

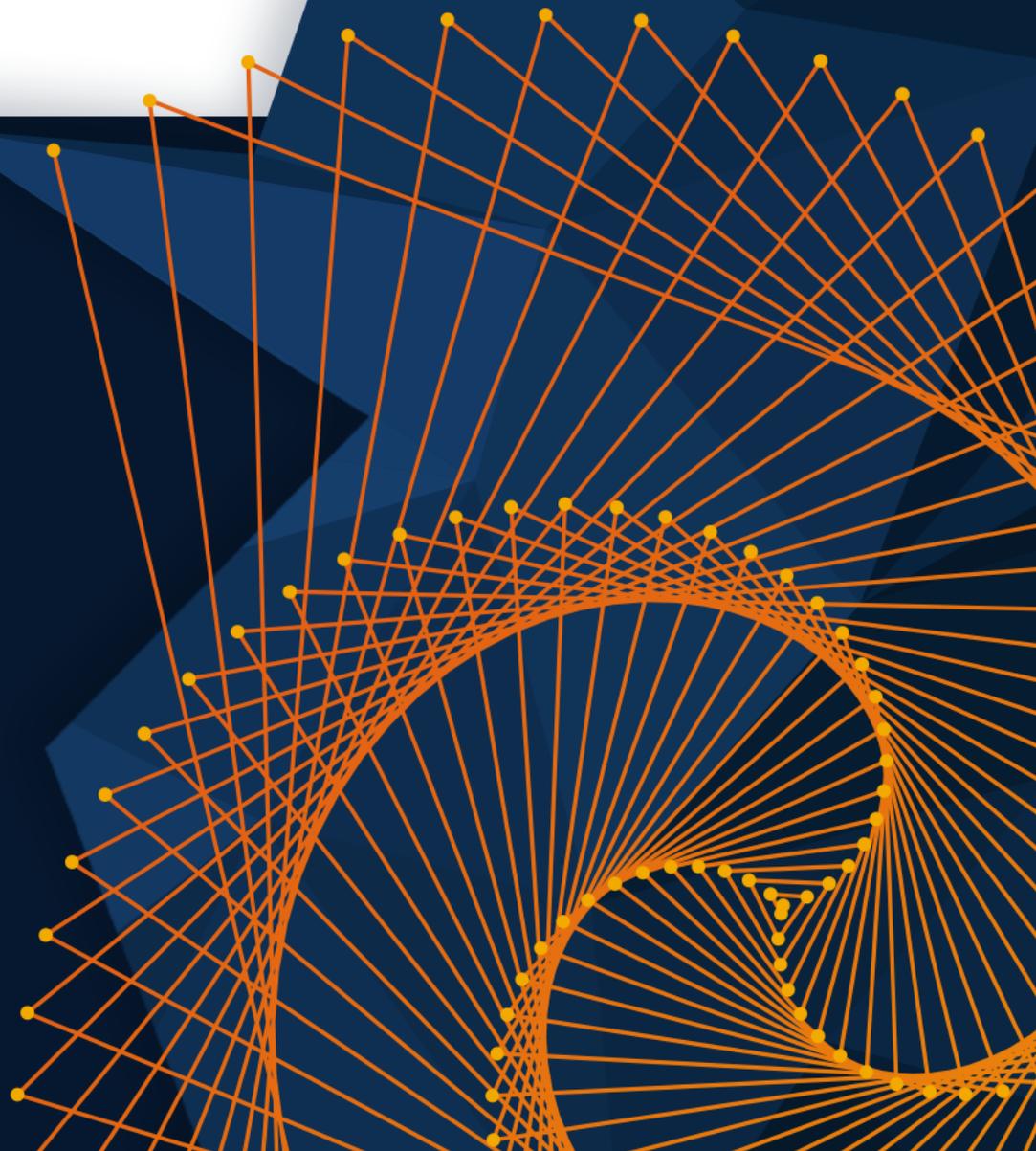
5月28日, 2024 | 北京

基于模型设计赋能整车热管理系统 控制算法设计和软件实现

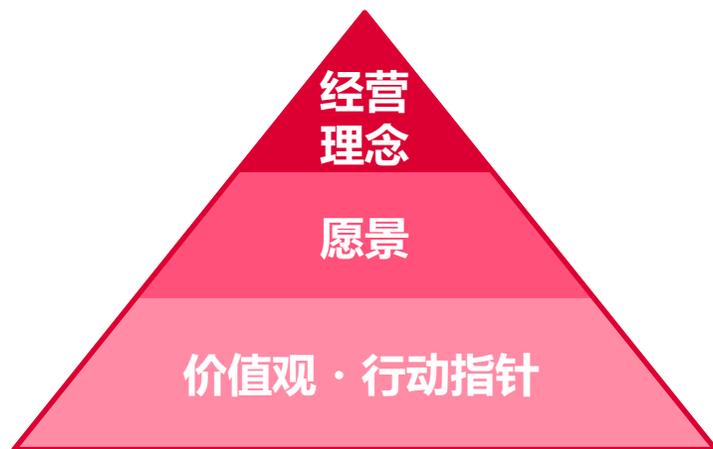
束明宏 重庆超力电器有限责任公司



MATLAB EXPO



超力电器经营理念



超力电器的经营理念·愿景·行动指针

用碳中和技术造福世人

**诚挚务实，卓越创新
努力为顾客创造价值，成为顾客最佳合作伙伴**

**安全·品质第一；超越自我，力求卓越
互助·互信·互敬，共创美好明天**

超力高科的经营理念·愿景·行动方针

企业文化 

超越自我 力求卓越

企业使命 面对新的工业革命带来的新能源、新技术发展机会，超力高科审时度势，顺应时代潮流，力争通过5年发展，迈向“世界级优秀供应商”的新台阶。
君子生非异也，善假于物也。整合资源，扬长避短，实现超力高科战略目标。

核心价值

创新卓越 求真务实
诚挚互信 行胜于言

经营理念

为客户创造价值
与员工共同发展

企业愿景

以整体创新引领中国工业化进程，
成为世界客户的最佳合作伙伴

以务实求真卓越创新引领中国工业化进程

DENSO的经营理念·愿景·行动方针

DENSO
Crafting the Core

经营理念

愿景

行动指南

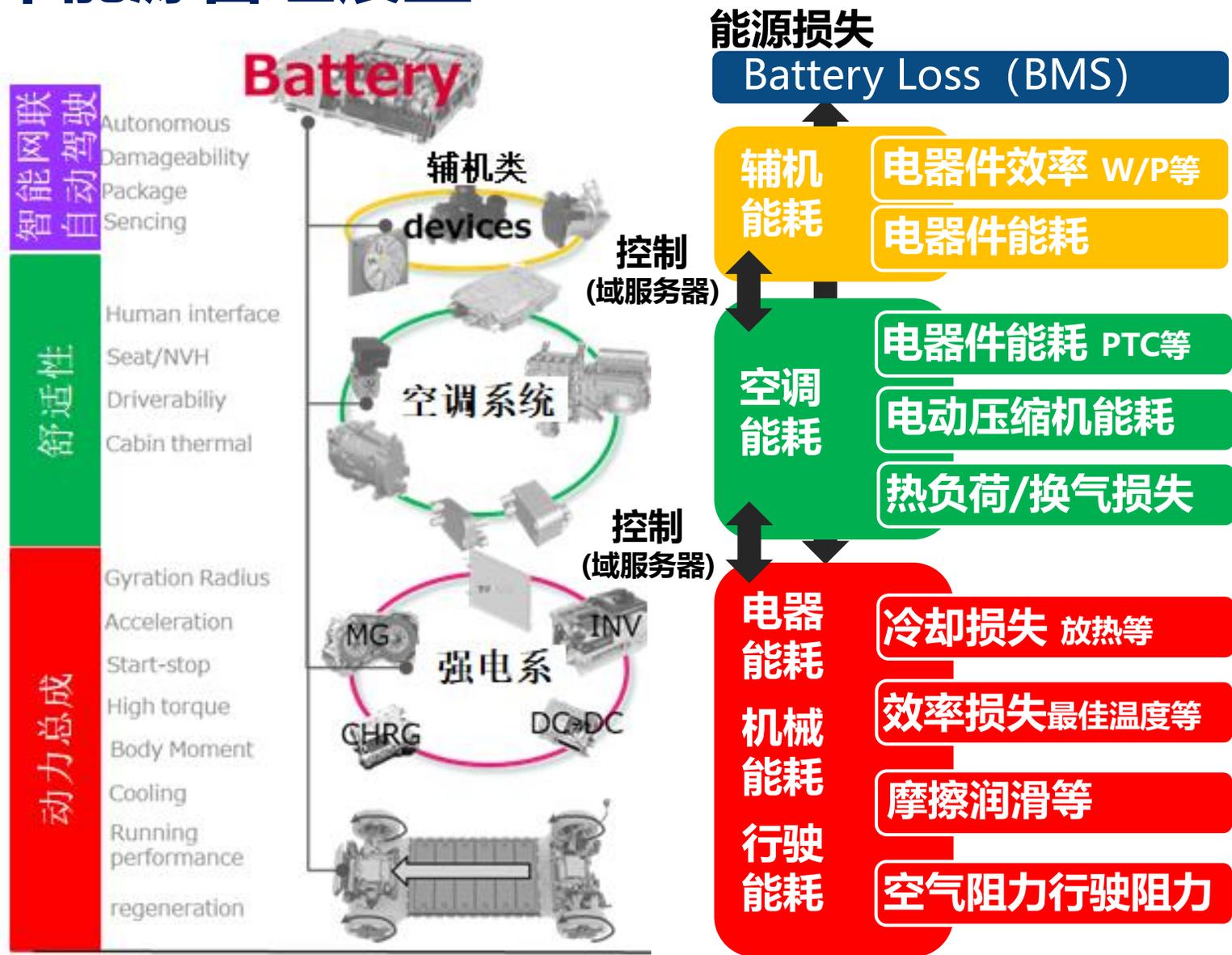
放眼世界和未来
创造价值，造福世人

用魅力四射的产品满足客户需求
预知变化、布局全球
珍爱大自然、与社会共生
尊重个性、创造有活力的职场

安全·品质第一
大胆假设、踏实践行
相互协作、挑战明天
磨练自我、赢得信赖

【环境】贡献碳中和 【安心】实现智能化社会

整车能源管理展望



节能思路

SOFTWARE

总能管理

能耗最适化分配算法

高效热管理

动态热管理高效算法

低能耗

热管理部件(压缩机等)

高效化/轻量化

模块化/集成化

气流管理

机舱/乘员舱热效率

HARDWARE

产品概述

完备的NEV热管理产品系列，能够满足客户的需求

1. 热管理系统

通过智能高效软件、小型轻量高效硬件两方面实现低碳低能耗

2. HVAC

20年以上市场供货业绩
基于NEV不断变化的布局需求，进行优化



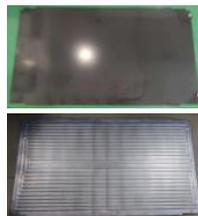
3. 电动压缩机



100万台以上市场供货业绩，满足NEV的能耗(COP)、NVH苛刻需求

4. 水冷电池冷却板

基于丰富的热交换器开发经验和生产技术，新开发产品



5. HV水加热器



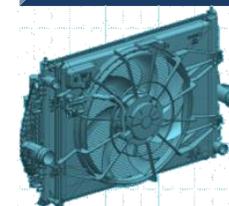
充分考虑了安全性，并从热交换专业角度进行了小型轻量化

6. 热管理集成模块

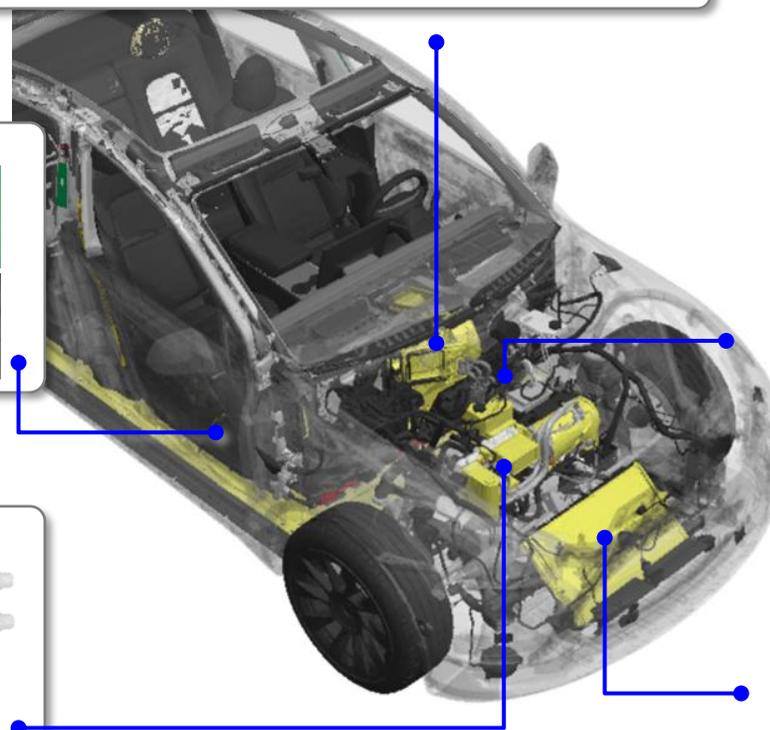
针对热交换器等核心零件进行优化，实现小型轻量化



7. NEV用前端冷却模块



15年以上市场供货业绩，根据市场需求不断优化

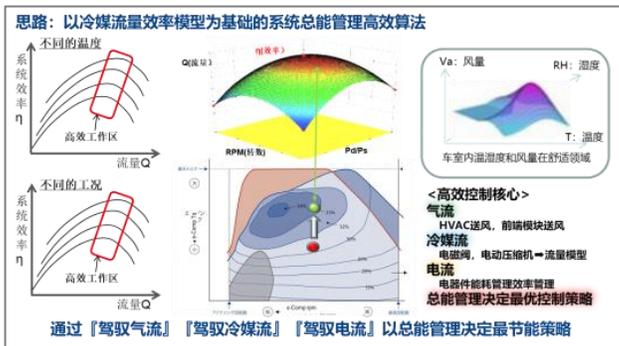


超力热管理路线

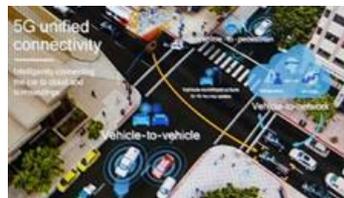
通过智能高效软件及小型轻量高效硬件的两方面实现低碳低能耗

软件Software

智能高效算法



智能热管理 Out Car

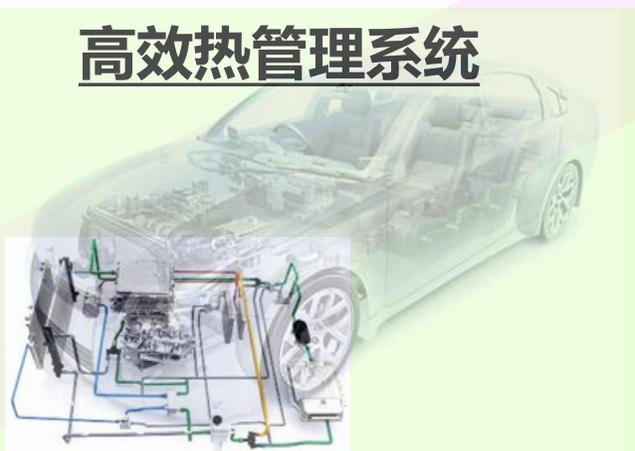


智能高效热管理系统

AI自进化控制



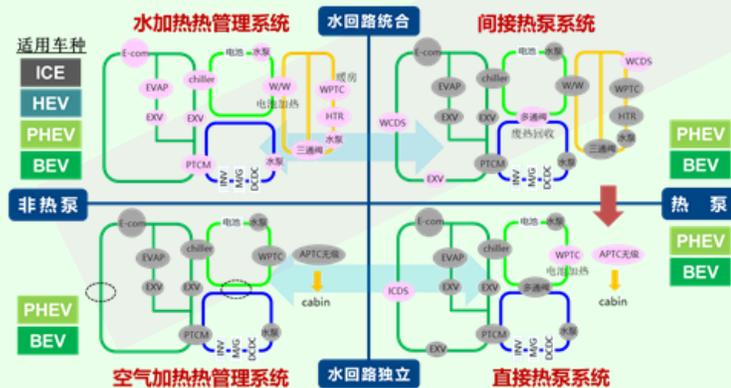
高效热管理系统



深度集成热管理模块

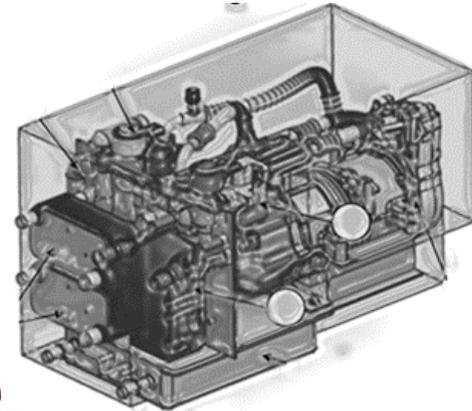
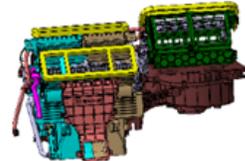
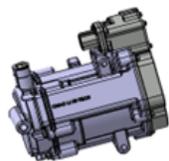
CTMA热管理系统架构

兼顾多样化与共通化



小型·轻量·高效·模块化

电动压缩机 小型高效HVAC 机舱气流管理模块



硬件Hardware

CTMA 超力热管理系统架构

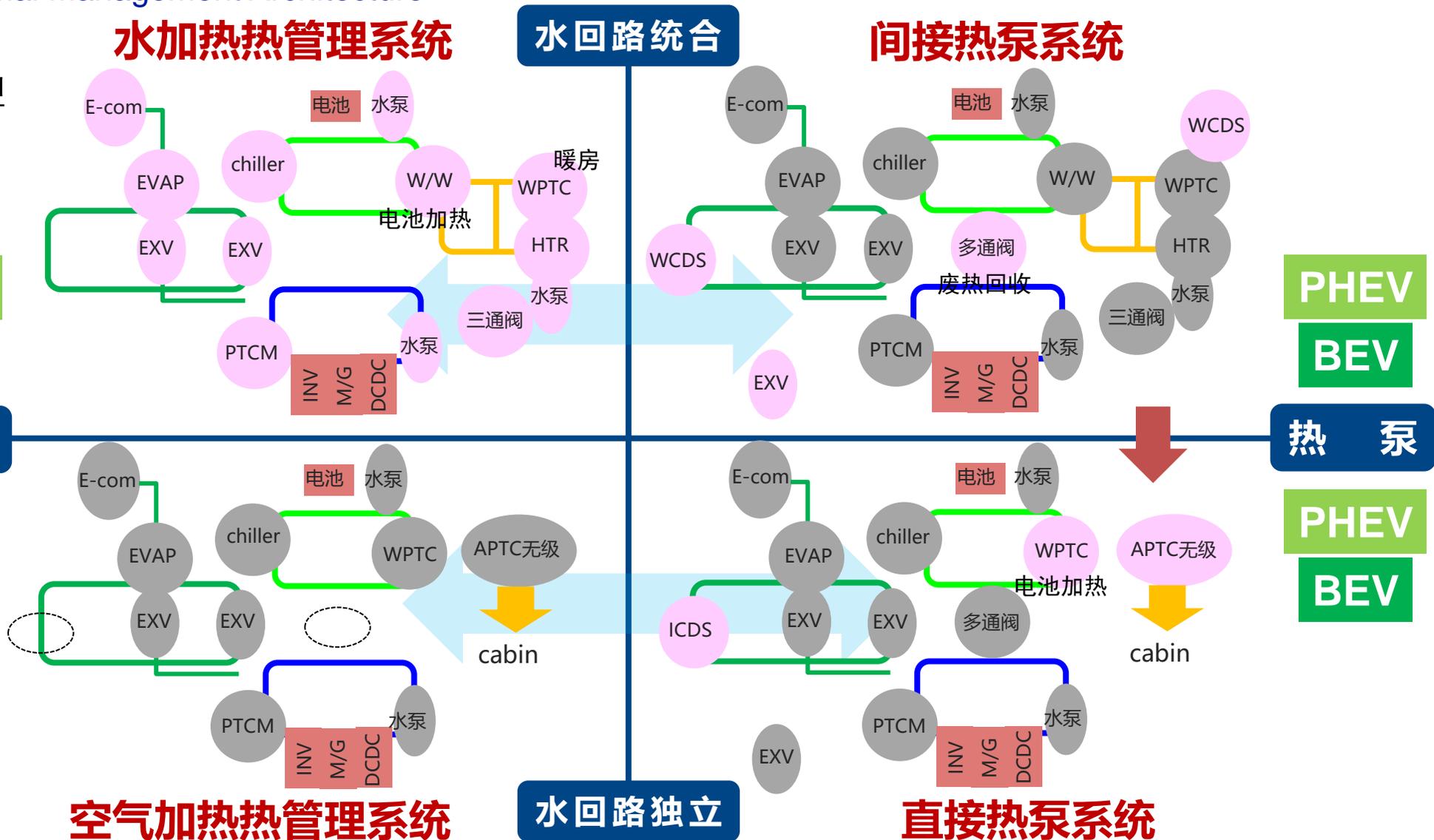
Chaoli Thermal Management Architecture

适用车种

- ICE
- HEV
- PHEV
- BEV

非热泵

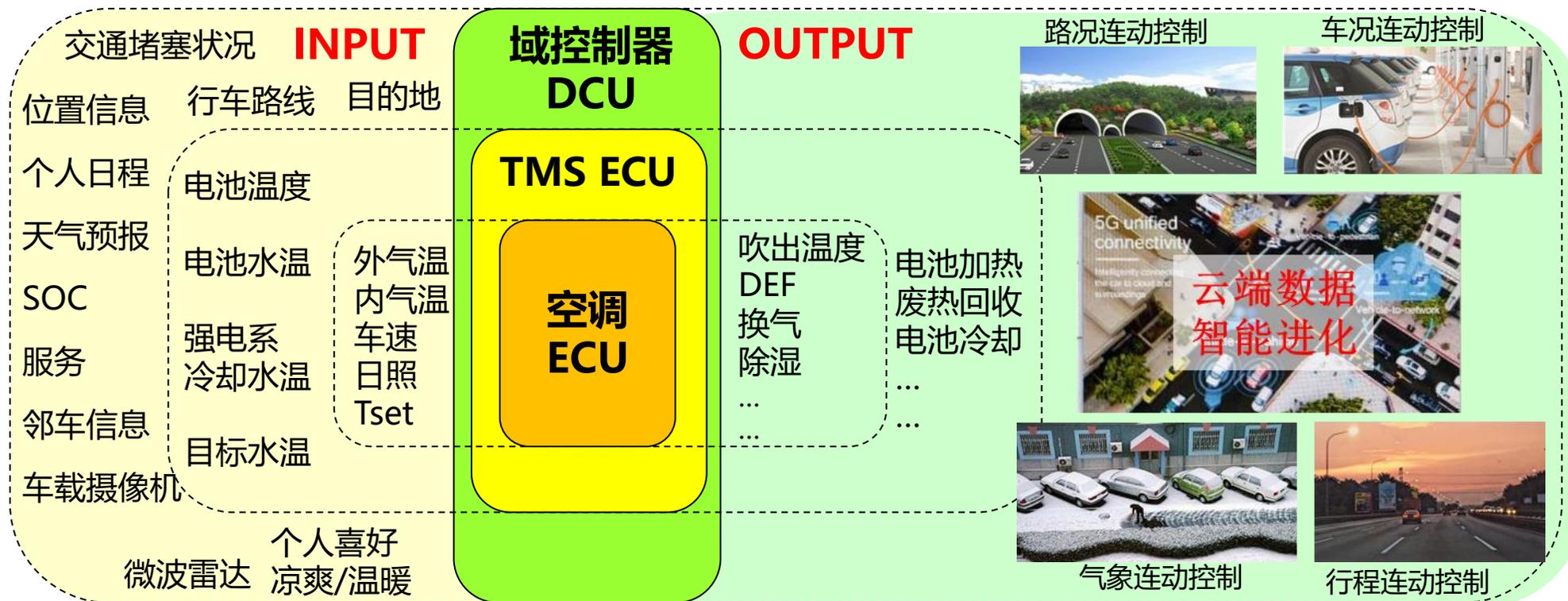
- PHEV
- BEV



智能化热管理 (CITMS)

CITMS (**C**haoli **I**ntelligent **T**hermal **M**anagement **S**ystem)

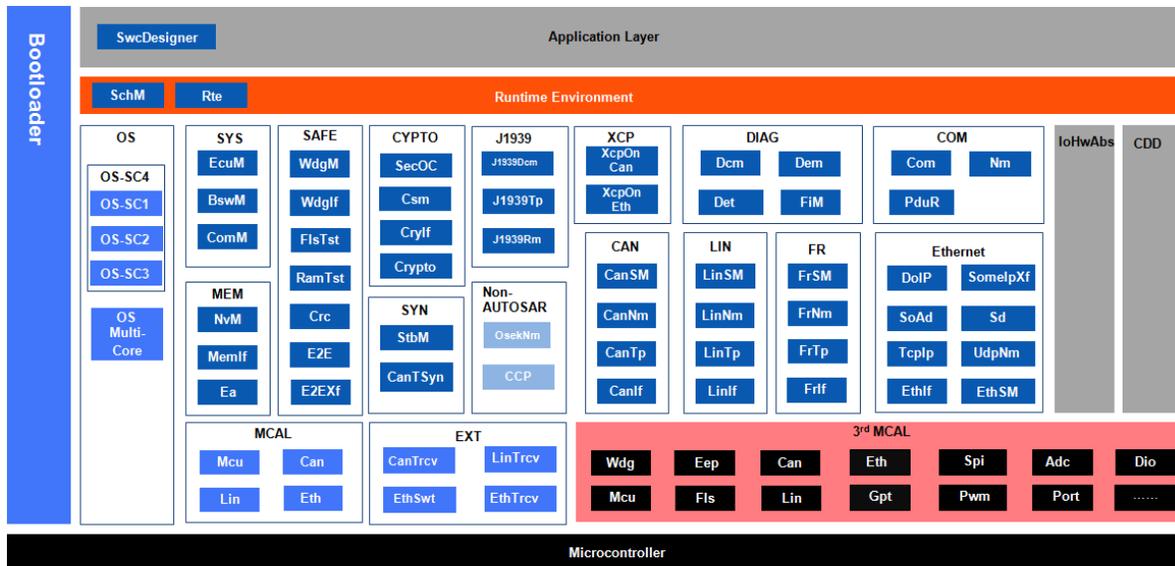
热管理域控制器化的发展趋势，可以通过得到更多的信息输入实现云端智能控制



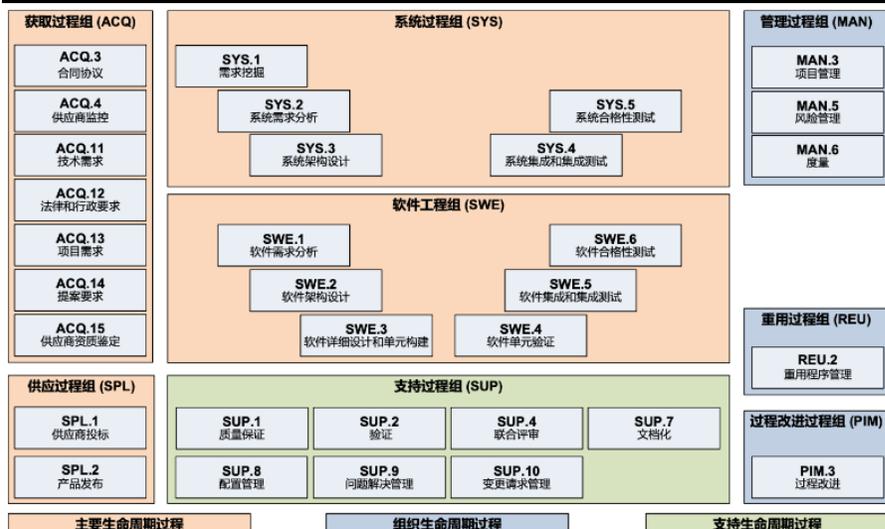
1. 根据用户喜好及行驶状况选出最优控制模式方案 → 节能
2. 通过持续学习进化深度贴近用户，实现专属定制的体验 → 节能
3. 远程控制，优化乘车前的舒适性，智能服务，超舒适性的追求

CITMS系统控制框架介绍 (软件)

AUTomotive open System ARchitecture



- ◆ 整个生命周期的可维护性
- ◆ 硬件抽象化，使软件开发更加灵活
- ◆ 功能可配置，而不是重新去实现
- ◆ 标准化AUTOSAR代码生成、建模工具
- ◆ 通过标准化BSW提高软件质量
- ◆ 便于软件的更新、升级
- ◆ 跨车辆网络的连接



Automotive Software Process Improvement and Capacity determination (ASPICE)

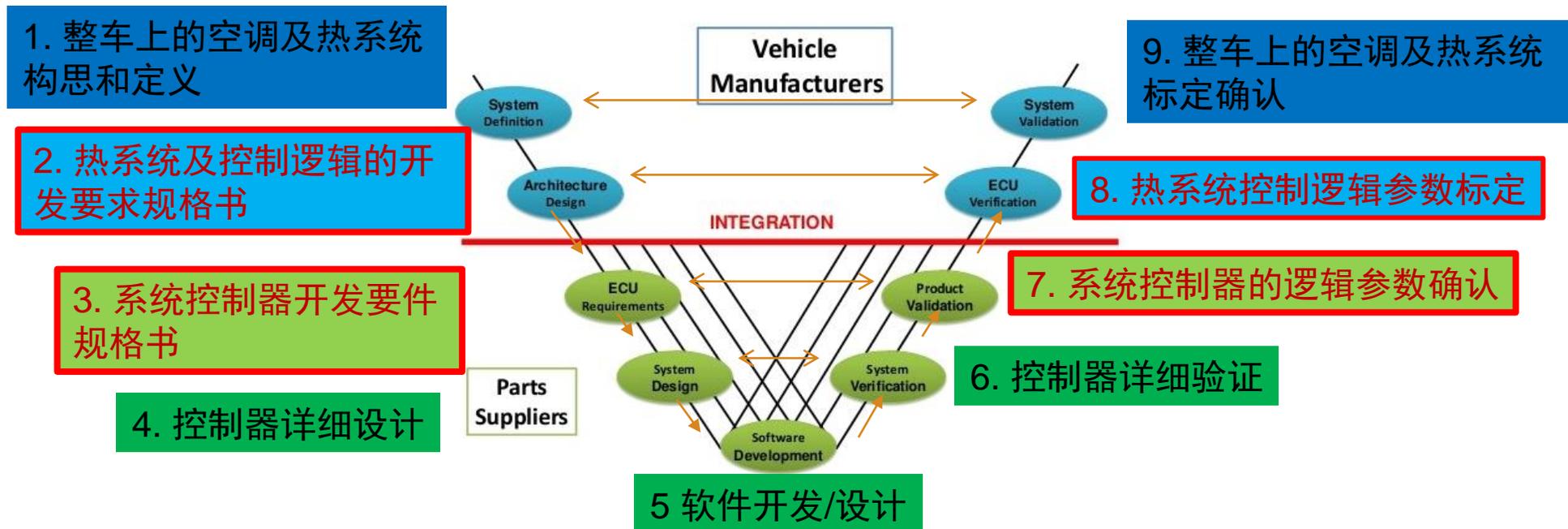
目前已获得**ASPICE CL2**等级认证，正在进行CL3的过程改进。

- ◆ 规范的研发过程
- ◆ 保证过程质量
- ◆ 提高工作效率
- ◆ 积累组织财富
- ◆ 长期研发设施

符合未来发展的软件开发流程和架构。

热管理系统软件开发与标定

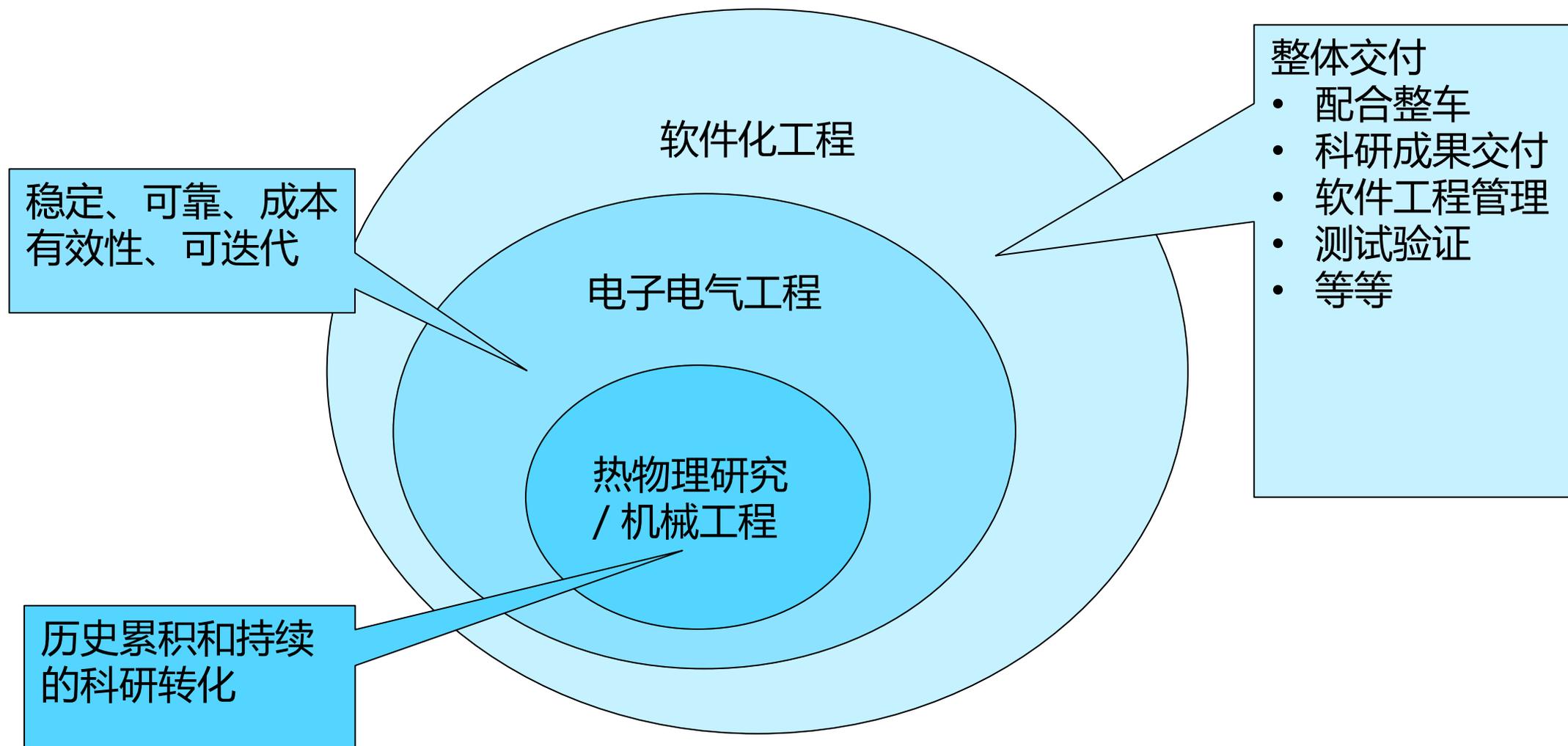
Thermal Management System Controller Development & Calibration



【A-SPICE】 Automotive Software Process Improvement and Capacity dEtermination

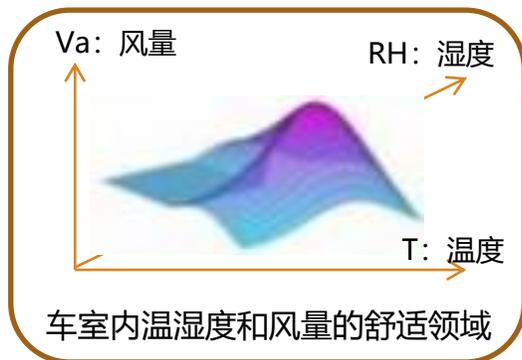
空调/热管理系统供应商软件开发流程，要符合A-SPICE V-process

热管理 vs 软件的责任边界



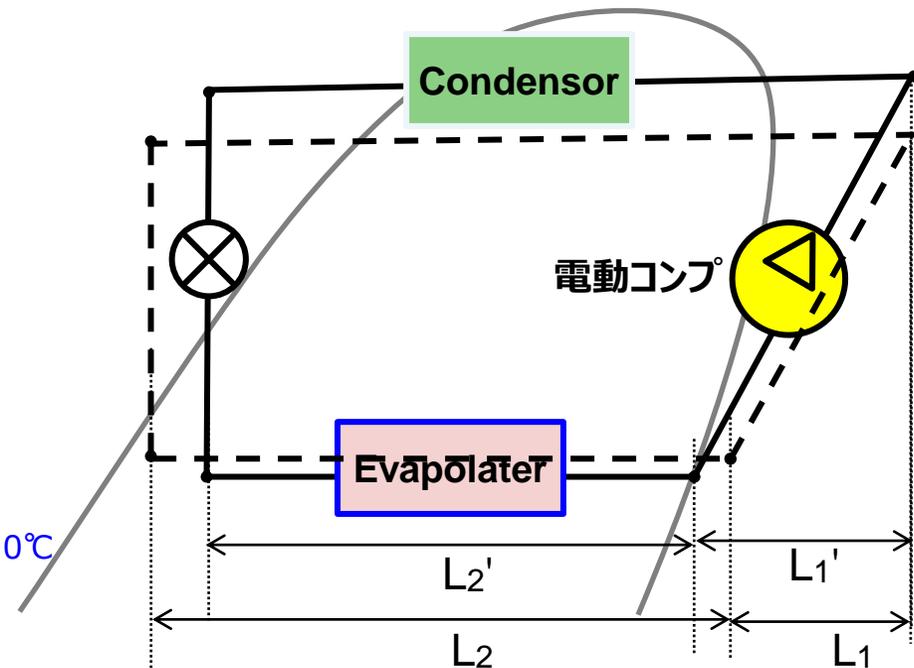
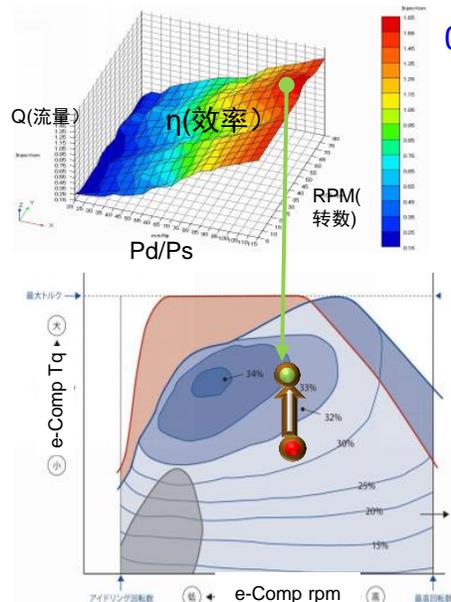
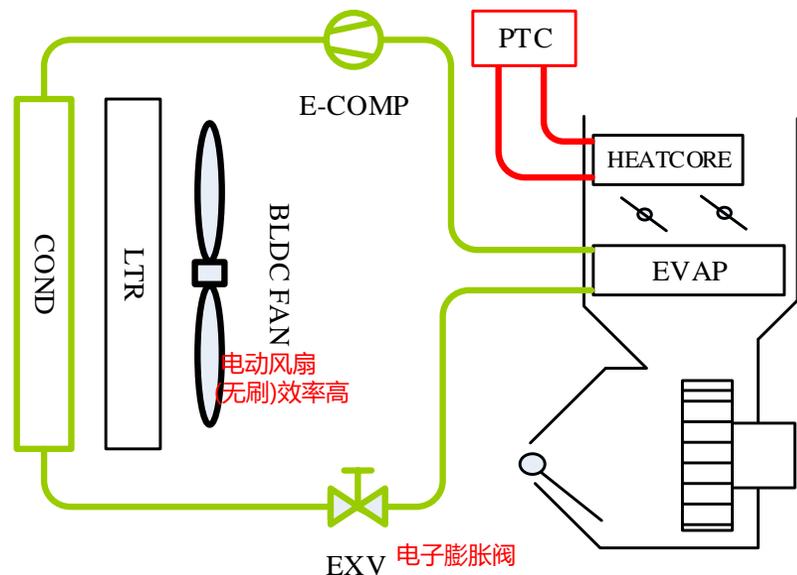
高效空调热管理系统控制

开发理念：保证舒适性下，让压缩机处于高COP区间工作，实现节能



高效率空调系统控制的基本方式

1. 计算HVAC吹出空气温度/湿度/风量目标值：
2. 计算压缩机(E-COMP)目标值：
3. 压缩机驱动高效化，空调系统COP高效化。



$$COP = L2'/L1' < L2/L1$$

ECO空调控制核心：电动压缩机&电磁阀控制

- 蒸发器冷却最小化，再加热量最小化；
- 电动压缩机工作领域，控制在效率高处；
- 电磁阀控制冷媒流量达到系统高效化；
- 优化系统省动力控制实现消费电力的最小化

整车热管理MATLAB/Simulink的解决方案

使用仿真工具在开发早期验证整车热管理策略

1 理解热管理系统的物理行为

提供复合物理领域的物理模型
(电气、机械、热、热流体等)

Simscape 工具箱

电机(热)

热 FEM-Parameterized PMSM
磁饱和和效应的扭矩纹路

热管理系统(热流体)

泵 管路
热阻 热质量
热流体特性 Thermal Liquid Properties (TL)
Reservoir (TL)

制冷循环 (两相流)

Environment
Condenser
Expansion Valve
Compressor
Evaporator
Cold Plate

电池建模

0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.01 -0.02 0.1

2 控制策略的效果以及尝试新的优化控制

在Simulink框图中设计控制器
(PID、LUT、周期/非周期任务、C代码集成)

Simulink®

PID PID(z) PID Controller
LUT 2-D T(u) 2-D Lookup Table
周期·非周期任务 External Scheduler f() In Out
集成C代码 system S-Function

Detailed

支持基于学习的控制器设计

模型预测控制

Reference Optimizer Prediction model MPC Controller Plant

强化学习

RL agent Environment Observation Action Reward

3 快速迭代设计参数，探索设计空间

确认各种信号的时间响应
(用实机难以测量的信号也可以用模型测量)

Simulink®

空调系统回路
电池回路
电机回路
散热器
冷凝器
蒸发器
暖风回路
冷却器

Vehicle Speeding
Cabin Temperature (degC)
Engine Temperature (degC)
Power and Controller Commands
Water Temperature (degC)
Battery Cell Output Temperature (degC)
Coolant Temperature (degC)
Coolant Flow Rate (l/min)
Coolant Pump RPM

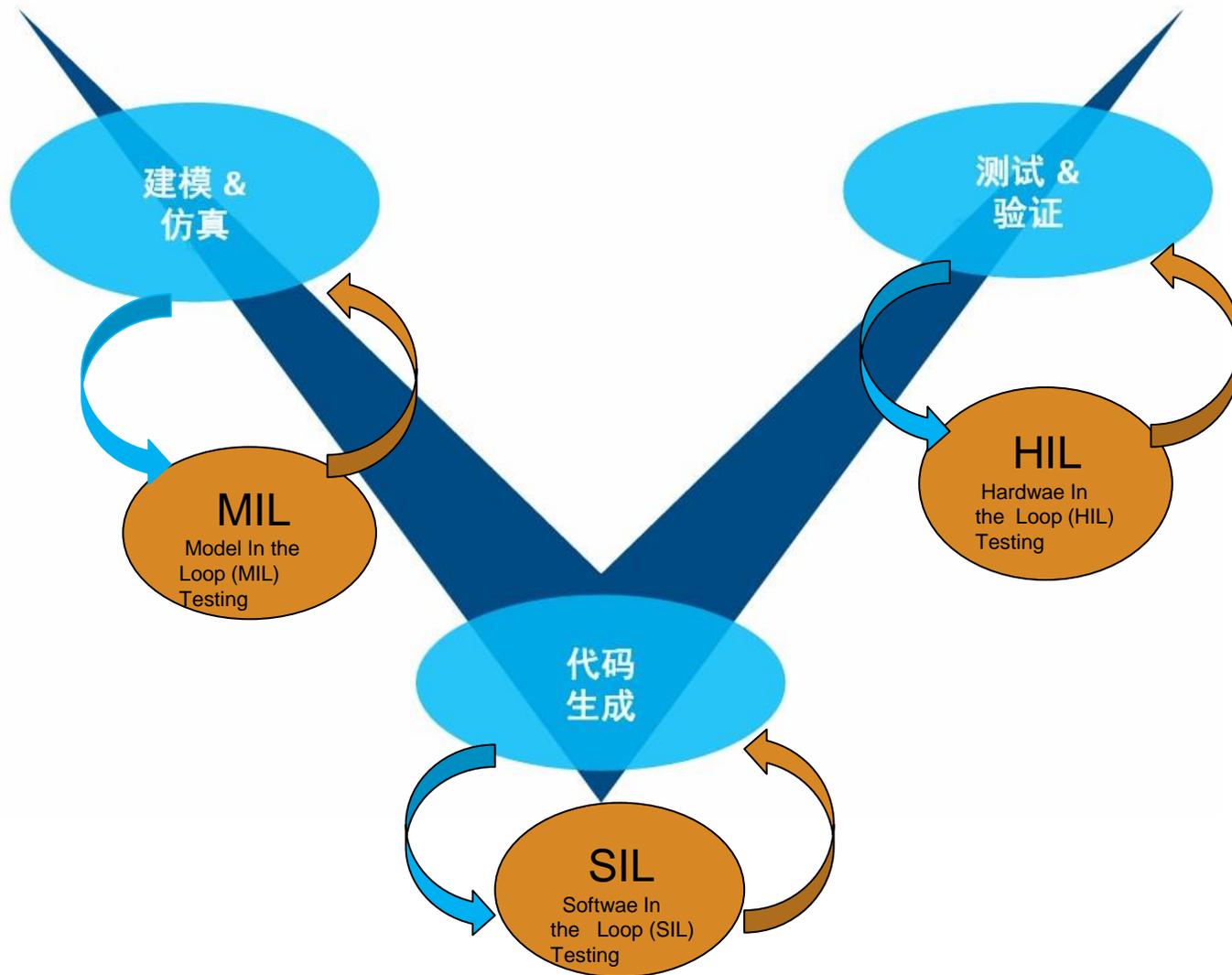
加快优化计算过程
(Fast restart, 重复计算如优化用多核并行处理)

MATLAB®, Parallel Computing Toolbox

Fast restart
Multi Core

MBD软件开发的V模型三大核心流

【MBD: Model Based Design】



【MBD: Model Based Design】三大核心流、三大闭环测试

MBD软件开发三大关键核心内容

建模&仿真

代码生成

测试&验证

热物理系统
+软件系统搭建

AUTOSAR代码
+C代码生成

软件单元
+集成+硬件
测试验证



```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<AUTOSAR xmlns="http://autosar.org/schema/x4.0"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://autosar.org/schema/x4.0 AUTOSAR_4-2-2.xsd">
  <AR-PACKAGE>
    <SHORT-NAME>MyProject</SHORT-NAME>
    <ELEMENTS>
      <APPLICATION-PRIMITIVE-DATA-TYPE>
        <SHORT-NAME>apFloa132</SHORT-NAME>
        <CATEGORY-VALUE/>CATEGORY</CATEGORY-VALUE/>
        <SW-DATA-DEF-PROPS>
          <SW-DATA-DEF-PROPS-VARIANTS>
            <SW-DATA-DEF-PROPS-CONDITIONAL>
              <SW-CALIBRATION-ACCESS-READ-ONLY/>SW-CALIBRATION-ACCESS
            </SW-DATA-DEF-PROPS-CONDITIONAL>
            </SW-DATA-DEF-PROPS-VARIANTS>
          </SW-DATA-DEF-PROPS>
        </APPLICATION-PRIMITIVE-DATA-TYPE>
      </ELEMENTS>
    </AR-PACKAGE>
  </AUTOSAR>
  
```

```

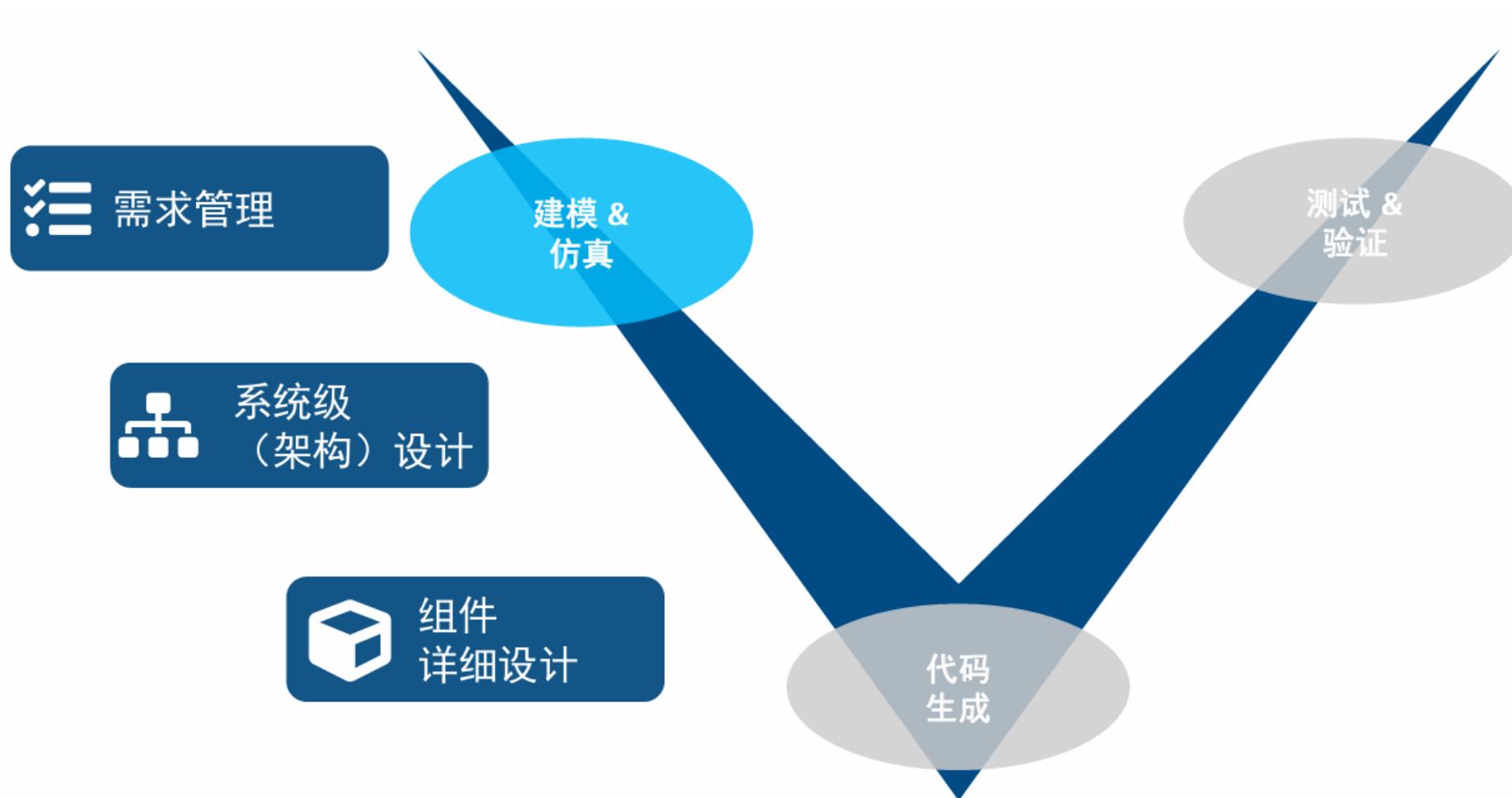
604 /* End of Saturate: '<S210>/Saturation' */
605
606 /* RelationalOperator: '<S196>/NotEqual' */
607 NotEqual_n = (0.0F != Switch_f);
608
609 /* Signum: '<S196>/SignPreSat' */
610 if (Switch_f <= 0.0F) {
611   Switch_f = -1.0F;
612 } else {
613   if (Switch_f >= 0.0F) {
614     Switch_f = 1.0F;
615   }
616 }
  
```

Index	ID	Summary	Implemented	Verify
Import1	throttReqs	References to throttReqs.doc	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1.1	inp_scl_1	Input Scaling	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1.2	inp_scl_2	Scaled data must be responsive.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	PI Controller	PI Controller	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2.1	pi_ctr_1	Must implement standard propo...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2.2	pi_ctr_2	Proportional and integral gains ...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2.3	pi_ctr_3	Maximum value of integral stat...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3	PWM Conversion	PWM Conversion	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.1	pwm_1	Duty cycle must be proportional.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.2	pwm_2	PWM torque should act in possi...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.3	pwm_3	PWM torque should act in nega...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.4	pwm_4	Duty cycle must be in range fro...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.5	pwm_5	Normal simulation and software...	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Output Scaling	Output Scaling	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4.1	out_scl_1	Scaled data must be responsive.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4.2	out_scl_2	Output data must be scaled for	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

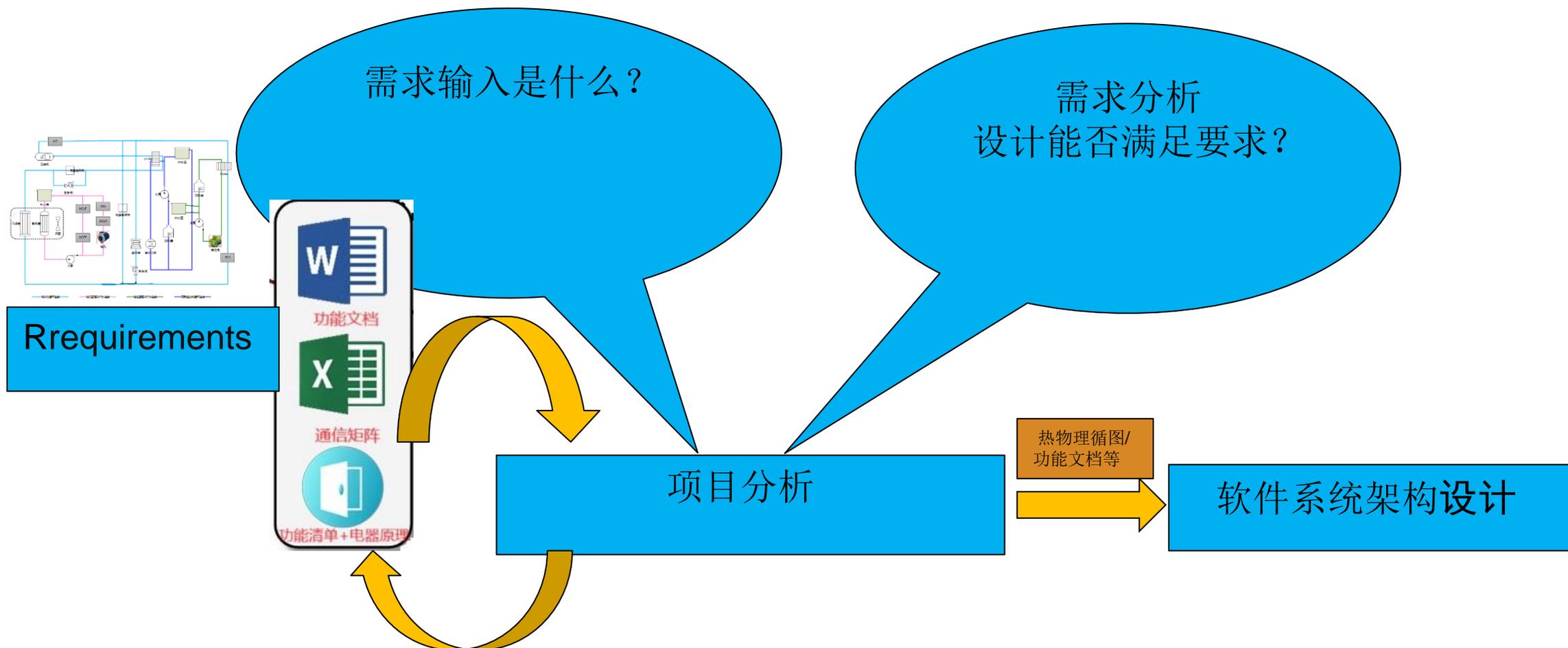
Aggregated status
Test failed
Not linked to a test
Test passed



建模&仿真



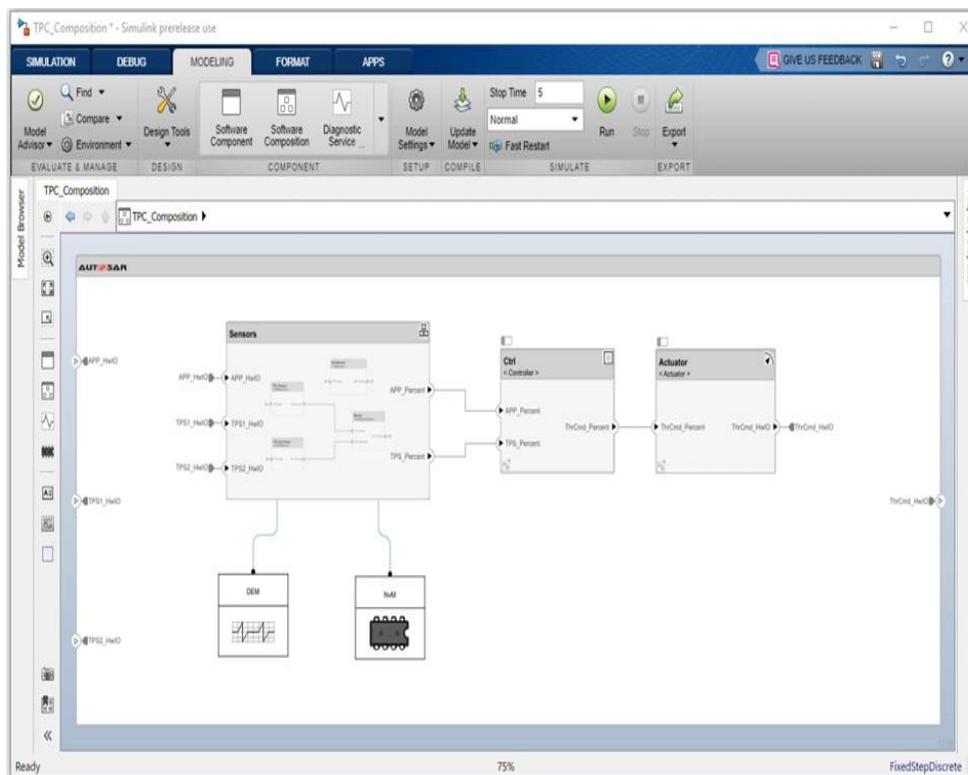
需求管理



系统架构设计

Simulink AutoSAR系统架构设计

- 集成生成的代码
- 缩减开发时间
- 消除手写代码错误



生成
AutoSAR
代码

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<AUTOSAR xmlns="http://autosar.org/schema/r4.0"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://autosar.org/schema/r4.0 AUTOSAR_4-2-2.xsd">
  <AR-PACKAGES>
    <AR-PACKAGE>
      <SHORT-NAME>MyProject</SHORT-NAME>
      <ELEMENTS>
        <APPLICATION-PRIMITIVE-DATA-TYPE>
          <SHORT-NAME>apfloat32</SHORT-NAME>
          <CATEGORY>VALUE</CATEGORY>
          <SW-DATA-DEF-PROPS>
            <SW-DATA-DEF-PROPS-VARIANTS>
              <SW-DATA-DEF-PROPS-CONDITIONAL>
                <SW-CALIBRATION-ACCESS>READ-ONLY</SW-CALIBRATION-ACCESS>
              </SW-DATA-DEF-PROPS-CONDITIONAL>
            </SW-DATA-DEF-PROPS-VARIANTS>
          </SW-DATA-DEF-PROPS>
        </APPLICATION-PRIMITIVE-DATA-TYPE>
      </ELEMENTS>
    </AR-PACKAGE>
  </AR-PACKAGES>
</AUTOSAR>
```

基于AutoSAR系统架构设计，生成AUTOSAR软件代码

模型设计

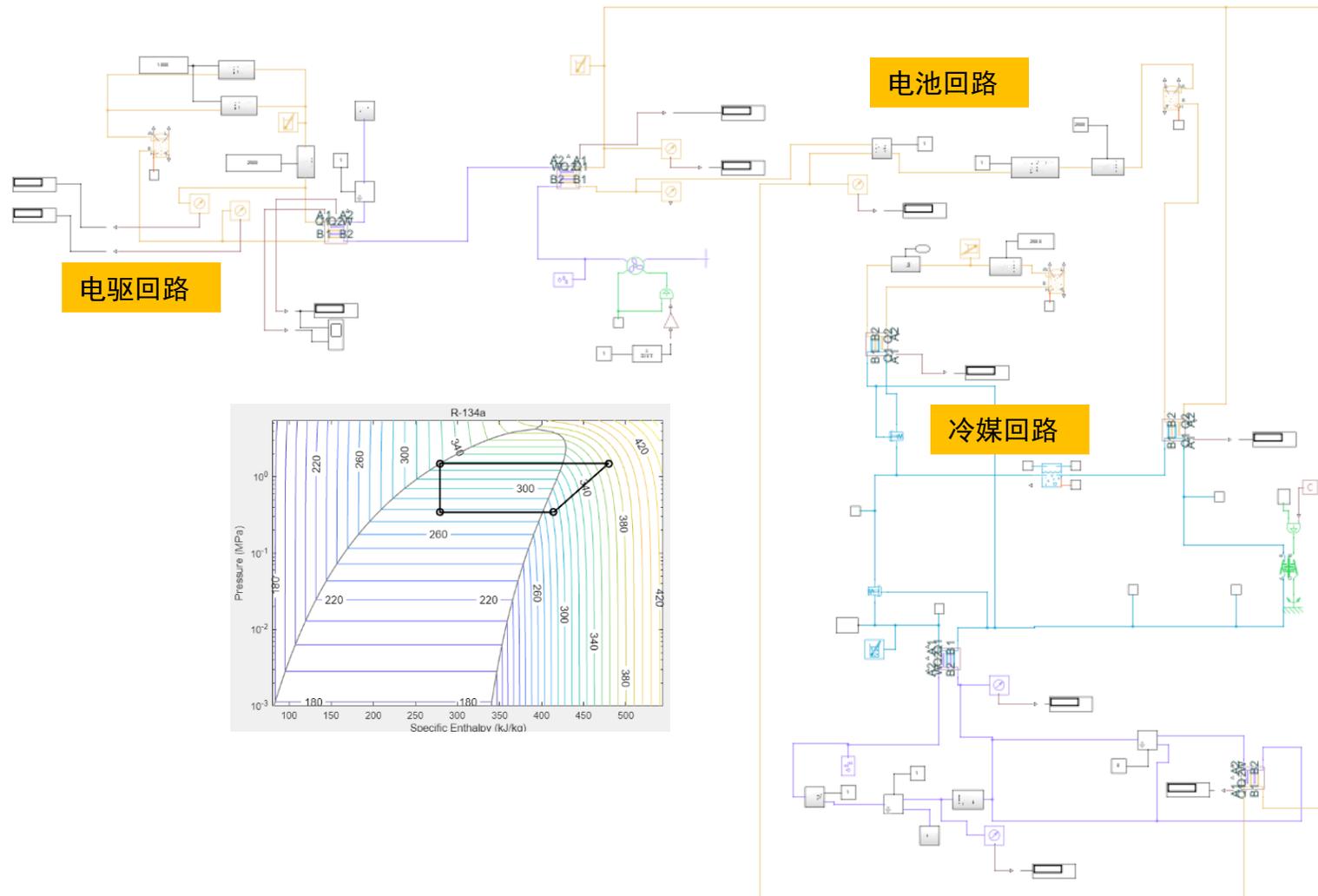
热管理系统仿真模型

- 电池冷却
- 电驱冷却
- 冷媒回路

功能:

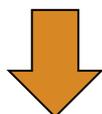
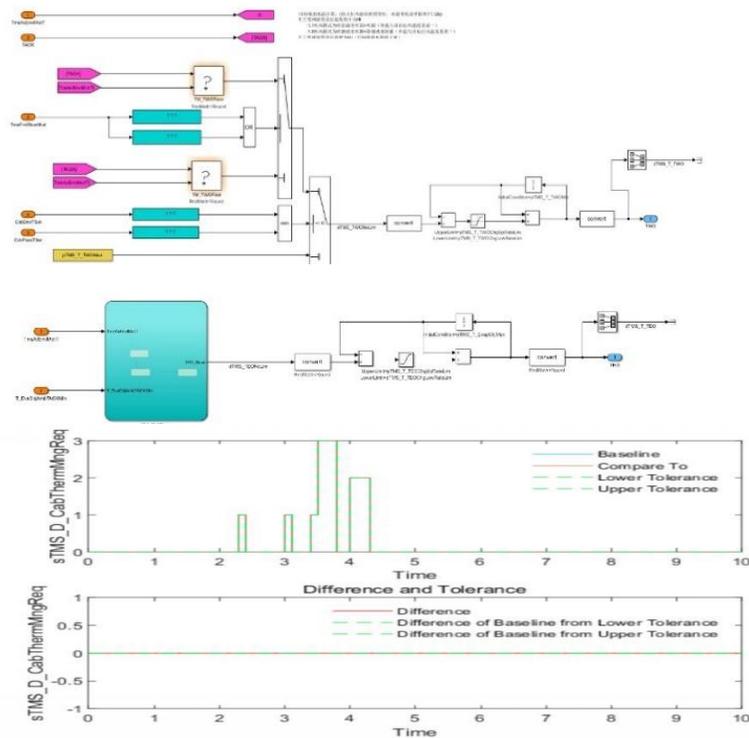
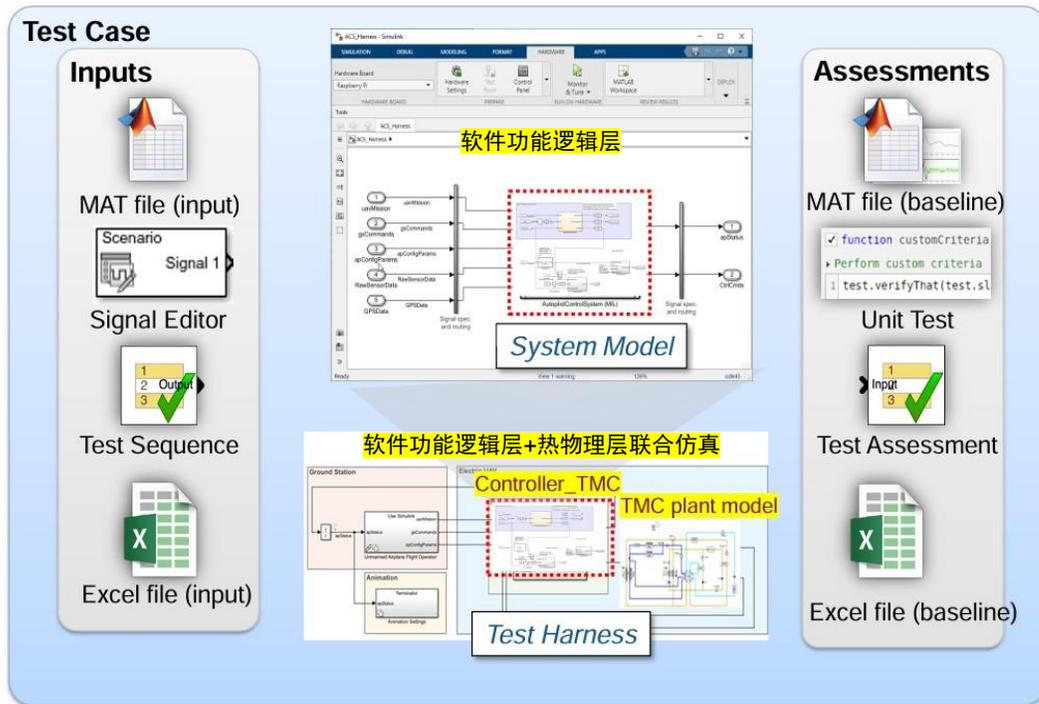
- 被控对象和控制算法闭环系统特性分析及系统性能优化
- 支持控制算法MIL测试
- 支持控制算法HIL测试

热物理系统拓扑模型



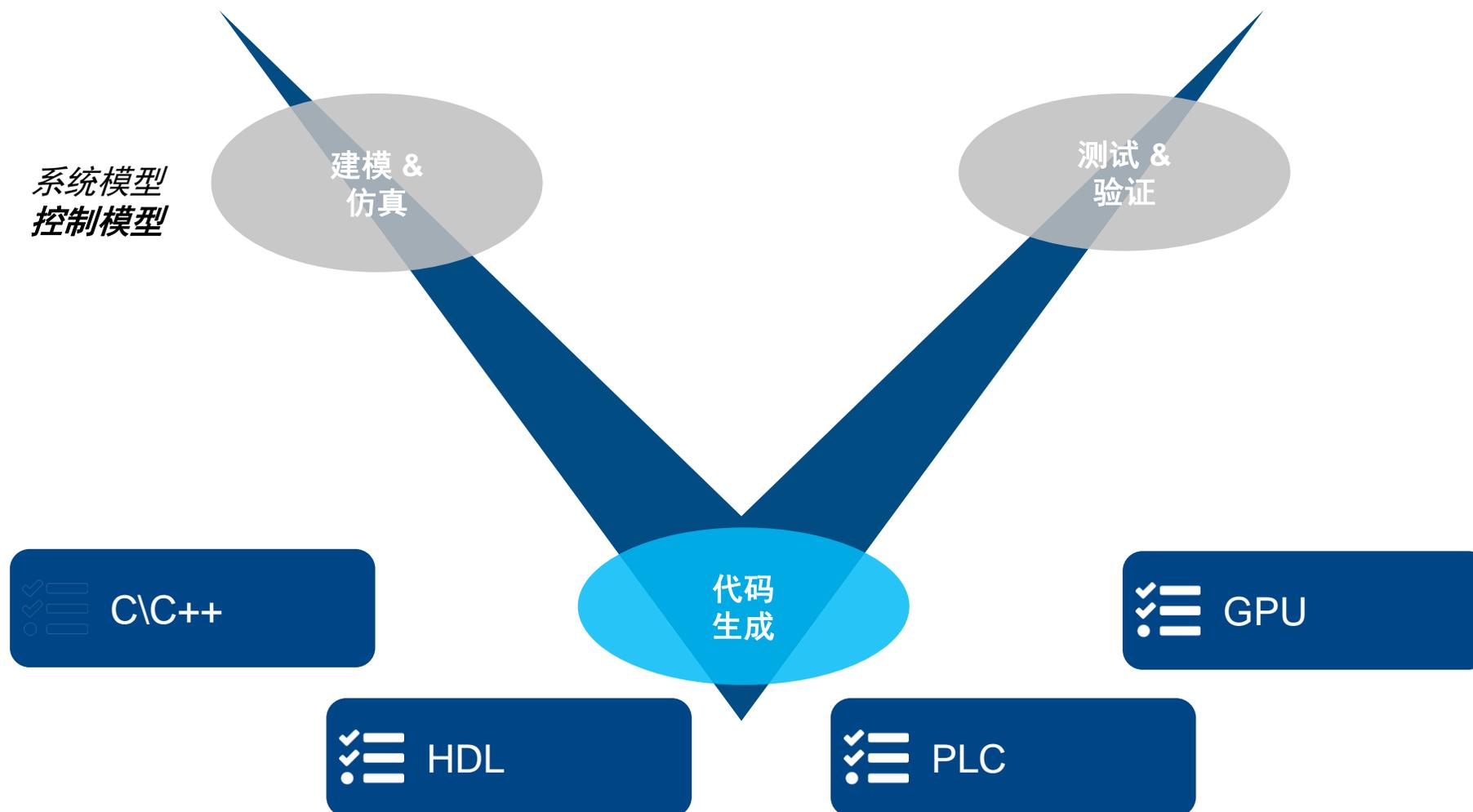
MIL (Model In the Loop) 测试

热物理系统和应用层模型联合仿真测试、软件模型单元及集成测试



代码生成

代码生成



软件模型设计

应用层模型设计

需求输入

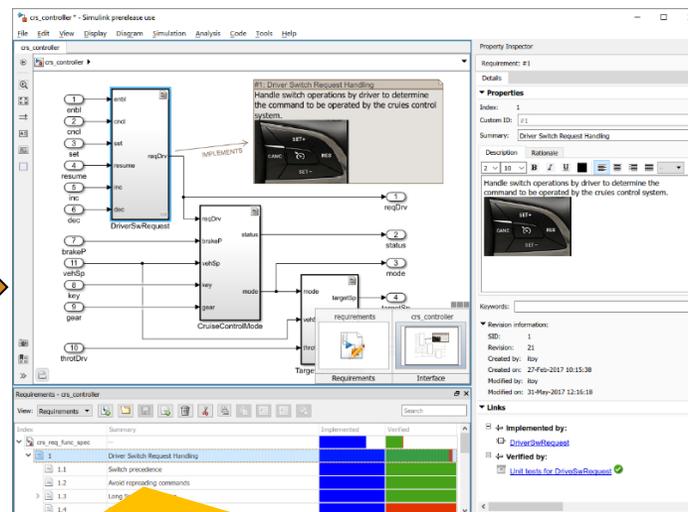
功能文档



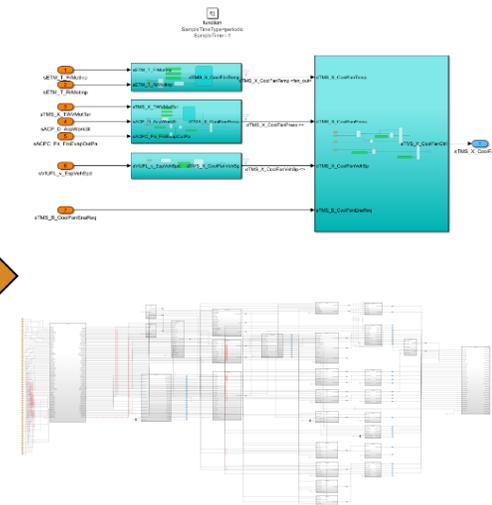
通信矩阵



Simulink软件功能设计



软件设计实现

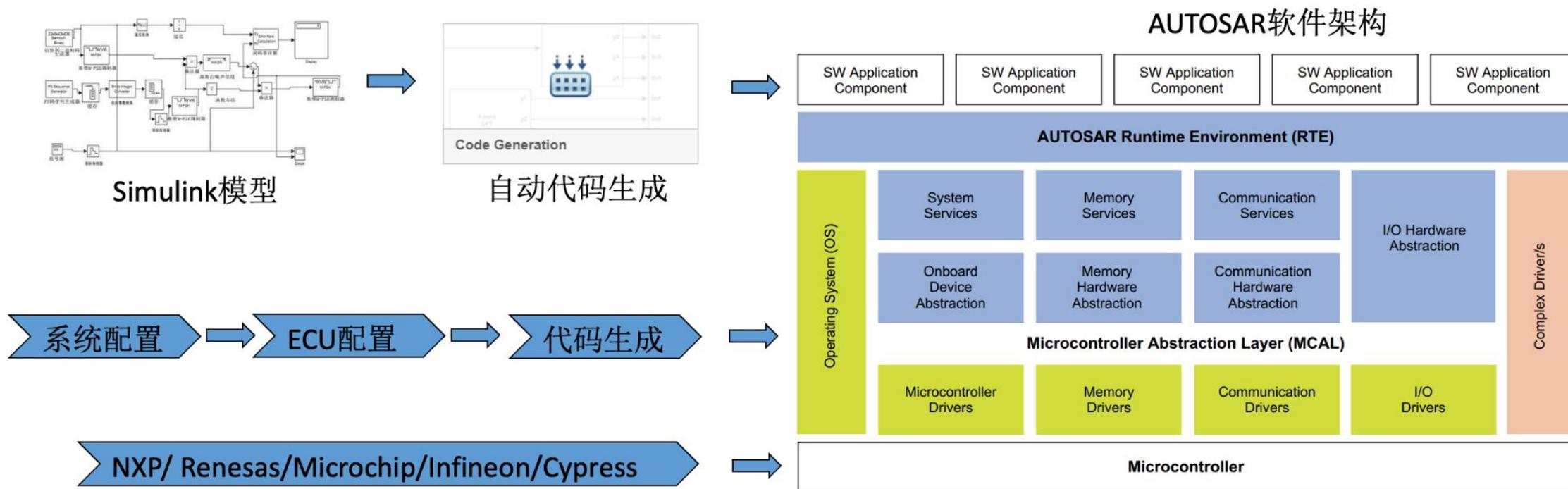


- 创建、编辑及整理需求
- 在Simulink的图形化编辑环境下查看并关联需求
- 状态跟踪并管理需求变更
- 在模型、代码与测试实现需求追溯

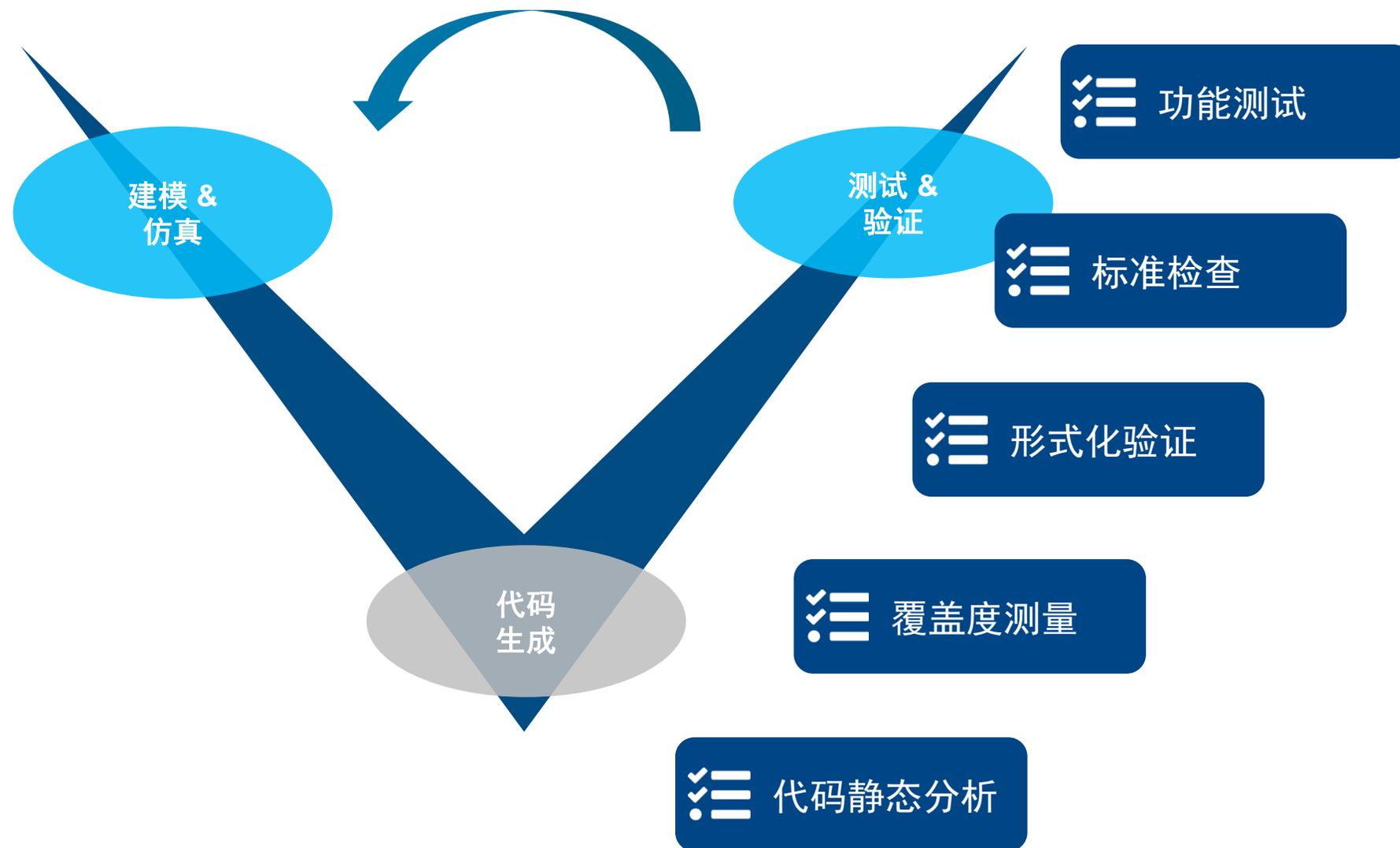
控制器开发——软件生成

基于AUTOSAR架构的Simulink模型化软件开发优点：

- 1、可移植性，平台化，无论是燃油车、电动车、混动车、热泵车、非热泵车，软件算法都可以复用；
- 2、标准的软件接口，针对不同的车型，可以通过软件配置搭配不同差异的硬件实现无缝集成；
- 3、完整的开发工具链，简化了设计流程和项目开发时间；



测试和验证



HIL (Hardware In the Loop) 测试

HIL测试是指将真的控制器连接到仿真的被控对象，将控制器与被控对象形成闭环控制，测试控制器是否满足设计要求。

HIL测试可进行自动化测试，减少测试费用及周期，提高测试覆盖度及可靠性。



热管理系统开发与标定——当前状态



Helix QAC Rule Compliance Report

Note: This report was generated using Helix QAC and is the intellectual property of Programming Research Limited.

Project: C:\Users\luc\Desktop\Qac\HelixQac

Status at: 11 Apr 2022 at 18:23:25

Enabled Rules

- 1. Disabled For Parent Rules
- 2. Most Wanted Rules

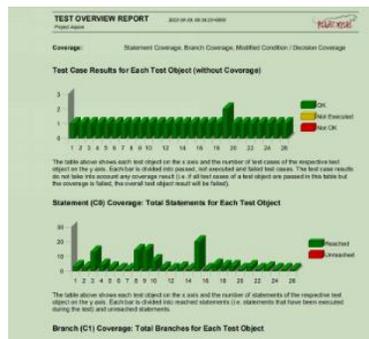
Summary for Enabled Rules

Number of Rules	26
Enabled Rules	26
Disabled Rules (Containing Headers)	0%
Disabled Rules (Containing Footers)	0%
Disabled Rules (Containing Content)	0%
Disabled Rules (Containing Images)	0%
Disabled Rules (Containing Audio)	0%
Disabled Rules (Containing Video)	0%
Disabled Rules (Containing Other)	0%
Disabled Rules (Containing All)	0%
Disabled Rules (Containing None)	0%
Disabled Rules (Containing All)	0%
Disabled Rules (Containing None)	0%
Disabled Rules (Containing All)	0%
Disabled Rules (Containing None)	0%

Diagnostics in Enabled Rule Groups

Diagnostics Per Parent Rules

Note: Use the top-level rules for each rule group. In these rules are defined rules that are not sub rules used to enforce parent rules. The table presents the violation counts for each top-level rule. Note that a message may be used to enforce more than one rule in a case, one diagnostic will result in multiple violations in a case for each rule that the message may be used to enforce. Diagnostic counts are available in the Data table.



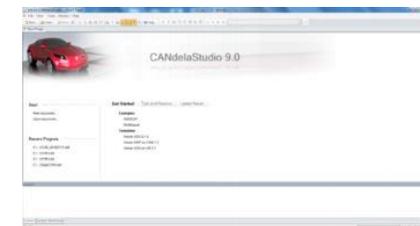
Vector CANoe



Vector CANStress



Vector CANdela Studio



TESSY [Project: Aspice]

File Edit Window Help

TEE - Environment Editor | Requirement Management | Overview | CTE - Classification Tree Editor | TIE - Test Interface Editor | TDE - Text Data Editor | SCE - Scenario Editor | Script Editor | CV - Coverage Viewer

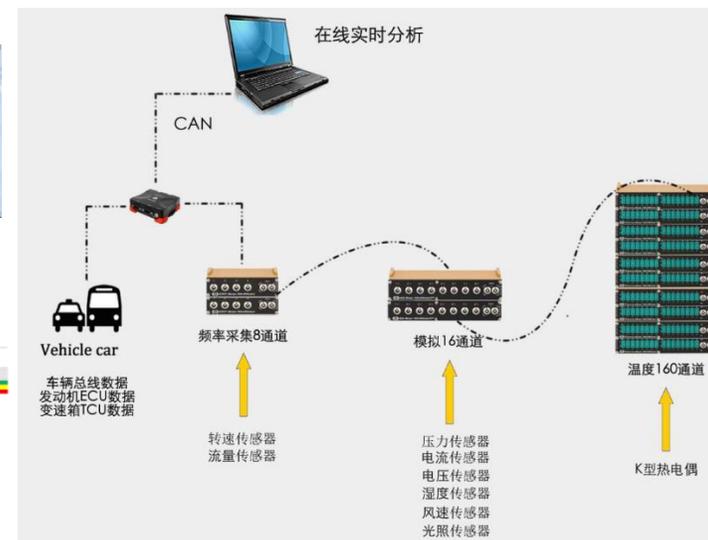
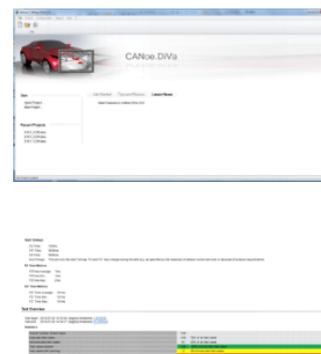
Test Project: AD_Convert

Test Project	CC	TGC	RS	CO	CI	MC
ASPC	217	0.00	-	-	-	-
APP	109	0.00	-	-	-	-
APP_ADconvert	19	0.00	-	-	-	-
AD_Convert	2	0.50	-	-	-	-
convert_HVIC	1	1.00	-	-	-	-
NVIC_ClearPw	1	0.00	-	-	-	-
NVIC_DisableIt	1	0.00	-	-	-	-
NVIC_EnableIt	1	0.00	-	-	-	-
NVIC_GetPw	2	0.00	-	-	-	-
NVIC_GetPw	2	0.00	-	-	-	-
NVIC_SetPw	1	0.00	-	-	-	-
NVIC_SetPw	2	0.00	-	-	-	-
NVIC_System	4	0.00	-	-	-	-
sysTrk_Conf	2	0.00	-	-	-	-
APP_gpio	24	0.00	-	-	-	-
APP_main	17	0.00	-	-	-	-
APP_process	20	0.00	-	-	-	-
APP_protect	29	0.00	-	-	-	-
Hv_Over_Pro	6	0.17	-	-	-	-
Hv_Under_Pro	6	0.17	-	-	-	-
HVOL_Analyse	1	1.00	-	-	-	-
NVIC_ClearPw	1	0.00	-	-	-	-

Test Data of 'AD_Convert'

Parameter	1.1	1.2	1.3	1.4
short AD_Convert:HVOLTAGE	0	0	0	500
unsigned short Read_ADChex	0	4095	2000	100
AD_Value_TypeDef's_AD_Val	0	0	0	0
unsigned short HVOLTAGE	0	0	0	0
unsigned char HVOLTAGE_h	0	9	9	5
unsigned int HVOLTAGE_h	0	36855	18000	1000
short AD_Convert:HVOLTAGE	0	756	369	500
AD_Value_TypeDef's_AD_Val	0	4095	2000	100
unsigned short HVOLTAGE	1	0	0	6
unsigned char HVOLTAGE_h	0	0	0	1100
unsigned int HVOLTAGE_h	0	756	369	500

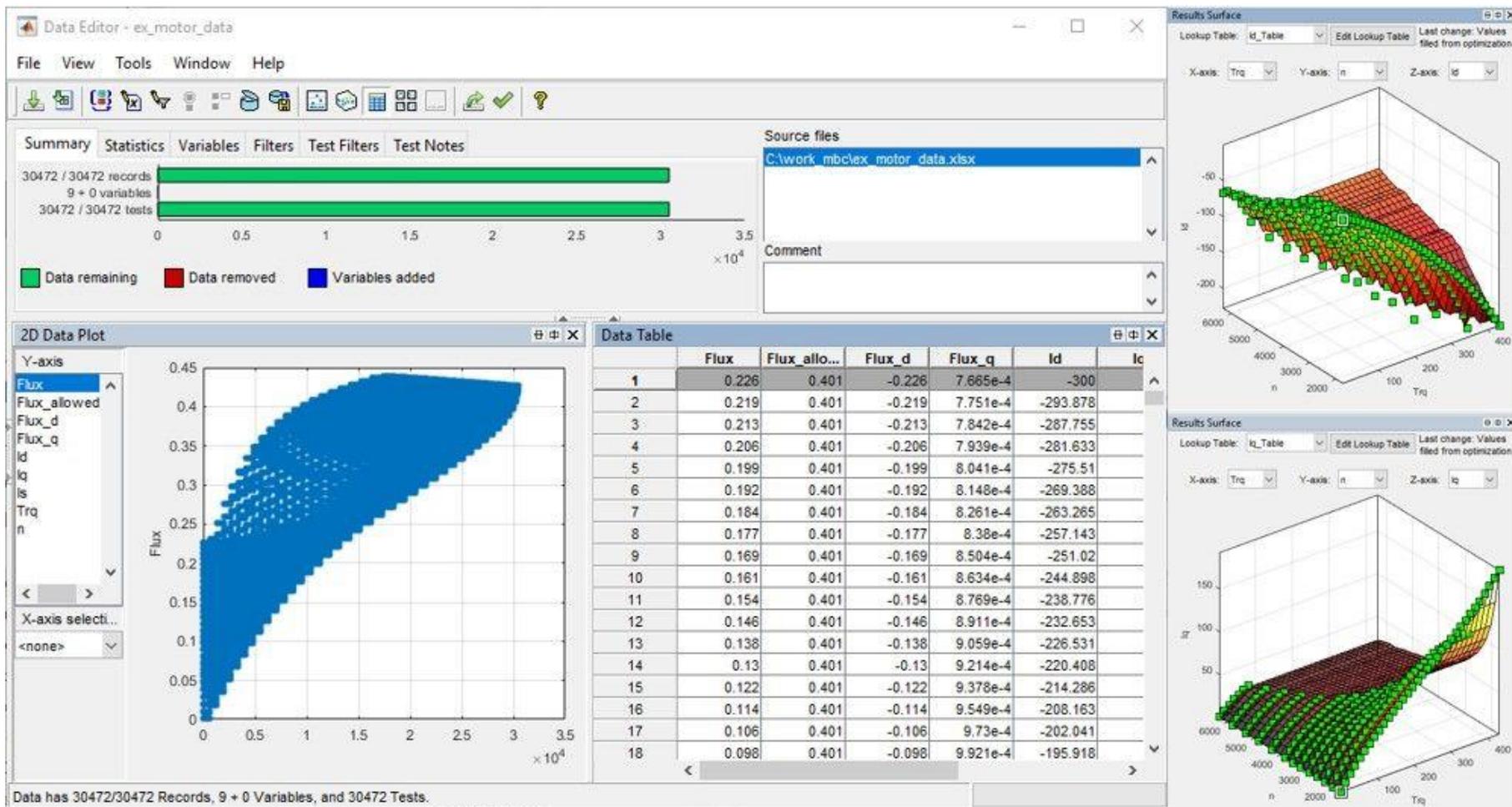
Vector CAN Diva



热管理系统开发与标定——下一步

■ Model-Based Calibration Toolbox

- 制定最优的测试计划，自动拟合统计模型，并为使用传统方法进行穷尽测试的高自由度系统生成标定表和查找表。



MathWorks与超力——热管理热流体系统建模

阶段	条目	内容	备注
系统功能模型	系统拓扑模型	根据热管理系统框图，搭建系统物理模型框架	Mathworks工程师提供专业的工具使用和物理建模方法支持，超力电气相关工程师实际操练。
	部件模型参数赋值	理解消化系统物理模型框架中部件模型，确认符合仿真需求，并搜集相关参数。	
	电池回路调试	通过指定工况、量化边界，把电池回路解耦出来，单独调试，理解系统仿真。	
	电驱回路调试	通过指定工况、量化边界，把电驱回路解耦出来，单独调试。	
	冷媒回路调试	通过指定工况、量化边界，把冷媒回路解耦出来，单独调试。	
	空调回路调试	通过指定工况、量化边界，把乘员舱回路解耦出来，单独调试。	
	热管理系统集成调试	通过指定工况、量化边界，对整个热管理系统进行集成调试。	
控制闭环系统模型	仿真工况	搜集控制算法测试需求，整理系统仿真工况。	
	支持控制算法MIL测试验证	系统物理模型调试，满足控制算法MIL测试需求	
	支持控制算法HIL测试验证	系统物理模型调试及生成代码，满足控制算法HIL测试需求	

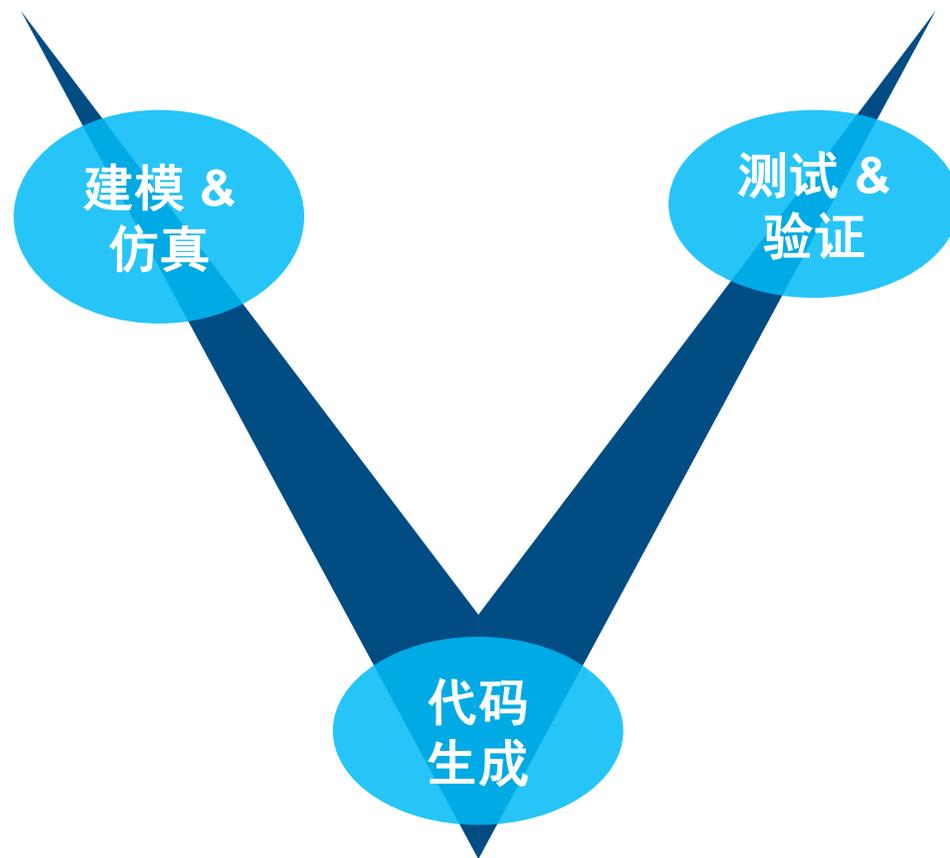
总结和展望

总结： 超力电器采用基于MBD的方法建立了：

- NEV间接式热泵热管理控制模型设计，仿真等全流程开发能力，从系统的需求分析，架构设计，到软件的模型搭建，仿真验证，单元测试以及MIL/SIL/HIL测试，可满足系统的快速开发，验证及迭代
 - 电加热器控制模型设计，仿真，实现了更高效的开发流程和更精准的控制效果
 - 热系统部分核心零部件的对象模型设计，仿真
 - 与Dymola/Amesim物理仿真平台的联合仿真等
- 通过这些设计，大大提高了设计质量，节省试验资源，缩短开发周期。

展望： 之后的工作重点，还将在以下领域继续深化：

- NEV直接式热泵热管理系统的模型设计、仿真
- R134a特殊循环、低温扩展应用的模型设计仿真
- FCL(Fuzzy Control Logic): 利用模糊控制对关键零件的传统PID控制的优化
- VS(Virtual Sensor): 利用Matlab神经网络算法及AI-DL深度学习生成算法，以虚拟替换实物
- 新冷媒（R290等）热管理系统的控制模型的设计仿真



电动汽车对节能降耗有更高的要求，超力电器将运用多年在热管理领域的深耕，从热系统到控制，借助MBD模型开发及仿真工具，挖掘更多高效热管理技术和方案，助力热管理行业发展。

MATLAB EXPO

Thank you



© 2024 The MathWorks, Inc. MATLAB and Simulink are registered trademarks of The MathWorks, Inc. See [mathworks.com/trademarks](https://www.mathworks.com/trademarks) for a list of additional trademarks. Other product or brand names may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.

