



上海电气
SHANGHAI ELECTRIC

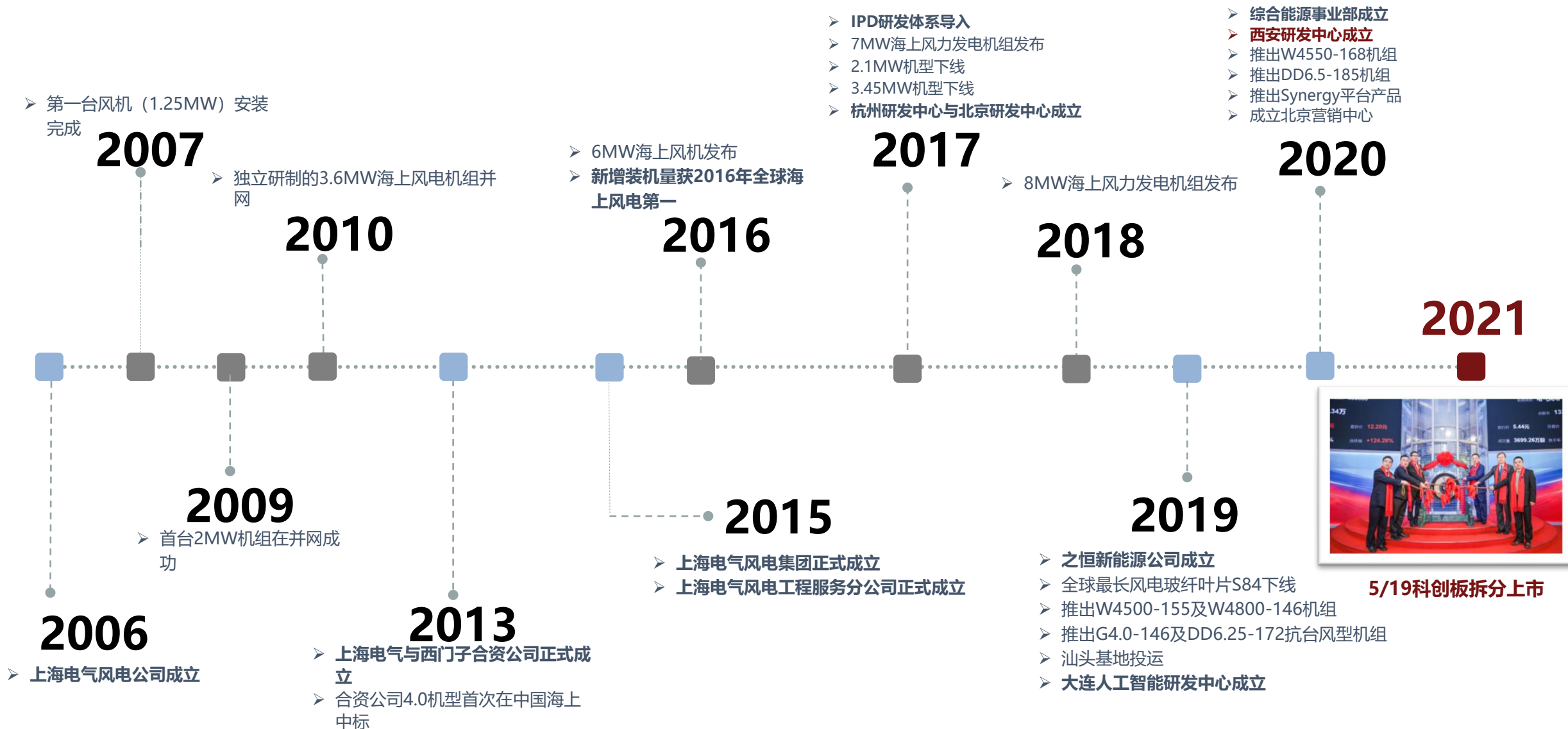
新一代风力发电机控制系统开发

马诚, 上海电气控制系统专家



MATLAB EXPO

上海电气风电集团介绍



5/19科创板拆分上市

电气风电业绩

7个研发中心

海外：丹麦

中国：上海、北京、杭州、大连、汕头、西安

11个制造基地

陆上：7个

海上：4个

7个海陆区域服务中心

7*24 不间断运维

7个销售区域公司 + 3个零部件事业部

陆上：5个 海上：2个

零部件：叶片、驱动链、混塔



2021年风电装机综合排名国内第5*
海上排名国内第1，全球第1*

*数据来源：彭博新能源财经

29.7+ GW



10000+ 台风机

360+ 风场



1846+ 员工

600+ 研发工程师

电气风电的三个转变

装备制造业 → 全生命周期服务商

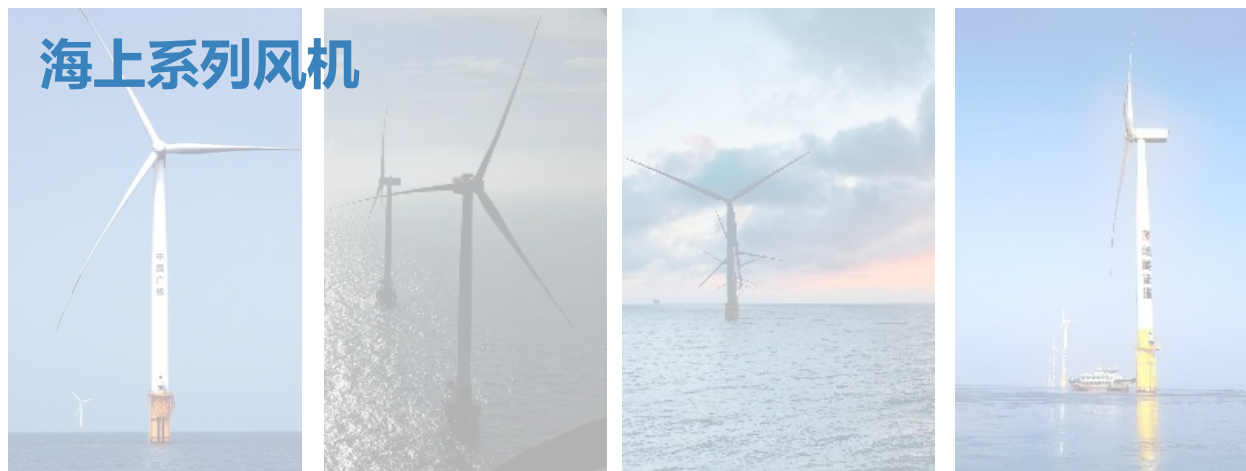
市场跟随 → 行业引领

本土化 → 国际化

注：以上数据截至 2022年6月30日

风电机组产品-覆盖全区域市场

海上系列风机



风电机组功率范围 4.X-13.X MW

风轮范围 146、167、172、185、208、230系列

可覆盖近岸中低风速、离岸中远低风速、东南风资源
优异等区域市场

包括常规性与抗台型风机

陆上系列风机



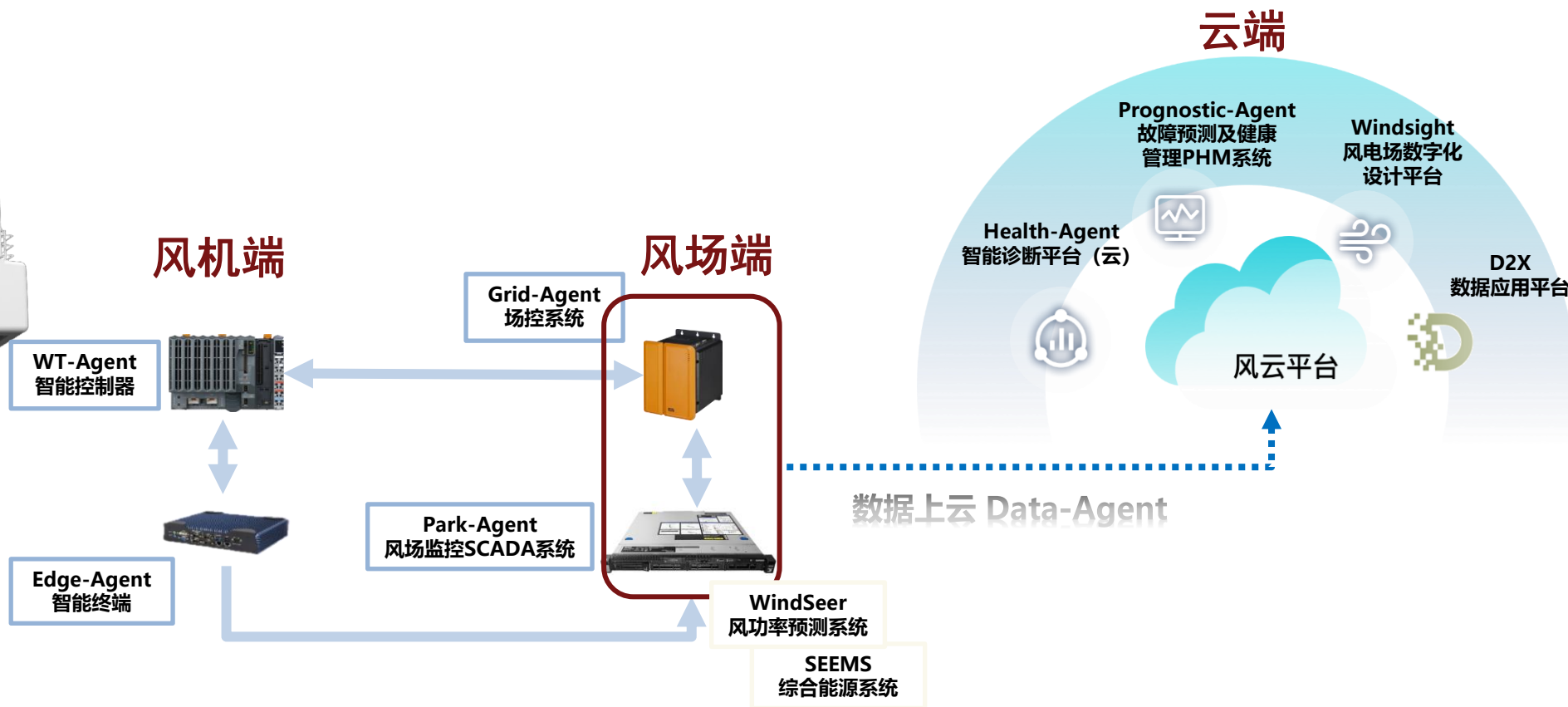
风电机组功率范围 4.X-8.X MW

风轮范围 172、182、202系列

可覆盖低中高速资源，及平原、山地、
高海拔等区域市场



数字化解决方案



风机控制系统研发的主要挑战



开发周期短

主控系统进行技术升级迭代速度越来越短



成本压力大

额定功率和叶轮直径持续加大



高性能和高可靠性

控制系统的各个控制回路耦合愈加严重，非线性因素对性能的影响越来越大

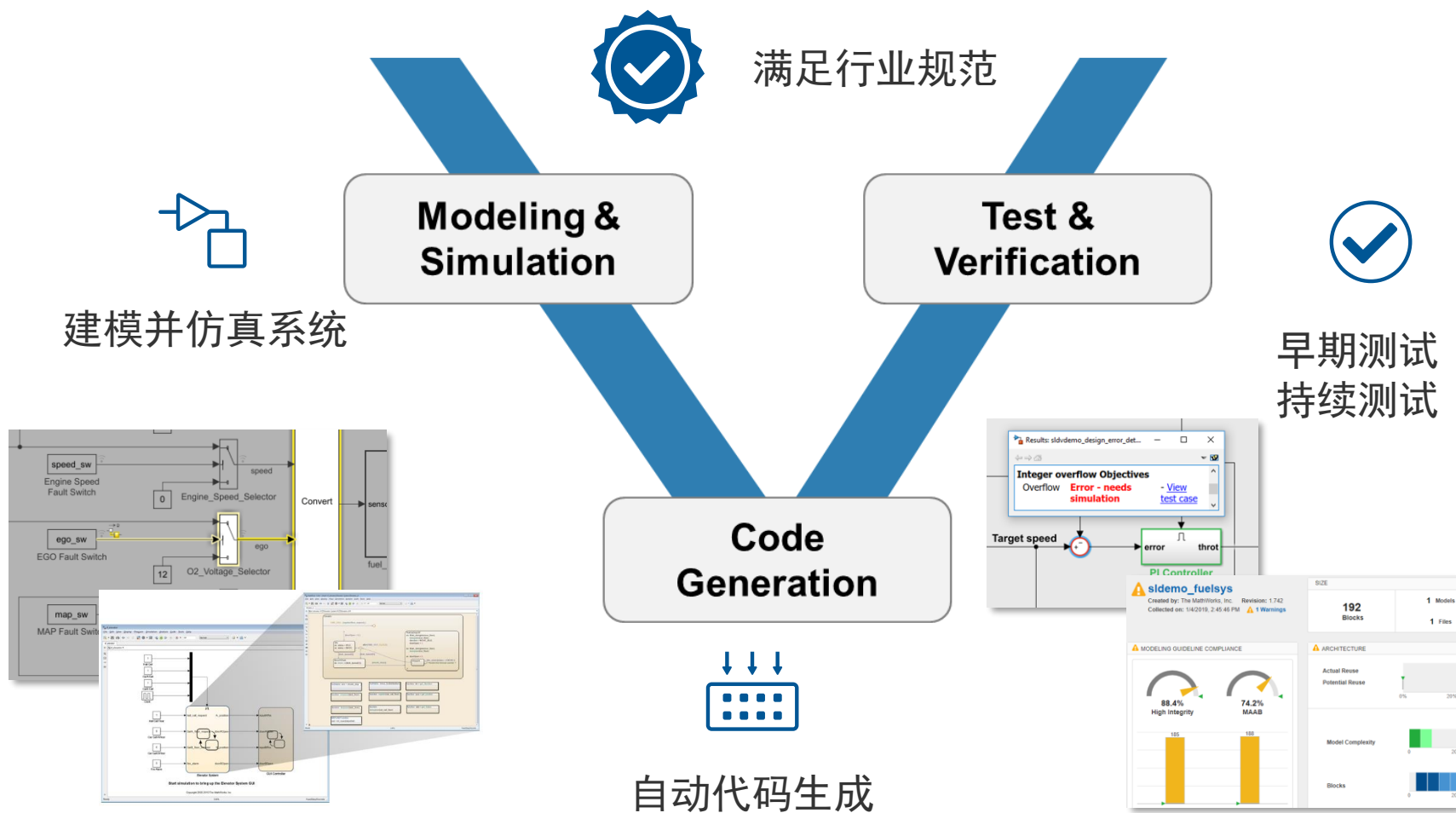


产品认证

越来越多跨行业新技术被融合到传统控制器的开发中

选择基于模型设计的原因

SIMULINK®



LeapX项目中使用MBD优势:

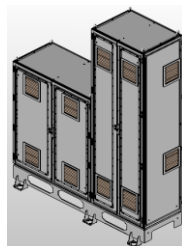
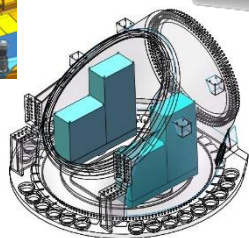
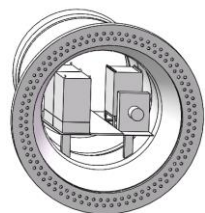
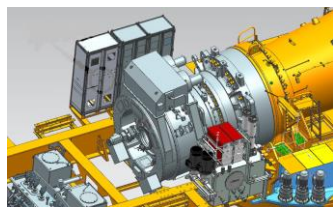
1. 团队的协同开发
2. 硬件平台无关性的通用程序
3. 高效而全面的一体化测试平台 (MIL/PIL/HITL) (Target: PLCs)
4. 图形化设计/早期验证/代码自动生成/文档自动化

新一代基于模型的风力发电机控制器

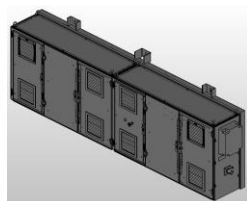
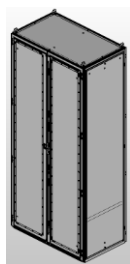
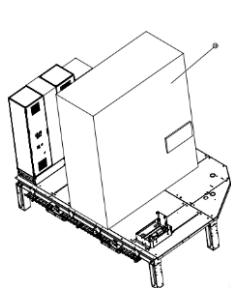


风机电气及控制系统的组成

风机部件上的传感器和执行单元



电气控制柜



电气控制柜及电源、控制、通讯、执行器件



PLC控制器

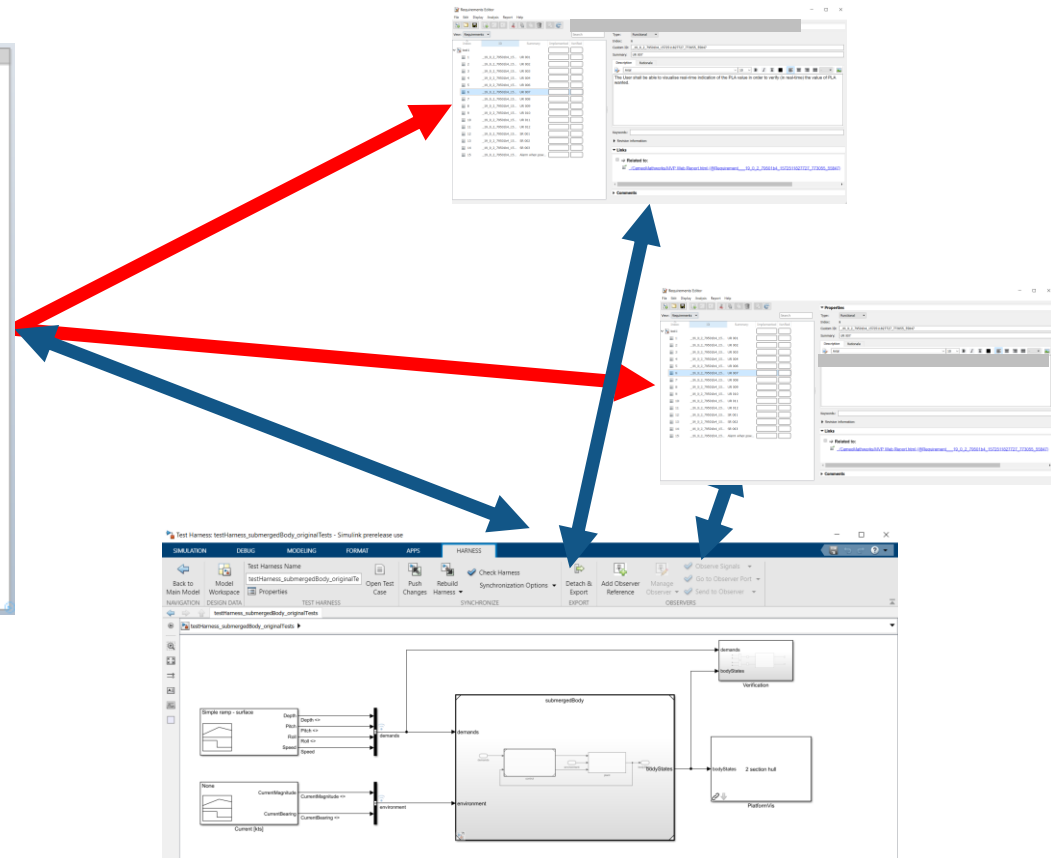
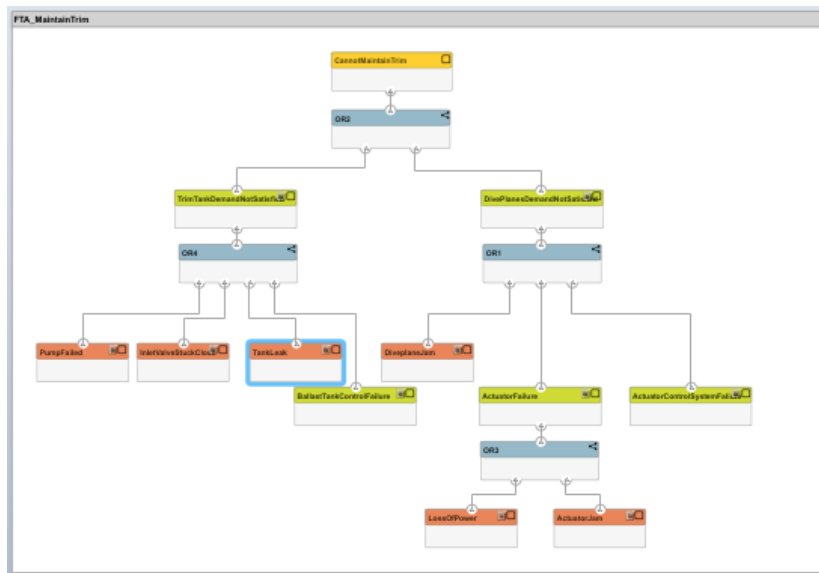


风机控制系统开发

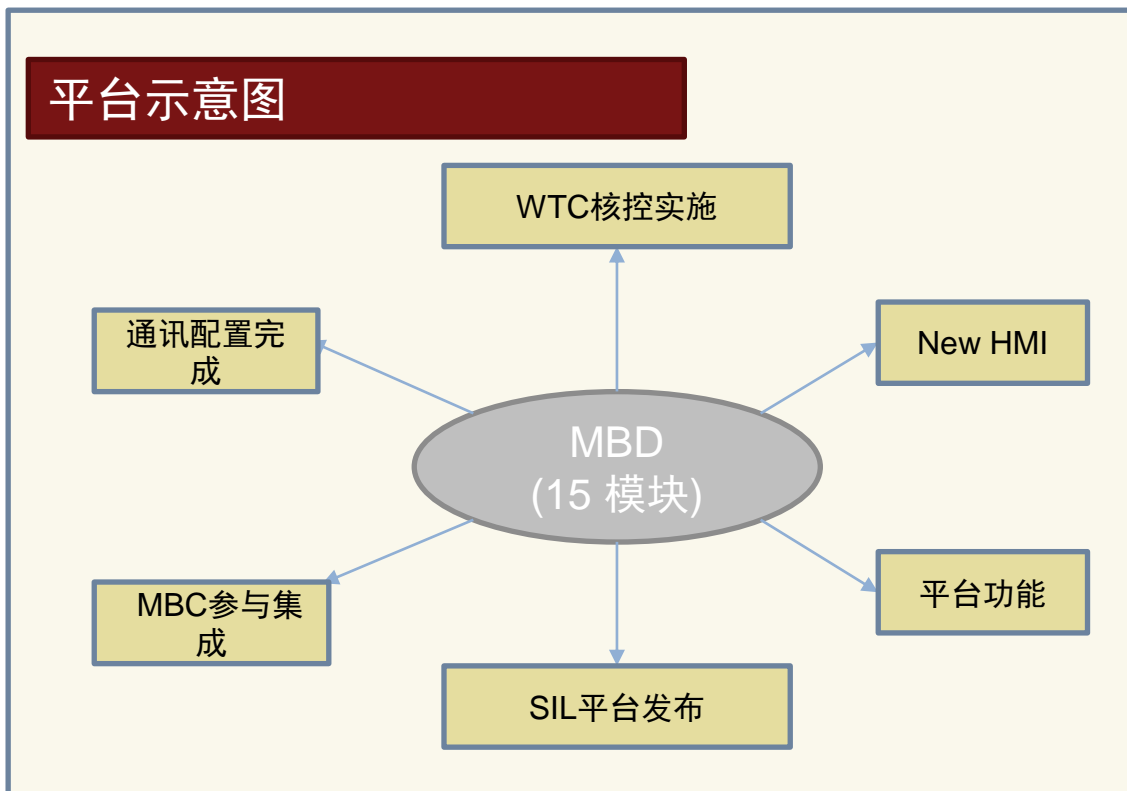
- 从顶层设计开始，模块化分工，设计全新的系统架构的软件和硬件平台
- 实现产品需求、文档、控制模型的可追溯

Process子系统

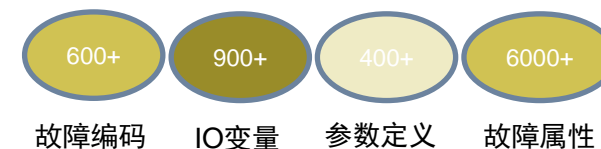
- 01_In
- 02_OpCtrl
- 03_Pitch
- 04_Brk
- 05_Cnv
- 06_Fire
- 07_Yaw
- 08_Gen
- 09_Gbx
- 10_Meteo
- 11_Grid
- 12_Transf
- 13_MVCbt
- 14_Cab
- 15_Mshf
- 16_Tower
- 17_Nac
- 19_DynCtrl



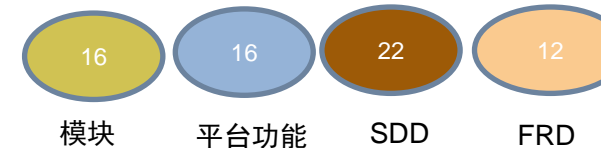
过程控制，掌握开发进度



数据定义



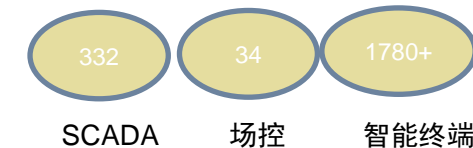
代码开发



测试验证



接口定义



子模块	FRD需求数量	测试用例总数	测试通过总数	失败用例总数
制动	18	46	46	0
发电机	17	6	6	0
主轴	5	0	0	0
消防	19	19	17	2
主流程	40	25	13	6
偏航	28	24	20	4
控制柜	13	5	5	0
电网	11	44	38	6
机舱	2	3	3	0
变流器	30	1	1	0
变桨	20	7	7	0
气象	17	4	4	0
齿轮箱	0	0	0	0
塔架	0	0	0	0
总计	220	184	160	18

基于模型的逻辑设计

风机状态机——发电模式

◆ 发电模式

- AB: 切入发电运行
- BG: 启动到最佳叶尖速比
- GH: 最佳叶尖速比到恒功率过程
- HL: 恒功率/恒转矩控制

$$T_e = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_P}{\lambda_{opt}^3} \omega^2 - T_{Los}$$

最佳转速转矩曲线

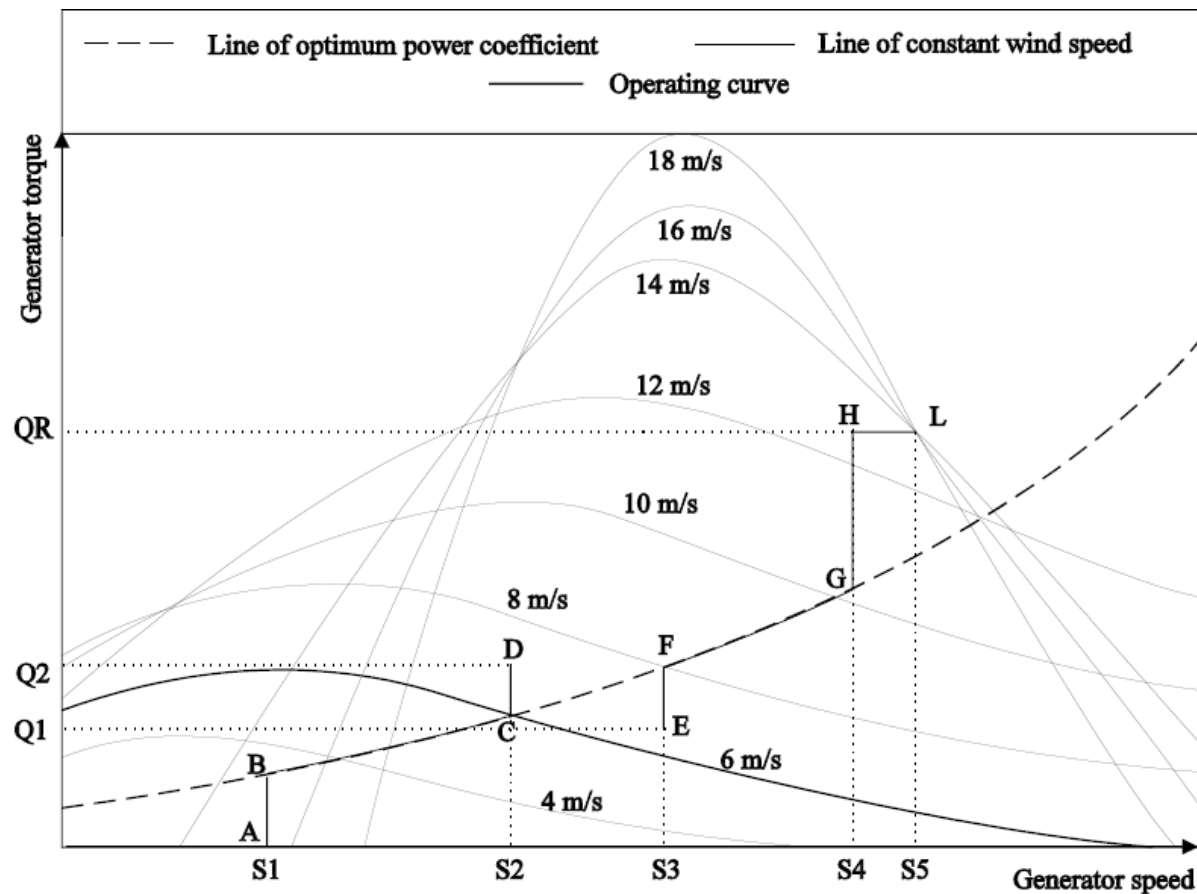
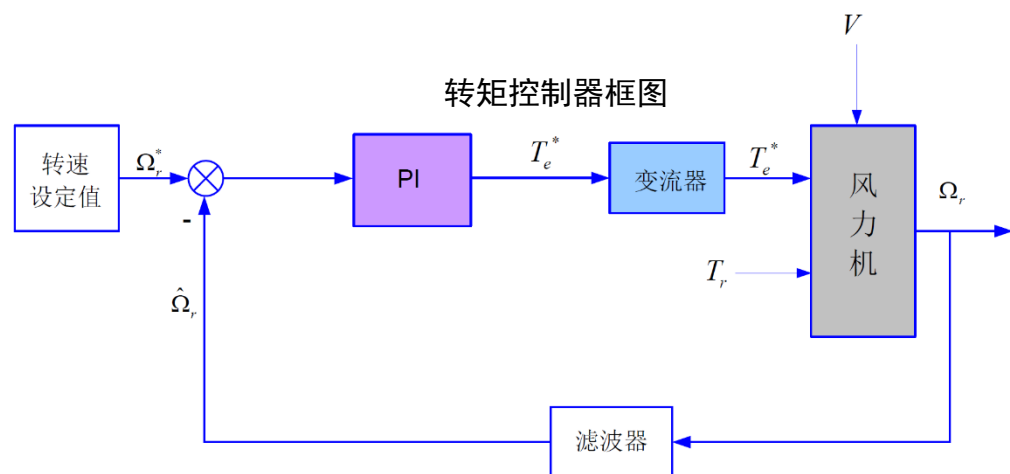


Figure 5.6: Variable speed pitch regulated operating curve

基于模型的逻辑设计

最佳程序实现示例-发电机降容功能

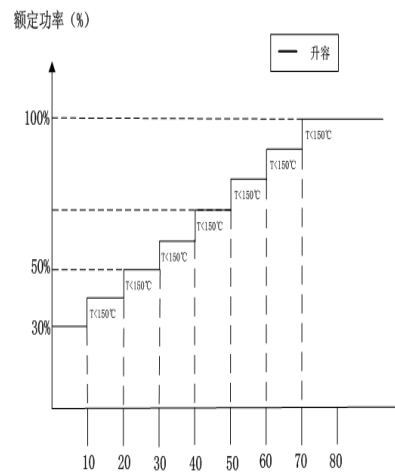
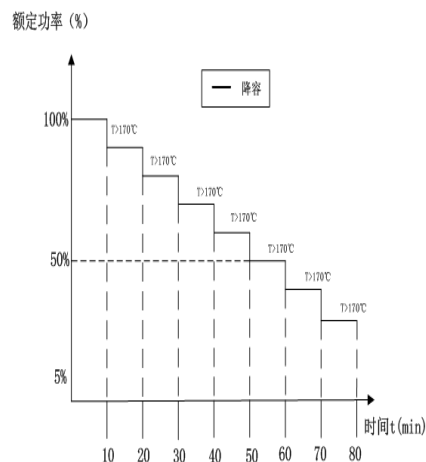
➤ 发电机高温穿越降容运行需求:

A. 启动“发电机高温穿越降容运行”:

发电机各测点绕组温度最高值（连续60s平均）>降容运行启动设定值（170°C），发电机降容5%（前一次降容执行后延时10min判定温度）。

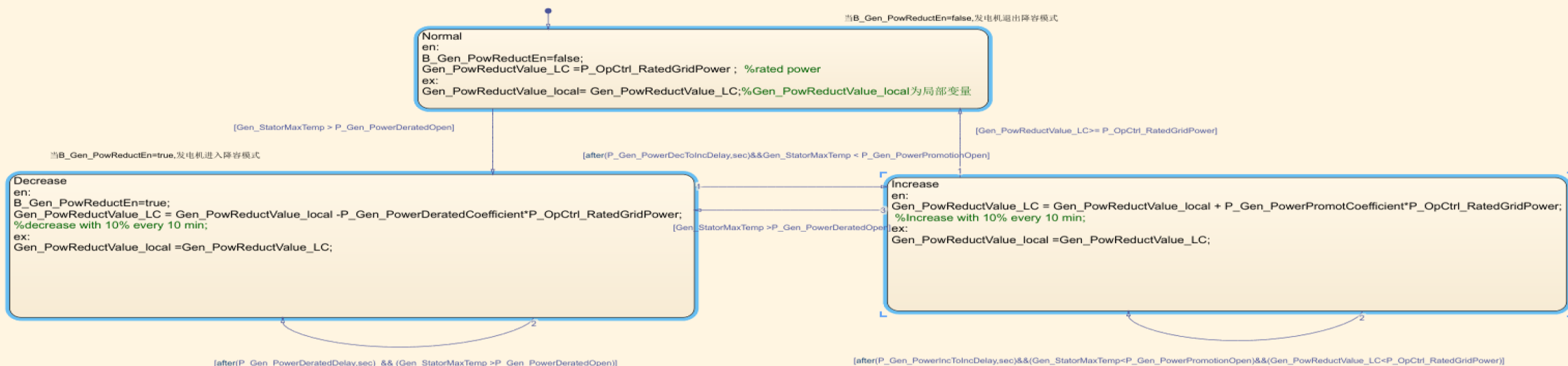
B. 启动“发电机高温穿越降容运行后的升容”:

发电机各测点绕组温度最高值（连续60s平均）<降容后升容启动设定值（150°C），发电机升容5%（前一次降容执行后延时1h判定或前一次升容执行后延时10min判定，最高升容至100%额定）。



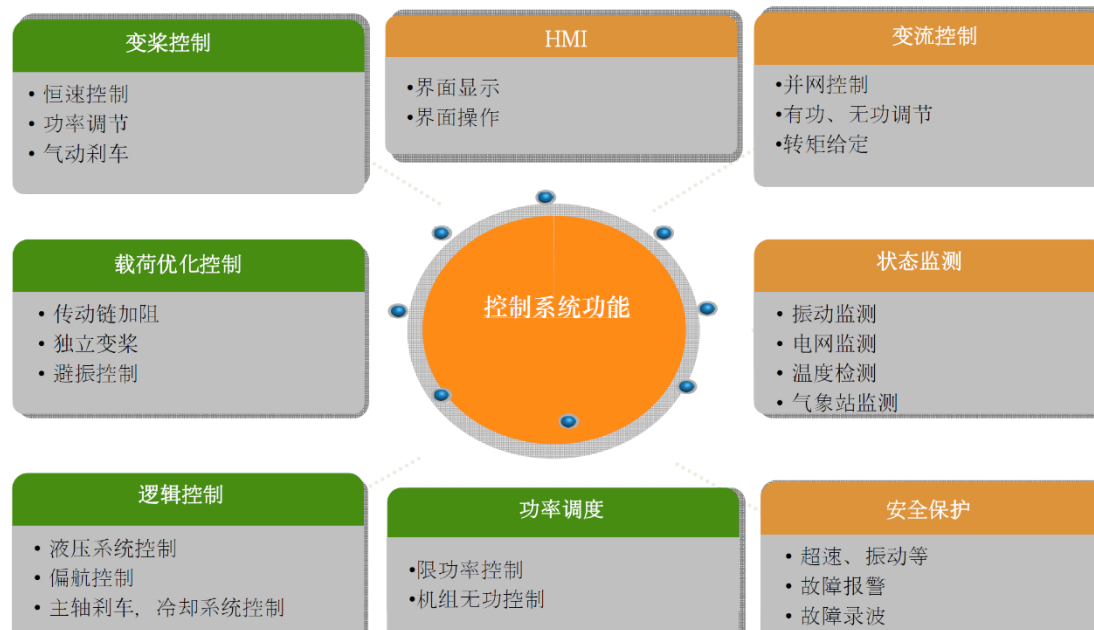
➤ 需求实现: Stateflow

- 满足了设计需求
- 维护性更高
- 代码可读性更强

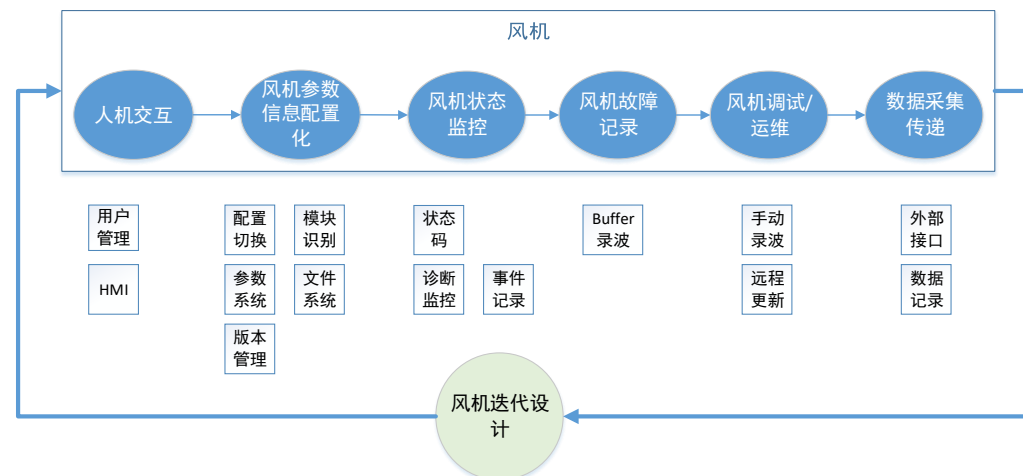


控制系统软件架构（基于PLC）

控制系统功能

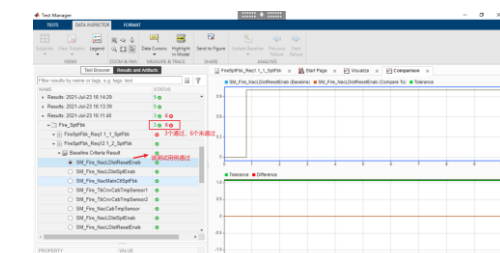
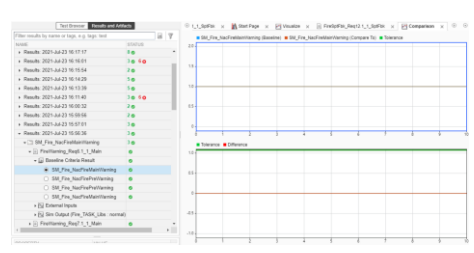
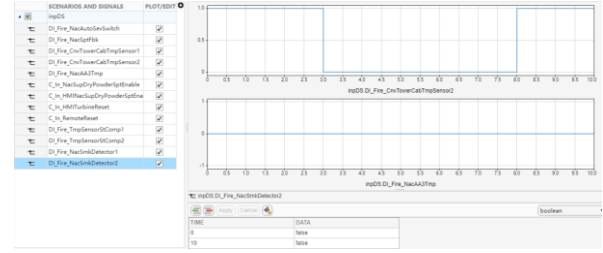
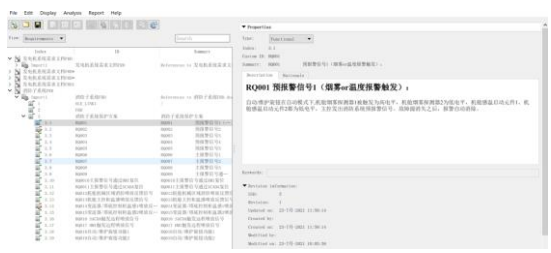


PLC平台功能



体系化的仿真测试系统

Simulink Requirements
Simulink Test
Simulink Coverage
Simulink Design Verifier



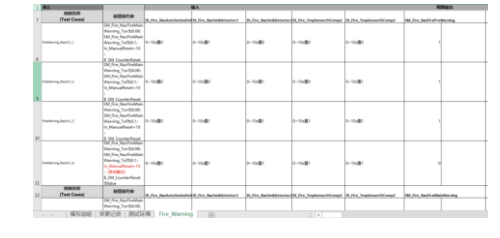
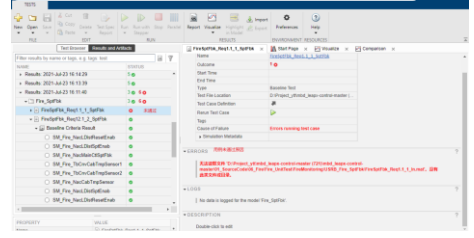
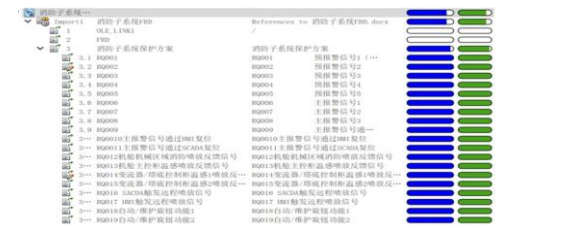
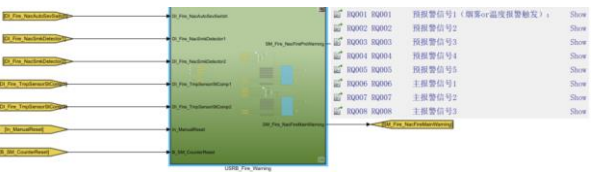
- Results: 2021-Jul-23 16:00:32
- Results: 2021-Jul-23 15:59:56
- Results: 2021-Jul-23 15:57:01
- Results: 2021-Jul-23 15:56:36
- Results: 2021-Jul-23 15:55:11
- Results: 2021-Jul-23 15:23:50
- Results: 2021-Jul-23 15:18:26
- Results: 2021-Jul-23 15:15:00
- Results: 2021-Jul-23 14:43:20
- Results: 2021-Jul-23 14:41:28
- Results: 2021-Jul-23 14:39:41
- Results: 2021-Jul-23 14:32:34
- Results: 2021-Jul-23 14:28:10
- Results: 2021-Jul-23 14:02:54
- Results: 2021-Jul-23 17:02:57
- Results: 2021-Jul-23 16:54:18
- Results: 2021-Jul-23 16:50:01
- Results: 2021-Jul-23 16:51:46

关联FRD

建立测试用例

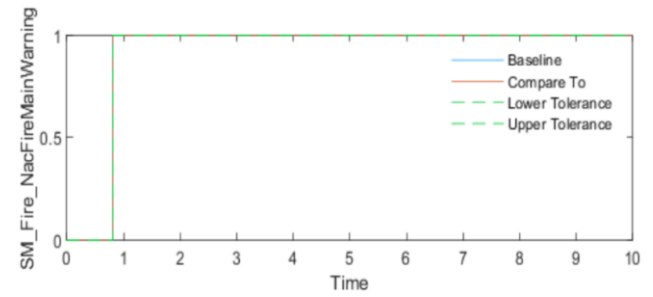
期望输出

测试报告



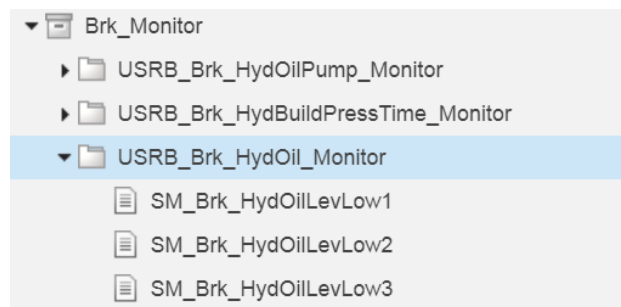
前提和约束 (状态码属性)	SM_Fire_NacFireMainWarning_Ton为0.08; ToI为0.1; In_ManualReset<10;B_SM_CounterReset为False;	SM_Fire_NacFireMainWarning_Ton为0.08; ToI为0.1; In_ManualReset<10;B_SM_CounterReset为False;	SM_Fire_NacFireMainWarning_Ton为0.08; ToI为0.1; In_ManualReset<10;B_SM_CounterReset为False;	SM_Fire_NacFireMainWarning_Ton为0.08; ToI为0.1; In_ManualReset>10;B_SM_CounterReset为False;
输入	用例1	用例2	用例3	用例4
DI_Fire_NacAutoSevSwitch	0~10s置0	0~10s置0	0~10s置0	0~10s置0
DI_Fire_NacSmkDetector1	0~10s置1	0~10s置0	0~10s置1	0~10s置0
DI_Fire_NacSmkDetector2	0~10s置0	0~10s置1	0~10s置1	0~10s置1
DI_Fire_TmpSensorStComp1	0~10s置0	0~10s置0	0~10s置1	0~10s置1
DI_Fire_TmpSensorStComp1	0~10s置0	0~10s置1	0~10s置1	0~10s置1
期望输出(SM_Fire_NacFirePreWarning)	1	1	1	1
期望输出(SM_Fire_NacFireMainWarning)	0	前0~0.8s为0, 后0.8~10s为1	前0~0.8s为0, 后0.8~10s为1	1

用例1实际输出



单元测试过程

- ◆ 在需要测试的Subsystem上建立Test Harness
- ◆ Test Manager管理测试用例，测试用例主要分为三层，TASK——USRB——TestCase



TASK层级: Brk_Monitor

USRB层级:

USRB_Brk_HydOil_Monitor

TestCase层级:

SM_Brk_HydOilLevLow1

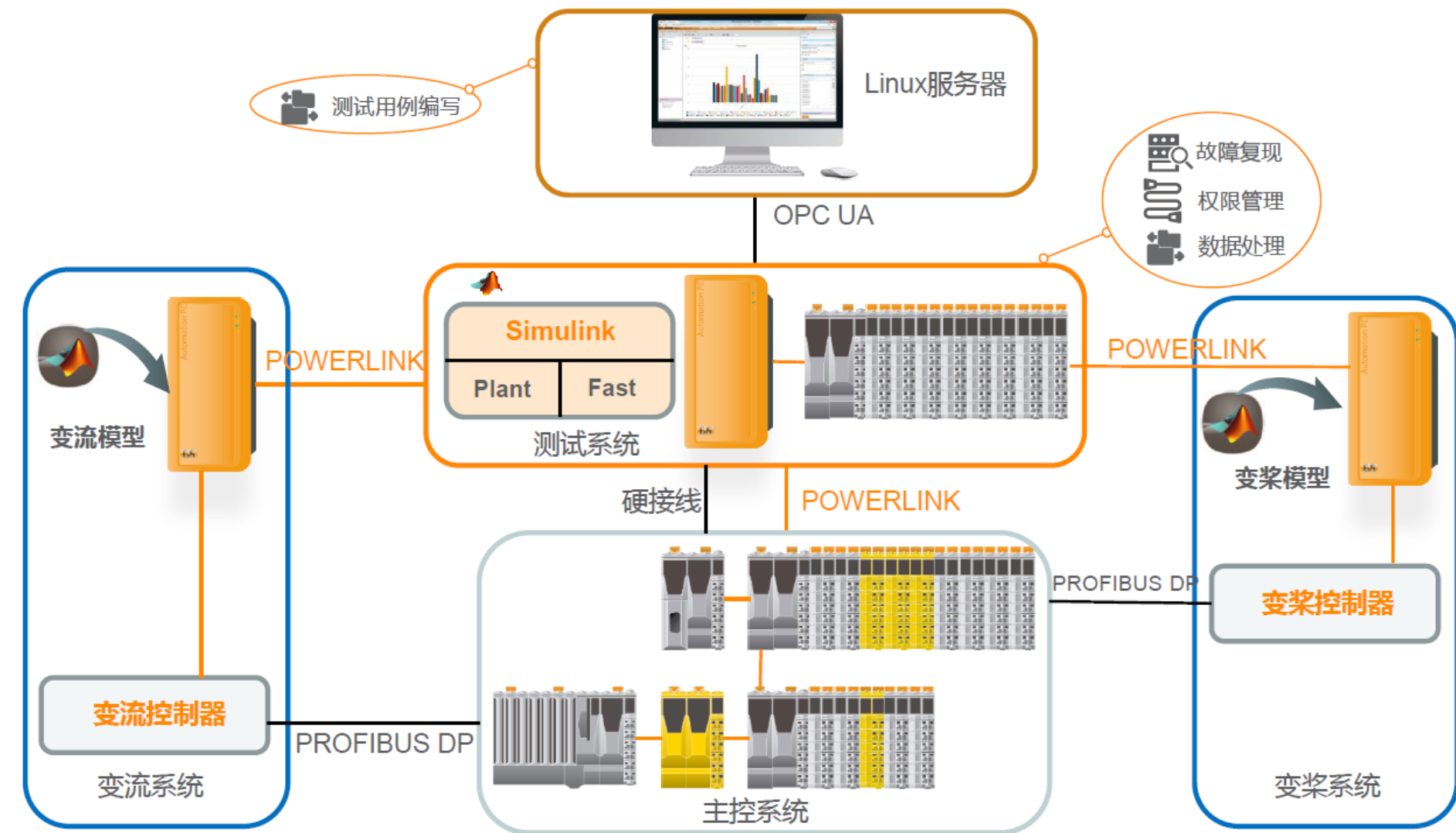
- ◆ 以mat文件的形式编写Input与Baseline

本地磁盘 (D:) > work > LeapX > UnitTest > 01-Brk_Monitor > 01-USRB_Brk_HydOilPump_Monitor

名称	修改日期	类型	大小
SM_Brk_HydOilPumpHtPrtErr1.mat	2021/4/14 19:13	MAT 文件	3 KB
SM_Brk_HydOilPumpHtPrtErr1_Base.mat	2021/4/14 19:21	MAT 文件	61 KB
SM_Brk_HydOilPumpHtPrtErr2.mat	2021/4/15 9:42	MAT 文件	3 KB
SM_Brk_HydOilPumpHtPrtErr2_Base.mat	2021/4/15 10:31	MAT 文件	61 KB

Index	ID	Summary	Implemented	Verified
制动系统需求文档				
Import1	Requirement	References to Requirement.docx	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1	制动子系统保护方案	制动子系统保护方案	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.1	RQ001	RQ001 制动子系统应该实时...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1.2	RQ002	RQ002 制动子系统应该实时...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1.3	RQ003	RQ003 制动子系统应该实时...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.4	RQ004	RQ004 制动子系统应该实时...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.5	RQ005	RQ005 制动子系统应该实时...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
1.6	RQ006	RQ006 制动子系统应该实时...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
1.7	RQ007	RQ007 制动子系统应该实时...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
2	制动子系统液压泵控制方案	制动子系统液压泵控制方案	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.1	RQ008	RQ008 制动子系统允许液压...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.2	RQ009	RQ009 制动子系统应该根据...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.3	RQ010	RQ010 制动子系统应该能够...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	制动子系统高速轴制动控制方案	制动子系统高速轴制动控制方案	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.1	RQ011	RQ011 制动子系统允许高速...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.2	RQ012	RQ012 制动子系统下发高速...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.3	RQ013	RQ013 制动子系统应该能够...	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	制动子系统液压油泵加热带控制方案	制动子系统液压油泵加热带控制方案	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4.1	RQ014	RQ014 制动子系统应该根据...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
4.2	RQ015	RQ015 制动子系统应该能够...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

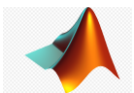
连接PLC的测试系统



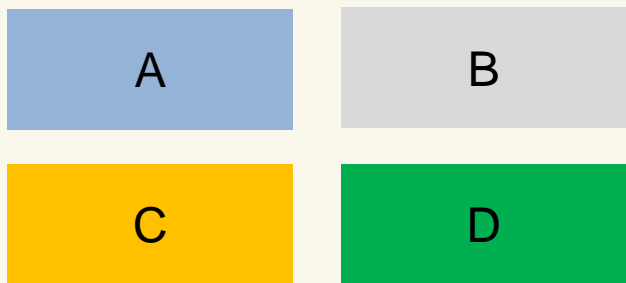
连接PLC的测试系统

- 仿真模型

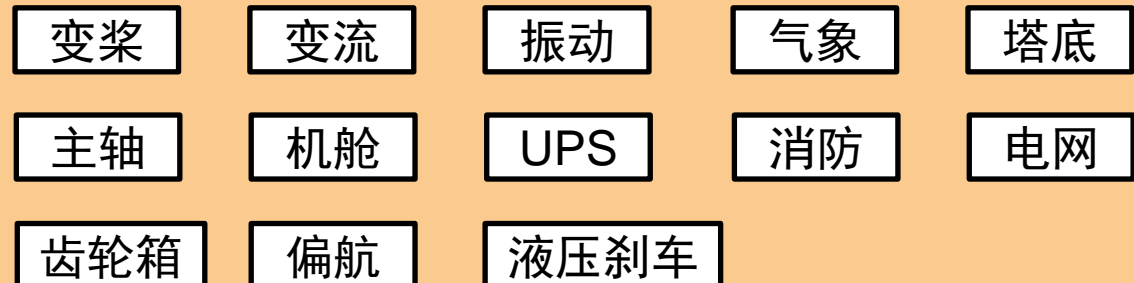
非实时核
-Matlab-



载荷模型



PLANT模型



S-FUNCTION

接口

输出接口

输入接口

实时核
-AS-

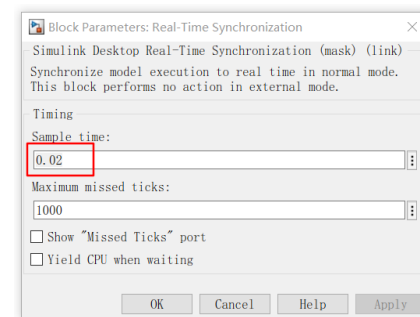
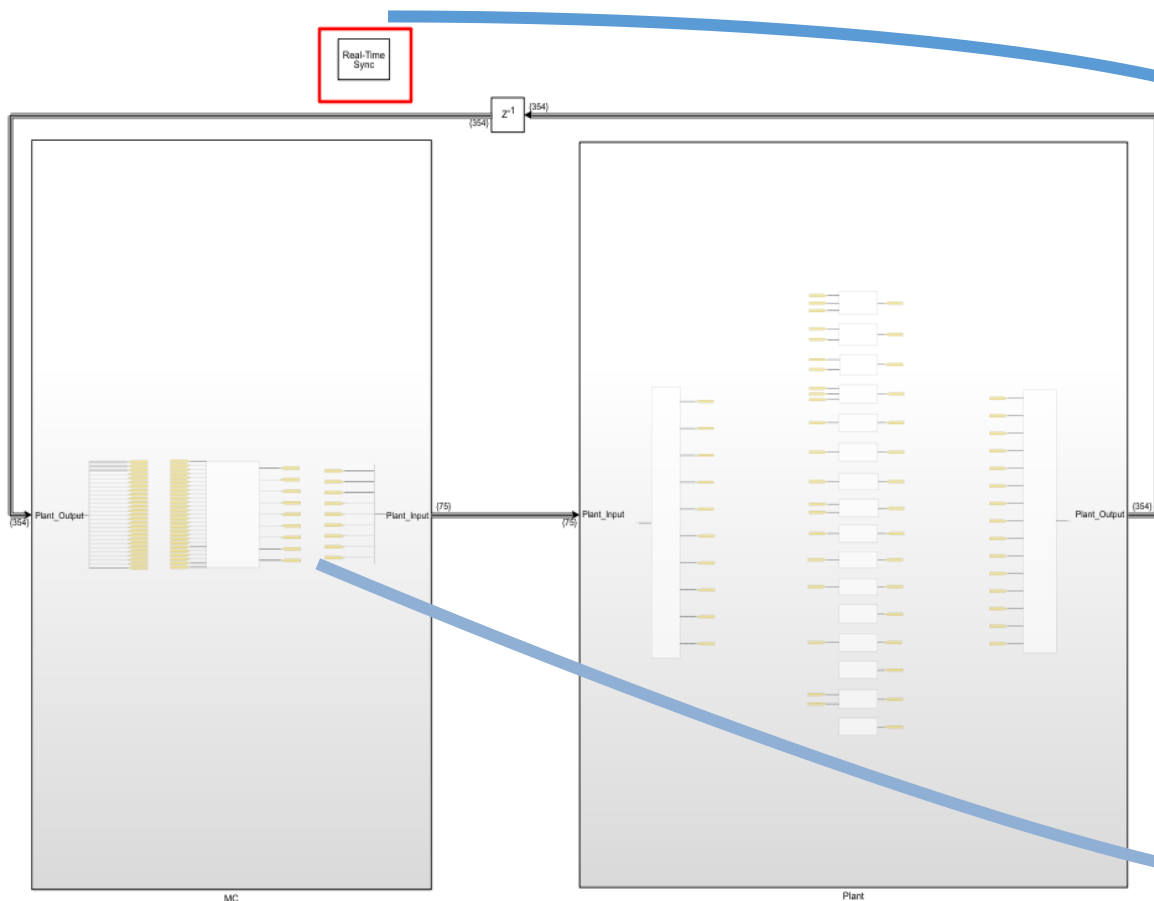


测试PLC

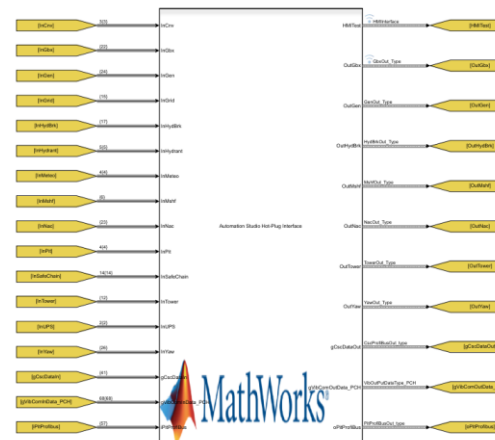
仿真模型

连接PLC的测试系统

- 仿真模型实时运行



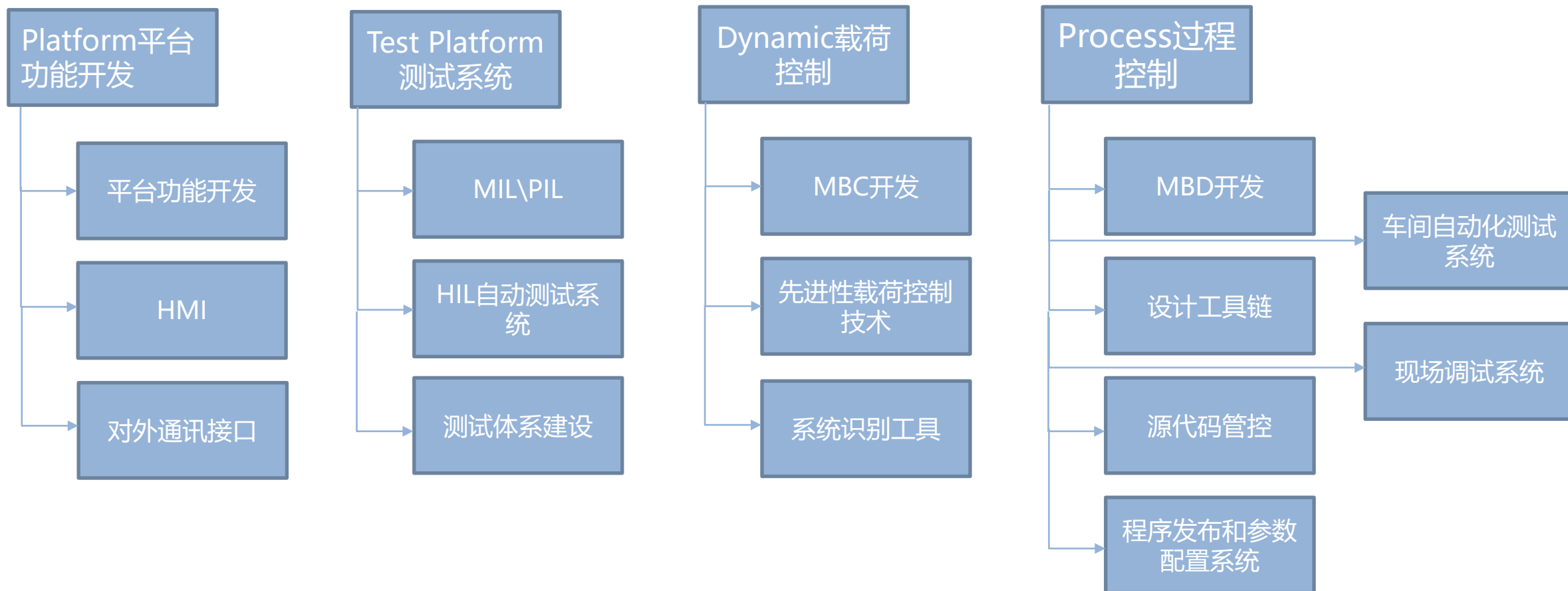
Real-Time Sync
同步器



S-FUNCTION

后续项目的展望和功能扩展

- 下一代主控系统架构设计



模型化开发的注意事项和经验总结

- 嵌入式系统代码生成的定制化
- 静态代码故障的检测能力需要提高
- 集成与编译的效率要持续提升
- 代码版本管理与审核流程能够集成处理
- 现场实时在线调试PLC代码与模型交互的工具化



MATLAB EXPO

Thank you



© 2023 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.