水平, 避免车辆出现走走停停的状态, 避免增程器频繁开启, 驾驶车辆运行平稳, 大大提高了燃油利用效率。

	增程器不启动 动力电池供电	增程器不启动 动力电池供电	增程器不启动 动力电池供电	增程器不启动 动力电池供电
T0	25%电池充电 75%踏板加速	15%电池充电 85%踏板加速	10%电池充电 90%踏板加速	5%电池充电 95%踏板加速
T1	35%电池充电 65%踏板加速	25%电池充电 75%踏板加速	15%电池充电 85%踏板加速	10%电池充电 90%踏板加速
T2	45%电池充电 55%踏板加速	35%电池充电 65%踏板加速	25%电池充电 75%踏板加速	15%电池充电 85%踏板加速
T3	100%电池充电 踏板不加速	55%电池充电 45%踏板加速	35%电池充电 65%踏板加速	25%电池充电 75%踏板加速
T4				
	D0	D1	D2	D3

图 6 模糊控制规则

Fig. 6 Fuzzy control rules

关于燃油利用效率,图8为在整个循环工况下,增程车在行驶和制动模式下的能量损失分布。车辆行驶消耗的能量效率与行驶里程、动力电池组的电能和增程器燃油效率有关。由于电能相比燃油更加便宜也更加清洁,因此在整个增程车行驶里程中,要避免增程器的反复开启,最大限度地利用动力电池组供电。在行驶阶段,主要损耗为发动机和动力电池,且发动机损耗较大。因此在增程器选型方面应该合理选取发动机和发电机的功率,选择燃油效率高的电机或对相关发动机进行改进,提高燃油经济性。在图8b所示的制动阶段,刹车机构的损耗所占比例最大,因此应该合理布置行车制动能量的回收,提高能量的利用效率。

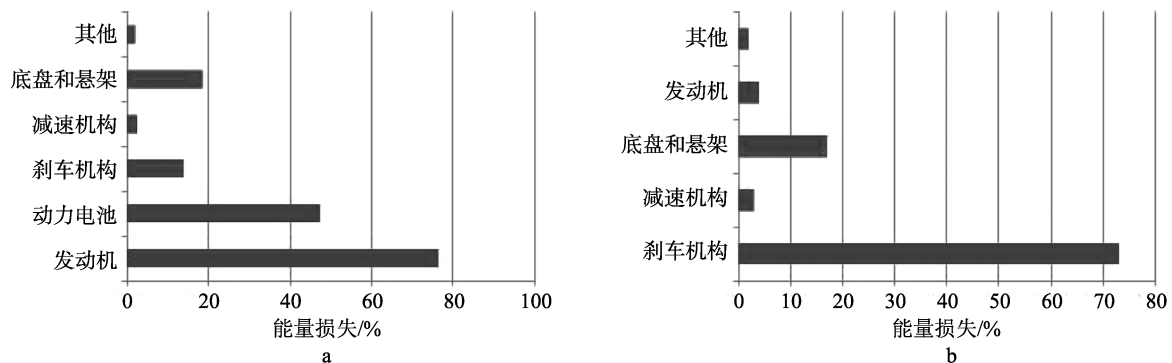


图8 增程车在行驶(a)和制动(b)模式下的能量损失分布

Fig. 8 Energy loss distribution of the extended range vehicles in driving (a) and braking (b) modes

4 结论

在现阶段电动汽车电池能量密度普遍不高的情况下,REEV作为一款过渡车有着重要的意义。采用模糊控制策略,电池的SOC能够控制在所设定的阈值范围之内,极大地避免了电池过放电现象的发生,降低了能量损失,在增大行驶里程的同时消除了里程焦虑。通过Matlab/Simulink仿真模拟,证明了其有效性与可行性。由于仿真过程是基于某一特定的行驶工况,而实际运行工况相比设定的工况更加复杂。因此,在以后的研究中要充分考虑实际工况以提高仿真结果的准确性,并在此控制策略的基础上做出相应的改进。

[参考文献] (References)

- [1] 高健. 混合动力电动汽车发展和应用现状[J]. 汽车工程, 2012, 10(3): 17-19.
GAO J. Development and application of hybrid electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2012, 10(3): 17-19. (in Chinese)
- [2] 窦曼莉, 石春, 储著林, 等. 串联式混合动力城市客车整车控制系统研制[J]. 控制工程, 2012, 19(4): 610-613.
DOU M L, SHI C, CHU Z L, et al. Development of series hybrid city bus driver control system[J]. Control Engineering, 2012, 19(4): 610-613. (in Chinese)
- [3] 宋柯, 章桐. 增程式纯电动汽车动力系统研究[J]. 汽车技术, 2011(7): 14-18.
SONG K, ZHANG T. Research on power system of extended electric vehicle[J]. Automotive Technology, 2011(7): 14-18. (in Chinese)
- [4] 窦国伟, 马涛峰, 马先萌. 基于模糊控制算法的增程式电动汽车能量分配策略[J]. 上海汽车, 2012(3): 10-14.
DOU G W, MA T F, MA X M. Energy allocation strategy of extended electric vehicle based on fuzzy control algorithm[J]. SAIC Motor, 2012(3): 10-14. (in Chinese)
- [5] 郭秀红. 混合动力电动汽车发动机建模与MATLAB仿真[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(4): 193-196.
GUO X H. Modeling and MATLAB simulation of HEV engine system[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,

- 2013, 34(4): 193-196. (in Chinese)
- [6] 陈锐, 罗禹贡, 马士奔. 混合动力特种车 APU 控制系统开发[J]. 车辆与动力技术, 2007 (3): 32-36.
CHEN R, LUO Y G, MA S B. Development of control system for the auxiliary power unit in hybrid electric special vehicle[J]. Vehicle & Power Technology, 2007(3): 32-36. (in Chinese)
- [7] 姜平, 石琴, 陈无畏. 基于马尔科夫的城市道路行驶工况构建方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40 (11): 26-30.
JIANG P, SHI Q, CHEN W W. Driving cycle construction methology of city road based on Markov process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 26-30. (in Chinese)
- [8] 伍伟硕. 日本 JC08 燃油模式解读更接地气的变革[EB/OL]. [2014-02-08]. <http://www.pcauto.com.cn/tech/384/>.
WU W S. Japan JC08 fuel mode interpretation of more ground gas change[EB/OL]. [2014-02-08]. <http://www.pcauto.com.cn/tech/384/>. (in Chinese)
- [9] 曾小华, 宫维钧. ADVISOR2002 电动汽车仿真与再开发应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
ZENG X H, GONG W J. Application and simulation of ADVISOR2002 electric vehicle simulation and redevelopment[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [10] 王耀南, 孙炜. 智能控制理论及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
WANG Y N, SUN W. Intelligent control theory and application[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2008. (in Chinese)