

# 2022 MathWorks 中国汽车年会

## 基于Simulink电池管理系统SOC算法在环仿真研究

胡攀攀, 国轩高科



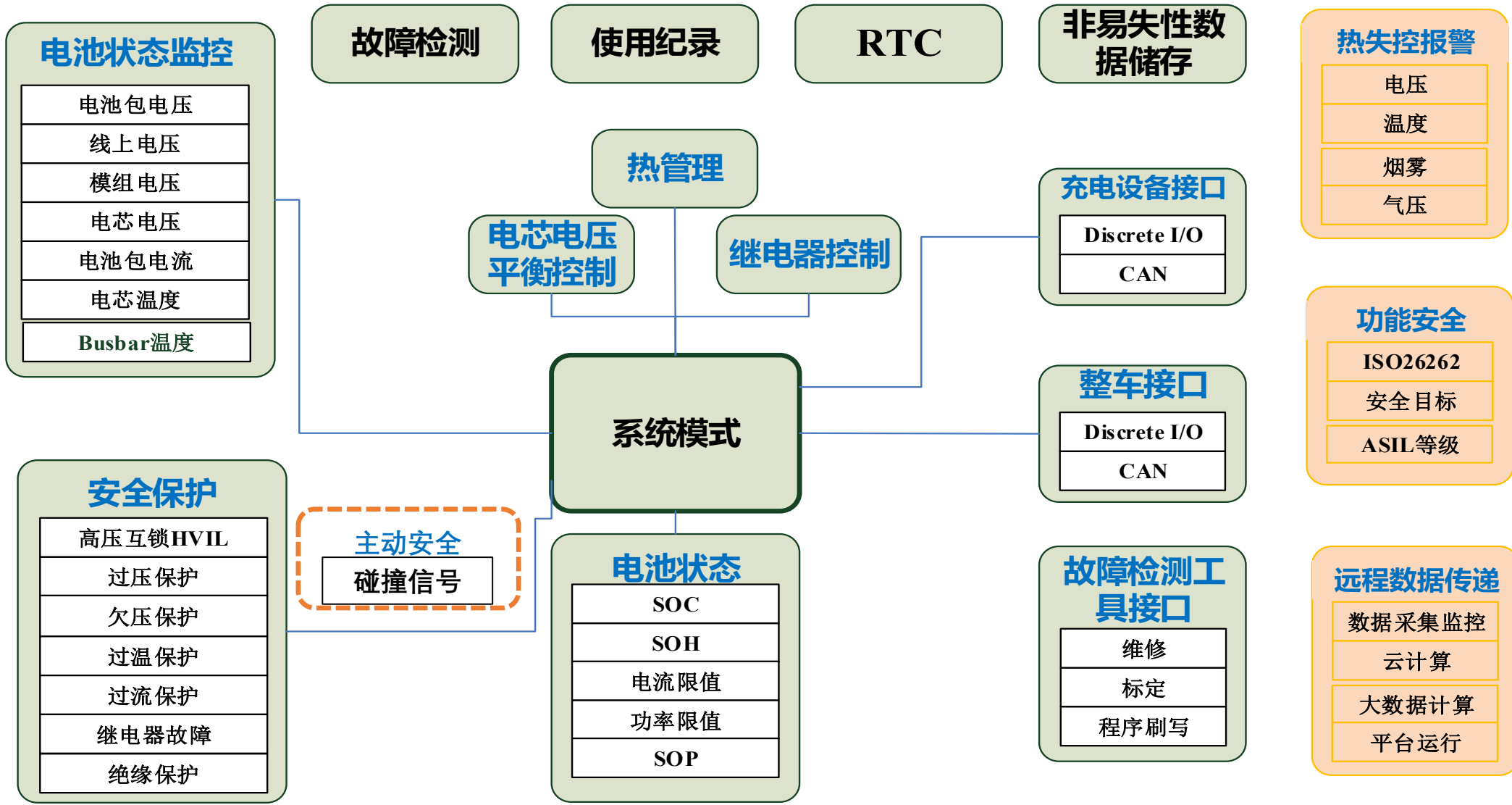
# 目录

- 一、**电池管理系统基本架构介绍**
- 二、**电池管理系统SOC面临的痛点问题**
- 三、**Simulink在电池管理系统SOC估算应用**

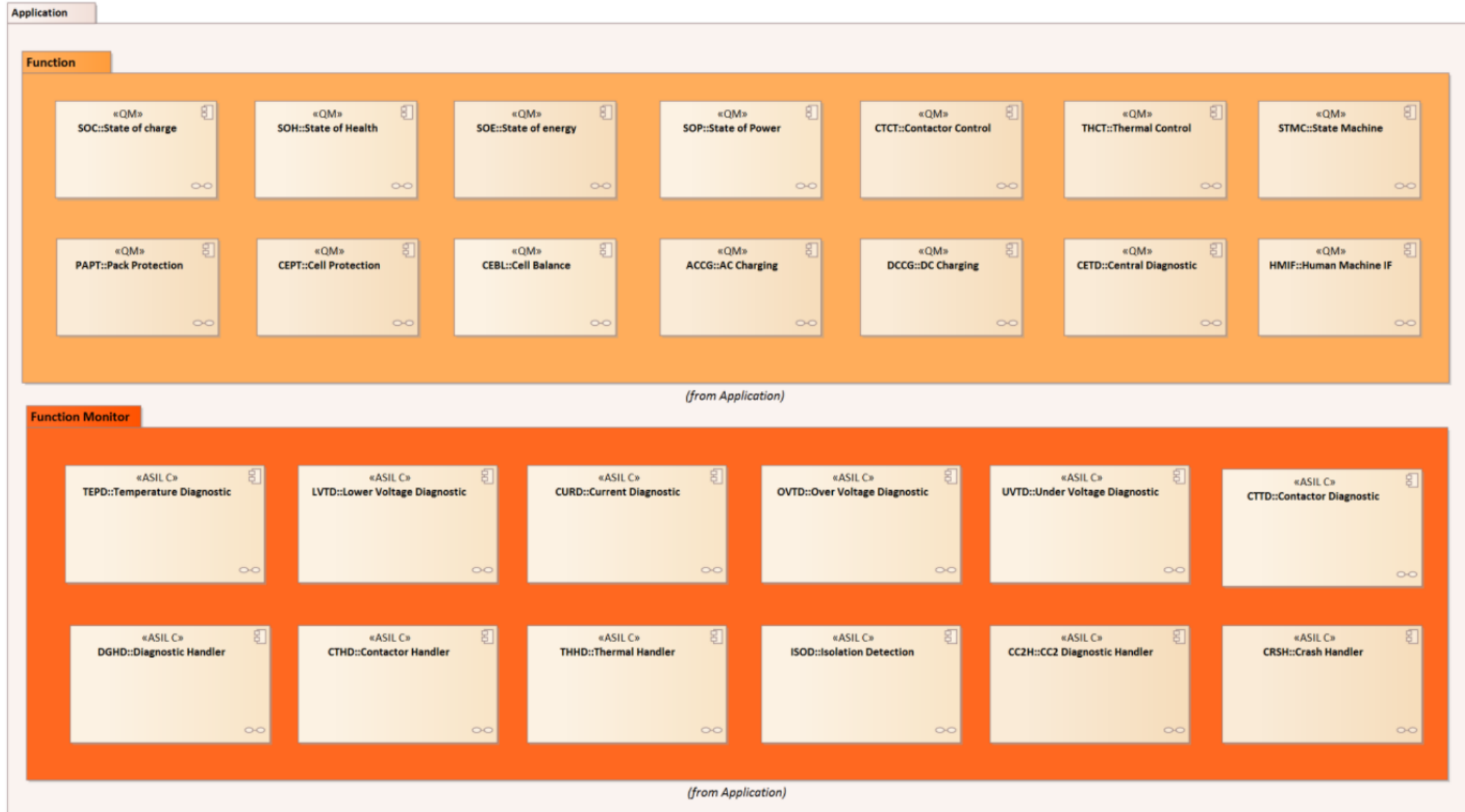
# 目录

- ➔ 一、**电池管理系统基本架构介绍**
- 二、**电池管理系统SOC面临的痛点问题**
- 三、**Simulink在电池管理系统SOC估算应用**

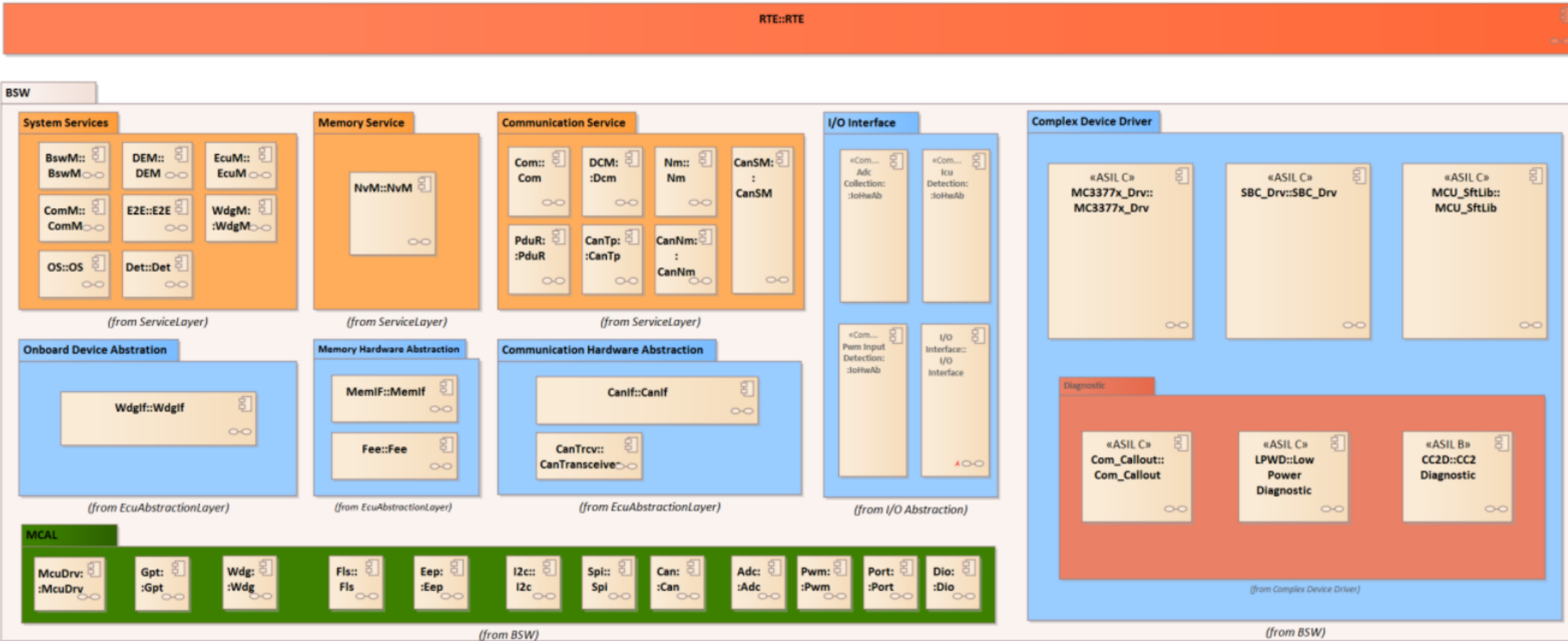
# 1.1 电池管理系统基本功能架构介绍



## 1.2 电池管理系统软件架构---应用层



# 1.2 电池管理系统软件架构---底层



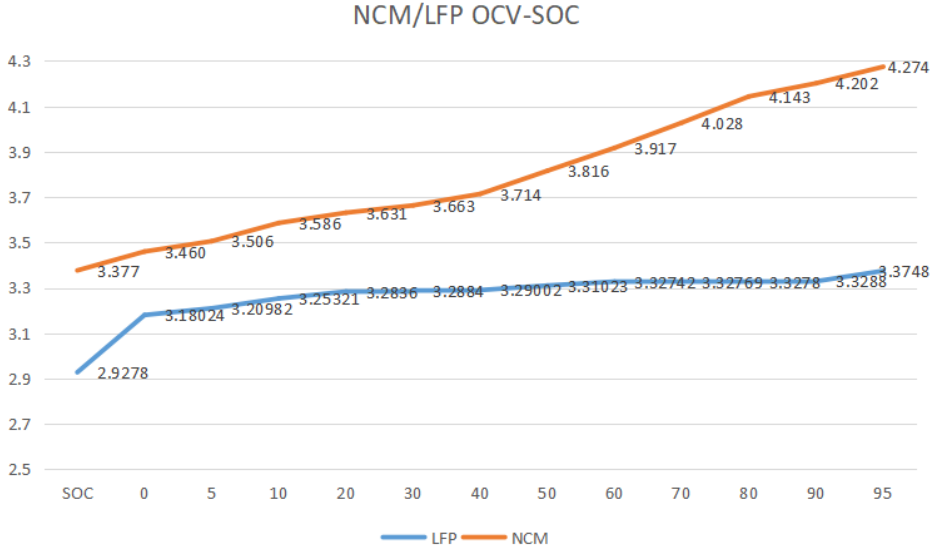
# 目录

- 一、电池管理系统基本架构介绍
-  二、电池管理系统SOC估算面临的痛点问题
- 三、Simulink在电池管理系统SOC估算应用

# 2.1 电池管理系统SOC估算面临的痛点问题

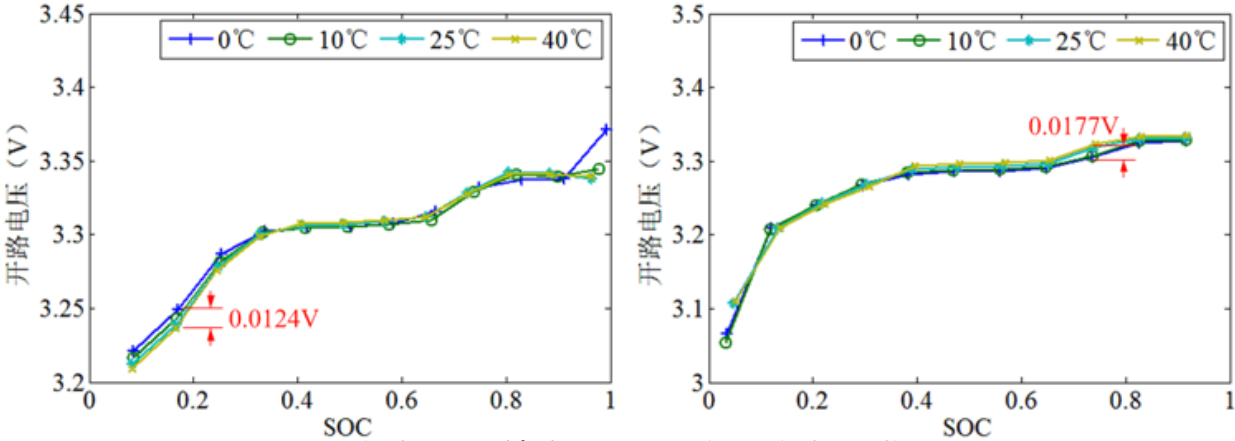
## 1. 电池开路电压(OCV)的特性一定程度影响SOC估算:

- 三元NCM的SOC-OCV斜率较明显，可一定程度反映SOC-OCV关系;
- LFP体系SOC-OCV曲线在30%-80%区间较为平坦，较难反映出SOC变化;



## 2. 电池温度敏感特性一定程度影响SOC估算:

- 电池对于温度的敏感特性，特别是低温条件下，电池可用容量发生变化，
- 磷酸铁锂电池具有明显的开路电压“滞回”现象;



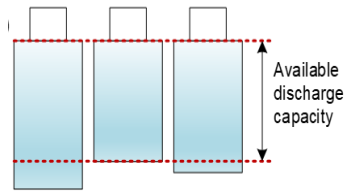
充电以及放电模式下的开路电压曲线



# 2.1 电池管理系统SOC估算面临的痛点问题

## 3. 电池系统成组后不一致性影响SOC估算：

- 电池系统成组后，由于单体之间的一致性，导致串并联成组后，带来“木桶效应”；

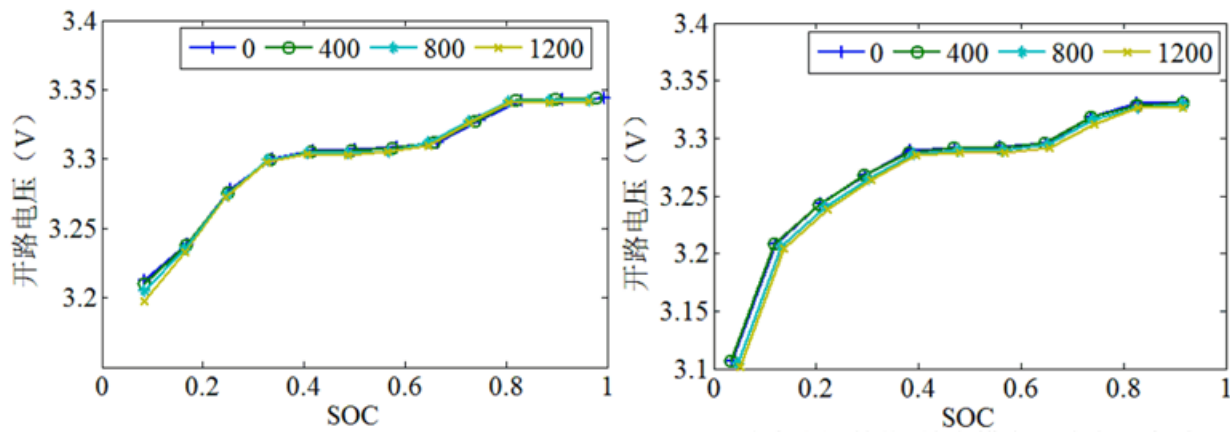
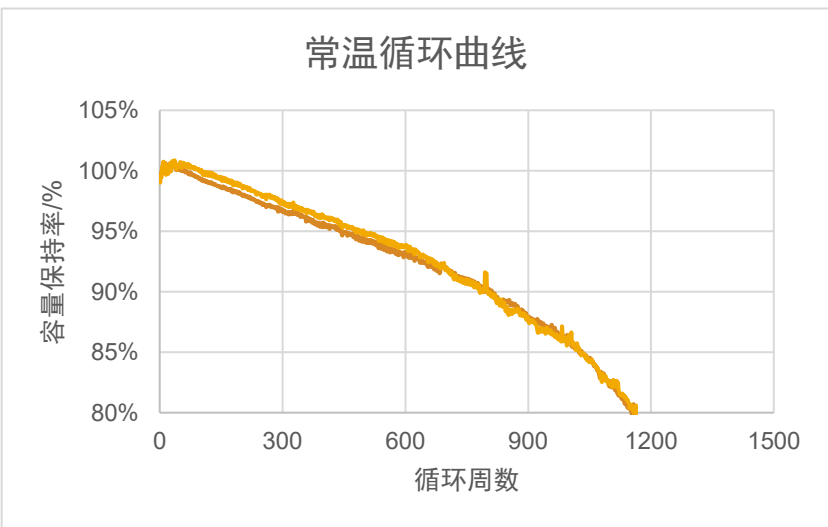


## 4. BMS电压、电流、温度等采集精度的影响：

- 在实际测量电压、电流、温度等量测过程中，由于电子电路自身精度以及噪声的影响，均影响估算精度；

## 5. 电池寿命影响(日历寿命、循环寿命)：

- 电池的日历寿命以及循环寿命均是非线性的，在实际SOC估算中由于寿命不确定性给与估算带来较大难度；

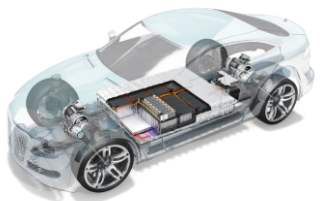


不同老化状态下动力电池的开路电压曲线在整个SOC区间范围内，呈现随电池的老化而降低的趋势。

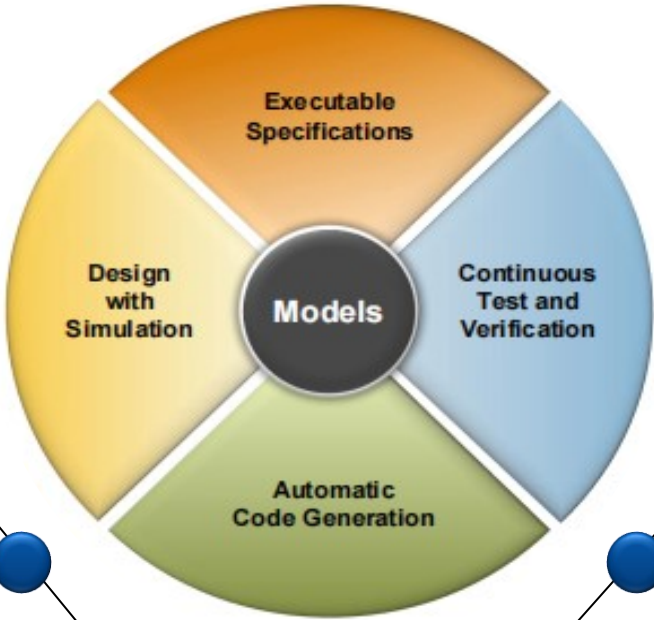
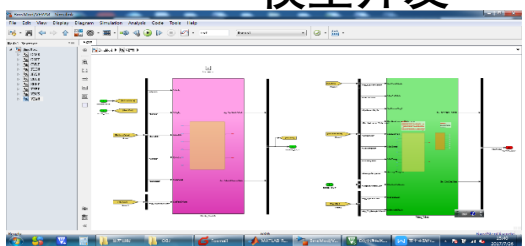
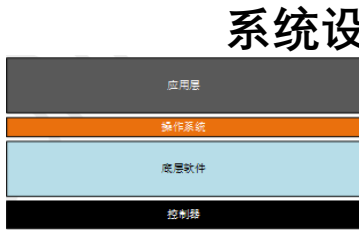
# 目录

- 一、电池管理系统基本架构介绍
- 二、电池管理系统SOC面临的痛点问题
-  三、**Simulink**在电池管理系统SOC估算应用

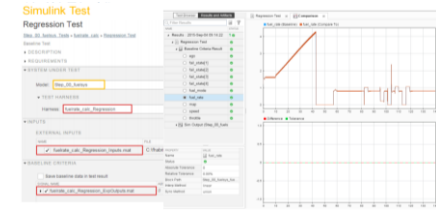
# 3.1 基于模型设计开发流程



整车设计、规划



单元模型测试



集成测试

XXX 项目 BMS 功能测试

序号	功能名称	测试项目	测试方法	测试要求	备注
1.	控制策略	策略验证	策略验证	策略验证	
2.	无	策略验证	策略验证	策略验证	
3.	策略验证	策略验证	策略验证	策略验证	
4.	策略验证	策略验证	策略验证	策略验证	
5.	策略验证	策略验证	策略验证	策略验证	

HIL测试



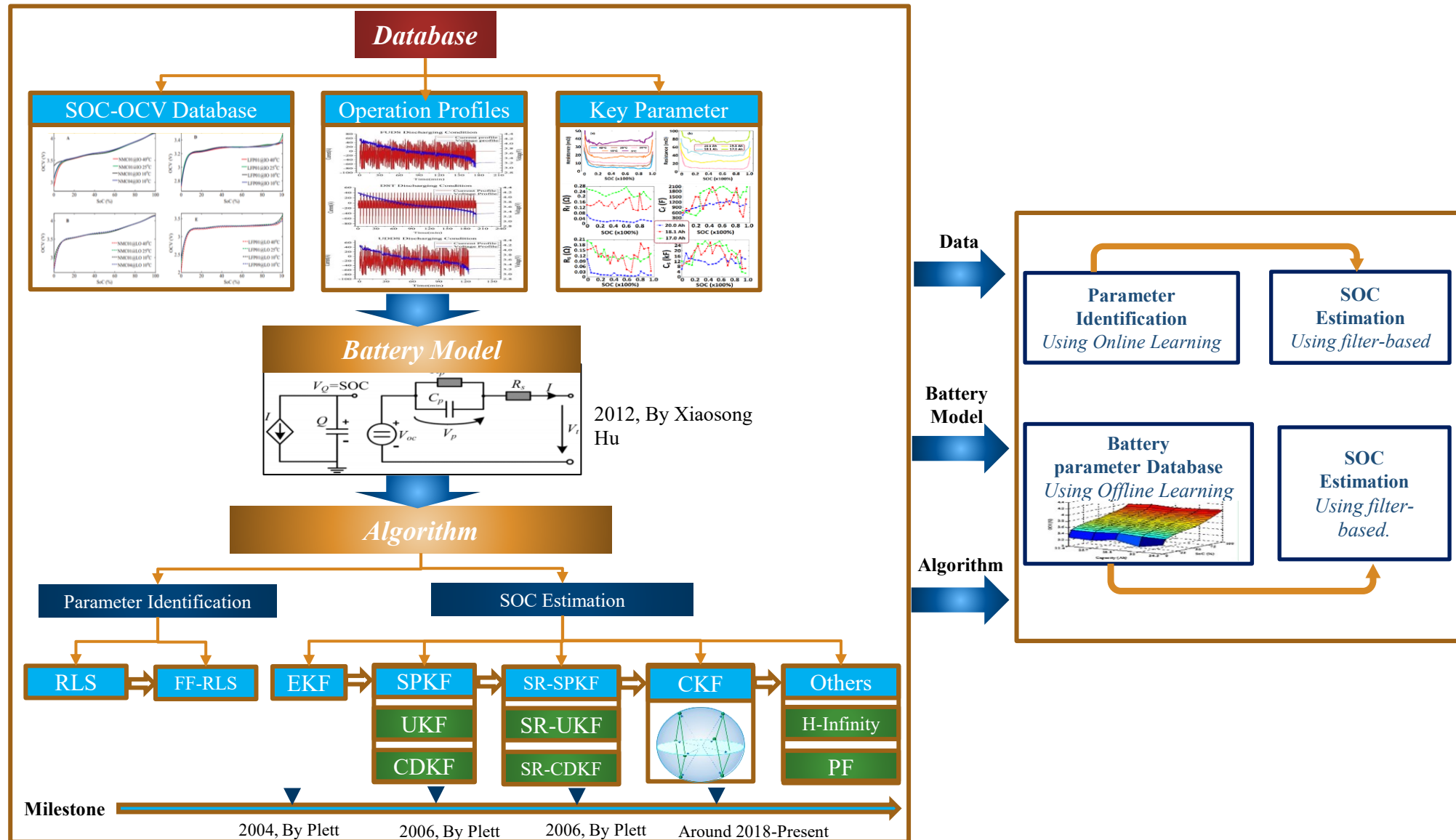
实车测试



DESIGN

Simulink Stateflow Embedded Coder Polyspace

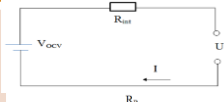
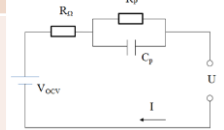
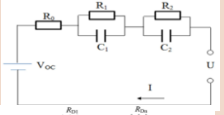
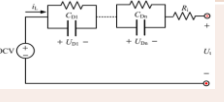
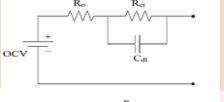
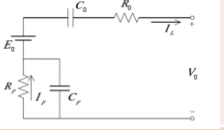
# 3.2 SOC 估算框架图



### 3.3 电池建模---常见电池模型说明

**电池模型的作用：**为了预测电池的工作特性，特别是在锂离子电池管理系统的工程化开发过程中，涉及到建模与仿真、控制策略研究、硬件在线测试等环节，这些研究过程都需要有符合锂离子电池特性的电池模型。电池模型描述了锂离子电池的伏安特性关系，即描述锂离子电池在工作过程中所表现出来的电压与电流之间的关系。

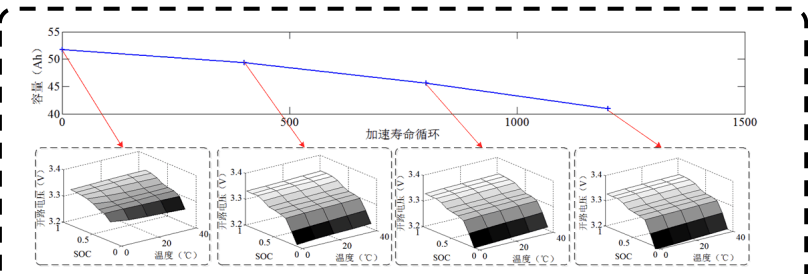
**电池模型的分类：**

类型	具体模型	模型示意图	模型描述	模型精度	模型复杂度	适用范围
等效电路模型	Rint模型		$V_k = V_{OC,k} - i_k R_{int}$	低	低	结构简单，需辨识的参数少，但不能很好模拟锂离子电池的动态特性
	一阶RC模型 (Thevenin)		$V_k = V_{OC,k} - i_k R_0 - i_k R_p$	适中	适中	电路结构简单，而且能较好的描述电池的动态特性，在电池建模中使用较多
	二阶RC模型		$V_k = V_{OC,k} - i_k R_{01} - i_k R_{p1} - i_k R_{02} - i_k R_{p2}$	较高	较高	比一阶RC电路能更好的描述电池的动态特性
	多阶RC模型		$V_k = V_{OC,k} - i_k R_{01} - i_k R_{p1} - \dots - i_k R_{0n} - i_k R_{pn}$	高	高	很好地描述电池的动态特性，通常电路模型的阶数越高，但运算也会更复杂
	一阶RC迟滞模型		$V_k = V_{OC,k} - i_k R_0 - i_k R_p + h_k$	适中	适中	电路结构简单，而且能较好的描述电池的动态特性，适用于另算铁锂电池
	PNGV模型		$V_k = V_{OC,k} - i_k R_L - i_k R_L$	适中	适中	在充放电电流交替变化较大的情况下，其精度比Thevenin模型要高，因而更适合用于HEV等高功率型电池
基于第一原理的电化学模型	电化学模型	电化学模型比较复杂，其模型详细反映电池内部的反应机理，描述了与电池设计参数有关的宏观（如电压、电流等）及微观信息（离子浓度分布、传输等），尽管准确，但巨大的复杂度和耗时性，不适用与实时的电池管理中，难以应用于实际产品中，其主要是用来辅助电池的设计和制造				

# 3.4 电池建模---基础数据建立

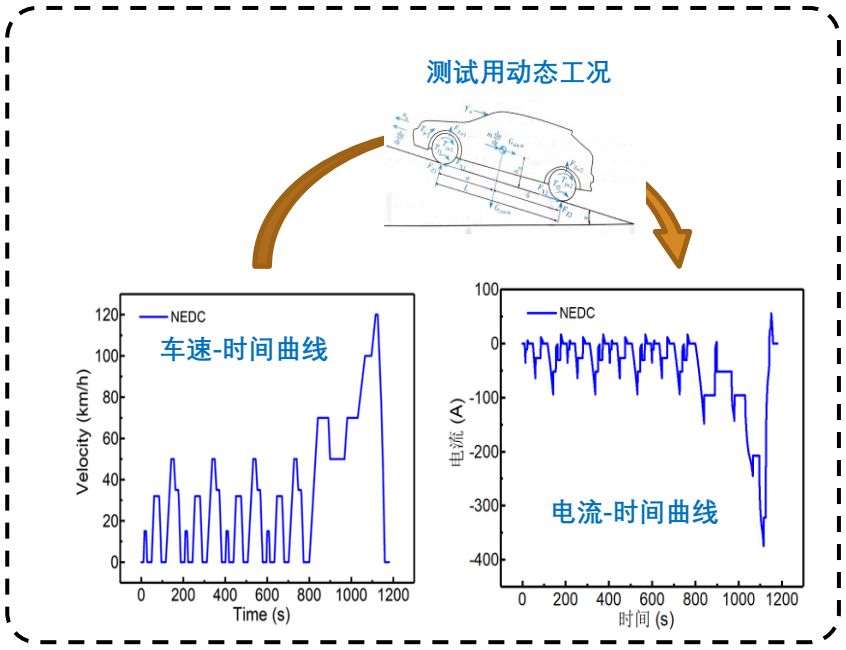


1 采集动力电池工况数据和操作温度，获取SOC与可用容量闭合估计的算法修正参数



不同老化状态的动力电池操作温度-SOC-开路电压三维Mesh数据库

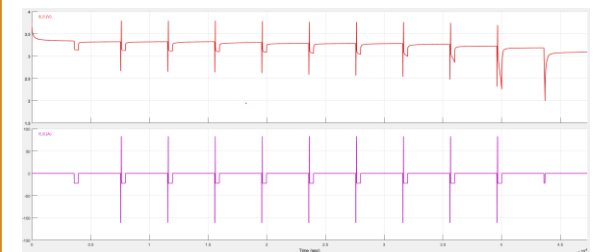
2 由整车模型换算获取车辆匹配行车工况参数



3 根据《FreedomCAR 电池试验手册》进行HPPC实验来获取电池模型的参数辨识数据

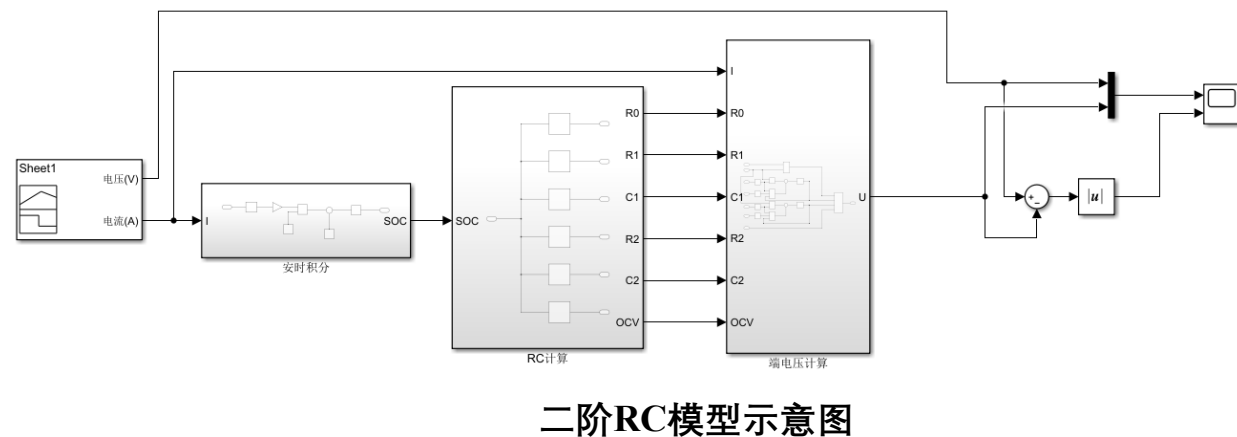
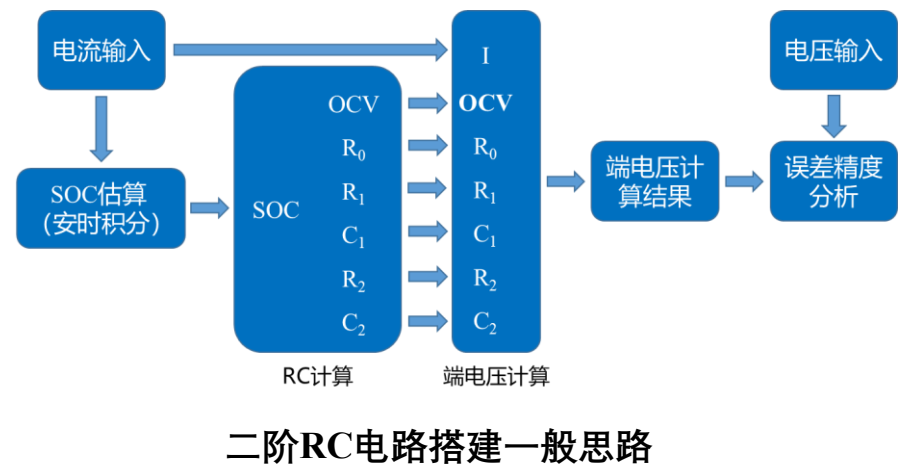
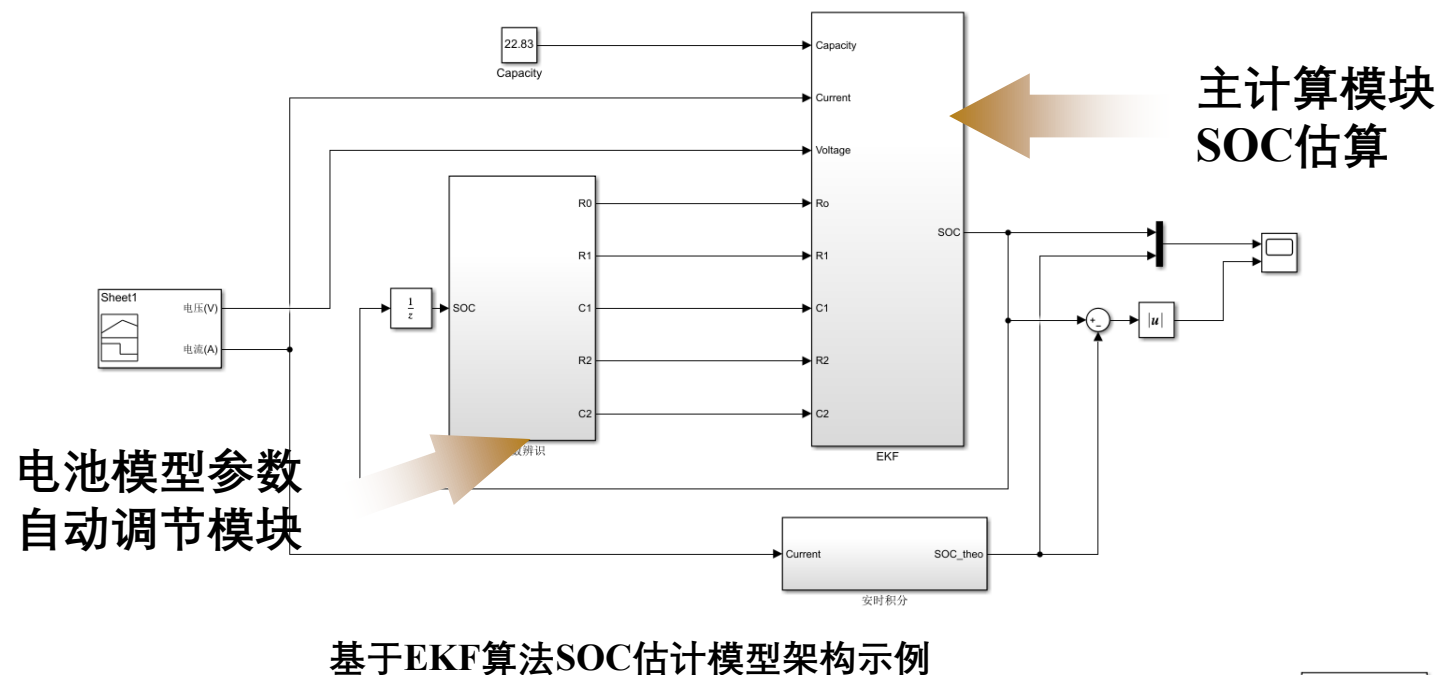
Table with 8 columns: Step No., Step Type, Voltage (V), Current (A), Power (W), Loop, Cycle, Stop Condition, Protection Condition. It lists various test steps like static, constant current discharge, and constant current charge.

HPPC测试工步



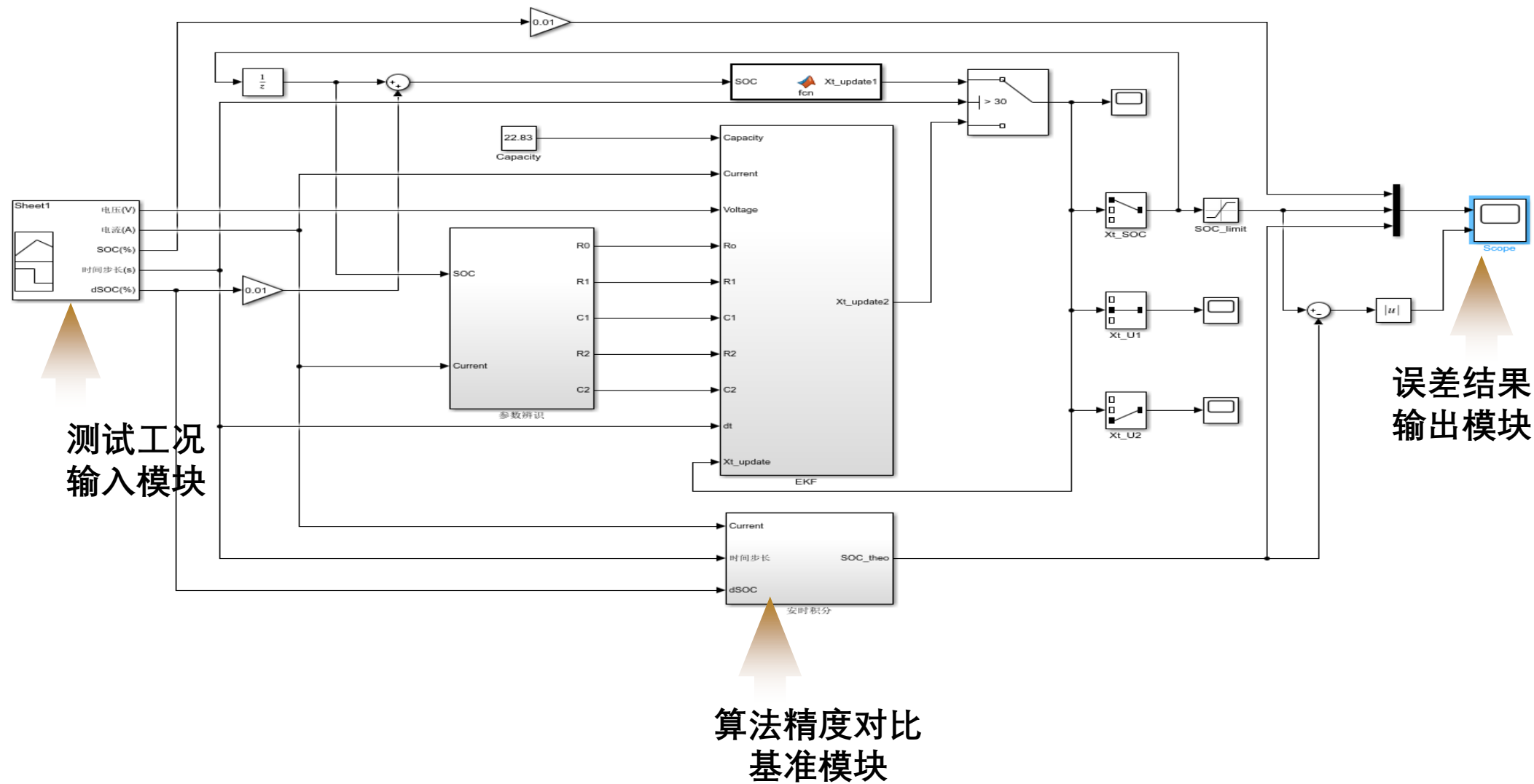
HPPC电压电流变化曲线

# 3. 5基于Simulink SOC算法建模





### 3.6 基于Simulink SOC算法模型精度MIL测试



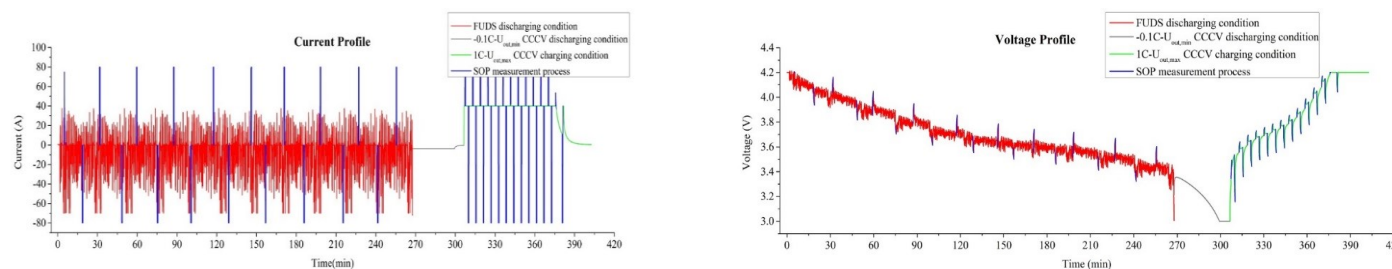


## 3.7 基于Simulink SOC算法模型精度MIL测试

### SOC估计算法鲁棒性验证:

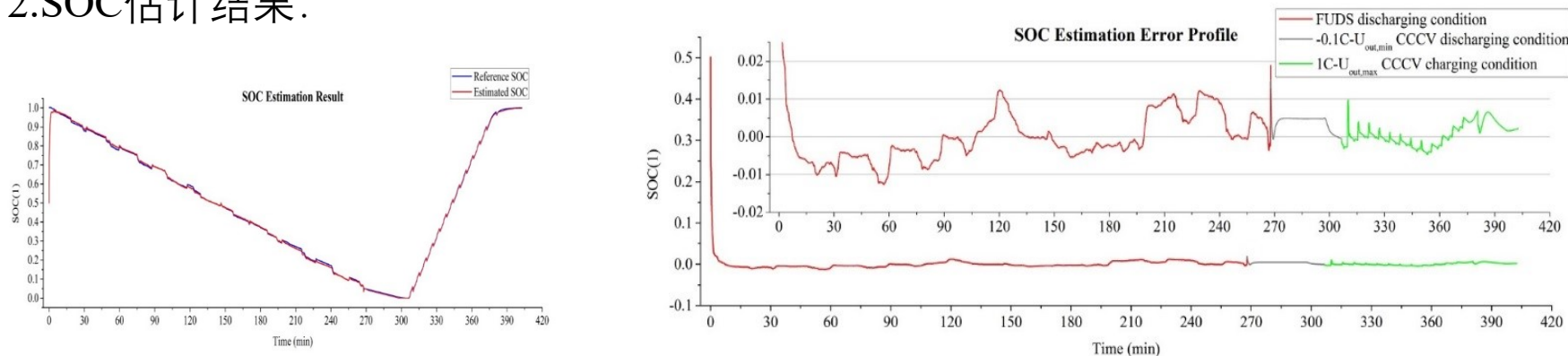
➤ 验证工况：恒流恒压充电工况、动态行车工况（如NEDC、WLTC、DST、FUDS、UDDS等）

➤ 1.测试工况示例：FUDS工况+CCCV充放电工况



测试工况电流/电压曲线

➤ 2.SOC估计结果:



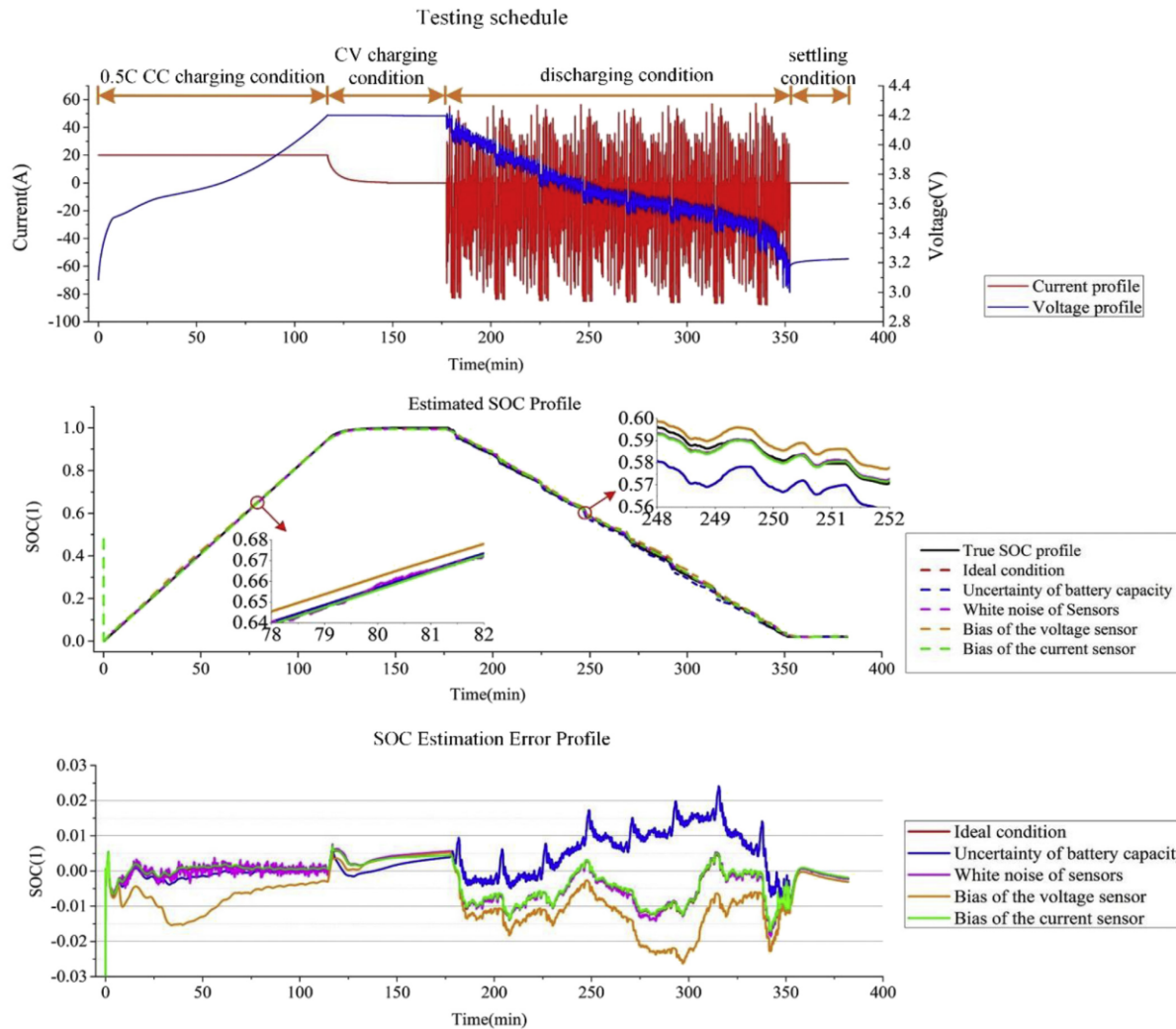
测试工况下SOC估计结果

测试工况下SOC估计误差

## 3.7 基于Simulink SOC算法模型精度MIL测试

### SOC估计算法鲁棒性验证:

- 多干扰条件：电池容量误差10%、电流传感器/电压传感器白噪声、电流传感器有色噪声、电压传感器有色噪声



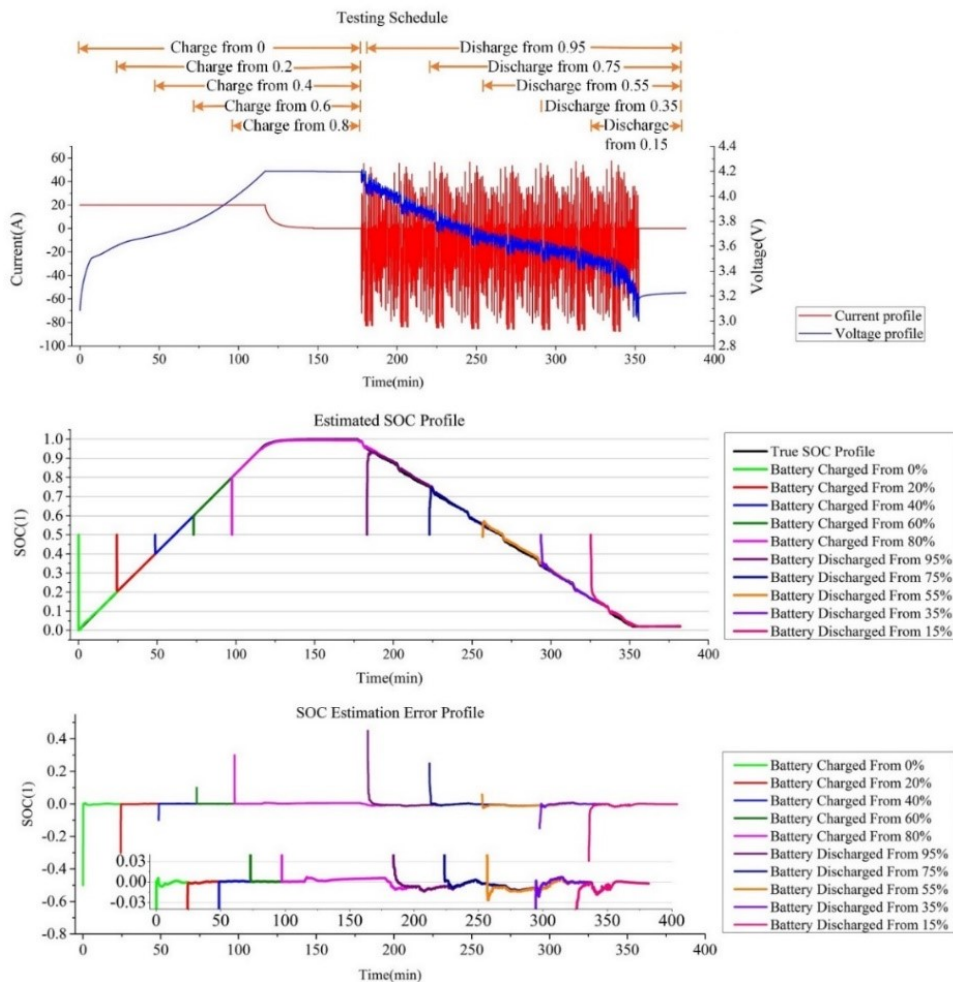
干扰条件	SOC误差
电池容量误差10%	2.8%
电流传感器/电压传感器白噪声	1.9%
电流传感器有色噪声	1.9%
电压传感器有色噪声	2.7%

- 各种工况下电池的SOC估计精度  $< 3\%$  ;
- 添加电流和电压噪声验证了算法的鲁棒性。

## 3.7 基于Simulink SOC算法模型精度MIL测试

### SOC估计算法快速响应验证:

- 验证工况：恒流恒压充电工况、动态行车工况，在不同电池状态启动算法
- 算法初始化状态：初始SOC<sub>0</sub>=50%

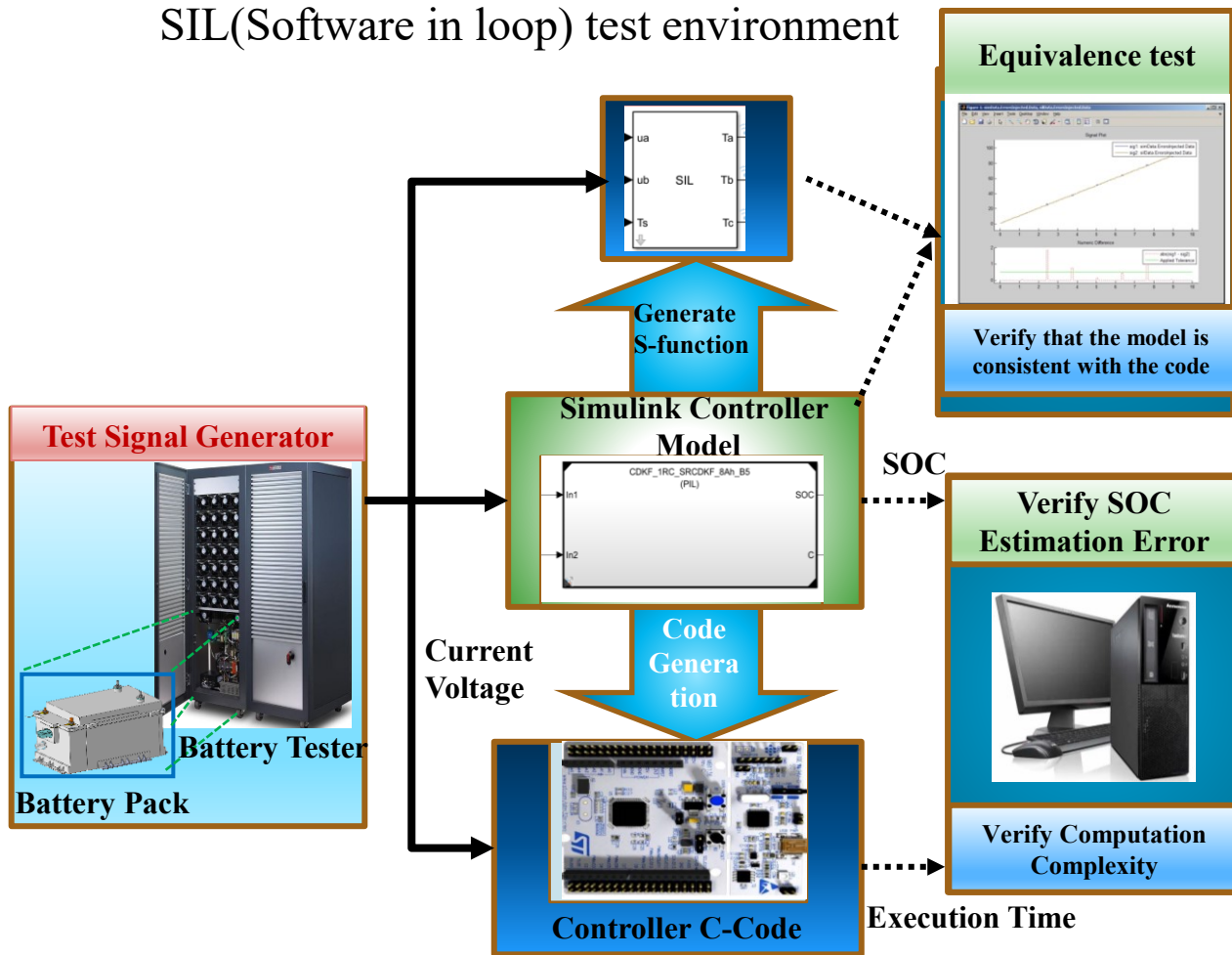


电池初始状态	收敛时间	电池初始状态	收敛时间
从0%开始充电	3秒	从95%开始放电	62秒
从20%开始充电	4秒	从75%开始放电	51秒
从40%开始充电	3秒	从55%开始放电	14秒
从60%开始充电	3秒	从35%开始放电	55秒
从80%开始充电	4秒	从15%开始放电	76秒

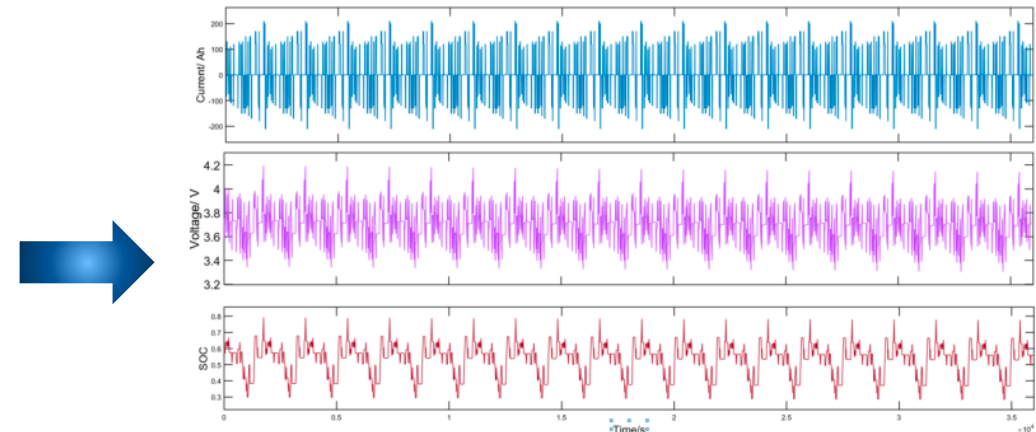
- SOC估计算法迅速响应，在不同SOC、不同工况中快速收敛到真实SOC附近

# 3.8 基于Simulink SOC算法SIL/PIL测试环境说明

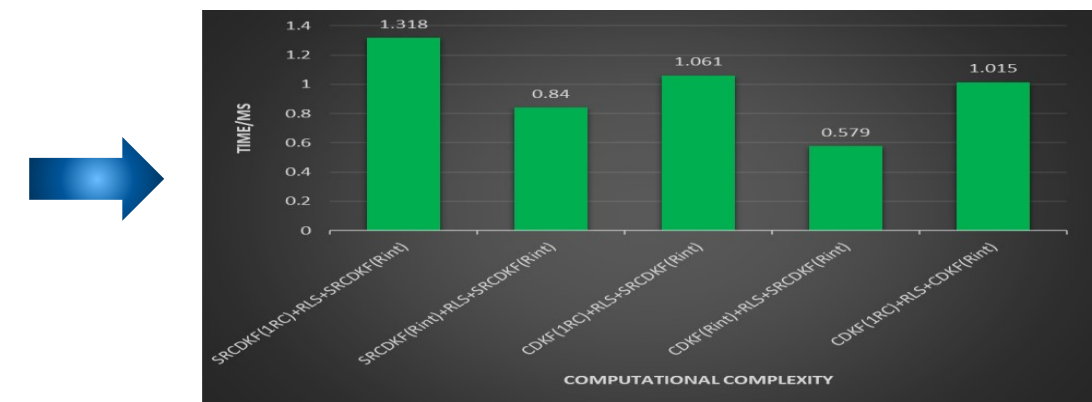
SIL (Software in loop) test environment



PIL (Processor in loop) test environment



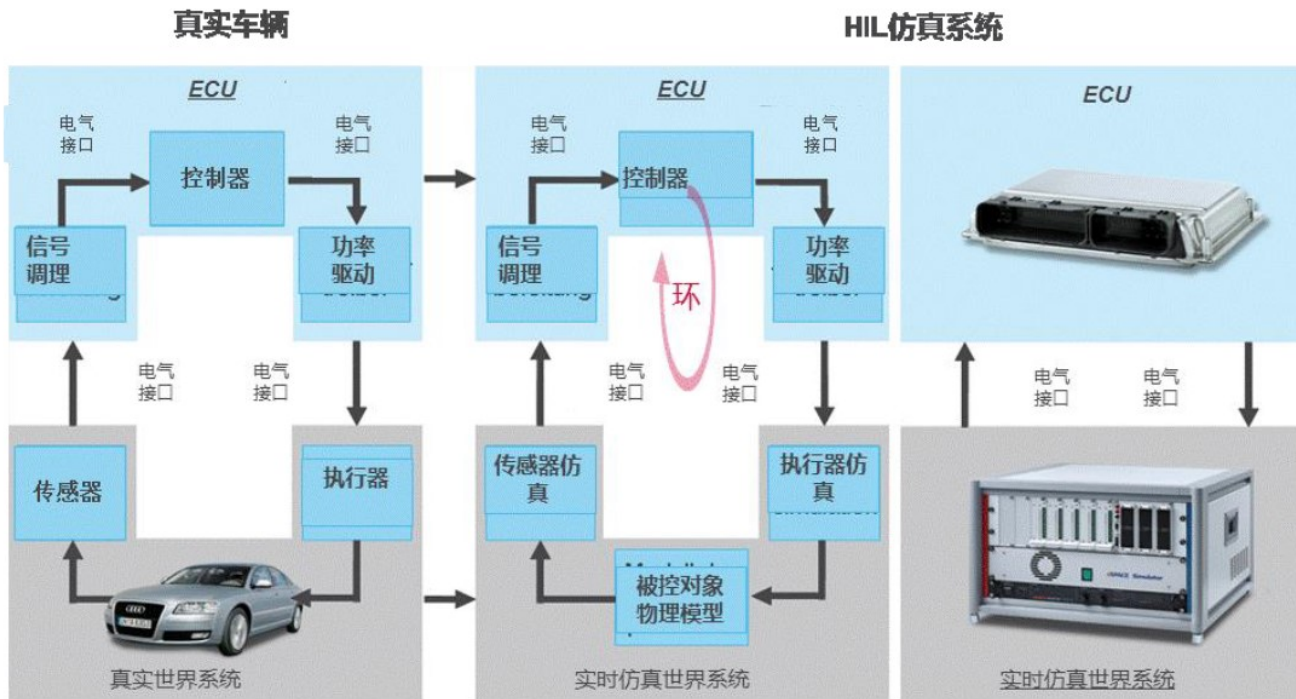
Testing data, current, voltage and reference SOC



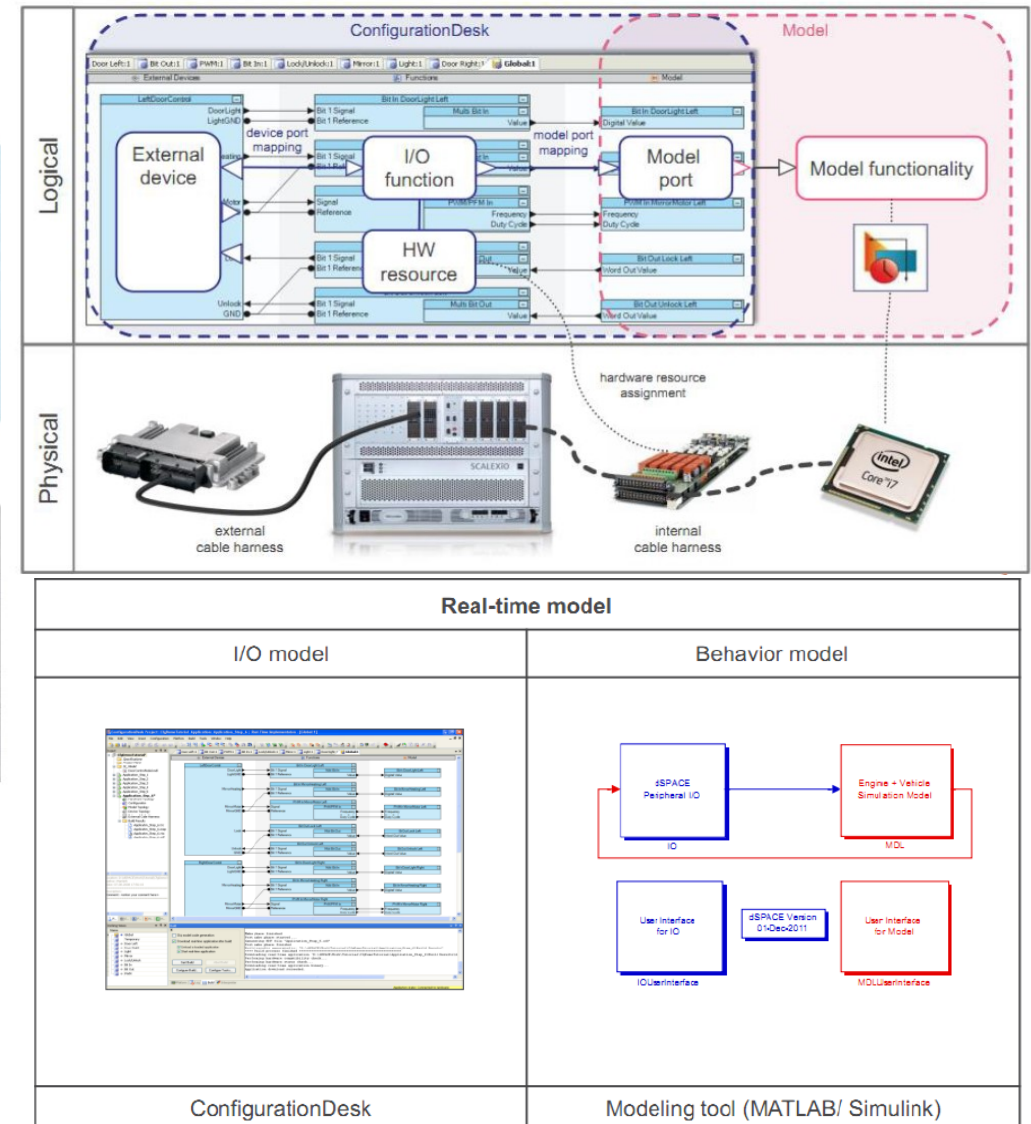
Computation complexity analysis result



# 3. 8 PACK-HIL测试系统



HIL测试系统一般定义：  
 用**数学模型**模拟被控对象行为；  
 用**硬件板卡**模拟传感器信号和采集ECU控制信号；  
 在实车道路试验之前对控制器大部分功能进行验证；  
 实车道路试验的有效补充：  
 故障诊断功能测试和极端工况的功能测试。

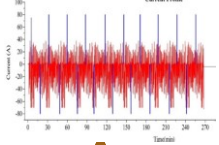


国轩使用Dspace/Configuration Desk 完成I/O model开发  
 在Matlab/Simulink 中完成物理模型或行为模型开发

# 3. 8 PACK-HIL测试系统

BMS采集数据（电压、温度、电流及功率等）

测试工况导入



外部输入：  
驾驶员操作信号；  
外部环境变量；

整车模型  
Dspace&Tealtime  
Workshop

充放电柜控制



充放电柜

+

被测PACK

恒温箱温度控制

整车模型仿真数据

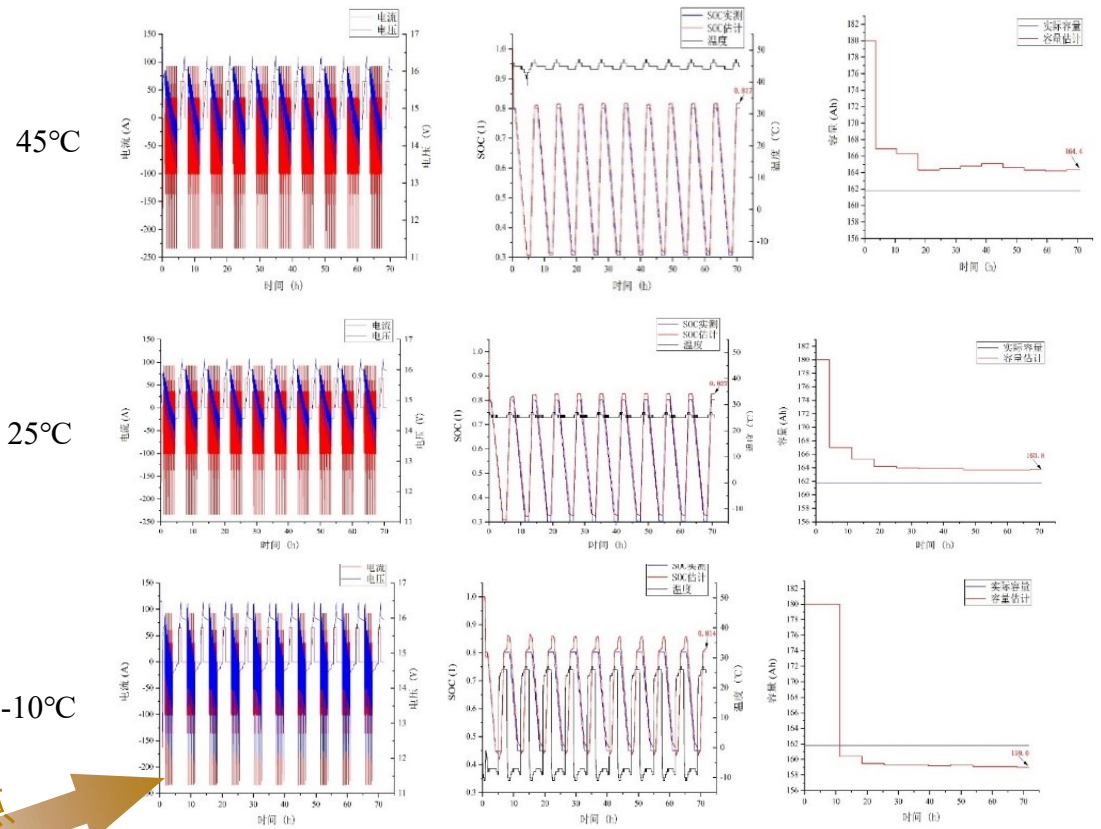
PC  
数据测量与记录

BMS上传数据

# 3. 8 PACK-HIL测试系统

宽温域多老化点三元电池PACK HIL测试结果示例：

老化状态	环境温度	动态工况	SOC估计误差
100%老化点	45°C	NEDC工况	-1.2%
	25°C	NEDC工况	-1.6%
	-10°C	NEDC工况	-2.7%
95%老化点	45°C	DST工况	-1.6%
		FUDS工况	-2.5%
		NEDC工况	2.0%
	25°C	DST工况	-2.4%
		FUDS工况	-2.4%
		NEDC工况	2.3%
-10°C	DST工况	-2.7%	
	FUDS工况	-2.8%	
	NEDC工况	2.2%	
84%老化点	45°C	DST工况	-2.5%
		FUDS工况	-1%
	25°C	DST工况	-2.5%
		FUDS工况	-1.2%
	-10°C	DST工况	2.8%
-10°C	FUDS工况	2.6%	



84%老化点  
测试结果节选

## 3.9 总结

### 数据采集；

- 方法：通过电池测试柜获取电池测试工况以及电池参数；
- 使用Simulink自带数据导入工具以及便捷的可视化模块；
- 根据工况的特征（恒流、动态）确定算法设计的技术要求；

### 电池模型：

- 便利的电池参数估算工具：
  - 参数拟合工具箱可以使用E指数拟合实现参数辨识；
  - 使用Simulink Design Optimization工具箱，最小二乘法实现参数拟合；
- 便于验证电池模型参数：根据Simulink模型输出与实际数据对比，以分析电池模型的精度；

### 算法验证：

- MIL仿真
  - 使用Simulink模块搭建，便于快速确定量测噪声与过程噪声的取值范围，以及对算法精度，稳定性的影响；加快模型搭建速度；
  - 便于调参：根据算法对收敛速度以及精度的设计需要，通过调参可以直观且定量分析算法的优缺点；
  - 定点设计（Fixed-point）：通过定点设计，在保持算法精度的基础上，加快算法运行效率；
- 可利用SIL测试，验证代码与模型的等效性；
- 可利用PIL测试，快速确定每种算法的运行效率，以选择最优算法；
- PACK-HIL测试：

模拟驾驶员、车辆及其工作环境，可连接真实PACK为算法验证提供良好的闭环测试环境。



# 2022 MathWorks 中国汽车年会

Thank you

