

Study on Power Transmission Characteristics and Optimization of Pure Electric Vehicle Based on Compound Power Supply

Yonghui Liu, Changfeng Zhou, Jun Yang, Li Yin, Huan Yang

Shandong Jiaotong University, Ji'nan Shandong

Email: lyh1981@139.com

Received: Jul. 5th, 2019; accepted: Jul. 19th, 2019; published: Jul. 29th, 2019

Abstract

The characteristics of power supply and power transmission system of pure electric vehicle directly influence on the economy and power performance. In this paper, the Advisor software is used to build the hybrid power supply model of pure electric vehicle, including battery, super capacitor, DC-DC model, control strategy, speed ratio control and so on. Through the simulation calculation of unsteady conditions, the dynamic characteristics of hybrid electric vehicle are obtained; through the simulation calculation of five-stage transmission, the power transmission characteristics and optimization scheme are obtained. The result of this paper can provide a theoretical basis for the research and design of pure electric vehicles.

Keywords

Pure Electric Vehicle, Compound Power Supply, Control Strategy, Power Transmission

基于复合电源的纯电动汽车动力传动特性及优化研究

刘永辉, 周长峰, 杨君, 尹力, 杨欢

山东交通学院, 山东 济南

Email: lyh1981@139.com

收稿日期: 2019年7月5日; 录用日期: 2019年7月19日; 发布日期: 2019年7月29日

文章引用: 刘永辉, 周长峰, 杨君, 尹力, 杨欢. 基于复合电源的纯电动汽车动力传动特性及优化研究[J]. 应用物理, 2019, 9(7): 326-335. DOI: 10.12677/app.2019.97039

摘要

纯电动汽车电源的利用率与动力传递系统的特性直接影响经济性和动力性。本文采用Advisor软件建立纯电动汽车复合电源模型，包括电池、超级电容、DC-DC、控制策略、速比控制等，通过对非稳定工况下的仿真计算，获得复合电源电动汽车的动力特性；通过对5级变速器的仿真计算，获得动力传动特性及优化方案。本文研究可以为纯电动汽车的研究设计提供一定的理论依据。

关键词

纯电动汽车，复合电源，控制策略，动力传动

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

与传统内燃机汽车相比，电动汽车在环境保护和新能源利用方面有巨大的优势。近年来国家大力发展战略电动汽车，2012年政府发布《节能与新能源汽车产业发展规划(2012~2020)》明确了新能源汽车的战略取向以纯电驱动为主。对于纯电动汽车，其关键问题在于能量存储和动力传递两个方面。因此，提高能量利用率以及动力传动系统的选型与匹配，直接影响其经济性、动力性以及续驶里程。

采用电池与超级电容的复合电源方案能够充分利用超级电容的比功率高和蓄电池比能量高的特点，为目前的研究热点，吉林大学[1] [2]对复合电源汽车的参数匹配进行了研究，舒杰军[3]采用模糊控制算法对复合电源进行了优化，袁义悦、曾梦远[4] [5]等人对复合电源系统进行了仿真研究；对于动力传动系统的研究，许伍洲、杨文兴、夏青松[6] [7] [8]等人采用仿真的方法对纯电动汽车的驱动系统、动力系统进行了研究与优化。Ren G, Cong N [9]对用电系统的能量存储系统进行了系统分析，Wang Lianmo, Bai Weijun [10]等人采用 advisor 软件对电动汽车进行了建模和仿真计算，Moreno J., Baisden Andrew C. [11] [12]等人对混合式电动汽车的能量存储系统包括电池和电容的控制及特性进行了研究。

综上所述，考虑复合电源的功率、动力及传动系统、工况之间的匹配及控制策略是影响电动车动力性和经济性的关键因素，因此，本文采用 advisor 软件搭建纯电动汽车仿真平台，采用数值方法建立电池、超级电容、动力传动等子系统的动态模型，根据仿真结果分析非稳定运行工况的能量和功率分配特点，建立适合纯电动汽车的功率控制模型和动力传动匹配模型。

2. 复合电源纯电动汽车模型建立

复合电源是由蓄电池、超级电容、DCDC 转变器共同组成的复杂系统，如图 1 所示。对复合电源的超级电容、动力电池及负载的能量管理和功率匹配问题为非线性耦合研究，需要综合考虑复合电源系统的各个参数、车辆参数和非稳定工况下的车辆动力学因素，建立一种动态仿真模型，因此设计过程要考虑每个部件的匹配与协调，并合理设计功率分配。

2.1. 蓄电池和超级电容模型

1) 蓄电池采用铅酸蓄电池，其模型结构包括 SOC 值、温度、电流、功率值四个模块，其电池模型

如图 2 所示。

2) 超级电容采用碳基超级电容模型, 其模型结构如图 3 所示。

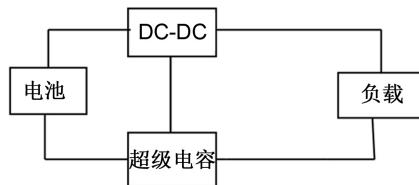


Figure 1. Composite power supply topology
图 1. 复合电源拓扑结构

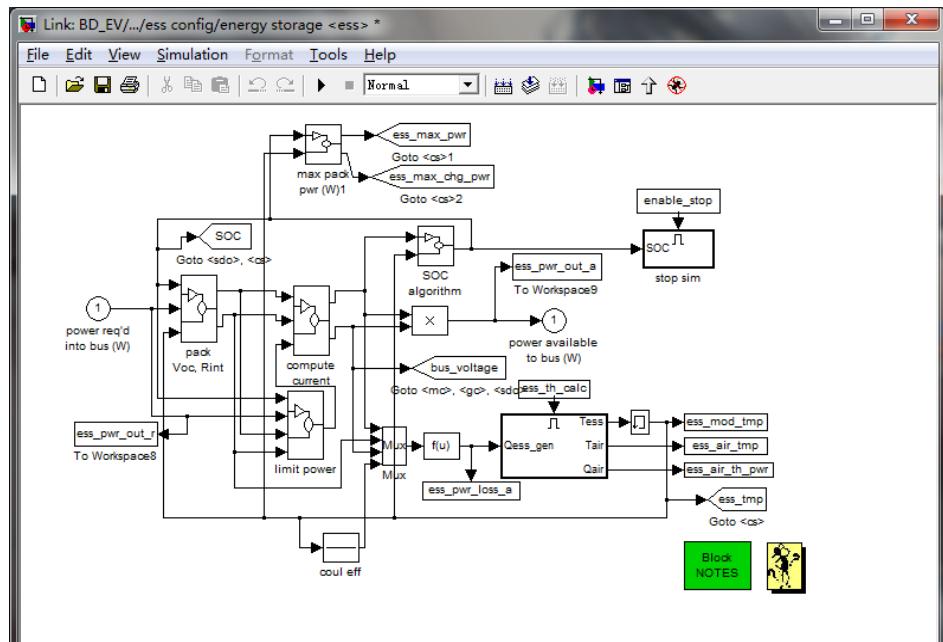


Figure 2. Lead-acid battery model
图 2. 铅酸蓄电池模型

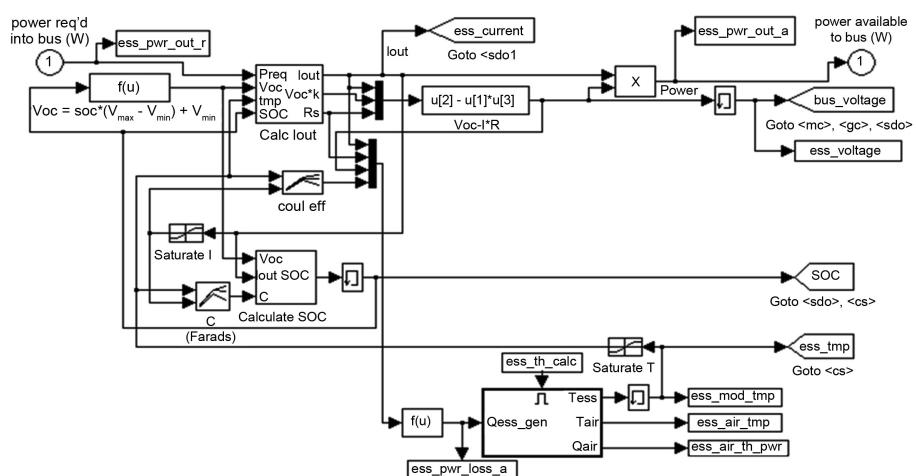


Figure 3. Supercapacitor model
图 3. 超级电容模型

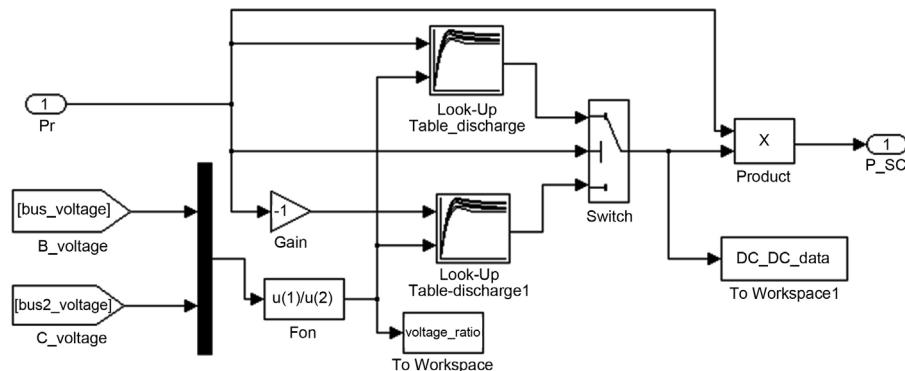


Figure 4. DC-DC model
图 4. DC-DC 模型

3) DC-DC 模型

DC-DC 是复合电源中调节超级电容电压的重要部件, 可双向变压调节, 调节超级电容的充放电电流, 防止电压变化过大, 保护电路的同时也能保证复合电源的高效率。考虑到效率问题, 忽略瞬态过程, 搭建模型, 由于 DCDC 效率受到电压和输入功率的影响, 利用二维数表插值的方法建模。本文建立的 DC-DC 的模型如图 4 所示。

2.2. 复合电源的控制策略

本文基于逻辑门限控制理论来设计能量管理分配策略进行能量分配, 应用 advisor 软件对复合电源纯电动汽车建模, 用 Simulink 开发制作能量分配策略, 在 Matlab/Simulink 中搭建逻辑门限控制策略模型, 整体控制策略如图 5 所示。

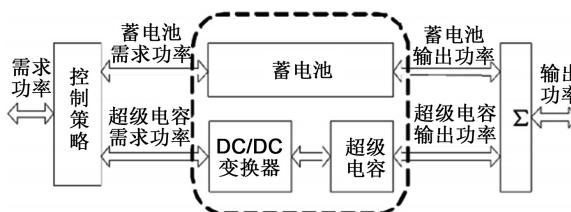


Figure 5. Control model of compound power supply
图 5. 复合电源控制策略模型

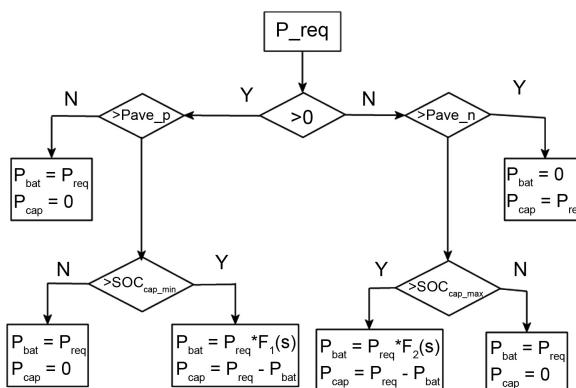


Figure 6. Logic threshold control logic
图 6. 逻辑门限控制逻辑

图 6 为逻辑门限控制策略的流程图。Preq 为电机对复合电源所需要的功率, Pbat 为蓄电池所需求的功率, Pcap 为超级电容所需求的功率, Pave_p 为驱动条件下所需要的功率门限值, Pave_n 为限制条件下需求功率门限值, SOCCap_max 为超级电容 SOC 上限值, SOCCap_min 为超级电容 SOC 下限值, F1(s) 为驱动条件下的滤波函数, F2(s) 为制动条件下的滤波函数。

在电机对复合电源需求功率大于 0 时, 判断其需求是否大于驱动条件下的功率门限值, 若小于则复合电源提供功率由蓄电池完全提供, 若大于则判断该值是否大于超级电容的下限值, 若小于还是由蓄电池提供功率, 若大于则根据公式 $P_{bat} = P_{req} \cdot F1(s)$ 、 $P_{cap} = P_{req} - P_{bat}$ 分别得出蓄电池和超级电容所提供的功率值; 若电机对复合电源的需求功率小于 0, 则判断该需求是否大于制动条件下所需求的功率门限值, 若大于则该部分需求都由超级电容提供, 若小于则再判断该需求功率是否小于超级电容荷电最小值, 若小于则该功率由蓄电池提供, 若大于则根据公式 $P_{bat} = P_{req} \cdot F2(s)$ 、 $P_{cap} = P_{req} - P_{bat}$ 分别得出蓄电池和超级电容所提供给电机的功率值。

2.3. 整车顶层模型

将建立好的逻辑门限控制策略和 DC-DC 模型、超级电容模型、蓄电池模型装载一起, 形成整车模型。整车的需求功率经过电机, 再经过控制策略分流, 考虑到 DC-DC 转换器的损失, 计算分别得到蓄电池和超级电容的需求功率。本文所建立的复合电源整车顶层模型如图 7 所示, 仿真界面如图 8 所示。

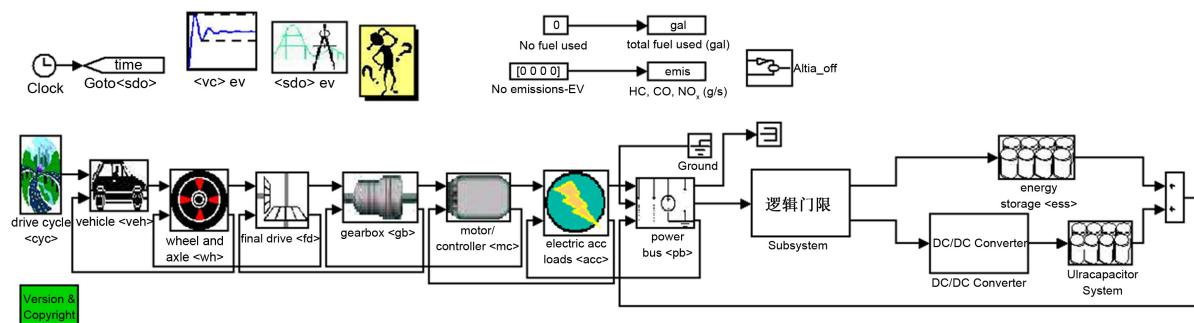


Figure 7. Top-level model of compound power supply
图 7. 复合电源整车顶层模型

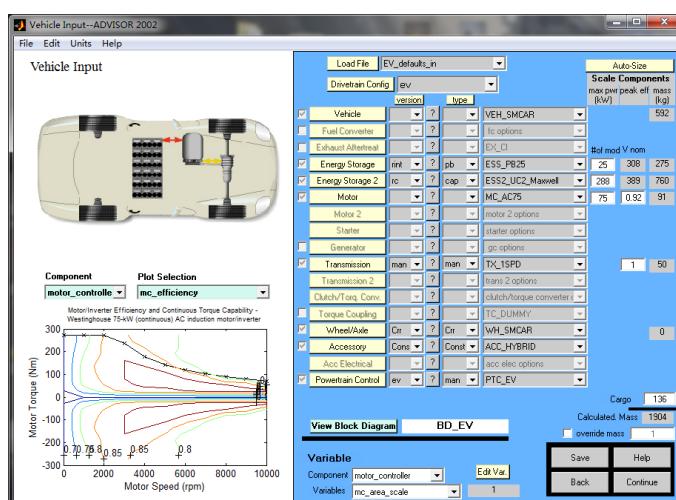


Figure 8. Advisor simulation interface
图 8. 纯电动汽车 advisor 仿真界面

3. 复合电源纯电动汽车性能分析

3.1. 中国典型城市工况性能分析

建立中国典型城市工况图, 添加到 advisor 中的 Drive Cycle 内, 如图 9 所示。图 10 为仿真跟随图, 可以看出, 与典型城市工况车速基本一致, 几乎看不出两者的差异, 说明该款电动车可以满足中国典型城市道路的行驶需求。

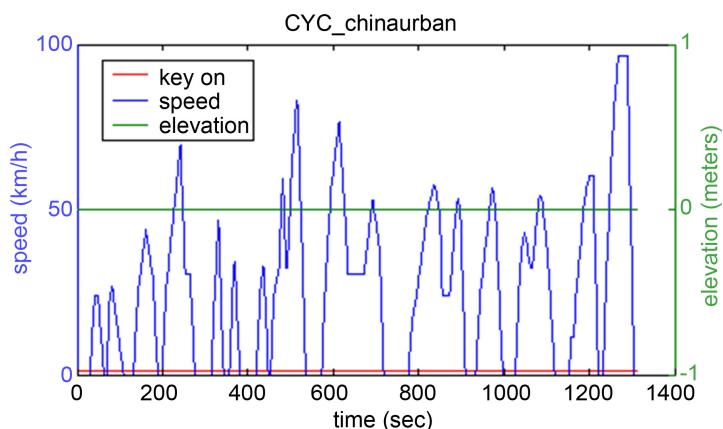


Figure 9. Typical urban circle in China
图 9. 中国典型城市工况

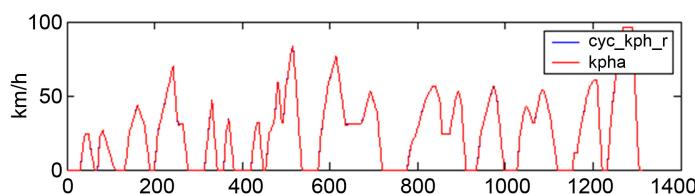


Figure 10. Velocity following chart via simulation
图 10. 仿真后中国典型城市工况速度跟随图

图 11 为复合电源中蓄电池和超级电容的 SOC 变化规律曲线, 可以看出电池的 SOC 值变化平稳, 而超级电容的波动较大, 但整体规律是随着时间 SOC 值下降, 说明本研究所建立的逻辑门限控制策略在纯电动汽车非稳定工况运行过程中起到了调节作用, 由于对制动工况和驱动工况分别制定了功率门限值, 所以 SOC 值出现增大的波动情况, 但整体的驱动需求的功率大于吸收的功率, 因此超级电容 SOC 随着时间是逐渐下降的。

3.2. 高速工况性能分析

高速工况行驶速度快, 对功率需求大, 可以明显对比各项参数, 本文研究采用 ADVISOR 中自带的高速工况, 如图 12 所示。图 13 为仿真的速度跟随图, 可以看出基本与所设定的工况一致, 达到电动汽车的行驶要求。

对比图 14 和图 15, 可以看出在高速工况下, 电池 SOC 值下降更为明显, 在一个循环工况结束后, 单一蓄电池 SOC 下降更明显, SOC 值剩余明显低于复合电源中的电池 SOC 值, 说明复合电源中超级电容合理分配了一部分电机的需求功率, 增大了电池的持续工作时间, 提高了电动汽车的续驶里程。

图 16 和图 17 为采用单一电池和复合电源的瞬时电流对比图, 可以看出单一蓄电池电流波动大, 峰值

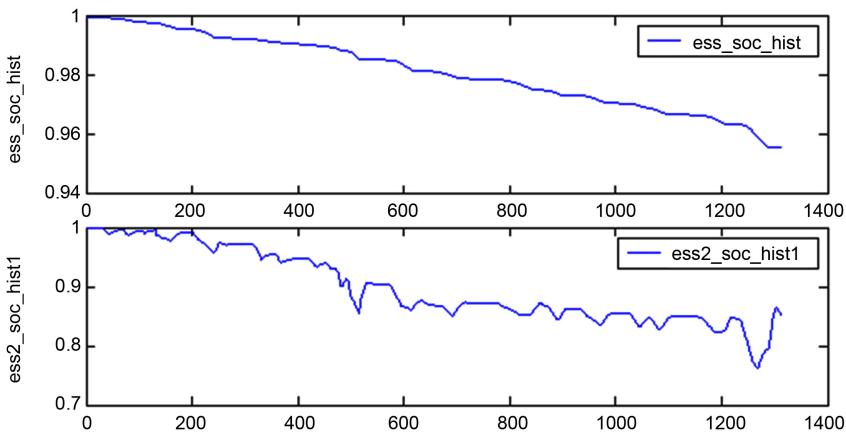


Figure 11. SOC chart of battery and super capacitance in compound power supply
图 11. 复合电源中蓄电池和超级电容的 SOC 变化图

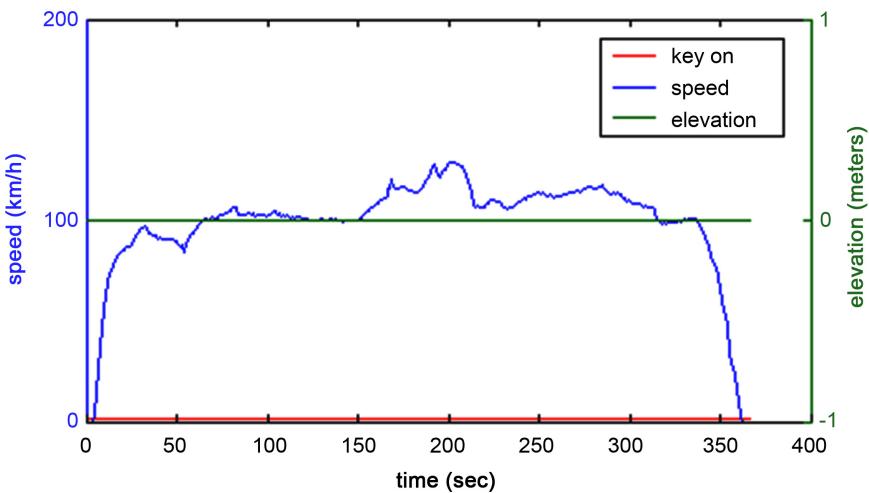


Figure 12. High speed circle
图 12. 高速工况

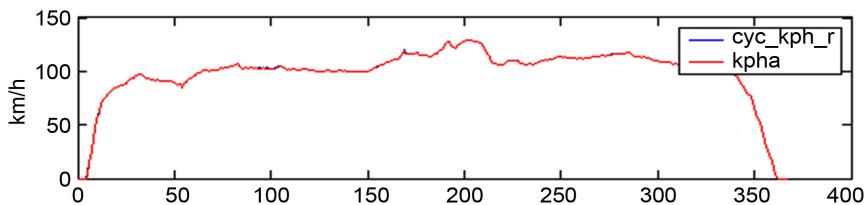
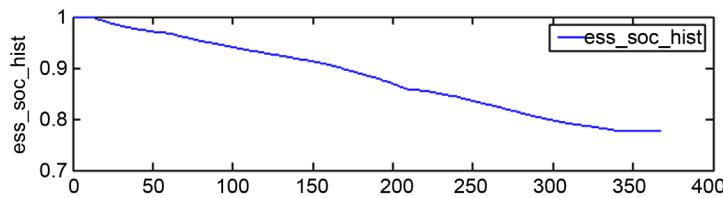
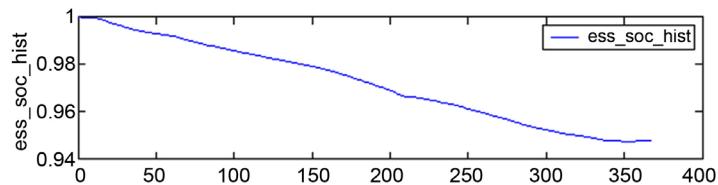
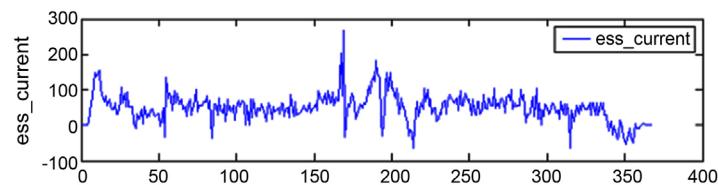
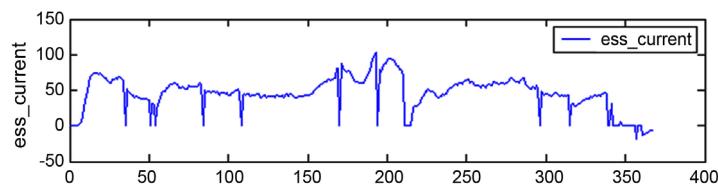


Figure 13. Velocity following chart of high speed
图 13. 高速工况速度跟随图

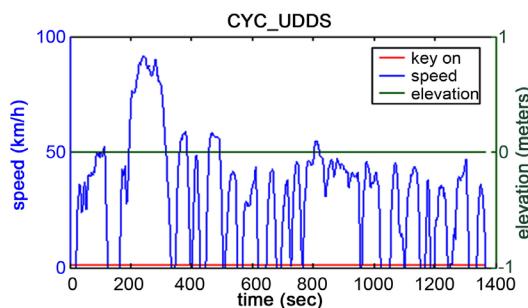
电流已经达到 280 A，而复合电源状态下电池的电流明显低了很多，峰值电流低于 100 A，说明复合电源下蓄电池得到了充分的保护，在高功率工况下行驶，超级电容提供较高的峰值功率，大幅度减少了电池的工作负荷，起到削峰填谷的作用，延长了电池的使用寿命。

4. 复合电源纯电动汽车动力传递及优化

建立纯电动汽车的速比模型，采用 1~5 级速比分别进行仿真计算。本文加速试验所需测试的内容有

**Figure 14.** SOC value of single battery**图 14.** 单一蓄电池 SOC 值变化曲线**Figure 15.** SOC value of battery in compound power supply**图 15.** 复合电源中蓄电池 SOC 值变化曲线**Figure 16.** Electric current of single battery**图 16.** 单一蓄电池电流变化曲线**Figure 17.** Electric current of battery in compound power supply**图 17.** 复合电源状态下电池的电流变化曲线

车速 0~96.6 km/h 加速时间、车速 64.4~96.6 km/h 加速时间、车速 0~130 km/h 加速时间、最大加速度以及最高车速，并且将初始 SOC 值设置为 1。采用 UDDS 工况进行研究，图 18 为所采用的工况图，图 19 为仿真结果图。

**Figure 18.** CYC_UDDS circle**图 18.** CYC_UDDS 工况

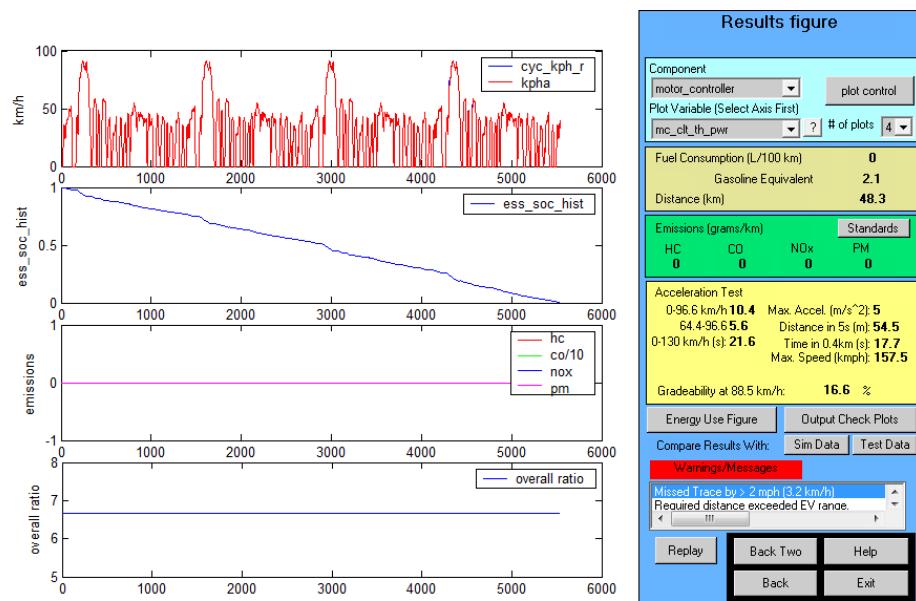


Figure 19. Simulation results
图 19. 仿真结果图

Table 1. Performance from first to five-stage transmission
表 1. 一级变速器到五级变速器各性能

	一级变速器	二级变速器	三级变速器	四级变速器	五级变速器
0 km/h~96.6 km/h 所需时长/s	10.4	11.5	11.6	11.7	12.4
64.4 km/h~96.6 km/h 所需时长/s	5.6	5.9	6.0	5.8	6.5
0 km/h~130 km/h 所需时长/s	21.6	23.2	23.1	23	23.1
最大加速度/m/s ²	5	5	5	5	5
最高行驶速度/km/h	157.5	165.9	166.4	167.2	168.5
UDDS 工况行驶的距离(km)	48.3	47.3	47.6	47.9	48.6
88.5 km/h 最大爬坡度(%)	16.6	15.7	15.8	15.9	16.4

通过对各级传动比变速器的结果分析，通过表 1 数据可以看出，随着变速器档位数的增加，最高速度增大，续驶里程增加，即档位数增大能提高电动汽车行驶的经济性。因此，对于高速工况行驶，应采用五级变速器为最优方案。

对整车动力性的分析，从表 1 中关于加速试验分析和爬坡度试验我们能看出，低速加速性能随档位的增大变差，高速加速性能影响较小；爬坡度先减小后增大。因此，考虑动力性，低档位的变速器为最优方案。

5. 结论

本文采用 advisor 软件建立了纯电动汽车复合电源模型，采用逻辑门限控制策略，通过对非稳定行驶工况下的能量管理、功率匹配以及动力传动特性进行研究，获得的主要结论如下：

- 1) 建立了非稳定工况下电动汽车复合电源的控制模型，包括动力电池、超级电容、控制策略，使车辆满足工况的行驶要求。

2) 通过对城市工况和高速工况的研究表明, 超级电容在制动工况和驱动工况下, 依据功率门限值合理分配了一部分电机的需求功率, 增大了电池的持续工作时间, 提高了电动汽车的续驶里程; 在高功率工况下, 超级电容提供较高的峰值功率, 大幅度减少了电池的工作负荷, 起到削峰填谷的作用, 延长了电池的使用寿命。

3) 通过对1~5级变速器的仿真结果分析, 说明动力传递特性对电动汽车的经济型、动力性具有较大影响, 即档位数增多, 续驶里程增大; 低速加速性能随档位数增大而变差, 爬坡度先减小后增大。

基金项目

山东省高等学校科技计划项目资助项目 J15LB03, 山东省重点研发计划资助项目 2016GGX105003。

山东省交通科技创新计划资助项目 2015B42。

山东省自然科学基金资助项目 ZR2015EL034, 山东省住房城乡建设科学技术项目计划 YK032。

运输车辆检测诊断与维修技术重点实验室支持计划资助。

参考文献

- [1] 于远彬. 车载复合电源设计理论与控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2008.
- [2] 刘杰. 混合动力轿车用复合电源参数匹配与优化设计研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2011.
- [3] 舒杰军. 车载复合电源系统的模糊控制及其优化研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [4] 袁义悦. 基于 ADVISOR 二次开发的车载复合电源参数匹配研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [5] 曾梦远, 王天利, 宫金朋, 等. 复合电源汽车气动系统的仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2015, 53(10): 32-35.
- [6] 许伍洲. 纯电动汽车驱动系统设计及其参数优化匹配的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [7] 杨文兴. 纯电动汽车动力系统匹配设计与仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [8] 夏青松. 电动汽车动力系统设计及仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [9] Ren, G. and Cong, N. (2015) Review of Electrical Energy Storage System for Vehicular Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **41**, 225-236. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.003>
- [10] Wang, L. and Bai, W. (2006) Development and Simulation of Electric Vehicle Based on ADVISOR. *Journal of Southeast University (English Edition)*, **22**, 196-199.
- [11] Moreno, J., Ortuzar, M.E. and Dixon, J.W. (2006) Energy-Management System for a Hybrid Electric Vehicle, Using Ultracapacitors and Neural Networks. *IEEE Transaction on Industry Applications*, **53**, 614-623. <https://doi.org/10.1109/TIE.2006.870880>
- [12] Baisden, A.C. and Ali, E. (2004) Advisor-Based Model of a Battery and an Ultra-Capacitor Energy Source for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **53**, 199-205.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，
搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7567，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”
进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：app@hanspub.org