



艾迪捷信息科技上海有限公司
北京技术部

Copyright (C) IDAJ Co., LTD. All Rights Reserved.

2018 IDAJ为中国新能源汽车加速
整车 / 新能源汽车关键性仿真技术

无人驾驶 | 新能源整车EMC | 动力性及能量管理 | 动力锂电池 | 结构可靠性

武汉 | 重庆 | 上海 | 广州 | 北京 | 长春巡回研讨会



锂离子动力电池性能仿真 解决方案

主要内容

1. AutoLion 软件包介绍
2. 锂电池电芯设计和优化
 - 电芯快速性能模拟和寿命预测
3. 锂电池的系统仿真
 - 系统动态响应、整车能量管理&真实驱动工况仿真
4. 锂电池的三维热管理及性能仿真
 - 单电池/电池包及冷却系统的三维CFD分析

1. AutoLion 软件包介绍

AutoLion软件包的历史及现状

AutoLion软件包由EC Power公司开发

- EC Power公司专门针对锂离子电池应用提供技术解决方案
- AutoLion软件包包含AutoLion1D, AutoLion3D和AutoLionST

2018年，AutoLion被Gamma公司收购

- AutoLion1D, AutoLionST, AutoLion3D, **AutoLionGT**



AutoLion软件包的功能



快速高效，非常适合电池设计和优化计算。可作为三维电池热管理和一维系统模拟的标准模型标定工具。

功能优势:

- 可进行多种不同电池化学组分的快速评价&极端工况下的电池设计
- 可对影响电池输出性能和安全性的内部机理进行研究
- 可进行大工况范围内锂电池老化的可靠预测



嵌入到GT和Simulink中的电池系统设计和优化工具

功能优势:

- 可对电池系统构架选择、设计和操作进行仿真
- 具有成本和时间的效率性：在电池动力系统开发中首先进行系统设计和工况考量
- 可进行具有寿命和安全意识的操作策略开发。是考虑电池老化的首款系统软件。

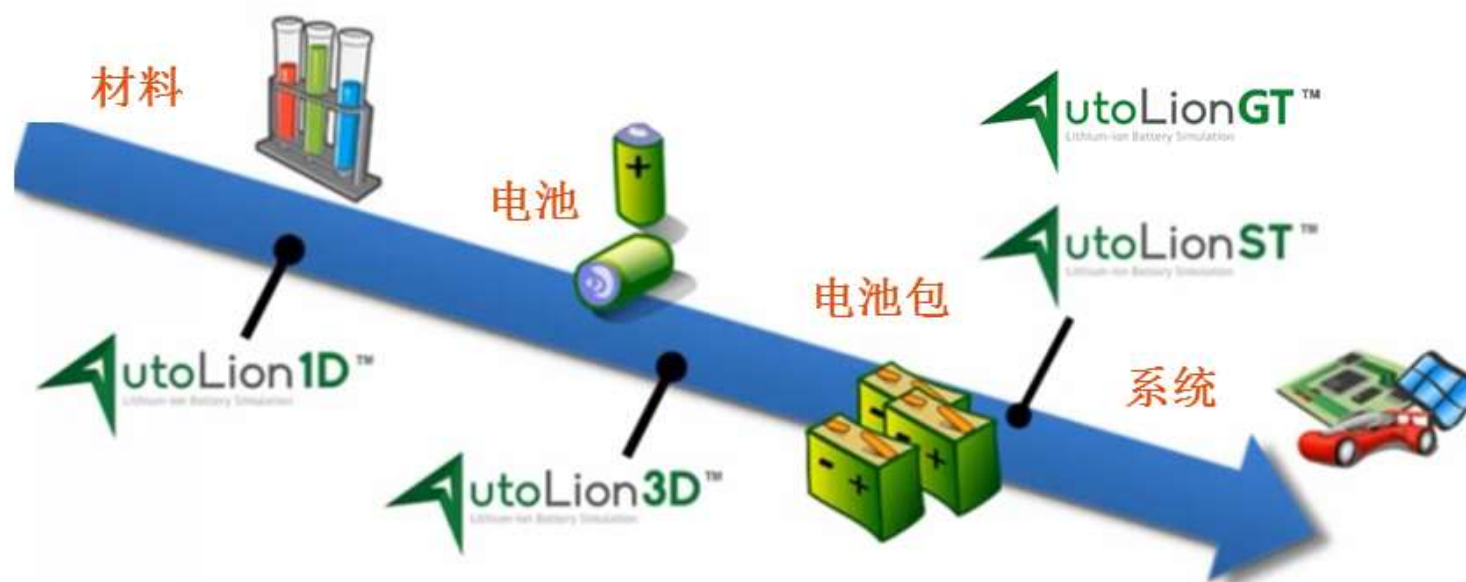


进行锂电池热管理和安全性模拟的理想工具

功能优势:

- 可进行大工况范围内锂电池热管理的精确模拟&冷却系统的评价
- 可进行电池/电池堆的安全性模拟（内部短路、外部短路、穿刺等）

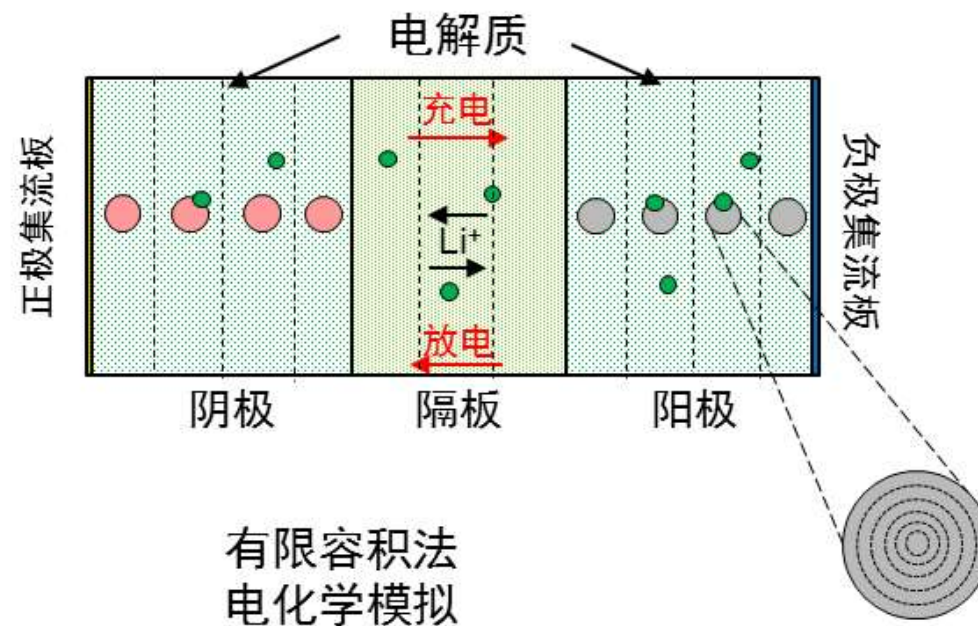
针对完整供应链的锂电池模拟软件包



AutoLion的电化学模拟-有限体积法离散

使用有限体积法进行电化学方程的离散

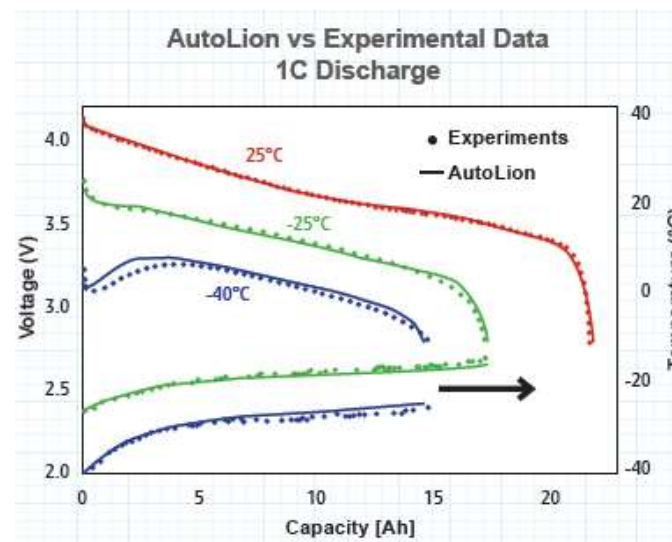
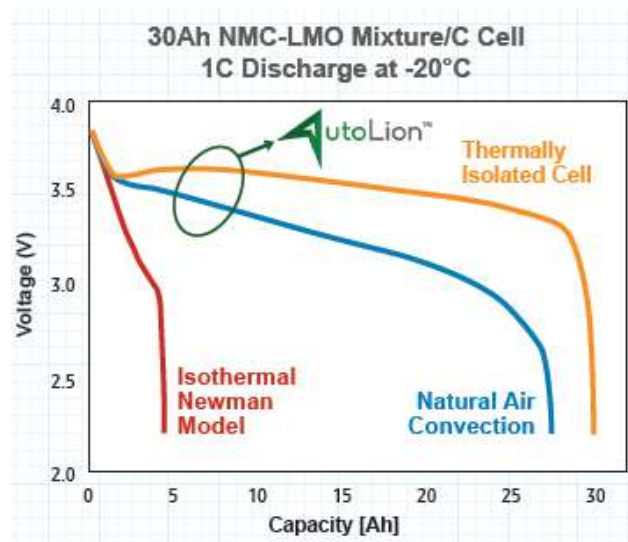
- 电荷传递
- Li^+ 扩散 (电解质)
- Li^+ 扩散 (粒子)



AutoLion的电化学模拟-热偶和

电化学模型跟热模型紧密耦合

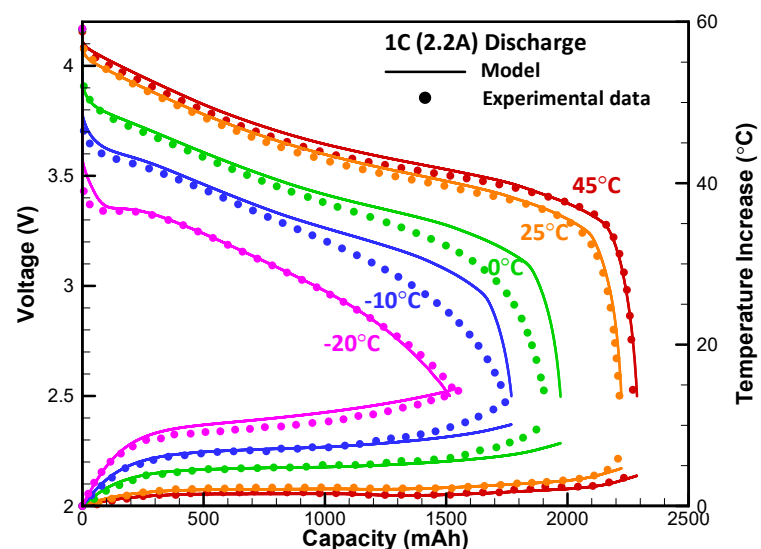
- 基于数据库中随温度变化的材料特性自动进行模型参数更新



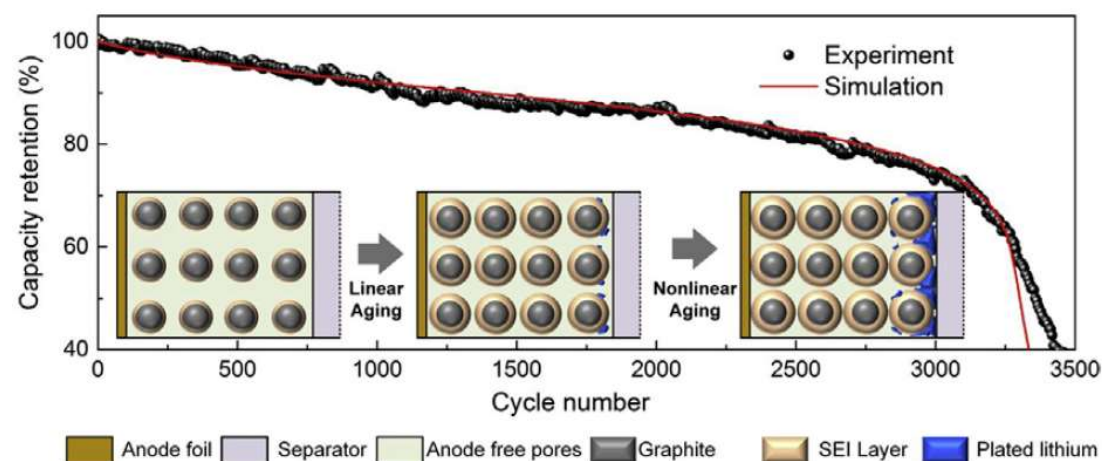
AutoLion的电化学模拟-计算速度

专有算法使得计算速度特别快，可以进行：

■ 快速高效的虚拟电池原型设计



■ 以月甚至年为时间单位的电池老化模拟



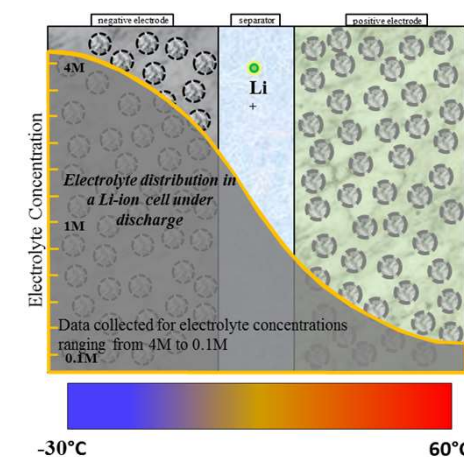
AutoLion的材料库

材料数据库基于超百万次的钮扣电池测试

阳极材料:	阴极材料:	电解质:
Graphite	NCM 111,	LiPF ₆
LTO	622, 811,	PEO polymer
Hard	523	LIPON
Carbon	LPF	Sulfide/Oxide
Si/C	LMO	
Li Metal	LCO	
	NCA	



- 基于不同浓度和温度的高质量数据
- 数据库持续进行更新以跟踪最新的电池技术
- 用户可自行添加数据库



2. 锂电池电芯设计和优化

- 电芯快速性能模拟和寿命预测

使用软件: AutoLion 1D

电芯性能仿真的应用

特点

- 快速&高效
- 精确

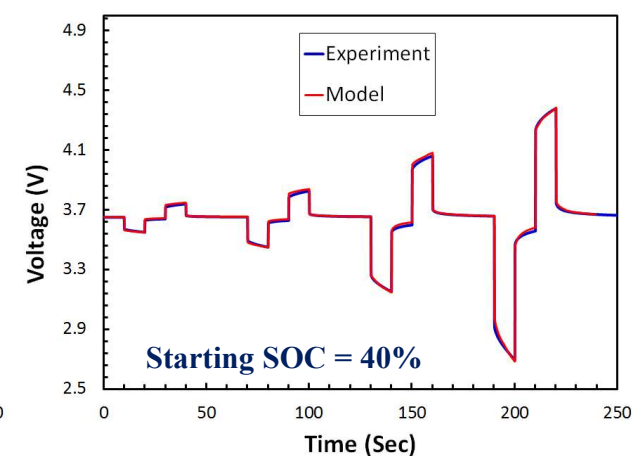
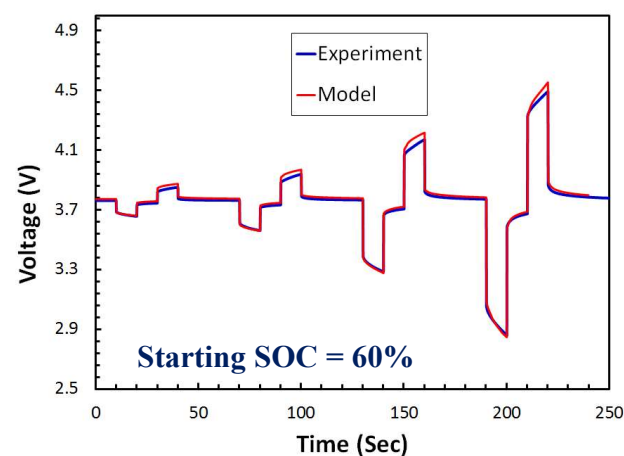
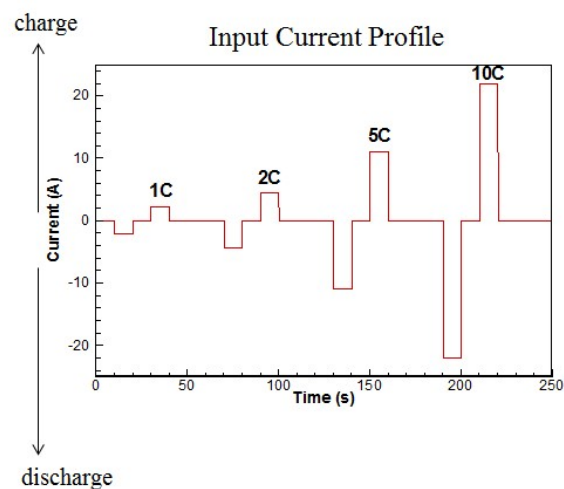
适用领域

- 虚拟锂电池设计和优化
 - 电芯材料选择、配比及能量密度和尺寸等
- 锂电池性能预测及影响电池性能的机理研究
- 宽广工况范围内锂电池老化的可靠预测
- 作为三维模拟和系统模拟的模型标定工具

任意操作工况下的性能仿真-动态电流输入

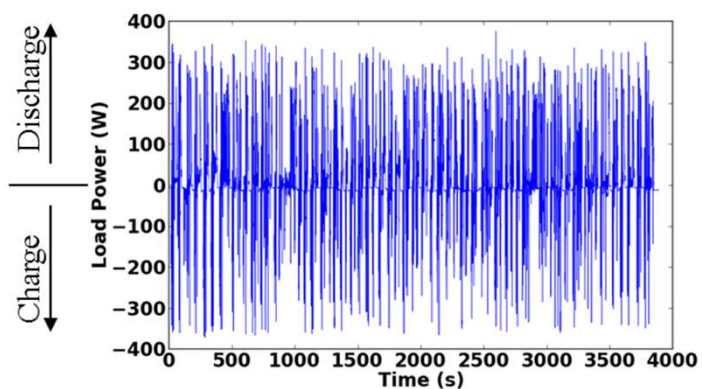
输入电流

输出电压

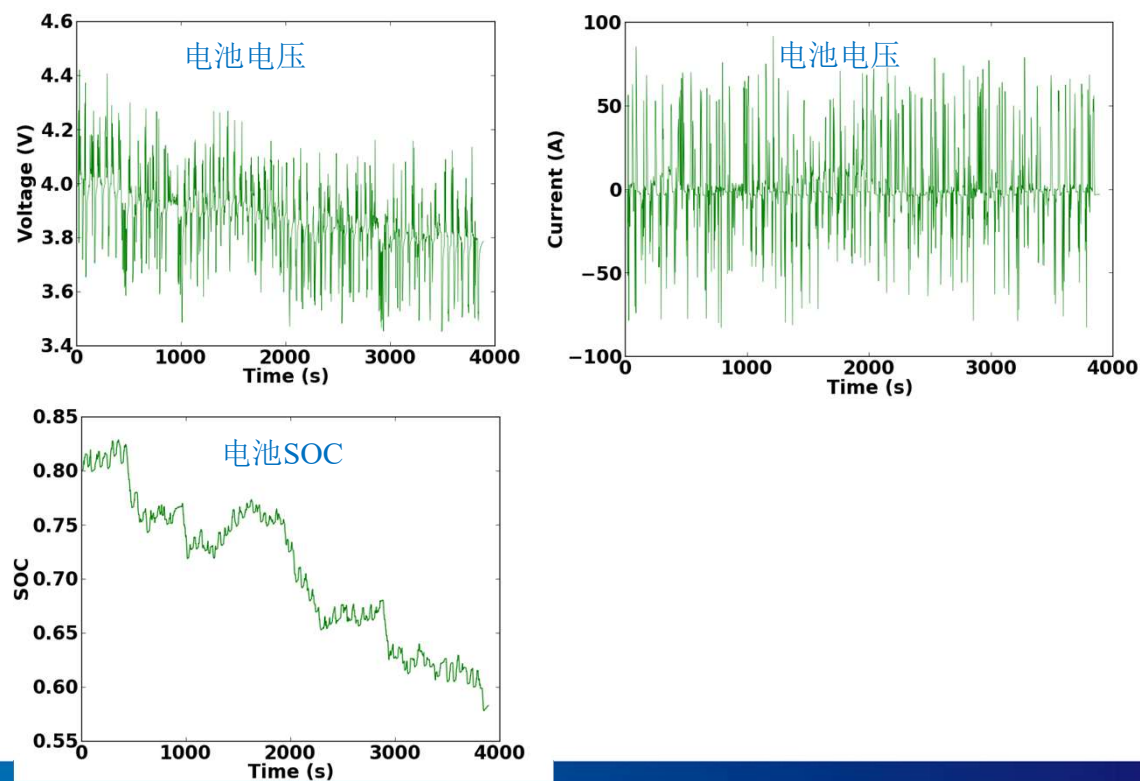


任意操作工况下的性能仿真-动态负载功率输入

输入-功率

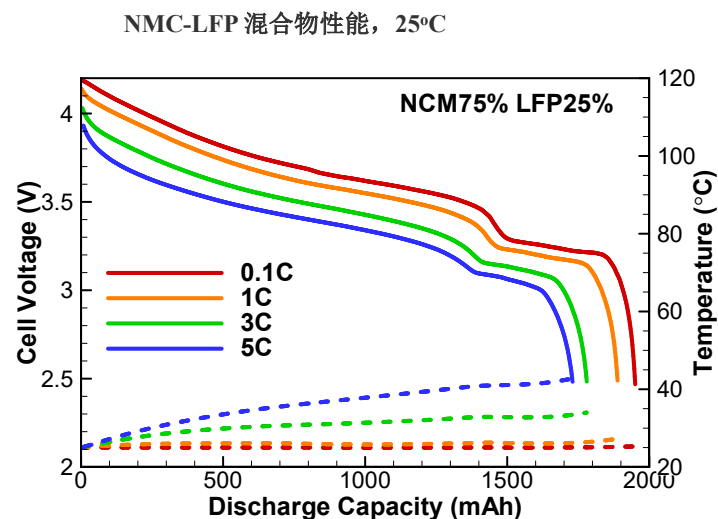
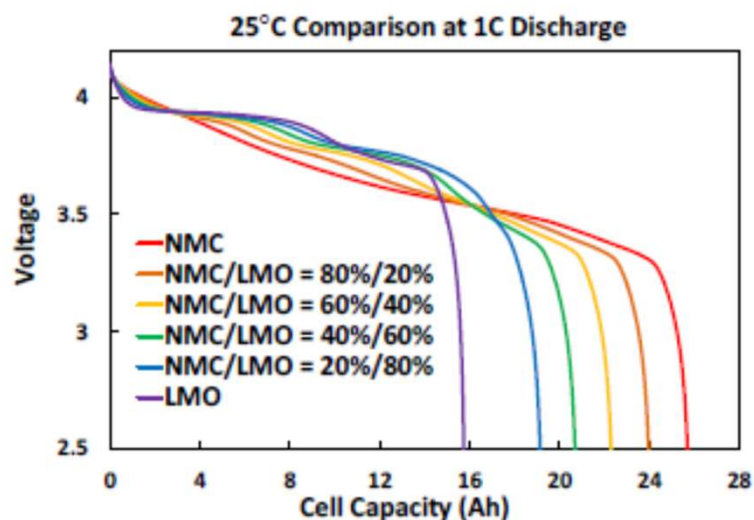
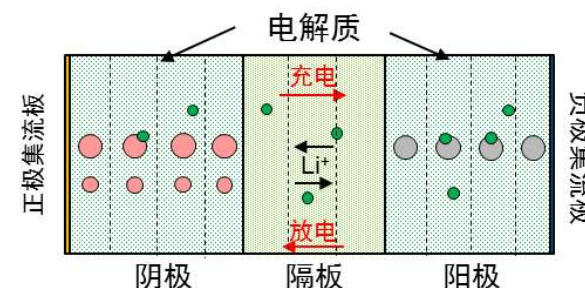


输出-电压、电流、SOC



使用混合活性物质的锂电池模拟

阳极或阴极使用混合材料或不同粒径的颗粒

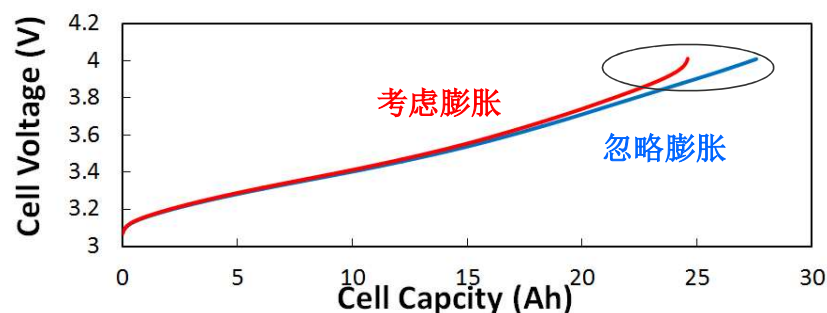


考虑活性材料膨胀的电池设计

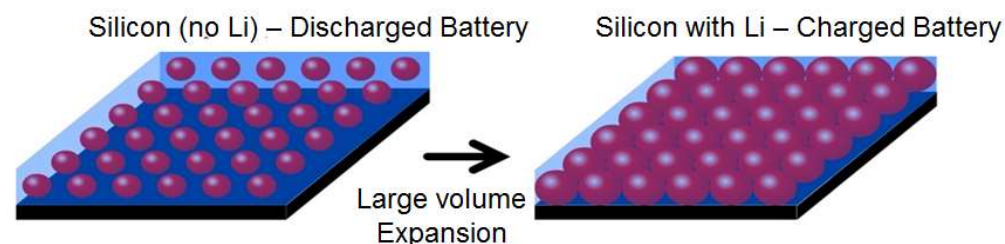
研究锂化过程带来的电极膨胀行为

■ 案例

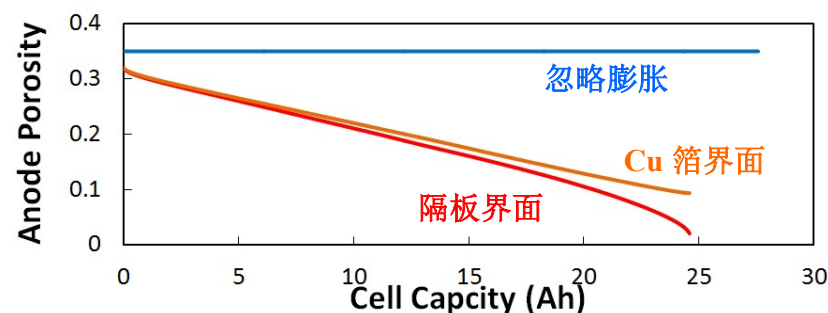
- 阴极：NCM111
- 阳极：Si-alloy
- 假设不允许电极厚度膨胀 (极端情况)



不考虑活性材料膨胀
高估充电容量



锂化时锂基阳极膨胀



考虑颗粒膨胀
阳极孔隙率急剧下降

电池老化模型介绍

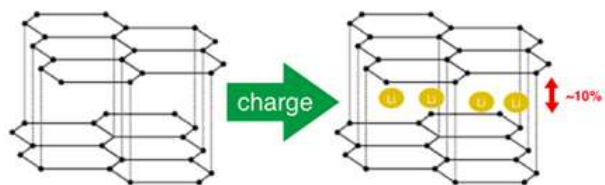
目前支持四种电池老化机理：

- 活性材料隔离模型
- 阳极SEI膜增长模型
- 阴极氧化膜增长模型
- 析锂模型

电池老化模型介绍- 活性材料隔离模型

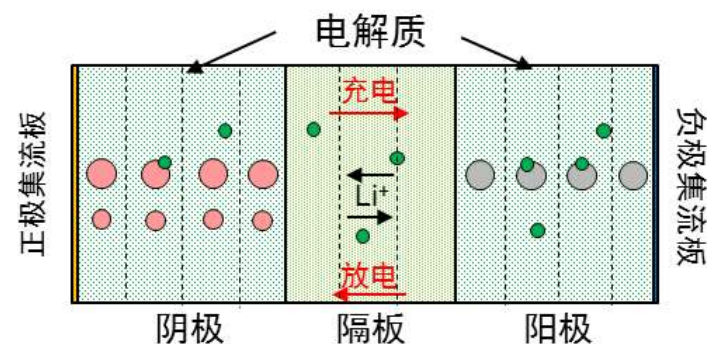
物理过程

- Li^+ 嵌入&脱嵌过程可对活性材料的晶体结构产生结构应力，导致循环过程中 Li^+ 的隔离/脱落



模型

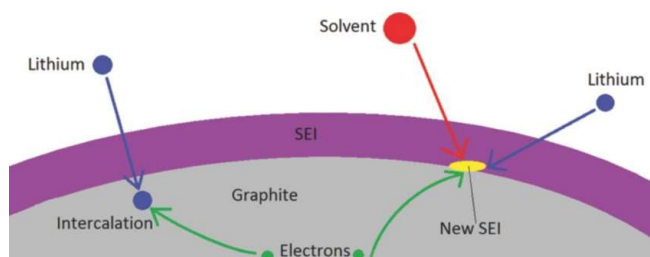
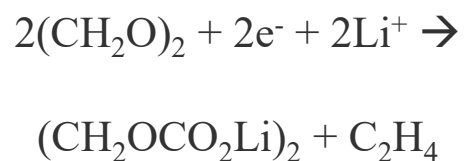
- 通过减少 Li^+ 来模拟活性物质隔离
- 跟嵌入速率成线性正比关系



电池老化模型介绍- 阳极SEI 膜增长模型

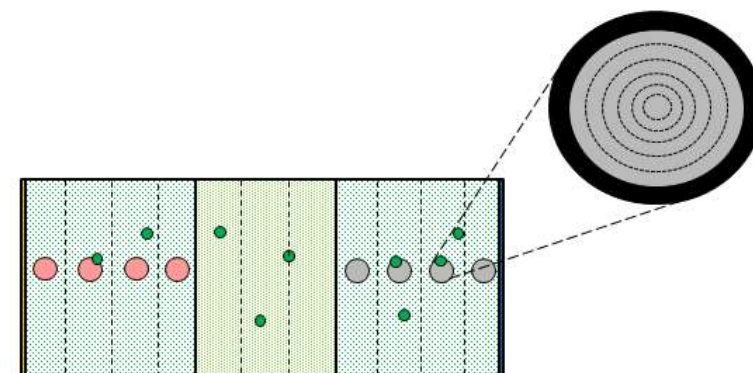
物理过程

- 电解质溶液中的碳酸亚乙酯 (EC) 跟Li⁺和电子结合生成烷基碳酸锂，即SEI膜



模型

- EC扩散通过SEI膜
- SEI 生成速率与烷基碳酸锂的生成率成正比
- SEI 电阻 & 孔隙率
- Li⁺ 移动

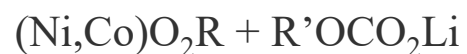


电池老化模型介绍- 阴极氧化膜增长模型

物理过程

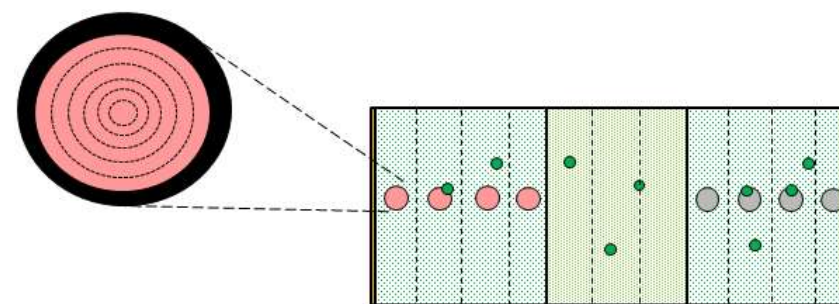
- 跟SEI膜增长类似，电解质中的反应物形成阴极膜的增长

比如，对于NCM阴极：



模型

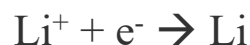
- 反应物扩散通过现有的膜
- 膜的生成速率与反应生成物的生成率成正比
- 膜电阻& 孔隙率



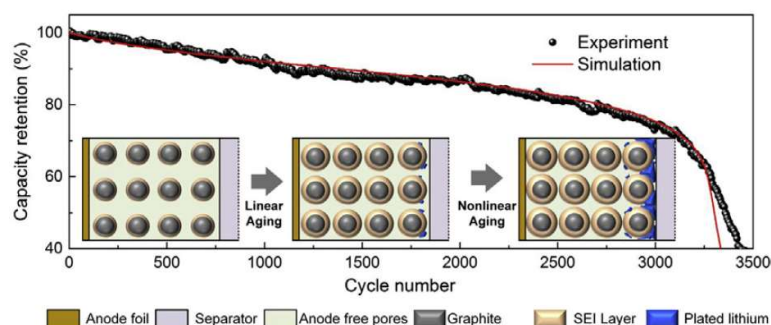
电池老化模型介绍- 阳极析锂模型

物理过程

- 如果局部阳极电势相对 Li/Li^+ 变为负值，则出现析锂现象

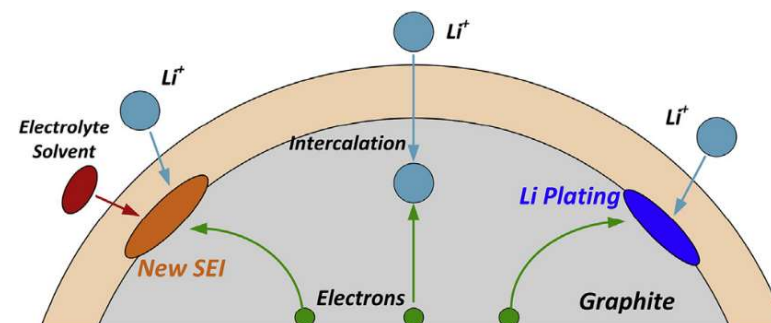


- 析锂模型影响后期非线性老化



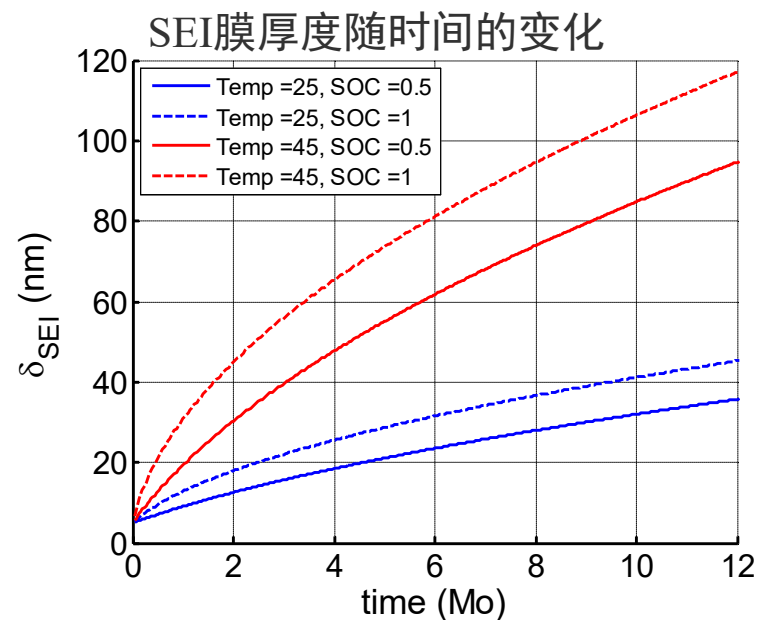
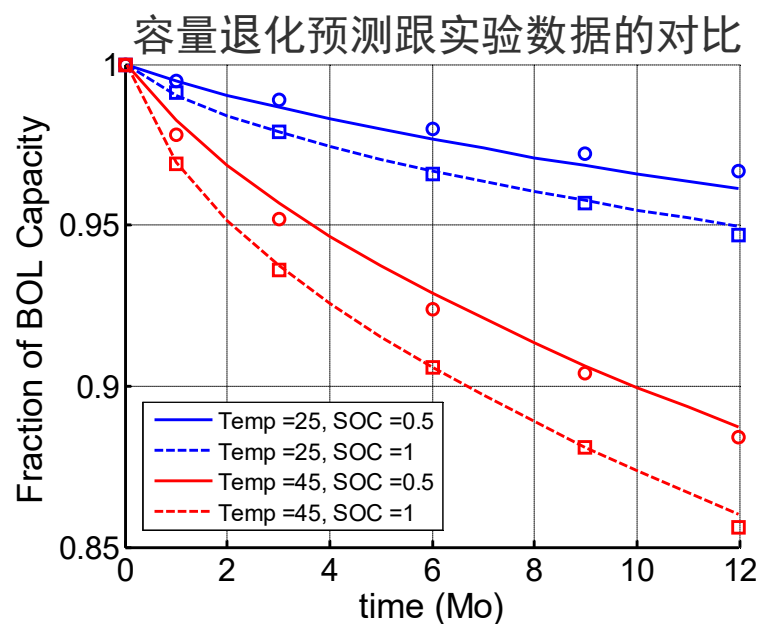
模型

- 在阳极粒子上模拟第二个副反应
- 锂金属膜影响阳极孔隙率
- 活性粒子被锂金属堵塞(有效反应面积减少)



电池老化模拟案例- 储存寿命

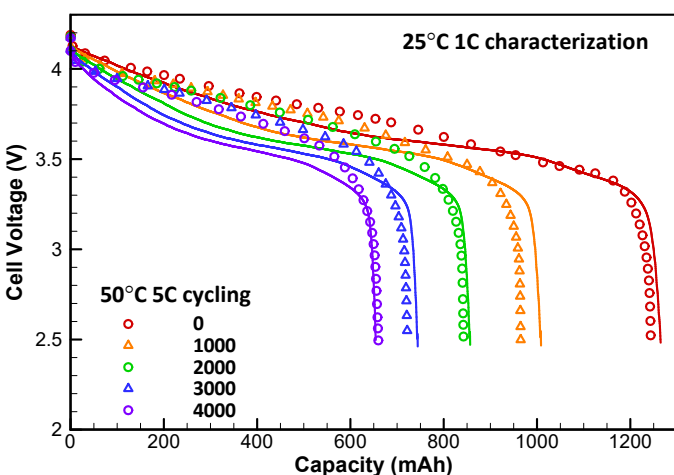
LFP/C 电池，不同温度下的储存寿命



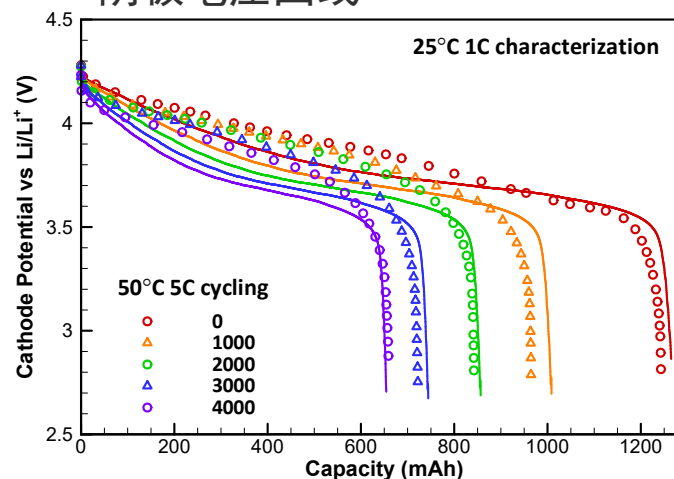
电池老化模拟案例- 循环寿命

50°C, NMC111/C电池- 电极的性能随循环数变化

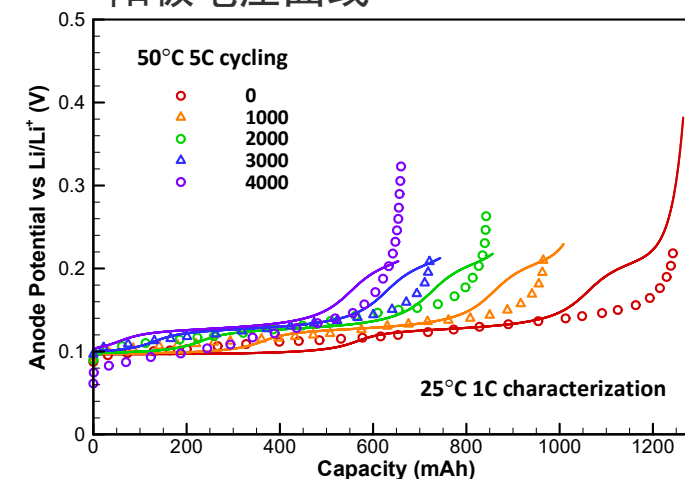
电池电压曲线



阴极电压曲线



阳极电压曲线



3. 锂电池的系统仿真

- 系统动态响应、整车能量管理&真实驱动工况仿真

使用软件: AutoLionGT + GT-SUITE
or AutoLionST + Simulink

AutoLionGT和AutoLionST

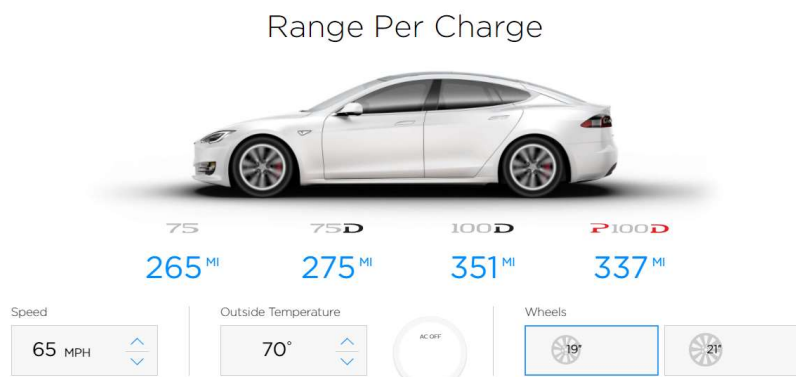
AutoLionGT

- AutoLionGT包含AutoLion1D的所有功能
- AutoLionGT 跟GT-SUITE进行耦合仿真
 - 电池本身建模和计算由AutoLionGT完成
 - AutoLionGT作为GT系统中的电池节点存在
 - 可自由进行电池串并联组合配置
- 由于GT-SUITE在汽车行业的广泛应用，AutoLionGT跟GT模型的耦合在电动车系统模拟中具有先天优势

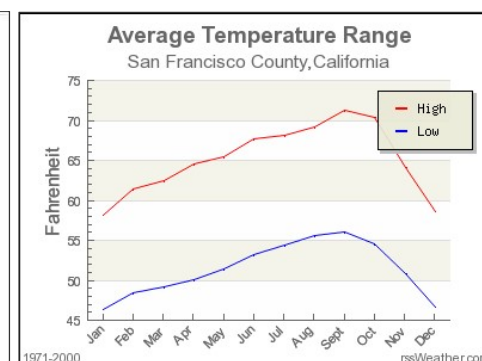
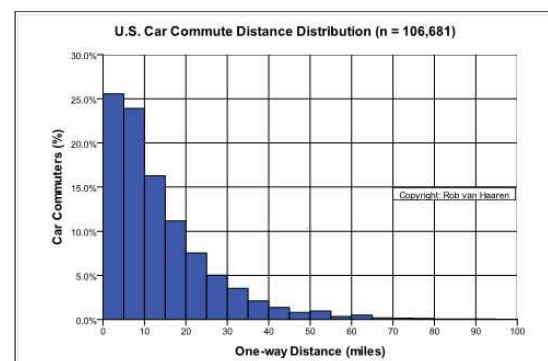
AutoLionST

- AutoLionST包含AutoLion1D的所有功能
- AutoLionST 跟Simulink进行耦合仿真
 - 电池本身建模和计算由AutoLionST完成
 - AutoLionST作为Simulink系统中的电池节点存在
 - Simulink中的电池串并联设置较复杂
- Simulink进行车辆系统模拟对使用者要求高

AutoLionGT + GT-SUITE协同仿真的目的



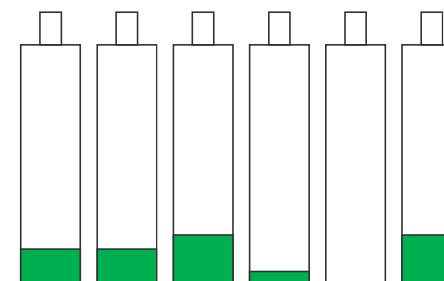
续航里程预测



不同驾驶工况的续航里程和电池老化预测



电池老化预测

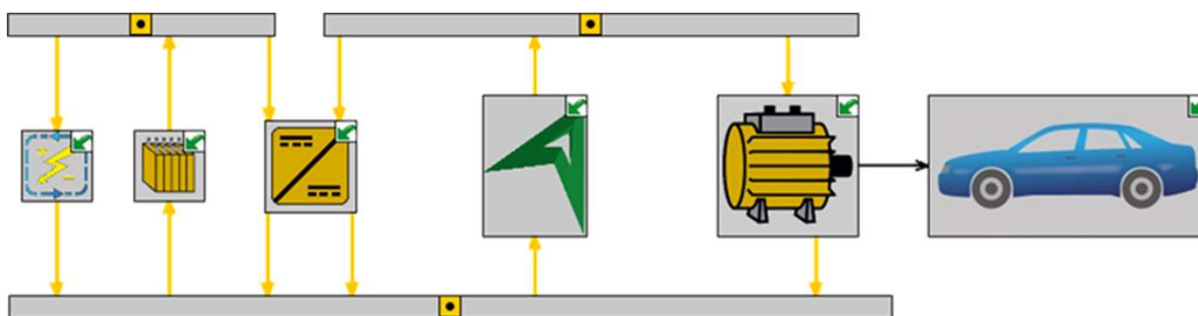


续航里程&电池寿命最大化的控制策略开发

AutoLionGT + GT-SUITE协同仿真建模

AutoLion 的电芯/电池包模型直接放入GT的电气模型中

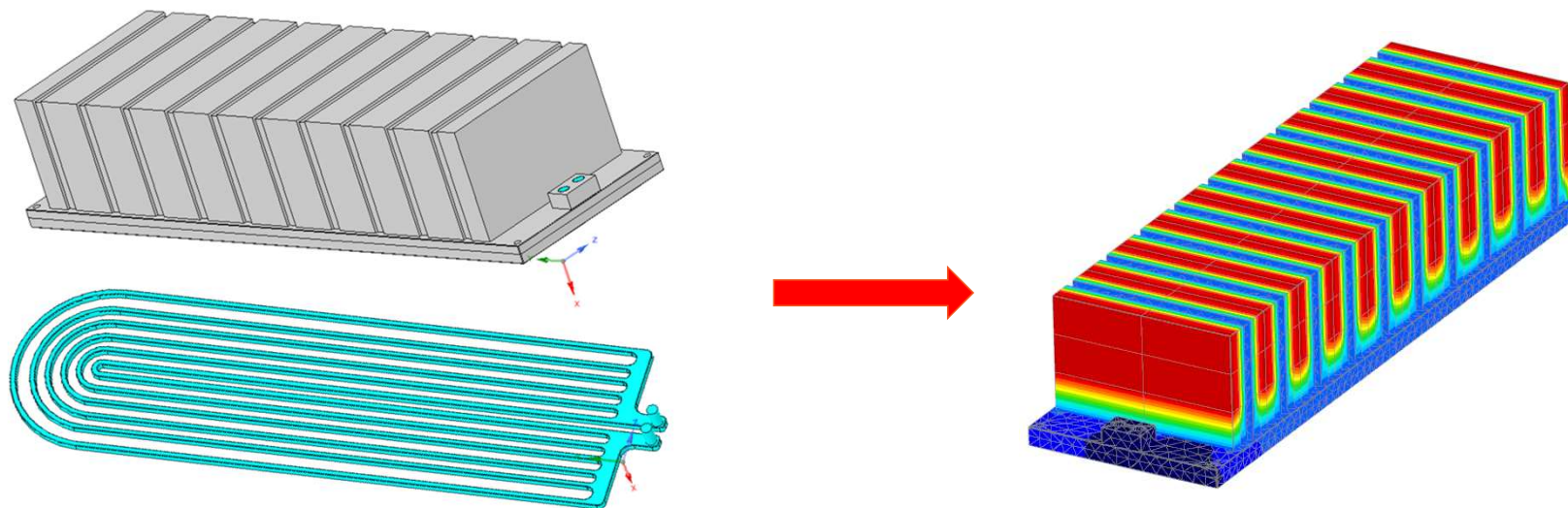
- 将电化学模型无缝引入整车模拟中
- 电气模型的链接-可以将它们进行串联或并联链接



AutoLionGT + GT-SUITE协同仿真建模

AutoLion-GT 可将电化学模型跟高级热流体模型进行耦合

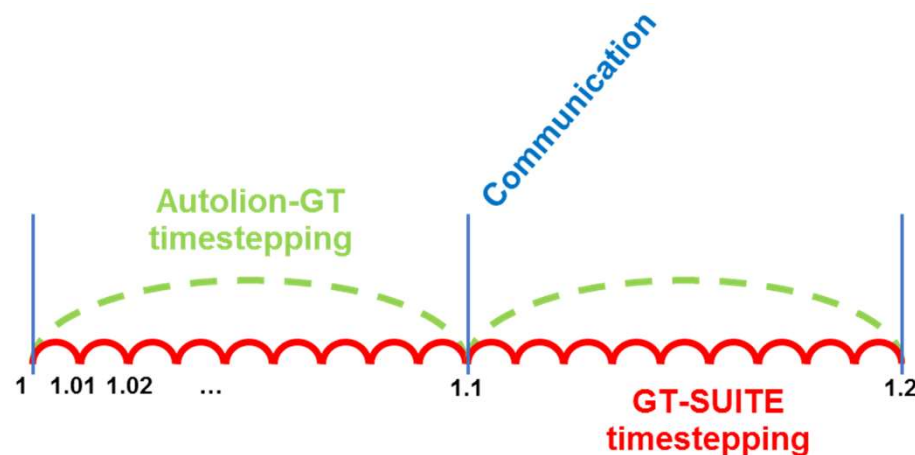
- 热网络或有限元分析
- 大部分的高级1-D 流动模拟



AutoLionGT + GT-SUITE协同仿真计算

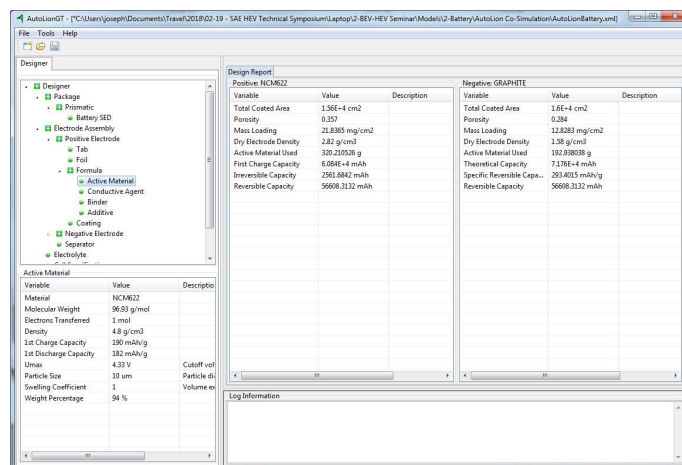
时间步长

- 多物理模型(GT-SUITE)在可变时间步长下运行
- 电化学模型(AutoLion) 在固定时间步长($\geq$ GT 时间步长)下运行

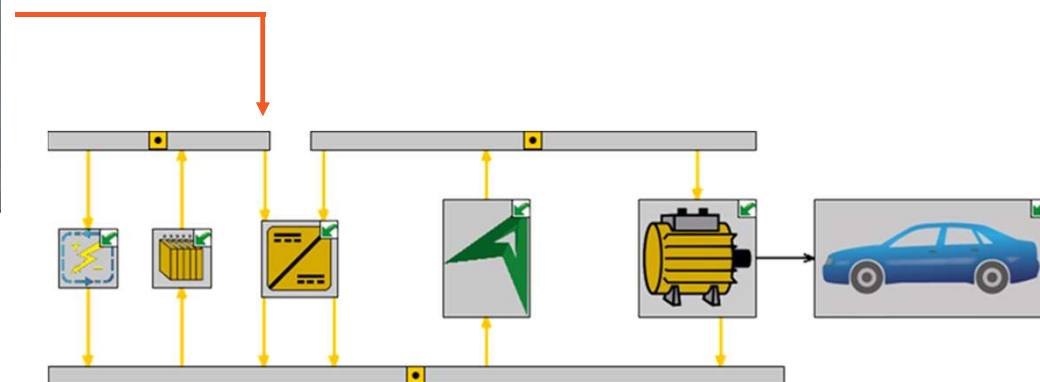


AutoLionGT + GT-SUITE协同仿真工作流程

当前流程



使用AutoLion的界面进行电化学模型的建立

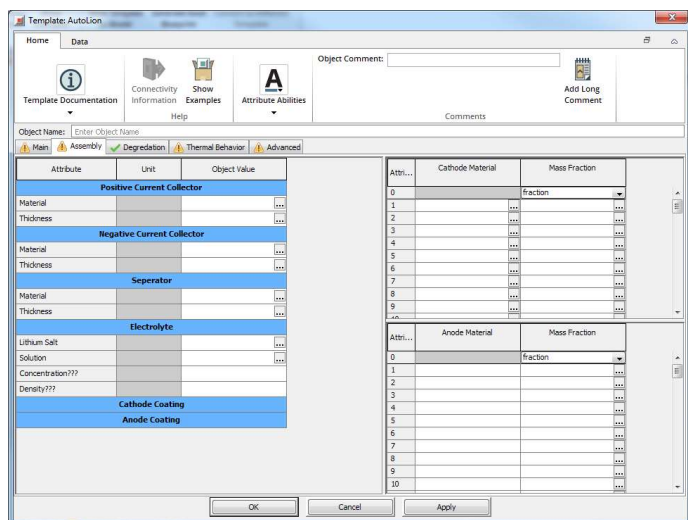


从GT中指向 AutoLion 模型，整合进系统

AutoLionGT + GT-SUITE协同仿真工作流程

以后流程

- 将AutoLion的GUI整合到GT中作为新的扩展库模板



优势:

- 可使用GT进行电化学属性的优化
- 可使用GT中简化的参数化设置(Case Setup)
- 可使用GT的DOE功能
- 可进行模型加密
- 更容易地引入用户材料(引用对象vs. UDF)

AutoLionST + Simulink协同仿真

功能

- 原则上可以实现AutoLionGT + GT-SUITE协同仿真的所有功能
- 要进行类似GT-SUITE那样的整车系统仿真，工作量比较大，对使用者要求高

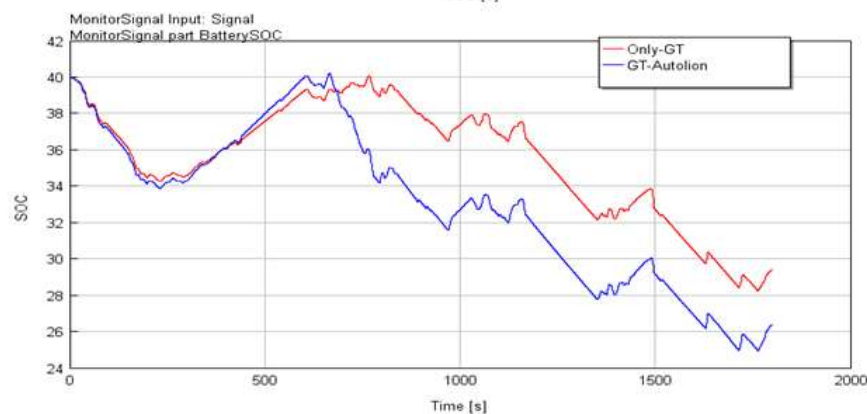
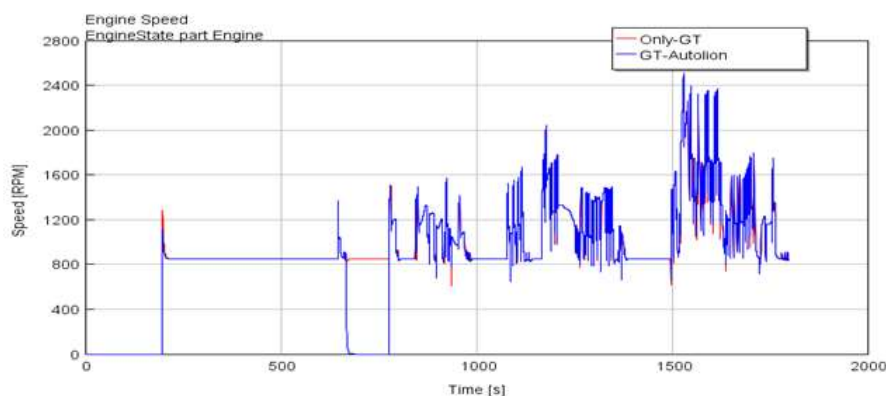
特点

- Simulink计算速度较快
- Simulink的模型可跟GT-SUITE进行耦合

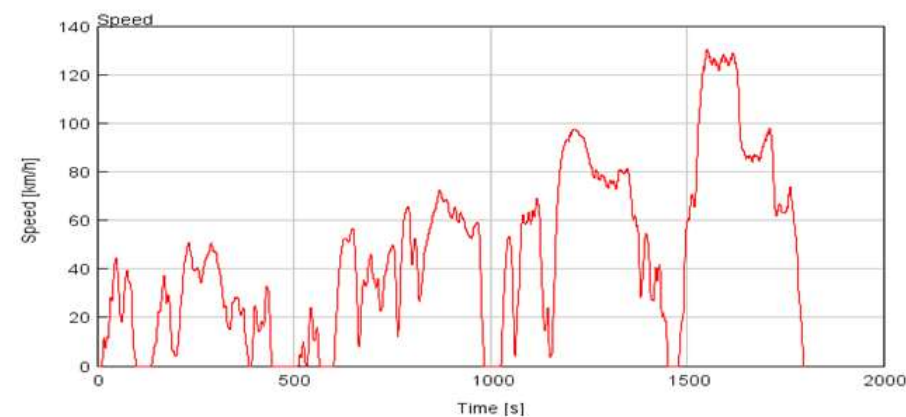
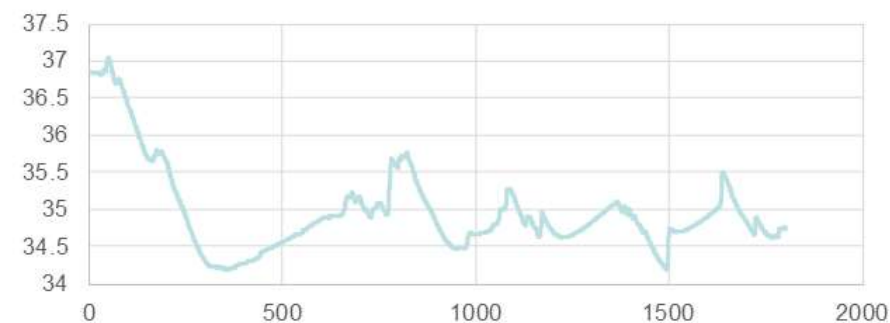


AutoLionGT + GT-SUITE整车能量管理案例

部分结果



Autolion-Temperature(C)



AutoLionST + Simulink一维热管理案例

模拟目标：热管理策略和运行环境对电池循环寿命的影响

■ 锂电池

- NCM/graphite

■ 电池包配置

- 96S, 3P

■ 操作工况

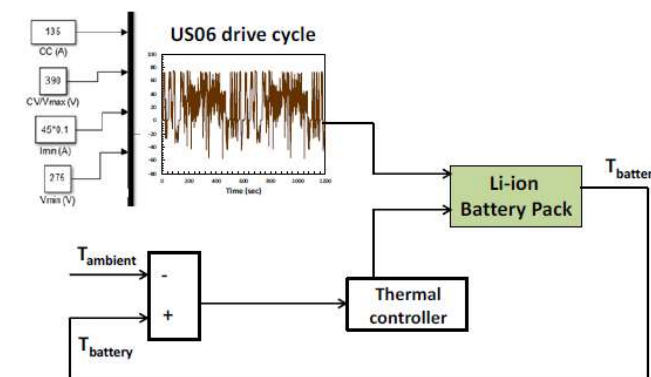
- US06驾驶工况

■ 运行环境

- 城市环境1: Portland, ME (年平均温度35°C)
- 城市环境2: Phoenix, AZ (年平均温度10°C)

■ 热管理策略

- 最高允许电池温度比环境温度升高5°C
- 使用空气冷却



AutoLionST + Simulink一维热管理案例

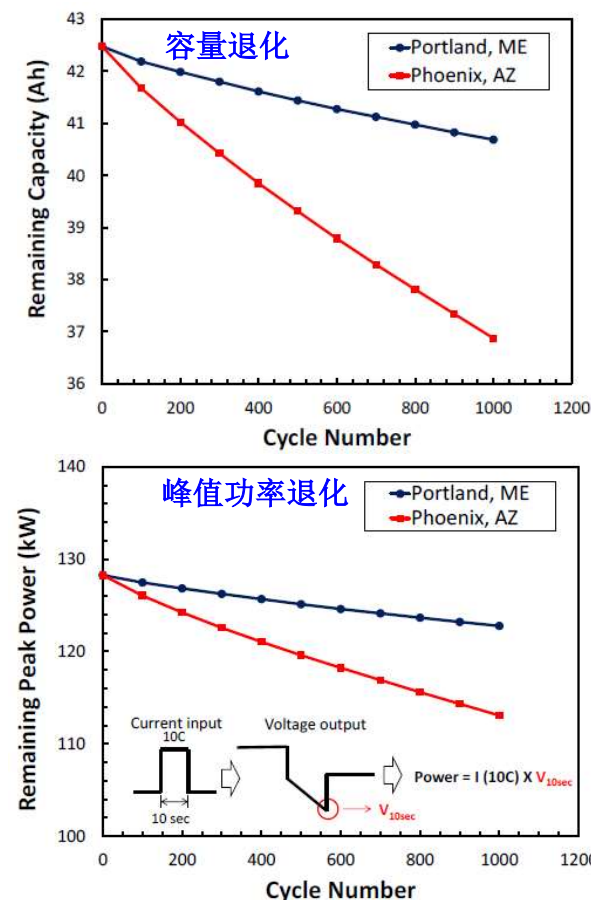
结果分析：1000次循环后的电池容量和峰值功率退化

■ Phoenix (35°C)

● ~ 15%的容量衰减， ~ 12%的峰值功率衰减

■ Portland (10°C)

● ~ 5%的容量衰减， ~ 3%的峰值功率衰减



4. 锂电池的三维热管理及性能仿真

- 单电池/电池包及冷却系统的三维CFD分析

使用软件: **AutoLion 3D + Fluent**

为什么使用AutoLion3D进行电池三维热管理分析？

- 电池/电池包的热管理需要精确给定在真实工况下的实时放热功率
- AutoLion的电化学-热耦合模型可精确预测大工况范围内电池的放热以及放热对电池性能的影响，尤其适合大功率大电池的模拟
- AutoLion还可以对内、外短路和穿刺等的行为进行评估

基于研究目的和实施方法的不同，使用AutoLion3D进行的三维热管理可按单电池和电池组进行区别。下面会分别进行介绍。

电池三维热管理分析的前期准备- 单电池的模型标定

为什么需要模型标定？

- 用户提供的参数不足/某些参数测量成本较高
- 在已知参数有限的情况下，仍然实现模拟目标

模型标定的一般流程：

- 室温小电流充放电：标定电池容量和电压的变化
- 室温大电流充放电：标定电池电压和温度的变化
- 不同温度下的充放电：标定不同温度下的电池容量和电压变化

单电池的三维热管理- AutoLion3D + Fluent实时耦合

目的

- 电池短路热失控和电力行为评估
- 电池穿刺热失控和电力行为评估
- 针对大尺寸电池的详细三维热和电性能评估

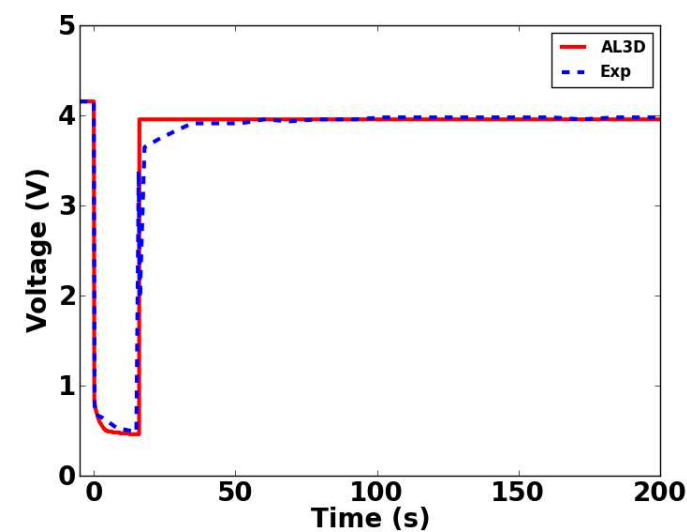
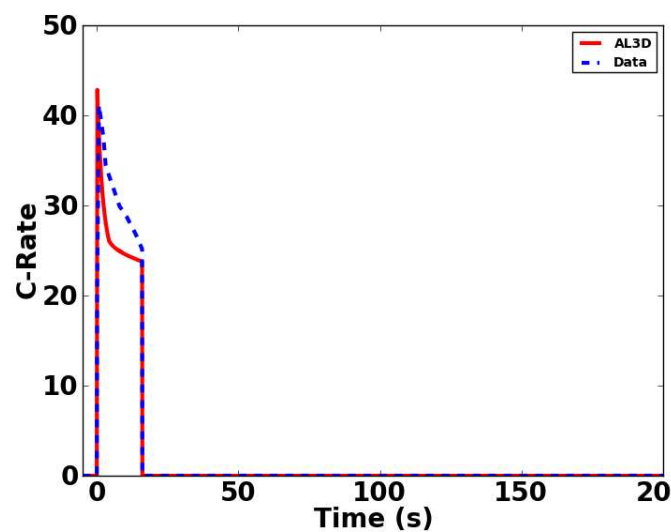
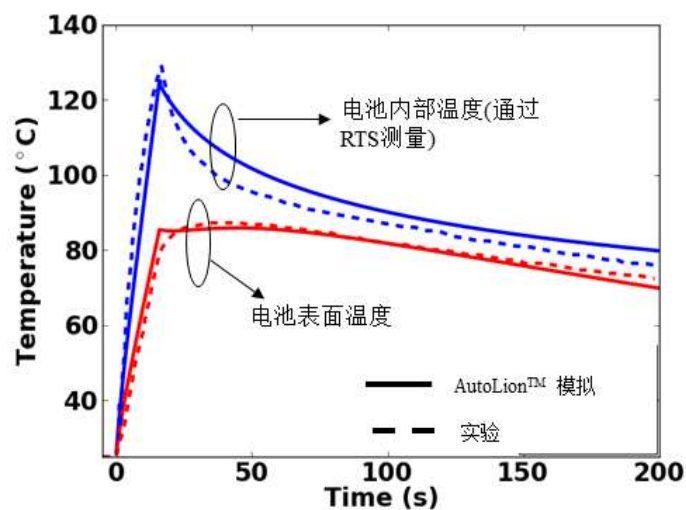
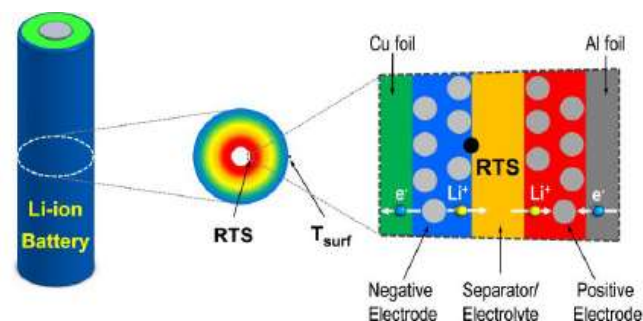
特点

- 网格准备及计算设定等均通过运行脚本文件自动完成，对操作要求低，用户实施仿真简单方便

单电池的三维热管理案例- 外部短路模拟

外部短路实验

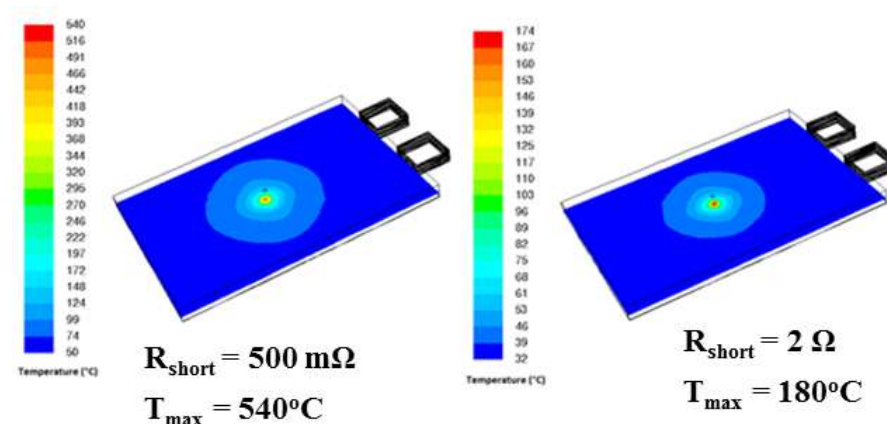
- 1.6 Ah 18650 电池(NMC/石墨)
- 0.15 ohm 短路



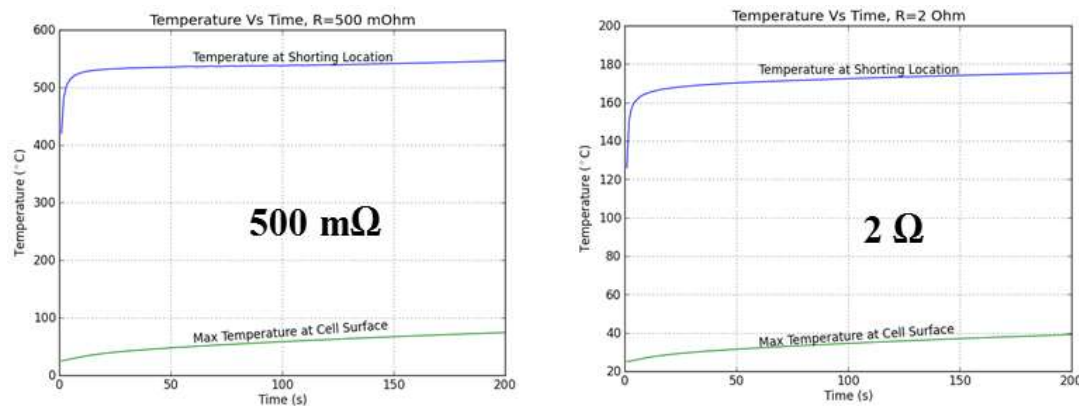
单电池的三维热管理案例- 内部短路模拟

信息

- 8 Ah NMC/石墨 叠片电池
- 17层中的第13层短路
- 短路电阻分别为500 mΩ 和 2 Ω



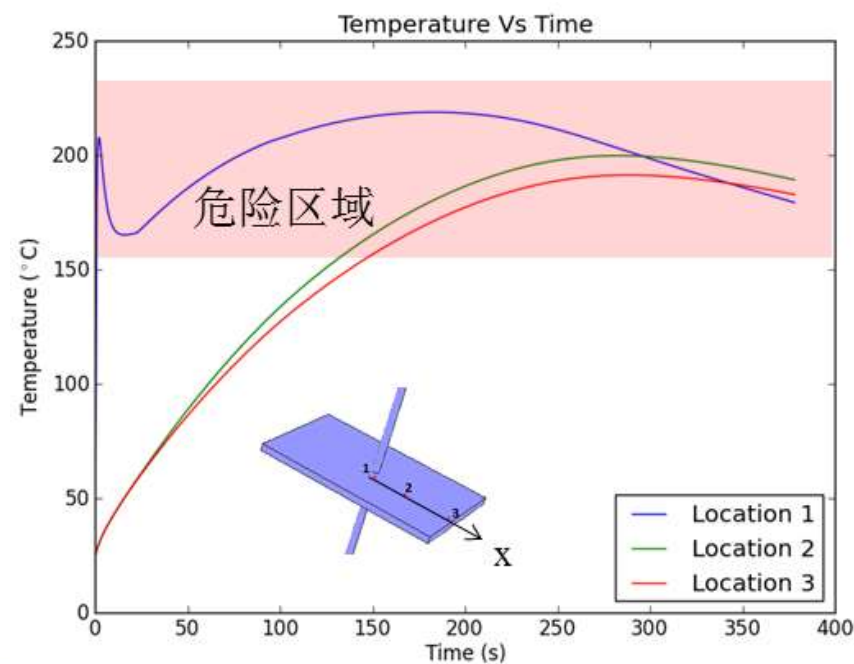
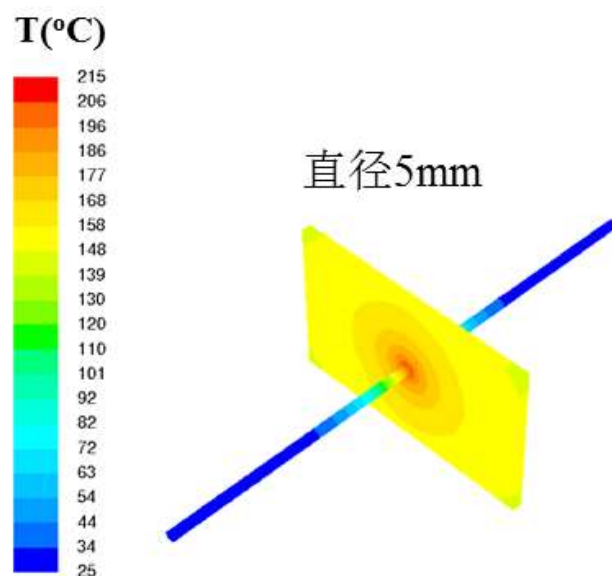
短路发生200s后短路层的温度云图 (#13)



单电池的三维热管理案例- 穿刺模拟

信息

■ 85Ah NMC/石墨 叠片电池



电池包的三维热管理

稳态计算

- 给定固定的电池发热功率
- 只能对系统进行初步粗略评估

瞬态计算

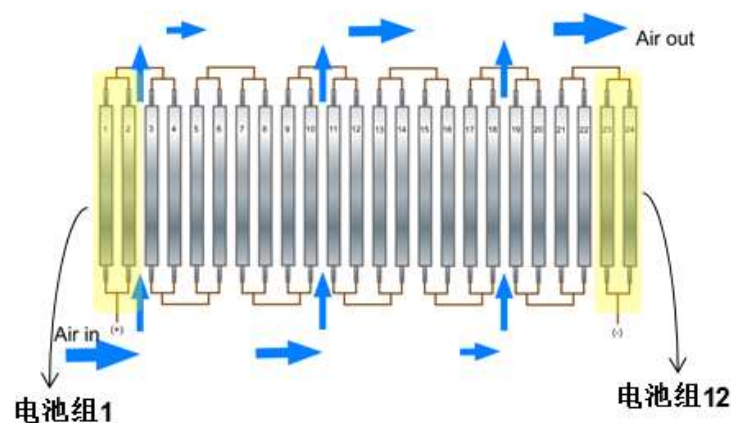
- 简单瞬态分析
 - 给定瞬时电池发热功率
 - 所有电池均相同且均匀分布
- 实时双向耦合分析
 - AutoLion3D + Fluent实时耦合
 - 电池发热功率实时计算更新
 - 可以考虑电池之间的不平衡和不均匀分布
 - 直接输出每个电池的电化学和热性能

电池包的网格模型由用户手动生成

AutoLion 3D+Fluent实时耦合计算- 案例2

电池信息

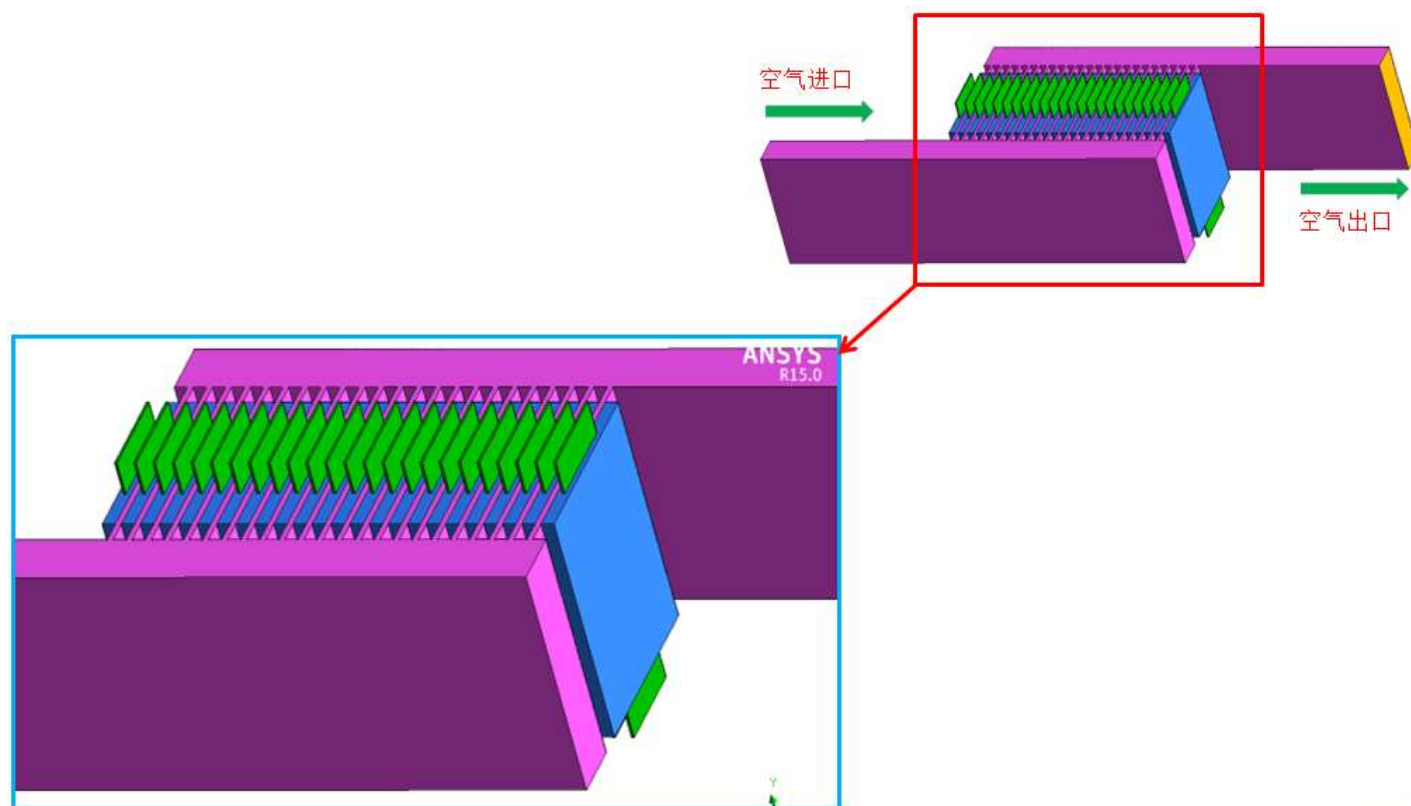
- 12S-2P 电池包 (NMC/石墨, 35 Ah)
- 从零下开始进行空气加热，由此引起的电池间的不平衡



AutoLion 3D+Fluent实时耦合计算- 案例2

几何模型

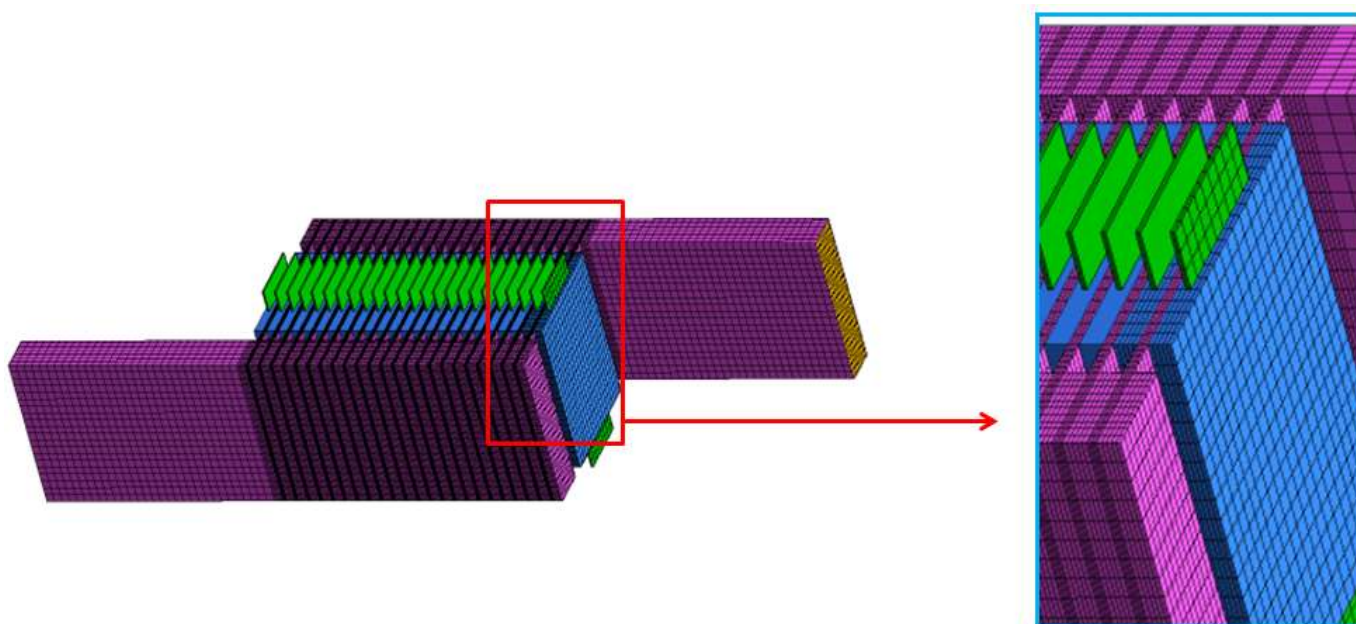
- 计算域包含空气冷却系统



AutoLion 3D+Fluent实时耦合计算- 案例2

网格模型

- 六面体网格
- 总网格数为：22万



AutoLion 3D+Fluent实时耦合计算- 案例2

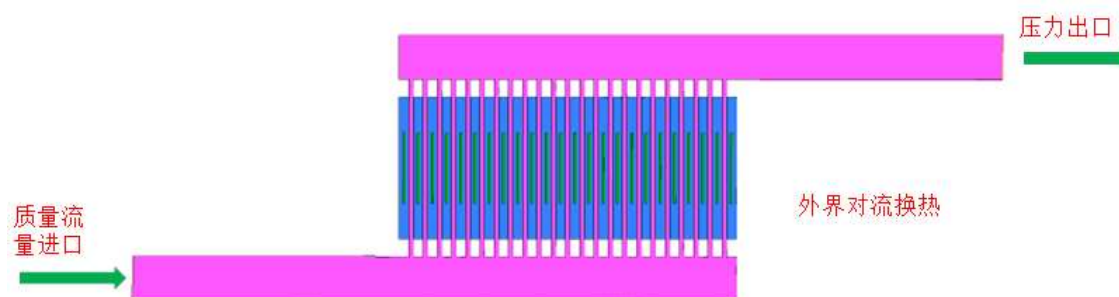
边界条件

■ 进口条件:

- 进口流量: 0.036kg/s
- 进口温度: -10°C

■ 外界换热条件:

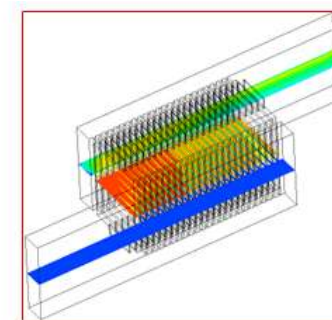
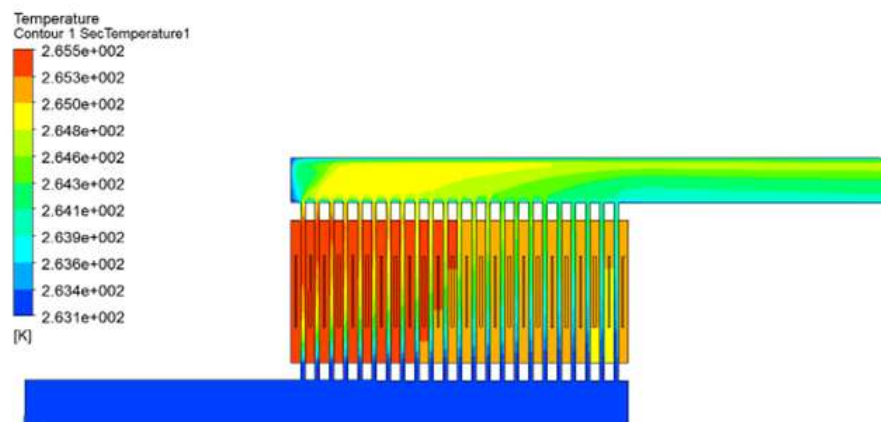
- 环境温度: -10°C
- 换热系数: $20\text{W/m}^2\text{K}$



AutoLion 3D+Fluent实时耦合计算- 案例2

部分结果

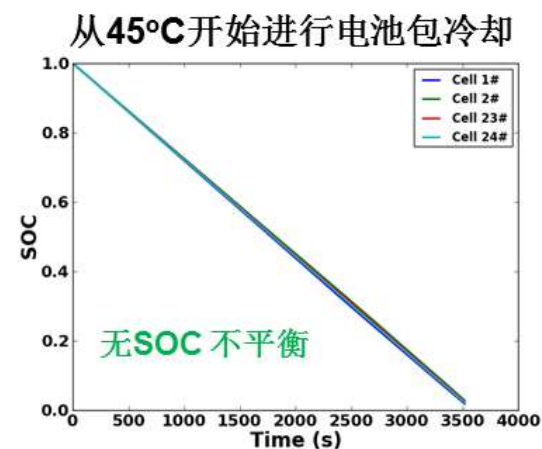
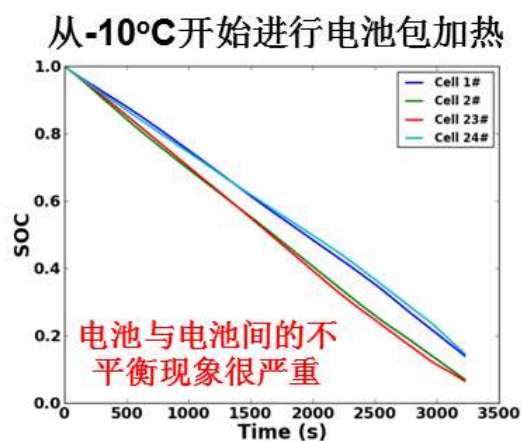
■ 某截面温度分布



AutoLion 3D+Fluent实时耦合计算- 案例2

部分结果

■ 电池间的不平衡



总结

1. AutoLion1D是电池性能快速评价、电池设计和优化以及电池老化模拟的理想工具
2. AutoLionGT跟GT-SUITE的协同仿真，对于整车能量管理、系统优化及BMS开发等的应用具有先天优势
3. AutoLion3D + Fluent针对单电池和电池组的热管理使用不同的实施方案。三维热管理中，由热驱动的SOC不平衡对电池性能、寿命和安全性的影响，只能通过AutoLion3D + Fluent来模拟

Thank you for your kind attention.
We are looking forward to doing business with you.

-
- 网址: <https://www.idaj.cn>
 - 技术支持E-mail: support@idaj.cn

联系方式

艾迪捷信息科技（上海）有限公司

网址：<http://www.idaj.cn>

技术支持email：support@idaj.cn



上海办公室

地址：上海市张杨路620号中融恒瑞国际大厦东楼2001室

电话：（021）50588290/50588291

传真：（021）50588292

邮编：200120

北京办公室

地址：北京市朝阳区光华路甲14号诺安基金大厦1601室

电话：（010）65881497/65881498

传真：（010）65881499

邮编：100020
