

武汉理工大学

(申请博士学位论文)

锂离子电池电化学反应模型简
化及其应用

培养单位：自动化学院

学科专业：交通信息工程及控制

研 究 生：孔纯

指导教师：朱国荣 教授

2024 年 5 月

Simplification and Applification of Electrochemical Models for Lithium-ion Batteries

Dissertation Submitted to
Wuhan University of Technology
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of
Doctor of Philosophy

by
Chun Kong
(Traffic Information Engineering and Control)

Dissertation Supervisor:
Guorong Zhu
Affiliation:
School of Automation

May, 2024

分类号 _____
UDC _____

密 级 _____
学校代码 10497

武汉理工大学

学 位 论 文

题目 锂离子电池电化学模型简化及其应用

英文题目 Simplification and Applification of
Electrochemical Models for Lithium-ion Betteries

研究生姓名 孔纯

指导教师 姓名 朱国荣 职称 教授 学位 博士
单位名称 武汉理工大学 邮编 430000

副指导教师 姓名 某某某 职称 教授 学位 博士
单位名称 武汉理工大学 邮编 430000

申请学位级别 博士 学科专业名称 交通信息工程及控制

论文提交日期 2024 年 5 月 论文答辩日期 2024 年 5 月

学位授予单位 武汉理工大学 学位授予日期 2024 年 6 月

答辩委员会主席 某某某 评阅人 某某某
某某某

2024 年 5 月

独创性声明

本人声明，所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得武汉理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

签 名：_____ 日 期：_____

学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文，并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生 (签名):

导师 (签名):

日期:

摘要

为减少大家写论文的排版工作量，让大家都能写出好看的，符合学校论文提交格式的论文。本人在顾加银同学做的 L^AT_EX 论文模板<https://github.com/Jiayin-Gu/WUTthesis> 的基础上，根据武汉理工大学硕博论文格式要求做出了新的武汉理工大学硕博论文 L^AT_EX 模板，网址为

<https://github.com/kon9chun/wutthesis2024>

大家可根据自己喜好选择使用那种模板，也希望大家将该模板多多推广，早日让武汉理工大学官方接受 L^AT_EX 排版论文。

本人使用 MiKTeX 编译工具，下载网址<https://miktex.org/>。习惯用其他的 L^AT_EX 编译工具的同学请自行选择。

模板使用方式：先刷一遍 XeLaTeX，再刷一遍 biber，最后刷一遍 XeLaTeX。

关键词：武汉理工大学，研究生，论文，L^AT_EX 模型

Abstract

English Abstract

Key words: Wuhan University of Technology, Postgraduates, Thesis, L^AT_EX
Template

目录

| | |
|----------------------------|-----|
| 摘要 | ii |
| Abstract | iii |
| 第 1 章 这是第一章 | 1 |
| 1.1 第一章第一节 | 1 |
| 1.1.1 第一章第一节第一小节 | 1 |
| 1.2 公式 | 1 |
| 1.3 图片 | 2 |
| 1.4 表格 | 2 |
| 第 2 章 这是第二章 | 4 |
| 2.1 伪代码 | 4 |
| 2.2 实用工具 | 4 |
| 2.3 参考文献引用 | 5 |
| 致谢 | 6 |
| 参考文献 | 7 |
| 攻读学位期间获得与学位论文相关的科研成果 | 8 |

插图

| | | |
|-------|--------------------------------|---|
| 图 1-1 | FOMe 原理示意图 | 2 |
| 图 1-2 | width=6cm,height=6cm | 2 |
| 图 2-1 | Ditto | 5 |
| 图 2-2 | Jabref | 5 |

表格

| | |
|--|---|
| 表 1-1 锂离子电池、镍氢电池和铅酸电池性能对比 | 3 |
| 表 1-2 FOM, FOMe 与 P2D 模型仿真耗时 | 3 |

缩略词注释表

| 缩写 | 英文全称 | 中文全称 |
|----------|---|-----------------------|
| Adam | Adaptive moment | 自适应动量 |
| BMS | Battery Management System | 电池管理系统 |
| FOM | Fractional-order Model | 分数阶模型 |
| FOMe | Fractional-order Model with Electrolyte | 考虑液相的分数阶模型 |
| FOMeA | Fraction-order Model with Electrolyte considering Aging Mechanism | 考虑老化机理的 FOMe |
| FOMeS | Fraction-order Model with Electrolyte considering Stress | 考虑应力变化的 FOMe |
| FOMeT | Fractional-order Model with Electrolyte considering Thermal effect | 考虑温度影响的 FOMe |
| LrEM | Long Short-term Memory Networks with Residual Electrochemical Model | 基于带残差长短记忆神经网络的简化电化学模型 |
| LSTM | Long Short-term Memory Networks | 长短记忆神经网络 |
| LSTM_Res | Long Short-term Memory Networks with Residual | 带残差项的长短记忆神经网络 |
| MCMB | Mesophase Carbon Microbeads | 中间相碳微球 |
| MSE | Mean Square Error | 均方误差 |
| OCP | Open-circuit Potential | 开路电势 |
| OCV | Open-circuit Voltage | 开路电压 |
| P2D | Pseudo 2-dimensional | 伪二维 |
| PINN | Physics-informed Neural Networks | 物理信息神经网络 |
| SEI | Solid Electrolyte Interphase | 固体电解质界面 |
| SOC | State of Charge | 荷电状态 |
| SOH | State of Health | 健康状态 |
| SPMe | Single Particle Model with Electrolyte | 考虑液相的单颗粒模型 |

第 1 章 这是第一章

1.1 第一章第一节

这是第一章第一节

1.1.1 第一章第一节第一小节

毕业论文只允许使用三级标题，再要写字标题可以成编号的形式：一个回车不换行

两个回车才换行。

1. 编号一

2. 编号二

3. 编号三

还可以自定义编号的形式：

自定义 1： 编号一

自定义 2： 编号二

自定义 3： 编号三

1.2 公式

公式编写使用标准的 L^AT_EX 公式语法，可以参考这个网址<https://www.latexlive.com/>。引用格式为：式 (1-1)，式 (1-2)

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\frac{U_1}{R_1 C_1} + \frac{I_L}{C_1} \\ U_L = U_{oc} - U_1 - I_L R_0 \end{cases} \quad (1-1)$$

$$SOC = \frac{Q_{pre}}{Q_{max}} \times 100\% \quad (1-2)$$

1.3 图片

插入图片显示如下，引用图 1-1，scale 可以直接调整比例。[H] 代表浮动体，删除则图片和表格自动调整，默认总是在页面最上方。

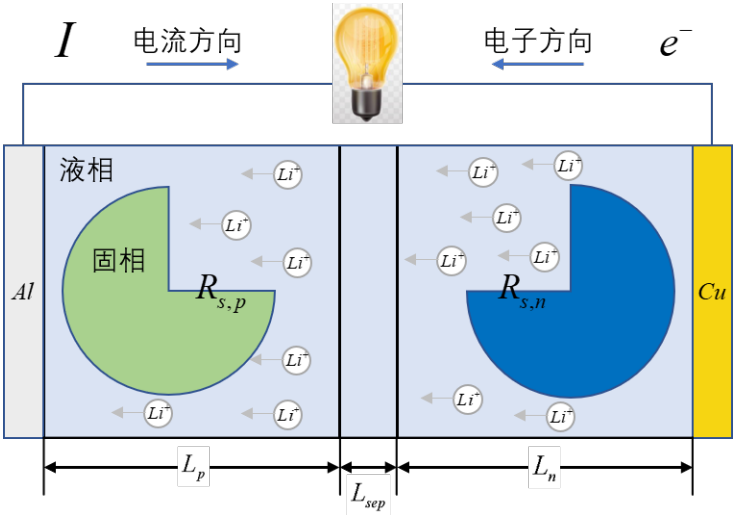


图 1-1 FOMe 原理示意图

也可设定长宽数值调整图片大小，如图 1-2 所示。

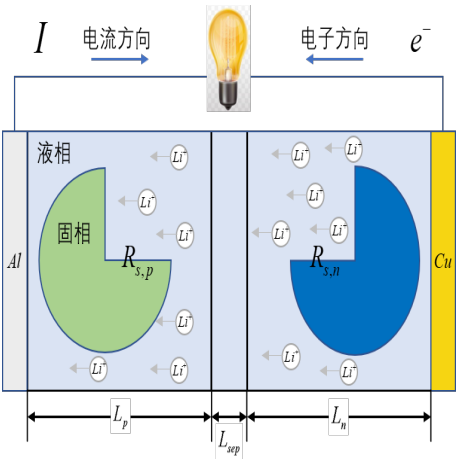


图 1-2 width=6cm,height=6cm

1.4 表格

表格使用方法如下，引用格式：如表 1-1

表 1-1 锂离子电池、镍氢电池和铅酸电池性能对比

| 特性 | 锂离子电池 | 镍氢电池 | 铅酸电池 |
|---------------|-----------------|----------------------|------------------|
| 工作电压 (V) | 3.6 | 1.26 | 2 |
| 循环寿命 (周次) | 800 | 500 | 300 |
| 自放电率 (%/月) | 5 | 20 | 30 |
| 环保性 | 不含重金属，相对传统电池更环保 | 含有重金属，不如镍氢电池和锂离子电池环保 | 不含重金属，相对于铅酸电池更环保 |

三线表如表 1-2

表 1-2 FOM, FOMe 与 P2D 模型仿真耗时

| 电化学模型 | 计算时间 |
|-------|---------|
| FOM | 0.3742s |
| FOMe | 0.3964s |
| P2D | 42s |

这个网址<https://tableconvert.com/zh-cn/excel-to-latex>提供了 Excel 表转 L^AT_EX 格式的表。

第 2 章 这是第二章

2.1 伪代码

如需阐述算法看用伪代码形式展示，如算法 2-1 所示。

算法 2-1: 二分查找确定电极初始嵌锂量

输入:

当前电池开路电压 OCV, FOM 热力学参数;

输出:

开路电压 OCV 对应的正负极初始嵌锂量;

- 1 初始化正极嵌锂量 $\theta_p=0.5$, 正极嵌锂量范围 $[0, 1]$;
 - 2 设置电压容差;
 - 3 repeat
 - 4 计算电池总容锂量 $Q_{Li} = \theta_p^0 \times Q_p + \theta_n^0 \times Q_n$;
 - 5 计算负极嵌锂量 $\theta_n = (Q_{Li} - \theta_p \times Q_p)/Q_n$;
 - 6 预测电池电压 $U = U_p(\theta_p) - U_n(\theta_n)$;
 - 7 if $(OCV - U) \leq 0$ then
 - 8 正极嵌锂上限 $\theta_p^{max} = \theta_p$;
 - 9 else
 - 10 正极嵌锂下限 $\theta_p^{min} = \theta_p$;
 - 11 end
 - 12 更新正极嵌锂量 $\theta_p = (\theta_p^{max} + \theta_p^{min})/2$;
 - 13 until 仿真电压与开路电压之差小于预设容差;
-

2.2 实用工具

Ditto 实用复制粘贴工具，直接在微软商店即可下载。

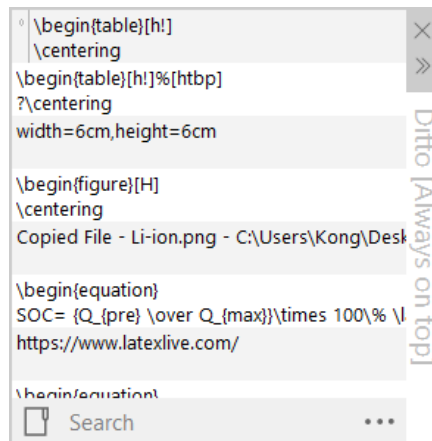


图 2-1 Ditto

Jabref Bib 文献工具，更方便的插入参考文献，网址地址<https://jabref.org/>。

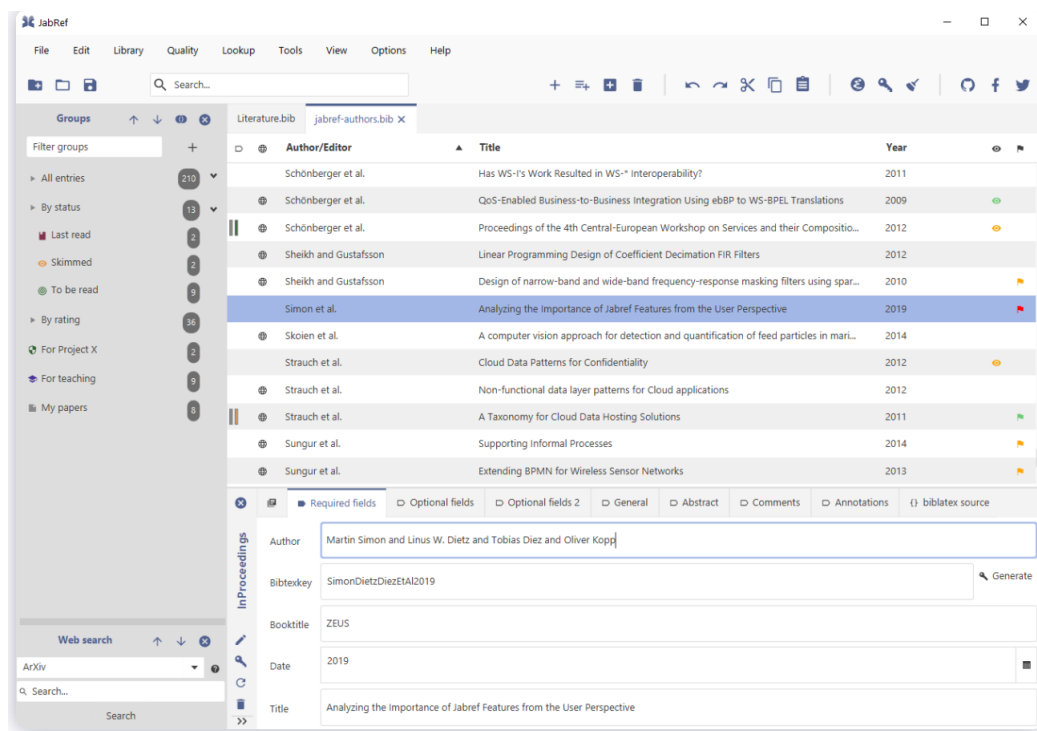


图 2-2 Jabref

2.3 参考文献引用

上角标引用参考文献像这样^[1]，方括号引用，文献 [2] 不啦不啦不啦。更改了.bib 文件要用 biber 刷一遍。

致谢

致谢的字体为楷体小四，也可改为宋体小四。

参考文献

- [1] Zhu G, Kong C, Wang J V, et al. A fractional-order model of lithium-ion battery considering polarization in electrolyte and thermal effect[J]. *Electrochimica Acta*, 2023, 438: 141461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141461>.
- [2] Zhu G, Kong C, Wang J V, et al. A fractional-order electrochemical lithium-ion batteries model considering electrolyte polarization and aging mechanism for state of health estimation[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108649. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108649>.

攻读学位期间获得与学位论文相关的科研成果

学术论文

- [1] ZHU G, **KONG C**, WANG J V, et al. A fractional-order electrochemical lithium-ion batteries model considering electrolyte polarization and aging mechanism for state of health estimation[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 72: 108649. DOI:10.1016/j.est.2023.108649. (SCI Q1, IF=9.4)
- [2] ZHU G, **KONG C**, WANG J V, et al. A fractional-order model of lithium-ion battery considering polarization in electrolyte and thermal effect[J]. Electrochimica Acta, 2023, 438: 141461. DOI:10.1016/j.electacta.2022.141461. (SCI Q1, IF=6.6)
- [3] ZHU G, **KONG C**, WANG J V, et al. A Simplified Electrochemical Lithium-ion Batteries Model based on Physics-informed Unsupervised Learning LSTM_Res Network[J]. (已投" Journal of Power Source" 在审)
- [4] ZHU G, **KONG C**, WANG J V, et al. A Simplified Electrochemical Model for Lithium-ion Batteries based on Ensemble Learning [J]. (已投" IScience" 在审)
- [5] 朱国荣, **孔纯**, 王菁, 等。锂离子电池电极颗粒破裂老化机理研究 [J]。(电机工程学报在投)

专利