

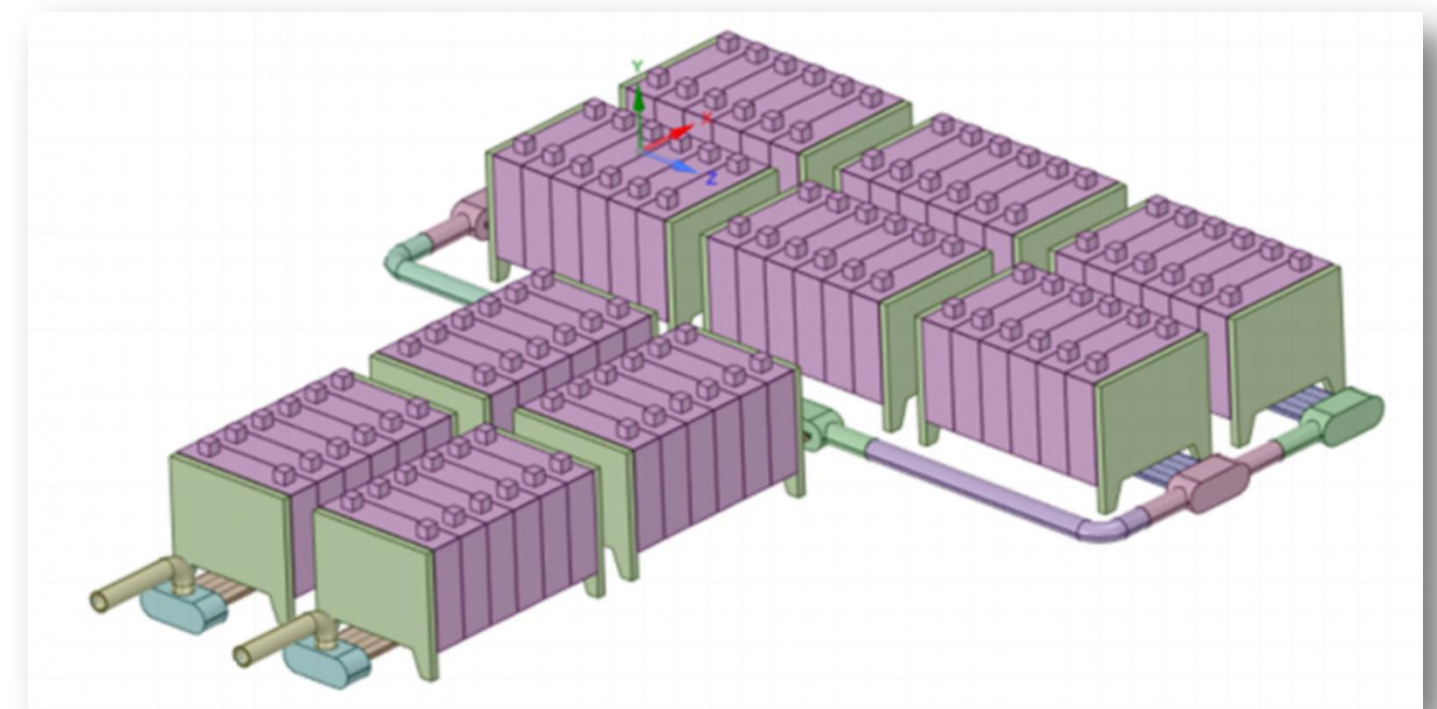


动力电池包热管理的一维和三维高效耦合仿真

IDAJ有限公司
技术部 陈桂杰

目录

1. 项目背景
2. 一维三维耦合解决方案
3. 等效电路模型ECM
4. 三维CFD模型
5. 降阶模型ROM
6. ECM和ROM联合
 - 含CFD验证仿真
7. 总结



项目背景



- 汽车数量剧增，给自然环境及人类的生存和健康带来许多不利影响。随着各国对环境保护、技术进步和能源安全重视程度的加深，大量消耗化石能源的传统汽车正逐渐被取代，以电动化为技术背景的新能源汽车行业迎来发展良机。
- 电池的热管理对于电动汽车（EV）和混合动力电动汽车（HEV）非常重要。动力电池在充放电过程中会产生热量，温度升高会影响电池的特性参数和寿命。数值模拟成为电池设计者和研究人员不可或缺的工具。
- 本文结合ANSYS旗下的CFD软件和系统仿真软件，介绍一种一维/三维耦合分析方法，可以兼顾热设计工程师和电路性能分析工程师的需求，即满足真实的三维热管理精度需求又可考虑电池的一维动态性能。该技术已在海外主机厂成熟采用，其试验结果表明本方法具备精度和效率的综合优势。

耦合解决方案

优势

- 一维仿真模型使用等效电路模型（ECM），可以获得电池的电荷状态（SOC），伏安特性和电池系统的动态响应。
- 三维仿真模型可以提取电池包（模组）热性能的响应曲线。
- 在三维仿真计算结果基础上建立降阶模型（ROM），可以计算不同负载工况下的电池包（模组）的温度变化曲线。
- ROM计算的时间可以达到秒级，与三维仿真达到同样的精度，大幅提高计算效率。ROM模型还可以继续用于系统级仿真中，搭建整个新能源车的热管理系统，用于实现数字双胞胎

耦合解决方案

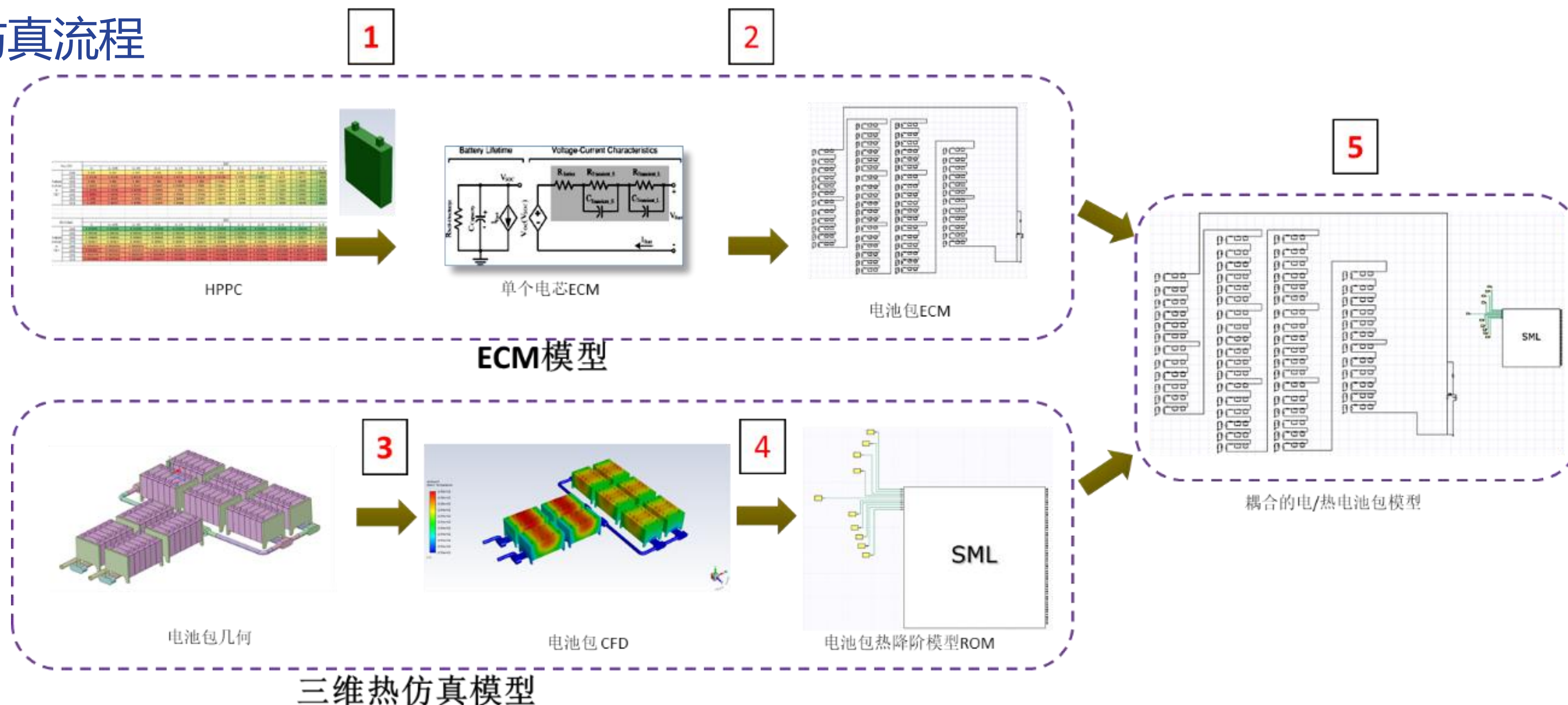
仿真流程



1. 使用Fluent对电芯单体的HPPC实验数据进行拟合，得到等效电路模型（ECM）中各参数与SOC的关系；
2. 使用Twin Builder建立电池单体的等效电路模型（ECM）；进而组成电池包（模组）的等效电路模型（ECM）；
3. 使用Fluent计算三维电池包热仿真模型，提取热源与温度之间的响应曲线；
4. 利用三维计算得到的响应曲线，使用Twin Builder建立降阶模型（ROM）；
5. 降阶模型（ROM）与等效电路模型（ECM）耦合，计算实际负载工况下的电池包温度

耦合解决方案

仿真流程

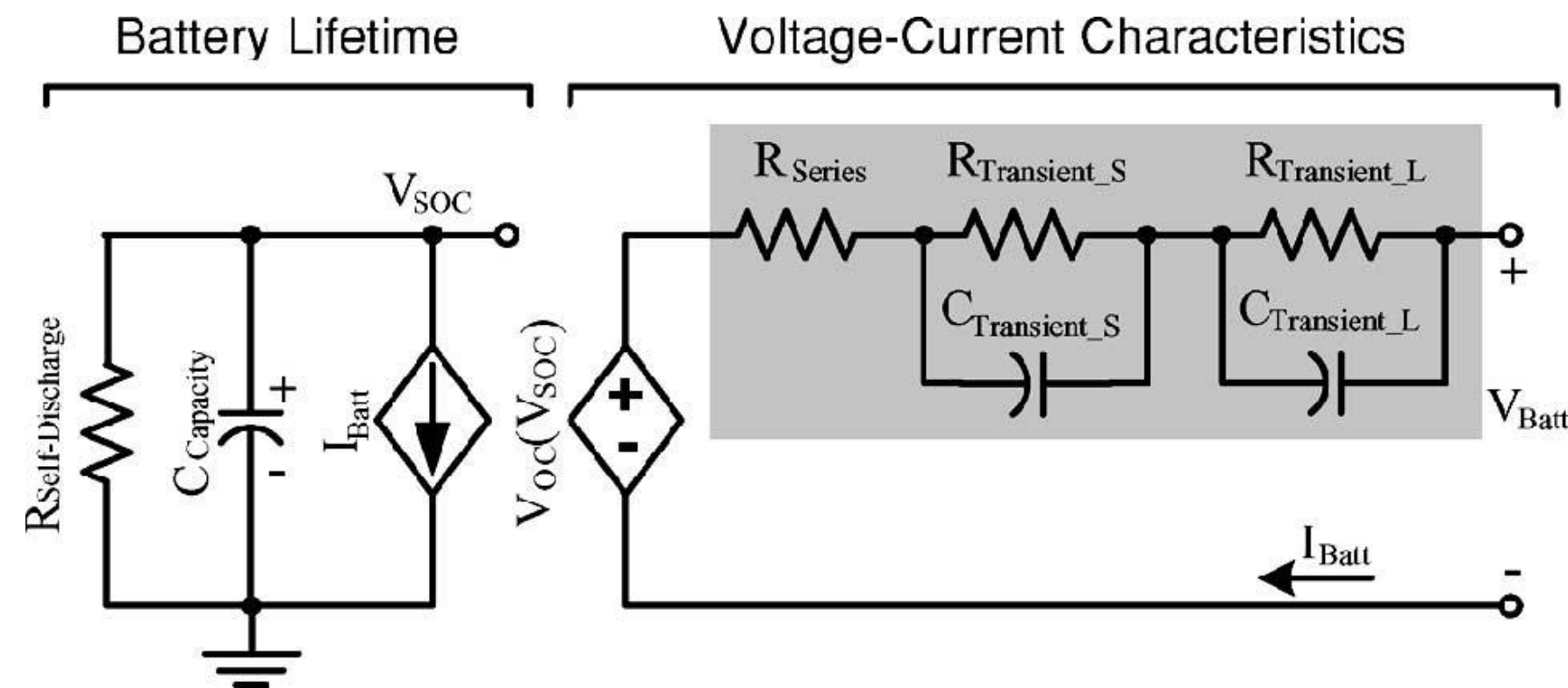


目录

1. 项目背景
2. 一维三维耦合解决方案
- 3. 等效电路模型ECM**
4. 三维CFD模型
5. 降阶模型ROM
6. ECM和ROM联合
 - 含CFD验证仿真
7. 总结

等效电路模型

- 基于Min Chen提出的电池模型，本文用到电池ECM由开路电压源，串联电阻器和两对并联电阻器-电容器（RC）元件组成。
- ECM参数的识别可以通过曲线拟合混合动力脉冲能力特性（HPPC/hybrid pulse power characterization）实验数据来完成。



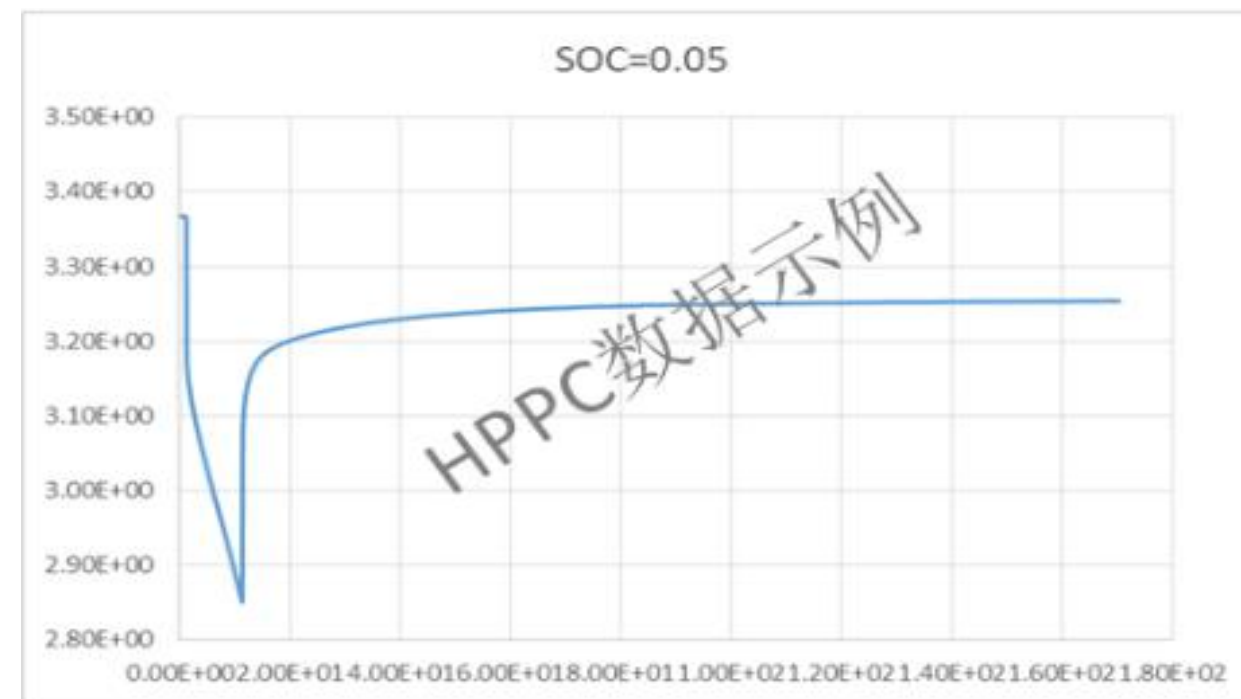
HPPC实验数据

- 本文用到的HPPC实验数据是在某个电流工况下，不同SOC水平下的脉冲放电（或充电）电压随时间的变化曲线

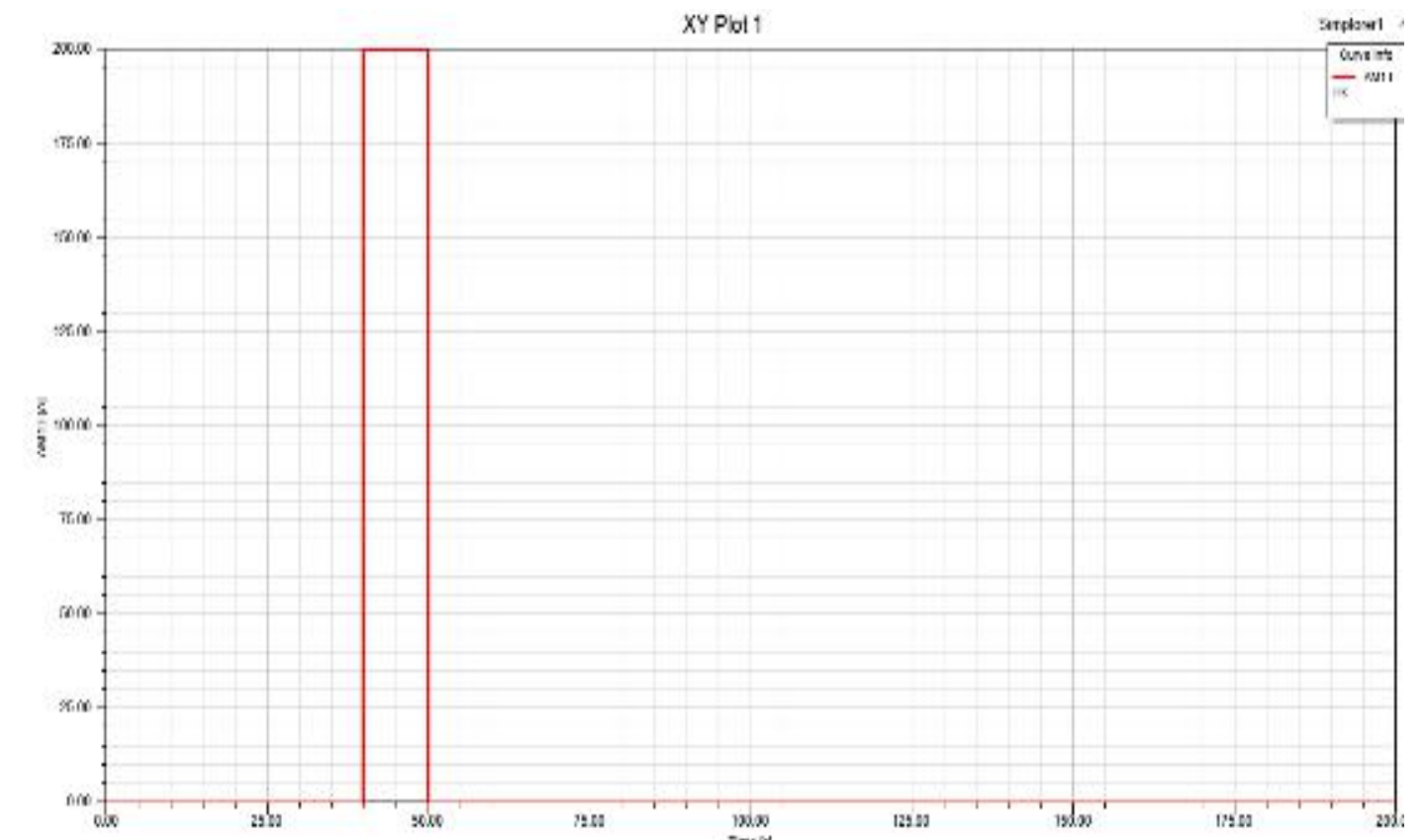
HPPC数据示例

```

SOC: 0.05
I: 200.0
0.00000E+00 3.36681E+00
1.00000E-01 3.36681E+00
2.00000E-01 3.36711E+00
3.00000E-01 3.36681E+00
4.00000E-01 3.36681E+00
5.00000E-01 3.36711E+00
6.00000E-01 3.36652E+00
7.00000E-01 3.36652E+00
8.00000E-01 3.36652E+00
9.00000E-01 3.36681E+00
1.00000E+00 3.36652E+00
1.10000E+00 3.36652E+00
1.20000E+00 3.16948E+00
1.30000E+00 3.16000E+00
1.40000E+00 3.15259E+00
1.50000E+00 3.14637E+00
1.60000E+00 3.14044E+00
1.70000E+00 3.13570E+00
1.80000E+00 3.13037E+00
.....
    
```



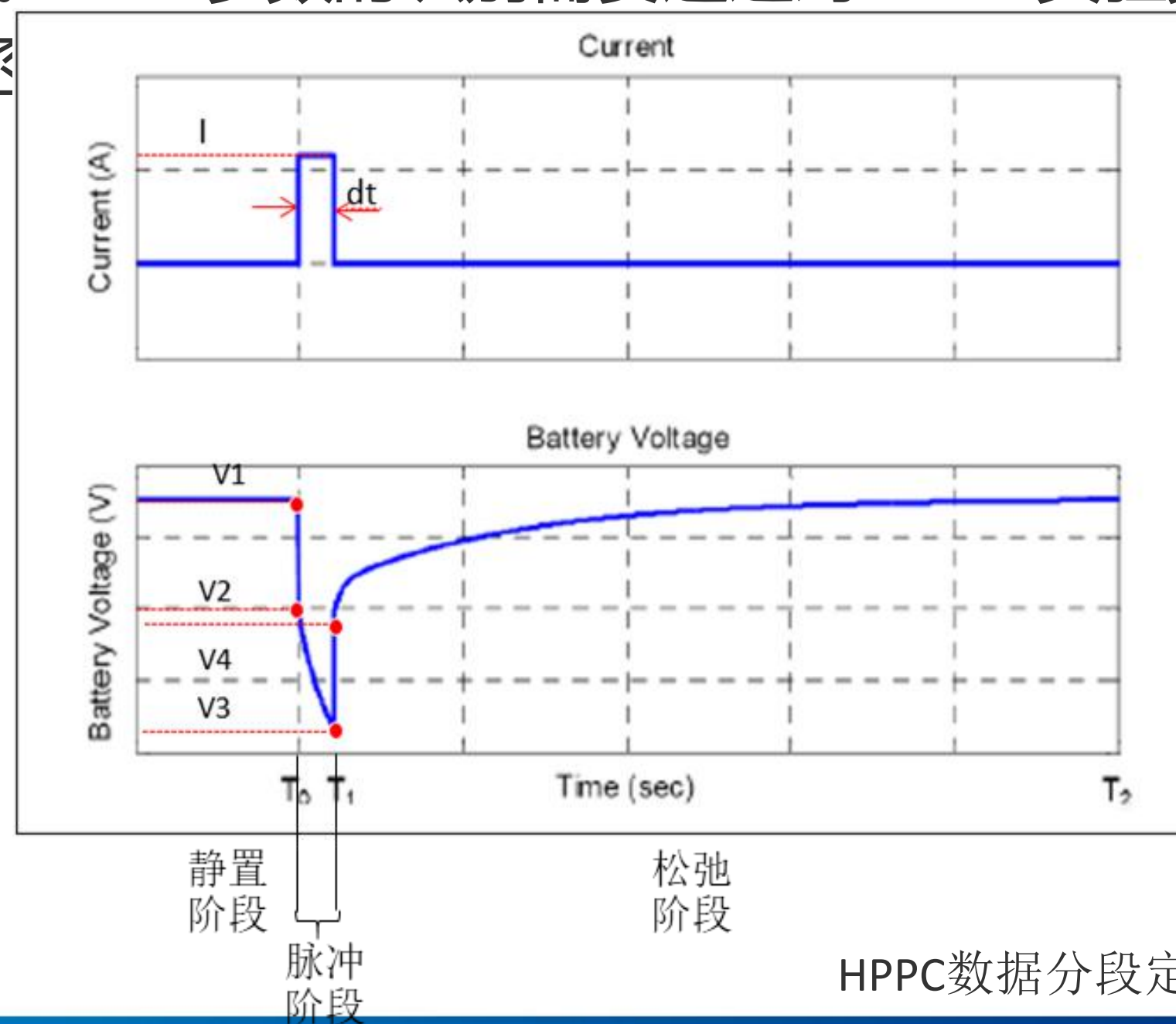
SOC=0.05时电压随时间变化曲线



脉冲电流

实验数据拟合

ECM中包含的6个参数是：开路电压VOC，内阻Rseries，两个RC网络，即两组电阻器-电容器（R_L,C_L, R_S,C_S）。ECM参数的识别需要通过HPPC实验数据的拟合来完成，将6个参数拟合为SOC的函数。



HPPC数据分段定义

实验数据拟合

- Shugang Jiang提出了一种拟合方式, $V_{oc} = V_1$, $R_{series} = (V_1 - V_2)/I$, R_L, C_L , R_S, C_S 是根据松弛段电压数据用最小二乘法拟合得到的, 拟合公式为

$$V(t - T) = V_{oc} - (V_{10}e^{-\frac{t-T}{\tau_1}} + V_{20}e^{-\frac{t-T}{\tau_2}})$$

$$V_{10} = IR_1 \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_1}}\right) \quad \tau_1 = R_1 C_1$$

$$V_{20} = IR_2 \left(1 - e^{-\frac{T}{\tau_2}}\right) \quad \tau_2 = R_2 C_2$$

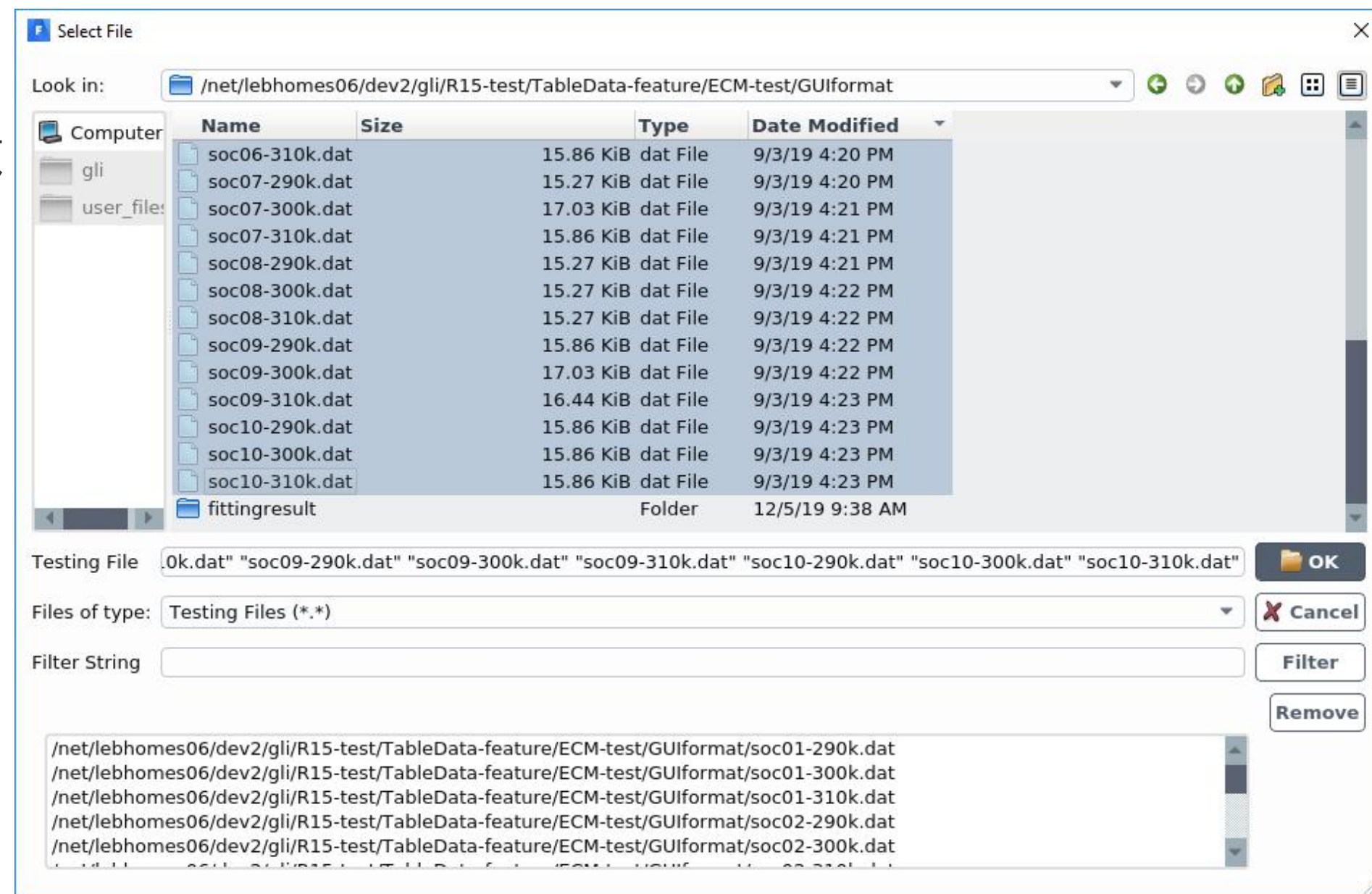
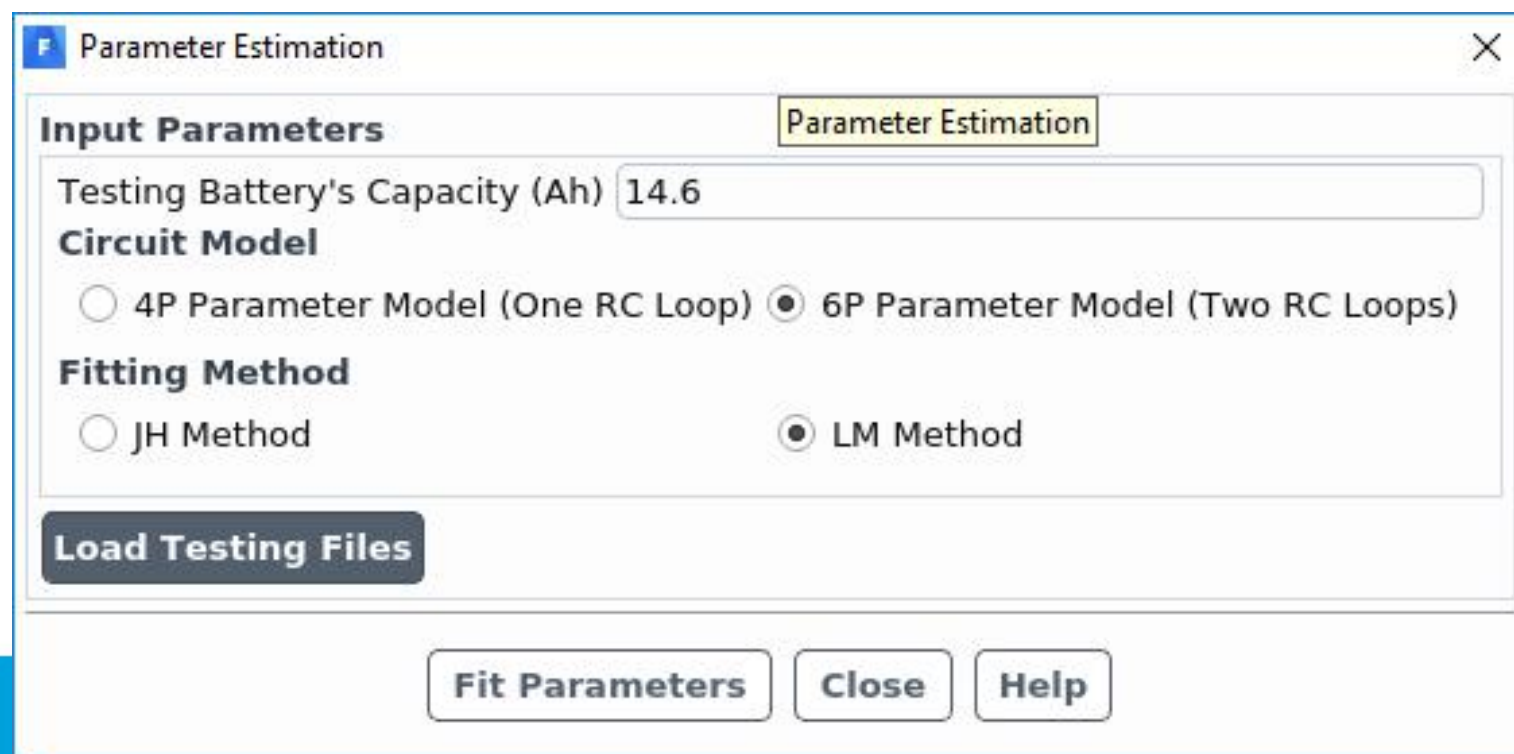
- 非线性的拟合方法Levenberg-Marquardt方法, $V_{oc} = V_1$, 其他参数由脉冲段和松弛段的数据拟合得到, 拟合公式为

$$V(t) = V_{ocv} - R_s I_0 - R_1 I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}}\right) - R_2 I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{R_2 C_2}}\right), \quad t < T$$

$$V(t) = V_{ocv} - R_1 I_0 e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \left(e^{\frac{T}{R_1 C_1}} - 1\right) - R_2 I_0 e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} \left(e^{\frac{T}{R_2 C_2}} - 1\right), \quad t \geq T$$

实验数据拟合 (Fluent 2020R1新功能)

- Fluent中的自动拟合工具 (在MSMD模块下)
 - JH Method, 在Jiang的方法基础上, HuXiao博士做了修正
 - LM Mehtod, 即Levenberg-Marquardt方法
- 等效电路法 (ECM) 和NTGK方法
- 参数估计工具现在有一个用于加载文件和计算参数的GUI前端



实验数据拟合

由于试验数据保密的原因，本文使用由HPPC拟合得到的数据开始

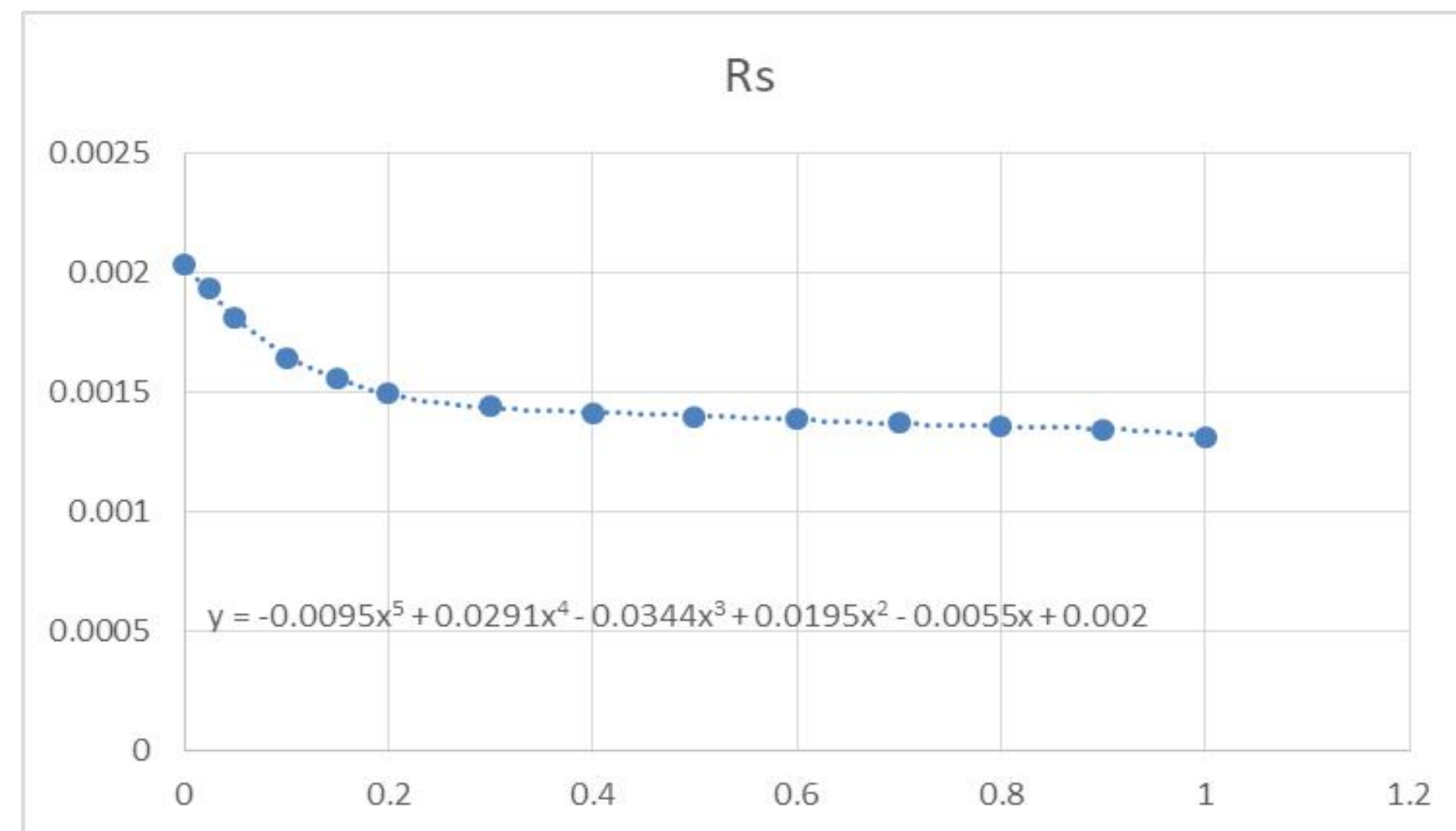
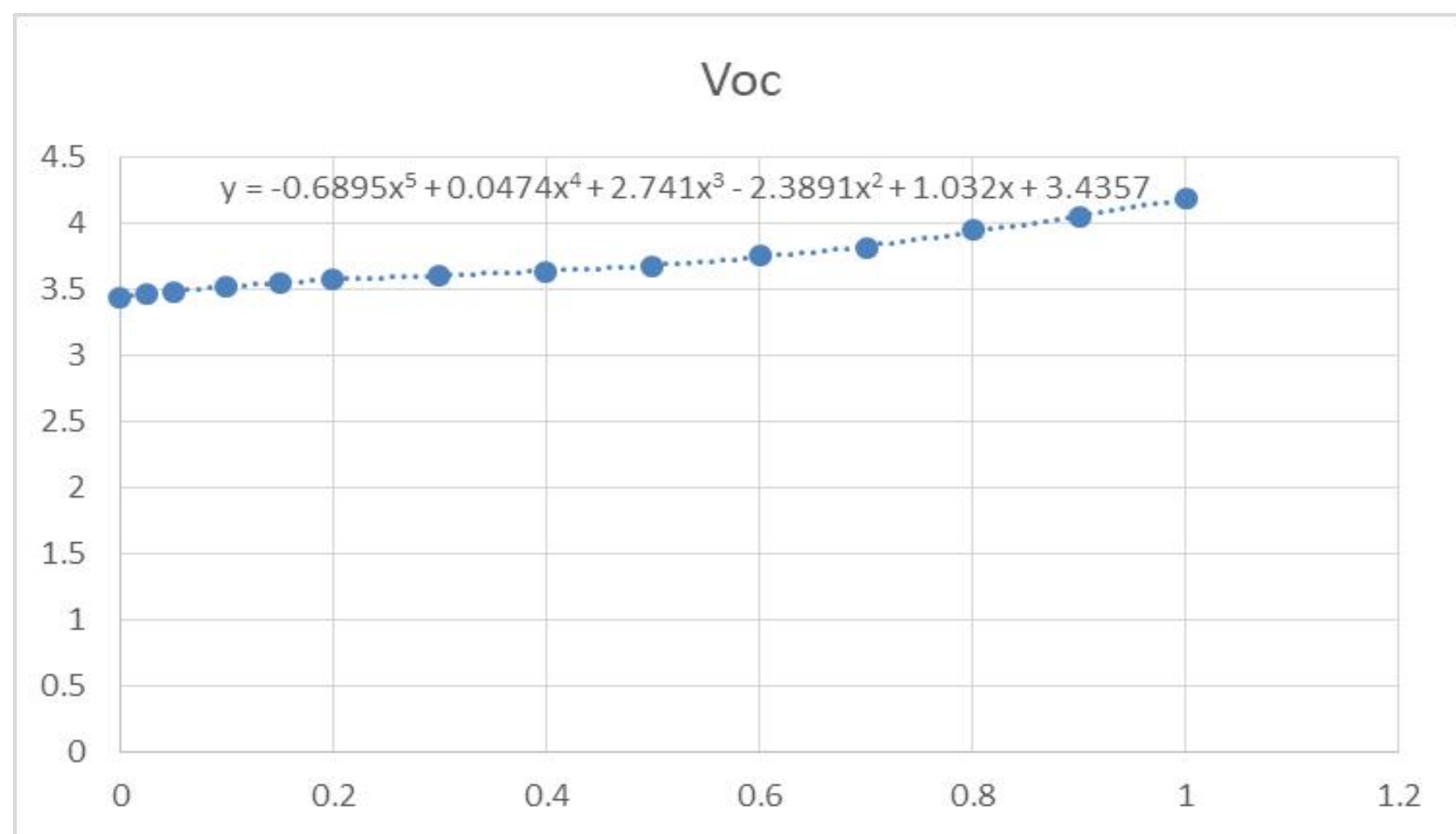
Voc(V)		SOC													
		0	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
tempe ratur e (K)	243	3.615	3.615	3.615	3.615	3.615	3.615	3.615	3.615	3.615	3.615	3.69621	3.88002	3.98213	4.10967
	253	3.47136	3.47136	3.47136	3.47136	3.47136	3.47136	3.47136	3.57523	3.85577	3.6279	3.66771	3.74055	4.02557	4.15285
	263	3.484	3.484	3.484	3.484	3.484	3.484	3.57841	3.6065	3.64002	3.69307	3.78385	3.88729	3.99687	4.17649
	273	3.51637	3.51637	3.51637	3.51637	3.535935	3.5555	3.58613	3.6153	3.64691	3.71019	3.80575	3.90151	4.0071	4.14162
	283	3.43708	3.43708	3.43708	3.50569	3.535	3.56431	3.59403	3.62015	3.65852	3.74089	3.82661	3.92351	4.03109	4.16088
	293	3.40491	3.44328	3.47312	3.51436	3.54506	3.57044	3.59875	3.62535	3.66761	3.75267	3.83692	3.93422	4.04289	4.1719
	303	3.4388	3.45781	3.4794	3.51587	3.54654	3.57407	3.60268	3.62944	3.67568	3.75801	3.80243	3.94012	4.04851	4.17789
	313	3.4375	3.45337	3.47552	3.51478	3.54384	3.57387	3.60619	3.63288	3.67762	3.76205	3.84788	3.948587	4.05479	4.18231

R0(ohm)		SOC													
		0	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
tempe ratur e (K)	243	0.010035	0.010035	0.010035	0.010035	0.010035	0.010035	0.010035	0.010035	0.010035	0.010035	0.009835	0.007192	0.006456	0.006313
	253	0.006102	0.006102	0.006102	0.006102	0.006102	0.006102	0.006102	0.007093	0.006803	0.007152	0.007054	0.00688	0.004855	0.004551
	263	0.004626	0.004626	0.004626	0.004626	0.004626	0.004626	0.005595	0.005614	0.005375	0.005194	0.005071	0.005024	0.005016	0.003835
	273	0.003813	0.003813	0.003813	0.003813	0.003813	0.004073	0.003845	0.00361	0.003468	0.003365	0.003325	0.003308	0.003319	0.0033
	283	0.00243014	0.00243014	0.00243014	0.00313075	0.00299709	0.00286343	0.00263065	0.00250752	0.00242756	0.0023863	0.00235596	0.00233757	0.00232742	0.00230914
	293	0.001401	0.00202473	0.00229079	0.00211884	0.00192716	0.00180285	0.00168469	0.00163049	0.00158975	0.00157485	0.00155717	0.00154183	0.00152979	0.00151018
	303	0.00203798	0.00193232	0.00181192	0.00164539	0.00155474	0.00149851	0.00144286	0.00141364	0.00139463	0.00138883	0.00137249	0.00135783	0.00134469	0.00131419
	313	0.00158904	0.00151438	0.00146625	0.00141371	0.00138067	0.00135516	0.00133564	0.00132131	0.00132044	0.00132848	0.00131953	0.00130881	0.0013	0.00128433

部分拟合数据

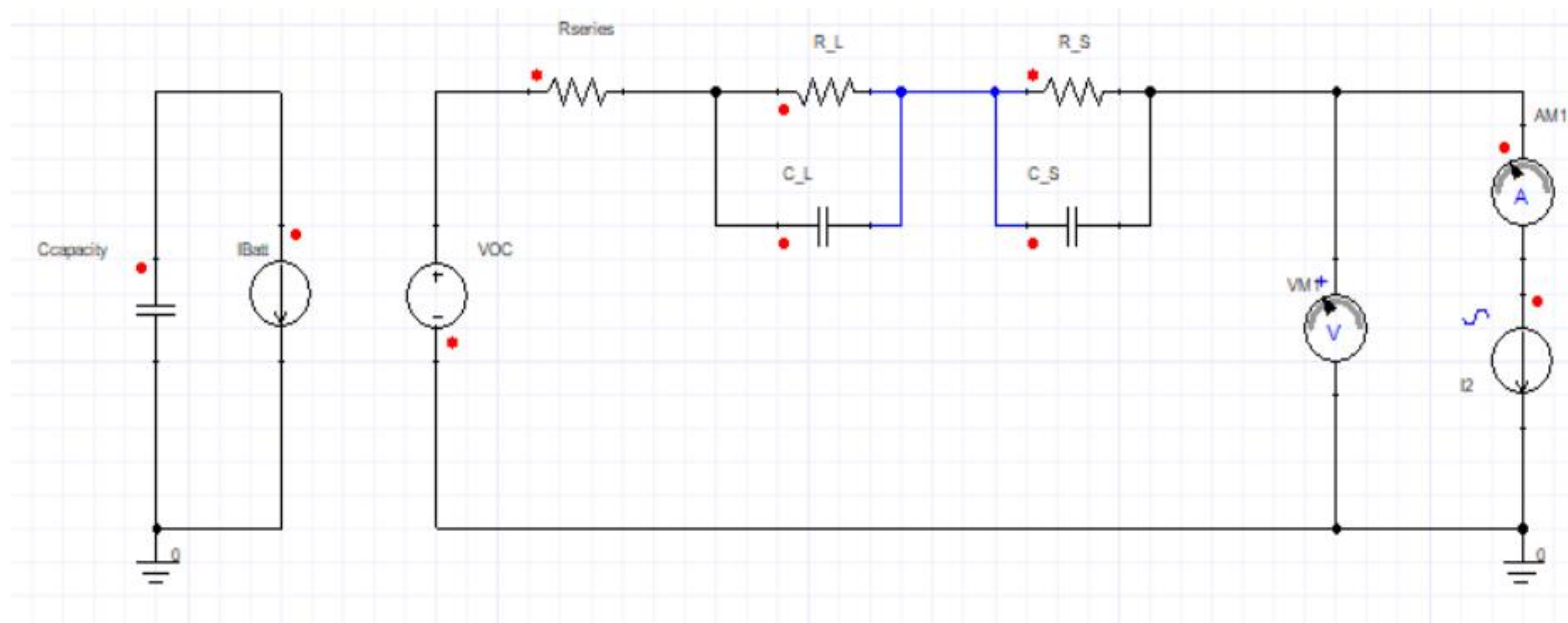
实验数据拟合

部分拟合多项式



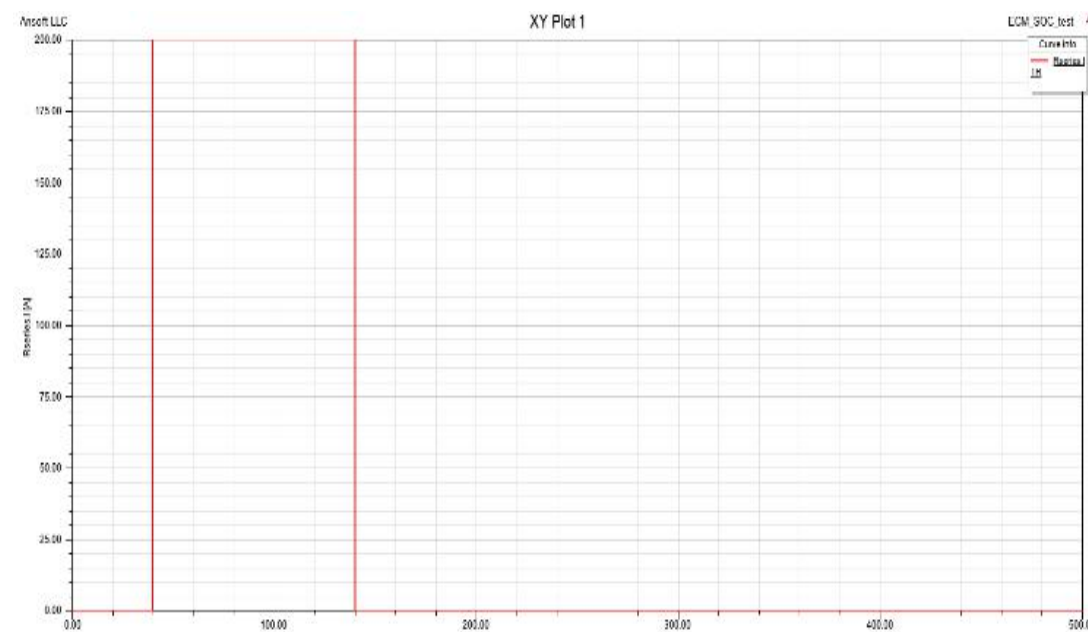
电池单体等效电路模型

- 电芯容量为57Ah，左侧电流源IBatt的电流等于右侧Rseries上的电流
- VOC, Rseries, R_L, C_L, R_S, C_S这6个参数都设定为上述拟合的SOC的函数，VM1为电压表，AM1为电流表，I2表示外部负载。

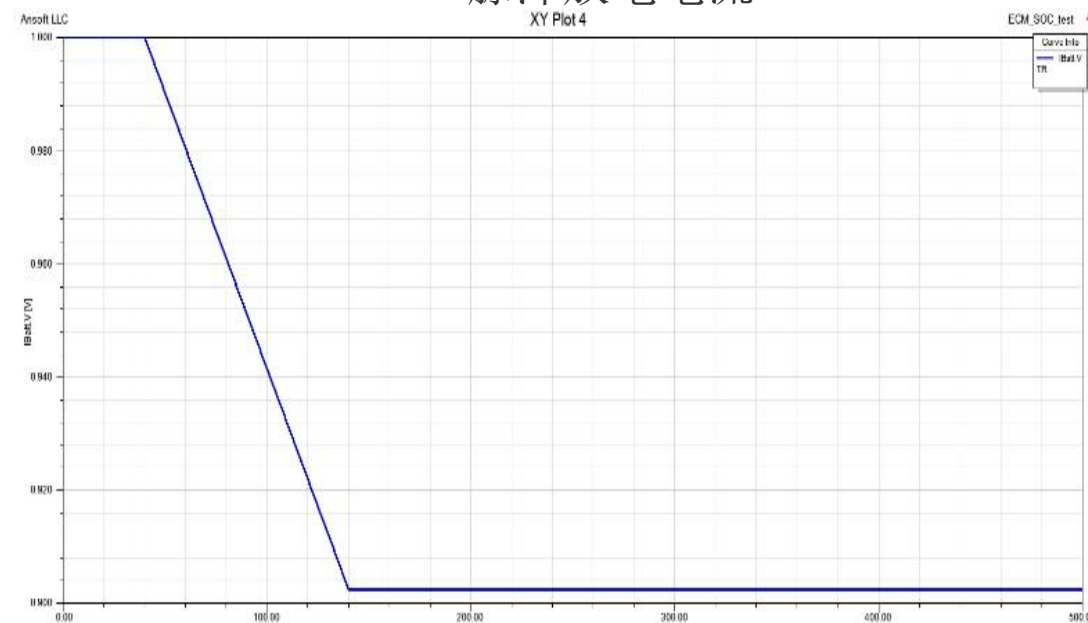


电池单体等效电路模型

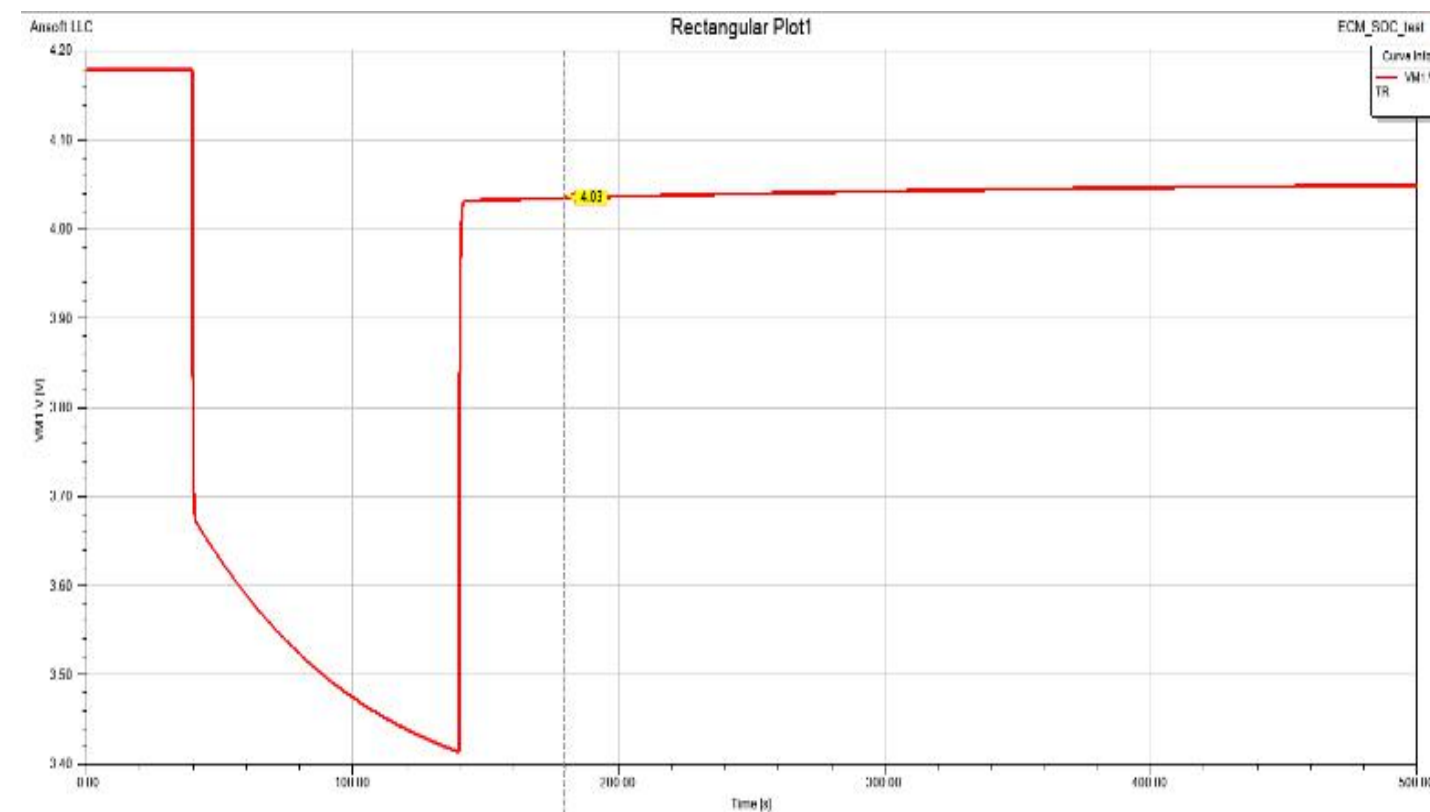
当以200A的电流脉冲放电100s时，SOC和电路中实际电压的变化如图所示



脉冲放电电流



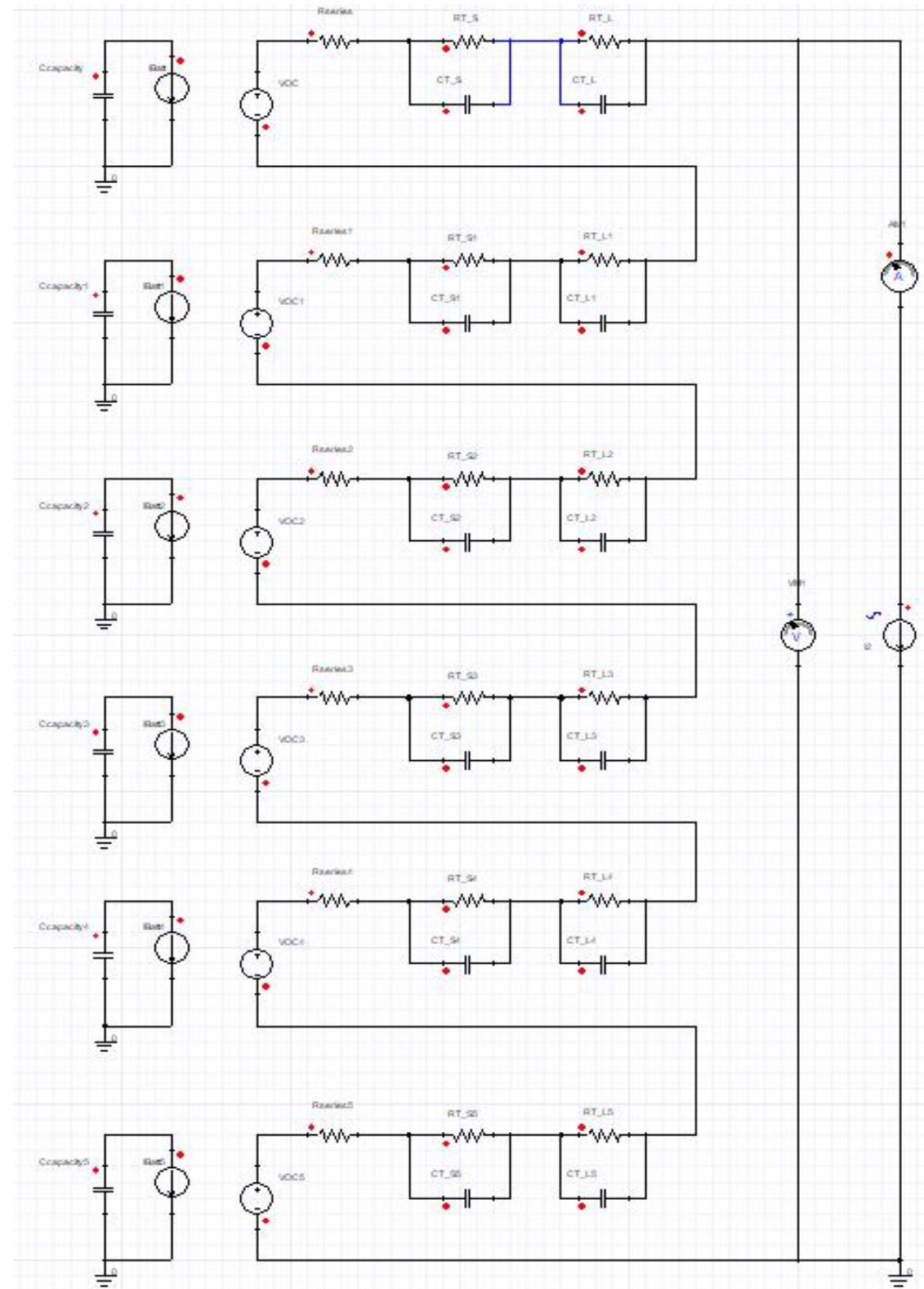
SOC变化



电路中实际电压变化

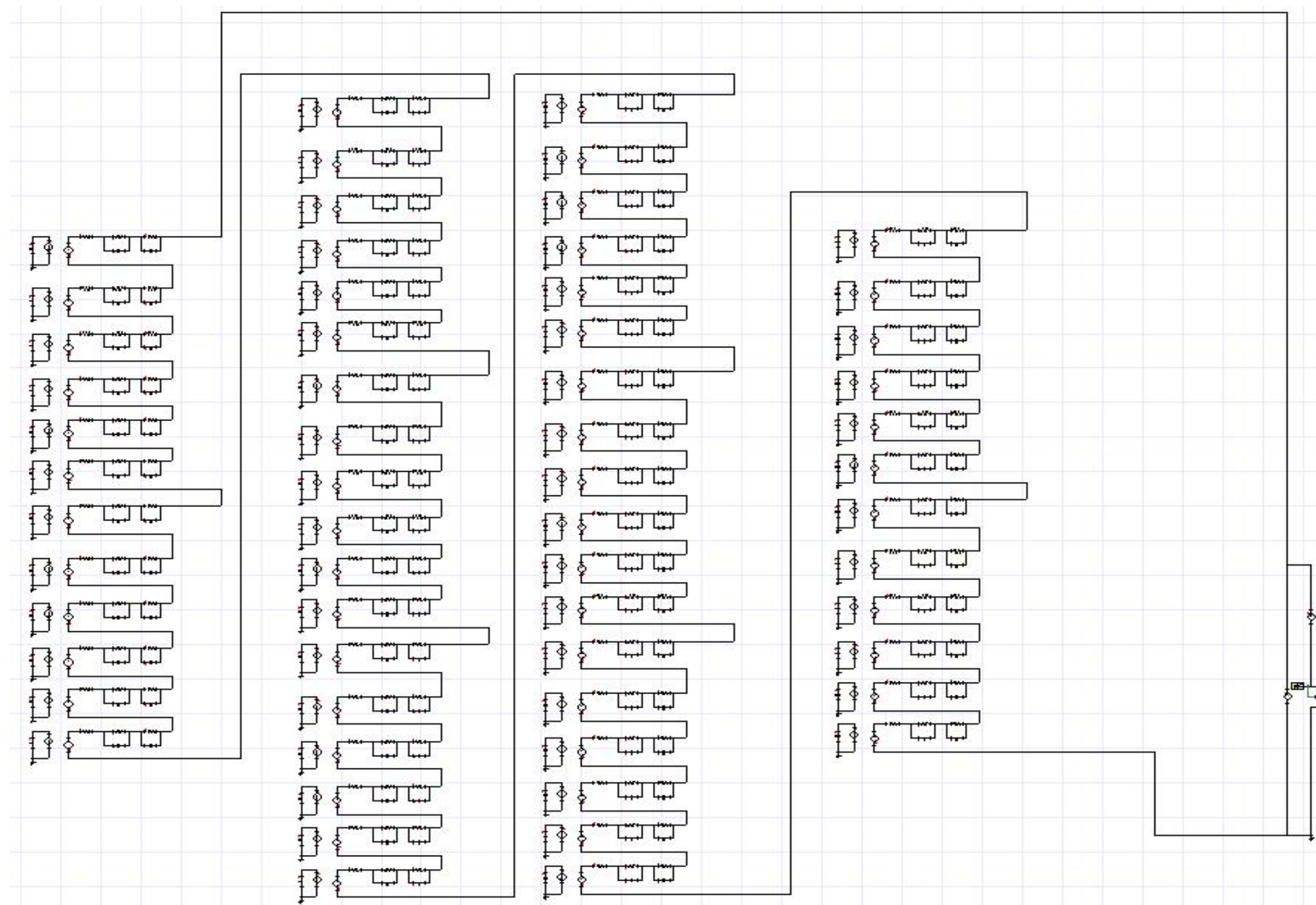
电池模组等效电路模型

每个模组中有6个电池单体，电池间关系为串联



电池包等效电路模型

电池包由10个模组组成，模组间也是串联关系。



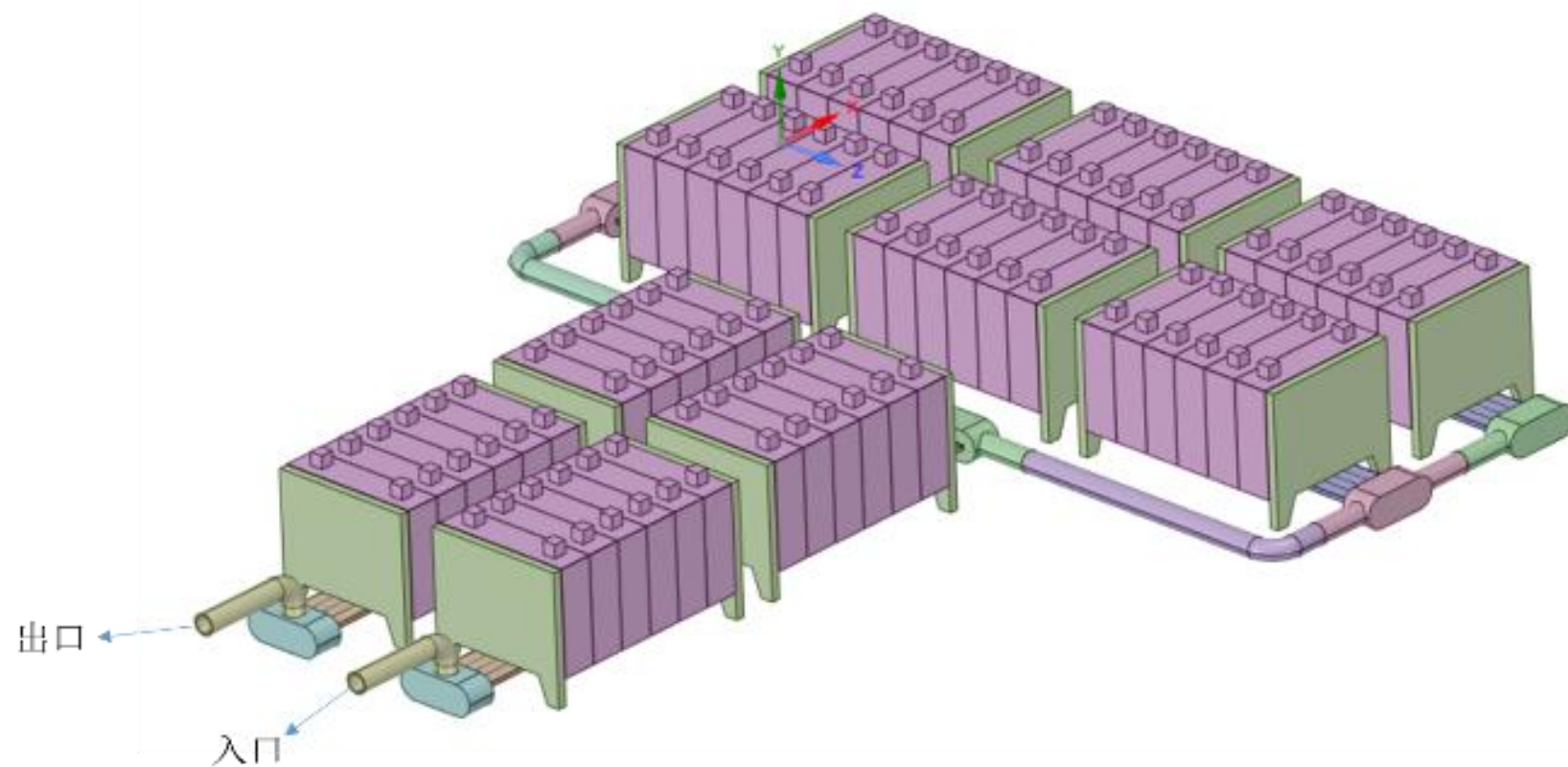
目录

1. 项目背景
2. 一维三维耦合解决方案
3. 等效电路模型ECM
- 4. 三维CFD模型**
5. 降阶模型ROM
6. ECM和ROM联合
 - 含CFD验证仿真
7. 总结

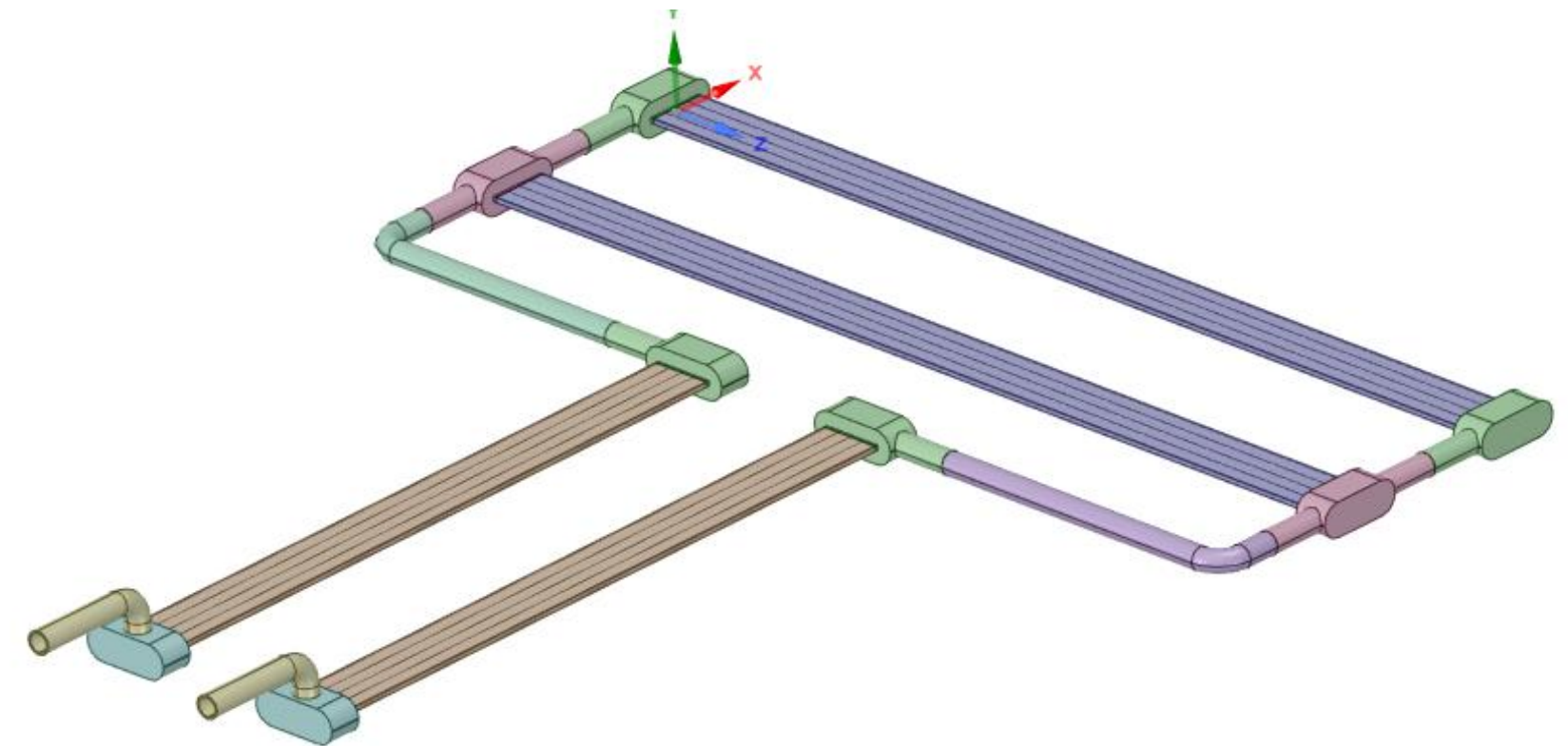
CFD基础模型设定

电池包及冷却回路几何模型

- 这里CFD基础模型的计算用于提取降阶模型的所需的阶跃响应曲线。



电池包几何模型



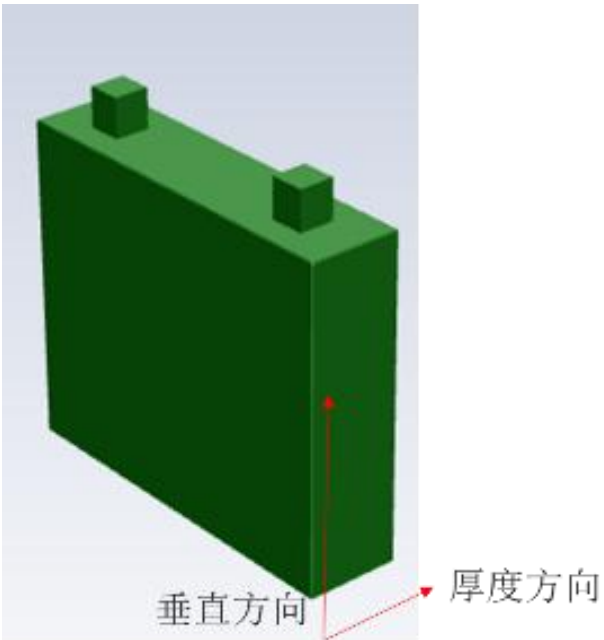
电池包冷却回路几何模型

CFD基础模型设定

- 冷却液为水和乙二醇的混合物，入口流量为10L/min，冷却液温度20℃。冷却管路材料为铝

	密度kg / m^3	比热J / Kg-K	导热系数w / m-K	粘度Kg / m-s
冷却液	1075.403	3261.963	0.377	0.00463
铝	2719	871	202.4	---
电芯	2600	1000	各向异性	---

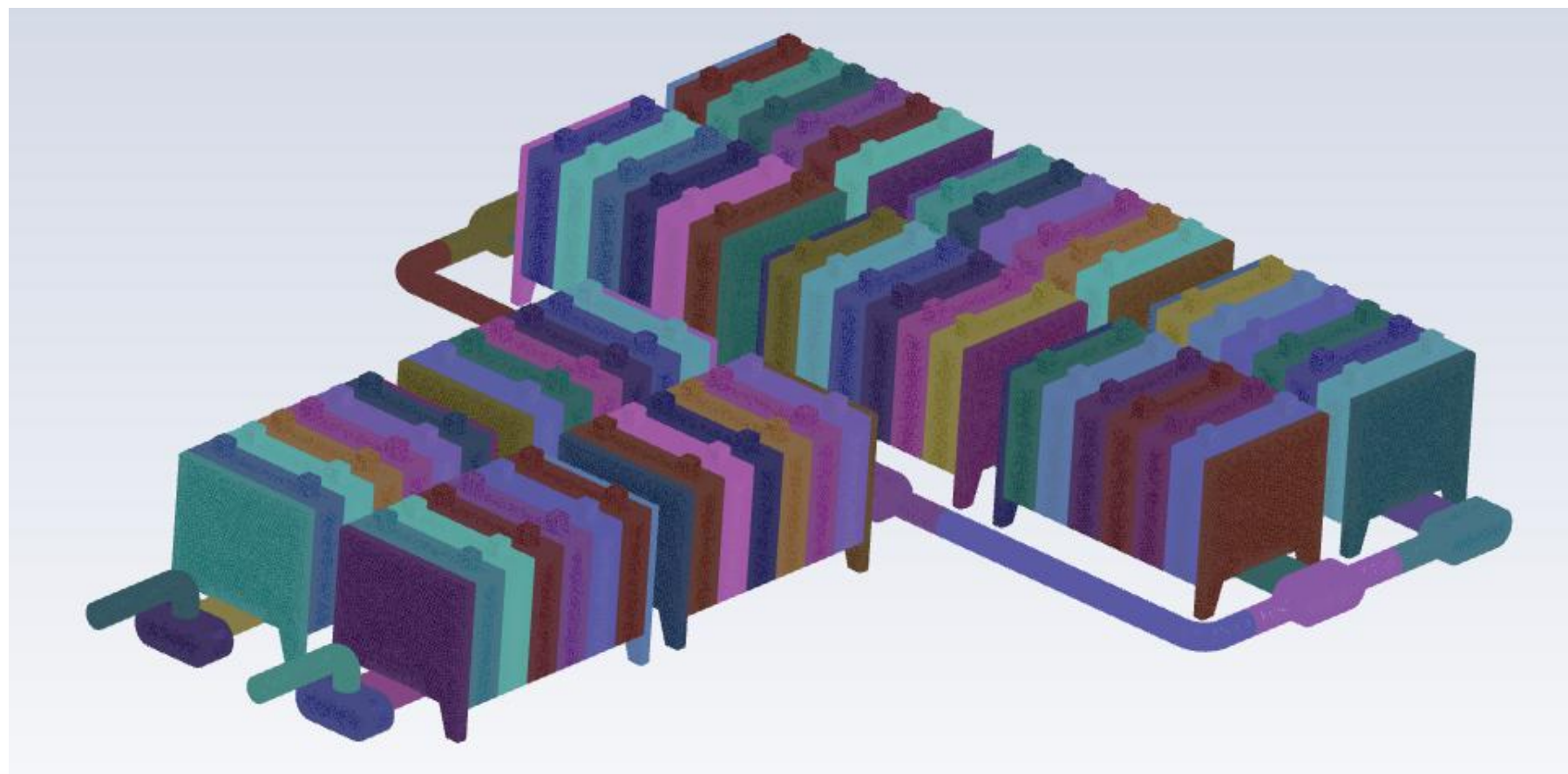
- 电芯材料的导热系数为各向异性



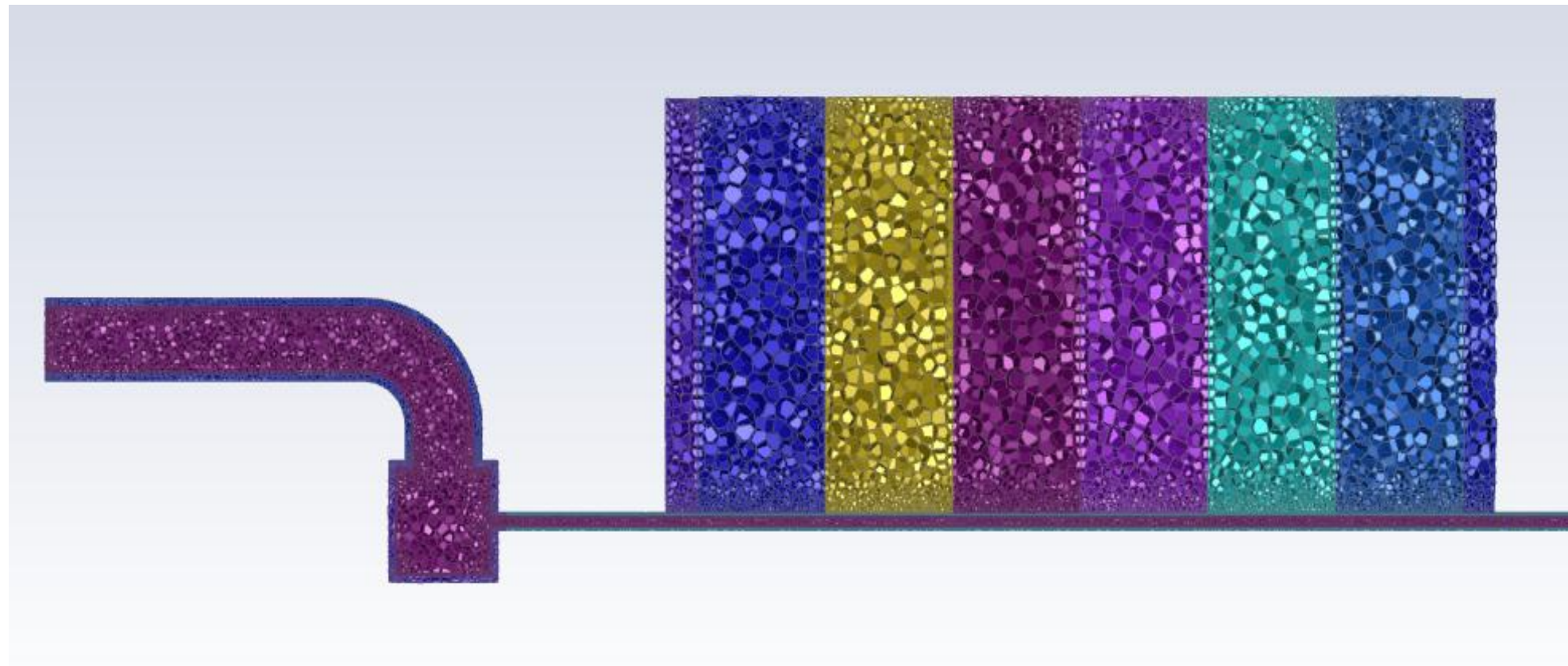
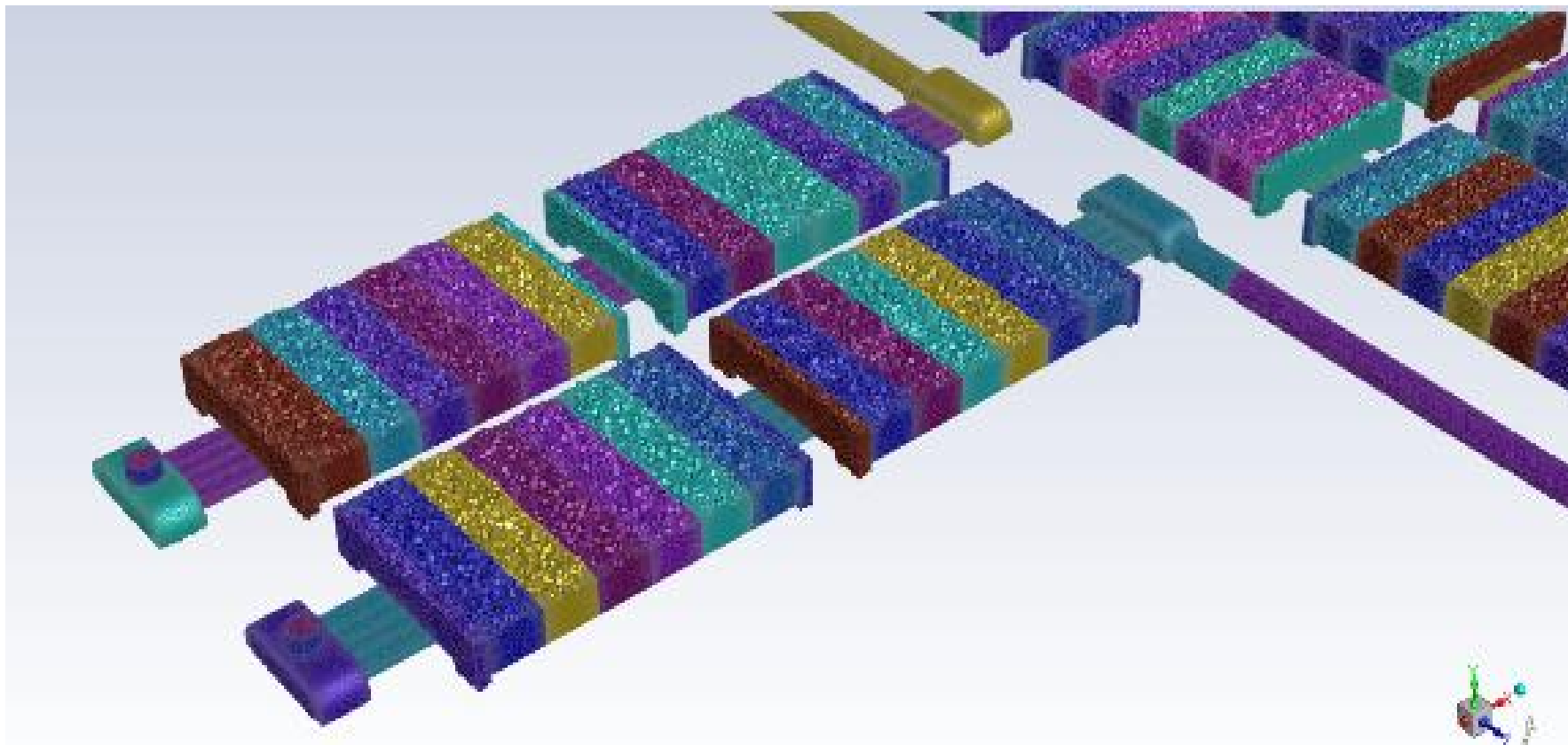
电芯导热系数	
方向	导热系数
厚度方向	4W/(mK)
垂直方向	10W/(mK)
第三方向	12W/(mK)

CFD网格模型

- 初始几何模型使用ANSYS的几何处理工具SpaceClaim中进行几何预处理，并处理各个域中间的拓扑连通关系。
- 使用ANSYS Fluent全新的密闭网格工作流程处理表面，该流程自动化程度高，流程化的操作方式简单易用，网格质量非常好。
- 电池包模型面网格数量308万，体网格类型为多面体网格，体网格数量为567万。



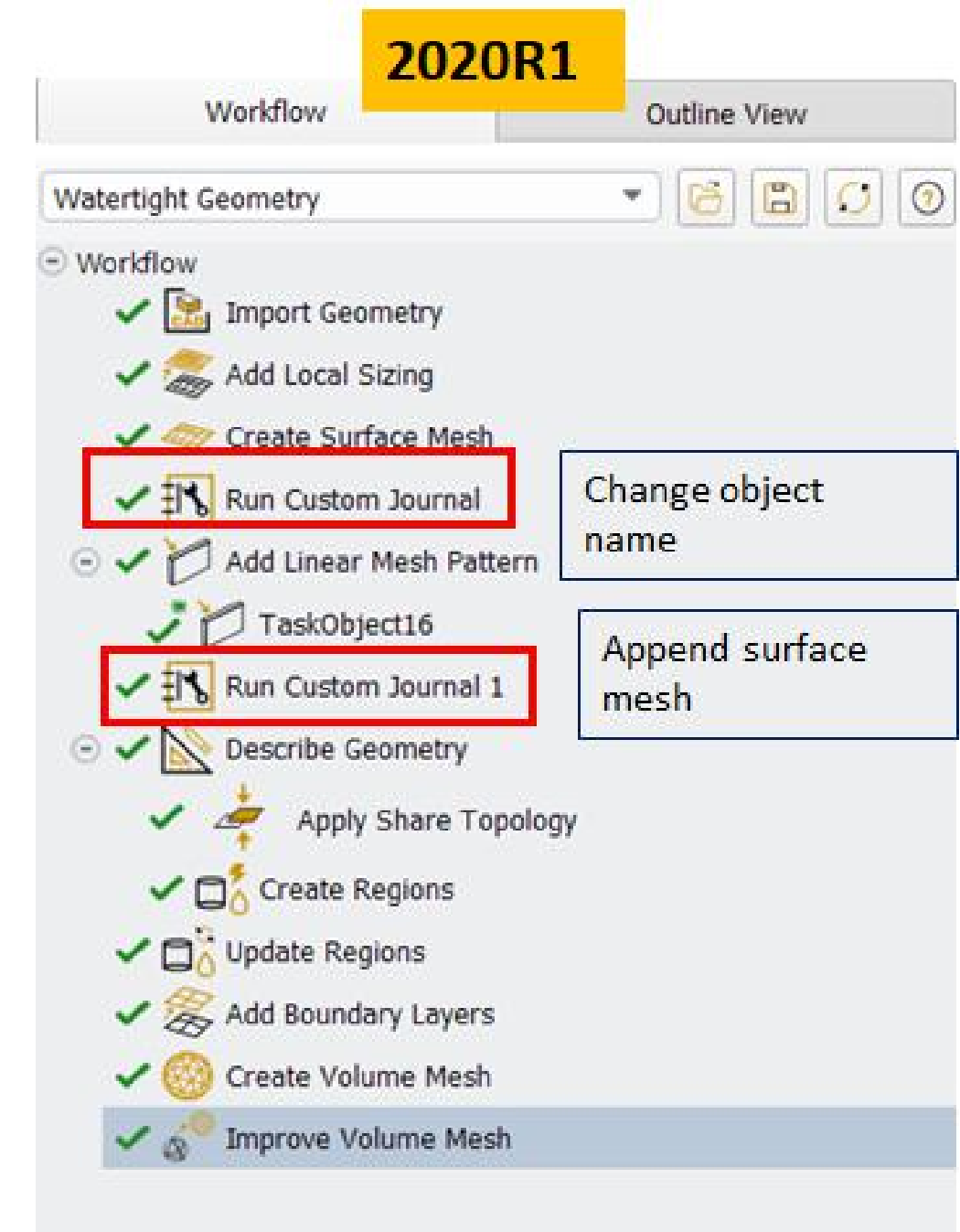
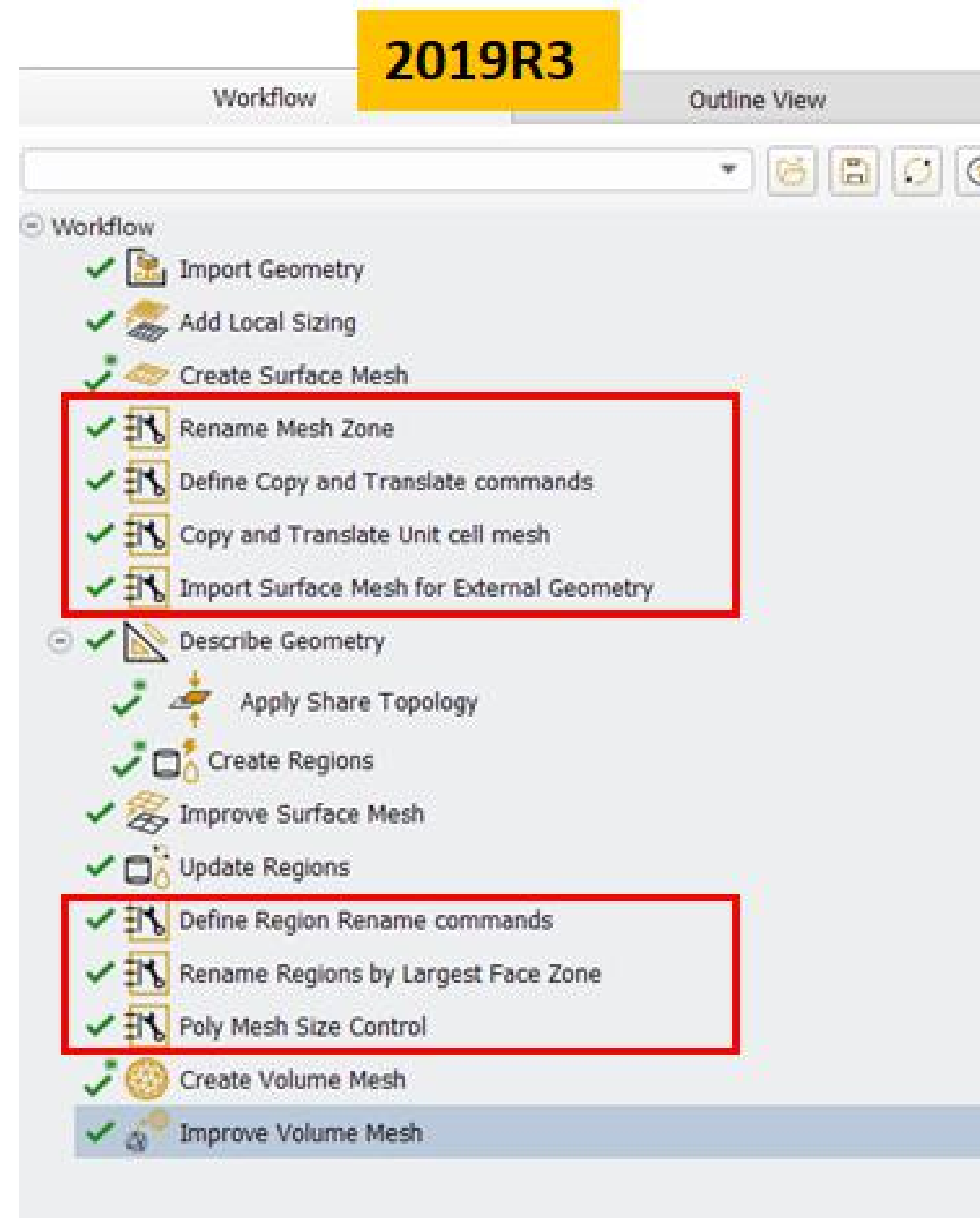
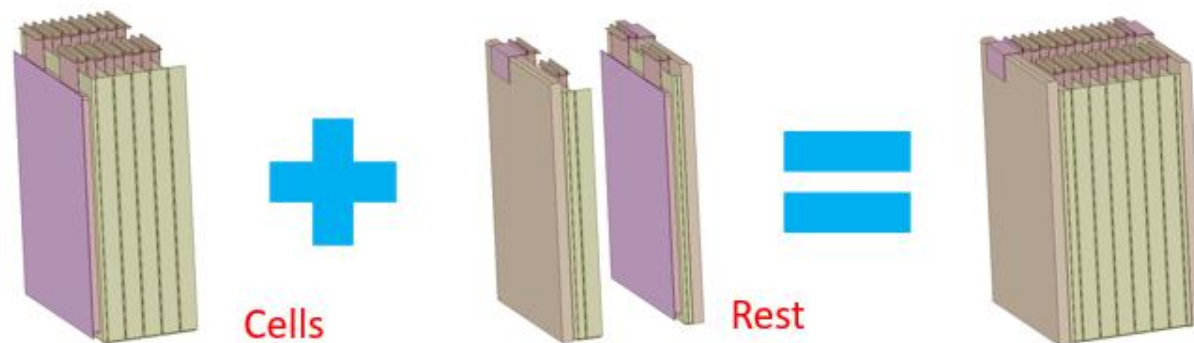
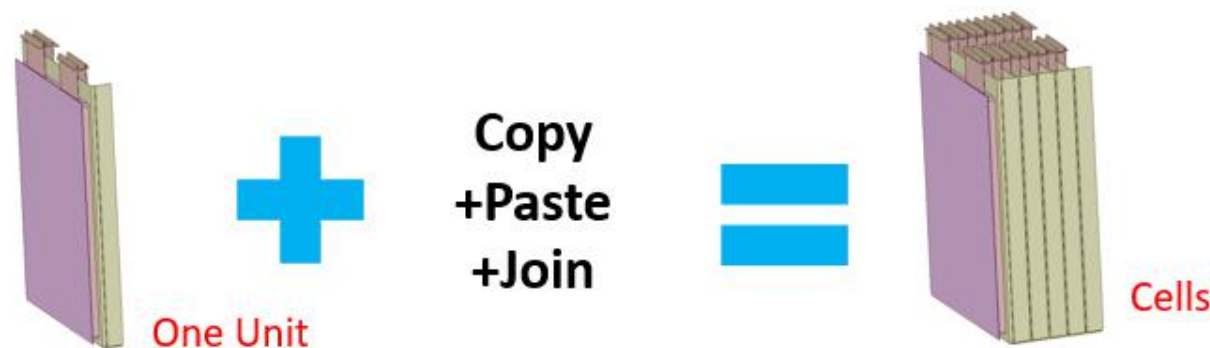
CFD网格模型



三维CFD体网格模型局部和截面示意图

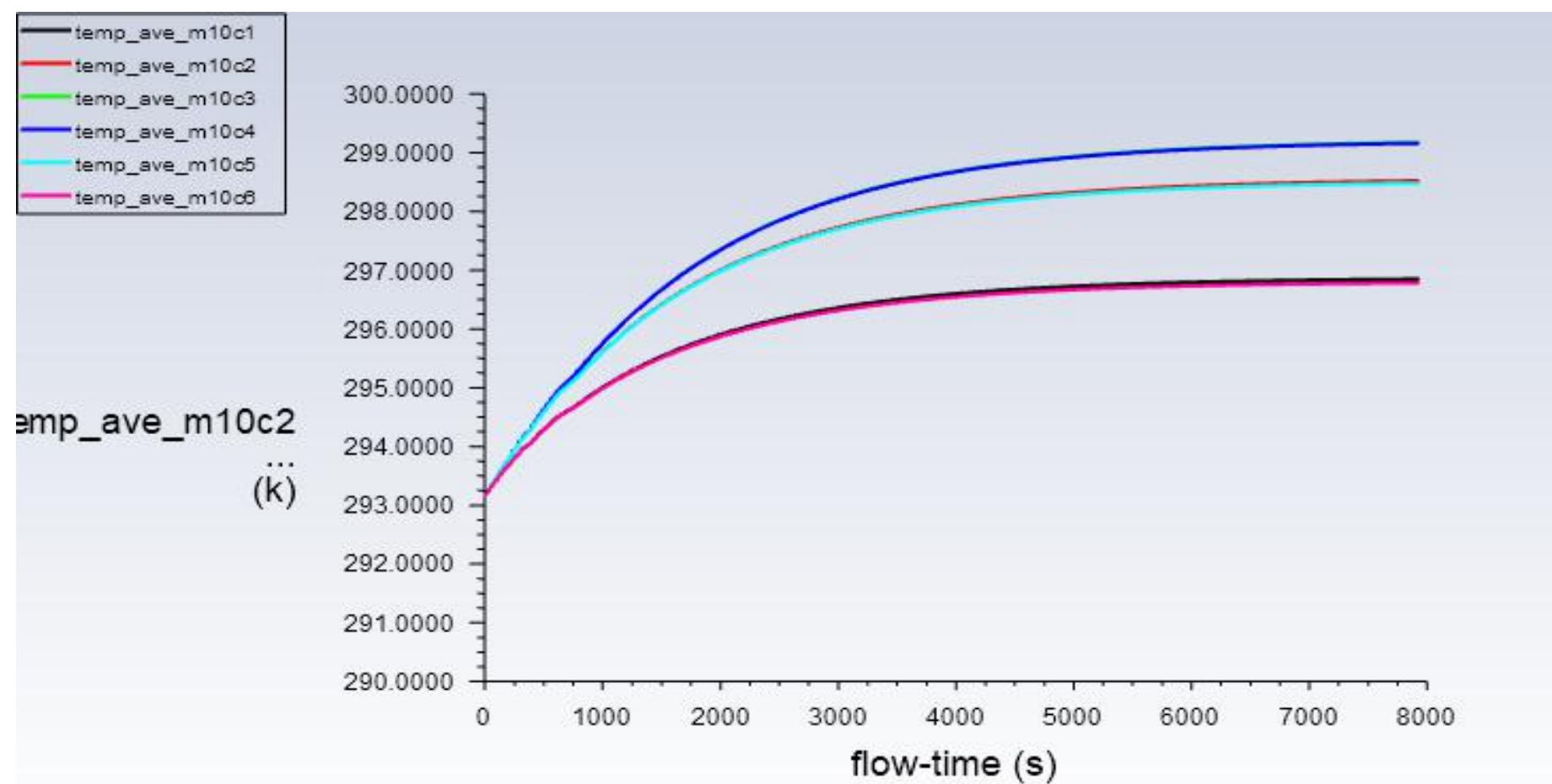
Fluent网格流程（2020R1新功能）：密闭网格流程中的网格阵列

- 在Watertight Workflow中创建parts的线性阵列
- 处理电池拓扑的专用选项



CFD基础模型结果

- 在不同的电芯上定义恒定热源，记录电芯上的体平均温度的变化曲线。由此会得到一系列的响应曲线



三维CFD模型提取出的部分响应曲线

对于重复的CFD基础模型计算，ANSYS Fluent有相应的ACT工具包RomExtract，可以通过Parameters工具定义输入和输出参数，自动完成一系列基础模型的计算，并自动提取出所有阶跃响应曲线，可以直接用于生成降阶模型。

目录

1. 项目背景
2. 一维三维耦合解决方案
3. 等效电路模型ECM
4. 三维CFD模型
- 5. 降阶模型ROM**
6. ECM和ROM联合
 - 含CFD验证仿真
7. 总结

降阶模型ROM

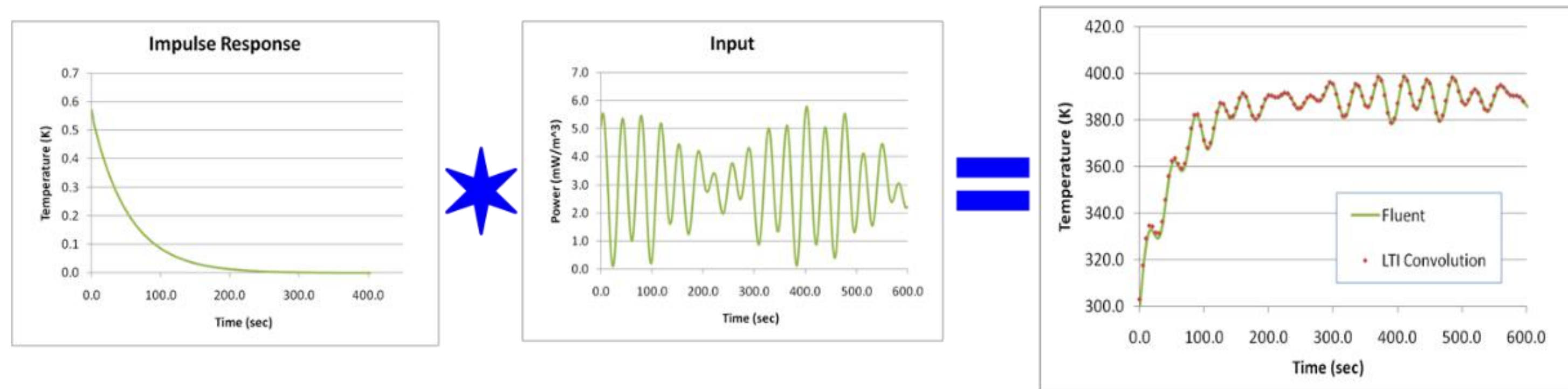
优势

- 电池热管理的三维CFD仿真结果精确，但是对于电池模组或电池包来说，网格量大，计算耗时长。
- 对于瞬态的热分析，尤其是分析很多种瞬态工况，往往需要多次重复这种大规模的计算。
- 降阶模型可以得到和三维CFD仿真同样的精度，但计算时间可以降低到秒级，可以大幅提升仿真效率。

降阶模型ROM

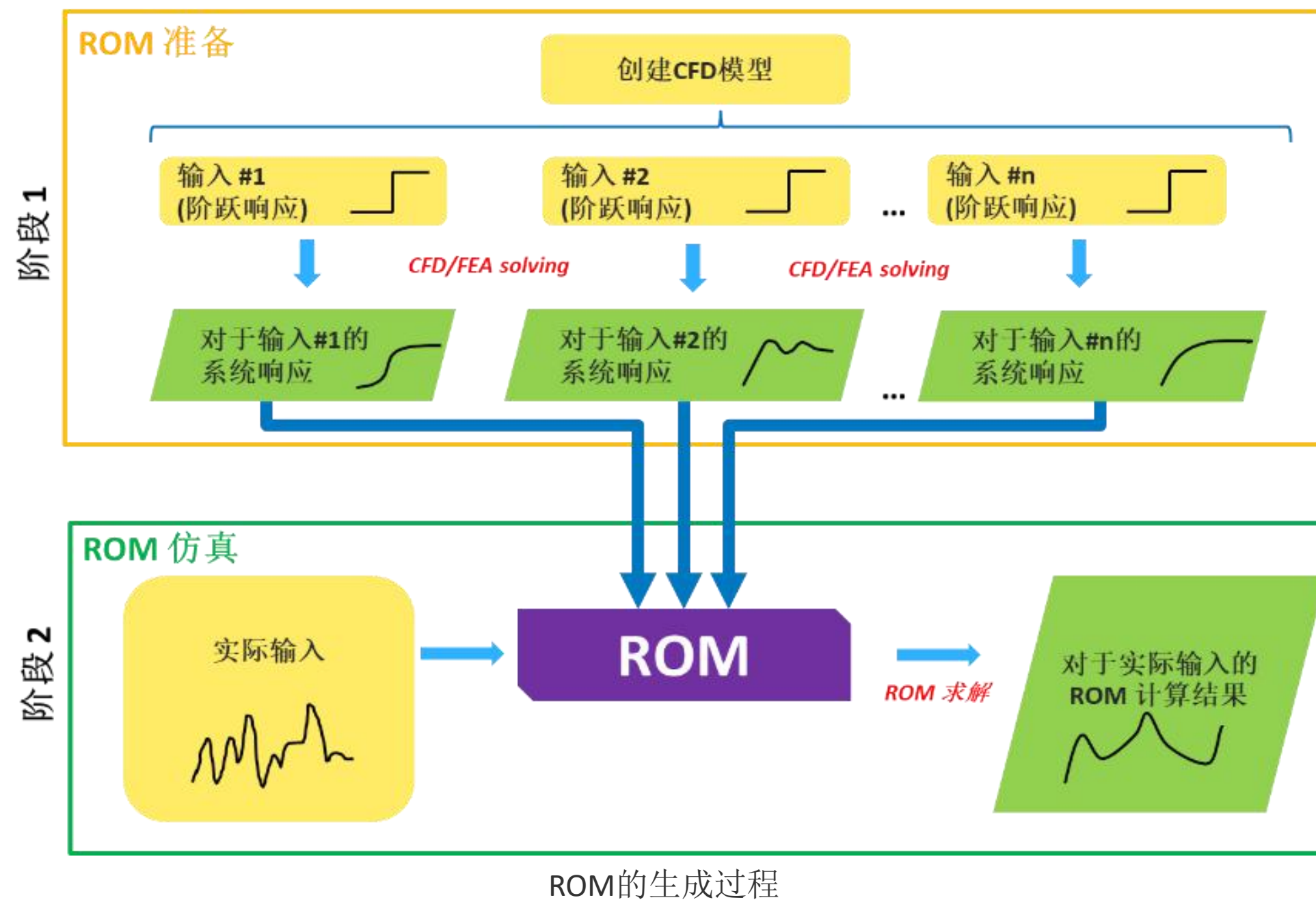
原理

- 本文用到的降阶模型是LTI ROM (Linear Time Invariant, Reduce Order Model) 。
- 当系统是一个线性时不变系统时，如果两个LTI系统有相同的脉冲响应时，两个系统就是等价的。LTI ROM降阶的数学本质是计算卷积。
- 卷积运算利用脉冲响应和输入，然后直接计算输出。不需要几何，网格或其他任何信息。
- LTI系统由脉冲响应表征。阶跃响应对时间的导数就是脉冲响应，因此LTI系统的输入就完全有阶跃响应表征。



降阶模型ROM

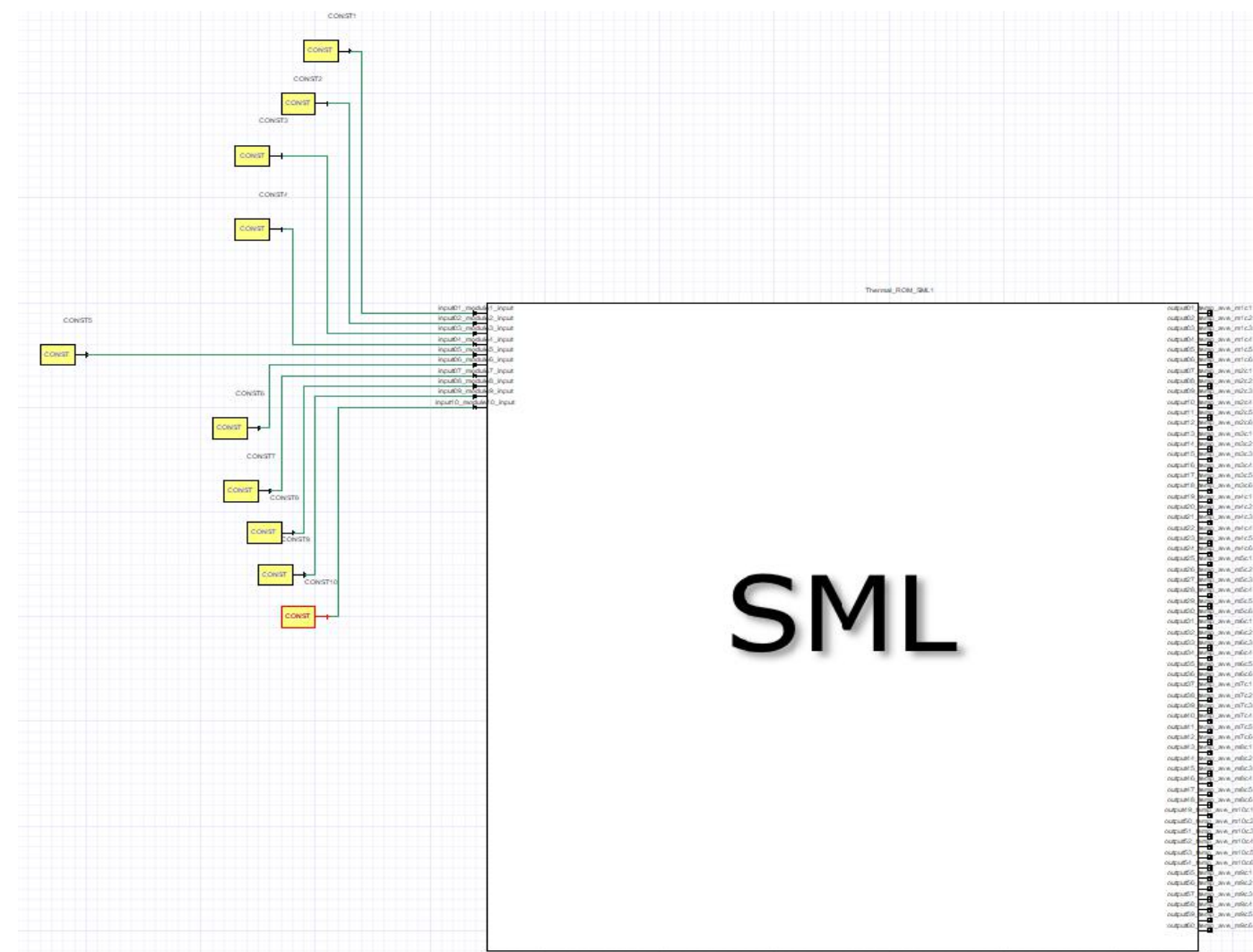
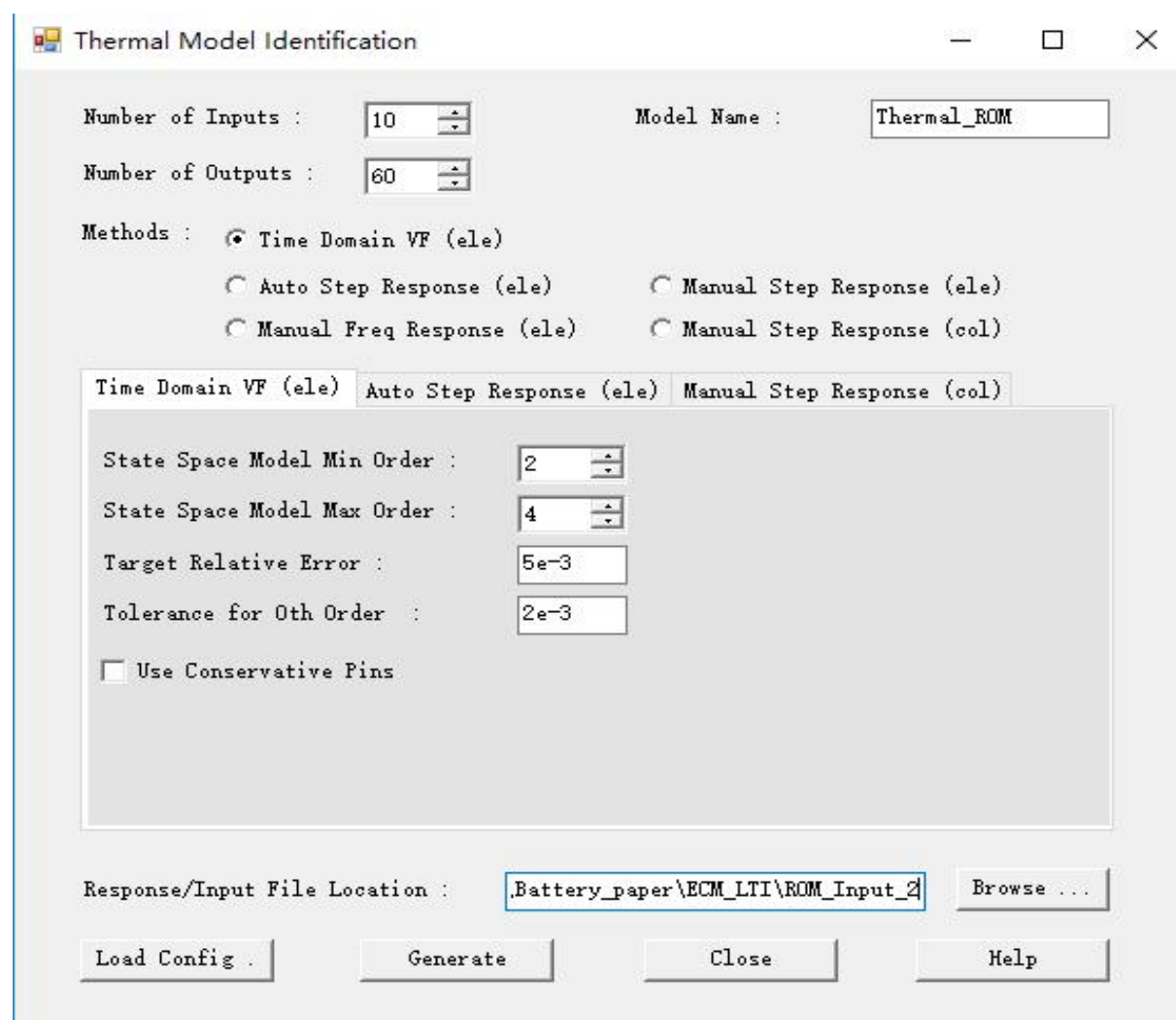
- 确定LTI系统需要的参数就需要确定阶跃响应，阶跃响应就是由三维CFD模型计算的。这就是一维和三维的耦合。



使用ROM，热问题就被处理成一个系统，输入是热源，输出是温度。

降阶模型建立

- 在Twin Builder软件中使用ROM生成器，利用CFD计算得到的一系列响应曲线，可以自动生成降阶模型。



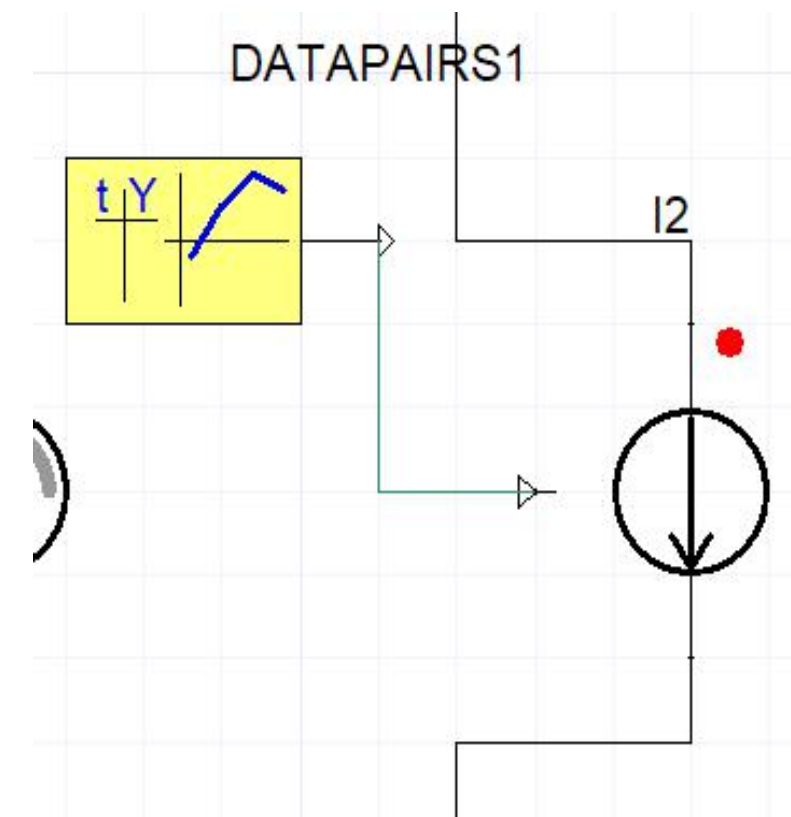
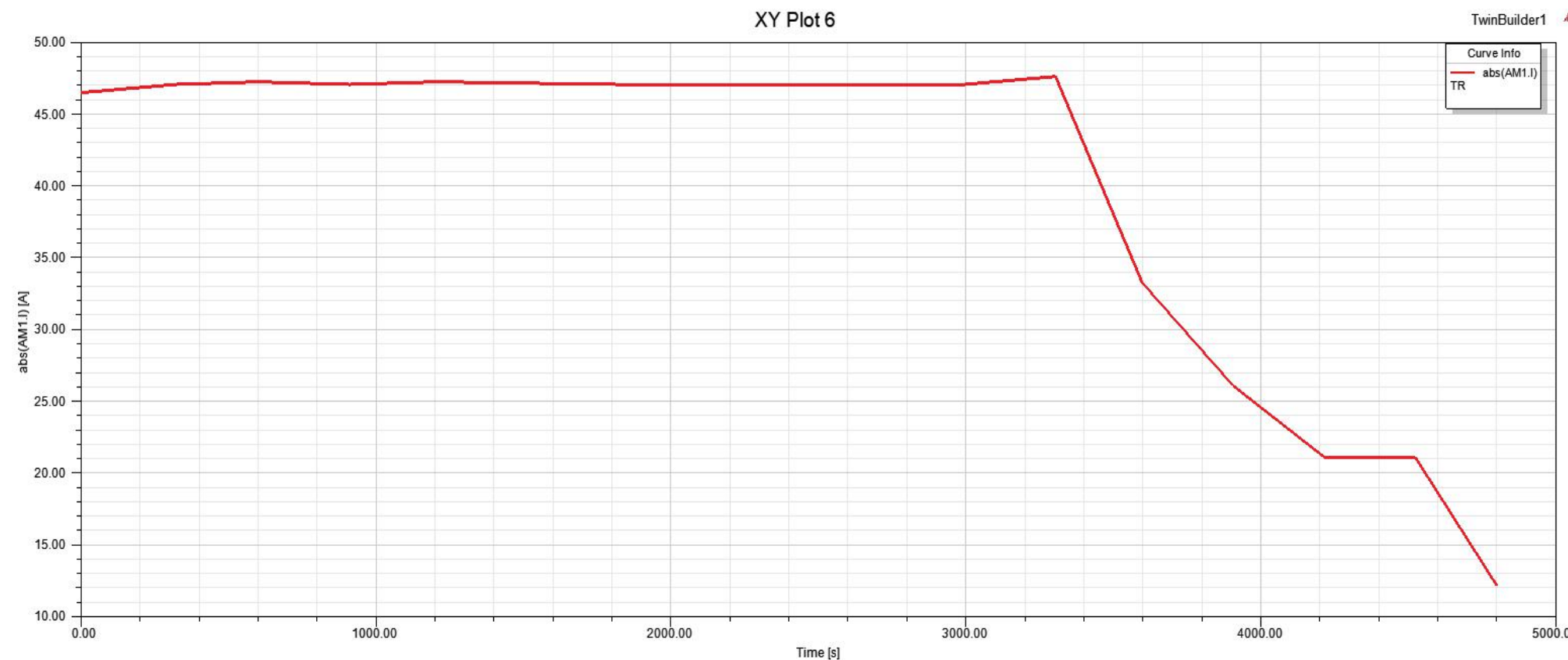
本例中降阶模型的输入对应10个电池模组上的热源，输出为60个电芯上的平均温度。

目录

1. 项目背景
2. 一维三维耦合解决方案
3. 等效电路模型ECM
4. 三维CFD模型
5. 降阶模型ROM
- 6. ECM和ROM联合**
 - 含CFD验证仿真
7. 总结

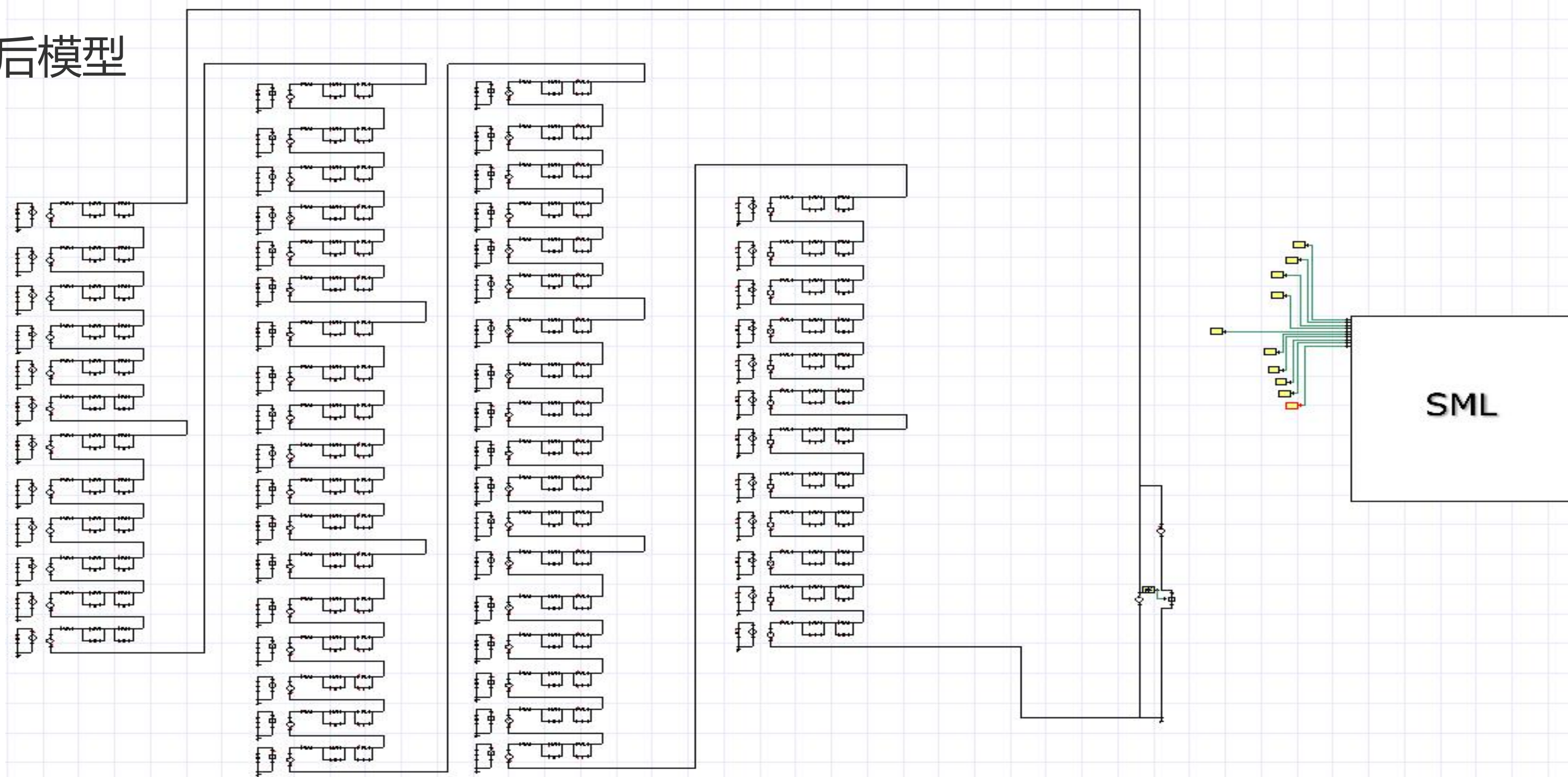
等效电路模型(ECM)和降阶模型(ROM)联合

- 计算电池充电过程中的温度变化，在电池包等效电路模型中，外部负载设定为随时间变化的电流，变化曲线如图所示，以45A左右的电流充电，当快充满时，电流逐渐下降。
- ROM模型中的输入定义为电池由于电流通过而产生的热量，即焦耳热。



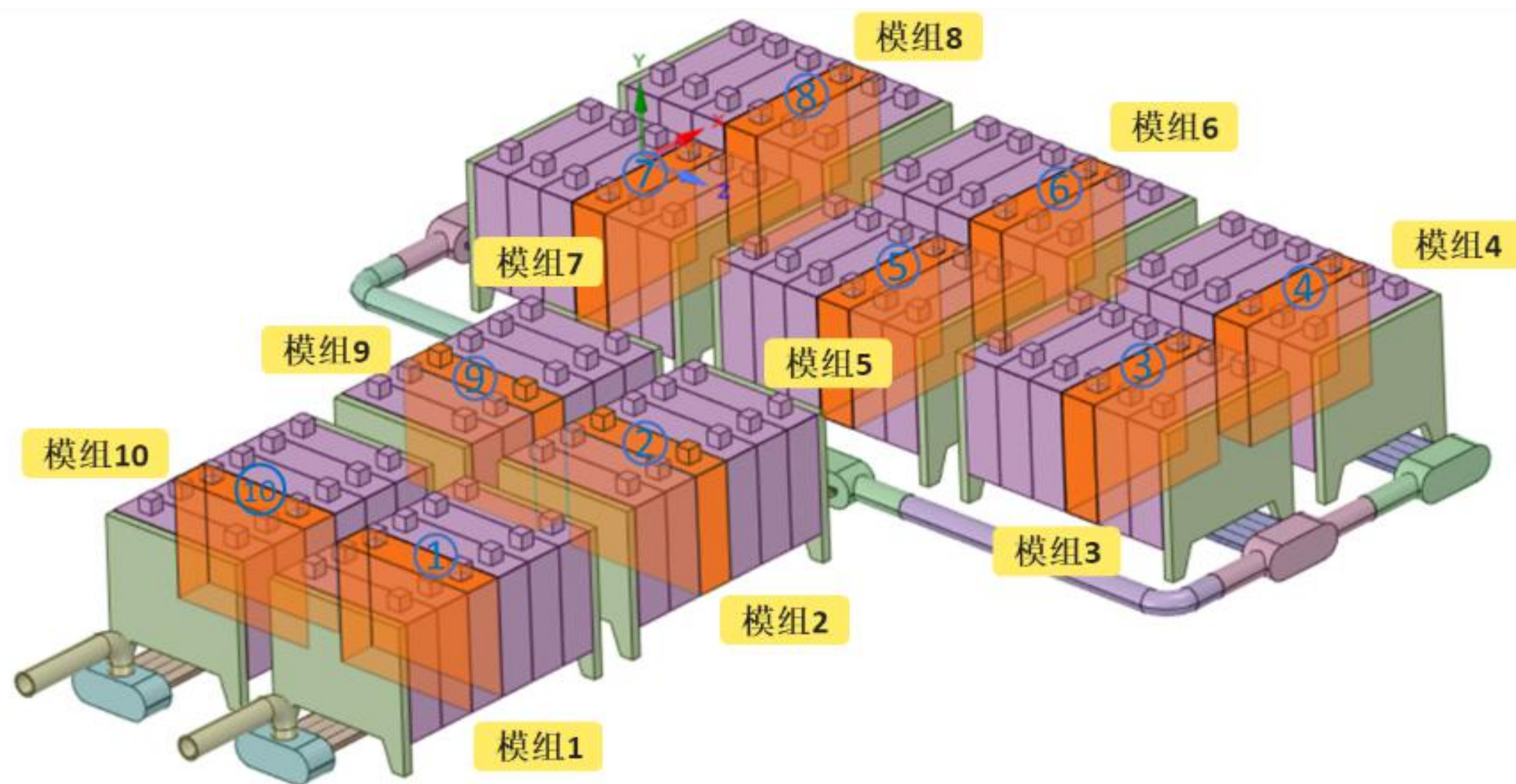
等效电路模型(ECM)和降阶模型(ROM)联合

联合后模型



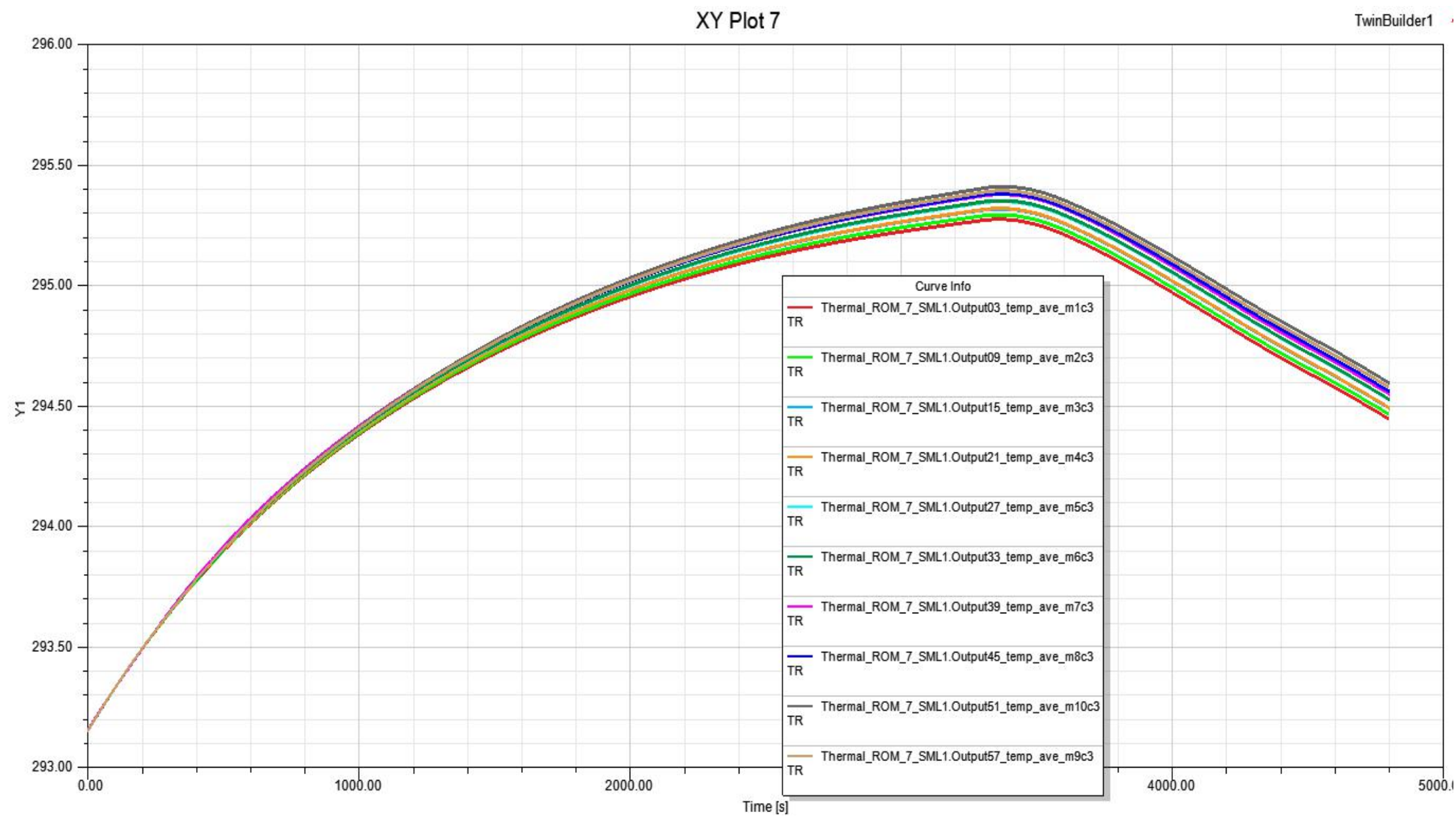
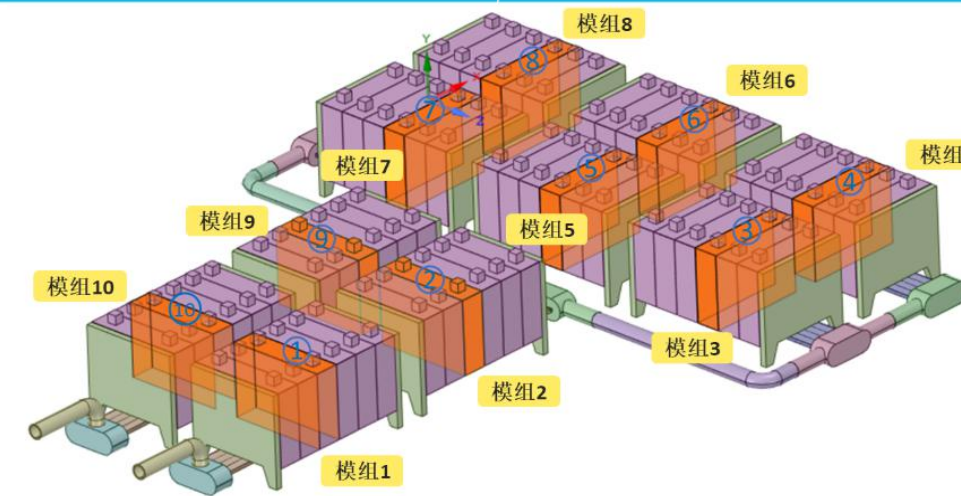
ROM计算结果

模组编号和每个模组上显示温度曲线的中间电芯位置如图所示



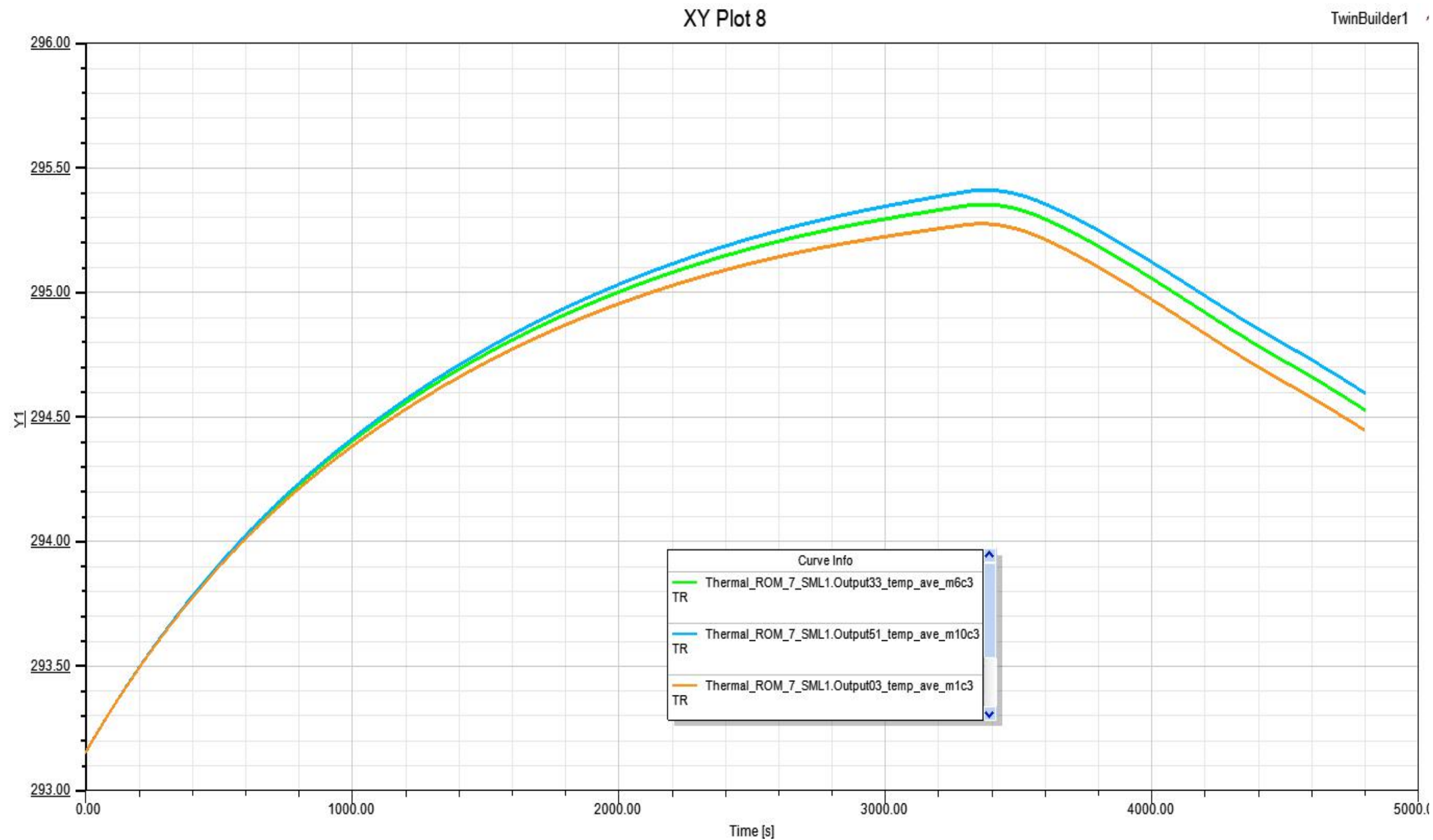
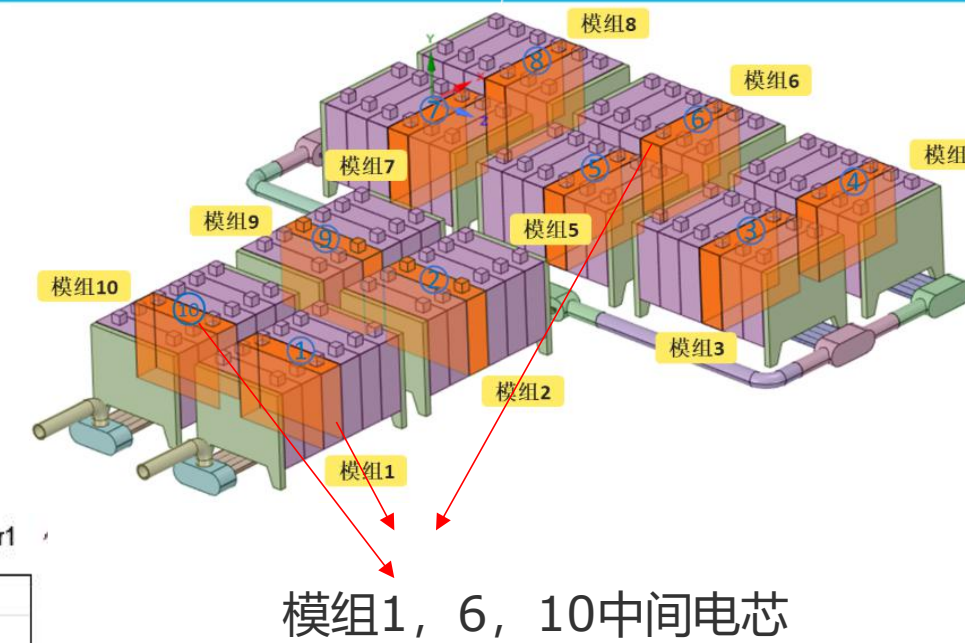
ROM计算结果

各个模组上中间电芯温度变化曲线-ROM



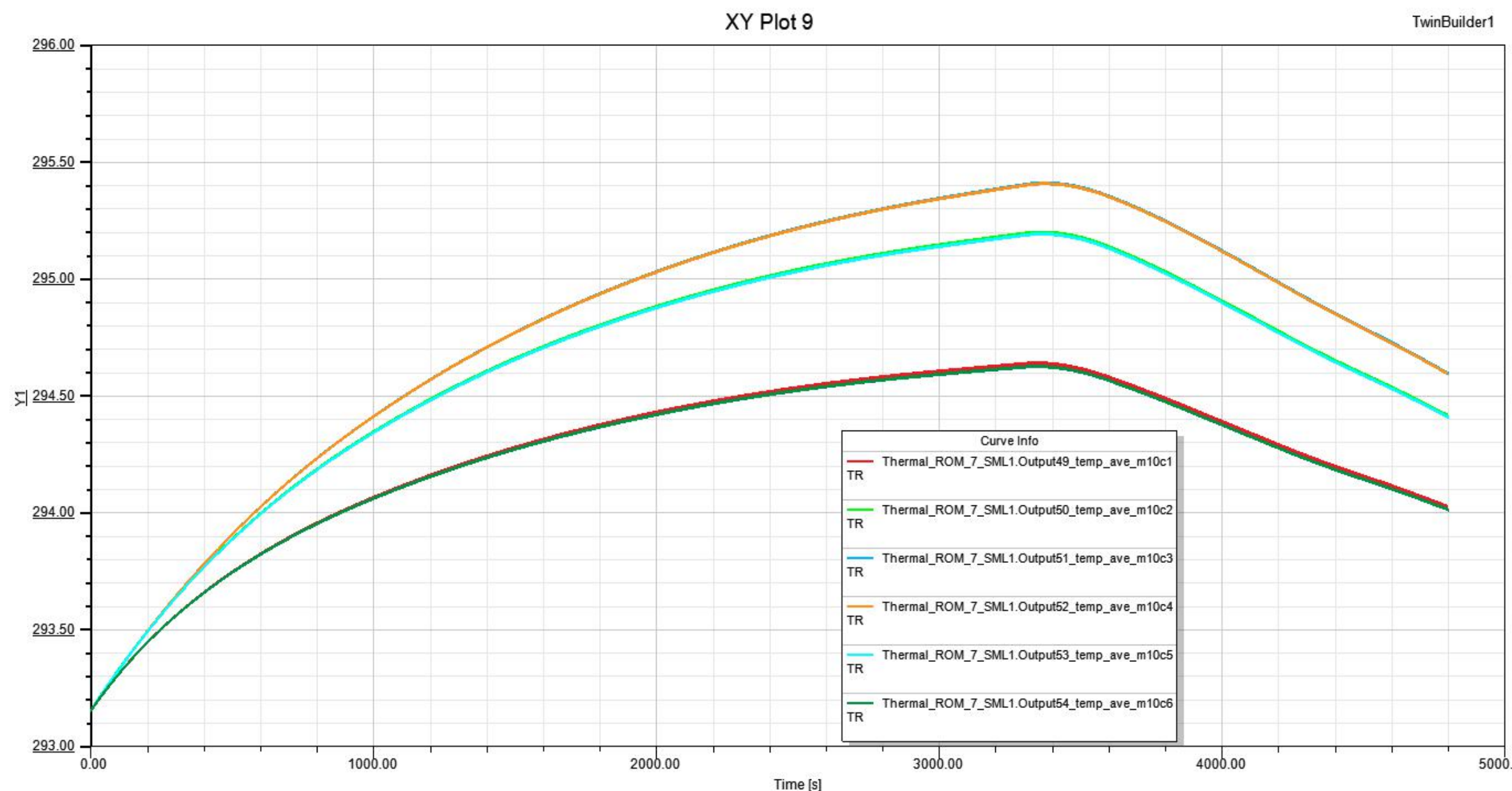
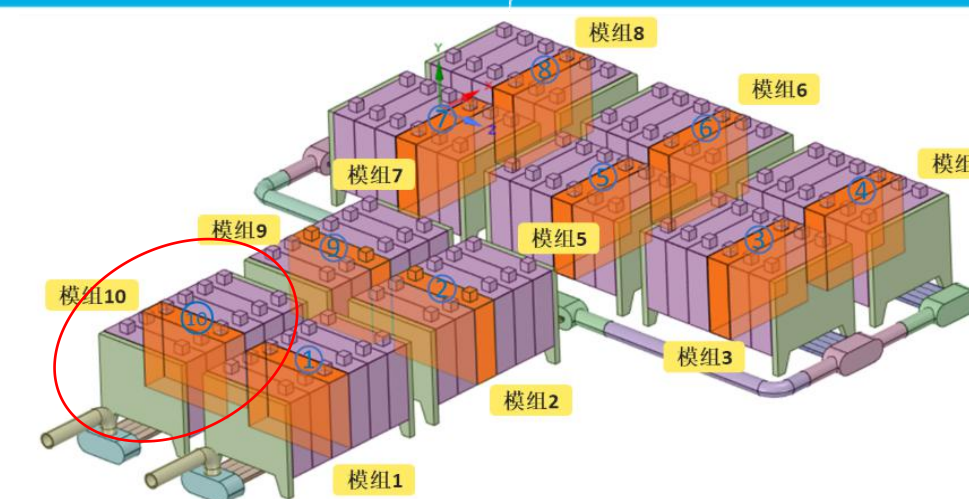
ROM计算结果

模组1,6和10上中间电芯温度变化曲线-ROM



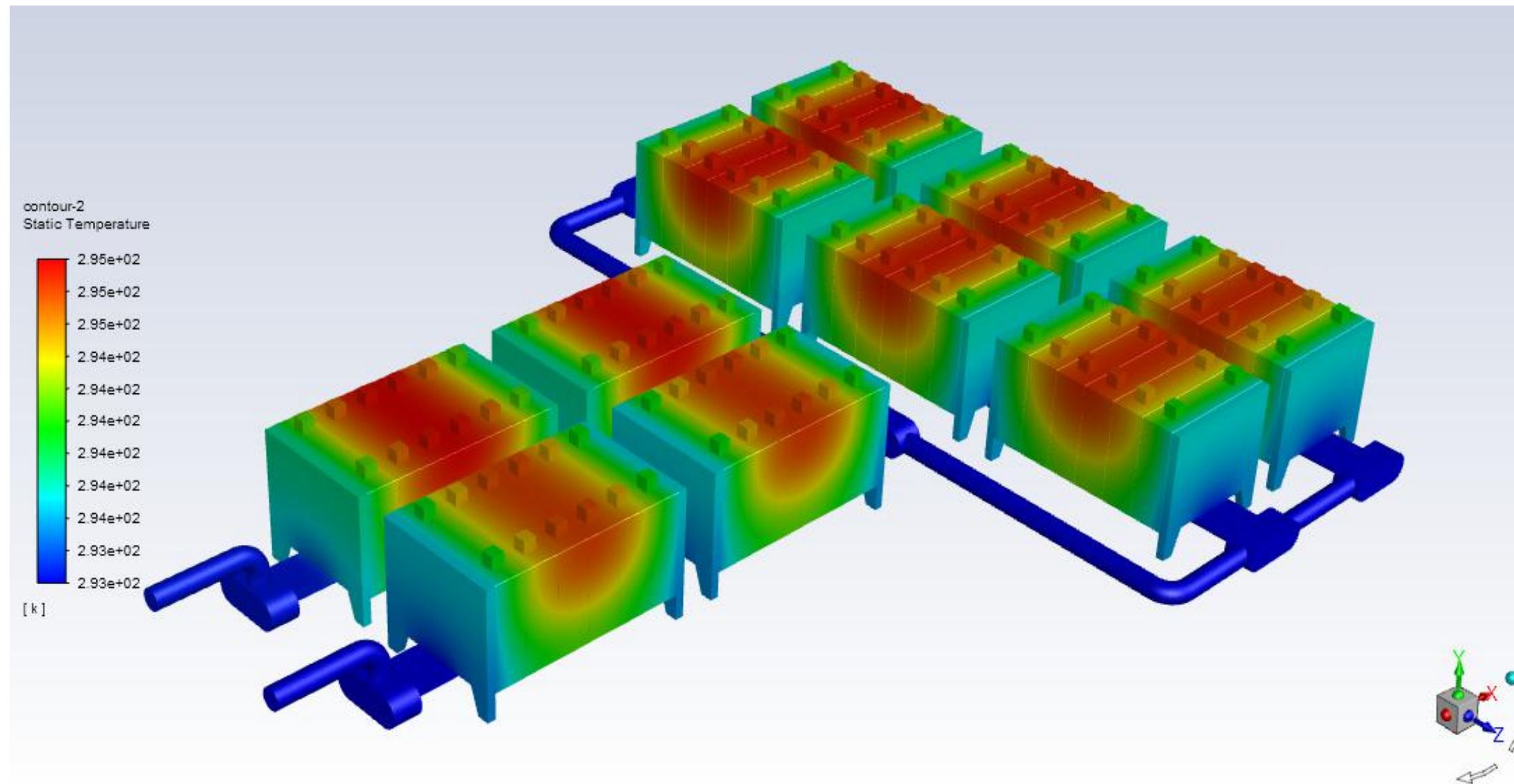
ROM计算结果

模组10上的6个电芯的温度变化曲线，由于环境的影响，两侧电芯的温度略低于中间电芯，但温度差别小于1℃。



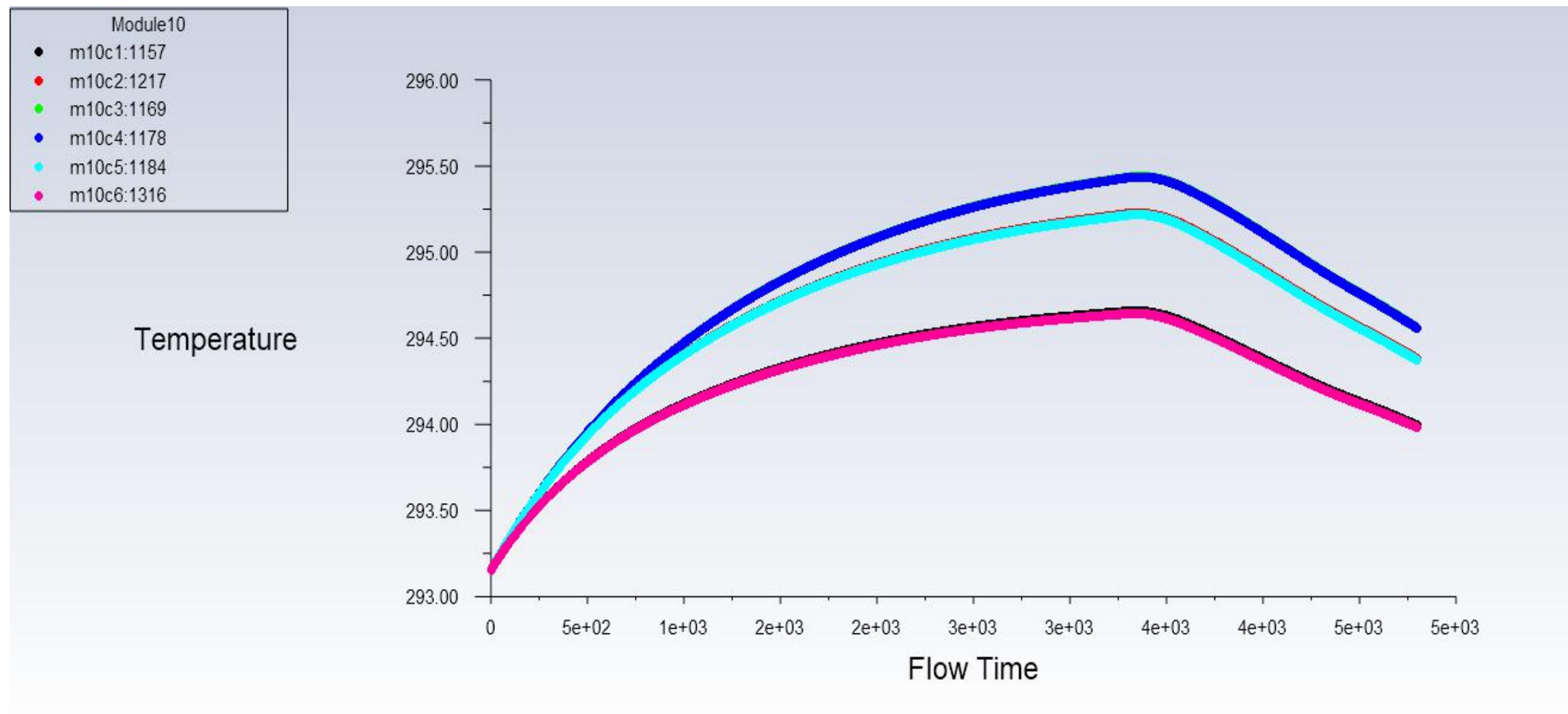
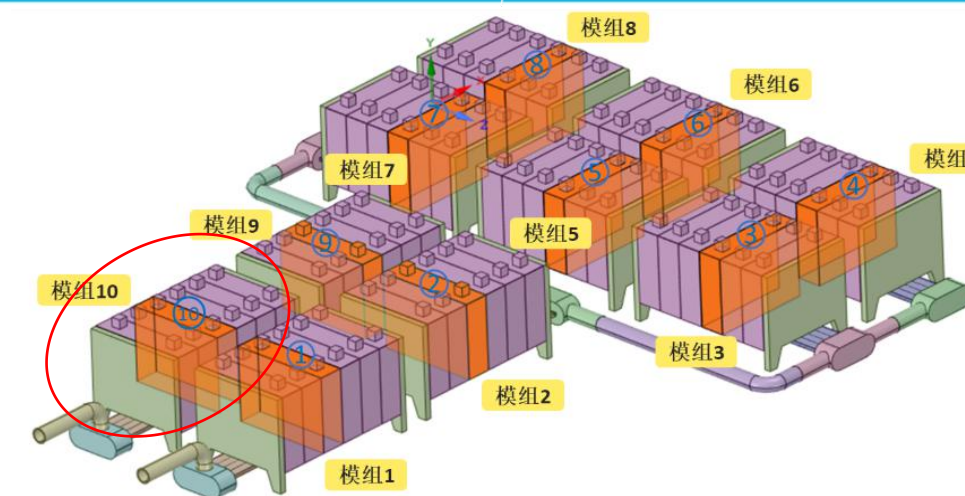
CFD验证计算

- 将充电过程中随时间变化的热源，以Profile的形式加载在三维模型上，计算瞬态的温度变化过程。
- 充电结束4800s时刻的电池包温度云图如图所示，可以看出单个模组上的温度差别。

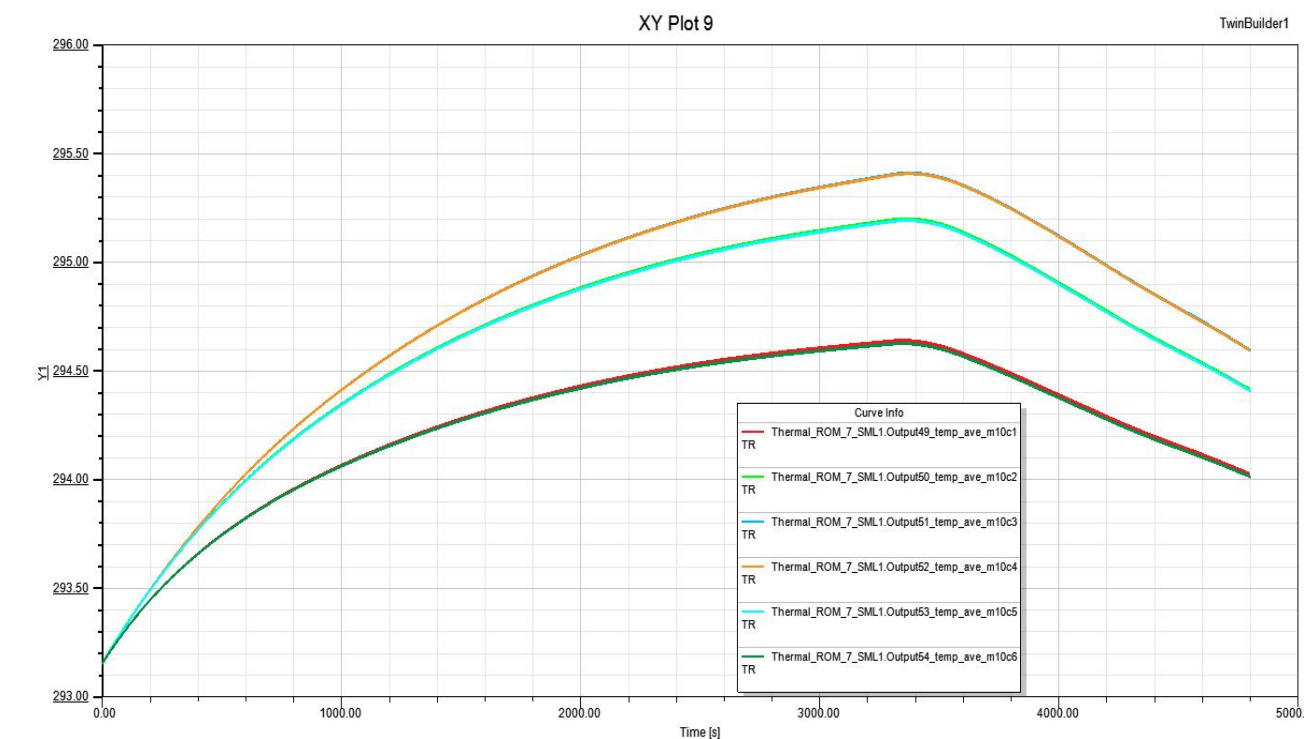


CFD验证计算

- 提取模组10上各电芯的平均温度曲线，如图所示，对比ROM计算结果，结果非常吻合



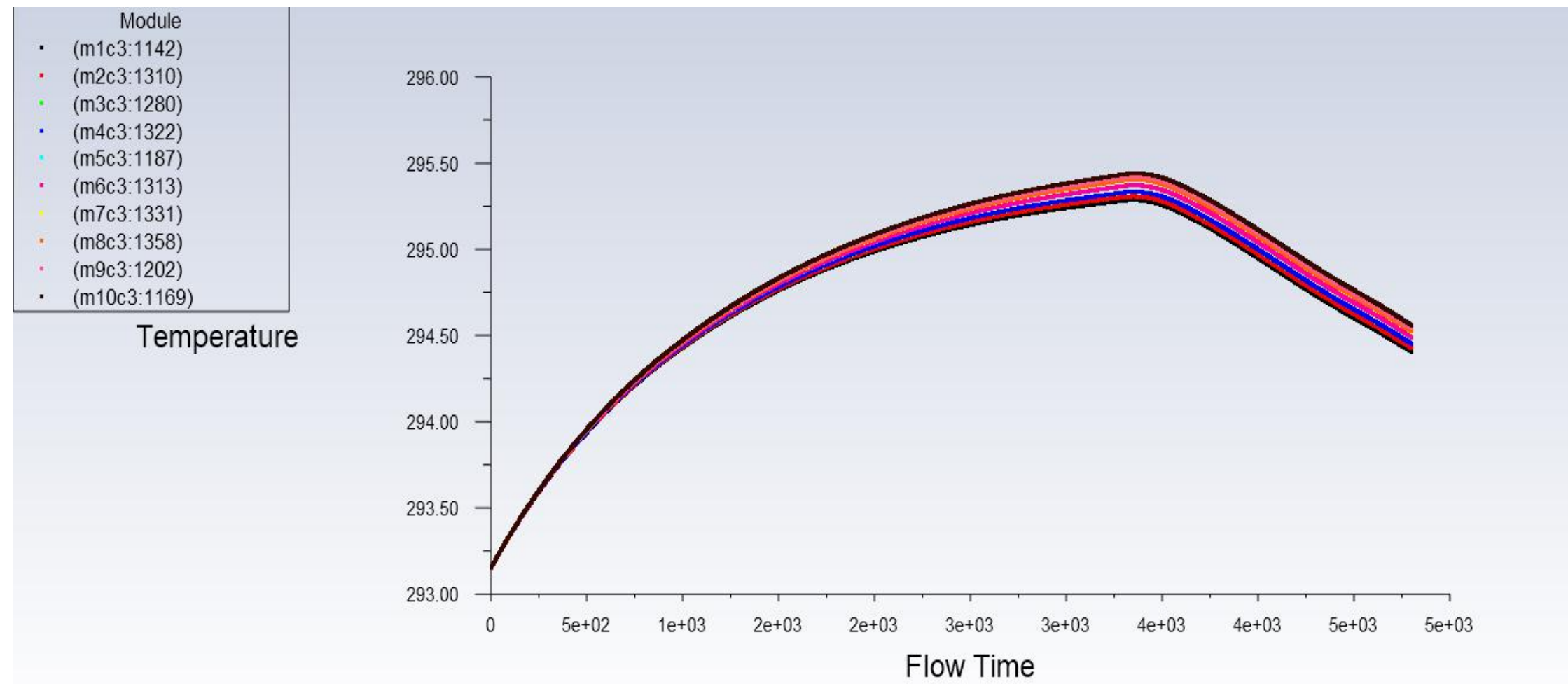
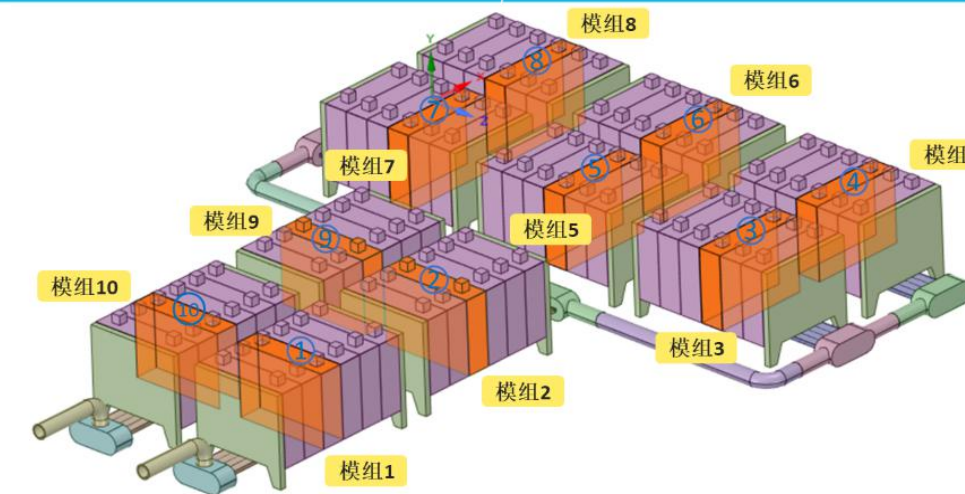
模组10上各电芯的温度变化曲线-Fluent



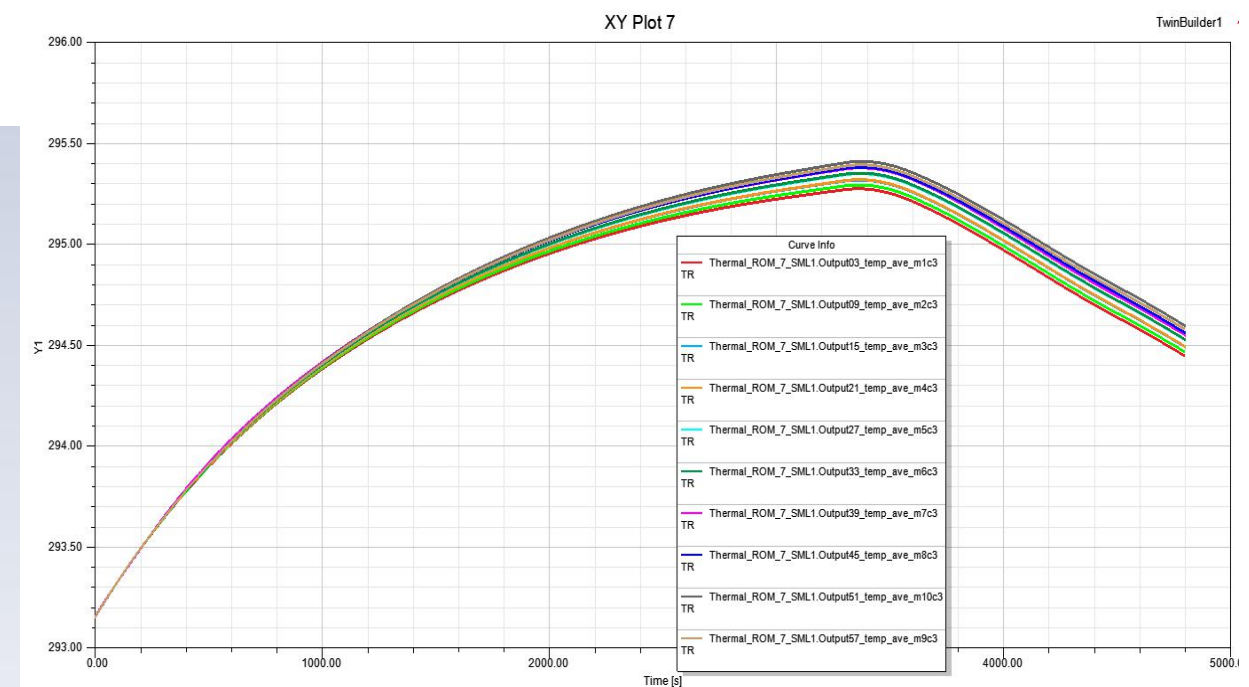
模组10上各电芯的温度变化曲线-ROM

CFD验证计算

- 各个模组中间位置电芯的平均温度变化曲线, 趋势与ROM计算结果一致。



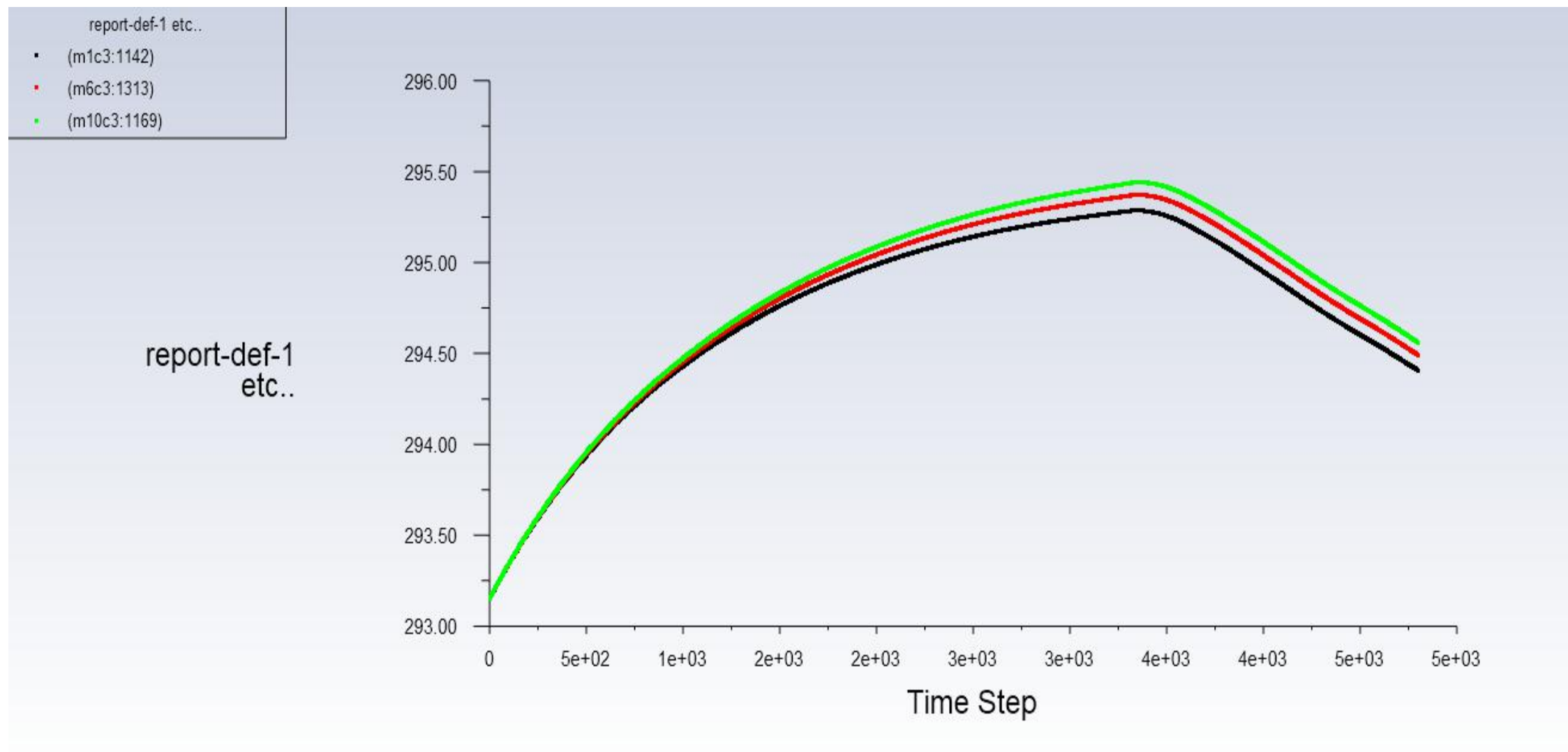
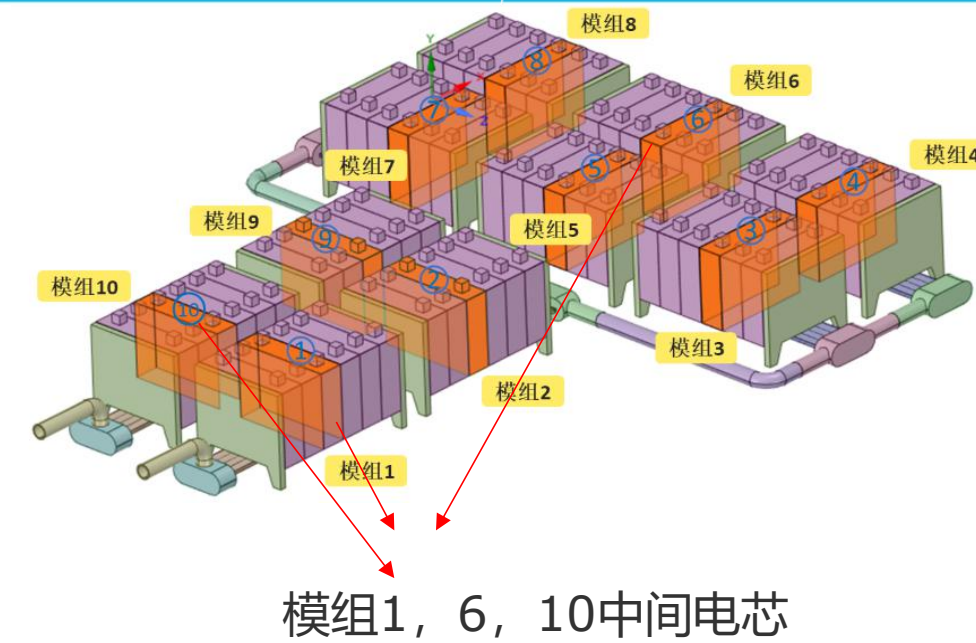
各个模组上中间电芯温度变化曲线-Fluent



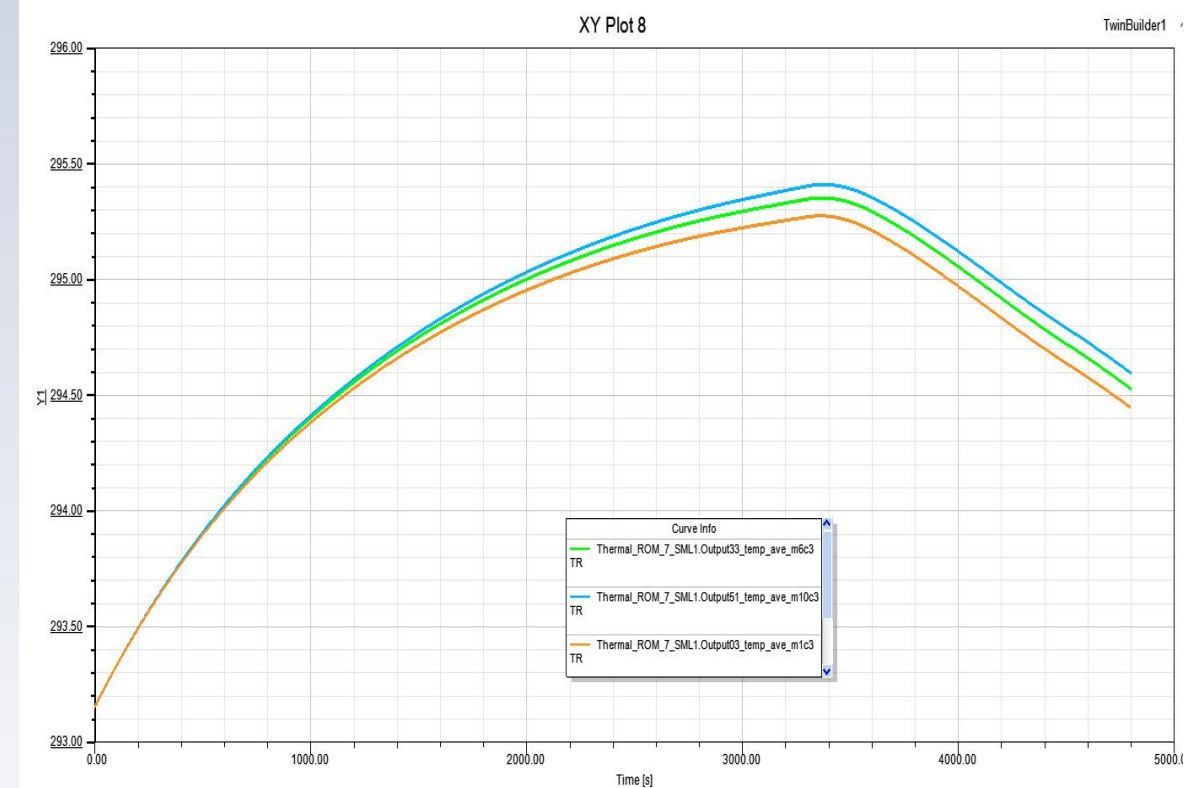
各个模组上中间电芯温度变化曲线-ROM

CFD验证计算

- 模组1,6和10的中间电芯温度曲线, 趋势与ROM计算结果一致。



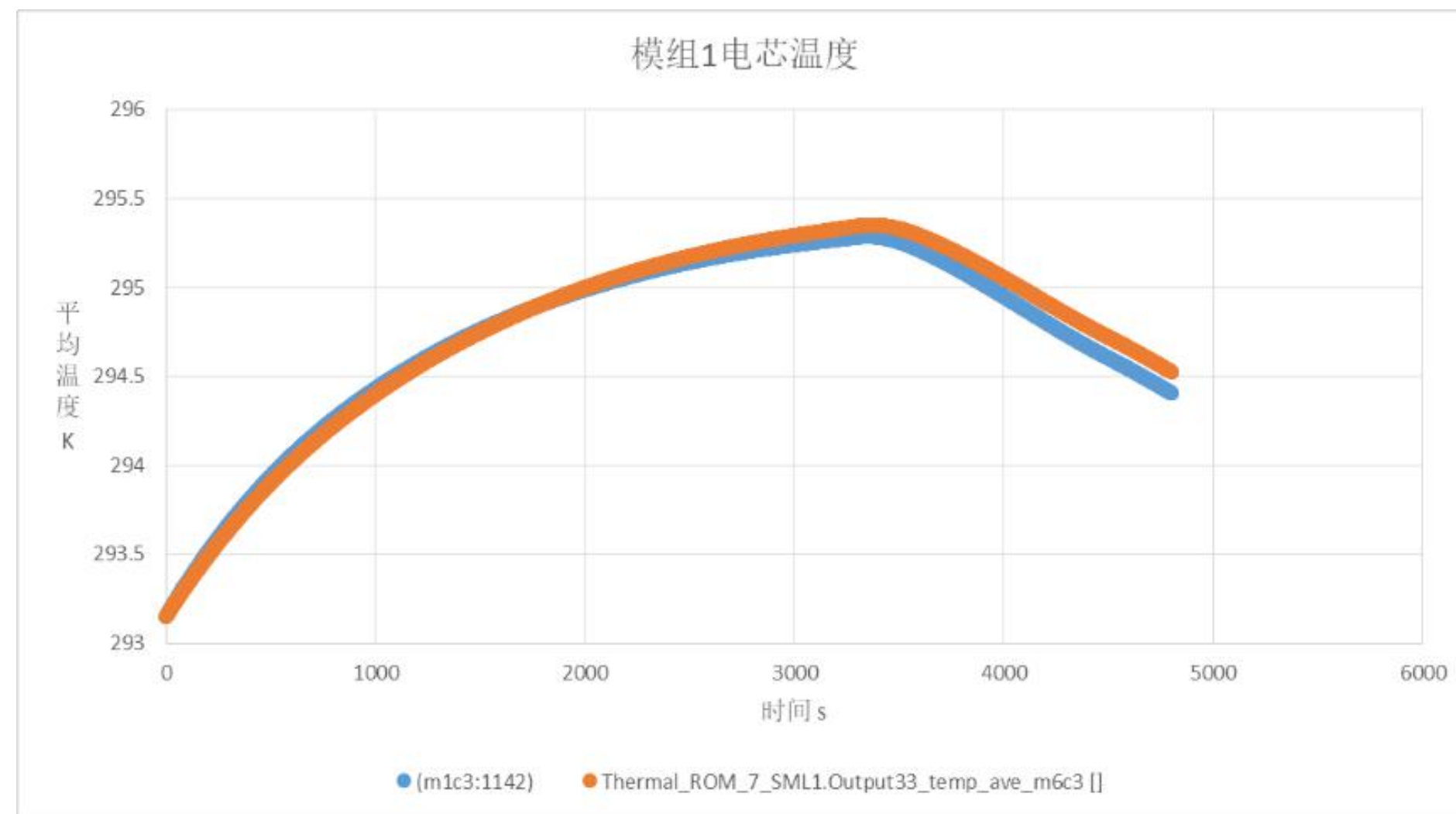
模组1,6和10上中间电芯温度变化曲线-Fluent



模组1,6和10上中间电芯温度变化曲线-ROM

CFD验证计算

- 将ROM计算出的和三维验证模型计算出的模组1上中间电芯平均温度曲线对比，如图所示，计算二者的偏差，偏差为0.017%。



同样方法计算模组6和模组10上的电芯温度偏差分别为0.014%和0.04%。

总结与展望

- 降阶模型计算出的结果与三维CFD基础结果误差非常小，三维CFD模型的计算需要多CPU并行计算几个小时，而降阶模型的计算确实秒级。对于重复的多工况瞬态计算可以节省大量的仿真计算时间。
- 本文利用一维和三维耦合的电池热管理方法，通过对一个简化的电池包模型仿真，验证了降阶模型可以得到和三维CFD计算同样的精度。
- 接下来我们将使用这种方法对真实的电池包模型进行仿真，可以与实验结果进行对比。该方法的准确度已经在国外主机厂得到验证。
- Twin Builder中有很多种降阶模型，例如SVD ROM (Singular Value Decomposition) 可以将降阶模型的计算结果转换成三维分布结果。由于温度对等效电路模型参数的影响，还可以通过ECM和ROM双向耦合的方法将温度的影响考虑到参数拟合中。

感谢倾听
期待与您的进一步合作~

咨询

- <https://www.idaj.cn>
- e-mail: support@idaj.cn