

基于神经网络的磷酸铁锂电池 SOC 预测研究*

尹安东^{1,2} 张万兴¹ 赵 韩^{1,2} 江 昊^{1,2}

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省汽车技术与装备工程研究中心, 合肥 230009)

摘 要: 利用神经网络进行了电动汽车用的磷酸铁锂(LiFePO₄)电池荷电状态(state of charge, SOC)预测研究。在分析磷酸铁锂电池充放电机理的基础上, 采用levenberg-marquardt (LM)算法建立了磷酸铁锂电池的BP (back propagation)神经网络模型, 并进行了电池 SOC 值的预测。结果表明, 基于神经网络的电池 SOC 预测方法具有较高的精度, 可用于预测磷酸铁锂电池的 SOC 值。

关键词: 电动汽车; 磷酸铁锂电池; 荷电状态(SOC); 神经网络; 预测

中图分类号: TM912

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 510.4130

Research on estimation for SOC of LiFePO₄ Li-ion battery based on neural network

Yin Andong^{1,2} Zhang Wanxing¹ Zhao Han^{1,2} Jiang Hao^{1,2}

(1. School of Machinery and Automobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Research Center for Automotive Technology & Equipment Engineering, Hefei 230009, China)

Abstract: The state of charge (SOC) of LiFePO₄ Li-ion battery for electric vehicle was estimated by neural network. Based on the electrochemical mechanism of LiFePO₄ Li-ion batteries during charge and discharge, a back propagation (BP) neural network model was built up using Levenberg-Marquardt(LM). The neural network model was used to estimate SOC of LiFePO₄ Li-ion battery. The results show that the neural network method is a quite accurate algorithm and can be used in estimation of SOC of LiFePO₄ Li-ion batteries.

Keywords: electric vehicle; LiFePO₄ Li-ion battery; state of charge(SOC); neural network; estimation

1 引 言

电动汽车具有能源利用率高、可以降低二氧化碳的排放甚至实现零排放、噪声小以及能量来源多样化等特点, 已成为汽车工业重要的研究领域之一^[1], 但其动力电池的性能和价格是目下电动汽车推广和产业化的主要“瓶颈”。磷酸铁锂(LiFePO₄)电池使用寿命长、安全性能好、成本低和环境友好将成为电动汽车的理想动力源^[2-4]。

为确保电池性能良好并延长电池使用寿命, 需对其进行必要的管理和控制, 准确地预测电池荷电状态(state of charge, SOC)是电池管理系统中最基本和最首要的任务^[5-7]。目前常用的电池SOC的预测方法有^[8-9]: 开路电压法、安时计量法、内阻法、卡尔曼滤波法等。这些方法大多是通过检测电池的电压、

电流、温度、充放电倍率、电池寿命等参数来推断, 但由于这些电池参数与SOC之间的关系复杂而又非线性, 用传统数学方法建立模型很困难, 且可靠性低。神经网络具有逼近多输入输出参数函数、高度的非线性、容错性和鲁棒性等特点, 对于外部激励能够给出相应的输出, 非常适用于电池SOC值的预测。

采用基于改进算法的BP神经网络方法进行电动汽车电池建模, 预测不同放电电流和不同电压下的LiFePO₄电池SOC值, 从而为新能源汽车的电池管理系统设计与优化提供新的思路。

2 LiFePO₄ 电池工作原理

电动汽车动力电池一般包括: 正极、负极、电

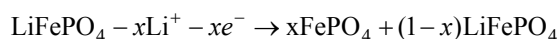
本文于 2011 年 2 月收到。

*基金项目: 国家“863”节能与新能源汽车重大专项(编号: 2008AA11A139)资助项目。

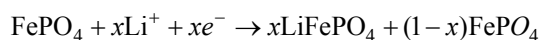
解质、隔膜、正极引线、负极引线、中心端子、绝缘材料、安全阀、密封圈、PTC(正温度控制端子)、电池壳等。LiFePO₄ 电池是用 LiFePO₄ 材料作电池正极的锂离子电池。正极材料 LiFePO₄ 由铝箔与电池正极连接,中间是聚合物的隔膜,将正极与负极隔开,锂离子 Li⁺ 可以通过而电子 e⁻ 不能通过,负极是由碳(石墨)组成的,由铜箔与电池的负极连接。电池的上下端之间是电池的电解质,电池由金属外壳密封封装^[10]。

充电时,正极材料中的锂离子 Li⁺ 从 [FePO₄]⁻ 层迁移出来,经过电解液进入负极材料中,Fe²⁺ 被氧化成 Fe³⁺,电子则经过相互接触的导电剂从外电路到达负极,放电过程与之相反。其反应可表示为

充电:



放电:



3 神经网络的 SOC 预测模型建立

3.1 BP 神经网络结构

应用最广泛的神经网络是 BP(error back propagation)网络^[11],它是三层前馈网络,即输入层,隐含层和输出层,如图 1 所示。

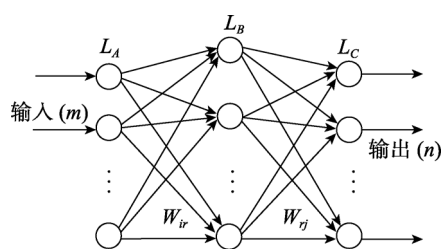


图1 三层PB神经网络结构

Fig. 1 Three-layer BP neural network

输入层 L_A 有 m 个节点,输出层 L_C 有 n 个节点,隐含层 L_B 有 u 个节点, W_{ir} 为输入层神经元到隐含层神经元间的连接权; V_{rj} 为隐含层神经元到输出层神经元间的连接权。隐含层中的节点输出函数为:

$$b_r = f(W^T X - \theta), r=1, \dots, u \quad (1)$$

输出层中节点的输出函数为:

$$c_j = f(V^T B - \varphi), j=1, \dots, n \quad (2)$$

式中: W 为网络输入层神经元到隐含层神经元间的

连接权矩阵; V 为网络隐含层神经元到输出层神经元间的连接权矩阵; θ 为隐含层单元的阈值; φ 为输出层单元的阈值; X 、 B 分别为隐含层节点的输入矢量和输出层节点的输入矢量, b_r 、 c_j 分别为隐含层节点的输出矢量和输出层节点的输出矢量, $f(\cdot)$ 是神经元激活函数。

3.2 BP 神经网络的算法改进

BP神经网络的基本算法是基于梯度下降法,存在着自身的限制和不足,主要表现为训练时间过长,并且容易陷入局部极小值。基于数值优化的 LM (levenberg-marquardt) 算法是 BP 网络的改进算法,可以有效提高网络的收敛速度^[12]。

LM 算法是一种利用标准的数值优化技术的快速算法。鉴于 BP 神经网络的性能函数是网络的均方误差,因而 Hessian 矩阵可以由 Jacobian 矩阵近似得到,即利用式(3)进行估算^[13]:

$$H = J^T J \quad (3)$$

梯度计算公式为:

$$g = J^T e \quad (4)$$

式中: J 为误差函数对权值向量微分的 Jacobian 矩阵,它的元素是网络误差对权值和阈值的一阶导数; e 为网络的误差向量。

在 LM 算法中,网络权值和阈值调整公式为:

$$X_{k+1} = x_k - [J^T J + \mu I]^{-1} J^T e \quad (5)$$

式中: μ 是可以自行调节的非负数,当网络的误差减小时,减小 μ 的值;当网络的误差增大时,增加 μ 的值,这样就能保证网络的性能函数值始终在减小,有效提高网络的收敛速度。

3.3 LiFePO₄ 电池 SOC 预测模型的建立

目前 LiFePO₄ 电池性能估计的数学模型都是基于电池内部所发生反应的物理化学规律建立的,在建模过程中应用了大量的假设条件和经验参数,模型精度有限,且模型的表达式是多参数的偏微分方程组,求解过程十分繁琐。而对于实际工作状态下的电池,其内部反应十分复杂,显然这种方法很难满足实际需要。为了避免 LiFePO₄ 电池内部的复杂性,采用改进算法(LM 算法)的 BP 神经网络建立电池 SOC 预测模型。

根据 Kolmogorov 定理,一个 3 层的前向网络具有对任意精度连续函数的逼近能力,故采用 3 层 BP 神经网络进行 LiFePO₄ 电池 SOC 预测,如图 2 所示。

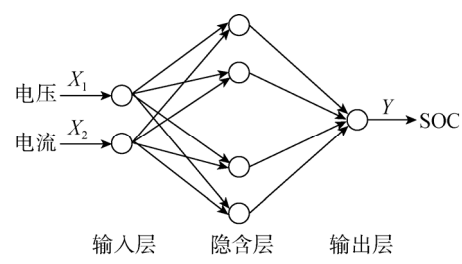


图2 基于BP神经网络的SOC预测模型
Fig. 2 Estimation model for SOC based on BP neural network

图 2 中输入层有 2 个节点, 输入矢量为 $[X_1, X_2]$, 其中 X_1 为电池的放电电流的数值, X_2 为电池放电电压的数值; 输出层只有 1 个节点, 输出矢量为 $[Y]$, 即电池 SOC 值; 经过多次试验后, 发现在隐含层中采用 12 个节点就可以比较准确地描述电池放电电流和放电电压与电池放电容量的相互关系。这里隐含层用 Transig 激活函数, 输入层和隐含层之间用正切 Sigmoid 激活函数, 输出层用 Purelin 线性激活函数。训练函数选取 LM 算法, 训练误差定为 0.001。

4 基于 BP 神经网络模型预测 SOC

4.1 电池测试系统及数据选取

4.1.1 电池测试系统

以商业的 LiFePO_4 电池(3.1 V, 40 A)为测试对象, 在 AVL 公司生产的动力电池性能测试装置上进行测试。电池测试系统结构如图 3 所示, 电池测试系统软件安装在 PC 机上, 软件通过 CAN 线与电池循环系统进行信息交流, 电池的正负极连接在电池循环系统上, 数据采集装置与电池直接连接, 并通过高压转换装置把信号送到数据记录器上, PC 机通过以太网与数据记录器连接。

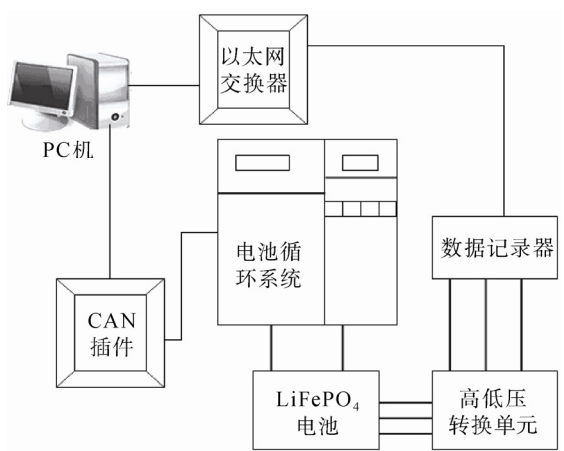


图3 LiFePO_4 电池测试系统
Fig. 3 Test system for LiFePO_4 battery

4.1.2 测试数据选取

在上述测试系统上进行不同恒流放电模式的电池测试, 保持测试的环境温度为 20°C , 电池放电在中等倍率下进行, 使测试过程中 LiFePO_4 电池的容量衰减很少。将电池分别按照 0.5 C、0.7 C、0.95 C、1.45 C 的放电倍率进行放电测试, 在测试过程中设备可以自动记录电池各个参数(电压、电流、放电容量)的变化。为了减小数据差异而对网络训练产生不良影响, 使网络训练更有效, 将所得数据经归一化处理。经处理后得到电池样本数据如表 1 所示。

表1 训练及测试样本数据
Table 1 Data for training and verifying

训练样本			测试样本		
电流/A	电压/V	SOC	电流/A	电压/V	SOC
19	3.582	1.000	38	2.726	0.030
19	3.253	0.983	58	3.123	0.903
19	3.205	0.835	58	3.106	0.728
19	3.199	0.783	58	3.099	0.640
19	3.188	0.626	58	3.083	0.494
19	3.169	0.443	58	3.041	0.290
19	3.162	0.400	58	3.024	0.231
19	3.025	0.104	58	2.886	0.046
28	3.167	0.822	19	3.449	0.999
28	3.157	0.726	19	3.193	0.774
28	3.132	0.453	19	3.180	0.630
28	3.126	0.412	28	3.197	0.959
28	2.869	0.070	28	3.154	0.699
38	3.226	0.992	28	2.879	0.107
38	3.151	0.945	38	3.165	0.963
38	3.120	0.671	38	3.133	0.814
38	3.118	0.634	38	2.885	0.110
38	3.113	0.579	58	3.132	0.935
38	2.985	0.140	58	3.053	0.354

4.2 网络训练与测试验证

4.2.1 网络训练

利用 MATLAB 神经网络工具箱进行 BP 网络搭建与训练^[14-15]。将标准化处理后的训练样本数据(如表 1 所列)输入网络。采用 LM 算法训练网络, 经过 32 个步长的训练, 网络达到精度要求(≤ 0.001), 误差收敛到期望值。训练过程如图 4 所示。

4.2.2 预测结果与实际测试值对比

为了验证电池 SOC 测试网络的准确性, 将测试样本导入网络, 如表 1 所示, 并进行实际测试 SOC 值与预测 SOC 值分析比较, 其结果如图 5 所示。由

图 5 可见: LiFePO_4 电池 SOC 的网络预测结果与实际测试结果较吻合, 其最大绝对误差在 2% 左右, 表明基于改进算法的 BP 神经网络预测 SOC 具有较高的准确性。

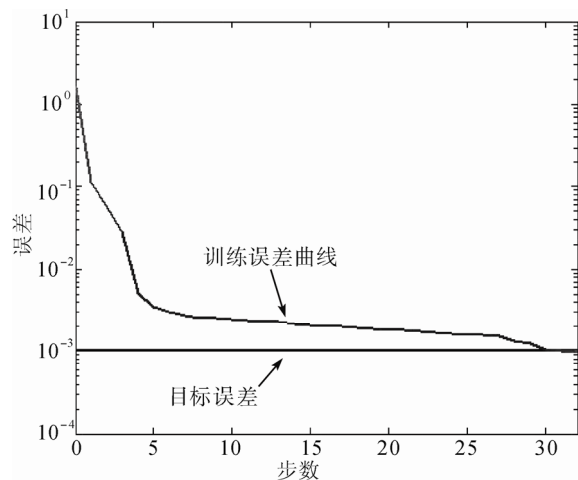


图4 网络训练误差变化曲线

Fig. 4 Curve of training error of network

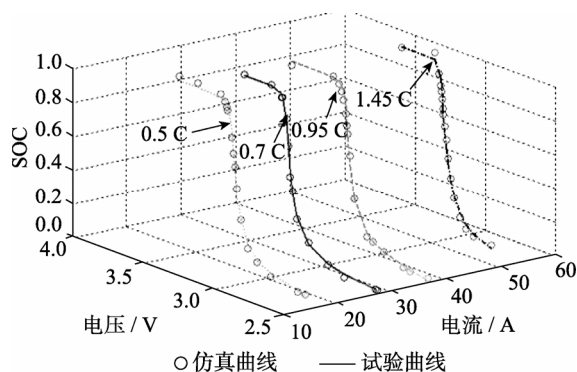


图5 实际SOC曲线与仿真SOC曲线图

Fig. 5 Curves of practical SOC and simulative SOC

为了验证基于改进算法的 BP 神经网络预测 SOC 方法的可行性, 将训练好的网络模型编程后嵌入到 AVL 软件系统, 进行不同放电倍率下的放电测试, 并与实际测试结果进行比较分析。图 6 为任意选取的放电倍率为 1.375 C 情况下 LiFePO_4 电池放电电压与 SOC 变化曲线, 其实际测试 SOC 值与预测 SOC 值误差在 6% 范围内, 表明基于改进算法的 BP 神经网络预测 SOC 方法可行, 并具有良好的预测效果。

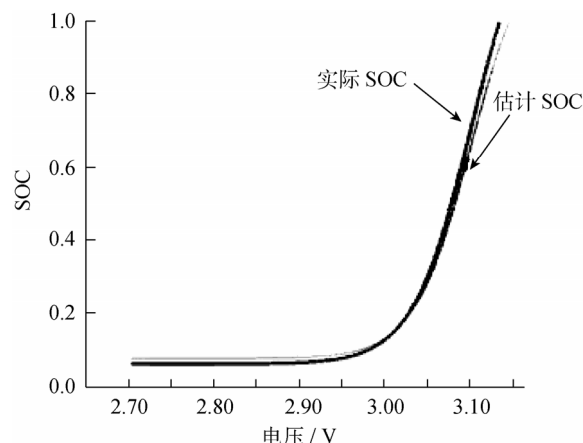


图6 电池放电电压与SOC关系图

Fig. 6 Relation between discharge voltage and SOC

5 结 论

动力电池SOC的预测一直是国内外电动汽车电池管理系统研究的热点。文中建立了基于改进算法的神经网络预测SOC模型, 并应用于 LiFePO_4 电池的SOC预测中, 验证结果表明, 基于改进算法的神经网络预测SOC方法可行, 并具有较高的准确性。

基于改进算法的神经网络预测 SOC 方法, 可以避免解析复杂的物理化学过程与数学方程, 体现出很好的自适应性, 从而为新能源汽车的电池管理提供了一个实用而便捷的新方法。

参考文献:

- [1] 王秉刚. 2010 高技术发展报告[R]. 北京: 中国科学院, 2010: 266-272.
WANG B G. 2010 high technology development report [R]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2010: 266-272.
- [2] 张宾, 林成涛, 陈全世. 电动汽车用 LiFePO_4/C 锂离子电池性能[J]. 电源技术, 2008, 32(2): 95-98.
ZHANG B, LIN CH T, CHEN Q SH. Performance of LiFePO_4/C Li-ion battery for electric vehicle [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2008, 32(2): 95-98.
- [3] 王治华, 殷承良. 电动汽车用 LiFePO_4 锂离子电池安全性分析[J]. 电池工业, 2008, 13(3): 169-172.
WANG ZH H, YIN CH L. Safety performance analysis of LiFePO_4 Li-ion batteries for electric vehicles [J]. Battery Industry, 2008, 13(3): 169-172.

- [4] 赵淑红, 吴锋, 王子冬. 磷酸铁锂动力电池工况循环性能研究[J]. 电子元件与材料, 2009, 28(11): 43-47.
ZHAO SH H, WU F, WANG Z D. Study on operating mode cycle performance of lithium ion power battery with natural graphite and LiFePO₄ [J]. Electronic Components and Materials, 2009, 28(11): 43-47.
- [5] 黎林. 纯电动汽车用锂电池管理系统的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
LI L. Research on Li-ion battery management system in EV [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [6] 文锋. 纯电动汽车用锂离子电池组管理技术基础问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
WEN F. Study on basic issues of the Li-ion battery pack management technology for pure electric vehicles [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.
- [7] 孙丙香. 混合动力汽车用镍氢电池组管理系统研究[D]. 北京: 中国科学院电工研究所, 2009.
SUN B X. Study on NiMH battery management system for hybrid electric vehicles [D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [8] 时玮, 姜久春, 李索宇, 等. 磷酸铁锂电池 SOC 估算方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(8): 769-774.
SHI W, JIANG J H, LI S Y, et al. Research on SOC estimation for LiFePO₄ Li-ion batteries [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(8): 769-774.
- [9] 林成涛, 王军平, 陈全世. 电动汽车 SOC 估计方法原理与应用[J]. 电池, 2004, 34(10): 376-378.
LIN C T, WANG J P, CHEN Q S. Methods for state of charge estimation of EV batteries and their application [J]. Battery, 2004, 34(10): 376-378.
- [10] 赵新兵, 谢健. 新型锂离子电池正极材料 LiFePO₄ 的研究进展[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 69-76.
ZHAO X B, XIE J. Recent development of LiFePO₄ cathode materials for Lithium-ion batteries [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 69-76.
- [11] 齐智, 吴锋, 陈实, 等. 利用人工神经网络预测电池 SOC 的研究[J]. 电源技术, 2005, 29(5): 325-328.
QI ZH, WU F, CHEN SH, et al. Research on forecast of state of charge of battery based on artificial neural network [J]. Power Source Technology, 2005, 29(5): 325-328.
- [12] 韩立群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
HAN L. Theory, design and application of Artificial Neural Network [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [13] 刘倩. 基于人工神经网络的电池容量预测[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(3): 28-31.
LIU Q. Estimation for SOC of MH/Ni battery based on artificial neural network [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(3): 28-31.
- [14] 楼顺天, 姚若玉, 沈俊霞. MATLAB 7.X 程序设计语言(第二版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.
LOU S T, YAO R Y, SHEN J X. MATLAB 7.X procedure design language (The 2nd Ed.) [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronics Science & Technology Press, 2007.
- [15] 许东, 吴铮. 基于 MATLAB 6.X 的系统分析与设计-神经网络(第二版) [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
XU D, W Z. Analysis and design of system based on MATLAB 6.X-neural network (The 2nd Ed.) [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science & Technology Press, 2002.

作者简介:

尹安东: 1982 年于安徽工学院获得学士学位, 2002 年于合肥工业大学获得硕士学位, 2010 年于合肥工业大学获得博士学位。现为合肥工业大学机械与汽车工程学院副教授。主要研究方向为电动汽车控制技术。

E-mail: yin_ad@163.com

Yin Andong: received BS from Anhui Institute of Engineering in 1982, MS from Hefei University of Technology in 2002, and PhD from Hefei University of Technology in 2010, respectively. Now he is an associate professor in School of Mechanical & Automobile Engineering, HFUT. His main research direction is electric vehicle control.

张万兴: 2009 年于合肥工业大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电动汽车控制技术。

E-mail: wsry2008ay@163.com

Zhang Wanxing: received BS from Hefei University of Technology in 2009. Now he is MS candidate of HFUT. His main research direction is electric vehicle control.

赵 韩: 1990 年于丹麦奥尔堡大学获得博士学位, 现为合肥工业大学机械与汽车工程学院, 教授, 博士生导师。主要研究方向为电动汽车设计与控制技术。

E-mail: hanzhao@mail.hf.ah.cn

Zhao Han: received PhD from Danmark Alborg University in 1990. Now he is a professor and PhD supervisor in School of Mechanical & Automobile Engineering, HFUT. His main research directions are electric vehicle design and control.