

硕士学位论文

电动汽车锂离子电池建模及 SOC 估计方法研究

RESEARCH ON MODEL IDENTIFICATION AND STATE OF CHARGE ESTIMATION FOR LITH- IUM-ION BATTERY IN ELECTRIC VEHICLES

何磊

哈尔滨工业大学

2012 年 7 月

国内图书分类号: U469.72

学校代码: 10213

国际图书分类号: 656

密级: 公开

工学硕士学位论文

电动汽车锂离子电池建模及 SOC 估计方法研究

硕 士 研 究 生: 何磊

导 师: 王彤教授

申 请 学 位: 工学硕士

学 科: 控制科学与工程

所 在 单 位: 航天学院

答 辩 日 期: 2012 年 7 月

授予学位单位: 哈尔滨工业大学

Classified Index: U469.72

U.D.C: 656

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**RESEARCH ON MODEL IDENTIFICATION AND
STATE OF CHARGE ESTIMATION FOR LITH-
IUM-ION BATTERY IN ELECTRIC VEHICLES**

Candidate:	He Lei
Supervisor:	Prof. Wang Tong
Academic Degree Applied for:	Master of Engineering
Speciality:	Control Science and Engineering
Affiliation:	School of Astronautics
Date of Defence:	July, 2012
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

为了应对温室效应、石油危机的加剧，世界各国纷纷研究零排放的电动汽车。二次电池是电动汽车核心的动力来源，其中锂离子电池由于高体积比能量、高质量比能量等优点成为研究的热点。电池的荷电状态(State of Charge, SOC)估计是电池管理系统中一项核心的技术，SOC 的准确估计对于提高电动汽车的性能具有重要意义。在电动汽车背景下，本文以动力锂离子蓄电池为研究对象，建立锂离子电池模型，重点研究 SOC 的估计方法。

本文首先从锂离子电池的反应过程入手，根据电化学阻抗谱理论，依据锂离子电池的电化学阻抗谱测试结果，构建锂离子电池的阻抗谱模型。针对阻抗谱模型出现的问题，引入高阶 RC 等效电路模型。研究不同电池温度下电池的电化学阻抗谱，获取模型参数与电池温度的关系。

然后详细分析现有的 SOC 估计方法的利弊，针对电动汽车实时测量估计的环境，提出基于状态空间模型的状态观测法。根据非线性系统可观性方法对模型进行可观性分析，在模型可观的基础上，设计收敛的状态观测器估计电池的 SOC，状态观测器的稳定性通过 Lyapunov 稳定性理论来保证。针对具体的锂离子电池模型，设计 SOC 估计的全维状态观测器。

最后应用动力电池测试设备对锂离子电池不同温度下进行脉冲放电实验，验证状态观测器法 SOC 估计的有效性。实验结果表明，即使在 -20°C 环境下，状态观测器法 SOC 估计的误差在 $\pm 4\%$ 以内，说明状态观测器法估计 SOC 有很高的精度。低温环境放电实验结果表明锂离子电池在低温下由于内阻的增大导致电池电压低于放电截止电压，因而终止放电。

关键词 锂离子电池；等效电路模型；SOC 估计；状态观测器

Abstract

To cope with the increasing greenhouse effect and oil crisis, many countries focus on the research of electric vehicle (EV) for its zero emission. In the automotive field, electrochemical batteries are the core of energy source. Among various kinds of batteries, Lithium-ion battery is an ideal type of battery due to its high energy ratio and high power ratio. State of Charge (SOC) of batteries is vital to the performance of EV, and SOC estimation is one of the key techniques of the batteries management system (BMS). This paper focuses on the battery model and method of SOC estimation for lithium-ion battery.

Firstly, based on the electrochemical impedance spectroscopy (EIS) theory, an impedance-based model was built using the results of lithium-ion battery EIS test. To the problem raised in the impedance-based model, a high-order equivalent circuit model (ECM) was introduced. This paper used EIS technique to investigate the influence of battery temperature on the battery. The consequences can amend the phenomenon that parameters of current model are constant, thus improve the adaptability to the battery temperature change.

Secondly, according to the real-time estimation requirements for the EV, the method of state estimator was introduced. This paper verified observability of the model based on the method of nonlinear system observability. The result showed the battery model is observable, thus a state estimator exists. The overall design process includes poles placement and Lyapunov analysis. After pole placement is done, the LMI condition resulting from the Lyapunov analysis must be checked to verify the closed loop system is stable. According to the known model parameters, a real state estimator was set up.

Finally, lithium-ion battery pulse current discharge tests at various temperatures implemented using battery test system to verify state estimator method. Results show that even if Li-ion battery was at -20°C , the error using state estimator method was within $\pm 4\%$. It means this method has high accuracy. The results of discharge test at -20°C show that at low temperature the resistance of lithium-ion battery rises significantly, thereafter battery voltage falls below the cut-off value and discharge ends.

Keywords lithium-ion battery, ECM, SOC estimation, state estimator

目录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 课题背景及研究的目的和意义	1
1.2 课题的研究现状	3
1.3 本文的研究内容和组织结构	6
第 2 章 锂离子电池的建模	8
2.1 引言	8
2.2 锂离子电池反应过程	8
2.3 锂离子电池模型分析	10
2.3.1 内阻模型	10
2.3.2 戴维南等效电路模型	11
2.3.3 电化学机理模型	12
2.3.4 阻抗谱模型	13
2.3.5 电池模型总结	14
2.4 锂离子电池的交流阻抗谱模型	15
2.4.1 锂离子电池的交流阻抗谱测试	15
2.4.2 锂离子电池的阻抗谱模型	17
2.4.3 常相位角元件的处理	18
2.5 锂离子电池等效电路模型	22
2.5.1 等效电路模型阶数的确定	23
2.5.2 模型参数与电池温度的关系	25
2.5.3 模型验证	28
2.6 本章小结	29
第 3 章 参数依赖的 SOC 估计方法研究	30
3.1 引言	30
3.2 常见 SOC 估计方法分析	30
3.2.1 安时积分法	30
3.2.2 神经网络法	31
3.2.3 卡尔曼滤波法	32

3.2.4 状态观测器法	35
3.3 锂离子电池等效电路模型	36
3.3.1 模型概述	36
3.3.2 开路电压与 SOC 关系	37
3.3.3 模型简化	39
3.3.4 模型参数与电池温度的关系	43
3.4 SOC 估计算法	44
3.4.1 系统可观性分析	44
3.4.2 状态观测器设计方法	45
3.4.3 状态观测器设计小结	49
3.4.4 状态观测器设计实例	49
3.5 本章小结	51
第 4 章 SOC 估计的实验与分析	53
4.1 引言	53
4.2 SOC 估计方法验证	53
4.2.1 实验环境	53
4.2.2 实验方案	56
4.2.3 实验结果及分析	57
4.3 低温电池放电容量变化实验	61
4.3.1 实验方案	61
4.3.2 实验结果及分析	61
4.4 本章小结	62
结论	64
参考文献	66
附录 1	71
附录 2	72
攻读学位期间发表的学术论文	73
哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明	74
哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书	74
致谢	75

第1章 绪论

1.1 课题背景及研究的目的和意义

化学能源由于其性能可靠，移动便利的优点成为应用最广泛的能源装置。从机动车用的蓄电池到航天飞机用的燃料电池，从日常生活中使用的干电池到人造卫星所使用的太阳能电池，都是不同种类的化学能源^[1]。对于实际使用的电池，效率问题和状态问题是研究工作者最为关心的两个问题。电化学系统本身的特性决定了电池的效率问题，其参数指标一般为放电电流密度，工作电压平稳性，放电截止电压^[2]。如果电池电压低于放电截止电压，应该立即终止放电。电池的状态问题包含以下几个方面：

- (1). 电池的电极在充放电过程中任意时刻的状态及变化规律。
- (2). 电池在充放电过程中任意时刻的荷电状态，即电池的可用电量，这也是本文研究的重点。
- (3). 随着充放电次数的增加，电池寿命的变化规律。
- (4). 电池在搁置时，电池自放电损失的电量变化规律。

针对电池的上述问题，电池的性能指标一般包括标称电压，标称容量，自放电率，SOC，SOH，循环寿命等。其中 SOC 是电池的荷电状态，其标准定义为：在一定的放电倍率下，电池剩余的电量与标称容量的比值，SOC 通常用百分比形式表示，数学表达式见式(1-1)^[3]：

$$SOC = SOC_{initial} - \frac{1}{C_n} \int_0^t \eta I d\tau \quad (1-1)$$

式中 $SOC_{initial}$ ——SOC 的初始值。

C_n ——电池的标称容量。

η ——电池的放电效率。

I ——电池的放电电流。

电池的荷电状态是电池在放电过程中的重要参数，根据电池的荷电状态，电池的使用者可以对电池进行合理的操作，有效地防止电池过充电或者过放电，从而保护电池，延长电池的使用寿命，因此准确的电池荷电状态信息对于电池的正常使用具有重要指导意义。由荷电状态的计算公式可知，电池的荷电状态是不可以直接测量的，实际中通常是通过测量电池的电压，电流，温度等直接可以测量的信息，然后根据这些信息估计电池的荷电状态。但是，电池的荷电状态与温度，前一时刻的充电或放电的状态，老化程度等许多因素有关，而且具有很强的非线性，因此荷电状态的估计是一项挑战性的工作，目前尚没有精确估计而且计算简便的方法。综上所述，荷电状态的估计是电池管理系统中的关键技术之一。

汽车自诞生以来已经成为人们日常生活不可缺少的交通工具，为人类提供便利快捷的同时，也加剧温室效应，环境污染和石油等不可再生能源的枯竭^[4]。针对上述问题，采用清洁能源作为动力来源的电动汽车应运而生。电池是电动汽车中的唯一动力来源，其特性对于电动汽车的性能具有重要作用。常用的动力电池有铅酸电池、镍氢电池、锂离子电池以及新兴的燃料电池和超级电容器^[5]。不同种类的电池的工作原理不同，电池特性也各不相同。常见的三类蓄电池的比较如表 1-1所示。

表 1-1不同电池的比较^[5]

	铅酸电池	镍氢电池	锂离子电池
工作电压(V)	2.0	1.2	3.2
质量比能量(Wh/Kg)	40	80	130
体积比能量(Wh/L)	10000	200	285
能量效率(%)	65%	70	>95
循环寿命(次)	500	500	1000
自放电率(%/月)	5	18	7
记忆效应	无	有	无

电动汽车对于电池的要求是具有较高的平台电压，具有较高的质量比能

量，具有较高的体积比能量，循环寿命长。从表 1-1 可以看出，三种电池之中，锂离子电池满足以上所有的要求。对于电动汽车有限的空间和质量的限制，相同体积或者相同质量的锂离子电池可以释放更多的能量。锂离子电池在相同条件下充放电特性一致，即滞回效应小。此外，锂离子电池没有记忆效应，电池的容量不会因为充电进行不当而减少。因此，锂离子电池成为目前电动汽车电池研究的重点，也是本文的研究对象。

电池及其管理技术作为电动汽车三大关键技术之一，对电动汽车电池组的正常运行以及电动汽车的运行具有重要指导意义^[6]。其中，电池荷电状态的估计即 SOC 的估计是电池管理技术中一项核心的工作。SOC 的准确估计可以防止电池过充或者过放，减少电池的滥用，延长电池的使用寿命。对电池来说，如果 SOC 估计值偏低，即实际可用的电量高于估计值，根据 SOC 的估计值，电池在正常放电结束条件之前终止放电，降低了电池的效率。同样地，SOC 估计值偏高的话，估计容量比实际容量大，使用时容易造成电池的过放电，对电池造成损害。SOC 的精确估计对于电动汽车整车的性能具有重要意义。在汽车仪表中，SOC 的估计值结合车速值估计剩余里程。整车控制器中，SOC 的估计值用来能量优化策略的分析与设计。因此，SOC 估计对于电池以及整车性能都有重大的意义^[7]。

鉴于 SOC 估计的重大意义，本文研究一种基于状态空间模型的锂离子电池的 SOC 估计算法，估计算法适用于电动汽车实时估计的环境中。

1.2 课题的研究现状

伴随着电池的发明与推广，SOC 估计方法不断发展。最初的 SOC 估计主要用来提示电池是否需要更换电池，因此 SOC 的估计并不要很高的精度，这可以追溯到 1938 年 Heyer 设计的 SOC 估计器，它仅仅使用电池两端的电压来估计电池的 SOC，因此精度不高^[8]。随着电池技术的不断发展以及消费电子对 SOC 估计精度的要求越来越高，SOC 估计策略也持续发展和改

进。目前常用的 SOC 估计策略有开路电压法，安时积分法，交流阻抗法，神经网络法，卡尔曼滤波法，滑膜观测器法等等。

开路电压法是较早的 SOC 估计策略之一，也是应用较为广泛的估计算法^[9]。它的基本原理是电池的开路电压与 SOC 有着固定的关系，一般开路电压随着 SOC 的增加而单调递增，通过测量开路电压与 SOC 的关系曲线(事先通过实验测量标定)，这样，对于确定的开路电压对应着该时刻电池的 SOC 值。实际应用中，将电池的 SOC 值与开路电压的关系通过建立表格的形式存储于处理器中，测量任一时刻的开路电压值，然后通过查表得到该时刻的 SOC 值。该方法最大的优点是简便，可以得到准确的 SOC 初始值，并且应用于各种电池。该方法的局限性也是显而易见的，主要有以下几个方面：

(1). 电池的 SOC 值与开路电压的曲线需要事先测量标定，测量需要耗费大量的时间。

(2). 在温度变化较大的条件下，同一电池的开路电压变化比较大，也就是不同温度下，电池的 SOC 值与开路电压的关系曲线不一致。

(3). 开路电压一般是电池放电后静置后的电压，至少需要静置 1 小时以上，对于需要在线实时估计 SOC 的电动汽车环境下，该条件很难满足。

自从 1975 年 Fingers 等的专利中提出安时积分法，该估计策略得到广泛的应用。该方法的基本思想是将电池看作一个黑箱，不管内部的状态变化，只对进出电池的电流进行积分，从而计算出电池消耗或积累的电量，通过计算得到该时刻电池的 SOC 值^[10,11]。该方法的局限性有以下两个方面，首先无法给出 SOC 的初始值，如果 SOC 的初始值不准确的话，这样估计得到的 SOC 值将会一直存在常值误差。实际使用中，通常结合开路电压法进行估计，由开路电压法估计 SOC 初始值，再通过安时积分法进行估计。其次，该方法需要电流测量具有很高的精度，由于积分的累积效应，电流测量引入的误差将一直累加，造成 SOC 估计的不准确。因此，安时积分法一般

不单独使用，通常结合其他方法如开路电压法等来提高 SOC 估计的精度。

上世纪 60 年代初，荷兰物理化学家 J H Sluyters 提出了电化学阻抗谱理论，通过对电池两端施加小幅度的干扰信号，测量电池的响应，进而得到电池的交流阻抗，根据交流阻抗来估计电池的 SOC 值^[12]。该方法的优点是在很宽的频率范围内，可以得到电池内部的动力学特征信息。但是该方法估计电池的 SOC 也存在缺陷。首先，在 SOC 很大或者很小的情况下，电池的交流阻抗谱变化比较明显，但是对于 SOC 变化不大的情况，电池的交流阻抗谱变化很小，测量精度不够的话，误差比较大。其次，电池的电化学阻抗谱受到很多因素的影响，最大的影响因素是温度，对于温度变化比较大的情形，采用交流阻抗法估计 SOC 的误差大。最后，电池的电化学阻抗谱测量需要专业的电化学分析仪，对于电动汽车的车载环境下，该方法显然不适用。

基于现代控制理论而提出的 SOC 估计策略在近年来得到了长足的发展，其中主要的方法有卡尔曼滤波法，神经网络法，状态观测器法等。卡尔曼滤波法是对动力系统状态的最优估计，同时可以给出误差的范围^[13-15]。G. Plett 对于电池的非线性模型提出了扩展卡尔曼滤波法，将模型近似线性化，获得很高的估计精度^[16]。同时，还发展出自适应卡尔曼滤波法，无迹卡尔曼滤波法，双通道卡尔曼滤波法。卡尔曼滤波法可以应用于实时测量，电流波动比较大的电动汽车环境中，同时可以给出估计值的误差范围，是目前研究最广泛的 SOC 估计算法。关于该方法的分析将会在第三章中详细阐述。

人工神经网络可以模拟人的抽象，学习，思考的能力，具有高度非线性特点，而且不需要具体的数学模型，根据外部激励自动计算相应的输出值，因此对于电池的高度非线性特点，人工神经网络可以很好的应用^[17,18]。用于估计电池荷电状态的神经网络通常包含为三层，分别为输入层，中间层，输出层。输入层的输入量一般为电池的电压，电流，电池温度，电池内阻，循

环次数等。神经网络需要对电池进行各种工况下的测试和训练，以获得足够的数据。因此，神经网络的弊端是估计精度受训练方法和训练数据的影响比较大，而且对电池的测试需要进行各种条件下的测试，前期测试工作繁琐，耗时久，实际使用时，对计算机的计算能力和存储要求高，因此神经网络法不适用于电动汽车的实时在线测量的要求。

状态观测器法是基于电池模型进行的，因此首先需要给出电池的模型，其基本思想是让电池的 SOC 作为模型的状态，通过设计观测器对状态进行观测^[19,20]。状态观测器的前提是误差矩阵的特征值收敛，即需要控制理论的知识来设计收敛的状态观测器，这样，SOC 的估计值收敛到 SOC 的真实值。常用的 SOC 观测器有滑膜观测器、全维观测器。相比于卡尔曼滤波法，状态观测器法计算量小，不需要进行矩阵求逆运算，而且 SOC 估计值收敛，但是观测器设计阶段需要控制理论的知识来保证收敛性。

随着电动汽车对 SOC 估计的要求越来越高，越来越多的 SOC 估计策略会陆续涌现，也出现不同的估计策略有机的结合在一起使用来弥补单一方法的不足。

1.3 本文的研究内容和组织结构

本文以电动汽车为研究背景，深入研究 SOC 估计策略。通过测量锂离子电池的电化学阻抗谱，构建锂离子电池的阻抗谱模型。研究不同电池温度下锂离子电池的电化学阻抗谱，获取模型参数与电池温度变化的关系，构建锂离子电池的线性时变系统。对于不同的 SOC 估计策略，设计适用于建立的锂离子电池模型的估计策略，通过对锂离子电池进行充放电测试，验证估计算法的可行性。对锂离子电池进行不同倍率的充放电测试，研究锂离子电池在不同放电倍率下的放电容量和温升变化。

本文的组织结构如下：

第一章：绪论。主要介绍课题背景以及 SOC 估计策略的研究现状，给

出研究的目的和意义以及本文的研究内容和组织结构。

第二章：锂离子电池等效电路模型。从锂离子蓄电池的电化学阻抗谱出发，构建锂离子电池阻抗谱模型。针对模型中常相位角元件不能写成状态空间描述的问题，引入等效电路模型拟合实验得到的电化学阻抗谱。研究不同电池温度下电池的电化学阻抗谱，获取模型参数与温度变化的关系，提高模型参数对于电池温度变化的适应性。

第三章：参数依赖的 SOC 估计方法研究。详细分析现有 SOC 估计策略的优缺点，在第二章建立的锂离子电池等效电路模型的基础上，验证模型的可观性，应用李雅普诺夫稳定性理论设计收敛的 SOC 状态观测器。针对具体的锂离子电池模型，设计实际的状态观测器。

第四章：SOC 估计的实验与分析。使用电池测试设备对锂离子电池进行测试，验证 SOC 估计方法的有效性，主要进行不同电池温度下锂离子电池脉冲放电的实验。结果表明状态观测器法估计 SOC 的误差在 $\pm 4\%$ 以内。

第2章 锂离子电池的建模

2.1 引言

为了研究锂离子电池的特性，中外学者建立了许多的锂离子电池模型，针对研究的内容，所建立的锂离子电池模型通常分为四类：热量模型，耦合模型，内部机理模型和性能模型^[21]。电化学反应总是伴随着热量的变化，因此热量模型主要研究锂离子电池的生热、传热过程，一般包括一维模型、二维模型等，根据热模型建立的电池热管理系统可以控制电池的温度。电池反应的过程都伴随着能量的变化，而温度变化反过来又会影响电池反应的速率，因此耦合模型既可以研究电池的电极反应，又考虑到电池热量的变化。内部机理模型研究锂离子电池微观反应过程并且用数学方法推导的，从粒子角度详细描述每一步反应过程，内部机理模型一般研究电池电动势、电极和隔膜的电势分布等。电池的性能模型描述锂离子电池工作时的外部特征，描述锂离子电池工作时电压、电流和内阻的变化，性能模型简单直观。本章将从电池的反应过程出发，从锂离子电池的电化学阻抗谱模型入手，建立锂离子电池等效电路模型，为下一步电池的 SOC 估计奠定基础。

2.2 锂离子电池反应过程

在二次金属锂电池的基础上，发展出一种锂离子电池，它是一种锂离子浓度差电池，阴极和阳极由两种可以嵌入或脱嵌锂离子的嵌入化合物组成^[22]。嵌入化合物是一种电子—离子混合导体，电子的导电性使其成为电极材料，离子的导电性使其成为电极活性物质。通常情况下，阴极是锂的过渡金属的离子嵌入化合物(LiMO_2 , $\text{M}=\text{Co}$ 、 Mn 等跃迁金属)，阳极是由碳化合物组成(石墨等)，可以嵌入锂离子。以 LiCoO_2 为例，图 2-1描述了锂离子电

池的反应过程。

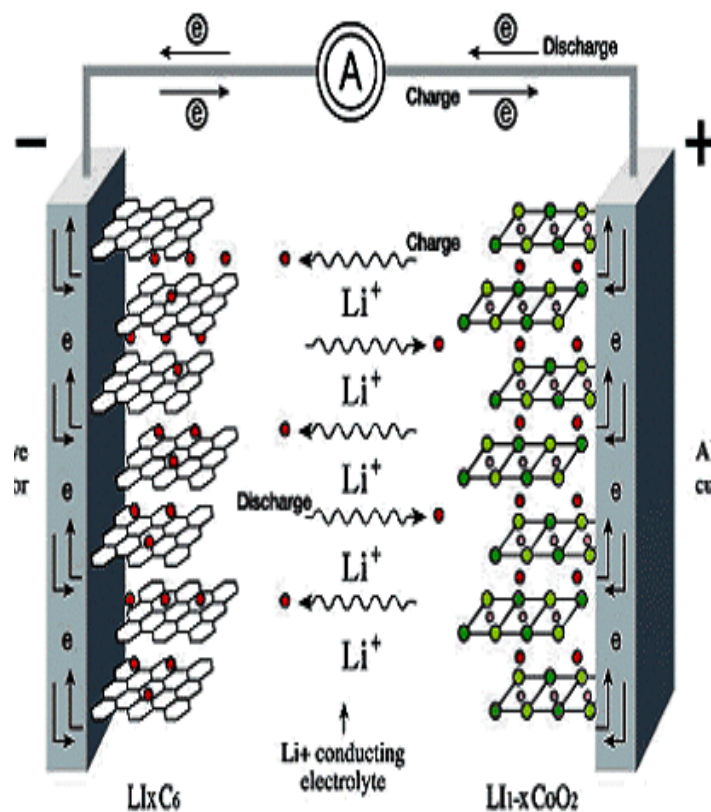
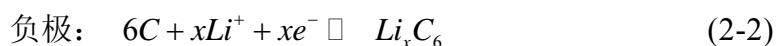
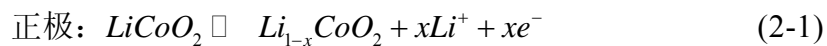


图 2-1 锂离子电池工作原理^[23]

锂离子在电极中的脱出和嵌入过程是一种比较特殊的电化学反应，称为电化学嵌入反应。该反应进行时，在电极/电解液界面上发生的是离子的嵌入与脱出，而不是传统电化学反应的电子的传递，同时，在电化学嵌入反应过程中，离子嵌入到电极材料内部或从电极材料内部脱出，电极的结构和性质随之发生改变。电化学反应的方程式见式(2-1),(2-2),(2-3)。





以上各式中，正向为充电反应，反向为放电反应。充电时，锂离子从 LiCoO_2 阴极中脱出，经过电解质溶液中，嵌入到石墨阳极中。放电时，锂离子从石墨孔隙中脱出，经过电解质溶液后形成 LiCoO_2 同时经过外电路放出电流。由此可见，锂离子电池的电化学反应的过程就是锂离子在正负极间嵌入脱出的过程，因此锂离子电池也被称作“摇椅电池”^[24]。

从上面的分析可知，锂离子反应过程一般包括以下几个方面：

- (1). 锂离子在电解质溶液中的浓差扩散过程；
- (2). 锂离子从电解质溶液向电极表面的扩散过程；
- (3). 锂离子通过 SEI 膜的迁移过程；
- (4). 锂离子在电极表面发生的反应过程；
- (5). 锂离子在固相中的扩散和积累过程。

综上，锂离子电池的电化学反应是非常复杂的反应过程，不仅包括一系列串联的步骤，在串联反应的同时，还存在一些并列进行的反应过程。

2.3 锂离子电池模型分析

常用的锂离子电池模型一般有内阻模型，戴维南等效电路模型，电化学机理模型和阻抗谱模型，下面从模型的复杂程度，精度和应用场合等角度对上述模型进行分析。

2.3.1 内阻模型

内阻模型将锂离子电池看成电压源和内阻组成，是一种最简单的电池模型。内阻模型的结构见图 2-2。电池模型由电池的电动势 U_{oc} 和内阻 R 组成，其中 U_{oc} 是电池 SOC 的函数。内阻模型反映了锂离子电池静态时的特性，在一定程度上可以模拟锂离子电池的特性。著名的汽车动力学仿真软件

Advisor 使用的就是内阻模型^[25]。

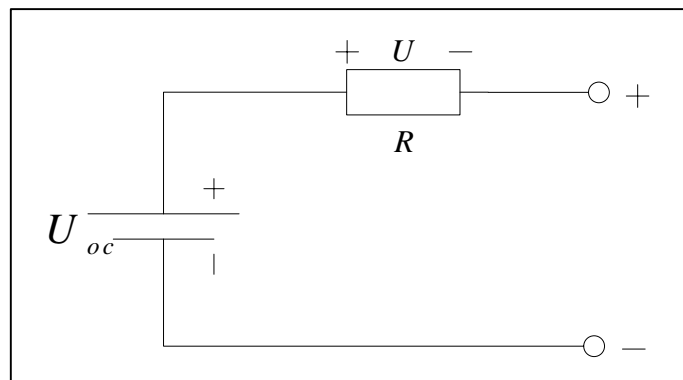


图 2-2 锂离子电池的内阻模型

内阻模型最大的优点是简单，然而模型的简化程度过大也使得内阻模型的精度降低，因此内阻模型一般应用于静态时电池的仿真场合。

2.3.2 戴维南等效电路模型

通过测量锂离子电池对恒流充放电的电压响应曲线建立的戴维南等效电路模型应用场合非常广，已经成为最常用的锂离子电池模型^[26-30]。戴维南等效电路模型结构见图 2-3。

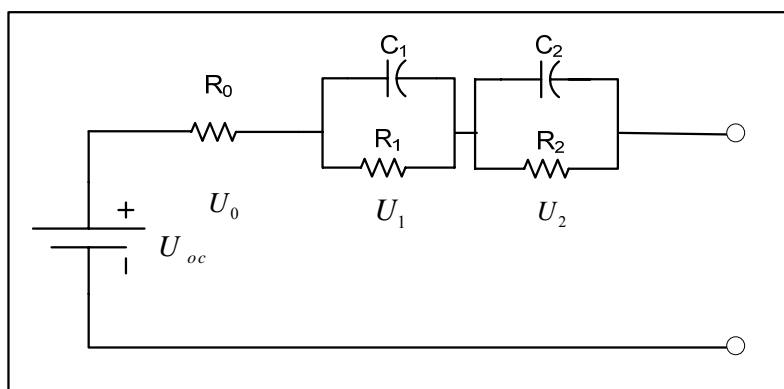


图 2-3 锂离子电池的戴维南等效电路模型

相比于内阻模型，戴维南等效电路模型增加两个 RC 电路环节用于模拟

电池的动态特性。同样，电池的开路电压 U_{oc} 为电池 SOC 的函数，等效电路其他的电路参数可以通过对电池电压的响应曲线进行非线性最小二乘拟合获取，模型参数获取方便。Gabrial A. Rincon-mora 改进了戴维南等效电路模型，增加电容和电流控制电流源来模拟电池容量、开路电压，提高了模型的精度^[31]。戴维南等效电路模型结构简单，参数获取容易，目前被广泛应用于电池 SOC 的估计中。但是等效电路模型参数固定，适用于电流变化不大的场合，因此在实际工况下，SOC 估计的精度不高。

2.3.3 电化学机理模型

电化学机理模型是通过对锂离子电池内部反应机理建立的，可以解释锂离子电池电化学反应的每一步过程。

在极片 x 处，在 t 时刻，电流密度为^[32]：

$$i_{s,l}(x,t) = i_{0,l}(x,t) \left\{ \exp\left[\frac{\alpha_{al}F}{RT}\eta_l(x,t)\right] - \exp\left[-\frac{\alpha_{cl}F}{RT}\eta_l(x,t)\right] \right\} \quad (2-4)$$

其中， α_{al} 和 α_{cl} 为正极和负极传递系数， T 是绝对温度， R 是气体常数， F 为法拉第常数。

$\eta_l(x,t)$ 为在负极极片 x 处，电化学的表面过电势，有：

$$\eta_l(x,t) = \phi_{s,l}(x,t) - \phi_{e,l}(x,t) - U_{s,l}(x,t) - i_{s,l}(x,t)R_{f,l} - I_{total}R_{reference} \quad (2-5)$$

根据 Fick 定律^[1]，有：

$$\frac{\partial C_{s,l}(x,t,r)}{\partial t} = D_{s,l} \frac{\partial^2 C_{s,l}(x,t,r)}{\partial r^2} + D_{s,l} \frac{2}{r} \frac{\partial C_{s,l}(x,t,r)}{\partial t} \quad (2-6)$$

其中， $C_{s,l}(x,t,r)$ 为在负极片 x 处，活性材料颗粒 r 处的活性材料浓度。

在多孔电极中，电子电流与导电率的关系为：

$$\kappa_{e,l}^{D,eff} = \frac{RT\kappa_{e,l}^{eff}}{F} (2t_{e,l}^0 - 1) \left(1 + \frac{\partial \ln f}{\partial \ln C_{e,l}(x,t)} \right) \quad (2-7)$$

溶液浓度方程为：

$$\frac{\partial C_{e,2}(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} D_{e,2}^{eff} \left[\frac{\partial C_{e,2}(x,t)}{\partial x} \right] - \frac{\partial t_+^0}{\partial x} \frac{j_{l,2}(x,t)}{F \varepsilon_{e,2}} \quad (2-8)$$

溶液相电势：

$$J = \frac{RT \kappa_{e,l}^{eff}}{F} (2t_{e,l}^0 - 1) \left(1 + \frac{\partial \ln f}{\partial \ln C_{e,l}(x,t)} \right) + \kappa_{e,2}^{eff}(x,t) \frac{\partial \phi_{e,2}(x)}{\partial x} \quad (2-9)$$

正极片的方程与负极片类似，可见，锂离子电池的电化学模型是由偏微分方程构成的，而且模型参数很多，有时多达几十个^[33]。使用电化学模型估计 SOC 精度最高，但是模型的计算周期长，计算量大。因此，电化学机理模型一般用于电化学工作者进行电池特性的设计。

2.3.4 阻抗谱模型

电化学阻抗谱(Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)是研究固体电极表面反应过程的重要方法，EIS 技术是通过对电化学体系施加一定振幅、不同频率的正弦波交流扰动信号，获得频域范围内相应电信号反馈的交流测试方法^[34]。电化学阻抗谱测量频率很宽的阻抗谱来研究锂离子电池，因而可以获得更多的电池动态特性和阴极、阳极界面的特征，通常情况下，测试频率范围为 0.01Hz~10000Hz。它可以根据电化学嵌入反应每一步弛豫时间常数的不同，在较宽频率范围内表征电化学嵌入反应的每一步。因此电化学阻抗谱可以表征锂离子电池的反应过程。

锂离子电池的典型阻抗谱如图 2-4所示，其中横坐标表示阻抗的实部，纵坐标表示阻抗的虚部，因为锂离子电池的阻抗谱的虚部总呈现容抗特性，容抗的虚部总为负，为了使阻抗谱图形位于第一象限，因此使用虚部的相反数作为虚轴，这也是阻抗谱的惯例。从图中可以直观的看出锂离子电池在不同频率段的阻抗特征。

如果能够使用电学元件(如电阻、电容和电感等)组成的电路，使得电路的阻抗谱与实验得到的电化学阻抗谱类似，这样的电学电路为等效电路。根

据锂离子电池的电化学阻抗谱形状构建的阻抗谱等效电路模型可以很好的描述电池电化学嵌入反应过程，同时模型参数代表相应的电化学反应过程^[35,36]。阻抗谱模型可以等效锂离子电化学反应过程，是一种接近机理模型，同时电路形式比较简单的模型。下面将从锂离子电池电化学阻抗谱实验入手，构建锂离子电池的阻抗谱模型。这些工作将在下面章节中详细阐述。

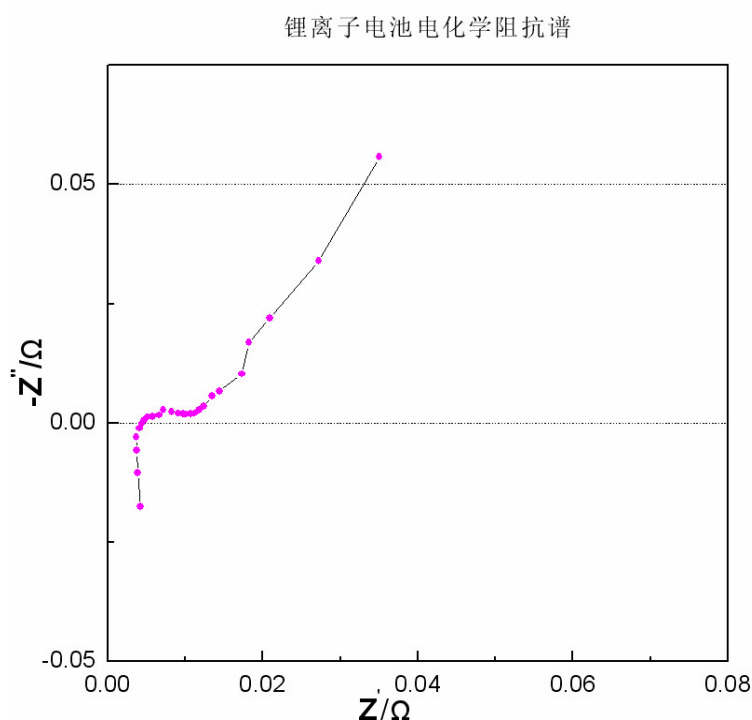


图 2-4 $T=18^{\circ}\text{C}$ ，SOC=100%锂离子电池的交流阻抗谱

2.3.5 电池模型总结

上文对常用的电池模型进行分析，上述模型可以适用于镍氢电池、锂离子电池等二次电池。不同模型有各自的优点和缺点，没有一种既简单又精度高的模型，因此各个模型有各自应用的场合。接下来本文将从阻抗谱模型出发，根据锂离子电池的电化学阻抗谱实验结果，提出锂离子电池的电化学阻抗谱模型。研究不同温度下锂离子电池的电化学阻抗谱，获取模型参数

跟温度的关系。

2.4 锂离子电池的交流阻抗谱模型

为了得到锂离子电池的交流阻抗谱模型，首先需要测试锂离子电池的电化学交流阻抗谱。测试锂离子电池的电化学阻抗谱需要专业的电化学分析仪。

2.4.1 锂离子电池的交流阻抗谱测试

2.4.1.1 测试设备

测试所用锂离子电池为商品化锂离子电池单体 2 片，正极材料为 LiFePO₄，负极材料为石墨，隔膜为聚合物电解质。锂离子电池单体的参数如表 2-1 所示。电化学阻抗谱测量仪器为美国 Princeton applied research 公司的 M2273 电化学分析仪。温度测量使用 HT-830 红外测温仪。实验中将电池单体置于泡沫保温箱中防止电池单体温度变化太快。实验连接图见附录 1。

表 2-1 实验锂离子电池单体参数

	标称容量	标称电压	放电终止电压	充电截止电压
参数	5Ah	3.2V	2.0V	3.65V

2.4.1.2 测试方法

对一个稳定的电极系统施加一个角频率为 ω 的振幅足够小的正弦波电流或者电压信号的扰动，相应地电极系统就会做出同样频率的正弦波响应，在被测电极与参比电极之间就会输出同样频率的电压响应，通过式(2-10)计算，就能得到该频率下的电化学阻抗。

$$Z(j\omega) = \frac{U(j\omega)}{I(j\omega)} \quad (2-10)$$

在不同角频率下连续测得的一组交流阻抗就是电池的电化学交流阻抗谱(EIS)。测试中，采用的是频率 0.01Hz~10000Hz，振幅为 10mV 的正弦波电

压。

2.4.1.3 测试结果及分析

通过锂离子电池电化学阻抗谱测试，共得到电池在以下五个温度点的电化学阻抗谱，分别为 -11°C ， -5°C ， 6°C ， 8°C ， 18°C ，不同温度下锂离子电池阻抗谱如图 2-5所示。这些数据将是下文中锂离子电池阻抗谱模型的基础。

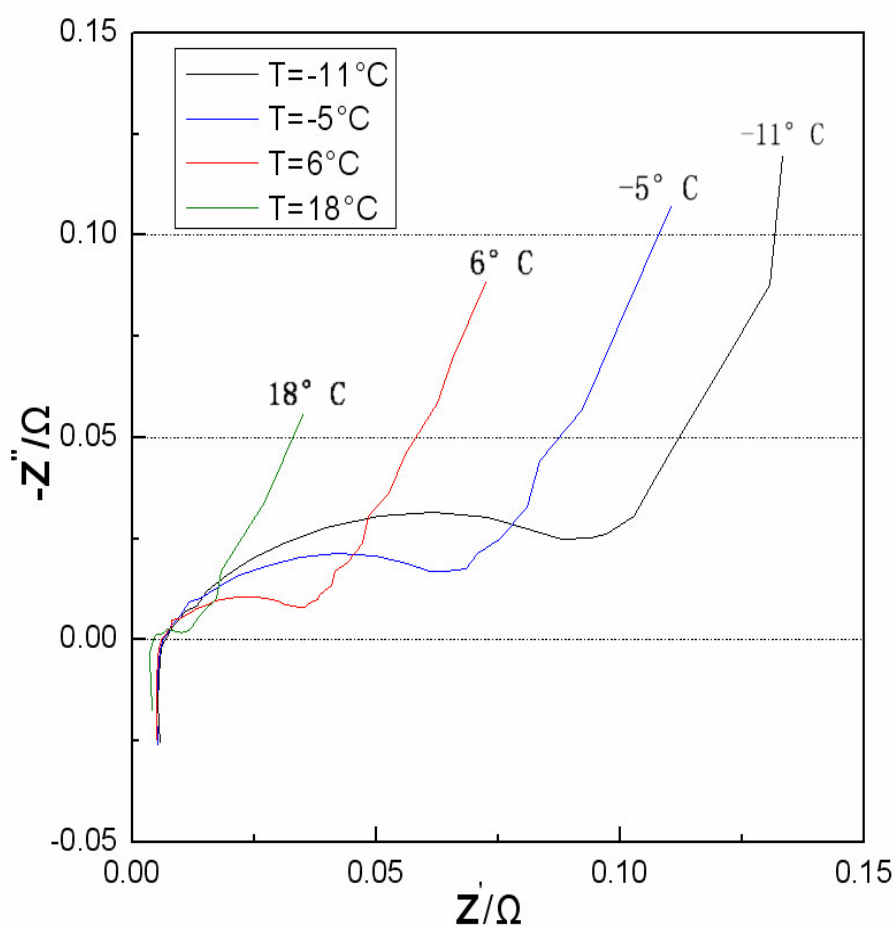


图 2-5 不同温度下锂离子电池阻抗谱

从图 2-5可以看出，高频段，锂离子电池的电化学阻抗谱几乎不变。中频段，随着电池温度的降低，锂离子电池的电化学阻抗谱圆弧逐渐增大，表明温度越低，锂离子电池的阻抗越大。

2.4.2 锂离子电池的阻抗谱模型

根据锂离子电池电化学阻抗谱实验结果，由图 2-5 可知，电池温度不同，锂离子电池阻抗谱形状不同，说明电池温度对锂离子电池内部参数有影响，模型的结构是确定的。从阻抗谱图形上来看，阻抗谱一般分为三段，高频段：位于虚轴下方，表现电感特性。中频段：阻抗谱图中第一象限的容抗弧，表现锂离子的电荷传递。低频段：相位角固定的斜线，表现锂离子在固态中的扩散过程。

电化学阻抗谱只能通过图形来定性描述锂离子电池的阻抗特性，为了定量地去分析，根据实验得到的锂离子电池电化学阻抗谱的形状，由常见电路的阻抗谱串联和并联建立的阻抗谱模型结构如图 2-6 所示。由于电化学阻抗谱只能测试电池阻抗信息，所以阻抗谱模型中没有电池电动势，电池电动势的模型将在第三章给出。

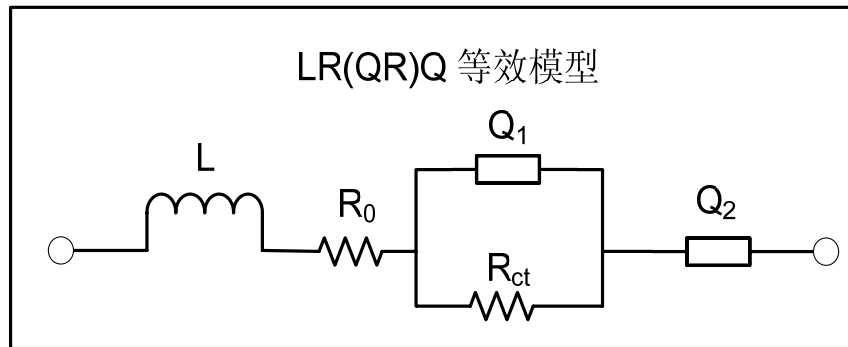


图 2-6 锂离子电池的阻抗谱模型

图 2-6 中的电感 L 是由电极集流体和导线产生的， R_0 代表电池的体电阻，表示锂离子通过电解质、多孔隔膜、导线、活性材料颗粒等输运有关的欧姆电阻， Q_1 / R_{ct} 代表阳极和阴极的电荷传递过程。 Q_2 代表锂离子在活性材料颗粒内部的固体扩散过程^[37]。

电极表面与电解溶液之间的电双层，通常等效为一个电容，但是在电化

学阻抗谱测试中发现，固体阴极的电双层电容与“纯电容”的特性并不是完全一致，而是存在一定的偏移，这种现象称为“弥散效应”^[38]。“弥散效应”出现的原因现在还没有完全弄清楚。由于 RC 电路的交流阻抗谱是一个完整的半圆，不能模拟锂离子电池电化学阻抗谱中出现的压扁的半圆，因此形成一种新的等效元件 Q。等效元件 Q 的引入可以很好地模拟电化学阻抗谱中压扁的半圆，但是同时也带来一个问题。

2.4.3 常相位角元件的处理

2.4.3.1 常相位角元件的概述

等效元件 Q 的表达式如下：

$$Z_Q = \frac{1}{Y_0} \cdot (j\omega)^{-n} \quad (2-11)$$

$$\begin{cases} Z'_Q = \frac{w^{-n}}{Y_0} \cos(\frac{n\pi}{2}) \\ Z''_Q = \frac{w^{-n}}{Y_0} \sin(\frac{n\pi}{2}) \end{cases} \quad 0 < n < 1 \quad (2-12)$$

由 Z''_Q/Z'_Q ，得到这一元件相位角的正切为：

$$\tan \phi = \tan(\frac{n\pi}{2}), \quad \phi = \frac{n\pi}{2} \quad (2-13)$$

因此，等效元件 Q 有两个参数：一个参数是 Y_0 ，其量纲是 $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-n}$ ，Q 是用来描述纯电容 C 的参数的偏移量，因而与 C 一样， Y_0 总为正值；另一个参数是 n ，它是无量纲的指数。从上式可以看出，等效元件 Q 的相位角与角频率没有关系，因此被称为常相位角元件(CPE: Constant Phase Element)^[39]。

锂离子电池阻抗谱测试得到的圆弧是一个压扁的半圆，常相位角元件的引入可以很好地模拟这一现象，但是同时也带来一定的麻烦。常相位角元件是电化学工作者为了处理电化学阻抗谱中压扁的半圆引进的，没有实际的意

义，而且常相位角元件的表达式中含有角频率的非整数次幂，不能做拉氏变换，因此无法将等效电路模型写成传递函数和状态空间描述形式。

2.4.3.2 常相位角元件的处理

针对锂离子电池阻抗谱中的常相位角元件不能写成状态空间描述的问题，引入高阶 RC 等效电路来模拟电化学阻抗谱中出现的压扁的半圆。处理的核心思想是使高阶 RC 等效电路阻抗谱的曲率逐渐接近常相位角元件的电化学阻抗谱的曲率。

下面以 $T=6^{\circ}\text{C}$ 时锂离子电池的电化学阻抗谱为例，等效电路选用 LR(QR)Q，等效电路的结构如图 2-6 所示。其中 R(QR)的参数为： $R=0.0048\Omega$ ， $Q=2.43$ ， $n=0.65$ ， $R_1=0.03\Omega$ 。使用电化学处理软件 Zsimpwin 模拟得到的阻抗谱图 2-7 所示。

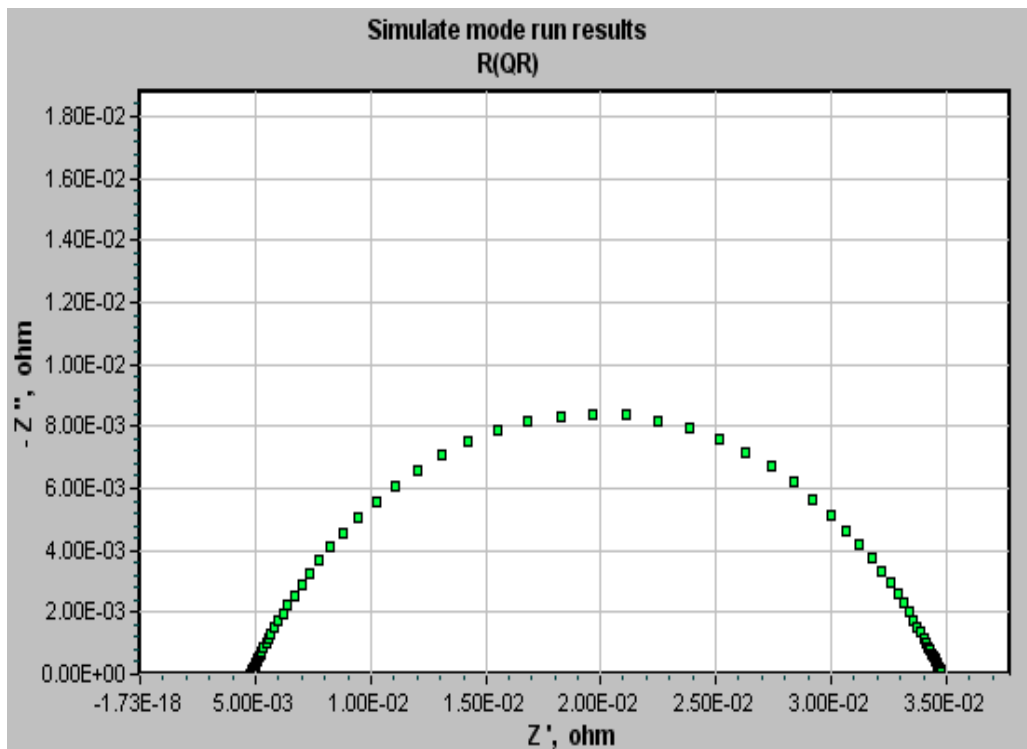


图 2-7 R(QR)电路的电化学阻抗谱

对于图 2-7 中的阻抗谱，使用六阶 RC 等效电路来拟合，等效电路结构如图 2-8 所示。

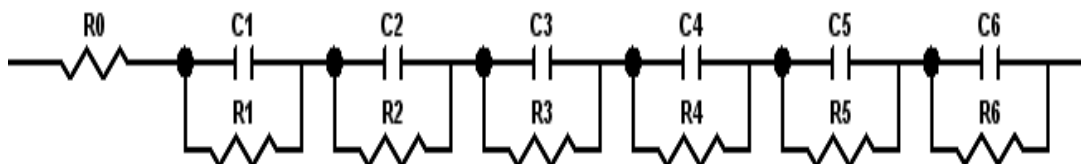


图 2-8 六阶 RC 等效电路

拟合后等效电路的电化学阻抗谱与原始阻抗谱的比较如图 2-9 所示。图中，黑色曲线为 R(QR) 电路的阻抗谱，绿色曲线为拟合后六阶 RC 等效电路的阻抗谱。

从拟合的比较图中可以直观的看出，六阶 RC 等效电路模型可以很好地模拟 R(QR) 电路的阻抗谱。六阶 RC 等效电路阻抗的波特图与 R(QR) 阻抗的波特图比较图如图 2-10 所示。从波特图的比较中，可以看出高阶 RC 等效电路模拟的效果很好。从误差角度分析，六阶 RC 等效电路模型与原始电路拟合的均方差为 0.0017185，离差平方和为 0.12717。进一步的测试结果表明，模型阶数越高，拟合的效果越好。

拟合后得到六阶 RC 等效电路模型参数如表 2-2 所示。

表 2-2 六阶 RC 等效电路模型参数

模型元件	R_0	C_1	R_1	C_2	R_2	C_3
参数	0.0048379	6.866	0.0088599	0.47996	0.0048962	219.4
R_3	C_4	R_4	C_5	R_5	C_6	R_6
0.00282024	0.069113	0.0040427	0.23045	0.0014721	1.074	0.011272

不失一般性，将等效电路参数 n 改为 0.8，即圆弧的曲率变大。采用六阶 RC 等效电路得到的阻抗谱与原始电路阻抗谱的比较图如图 2-11 所示。从图 2-11 可以看出，六阶模型可以很好地拟合原始阻抗谱。

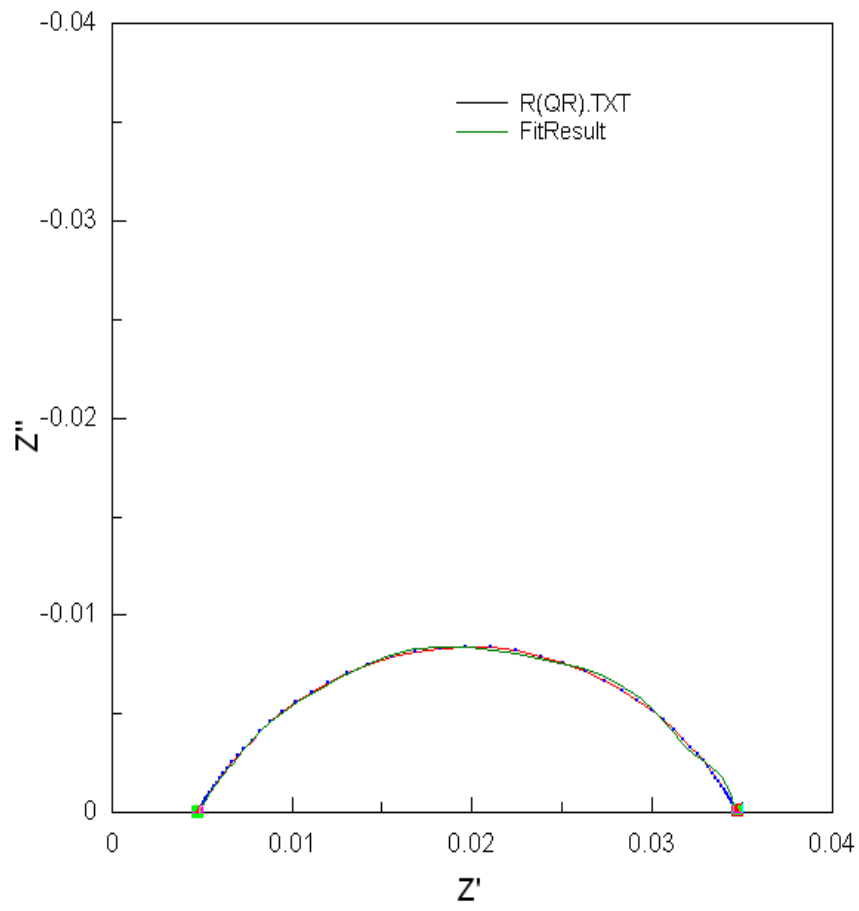


图 2-9 拟合比较图

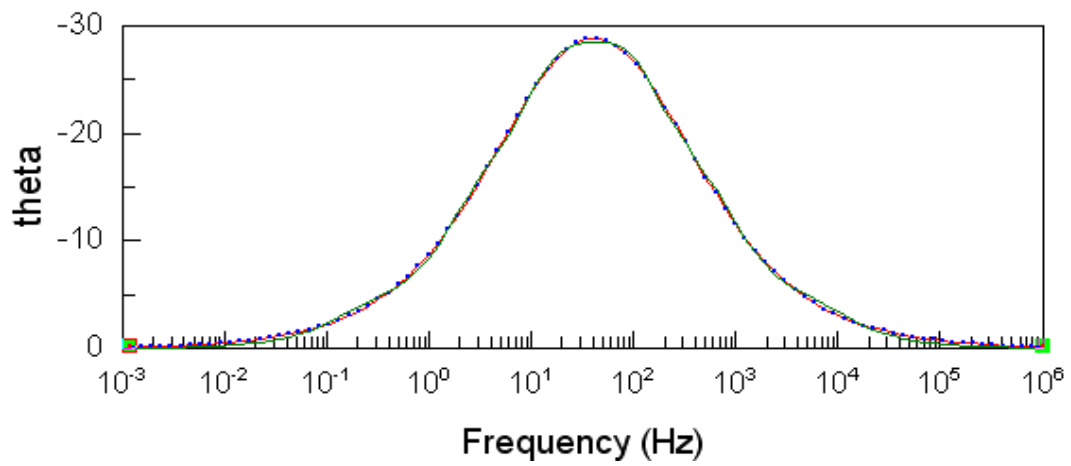


图 2-10 波特图比较图

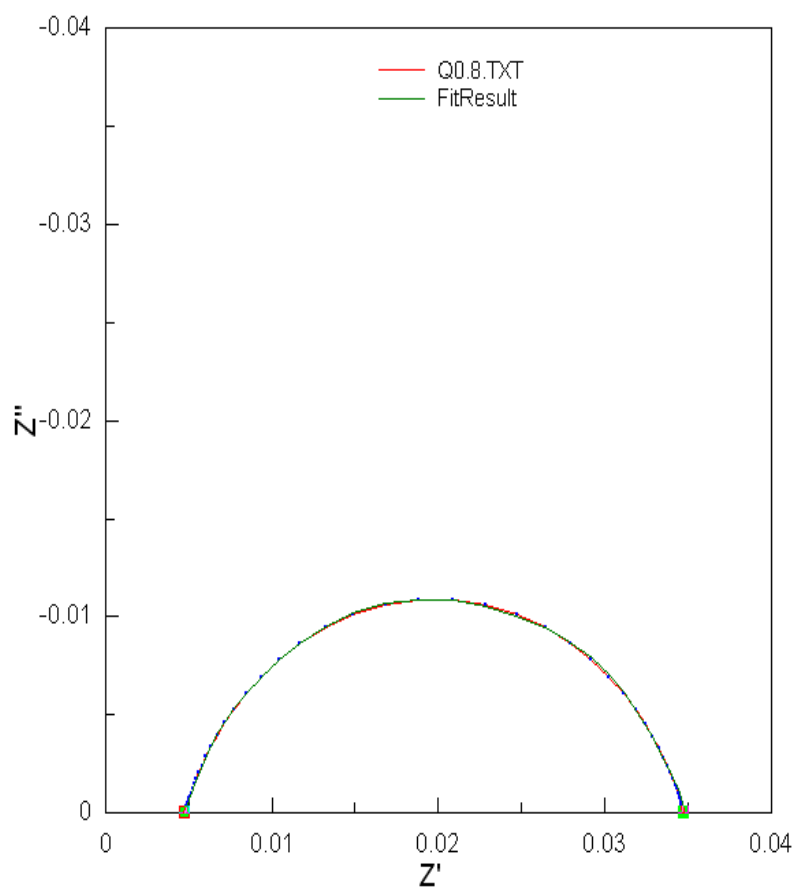


图 2-11 $n=0.8$ 时拟合比较图

由以上分析可知，使用高阶 RC 等效电路可以很好地模拟常相位角元件。因此，对于阻抗谱模型中的常相位角元件，可以使用高阶 RC 等效电路来模拟阻抗谱中出现的压扁的半圆。

2.5 锂离子电池等效电路模型

由上节的叙述可知电化学阻抗谱模型中存在的特殊的电路元件即常相位角元件使得阻抗谱模型难以应用到实际中。为解决上述问题，引入高阶 RC 等效电路来拟合电化学阻抗谱，结果表明，高阶 RC 等效电路可以很好地模拟。

2.5.1 等效电路模型阶数的确定

由图 2-5可知，在一定的温度范围内，锂离子电池的电化学阻抗谱形状类似，因而等效电路模型结构确定，只是参数随温度等因素变化而已。下面以锂离子电池在 $T=6^{\circ}\text{C}$ 时的电化学阻抗谱为例，分别用不同阶数的 RC 等效电路来拟合，得到的拟合后的结果如图 2-12所示。

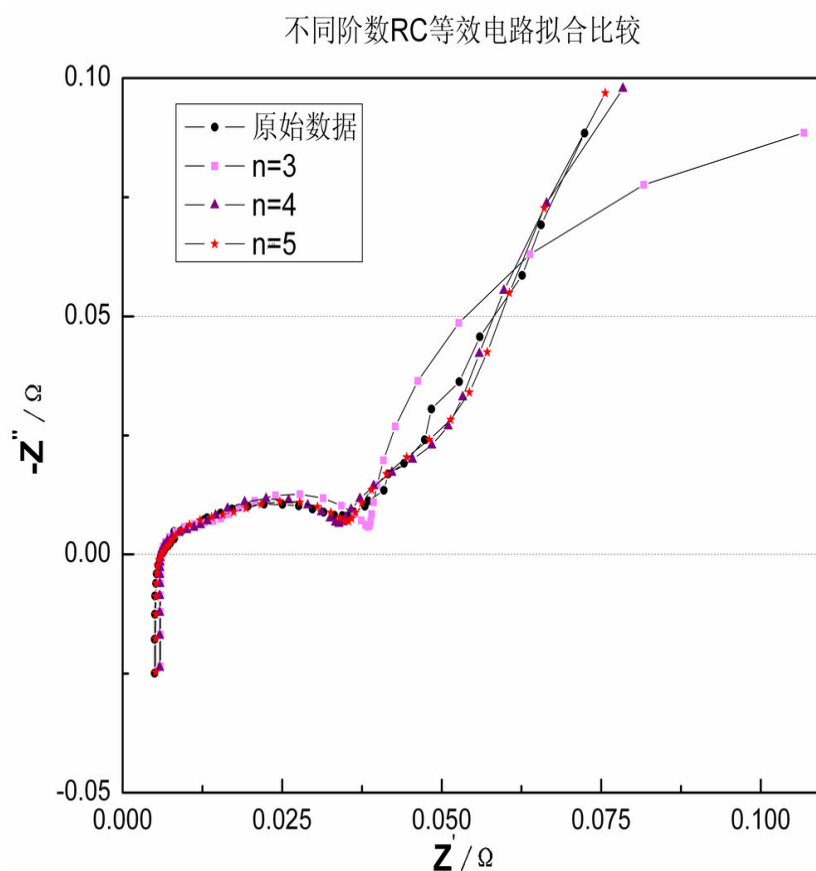


图 2-12 不同阶数 RC 等效电路拟合比较

由图 2-12可以直观看出，当模型阶数为 3 阶时，等效电路阻抗谱与原始数据相差比较大，这个情况也在预想之中。模型阶数越高，等效电路的阻抗谱与原始电化学阻抗谱越接近，效果越好。当模型阶数为 6 阶时，等效电路的阻抗谱几乎和原始的电化学阻抗谱重合。但是模型阶数越高，系统的阶

数也越高，计算量越大，实现难度也大大增加。不同阶数模型拟合的误差如表 2-3 所示。

表 2-3 不同阶数模型拟合的误差

模型阶数	均方差	离差平方和
3	0.021567	1.6822
4	0.007432	0.56484
5	0.0027377	0.20259
6	0.0015804	0.11379

由表 2-3 可以得到五阶、六阶的均方差比低阶时小一个数量级，而六阶模型比五阶模型的均方差相近。综合模型复杂性和实现难易等因素，选择五阶 RC 等效电路模型来模拟实验得到的电化学阻抗谱。这样，图 2-13 给出了锂离子电池的等效电路模型。

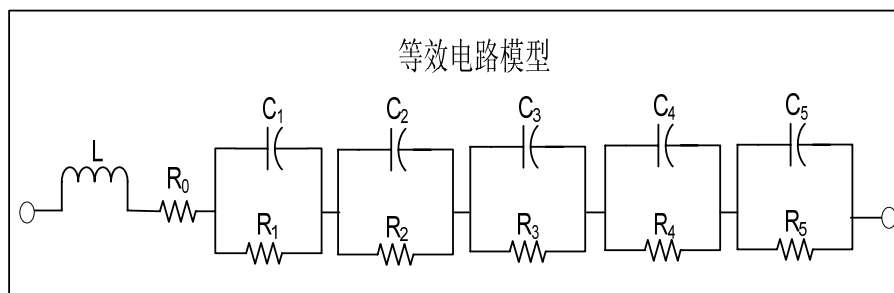


图 2-13 等效电路模型

Zview 是专业处理电化学阻抗谱的软件，Zview 可以使用非线性最小二乘法来拟合实验得到的阻抗谱。在 Zview 中使用上述模型拟合 $T=6^{\circ}\text{C}$ 的电化学阻抗谱，得到等效电路参数及相对误差如表 2-4 所示。

选取电容上的电压作为状态量，根据基尔霍夫电压定律，列写微分方程如下式所示：

$$\frac{dV_i}{dt} = -\frac{1}{R_i C_i} V_i + \frac{1}{C_i} I \quad (2-14)$$

研究表明等效电路模型的参数和电池的 SOC，电流和电池温度有关^[40,41]。为了研究模型的参数与上述变量的关系，首先固定电池的 SOC 和电流，研究等效电路模型参数与电池温度的关系。等效电路模型的参数与 SOC 和电流的关系将是以后研究工作的重点。

表 2-4 T=6°C 锂离子电池等效电路模型参数

等效元件	参数	相对误差%
L	3.9609E-7	1.372
R ₀	0.0051693	2.0291
C ₁	1.945	9.0288
R ₁	0.018569	3.665
C ₂	0.46355	5.4531
R ₂	0.0097545	6.358
C ₃	90.35	7.6022
R ₃	0.020515	7.1679
C ₄	0.13086	13.443
R ₄	0.0021187	7.7379
C ₅	161.4	2.9721
R ₅	0.4708	17.591

2.5.2 模型参数与电池温度的关系

实验所用电池为商品化锂离子电池单体，标称容量 5Ah，额定电压 3.2V，锂离子电池的参数如表 2-1所示。实验设备为美国 Princeton applied research 公司的 M2273 电化学分析仪。温度测量使用 HT-830 红外测温仪。

在 0.01Hz~10000Hz，对锂离子电池单体施加振幅为 10mV 的正弦波电压，根据电池的响应计算出该频率点的阻抗，进而得到实验对象的电化学阻抗谱。实验选择的温度点为-11°C，-5°C，6°C，18°C。各温度下的实验电池的电化学阻抗谱如图 2-14所示。

从图 2-14可以直观地看出，随着电池温度的降低，锂离子电池的电化

学阻抗谱的圆弧逐渐变大，从电池内部结构分析，这意味着锂离子电池的欧姆内阻和极化电阻的增大。这种现象与温度降低，物体的电导率降低的结论是一致的。

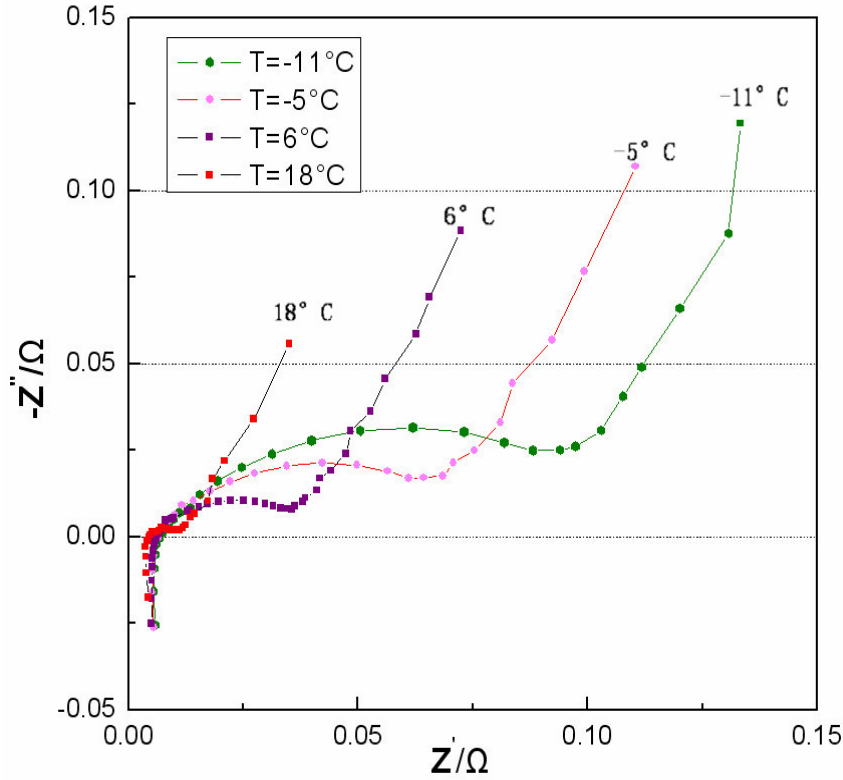


图 2-14 不同温度下锂离子电池的电化学阻抗谱

等效电路模型的参数与温度的变化的关系如图 2-15和图 2-16所示。

由于锂离子电池的内部状态不可能突变，因此电池的等效电路模型参数随温度连续变化的，采用多项式拟合的方法，确定各个模型参数与电池温度的表达式。

$$R_i = f(T) = a_n \cdot T^n + a_{n-1} \cdot T^{n-1} \cdots + a_0 \quad (2-15)$$

同理可以得到电容等其他参数的表达式。实际工况下，已知某时刻电池的温度，就可以通过表达式(2-15)来计算等效电路模型的参数，为下一步

SOC 估计奠定基础。

等效电路模型参数与温度变化关系曲线1

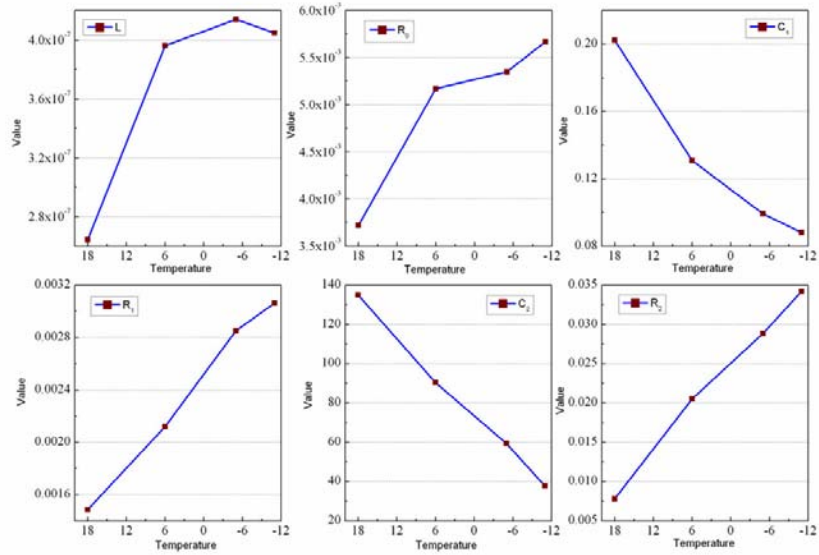


图 2-15 等效电路模型参数与温度的变化曲线 1

等效电路模型参数与温度变化关系曲线2

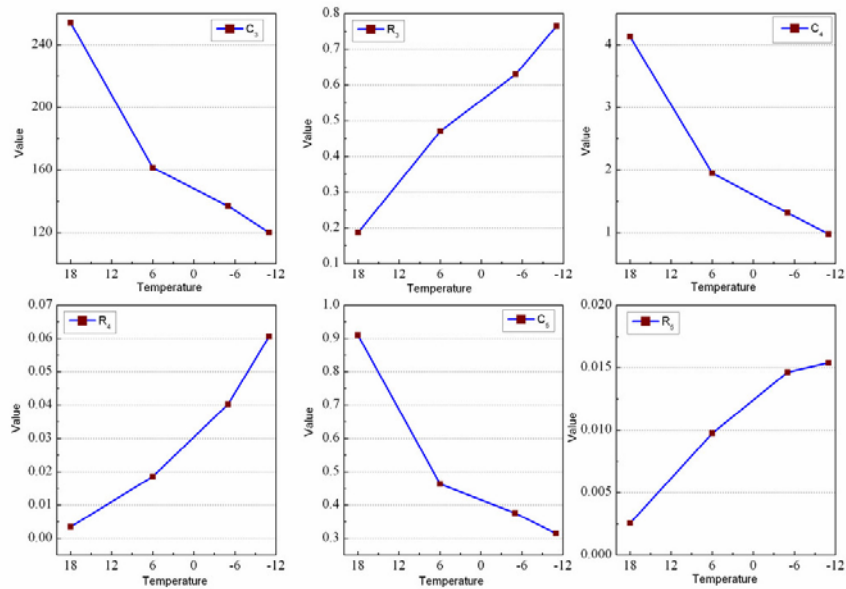


图 2-16 等效电路模型参数与温度变化曲线 2

2.5.3 模型验证

为了验证等效电路模型的有效性和多项式拟合的精度，测量锂离子电池分别在电池温度为 16°C 、 10°C 、 5°C 、 -8°C 时的电化学阻抗谱。当 $T=10^{\circ}\text{C}$ ，根据式(2-15)计算等效电路模型参数如表 2-5 示。

表 2-5 $T = 10^{\circ}\text{C}$ 时多项式拟合等效电路模型参数

参数	拟合值	参数	拟合值
L	3.8378E-7	C_3	198
R_0	0.00453	R_3	0.4454
C_1	0.14226	C_4	3.423
R_1	0.00213	R_4	0.01469
C_2	153.9	C_5	0.45616
R_2	0.01883	R_5	0.0098

在 $0.01\text{Hz}\sim 10000\text{Hz}$ 范围，使用上述等效电路模型参数绘制的电化学阻抗谱与测量得到的锂离子电池的交流阻抗谱进行比较，比较结果如图 2-17 所示。其中，红色为被测量电池的电化学阻抗谱，黑色为等效电路的电化学阻抗谱。

使用拟合参数得到的电化学阻抗谱与原始电化学阻抗谱的误差如表 2-6 所示。

表 2-6 拟合数据的电化学阻抗谱与原始电化学阻抗谱的误差

电池温度	均方差	离差平方和
$T=16^{\circ}\text{C}$	0.004213	0.31176
$T=10^{\circ}\text{C}$	0.003654	0.307
$T=5^{\circ}\text{C}$	0.003259	0.15643
$T=-8^{\circ}\text{C}$	0.0015032	0.072153

从拟合的误差来看，采用多项式拟合的方法得到的等效电路参数可以很好地模拟锂离子电池的电化学阻抗谱。电动汽车动力电池组工作在一定的温度范围内，超过正常的温度范围，电动汽车会通过加热或者冷却来使动力电池组温度恢复正常。因此，在一定的温度范围内，锂离子电池等效电路模型

的参数可以通过拟合的多项式求取，计算简便，误差小。

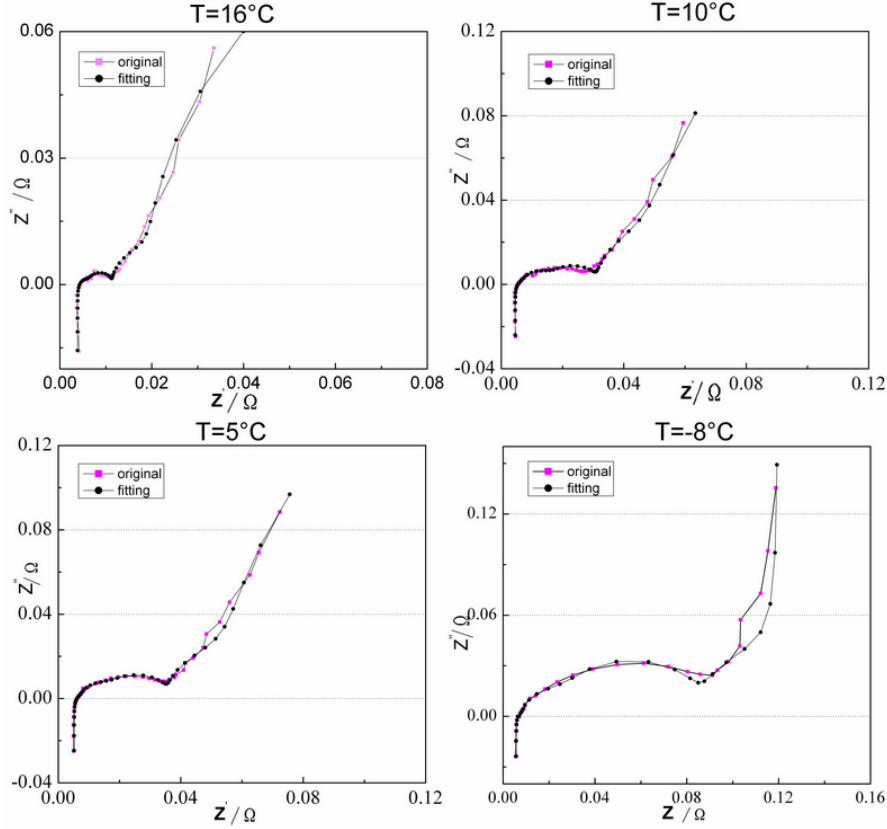


图 2-17 不同温度等效电路的阻抗谱与原始阻抗谱比较

2.6 本章小结

本章从锂离子电池的反应过程入手，分析常用电池性能模型的优缺点和应用场合，通过测试锂离子电池的电化学阻抗谱，构建锂离子电池的电化学阻抗谱模型。针对电化学阻抗谱模型中常相位角元件不能写成状态空间描述的问题，引入高阶 RC 等效电路模型来拟合实验得到的电化学阻抗谱。通过测试不同电池温度下电池的交流阻抗谱，模型参数的获取采用非线性最小二乘法，提高模型参数对电池温度变化的适应性，为下一步 SOC 估计奠定基础。

第3章 参数依赖的 SOC 估计方法研究

3.1 引言

在绪论中已经阐述 SOC 估计的重要性，实际上，在电动汽车之前，SOC 估计就已经广泛用于各类消费电子产品中，对于消费电子产品来讲，SOC 的估计精度要求并不是特别高，但是对于电动汽车来说，由于 SOC 估计对于电池组和电动汽车的性能具有重要意义，因此 SOC 估计精度要求很高。目前，尚没有一种精度高而且计算简单的方法。基于简单电池模型的卡尔曼滤波法，状态观测器，滑膜观测器方法是当前研究最多而且应用广泛的方法。神经网络等复杂方法现在基本处于计算机仿真研究中。

3.2 常见 SOC 估计方法分析

在电动汽车实际运行的工况下，动力电池组的电流变化比较剧烈，而且动力电池组的放电反应本身就是一个复杂的非线性过程。电池温度、极化反应、电池寿命等很多因素都会对 SOC 估计有影响，也就为 SOC 估计带来很大的困难。现有的 SOC 估计算法在实际使用时都有一定的缺陷，目前还没有一种比较成熟的 SOC 估计算法。下面对常见的 SOC 估算策略进行分析。

3.2.1 安时积分法

安时积分法的原理是基于黑箱理论提出的，将电池看做一个黑箱，不关心电池内部的电化学反应及复杂的参数，只关心黑箱与外界的能量交换，通过对进出黑箱的电流积分，计算出消耗的电量，进而可以得到剩余电量。安时积分法的公式如式(3-1)所示。

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_0^t \eta I d\tau \quad (3-1)$$

其中, SOC_0 为 SOC 的初始值, C_N 为电池的标称容量, η 为充放电效率。由公式可知该方法操作简便, 简单易行。与此同时, 也存在着不可避免的缺陷。首先, 在每次计算时, 都需要标定初始 SOC 值, 由于初始 SOC 值都是未知, 标定初始值一般认为刚充满电的电池的 SOC 为 100%, 然而在实际使用中, 电池并不是每次都从满电时开始放电的。因此标定初始 SOC 值是一个很大的问题。其次, 在公式中, 电池的额定容量在计算时被认定为恒定值, 这个理想的情况。实际工况下, 电池的寿命随着循环次数的增加而衰减, 这样的话, 由公式计算得到的 SOC 值应该比实际值偏大。最后, 式中还有电流的积分项, 电流测量不可避免的存在干扰, 这样, 由于积分环节的存在, 干扰会一直累积, 造成 SOC 估计的偏差。该项可以通过提高电流测量精度来抵消, 却不能完全消除。

因此安时积分法一般用于 SOC 估计精度要求不高的场合, 在电动汽车电流变化剧烈且温度等因素影响的环境, 安时积分法的精度很差。

3.2.2 神经网络法

神经网络是从微观结构与功能层面上模拟人脑神经网络系统建立起来的, 可以模拟人进行推理、思考和学习。神经网络最大的优点是不需要研究对象精确的数学模型, 而是通过一定的学习和训练来解决非线性问题^[42,43]。神经网络法估计电池 SOC 是一种先进的方法, 神经网络法 SOC 估计的原理图如图 3-1 所示。

通过对不同放电倍率, 不同放电深度, 不同电池温度等各种环境中进行多次重复的电池实验, 获取足够的数据。仅仅有这些数据是不够的, 还需要将这些数据进行训练, 使其有机的组合在一起, 最后得到所需要的神经网络层。理论上, 神经网络层的层数越多, 建立的模型也越精确。但是在实际中, 随着网络层数的增加, 硬件处理的负担也相应增大, 原则上, 神经网络

层数不超过五层。

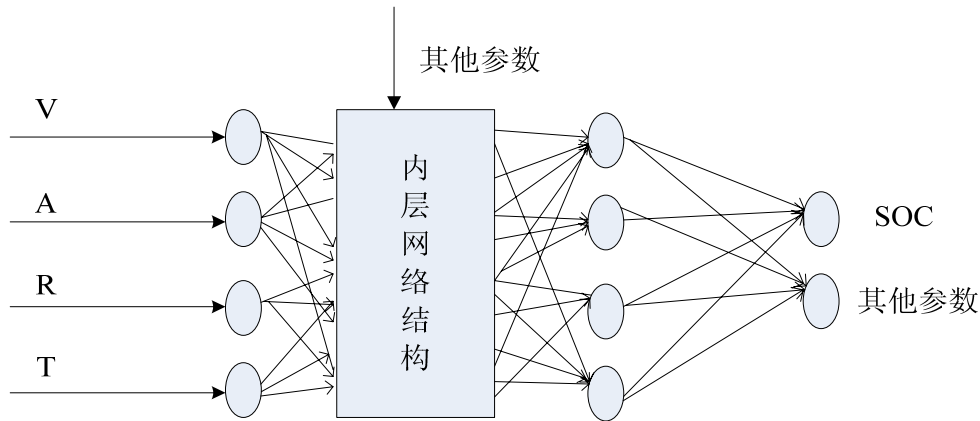


图 3-1 神经网络法 SOC 估计的原理图

但是人工神经网络受训练数据和训练方法影响比较大，如果训练方法不适当的话，通过神经网络法得到的 SOC 估计值也会有一定的偏差。相应地，如果训练数据不够全面的话，通过神经网络法得到的 SOC 估计值也会存在偏差。神经网络法事先需要对电池进行各种环境下的测试，获取训练数据，但是穷极所有条件下的测试，是一个很大的工作量。

3.2.3 卡尔曼滤波法

卡尔曼滤波广泛应用于在噪声环境中提取有用信号，是一种较为先进的估计算法，也是目前应用最广泛的 SOC 估计算法^[44-46]。卡尔曼滤波法是基于系统的状态空间模型计算的，系统的模型结构如图 3-2所示。为了估计得到电池 SOC 的估计值，SOC 必须作为系统的一个状态量，这是使用卡尔曼滤波法估计 SOC 的前提。

卡尔曼滤波采用预测和校正的思想来估计系统的状态。首先，根据建立的模型计算出状态的预测值，然后根据预测值计算模型输出值与实际系统输出量的差值来修正预测值，进而得到较为准确的状态估计值。采用卡尔曼滤波方法估计电池 SOC 的原理框图如图 3-3所示。

卡尔曼滤波引入了修正的思想来修正干扰等不确定性因素，从而使状态值更接近于实际的真值。根据建立的电池状态空间模型和卡尔曼滤波法的原理框图，可以得到卡尔曼滤波法 SOC 估计的流程图如图 3-4 所示。

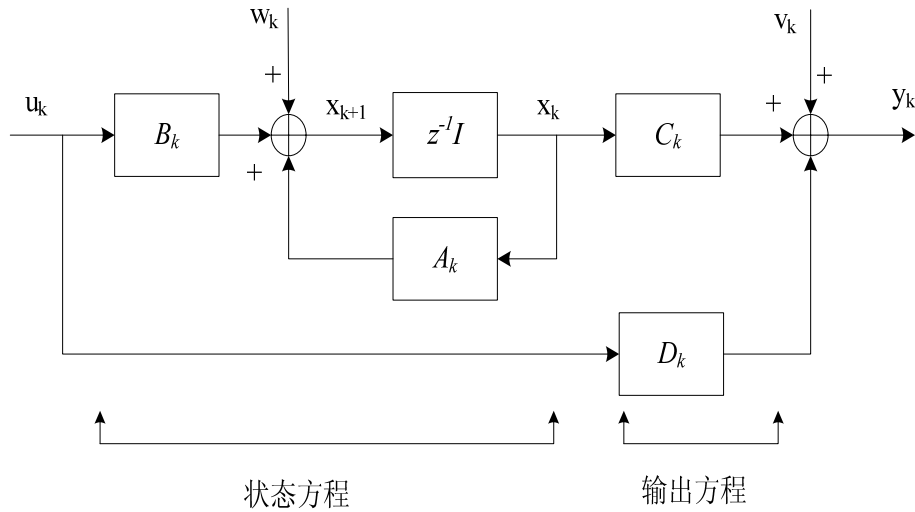


图 3-2 系统状态方程

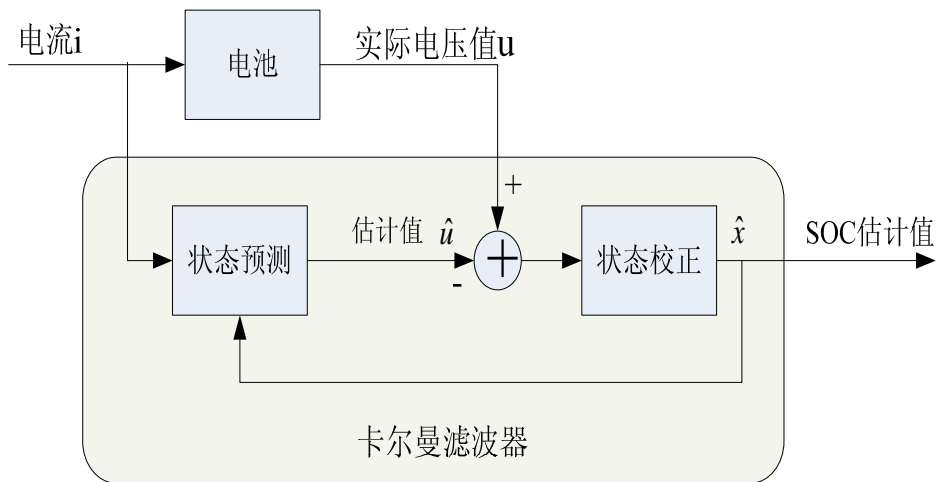


图 3-3 卡尔曼滤波法原理

相比于安时积分法，卡尔曼滤波法引入了反馈的思想来估计 SOC，在实际使用中更适合于电流变化剧烈且电池常处于充电或放电的环境里，对于

含有白噪声的情况下，该方法可以准确地估计 SOC 值，并且给出估计值的误差范围。

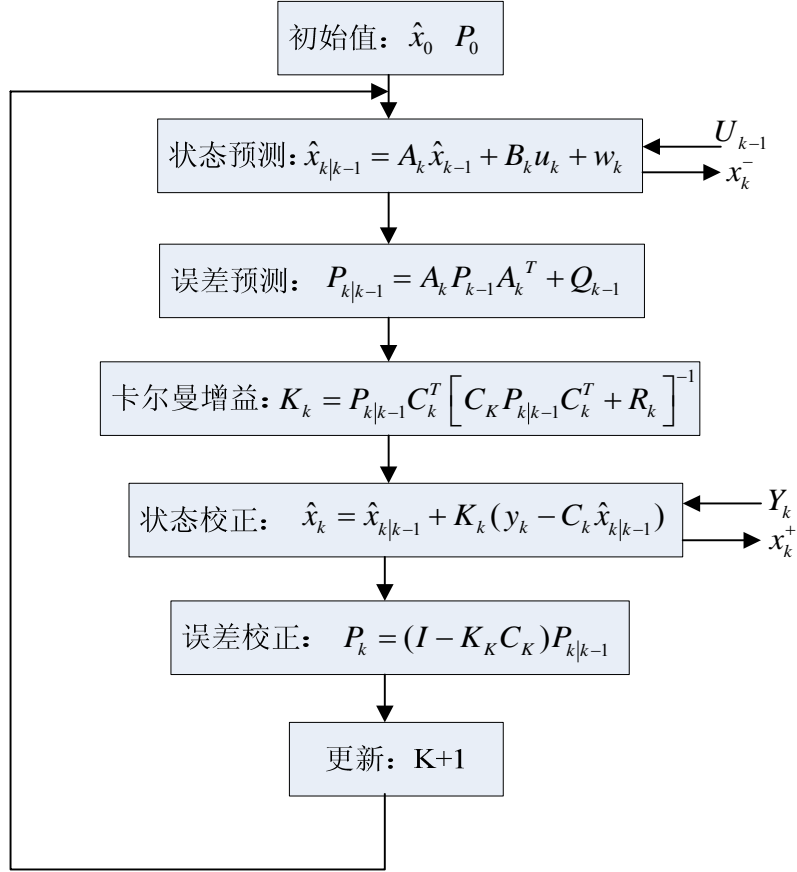


图 3-4 卡尔曼滤波法估算 SOC 流程图

从理论分析角度来讲，卡尔曼滤波法 SOC 估计具有很高的精度，但是在实际使用时，卡尔曼滤波法具有不可避免的缺陷，具体有以下几个方面：

(1). 初始时刻要求给出状态的估计值和估计误差，也就是知道 SOC 的初始值，这是卡尔曼滤波法的基础，递推是在此基础上进行的。如果初始估计值与真实值相差很大，可能出现滤波发散的情况，估计值与真实值相差越来越远。

(2). 算法中噪声的方差和统计特性要求已知，并且是白噪声。实际工况

下，很难获得噪声的统计特性，而且白噪声在实际中是不存在的，因此卡尔曼滤波法估计 SOC 时就会产生一定的偏差，这样估计精度也会受到一定的影响。

(3). 扩展卡尔曼滤波法的收敛性没有证明，实际参数不可能满足理想条件，这样在估计时就会引入相应的误差。在使用中，非线性系统离散化后可能出现滤波发散的情形。

(4). 卡尔曼滤波法每一次递推都需要五步计算，尤其是在计算卡尔曼增益时，需要求取矩阵的逆，即使现在微处理器的运算能力很强，矩阵求逆也是比较耗时的，而且每一步都要计算矩阵的逆，增加了微处理器的负担。

3.2.4 状态观测器法

本文将采用一种基于状态观测器的方法来估计 SOC，状态观测器最早由龙伯格提出的，其实质就是重新构造一个与原系统相同的系统，利用原来系统的可测量的量通过反馈到新的系统，使新的系统与原来系统等价^[47]。应用状态观测器方法估计 SOC 的结构图如图 3-5 所示。

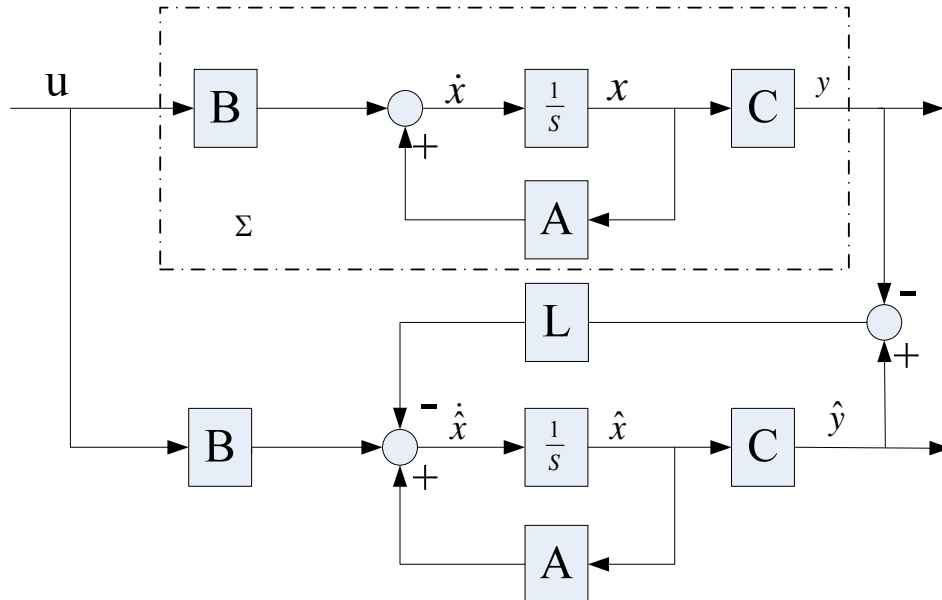


图 3-5 状态观测器法估计 SOC 结构图

同卡尔曼滤波法估计 SOC 一样，SOC 同样要作为系统的一个状态，通过构建与原系统一样的系统，利用原系统与新系统的误差反馈到新的系统，进而去估计系统的状态量。在观测器设计阶段，需要保证闭环系统的稳定性，进而才能设计反馈增益。因此相比于卡尔曼滤波法，状态观测器法设计阶段需要更多控制理论的知识，在计算阶段，状态观测器法比卡尔曼滤波法的计算量要少很多。状态观测器的设计方法将在下面重点论述。

3.3 锂离子电池等效电路模型

3.3.1 模型概述

对于在不同温度下测量得到的锂离子电池阻抗谱，分别使用阶数不同的 RC 等效电路模型进行拟合。结果表明，五阶 RC 等效电路模型拟合效果符合要求，同时模型阶数也不是很高。因此选择五阶 RC 等效电路作为锂离子电池的模型。图 3-6 给出了模型的结构。

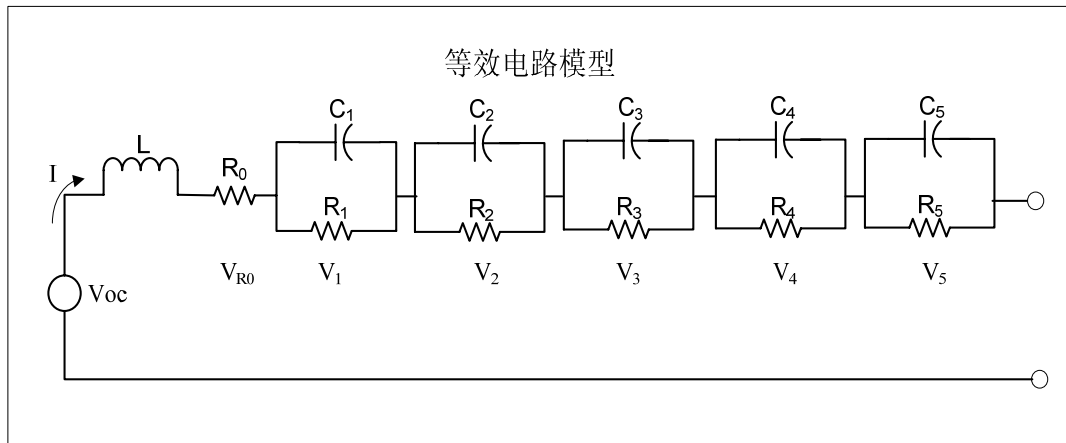


图 3-6 锂离子电池等效电路模型

在等效电路模型中，理想电压源表示电池的开路电压，电感是由电极集流体引起的， R_0 代表电池的欧姆内阻，RC 等效电路用来模拟电池反应过程中的动态特性。

等效电路模型参数采用非线性最小二乘法对实验得到的阻抗谱拟合的方法获取。

3.3.2 开路电压与 SOC 关系

电池的电动势是衡量一个电池做功的能力，一般定义为：在电池中没有电流通过时，原电池两个终端相之间的电位差叫做该电池的电动势，也即是上文所述的开路电压^[48]。

开路电压与 SOC 关系曲线可以通过间歇放电获得，对充满电的电池恒流放电，初始 SOC 认为是 100%，每次放出额定电量的 10%，直至电池容量降到标称容量的 10%，每次放电间隙让电池静置 1 小时来使电池达到平衡状态，完全静置后得电池两端的电压认为是开路电压。对两个单体锂离子电池做相同的实验，得到单体锂离子电池开路电动势与 SOC 的关系如图 3-7 所示。

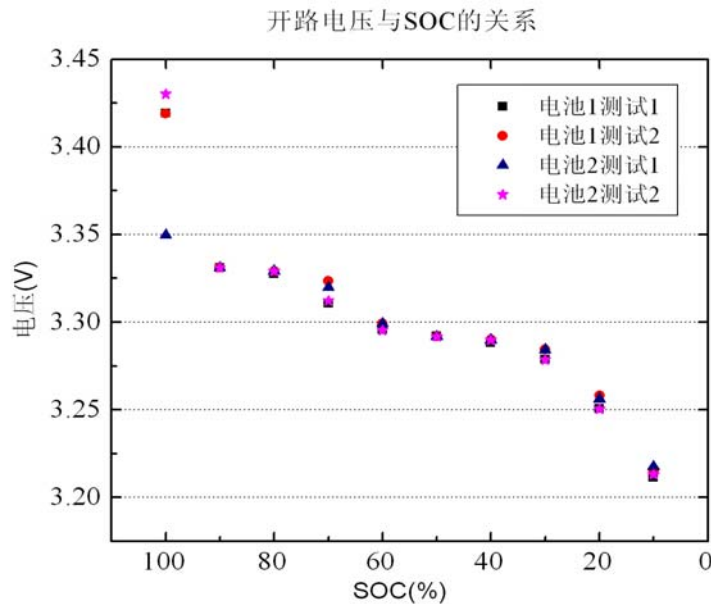


图 3-7 开路电动势与 SOC 的关系

由图 3-7可知，电池的开路电压随着 SOC 的减少而减少，呈单调关系，这对后来模型的简化很有帮助。在 SOC 较大或者较小的情况，开路电压随 SOC 变化比较剧烈。电池的开路电压与 SOC 的关系如表 3-1所示。

表 3-1 电池开路电压与 SOC 的关系

SOC(%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
OCV(V)	3.404	3.331	3.329	3.316	3.329	3.292	3.289	3.281	3.254	3.214

在模型中，可以用多项式拟合的方法来获取开路电压与 SOC 的关系式。使用 Matlab 的 curvefitting 工具箱，对上述曲线进行拟合，得到开路电压与 SOC 的关系如式(3-2)所示，SOC 用字母 z 表示。

$$f(z) = 3.15058 + 0.758 * z - 1.3544 * z^2 + 0.8425 * z^3 \quad 0 \leq z < 100\% \quad (3-2)$$

拟合得到的图形与原始数据的比较如图 3-8所示。

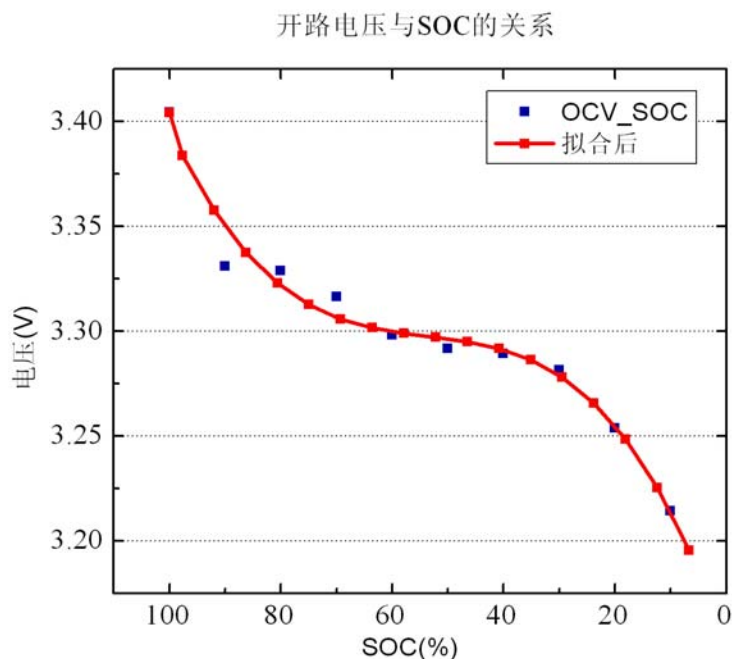


图 3-8 拟合后比较图

由图 3-8可以看出，三次多项式可以很好地拟合实验得到的数据，这样，开路电压与 SOC 的关系可用式(3-2)来计算。

3.3.3 模型简化

等效电路模型中含有两种储能元件，电感和电容。由于电感的数值较小，一般为 10^{-7} 数量级，只对电化学阻抗谱的高频区域有影响，对于电池的动态特性没有影响，并且电感的存在对于模型转变成状态空间描述造成困难。因此在转换状态空间描述前，可以将电感忽略掉。

这样，锂离子电池的等效电路模型如图 3-9所示。

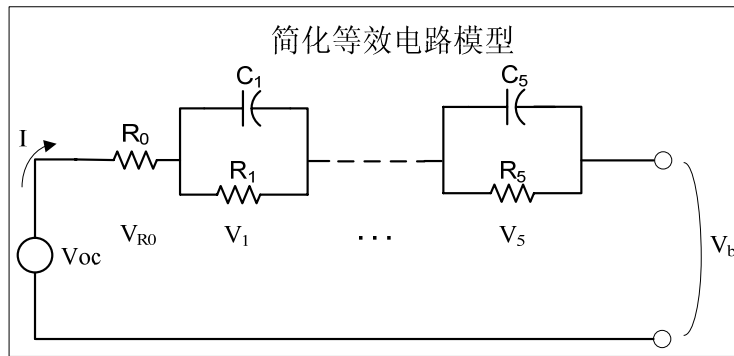


图 3-9 简化后的等效电路模型

选取第 i 个 RC 回路上的电压作为状态量，根据基尔霍夫电压定律，列写微分方程如式(3-3)示：

$$\frac{dV_i}{dt} = -\frac{1}{C_i R_i} V_i + \frac{1}{C_i} I \quad (3-3)$$

为了方便地对模型进行辨识，式(3-3)可以写成更简洁的形式，如式(3-4)所示。

$$\frac{dV_i}{dt} = -a_i V_i + a_i b_i I \quad (3-4)$$

其中， $a_i = \frac{1}{C_i R_i}$ ， $b_i = R_i$ 。

电池 SOC 的状态方程如式(3-5)所示。

$$\dot{z} = -\frac{1}{C_n} I \quad (3-5)$$

电池的输出电压 V_b 表示成

$$V_b = V_{oc} - R_0 I - \sum_{i=1}^5 V_i \quad (3-6)$$

由(3-4)，(3-5)，(3-6)可得到锂离子电池的状态空间描述如式(3-7)和式(3-8)所示：

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -a_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_n} \\ a_1 b_1 \\ a_2 b_2 \\ a_3 b_3 \\ a_4 b_4 \\ a_5 b_5 \end{bmatrix} I \quad (3-7)$$

输出方程为：

$$V_b = V_{oc}(z) - R_0 I - \sum_{i=1}^5 V_i \quad (3-8)$$

式(3-7)和式(3-8)中，模型参数是温度，电流方向，SOC 的函数，因此上述系统为线性时变参数(Linear Parameter Varying, LPV)系统，本文主要研究模型参数与电池温度的关系。

为了书写方便，将式(3-7)和式(3-8)写成简便的形式：

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A(T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ X \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_n} \\ B(T) \end{bmatrix} \cdot u \quad (3-9)$$

$$y = f(T, z) + CX + D(T, i_d) \cdot u \quad (3-10)$$

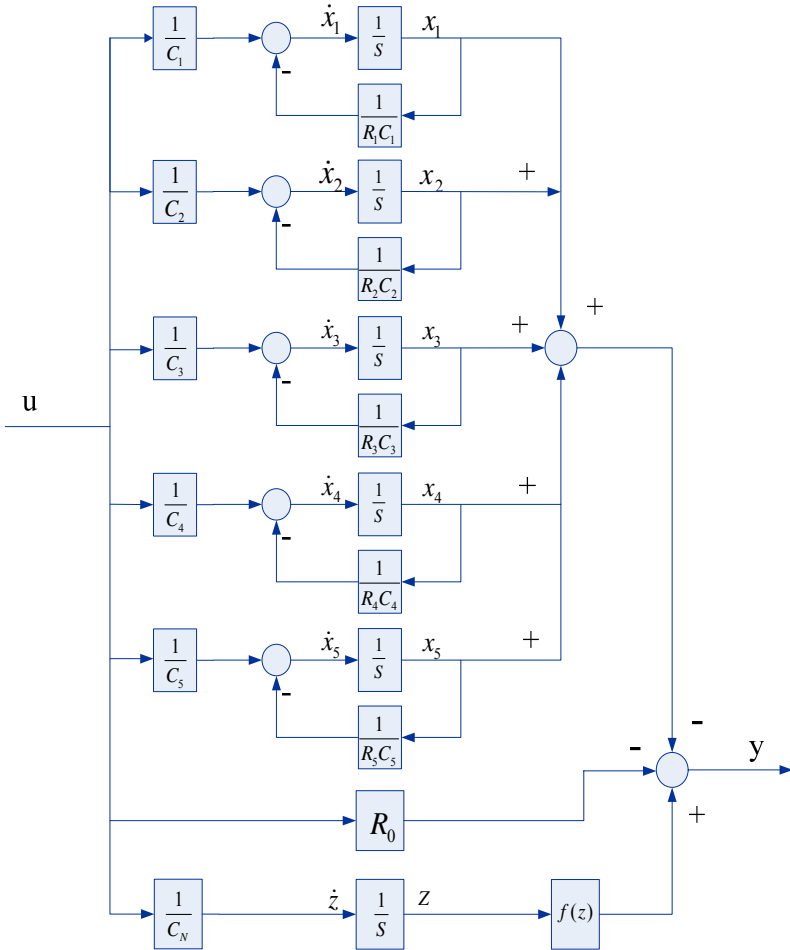


图 3-10 模型结构框图

这种电池模型可以直观的模拟电池的动态特性，电池的输出电压是由电

池开路电压，动态电压降和欧姆电阻引起的压降三部分组成。动态电压降是由电池的电化学特性如充电转移和扩散等因素引起的，动态电压降和欧姆内阻的电压降一般被称作电池的动态过电压。

对于给定的采样时间 T_s 和线性系统如(3-11)所示。

$$\dot{x} = -ax + bu \quad (3-11)$$

其中线性系统参数 a ， b 在一个采样时间内恒定不变，这样线性系统可以离散成式(3-12)：

$$x[k+1] = e^{-aT_s} x[k] + \frac{b}{a} (1 - e^{-aT_s}) u[k] \quad (3-12)$$

因此，对于式(3-7)和式(3-8)的系统可以按照式(3-11)进行离散化。

通常，电池模型中包含滞回电压，滞回电压是由电池不同的充放电反应引起的。在实际测试中发现，对同一电池进行同样条件下的充电和放电，电池的电压响应曲线并不重合，这种现象称为滞回现象^[49]。滞回电压的状态方程可以写成式(3-13)：

$$\dot{V}_h = \Gamma |I| (H(\dot{z}, T) - V_h) \quad (3-13)$$

其中， V_h 是电池的滞回电压， Γ 是时间常数， H 是在给定温度和 SOC 情况下最大的滞回电压。当电流输入为 0，即电池处于开路条件下：

$$\dot{V}_h = 0 \quad (3-14)$$

$$V_h[k+1] = V_h[k] \quad (3-15)$$

因此当电流为 0 时，即电池开路时，从电池的输出电压不能区分开路电压和滞回电压。也就是说，当模型考虑滞回电压时，在零电流情况下，系统是不可观测的，因此在观测器的设计中不考虑滞回因素，而且，相比于铅

酸电池和镍氢电池，锂离子电池的滞回因素很小，可以忽略不计。

3.3.4 模型参数与电池温度的关系

通过对不同电池温度下锂离子电池的阻抗谱的测试，得到锂离子电池在不同电池温度下的电化学阻抗谱。通过非线性最小二乘法拟合获取等效电路的各个参数。在一定的温度范围内，锂离子电池模型参数与电池温度的关系如图 3-11 所示。

在一定的温度范围内，锂离子电池的模型参数与温度的关系可以通过图 3-11 的曲线进行多项式拟合得到。

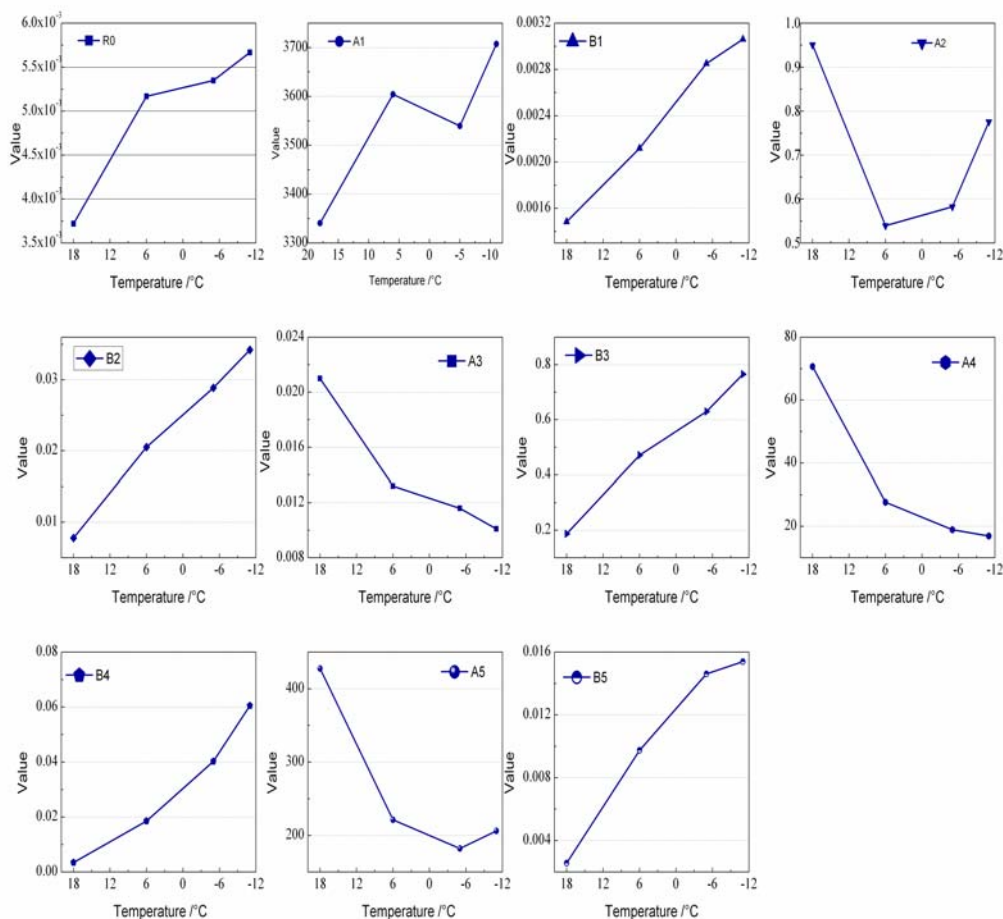


图 3-11 模型参数与温度变化的关系

3.4 SOC 估计算法

状态观测器法估计 SOC 的核心思想是将电池的 SOC 作为模型系统的一个状态进行状态重构。在设计阶段，该方法需要控制理论的知识来保证观测器的收敛性，在计算阶段，状态观测器法估计 SOC 的计算量相比于卡尔曼滤波法的计算量小很多，因此本文提出状态观测器法来估计电池的 SOC。下面将给出 SOC 估算策略的具体设计方法。

3.4.1 系统可观性分析

状态观测器存在的前提是系统可观，因此首先要验证系统是否可观。由于构建的锂离子电池等效电路模型为非线性系统，不能使用线性系统可观性分析的方法进行验证。

非线性系统能观性分析需要使用李导数，参考文献[50]中的方法，给出非线性系统的能观性矩阵 O ：

$$O = \frac{do(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} h(x) \\ L_f h(x) \\ \vdots \\ L_f^5 h(x) \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

其中 x 为向量，李导数的符号 L_f 的计算如(3-17)所示：

$$\begin{cases} L_f h(x) = \frac{dh(x)}{dx} f(x, u) \\ L_f^{i+1} h(x) = \frac{dL_f^i h(x)}{dx} f(x, u) \end{cases} \quad (3-17)$$

对于式(3-7)和(3-8)的状态空间模型，有：

$$\begin{aligned}
 h(x) &= f(z) - x_1 - x_2 - x_3 - x_4 - x_5 \\
 L_f h(x) &= a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_4 x_4 + a_5 x_5 \\
 L_f^i h(x) &= (-1)^{i-1} (a_1^i x_1 + a_2^i x_2 + a_3^i x_3 + a_4^i x_4 + a_5^i x_5)
 \end{aligned} \tag{3-18}$$

将式(3-18)代入到式(3-17)中，可以得到系统的能观性矩阵如式(3-19)所示：

式(3-7)中系统的阶数为六阶，因此能观性矩阵也是六阶。由式(3-19)可以看出能观性矩阵比较规律。

$$O = \begin{bmatrix} f'(z) & -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_4 & a_5 \\ 0 & -a_1^2 & -a_2^2 & -a_3^2 & -a_4^2 & -a_5^2 \\ 0 & a_1^3 & a_2^3 & a_3^3 & a_4^3 & a_5^3 \\ 0 & -a_1^4 & -a_2^4 & -a_3^4 & -a_4^4 & -a_5^4 \\ 0 & a_1^5 & a_2^5 & a_3^5 & a_4^5 & a_5^5 \end{bmatrix} \tag{3-19}$$

由于 $a_1 \neq a_2 \neq a_3 \neq a_4 \neq a_5$ ， $f'(z) \neq 0$ ， $\det(O) \neq 0$ ，可知能观性矩阵满秩，

因此系统可观，可以通过状态观测器对系统的状态重构。

3.4.2 状态观测器设计方法

SOC 观测器是一种状态观测器，使用电池电压、电流和温度作为反馈信号。由于 SOC 是系统的一个状态，通过状态重构，如果状态观测器收敛到系统的真实状态，那么 SOC 的估计也相应实现^[51]。

状态观测器的形式如式(3-20)和式(3-21)所示：

$$\begin{bmatrix} \hat{z}[k+1] \\ \hat{X}[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A(T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z}[k] \\ \hat{X}[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{T_s}{3600C_n} \\ B(T) \end{bmatrix} u[k] + k_e (\hat{y}[k] - y[k]) \tag{3-20}$$

$$\hat{y}[k] = f(T, \hat{z}) + C\hat{X}[k] + D(T)u[k] \quad (3-21)$$

上述模型使用系统的输出与实际系统的输出差值作为反馈校正，反馈量 k_e 是观测器输出与实际测量输出差值的函数，其形式将在后面进行讨论。

输出误差 $\tilde{y}[k] = \hat{y}[k] - y[k]$ 可以通过式(3-22)进行计算。

$$\tilde{y}[k] = f(T, \hat{z}) - f(T, z) - C\tilde{X}[k] \quad (3-22)$$

其中 $\tilde{X}[k] = X[k] - \hat{X}[k]$ ，这样系统的误差可以写成式(3-23)：

$$\begin{bmatrix} \tilde{z}[k+1] \\ \tilde{X}[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A(T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{z}[k] \\ \tilde{X}[k] \end{bmatrix} + k_e (f(T, \hat{z}) - f(T, z) - C\tilde{X}[k]) \quad (3-23)$$

下一步，定义 $\chi[k]$ 为：

$$\chi[k] = \frac{f(T[k], z[k]) - f(T[k], \hat{z}[k])}{z[k] - \hat{z}[k]} \quad (3-24)$$

对于给定的温度，开路电压 OCV 随着 SOC 单调递增。由于 χ 代表 f 割线的斜率。 f 的单调性表明 χ 恒为正值。由于 T 和 z 是有界的，因此 $\exists L_f, U_f > 0$ ，这样 χ 可以表示成式(3-25)：

$$0 < L_f \leq \chi[k] \leq U_f, \forall k \in N \quad (3-25)$$

不同温度下，OCV 与 SOC 的曲线近似，也就是说 χ 与温度关系不大，因此 L_f 和 U_f 与温度的关系也不大，为了简化处理， L_f 和 U_f 可以认为是常值。

假定：

$$f(T, \hat{z}) - f(T, z) - C\tilde{X}[k] = [-\chi[k] \quad -C] \begin{bmatrix} \tilde{z}[k] \\ \tilde{X}[k] \end{bmatrix} \triangleq C_e[k] \tilde{X}_e[k] \quad (3-26)$$

从上式中可以看出输出误差可以写成估计误差的近似线性函数，式中 χ 是时变的，并且是未知的。

这样，可以选择系统的输出误差的线性函数作为 K_e 使得观测器收敛。

这样， K_e 可以写成式(3-27)：

$$K_e = \begin{bmatrix} K_z(T, i_d) \\ K_x(T, i_d) \end{bmatrix} \quad (3-27)$$

系统误差的状态矩阵可以写为：

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \tilde{z}[k+1] \\ \tilde{X}[k+1] \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A(T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{z}[k] \\ \tilde{X}[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_z \\ K_x \end{bmatrix} ([-\chi[k] \quad -C] \begin{bmatrix} \tilde{z}[k] \\ \tilde{X}[k] \end{bmatrix}) \\ &= \bar{A}_e[k] \begin{bmatrix} \tilde{z}[k] \\ \tilde{X}[k] \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-28)$$

其中，

$$\bar{A}_e[k] = \begin{bmatrix} 1 - K_z \chi & -K_z C \\ -K_x \chi & A(T) - K_x C \end{bmatrix} \quad (3-29)$$

\bar{A}_e 决定误差的动态特性，对于线性自治系统，没有干扰和不确定性因素，如果系统状态渐近稳定的话，对于有界输入，系统的状态响应也是有界的。因此， K_e 的作用就是使自治系统渐近稳定。对于线性时变系统，以上结论则不一定成立。然而对于锂离子电池，模型参数相对于温度变化缓慢，使用增益规划的思想使得误差矩阵的特征值位于单位圆内进而使得系统渐近稳定。

\bar{A}_e 对角线有两部分： $1 - K_z \chi$ 和 $A(T, i_d) - K_x C$ 。如果 $|K_x \chi| \ll 1$ 且 $K_z > 0$ ，那么 \bar{A}_e 的特征值可近似认为 $1 - K_z \chi$ 和 $A(T, i_d) - K_x C$ 的特征值。由于系统矩阵 A 是稳定的， K_e 的选取要留有足够裕量来抵消系统的未建模动态特性。因此 K_e 应该足够小，使得系统有很强的鲁棒性。然而 K_e 用来设置极点，这意味着闭环响应的速度是以牺牲噪声敏感性为代价的。以上论述可以通过

Lyapunov 稳定性理论来验证。

定义李雅普诺夫函数 V 为式(3-30)所示：

$$V[k] = \tilde{X}_e^T[k] P(T) \tilde{X}_e[k] \quad (3-30)$$

其中 $P \in n+1 \times n+1$ ， P 为正定矩阵。

对于给定的 V ，可以得到：

$$V[k+1] - V[k] = \tilde{X}_e^T[k] (\bar{A}_e^T[k] P(T) \bar{A}_e[k] - P(T)) \tilde{X}_e[k] \quad (3-31)$$

对于 $P(\cdot), Q > 0$ ，使得 $\bar{A}_e^T[k] P(T) \bar{A}_e[k] - P(T) < -Q, \forall k$ 。

这样，上式可以写成：

$$V[k+1] - V[k] = \tilde{X}_e^T[k] (-Q) \tilde{X}_e[k] \quad (3-32)$$

式(3-32)中，如果存在 $Q > 0$ ，那么 $V[k+1] - V[k] < 0$ 。

K_e 的选取必须满足 LMI 方程： $\bar{A}_e^T[k] P(T) \bar{A}_e[k] - P(T) < -Q$ 存在解 $P(\cdot), Q > 0$ 。 K_e 和 P 的解必须满足上述 LMI 方程，同时， K_e 影响着观测器的收敛速度和干扰抑制，LMI 方程的解可能是不满意的。针对上述问题，引入增益规划的思想，首先选取 K_e 满足观测器性能要求，然后通过 LMI 求解出可行解 P 和 Q 。

在设计 K_e 的时候， χ 的特性可以大大简化设计。由前面的论述， \bar{A}_e 的特征值应尽量靠近 $1 - K_z \chi$ 和 $A(T, i_d) - K_x C$ 的特征值。特征值 $1 - K_z \chi$ 和 SOC 有关，决定了观测器 SOC 项的收敛性。特征值距离单位圆越远，SOC 收敛的越快。 χ 和 K_z 的取值应该足够小来抑制干扰，这样 $1 - K_z \chi$ 总为正值且靠近单位圆。那么对于所有 χ 的取值， $\chi = L_f$ 是最坏的情况。因此设计 K_e 时，可以令 $\chi = L_f$ ，求出 K_e 使得满足要求。这样，对于其他的 χ ，同样满

足要求。

因此整个设计过程简化为两部分，首先配置观测器闭环系统的极点使其满足收敛性和干扰抑制。极点配置完成后，根据李雅普诺夫稳定性分析，求解 LMI 方程使得闭环系统稳定，LMI 方程可以写成式(3-33)：

$$\begin{bmatrix} \bar{A}_e^T[k]P(T)\bar{A}_e[k]-P(T)+Q & 0 & 0 \\ 0 & -P(T) & 0 \\ 0 & 0 & -Q \end{bmatrix} \leq 0 \quad (3-33)$$

3.4.3 状态观测器设计小结

上文提出了 SOC 观测器的设计方法，给出了状态观测器的数学表达式，实际使用状态观测器时需要注意以下方面：首先决定观测器性能的值是 L_f 。较大的 L_f 表明 SOC 对电压变化越敏感，这样通过电压测量可以获取更多的信息。其次，收敛速度和跟踪性能总是存在矛盾，提高收敛速度会不可避免地降低跟踪性能，与此同时，增强跟踪性能也会导致观测器收敛速度降低。

3.4.4 状态观测器设计实例

由以上 SOC 估计方法的分析可知，状态观测器法估计 SOC 的流程分为以下两步：

- (1). 构建与原系统相同的新系统，利用误差反馈，通过极点配置使得新系统收敛。
- (2). 使用 Lyapunov 稳定性理论分析保证观测器收敛，求取可行解 P 和 Q 。

电池温度 $T=18^\circ \text{C}$ 时，锂离子电池等效电路模型的参数如表 3-2 所示。模型参数单位为标准单位。

表 3-2 T=18°C 时模型参数

温度	R0	A1	B1	A2	B2	A3
18°C	0.00372	3340.7944	0.00148	0.9509	0.00779	0.021
温度	B3	A4	B4	A5	B5	
18°C	0.18705	70.6776	0.00343	427.6444	0.00257	

采样时间 $T_s = 0.001s$ ，离散化后的模型如式(3-34)所示。

$$\begin{bmatrix} z[k+1] \\ X[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0354 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.999 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9318 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.652 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z[k] \\ X[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -5.5556 \times 10^{-8} \\ 4.2732 \times 10^{-7} \\ 7.7863 \times 10^{-6} \\ 1.8705 \times 10^{-4} \\ 3.3116 \times 10^{-6} \\ 2.0911 \times 10^{-6} \end{bmatrix} u[k]$$

$$y[k] = f(z[k]) + [-1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1]X[k+1] + (-0.00372) * u[k]$$

(3-34)

SOC 与开路电压之间的关系式如式(3-35)所示：

$$f(z) = 3.15058 + 0.758 * z - 1.3544 * z^2 + 0.84246 * z^3 \quad 0.1 \leq z < 1 \quad (3-35)$$

从上式可以计算出 $L_f = 0.0322$ ， $U_f = 0.758$ 。

设计观测器的极点为 $[0.999 \ 0.24 \ 0.998 \ 0.999 \ 0.92 \ 0.69]$ ，使用 Matlab 中的 LMI 工具箱，解出 P 和 Q 的可行解为：

$$P = \begin{bmatrix} 28.5523 & 90.2765 & -222.0127 & -898.7252 & -79.895 & 41.7294 \\ 90.2765 & 9702.887 & -2773.8137 & -2803.01 & -1650.4361 & -466.7305 \\ -222.0127 & -2773.8137 & 36684.1401 & 6861.11 & 2872.2138 & -1249.8165 \\ -898.7252 & -2803.01 & 6861.11 & 28299.0116 & 2489.9809 & -1325.9962 \\ -79.895 & -1650.4361 & 2872.2138 & 2489.9809 & 22861.1565 & 116.3816 \\ 41.7294 & -466.7305 & -1249.8165 & -1325.9962 & 116.3816 & 17902.1931 \end{bmatrix}$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0.4762 & 41.0183 & -14.4872 & -14.7928 & -14.3369 & 7.027 \\ 41.0183 & 4542.6908 & -1272.2122 & -1273.7718 & -818.4062 & -596.3304 \\ -14.4872 & -1272.2122 & 468.8057 & 449.7645 & 444.0668 & -217.8665 \\ -14.7928 & -1273.7718 & 449.7645 & 459.5023 & 445.3647 & -218.2659 \\ -14.3369 & -818.4062 & 444.0668 & 445.3647 & 1768.6306 & -63.2481 \\ 7.027 & -596.3304 & -217.8665 & -218.2659 & -63.2481 & 4478.606 \end{bmatrix} \quad (3-36)$$

$$(3-37)$$

P 和 Q 的可行解存在意味着观测器是渐近稳定的，而且反馈增益 K 为：

$$K = [2.561 \quad 0.2137 \quad -2.5 \times 10^{-6} \quad 0.08 \quad -0.0075 \quad 0.0241]'$$

这样，SOC 观测器的状态空间描述可以写成式(3-38)：

$$\begin{bmatrix} \hat{z}[k+1] \\ \hat{X}[k+1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A(T) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z}[k] \\ \hat{X}[k] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{T_s}{3600C_n} \\ B(T) \end{bmatrix} u[k] + K(\hat{y}[k] - y[k]) \quad (3-38)$$

$$\hat{y}[k] = f(\hat{z}[k]) + C\hat{X}[k] + D(T)u[k]$$

同理可以得到在不同电池温度，状态观测器的反馈增益，将其整理成表，如表 3-3 所示。

表 3-3 反馈增益与电池温度的关系

电池温度(°C)	反馈增益 K
18	[2.561 0.2137 -2.5e-6 0.08 -0.0075 0.0241]
6	[6.7904 0.2165 -0.0009 0.2168 -0.0016 0.013]
-5	[12.4462 0.2043 -0.001 0.3973 -0.0079 -0.0091]
-11	[10.6657 0.2135 -0.0001 0.3393 -0.0081 0.0042]

3.5 本章小结

本章首先从估计精度、计算复杂性和适用的场合等角度对常见的 SOC 估计算法进行分析和比较，基于讨论结果，选择计算相对简便，精度高的状

态观测器法。然后针对第二章中建立的锂离子电池等效电路模型，对模型进行简化和标准化处理，得到模型的状态空间描述。由于模型中存在非线性环节，使用李导数分析电池模型的可观性，在模型可观性的基础上，设计状态反馈增益使得误差收敛，同时采用 Lyapunov 稳定性理论分析使得系统稳定。

第4章 SOC 估计的实验与分析

4.1 引言

第二章利用锂离子电池的交流阻抗谱建立锂离子电池等效电路模型，第三章在锂离子电池模型的基础上提出状态观测器法 SOC 估计的方法。为了验证 SOC 估计方法的有效性，本章将构建实验环境，设计实验方案，进行锂离子电池的放电实验，通过比较估计值与真实值来验证状态观测器法估计 SOC 的有效性。本章主要完成室温和-20° C 下锂离子电池脉冲放电实验。

4.2 SOC 估计方法验证

4.2.1 实验环境

4.2.1.1 锂离子电池

实验使用的电池为河南环宇赛尔新能源公司的聚合物锂离子可充电电池单体，单体电池的参数如表 4-1所示。

表 4-1 单体锂离子电池参数^[52]

项目		参数
尺寸(mm)		133×101×6.2
标称容量(V)		5
标称电压(V)		3.2
充电截止电压(V)		3.65
放电截止电压(V)		2.0
最大持续充电电流		1C
最大瞬间放电电流		3C
工作温度	充电(° C)	0~45
	放电(° C)	-20~60

4.2.1.2 动力电池测试系统

美国 Arbin 公司的 BT2000 动力电池测试系统利用恒流充电、恒压充电、恒流放电、恒负载放电等基本原理，通过开放性测试软件进行任意可编程控制测试，以及设定、组合以上各项充放电功能，执行充放电程序，通过系统的恒流源以及恒流充电或恒流放电测试各种电池的容量(比)和能量(比)，组合以上方式可以测试电池的充放电效率及其他各种电性能的测试^[53]。购买的电池测试设备主要参数如表 4-2所示。

表 4-2 电池测试设备主要参数

参数	数值
通道数	2
每通道最大功率	3000W
充放电电压控制范围	2V~60V
充放电电流控制范围	0~50A
三档电流流程	50A/10A/1A
电流响应时间	<5ms
最小脉冲宽度	10ms

BT2000 动力电池测试设备可以实现充放电循环寿命测试、电池容量测试、电池充放电性能测试、过倍率充放承受能力测试、直流内阻测试、荷电保持能力测试，不同温度下电池性能测试^[53]。辅助电压测量通道可以测量电池组单体电池的电压，辅助温度通道可以测量电池极耳的温度。

4.2.1.3 上位机监控软件

MITs Pro 是 Arbin 测试软件的最新版本，它可以设计、组合各种充放电功能。通过对时间、电压、电流、容量等参数的设定限值改变程序执行步骤和终止实验。软件可以对实验过程的数据全程记录，并转换为 Excel 文件存储；对实验过程中的测量值能实时显示，并且自动绘制曲线、图形。最重要的是它具有断电数据保护功能。

MITs Pro 启动时的第一个窗口是一个控制台窗口，用命令行方式控制

MITS Pro.控制台窗口提供文件编辑选项：比如进度控制，批处理，系统设置文件等等；启动及控制测试，硬件校准；启动 Excel 和其他的工具。测试时监控界面如图 4-1所示。它包括一个菜单，一个工具条，两个属性页（文件和系统设置）、面板、快速提示条、状态条。

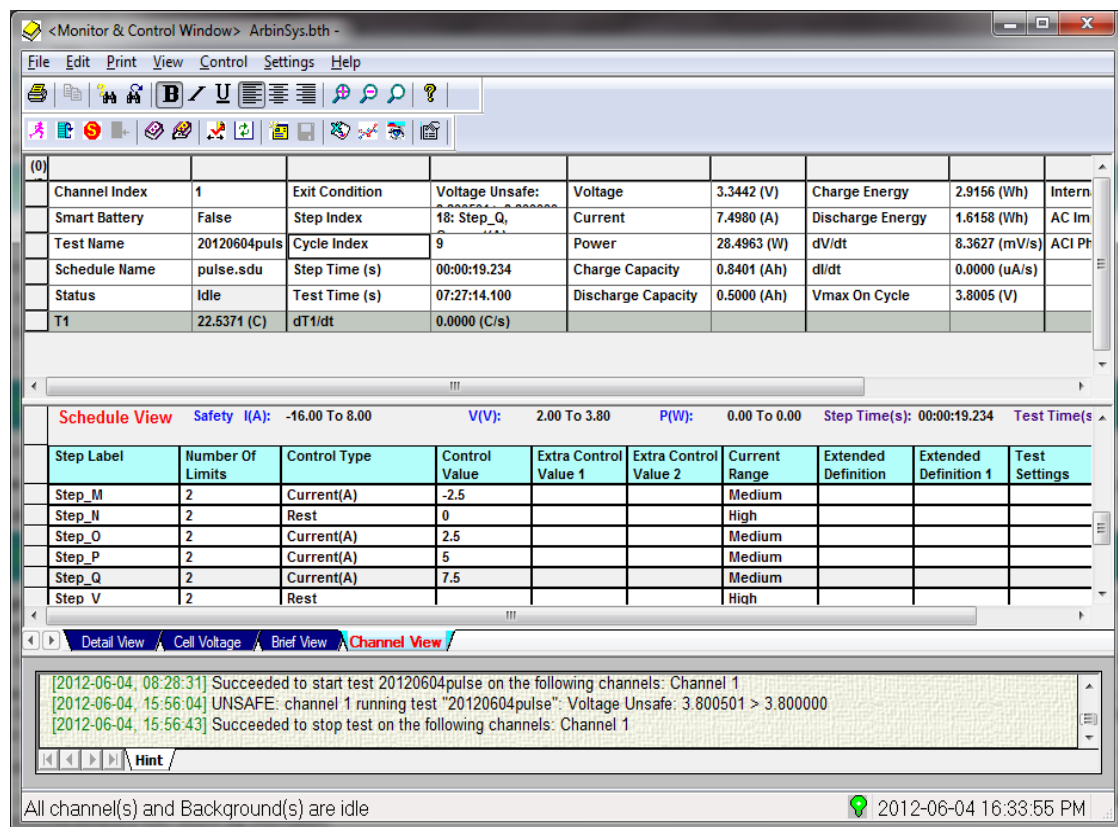


图 4-1 测试监控界面

4.2.1.4 恒温恒湿箱

巨孚仪器的 ETHHV-800-50-6H 可以为锂离子电池测试提供恒温恒湿环境，对于低温环境下保持锂离子电池温度非常重要。恒温恒湿箱主要技术指标为：

(1). 适用范围

温度：-50° C 至 150° C

湿度：20%至 95%RH

(2). 控制精度

温度： $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

(3). 降温时间

$125^{\circ}\text{C} \rightarrow -40^{\circ}\text{C} \leq 80$ 分钟

(4). 满足实验标准

GB/T 2423.1-2001 实验 A: 低温实验方法

GJB 150.4-1986 低温实验

4.2.2 实验方案

为了验证温度对 SOC 的影响因素，实验分别对同一锂离子电池进行室温和 -20°C 放电实验。

首先设计激励信号，即电池的输入电流。激励信号的选取原则是对被测对象充分激励，同时保证不会对电池造成损害。因此实验中采用脉冲电流对锂离子电池进行循环放电，使得电池的 SOC 的值在 100%~20%之间变化。放电电流采用脉冲电流，放电倍率分别选择为 3C，1.5C，0.5C，放电电流的波形如图 4-2所示，电流为负表示放电。

实验开始前锂离子电池为满电状态，即 SOC=100%。确定锂离子电池的脉冲电流后，实验流程分为以下几步：

- (1). 单体锂离子电池静置在恒温恒湿箱中，恒温箱温度设定为 -20°C ，静置时间为 2 小时。
- (2). 在恒温恒湿箱中对静置后的电池进行脉冲电流放电，脉冲电流波形如图 4-2所示，直至电池电压降到放电截止电压时停止放电。
- (3). 室温环境下，按照步骤(2)对相同的锂离子电池进行实验。
- (4). 实验结束后，采用 CCCV (恒流恒压) 将电池充满电，以备以后使用。

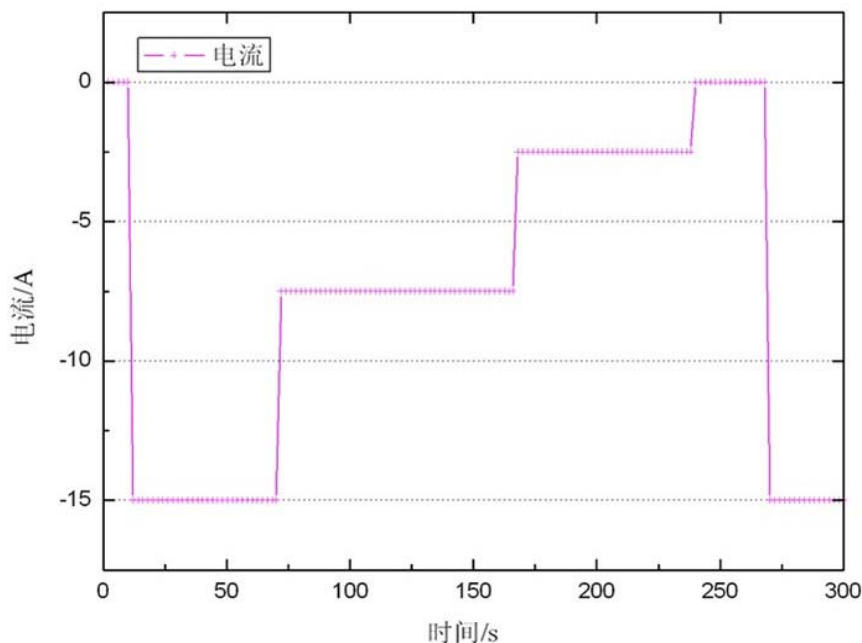


图 4-2 脉冲电流波形

4.2.3 实验结果及分析

采用状态观测器法估计 SOC 的结果和电池测试设备内部的开路电压-安时积分法作比较，电池测试设备的电流测量精度高，因此可以近似认为设备得到的 SOC 值为真实值。

使用图 4-2 的脉冲电流对实验电池激励，使得锂离子电池的 SOC 在 100% 和 20% 之间变化。

4.2.3.1 室温脉冲放电实验结果及分析

设计状态观测器 SOC 的初值为 60%，这样初始误差为 40%，实验环境为室温，利用上述状态观测器方法估计的 SOC 的值与实际测量 SOC 的值的比较图如图 4-3 所示。

从图中可以看出，虽然初始估计误差为 40%，SOC 估计值迅速逼近真实值。整体来看，使用状态观测器法估计 SOC 效果很好。实际中，利用开

路电压获得准确的 SOC 初始值，再使用状态观测器法估计效果会更好。

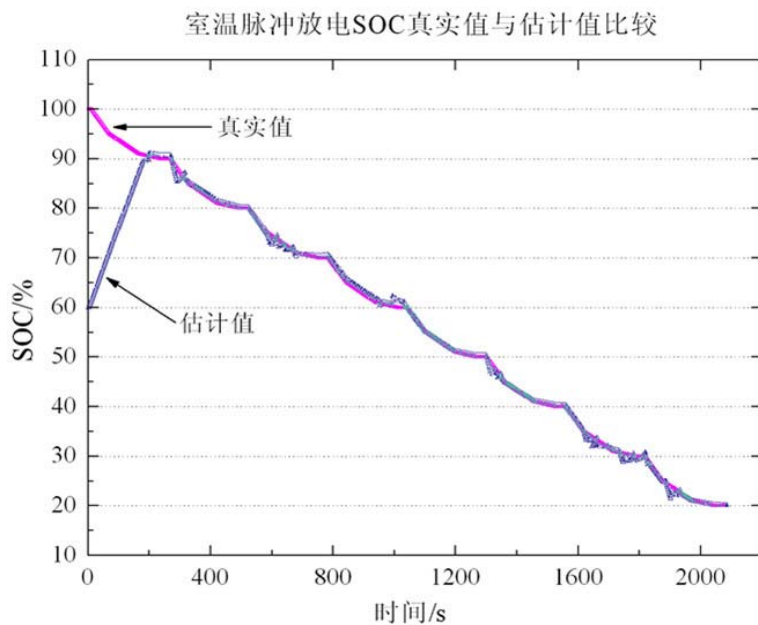


图 4-3 室温下 SOC 真实值与估计值比较

SOC 真实值与估计值的误差如图 4-4所示，从误差角度分析，SOC 估计的误差在 $\pm 2\%$ 以内。

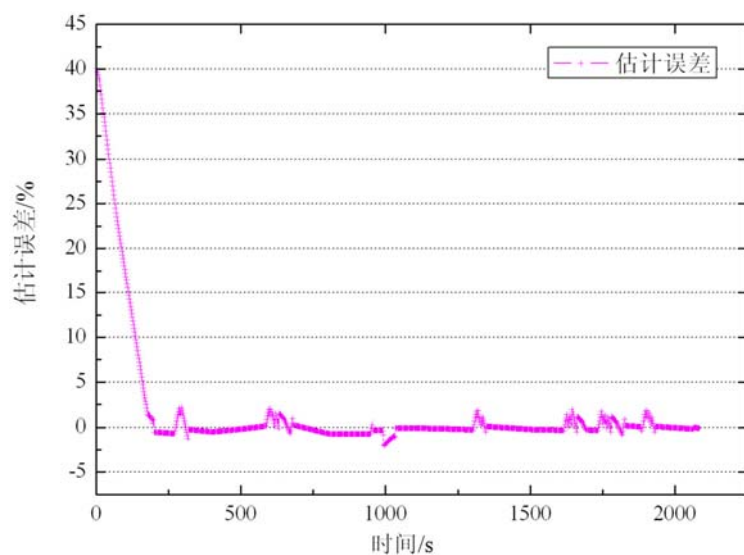


图 4-4 室温下 SOC 估计误差

4.2.3.2 -20° C 下脉冲放电实验结果及分析

在-20° C 环境下，对同一锂离子电池进行脉冲放电，在 $t=1874s$ 时，锂离子电池电压下降到放电截止电压，放电终止。-20° C 下，SOC 估计与真实值的比较如图 4-5所示。同样，SOC 估计的初值设为 60%。

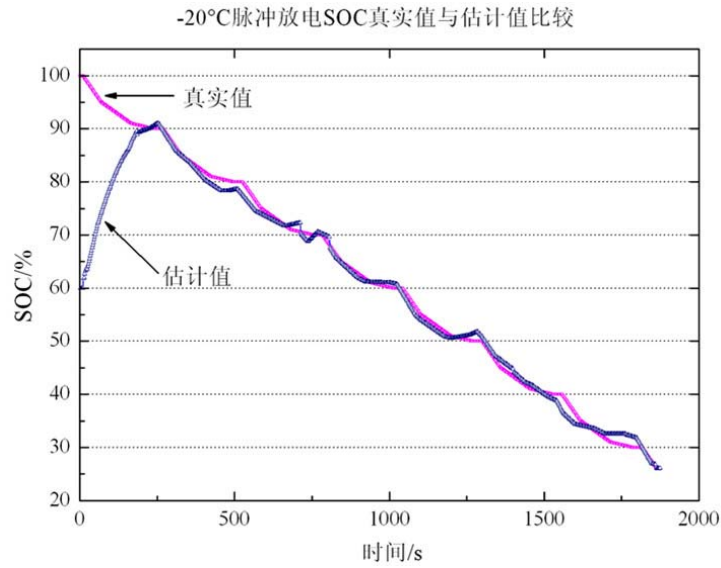


图 4-5 -20° C 下 SOC 真实值与估计值比较

SOC 估计值与真实值的误差如图 4-6所示。

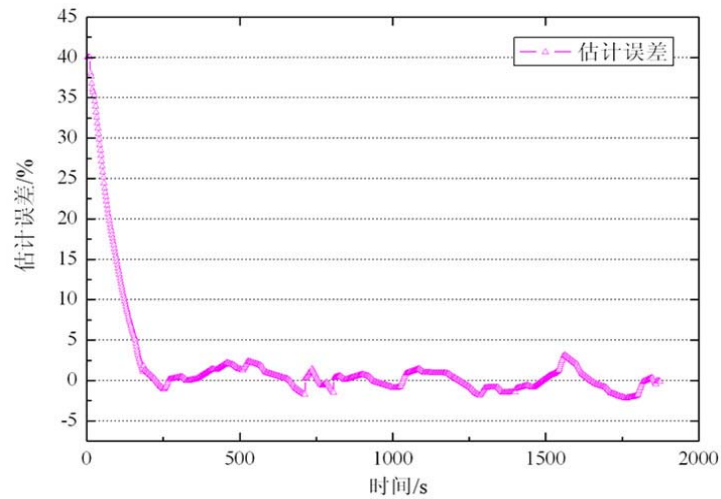


图 4-6 -20° C 下 SOC 估计误差

相比于室温下， -20°C 时 SOC 估计误差偏大，SOC 估计误差在 $\pm 4\%$ 以内。产生这种现象的原因是低温环境下，锂离子电池电压波动比较大，这点从图 4-7 可以看出。

图 4-7 中，脉冲放电初期，电压降是由于锂离子电池的欧姆内阻引起的，由欧姆定律，得到室温下和 -20°C 锂离子电池的欧姆内阻分别为： $0.0153\ \Omega$ 和 $0.0591\ \Omega$ ， -20°C 下锂离子电池的欧姆内阻几乎是室温下的 4 倍。

由以上分析可知，温度变化对锂离子电池欧姆内阻影响比较大，尤其在放电末端，电池的内阻迅速增大，放电时使得锂离子电池的电压低于放电截止电压，电池停止放电。

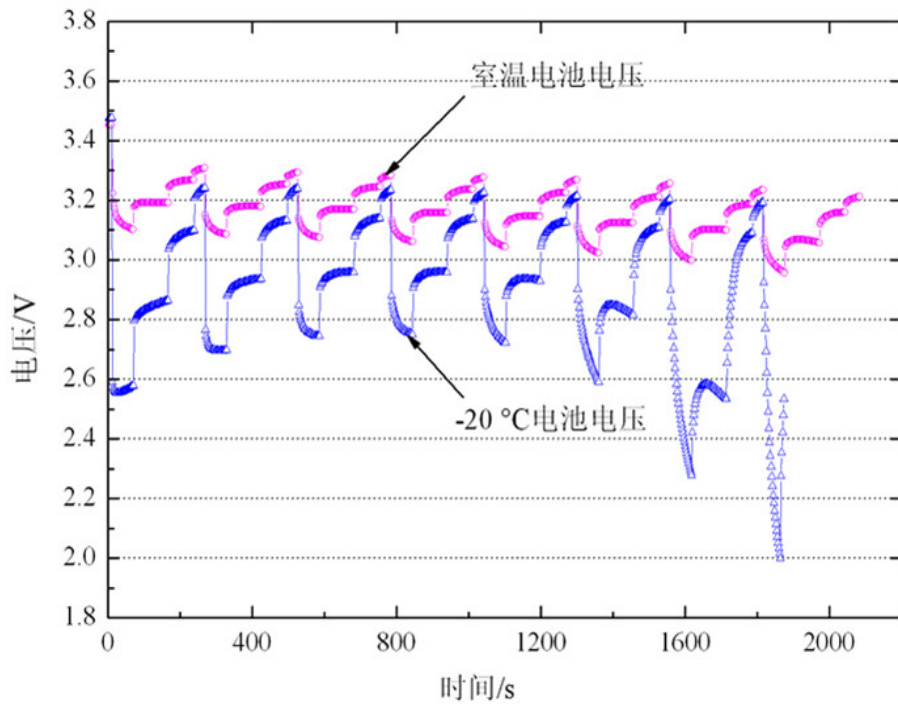


图 4-7 室温与 -20°C 脉冲放电电压变化比较

从估计误差来看，初始误差由于设置问题比较大，随后，误差迅速收敛， -20°C 是锂离子电池放电的极限温度，由此可知使用状态观测器估计 SOC 的误差在 $\pm 4\%$ 以内。

4.3 低温电池放电容量变化实验

从 -20°C 环境下脉冲放电实验发现，标称容量 5Ah 的锂离子电池并没有完全放电就终止放电，此时锂离子电池的 SOC 是否为 0，即锂离子电池的剩余电量为 0。针对这种情况设计实验，研究低温环境下电池的放电容量。

4.3.1 实验方案

锂离子电池 -20°C 环境下放电容量实验的流程为：

- (1). 将充满电的锂离子电池静置于恒温恒湿箱中，恒温箱温度设为 -20°C ，静置时间为 2 小时。
- (2). 对锂离子电池进行 0.5C 恒流放电，当放电电量为 0.5Ah 时，停止放电，锂离子电池静置 1 小时。
- (3). 重复步骤(2)，直至锂离子电池电压降到放电截止电压时，停止放电，记录锂离子电池在 -20°C 下放出的电量。
- (4). 将锂离子电池静置于室温环境下 1 小时，对锂离子电池进行 0.5C 恒流放电，直至电压降到放电截止电压，停止放电，记录锂离子电池在室温下放出的电量。

4.3.2 实验结果及分析

-20°C 下锂离子电池放电实验过程电压随时间变化的关系如图 4-8所示。从图 4-8中可以看出，电池容量比较高时，锂离子电池的放电电压变化规律和常温下放电电池电压变化规律相同。在第四次放电时，此时电池容量为 70%，锂离子电池电压明显比前三次放电时偏大，表明锂离子电池内部电阻等变化剧烈，导致电池端电压下降明显。下一次放电时，电压变化更加剧烈，呈现很强的非线性。在第六次放电时，锂离子电池的电压低于放电截

止电压，停止放电，锂离子电池放电电量为 2.7507Ah。

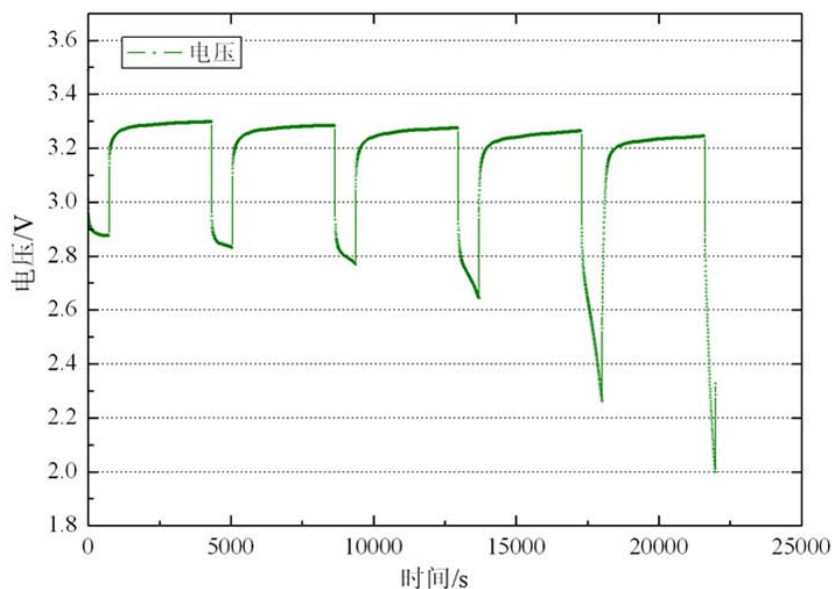


图 4-8 -20° C 下锂离子电池放电过程电压变化

将锂离子电池从恒温箱中取出后，在室温下静置 1 小时，此时认为锂离子电池温度恢复到室温，对锂离子电池进行 0.5C 恒流放电，直至锂离子电池电压降到放电截止电压，锂离子电池又放出电量 2.2885Ah。

两次放电电量之和为 5.0492Ah，刚好为锂离子电池的标称容量。由此可见，在低温环境中，锂离子电池放电截止是由于放电时电池电压低于放电截止电压导致的。这与实际生活中，我们在低温下使用数码产品时，电池会很快没电，如果电池静置于温暖的环境中，电池可以继续放电的现象是一致的。

4.4 本章小结

本章主要应用电池测试设备对锂离子电池进行脉冲放电测试，验证 SOC 估计算法的有效性，主要完成锂离子电池室温下和 -20° C 环境下锂离子电池脉冲放电的实验。

结果表明，室温下，状态观测器法估计 SOC 的误差在 $\pm 2\%$ 以内，即使在 -20°C 的极端环境下，状态观测器估计 SOC 的误差也在 $\pm 4\%$ 以内。因此，状态观测器法估计 SOC 的精度很高。

低温下锂离子电池的放电实验表明，低温环境下，锂离子电池的内阻迅速增大，导致锂离子电池电压降到放电截止电压后停止放电，电池的剩余电量依然存在，只是电池的电压过低不能继续放电。

结论

本文主要研究电动汽车动力锂离子电池，重点研究了电池的 SOC 估计方法，主要完成以下内容：

(1). 分析常见的锂离子电池模型的优缺点，从锂离子电池的电化学阻抗谱入手，根据锂离子电池的电化学阻抗谱测试结果，构建锂离子电池的电化学阻抗谱模型。针对阻抗谱模型中常相位角元件不能写成状态空间描述的问题，引入高阶 RC 等效电路模型。结果表明，五阶 RC 等效电路模型的拟合效果很好，而且误差小。测试不同电池温度下锂离子电池的电化学阻抗谱，采用非线性最小二乘法获取等效电路模型参数与温度的关系，可以修正等效电路模型，提高模型参数对温度变化的适应性。

(2). 通过电池测试设备测试电池开路电压用于开路电压的建模，同时将等效电路标准化处理后得到锂离子电池的状态空间描述。对现有 SOC 估计方法的分析提出状态观测器法估计 SOC。针对电池模型的非线性环节，应用李导数分析电池模型的可观性，在模型可观性的基础上，应用 Lyapunov 稳定性理论设计收敛的状态观测器估计电池的 SOC。稳定性分析得到的线性矩阵不等式的解通过 MATLAB 中 LMI 工具箱求取。在 MATLAB/Simulink 环境下，针对具体的锂离子电池模型，设计可行的状态观测器。

(3). 应用电池测试设备对锂离子电池进行测试，验证状态观测器法估计 SOC 的有效性，主要完成不同温度下锂离子电池脉冲放电实验。结果表明，即使锂离子电池在 -20°C 的环境下，状态观测器法估计 SOC 的误差在 $\pm 4\%$ 以内，表明状态观测器法估计 SOC 有很高的精度。通过对低温下锂离子电池放电实验，得到在较低的温度下，锂离子电池的内阻迅速增大导致锂离子电池端电压低于放电截止电压，因而停止放电。实验结果对于实际中锂离子电池的使用有很好地指导作用。

由于锂离子电池具有高度的非线性，研究工作也存在很多不足：

(1). 锂离子电池的电化学阻抗谱不仅和电池的温度有关，还和电池 SOC 以及电流有关，由于条件有限，本文固定 SOC 和电流，研究阻抗谱和温度的关系。

(2). 在电动汽车中的动力电池组一般由数百节电池串联和并联组成，电池组的分析与研究工作开展的比较少，这将是以后研究的重点。

参考文献

- [1] 李荻. 电化学原理[M]. 修订版. 北京航空航天大学出版社, 1998: 5-7
- [2] 史美伦. 交流阻抗谱原理及应用[M]. 国防工业出版社, 2001: 349-352
- [3] Il-Song Kim. Nonlinear State of Charge Estimator for Hybrid Electric Vehicle Battery[J]. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS July 2008 vol 23: 2027-2034
- [4] 张术. 电动汽车电池管理系统软件设计与 SOC 估算策略研究[D]. 天津大学硕士学位论文. 2005.12: 1-3
- [5] 李兴虎. 电动汽车概论[M]. 北京理工大学出版社, 2005: 67-96
- [6] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光编著. 现代电动汽车技术[M]. 北京:北京理工大学出版社.2002
- [7] 夏晴. 电动汽车用锂离子电池荷电状态估计算法的研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文. 2011.6: 2-4
- [8] Pop V, Bergveld H. J, Danilov D, et al. Battery Management Systems Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications[M]. NewYork: Springer Science Business Media B.V,2008:17.
- [9] Sabine Piller, Marion Perrin, Andreas Jossen. Methods for state-of-charge determination and their applications[J]. Journal of Power Sources. 96(2001): 113-120
- [10] 徐杰. 基于卡尔曼滤波的动力电池组 SOC 精确估计[D]. 杭州电子科大硕士学位论文. 2009.12:16-20
- [11] Tingshu Hu, Brian Zanchi, Jianping Zhao. Determining battery parameters by simple algebraic method[C]. American Control Conference. July 2011: 3090-3095
- [12] 古艳磊. 锂离子电池阻抗模型的研究[D]. 哈尔滨理工大学硕士学位论文.2008.3: 6-10
- [13] Domenico Di Domenico, Giovanni Fiengo, Anna Strfanopoulou. Lithium-Ion battery State of Charge estimation with a Kalman Filter based on a electrochemical model[C]. IEEE International Conference on Control Applications. 2008.9: 702-708

- [14] Haifeng Dai, Zechang Sun, Xuezhe Wei. Online SOC Estimation of High-power Lithium-ion Batteries Used on HEVs[C]. IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. 2006.12: 342-347
- [15] Dai Haifeng, Wei Xuezhe, Sun Zechang. State and Parameter Estimation of a HEV Li-ion Battery Pack Using Adaptive Kalman Filter with a New SOC-OCV Concept[C]. International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2009: 375-380
- [16] Gregory L. Plett. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 1. Background[J]. Journal of Power Sources. 134(2004): 252-261
- [17] 吴清宇. HEV 电池管理系统建模仿真及设计开发的研究[D]. 北京交通大学硕士学位论文. 2008.6: 18-20
- [18] 张建. 电动汽车电池监控系统设计[D]. 浙江大学硕士学位论文. 2006.5: 30-35
- [19] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, B.J. Yurkovich. A technique for dynamic battery model identification in automotive applications using linear parameter varying structures[J]. Control Engineering Practice. 17(2009): 1190-1201
- [20] Y. Hu, S. Yurkovich, Y. Guezennec, B.J. Yurkovich. Electro-thermal battery model identification for automotive applications[J]. Journal of Power Sources. 196(2011):449-457
- [21] 陈全世, 林成涛. 电动汽车用电池性能模型研究综述[J]. 汽车技术. 2005,3: 1-5
- [22] 桂长青等, 动力电池[M], 北京: 机械工业出版社. 2009,5: 120-124
- [23] 陈全世, 朱家琰, 田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 2007: 78
- [24] 黄可龙, 王兆翔, 刘素琴编著. 锂离子电池原理与关键技术[M]. 北京: 化学工业出版社. 2008
- [25] Johnson. V.H. Battery Performance Models in ADVISOR[J]. Journal of Power Sources, 2002(110): 321-329.
- [26] Jaehoon Jang, Jiyeon Yoo. Equivalent Circuit Evaluation Method of Lithium Polymer Battery Using Bode Plot and Numerical Analysis[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION. 2011.3(26): 290-298

- [27] Shuhui Li, Bao Ke. Study of Battery Modeling using Mathematical and Circuit Oriented Approaches[C]. IEEE Conference on Power and Energy General Meeting. July.2011: 31-38
- [28] K.M. Tsang, W.L.Chan, Y.K.Wong, L.Sun. Lithium-ion Battery Models for Computer Simulation[C]. IEEE International Conference on Automation and Logistics. August.2010: 98-103
- [29] O. Erdinc, B. Vural, M. Uzunoglu. A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading[C]. IEEE International Conference on Clean Electrical Power. June.2009: 383-386
- [30] Hanlei Zhang, Mo-Yuen Chow. On-line PHEV Battery Hysteresis Effect Dynamics Modeling[C].36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. Nov.2010: 1844-1849
- [31] Min Chen, Gabriel A. Rinvcon-Motra. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance[J]. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION.June.2006: 504-511
- [32] 冯毅. 锂离子电池数值模型研究[D]. 中国科学院研究生院博士学位论文.2008.5: 33-50
- [33] Ravishankar Rao, Sarma Vrudhula, Daler N. Rakhmatov. Battery Modeling for Energy-Aware System Design[J]. IEEE Computer Society. Dec.2003:77-87
- [34] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M].北京:科学出版社.2002.7: 20-22
- [35] Andreas Jossen. Fundamentals of battery dynamics[J]. Journal of Power Sources.154(2006): 530-538
- [36] 徐睿. 锂离子电池劣化程度与阻抗模型相关性研究[D].哈尔滨理工大学硕士学位论文. 2010.3: 2-10
- [37] Zhuang Quanchao, Xu Shoudong, Qiu Xiangyun. Diagnosis of Electrochemical Impedance Spectroscopy in Lithium Ion Batteries[J]. Progress in Chemistry. Jun 2010 22(6): 1044-1057
- [38] Anand Ramaurthy, Shailesh Notani, Subhashish Bhattacharya. Advanced Lithium Ion Battery Modeling and Power Stage Integration Technique[J]. Energy Conversion Congress and Exposition 2010: 1485-1492.
- [39] 1 Evenij Barsoukov, J.Ross Macdonald. Impedance Spectroscopy Theory,

- Experiment, and Applications. Second Edition. John Wiley & Sons. 2005: 80-83.
- [40] Stephan Buller, Marc Thele, Eckard Karden, Rik W. De Doncker. Impedance-based non-linear dynamic battery modeling for automotive applications[J]. Journal of Power Sources. 113(2003): 422-430
- [41] D. Andre. M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, D.U. Sauer. Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling[J]. Journal of Power Sources. 196(2011): 5349-5356
- [42] Amin Rezaei Pish Robot, Farzad Rajaei Salmasi. State of Charge Estimation for Batteries in HEV Using Locally Linear Model Tree(LOLIMOT)[C]. Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems. Oct.2007: 2041-20469
- [43] Jonghoom Kim, Seongjun Lee, B.H. Cho. Discrimination of Li-ion batteries based on Hamming network using discharging-charging voltage pattern recognition for improved state-of-charge estimation[J]. Journal of Power Sources. 196(2011): 2227-2240
- [44] Gregory L. Plett. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification[J]. Journal of Power Sources. 134(2004): 262-276
- [45] 陈金干. 基于模型的动力电池参数估计研究. 同济大学硕士学位论文. 2009.3: 77-80
- [46] Gregory L. Plett. Extended Kalman filtering for 342-347battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 3. State and parameter estimation[J]. Journal of Power Sources. 134(2004): 277-292
- [47] 杨国安. 数字控制系统—分析、设计与实现. 西安: 西安交通大学出版社. 2008.2: 157-168
- [48] 查全性等著. 电极过程动力学导论[M]. 北京:科学出版社. 2002:219-246
- [49] Lijun Gao, Shengyi Liu, Roger A. Dougal. Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation[J]. IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKING TECHNOLOGIES. Sept.2002(25):495-504
- [50] Robert Hermann, Arthur J, Krener. Nonlinear Contollability and Observability. IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL.

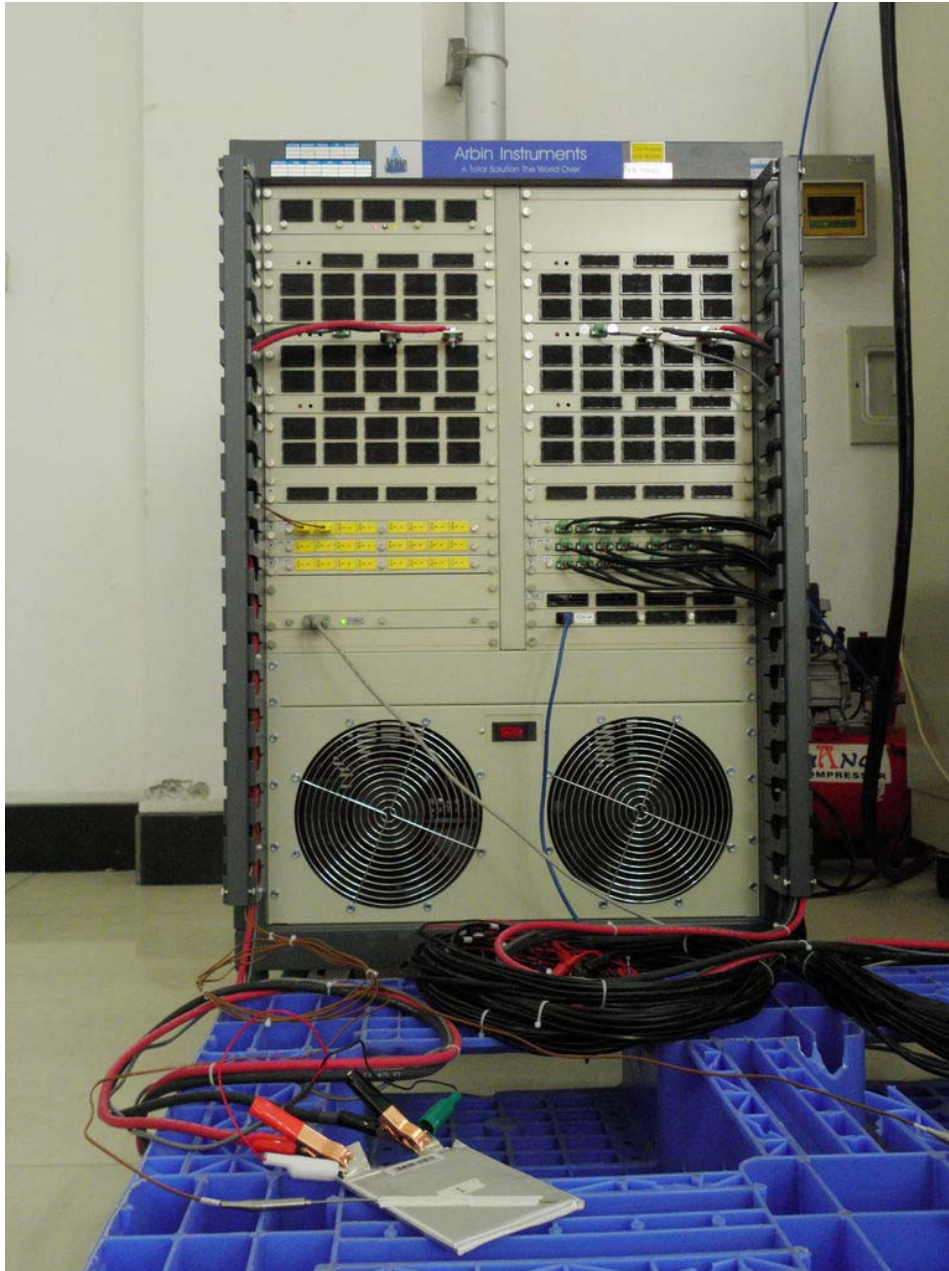
Oct.1977(22):728-740

- [51] Y.Hu, S.Yurkovich. Battery cell state-of-charge estimation using linear parameter varying system techniques [J]. Journal of Power Sources. 198(2012):338-350
- [52] HPPF60100131-5Ah 聚合物锂离子可充电电池产品规格书. 河南环宇赛尔新能源科技有限公司. 2012.1
- [53] MITS Pro User's Guide. Arbin INSTRUMENTS.2012.4

附录 1



附录 2



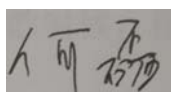
攻读学位期间发表的学术论文

1. Lei He, Haifeng Liu, Tong Wang. An Equivalent Circuit Model for Li-ion Batteries Considering Temperature Effect [C]. //The 3rd International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering (MACE 2012), Baotou, China, 2012. (已录用)

哈尔滨工业大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《电动汽车锂离子电池建模及 SOC 估计方法研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：



日期：2012 年 7 月 4 日

哈尔滨工业大学硕士学位论文使用授权书

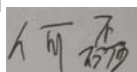
《电动汽车锂离子电池建模及 SOC 估计方法研究》系本人在哈尔滨工业大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨工业大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨工业大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，同意学校将论文加入《中国优秀博硕士学位论文全文数据库》和编入《中国知识资源总库》。本人授权哈尔滨工业大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以上相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

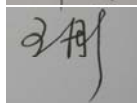
不保密□

作者签名：



日期 2012 年 7 月 4 日

导师签名：



日期 2012 年 7 月 9 日

致谢

时光荏苒，岁月如梭，两年的研究生学习已接近尾声，值此论文完成之际，对曾经给予我支持帮助的老师、师兄师姐们致以由衷的感谢和崇高的敬意。

本论文是在刘志远老师的悉心指导和耐心帮助下完成的，从论文的选题、实验的设计、方法的分析，刘老师都给予了最大的帮助。刘老师刻苦钻研、孜孜不倦、严谨求实的治学态度及和蔼可亲、平易近人、为人师表的处事原则都深深影响着我，使我终身受益。同时，感谢导师王彤教授，在论文方面也给予了我很大的帮助。这些都将成为我人生中最宝贵的一笔财富。感谢刘老师提供的规范的实验室环境，正规的工作制度、定期的总结报告、协同合作的学术氛围以及先进的仪器设备，这些都为论文的完成提供了便利。

与此同时，感谢化工学院的贾诤教授、王秋明师兄和电化学专业的同窗们，他们无私地提供仪器设备，并且给我耐心讲解电化学专业知识。感谢实验室范国伟师兄，在线性矩阵不等式问题中给予我很多帮助。感谢赵林辉师兄在论文最后关键时刻给予的帮助。感谢实验室的同窗廖洁、井岩、李玉林、王浩、张娟、杨丽君、邓邦夏、吕镇基、朱锋、孙振众、李壮和乔海霞(排名不分先后)，我们一起学习，一起娱乐。感谢实验室的赵洁老师和师弟师妹们，我们一起组成一个温暖的大家庭。感谢 11 硕控制二班所有的兄弟姐妹们，两年的学习生活给我留下难忘的回忆。在我感到迷茫不知方向时，你们鼓舞我继续前进。没有你们，我是不可能完成这篇论文的。

最后，我要感谢我的父母和妹妹。你们一直关心我，爱护我，支持我，当我遇到挫折的时候，你们在后方给我勇气迎接挑战。父母的养育之恩我将终生铭记。