**基于Matlab/Simulink的锂离子蓄电池低温模型**

摘 要

混合动力汽车和电动汽车预示着绿色出行的未来，而电池储能技术是其中不可或缺的一个关键环节。目前电动汽车的推广取得了良好的效果，但在寒冷地区的应用仍然存在较大障碍。低温环境下锂离子电池在充放电过程中会发生容量损失的现象，并且阻抗明显增大，锂离子动力电池的性能急剧下降，因此建立一种考虑温度对电池性能影响的模型具有一定的理论意义与应用价值。本文以磷酸铁锂动力电池为研究对象，进行了以下研究：

首先介绍了锂离子动力电池的发展情况，总结了锂离子电池模型的国内外研究现状、主要难点技术，总结了前人针对锂离子蓄电池低温性能研究所使用的模型和方法。

接下来针对常见的锂离子动力电池——26650型磷酸铁锂电池，根据对该电池的电池容量、开路电压、极化电阻及欧姆电阻的标定实验，结合电池的热行为及低温情况下电池的容量衰减特性，提出了一种考虑低温容量衰减的电热耦合等效电路模型，在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型，并进行了模型仿真验证。

**关键词：**锂离子电池，低温容量衰减，等效电路模型，Simulink

**Low Temperature Model of Lithium Ion Battery Based on Matlab/Simulink**

ABSTRACT

Hybrid electric vehicles and electric vehicles indicate the future of green travel, and battery energy storage technology is an indispensable key link. At present, the promotion of electric vehicles has achieved good results, but there are still large obstacles in the application in cold areas. In low temperature environment, lithium ion battery will lose its capacity during charging and discharging, and its impedance will increase obviously, thus the performance of lithium ion power battery will drop sharply. Therefore, it has certain theoretical significance and application value to establish a model considering the effect of temperature on battery performance. In this paper, the lithium iron phosphate power battery is taken as the research object, and the following researches are carried out:

Firstly, the development of Li-ion power battery is introduced, the research status and main difficult technologies of Li-ion battery models at home and abroad are summarized, and the models and methods used by predecessors for low temperature performance research of Li-ion battery are summarized.

Next, aiming at 26650 lithium iron phosphate battery which is a common lithium ion power battery, according to the calibration tests of the battery capacity, open circuit voltage, polarization resistance and ohmic resistance, and combined with the thermal behavior of the battery and the capacity attenuation characteristics of the battery at low temperature, an electro-thermal coupling equivalent circuit model considering low temperature attenuation is proposed, and a simulation model is built in Matlab/Simulink environment. Then the model simulation verification is carried out.

**Key words:** lithium ion battery, low temperature capacity fade, equivalent circuit model, Matlab/Simulik

# 1 引言

## 课题背景

混合动力汽车和电动汽车预示着绿色出行的未来，而电池储能技术是其中不可或缺的一个关键环节。锂离子电池是新一代绿色二次电池，它具有电压高、能量密度大以及自放电率低等突出优点[1]。在现有可充电电化学系统中，锂离子电池是目前混合动力汽车和电动汽车的首选电源。

然而在低温环境下锂离子电池在充放电过程中会发生容量损失的现象，并且阻抗明显增大。降低电池使用的环境温度会导致电池内部化学反应的减缓，影响电荷转移动力学[2]，并导致电解质电导率降低[3]和锂离子在阳极扩散率的降低[4]。这些因素降低了电池的可用容量和输出功率，也导致锂离子电池在低温环境下整体性能的失效[5]。

除了性能变差之外，锂离子电池阳极在低温下还有更危险的现象：锂沉积。低温会导致石墨阳极的高度极化，从而使阳极电位接近锂金属的电位[6]。这种情况下，锂离子向石墨的扩散减缓，导致充电时锂枝晶析出[7]。锂沉积的现象发生在电极表面，从而导致锂离子电池容量降低和功率输出降低，并导致电池的严重老化。

这种在低温环境下锂离子电池充电性能的严重退化使得电动汽车等使用锂离子电池作为储能载体的设备无法在低温环境下正常工作，电动车在不同地理位置和气候条件下的普及使用也受到了严重限制。因此锂离子电池低温状态下电池性能的研究具有深远的意义，建立精准的锂离子电池低温模型是本课题的重要研究内容之一。

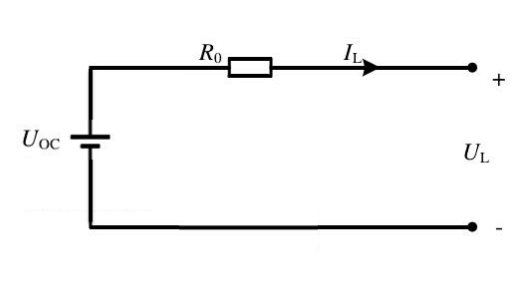
## 锂离子电池模型研究现状

锂离子动力电池内部的物理化学反应十分复杂，对锂离子电池的精准建模一直以来也是学术与工业界在电池研究方向的重点和难点之一。目前锂离子电池模型可分为等效电路模型、电化学模型、神经网络模型、交流阻抗模型等。不同的电池模型适用于不同的场合和范围，各有优势也同时各自有自身的缺陷，目前还未有一种模型可以准确表述电池在全工作范围内的所有特性。

### 1.2.1 等效电路模型

等效电路模型基于电池的工作原理和外部动态特性，通过使用无源元件，如阻抗、极化电阻和电容，以及有源元件，如受控电源来描述电池工作特性。这是一种参数化方法，通过给定合适的参数，它可以用于对任何电池建模，而不论其化学性质、配置和放电速率如何，因此等效电路模型是电动和混合动力汽车应用中最常见的模型。根据等效电路元件的性质，可分为线性等效电路模型和非线性等效电路模型。常见的等效电路模型有 Rint 模型、 Thevenin 模型、 PNGV 模型、高阶模型等。

Rint模型也称为简化静态模型，通过理想电压源和电阻的串联来等效的动力电池拓扑结构。这种模型优点在于电路结构简单，方便计算，其不足之处是这种理想模型没有考虑动力电池的极化现象，与实际动力电池特性偏差较大，因此仅适合于模拟蓄电池的理想工作状态，而不能适用于模拟汽车动力电池的工况仿真。

图1.1 Rint 模型

Thevenin模型在Rint模型基础上加了RC支路，用于模拟动力电池随时间的回弹特性。该模型考虑了电池极化现象，但单个RC支路不足以完全体现电池的动态性能。

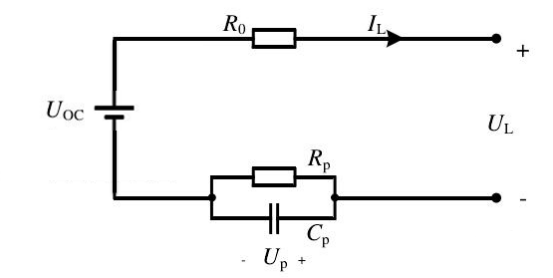


图1.2 Thevenin 模型

PNGV模型在Thevenin的基础上增加了负载电流对电池OCV（Open Circuit Voltage）影响的考虑。在该模型中用来表示电池的理想开路电压，为电池电容（表示负载电流引起的OCV变化），为电池的欧姆内阻（经过的负载电流为），为电池的极化内阻（经过的极化电流为），为极化电容（表示负载电流引起的极化电压变化）。

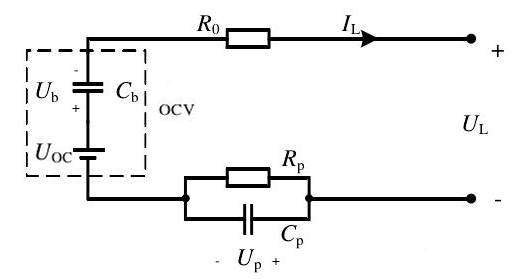
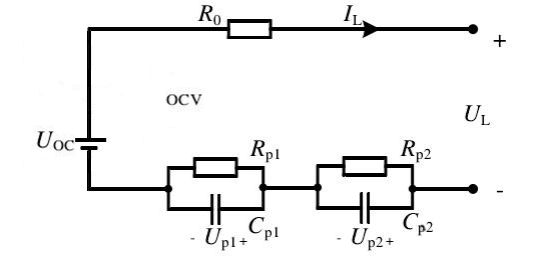


图 1.3 PNGV 模型

高阶模型以二阶模型常见，若干个RC电路表征动力电池的时间常数和频率响应等瞬态特性。李炳思提出一种基于二阶等效模型并考虑了电池模型参数随温度的变化和迟滞效应因素的改进模型[8]。通过找到合适的电池参数组合，可以适用于多种电池模型而不论其内部化学组成。但该模型虽然考虑了电池所处环境温度，并未考虑电池表面温度、内部温度之间的区别联系，也未考虑电池内部生热等因素。

图 1.4 二阶等效电路模型

### 1.2.2 神经网络模型

神经网络具有非线性特性、并行结构和学习能力，目前也应用于电池建模和SOC（State of Charge）估计中。神经网络模型的计算量受输入变量和数据量影响，其精确程度受训练数据和训练方法的影响，并且十分耗时，依赖于历史数据来完整建立动态模型，以便实现可接受的泛化能力[9]。

### 1.2.3 交流阻抗模型

这类模型主要用于描述电池的交流阻抗特性，可以比较精确的反应电池动态特性。但是受限于其检测技术与检测设备，目前车用动力电池特有的工作环境决定了其很难被在线应用在实车上，这种方法可以用来预先离线建立电池模型以及对模型初始参数进行辨识。

### 1.2.4 电化学模型

电化学模型是基于电化学原理，根据电池内部特性建立而成的模型，其模型略显复杂，建模和应用都会有一定的困难，不易直接用于电动汽车动力系统的研发，因此人们常常对电化学模型进行一定程度的简化。Doyle和Newman在1993年从分子水平的角度提出了伪二维多孔电极模型（P2D模型），奠定了电化学模型的发展基础[10]。

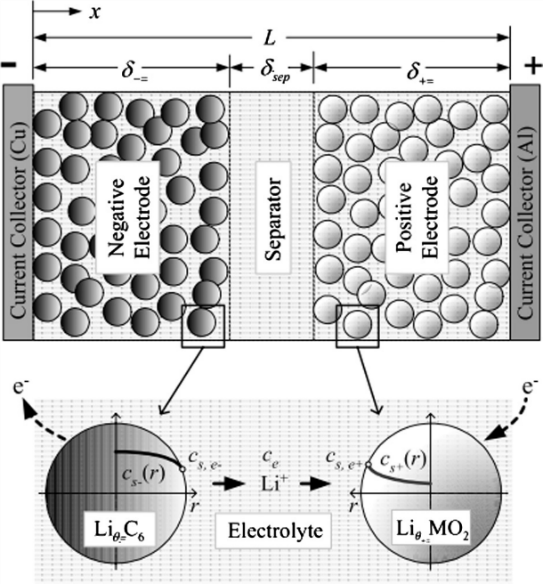


图 1.5 锂离子电池放电示意图

经典P2D模型形式复杂，计算耗时长，不少研究者尝试对经典P2D模型进行简化。一种方案是忽略或近似电池内部物理化学过程，例如单粒子模型（Single Particle Model, SPM）忽略电池内部锂离子浓度分布和反应电流分布的不均性之后得到[11-12]。另一种方案是针对特定的边界条件，利用数学方法对偏微分方程进行降阶或重构[13-15]。

另外有研究者提出了电化学—热耦合模型，所谓耦合模型是指既利用电化学模型仿真结果计算电池产热率与温度，又反过来用温度修正电化学模型的某些参数。Song等人通过将改进的电化学模型和热模型耦合的方式来研究聚合物锂电池的热传递和制定热管理策略[16]，Samba等人建立了LiFPO4软包电池的三维模型[17]，通过实验数据验证，电化学-热耦合模型能够精确模拟电池参数，包括温度不均匀性、电势分布和电流密度等基本细节。通过同样的方法, Samba采用类似的电化学电池模型来模拟不平衡电池模块的热行为[18]。这项研究的主要贡献在于，通过使用电化学模型和热模型耦合的方式，可以详细模拟和观察电池中的温度分布。

## 参数辨识方法

由于锂离子电池模型具有大参数集、高度非线性、无解析解以及必须通过迭代求解等特点，决定了传统参数估计方法难以直接应用。目前获取锂电池模型参数的方法主要有三类：基于电化学原理的参数测试方法、基于数值方法参数辨识以及激励响应分析法。

基于电化学原理的参数测试方法需要通过生产厂家提供或是拆解电池进行物理测量得到几何结构参数，主要方法有电化学阻抗谱法、线性扫描伏安法、恒电位、恒电流间歇滴定法。这些方法存在一些缺点，比如均需参比电极，需要拆解电池后，对正负极材料进行电化学参数测量，且对参数测量的时间较长。

基于数值方法模型参数辨识主要利用非线性最小二乘法[19]，高斯-牛顿法[20]，遗传算法[21]和粒子群算法[22]等。前二者主要用于等效电路或SP模型参数辨识，智能算法则可用于从等效电路到电化学模型等各种电池模型中。

Saw等人提出一种基于电流激励响应分析的方法辨识锂电池参数[23-24]。激励响应分析方法中的电流激励工况是在深入分析锂电池内部不同工作过程后设计出来的。激励工况能够解耦出电池内部不同的电化学过程，进而应用描述不同过程的电化学方程和最小二乘法辨识出对应的相关参数，获取的参数更加准确。

## 本文主要研究内容

本文首先综述了锂离子电池模型的国内外研究现状，然后以26650型磷酸铁锂电池为研究对象，通过前文对各种建模方法的分析，采用二阶等效电路模型作为电池的基本工作过程模型，同时基于目前对锂电池热行为的研究，将热模型与等效电路模型进行耦合，同时考虑低温情况下电池工作循环中发生的容量衰减现象对锂电池的容量进行修正，最终得到一种考虑低温容量衰减的电热耦合等效电路模型，通过 Matlab/Simulink 环境搭建模型，并进行参数辨识与仿真验证。

# 2 等效电路模型及参数辨识

本章主要根据锂电池在不同温度环境下的工作状况，分析电池容量、开路电压、欧姆内阻以及极化电阻和极化电容与温度、SOC的关系，辨识参数后建立锂电池基本工作过程的二阶等效电路模型，并在 Matlab/Simulink 中搭建电池仿真模型。

## 2.1 二阶等效电路模型

二阶等效电路模型原理图如图1.4所示。

根据电路KCL定律，可得关于电流的方程如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.1） |
|  |  | （2.2） |

电路端电压表达式如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.3） |

式中为电池的开路电动势，受温度及电池SOC状态的影响，为电池欧姆内阻，与为电池的极化过电势。

电池SOC反应电池的剩余可用容量，目前通常以美国先进电池联合会的电池实验手册中的SOC定义为标准，即特定放电速率下剩余电量与额定电池容量的比值[25]。而电池容量会受温度、循环次数等因素的影响，本文采用剩余电量与电池的实际容量的比值作为SOC的定义，即：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.4） |

式中表示t时刻电池SOC值，为初始时刻电池SOC值，Q为电池实际容量，为电池干路电流。

与温度及SOC的关系、电池实际容量Q、欧姆内阻、极化内阻、、极化电容、等参数均与温度有关，在二阶等效电路模型中为需要辨识的参数。

## 2.2 电池参数及实验平台

本文选用的磷酸铁锂电池参数如表2.1所示。

表2.1 电池型号参数

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 型号 | 额定容量 | 额定电压 | 充电截止电压 | 充电截止电流 | 放点截止电压 | 工作温度范围 |
| 26650 MP2-Fe | 3000mAh | 3.2V | 3.6V | 0.01C | 2.0V | 充电0℃~+45℃  放电-20℃~+60℃ |

电池测试平台为LK-80G可编程式恒温恒湿实验箱、BTS-60V100A电池充放电设备、上位机及相应连接线组成。上位机装载实验所需软件，在线控制实验进程并记录实验数据，电池充放电设备可提供恒流或动态电流工况，恒温恒湿实验箱用来控制实验环境温度。

考虑到极端低温的工况会对电池造成极大地不可逆伤害，同时权衡电池的工作环境温度范围，在设定试验温度时应尽量保证参数标定过程中既覆盖参考低温环境又不至于对电池造成过大伤害，最低温度定为-10℃。

为保证试验可靠性，每组实验选取5块电池，相同工况下重复试验三次并求取实验结果平均值作为最后实验结果。

## 2.3 电池容量标定及参数辨识

### 2.3.1 电池容量标定试验

将电池置于不同的环境温度下（-10℃、10℃、25℃、40℃、55℃）进行试验，实验步骤如下所示：

（1）将电池静置1小时；

（2）准备过程：在环境温度下以1/5 C充电速率恒流充电至充电截止电压，然后以1/100 C的充电速率恒压充电至充满；

（3）静置1小时使电池状态稳定；

（4）放电过程：以1/3 C放电速率恒流放电至放电截止电压，然后以1/30 C放电速率恒流放电，记录总放电容量；

（5）充电过程：以1/3 C充电速率恒流充电至充电截止电压，然后以1/30 C充电速率恒流充电，记录总充电容量；

（6）重复充放电过程5次，求取平均值，记录实验数据。

实验所得电池容量的数据如表2.2所示。

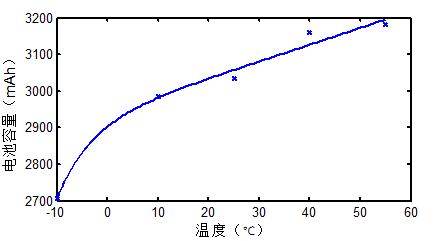
表2.2 电池充放电容量与温度

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 温度 | -10℃ | 10℃ | 25℃ | 40℃ | 55℃ |
| 放电容量（mAh） | 2663.3 | 2982.9 | 3032.8 | 3165.1 | 3184.4 |
| 充电容量（mAh） | 2752.2 | 2987.4 | 3038.5 | 3156.2 | 3178.0 |
| 平均容量 Q（mAh） | 2707.8 | 2985.1 | 3035.6 | 3160.6 | 3181.2 |

将电池实际容量与温度关系进行拟合，通过Matlab中的函数拟合工具箱可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （2.5） |

其中为温度T下电池实际容量，拟合参数=2949，=0.001464，=-46.07，=-0.146，拟合函数的相关系数=0.987，拟合函数图像和实验数据的关系如图2.1所示。

图2.1 锂电池容量与温度关系

# 参考文献

1. Capasso C, Veneri O. Experimental analysis on the performance of lithium-based batteries for road full electric and hybrid vehicles[J]. Appl Energy, 2014, 136(Dec): 921–30.
2. Ji Y, Zhang Y, Wang C-Y. Li-Ion cell operation at low temperatures[J]. Electrochem, 2013, 160(4): A636–49.
3. Shiao HZA, Chua D, Lin H, et al. Low temperature electrolytes for Li-ion PVDF cells[J]. Power Sources, 2000, 87-93.
4. Zhang SS, Xu K, Jow TR. Low temperature performance of graphite electrode in Li-ion cells[J]. Electrochim Acta, 2002, 48: 241–6.
5. Zhang SS, Xu K, Jow TR. A new approach toward improved low temperature performance of Li-ion battery[J]. Electrochem Commun, 2002, 4:928–32.
6. Gunawardhana N, Dimov N, Sasidharan M, et al. Suppression of lithium deposition at sub-zero temperatures on graphite by surface modification[J]. Electrochem Commun 2011; 13(10):1116–8.
7. Sarre G, Blanchard P, Broussely M. Aging of lithium-ion batteries[J]. Power Sources 2004; 127(1–2): 65–71.
8. 李炳思.温度依赖的电动汽车动力电池建模及SOC估计方法研究[D].吉林大学,2017
9. 武骥，张陈斌，陈宗海. 一种基于自适应模型融合算法的动力锂电池建模方法[C]. 系统仿真技术及其应用学术论文集, 2014
10. Doyle M, Fuller T F, Newman J. Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium Polymer Insertion Cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1993, 140(6): 1526-1533.
11. Meng G, Sikha G, White RE. Single-Particle Model for a Lithium-Ion Cell: Thermal Behavior[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(2): A122-132.
12. Rahimian S K, Rayman S, White R E. Extension of physics-based single particle model for higher charge-discharge rates[J]. Journal of Power Sources, 2013, 224: 180-194.
13. Cai L, White R E. Reduction of Model Order Based on Proper Orthogonal Decomposition for Lithium-Ion Battery Simulations[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156(3): A154-A161.
14. Northrop P W C, Ramadesigan V, De S, et al. Coordinate Transformation, Orthogonal Collocation, Model Reformulation and Simulation of Electrochemical-Thermal Behavior of Lithium-Ion Battery Stacks[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2011, 158(12): A1461-A1477.
15. Subramanian V R, Boovaragavan V, Ramadesigan V, et al. Mathematical Model Reformulation for Lithium-Ion Battery Simulations: Galvanostatic Boundary Conditions[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2009, 156(4): A260-A271.
16. Song SW, Evans JW. Electrochemical thermal model of lithium polymer batteries[J]. Electrochem,2000,147(6):2086–95.
17. Samba A, Omar N, Gualous H, et al. Impact of tab location on large format lithium-ion pouch cell based on fully coupled tree-dimensional electrochemical-thermal modeling[J]. Electrochim Acta ,2014,147(Nov):319–29.
18. Capron O, Samba A, Omar N, et al. Lithiumion batteries: thermal behaviour investigation of unbalanced modules[J]. Sustainability,2015,7(7):8374–92.
19. Schmidt A P, Bitzer M, Imre A W, et al. Experiment-driven electrochemical modeling and systematic parameterization for a lithium-ion battery cell[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(15): 5071-5080.
20. Boovaragavan V, Harinipriya S, Subramanian V R. Towards real-time (milliseconds) parameter estimation of lithium-ion batteries using reformulated physics-based models[J]. Journal of Power Sources, 2008, 183(1): 361-365.
21. Forman J C, Moura S J, Stein J L, et al. Genetic identification and fisher identifiability analysis of the Doyle-Fuller-Newman model from experimental cycling of a Li Fe PO4 cell[J]. Journal of Power Sources, 2012, 210: 263-275.
22. Hu X, Li S, Peng H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2012, 198: 359-367.
23. Saw L H, Ye Y, Tay A A O. Electro-thermal characterization of Lithium Iron Phosphate cell with equivalent circuit modeling[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 87:367-377.
24. Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1984, 132(1):5-12.
25. 张杰家，霍炜，尹怀仙.电动汽车磷酸铁锂电池最佳SOC工作区间研究[J].电源技术，2017，41（4）：555-632