

Battery Management Systems on Power Batteries:  
Applied Technology and Advanced Theories

# 电池管理系统深度理论研究

——面向大功率电池组的应用技术

谭晓军 著

中山大学出版社

电池管理系统深度理论研究  
——面向大功率电池组的应用技术


**Battery Management Systems on Power Batteries:  
Applied Technology and Advanced Theories**

谭晓军 著

中山大学出版社

· 广州 ·

## 商标注册权声明

本书中所涉及到的、LT、LTC、LTM、Linear Technology 和 Linear 标识是凌力尔特公司 (Linear Technology Corporation) 的注册商标, 特此声明。

## 版权所有 翻印必究

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电池管理系统深度理论研究: 面向大功率电池组的应用技术/谭晓军著. —广州: 中山大学出版社, 2014. 4

ISBN 978 - 7 - 306 - 04839 - 4

I. ①电… II. ①谭… III. ①汽车—蓄电池组—研究 IV. ①U463. 63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 029937 号

---

出版人: 徐 劲

策划编辑: 陈文杰

责任编辑: 曾一达

封面设计: 陈启新

责任校对: 陈文杰

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: [zdcbs@mail.sysu.edu.cn](mailto:zdcbs@mail.sysu.edu.cn)

印 刷 者: 广州中大印刷有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 10 印张 280 千字

版次印次: 2014 年 4 月第 1 版 2014 年 4 月第 1 次印刷

定 价: 35.00 元

---

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

## 前 言

动力电池管理系统属于一个跨学科领域，涉及电子信息科学、电化学、汽车工程、能源学科等多个领域的相关知识，但从某种意义上来说，它又是一个学科盲点。参与相关研究工作的学者、工程师经常会遇到以下的困惑：从化学工业研究人员的角度看，电池管理系统应该是从事电子传感器、嵌入式计算机系统等领域的工程师解决的问题；然而，相关的电子工程师却很难在短时间内掌握动力电池的电化学机理；对汽车工程的从业人员来说，电池管理系统是与传统汽车学科相关度不高的领域。因此，在解决电池管理系统相关技术的过程中，来自高校及研究所的工作者缺少一套较为完备的理论体系，甚至有些基本概念都处于模糊状态。以上的情况在国内、国外都是基本一致的，以致于严重制约了相关行业的快速发展。

2011年下半年，笔者结合自己的研究、开发工作经验，完成了《电动汽车动力电池管理系统设计》一书，对这一领域的一些基本概念以及基本研究方法进行了总结，为该领域的研究人员与工程技术人员提供了一点参考。该书完成以后，反响强烈，作者不断接到相关的邮件与电话，对该领域的技术问题共同进行探讨。许多读者希望笔者能继续把自己工作中的一些经验进行总结。于是到了2013年，笔者结合这几年研究工作的进展，进行归纳，完成了本书。

本书的内容有以下几个原则：(1) 不与第一本书重复。凡是在第一本书中表述过的内容，本书不再重复。(2) 各章节的专题性。如果说第一本书的写作更加关注的是系统化，希望涵盖电池管理系统的每个章节的话，本书的每个章节基本上都是一个研究的专题，章与章之间可能具有较强的独立性。(3) 注意技术的先进性、细致化。第一本书完成后，不少读者在给我的来信中提到，希望书中能有更多具体的电路图、源代码。本书尽可能把最先进的电压监测电路、均衡电路的方案进行描述。

本书的主要技术工作，源于笔者在中山大学工学院电动汽车研究中心以及东莞中山大学研究院电动汽车工程中心从事的电动汽车相关科研工作。近年来，我团队的工作得到了国家、省、市各级政府的大力支

持，也得到了中山大学的大力支持，作者代表整个团队在此表示真诚感谢。

另外，本书的写作得到了凌力尔特公司（Linear Technology Corp）的大力资助，该公司不仅为笔者提供了大量的实验样本与参考文献，还对本书的部分章节提出了宝贵的修改意见。在此特别表达真诚的致谢！

部分本书未及讨论的内容或笔者最新的研究成果，将陆续在个人博客 [sysubms.blog.163.com](http://sysubms.blog.163.com) 上展示，欢迎读者访问。同时，也欢迎读者通过电子邮箱 [sysubms@163.com](mailto:sysubms@163.com) 与笔者进行交流。

作者

2014年2月于康乐园

# 目 录

第一章 关于本书的一些说明	1
1.1 近两年相关研究领域的新动态	1
1.2 本书与笔者上一本书的关系	3
1.3 本书的写作思路	3
第二章 基于扩展 Kalman 滤波器的剩余电量 (SoC) 估算	5
2.1 基于扩展 Kalman 滤波器的 SoC 估算算法的要点	5
2.2 基于扩展 Kalman 滤波器的 SoC 估算的误差谱	8
2.3 Kalman 滤波器计算过程中计算参数的设置	28
2.4 小结	40
第三章 关于动力电池劣化 (SoH) 的研究	43
3.1 动力电池劣化的定义及其评价指标	43
3.2 开展动力电池劣化研究的意义	52
3.3 锂离子电池劣化研究现状	55
3.4 国内外电池劣化测试的相关工作	64
3.5 笔者开展的电池劣化测试	74
第四章 先进的动力电池管理系统硬件	79
4.1 当前主流的电压监测方案	79
4.2 精确的电压监测的意义	83
4.3 LTC6804 的整体特色	90
4.4 采用 isoSPI 的优势	97
4.5 基于 LTC6804 的 BMS 系统结构	101
第五章 非耗散型 (ACTIVE BALANCE) 的电池均衡技术	109
5.1 电池不均衡的几种表现及相关讨论	109
5.2 几种非耗散型电池均衡技术的回顾与分析	114
5.3 基于 LTC3300 的先进的非耗散型均衡方案	122
5.4 非耗散型均衡电路的测试	130
5.5 非耗散型均衡电路的能耗建模与仿真分析	141
第六章 展望	148
参考文献	150

## 第一章 关于本书的一些说明

距离笔者上一本书的出版，过去了整整两年的时间。在这两年里，国内外在电池技术领域、电池管理系统技术领域都有了较大的发展，笔者的研究工作也取得了一些进展。把这两年工作中的一部分心得整理出来，与同行们分享，是本书的目的。本章作为全书的总起，希望对本书的构思、写作原则、写作思路等问题进行一些说明，以帮助读者更好地使用本书。

### 1.1 近两年相关研究领域的新动态

在过去的两年内，国内外在大功率动力电池管理系统技术领域都有了较大的发展。笔者在此尝试对同行们近年来研发工作的新动态进行一些归纳。

#### 1. 大功率电池组成组技术

几年前，电池管理系统理论还处于起步阶段，许多工程师缺乏经验，常常片面地将消费电子产品中的“单体电池”的管理技术或者将电动自行车中的“小电池组”管理技术平移到“大功率动力电池组”中。近两年来，越来越多的学者和工程师们关注大功率动力电池组的一些典型的问题，人们更多地将电池组作为一个整体来研究，更多地关注电池的不一致性及其产生的原因，并注意到了在大功率电池组中因为热力场分布的不均匀而增加了电池管理难度。针对“大功率动力电池组”衍生出了一系列的专业技术，例如：电池组的热力学建模与热管理技术，高压绝缘自诊断技术、预充电电路技术等。

#### 2. 电池建模技术

之前许多人认为 BMS 就是电子、自动化技术，相当于在一堆电池旁边加入几块电路板，再写两个嵌入式程序。事实上，近年来人们已经认识到了要开发出更优的 BMS 离不开对电池特性的了解和掌握，而能对电池的行为进行建模、仿真，就是了解和掌握电池特性的一个重要标志。电池建模是制定电池管理策略的基础。从文献可见，在过去两年中，对电池模型的研究越来越得到重视。

#### 3. 电池劣化的研究

电池劣化（也称电池老化、电池衰退等）直接与电池的健康状态（SoH）相关，也是学术界近两年的研究热点。从本领域较为重要的刊物 *Journal of Power Sources* 来看，研究电池劣化的文献的数量近两年都在成倍的递增。从已发表的文献来看，研究电池劣化的因素及衰减规律的占了相当高的比例；而就研究的电池材料类型来看，超过六成为磷酸铁锂电池。然而，至今没有一个非常完善的数学方法

来描述电池劣化。尽管如此，人们对造成电池劣化原因的认识还是加深了不少，这对动力电池的使用、维护以及电池的优化管理等提供了有力的理论依据。

#### 4. 电池寿命及经济性分析

严格而言，电池寿命的预测与电池劣化的研究是密不可分的。然而，与科学家们关注劣化机理、劣化模型不同，有部分同行关注电池寿命更多地是从电池使用的经济性角度出发。例如在我国电动汽车行业，近年来出现了不少使用铅酸电池的低速小轿车，价格便宜，解决了不少城乡居民的短途出行问题。然而，就此类低速轿车而言，如果将其搭载的铅酸电池全部替换为锂离子电池，则尽管购置成本有所提高，但是由于电池的整体寿命延长、使用效率高（内耗小），从长远来看可能更加经济。目前，能算清这笔经济账的研究成果还在进行中；尽管已经发表了一些赞成的或者反对的意见，也是多从自身经济利益或者主管臆断出发，尚欠缺有力的实验数据或者合理的推理分析，未能充分说明问题。

#### 5. 精确的 SoC 估算算法

精确的剩余电量（SoC）估算是 BMS 研究、开发人员不变的追求目标。近两年来，人们逐渐意识到了锂离子电池比先前的铅酸电池的管理难度大得多，并且基本形成了共识：想得到一个静态的、放之四海而皆准的 SoC 算法是不大可能的。“静态”的意思是：算法不管电池的类型、型号，不管电池的劣化，不管使用环境的变化等。因此，许多“自适应”的算法被相继提出，在特定类型的电池、特定的应用场合能取得很好的估算精度。与之前某些“大而全”的“万能”SoC 算法相比，这些专用的算法更加值得大家关注。与此同时，一些新器件的推出，为实现更精确的电压、温度监控提供了可能，从而有助于提高 SoC 估算的精度。

目前，没有一个 SoC 算法在任何情况下都能够做到小于 1% 的误差。无论何种 SoC 算法，在忽略了特定条件之后，都有可能产生较大的偏差。本书的第二章尝试从“误差谱”的角度出发，分析各种可能造成 SoC 估算误差的因素，并且分析这些因素可能造成的最大误差，从而有助于读者分析原有算法的不足。克服不足的过程，恰好是提高 SoC 估算精度的过程。

#### 6. 电池均衡控制

曾经在相当长的一段时间内，人们对电池均衡存在着许多误解。例如，有人笼统地认为：“均衡控制功能是多余的，越做均衡越损害电池。”这是对均衡问题认识不够深入所导致的。近年来，均衡的必要性已经越来越得到肯定，不同的均衡控制方法被提出。但是，关于均衡控制的理论研究却有所滞后，例如：关于如何评判 BMS 均衡控制的优劣，均衡控制方法与电池状态监测精度的关系等问题的研究，都有待加强。本书的第三章、第五章尝试在这个方面作一些理论探讨。



## 1.2 本书与笔者上一本书的关系

### 1. 笔者上一本书的写作目标

笔者于2011年出版了国内第一本以“电池管理系统”为主题的技术专著《电动汽车动力电池管理系统设计》。在该书中，笔者尝试搭建一个关于电池管理系统的研究体系，除了状态监测、SoC估算等核心功能之外，还涉及到了诸如电池系统的信息管理等一些非核心功能。尽量帮助读者弄清BMS的基本概念，力求做到“面面俱到”是该书写作所追求的目标。

### 2. 本书在内容上的差异

本书是笔者前一本书的提高版，基于“贵精而不求全”的原则，在内容上做到更深入而不重复。本书选择了“SoC估算精度”、“电池劣化（SoH）”、“精确的电压监测”、“非耗散型均衡控制”等电池管理系统（BMS）的深度技术内容，以专题的形式进行讨论，在内容上注意与前一本书的互补性，并尽量做到不重复。

### 3. 本书在研究对象上的扩展

在前一本书中，所探讨的基本上是用在“电动汽车”上的“磷酸铁锂”动力电池，而本书在研究对象上进行了扩展：第一，本书跳出了“电动汽车”的范畴，可适用于大功率动力电池；第二，所讨论的电池对象不限于磷酸铁锂电池，还包括其他材料（如三元材料）的锂离子电池。

## 1.3 本书的写作思路

笔者在本书的写作过程中，力求做到以下四个原则。

### 1. 专题性

本书的主体是四个章节，每个章节为一个独立的专题。如果部分读者认为某个章节太过深奥，或者不感兴趣，可以直接跳过，因为基本上每个章节都自成体系，可以作为一个整体单独阅读。

### 2. 互补性

除了“电池劣化（SoH）”一章以外，本书的其他主体章节在概念上都是对上一本书的补充和深化，在写作过程中，笔者尽量做到不重复。对于那些已经论述过的问题，不再重复进行说明，以免累赘。

### 3. 新颖性

本书涉及到的专题，包括电池劣化规律、非耗散均衡控制等，均是近年来研究的热点问题，是同行们感兴趣的。部分章节中介绍的器件、方案，也是本书出版时较为先进的代表，从而帮助部分同行搭建较为先进的BMS平台。

#### 4. 实用性

本书的许多内容，都是从实践中得来的，也希望能够指导实际工作。例如，作为 BMS 的研发人员，我们常常希望对系统的 SoC 估算精度进行评判，并且找出造成估算误差的原因和预计误差的大小；又如，当前所谓的“主动均衡”方案满天飞，每个解决方案都号称自己具有先进性，如何从“效率”的角度客观地评价一个均衡方案，也是一线工程师们所关心的问题。以上的这些问题，均属于本书后面讨论的专题。

## 第二章 基于扩展 Kalman 滤波器的 剩余电量 (SoC) 估算

剩余电量 (SoC) 的估算, 一直是动力电池管理系统最基本、最重要的功能之一。基于扩展 Kalman 滤波器 (EKF) 的估算方法, 是近年来研究的热点。在《电动汽车动力电池管理系统设计》一书中, 我们曾对该方法的优势以及算法实现的要点进行了描述。读者们一般关心两个问题: 第一, 估算的误差与什么因素有关, 每种因素可能造成的误差将会有多大? 第二, 如何设定 EKF 的计算参数, 从而使估算更加精确。

本章将对该方法进行简要回顾的基础上, 进行更深层次的探讨, 包括: 第一, 基于 EKF 的 SoC 估算的误差谱, 即对各种因素可能引起的估算误差进行定量分析; 第二, EKF 的具体运算步骤中两个关键的计算参数对运算结果的影响, 即设定的计算参数与实际值有差异时, 对 Kalman 滤波器算法所造成的影响。

### 2.1 基于扩展 Kalman 滤波器的 SoC 估算算法的要点

《电动汽车动力电池管理系统设计》一书的第七章曾经详细地给出了基于扩展 Kalman 滤波器的 SoC 估算方法的步骤。为了方便读者, 本节对此算法的基本要点进行简要的回顾, 其中涉及到的数学知识及相关理论推导将被省略。

#### 1. Kalman 滤波器与扩展的 Kalman 滤波器算法

一般地, Kalman 滤波器算法都是基于以下两条基本方程的:

$$x_k = f(x_{k-1}, \varphi_{k-1}, w_{k-1}) \quad (2-1)$$

$$z_k = h(x_k, v_k) \quad (2-2)$$

其中式 (2-1) 被称为状态方程, 式 (2-2) 被称为量测方程。其中,  $x_k \in R^n$  是系统的状态变量 (向量),  $z_k \in R^m$  是系统的观测变量 (向量), 系统的过程激励噪声与观测噪声分别用随机信号  $w_k$  和  $v_k$  表示,  $\varphi_k$  表示系统激励。在以上两条式子中, 如果函数  $f(\cdot)$  和  $h(\cdot)$  都是线性的, 那么依据这两条式子所进行的滤波器算法就是经典的 Kalman 滤波器; 反之, 如果  $f(\cdot)$  和  $h(\cdot)$  之一为非线性, 则所进行的滤波器算法就被称为扩展的 Kalman 滤波器。本书所提出的算法中, 量测方程  $h(\cdot)$  是非线性的, 因此属于扩展 Kalman 滤波器的方法。

在大功率电池的工作过程中, 一般以电池的工作电流  $i_k$  作为系统激励, 即在式 (2-1) 中  $\varphi_k = i_k$ ; 另外, 一般以电池两端的工作电压  $u_k$  作为观测变量, 即

$$z_k = u_k。$$

## 2. 根据磷酸铁锂电池模型确定状态方程

在《电动汽车动力电池管理系统设计》一书的第六章，我们提出了一个基于三阶阻容网络的等效电路模型，基于该模型，可以选定扩展 Kalman 滤波器的状态变量为： $x_k = [u_k^\Omega \quad u_k^s \quad u_k^m \quad u_k^l \quad SoC_k]^T$ 。其中，前四项都是依据等效电路模型的，分别代表等效的欧姆内阻两端的电压以及三个 RC 网络两端的电压，状态变量的最后一项是我们最为关心的电池的 SoC 值。

依据《电动汽车动力电池管理系统设计》一书第六章的电池模型，各个状态参数在电流激励的作用下，存在以下关系：

$$\begin{cases} u_k^\Omega = i_{k-1} R_\Omega \\ u_k^s = i_{k-1} \frac{R_s}{1 + R_s C_s} + \frac{R_s C_s}{1 + R_s C_s} u_{k-1}^s \\ u_k^m = i_{k-1} \frac{R_m}{1 + R_m C_m} + \frac{R_m C_m}{1 + R_m C_m} u_{k-1}^m \\ u_k^l = i_{k-1} \frac{R_l}{1 + R_l C_l} + \frac{R_l C_l}{1 + R_l C_l} u_{k-1}^l \\ SoC_k = SoC_{k-1} - i_{k-1} \frac{1}{C_{cap}} \end{cases} \quad (2-3)$$

注意，上式是在计算步长为“1 秒”的前提下，通过把电压、电流关系式离散化而得到的，其中  $C_{cap}$  代表电池的容量，单位为“安培·秒”，如果计算步长不是 1 秒，则需要把最后一条式子改为  $SoC_k = SoC_{k-1} - i_{k-1} \frac{m}{C_{cap}}$ ，其中  $m$  为计算步长。

将 (2-3) 式改写为矩阵的形式，如下

$$x_k = i_{k-1} \begin{bmatrix} R_\Omega \\ \frac{R_s}{1 + R_s C_s} \\ \frac{R_m}{1 + R_m C_m} \\ \frac{R_l}{1 + R_l C_l} \\ -\frac{1}{C_{cap}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_s C_s}{1 + R_s C_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_m C_m}{1 + R_m C_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_l C_l}{1 + R_l C_l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_{k-1} \quad (2-4)$$

为了表达起来更加简洁，不妨令

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R_s C_s}{1 + R_s C_s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{R_m C_m}{1 + R_m C_m} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{R_l C_l}{1 + R_l C_l} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$B = \left[ R_\Omega \quad \frac{R_s}{1 + R_s C_s} \quad \frac{R_m}{1 + R_m C_m} \quad \frac{R_l}{1 + R_l C_l} \quad -\frac{1}{C_{cap}} \right]^T,$$

则式 (2-4) 可以表达为

$$x_k = Ax_{k-1} + Bi_{k-1} \quad (2-5)$$

### 3. 确定量测方程

从式子 (2-5) 可知, 状态方程是线性的, 如果量测方程也是线性的, 则可以用经典 Kalman 滤波器而避免使用 EKF。事实上, 量测方程并非线性, 在电池处于放电状态时, 电池的工作电压与电池的平衡电势、三个 RC 网络两端的电压以及欧姆内阻两端的电压有关, 存在以下的电路关系式

$$z_k = u_k = E_k^B - u_k^\Omega - u_k^s - u_k^m - u_k^l \quad (2-6)$$

其中,  $E_k^B$  是电池的平衡电势 (即下一节所述的  $E_B$ , 这里使用  $E_k^B$  来作记号纯粹是为了时间下标 “k” 的书写方便), 它与电池的 SoC 存在非线性的函数关系, 即

$$E_k^B = g(\text{SoC}_k) \quad (2-7)$$

根据模型, 函数  $g(\cdot)$  是非线性的, 因此式 (2-6) 也是非线性的, 而式 (2-6) 正好是反映状态变量与观测变量之间关系的观测方程。所以, 用在解决变量估算问题的是扩展后的 Kalman 滤波器, 而不是经典的 Kalman 滤波器。

### 4. 递归计算步骤

在实际应用中, 基于扩展 Kalman 滤波器的状态估算是一个递归的过程。具体的计算步骤如下:

第一, 根据式子 (2-5) 得到  $k$  时刻的状态变量的估算值, 即

$$x_k^* = Ax_{k-1} + Bi_{k-1} \quad (2-8)$$

这里为状态向量打上一个 “\*” 号, 表明这是根据状态方程得到的一个估算值, 相应地, 得到完成了状态递推后的协方差矩阵

$$P_k^* = A_k P_{k-1} A^T + Q_{k-1} \quad (2-9)$$

第二, 也就是关键的一步, 求解 Kalman 增益  $K_k$

$$K_k = P_k^* H_k^T (H_k P_k^* H_k^T + R_k)^{-1} \quad (2-10)$$

其中,  $R_k$  是观测噪声协方差矩阵。另外,  $H_k$  是根据式子 (2-2) 的非线性关

系得到的雅可比矩阵，矩阵  $H_k$  中的元素满足

$$H_{k[i,j]} = \frac{\partial h_{[i]}}{\partial x_{[j]}} [x_k^*, 0] \quad (2-11)$$

第三，根据 Kalman 增益修正状态向量的估算值及相应的协方差矩阵

$$x_k = x_k^* + K_k(z_k - H_k x_k^*) = x_k^* + K_k(u_k - H_k x_k^*) \quad (2-12)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^* \quad (2-13)$$

这里， $I$  为单元矩阵。另外，由于采用电池两端的工作电压  $u_k$  作为观测变量，所以 (2-12) 式中的  $z_k = u_k$  成立。

第三步执行完成以后，时间指标  $k$  增加 1，然后循环回到第一步，继续计算。至此，一种基于电池模型及扩展 Kalman 滤波器的评估方法的递归算法得到了实现。

## 2.2 基于扩展 Kalman 滤波器的 SoC 估算的误差谱

任何一个 SoC 估算算法都不免存在着估算误差，基于扩展 Kalman 滤波器的 SoC 估算方法也不例外。在估算过程中，电压、电流传感器的误差，模型本身存在的误差等，都会在不同程度上影响着算法的精度；再者，即使其他因素都相同，但电池的剩余电量处于较高或者较低的水平，对于 SoC 估算的精度也是有影响的。例如，对某个电池进行 SoC 估算，如果电压传感器的读数存在 0.05V 的偏差，那么在电池剩余 50% 电量的情况下以及电池剩余 10% 电量的情况下，用同一个算法进行 SoC 估算，可能造成的估算误差大小是不一样的。可见，对各种因素可能造成的 SoC 估算误差进行定量的分析是必要的，这就是要研究该算法的“误差谱”问题。

本节将从两个大的方向来分析该算法的误差问题：第一是分析电池模型的不准确所造成的估算误差；第二是分析由于传感器测量不准确造成的估算误差。

### 2.2.1 电池模型不准确造成的估算误差

由《电动汽车动力电池管理系统设计》一书的第六章可知，模型包括“等效电压源”和“等效阻抗”两部分。如下图所示。

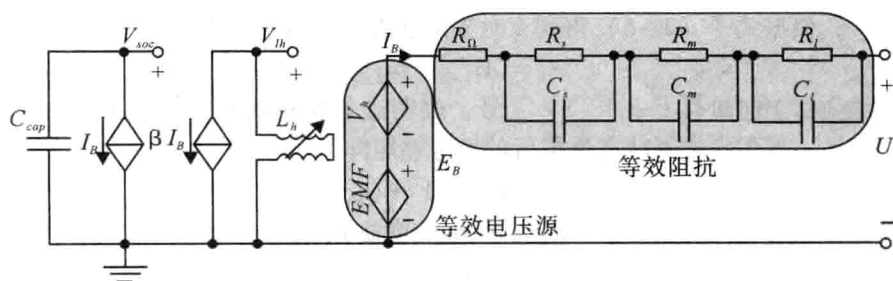


图 2-1 面向磷酸铁锂动力电池的模型

其中,“等效电压源”部分描述的是电池的平衡电势 ( $E_B$ ) 与 SoC 之间的关系,而平衡电势 ( $E_B$ ) 又包含电动势 ( $EMF$ ) 以及滞回电压 ( $V_h$ ) 两个部分,前者受控于  $V_{soc}$ , 后者受控于  $V_{lh}$ 。“等效阻抗”部分主要是用一个三阶阻容网络来模拟磷酸铁锂电池的电压回弹特性,其中  $R_\Omega$  主要用来描述电池的欧姆内阻,  $R_s$ 、 $C_s$ 、 $R_m$ 、 $C_m$ 、 $R_l$ 、 $C_l$  等,反映了电池的极化内阻特性。然而,这样的电池模型可能存在一定的误差。以下分为三个方面进行分析。

### 1. 由于忽视滞回电压所造成的 SoC 估算误差

首先有必要明确一下,在概念上动力电池的电动势 ( $EMF$ ) 与电池的平衡电势 ( $E_B$ ) 是有区别的。前者只与电池当前的荷电状态 (SoC) 以及温度有关,后者则需要考虑电池的电压滞回特性。一般而言,有

$$E_B = EMF + V_h \quad (2-14)$$

以下对电动势 ( $EMF$ )、平衡电势 ( $E_B$ )、开路电压 ( $OCV$ ) 三个概念进行辨析:

第一,电动势 ( $EMF$ ) 是电池所携带化学能的量值,它与电池的荷电状态 (SoC) 以及电池所处的温度相关,与电池处于充电或者放电状态无关。

第二,平衡电势 ( $E_B$ ) 是电池在经历了充电、放电的状态以后,所处于的一种稳态电势,它与  $EMF$  之间相差一个滞回电压,即  $E_B = EMF + V_h$ 。当电池处于充电状态时  $V_h > 0$ ; 当电池处于放电状态时  $V_h < 0$ ; 当电池处于充电与放电状态切换的过程中时,  $V_h$  是一个不确定的值。可见,  $E_B$  的大小取决于  $EMF$  和  $V_h$  这两个因素,间接与电池的荷电状态 (SoC)、电池所处的温度相关。既然  $E_B$  被定义为“平衡电势”,那么在电池的“充电”、“放电”状态不发生改变时,它的大小是不会改变的。即如果温度不变,电池不带负载 (相当于把电池搁置,不动它),则  $E_B$  的数值维持不变。

第三,开路电压 ( $OCV$ ) 是电池在不带任何负载的情况下,量度电池两极之间的电压值。由于电池是由化学材料构成的,因此,即使在不带负载的情况下,电池两端的电压并非一个稳定的值。下图为在室温条件下,以 0.5C 放电倍率对电池放电后,断开负载,静置一段时间的开路电压曲线。从图中可见,虽然电池不带负载,但是电池两端的开路电压在一个多小时内仍然不断在变化 (回弹)。从图中也可以看出,在静置一段时间之后,电池的开路电压将会回弹至电池的平衡电势 ( $E_B$ )。因此,可以这样理解:在温度一定的情况下,如果电池不带负载,则电池的开路电压收敛于电池的平衡电势 ( $E_B$ )。

下面,为了表述方便,我们把充电时电池所处的平衡电势记为  $E_{charge}$ , 在放电时,把电池所处的平衡电势记为  $E_{discharge}$ , 即:

$$E_B = \begin{cases} E_{charge}, & \text{当电池处于充电过程中;} \\ E_{discharge}, & \text{当电池处于放电过程中。} \end{cases}$$

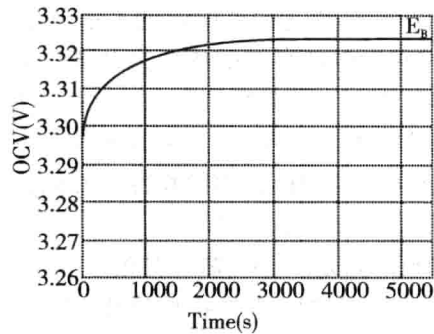


图 2-2 某电池在室温条件下, 以 0.5C 放电后的电压回弹曲线

一般磷酸铁锂动力电池的充电平衡电势  $E_{\text{charge}}$  会略高于 EMF, 而放电平衡电势  $E_{\text{discharge}}$  会略低于 EMF, 这就是磷酸铁锂动力电池的滞回电压特性, 如下图所示。

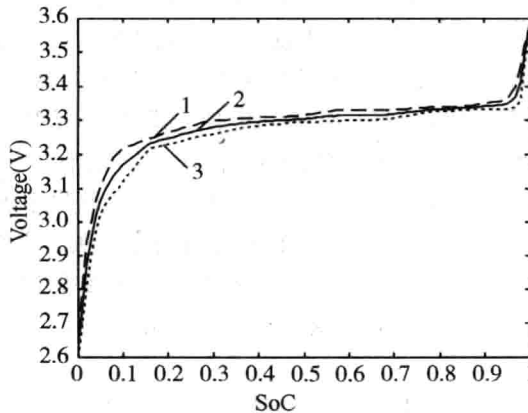


图 2-3 磷酸铁锂电池的滞回电压曲线

说明: 图中 1 - 充电平衡电势  $E_{\text{charge}}$  曲线, 2 - 电池电动势 EMF 曲线, 3 - 放电平衡电势  $E_{\text{discharge}}$  曲线

在利用电池模型进行 SoC 估算的过程中, 如果忽视滞回电压 ( $V_h$ ) 的存在, 认为  $EMF = E_{\text{charge}} = E_{\text{discharge}}$ , 则会引起较大的估算误差。下图是一个误差谱, 描述了在充、放电过程中, 在不同的实际荷电状态下, 如果忽视了滞回电压, 将会引起的 SoC 估算误差。

表 2-1 对充、放电过程中忽视滞回电压引起的 SoC 估算误差进行了统计。从表中可见, 如果忽视了滞回电压, 在充放电过程中造成的 SoC 估算误差的标准差大于 5%, 而最大的偏差有可能接近 20%。



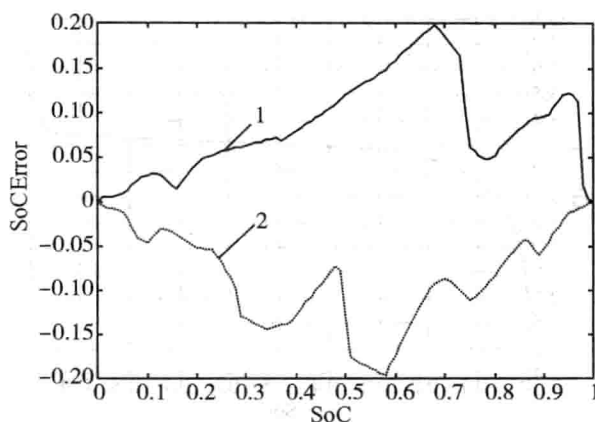


图 2-4 在充、放电过程中忽视滞回电压引起的 SoC 估算误差谱

注: 1 - 在充电过程中把 EMF 曲线当成充电平衡电势  $E_{\text{charge}}$  曲线所造成的 SoC 估算误差  
2 - 在放电过程中把 EMF 曲线当成放电平衡电势  $E_{\text{discharge}}$  曲线所造成的 SoC 估算误差

表 2-1 充、放电过程中忽视滞回电压引起的 SoC 估算误差的统计

误差原因	标准差	最大偏差	平均偏差
充电中忽视 $V_h$	0.0540	0.1955	0.0848
放电中忽视 $V_h$	0.0538	-0.1982	-0.0832

对于表 2-1, 还需要进一步的理解:

第一, 从以上的图、表可知, 一般而言, 如果忽视了动力电池的滞回电压特性, 那么在充电过程中估算的 SoC 值偏大, 而放电过程中所估算的 SoC 值偏小。

第二, 以上的数据都是基于磷酸铁锂电池获得的, 磷酸铁锂电池的 EMF-SoC 曲线比较平坦, 估算时造成的误差相对较大, 如果将电池类型换为三元材料锂离子电池的话, 表中的每一个单元格大概可以减小一半以上。因此, 有人认为, 三元材料的锂离子电池比磷酸铁锂电池更容易管理。从以上误差谱的角度来说, 这样的观点是有一定道理的。

## 2. 由于 EMF-SoC 曲线不准确所造成的 SoC 估算误差

即使考虑了滞回电压, 如果模型中所使用的 EMF-SoC 曲线不准确, 仍然会导致一定的 SoC 估算误差。EMF 是指电池两极的电动势, 其大小只与电池的材料类型以及工作温度相关。对于磷酸铁锂动力电池来说, 同一温度下的 EMF 值是唯一的, 下图为 20℃ 时, 磷酸铁锂动力电池的 EMF-SoC 曲线。

既然 EMF-SoC 曲线具有较好的稳定性, 可以进行较为精确的测定, 那么为何还会引起 SoC 估算的误差呢? 原因在以下两个方面: