



基于MATLAB平台和工具链的 燃料电池先进模型及控制算法开发

◆
蔡俊

2023.5.30



目录

CONTENTS

01

氢能和燃料电池

02

燃料电池系统建模和FCU软件开发

03

基于MATLAB深度学习工具箱
的智能算法开发

04

捷氢科技简介及未来展望





PART 01

氢能和燃料电池



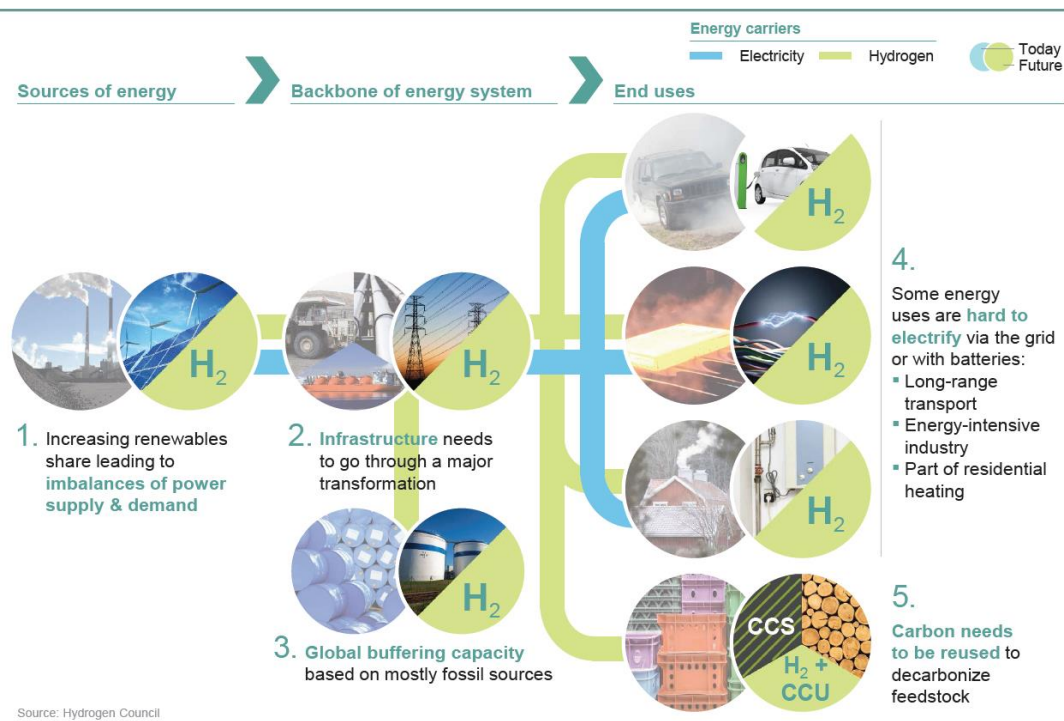
氢能和燃料电池是践行绿色发展可持续发展理念的有效途径



“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于**2030年前达到峰值**，努力争取**2060年前实现碳中和**。”

——2020-9-22，国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话

- **低碳**：推动新能源资源富集地区新能源高效开发
- **安全**：作为新型交通用能源，推动新能源动力转型和保障能源供应安全
- **高效**：实现各种能源品种之间高效转化的理想媒介
- **清洁**：推动化石能源的清洁化利用



氢能已经成为全球共识

- 世界各国对全球气候变化逐渐重视，碳达峰、碳中和等碳排放规划逐渐落地，全球已有140+个国家做出了碳中和承诺
- 截至2022年底，全球已有20+个主要国家和地区制定了国家层面的氢能发展战略规划和技术路线图，另外近30个国家开展氢能产业布局，南美、非洲和中东地区均在积极布局氢能出口贸易

欧盟：

- 2020 《欧盟氢能战略》
- 2020 《德国国家氢能战略》

加拿大：

- 2020 《加拿大氢能战略》

美国：

- 2020 《美国能源部氢能项目计划》
- 2021 《2022财年美国能源部(DOE)预算纲要》

非洲：

- 2022 《南非氢能社会路线图2021》

中国：

- 2019 《政府工作报告》
- 2022 《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》

韩国：

- 2020 《促进氢经济和氢安全管理法》
- 2021 《氢经济发展基本规划》

日本：

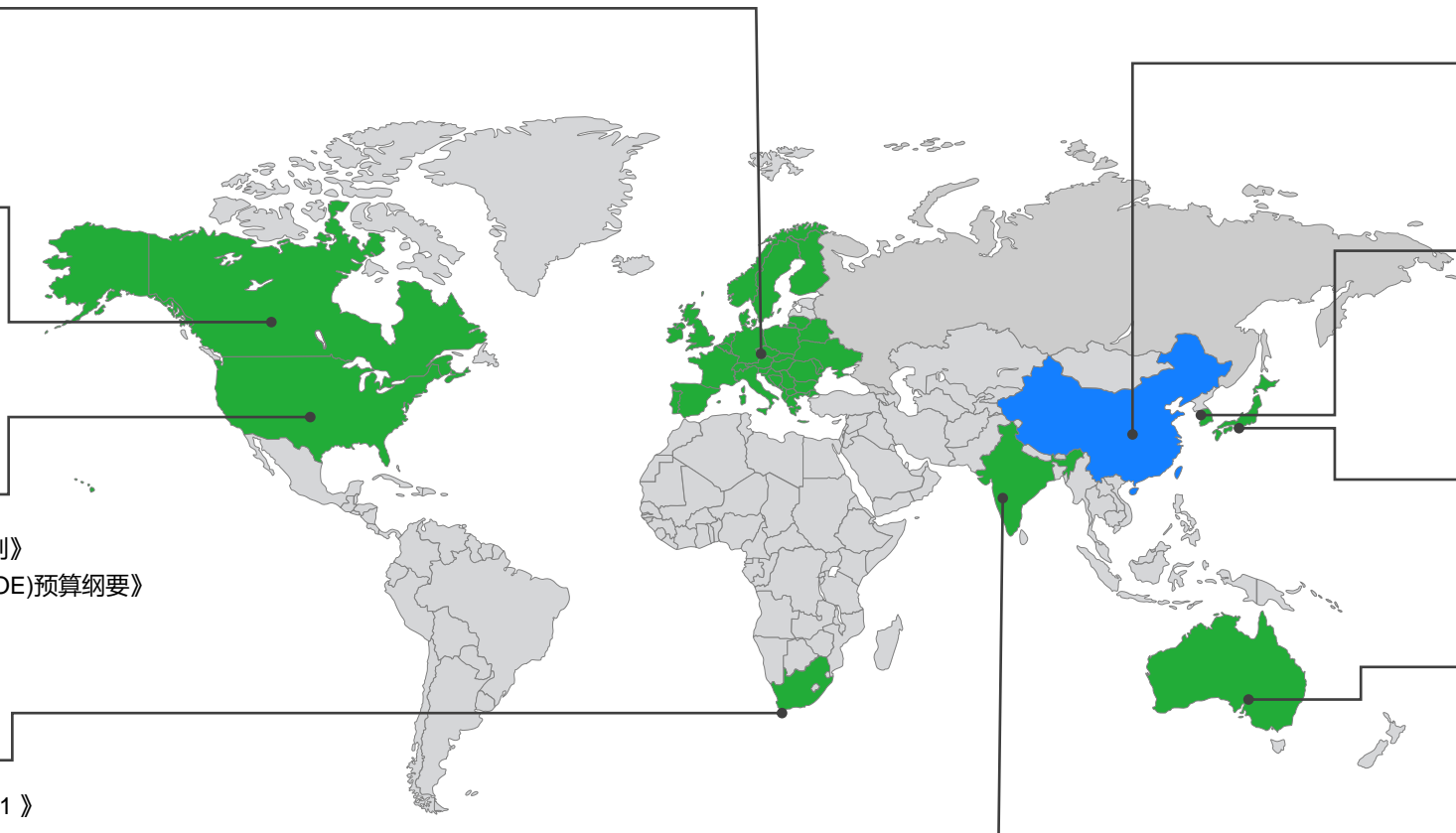
- 2021 《氢能战略计划》V6
- 2022 《燃料电池重型交通（HDV）技术路线图》

澳大利亚：

- 2019 《国家氢能战略》
- 2021 《2021氢能现状》

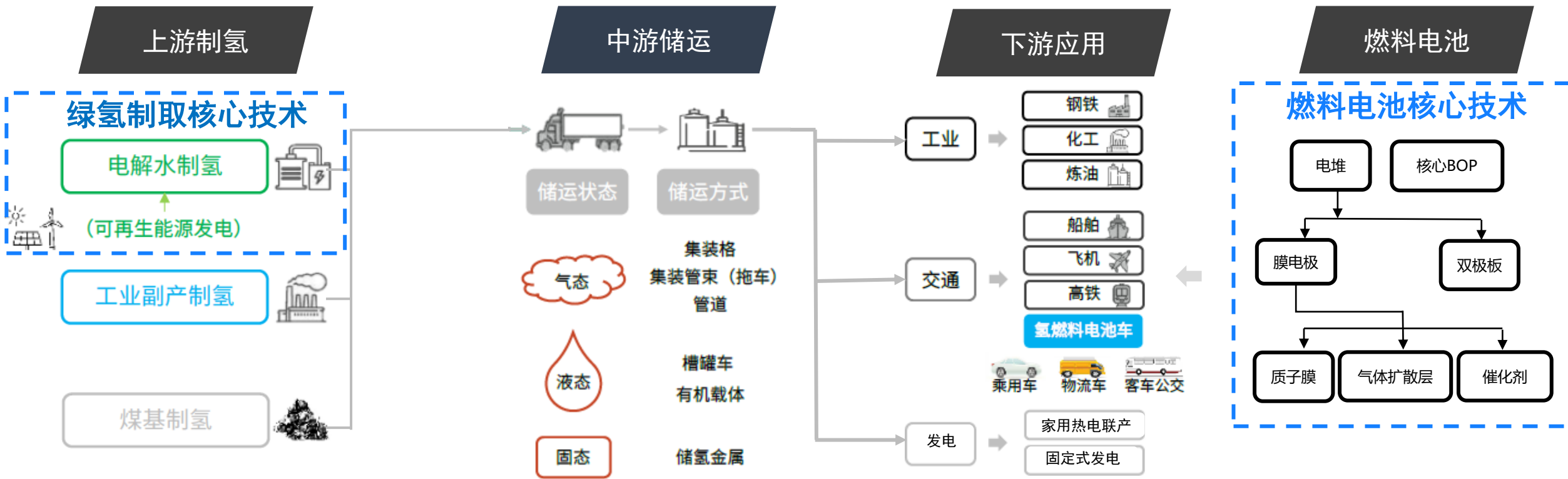
印度：

- 2020 《印度绿色氢经济路线图》
- 2021 《国家氢能计划》



■ 中国 ■ 已制定氢能发展规划地区 ■ 未制定氢能发展规划地区

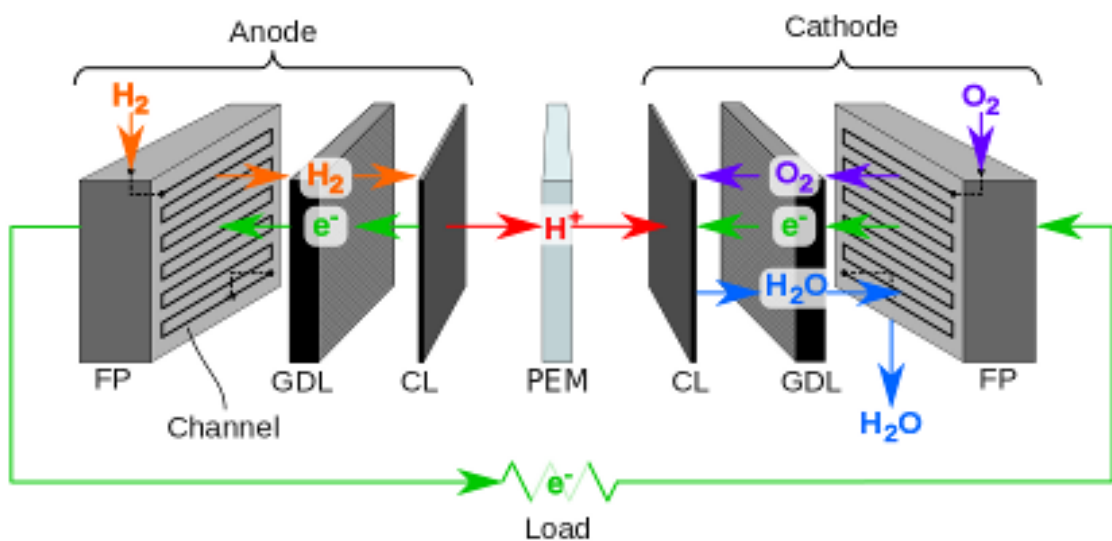
氢能和燃料电池产业链



- 经历十四五的燃料电池示范城市政策推动，行业发展将更加青睐**自主掌握电堆及核心部件关键技术**的企业，头部聚集效益将更加明显，预计3~5家企业将掌握90%的市场份额
- 2025年后氢能与燃料电池行业进入后政策时代，产业链的价值顶端将集中于**绿氢制取和电堆核心技术**两大领域

• 燃料电池 (Fuel Cell) :

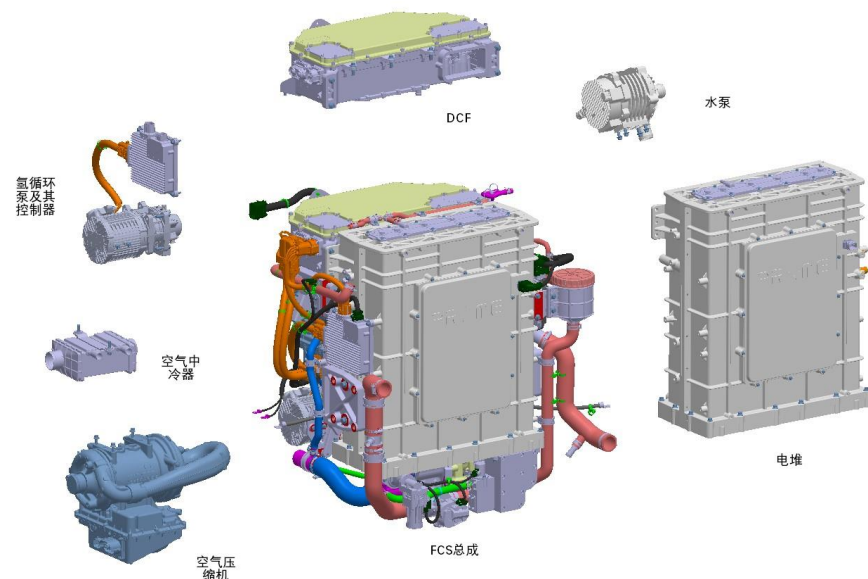
- 燃料电池是一种将存在于燃料与氧化剂中的化学能直接转化为电能的发电装置;
- 道路车辆一般采用**质子交换膜燃料电池 (PEMFC)** ,
 - 使用氢气作为燃料、空气中的氧气作为氧化剂
 - 高分子膜 (质子交换膜) 作为电解质
 - 产生电能、热量、水



PEMFC工作原理示意图

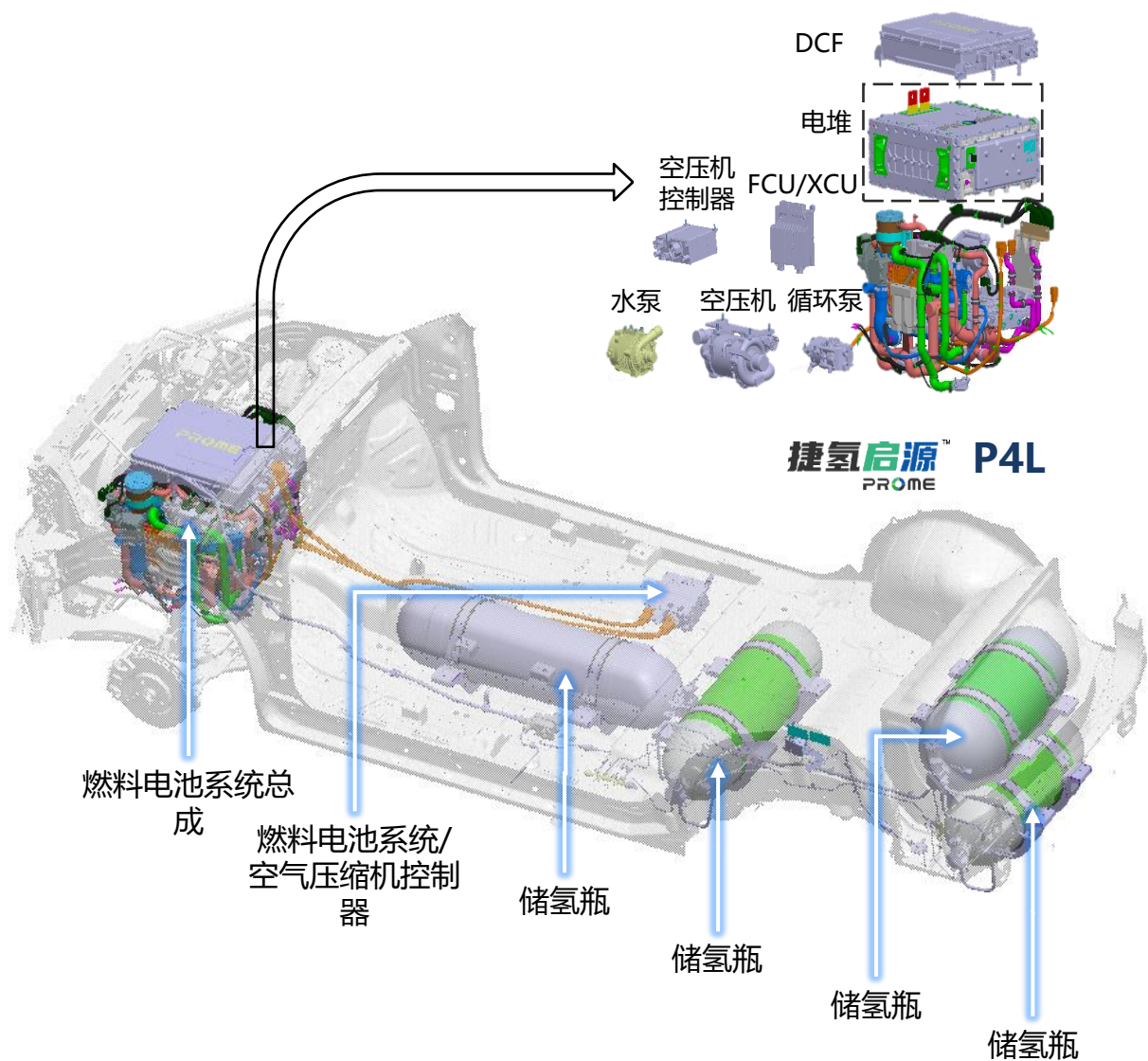
• 燃料电池系统 (Fuel Cell System) :

- 以电堆为核心部件, 搭载空气供给系统、氢气供给系统、热管理系统、高低压电气系统;
- 燃料电池系统应用于道路车辆具有以下优点:
 - 化学能直接转化为电能, **能量利用效率高**;
 - **车辆补能迅速**, 消除续航焦虑;
 - 仅生成水, **无污染物排放**;



车载燃料电池系统部件组成

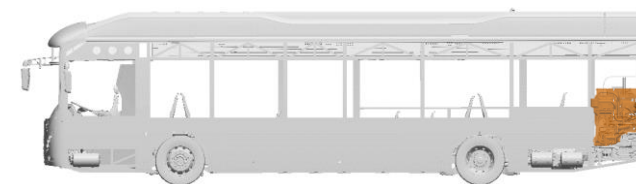
燃料电池系统与整车布置



乘用车



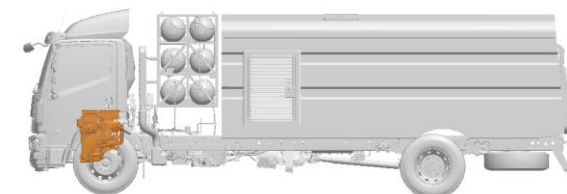
公交



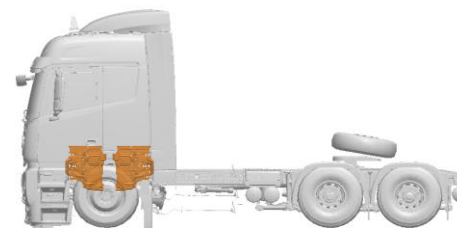
轻卡
(4.5吨)



中卡
(18吨)



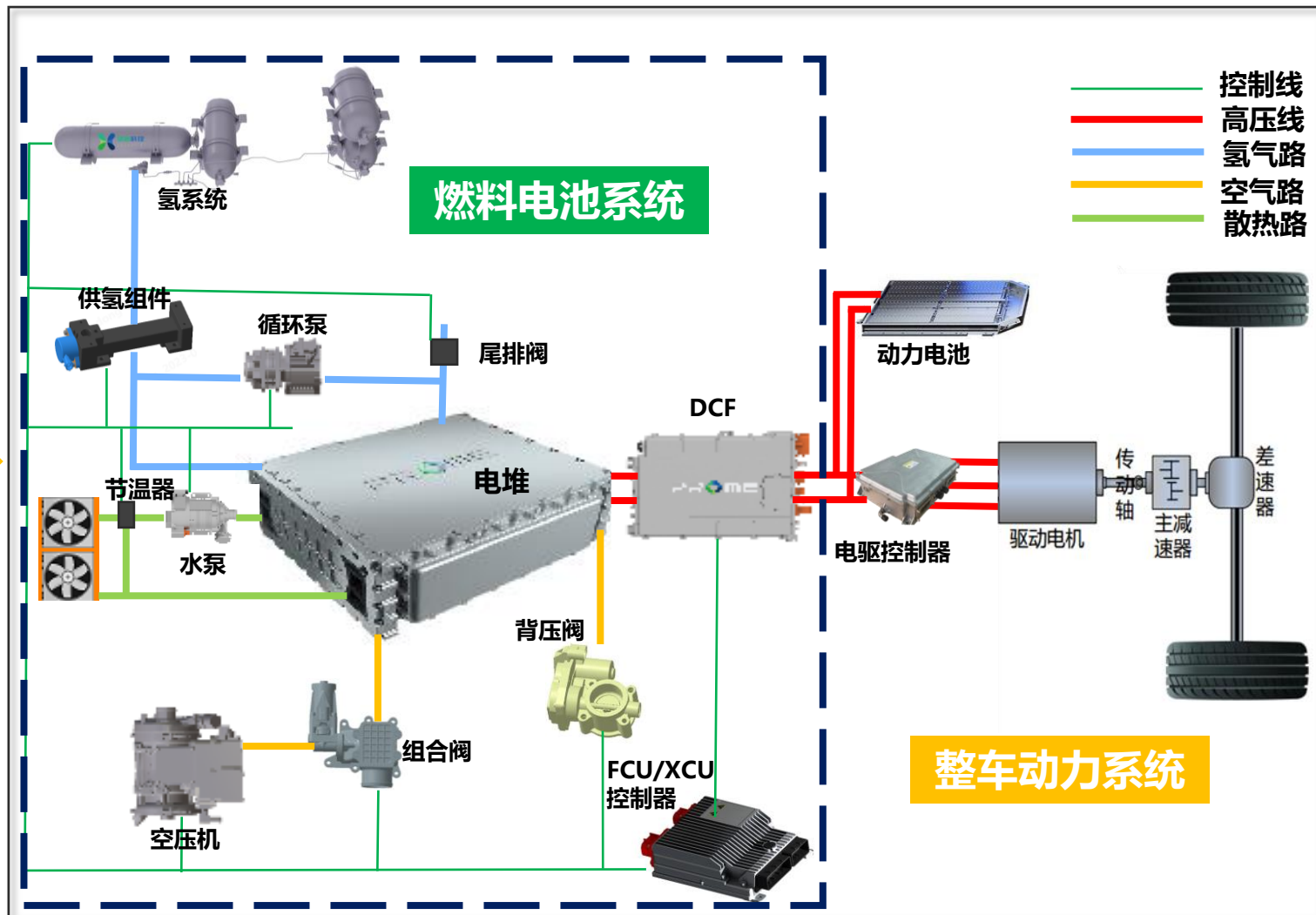
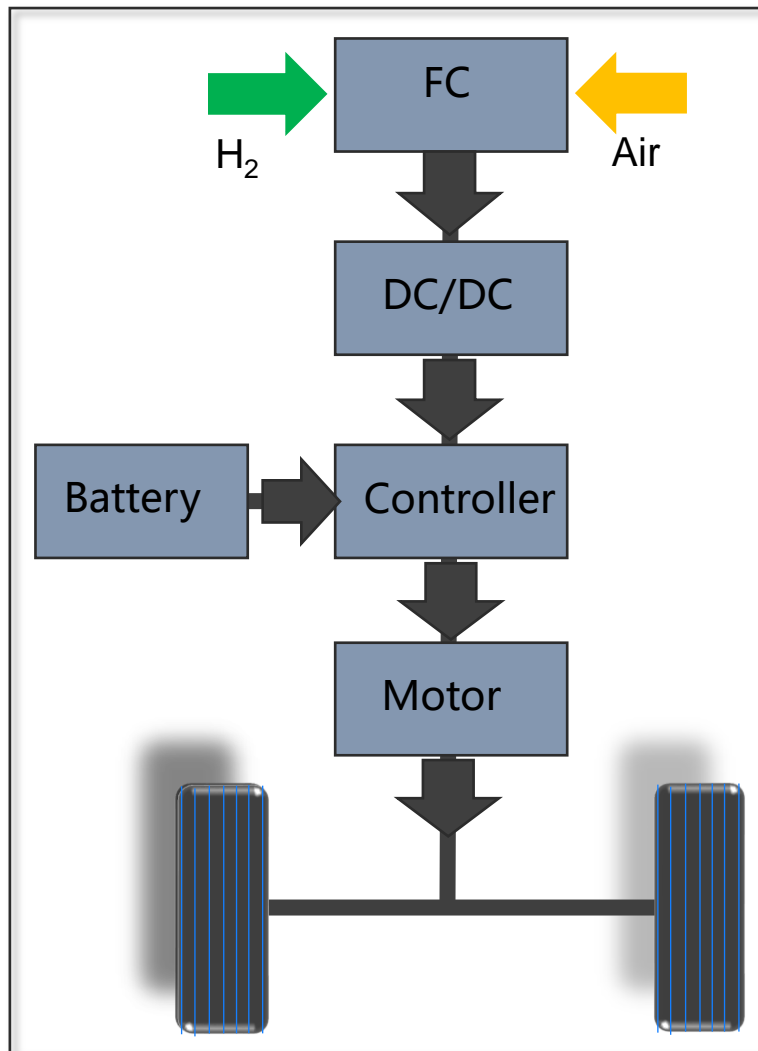
重卡
(42/49吨)



重卡
(49吨)



燃料电池控制系统拓扑



(混合型燃料电池汽车, FC作主动力源, 电池为辅助电源)



PART 02

燃料电池系统建模和FCU软件开发

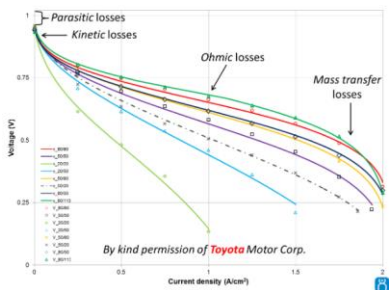


燃料电池系统控制策略

- 燃料电池系统具有上电初始化、就绪、启停机、运行、故障诊断等运行模式
- 接收整车控制指令，通过对系统各状态的感知，决策各执行器的动作，实现系统高可靠性的能量输出

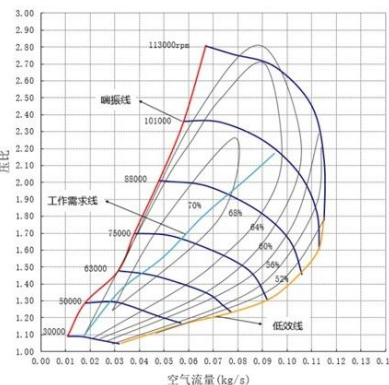
初始化

- 通讯状态自检
- 传感器限值自检
- 零部件状态自检



状态监测与诊断

- 零部件故障监测
- 单体电压保护
- 空压机喘震保护
- 远程数据传输



就绪

- 等待整车指令

运行模式

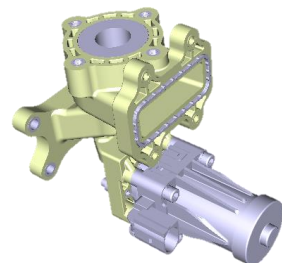
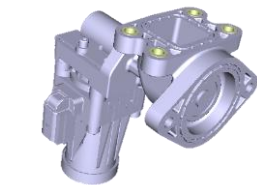
系统启动

- 高电位抑制
- 避免氢氧界面
- 快速启动
- 低温冷启动



系统运行

- 功率控制
- 快速加减载策略
- 氢/空气供给控制
- 水热管理控制



系统停机

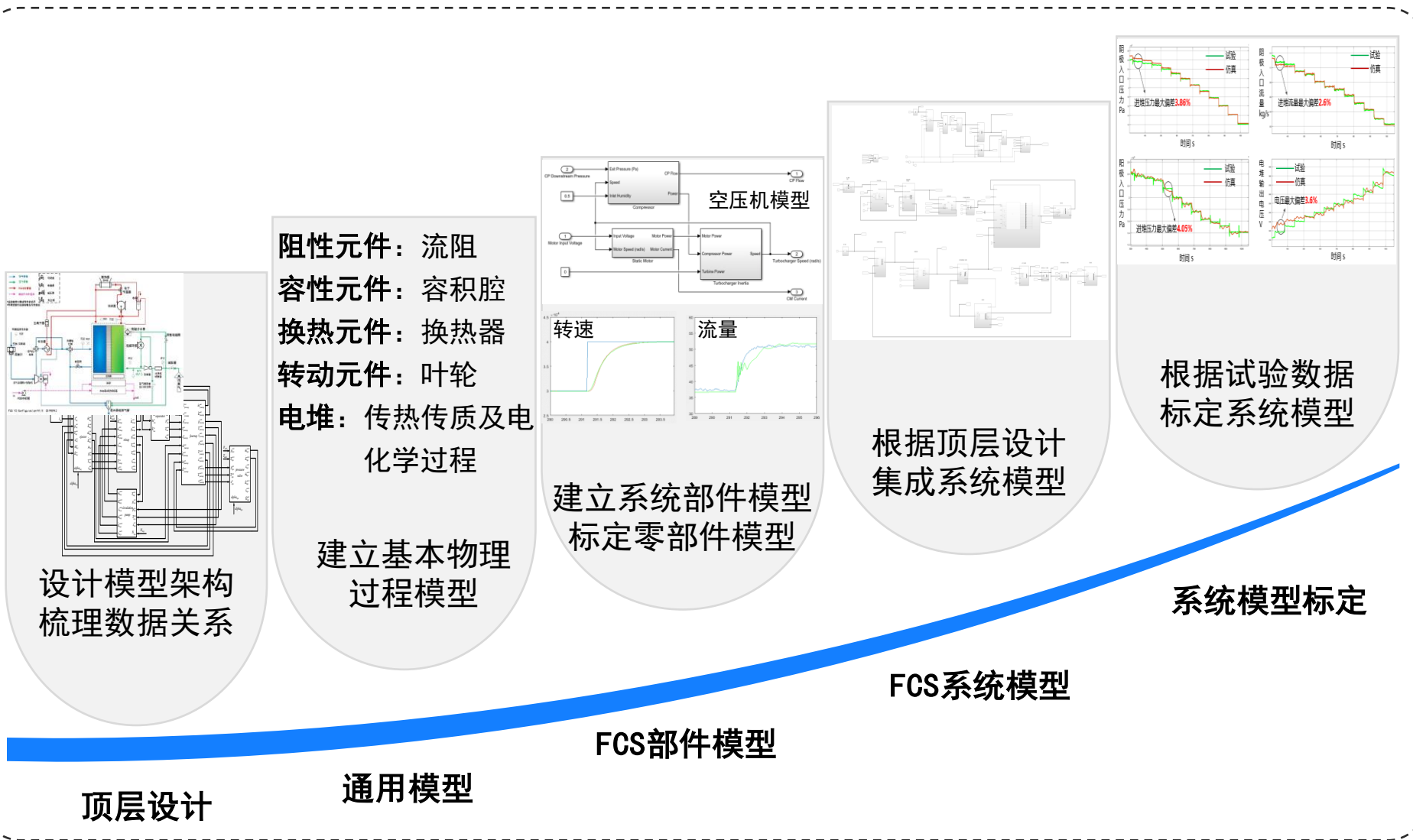
- 电堆吹扫
- 快速放电
- 氢耗氧

◆ 系统建模目的

根据燃料电池的系统架构，建立电堆及相应BOP部件的数学/工作特性模型，进而集成系统仿真模型。

建立燃料电池系统仿真模型是为了获得系统的工作特征关系。从而可以分析燃料电池环境条件、操作条件、BOP部件状态与电堆性能之间的关系。从而支撑系统性能开发、控制策略开发和软件开发。

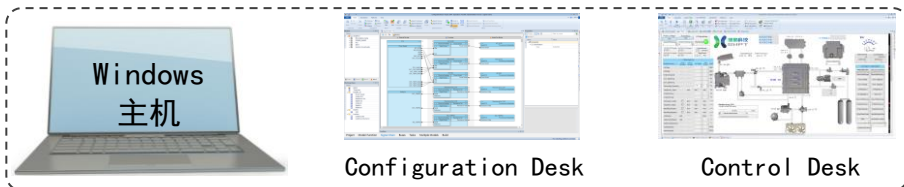
◆ 系统建模技术路线



基于MATLAB & Simulink的系统建模优势

◆ 系统模型与控制软件共平台

上位机



网络通讯

实时仿真器



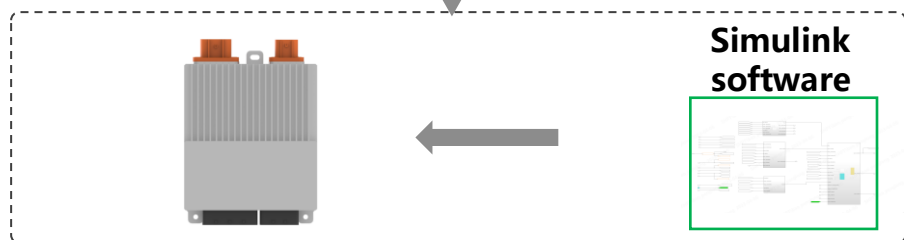
PCI

板卡

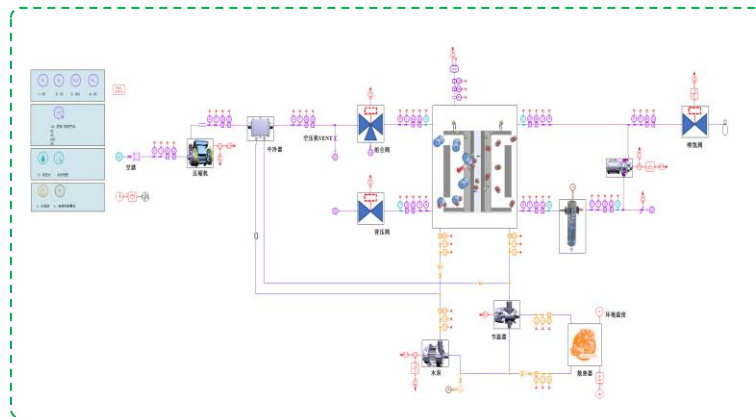
控制器

I/O模块

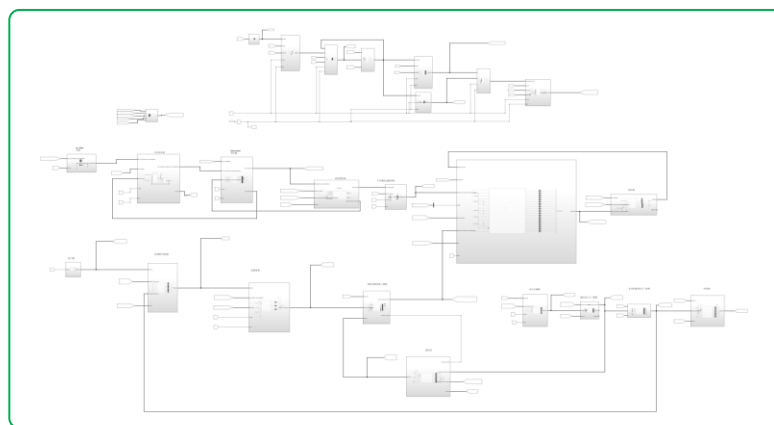
CAN



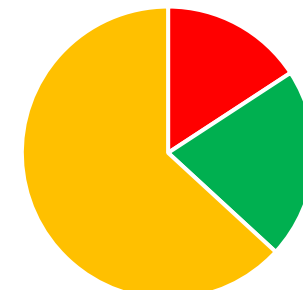
切换前系统模型平台



切换后Simulink模型平台



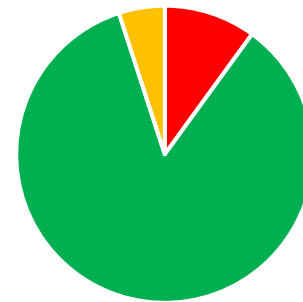
跨平台联合仿真，代码编译器不同，模型兼容性、计算稳定性不足



工况覆盖度 55%

■ 可实现 ■ 介入可实现 ■ 未实现

共平台联合仿真，模型兼容性更高，数据传递更高效，计算更稳定



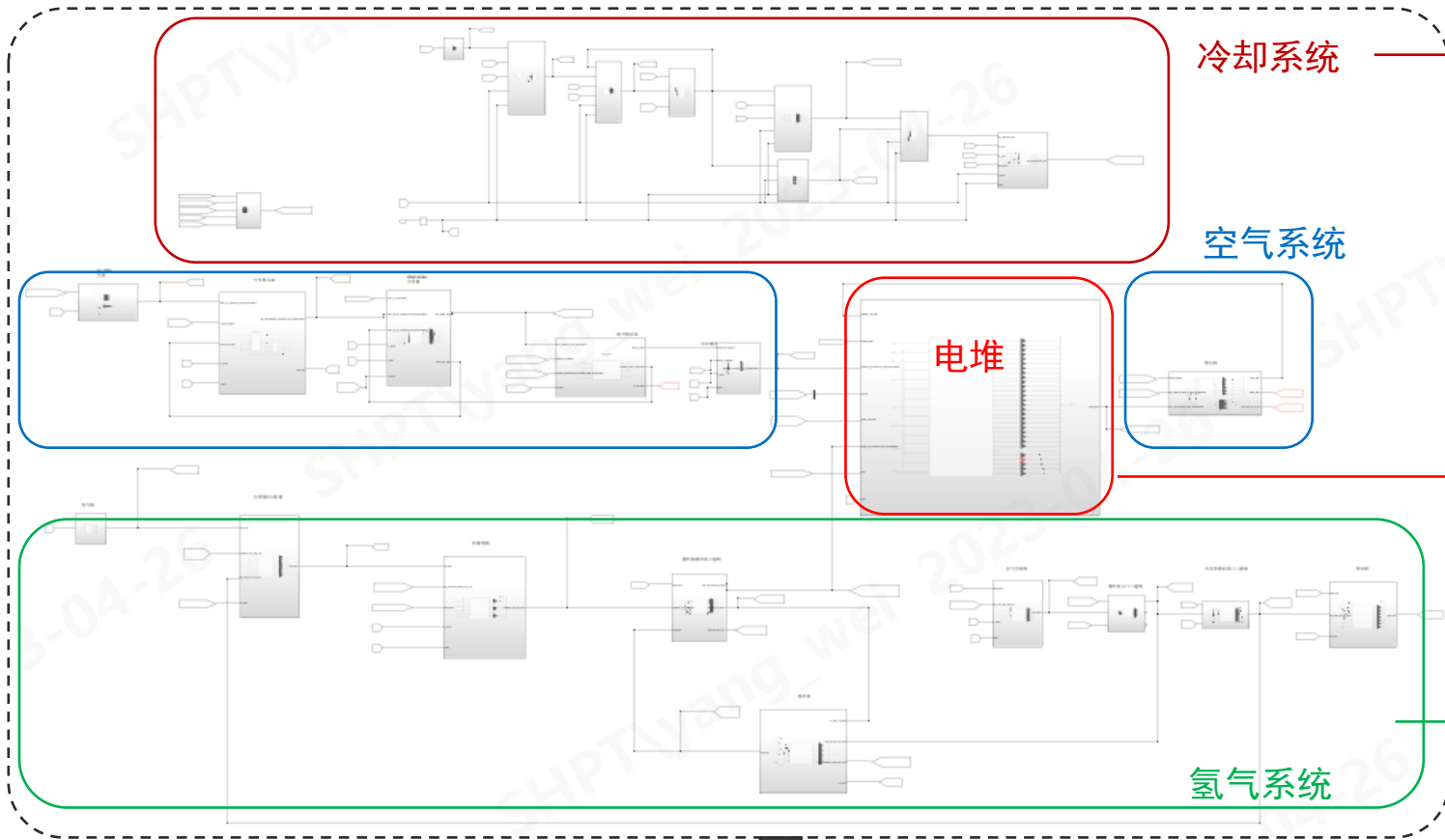
工况覆盖度 85%

■ 可实现 ■ 介入可实现 ■ 未实现

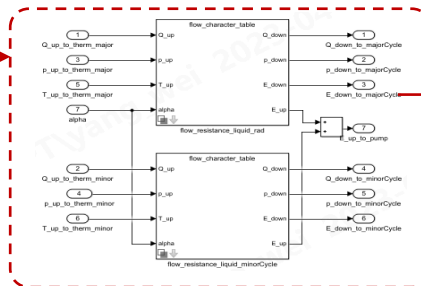
燃料电池系统模型、设置及仿真

◆ 系统模型包含氢、空、水子系统和电堆模型；模型参数包含：环境、物性、阻力、换热、气动、液力及电化学等相关参数

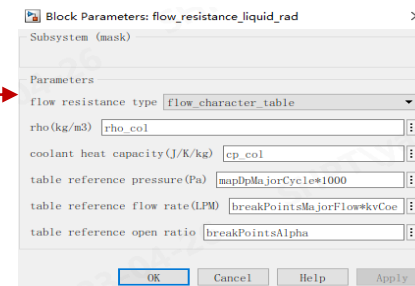
Simulink系统模型



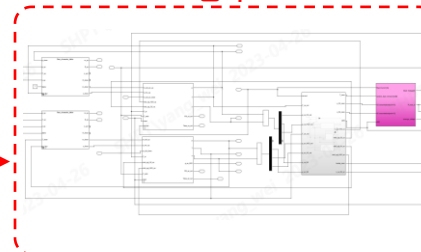
节温器模型



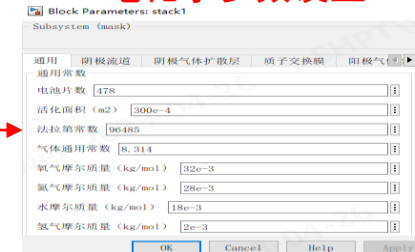
阻力参数设置



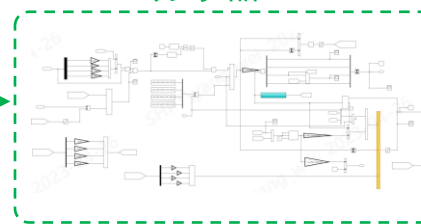
电堆



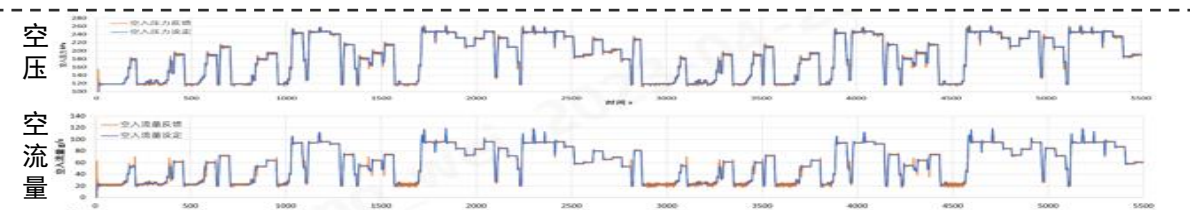
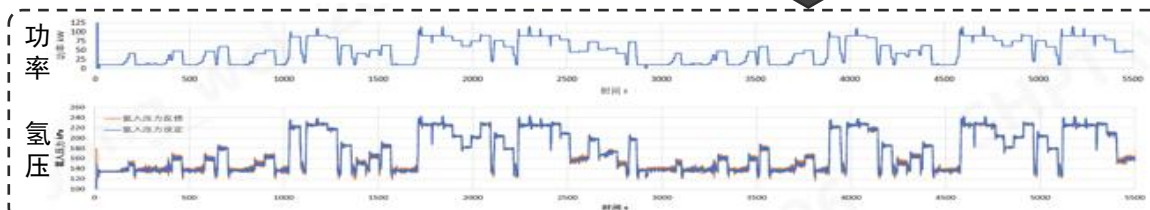
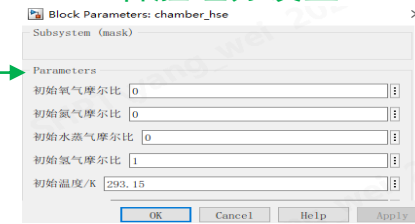
电化学反应参数设置



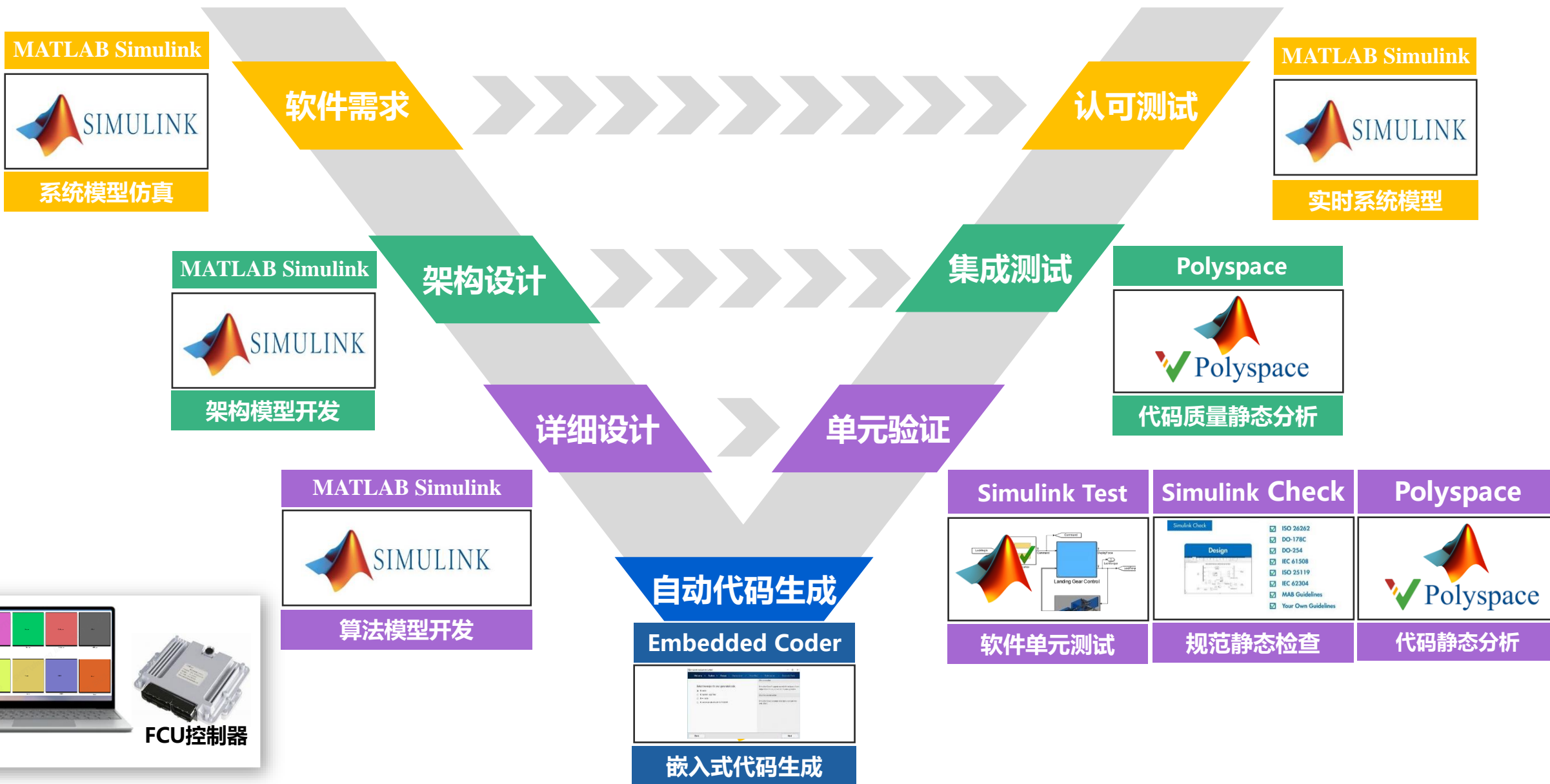
分水器



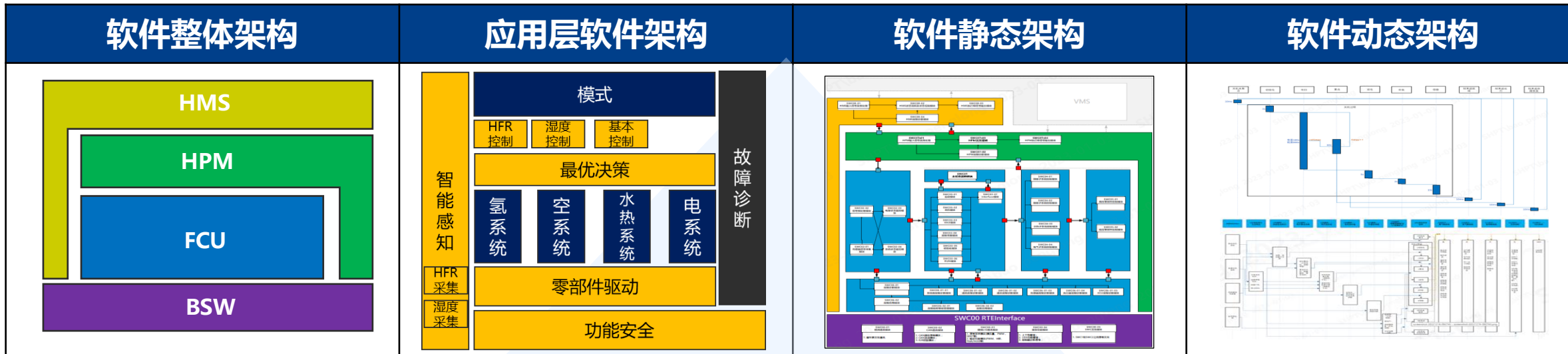
容腔组分设置



基于MATLAB & Simulink的全过程FCU软件开发



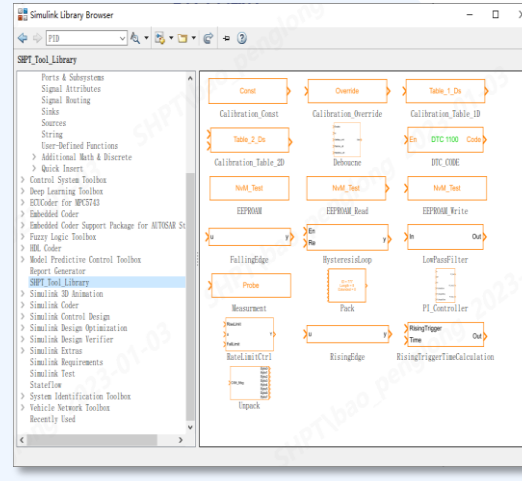
FCU软件平台化架构设计



多车型平台软件共用



自建软件脚本库



自建软件模型库



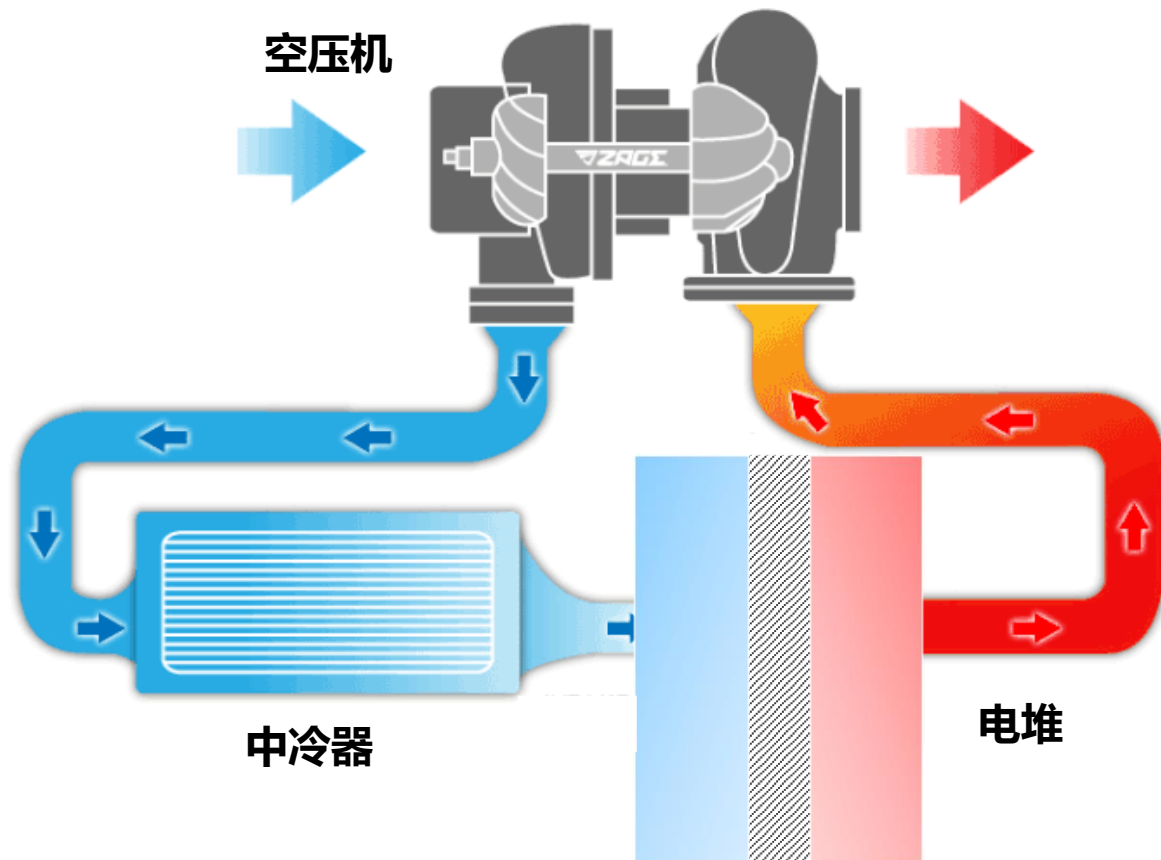
软件建模规范

空气路控制算法	散热路控制算法	氢气路控制算法	诊断控制技术
<div data-bbox="89 307 351 506"> <p>燃料电池阴极双闭环解耦控制</p> </div> <div data-bbox="369 307 637 506"> <p>空压机非线性模型控制</p> </div> <div data-bbox="89 521 351 749"> <p>空压机防喘振保护算法</p> </div> <div data-bbox="369 521 637 749"> <p>环境自适应空气闭环控制算法</p> </div>	<div data-bbox="687 307 955 506"> <p>基于串级内模的水出温度控制技术</p> </div> <div data-bbox="968 307 1235 506"> <p>基于模型的自适应风扇控制技术</p> </div> <div data-bbox="687 521 955 749"> <p>基于前馈算法的温差控制技术</p> </div> <div data-bbox="968 521 1235 749"> <p>基于Smith预估的外循环温度控制技术</p> </div>	<div data-bbox="1286 307 1554 506"> <p>氢气路多级引射高效循环控制</p> </div> <div data-bbox="1567 307 1834 506"> <p>全工况氢压双闭环控制算法</p> </div> <div data-bbox="1286 521 1554 749"> <p>基于动态冷凝水量的积分排水策略</p> </div> <div data-bbox="1567 521 1834 749"> <p>基于电堆干湿状态的循环泵补偿控制</p> </div>	<div data-bbox="1885 307 2153 506"> <p>基于多频阻抗监测的电堆控制技术</p> </div> <div data-bbox="2165 307 2433 506"> <p>燃料电池在线诊断干湿控制技术</p> </div> <div data-bbox="1885 521 2153 749"> <p>基于功能安全的故障诊断体系</p> </div> <div data-bbox="2165 521 2433 749"> <p>基于FTA的故障诊断容错控制</p> </div>
<p>燃料电池阴极子系统环境自适应控制算法</p>	<p>燃料电池散热路串级内模控制算法</p>	<p>燃料电池氢气侧多回路高效循环控制算法</p>	<p>多频阻抗监测的电堆状态实时在线诊断及控制</p>



基于智能化自适应控制算法及深度诊断技术，有效提升系统功率密度和使用寿命

- ◆ 氢气路采用多级引射方案，实现了零功耗阳极再循环技术，热管理采用串级内模控制算法，自适应不同外界环境，最大程度提高电堆工作的舒适性；
- ◆ 空气自适应控制算法使得系统重要操作条件控制精度达到±0.5%，可以自主适应环境温度、海拔高度和系统衰减；
- ◆ 深度诊断技术全面监测电堆内部干湿、传质及老化状态，并基于此实时调整操作条件，电堆寿命提升10%以上；



空压机喘振

- 空压机的流通空气流量低于空压机的临界值;
- 导致空压机出现流量“忽大忽小”的喘振抖动;

危害

- 空压机的高频喘振抖动, 会导致叶片同频振动, 严重情况下会引起叶片断裂;

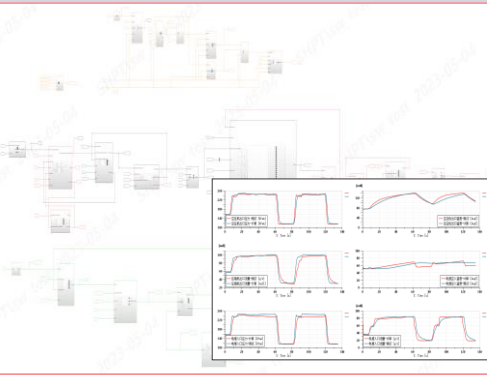


需求分解和架构设计 - 空压机喘振保护算法

系统需求分解与软件需求分析

MATLAB & Simulink平台高精度燃料电池系统模型仿真支持系统控制策略和系统需求制定

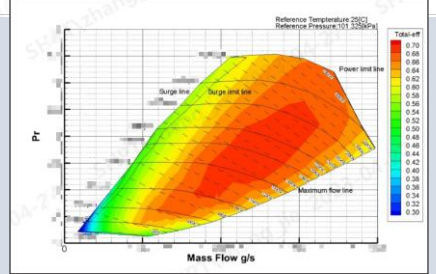
例：喘振是高速离心式空压机会出现的一种非正常运行模式，软件需要识别并避免喘振，以确保空压机的可靠性和寿命



燃料电池系统仿真

4) 系统诊断与保护
为保护空压机，并确保零部件的有效使用，系统需对零部件的状态进行额外诊断并保护，相关诊断需求如下表所示：

序号	诊断项	零部件处理
1	空压机喘振故障	空压机反馈转速>30000rpm&&组合阀开度>20时，空压机的工作工况点进入空压机的喘振区域

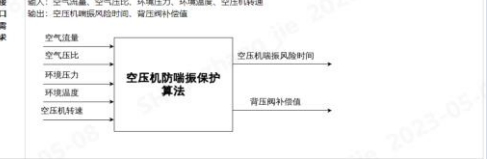


系统需求

三、软件需求描述
基于上述的算法设计方案，具体的软件需求描述如下：

需求编号	需求描述	运行模式	ASIL
E4-981-SRS01	在传感器信号正常的情况下，通过空气流量和压力的动态特性，结合空压机的ASL图，计算空压机的喘振危险时间；	所有工作模式	
E4-981-SRS02	当计算出的空压机喘振危险时间 $\Delta t_{surge} < 0.2s$ 时，软件判断为空压机有喘振风险；当 $\Delta t_{surge} < 0.3s$ 时，软件判断为空压机无喘振风险；在 $0.2s < \Delta t_{surge} < 0.3s$ 时，软件判断结果继承；	所有工作模式	
E4-981-SRS03	基于空压机喘振危险时间的危险度定义，通过PI控制策略实现空压机喘振开度的控制；当软件判断空压机有喘振风险时，通过PI调节降低空压机开度减小空压机的喘振危险；当检测到空压机喘振状态，软件判断空压机无喘振风险时，取消降低空压机开度控制补偿；	所有工作模式	

接口需求
输入：空气流量、空气压力、环境温度、空压机转速
输出：空压机喘振危险时间、背压补偿值



软件需求编制与分析

软件架构设计

合理划分软件模块、合理分配软件接口，基于Simulink开发“高内聚低耦合”的软件架构模型



定位到架构要素位置

SWC04-02_IF03 接口信息表如下，此接口来源于<SWC02>。

接口类型	接口方向	接口名称	参数方向	参数名称	数据类型	数据范围	数据描述
S/R	R	Sensing_p_AmbPresAbs	/		Single	0~120	环境压力值
S/R	R	Sensing_T_AmbTempProcessed	/		Single	-40~100	环境温度的真实值
S/R	R	Sensing_t_ACSurgePredicted	/		Single	0~5	空压机喘振预测时间
S/R	R	Sensing_o_CmbnVlvPostn	/		Single	0~100	组合阀开度反馈值
S/R	R	Sensing_o_BackPresVlvPostn	/		Single	0~100	背压阀开度反馈值
S/R	R	Sensing_p_StackAirInPresAbs	/		Single	0~400	空入压力的绝对值
S/R	R	Sensing_Q_AFMFlw	/		Single	-5~300	空气流量值
S/R	R	Sensing_n_ACSpeedCorrect	/		Single	0~150000	空压机修正转速
S/R	R	Sensing_m_AirMassFlowCorrect	/		Single	0~300	空压机修正流量
S/R	R	Sensing_p_ACPresRatioCorrect	/		Single	0~10	空压机修正压力

设计架构接口



架构模型开发

需求分解

架构设计

详细设计

单元验证

算法开发流程

软件详细设计 - 空压机喘振保护算法

■ 软件详细设计

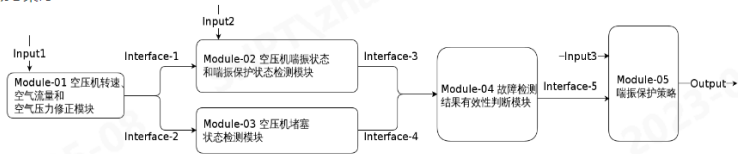
基于MATLAB & Simulink各算法工具箱进行软件算法单元的详细设计开发,

二、架构设计

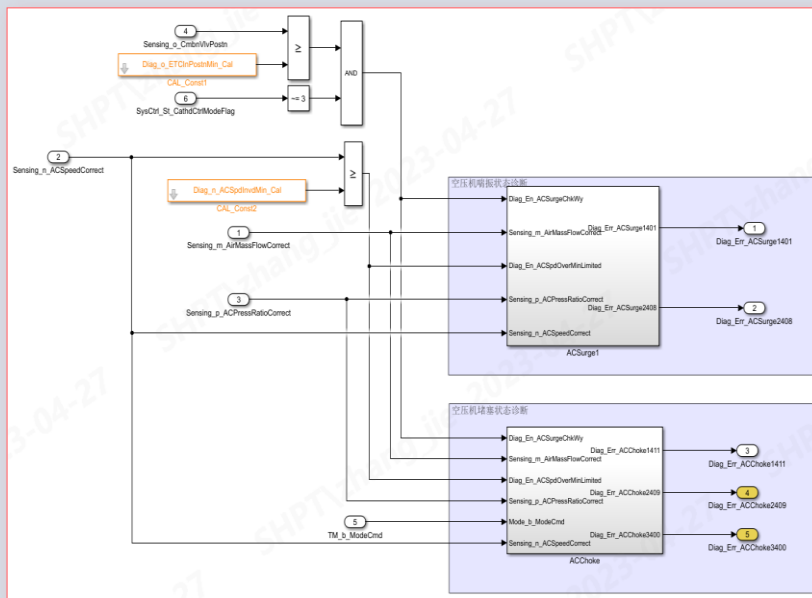
2.1 静态架构

模块ID	模块名称	模块功能
Module-01	空压机转速、空气流量和空气压力修正模块	对空压机转速、空气压力和空气流量进行标准工况修正,得到修正的空压机转速、空气流量和空气压力;
Module-02	空压机喘振状态和喘振保护状态检测模块	根据空压机的喘振区域和喘振保护区域的设定,判断空压机的实际工况点是否进入喘振区或喘振保护区
Module-03	空压机堵塞状态检测模块	根据空压机的堵塞区域的设定,判断空压机的实际工况点是否进入堵塞区
Module-04	故障检测结果有效性判断模块	根据系统的故障诊断定义,判断诊断结果的有效性
Module-05	喘振保护模块	当空压机工作点触发的喘振保护线时,系统提前进行干预保护,避免空压机的运行工况进一步恶化

2.2 动态架构



软件详细设计



软件模型开发

需求分解

架构设计

详细设计

单元验证

算法开发流程

软件单元验证- 空压机喘振保护算法



软件单元验证 – 模型规范检查

基于MAB规范筛选出60项重点检查项形成捷氢建模规范企标，基于Simulink Check工具实现一键检查

规范类型	规范编号	JMAAB 推荐等级	NA-MAAB 推荐等级	规范类型	规范编号	JMAAB 推荐等级	NA-MAAB 推荐等级	规范类型	规范编号	JMAAB 推荐等级	NA-MAAB 推荐等级	
命名规范	ar_0001	强制	推荐	Simulink	jc_0628	强制	推荐	Stateflow	jc_0731	推荐	推荐	
	jc_0201	强制推荐	推荐		jc_0001	强制	推荐		jc_0732	强制推荐	推荐	推荐
	jc_0211	强制推荐	推荐		jc_0002	强制	推荐		jc_0734	强制推荐	推荐	推荐
	jc_0243	强制推荐	推荐		na_0003	强制	不推荐		jc_0735	强制	推荐	推荐
	jc_0244	强制推荐	推荐		na_0005	强制	不推荐		jc_0742	强制推荐	推荐	推荐
	jc_0245	强制推荐	推荐		na_0011	强制	推荐		jc_0751	强制	推荐	推荐
	jc_0246	强制推荐	推荐		na_0012	强制	推荐		jc_0753	强制推荐	推荐	推荐
	jc_0247	推荐	推荐		db_0123	强制推荐	推荐		jc_0760	强制推荐	推荐	推荐
	db_0042	强制推荐	推荐		db_0127	强制	推荐		jc_0762	强制推荐	推荐	推荐
	db_0043	强制推荐	推荐		db_0137	强制	推荐		jc_0763	推荐	推荐	推荐
	db_0051	强制	推荐		db_0151	强制推荐	推荐		jc_0772	强制	推荐	推荐
	db_0142	强制推荐	推荐		jc_0451	强制推荐	推荐		jm_0011	强制推荐	推荐	推荐
na_0001	强制推荐	推荐	jc_0481	强制推荐	推荐	na_0038	推荐	推荐	推荐			
na_0110	强制推荐	推荐	jc_0501	推荐	推荐	na_0040	推荐	推荐	推荐			
jc_0111	强制推荐	推荐	jc_0700	强制推荐	推荐	na_0017	强制推荐	推荐	推荐			
jc_0131	推荐	推荐	jc_0701	强制	推荐	na_0021	强制	推荐	推荐			
jc_0521	强制推荐	推荐	jc_0721	强制推荐	推荐	na_0022	强制	推荐	推荐			
jc_0526	强制推荐	推荐	na_0022	强制推荐	推荐	na_0024	强制推荐	推荐	推荐			
jc_0627	推荐	推荐	jc_0722	推荐	推荐	jc_0011	强制	推荐	推荐			
			jc_0730	强制	推荐	jc_0021	推荐	推荐	推荐			

捷氢建模规范检查项

```

1 SHPT_ModelStyleCheck_Config_AutoV1_0.m
2 一键脚本去自动检查建模规范
3 CheckIDList = {
4     'mathworks.maab.db_0043'...%--simulink规范---Check positioning
5     'mathworks.maab.db_0043'...%--Check font formatting
6     'mathworks.maab.db_0081'...%--Check for unconnected ports and sign
7     'mathworks.maab.db_0142'...%--Check whether block names appear bel
8     'mathworks.maab.db_0146'...%--Check position of Trigger and Enable
9     'mathworks.maab.hd_0001'...%--Check for prohibited sink blocks
10    'mathworks.maab.jc_0110'...%--Check block orientation
11    'mathworks.maab.jc_0111'...%--Check orientation of Subsystem block
12    'mathworks.maab.jc_0131'...%--Check usage of Relational Operator b
13    'mathworks.maab.jc_0601'...%-- Check icon shape of Logical Operat
14    'mathworks.maab.jc_0626'...%--Check usage of Lookup Tables
15    'mathworks.maab.jc_0627'...%--Check usage of Discrete-Time Integr
16    'mathworks.maab.jc_0628'...%--Check for prohibited blocks in disc
17    'mathworks.maab.jm_0001'...%--Check for prohibited sink blocks
18    'mathworks.maab.na_0002'...%--Check fundamental logical and numeri
19    'mathworks.maab.na_0003'...%--Check logical expressions in If bloc
20    'mathworks.maab.na_0005'...%--Check visibility of block port names
21    'mathworks.maab.na_0011'...%--Check scope of From and Goto block
22    'mathworks.maab.db_0123'...%--stateflow规范---Check for Strons
23    'mathworks.maab.db_0127'...%--Check Stateflow data objects with lo
24    'mathworks.maab.db_0137'...%--Check for MATLAB expressions in Stat
25    'mathworks.maab.db_0137'...%--Check usage of exclusive and default
    
```

一键检查脚本

建模规范检查报告

软件单元验证 – 模型圈复杂度优化

通过合理降低模型圈复杂度，可以有效减少软件潜伏缺陷，提升软件的可测试性，且便于代码的维护和重构

捷氢的模型圈复杂度要求

- [0 60]: 低复杂度
- (60 100]: 中复杂度
- > 100: 高复杂度

Simulink Check

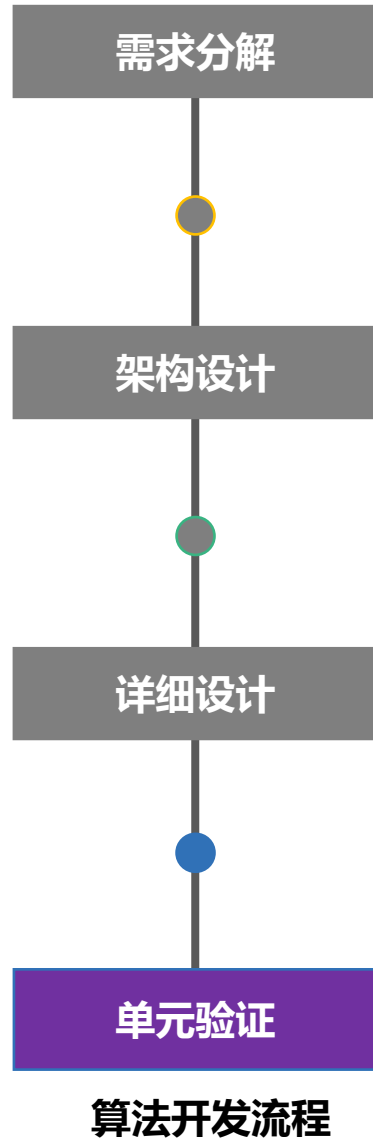
Component	Local Complexity (Component level)	Aggregated Complexity (Component level and descendants)
...StartUpSubsystem1_StartUp	287	287
...Mode_IndividualMode_StartUpSubsystem1	2	289
...IndividualMode_StartUpSubsystem1_Probe1	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const1	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const1	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const2	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const2	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const3	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const3	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const4	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const4	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const5	0	0
...StartUpSubsystem1_calibration_const5	0	0

获取模型圈复杂度报告

圈复杂度: 287

圈复杂度: < 70

圈复杂度优化



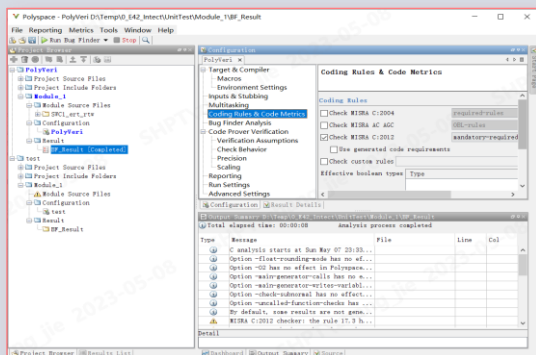
算法开发流程

软件单元测试 - 空压机喘振保护算法

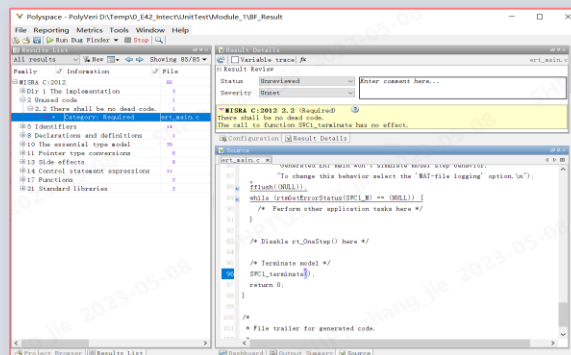


软件单元验证 - 代码静态分析

使用Polyspace对软件单元代码进行静态分析，证明软件没有关键的运行错误，如死代码、死循环、除零等



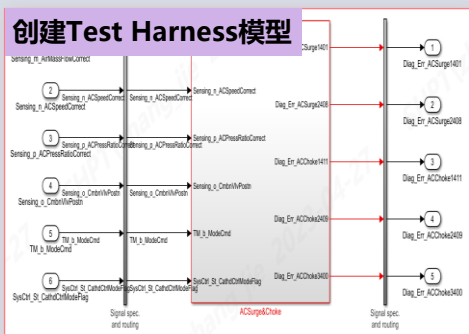
Polyspace配置



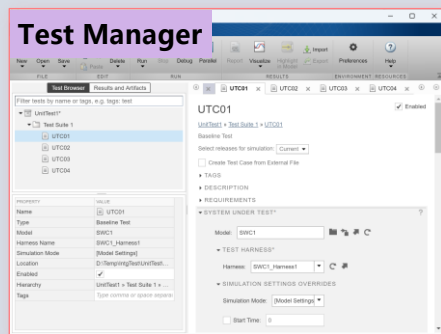
Polyspace报告

软件单元验证 - 软件单元测试

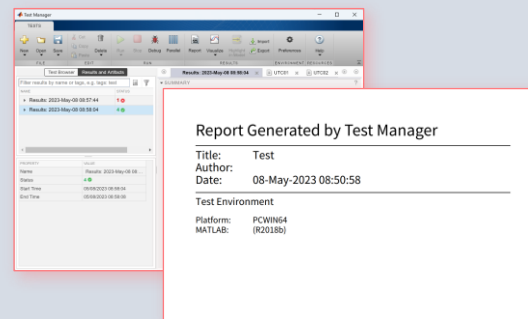
基于Simulink Test测试软件单元，以确认软件单元是否完全满足详细设计要求。



被测单元模型



测试用例设计与管理



软件单元测试报告

需求分解

架构设计

详细设计

单元验证

算法开发流程



全过程MBD平台应用

- 在MATLAB & Simulink平台中实现开发测试全过程管理，有效提升软件开发和验证效率；
- 整体开发效率提升2倍以上；



开放式的外部接口

- 给软件开发和测试提供了更加灵活的应用场景；
- 实现了多个外部接口的连通，如ECU-TEST 自动化测试工具，dSPACE平台等



丰富的开发辅助工具箱

- 给算法开发提供了多样选择；
- 完成了串级内模、双闭环解耦等控制算法的开发；



丰富的测试验证工具箱

- 通过各级别的检查分析和测试，可有效保证软件质量；
- 售后问题减少至少50%；



PART 03

基于MATLAB深度学习 工具箱的智能算法开发



强可靠性软件架构	一体化集成控制器	先进控制算法	智能诊断技术																
<table border="1"><tr><td data-bbox="104 325 366 525">基于AUTOSAR架构的软件设计</td><td data-bbox="372 325 634 525">基于多核操作系统的软件高效调度</td></tr><tr><td data-bbox="104 528 366 735">可再入函数设计保障软件高效复用</td><td data-bbox="372 528 634 735">算法、数据、配置全面分离管理</td></tr></table>	基于AUTOSAR架构的软件设计	基于多核操作系统的软件高效调度	可再入函数设计保障软件高效复用	算法、数据、配置全面分离管理	<table border="1"><tr><td data-bbox="703 325 965 525">高低压一体化集成设计</td><td data-bbox="970 325 1233 525">兼容性高压氢系统控制功能</td></tr><tr><td data-bbox="703 528 965 735">高速高精度信号采样</td><td data-bbox="970 528 1233 735">基于单主控核心的控制器深度集成</td></tr></table>	高低压一体化集成设计	兼容性高压氢系统控制功能	高速高精度信号采样	基于单主控核心的控制器深度集成	<table border="1"><tr><td data-bbox="1302 325 1564 525">基于机器学习的水氢估计</td><td data-bbox="1569 325 1832 525">基于模型的空气自适应控制技术</td></tr><tr><td data-bbox="1302 528 1564 735">基于强化学习的燃料电池最优控制</td><td data-bbox="1569 528 1832 735">基于串级内模的水温自适应控制技术</td></tr></table>	基于机器学习的水氢估计	基于模型的空气自适应控制技术	基于强化学习的燃料电池最优控制	基于串级内模的水温自适应控制技术	<table border="1"><tr><td data-bbox="1900 325 2163 525">基于多频阻抗监测的电堆控制技术</td><td data-bbox="2168 325 2430 525">燃料电池在线诊断干湿控制技术</td></tr><tr><td data-bbox="1900 528 2163 735">基于功能安全的故障诊断体系</td><td data-bbox="2168 528 2430 735">基于FTA的故障诊断容错控制</td></tr></table>	基于多频阻抗监测的电堆控制技术	燃料电池在线诊断干湿控制技术	基于功能安全的故障诊断体系	基于FTA的故障诊断容错控制
基于AUTOSAR架构的软件设计	基于多核操作系统的软件高效调度																		
可再入函数设计保障软件高效复用	算法、数据、配置全面分离管理																		
高低压一体化集成设计	兼容性高压氢系统控制功能																		
高速高精度信号采样	基于单主控核心的控制器深度集成																		
基于机器学习的水氢估计	基于模型的空气自适应控制技术																		
基于强化学习的燃料电池最优控制	基于串级内模的水温自适应控制技术																		
基于多频阻抗监测的电堆控制技术	燃料电池在线诊断干湿控制技术																		
基于功能安全的故障诊断体系	基于FTA的故障诊断容错控制																		
<p>集成度、可靠性、调度效率全面提升的软件架构设计</p>	<p>燃料电池系统控制器的一体化集成设计</p>	<p>基于人工智能和高精度控制模型的自适应控制算法</p>	<p>基于多频阻抗监测的电堆在线诊断及控制</p>																



基于创新成果，研发出一体化集成控制器、先进自适应控制算法及智能诊断技术，有效提升系统功率密度和使用寿命

- ◆ 集成控制器功率密度提升超过28%，软件全面一体化编译与集成，调度效率与可靠性明显提升；
- ◆ 先进自适应控制算法确保系统重要操作条件控制精度达到99.5%，可以自主适应环境温度、海拔高度和系统衰减；
- ◆ 智能诊断技术全面监测电堆内部干湿、传质及老化状态，并基于此实时调整操作条件，电堆寿命提升10%以上；

智能算法实例 - 燃料电池阳极水淹判断

01

阳极的液态水会堵塞气体扩散层 (GDL) 与流道, 阻碍气体传质, 造成反应欠气, 从而损伤催化剂, 进而降低电堆耐久性;

02

燃料电池水淹故障诊断算法对提升系统效率和耐久性非常重要;

01

燃料电池运行过程中产生的水会向阴极和阳极扩散

02

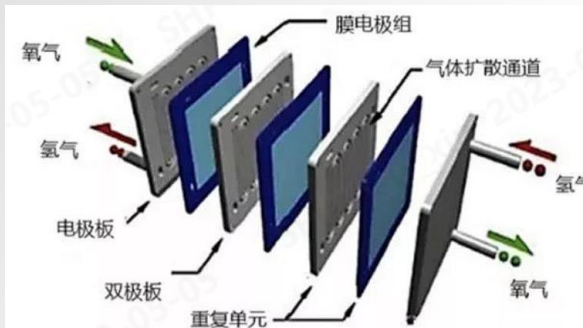
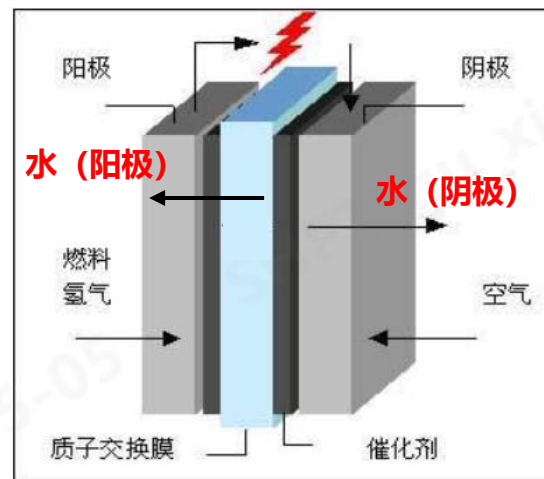
阳极液态水持续积累, 会造成燃料电池阳极水淹, 降低系统效率和寿命

阳极水淹的危害

燃料电池阳极水淹

阳极发生水淹故障时, 单体没有足够的反映气体, 电压反复波动, 降低系统效率并影响电堆耐久

燃料电池水传输



黑盒模型（数据驱动模型）

- ◆ 可以屏蔽机理过程和领域知识，对复杂过程进行建模
- ◆ 可以降低模型复杂度，加快仿真和运行速度



优势



黑盒模型

- ◆ 使用统计方法，优化方法或AI方法进行建模



劣势

- ◆ 需要大量的训练数据、模型对训练数据以为的知识缺乏推断
- ◆ 对机理过程缺乏解释性，无法对原理进行参数化

选择LSTM网络进行阳极水淹诊断的原因

- ◆ 燃料电池阳极水淹涉及复杂传质和传热问题，且和系统工况高度相关，**机理建模困难**
- ◆ 该问题机理建模需要求解复杂偏微分方程组，**无法在车载条件下实时计算**
- ◆ 捷氢实验室具有电化学阻抗分析设备，**可以提供足够训练数据**，支持虚拟传感器建模

综上所述，捷氢科技基于MATLAB工具链，使用LSTM网络，对燃料电池阳极水淹故障建立数据驱动模型

白盒模型（机理模型）

- ◆ 可以清晰的解释过程机理，容易对机理进行参数化解释
- ◆ 建模不依赖大量的训练数据



优势



白盒模型

- ◆ 使用物理，化学和数学等第一性原理方法进行建模



劣势

- ◆ 对于复杂过程，机理模型难以准确得到
- ◆ 建模速度较慢，且对复杂机理的建模难以在嵌入式平台实时计算

燃料电池阳极水淹诊断模型的构建

- ◆ 使用MATLAB Deep Learning工具箱，可视化搭建基于LSTM网络的阳极水淹诊断模型，模型参数可由对话框配置
- ◆ 基于Deep Learning工具箱，网络参数可以由对话框配置，替代复杂函数的编程

$$f_t = f(W_f * \begin{bmatrix} h_{t-1} \\ X_t \end{bmatrix} + b_f)$$

遗忘门计算函数

$$i_t = f(W_i * \begin{bmatrix} h_{t-1} \\ X_t \end{bmatrix} + b_i)$$

输入门计算函数

$$\tilde{C}_t = f(W_c * \begin{bmatrix} h_{t-1} \\ X_t \end{bmatrix} + b_c)$$

$$C_t = f_t \circ C_{t-1} + i_t \circ \tilde{C}_t$$

状态更新函数

$$O_t = f(W_o * \begin{bmatrix} h_{t-1} \\ X_t \end{bmatrix} + b_o)$$

$$h_t = O_t \circ \tanh(O_t)$$

输出门计算函数

LSTMLayer计算函数

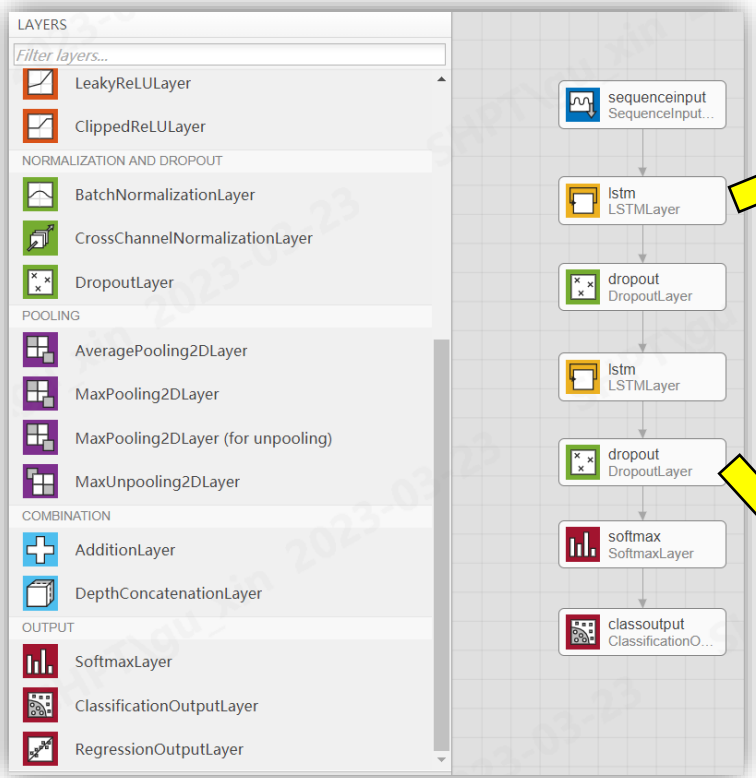
复杂网络函数
可由配置界面
进行配置

$$f(\mathbf{x}; \{W_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}) = \phi_n(W_n \phi_{n-1}(W_{n-1} \dots (\phi_1(W_1 \mathbf{x}))))$$

$$K * \mathbf{x} \equiv \begin{pmatrix} k_1 & k_2 & 0 & k_3 & k_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & k_2 & 0 & k_3 & k_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_1 & k_2 & 0 & k_3 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_1 & k_2 & 0 & k_3 & k_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{pmatrix}$$

$$g(\mathbf{x}) = \mathbf{u} * \mathbf{h} = \begin{pmatrix} u_5 & u_6 & 0 & u_8 & u_9 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ u_4 & u_5 & u_6 & u_7 & u_8 & u_9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_4 & u_5 & 0 & u_7 & u_8 & 0 & 0 & 0 \\ u_2 & u_3 & 0 & u_5 & u_6 & 0 & u_8 & u_9 & 0 \\ u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 & u_7 & u_8 & u_9 \\ 0 & u_1 & u_2 & 0 & u_4 & u_5 & 0 & u_7 & u_8 \\ 0 & 0 & 0 & u_2 & u_3 & 0 & u_5 & u_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_1 & u_2 & u_3 & u_4 & u_5 & u_6 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \\ h_5 \\ h_6 \\ h_7 \\ h_8 \end{pmatrix}$$

DropoutLayer层计算函数



图形化深度学习网络构建

PROPERTIES

LSTMLayer

Name: lstm

InputSize: auto

NumHiddenUnits: 100

OutputMode: sequence

StateActivationFunction: tanh

GateActivationFunction: sigmoid

InputWeights: []

RecurrentWeights: []

Bias: []

HiddenState: []

CellState: []

InputWeightsLearnRateF...: 1

InputWeightsL2Factor: 1

RecurrentWeightsLearnR...: 1

RecurrentWeightsL2Factor: 1

BiasLearnRateFactor: 1

BiasL2Factor: 0

LSTMLayer网络配置界面

PROPERTIES

DropoutLayer

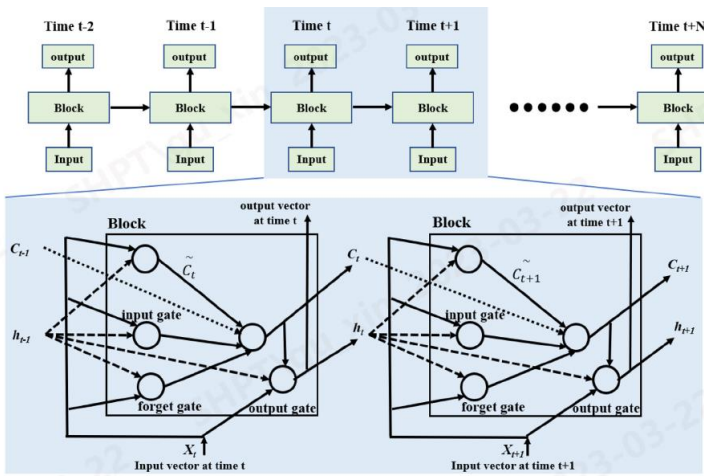
Name: dropout

Probability: 0.5

DropoutLayer网络配置界面

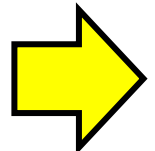
LSTM网络的自动化导出

配置后的图形化网络可以自动化导出为网络模型，可以由测试/仿真/控制模型调用



模型示意框图

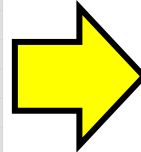
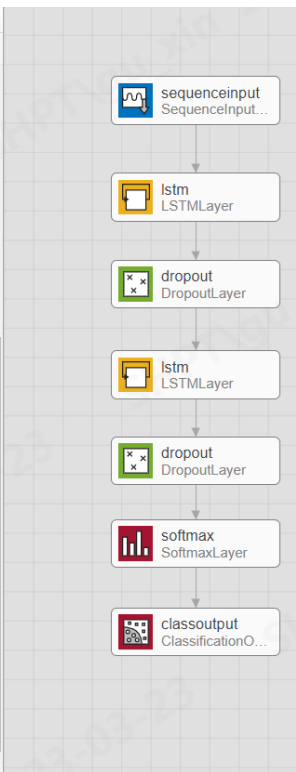
图形化构建
基于LSTM
网络的水淹
诊断模型



LAYERS

Filter layers...

- LeakyReLU Layer
- ClippedReLU Layer
- BatchNormalization Layer
- CrossChannelNormalization Layer
- Dropout Layer
- AveragePooling2D Layer
- MaxPooling2D Layer
- MaxPooling2D Layer (for unpooling)
- MaxUnpooling2D Layer
- Addition Layer
- DepthConcatenation Layer
- Softmax Layer
- ClassificationOutput Layer
- RegressionOutput Layer



图形化
模型自
动化导
出为代
码

模型的自动化导出

```

layers_1 x
├── 7x1 Layer
│   ├── 1
│   ├── 1x1 ImageInputLayer
│   ├── 1x1 LSTMLayer
│   ├── 1x1 DropoutLayer
│   ├── 1x1 LSTMLayer
│   ├── 1x1 DropoutLayer
│   ├── 1x1 SoftmaxLayer
│   └── 1x1 ClassificationOutputLayer
└── ...
    
```

工作区中的水淹诊断模型

属性	值
Name	'Istm_1'
InputSize	'auto'
NumHiddenUnits	100
OutputMode	'sequence'
StateActivationFunction	'tanh'
GateActivationFunction	'sigmoid'
InputWeights	[]
InputWeightsLearnRateFactor	1
InputWeightsL2Factor	1
RecurrentWeights	[]
RecurrentWeightsLearnRateFactor	1
RecurrentWeightsL2Factor	1
Bias	[]
BiasLearnRateFactor	1
BiasL2Factor	0
HiddenState	[]
CellState	[]

每层参数可在工作区查看

Components of the model input vector X	unit	Signal acquisition method under vehicle operation
1 inlet pressure of hydrogen	Kpa	AD sampling of controller
2 inlet pressure of air	Kpa	AD sampling of controller
3 inlet flow rate of air	g/s	AD sampling of controller
4 t emperature of cooling water inlet	°C	AD sampling of controller
5 t emperature of cooling water outlet	°C	AD sampling of controller
6 speed of cooling pump	r/min	automotive CAN bus
7 state of the hydrogen purge valve	no unit	digital sampling of controller
8 current density of stack output	A	automotive CAN bus
9 voltage of stack output	V	automotive CAN bus
10 speed of hydrogen recirculation pump	r/min	automotive CAN bus
11 current of hydrogen recirculation pump	A	automotive CAN bus

模型输入

水淹诊断模型的训练

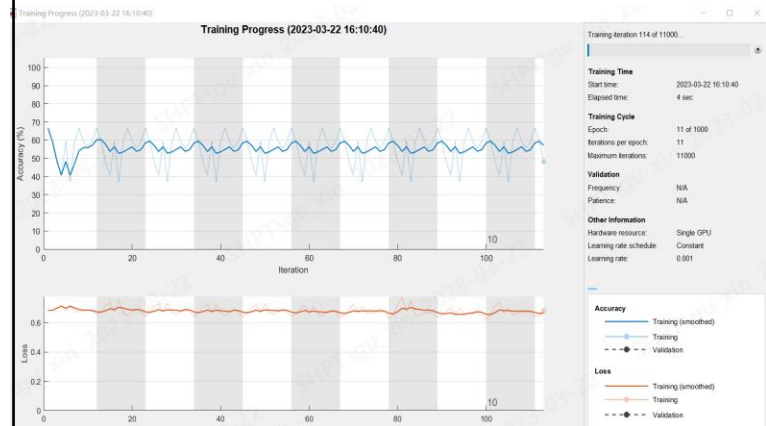
```
maxEpochs = 1000;%最大训练周期数
miniBatchSize = 500;%分块尺寸

options = trainingOptions('adam', ...
    'ExecutionEnvironment','gpu', ...
    'MaxEpochs',maxEpochs, ...
    'MiniBatchSize',miniBatchSize, ...
    'GradientThreshold',1, ...
    'Verbose',false, ...
    'Plots','training-progress');
```

%% 训练

```
net=trainNetwork(XTrain,YTrain, layers, options);
```

调用函数对网络进行训练



可视化的LSTM网络训练过程

01

使用MATLAB提供的训练函数，对导出后的模型进行训练

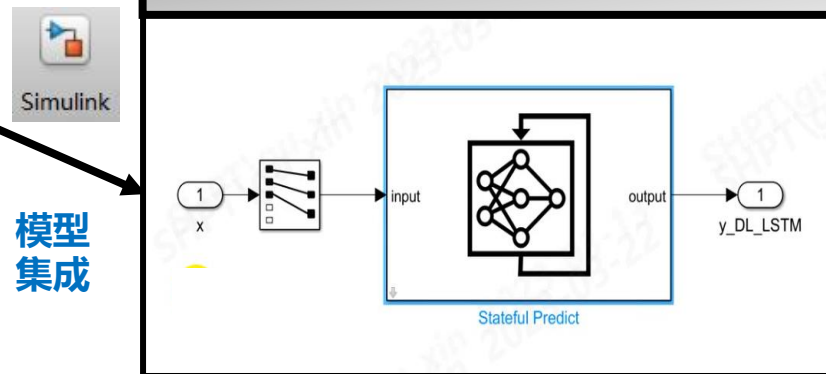
- ◆ 调用MATLAB的**trainNetwork**函数，对导出后的模型进行训练
- ◆ 训练过程，如迭代次数、损失函数等，实时可视化查看

02

水淹诊断模型的C代码自动生成，和面向车载控制器的代码集成

- ◆ Simulink的**Stateful Predict**模块可以在燃料电池系统控制模型中调用训练后的水淹诊断模型
- ◆ 使用MATLAB的**Embedded Coder**，将控制算法整体生成C代码，并通过集成工具进行代码集成

在Simulink算法模型中对网络进行调用



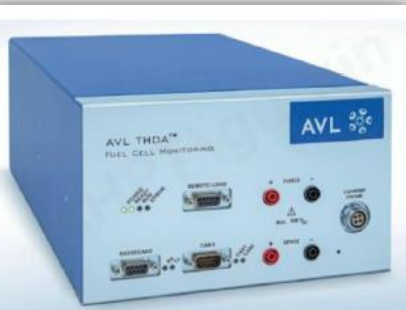
调用MATLAB的**Embedded Coder**自动化生成应用层C代码

车载控制器软件代码集成

应用层代码
(C代码)

底层代码
(C代码)

代码集成
工具



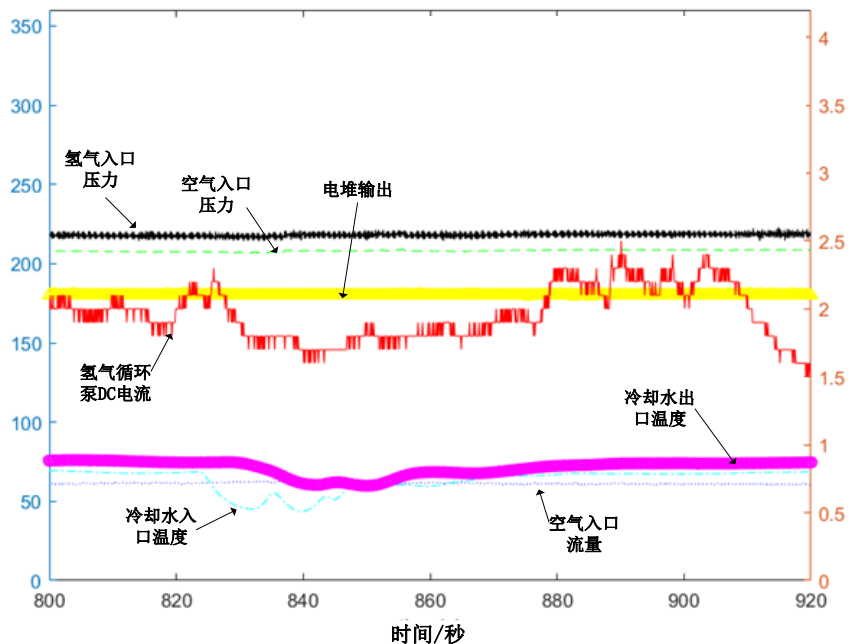
使用THDA诊断设备进行水淹在线诊断，为有监督训练提供训练数据

基于LSTM网络的燃料电池水淹诊断模型诊断效果

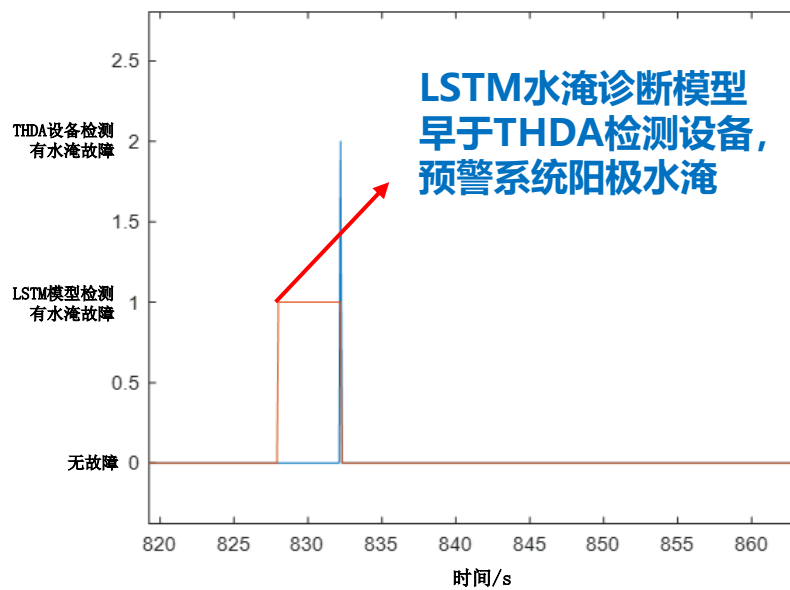


模型测试结果

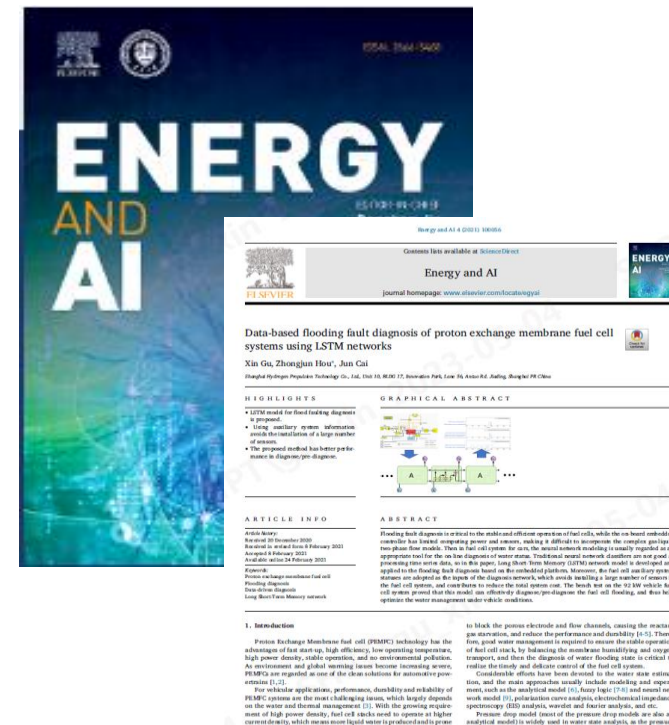
- ◆ 捷氢科技使用LSTM网络对电堆水淹故障进行分类器设计，建立车载虚拟传感器，测试结果表明该网络对水淹故障具有良好诊断效果，可以及时提示控制系统，使系统可以及时作出响应，避免故障的发生；
- ◆ 该水淹诊断模型综合辅助系统与电堆出入口传感器信息进行诊断，避免了安装大量传感器的同时，只依赖少数价格低廉的传感器，对车载应用具有很强的实用性。



燃料电池系统工况



水淹诊断模型诊断效果



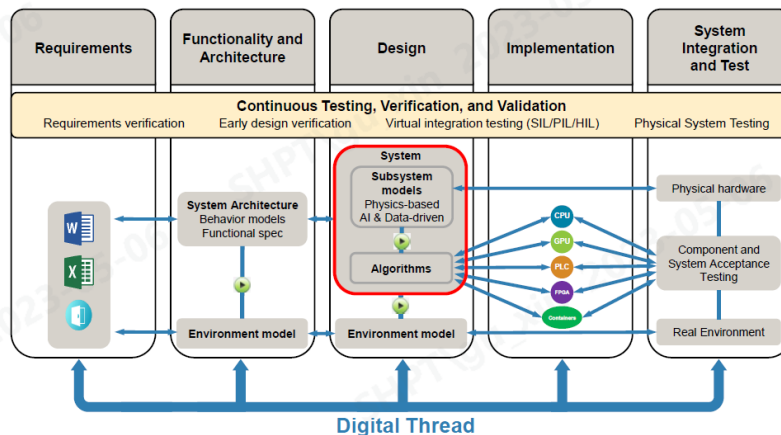
MATLAB智能算法工具箱使用感受

- ◆ MATLAB工具链支持AI模型的在整个V模型中的管理、设计、实现和测试验证，有助于研发流程的整体数字化
- ◆ 使用MATLAB Deep Learning工具箱训练后的模型，可以自动化嵌入已有车辆控制模型，统一进行代码生成和代码集成
- ◆ 对AI模型的设计、训练和部署有良好的支持，对主流的AI模型开发框架均有API支持

01

支持架构、设计、试验和验证等全开发流程的数字化

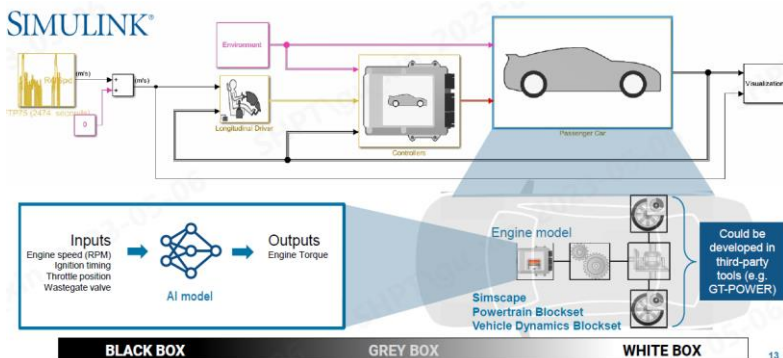
开发流程



03

对AI模型建模支持全面，且兼容主流AI模型开发框架

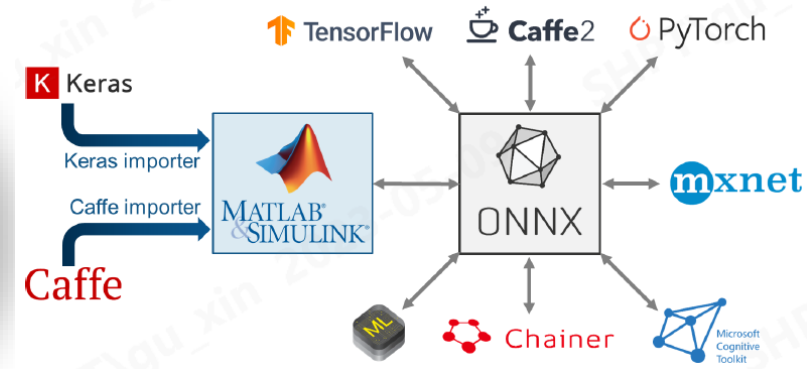
AI支持



代码生成

可以嵌入已有控制模型，统一进行代码生成和代码集成

02





PART 04

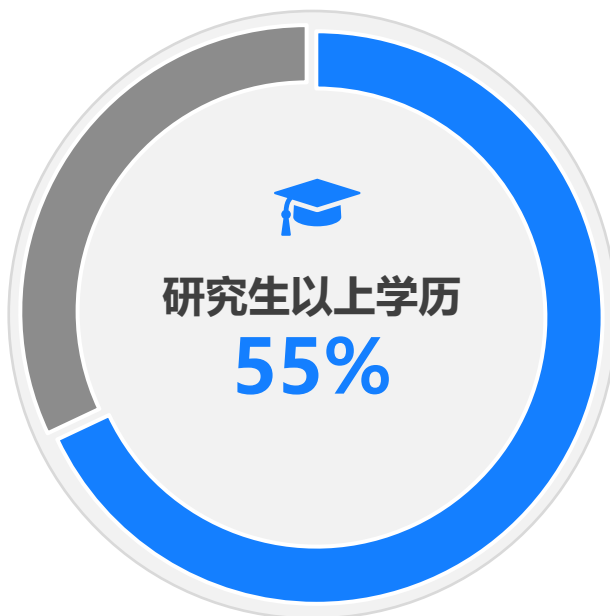
捷氢科技简介及未来展望



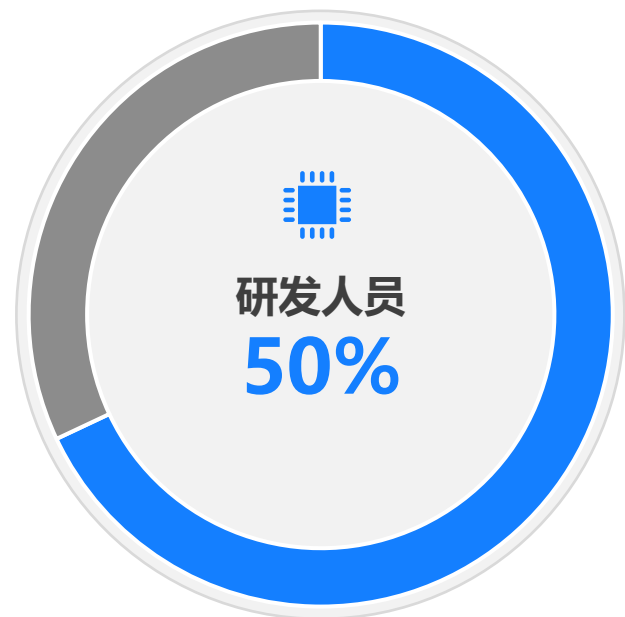
成立时间 2018年6月27日

公司定位 为行业提供完整的燃料电池产品解决方案和专业的技术服务

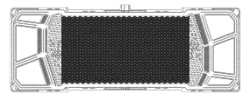
团队结构 汇聚国内外燃料电池业务领域的中坚力量，具备20年资深燃料电池电堆、系统、整车开发及应用经验



其中博士25人

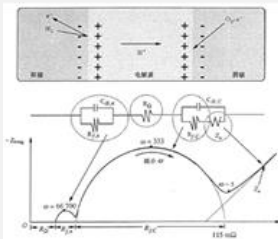


其中研究生及以上学历占 81%



超薄金属双极板

强化传质流道结构
低成本非贵金属涂层

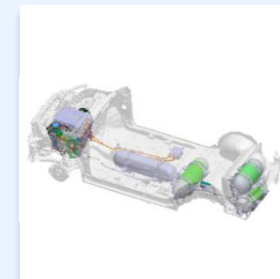


控制策略及软件

长寿命智能控制技术
先进在线诊断技术



燃料电池系统



整车

满足整车应用需求
的柔性化集成能力



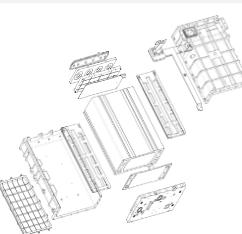
自制高性能膜电极

Pt用量 $\leq 0.27\text{g/kW}$
功率密度 $> 1.3\text{W/cm}^2$



燃料电池电堆

采用正向设计
流程、方法



电堆集成设计

零件集成度高
流体分配均匀



系统集成技术

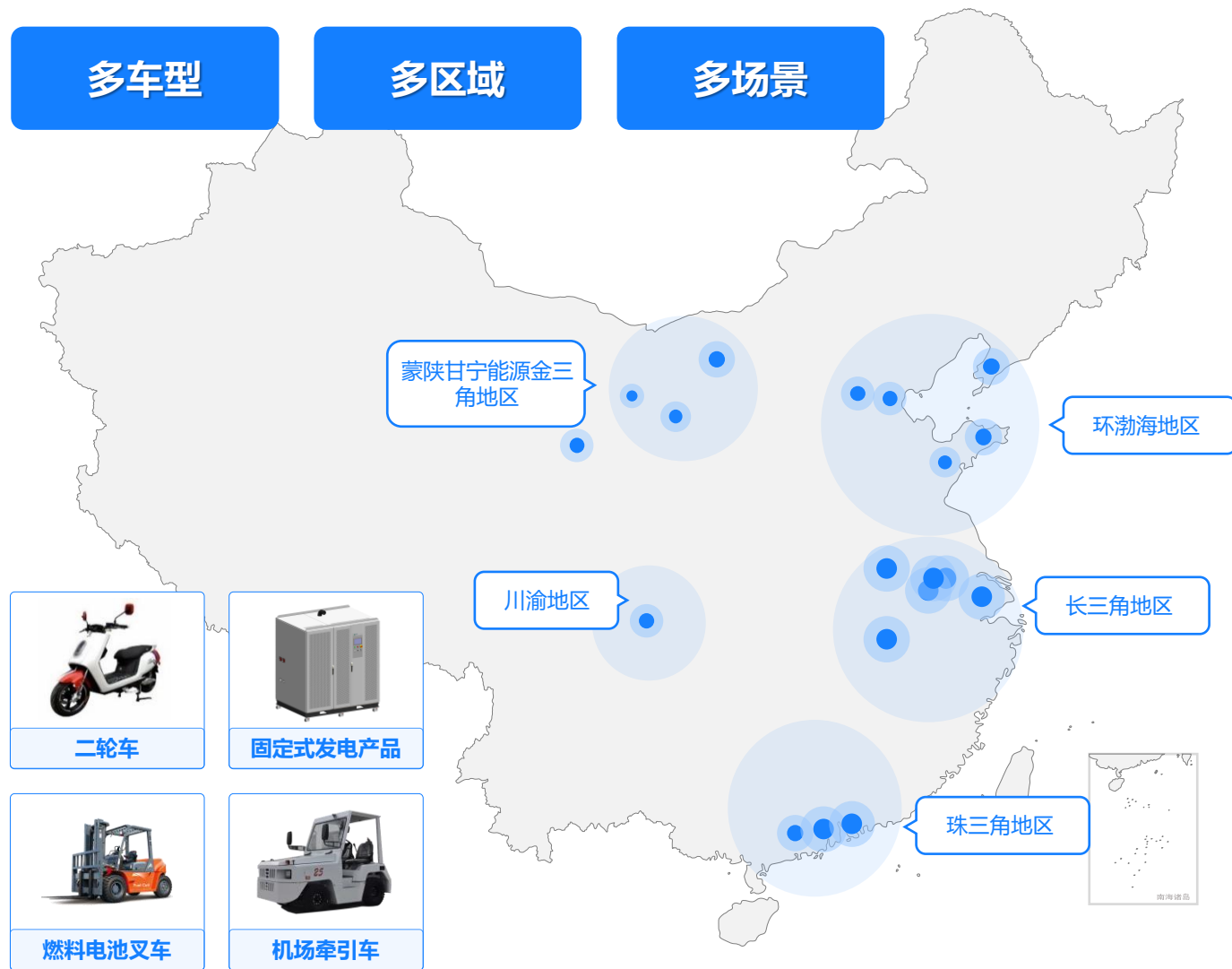
“商乘并举”的系
统一体化集成技术



储氢系统

践行商乘并举策略 不断探索应用场景

- 产品应用覆盖燃料电池二轮车、乘用车、公交客车、团体客车、轻中型物流车、专用车、重载牵引车/自卸车、固定式发电等，实现全国18个城市商业化运营，适应各类严苛环境



 大通燃料电池MPV 高端商务车	 上海申沃 (10.5/12米) 公交客车	 苏州金龙 (11.6米) 团体客车	
 上汽轻卡 (4.5吨) 冷链物流	 金旅 (4.5吨) 冷链物流	 金旅 (4.5吨) 保温物流	
 苏州金龙 (18吨) 城市物流、城郊物流、市政环卫等	 上汽轻卡 (12/18吨) 城市物流、城郊物流、市政环卫等	 上汽轻卡 (12/18吨) 城市物流、城郊物流、市政环卫等	
 上汽红岩 (42/49吨) 港口、企业园区物流、煤矿短倒运输等	 飞驰 (49吨) 港口、企业园区物流、煤矿短倒运输等	 陕汽 (49吨) 港口、企业园区物流、煤矿短倒运输等	 三一 (49吨) 港口、企业园区物流、煤矿短倒运输等

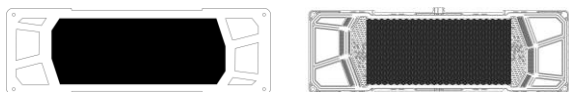
未来展望 - 大国国产化引领全面提质降本

- 作为产业链枢纽，捷氢科技以“大国国产化”为核心理念，积极提升自主研发实力和技术水平，并推动和培育产业链上下游合作伙伴国产化进程，逐步实现核心原材料、关键零部件、电堆、系统、研发和制造装备、测试设备100%国产化；

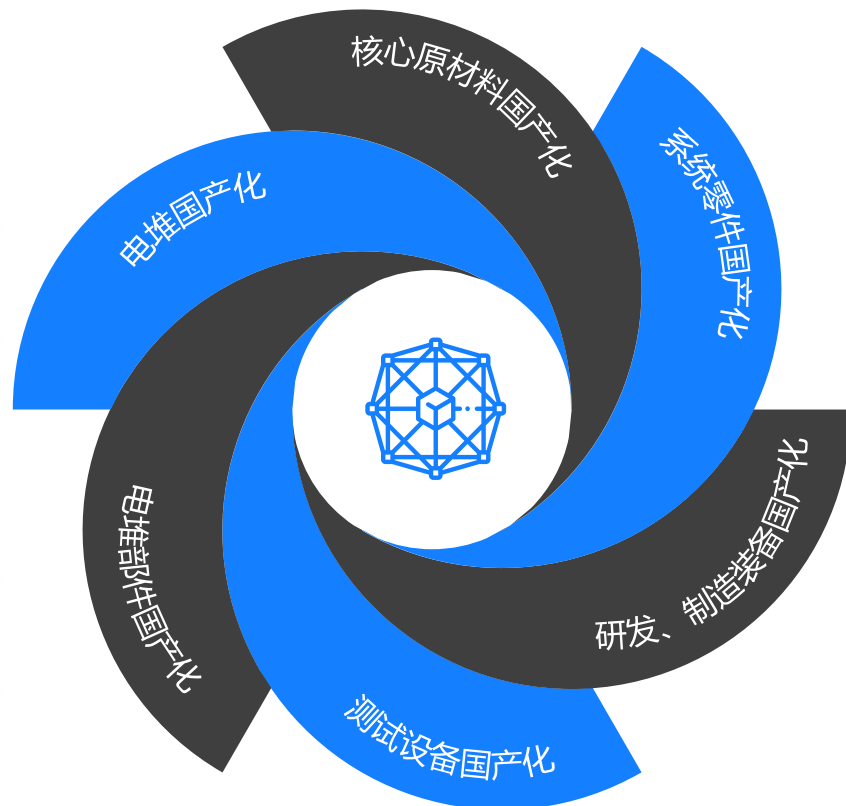
核心原材料国产化



电堆部件国产化



电堆国产化



系统零件国产化



研发、制造装备国产化



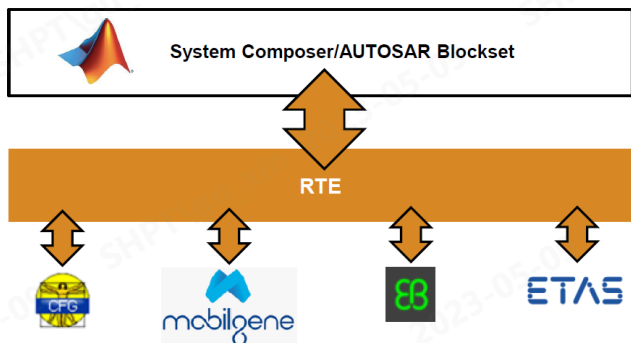
测试设备国产化



未来展望 - 燃料电池系统控制技术

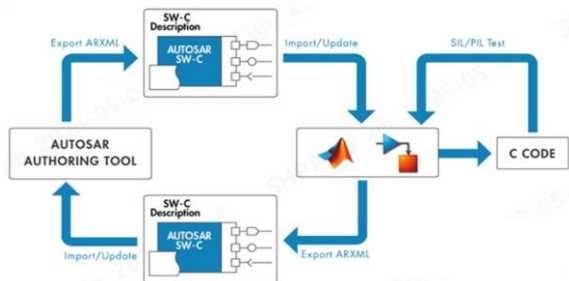
控制器硬件集成化

- ◆ 采用集中式电子电气架构，对燃料电池系统内的控制器进行一体化集成设计
- ◆ 一体化集成设计可以有效提升控制器功率密度和软件执行效率，降低成本



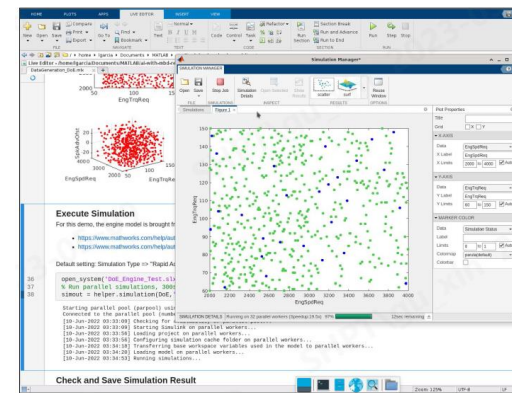
高可靠性的软件设计

- ◆ 基于AUTOSAR架构进行燃料电池系统控制软件开发
- ◆ 满足高功能安全等级要求和ASPICE软件开发流程



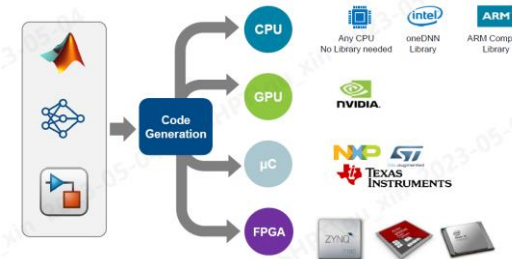
控制软件智能化

- ◆ 基于AI智能算法，根据环境和工况等变化实现操作条件的实时调整 and 高度自适应，使系统控制做到千人千面
- ◆ 基于数据驱动建模进行燃料电池系统高精度诊断



大数据辅助开发

- ◆ 基于数据挖掘，为燃料电池动力系统提供有效设计输入，加速设计迭代
- ◆ 基于数据进行燃料电池控制系统黑盒建模，支持系统仿真与控制算法开发

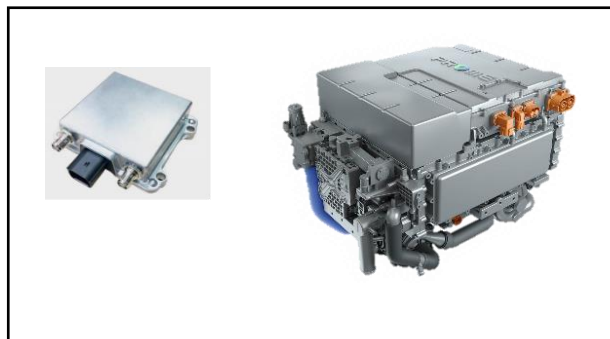


未来展望 - 燃料电池系统控制技术

云端



远程数据传输



燃料电池系统

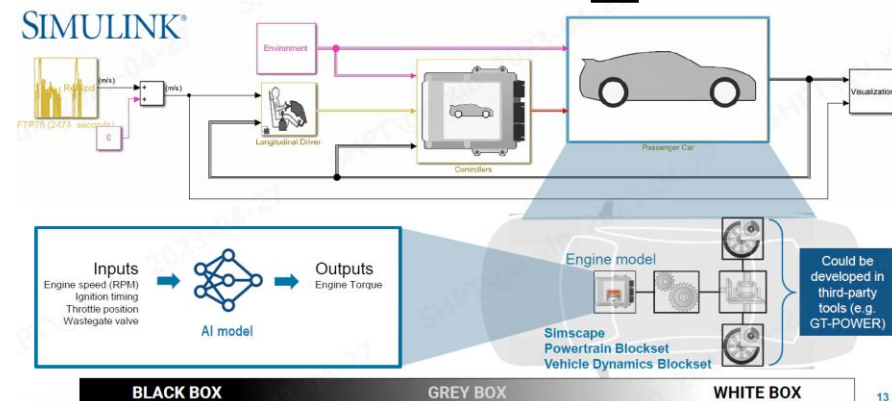


车端

软件集成&刷新

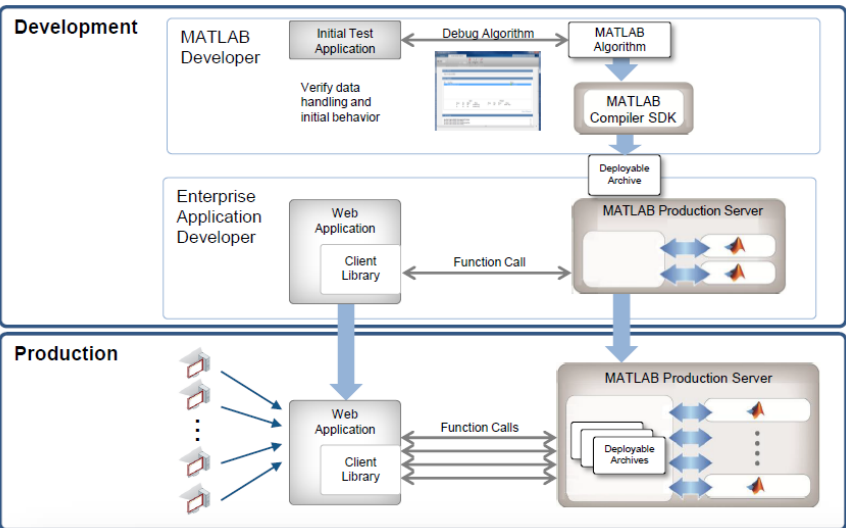


代码生成 (Simulink Embedded Coder)



基于模型的燃料电池控制软件开发

- ◆ 基于MATLAB/Simulink, 进行控制算法的开发
- ◆ 神经网络算法模型可以被Simulink调用, 并生成C代码, 向车载控制器进行部署
- ◆ 支持基于模型的仿真和测试



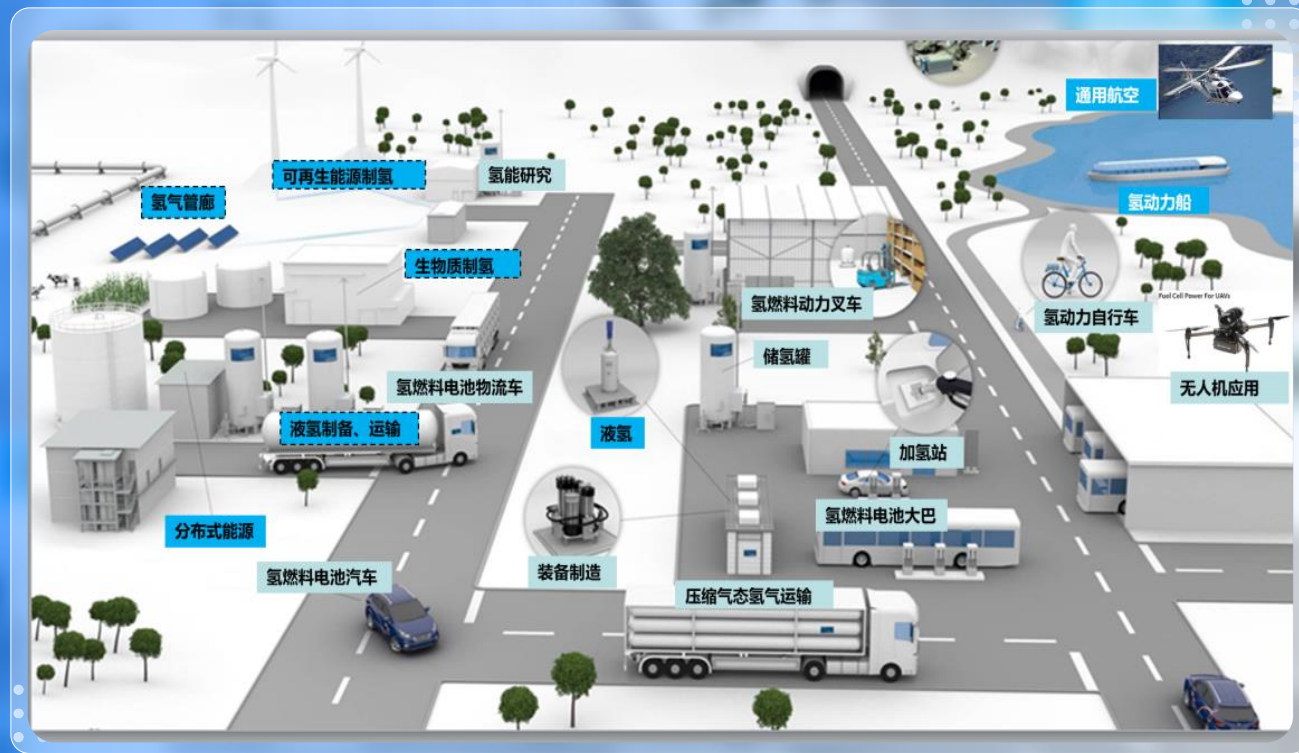
基于云端的燃料电池数据挖掘

- ◆ 在开发环境, 完成燃料电池数据挖掘算法的快速开发
- ◆ 将算法快速部署到生产环境, 进行对大数据的自动化处理

基于大数据, 对实际车辆运行数据进行挖掘, 为车载算法优化提供理论指导与训练数据

以氢能为中介，

实现从可再生能源制氢，到绿色出行、绿色港口、氢能分布式能源.....完整的可再生能源循环发展体系



THANKS

上海捷氢科技股份有限公司

SHANGHAI HYDROGEN PROPULSION TECHNOLOGY CO., LTD.

www.shpt.com

