



电力系统保护与控制数字孪生技术探索

王伟

许昌开普检测研究院股份有限公司

2023年5月6日

- ◆ 当前，数字经济已成为全球发展的热点，世界各国分别提出数字经济发展战略。我国十四五规划中明确提出要坚定不移地建设数字中国，推进产业基础高级化、产业链现代化。
- ◆ 国资委大力推动国有企业数字化转型，组织实施国有企业数字化转型专项行动计划，以数据要素为核心，运用5G、云计算、区块链、人工智能、数字孪生、北斗通信等新一代信息技术，构建集团级数字技术赋能平台，促进企业提质增效、优化资源配置。**国有企业数字化转型、数字孪生技术应用进入快车道。**



《国家电网公司新型电力系统数字技术支撑体系白皮书》

《南方电网公司数字电网白皮书》

《2022电力行业数字孪生技术应用白皮书》

政府部门	文件名称	相关要求
国务院	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》	完善城市信息模型平台和运行管理服务平台，构建城市数据资源体系，推进城市数据大脑建设。探索建设 数字孪生 城市。
国家发展改革委、中央网信办	《关于推进“上云用数赋智”行动，配乐新经济发展实施方案》	将 数字孪生 与大数据、人工智能、云计算、5G、物联网、区块链列为共同推进发展的新一代数字技术
工业和信息化部	《“十四五”信息化和工业化深度融合发展规划》	围绕机械、汽车、航空、航天、船舶、兵器、电子、电力等重点装备领域，建设数字化车间和智能工厂，构建面向装备全生命周期的 数字孪生 系统。
工业和信息化部	《“十四五”智能制造发展规划》	推动 数字孪生 、人工智能等新技术创新应用，研制一批国际先进的新型智能制造装备。推动 数字孪生 、数据字典、人机协作、智慧供应链、系统可靠性、信息安全与功能安全一体化等基础共性和关键技术标准制修订，满足技术演进和产业发展需求，加快开展行业应用标准研制。
工业和信息化部	《“十四五”工业绿色发展规划》	推动数字化智能化绿色化融合发展。深化产品研发设计、生产制造、应用服役、回收利用等环节的数字化应用，加快人工智能、物联网、云计算、 数字孪生 、区块链等信息技术在绿色制造领域的应用，提高绿色转型发展效率和效益。
工业和信息化部、科技部、自然资源部	《“十四五”原材料工业发展规划》	提高生产智能水平。构建面向主要生产场景、工艺流程、关键核心设备的 数字孪生 模型。

★ 数字化是未来社会发展及电网发展的方向，继电保护与控制数字孪生技术是对继电保护与控制的深度数字化，能够为学习保护、研究保护、管理保护提供关键技术手段支撑

目录

Contents

1

数字孪生

2

保护与控制数字孪生研究现状

3

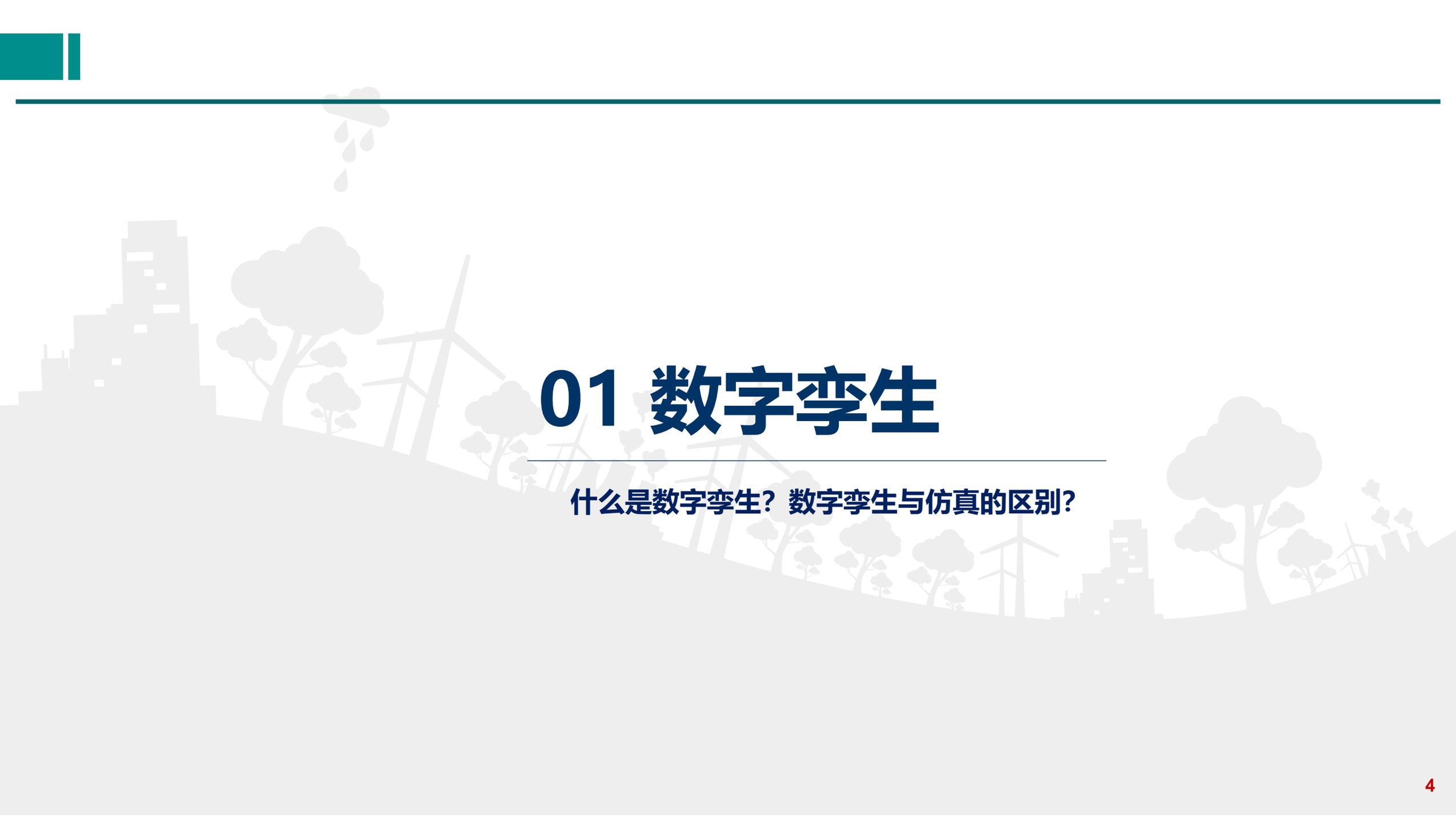
保护与控制数字孪生构建关键技术

4

实例分析

5

应用展望

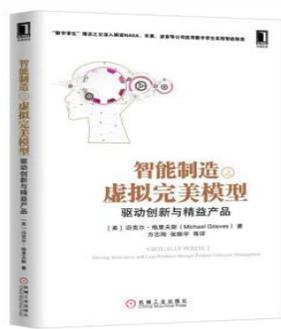


01 数字孪生

什么是数字孪生？数字孪生与仿真的区别？

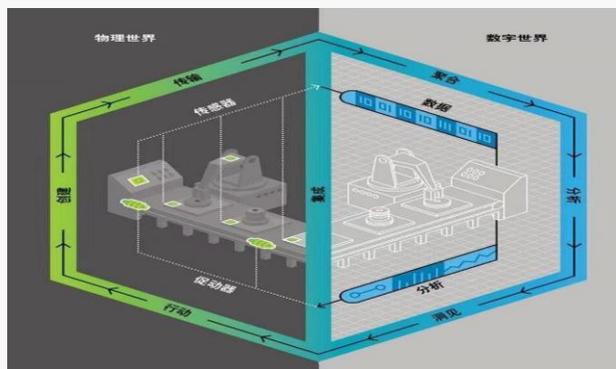
1.1 数字孪生的概念及模型

- 2002年，密歇根大学Michael Grieves教授在产品全生命周期管理课程上提出**数字化概念模型**，即“与物理模型等价的虚拟数字化表达”
- 2012年，NASA（美国国家航空航天局）给出了**数字孪生的定义**
- 2018年，北京航空航天大学陶飞团队在数字孪生车间研究过程中，提出了**数字孪生五维模型**

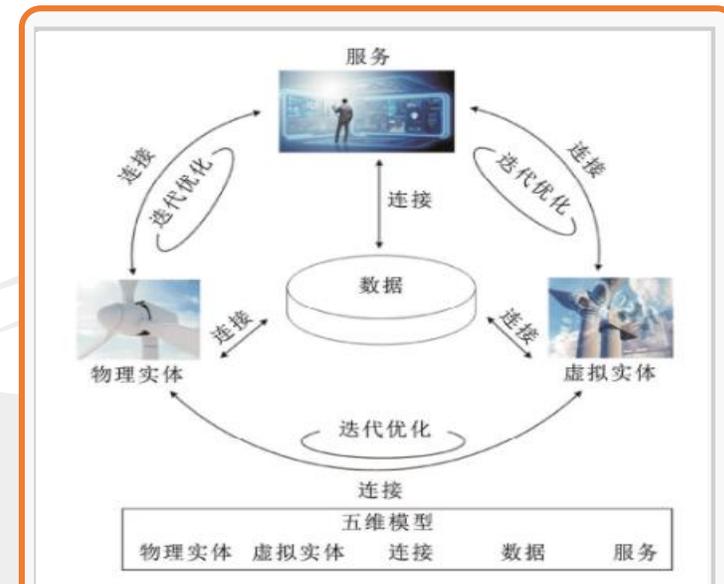


Michael Grieves教授及其著作

- **三维模型**：物理实体、虚拟实体及二者间的连接



数字孪生是：充分利用物理模型、传感器更新、运行历史等数据，集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，在虚拟空间中完成映射，从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程



数字孪生五维模型

1.2 数字孪生的主要特征

互动性：指数字虚拟对象间及其与物理实体对象之间的实时动态互动

★ 交互的实时性和频率取决于物理对象的特点和应用的需求

社会性：数字孪生体能够自主演化和升级，并反过来指导物理实体对象的操作与运行



演绎性：指在虚拟空间中对物理实体对象进行反演、前推和动态预测

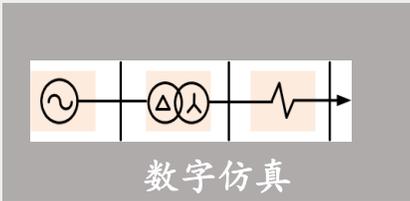
共享性：数字孪生体之间通过统一标准化实现数据共享状态

1. 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概念,特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-499.
2. 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2029.

1.3 数字孪生与仿真的对比

■ 仿真

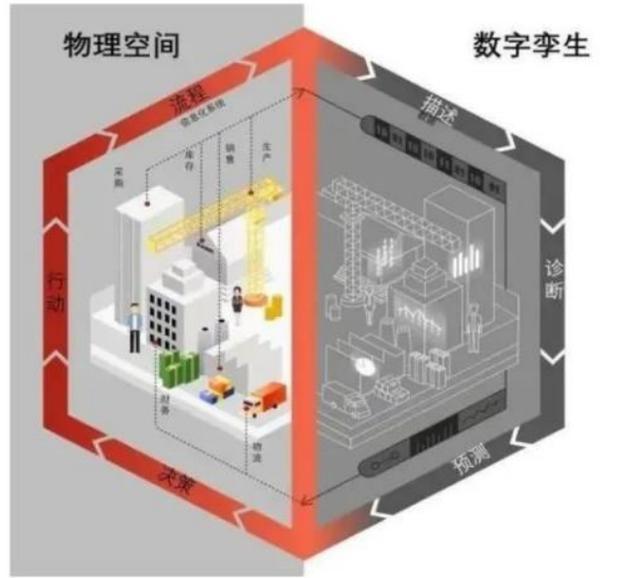
分物理仿真和数字仿真方式，可实时/离线、闭环/开环等方式运行。



- 模型具有普适性，反映物理对象的内在规律和运行机理
- 模型多离线运行，离线更新
- 物理对象与模型之间的数据多为单向流动

■ 数字孪生

通过仿真技术、数据感知、混合建模、虚拟现实等技术构建物理实体的精确仿真或全数字化表达，具有实时、闭环、保真等特点。



- 模型高保真，更偏向物理对象的个性差异
- 模型实时运行，自动更新
- 物理实体与数字孪生体之间的数据为双向互动

1.4 数字孪生的应用现状

应用层级	应用领域	孪生对象	机构/平台	应用效果
装备/部件级	航空航天	SpaceX猎鹰九号	3DEXPERIENCE	基于孪生模型开展了大量静力、动力、强度、疲劳等虚拟测试
	能源电力	汽轮机叶片	ANSYS	基于实时仿真得到难以直接测量到的数据，服务于状态评估算法
	船舶航运	舰船	DNV GL	结合传感数据与数字孪生，有效提高船体状态预测精度
	医疗健康	心脏、大脑	3DEXPERIENCE	基于孪生模型开展心脏手术预演，寻找大脑施加信号的位置及强度
产线/流程级	智能制造	产线及动态机器	贝加莱	结合输送系统ACOPOStrak和数字孪生实现产线设计虚拟验证与可视化
	油气开采	石油开采系统	ANSYS	利用采油系统数字孪生模型，辅助其采油策略的制定
	环境保护	污水处理单元	GE Predix	构建涵盖微生物、化学等属性的孪生模型，实现可化及污水处理预测
工厂/城市级	汽车行业	汽车试验场地	IDIADA	构建了数字化试验场，可模拟各种真实汽车行驶场景
	建筑建设	京雄高铁	自研平台	为自研平台植入BIM技术，并完成铁路的数字化场景设计与交付
	城市管理	新加坡	3DEXPERIENCE	构建了城市的动态三维实景模型，辅助新加坡城市的规划与决策

性能分析

生产方案验证、生产过程可视化

三维场景可视化与沉浸式体验

◆ 电力系统数字孪生的应用现状

国内

发电领域

- 利用数字孪生构造电厂的镜像体，实现设备经营在线和实时决策
 - 大渡河公司瀑布沟水电厂
 - 中广核核电厂数字孪生建设级运维方案
 - 雄安高铁数字孪生光伏电站

输电领域

- 利用数字孪生及传感器，对输电线路当前以及未来的状态进行实时掌握及预测
 - 成都大运会输电全链路数字孪生试点建设
 - 柳昆龙特高压多端直流输电工程数字孪生
 - 雄安数字孪生高压电缆系统

变电领域

- 利用数字孪生构建变电站设备运维系统
 - 安徽继远变电站GIS运维系统
 - 上海35kV蔡伦站数字孪生
 - 110kV游乐港智能变电站数字孪生

配电领域

- 利用数字孪生支撑配用电建设及运维
 - 山东智慧物联数字孪生服务平台
 - 雄安王家寨数字孪生微电网

国外

西门子：开发针对芬兰电力系统规划、运行和维护的数字孪生系统

通用电气：利用数字孪生技术优化风电场开发、运营和维护的全过程

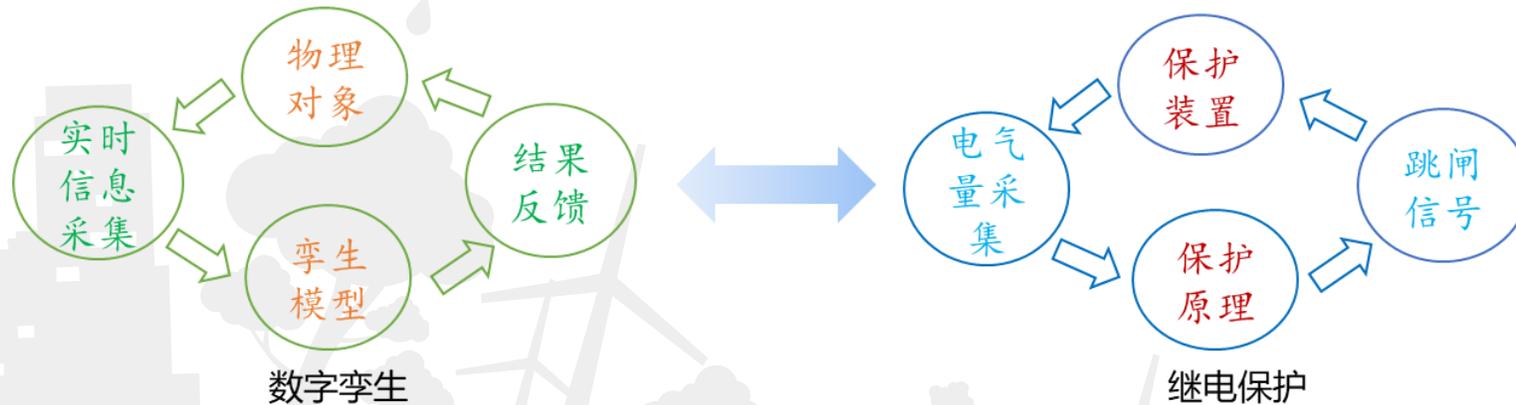


02 保护与控制数字孪生研究现状

现有保护与控制数字孪生研究到何种程度了？研究难点？未来的研究方向？

保护与控制数字孪生研究现状

2.1 保护控制与数字孪生



- 保护原理对应着虚拟空间模型
- 保护的采样和跳闸对应着物理对象和虚拟模型之间的信息闭环交互

◆ 应用

- 1) 美国佐治亚理工学院在交流系统中提出了基于保护对象的数学模型进行动态状态估计的保护；
- 2) 北京交通大学有学者提出基于数字孪生的柔性直流线路纵联保护原理；
- 3) 开普实验室特高压**直流控保孪生**、安徽古泉**换流站数字孪生**、思源弘瑞**继电保护原理孪生**、上海交大仿真实验室、武大国家级**虚拟实验室**项目、国网设备部特高压换流站运行仿真比武竞赛平台

保护与控制数字孪生研究现状

应用领域	应用效果	技术特点	优缺点
开普实验室 (特高压直流控保孪生)	以NewLinkC和Simulink为建模工具，基于实际直流控制保护程序，构建与实际工程特性一致的直流控制保护孪生模型；模型可嵌入到RTDS中运行或在Linux平台运行，通过GTFPGA接口与RTDS通信，替代了交直流大电网仿真中的大量实际直流控保屏柜。	<ul style="list-style-type: none">• 基于实际直流控制保护程序建模• 图形化建模• 模型实时运行（RTDS）	<ul style="list-style-type: none">◆ 保护逻辑透明可视化建模；◆ 能够实时、闭环与仿真系统进行数据交互，程序代码颗粒度细腻，保真性良好；◆ 无法与其它厂家的控保系统进行数据交互。
保护厂家 (保护装置孪生)	利用matlab、C语言对保护源代码模块化孪生；借助调试工具秒级刷新遥测、遥信；借助虚拟液晶观察保护动作行为、LED灯、进行按键操作等。	<ul style="list-style-type: none">• 保护源代码建模• 模型离线运行	<ul style="list-style-type: none">◆ 能够对继电保护功能进行离线调试，数据无法实时交互，互动性不足；◆ 难以接入其它厂家的保护代码。
高校 (学生实验培训)	搭建交流站中线路、开关、主变等二次保护设备的数字孪生体，且包含保护定值配置、保护相关模拟量接入连线操作、保护特性曲线展示、故障波形、保护报文信息分析等功能，为参与试验的人员提供形象生动的二次保护孪生试验环境。	<ul style="list-style-type: none">• 二次保护外特性仿真• 具备简单人机互动	<ul style="list-style-type: none">◆ 能够开展学术及继保从业人员的试验培训；◆ 保护逻辑较简化，与实际装置外特性一致性不足；◆ 平台较封闭，无法与其它保护设备互联。

保护与控制数字孪生研究现状

当前保护与控制数字孪生技术的研究主要集中在以下三方面：

保护逻辑

- 厂家提供**源代码封装模型**，该方法能最大程度还原实际保护装置，但对于使用者来说还是黑匣子；
- 基于厂家说明书进行**可视化逻辑搭建**，但对于一些经验问题、细节处理问题，厂家说明书中不会体现

外特性

- 目前实际保护装置的遥测、遥信、录波、液晶界面等功能均可通过数字孪生手段逐渐模拟实现
- 但实际保护装置的**物理特性**，如低通滤波特性、受温度影响特性、A/D特性等，数字孪生手段**难以模拟**

数据交互

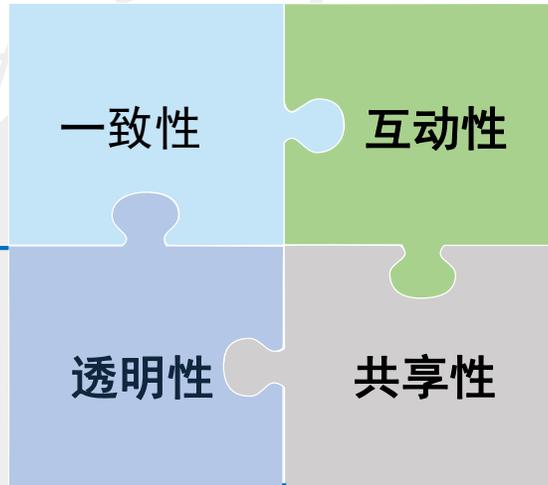
已有部分研究虽然实现了虚拟保护装置和一次仿真系统之间的数据交互，但受仿真技术的限制，大多数模型仍处于**离线运行**状态

2.2 保护与控制数字孪生的内涵及特征

参考数字孪生的内涵及特征，结合保护与控制领域的实际应用需求，提出了保护与控制数字孪生的概念，即能够实现对真实保护或控制装置的功能替代，同时又能与其进行实时数据交互的全数字化仿真建模技术，且涵盖以下四点特征：

➤ 保护与控制数字孪生体的功能配置、定值格式、报告输出、接口标准、信息规范和动作行为应与实际的保护或控制装置一致

➤ 保护与控制数字孪生体的内部逻辑、站控层及过程层应透明可视化



➤ 保护与控制数字孪生体应能通过物理信号接口或通信接口与其他保护或控制数字孪生体、实际电力设备和仿真系统进行数据交互

➤ 保护与控制数字孪生体应支持通过标准化的接口嵌入不同保护厂家开发的中间元件或保护控制元件，实现平台共享

保护与控制数字孪生的技术难点

2.3 保护与控制数字孪生的技术难点

◆ 难点一：保护/控制原理的精确建模

基于模型驱动

- 基于装置的运行规律和内在机理建立模型，模型有明确的物理或现实意义
- 新型电力系统背景下，电网中部分设备的**机理模型难以准确获得**
- 模型**难以反映**物理对象的**个性差异**

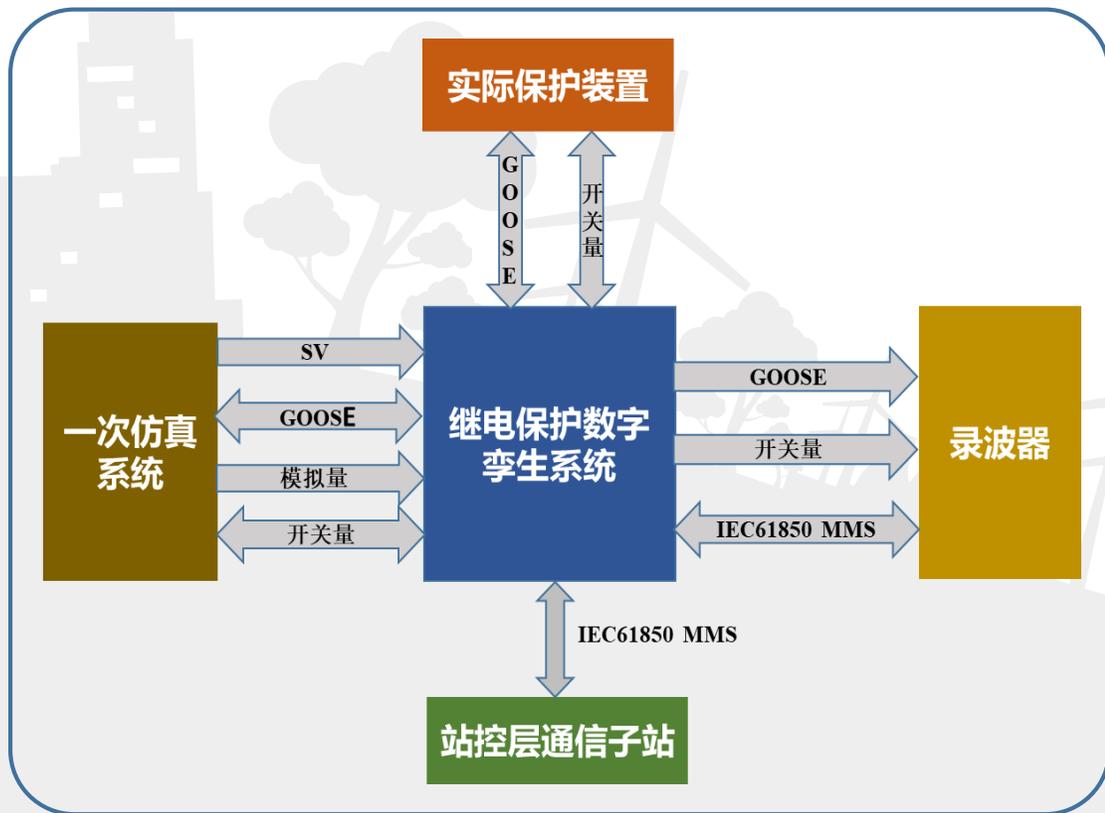
基于数据驱动

- 运用大数据、人工智能、机器学习等手段，拟合输入输出之间的关系
- 略去了对实际保护装置复杂运行机理的研究过程，建立的是**黑箱模型**
- 随着训练样本的不断增多，模型可进一步完善，但由于对数据的依赖程度高，**易受不良数据影响**

需通过总结保护/控制原理的程序实现方式，研究相应的图形化、层级化、混合建模等技术，使搭建的孪生保护原理模型满足透明度、兼容性、易维护等要求

保护与控制数字孪生的技术难点

◆ 难点二：接口建模及数据实时交互



保护与控制数字孪生系统与外部设备数据交互示意图

- **常规接口技术：**其接口功能、转换精度和延时应符合孪生场景要求，且接口输入/输出通道数量应能配置及扩充
- **智能接口技术：**应采用电力系统常用通信标准与规约，通信带宽、通道延时应符合孪生场景要求，通信接口应采用模块化设计，通道数量应能配置和扩充

保护与控制数字孪生的技术难点

◆ 难点三：系统的实时运行及执行效率

实时操作系统（RTOS）是指当外界事件或数据产生时，能够接受并以足够快的速度予以处理，其处理的结果又能在规定的时间之内控制生产过程或对处理系统做出快速响应，并控制所有实时任务协调一致运行的操作系统。

操作系统实时性比较

Windows通用操作系统	PSOS, VxWorks, QNX, VRTX等主流实时操作系统	Linux开源操作系统
<ul style="list-style-type: none">中断响应时间可达数百毫秒，实时性较差	<ul style="list-style-type: none">实时性能、技术积累、硬件支持较好商业操作系统，需购买高昂的授权费用	<ul style="list-style-type: none">用户群体、文档支持较好开放源代码，遇到问题时可从代码层级深入分析打补丁方式可使Linux内核的实时性能达到商业实时操作系统水平

选用Linux操作系统加以研究改造，同时为保证单个计算单元可同时运行多套典型的孪生保护，还需对CPU多核并行计算技术、核与核之间的通信技术进行研究

保护与控制数字孪生的技术难点

◆ 难点四：人机交互功能模拟

为实现对孪生保护信息的获取和控制，还需进行人机交互技术研究，主要包括以下几点：

1) 保护界面模拟及控制研究

可显示保护的模拟量、信号灯等信息，可进行保护复归、保护定值参数修改、保护压板投退等操作，且具备保护状态实时监视、保护报文实时刷新、保护录波实时生成等功能。

2) 保护模型文件的自动生成技术研究

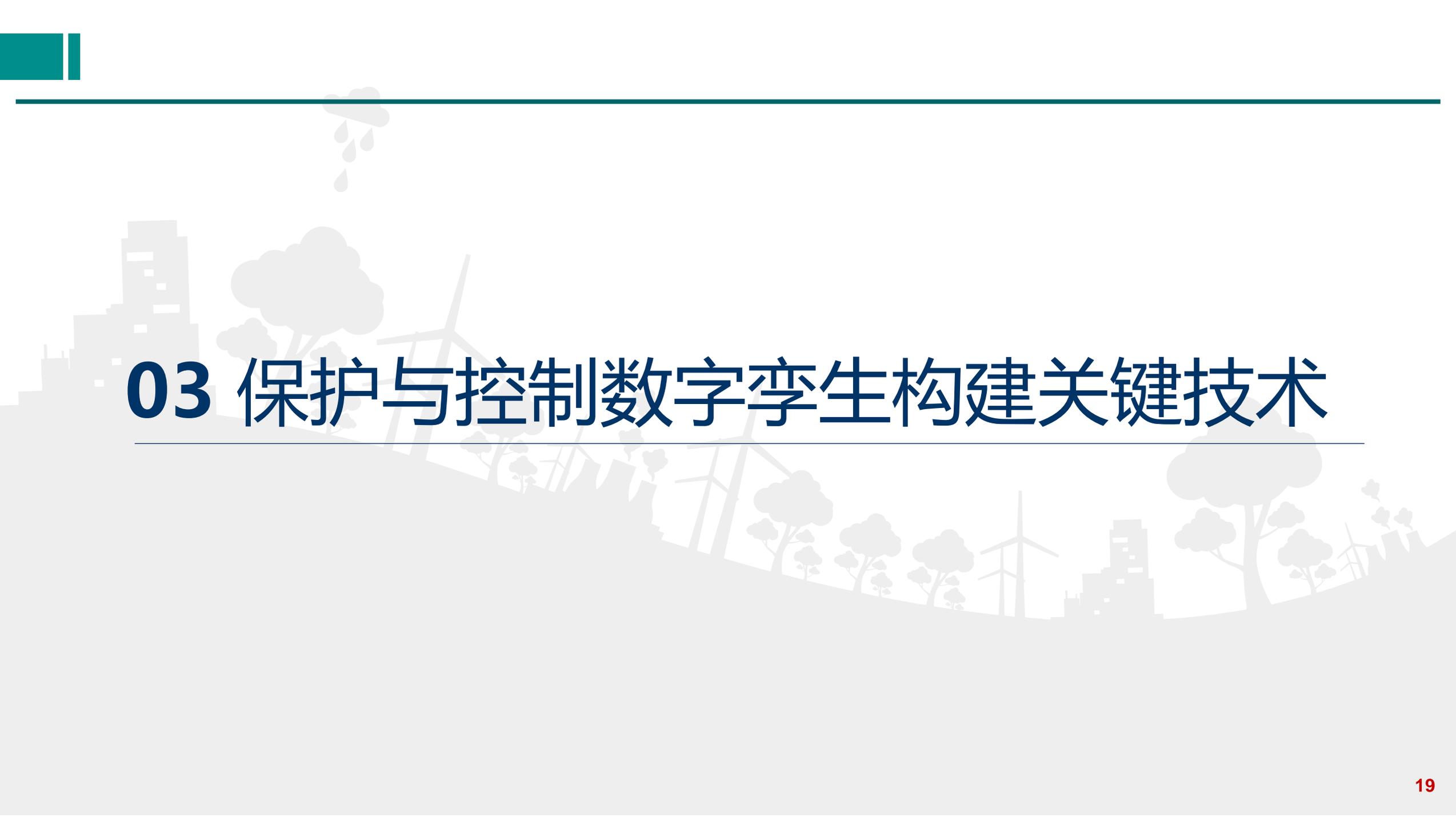
SCD文件结构复杂，几乎无法用手工方式编辑，因此孪生保护的SCD文件须能够自动生成，且自动生成的SCD应满足相关标准要求，格式及内容要规范。在孪生保护模型更新后，SCD文件、MMS Server服务也应能自动更新。

3) 虚拟站控层服务技术研究

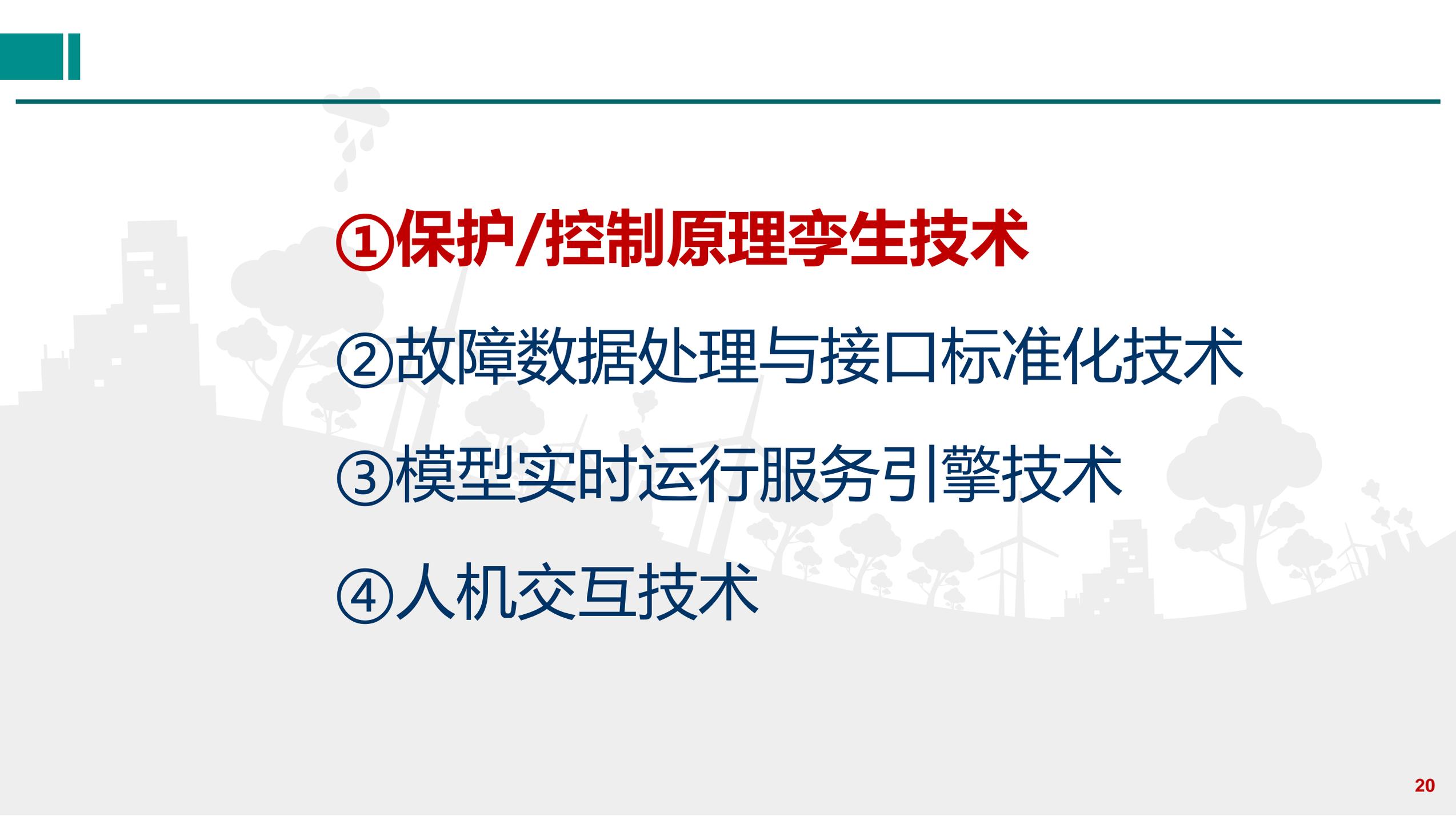
孪生保护应能运行MMS Server，供站控层客户端、录波器、保信子站等连接，以实现在站控层读取孪生保护的参数、定值、压板、遥测、遥信等信息，并能实时上送保护功能状态、保护事件、保护告警信息、遥测及遥信信息等；

4) 保护接口配置技术研究

应能解析孪生保护的SCD文件，并通过特定方式实现孪生保护侧与一次仿真系统、硬件通道间SV、GOOSE、开入、开出信息的对应连接。



03 保护与控制数字孪生构建关键技术



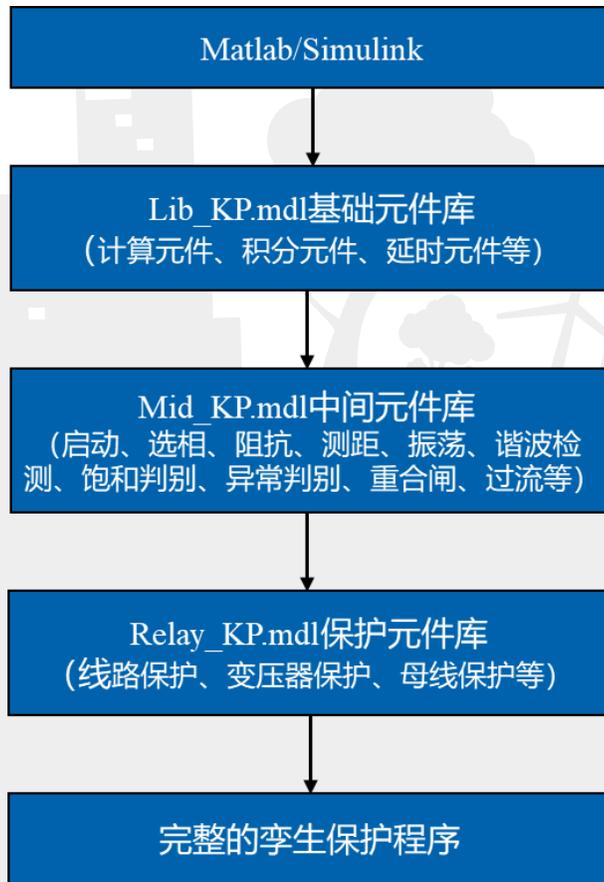
①**保护/控制原理孪生技术**

②故障数据处理与接口标准化技术

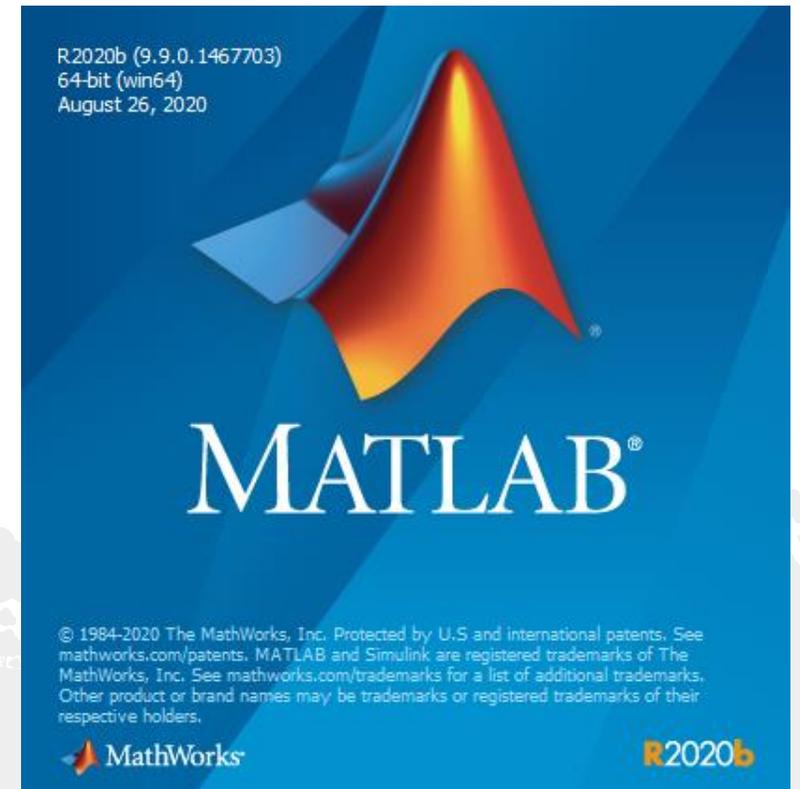
③模型实时运行服务引擎技术

④人机交互技术

3.1.1 层级化图形化建模技术



- 基于Simulink建模平台作为开发工具，依照**层级化建模理论**，使用**基础元件库、中间元件库、保护元件库**三层结构进行图形化建模
- 保护/控制逻辑元件的搭建参考**继电保护/控制理论书籍、相关专业论文、保护厂家说明书等**



◆ 基础元件库开发

基础元件库的建模可通过简单元件、组合元件以及M代码元件等方式实现。

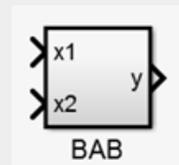
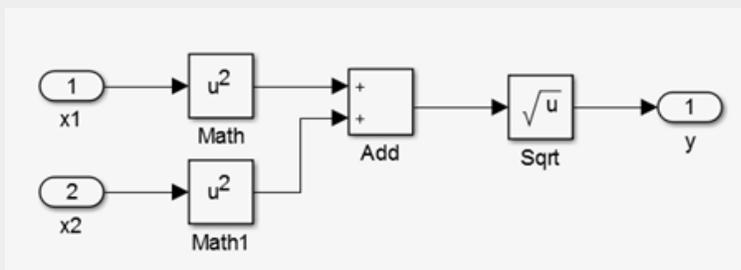
(1) 简单元件

➤ 简单元件直接从Simulink库中复制，可重新命名



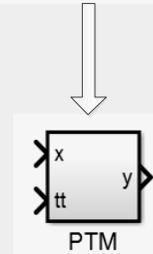
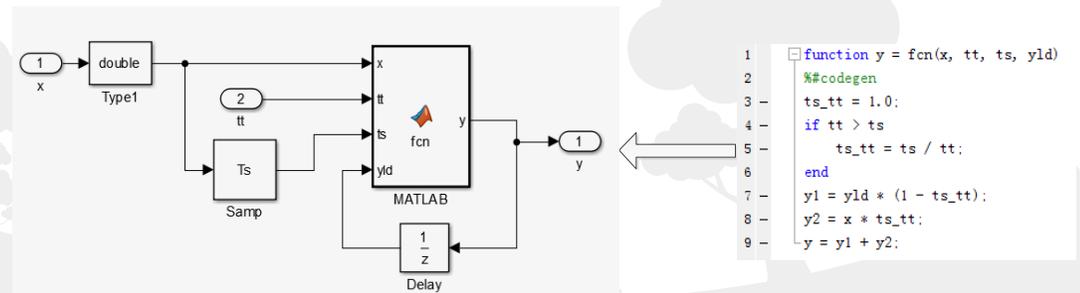
(2) 组合元件

➤ 组合元件使用Simulink中的atomic subsystem生成，算法逻辑由基本元件搭建而成



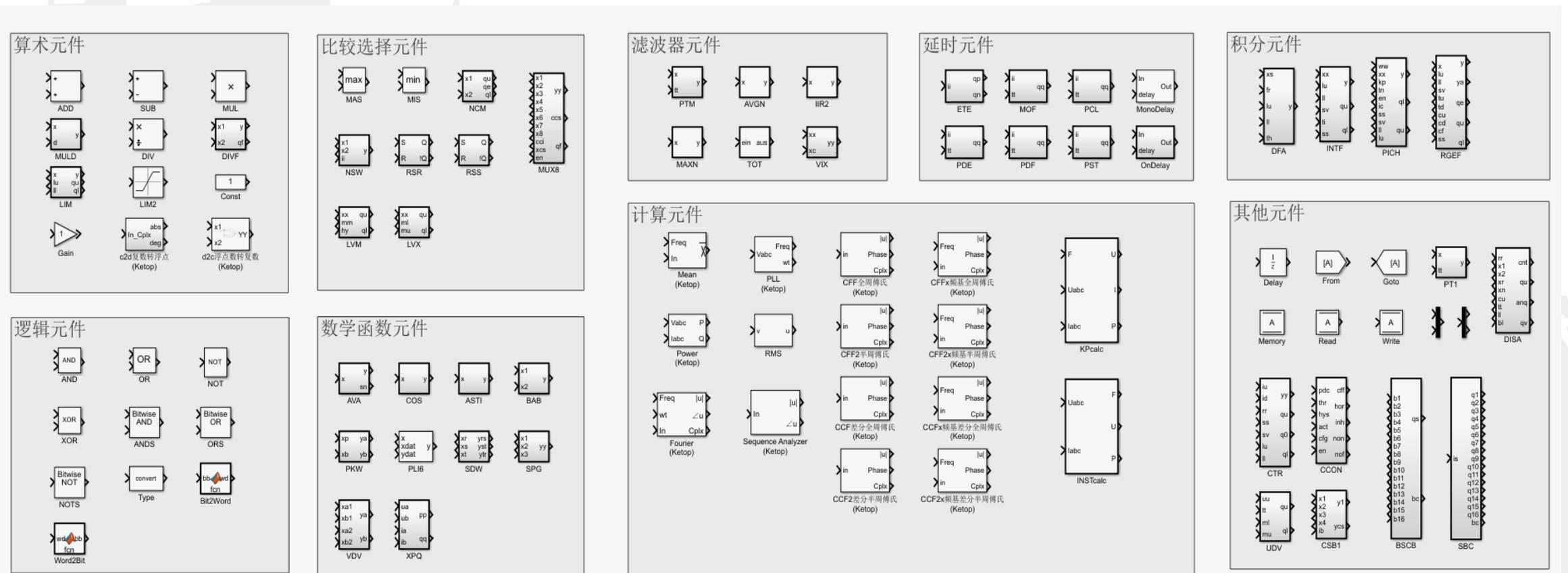
(3) M代码元件

➤ M代码元件使用Simulink中的atomic subsystem生成，其中的逻辑主要由M代码进行描述（适合构建复杂元件）



保护/控制原理孪生技术

典型的基础元件库包含：算数元件、计算元件、逻辑运算、比较选择元件、滤波器元件、数学函数元件、延时元件、积分元件及其他元件等。

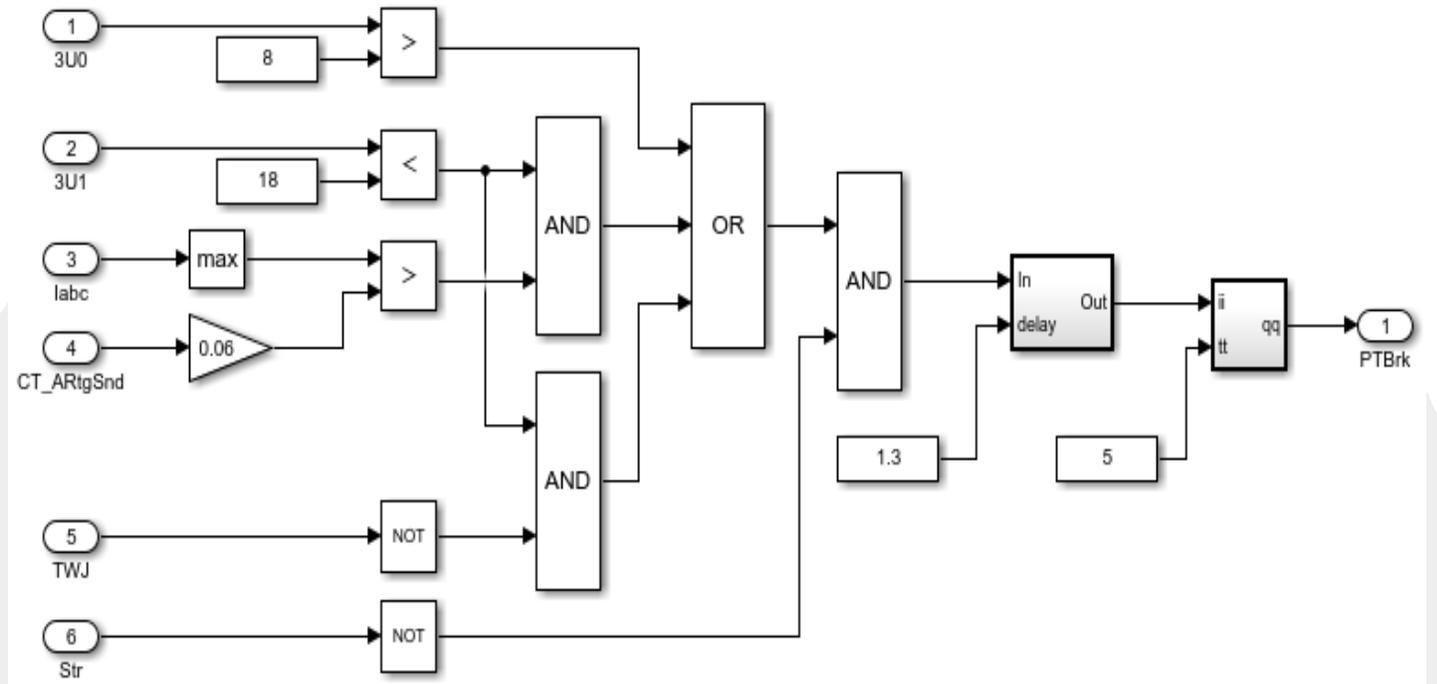
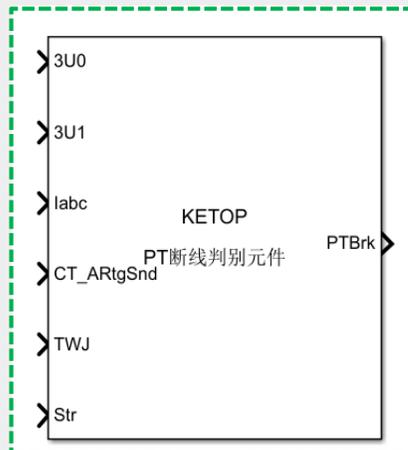


◆ 中间元件库开发

- 使用Simulink中Atomic Subsystem建立中间元件；使用Inport、Outport建立页面的接口
- 使用Lib_KP基础元件库以及Simulink元件库，搭建可复用的保护算法逻辑

装置不启动条件下，满足以下任一条件，即延时1.3s报“PT断线”

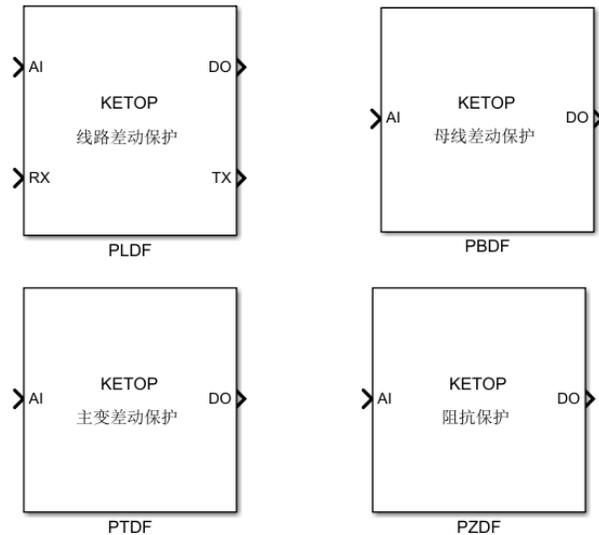
- 1) 零序电压大于8V
- 2) 正序电压小于18V且任一相有流
- 3) 正序电压小于18V且TWJ不动作



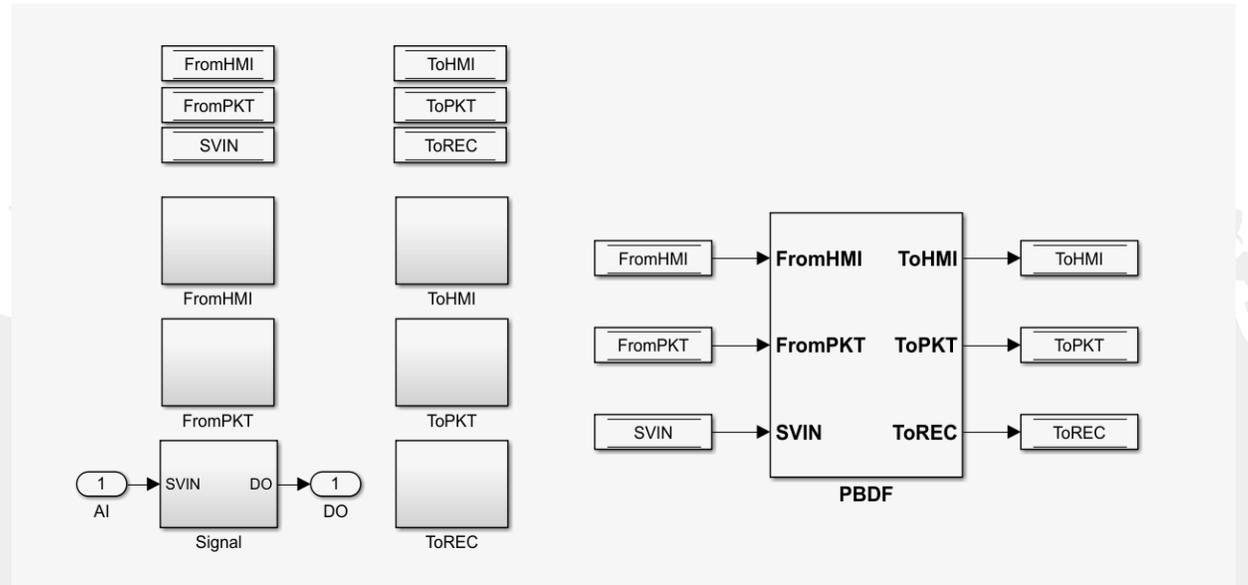
PT断线图形化逻辑搭建示意图

◆ 保护元件库开发

- 保护元件库由基础元件库及中间元件库搭建完成，同时定义了保护与外部交互的接口等
- 将保护逻辑封装为**S-Function元件**，可显著提高模型编译效率，实测28台线路保护采用S-Function前后的编译时间分别为**37分钟**和**3分钟**



保护元件库

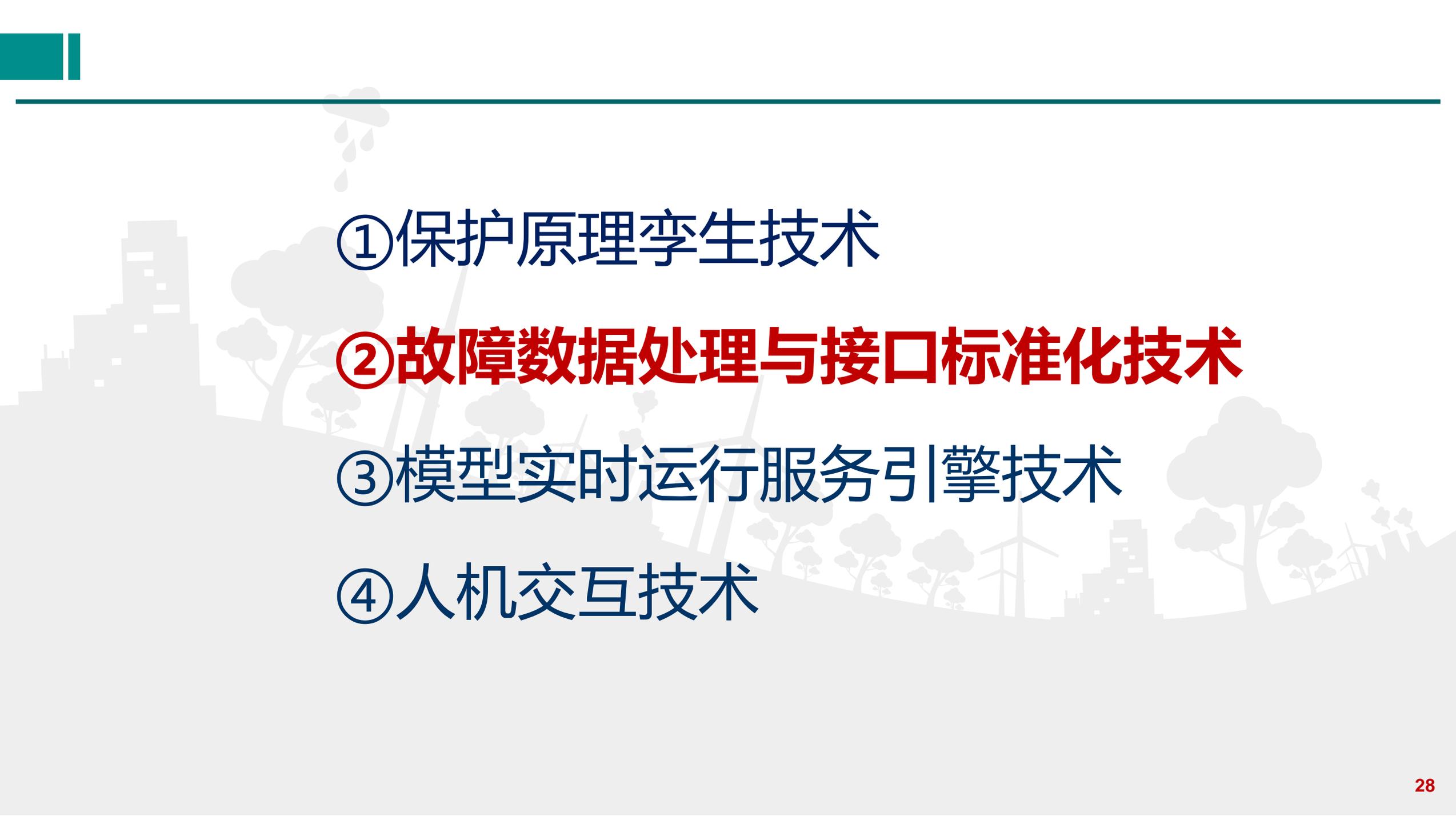


母差保护

3.1.2 模型变量命名规则

完整的继电保护模型中间变量数量众多，为便于理解，需制定一套标准化的模型变量命名规则，且符合行业使用习惯。以上述层级化建模方式为例：





①保护原理孪生技术

②故障数据处理与接口标准化技术

③模型实时运行服务引擎技术

④人机交互技术

3.2.1 故障数据处理技术

◆ 数据采集

李生保护采集SV9-2报文信息进行逻辑运算，SV9-2报文为每秒钟4000点采样，为减少计算量，对SV9-2报文进行两分频，即李生保护使用每秒钟2000点固定间隔采样。

- 系统频率45Hz时，每周波采样点数为44.44
- 系统频率55Hz时，每周波采样点数为36.36

两种情况下每周波采样点数均大于24点采样，因此可以跳过一些多余的点不计算，从而保证每周波仅计算24次，但是24次计算的采样值为通过线性内插法重新得到的一组24点采样数据，用于后续的逻辑计算。

◆ 保护算法

继电保护算法种类繁多，采用与实际保护装置一致的全周傅氏算法对上述采样数据进行处理。

故障数据处理与接口标准化技术

3.2.2 IO接口技术

孪生保护应与实际保护装置一致，具备人机交互接口、输入输出接口以及录波等功能，为了便于在生成代码的时候对不同接口类型进行区分，定义以下**五个接口模块**对接口类型进行标准化：

接口类别	数据类型	含义
FromHMI	RP	装置参数(dsParameter)
	RS	保护定值(dsSetting)
	RE	保护软压板(dsRelayEna)
ToHMI	RT	保护事件(dsTripInfo)
	RW	告警信号(dsWarning)
	RA	保护遥测(dsRelayAin)
	RD	保护遥信(dsRelayDin)
	RS	保护功能状态(dsRelayState)
	RB	保护功能闭锁(dsRelayBlk)
FromPKT	GI(单点)	GOOSE接收数据集
	GI2(双点)	
	GI5(整型)	
	GI7(浮点)	
ToPKT	GO(单点)	GOOSE发送数据集
	GO2(双点)	
	GO5(整型)	
	GO7(浮点)	
ToREC	F	录波类型
	V	电压模拟量
	A	电流模拟量
	D	开关量

接收该孪生保护与后台交互的量，如装置参数、保护定值、保护软压板等

后台监视的量，如有效值、全周傅氏值、频率、保护中间节点、保护出口节点等

孪生保护需要接收的开关量，如开关位置、刀闸位置、失灵开入、远跳、闭重信号等

孪生保护需要输出的开关量，如跳闸信号、启动失灵信号等

孪生保护的录波，如各种模拟量和开关量等

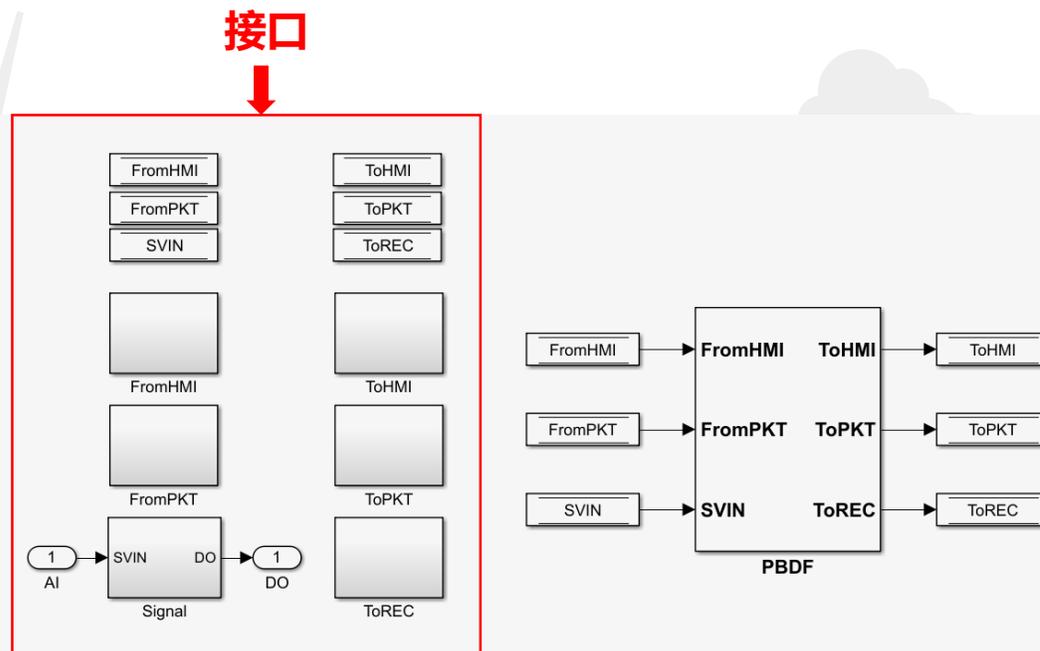
故障数据处理与接口标准化技术

◆ 信号在模块间的传递方式

- From-Goto方式：From模块与Goto模块借助Goto标记进行匹配，其中Goto模块的Tag Visibility参数决定访问信号的From模块的位置是否受限制（“local”、“scoped”、“global”）。
- Data Store Memory方式：定义并初始化一个命名的共享数据存储，即一个内存区域，供指定相同数据存储名称的Data Store Read和Data Store Write模块使用。（模型变量多且需多次复用的情况更具优势）

1) 若Data Store Memory模块在顶层系统中，则模型中任意位置的Data Store Read和Data Store Write模块都可以访问该数据存储；

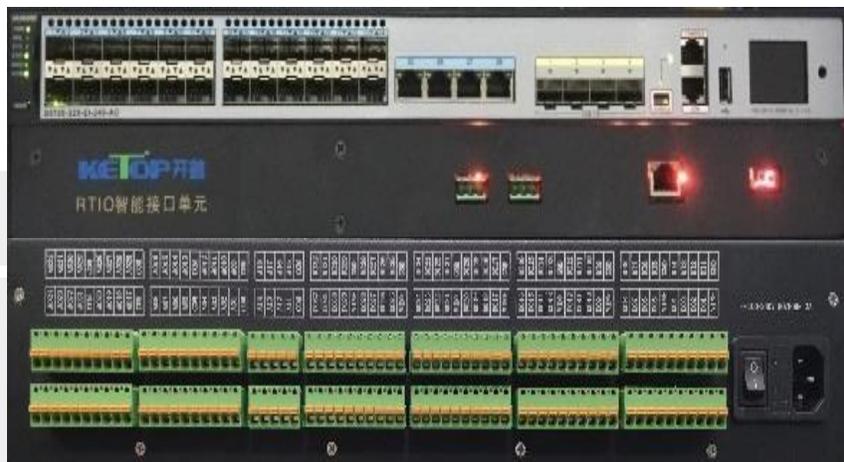
2) 若Data Store Memory模块在子系统中，则位于同一子系统或模型层次结构中该子系统下面的任何子系统内的Data Store Read和Data Store Write模块都可以访问该数据存储。



Data Store Memory的使用示意图

故障数据处理与接口标准化技术

3.2.3 数据交互技术

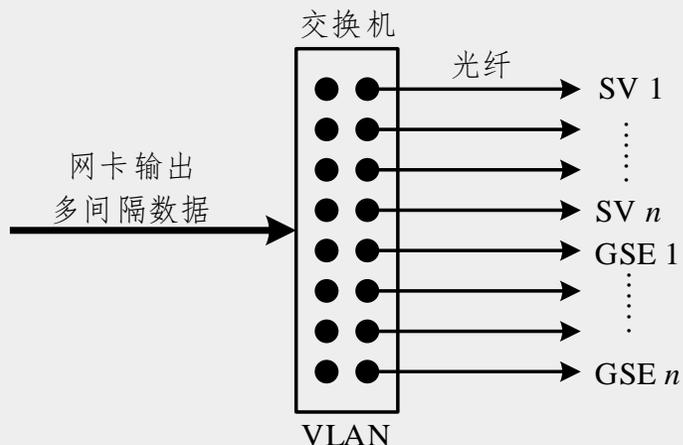


常规IO接口

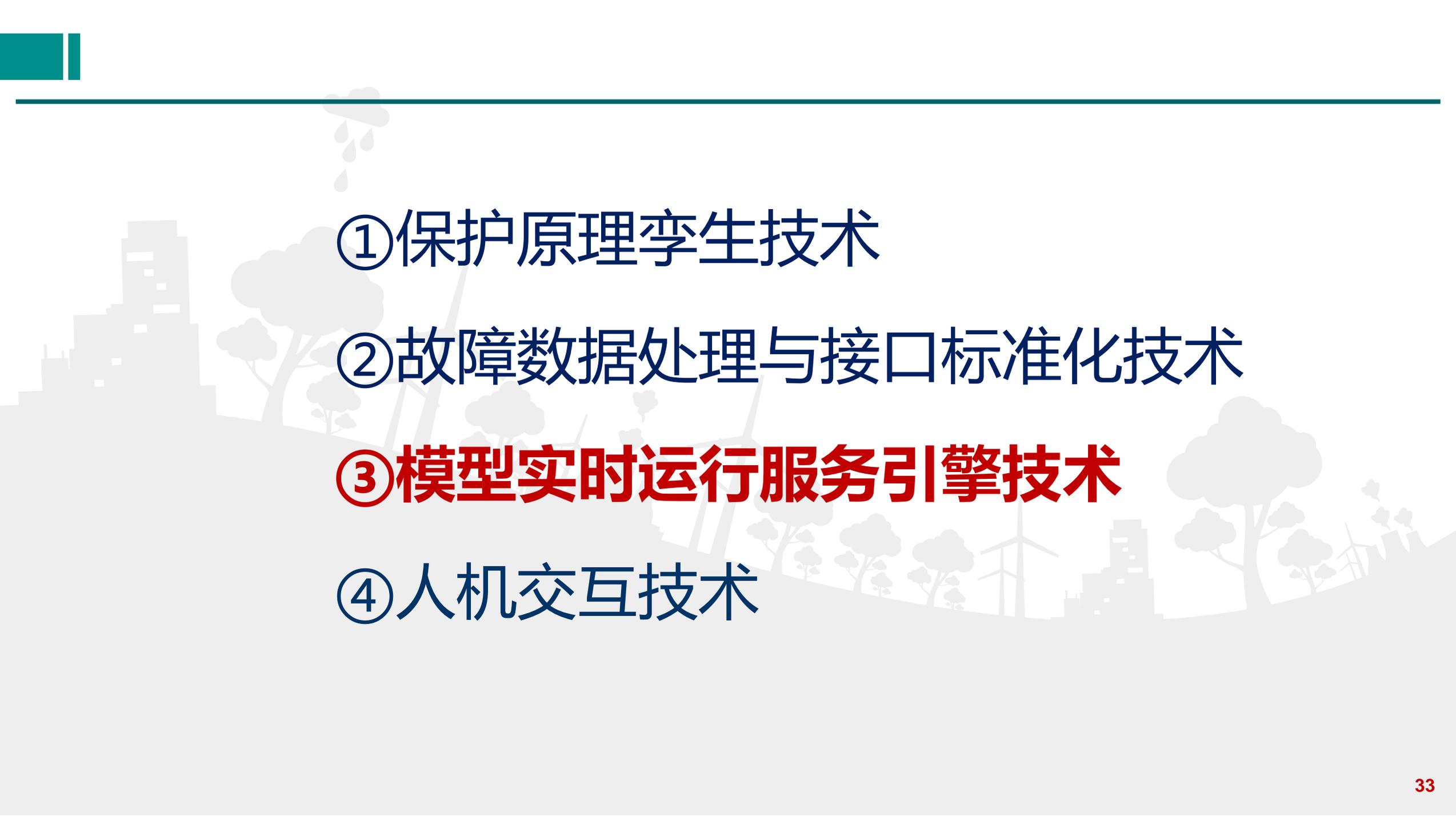
每个I/O模块包含32路AO；8路AI；32路DO；32路DI。

智能IO接口

每隔IO模块24个百兆光口，8个千兆电口，支持VLAN分组。



➤ 智能IO为了解决多间隔数据同步输出的难题，采用了整体数据打包再分组转发的模式，通过重新编写网卡驱动实现了数据的整体打包发送，通过专用交换机的VLAN分组技术实现了数据的分组转发。



①保护原理孪生技术

②故障数据处理与接口标准化技术

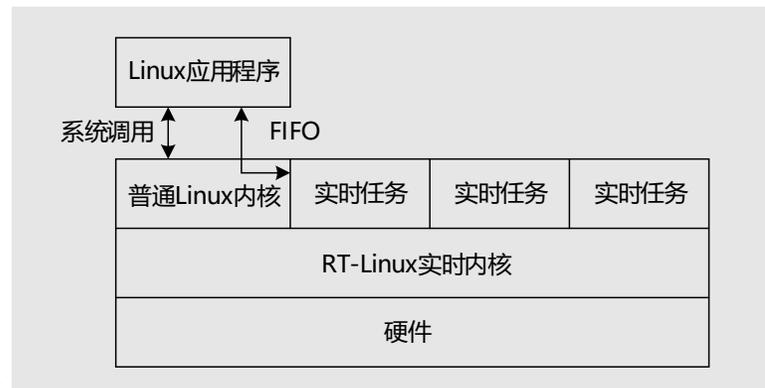
③模型实时运行服务引擎技术

④人机交互技术

3.3.1 Linux系统的实时性改造



硬件平台



实时Linux操作系统的基本结构

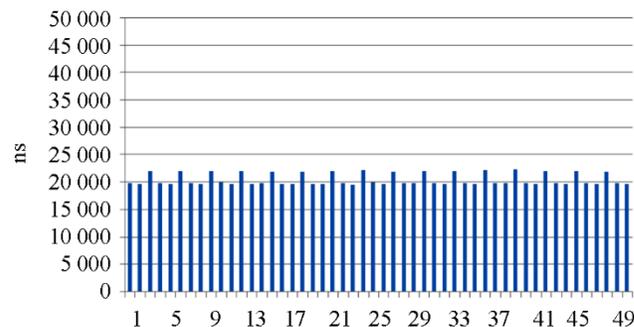
- 计算单元为1U的高性能工控机，CPU采用Intel Core i7；
- 通用的Linux内核以吞吐量为主要优化目标，只有系统调用和中断响应结束时能够发生任务抢占，造成高优先级的中断不能被及时响应。因此需要对内核打上preempt_rt补丁，该补丁将所有中断服务程序（ISR）线程化，并且用户可以自由调整ISR的优先级，因此赋予了高优先级的ISR能够随时抢占执行；并且将原始自旋锁改造成可休眠自旋锁，将较大的禁止抢占区更改为多个较小的禁止抢占区，从而将Linux改造成一个实时操作系统。

3.3.2 中断响应时间不稳定改造

除了上述的ISR线程化之外，其它软硬件因素也可能造成中断响应时间不稳定，例如CPU电源管理、PCI中断共享、质量不佳的系统代码等。

解决方案：

- CPU电源管理可以通过BIOS选项关闭；
- PCI中断共享可以通过消息信号中断（SMI）方式避免；
- 质量不佳的系统代码可以通过Linux任务隔离机制指定到一个单独的CPU运行，例如在8核系统上添加内核参数isocpus=1-7,可将所有非实时任务指定到CPU0运行。

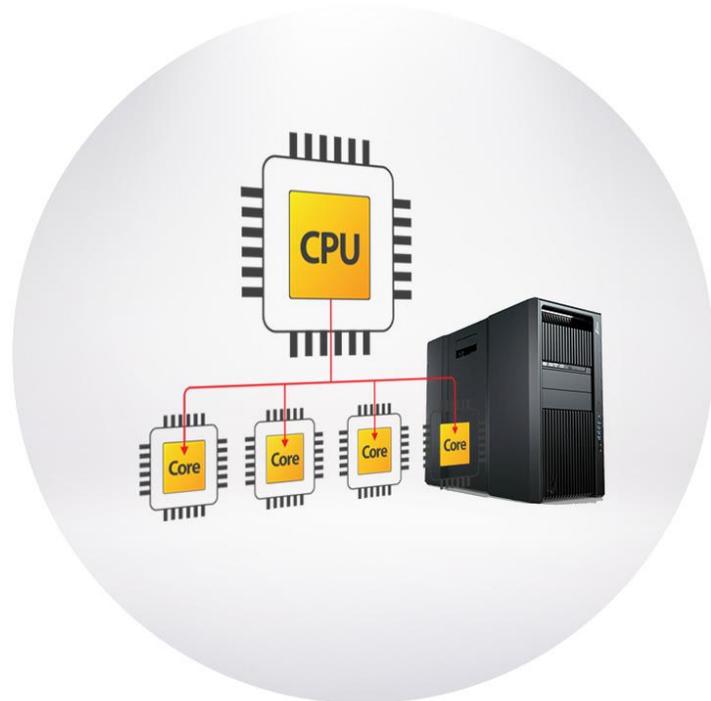


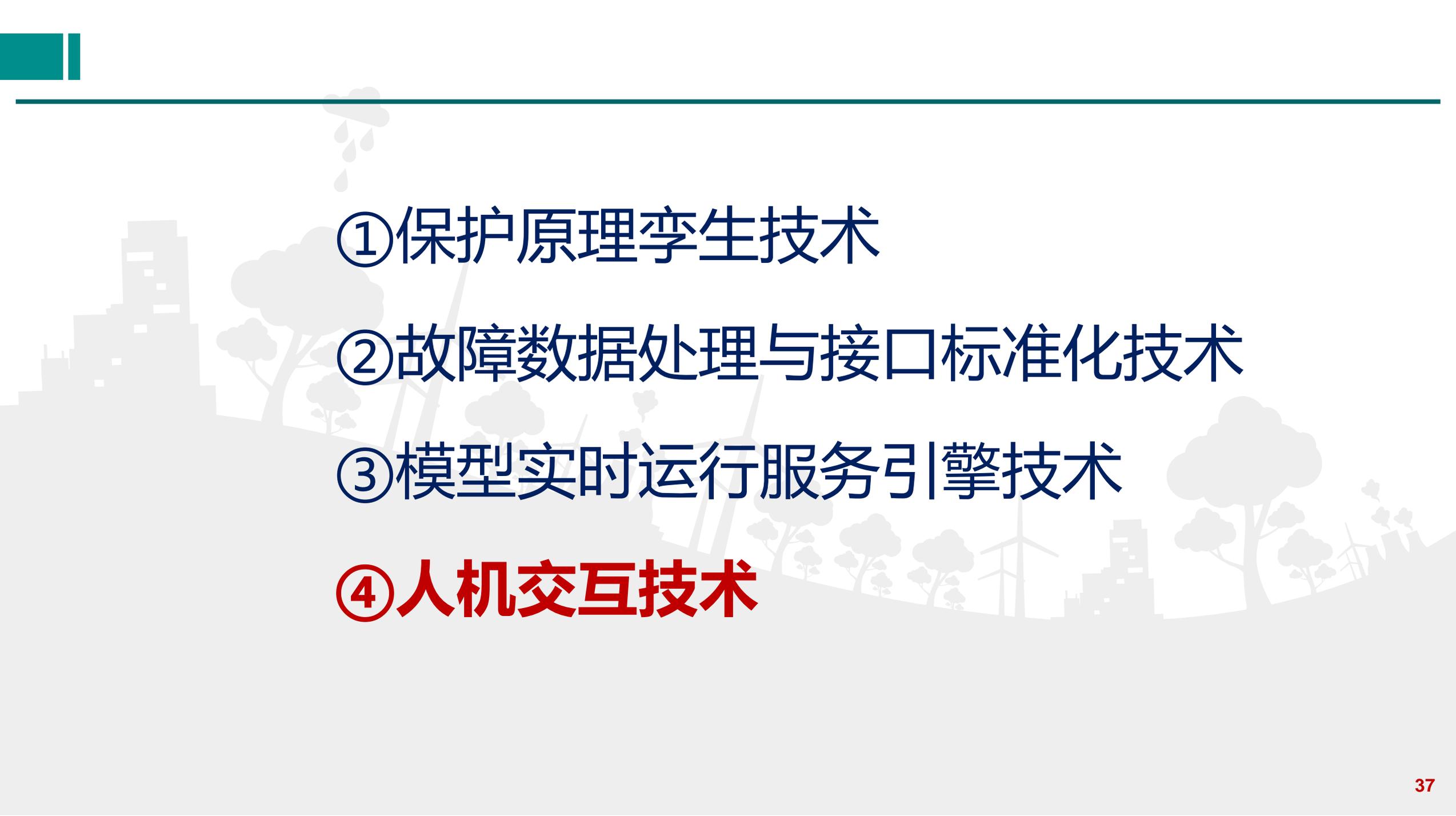
计算时间抖动控制

★网卡的中断节流模式虽能够减少单位时间内的中断数量，从而大幅提升接收报文的吞吐量，但会影响SV9-2报文接收的及时性，因此需要关闭网卡的中断节流模式，从而使得每包报文中断都能及时触发ISR，这通常需要增加驱动参数InterruptThrottleRate=0

3.3.3 多核并行计算技术

- 单核的计算能力总是有限的，为了实现一台服务器能同时运行多台（如20台）孪生保护，可采用核1用于接收和解析SV9-2及GOOSE报文，对于核2~5，每个核运行5台典型的孪生保护；
- 当核1完成报文解析得到保护所需的模拟量和开关量之后，核2~5同时开始并行计算，吞吐量比串行计算提升4倍，可以在有限步长内计算完成20台孪生保护；
- 多核之间通过共享内存传递数据，同时为了保证数据传递的完整性，借助Linux信号量进行同步。





①保护原理孪生技术

②故障数据处理与接口标准化技术

③模型实时运行服务引擎技术

④人机交互技术

3.4.1 保护界面模拟及控制技术

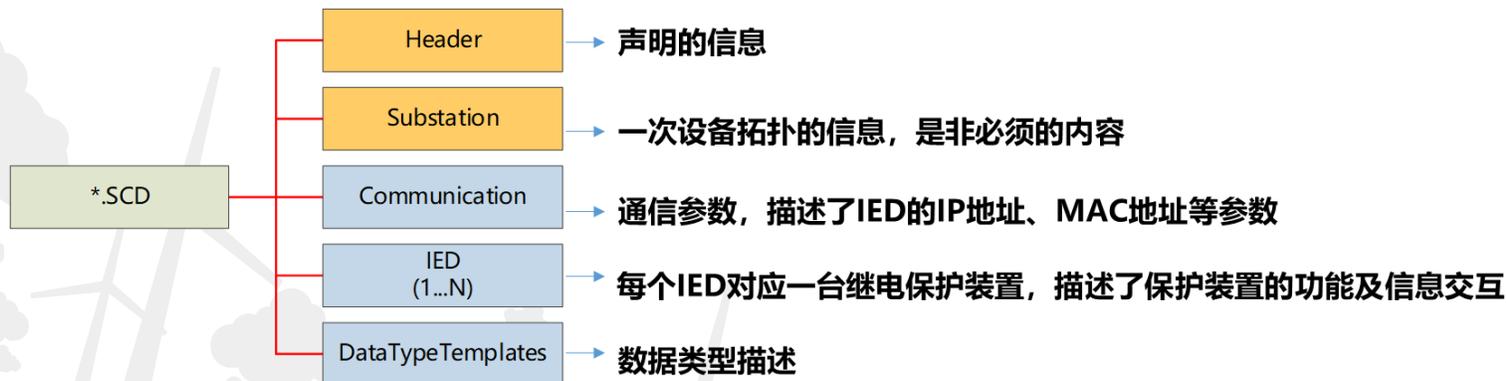
要实现后台主机对孪生保护信息的获取和控制，有以下两种方式：



- **方式1：**通过后台控制程序实现二者间的实时通信，通信协议为自定义的私有协议，采用UDP方式。该方式下后台主机可以调整孪生保护的参数、定值等，相当于实际保护装置的按键操作；同时孪生保护也能将遥测、遥信、动作事件及故障录波上送至后台主机，相当于实际保护装置的液晶屏幕显示及后台操作。
- **方式2：**通过IEC61850-MMS协议与孪生保护进行站控层通信，该方式下孪生保护中集成了MMS Server服务，孪生保护运行后Server服务自动启动，实时响应MMS Client的连接请求，从而实现定值、压板、事件、录波文件等MMS协议下的信息实时交互。

3.4.2 虚拟SCD建模及自动生成技术

SCD文件是一种采用XML格式的复杂的树形结构描述文件，其树形结构的根节点如下图所示：

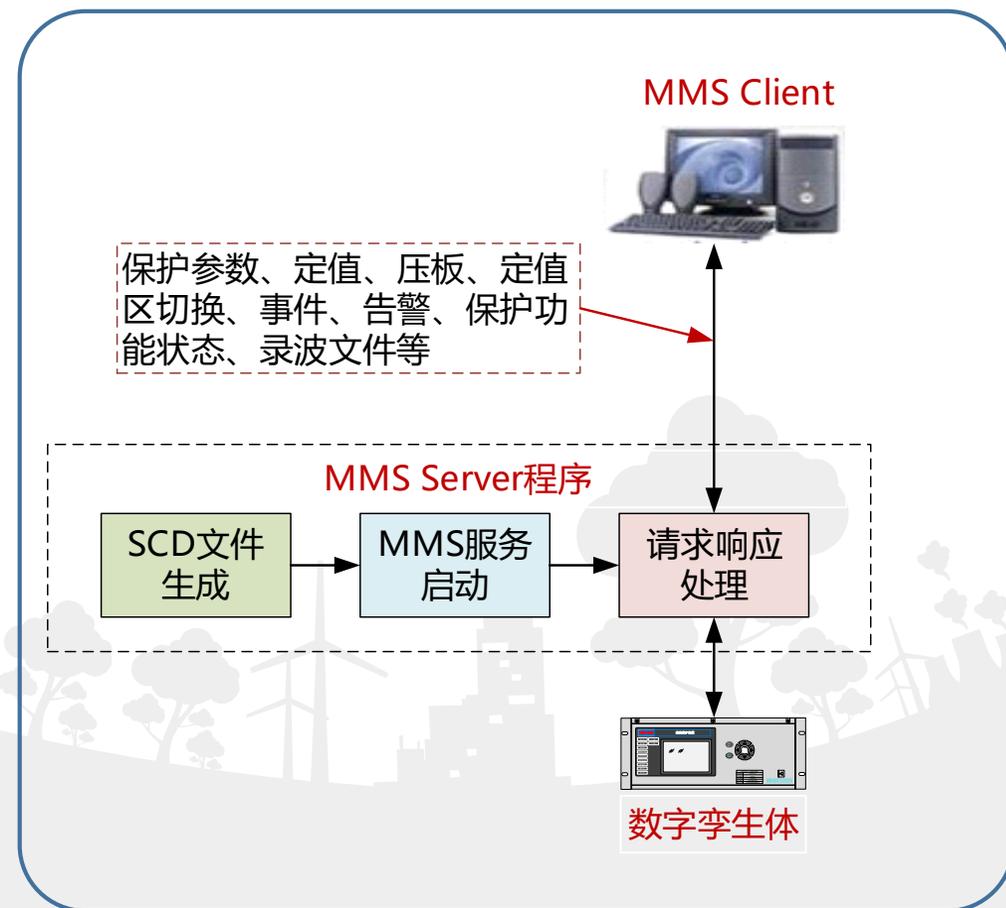


- **Communication**: SubNetwork_Stationbus为站控层网络，包含所有孪生保护IED的通信信息，IP地址自动生成，其余采用典型通信参数；SubNetwork_Processbus为过程层网络，包含所有的合并单元、智能终端以及孪生保护的GOOSE发布。
- **IED**: 合并单元采用典型数据集自动生成30个合并单元的IED；智能终端采用典型的数据集自动生成64个IED；保护装置按照模型文件中的孪生保护数量进行生成，然后依据3.2.2节定义的数据类型进行IED内容中数据集、逻辑节点等信息的生成。
- **DataTypeTemplates**: 数据类型中DOType、DType、EnumType类型采用典型结构，存储在单独的文件中，供自动生成SCD文件时加载；LNodeType按照模型中输入输出的不同类型进行生成，包含LPHD（装置铭牌信息）、RDRE（扰动记录）、LLN0（数据集节点）、MMXU（遥测）、PDIF（孪生保护）、TVTC（互感器参数）、GGIO（状态量）等数据类型，不同数据类型的成员信息依据孪生模型中的信息确定。

3.4.3 虚拟站控层服务技术

孪生保护的模型更改后，MMS Server服务自动完成SCD文件生成、MMS服务启动及请求响应处理等步骤。

MMS服务与孪生保护之间实时进行数据交互，同时响应MMS Client的相关请求，实现包括读取保护参数、定值、压板、遥测、遥信，实时上送保护功能状态、保护功能闭锁状态、保护事件、保护告警信号、遥测及遥信等服务。



MMS Server服务示意图

3.4.4 孪生保护接口配置技术

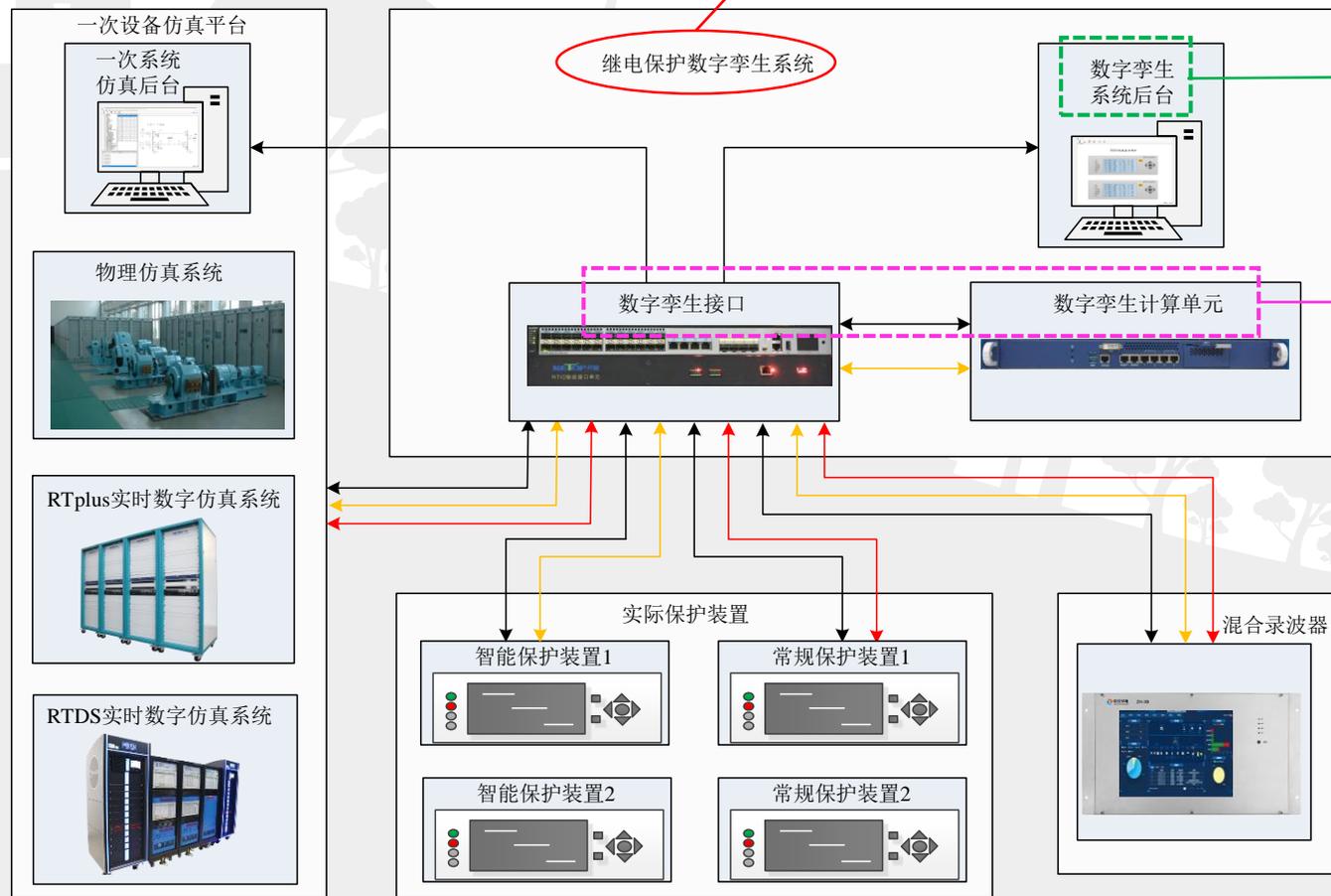
借助大数据特性分析技术，通过分析3.2.2节建模后生成的Simulink代码文件，即可实现模型中接口分类及变量类型等信息在后台的分类显示。在后台软件加载孪生保护的SCD后，借助以下连线式的信号映射方式，可实现孪生保护侧与一次仿真系统、硬件通道间SV、GOOSE、开入、开出信息的对应连接。

Index	数据集描述	索引	数据类型	通道	Index	输出通道描述
0	母联_保护跳闸_stVal	1	1	母联_保护跳闸	0	ZERO
1	分段1_保护跳闸_stVal	2	1	分段1_保护跳闸	1	母联_保护跳闸
2	分段1_启动失灵_stVal	3	1	分段1_启动失灵	2	分段1_保护跳闸
3	分段2_保护跳闸_stVal	4	1	分段2_保护跳闸	3	分段1_启动失灵
4	分段2_启动失灵_stVal	5	1	分段2_启动失灵	4	分段2_保护跳闸
5	主变1_保护跳闸_stVal	6	1	主变1_保护跳闸	5	分段2_启动失灵
6	主变2_保护跳闸_stVal	7	1	主变2_保护跳闸	6	主变1_保护跳闸
7	支路6_保护跳闸_stVal	8	1	支路6_保护跳闸	7	主变2_保护跳闸
8	支路7_保护跳闸_stVal	9	1	支路7_保护跳闸	8	支路6_保护跳闸
9	支路8_保护跳闸_stVal	10	1	支路8_保护跳闸	9	支路7_保护跳闸
10	支路9_保护跳闸_stVal	11	1	支路9_保护跳闸	10	支路8_保护跳闸
11	支路10_保护跳闸_stVal	12	1	支路10_保护跳闸	11	支路9_保护跳闸
12	支路11_保护跳闸_stVal	13	1	支路11_保护跳闸	12	支路10_保护跳闸
13	主变1_失灵联跳变压器_stVal	14	1	主变1_失灵联...	13	支路11_保护跳闸
14	主变2_失灵联跳变压器_stVal	15	1	主变2_失灵联...	14	主变1_失灵联跳变压器
15	I 母保护动作_stVal	16	1	I 母保护动作	15	主变2_失灵联跳变压器
16	II 母保护动作_stVal	17	1	II 母保护动作	16	I 母保护动作
					17	II 母保护动作

连线式接口配置界面

3.5 总体结构

站控层通信 ——
SV、GOOSE ——
模拟量开关量 ——



- 可实现对真实二次设备的功能替代
- 既能与一次仿真系统实时连接、又能与真实二次设备实时连接

软件：实现二次设备建模、计算单元控制、保护界面模拟、虚拟站控层服务等功能

硬件

• **计算单元：**实现数字孪生体保护逻辑实时计算、SV发布/订阅、GOOSE发布/订阅等功能

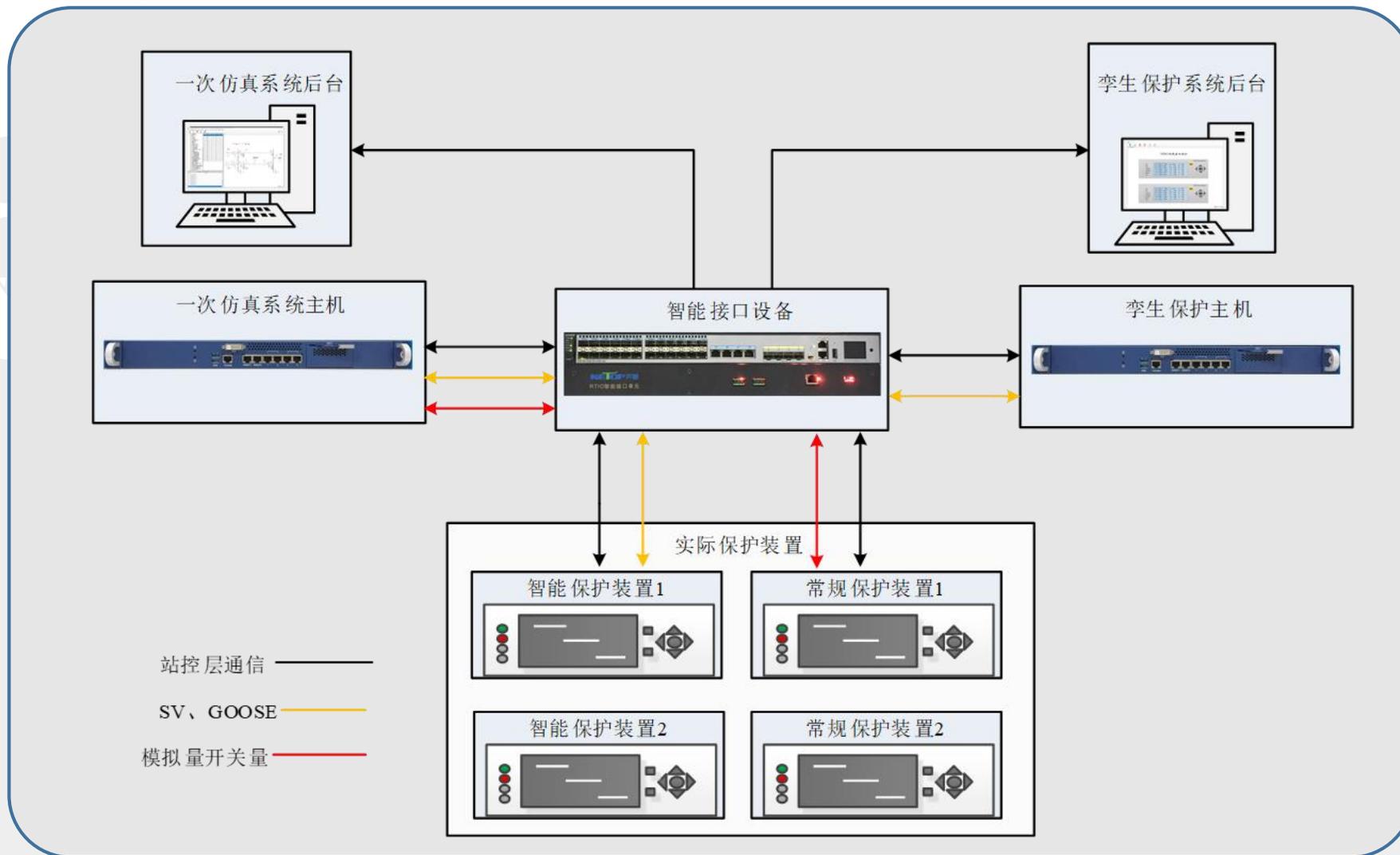
• **数字孪生接口：**实现SV、GOOSE、模拟量、开关量的信号交互





04 实例分析

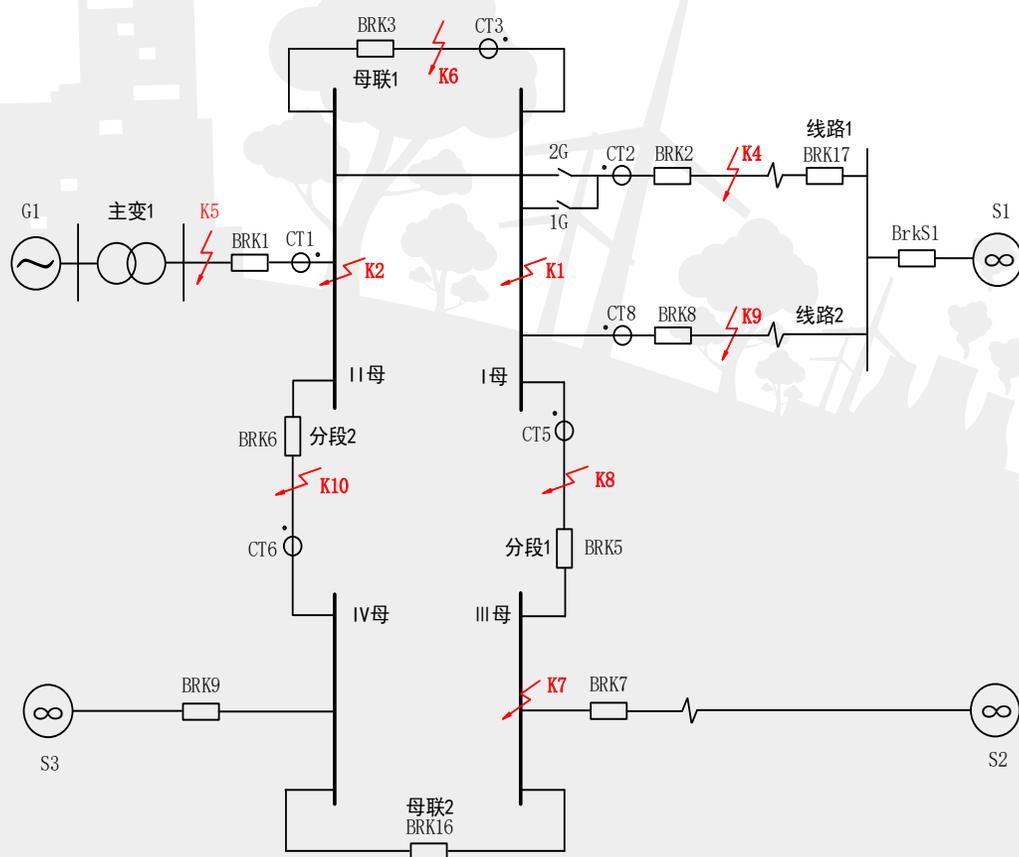
4.1 闭环仿真试验平台



一二次系统实时闭环仿真试验平台示意图

4.2 闭环测试实例

1) 根据GB/T 26864的标准要求建立110kV双母双分母线模型。



110kV双母双分主接线图

2) 在Simulink中进行母线孪生保护模型搭建，其中间元件库包含可实现数据处理、保护启动、差动复压闭锁、CT饱和、CT断线、PT断线、刀闸矫正、比率差动方程、母线互联、手合死区故障、分列运行、充电过流保护、母联分段失灵、断路器失灵等功能的元件。

3) 将搭建好的模型进行编译，使其生成的C代码文件分别通过一次系统仿真后台和孪生保护后台上传至一次系统仿真主机和孪生保护主机中运行。

孪生保护侧

The interface displays several key components:

- 定值 (Settings):** A table of protection parameters such as CT saturation, busbar disconnection, and low voltage protection.
- 保护界面模拟 (Protection Interface Simulation):** A graphical representation of the 110kV busbar differential protection control panel.
- 监视量 (Monitoring Data):** A table of real-time measurements including phase voltages, currents, and CT ratios.
- 录波文件 (Waveform Files):** A list of recorded event files with their respective indices and timestamps.
- 站控层 (Station Control Layer):** A window showing the connection status and IP address of the PM1101 device.
- 报文 (Messages):** A log of communication messages between the protection and the station control layer.

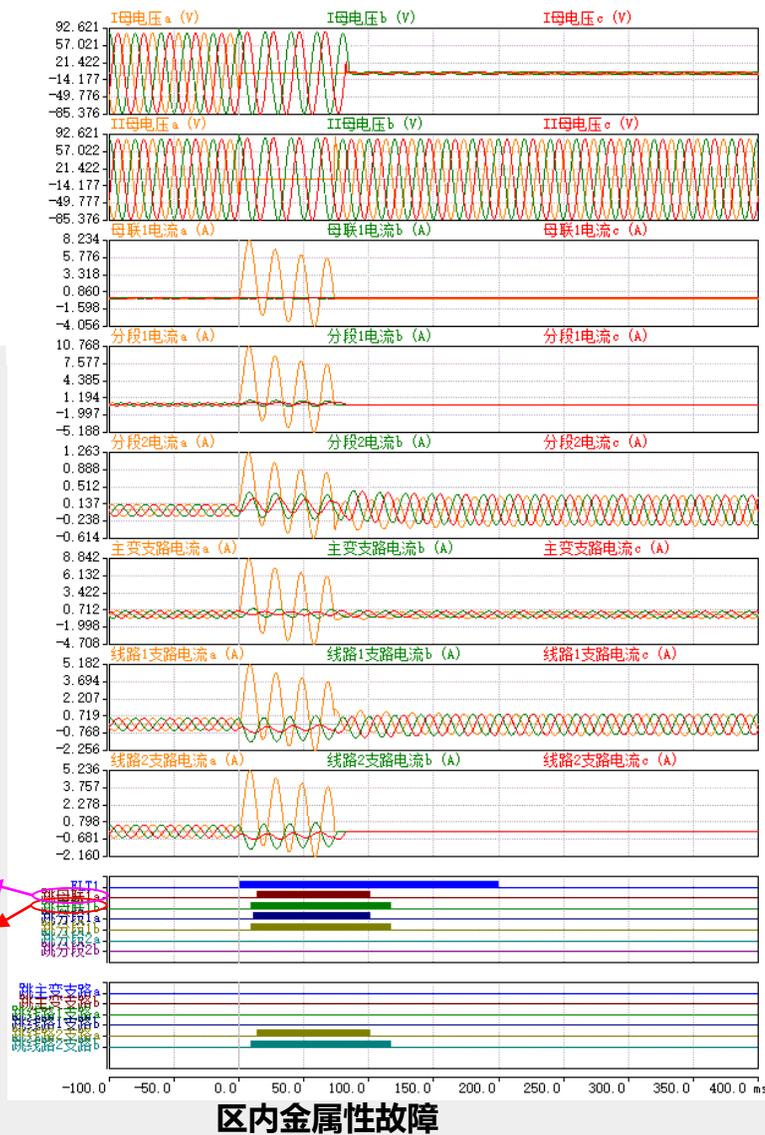
一次仿真系统侧

The interface includes the following elements:

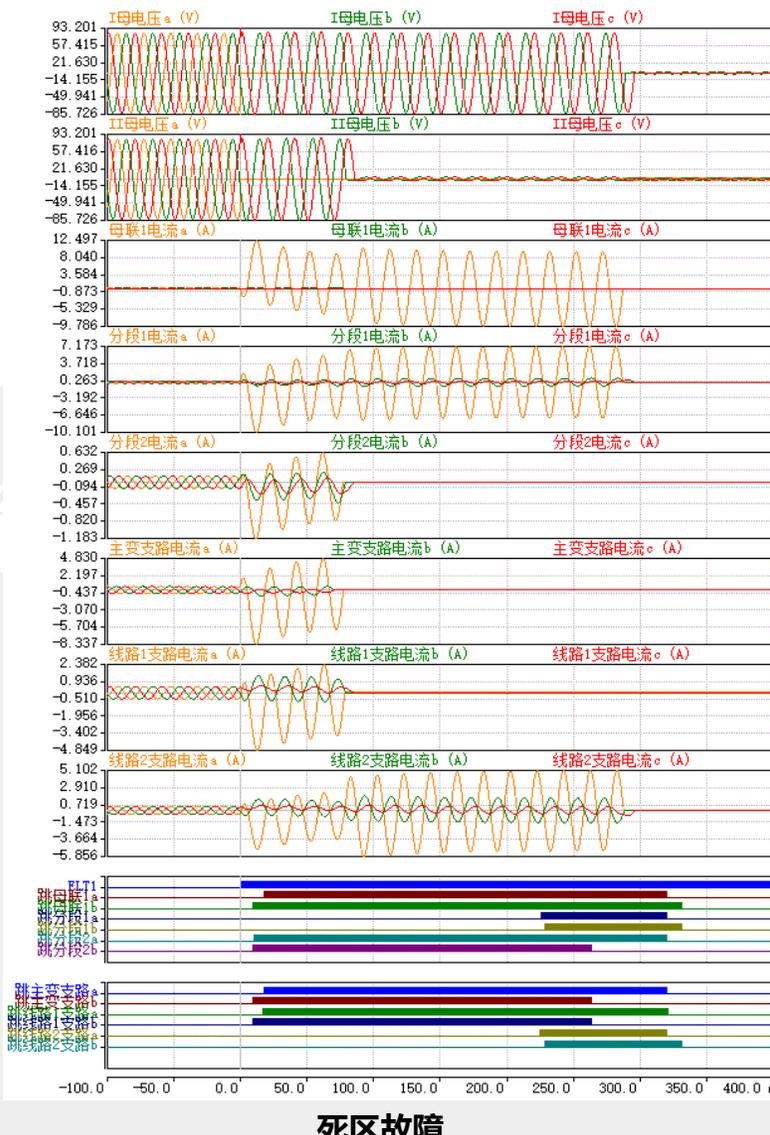
- 虚拟站控层连接 (Virtual Station Control Layer Connection):** A menu for connecting to the PM1101 device.
- 读取保护定值 (Read Protection Settings):** A table listing protection settings for the virtual busbar protection.
- 孪生保护录波读取及下载 (Twin Protection Waveform Reading and Download):** A table for managing recorded waveforms, including file names, sizes, and dates.
- 读取孪生保护上送的报文 (Read Messages Sent by Twin Protection):** A window displaying received messages, such as protection start and busbar differential protection start.

按照动模试验相关标准要求，典型试验项目下孪生保护与实际保护装置的动作行为对比如下：

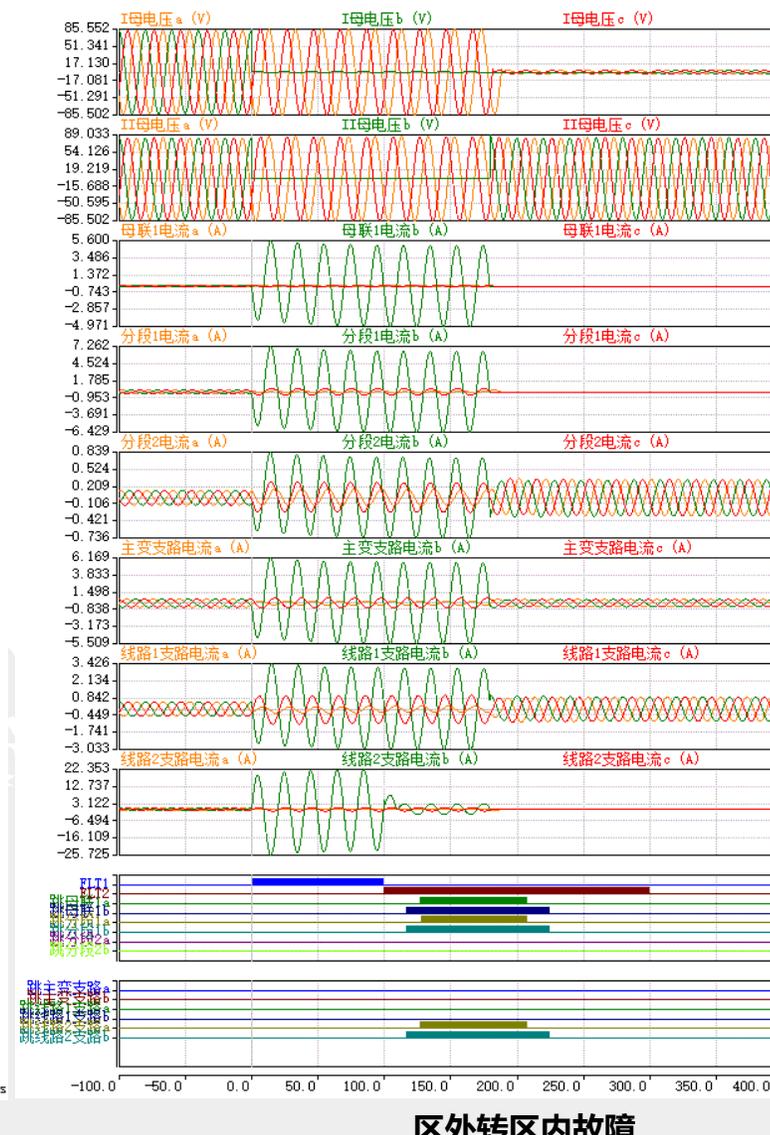
动作行为一致



区内金属性故障



死区故障



区外转区内故障





05 应用展望

保护与控制数字孪生技术的潜在应用方向？

◆ 应用1：系统级测试

- 系统级测试是利用物理仿真系统或实时数字仿真器搭建系统级模型、继电保护装置配置完整的测试，在对录波器或某一类继电保护产品开展系统级测试时，可利用**保护与控制数字孪生体代替其它实际的继电保护/控制装置**来开展系统级测试。



◆ 应用2：智能变电站运维辅助决策

- 通过实时数字仿真器搭建与现场一致的一次系统模型，利用现场继电保护的孪生体代替实际的保护装置接入仿真系统，构建与现场一致的一二次系统闭环仿真环境，为**变电站改扩建、二次回路验证、继电保护定值整定、设备功能配置优化、设备故障隐患诊断及预警和现场反措**等工作提供研究平台支撑。

◆ 应用3：继电保护原理开发与验证

- 通过该平台可开展继电保护**新原理的开发和验证**，为继电保护专业学生及继电保护原理开发人员提供透明化的继电保护逻辑开发及验证平台，缩短继电保护新原理的研发周期，加快新型电力系统建设速度。

◆ 应用4：继电保护专业培训

- 区别于传统继电保护培训的理论知识结合实操的培训方式，继电保护数字孪生系统提供的**保护/控制逻辑、过程层、站控层均透明**的培训平台，可为继保从业者提供多样化的培训方式，有利于人员专业技能强化。

小 结

新型电力系统在电源装机结构和电能生成方式、电网的功能和形态、负荷的结构和特征等方面发生重大变化，使得控制保护等电网二次设备面临重大挑战。

数字化是未来社会发展及电网发展的方向，开普检测通过技术创新，提出了包含**保护/控制原理孪生技术、故障数据处理与接口标准化技术、模型实时运行服务引擎技术、人机交互技术**等在内的保护与控制数字孪生构建关键技术，通过和实际保护装置的对比试验，验证了该方案的可行性，预期能为后续数字孪生技术在电力系统保护与控制领域的进一步研究提供一定的参考。

开普检测将一如既往的坚持“**速度、微笑、帮助客户成功**”的服务理念，致力于研究电力系统保护与控制设备（系统）、智能微电网控制设备（系统）、电动汽车充换电设备（系统）的国际前沿检测技术与试验方法，为电力系统产品质量保证提供专业的检测服务。



谢谢!

中国·许昌开普检测研究院股份有限公司
China • Xuchang KETOP Testing Research Institute Co., Ltd.