

# 一种改进的电动汽车锂电池SOC算法

中煤国际工程集团北京华宇工程有限公司 王慧芳

**【摘要】** 本文提出了一种改进的安时积分法来估算电动汽车电池剩余电量(SOC)的方法。在大量实验基础上,分析了影响安时积分法估算精度的参数,采用最小二乘法建立了数学模型以及实现了各参数修正因子,经实验表明,此方法提高了电池SOC计算的精度,达到了电动汽车的应用要求。

**【关键词】** 安时积分; SOC; 修正因子; 数学模型; 电动汽车

## An Improved SOC Algorithm with Electric Vehicles

WANG Hui-Fang

(Beijing Huayu Engineering Company Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100120, China)

**Abstract:** This paper puts forward an improved ampere-hour integral method to estimate SOC for Lithium-ion Battery Pack in Electric Vehicle. Based on a large number of experiments, the paper analysis the parameters which affect the estimation accuracy of integral method, then use the least square method to establish the mathematical model and realize the correction factor of the parameters. The experiments show that this method improves the accuracy of the battery SOC to the application requirements for electric vehicles.

**Keywords:** Ampere-hour Integral; SOC; Correction Factor; Mathematical Model; Electric Vehicles

### 1. 引言

近年来,随之我国智能电网的建设,电动汽车技术得到了飞速的发展。锂电池作为电动汽车的主要能量源,是电动汽车的重要组成部分。锂电池剩余电量(SOC)实时估算涉及到电池充放电控制和电动汽车的优化管理,直接影响锂电池的使用寿命和动力系统的性能,因此锂电池SOC的精确估算对于电动汽车的安全运行非常关键。

在各类SOC估算方法中,安时积分法由于电路结构简单易于实现,在电池管理系统中使用最广,但由于它自身算法的缺陷,使得SOC估算精确度不高,无法满足当今电动汽车的需求。本文就是在此基础上,提出了一种改进的安时积分SOC算法。

### 2. 安时积分法参数分析与仿真

安时积分法的工作原理如式(1)所示,充放电起始状态为SOC<sub>0</sub>,那么当前状态的SOC为:

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C} \int_0^t \eta I dt \quad (1)$$

$\eta$ 为充放电效率,定义为:电池放电放出的容量与电池充入的容量的比值; $C$ 为电池总容量; $I$ 表示电池的放电电流 $I$ 在时间 $[0, t]$ 上的积分,放电电流 $I$ 为正值,充电电流 $I$ 为负值。

安时积分法应用存在的问题:对于SOC<sub>0</sub>值,由于电流值采集的不精确,会造成误差的不断积累,电流采集精度可通过使用高性能电流传感器解决,但成本增加,不是一种很好的解决办法;电池充放电效率 $\eta$ 代表了充放电循环中内部的电量耗散,它与平均放电电流、SOC和电池循环SOH(健康程度)等有关,解决电池充放电效率 $\eta$ 需要通过事前大量实验,建立电池充放电效率数学模型公式;对于电池的总容量 $C$ ,它随温度、放电电流、充放电

次数等因素而变化。

综合上述问题,本文通过大量实验数据与仿真,完成了对锂电池在放电过程中,各参数数学模型的建立于修正。

对于改进SOC算法的实现,是建立在大量实验的基础上的,本实验是以3.3V/12A.h磷酸铁锂动力电池为实验对象。主要完成了以下实验:在不同初始值SOC<sub>0</sub>下,电池放电SOC与时间 $t$ 的关系;当电池充分静置后,电池开路电压OCV与电池SOC的关系;电池达到静置状态所需的时间 $t$ 与电池SOC的关系;电池的充放电效率 $\eta$ 与SOC的关系;电池的总容量 $C$ 与电池循环次数的关系;不同初始放电倍率下,电池放电电压与时间 $t$ 的关系;自放电及老化因素与循环次数的关系。

#### 2.1 电池放电SOC与时间 $t$ 的关系

在不同初始状态SOC<sub>0</sub>条件下,对单体电池进行恒流放电实验;放电电流为1C,如图1所示,在SOC<sub>0</sub>值分别为100%、90%、80%、60%条件下,形成了SOC平行曲线簇,从图可以看出:在不同的SOC<sub>0</sub>下,SOC估算相差很大。这表明SOC<sub>0</sub>对于电池SOC估算精度的影响十分显著,同时其他影响SOC的因素在整个放电区间内保持稳定,于是在不同SOC<sub>0</sub>下得到的SOC曲线呈现平行状态。从而可知精确的对SOC<sub>0</sub>的估算,是完成SOC估算的第一步。

#### 2.2 电池的开路电压OCV与电池SOC的关系

如图2所示,为开路电压OCV与电池SOC的关系,开路电压法的基本原理是将电池充分静置,使电池端电压恢复至开路电压,静置时间一般在1小时以上,不适合电动汽车的实时在线检测,但对于锂电池SOC估算是一种精确的方法。本文采用OCV-SOC开路电压法,在满足一定条件下,实现对初始值SOC<sub>0</sub>的估算,来提高SOC估算的精确性。

#### 2.3 电池达到静置状态所需的时间 $t$ 与电池SOC的关系

如图3所示,表明了电动汽车在停车时刻的SOC值,经过时间 $t$ 达到稳定状态的关系,它可以判断是否可以用OCV-SOC确定SOC<sub>0</sub>值的依据。下面在改进安时积分法中,对初始值SOC<sub>0</sub>时,将用到此方法。

#### 2.4 电池的充放电效率 $\eta$ 与SOC的关系

如图4所示,表明充放电效率 $\eta$ 是随着充电时刻SOC值成反向变化的,究其原因有很多,锂电池内部发生的化学反应和电池本身的自放电等都会造成电池的充放电效率 $\eta$ 小于1,电池的充放电效率 $\eta$ 与很多因素有关。通过此曲线图,可以得知: $\eta_2$ 的绝对值一般都在96.67%以上,若将电池的充放电效率 $\eta_2$ 简化地当作1处理,将给SOC估算造成误差。

为了实现对SOC高精度的估算,就需要考虑库仑效率 $\eta$ 的变化规律,由于它与充放电差异、电流大小、环境温度等因素有关,为了克服传统库仑效率的缺点,同时将电池变电流充放电过程归一化为恒电流充放电过程,本文采用了等价库仑效率的思想。等价库仑效率的核心为将不同电流的库仑效率统一到5h倍率放电电流 $I_5$ 的库仑效率上;用锂电池在电流 $I_5$ 下的放出电量与用电流 $I_5$ 使锂电池SOC恢复到放电前状态所需电量之比作为基准库仑效率 $\eta_1$ ;锂电池实际运行中的放电等价库仑效率 $\eta_2$ ,用电池在被测电流下放出的电量与用电池在定流 $I_5$ 恢复到放电前状态所需电量之比表示;实际运行中的充电等价库仑效率 $\eta_3$ ,用电池在定流 $I_5$ 下放出的电量与电池在被测电流下电池恢复到放电前所需电量之比。

对于锂电池的实际运行变电流充放电情况下,用充电和放电等价库仑效率将其等价于 $I_5$ 的恒流充放电过程,归纳得到等价库仑效率 $\eta_e$ 的定义公式:

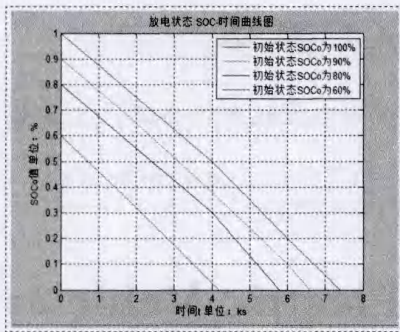


图1 不同初始状态SOC<sub>0</sub>, SOC曲线图

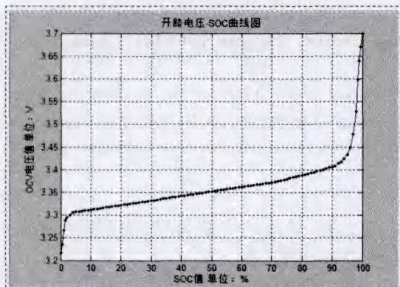


图2 电池的开路电压OCV与电池SOC曲线图

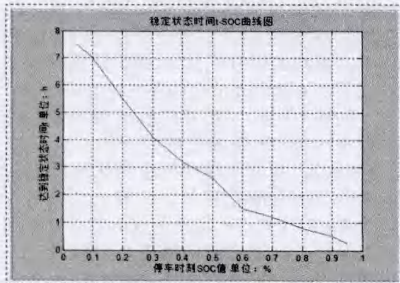


图3 静置状态所需的时间t与电池SOC曲线图

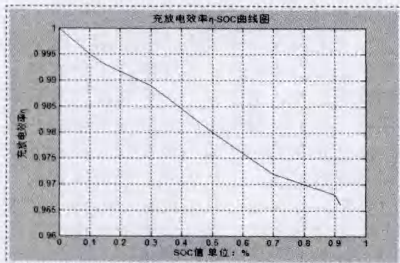


图4 充放电效率η与SOC曲线图

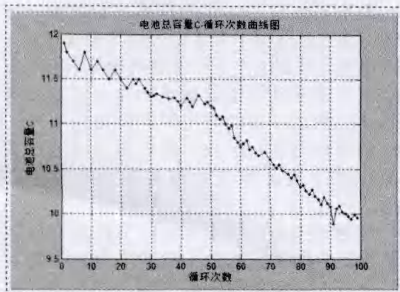


图5 电池的总容量C与循环次数曲线图

$$\eta_c = \begin{cases} \eta_c, & I < 0 \\ \eta_c / \eta_r, & I > 0 \end{cases} \quad (2)$$

## 2.5 电池的总容量C与循环次数的关系

如图5所示, 电池的总容量C在充电次数的增加过程中的变化规律, 考虑到电动汽车的运行状况, 电池的总容量C与循环次数(即电池的SOH相关)关系最为密切, 改图表明随循环次数增加, 电池容量持续下降, 因此在进行SOC估算时, 必须充分考虑电池总容量C的变化, 建立数学模型对其进行修复, 提高SOC估算精度。

## 2.6 电池放电电压与时间t的关系

图6所示, 在初始放电倍率分别为1C, 2C, 4C下, 放电电压与时间的变化规律。从图6可知: 在不同初始放电倍率下, 曲线呈现相似的变化规律。都存在三个阶段, 第一阶段和第二阶段的变化规律比较陡峭, 第二阶段变化规律比较平坦; 随着放电倍率的增加, 电池的放电

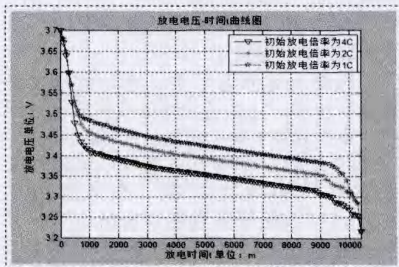


图6 电池放电电压与时间t曲线图

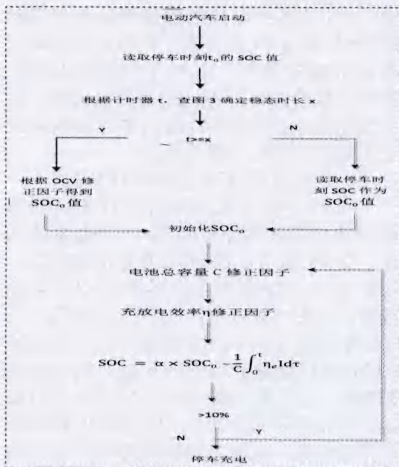


图7 改进的安时积分法的算法

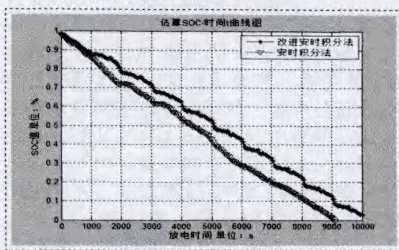


图8 SOC估算结果

电压在第二阶段明显下降。根据欧姆定律可知, 对于放电电流, 本实验是通过分流器, 根据电压的变化来测量出电流值。

## 2.7 自放电及老化因素与循环次数的关系

由于锂电池多次充放电以后电池存在极化现象, 出现电池容量下降和内阻增加现象, 通过大量实验, 可设定锂电池老化系数与循环次数函数式为:

$$\alpha = \begin{cases} 1, & N \leq 500 \\ 0.98, 500 < N < 10000 \\ 0.95, & N \geq 10000 \end{cases} \quad (3)$$

N为充放电次数, α锂电池老化系数。

## 3. 算法实现与修正因子

### 3.1 改进算法模式

通过上述对传统安时积分法参数因子分析与仿真, 可以得出如下公式:

$$SOC = \alpha SOC_0 - \frac{1}{C} \int_0^t \eta_t I dt \quad (4)$$

### 3.2 修正因子

#### (1) 电池总容量C修正因子

利用最小二乘法对图5采集的数据进行拟合, 构造数学模型, 设定采集的数据点(x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>) i=1, 2, ..., N, 且函数关系为:

$$y_i = f(x; c_1, c_2, \dots, c_m)$$

其中c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, ..., c<sub>m</sub>是要通过实验确定的参数, 设测量中不存在系统误差, 则y<sub>i</sub>的观测值y<sub>i</sub>围绕期望值f(x; c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, ..., c<sub>m</sub>)摆动, 其分布为正态分布, 则y<sub>i</sub>的概率密度为:

$$p(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \exp\left\{-\frac{[y_i - f(x; c_1, c_2, \dots, c_m)]^2}{2\sigma_i^2}\right\} \quad (5)$$

为简化起见, 下面用C代表(c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, ..., c<sub>m</sub>)。考虑各次测量是相互独立的, 故观测值(y<sub>1</sub>, y<sub>2</sub>, ..., y<sub>N</sub>)的似然函数:

$$L = \frac{1}{(\sqrt{2\pi})^N \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_N} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{[y_i - f(x; C)]^2}{\sigma_i^2}\right\} \quad (6)$$

取似然函数L最大来估计参数C, 应使

因权重因子ω<sub>i</sub>=1/σ<sub>i</sub><sup>2</sup>, 故用最小二乘法来估计参数, 要求各测量值y<sub>i</sub>的偏差的加权平方和为最小, 则有:

$$\frac{\partial}{\partial c_k} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} [y_i - f(x; C)]^2 = 0 \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

从而得到方程组:

$$\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2} [y_i - f(x; C)] \frac{\partial f(x; C)}{\partial c_k} = 0 \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

解方程组, 即得m个参数的估计值c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>, ..., c<sub>m</sub>, 从而得到拟合的曲线方程为:

$$y = 0.0010x^2 - 0.0332x + 11.8819 \quad (9)$$

在此, 设定电池总容量C修正因子为δ, 则拟合曲线为:

$$\delta = 0.0010N^2 - 0.0332N + 11.8819 \quad (10)$$

#### (2) 电池的开路电压OCV修正因子

同理, 根据图2-2数据可得电池电压的开路电压OCV修正因子γ:

$$\gamma = 0.00025^3 - 0.00325^2 + 0.02715 + 3.2347 \quad (11)$$

### 3.3 算法实现



## TADS分布系统覆盖技术研究

中国移动通信集团设计院有限公司陕西分公司 卓毅

**【摘要】**随着城市的快速发展,高层建筑物的遮挡、各种频率在室内形成的噪声,使室内成为各个运营商争夺用户的重要战场。所以室内分布系统在无线优化中的地位,越来越受到运营商的重视。由于传统室内分布系统在馈线使用,天线安防位置上都有很多局限性,在住宅楼,高档宾馆无法做到真正的楼宇内部全面覆盖。本文介绍TADS系统在某市3星级酒店中的实际应用情况,通过TADS分布系统覆盖技术的研究,引入全新的覆盖模式,做到对传统室内分布系统无法深度覆盖补充。

**【关键词】**室内分布系统;深度覆盖;TADS分布系统

## 一、概述

近年来,随着运营商建设投资的加大,网络规模和服务已经形成,同时配合大量网络优化项目的开展,使得过去存在盲点的区域,如村庄、高速公路、桥梁、隧道等基本都已经得到良好覆盖,整个网络指标得到明显优化。

3G时代的来临,使数据业务逐渐占据了主导地位。根据NTT统计:手机用户70%的业务需求发生在室内,3G的室内覆盖成为各个运营商争夺的战场。对于大型住宅小区、大型办公室、高档宾馆等,各个运营商虽然大部分建筑已经建设了室内覆盖系统,但由于室内信号强度的安全的限制及建筑物场强损耗,房间内部信号差的问题不能得到有效解决,尤其体现在高层的无线信号覆盖上。网络问题集中表现为由于建筑物阻挡造成的低覆盖、低场强、低

接通率、低质量、高掉话率、导频污染严重等。

所以如何能改变这种覆盖有困难的场景进行全面的覆盖,将是传统室内分布系统的突破!

## 二、TADS分布系统介绍

针对以上这类型的问题,在一些密集住宅区,酒店等场景建设传统的室内分布系统比较困难,主要体现在线缆的布放上,WLAN合路后对天线密度要求更高,需要重新布放线缆,为此提出了一种新的室内分布解决方案——TADS室内分布系统。(TADS:Triple-networks Access Distribution System,三网接入分布系统)。

TADS室内分布系统是无线网络建设中的一种室内外信号分布系统,以CATV电缆作为传输介质,实现高带宽、全双工、低

损耗传输、分配的通信设备的总称。

共用天线电视(Community Antenna Television)是一种新兴的电视接收、传

表3-1 CATV网络频率分布

电视频道	频率
DS1-DS5	48.5-92MHz
调频广播	87-108MHz
Z1-Z7	111-167MHz
DS6-DS12	167-223MHz
Z8-Z37	223-463MHz
DS13-DS24	470-566MHz
DS25-DS68	606-958MHz



图1 TADS网络拓扑图

为了能够精确的得到SOC估算值,在使用安时积分法时,定时或不定时地对初始SOC<sub>0</sub>值、充放电效率 $\eta$ 、电池总容量C、放电电流I进行修正,才能估算高精度SOC值。

改进的安时积分法的算法如图7所示。

## 4. 试验结果分析

本试验在国网电科院所属国电通公司的电动汽车模拟实验室进行的,在放电倍率为1C下,所有的实验数据如下:

表1 1C部分实验数据					
电压值 <sub>0</sub>	电流值 <sub>0</sub>	电压值 <sub>1</sub>	电流值 <sub>1</sub>	电压值 <sub>2</sub>	电流值 <sub>2</sub>
3.36	12.00	3.28	12.02	3.23	11.97
3.35	11.98	3.27	12.01	3.23	11.97
3.33	11.94	3.26	12.02	3.23	11.94
3.33	12.02	3.26	12.01	3.23	11.94
3.34	12.01	3.25	11.98	3.22	11.97
3.34	11.98	3.25	12.00	3.22	11.95
3.33	11.97	3.25	11.96	3.21	11.93
3.33	12.04	3.25	12.00	3.21	11.94
3.33	12.01	3.25	12.03	3.21	11.94
3.33	12.03	3.25	12.03	3.20	11.94
3.33	12.01	3.25	12.04	3.20	11.93
3.33	11.99	3.25	12.00	3.19	11.93
3.32	11.93	3.25	12.01	3.19	11.94
3.31	12.01	3.25	12.00	3.19	11.91
3.31	12.02	3.25	11.99	3.18	11.91
3.30	11.99	3.25	12.03	3.18	11.90
3.30	12.01	3.24	11.99	3.20	11.85
3.29	12.00	3.24	11.98	3.18	11.99
3.28	11.97	3.24	11.98	3.18	11.99
3.27	11.98	3.24	12.00	3.18	12.00

对实验的数据进行分析与仿真,并与安时积分法的SOC估算进行了比较,仿真结果如图8所示。

实验结果表明:用安时积分法估算的SOC<sub>0</sub>值为97.6%,采用改进安时积分法的

SOC<sub>0</sub>值为98.4%;在放电截止状态,用开路电压法得到的SOC值为16%,安时积分法估算的SOC值为4.6%,误差为11.4%,采用改进安时积分法估算的SOC值为14.9%,误差为1.1%,可见采用本论文的改进安时积分法,有利于消除累计误差,提高SOC估算的精度。

## 5. 结论

研究了一种改进的安时积分算法,并对其相关参数进行了修正,从实验救过可以看出,该算法的可行性,实际工作过程与理论分析是一致的,本算法在国网电科院所属国电通公司自主研发的电池管理系统中运行正常,提高了对SOC估算的精度。

## 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.
- [2]赵淑红,吴峰,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.
- [3]张宾,林成涛,陈全世.电动汽车用LiFePO<sub>4</sub>/C锂离子电池性能[J].电源技术,2008,32(2):95-98.
- [4]王治华,殷承良.电动汽车用LiFePO<sub>4</sub>锂离子电池安全性分析[J].电池工业,2008,13(3):169-172.
- [5]张宾.电动汽车用动力锂离子电池的电压特性[J].电池工业,2009,14(6):398-403.
- [6]张宾.电动汽车用磷酸铁锂离子电池的PNGV模型分析[J].电源技术,2009,33(5):417-421.

[7]华宁.锂离子电池正极材料LiFePO<sub>4</sub>研究进展[J].电子元件与材料,2007,26(12):1-4.

[8]赵新兵,谢健.新型锂离子电池正极材料LiFePO<sub>4</sub>的研究进展[J].机械工程学报,2007,43(1):69-76.

[9]张金灵.电动汽车智能电池系统的研究[D].北京:北京交通大学,2010.

[10]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.

[11]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.

[12]胡会利,李宁.电化学测量[M].北京:国防工业出版社,2007.

[13]文锋.电动汽车用锂离子电池组充电方法[J].汽车工程,2008,30(9):792-795.

[14]MATTHIEU D,LIAN B Y. Identify capacity fading mechanism in a commercial LiFePO<sub>4</sub> cell[J]. Journal of Power Sources,2009,194:541-549.

[15]郭鹤桐,姚素薇.基础电化学及其测量[M].北京:化学工业出版社,2009.

[16]GUO H T,YAO S W. The basis of electrochemical measurement[M]. Beijing Chemical Industry Press,2009.

**作者简介:**王慧芳(1981—),女,内蒙古呼和浩特人,毕业于华北电力大学电子信息技术专业,工程师,现供职于北京华宇工程有限公司,从事电气通信专业方面的工作。