

# 基于AMESim的不同充电方式下磷酸铁锂电池老化仿真分析

于 健

上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州

收稿日期: 2023年11月9日; 录用日期: 2023年12月10日; 发布日期: 2024年1月29日

## 摘 要

随着全球碳减排行动深入, 交通领域电气化驱动新能源汽车数量高增, 动力电池作为新能源汽车的主要动力来源, 其老化过程直接影响汽车的高续航里程与使用年限。通过AMESim仿真建模软件, 建立了针对动力电池老化问题的充电策略评估模型, 对比在四种不同充电策略下电池的老化程度。仿真结果显示, 在“早晨上班前充电”策略下电池老化仿真结果最佳, 容量损失为3.59%; 而在“有空就充”策略下, 电池老化仿真结果最差, 产生了7.54%的容量损失。

## 关键词

AMESim仿真, 动力电池, 充电策略, 老化程度

## Simulation Analysis of Lithium Iron Phosphate Battery Aging under Different Charging Modes Based on AMESim

Jian Yu

SAIC GM Wuling Automobile Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

Received: Nov. 9<sup>th</sup>, 2023; accepted: Dec. 10<sup>th</sup>, 2023; published: Jan. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

As the global carbon emission reduction action is deepening, the electrification of the transport sector drives the high increase in the number of new energy vehicles, the aging process of the power battery, as the main power source of new energy vehicles, directly affects the high range

and service life of the vehicle. Through AMESim simulation modeling software, a charging strategy evaluation model for the power battery aging problem was established to compare the aging degree of the battery under five different charging strategies. The simulation results show that the “charge in the morning before going to work” strategy has the best battery aging simulation results, with a capacity loss of 3.58%, while the “charge when free” strategy has the worst battery aging simulation results, with a capacity loss of 7.54%.

## Keywords

AMESim, Power Battery, Charging Strategies, Ageing Degree

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

由于汽车使用过程中发生的化学反应会引起活性材料损失、可用锂损失、以及内阻增加等现象，从而导致电池老化[1]。锂离子动力电池的老化主要表现为容量的衰减和功率的下降，当电池容量衰减至标称容量的 80% 时，电池安全性无法得到保证，则达到了其寿命的终点[2]。本文从用户充电习惯角度出发，通过 AMESim 软件建立针对动力电池老化问题的充电策略评估模型，分析不同用户不同充电习惯对电池衰减程度的影响。

## 2. 电池老化模型建立

本文研究对象选用磷酸铁锂电池，研究目的是分析不同充电策略对电池老化程度的影响，由于老化结果评估需要长时间和高成本的测试，而 AMESim 中的系统仿真可以提供预测性仿真数据来描述整个电池寿命期间的系统行为，其经验老化模型能够预测日历老化和循环老化，采用 AMESim 仿真软件可以节省测试时间和成本，为改进控制策略提供方向。

### 2.1. 电池系统模型搭建

AMESim 中有直接可以调用的针对动力电池老化问题的充电策略评估模型，如图 1 所示，该模型主要由环境温度 - 工况集成模块、热容、电池模块、可变电源以及充电策略模块构成。可直接在温度 - 工况集成模块中导入数据设置试验外部条件，在充电策略模块中定义不同的充电策略。

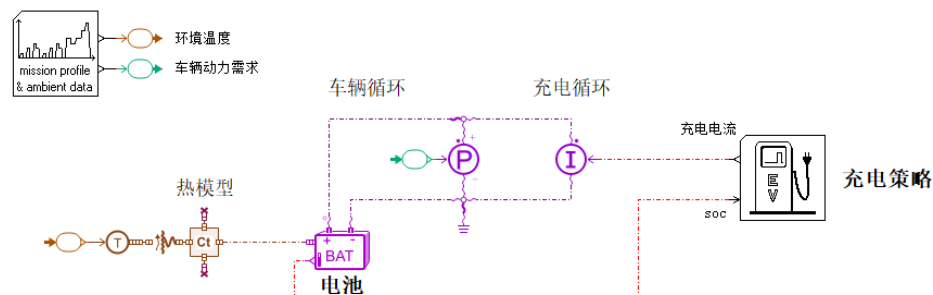


Figure 1. Battery ageing charging strategy evaluation model

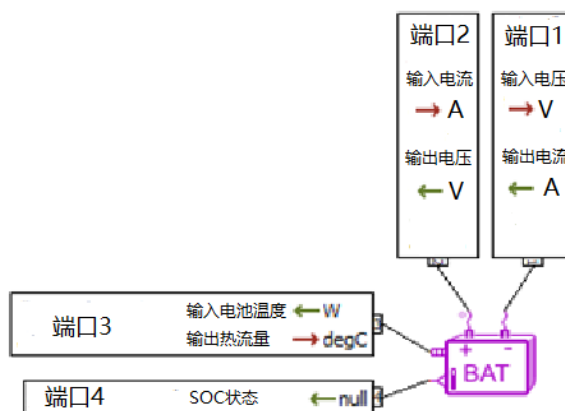
图 1. 电池老化充电策略评估模型

本文试验工况为 NEDC 循环工况, 电池模型选用 100 个 70 g 的电池单体串联为一组, 然后十组并联, 动力电池模型组如图 2 所示, 端口 1 代表电压信号, 输入电压, 输出电流; 端口 2 代表终端电流信号, 输入电流, 输出电压, 端口 3 代表开路电压信号, 输入电池温度, 输出热流量; 端口 4 代表输出电池的充电状态即 SOC。在锂电池的实际运用中需要同时考虑安全、寿命、功率特性等, 因此锂离子的实际使用区间一般选用 10%~90%, 本文将实验 SOC 区间设置为 15%~85%, 将其设置为参考区间, 电池主要性能如表 1 所示。

**Table 1.** Main performance parameters of the battery

**表 1.** 电池的主要性能参数

性能参数	数值
电池容量	2.3 Ah
最大电压	3.6 V
最小电压	2 V
充电电流	40 A
放电电流	40 A
导热率	1.5 W/m/K



**Figure 2.** Power battery model group  
**图 2.** 动力电池模型组

## 2.2. 试验条件设置

本文基于某企业电动汽车数据分析平台中用户充电行为习惯, 将用户充电行为习惯分为 4 大类, 将其定义成 4 种不同的充电策略:

- 晚上充电, 充放电曲线如图 3 所示: 表示用户汽车一天 24 h 的充放电情况, 用户在夜间充电至 80%, 日间用电分为 4 个阶段分别是早晨出门上班, 中午下班, 下午上班, 下午下班回家, 然后夜间充电至 80%, 循环时间为 1 年。
- 早上上班前充电, 充放电曲线如图 4 所示: 表示用户汽车一天 24 h 的充放电情况, 用户在夜间以低电量存放汽车, 等到上班前将汽车充电至 80%, 日间用电分为 4 个阶段分别是早晨出门上班, 中午下班, 下午上班, 下午下班回家, 然后以低电量储存至次日早晨, 循环时间为 1 年。
- 有空就充, 充放电曲线如图 5 所示: 表示用户汽车一天 24 h 的充放电情况, 用户在用车后, 会立刻将 SOC 补充至 80%, 循环时间为 1 年。

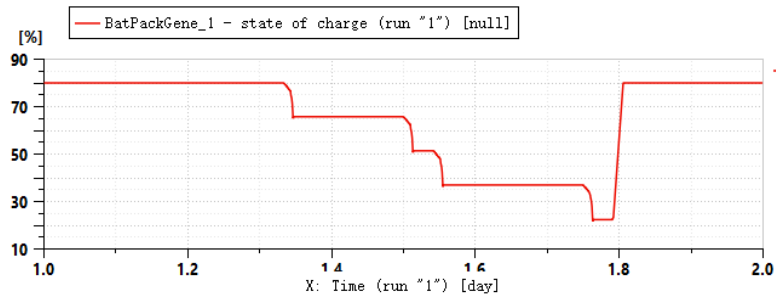


Figure 3. Charge and discharge curve features charge at night

图 3. “晚上充电”充放电曲线

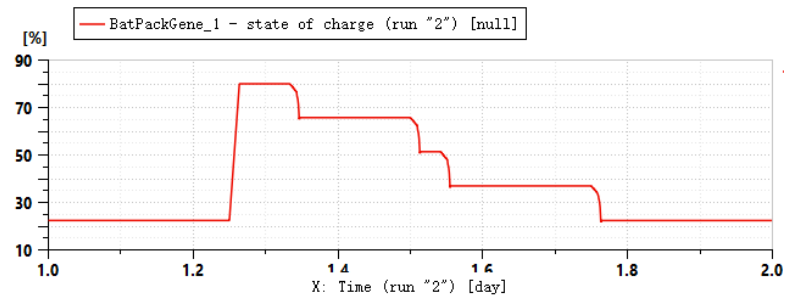


Figure 4. Charge and discharge curve features charge before going to work in the morning

图 4. “早上上班前充电”充放电曲线

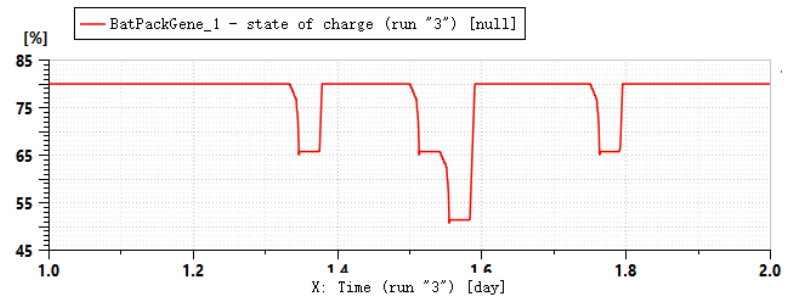


Figure 5. Charge and discharge curve features charge when free

图 5. “有空就充”充放电曲线

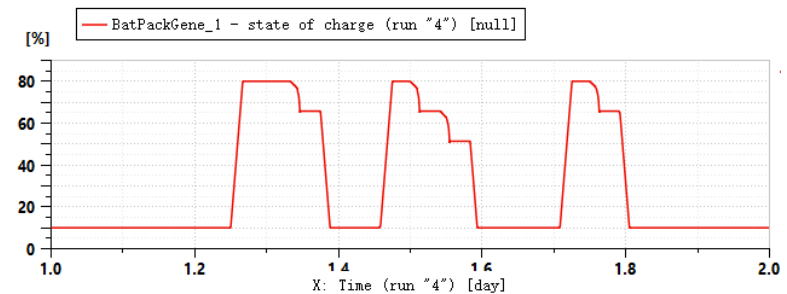


Figure 6. Charge and discharge curve features use as much as charged

图 6. “充多少用多少”充放电曲线

● 充多少用多少，充放电曲线如图 6 所示：表示用户一天 24 h 的充放电情况，用户在需要用车的时候充电至 80%，将电池电量消耗到 10%至下次需要用车，才会再次充电，期间车辆以低电量状态存放，

循环时间为 1 年。

### 3. 锂电池特性研究

#### 3.1. 电池衰减机理

电池老化分为循环老化和日历老化，日历老化是指锂离子电池无需工作，由于没有电化学反应发生，此状态下电池性能下降是由电池中的副反应引起。循环老化是指电池在一定的工况下反复充放电引起的老化。对于容量损失，电流值决定了日历老化与循环老化之间的切换。

当  $I \leq 0$  时，电池老化容量损失：

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{ca}}{dt}$$

当  $I > 0$  时，电池老化容量损失：

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_{ca}}{dt} + \left( \frac{dQ_{cy}}{dt} - \frac{dQ_{ca}}{dt} \right) \times \left( 1 - e^{\frac{-3I}{Q_{ag} \times C_{min}}} \right)$$

式中： $Q$  代表电池总容量损失； $Q_{ca}$  代表日历老化容量损失； $Q_{cy}$  代表循环老化容量损失； $I$  代表滤波电流； $Q_{ag}$  代表电池的老化容量； $C_{min}$  代表电池全周期老化的最小速率。

导致电池容量衰减的主要因素可以归纳有效锂离子减少、正负极活性材料的损失以及电解液的分解三个部分[3]。Gao 等曾对额定容量为 2.4 Ah 的商业化电池进行研究，发现容量衰减过程存在三个阶段，分别为衰减较快的初期、平稳衰减的中期和衰减较快的后期，分析认为，初期主要是由于 SEI 膜的大量形成造成的容量衰减，中期则归因于 SEI 膜的稳定生长，而后期主要是活性物质的损失造成容量衰减速率大[4]。SEI 膜厚度增加，使充放电过程中电池内部阻力增大，使电池中有效锂离子扩散能力减小，导致电池的容量迅速衰减，性能也随之下降。

#### 3.2. LPC 电池等效电路模型

本文选用的电池等效电路模型为 OCV + Rohm。其中 OCV-SOC 特性曲线如图 7 所示，在相同 SOC 状态下，磷酸铁锂电池开路电压随 SOC 的增加逐步上升，在电池充电初期和末期开路电压变化较快。

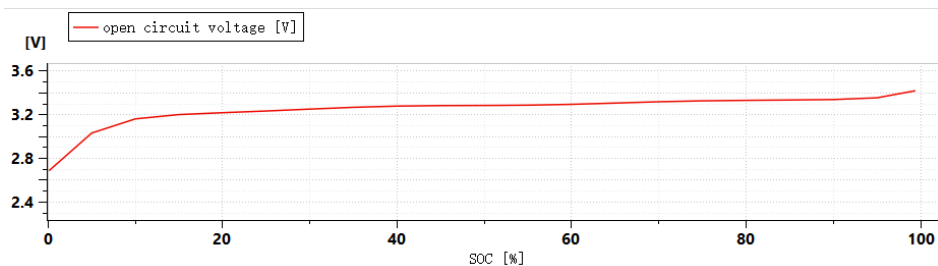


Figure 7. Battery OCV-SOC curve

图 7. 电池 OCV-SOC 曲线

除此之外，图 8 展示了不同环境温度对电池的影响，对比了在 0℃、23℃、30℃ 电池充电过程中内阻的变化情况。从图中可以看出 0℃ 下，电池的整体内阻高于电池在 25℃ 及 30℃ 下的内阻，在 25℃ 下的内阻与 30℃ 下的内阻整体情况及变化趋势都很接近，但电池在 25℃ 环境温度下内阻低于 30℃ 时电池内阻，说明在非极端使用温度范围内，温度越高内阻越大。

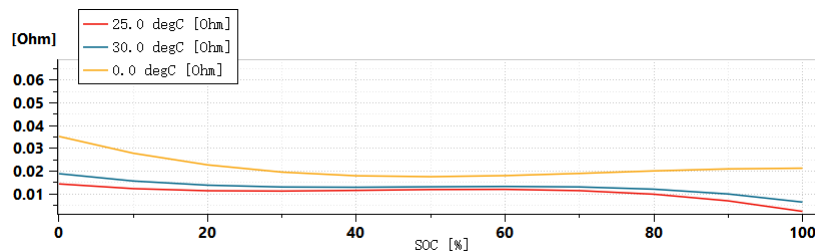


Figure 8. Battery resistance curve in different temperature  
图 8. 电池不同温度下电阻曲线

#### 4. 仿真结果分析

本文使用 AMESim 软件对上述 4 种不同的用户充电策略进行电池老化仿真分析, 电池容量损失具体情况如图 9 所示。由图可知, 由于用户选择的充电策略不同, 仿真一年时间内造成的电池容量损失也大有不同, 范围从最佳结果电池容量损失 3.59% 到最差结果电池容量损失 7.54%。

关于不同的策略, LFP-C 电池的最佳策略是“早上上班前充电”, 即电池以较低的 SOC 在夜间存储, 并在使用前充电。在电池短期静置状态下, 即使锂电池未发生充放电, 其内部也会发生各种物理化学反应。当电池荷电较低时, 电极材料锂脱嵌能力较低, 应力相应变弱, 此时锂离子从正极进入负极需要克服更大的阻力。

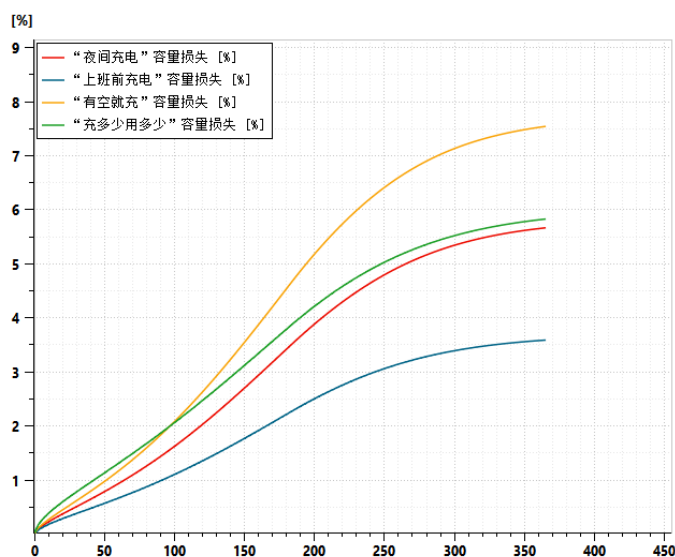


Figure 9. Battery capacity loss comparison diagram in different charging strategies  
图 9. 不同用户充电策略下电池容量损失对比图

而表现最差的策略则是“有空就充”, 该策略的显著特征是高 SOC 储存和频繁充电。电极正负极材料均处于循环周期种锂离子较大脱嵌状态, 其内部结构应力也较大, 造成结构畸变和表界面副反应增多 [5] [6], 表现为电池容量快速衰减。在频繁多次充放电过程中, 正极会发生金属离子溶解, 溶解的金属离子穿过隔膜, 在负极表面析出并沉积, 加速 SEI 膜形成。当锂离子多次重复进行嵌入和脱嵌, 锂离子沉积可能造成电极表面 SEI 膜厚薄不均匀使 SEI 膜易于破裂 [7]。除此之外我们还能看出 4 种不同策略在第 150 天至第 250 天电池容量衰减速率明显加快, 根据图 8 可以推测是由于夏季高温的影响, 导致电池负极活性锂损失及正极活性材料层状结构发生破裂, 最终表现为容量衰减速率变快。

## 5. 结论

本文从汽车用户充电习惯出发研究常见的 4 种不同的充电策略对电池老化程度的影响, 通过建立磷酸铁锂电池老化仿真模型, 预测了电池循环使用一年后的老化情况, 主要获得了以下几点结论:

(1) 电池在“早上使用前充电”充电策略下, 电池容量损失最低, 延缓了静态时电池内部电化学反应, 降低了电池的容量损失。

(2) 电池在“有空就充”的充电策略下电池容量损失最大, 主要是由于受到频繁充放电和高 SOC 存储的双重作用, 致使电池内部有效活性材料较快衰减。

## 参考文献

- [1] 田晟, 吕清. 基于电化学机理的动力电池老化模型研究[J]. 汽车技术, 2020(4): 22-26. <https://doi.org/10.19620/j.cnki.1000-3703.20190430>
- [2] 吴赞, 蒋新华, 解晶莹. 锂离子电池循环寿命快速衰减的原因[J]. 电池, 2009, 39(4): 206-207. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1579.2009.04.010>
- [3] 朱晓鹏. 车用磷酸铁锂动力电池状态估计研究[D]: [硕士学位论文]. 山西: 太原理工大学, 2021.
- [4] Gao, Y., Jiang, J., Zhang, C., *et al.* (2017) Lithium-Ion Battery Aging Mechanisms and Life Model under Different Charging Stresses. *Journal of Power Sources*, **356**, 103-114. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.04.084>
- [5] 汪红辉, 刘一凡, 储德韧. 不同荷电状态钛酸锂电池高温日历老化研究[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(8): 2606-2614. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0121>
- [6] 刘汉雨. 锂离子电池充电方法及寿命预测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [7] 刘卓然, 吕培召, 霍宇涛, 等. 三元富镍锂离子电池不同充放电策略下的老化特性研究[J]. 能源研究与利用, 2021(5): 22-27. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-5523.2021.05.005>