

文章编号:1000-582X(2009)03-0279-04

混合动力汽车镍氢电池组的充放电效率分析

胡明辉,秦大同

(重庆大学 机械工程学院,重庆 400030)

摘要:以 6.5 A·h/144 V60QNY6.5 镍氢电池组为对象进行效率分析,搭建了混合动力汽车镍氢电池组综合性能实验台,进行了电池组充放电性能实验测试与数据分析;基于镍氢电池组性能实验结果,并考虑电池组环境温度,利用拟合技术得到了镍氢电池内阻与电动势的理论计算模型;结合电池与电机联合工作原理,提出了镍氢电池组效率的理论计算模型,为混合动力汽车系统控制策略的动态优化技术提供了理论基础。

关键词:混合动力汽车;镍氢电池;充放电效率

中图分类号:TM912.1

文献标志码:A

The efficiency of a Ni-MH battery used in hybrid vehicles

HU Ming-hui, QIN Da-tong

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: The efficiency of the 60QNY6.5 battery is studied by testing and theoretical analysis in order to improve the control precision of hybrid electric vehicles (HEVs) and the battery useful life. A rig for testing the Ni-MH batteries of HEVs is established. The data from experiments performed on the Ni-MH battery are analyzed. Based on the experimental results and the temperature of the batteries, internal resistance and electromotance models of Ni-MH batteries are proposed by function-fitting methods. The theoretic formula for battery efficiency is deduced by the operational principle of the battery and motor, which provides theoretical basis for dynamic optimizing technology of HEV system controlling strategy.

Key words: hybrid electric vehicles (HEVs); Ni-MH battery; efficiency

蓄电池作为混合动力及电动汽车的关键部件,其充放电效率直接影响到系统的能量优化结果及电池组的使用寿命。目前,国内外混合动力汽车研究大多集中在电池荷电状态(state of charge, SOC)及电池管理系统(battery management system, BMS)的研究^[1-4],对电池充放电效率的研究较少。大多文献认为混合动力汽车电池组 SOC 工作范围中内阻变化不大,电池充放电效率基本上是恒定不变的,忽略了电池充放电功率、环境温度和 SOC 变化对其效率的影响^[5-9]。因此,笔者将以蓄电池性能实验为基

础,利用理论推导得到其效率的变化规律。

1 蓄电池充放电性能实验

镍氢电池充放电性能实验测试系统原理如图 1 所示。美国 ARBIN 电动汽车电池测试系统用于电池充放电电流的控制,既可以输出功率,也可以吸收功率,同时对实验过程中的充放电总电流和总电压进行监控,还可以按设定的实验条件对充放电过程进行安全保护。电池温度采集系统用于电池单体温度测试(温度传感器量程: -30~+100 °C,其测量

收稿日期:2008-11-08

基金项目:国家 863 计划重大专项资助项目(2006AA11A107);重庆市科技攻关重大专项资助项目(CSTC 2006AA6006)

作者简介:胡明辉(1975-),男,重庆大学博士,主要从事混合动力传动系统的研究。

秦大同(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)dtqin@cqu.edu.cn。

精度: $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

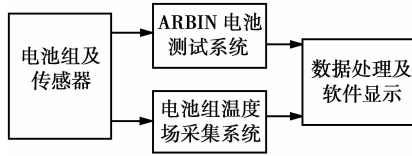
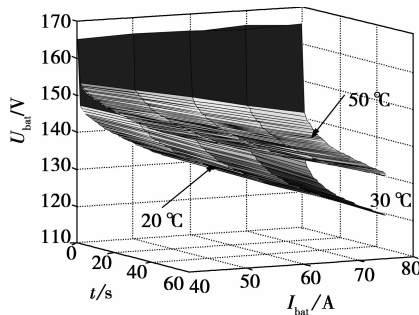


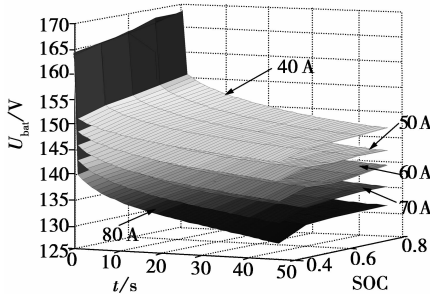
图 1 电池实验测试系统原理图

由于镍氢电池有强烈的非线性特性,其充放电效率受到多种因素影响,如电池的充放电电流、SOC、温度等,因此难于用传统意义上的公式来描述^[10-13]。笔者将在电池充电性能实验的基础上,综合考虑电池的充放电电流、SOC、温度等多种因素,采用数表和公式拟合的方法建立合理精确的电池效率模型。

笔者以 60QNY6.5 型镍氢电池为测试对象,在不同环境温度条件下,分别进行不同电流恒流充放电测试,初始 SOC 分别为 0.8、0.7、0.6、0.5、0.4, SOC 为 0.5 时不同环境温度下放电端电压 U_{bat} 试验曲面如图 2(a)所示,环境温度为 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不同放电电流的电池端电压 U_{bat} 试验曲如图 2(b)所示。可以看出,随着环境温度升高电池组端电压升高;随着电池组电流增大端电压降低;SOC 的变化对电池组端电压影响不大。



(a) SOC 为 0.5



(b) 环境温度 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 2 电池端电压曲面

2 蓄电池电动势与内阻模型建立

为了建立电池组效率模型,首先需要建立蓄电池电动势与其内阻数学模型。电池端电压 U_{bat} 、内

阻 $R_{\text{SOC},T}$ 与电动势 $E_{\text{SOC},T}$ 之间的关系为

$$U_{\text{bat}} = E_{\text{SOC},T} - R_{\text{SOC},T} \times I_{\text{bat}}, \quad (1)$$

式中 I_{bat} 为电池组充放电电流, A。通过图 2, 可查出不同放电电流下相同环境温度和 SOC 时的电池端电压。

电池组内阻计算可参考文献^[14-15], 这里考虑了环境温度对电池内阻的影响, 因此原有计算式改进后变成:

$$R_{\text{SOC},T} = b_{\text{SOC},T} \frac{E_{\text{SOC},T}}{I_{\text{bat}}} + \frac{l_{\text{SOC},T}}{\text{SOC}}, \quad (2)$$

式中 $b_{\text{SOC},T}$ 、 $l_{\text{SOC},T}$ 为随 SOC 和环境温度 T 变化的系数。

将 20、60、80 A 恒流放电的电池端电压代入式(1)(2)中, 在相同的 SOC 和相同的环境温度下可得:

$$\left. \begin{aligned} E_{\text{SOC},T} &= U_{\text{bat}_{80}} + b_{\text{SOC},T} \times E_{\text{SOC},T} + 80 \frac{l_{\text{SOC},T}}{\text{SOC}}, \\ E_{\text{SOC},T} &= U_{\text{bat}_{60}} + b_{\text{SOC},T} \times E_{\text{SOC},T} + 60 \frac{l_{\text{SOC},T}}{\text{SOC}}, \\ E_{\text{SOC},T} &= U_{\text{bat}_{20}} + b_{\text{SOC},T} \times E_{\text{SOC},T} + 20 \frac{l_{\text{SOC},T}}{\text{SOC}}. \end{aligned} \right\} (3)$$

式中: $U_{\text{bat}_{80}}$ 、 $U_{\text{bat}_{60}}$ 、 $U_{\text{bat}_{20}}$ 表示在相同 SOC 和相同的环境温度下, 分别以 80、60、20 A 恒流放电时, 电池端电压, V; $l_{\text{SOC},T}$ 为环境温度和 SOC 影响的多项式。

对于相同的 SOC 和相同的环境温度条件下, 电池具有相同的电动势, 由式(3)可得出 l_{SOC,T_1} 、 l_{SOC,T_2} 和 l_{SOC,T_3} , 由于环境温度对 $l_{\text{SOC},T}$ 的影响主要来自于环境温度对电池额定容量的影响, 所以可以分别考虑 SOC 和环境温度对系数 $l_{\text{SOC},T}$ 的影响, 从而得到 $l_{\text{SOC},T}$ 的多项式拟合公式

$$l_{\text{SOC},T} = \left(\sum_{i=0}^2 l_{T_i} \times T^i \right) \times \sum_{i=0}^3 l_{\text{SOC}_i} \times \text{SOC}^i, \quad (4)$$

式中: l_{T_i} 为环境温度影响的多项式拟合系数; l_{SOC_i} 为 SOC 影响的多项式拟合系数。

根据 SOC=1 和 SOC=0 时的极限电动势, 可计算出电池放电时 $b_{\text{SOC},T}$ 的线性近似关系:

$$b_{\text{SOC}} = (C_{\text{bat}} - k_{\text{bat}}(\text{SOC} - \text{SOC}_{\text{bat}0}))(\tau_{\text{bat}} T - \tau_0), \quad (5)$$

式中 C_{bat} 、 k_{bat} 、 $\text{SOC}_{\text{bat}0}$ 、 τ_{bat} 、 τ_0 均为常数。

最后可以得到电池电动势随 SOC 和环境温度的变化关系

$$E_{\text{SOC},T} = (\lambda T + \lambda_0) \left(E_0 + \sum_{i=1}^5 E_i \text{SOC}^i \right), \quad (6)$$

式中: λ 、 λ_0 均为蓄电池电动势的温度系数; E_0 为蓄电池的电动势常数; E_i 为拟合系数。

根据上述电池电动势和内阻模型, 可以得到蓄电池电动势与环境温度、SOC 的变化趋势如图 3 所

示,与实验测试误差在-2~2 V,说明所建立的电池电动势模型是准确合理的。蓄电池内阻与环境温度、SOC 的变化趋势如图 4 所示,与实验误差在-0.05~+0.05 Ω,说明所建立的电池内阻模型也是准确合理的。

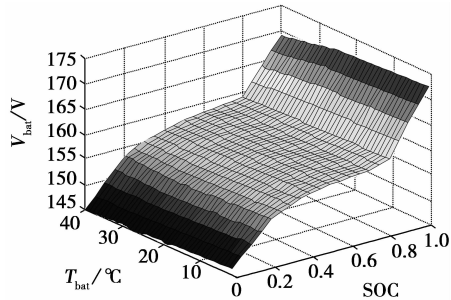
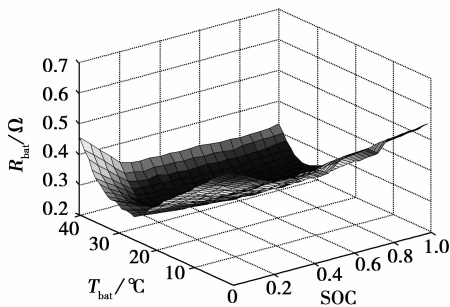
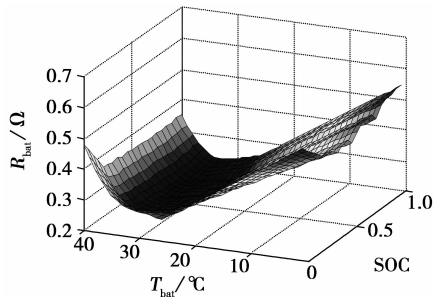


图 3 蓄电池组温度、SOC 和电动势的关系



(a) 蓄电池放电



(b) 蓄电池充电

图 4 蓄电池内阻与温度、SOC 的关系

由图 3 可以看出,电池电动势随 SOC 变化较大,随温度变化不大;而电池内阻随温度变化较大,随 SOC 变化不大。

3 蓄电池充放电能量效率模型建立

图 5 是电池与电机共同工作原理图。

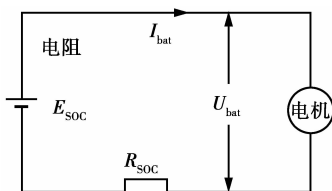


图 5 电池与电机共同工作原理

由图 5 可知,电机功率为

$$P_m = I_{bat} \times U_{bat}, \quad (7)$$

式中 P_m 为电机电动或发电功率,kW。

由式(1)和(7)可得回路电流

$$I_{bat} = \frac{E_{SOC,T} - \sqrt{E_{SOC,T}^2 - 4 \times R_{SOC,T} \times P_m}}{2 \times R_{SOC,T}}. \quad (8)$$

而蓄电池放电输出的功率或充电吸收的功率可由其电动势与电流之积表示:

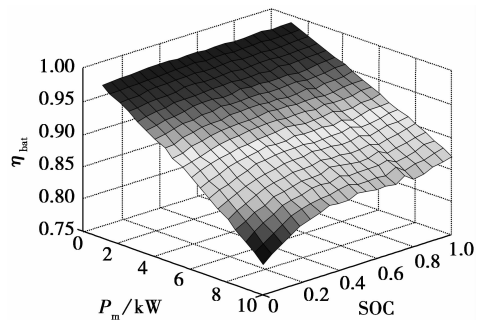
$$P_{bat} = \left(\frac{E_{SOC,T} - \sqrt{E_{SOC,T}^2 - 4 \times R_{SOC,T} \times P_m}}{2 \times R_{SOC,T}} \right) E_{SOC,T}. \quad (9)$$

综上所述,蓄电池的充放电效率分别为:

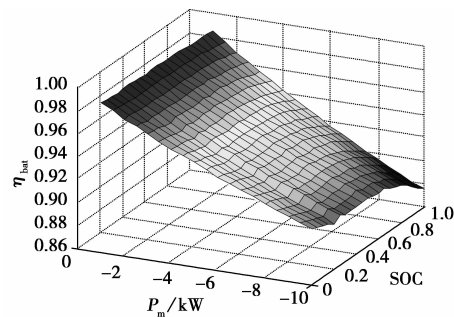
$$\eta_{bat_charge} = \frac{(E_{SOC,T} - \sqrt{E_{SOC,T}^2 - 4P_m R_{SOC,T}}) E_{SOC,T}}{2P_m R_{SOC,T}}, \quad P_m < 0; \quad (10)$$

$$\eta_{bat_discharge} = \frac{2P_m R_{SOC,T}}{(E_{SOC,T} - \sqrt{E_{SOC,T}^2 - 4P_m R_{SOC,T}}) E_{SOC,T}}, \quad P_m > 0. \quad (11)$$

根据蓄电池效率计算公式(10)和(11),可知蓄电池效率与电机功率、蓄电池 SOC、温度等相关,在环境温度为 25 °C 条件下电池充放电效率与电机功率、蓄电池 SOC 的关系如图 6 所示,可以看出电机电动/发电功率对蓄电池的效率影响较大。



(a) 蓄电池放电



(b) 蓄电池充电

图 6 电池效率与 SOC、电机功率的关系图

蓄电池的电动势、内阻、端电压都受到蓄电池环境温度的影响,特别是蓄电池的内阻和端电压对环境温度的敏感性高,因此环境温度对蓄电池充放电

效率影响也很大。SOC为0.5条件下电池充放电效率与电机功率、环境温度的关系如图7所示。可以看出环境温度在35℃时电池效率达到最高。

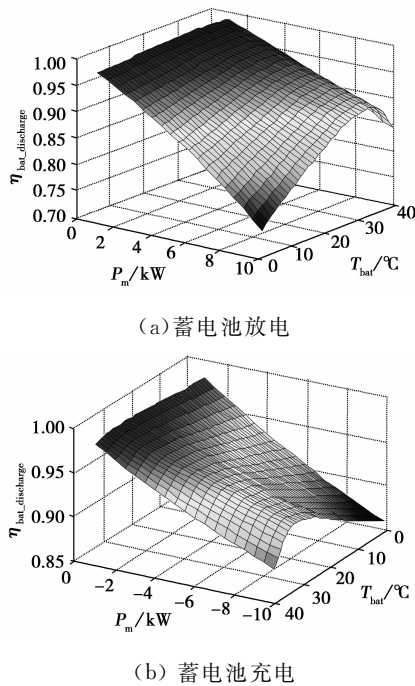


图7 蓄电池充放电效率与温度、电机功率的关系

4 结论

电池组效率模型的精度对混合动力汽车控制策略的动态优化和电池工作寿命有着很大的影响,笔者综合考虑电机电动/发电功率、环境温度和蓄电池SOC变化对电池性能的影响,提出了镍氢电池组的效率计算模型。下一步研究重点是考虑电池组效率和其工作温度,进行混合动力系统控制策略与电池能量管理策略联动的整车高动态控制策略优化。

参考文献:

- [1] 吴红杰, 齐铂金, 郑敏信, 等. 基于 Kalman 滤波的镍氢动力电池 SOC 估算方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(8): 7-11.
WU HOHNG-JIE, QI BO-JIN, ZHENG MIN-XIN, et al. Ni-MH battery state-of-charge estimation based on Kalman filter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(8): 7-11.
- [2] HE H W, PENG L Y, SUN F C. Analysis of DMFC/battery hybrid power system for portable applications[J]. Journal of Power Sources, 2004, 131(1): 207-212.
- [3] 卢居霄, 林成涛, 陈全世, 等. 三类常用电动汽车电池模型比较研究[J]. 电源技术, 2006, 30(7): 535-538.
LU JU-XIAO, LIN CHENG-TAO, CHEN QUAN-SHI, et al. Comparison study of 3 types of battery models for electrical vehicle[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(7): 535-538.
- [4] 钟静宏, 张承宁, 张旺. 电动汽车的铅酸蓄电池快速脉冲充电系统[J]. 电源技术, 2006, 30(6): 504-506.
ZHONG JING-HONG, ZHANG CHENG-NING, ZHANG WANG. The research about quick pulse charge system of lead-acid battery for electric vehicle [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2006, 30(6): 504-506.
- [5] NIELS J S, MUTASIM A S, NAIM A K. Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic[J]. Control Engineering Practice, 2003(11): 171-177.
- [6] FUKUNAGA H, KISHIMI M, OZAKI T, et al. Non-foam nickel electrode with quasi-three-dimensional substrate for Ni-MH battery[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2005, 152(1): 126-131.
- [7] 吴剑, 张承慧, 崔纳新. 基于粒子群优化的并联式混合动力汽车模糊能量管理策略研究[J]. 控制与策略, 2008, 23(1): 46-50.
WU JIAN, ZHANG CHENG-HUI, CUI NA-XIN. Fuzzy energy management strategy of parallel hybrid electric vehicle based on particle swarm optimization[J]. Control and Decision, 2008, 23(1): 46-50.
- [8] LIN C C, PENG H E, GRIZZLE J W. Power management strategies for a parallel hybrid electric truck[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 38(11): 839-849.
- [9] 王庆年, 郑君峰, 王伟华. 一种新的并联混合动力客车的自适应控制策略[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2008, 38(2): 249-253.
WANG QING-NIAN, ZHENG JUN-FENG, WANG WEI-HUA. New adaptive control strategy of parallel hybrid electric bus[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(2): 249-253.
- [10] BITSCHKE O, GUTMANN G. Systems for hybrid cars [J]. Journal of Power Sources, 2004, 127(1/2): 8-15.
- [11] 苏玉刚, 夏永峰, 陈强, 等. 电动汽车用铅蓄电池组的智能充电[J]. 重庆工学院学报: 自然科学, 2008, 22(2): 6-9.
SU YU-GANG, XIA YONG-FENG, CHEN QIANG, et al. Intelligent charge method of VRLA batteries for electrical vehicles[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology: Natural Science, 2008, 22(2): 6-9.
- [12] JONG-SEOB W, LANGARI R, EHSANI M. An energy management and charge sustaining strategy for a parallel hybrid vehicle with CVT[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(2): 313-320.
- [13] ALAOUI C, SALAMEH A M. A novel thermal management for electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 313-320.
- [14] MORITA K. Automotive power source in 21st century [J]. JSAE Review, 2003, 24(1): 3-7.
- [15] SZUMANOWSKI A. 混合电动车辆基础[M]. 陈清泉, 孙逢春, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.

(编辑 张 苹)