

基于电池输出特性的电动汽车动力性能评价方法研究

许红¹ 付红波¹ 董伟玲² 杨晨明¹ 吴大鸣^{1*} 朱红³

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 北汽福田汽车股份有限公司, 北京 102200;

3. 北京化工大学 理学院, 北京 100029)

摘要: 对电动汽车不同工况负载进行受力分析的基础上,以直流伺服电机作为电池驱动的主动牵引电机,以交流伺服电机作为提供不同工况负载阻力电机,构建基于控制核心可编程逻辑控制器(PLC)的模拟双电池混合动力牵引的电动汽车电池性能测试平台。通过模拟负载阻力和行驶工况,对匀速行驶状态下的电池动力输出性能进行实验研究,同时采用车辆仿真软件 ADVISOR 对相同行驶工况进行模拟分析。结果表明:锂电池在放电过程中存在最大有效输出的工作区,单位时间内的电压变化率可以作为预测和判断对应工况下电池持续有效输出和续航时间的依据。软件模拟分析结果和实验测试结果一致,证明了测试平台的可靠性。

关键词: 电池输出特性; 双电池混合动力; 汽车牵引动力模拟; 路况阻力模拟; 电池电压变化率

中图分类号: U469.72 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2018.03.009

引言

开发新能源电动汽车是响应节能环保要求最直接的应对措施之一^[1-2]。电动汽车启动、加速和爬坡等动力性能和续航能力直接取决于电池的动力性能、有效寿命及输出稳定性^[3-4],因此模拟不同外形尺寸参数的电动汽车在不同工况下的行驶状态,得到对应工况下电池的输特性、对应不同电池性能的汽车最佳结构技术参数和行驶参数,既可以对电池有效动力输出性能进行科学有效的评价,也能为电动汽车电池系统的研发与改进提供测试和评价的方法。

目前对电池输出特性的研究主要是在一定放电倍率下放电时考察不同参数对电池有效输出性能的影响^[5-7],但电动汽车在实际行驶的过程中的负载是随着路况在不断变化的,一定放电条件下得出的电池输出参数很难对电动汽车实际行驶过程中受无序变化负载影响的电池输出功率变化率、电压变化率进行定性分析。本文基于对电动汽车在不同行驶

工况下的受力分析搭建了电动汽车模拟测试平台,通过对电动汽车的行驶过程进行模拟实验,得到不同工况下电池输出特性及其评价方法,为电动汽车实际行驶过程中的电池输出特性评价提供了一种快速有效的方法。

1 双电混合动力电动汽车的驱动原理

1.1 汽车行驶工况受力分析

汽车行驶状态的受力分析如图1所示。电动汽车在行驶过程中,其牵引动力主要由阻力和加速度决定。行驶过程牵引动力 F_t 和综合阻力 F_r 由式(1)和式(2)^[8-10]计算。

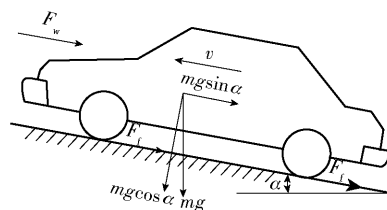


图1 电动汽车行驶状态的受力分析

Fig. 1 Force analysis of the electric vehicle in the driving state

$$\begin{cases} F_t = F_r + m \frac{\Delta v}{\Delta t} & (\text{加速}) \\ F_t = F_r & (\text{匀速}) \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期: 2017-04-13

基金项目: 双一流建设专项基金(JC1504)

第一作者: 女, 1968年生, 博士, 副教授

* 通信联系人

E-mail: wudm@mail.buct.edu.cn

$$\begin{cases} F_r = F_f + F_w + F_i = \frac{1}{2}\rho AC_D v^2 + \\ f_r mg \cos \alpha + mg \sin \alpha \quad (\text{有坡}) \quad (2) \\ F_r = F_f + F_w = \frac{1}{2}\rho AC_D v^2 + f_r mg \quad (\text{无坡}) \end{cases}$$

式(1)、(2)中, F_i 为电动汽车牵引动力, 由电池提供动力源, F_r 为电动汽车行驶的综合阻力, F_w 为空气阻力, F_f 为滚动摩擦阻力, F_i 为坡道阻力, 单位均为 N; $\Delta v / \Delta t$ 为单位时间内速度的变化量, m/s^2 ; m 为汽车的整车质量, kg ; α 为坡度, $(^\circ)$; f_r 为滚动阻力系数; C_D 为风阻系数; A 为汽车迎风面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 。由式(1)和(2)通过相应的计算可以得到任意工况下汽车的驱动牵

引动力和综合阻力。

1.2 牵引动力分配

电动汽车行驶性能主要体现在两个方面: 动力性能和经济性能^[11]。动力性能指汽车的最高车速、加速能力及爬坡能力^[12]; 经济性能指正常匀速行驶的续航能力。双电混合驱动的电动汽车正是基于这一理念来设计的, 通过提供瞬时高扭矩的峰值电源和持久恒功率输出的主力电源两种电池组合的系统供电来满足不同阻力负载的需求, 即根据不同路况和行驶状态对牵引功率的需要, 对单一供电和混合供电的方式进行选择以满足电动汽车需要的有效动力输出。图2是双电混合电动汽车的动力分配原理图。

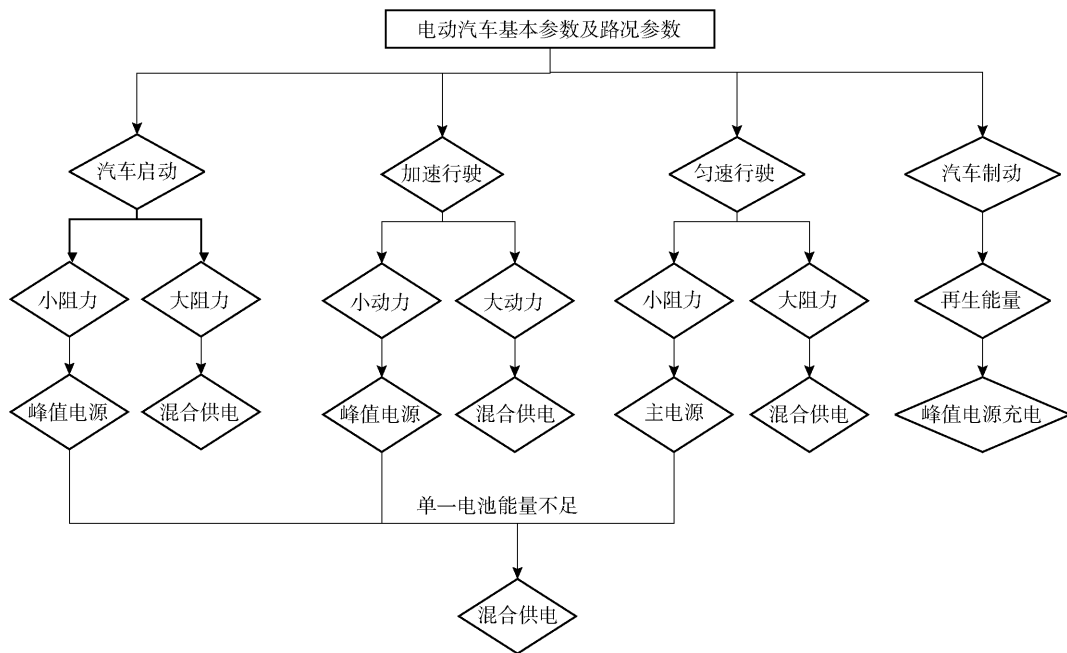


图2 双电混合电动汽车的电池动力分配原理

Fig. 2 The principle of power distribution for a dual-battery hybrid electric vehicle

2 实验部分

2.1 测试平台及运行原理

基于1.1节对电动汽车行驶过程中的牵引驱动和受力状态的分析, 设计构建了一种能够用于模拟电动汽车运行状态的电池动力性能测试平台, 如图3所示。该平台包括提供驱动牵引动力和综合负载阻力的机械传动系统、PLC控制系统、混合电池系统、上位机 Fameview 数据采集处理系统。

平台采用由混合电源驱动的直流伺服电机来模

拟电动汽车行驶过程中的牵引动力, 控制模式为速度控制; 模拟综合负载阻力由负载伺服电机提供, 控制模式为扭矩控制。平台通过改变牵引电机的不同模拟速度及对应的负载电机扭矩值, 来实现对电动汽车行驶过程的工况模拟。负载电机的扭矩设定值依据式(3)计算得到

$$T = F_r r_d \quad (3)$$

式(3)中, r_d 为模拟电动汽车的车轮滚动半径, mm ; T 为负载电机根据模拟阻力需要输出的阻力扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

被测混合电池系统包括主动力电源和峰值电

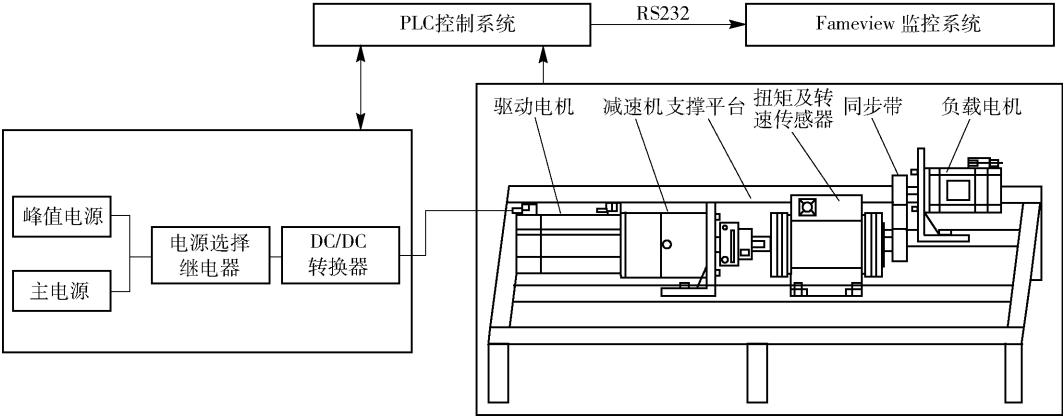


图 3 测试平台示意图

Fig.3 Test platform schematic

源,分别用于匀速低负载驱动和启动、加速、爬坡等高负载驱动。平台通过上位机 Fameview 监控系统设定模拟电动汽车的外形尺寸参数、路面工况及行驶状态,并以 PLC 为主控单元控制相应的牵引电机及负载电机的运行,通过 A/D 转换及高数计数模块将采集的电压、电流、转速、扭矩等参数传输至 Fameview 监控系统进行相应的数据处理,得到电池性能评价的测量结果。

2.2 评价方法

选定某种型号的电动汽车,当外形尺寸参数和行驶的工况条件确定时,由式(1)~(3)得到电动汽车的牵引动力、综合阻力及负载电机输出的扭矩。通过上位机 Fameview 测试系统对不同工况的参数设定后进行实验,得到实验过程中电池实时消耗的电压、电流以及速度、扭矩等相关参数后,由公式(4)分别得到电池累计输出能量、累计牵引电机消耗能量、累计牵引电机功率、电池输出效率、电池每公里耗能以及电池单位时间电压变化率等测量结果。

$$\left\{\begin{aligned}W_{(total)B} &= \int_0^t U_t I_t dt \\W_{(total)M} &= \int_0^t P_t dt = \int_0^t \frac{T}{9\,550 i n_t} dt \\ \eta_0 &= \frac{W_{(total)M}}{W_{(total)B}} \times 100\% \\ Q &= \frac{W_{(total)B}}{S_{(total)B}} \\ R_V &= \frac{\Delta V}{t_c}\end{aligned}\right. \quad (4)$$

式(4)中, $W_{(total)B}$ 为累计电池输出能量,kW·h; U_t 为电池实时输出电压,V; I_t 为电池实时输出电流,A;

$W_{(total)M}$ 为累计牵引电机消耗能量,kW·h; P_t 为牵引电机所消耗的功率,kW; T 为扭矩传感器实时测量值,N·m; n_t 为牵引电机不同阶段实时输出转速,r/min; i 为传动机构的减速比; t 为对应不同牵引转速的电池工作时间,h; η_0 为电池的动力输出效率; $S_{(total)B}$ 为汽车各个转速下行驶的总里程,km; ΔV 为计量时间内消耗的电压,V; t_c 为计量时间,h; Q 为每公里消耗的瓦时量电池的耗电能力,kW·h/km,相当于燃油车的百公里耗油量,同样工况下 Q 值越小说明汽车续航能力越强; R_V 为两小时内的电压变化率,V/h,同样工况下 R_V 越小说明该区间段电池有效输出性能越好。由此可以对电池在不同工况下的动力输出效率和续航能力进行快速有效的评价,同时根据电池具体情况,通过改变电动汽车技术参数得到最佳的动力输出效率。

2.3 测试及结果分析

2.3.1 测试条件

本文对匀速工况下主动力源电池耗损情况进行实验分析和模拟。表 1 是模拟电动汽车的外形尺寸参数,表 2 为测试工况及相关参数。

表 1 电动汽车部分技术参数

Table 1 Some technical parameters of the electric vehicle

参数	数值
长×宽×高/mm×mm×mm	4 478×1 717×1 334
整车整备质量/kg	1 380
轴距/mm	2 600
轮胎滚动半径 r_d /mm	282
迎风面积/(A·m ⁻²)	2.0
空气阻力系数 C_D	0.3
滚动摩擦系数 f_r	0.01
主减速比 i	8.0

表 2 测试工况及负载

Table 2 The working conditions and resistance			
$n_t/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	F_t/N	$T/(\text{N}\cdot\text{m})$	t/h
1 000	140.24	39.55	2
1 500	146.50	41.31	2
2 000	155.26	43.78	2
2 500	166.52	46.96	2
3 000	180.28	50.84	2

根据表 1 电动车外形尺寸的设置和表 2 中牵引电机转速和负载电机扭矩的工况条件在测试平台上进行测试实验,对表 2 中所有的工况进行了相应实验,通过采集系统得到数据并根据公式(4)得到电池的相应性能参数。由于不同工况下的负载不同,电池输出特性不同,本文以 1 000 r/min 匀速运行工况为例分析不同电压区间的电池电压变化率与相应有效能量输出的关系。

2.3.2 结果分析

根据 2.3.1 节设定的技术参数和测试工况对锂电池进行性能测试实验。图 4(a)为电池在有效工作电压范围内以 1 000 r/min 匀速运行时锂电池不同容量对应的两小时电压变化率;图 4(b)为 1 000 r/min 匀速行驶工况下通过实验得到的不同电压区间内的累积输出能量和有效工作时间。

由图 4(a)、(b)可以看出,对应 1 000 r/min 匀速行驶速度,锂电池在最佳输出电压段(48 ~ 46 V)内的输出电压变化率最小,有效输出能力最好,累计输出的能量最多;在不变牵引功率(1 000 r/min 匀速)下可以行驶更多的时间。这说明锂电池在同一负载不同电压区间释放的能量不同,存在一个输出效率最高的电压区间;同时也说明随着锂电池容量和电动汽车行驶工况不同,电动汽车最优行驶策略也不同,需要根据实际工况改变策略才能得到锂电池的最大有效能量输出和最大续航里程。另外由图 4 还可以看出,电池的单位时间电压变化率在不同电压区间存在差异,并呈现了先减小后增大的趋势,这与电池有效输出能量变化存在一定的对应关系,说明电池单位时间内电压变化率可以作为预测和判断对应工况下电池持续有效输出能力和续航时间的依据之一。

3 软件模拟及结果分析

在实验测试的基础上,本文利用电动汽车模拟软件 ADVISOR^[13]对测试平台实验中的同一车型和

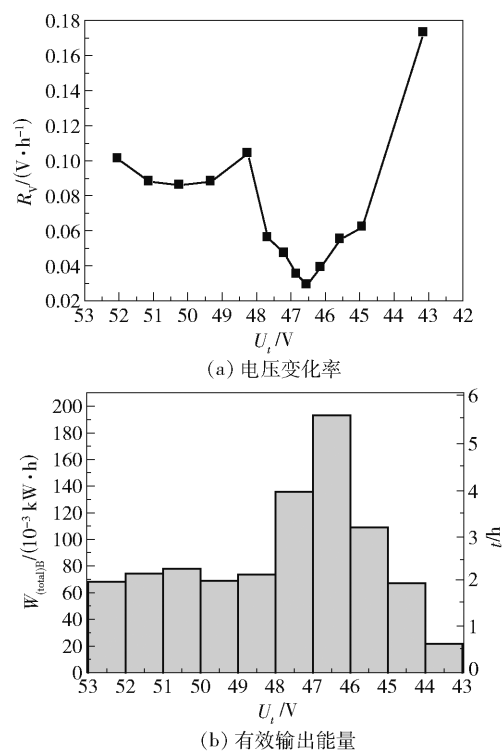


图 4 锂电池不同电压区间的有效输出特性

Fig. 4 Effective output characteristics of different voltage ranges for lithium batteries

工况进行模拟,模拟条件与实验相同。通过 ADVISOR 得到相应模拟数据后,将实验结果和模拟结果进行归一化处理,得到不同行驶速度下每公里消耗能量的输出变化曲线如图 5 所示。

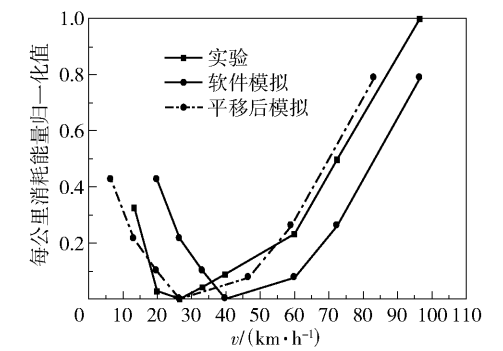


图 5 能量消耗率变化的实验和模拟比较

Fig. 5 Energy consumption rate at each driving speed

由图 5 可知,ADVISOR 模拟与实验测试得到的电池能量消耗随行驶速度的变化趋势基本一致,并且电动汽车行驶过程都存在一个最佳行驶速度,该速度下电池每公里消耗的能量最小,表明利用测试平台进行电动汽车实验测试的方法可行。将模拟曲线平移后可以看出,实验和模拟结果在局部存在差异,这是由于受测试平台中的直流牵引伺服电机和

交流负载伺服电机的功率限制,测试平台所能模拟的工况有限,导致二者得到的最佳速度出现在不同的区间。另外,ADVISOR 模拟的电动汽车传动机构复杂,引起能量损失的因素较多,而测试平台实验过程中考虑的能量损失因素较少,从而使每公里消耗能量变化率的模拟值比实验测试值略有增大。由此得出测试实验平台还需考虑更多的影响因素才能使实验结果更准确。

4 结论

(1)测试平台上的电池性能实验测试结果与利用 ADVISOR 模拟得到的结果相符合,说明本文所构建的电动汽车电池性能测试平台及测试方法是实用可行的。

(2)在同一负载下电池的输出存在最佳输出区间,该区间内电池输出的能量最多,有效工作时间最长,相应的电动汽车的续航里程最长。据此可参照制定不同容量电池在不同负载下获得最大里程的行驶策略。

此外本文只进行了匀速部分实验,今后的研究过程中还需对电动汽车在启动、加速及制动等不同行驶工况下的供电电池输出特性进行实验和模拟。同时,还有必要根据两个电池实时在线电池容量的变化来对双电池同时供电时的电池性能进行评价,不断完善其测试评价方法。

参考文献:

- [1] WU Y, ZHANG L. Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? [J]. Transportation Research Part D, 2017, 51: 129–145.
- [2] KUMAR M S, REVANKAR S T. Development scheme and key technology of an electric vehicle: an overview [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 70: 1266–1285.
- [3] 夏正鹏,汪兴兴,倪红军,等. 电动汽车电池管理系统研究进展[J]. 电源技术, 2012, 36(7): 1502–1504.
XIA Z P, WANG X X, NI H J, et al. Research progress of electric vehicle battery management system [J]. Power Technology, 2012, 36(7): 1502–1504. (in Chinese)
- [4] 唐哲慈,郭春林,贾东明,等. 电动汽车动力电池测试、建模与仿真[J]. 电源技术, 2015, 39(12): 2612–2615.
TANG Z C, GUO C L, JIA D M, et al. Electric vehicle power battery testing, modeling and simulation [J]. Power Technology, 2015, 39(12): 2612–2615. (in Chinese)
- [5] 何洪文,孙逢春,张晨光,等. 锂离子动力电池充放电特性的试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2002, 22(5): 579–581.
HE H W, SUN F C, ZHANG C G, et al. An experimental study on the charging and discharging characteristics of li-ion traction battery [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(5): 579–581. (in Chinese)
- [6] 张松通,李萌,邱景义,等. 锂离子电池大倍率放电热特性研究[J]. 电源技术, 2016, 40(11): 2132–2133.
ZHANG S T, LI M, QIU J Y, et al. Study on thermal properties of high-power lithium ion battery discharging at high rate [J]. Power Technology, 2016, 40(11): 2132–2133. (in Chinese)
- [7] 许涛,宫璐,方雷,等. 锂离子电池自放电的研究进展[J]. 电池, 2016, 46(1): 49–51.
XU T, GONG L, FANG L, et al. Research progress in self-discharge of Li-ion battery [J]. Battery Bimonthly, 2016, 46(1): 49–51. (in Chinese)
- [8] EHSANI M, GAO Y M, EMADI A, 等. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计[M]. 倪光正,倪培宏,熊素铭,译. 2版. 北京:机械工业出版社, 2010: 18–23.
EHSANI M, GAO Y M, EMADI A, et al. Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles [M]. NI G Z, NI P H, XIONG S M, Trans. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2010: 18–23. (in Chinese)
- [9] 王兴,秦东晨,裴东杰. 电动汽车动力性能仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2012(12): 114–115.
WANG X, QIN D C, PEI D J. Simulation and analysis of dynamic performance of electric vehicle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(12): 114–115. (in Chinese)
- [10] 伍庆龙,冷宏祥,沈延. 电动汽车动力性及续航里程仿真研究[J]. 新能源汽车, 2012(8): 10–14.
WU Q L, LENG H X, SHEN Y. Simulation research on power performance and range of electric vehicles [J]. New Energy Vehicles, 2012(8): 10–14. (in Chinese)
- [11] 刘新. 纯电动汽车动力参数匹配与仿真研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013: 14–18.
LIU X. Study on electric vehicle dynamic parameters matching and simulation [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013: 14–18. (in Chinese)
- [12] 赵新龙. 电动汽车蓄电池性能测试方法研究及试验台开发[D]. 长安:长安大学, 2008: 1–3.

- ZHAO X L. Research on test method of electric vehicle battery performance and development of test bed [D]. Chang'an: Chang'an University, 2008:1-3. (in Chinese)
- [13] 雷宵,戴朝华,陈维荣,等. 基于 ADVISOR 的燃料电池混合动力机车建模与仿真[J]. 电源技术, 2015, 39(12):2643-2646.
- LEI X, DAI C H, CHEN W R, et al. Dynamic modeling and simulation of fuel cell hybrid locomotives based on ADVISOR[J]. Power Technology, 2015, 39(12):2643-2646. (in Chinese)

Research on evaluation method of electric vehicle's dynamic performance based on battery output characteristics

XU Hong¹ FU HongBo¹ DONG WeiLing² YANG ChenMing¹ WU DaMing^{1*} ZHU Hong³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Beiqi Foton Motor Co. Ltd., Beijing 102200; 3. Faculty of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Based on the load analysis of electric vehicles under different working conditions, this work employs a DC servo motor as the battery-driven active traction motor and an AC servo motor as the load resistance motor under different working conditions in order to build an analog dual battery based on the PLC control core. The hybrid traction electric vehicle battery performance test platform simulates the load resistance and driving conditions allowing experimental research on the battery power output performance of the battery-powered electric vehicle under constant driving conditions to be carried out. The vehicle simulation software ADVISOR was used to simulate and analyze data obtained under the same working conditions. The results show that there is a working area with the maximum effective output during the discharge process of the lithium battery. The voltage change rate per unit time can be used as a basis for predicting and judging the continuous effective output and battery life of the battery under the corresponding operating conditions. The software simulation analysis and experimental test results are consistent, indicating the reliability of the test platform.

Key words: battery output characteristics; double battery hybrid power; traction power simulation of vehicle; resistance simulation of road conditions; battery voltage change rate

(责任编辑:汪 琴)