

PUFAFFEN

上海普法芬电子科技有限公司

使用Simscape进行新能源汽车热管理系统建模及仿真

Jiahui Luo, Shanghai Pufaffen Electronics



MATLAB EXPO



PART 1

公司介绍

General Introduction

公司概况



普法芬使命

立志成为全球顶尖新能源汽车热管理软件供应商

关于我们

上海普法芬电子科技有限公司成立于2019年，注册于上海闵行紫竹国家级高新园区，2022年总部迁入上海市杨浦区保辉国际新办公楼，是一家集研发、销售、服务于一体的高新技术企业。

公司主要经营热管理系统及控制算法开发、功能安全以及智舱控制（车身域控软件方向）的研发。多年来，公司秉承着“创新、厚重、专业、阳光”的发展理念，打造了一支创新、研发一体化的专业队伍。

专家团队



Yuqin LI 李玉钦

首席算法专家

上海大学 自动化系自动控制专业

20年以上工作经验

上海德尔福汽车空调
算法与标定专家

上海松芝 最高级别技术专家



Qihua LIU 刘启华
企业管理顾问

上海交通大学 博士后
35年以上工作经验

上汽—上海交大车用发动机
工程中心 常务副主任
美国通用汽车中国公司技术
工程部 主任研究员

上海汽车技术中心
副总工程师

上汽动力总成集成部
总监

上海汽车乘用车公司动力总
成 高级顾问



Patrick JIA 贾之喆
软件算法专家

德国卡尔斯鲁厄应用科技
大学

传感器专业 硕士
华东理工大学控制及仪表
专业 本科

12年以上工作经验
德国贝洱海拉算法与标定
专家

德国三电 算法与标定专
家



Ylva YOU 尤谊 (德籍)
欧洲子公司总经理

德国汉诺威大学, 电气工程
专业 硕士

丰富的汽车行业供应链管
理和项目管理经验

德国大众集团, 上汽大众
采购部代表

上汽大众, 资深采购主管
联合电子 (博世与上汽合
资公司), 国际采购主管
欧洲FEV, 项目工程师 / 大
客户经理



Ray QIN 秦茂华
热管理系统专家

17年以上工作经验

上海飞机研究所 飞机外形
主管

艾泰斯热系统 项目总工
克莱斯勒 热管理系统负责
人

达索新能源汽车热管理专
家顾问

上海高秣新能源科技有限
公司 总经理



Kun YANG 杨坤
CFD专家

上海交通大学 机械工程
硕士

20年以上工作经验
上海飞机设计研究所 CFD
工程师

上海普信科技有限公司
CFD工程师&技术支持

上海龙创汽车设计股份有限
公司 CFD主管工程师

上汽集团技术中心 流体
技术主管

上海高秣新能源科技有限
公司 先行技术总监



Min ZHANG 章敏
热管理系统专家

北京理工大学 硕士
15年以上工作经验

艾泰斯热系统 CAD主管
&技术专家

华域三电汽车空调有限
公司 系统经理

上海高秣新能源科技有
限公司 产品开发专家

热管理系统及控制算法开发

热管理控制软件

主攻域控制器热管理控制算法，包括乘客舱舒适性、制冷回路、三电热管理控制算法。



热管理系统及零部件设计开发

包含空调系统、整车热系统、热管理零部件、空调箱、水冷板等的设计与开发。

云空调（智舱行为研究室）

软件替换硬件（拟合感知技术）
车云融合算法，包括能量流管理和千人千面个性化设计方案。

数字孪生（联合仿真+虚拟标定）

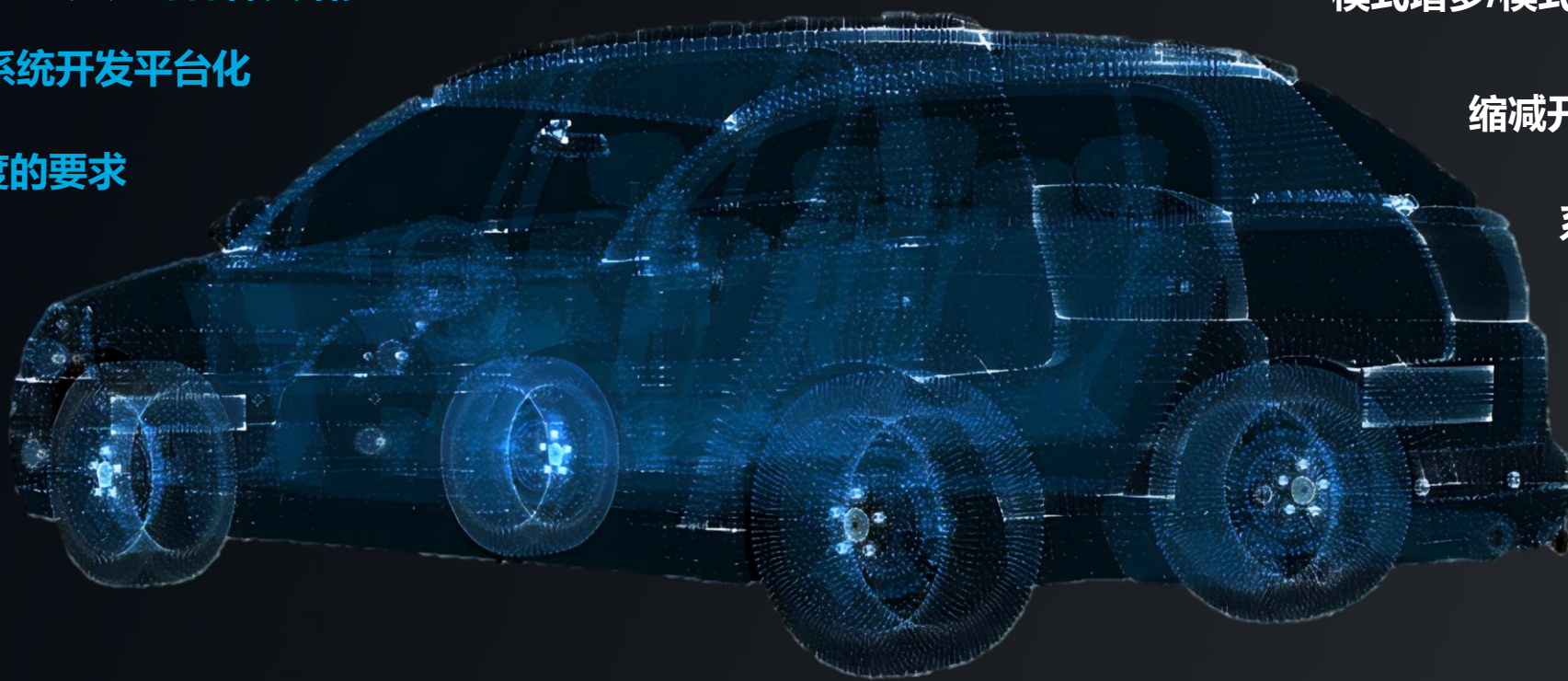
虚拟标定平台工具，包含整车热管理仿真和控制算法联合。

趋势与挑战

Challenge

Trend

- 被控对象增多
- 热力系统架构多样化
- 热力部件种类增多
- 热管理系统开发平台化
- 对系统集成度的要求
- 功能需求增多
- 控制系统智能化
- 子系统耦合度增强



平衡系统成本-舒适性-能耗的关系

模式增多/模式切换逻辑复杂

缩减开发周期

系统模型复用度

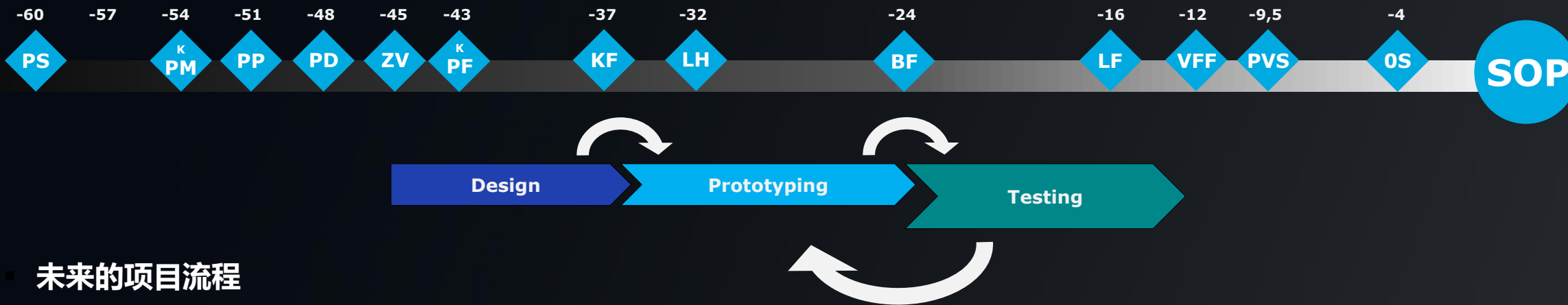
降低开发成本

乘员舱舒适性

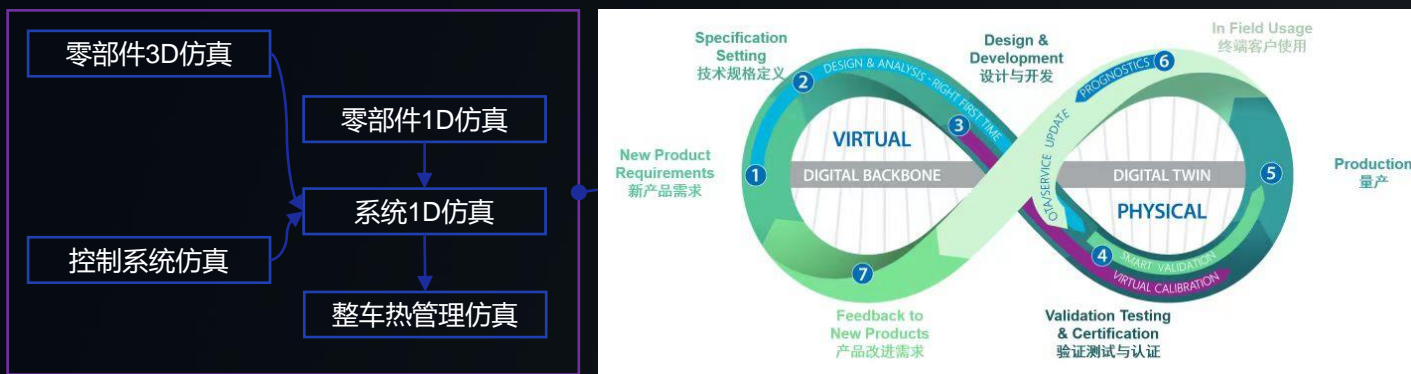
整车能效/能耗

数字孪生 - 整车热管理

标准-PEP



未来的项目流程



- 定义系统和整车的可量化目标值
- 标准化仿真模型，仿真方法以及仿真流程
- 搭建部件功能与系统功能的技术能力



缩短开发周期

工具链的选择

1. Simscape + Simulink + Stateflow + M文件组合式建模
2. Simscape专业模型库覆盖面广，支持整车模型建模
3. 实现标准化 & 平台化建模
4. 建模仿真的侧重点：验证功能实现情况和控制策略的逻辑
5. 联合仿真的便捷性：同平台实现，不需要额外的接口工具，避免联合仿真跨平台的兼容问题
6. 支持实时机HIL台架测试



PART 3

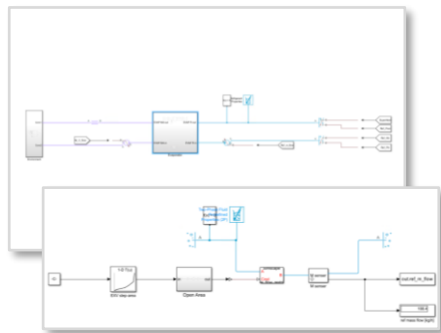
普法芬仿真解决方案

SPE Solution for simulation

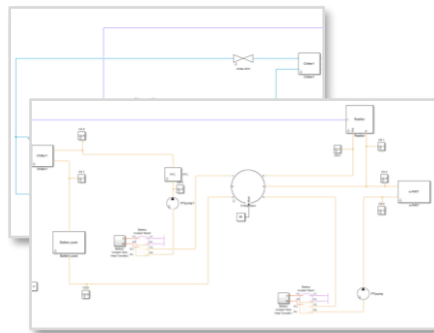
1D system modelling

基于模型的系统开发

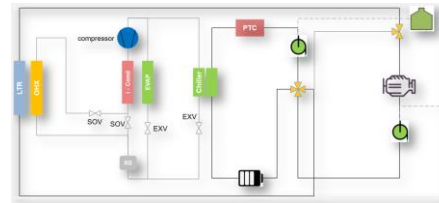
例如：R134a+直冷直热-热泵系统+多温区水侧回路+余热回收



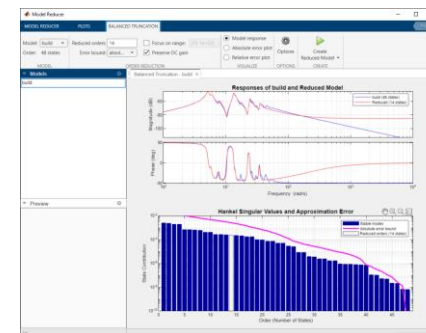
- 建立零部件数据库
- 零部件（详细）建模
- 零部件标定
- 部件选型建议
- 性能和流阻优化



- 定义子系统的边界参数
- 定义子系统的功能需求
- 子系统标定



- 集成制冷循环
- 集成空气侧回路（HVAC+乘员舱）
- 集成冷却液回路（电机回路+电池回路+高温回路）
- 系统的虚拟标定



- 系统负载模型的简化
- 模型降阶
- 负载模型精度评估

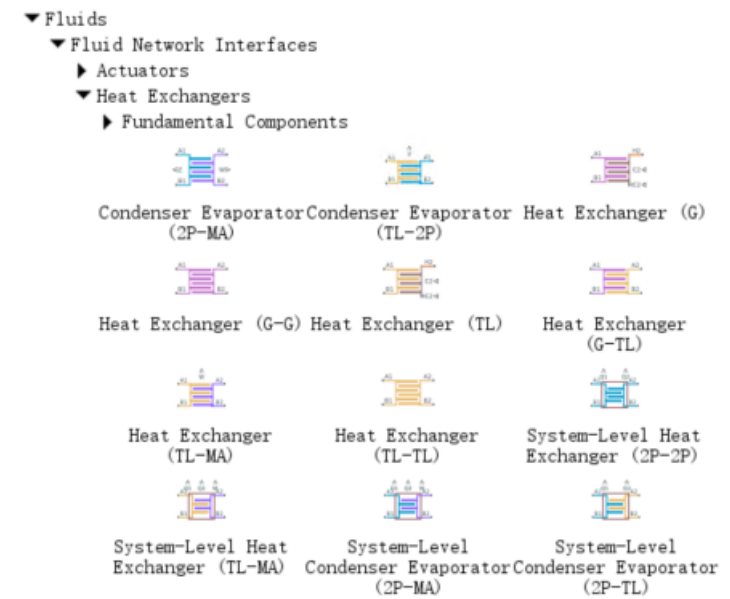
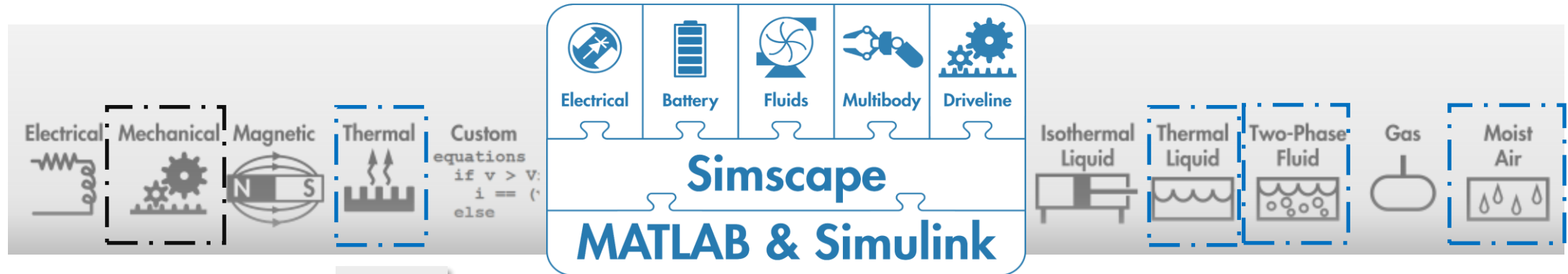


内部接口

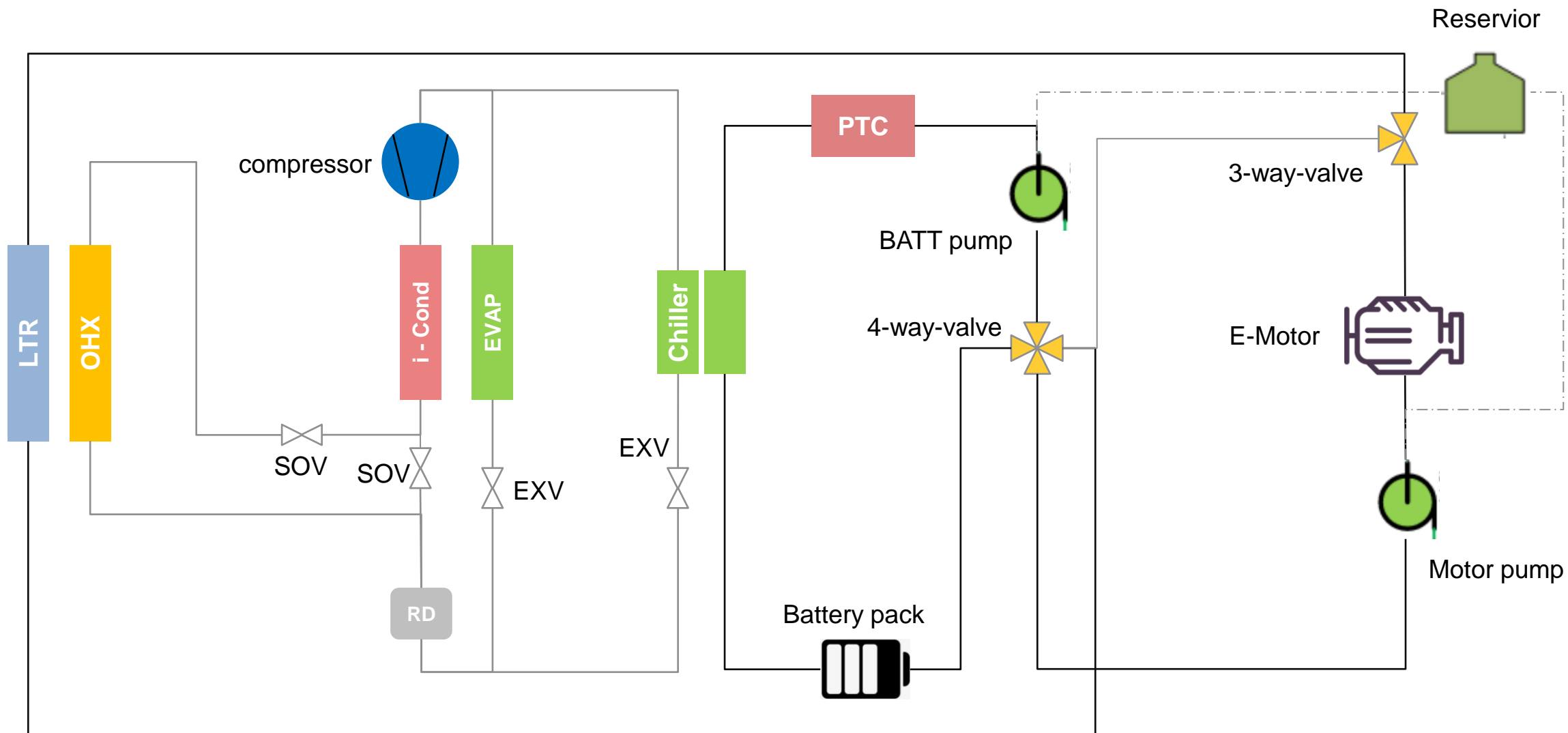


- 进行系统负载与控制模型的联合仿真
- 动态MIL测试
- 验证功能实现
- 优化控制逻辑
- 评估能量管理对能耗的影响

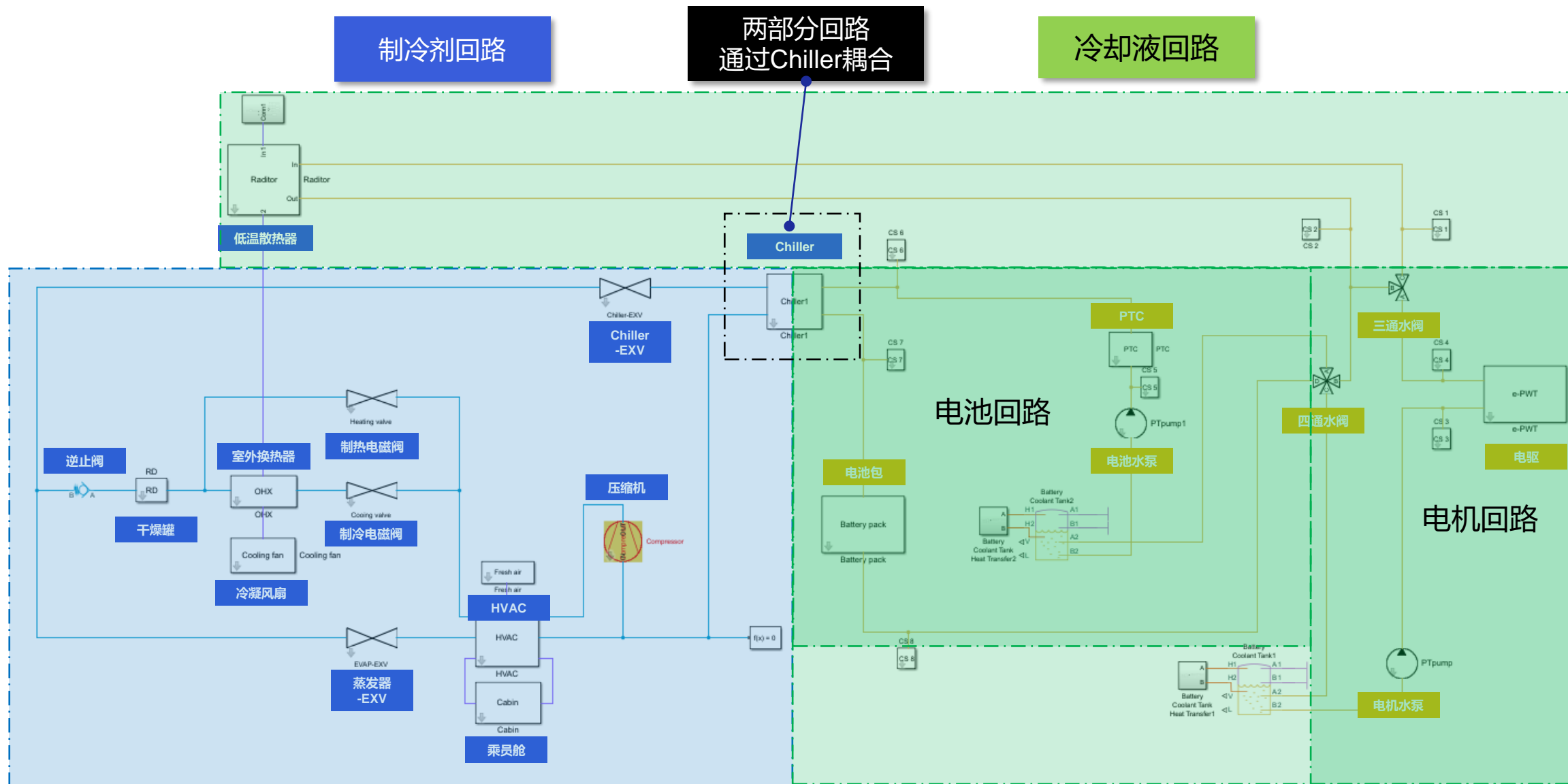
Mathwork工具链



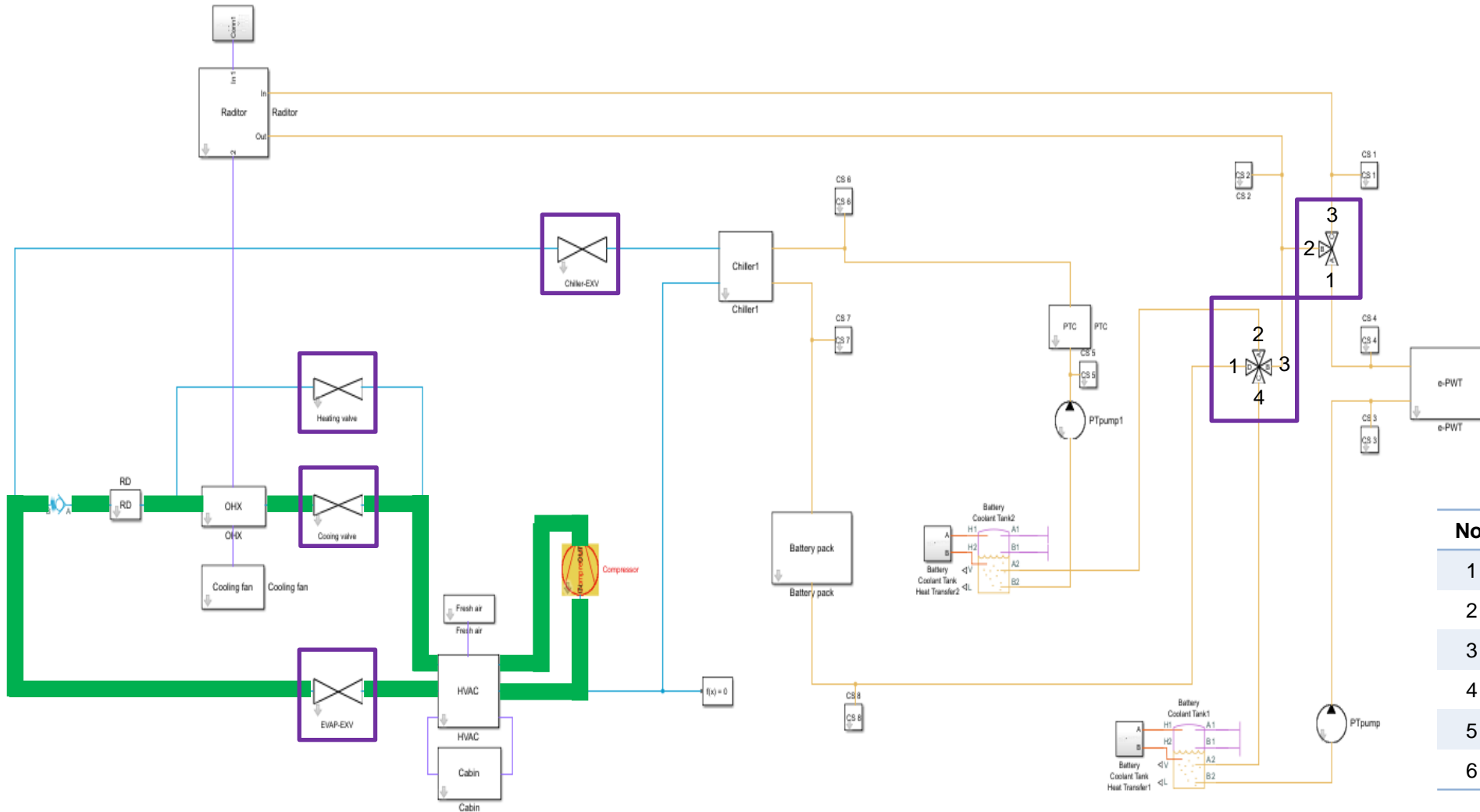
系统架构原理图



系统一维建模及仿真

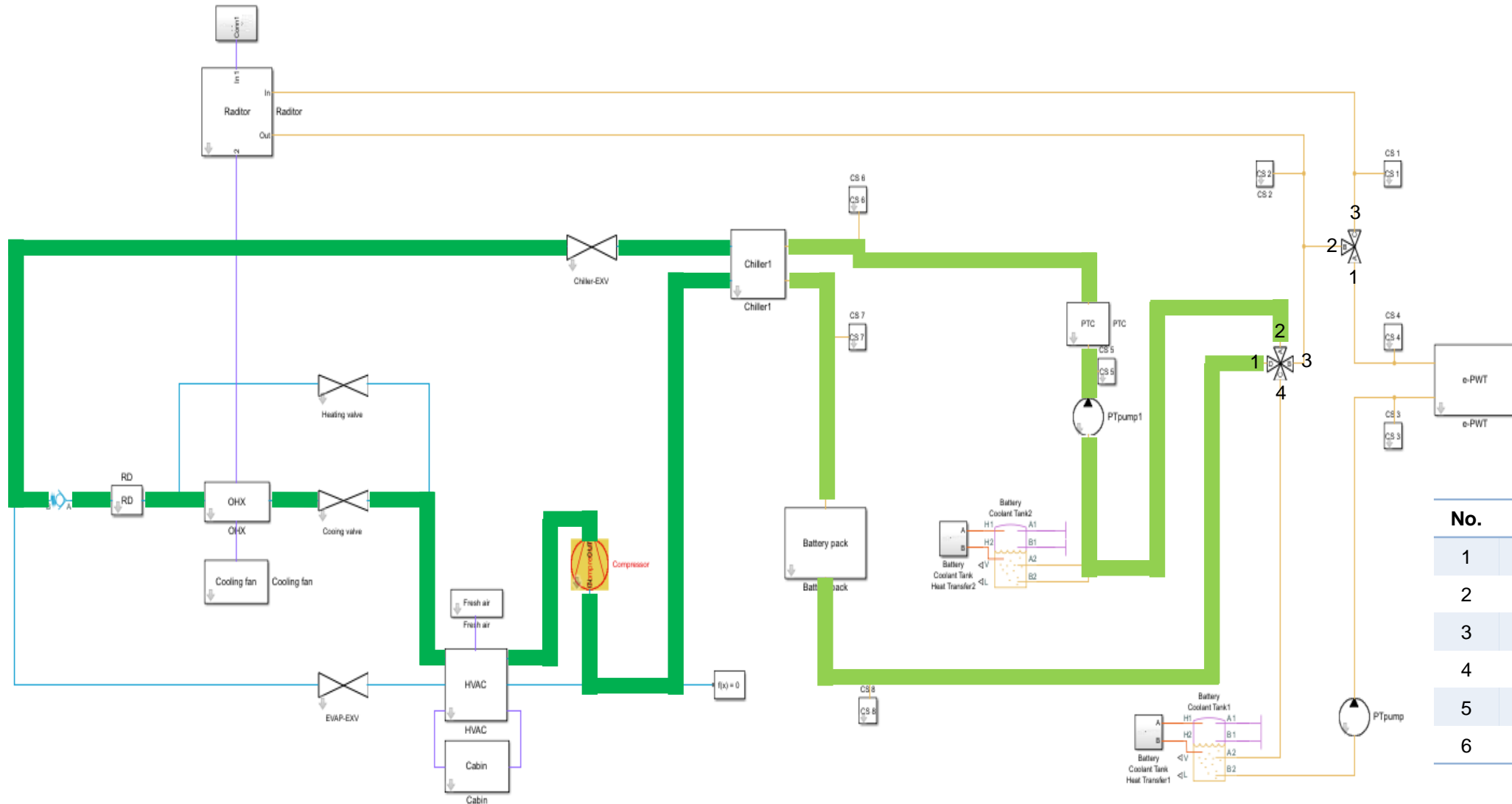


系统一维建模及仿真 - 单乘员舱制冷

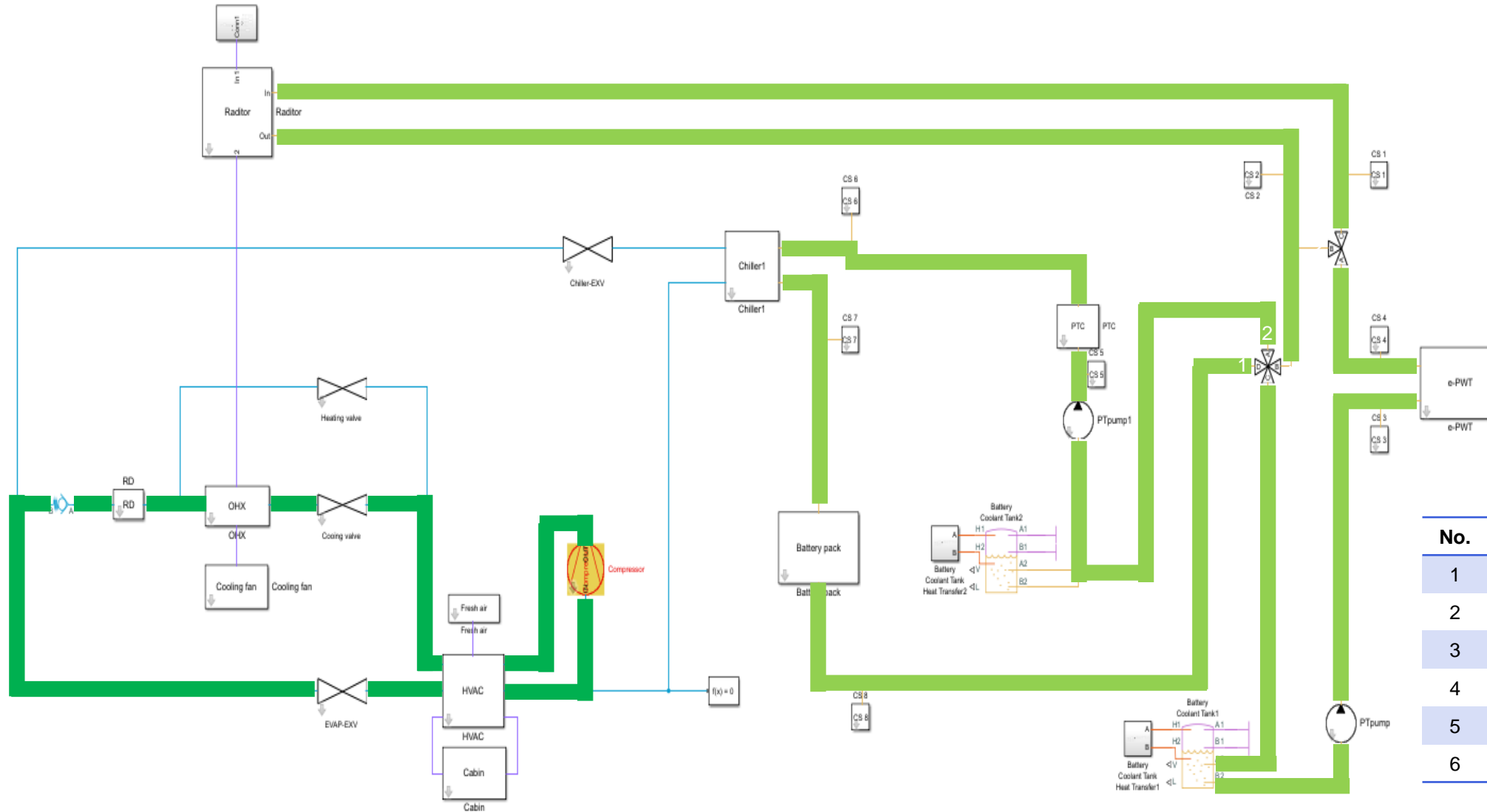


No.	Component	status
1	Heating valve	0
2	Cooling valve	1
3	EVAP - EXV	0-1
4	Chiller - EXV	0
5	4-way-valve	1-2/3-4
6	3-way-valve	1-3

系统一维建模及仿真 - 单电池冷却 (Chiller液冷)

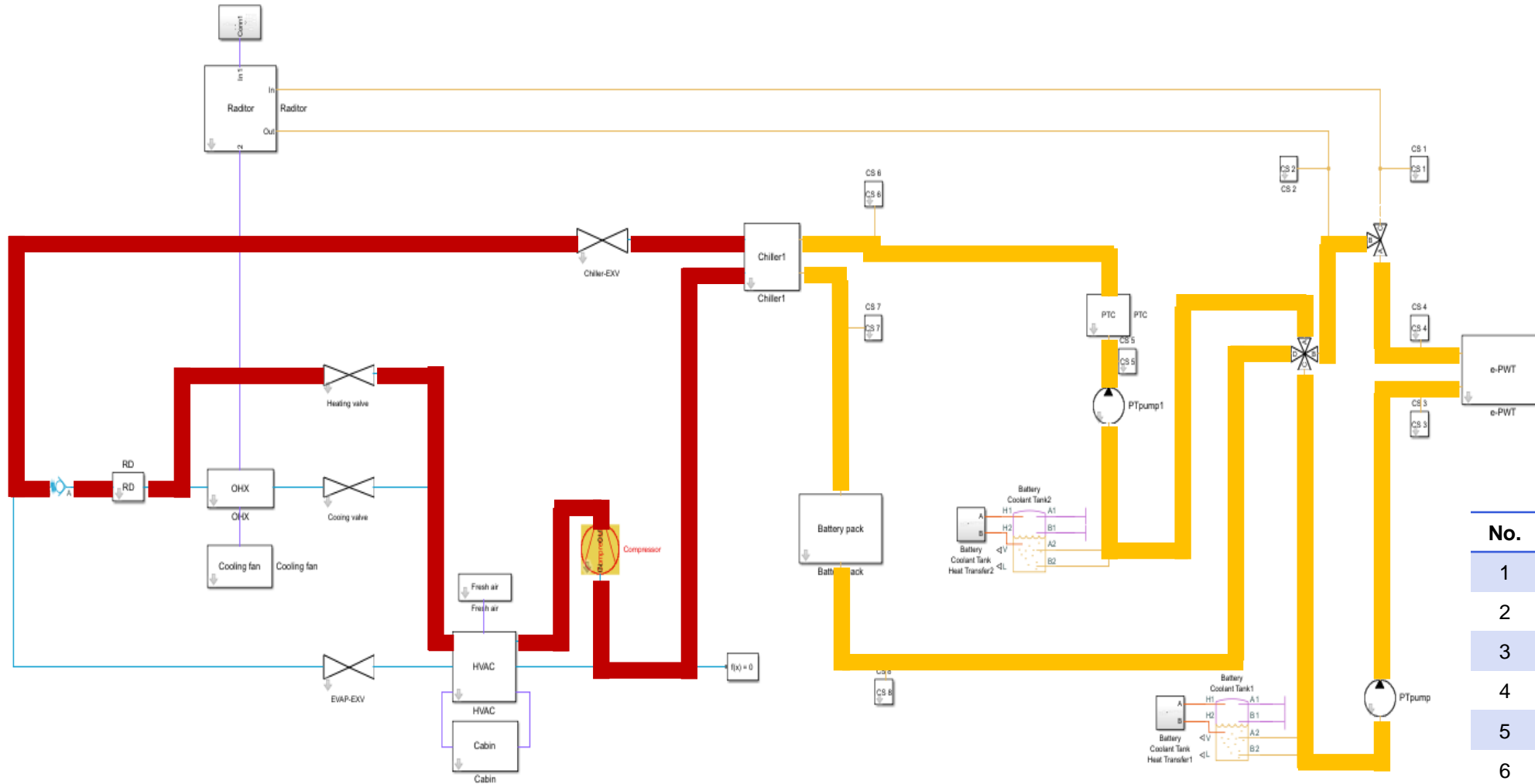


系统一维建模及仿真 - 单电池冷却 (LTR风冷)



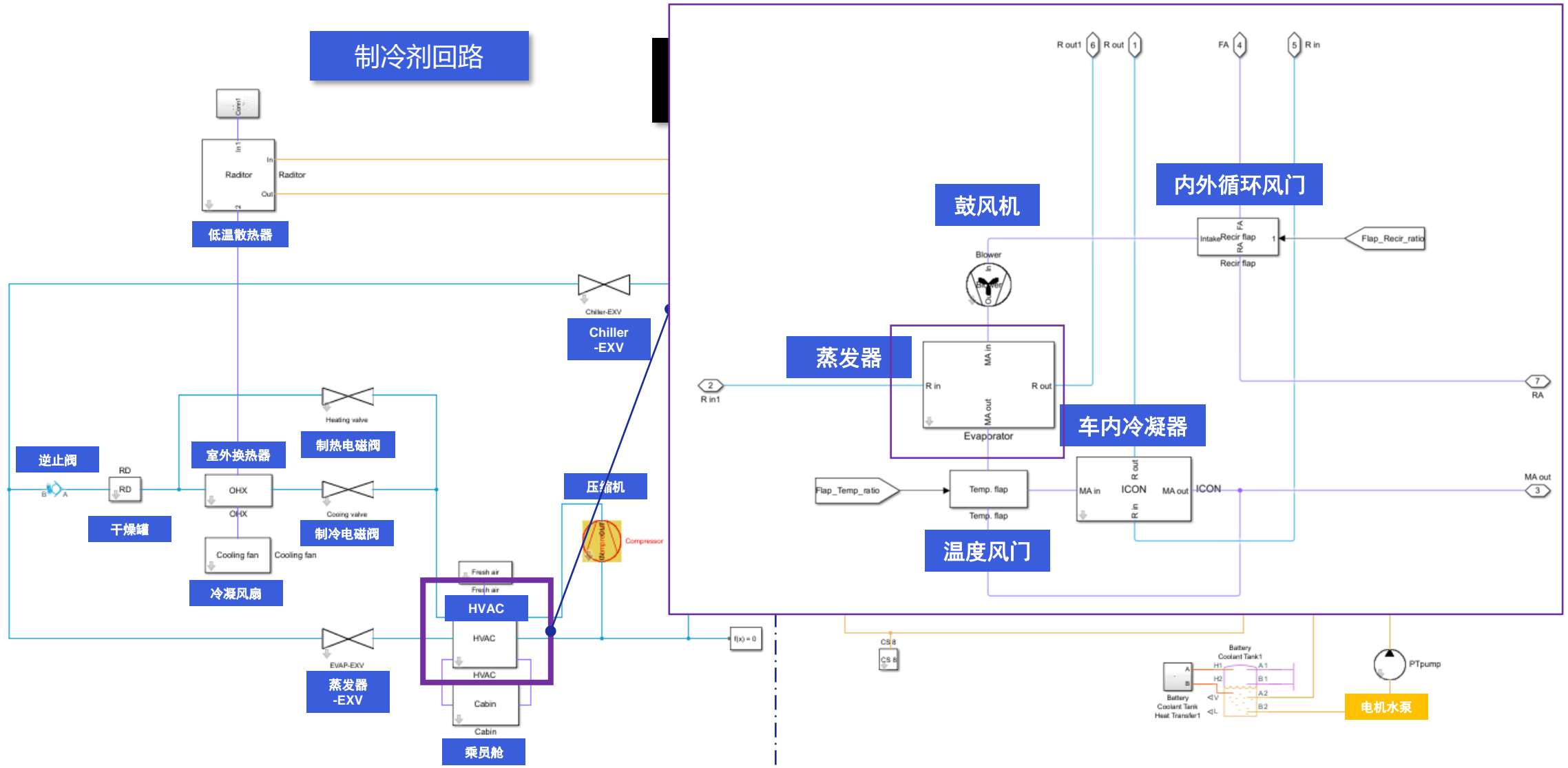
No.	Component	status
1	Heating valve	0
2	Cooling valve	1
3	EVAP - EXV	0-1
4	Chiller - EXV	0
5	4-way-valve	1-2/3-4
6	3-way-valve	1-3

系统一维建模及仿真 – 乘员舱采暖（余热回收）



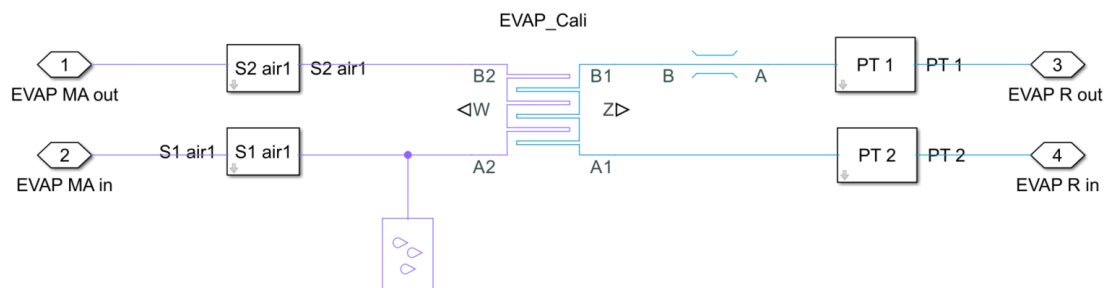
No.	Component	status
1	Heating valve	1
2	Cooling valve	0
3	EVAP - EXV	0
4	Chiller - EXV	0-1
5	4-way-valve	1-4/3-2
6	3-way-valve	1-2

系统一维建模及仿真

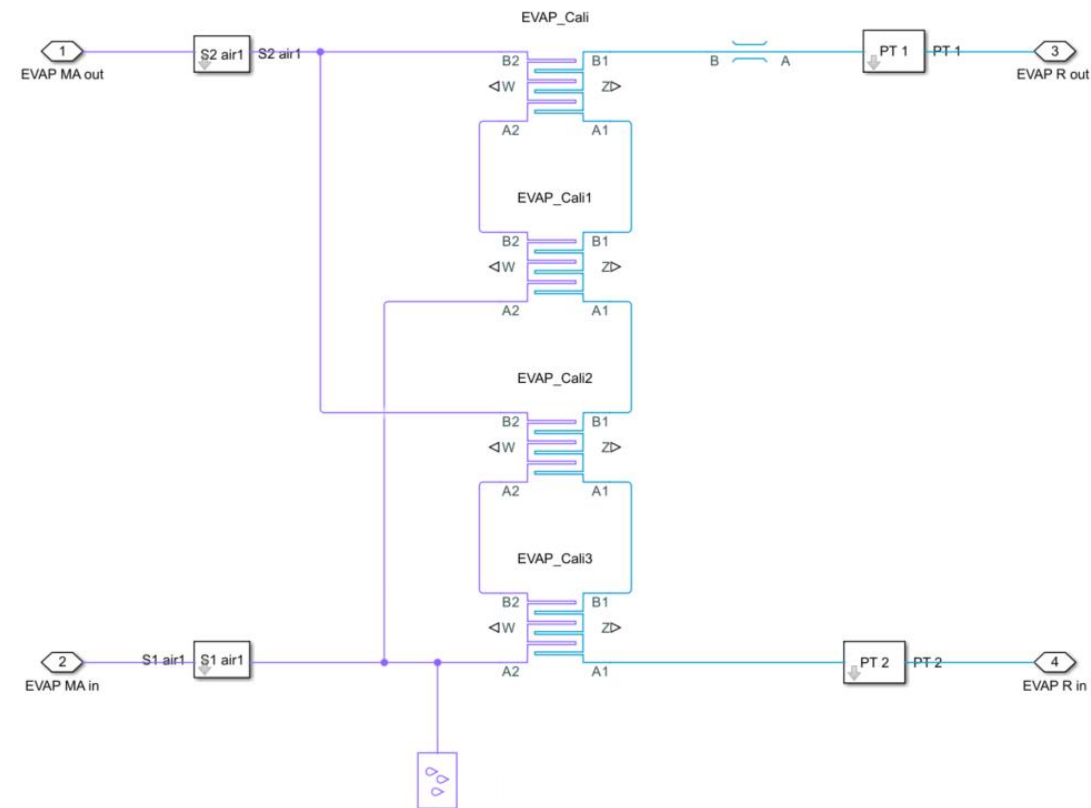


零部件建模 - 蒸发器

简单建模

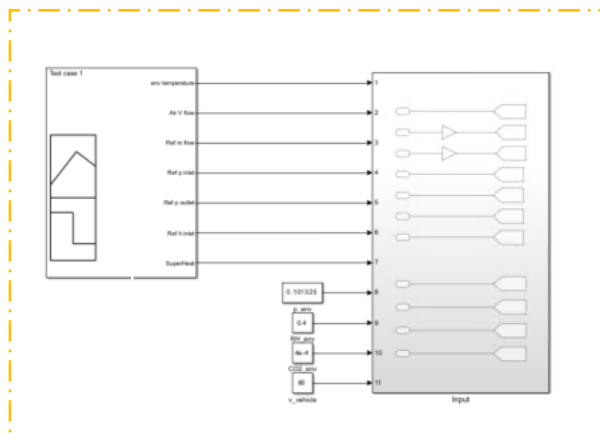


详细建模

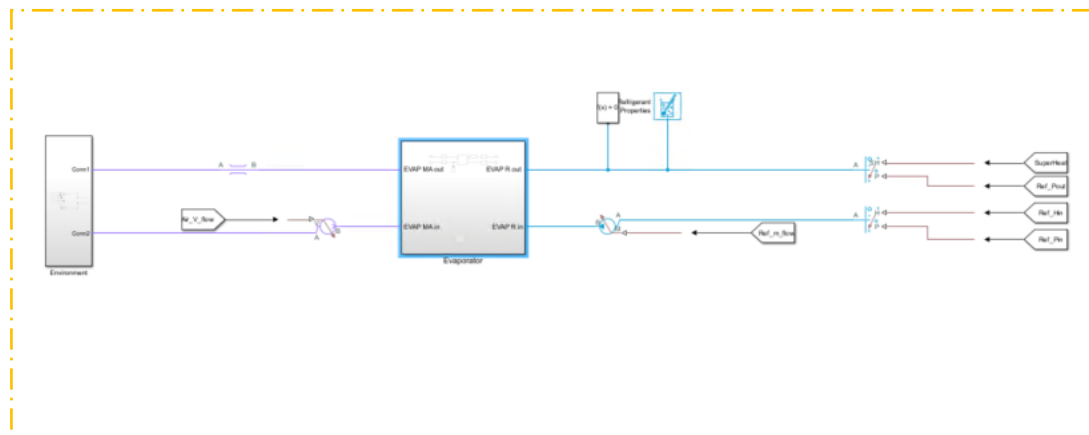


零部件标定及测试

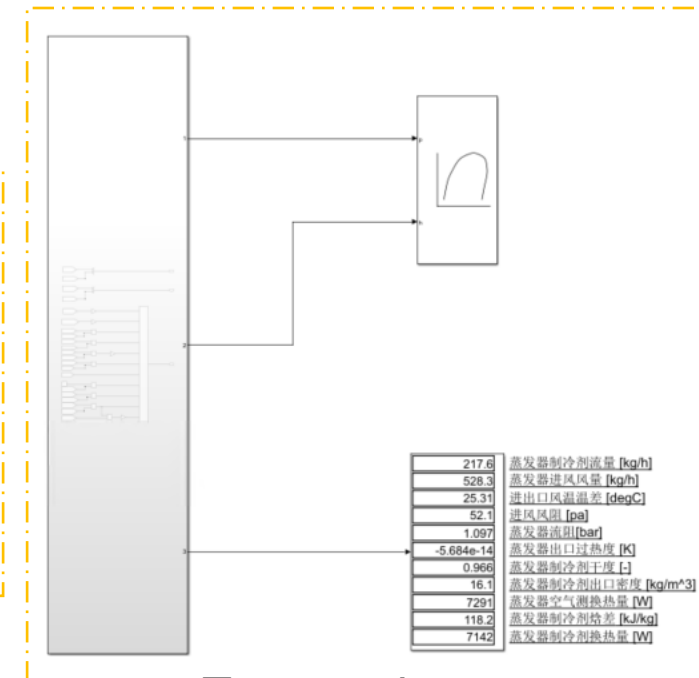
Test frame of evaporator



Test input



Evaporator model



Test results



Test conditions

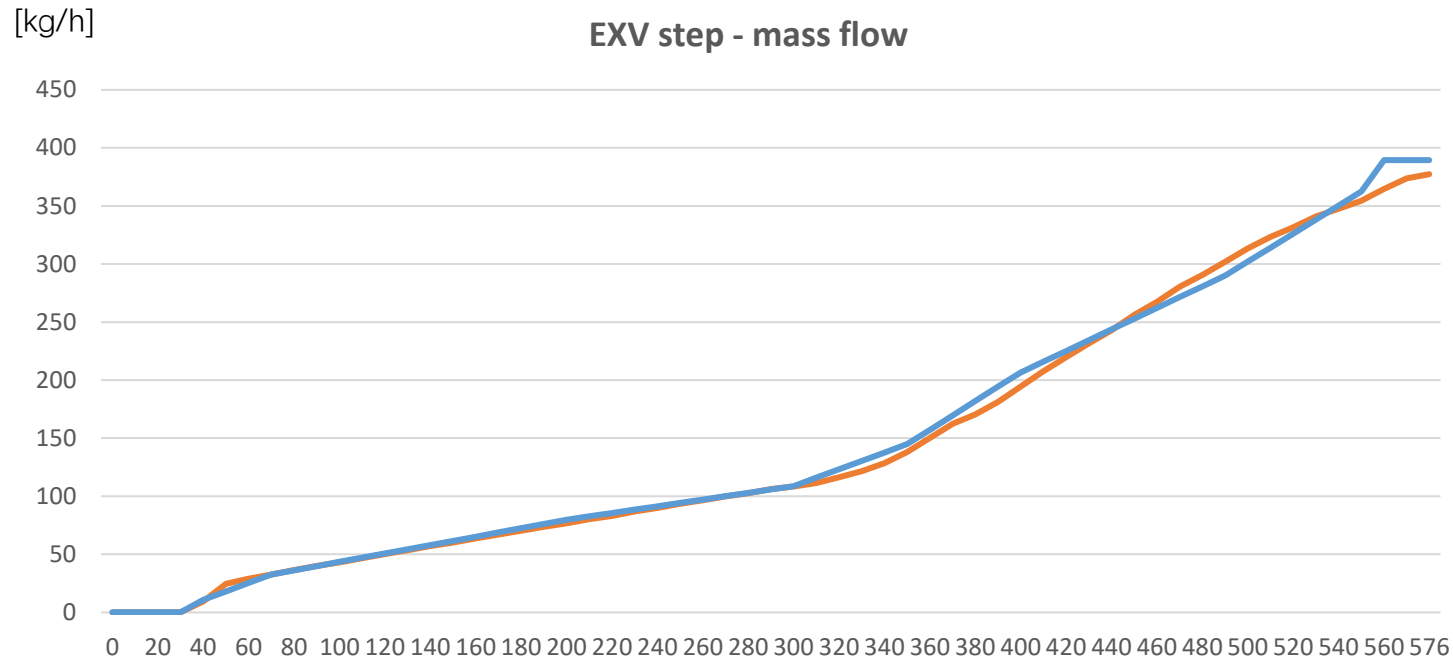
Exp. No.	T air in	RH	air v flow	ref m flow	P ref in before EXV	SC	SH	H ref in	P ref in	P ref out	delta p ref exp.	heat flow exp.	delta p ref sim.	heat flow sim.	Dev.
[-]	[°C]	[%]	[m ³ /h]	[kg/h]	[bar]	[K]	[K]	[kJ/kg]	[bar]	[bar]	[kpa]	[W]	[kpa]	[W]	[%]
1	40	40	476.4	217.6											1.33
2	40	40	371.2	182.3											1.2
3	40	40	254.1	136.5											0.5

Calibration results

iteration

- Calibration parameter**
- Heat exchange model
 - Pressure drop model

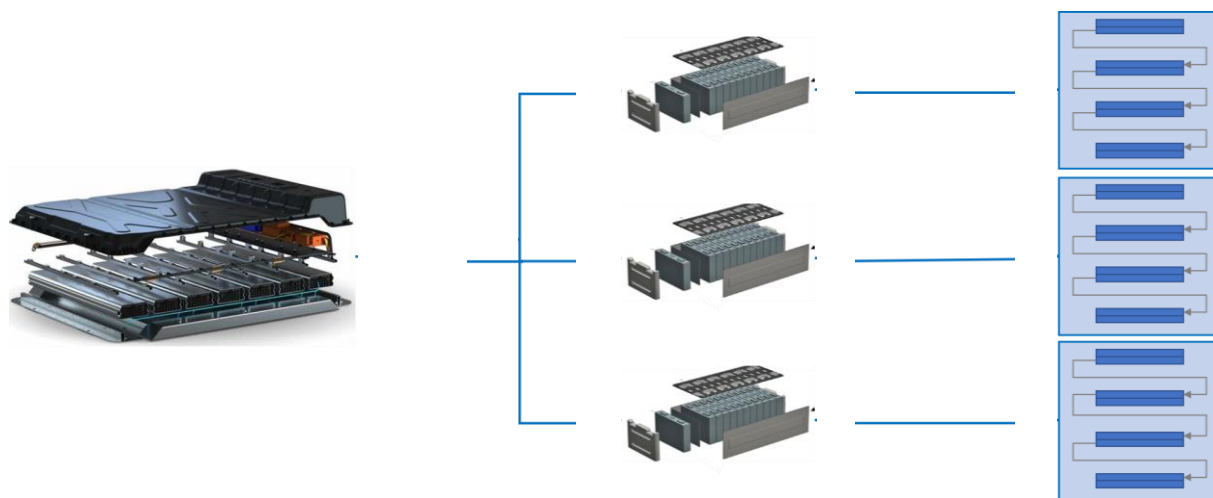
零部件建模 – 电子膨胀阀



```
1 % clear workspace
2 clc
3
4 % open the test harness of Chiller & EVAP Expansion valve
5 open Chiller_EVAP_EXV_Model_Harness_20230416.slx
6
7 % define the model name
8 model = "Chiller_EVAP_EXV_Model_Harness_20230416";
9
10 % define exv open range
11 EXV_Open = linspace(300,400,11);
12 disp(EXV_Open)
13
14 % create the empty array for exv open and ref mass flow
15 EXV_Open_out = [];
16 MassFlow_out = [];
17
18 % test condition
19 P_EXV_in = 16; % ref. inlet pressure of EXV [bar]
20 P_EXV_out = 3; % ref. outlet pressure of EXV [bar]
21
22
23 % param_struct = struct('StopTime','60');
24 SimIn = Simulink.SimulationInput('Chiller_EVAP_EXV_Model_Harness_20230416');
25 % SimIn = setModelParameter(SimIn,'StartTime','0','EndTime','120');
26 SimIn = setVariable(SimIn,'P_EXV_in',P_EXV_in);
27 SimIn = setVariable(SimIn,'P_EXV_out',P_EXV_out);
28
29 % define EXV open step interval for EXV test harness
30 step = 50;
31
32 % EXV open input
33 for s = 1:length(EXV_Open)
34     SimIn = setVariable(SimIn,'EXV_Open',EXV_Open(s));
35     disp(EXV_Open(s))
36     out=sim(SimIn);
37     mass= mean(out.ref_m_flow);
38     disp(mass)
39     MassFlow_out = [MassFlow_out,mass];
40 end
41
42 % EXV test harness output
43 disp(MassFlow_out)
```

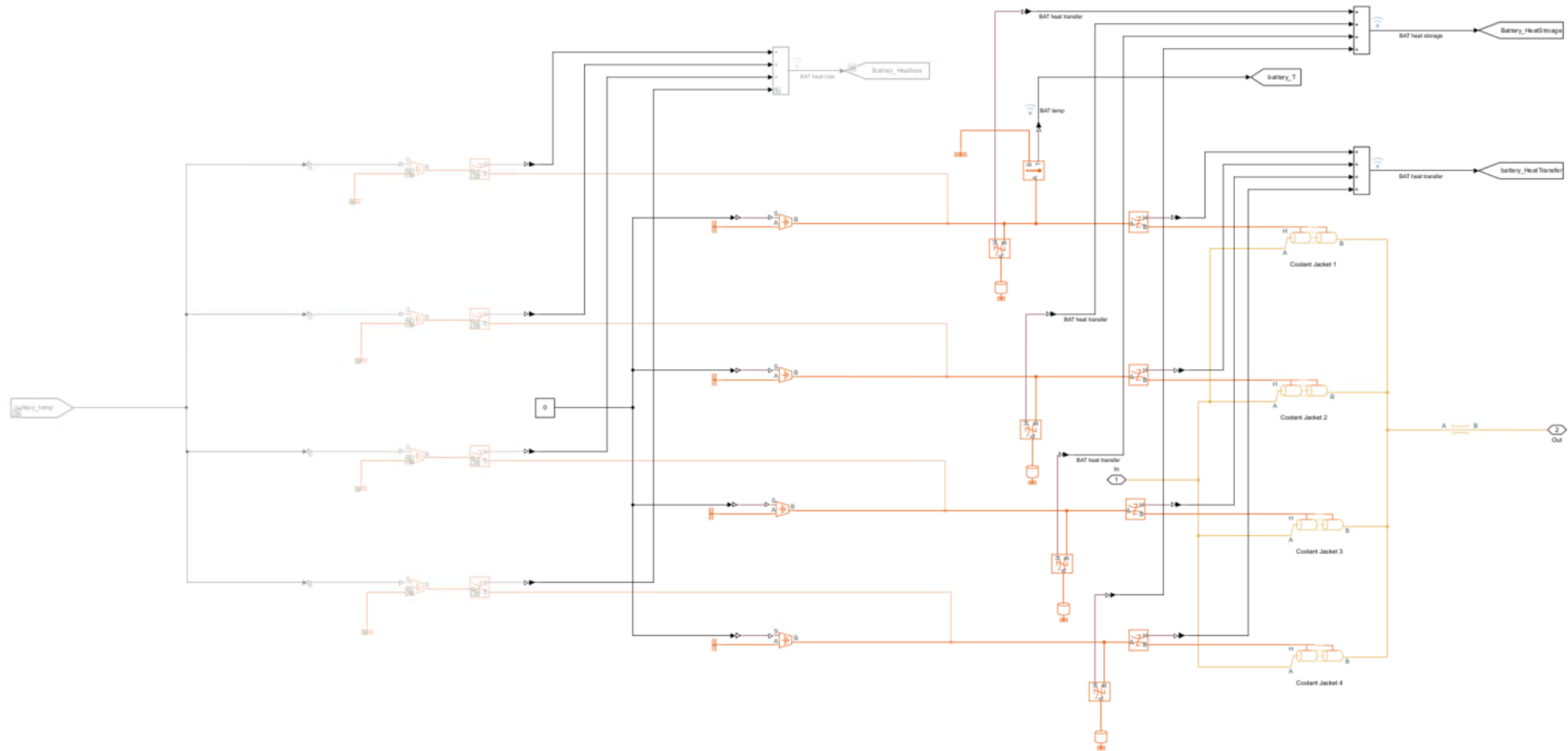
详细数据见零部件标定数据表

零部件建模 – 电池包架构及等效建模

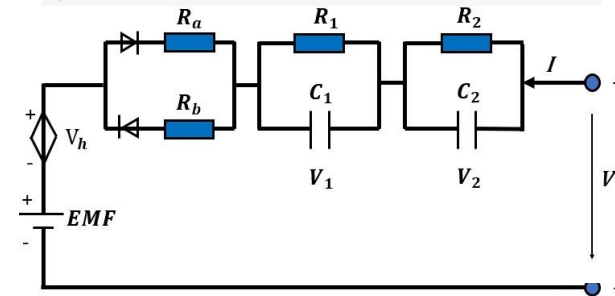
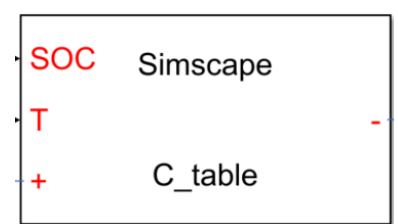
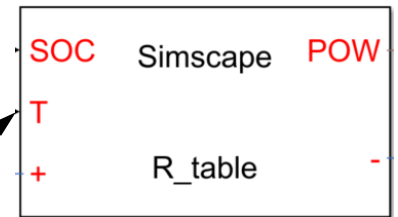
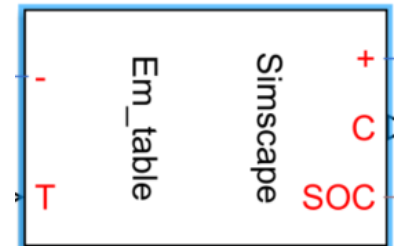
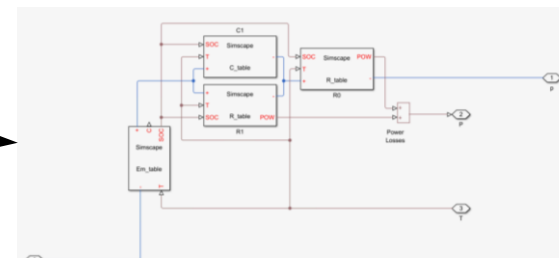
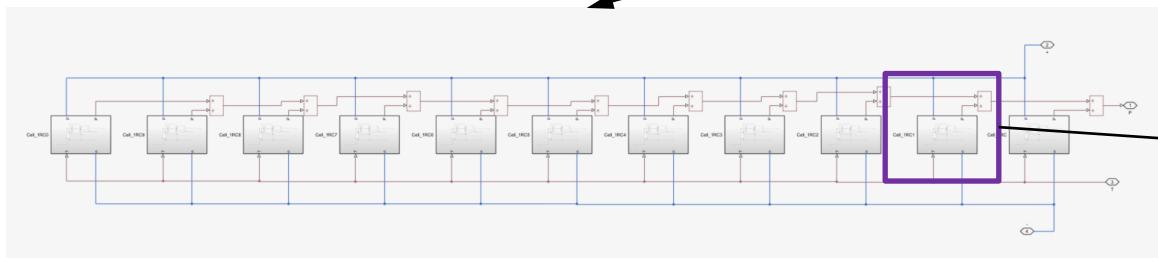
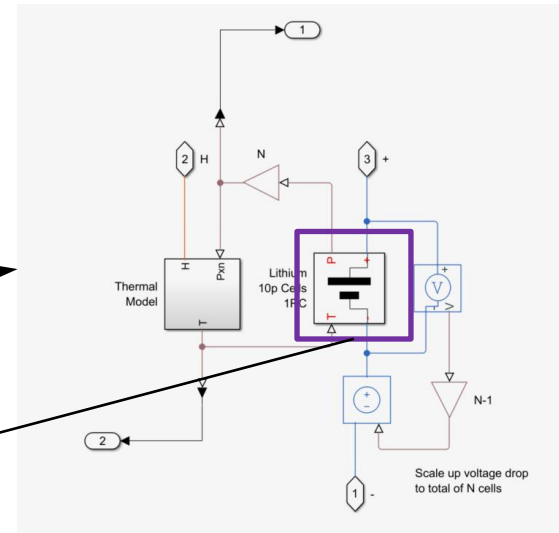
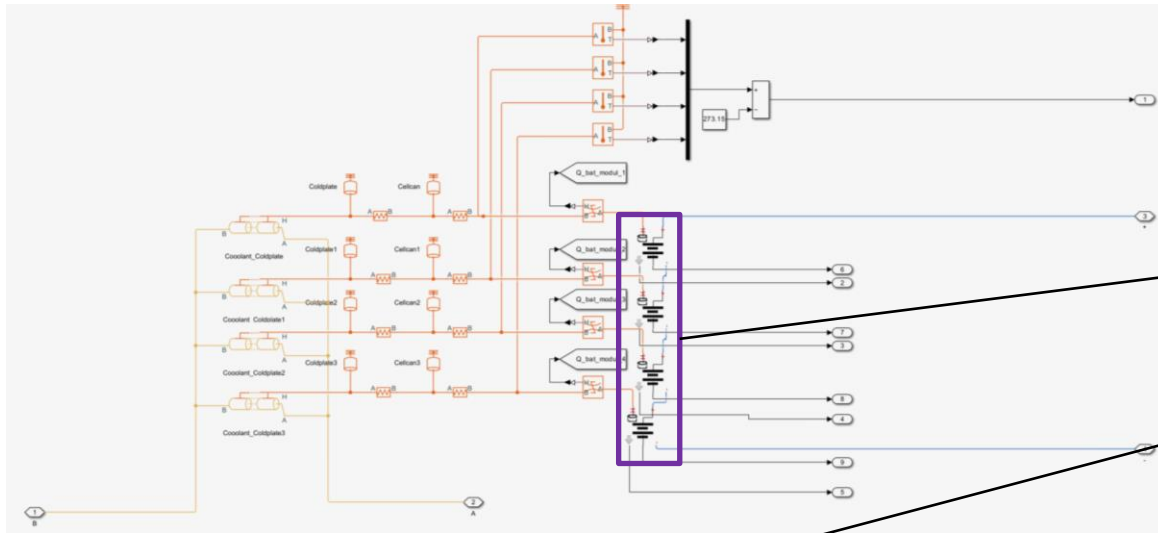


分类		模型特点	优势
电化学模型		建立偏微分方程来描述电池工作时内部的反应过程。对于电池的设计、改进有较大帮助。	描述电池内部机制；有利于电池设计优化和电池结构改进
数学模型		表达式为较复杂的数学公式，参数常通过设计者经验确定。	可用于电池设计过程分析效率、容量等参数的特性。
热模型		用来电池内部产热和热传导过程。	能很好的描述电池的产热和传热过程。
耦合模型		电化学反应和电池的产热是互相影响，为电化学反应动力学公式	能够描述电池内部电能、化学能和热能之间的互相关系。
电气模型		利用常见的电气元器件组成电路，模拟电池的工作过程。	简便、好用，常规元器件的性能确定。
性能模型	神经网络模型	具有自学习能力，解决非线性问题具备优势，需要大量样本进行学习训练。	对非线性有良好的响应。
	等效电路模型	综合性能较好，表达式简单，能够较全面描述系统状态，形式多样。	可根据实际应用的需求方便对模型表达式做出调整。

零部件建模 – 热负载：电池包热输入



二阶RC等效电路模型



负载模型仿真案例1

仿真工况

模式：乘员舱制冷

仿真时间：3600 s

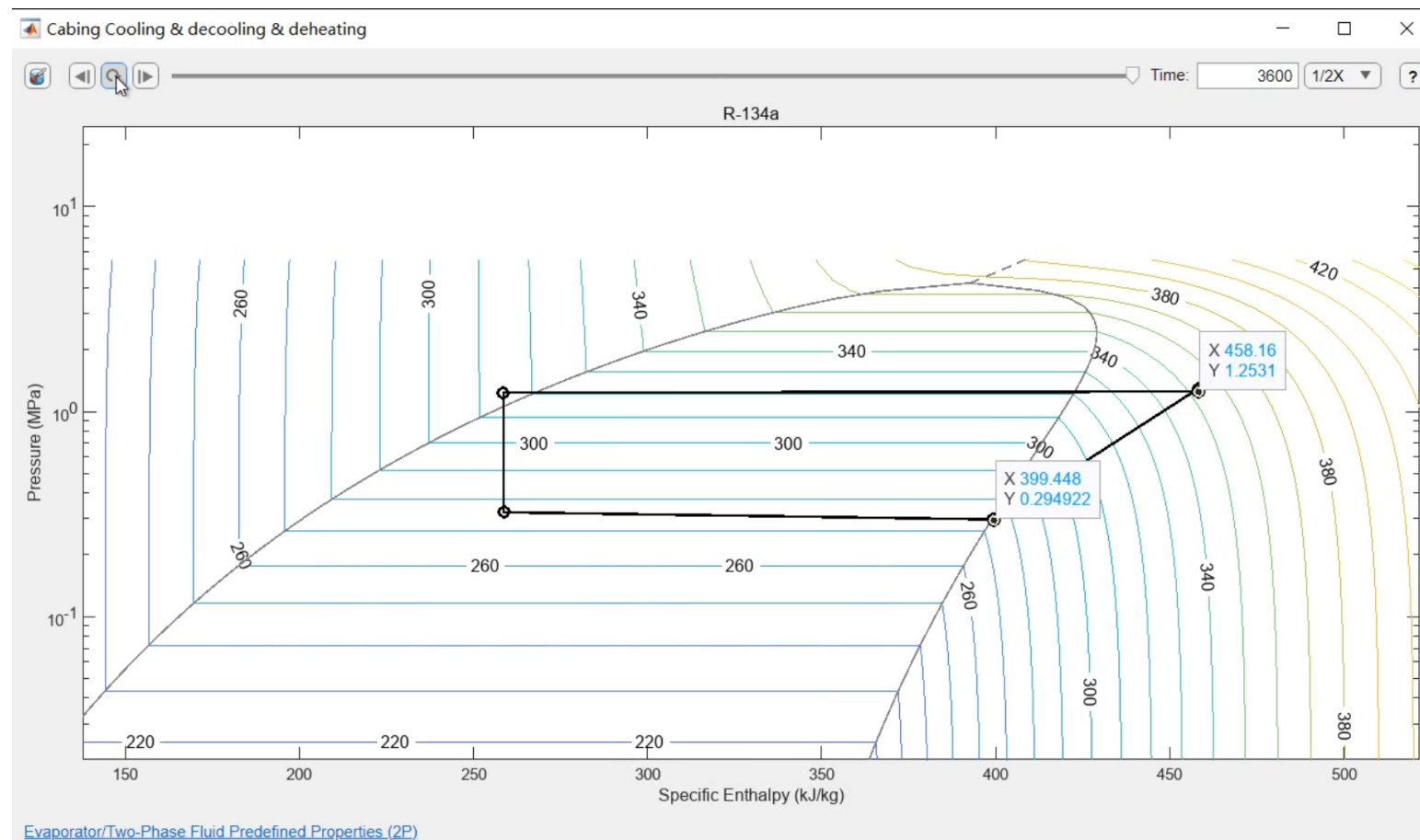
仿真运行时间：156 s

乘员舱初始温度：40 ° C

环境温度：40 ° C

环境相对湿度：40 %

HVAC风量：400 kg/h



负载模型仿真案例1

仿真工况

模式：乘员舱制冷

仿真时间：3600 s

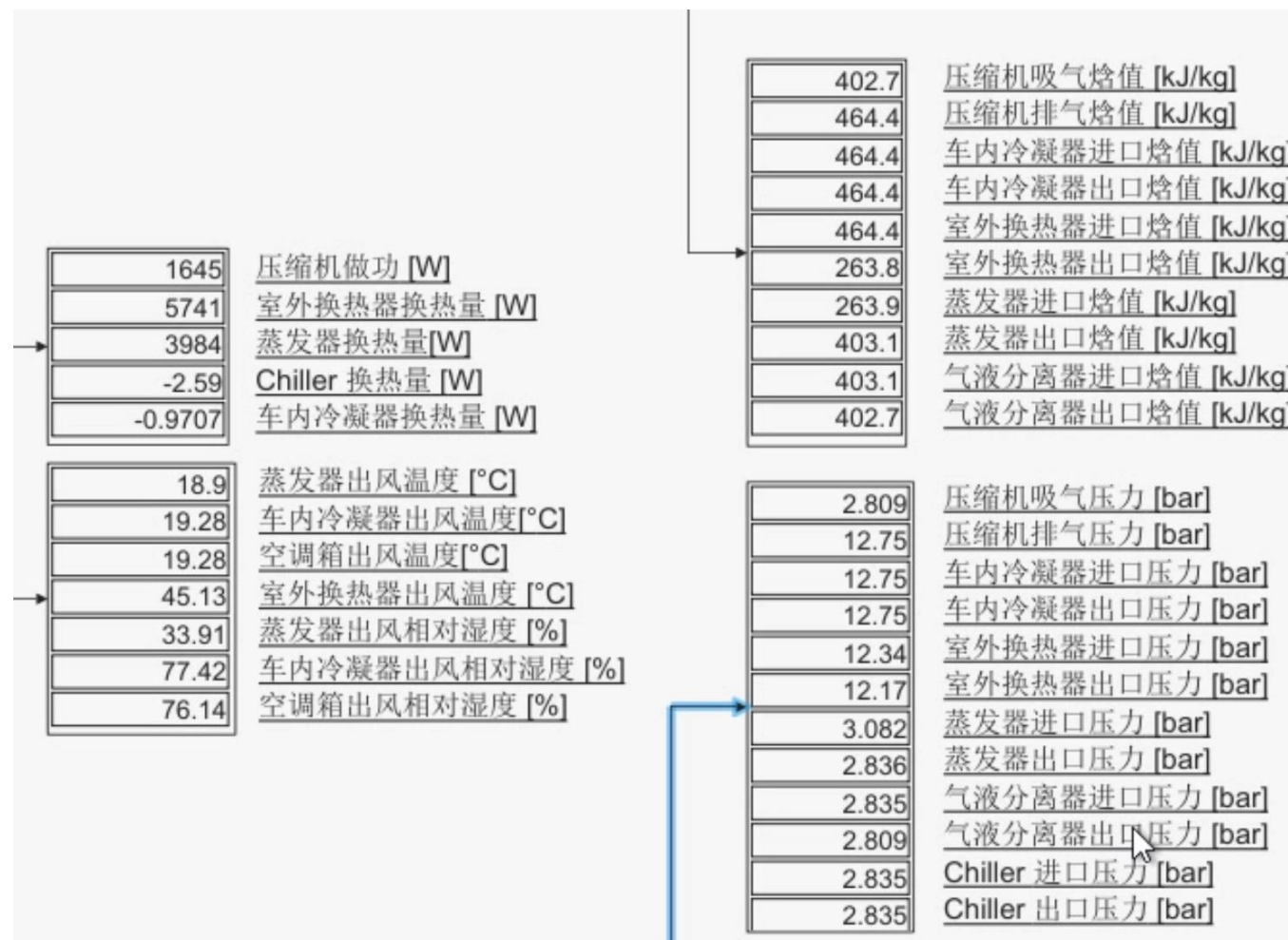
仿真运行时间：156 s

乘员舱初始温度：40 ° C

环境温度：40 ° C

环境相对湿度：40 %

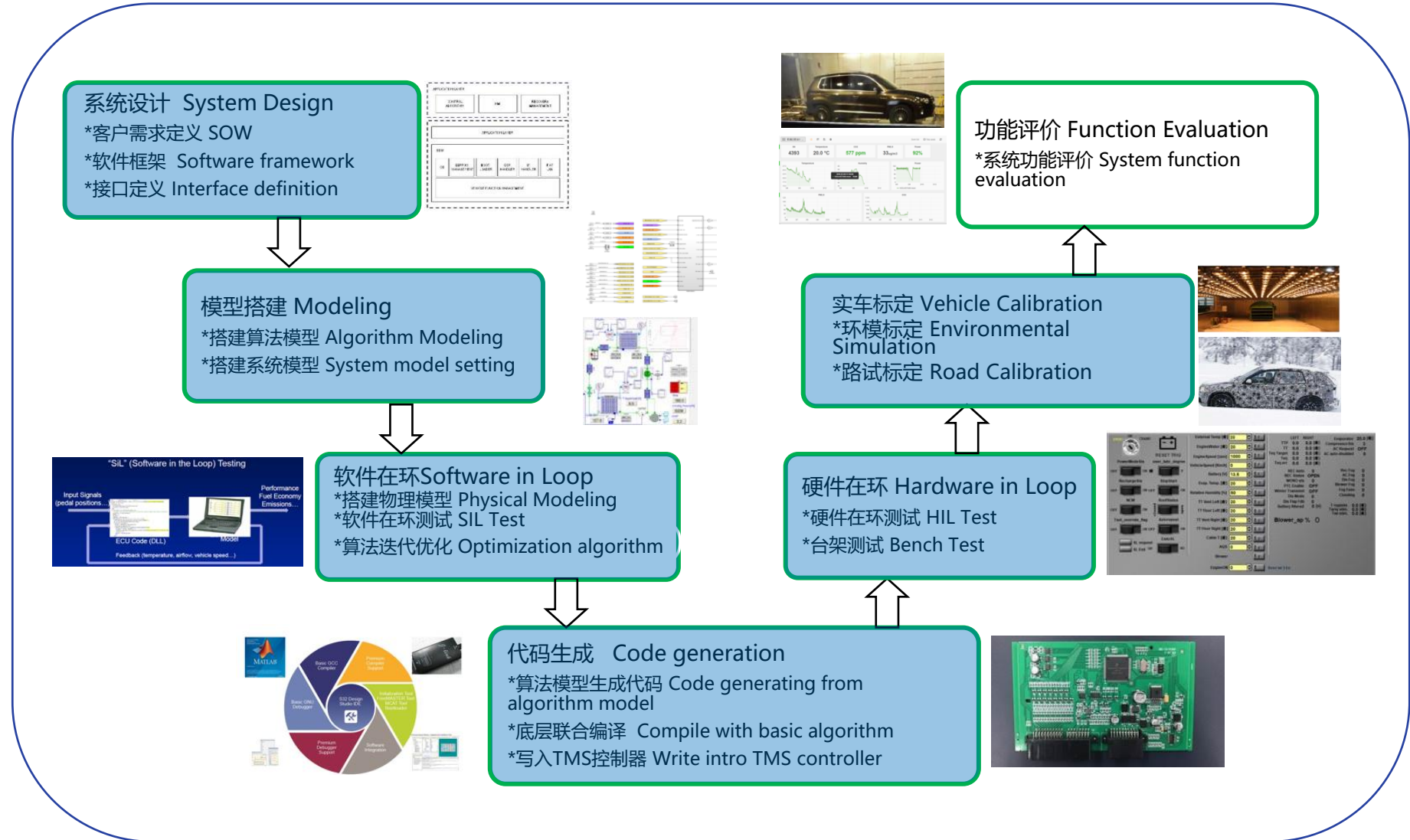
HVAC风量：400 kg/h



软件开发流程

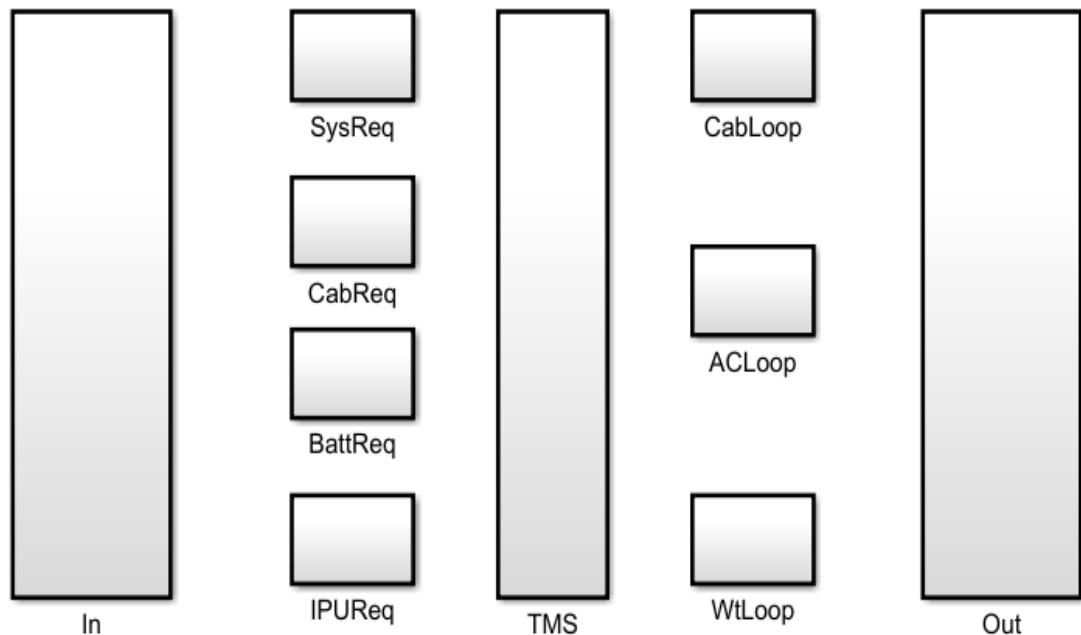
支持完整V-Model工程开发
支持ASPICE流程LV2等级

Mathwork 工具链
的应用



软件框架设计

使用标准架构设计，实现软件功能



Level	Module	SubModule	Task	Source File	Description		
Input	/		100ms	TM_Input.c	输入信号处理		
ReqCal	SysReq	COM	100ms	TM_Req.c	通用信号处理		
		CFG	100ms	TM_Req.c	配置管理		
		Diag	100ms	TM_Req.c	系统失败处理		
		SenCorr	100ms	TM_Req.c	传感器修正		
		Crash	100ms	TM_Req.c	故障处理		
		EnergySave	100ms	TM_Req.c	能量管理		
		AfterRun	100ms	TM_Req.c	后运行		
		LVHV	100ms	TM_Req.c	电源管理		
		CabReq	HMI		20ms	TM_Req.c	人机交互处理
				CabSP	500ms	TM_Req.c	计算期望呼吸点温度
				AutoDefog	500ms	TM_Req.c	计算自动除雾需求
				Energy	500ms	TM_Req.c	车能能量平衡算法
				CabMode	500ms	TM_Req.c	计算车厢需求模式
				AirFlow	500ms	TM_Req.c	计算期望风量
DVT	500ms			TM_Req.c	计算期望出风温度		
OutletCal	500ms			TM_Req.c	计算期望出风模式		
InletCal	500ms			TM_Req.c	计算期望循环比例		
BattReq	BattMode				100ms	TM_Req.c	计算电池需求模式
		BattTarT	100ms	TM_Req.c	计算电池期望水温		
IPUReq	/	500ms	TM_Req.c	计算IPU需求			
TMS	HP_Mode	HP_ModeUser	100ms	TM_TMS.c	计算车厢、电站、IPU综合需求		
		HP_HcCalSource	100ms	TM_TMS.c	计算冷热源选择		
		HP_ModeAC	100ms	TM_TMS.c	计算压缩机控制请求		
		HP_ModePTC	100ms	TM_TMS.c	计算PTC控制请求		
		HP_ModeValve	100ms	TM_TMS.c	计算阀工作模式		
		DECT	DECT	500ms	TM_TMS.c	计算期望蒸发器温度	
	DCT	DCT	500ms	TM_TMS.c	计算期望Chiller温度		
		DECT	500ms	TM_TMS.c	计算蒸发器和chiller综合需求		
	DHT		500ms	TM_TMS.c	计算期望的内冷温度		
	DWT		500ms	TM_TMS.c	计算期望加热水温		
LoadDrive	CabLoop	Blower	500ms	TM_Load.c	鼓风机控制		
		Outlet	500ms	TM_Load.c	出风模式控制		
		Inlet	500ms	TM_Load.c	循环控制		
		Mixdoor	500ms	TM_Load.c	冷暖风门控制		
		OutletAGS	500ms	TM_Load.c	电动出风口控制		
		Fragrance	500ms	TM_Load.c	香氛控制		
		APTC	100ms	TM_Load.c	APTC控制		
	ACLoop	EAC	100ms	TM_Load.c	压缩机控制		
		SCV	100ms	TM_Load.c	电磁阀控制		
		EXV	100ms	TM_Load.c	EXV控制		
	WtLoop	Pump	500ms	TM_Load.c	水泵控制		
		AGS	500ms	TM_Load.c	AGS控制		
		CFan	500ms	TM_Load.c	电子风扇控制		
		WPTC	100ms	TM_Load.c	WPTC控制		
		WV	500ms	TM_Load.c	水阀控制		
Output	/	/	100ms	TM_Output.c	输出信号处理		

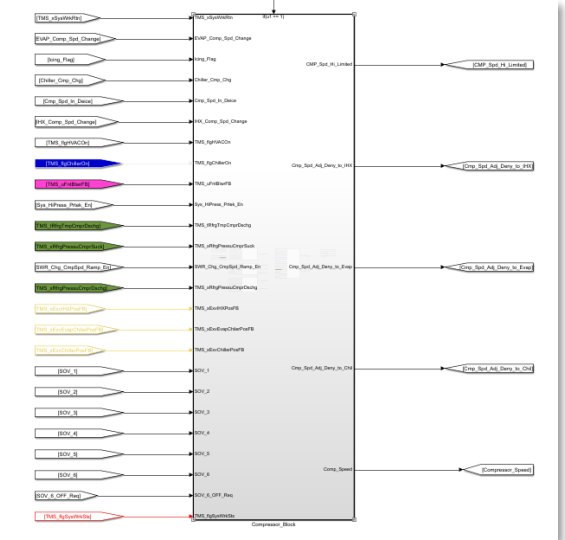
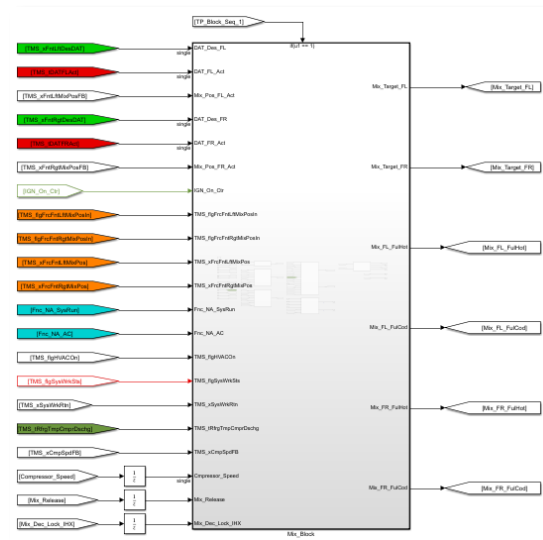
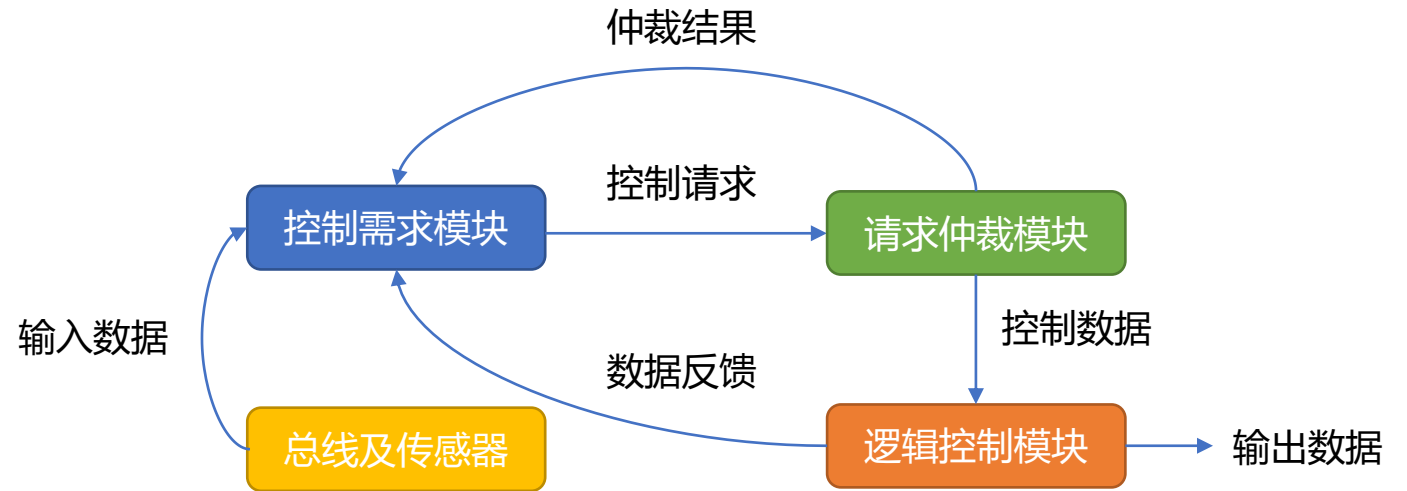
热管理系统软件开发 – 热力系统控制

控制方式:

面对对象的控制方式

被控对象:

- 1) 蒸发器+相关EXV
- 2) 内冷冷凝器+相关EXV
- 3) Chiller+相关EXV
- 4) OHX (状态监控)
- 5) 制冷回路阀泵
- 6) 压缩机控制
- 7) HVAC控制
- 8) 水路阀泵控制
- 9) AGS+散热器风扇控制



控制·逻辑 – 蒸发器温度控制

蒸发器温度计算

依据DAT，车内除湿温度等，计算蒸发器工作温度

压缩机转速控制

控制目标：蒸发器表面温度

采用改良后的PID控制，计算压缩机转速增量

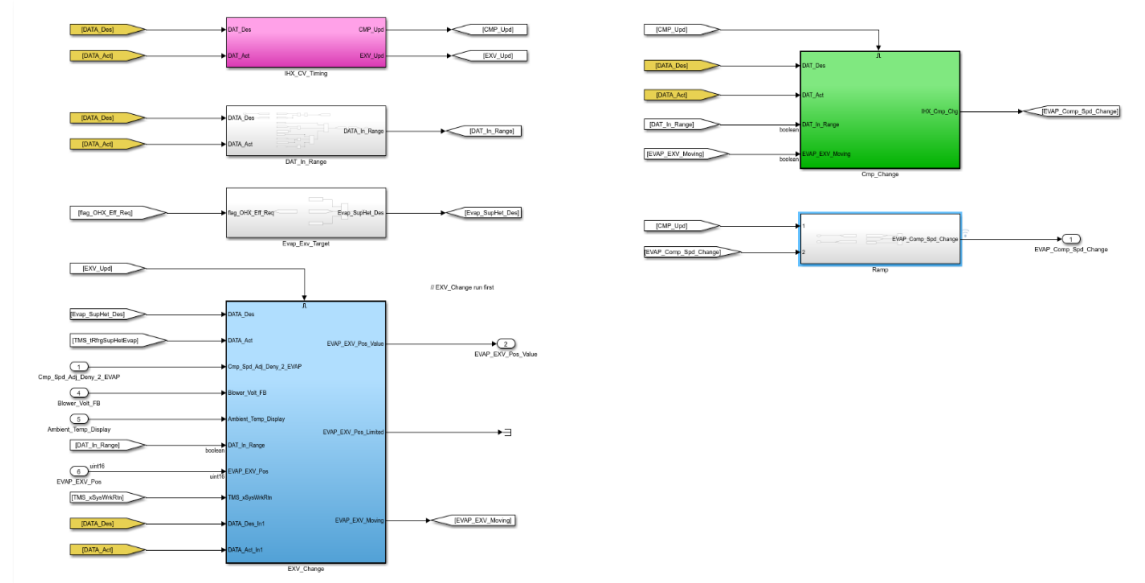
EXV控制

控制目标：目标过热度

以实际过热度为反馈，针对EXV位置采用PI控制

蒸发器温度保护

在控制蒸发器温度的同时，将压缩机停机保护的下限温度进行动态处理，防止结霜以及压缩机的停机

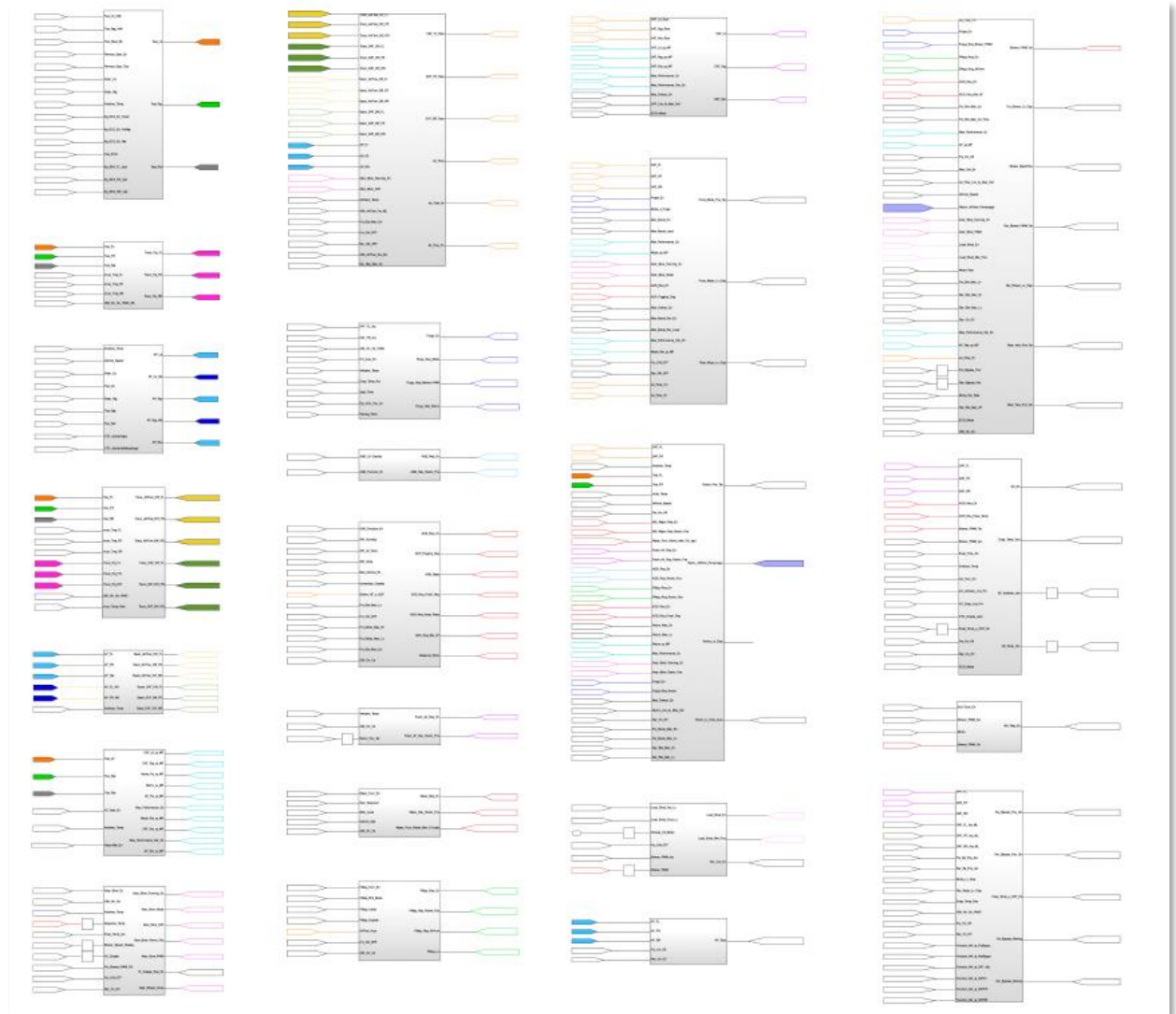


热管理系统软件开发 – 舒适性算法

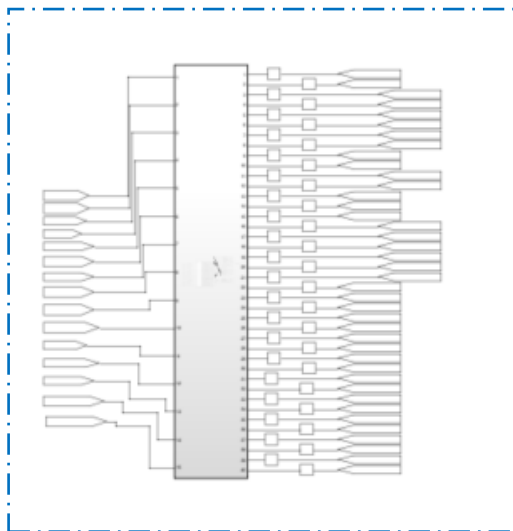
自动控制

- ✓自动风量控制
- ✓自动模式控制
- ✓自动AC控制
- ✓自动循环控制
- ✓自动出风口控制
- ✓自动除雾控制
- ✓自动空气净化控制

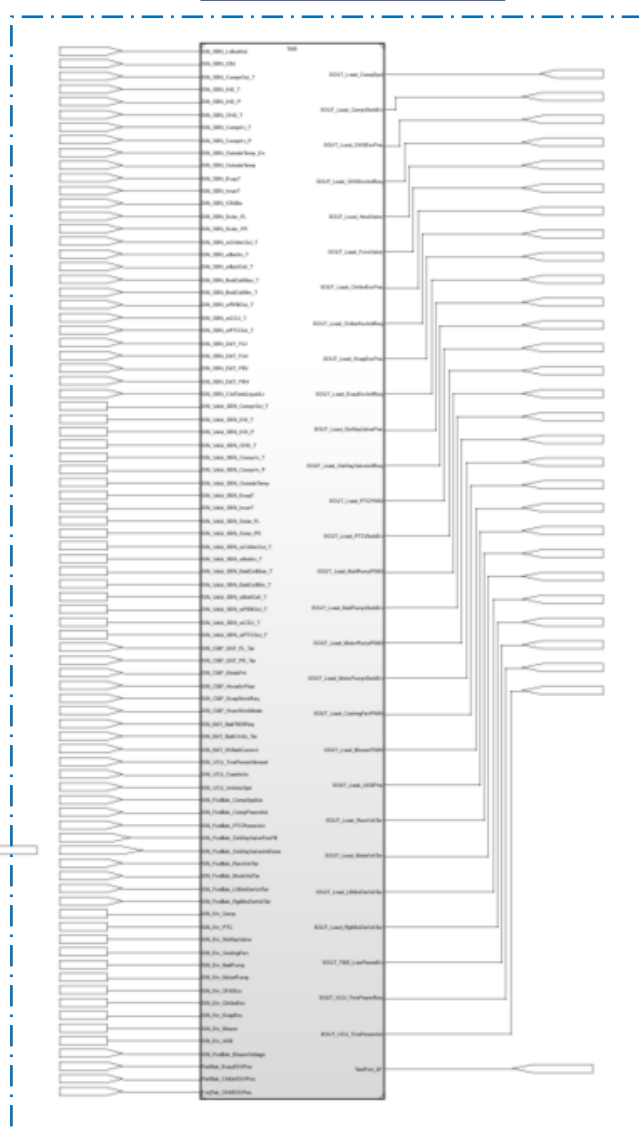
.....



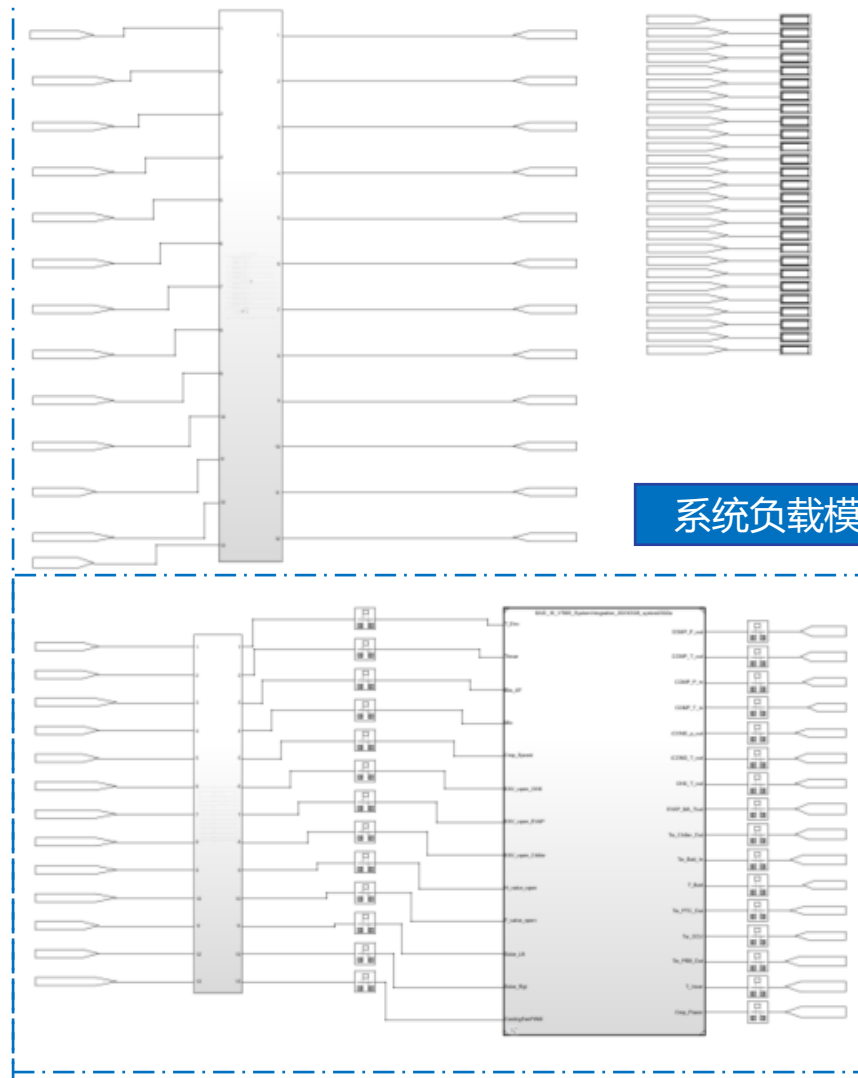
仿真工况



控制模型



系统负载模型



联合仿真案例

仿真工况

乘员舱初始温度: 25 ° C

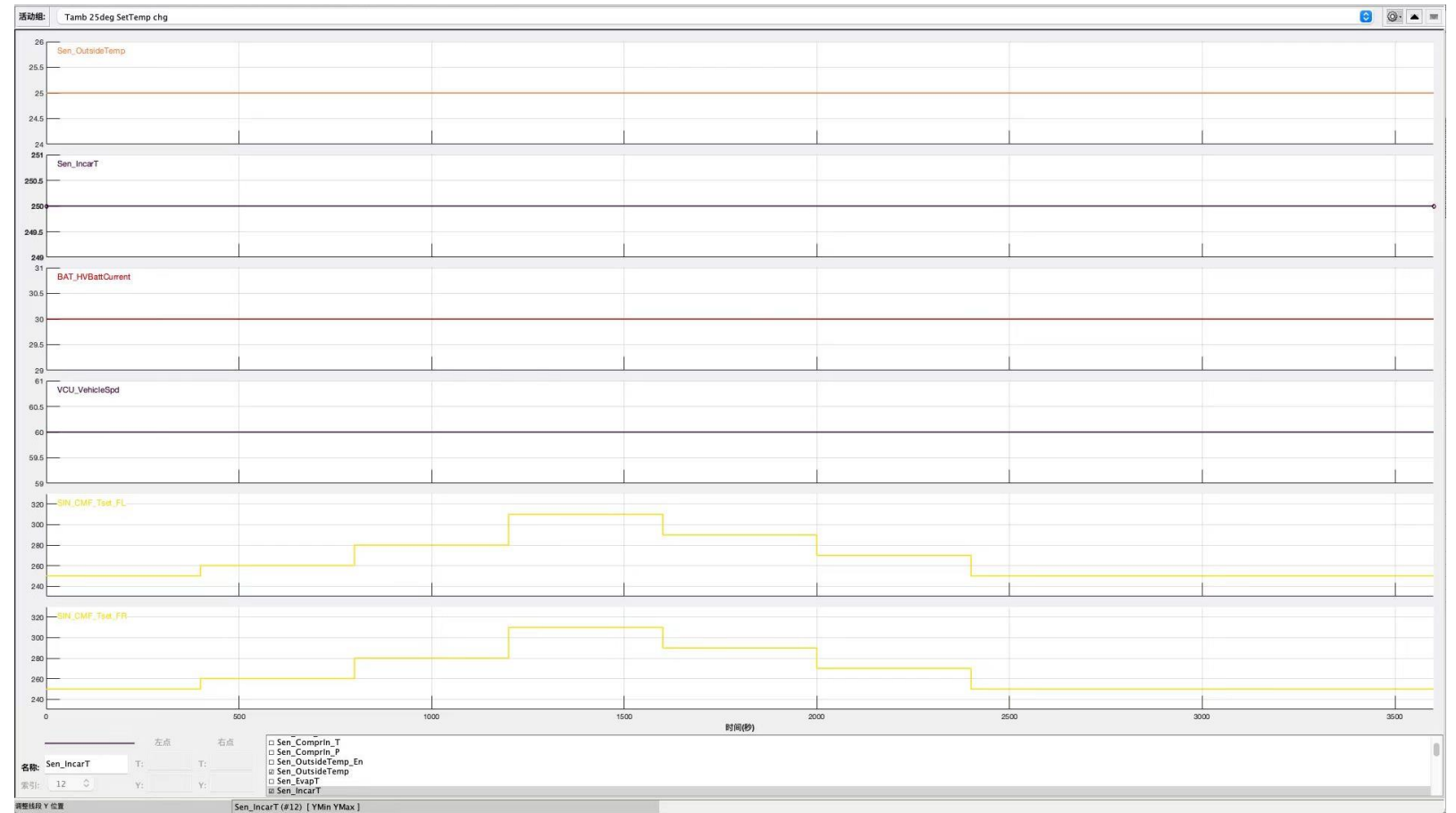
环境温度: 25 ° C

动力电池电流: 30A

车速: 60 km/h

左区设定温度: 变化量

右区设定温度: 变化量



经验总结及分享

问题解决

1. 自动化操作及配置：批量运行仿真工况
2. Mathwork定制化的模型：EXV + Compressor
3. 解决压缩机停机时的压力平衡问题
4. 联合仿真：异步联合
5. 模型中无法直接调用的信号：通过脚本读取
SimLog中的data可以进行后处理

To-dos

1. 联合仿真，涉及到模式切换的仿真工况，运算时间比较久
后期需要通过系统负载模型简化和ROM (Reduce order model) 系统负载模型的降阶实现
2. 常用模型建模时间成本较高
通过建立自己模型模板，提高复用度，降低建模的时间成本
3. 系统内容积的计算



新能源汽车“节能管家”

NEV's "Energy Saving Butler"