

基于 Simulink 的锂电池建模仿真

胡勇, 沈汉鑫, 雷桥

(厦门理工学院 电气工程与自动化学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 针对锂离子电池 SOC (荷电状态) 难以估算的问题, 通过对电池建立等效的 Thevenin 电路模型, 对不同时刻的 SOC 的模型参数进行拟合得到动态的模型参数, 在 Matlab 中借助 Simulink 建立仿真模型, 采用模块化结构, 建立基于卡尔曼滤波算法的电池 SOC 估算系统; 利用测得的电池电压电流, 仿真系统可直接估算出实时的电池 SOC, 与实际的电池 SOC 对比, 误差保持在 2.5% 以内, 表明该方法可以有效地估计电池的 SOC, 对于锂离子电池在实际应用的容量估算有着重要意义。

关键词: 锂离子电池; 电池荷电状态; 卡尔曼滤波算法; 电路模型

Lithium Battery Modeling and Simulation Based on Simulink

Hu Yong, Shen Hanxin, Lei Qiao

(School of Electrical Engineering and Automation, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: In terms of the problem that the SOC (State of Charge) of lithium ion battery is difficult to estimate, conduct fitting toward the model parameters of SOC at different moments to get dynamic model parameters through establishing equivalent Thevenin circuit model toward the battery. Establish simulation model in Matlab with the help of Simulink and apply modular construction to establish battery SOC estimation system based on Kalman filtering algorithm; the simulation system can directly estimate the real-time battery SOC with the measured battery voltage and current. Compare with the actual battery SOC and if the error maintains within 2.5%, it indicates that the method can effectively estimate the battery SOC and it is significant for the capacity estimation of lithium ion battery in practical application.

Keywords: lithium ion battery; battery state of charge; Kalman filter algorithm; circuit model

0 引言

锂电池以其高容量、高比容、高安全性、低价格和长寿命等优点, 在电动汽车、信息存储、便携能源、以及电子设备等各种工业领域和日常生活中得到越来越多的应用。电池的荷电状态 (SOC) 作为电池的一个重要参数, 用来描述电池的剩余容量, 电池的荷电状态在电池的使用中有着重要的意义, 直接决定了产品的性能; 同时, 通过电池的荷电状态, 可以更有效地使用电池, 防止电池的过冲过放, 更加安全可靠地使用电池, 大大提高电池的使用寿命, 更加有效地对电池组进行控制和管理, 减少环境的污染的同时还可以提高能量利用率, 因此, 如何准确的估算电池的 SOC 具有重要的意义。

目前, 在电池的荷电状态估算方面国内外已经取得了大量的研究成果, 各种不同的方法都对电池容量的准确估算有了一定的提高, 主要有电池内阻法、开路电压法、安时积分法、卡尔曼滤波法、神经网络法等, 电池的内阻测量法中, 电池内阻有直流电阻和交流电阻两种, 内阻测量法是通过测量电池使用过程中的内阻变化来测量电池的 SOC。用内阻检测时, 当 SOC > 40% 时, 电池内阻几乎没有变化, 在锂电池容量大于 40% 时, 用这种方法很难测量锂电池的 SOC, 不能对单体电池实时准确的在线测量, 且随着电池的使用, 内阻会发生难以

预期的变化, 因此在实际应用中比较少。开路电压法中锂离子电池的电动势与 SOC 之间的函数可以通过实验得出, 虽然锂离子电池线性度不如铅酸电池的明显, 但其对应关系曲线也可以用来估算 SOC。应用开路电压法可以粗略估算电池 SOC, 用来测量时, 需要先将电池经过长时间的静置, 让电池各项数值达到稳定, 无法实现动态实时的测量。卡尔曼滤波法是一种统计学上的方法, 用上一时刻的最优估计值加上此时此刻的测量值计算出均方差最小的状态变量的估计。卡尔曼滤波法可以在估算的过程中很好的去掉噪声污染, 对初始值的误差进行及时的修正, 适用于电池电量的动态在线测量。神经网络是一种对动物神经网络的模仿, 进行分布式并行信息处理的算法数学模型。这种网络依靠系统的复杂程度, 通过调整内部大量节点之间相互连接的关系, 从而达到处理信息的目的。通过大量的数据来进行推理, 拥有非线性优点, 同时建立输入与输出关系, 无需分析电池内部复杂的电化学反应。理论上只要网络的节点足够多, 完全可以用于各种复杂的运算, 但是过于复杂的网络需要强大的硬件支撑, 成本太高。每种方法都有其优缺点以及适用的范围, 其中安时积分法^[1]和开路电压法^[2]应用最为广泛, 和其他的多种算法结合来对电池的 SOC 进行估算。文献 [3] 采用改进的安时积分法和卡尔曼滤波算法来估算电池 SOC, 文献 [4] 采用开路电压法和卡尔曼滤波算法来估算电池 SOC, 文献 [5] 采用开路电压法来解决安时积分法无法测定电池初始 SOC₀ 的问题。

本文选用目前应用最多的等效电路模型, 用一阶的戴维南 (Thevenin) 等效模型来电池的 SOC 来进行估算, 运用卡尔曼滤波算法来消除安时积分法所造成的累积误差, 大大提高了对电池的电量估算精度。在对等效模型电路的参数辨识时, 文献 [4-6] 都是用电压脉冲对电池充放电来辨识出固定的参数值, 但是电池是一个复杂的充放电系统, 电池的内阻和极化电容会

收稿日期: 2017-05-09; 修回日期: 2017-05-24。

基金项目: 厦门理工学院研究生科技创新计划项目 (YKJXC2015002)。

作者简介: 胡勇 (1991-), 男, 湖北孝感人, 硕士研究生, 主要从事电池管理与嵌入式系统方向的研究。

沈汉鑫 (1966-), 男, 福建厦门人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事电子材料及光电子技术方向的研究。

随着电池的电量 and 不同环境发生变化, 会造成很大的误差, 本文对电池的电量工作区间内多个 SOC 分别进行充放电实验, 拟合出电池充放电时不同容量的模型参数, 用多项式拟合, 得到不同电池容量和电池极化电阻电容之间的函数关系, 用卡尔曼滤波算法消除累计的误差, 该方法有比较简单、容易实现、计算量较小的特点, 同时系统估算的准确性也得到了提高。

1 电路模型

1.1 锂电池模型等效电路模型

目前在锂电池的电量管理系统中, 电池的等效电路应用的最多, 电化学模型过于复杂, 实时性差, 而且通常某一个电化学模型仅适用于特定类型的电池, 而且电化学模型需要建立多组复杂的、时变的偏微分方程, 求解这些方程通常耗费大量的时间。使得使用范围仍然有限, 很难在实际应用中使用。另一种是数学模型, 通常是对实际对象的抽象化, 通过数学方程来表示对象内部关系, 目前应用最广泛的时人工神经网络, 用神经网络来模拟电池的外特性。目前在估计电池 SOC 方面应用最多的是 3 层的典型神经网络, 其计算量和复杂性相对较小, 但是非线性的网络计算量也相对较大, 不利于实际的应用, 同时针对不同类型的电池要进行不同的训练, 不利于大规模的推广使用。

电路模型通过具体的电路方程描述电池内部的变化, 使用电阻、电容、电压源、电流源等元件, 来等效电池的外部电特征, 而且各个参数的物理意义明确, 能够较准确地对参数辨识。目前提出的各种等效模型可以分为: 内阻模型、阻容模型和基于运行时间的电路模型。较为常用的电池模型为 Thevenin 电路模型, 它用电压源表示电源的电动势, 电阻表示电池的直接内阻, 用 RC 电路模拟电池的极化内阻和极化电容。电路模型用电路的理论知识来描述电池的工作状态, 各部分的物理意义用相关的数学模型来表达, 非常适合电池的建模分析。本文选择戴维南 (Thevenin) 等效电路模型, 电路模型如图 1 所示。

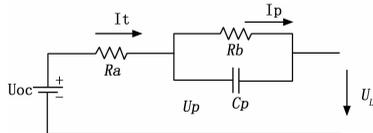


图 1 锂离子电池的 Thevenin 模型

其中: U_{oc} 为理想电压源电压 (V), R_a 为电池欧姆内阻 (Ω), U_o 为电阻上电压 (V), R_b 为电池极化阻抗 (Ω), C_p 为电池极化电容 (F), U_p 为 R_b 两端电压 (V), U_L 为电池两端电压 (V), I_t 为电池负载电流 (A), Thevenin 等效电路模型相比电化学模型结构简单易于实现, 能较好地适用于电池的工作状态, 在电池仿真中得到广泛的应用。

根据电路图, 从电路的原理得出 Thevenin 等效电路模型中各个电压关系:

$$\begin{cases} U_{oc} = I_t \cdot R_a + I_p \cdot R_b + U_L \\ I_t = C \frac{dU_p}{dt} + \frac{U_p}{R_b} \end{cases} \quad (1)$$

R_C 环节为了描述电池的极化反应, 由电路关系可以得到 R_C 环节的电压电流关系为:

$$\frac{dU_p}{dt} = -\frac{1}{R_b \cdot C_p} U_p + \frac{1}{C_p} I_t \quad (2)$$

定义时间常数为 $\tau = R_b \cdot C_p$, $U_p(0)$ 为电容初值, 解微

分方程得:

$$U_p = U_p(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} + I_t \cdot R_b(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3)$$

1.2 模型参数确定

建立好电路模型后, 需要辨识出模型的参数, 本文采用电池的电压脉冲波形^[7]对电池充放电, 得到电池的电压变化曲线, 根据变化曲线辨识出电池的参数。

如图 2 是以 10 A 电流对电池放电 5 min 后静置 10 min, 再以 10 A 电流放电得到的电池电压变化曲线。

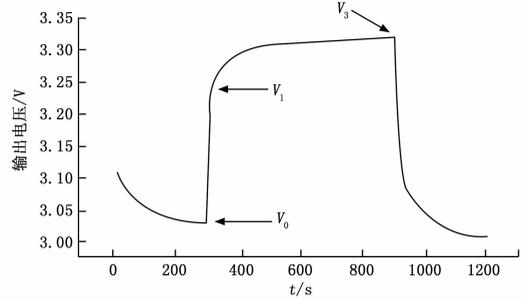


图 2 电池的电压脉冲波形

从图中波形可以看出, 在停止放电的瞬间, 电池的端电压发生了突变, 其中 300 s 时 V_0 到 V_1 的垂直上升与纯电阻的性质类似, 具有单一的欧姆电阻特性, 这是电池的欧姆内阻压降的变化造成的。300~900 s 这段时间, 电池的两端电压 V_1 到 V_3 开始慢慢上升, 上升速度越来越慢, 最终趋于稳定, 这是电池极化现象缓慢消失的过程, 根据电池特性得到电池 Thevenin 模型的参数。放电电阻为:

$$R_a = \frac{V_1 - V_0}{I} \quad (4)$$

在电池放电停止时, 电路电流为零, 为电源的零输入响应得:

$$U_p = U_p(0) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (5)$$

在电池静置一段时间刚开始充电时, 可作为电源的零状态响应得:

$$U_p = I_t \cdot R_b(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (6)$$

式 (5) 中, 用最小二乘法^[8]可以估算出电池放电时的时间常数 τ , 公式 (6) 中用最小二乘法可以估算出电池放电时的极化电阻 R_b , 然后得到电池的极化电容 C_p 。

电池是一个将内部化学能转化为电能的装置, 随着电池不断放电, 电池内部电解液的浓度会不断减小, 化学反应的速度会不断下降, 电池的电压也会随之不断下降。在 Thevenin 模型中电池电阻有欧姆电阻和极化电阻两种, 电池的欧姆内阻包括电池的电极材料本身的电阻、电池正负极与隔离层的接触电阻、电池内部电解材料的电阻、内部离子透过薄膜时的阻力电阻等, 欧姆电阻主要由电池的类型、电解质的材料、电池正负极的材料决定; 极化电阻是电池的正负极与电池电解质发生化学反应时极化引起的电阻, 主要包括电化学极化和浓差极化引起的电阻。在电池的电量发生变化时, 对应电池的极化电阻和极化电容会发生变化, 本文在对多个不同的电池容量分别进行电压脉冲测试, 然后对测得的参数都用多项式 $y = a_1 \cdot x^6 + a_2 \cdot x^5 + a_3 \cdot x^4 + a_4 \cdot x^3 + a_5 \cdot x^2 + a_6 \cdot x + a_7$ 进行拟合, 对电池电阻电容分别解出系数的值, 即电池容量对应电池电阻电容的函数关系。拟合结果如图 3 所示 (电阻单位为 Ω , 电容单位为 F)。

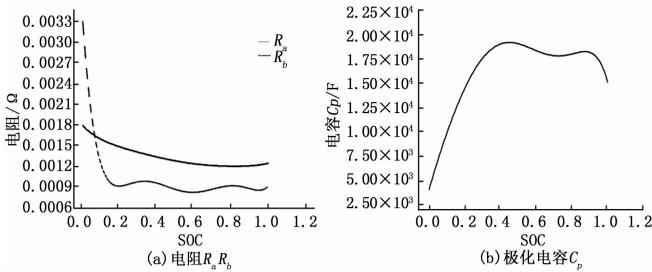


图 3 电池的拟合参数

在电池不断的放电过程中, 电池的欧姆内阻 R_a 随着电池容量的减小, 会有一个慢慢下降的趋势, 电池的极化电阻 R_b 在电池容量较小时会有一个突变的过程, 随着电池容量的变化有一定的波动, 所以在电池过度放电时, 会出现电池电阻急剧增大的过程。电池的极化电容也会随着电池容量的变化有一个突变的过程。

2 扩展的卡尔曼滤波算法

卡尔曼滤波算法^[9]是一种通过系统输入输出观测数据, 对系统状态进行最优估计的算法, 利用前一时刻的估计值和现在时刻的观测值得到最优的状态变量估计, 算法不用保存过去所有的观测数据, 降低了计算机对数据的计算和存储问题, 因此算法适用于动态的估算。图 4 为卡尔曼滤波算法的结构图。

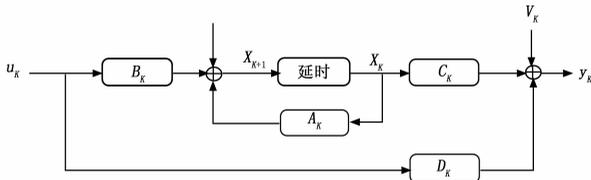


图 4 卡尔曼滤波算法结构图

考虑到电池内部是一个复杂的反应系统, 模型中的状态向量以及观测输出与系统的输入是非线性关系, 我们使用扩展的卡尔曼滤波算法, 扩展的卡尔曼滤波算法是将原系统的状态方程作一阶泰勒展开, 然后忽略高阶项, 系统状态方程为:

$$\begin{cases} X(k+1) = AX(k) + BU(k) + W(k) \\ Y(k+1) = g(X(k), U(k)) + V(k) \end{cases} \quad (7)$$

其中: X_k 为 k 时刻的状态变量、 U_k 是 k 时刻的系统输入激励、 Y_k 为 k 时刻的测量值; A_k 为前一状态转移矩阵、 B_k 为输入激励矩阵、 C_k 为系统状态测量矩阵; W_k 、 V_k 为系统激励白噪声及观测白噪声。

设系统的采样时间为 Δt , 电池总电量为 Q_0 , 电池的电量与电池 SOC 以及电流关系为:

$$\begin{aligned} SOC(k+1) &= \frac{Q(k+1)}{Q_0} = \frac{Q(k) + I \cdot \Delta t}{Q_0} = \\ &SOC(k) + \frac{\Delta t}{Q_0} I \end{aligned} \quad (8)$$

选取 SOC 和 C_p 上的电压为 U_p 为状态变量, 结合公式 (3) 得:

$$\begin{bmatrix} SOC(k+1) \\ U_p(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\Delta t/\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC(k) \\ U_p(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta t/Q_0 \\ Rb(1 - e^{-\Delta t/\tau}) \end{bmatrix} I(k) + w(k) \quad (9)$$

$$UL(k) = U_{oc}[SOC(k)] - I_t(k)Ra(k) - U_p(k) \quad (10)$$

扩展的卡尔曼滤波算法归纳如下:

$$\begin{cases} X(k|k-1) = AX(k-1|k-1) + BU(k-1) \\ P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q \\ X(k|k) = X(k|k-1) + K_g(k)\{Y(k) - g[X(k), U(k)]\} \\ K_g(k) = P(k|k-1)C(k)[C(k)P(k|k-1)C(k)^T + R]^{-1} \\ P(k|k) = [1 - K_g(k)C(k)^T]P(k|k-1) \end{cases} \quad (11)$$

式中, P 为滤波计算误差的协方差矩阵, K_g 为滤波器增益矩阵, k 代表每一个时刻, 从公式 (9) 知状态变量 $X(k) = [SOC(k+1) \ U_p(k+1)]^T$ 矩阵 $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-\Delta t/\tau} \end{bmatrix}$, 矩阵 $B = \begin{bmatrix} \Delta t/Q_0 \\ Rb(1 - e^{-\Delta t/\tau}) \end{bmatrix}$, 输入信号 $U(k) = I(k)$; 状态转换矩阵 $Ck = \frac{\partial g(X(k), U(k))}{\partial X(k)} = \left\{ \frac{dU_{oc}(SOC(k))}{dSOC(k)} - 1 \right\}$, 公式 (11) 中前两个式子是对系统的预测, 后面三个式子是对系统状态的更新。按照公式即可完成系统的动态最优估算。

3 仿真与实验结果

根据所建立的等效电路模型和公式 (11), 在 Matlab 建立如图 6 的仿真模型。

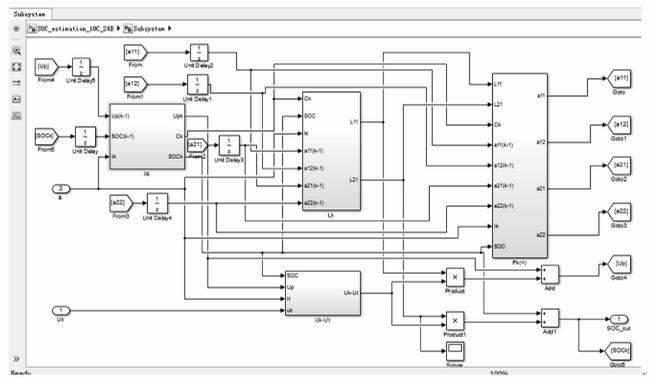


图 6 仿真模型

仿真模型中 X_k 对应系统估算状态的更新, I_k 、 U_k 为电池测试平台测得的系统电压电流, 用来对应实际估算系统中实时测得电压电流。 P_k 是系统的估计误差协方差矩阵 P , 表示系统状态估计的偏差程度, 测量值和估计值在用来计算这一时刻的状态时, 由误差协方差矩阵 P 来计算增益矩阵 K_g , 协方差矩阵越大说明越不准确。 L_k 对应滤波器增益矩阵 K_g 。系统参数按照第一节中介绍的方法, 对电池的电阻电容等参数进行估计, 估计结果如表 1 所示, 在 Simulink 中建立电池荷电状态与电池参数相对应的 fcn 函数作为模型电阻电容单元。

表 1 参数估计结果

系数类型	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
R_a	0.0098	-0.03332	0.04502	-0.0305	0.0115	-0.00301	0.0018
R_b	0.2242	-0.78137	1.06901	-0.7256	0.2539	-0.043	0.0037
C_p	-465621	1048175	-753500	202435.3	-87259.3	67422.4	3440.78

本文选择电池容量为 10 Ah 的锂离子电池用 1 C 的电流对

电池进行持续放电实验，直到电池完全放电，环境温度设定为 25℃，采集电池放电时的实验数据，根据实验数据进行 Simulink 仿真，将测得的电压 U_k 电流 I_k 通过仿真系统得到估算的电池 SOC 曲线。

如图 7 所示，曲线 1 为通过实验测得的数据经过仿真系统得到的电池 SOC 估算曲线，曲线 2 是通过实验测得的数据通过理论计算得到的准确的电池 SOC。从 0 到 31280 s 时间内，电池不断放电，SOC 从 1 开始减少到 0.12，可以看到随着电池的不断放电，经过仿真模型估算的 SOC 与标准的实验测得电池 SOC 误差范围始终在一个很小的范围波动，误差很小，验证了仿真模型估算的准确性。

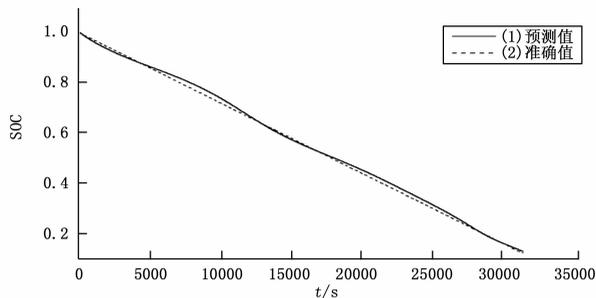


图 7 SOC 预测值与准确值对比图

图 8 为模型的估算误差，可以看到估算的误差一直在 2.5% 以内，随着卡尔曼滤波不断的计算，系统估算误差不断减小，采用的曼滤波算法能较好地估算电池的荷电状态值，通

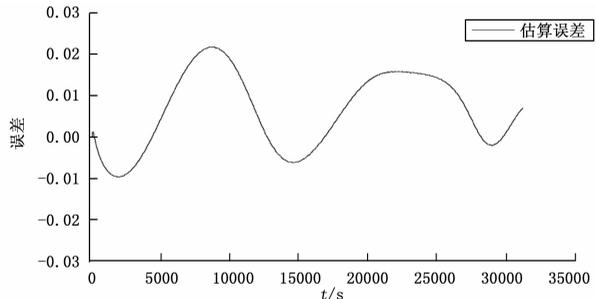


图 8 SOC 估算误差

传输的环节，提高消息传输的效率与安全性。

(上接第 186 页)

健全的分发策略，为控制海上对象险情知情范围，明确险情处理责任人提供保障。

5 总结

系统目前已投入正式使用，针对遇险救生任务需要综合多种通信手段的需求，本系统在设计时尽可能统一与其他通信子系统之间的协议，对已经建设完成，无法修改的通信子系统，单独定制通信协议，减少设计与实现的复杂度。针对数据传输高效、稳定和可靠的需求，一方面，在与通信设备交互时加入消息重传机制，从而减小网络时延等问题对消息传输带来的影响，提高数据传输的可靠性和稳定性。另一方面，为各通信子系统提供多种接入手段进行数据传输，提高数据传输的可靠性和稳定性。考虑到知情权问题，系统提供包括对遇险对象、遇险性质和报文种类权限的灵活配置，在接收报文后根据权限直接分发到不同用户，通过声光告警等手段告知用户，减少消息

过估算系统得到的电池荷电状态的预测结果有较高的精度。

4 结论

本文通过对电池建立等效的电路模型，通过对不同时刻的电池容量测得对应的不同模型参数，用多项式拟合的方法得到电池参数与 SOC 对应的函数，使得模型估算更加准确。在 Matlab 中利用 Simulink 建立电池的电路仿真模型，所建立的模型采用模块化结构，具有通用性，与实际中电池测量系统一致，由测得的电路电压电流即可得到电池的 SOC 估算值，可以将其应用到实际的电量预测中。通过对电池的放电情况下的仿真和实测对比，该模型仿真结果误差较小，保持在 2.5% 以内，因此，本研究所做的工作可为电池的 SOC 估算提供一个较好的实验仿真系统，同时模拟实际的电池测量系统，为实际应用中的电池管理系统提供了一种电池荷电状态的估算方法。

参考文献:

- [1] 鲍 慧, 于 洋. 基于安时积分法的电池 SOC 估算误差校正 [J]. 计算机仿真, 2013, 30 (11): 148 - 151.
- [2] 徐欣歌, 杨 松, 李艳芳, 等. 一种基于预测开路电压的 SOC 估算方法 [J]. 电子设计工程, 2011, 19 (14): 127 - 129.
- [3] 刘从臻, 赵淑红, 刘庆新. 基于改进 Ah 计量法的电池 SOC 卡尔曼滤波估计 [J]. 山东理工大学学报 (自然科学版), 2015 (3): 32 - 36.
- [4] 付 浪, 杜明星, 刘 斌, 等. 基于开路电压法与卡尔曼滤波法相结合的锂离子电池 SOC 估算 [J]. 天津理工大学学报, 2015 (6): 9 - 13.
- [5] 林成涛, 陈全世, 王军平, 等. 用改进的安时计量法估计电动汽车动力电池 SOC [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2006 (2): 247 - 251.
- [6] 袁学庆, 张 阳, 赵 林, 等. 基于 EKF 的锂电池 SOC 估算与试验研究 [J]. 电源技术, 2015 (12): 2587 - 2589, 2615.
- [7] 卢杰祥. 锂离子电池特性建模与 SOC 估算研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [8] 陈岚峰, 杨静瑜, 崔 崧, 等. 基于 MATLAB 的最小二乘曲线拟合仿真研究 [J]. 沈阳师范大学学报 (自然科学版), 2014 (1): 75 - 79.
- [9] 史忠科. 最优估计的计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

参考文献:

- [1] 鲍君忠, 刘正江. 2010 年国际海事组织海上安全委员会通过的决议内容概览 [J]. 世界海运, 2011 (1): 12 - 18.
- [2] 彭信发. 海上搜救存在的主要问题与对策研究 [J]. 珠江水运, 2006 (1): 23 - 26.
- [3] 孔凡颖, 阮 巍. 我国海上搜救管理体系探析 [J]. 水运管理, 2004 (7): 15 - 18.
- [4] 方传顺. 全球海上遇险与安全通信系统 [J]. 外军电信动态, 2004 (4): 4 - 7.
- [5] 张更新, 牛 鑫, 张有志. GMDSS 在中国的发展及应用 [J]. 世界电信网络, 2002 (11): 19 - 22.
- [6] 冯国友, 廖淑兵. 全球海上遇险与安全系统在海事通信中的应用 [J]. 江苏船舶, 2008 (4): 13 - 17.
- [7] Ernestos T. GMDSS Operability: The Operator - Equipment Interface [J]. Journal of Navigation, 2002 (1): 29 - 36.