



基于智能制造数字底座的复杂装备数字孪生实践

The practice of digital twin technology in complex equipment based on smart manufacturing digital platform

郭翹 Qiao Guo

雪浪云高级副总裁 Senior VP, Xuelangyun

雪浪工业软件研究院助理院长 Deputy Dean, Xuelang Industrial Software Research Institute



从制造业中来 到制造业中去



雪浪云团队介绍 Introduction of Xuelangyun

创始人&CEO
王峰 Feng Wang



- 东南大学计算应用技术硕士研究生
- 曾就职于美国国家仪器、IBM、阿里
- 阿里数加大数据平台创始人、阿里云ET工业大脑创始人
- 江苏省人大代表
- 九三学社无锡市委委员经开主委
- 浙江大学高端装备研究院特聘研究员
- 上海流程智造科技创新研究院理事
- 江苏省双创人才创业领军人才与团队
- 太湖人才计划创业领军人才与团队
- 无锡市十大科技人物
- BE and MS from Southeast University
- Previously in National Instruments, IBM and Alibaba
- Deputy to Jiangsu Provincial People's Congress

雪浪云院士专家团队 Xuelangyun's Academician and Expert



顶层 Top-level	技术 Technology	价值 Value	支撑 Support	人才 Talent
李培根院士 Peigen Li, Academician 中国工程院院士 国家智能制造专家委主任 雪浪工业软件研究院战略委员会主任	杨华勇院士 Huayong Yang, Academician 中国工程院院士 国家智能制造专家委副主任 雪浪工业软件研究院战略委员会副主任	钱锋院士 Feng Qian, Academician 中国工程院院士 国家智能制造专家委副主任 雪浪工业软件研究院战略委员会副主任	王坚院士 Jian Wang, Academician 中国工程院院士 阿里云创始人 雪浪小镇 名誉镇长 “2050大会”发起人	顾佩华院士 Peihua Gu, Academician 加拿大工程院院士 汕头大学前执行校长 教育部“CDIO工程教育模式研究与实践课题组”组长
智能制造 Smart Manufacturing	高端装备 High-end Equipment	流程制造 Process Industry	数字经济 Digital Economy	人才教育 Education

互联网公司（阿里巴巴、华为等）+制造业（NI、SAP、山崎马扎克等）联合组成的创始人&合伙人团队
Founders and partners from internet companies (Alibaba, Huawei, etc.) and manufacturing (NI, SAP, Mazak)



制造业数字化转型的内涵 Essence of Manufacturing Digital Transformation

制造业数字化转型：

将制造流程/资源与工业互联网、人工智能等现代信息技术深度融合，以绿色化低碳化、高值化高端化、数字化智能化为目标，形成物质转化/加工制造中物质流、能量流、价值流的自主智能协同调控机制，实现生产、管理、营销模式的变革。

Deeply integrated with industrial Internet, artificial intelligence and other modern information technologies, with the goal of green and low carbonization, high value and high-end, digital intelligence, forming an independent intelligent collaborative regulation mechanism of material flow, energy flow and value flow in entire manufacturing process, and realizing the transformation of production, management and marketing modes.



现代信息技术驱动的
全流程、全要素数字汇聚

信息数据汇聚
Digitalization
and Aggregation



数字化转型
Digital
Transformation

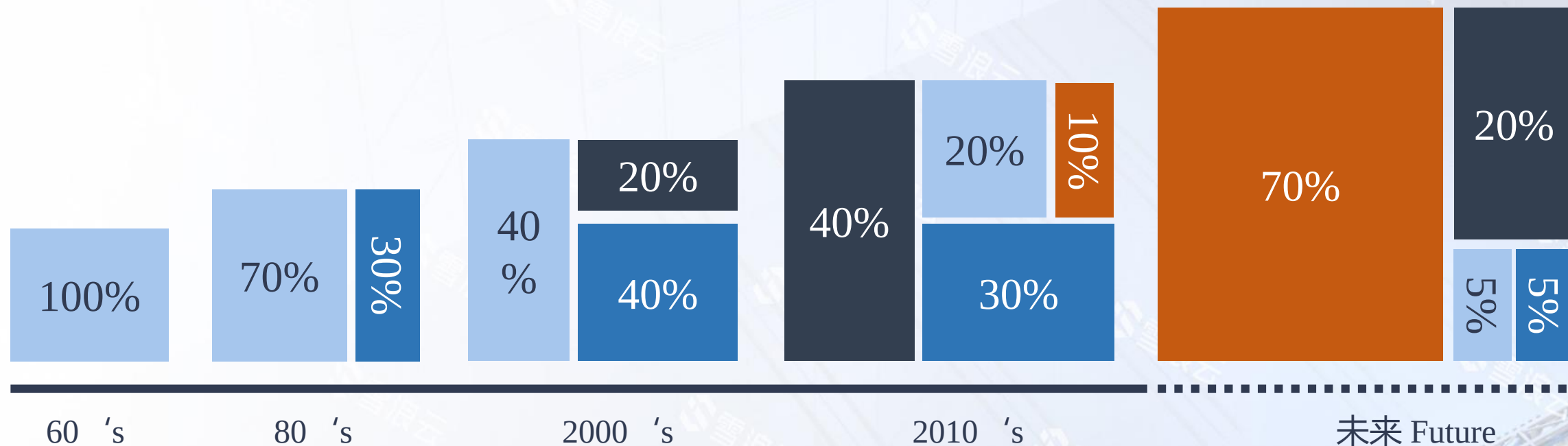


高质量发展
High-quality
Development



工业产品由硬到软（数据化智能化）到软硬结合新模式

Industrial products business model from product-only to service
(Digitalization and Intelligentization)



价值构成

Value Proposition



机械

Mechanics

电子

Electronics

嵌入式软件

Embedded Software

数据服务

Data Service

数字孪生

Digital Twin

工业产品正在从机电产品向数字化智能化网联产品转变

Mechanical and electrical products to digital, intelligent and connected products



高端装备数字孪生应用需求

Digital Twin Application Requirement of High-end Equipment



柴油发动机
Diesel Engine



动力电池
Power Battery



燃气轮机
Gas Turbine



盾构机
TBM



压铸机
Die-casting Machine

高端装备特点

High-end Equipment Characteristics

系统组成复杂 Sophisticated System

涉及机械、流体、电气、控制、能源等多个子系统，各子系统相互耦合，是高度复杂和非线性的集成系统。

Coupled sub-system, nonlinear system

研制周期长 Long Development Cycle

研制过程涉及机、电、液、控、化、热等多个物理学科领域，涉及多个部门的研发协同，迭代设计流程长。

Multi-physics and multi-discipline, coordination of different R&D development

工作环境恶劣 Rugged Environment

在复杂恶劣环境中易发生各种故障，会造成装备性能下降，影响装备运行的安全性和可靠性。

Degradation in rugged environment leads to the concern of safety and reliability

运维成本高 High Maintenance Cost

部件维修更换成本高，耗时长，导致装备长时间停机，造成较高的经济损失。

Unscheduled downtime increases the maintenance cost

数字孪生技术为解决高端装备满足复杂真实工况要求的研发设计、生产制造、运行维护提供了新的途径

Digital twin technology provides new method to overcome the challenges of high-end equipment R&D, manufacturing and maintenance for complicated working environment



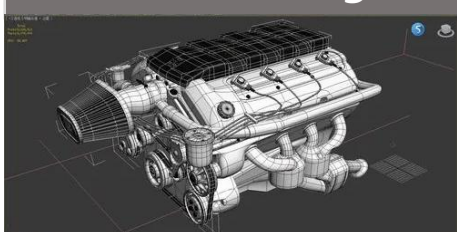
复杂装备设计到运维：业务综合痛点

Overall Challenges from Design to Maintenance for Complex Equipment

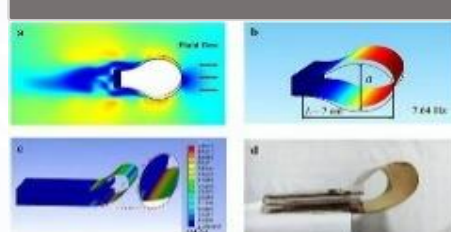
设计 Design

运维 Maintenance

产品设计 Design



仿真分析 Simulation



孪生模型 Digital Twin



运维服务 Maintenance



大量自定义文档、模型、数据和审批流程，人工操作管理，人员协同效率低下，辅助工具不完备

Customized design documents, models, data and approval process, manual operation, low collaboration efficiencies, incomplete auxiliary modules



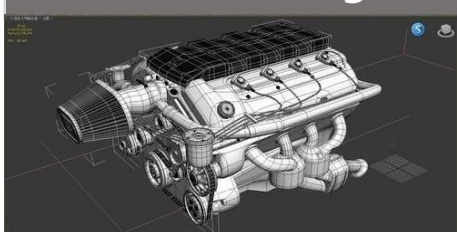
复杂装备设计到运维：业务细分痛点

Detailed Challenges from Design to Maintenance for Complex Equipment

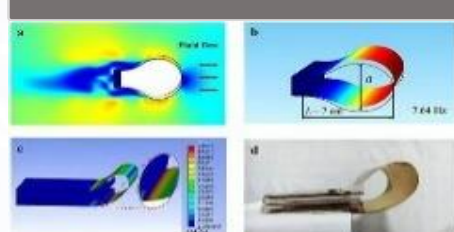
设计 Design

运维 Maintenance

产品设计 Design



仿真分析 Simulation



孪生模型 Digital Twin



运维服务 Maintenance



难度大

High Difficulty

要求高

High Requirement

体系缺

Incomplete Process

1

设计仿真 Design and Simulation

- 研发过程工具异构繁多，复杂样机构建困难。
 - 部门与人员间协作困难，模型共享复用率低。
 - 模型实物关联弱，精度低。
- Lack of platform to coordinate all the CAD/CAE toolchain. Inconsistency between simulation and physical testbed.

2

孪生建模 Digital Twin

- 复杂产品孪生模型构建难
- 孪生模型精度、实时性要求高
- 孪生模型动态可视化要求高

Challenges of modeling complex product digital twin. Challenges of real-time performance, accuracy, and visualization of digital twin.

3

运维服务 Maintenance

- 运维服务体系不健全
- 运维服务智能化程度不高
- 大量数据缺乏挖掘应用

Incomplete MRO process and lack of intelligentization. Lack of data mining.

建模计算与应用开发、数据连接与集成管理工具及平台缺乏

Lack of digital platform for hybrid modeling, data aggregation and coordination, integrated management, and thin application software development



制造业不仅仅需要一些工业软件，更要一个“数字空间”的整体系统

Manufacturing digital transformation not only needs a set of industrial software, but also a digital platform

用户需求

User Requirement



工业软件、APP 研发需求

软件工程师

Software Engineer: industrial software, SaaS APP



工业建模、仿真、 优化

业务工程师

Business Engineer: factory modeling, simulation, optimization



数据、AI与计算 需求

算法工程师

Algorithm Engineer: Data, AI, computing

设计&研发

R&D



智能工业软件&APP群
Smart industrial software/APP



智能化产品
设计加速及
仿真优化
Smart design and
simulation optimization



数字样机
&数字孪生
Digital prototyping
& twin

采购&计划

Purchase & Planning



工厂设计
与供需分析
优化
Factory design, supply
and design analysis



工厂仿真与实时优化
Factory simulation and
real-time optimization

排产&生产

Scheduling & Production



实时动态
生产计划与
工艺优化
Real-time, dynamic
planning and scheduling

仓储&物流

Warehouse & Logistics



供应链优化
Supply chain
optimization



供应链
数字孪生
Supply chain digital twin

MRO

Maintenance Repair
Operation



资产生命
周期优化
Asset lifecycle
optimization



装备/产品
数字孪生
Equipment digital twin



基于模型的需求、设计、制造、运维一体化，从「资源协同」到「操作协同」

Incorporated with design, manufacturing and maintenance, from resources coordination to operational coordination



丰富的功能性内置组件库、松耦合组件化数据中台、聚焦于工业场景的业务中台

Rich functional toolkit libraries, loose-coupled data platform and industry-oriented business platform



边缘计算

Edge Computing

数据中枢

Data Net

数据建模

Data Modeling

联合仿真

Co-simulation

并行计算

Parallel Computing



雪浪OS：智能制造数字底座

Xuelang OS: Smart Manufacturing Digital Platform



■ 上层应用层

Application Layer

底座孵化新型工业APP以及工业软件“链”：分布式、智能网联、自成长

Next generation of Industrial APP

■ 组件开发层

Component development layer

数据与AI组件&工业机理组件

Data, AI and industrial knowledge component library

■ 底层支撑系统

Fundamental supporting layer

提供新型计算与存储的系统级服务，如混合流计算、分布式并行计算、求解引擎、新型数据库引擎等

Mixed computing, distributed parallel computing, solver engine, new database engine

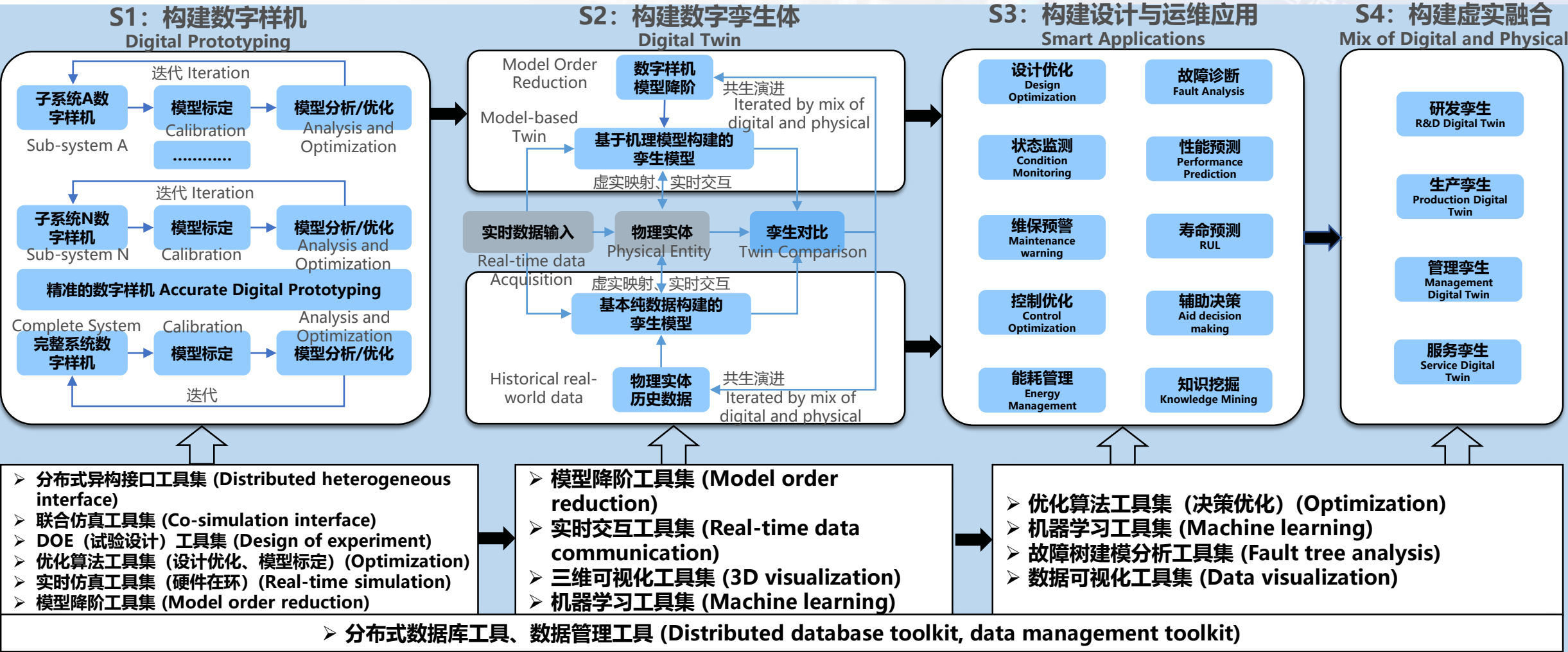


基于雪浪OS的数字孪生技术路线：数字样机->数字孪生->智能应用->虚实融合

Xuelang OS based Digital Twin Technology Roadmap: Digital Prototyping->Digital Twin->Smart Application->Mix of Digital and Physical

业务

工具



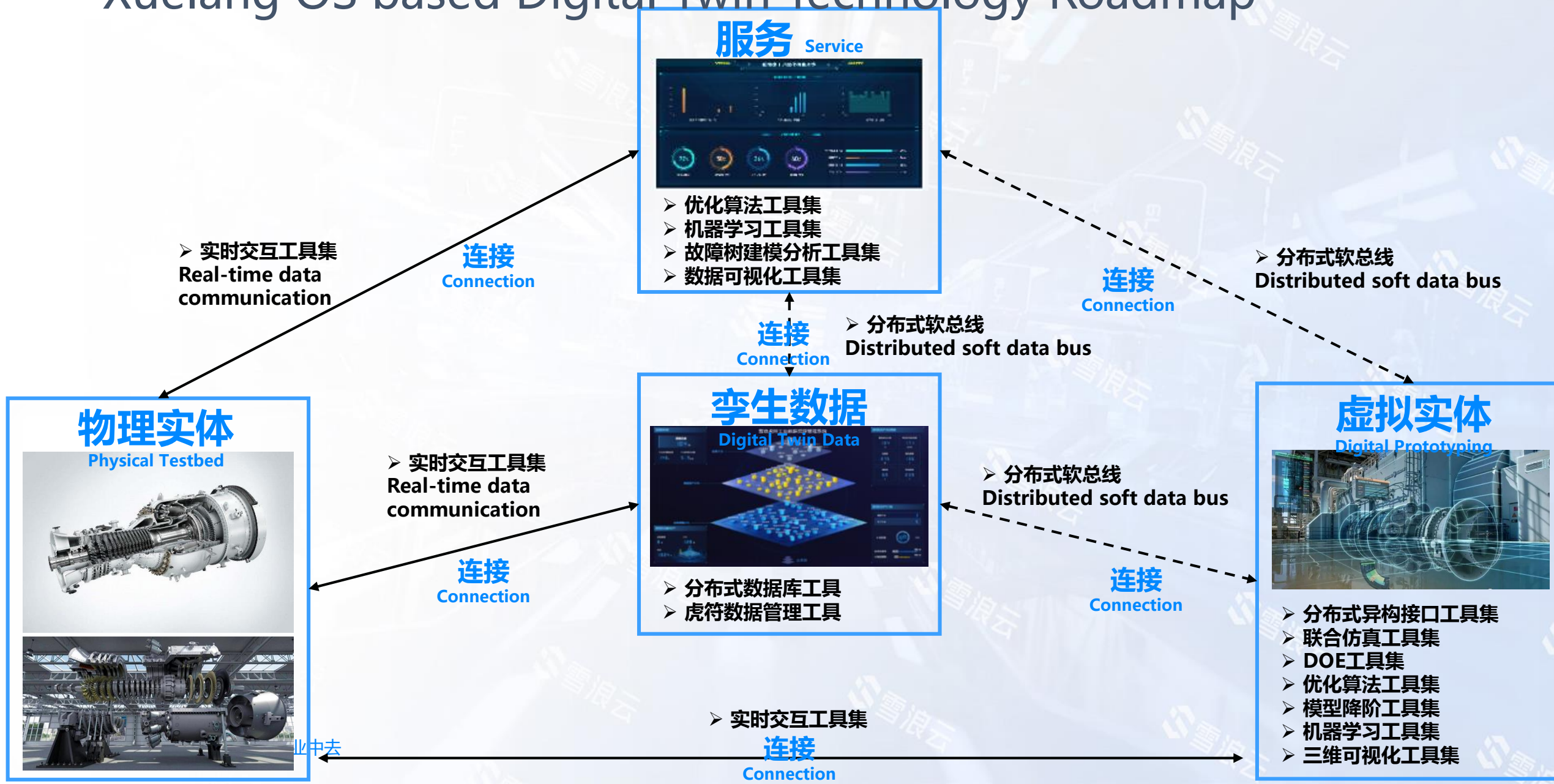
雪浪OS：智能制造数字底座

Xuelang OS: Smart Manufacturing Digital Platform



基于雪浪OS的数字孪生技术路线

Xuelang OS based Digital Twin Technology Roadmap





Xuelang OS-based New Industrial Software: Equipment Design and Maintenance Integration

 雪浪云 从制造业中来 到制造业中去



核心工具集：分布式异构仿真接口工具集

Key Toolkit: Distributed heterogeneous simulation interfaces

亮点 Features

1. 30+ 仿真接入协议标准化：无需脚本
支持多学科协同优化仿真

30+ CAE supported

2. 异构仿真调用网关和仿真代理服务：
利用所有可用的计算资源，跨平台和
操作系统协调仿真任务

Gateway and agent service of heterogeneous
simulation across different platforms and OS

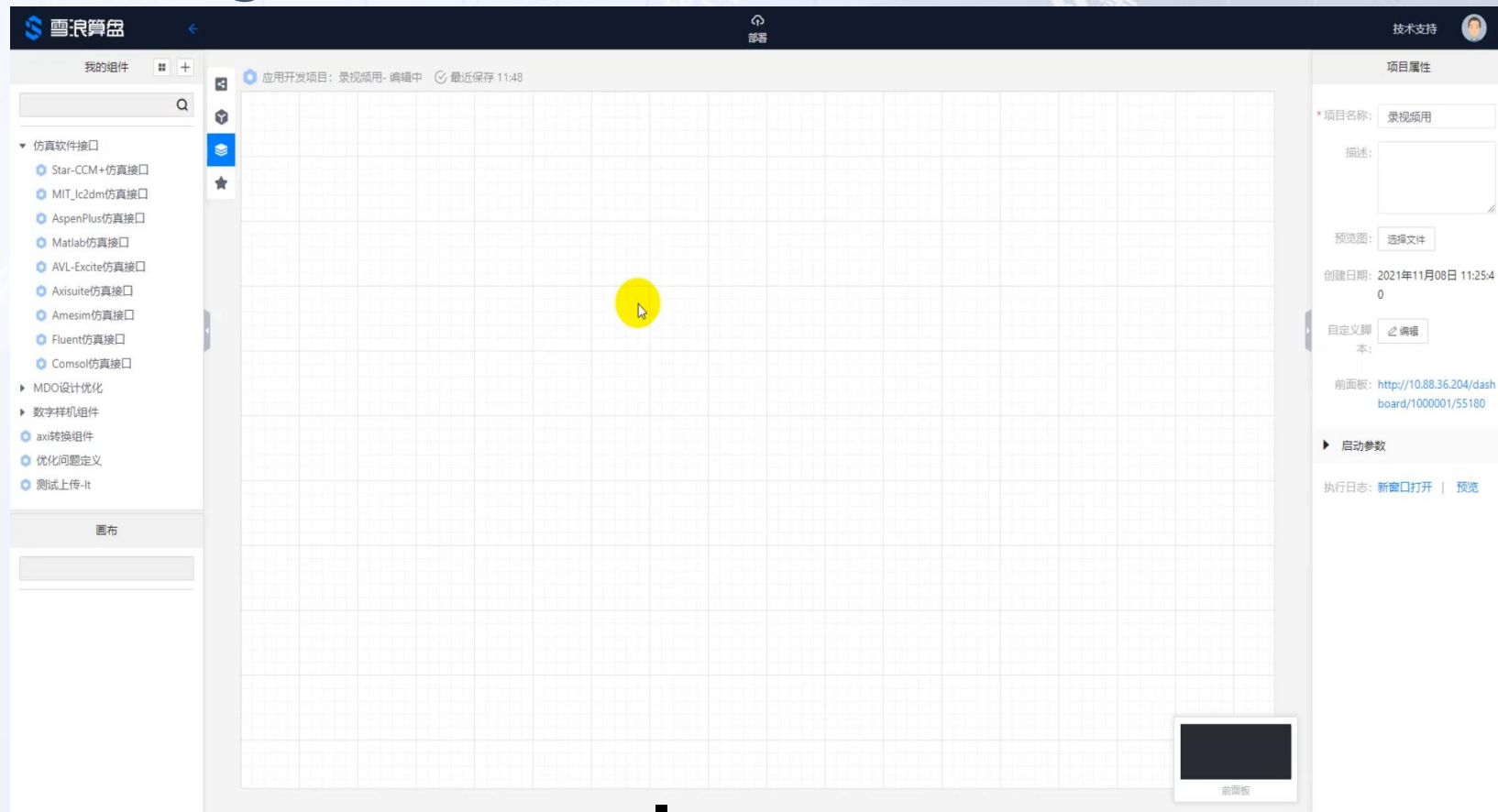
3. 仿真任务流程自动化

Graphical programming of automatic simulation tasks

价值 Values

解决多软件协作仿真任务流程繁杂问题，
复杂装备数字样机和数字孪生的混合建
模难题，提升研发效率

Coordination of multiple CAE tools, overcome the
challenges of hybrid modeling and increase R&D efficiency





核心工具集：优化/标定自动化工具集

Key Toolkit: Optimization/calibration automation

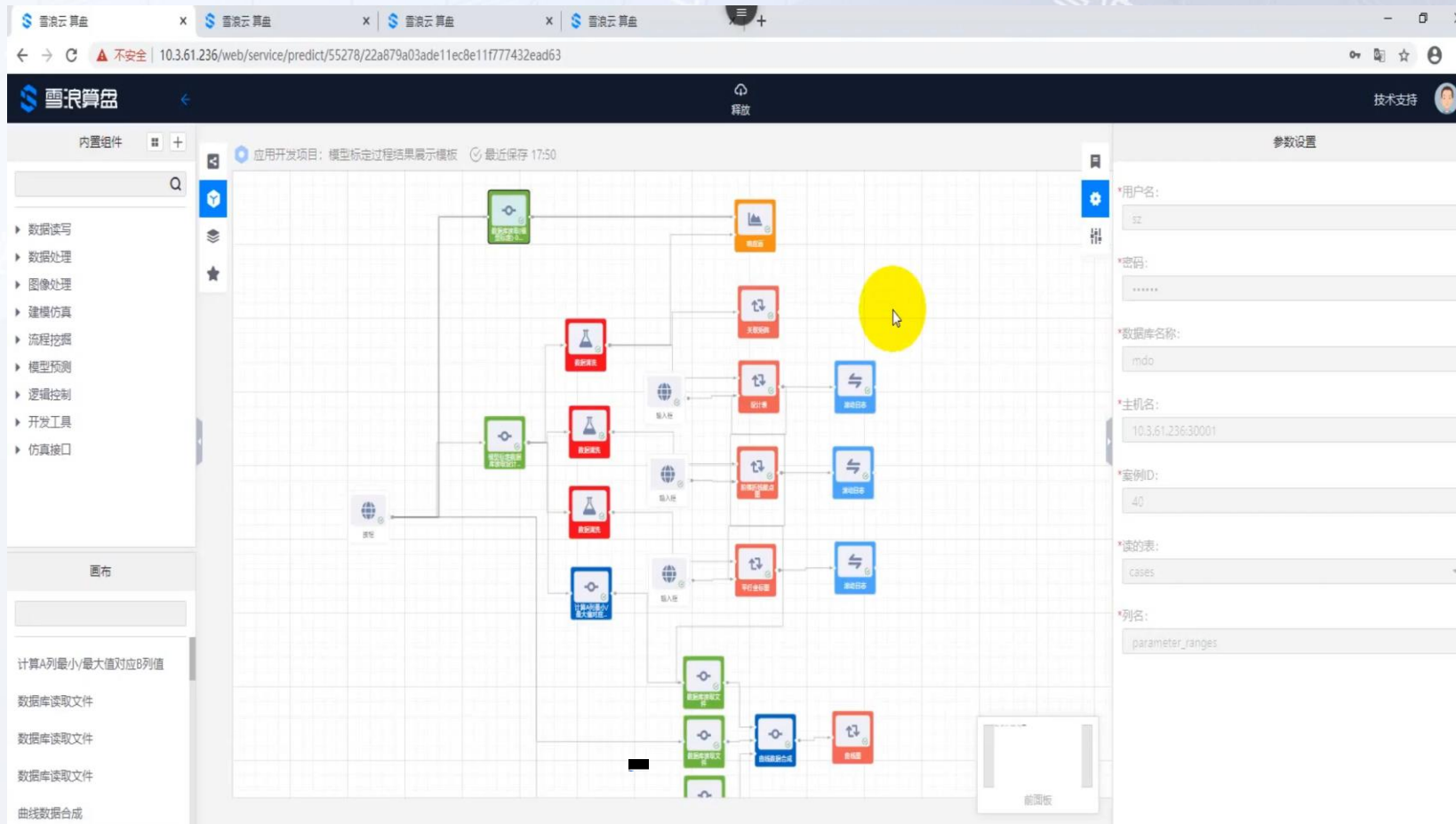
亮点 Features

1. 完整工具集：试验设计、优化算法、优化标定引擎、流程自动化组件等
Complete feature set
2. 高效搜索与优化：最少的仿真时间和成本来确定性能更高的设计
High-efficient search and optimization
3. 设计性能可视化：获得内部变量间关系，促进设计评审
Design performance visualization

价值 Values

专注设计而非工具本身，推动更大的产品创新

Design oriented not the tool itself, to drive more innovation





核心工具集：模型降阶工具集

Key Toolkit: Model Order Reduction

亮点 Features

1. 针对每类仿真模型，提供多种模型降阶算法，获取最佳降阶模型

Multiple algorithms provided based on different simulation type to achieve best performance

- 稳态零维 (Steady-state zero dimension): Kriging, Balanced Truncation, Krylov, NARMAX
- 稳态多维 (Transient-state zero dimension): POD-RBF, DMD, MLP, LSTM-Net, Encoder-Decoder-Net
- 瞬态零维 (Steady-state multidimensional): 稀疏空间非线性系统辨识方法, 多项式自适应模型, MLP
- 瞬态多维 (Transient-state multidimensional): CNN, NLP Transformer + Fourier Transform

2. 支持千万网格的快速计算、高精度模型降阶

Support dozens of millions of meshing elements, fast model order reduction with high accuracy

价值 Values

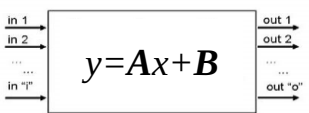
1. 解决复杂模型计算量大、计算耗时长、实时性差等问题

Solve the problems of computation time and real-time performance

2. 提升仿真速度，可用于仿真优化加速、实时孪生模型搭建

Increase simulation speed, real-time digital twin realization

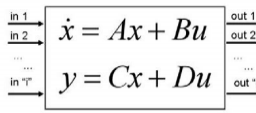
机理仿真类别 Mechanism Simulation Type



稳态零维

Steady-state

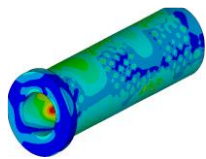
zero dimension



瞬态零维

Transient-state

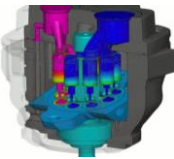
zero dimension



稳态多维

Steady-state

multidimensional



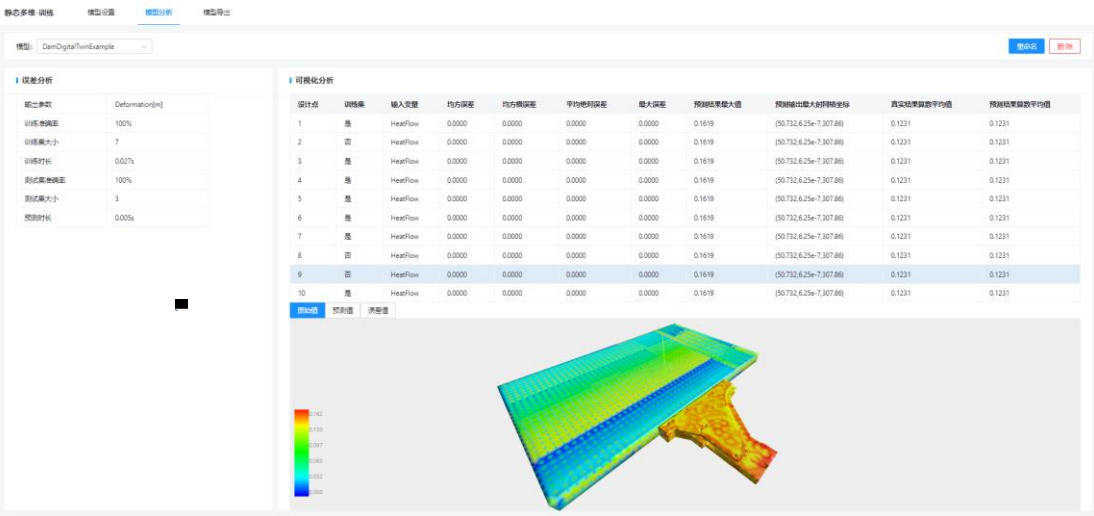
瞬态多维

Transient-state

multidimensional

降阶模型应用效果 (某大坝应力场)

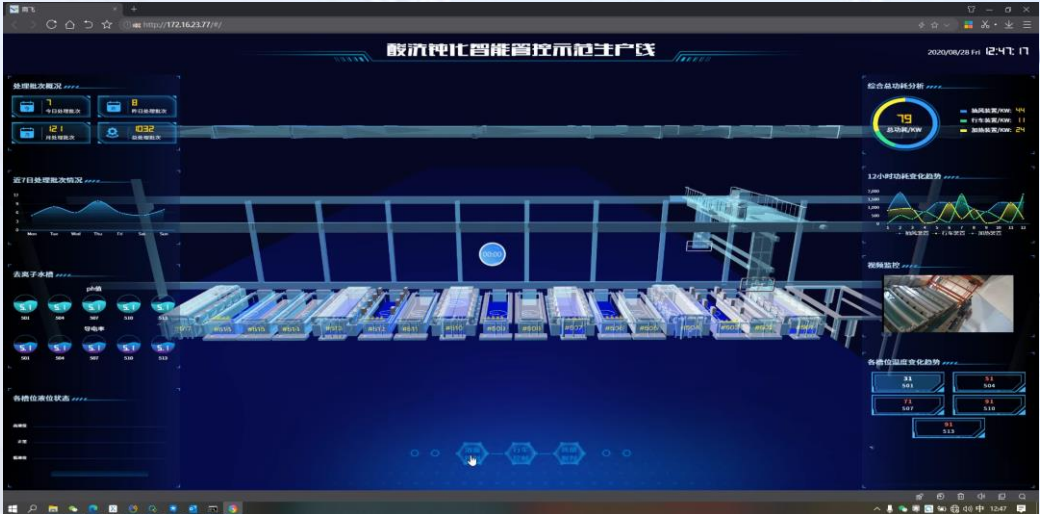
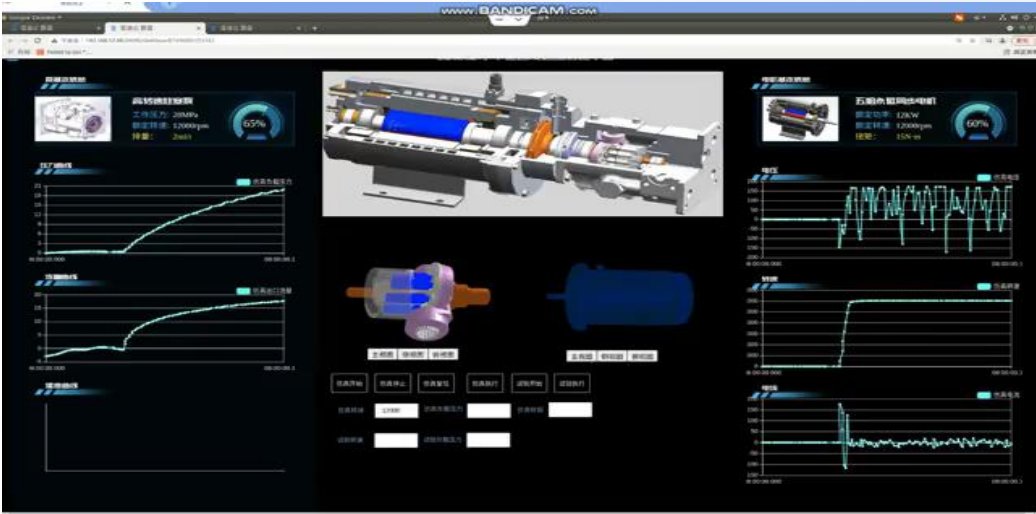
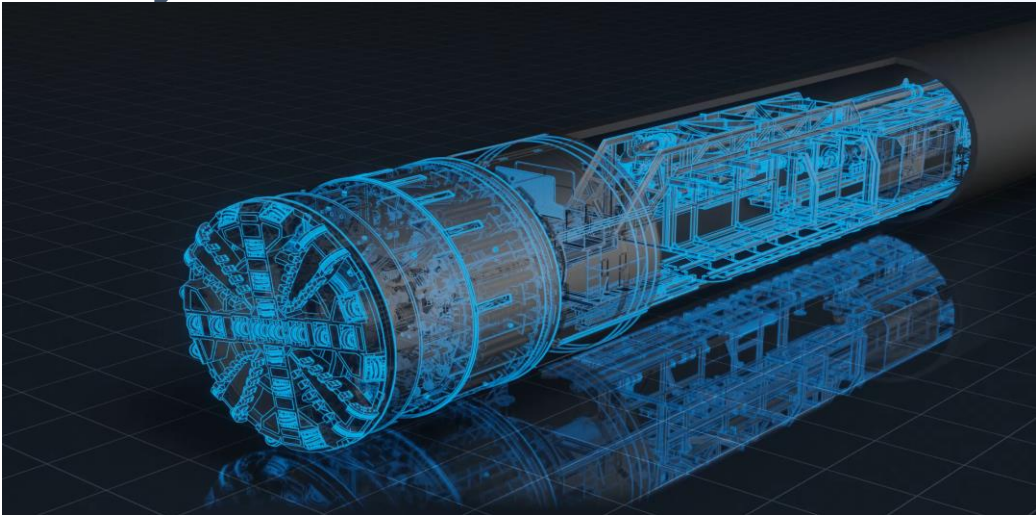
Application Effect of Model Order Reduction (Dam Stress Field)





核心工具集：三维可视化工具集

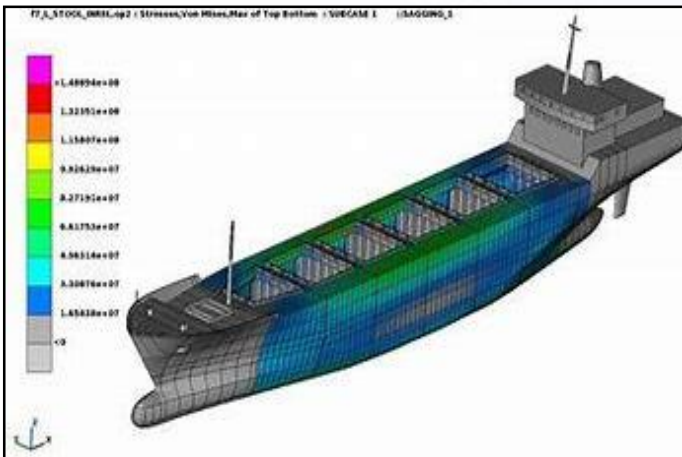
Key Toolkit: 3D Visualization





数字孪生应用场景：几何模型-物理模型-行为模型-规则模型

Digital Twin Applications: Geometric Model, Physical Model, Behavior Model, Rule-based Model



1、虚拟测量 Virtual Metrology

(状态数据)
Condition Data

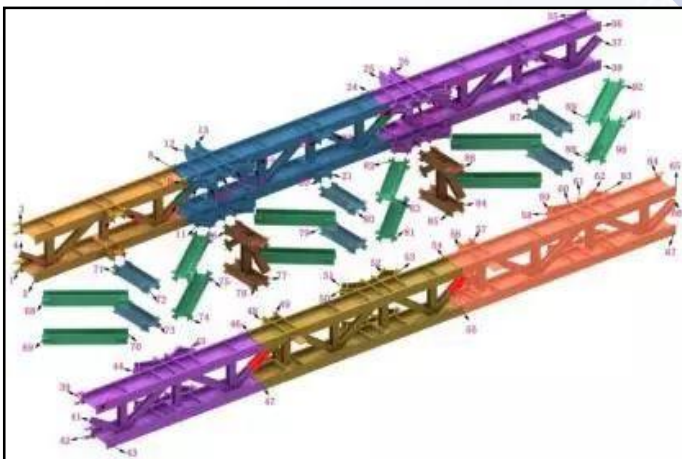
2、故障模拟 Fault Simulation

(故障数据)
Faulty Data



3、虚拟试验 Virtual Experiment

(试验数据)
Experiment Data



4、装备预研 Performance Prediction

(性能数据)
Performance Data

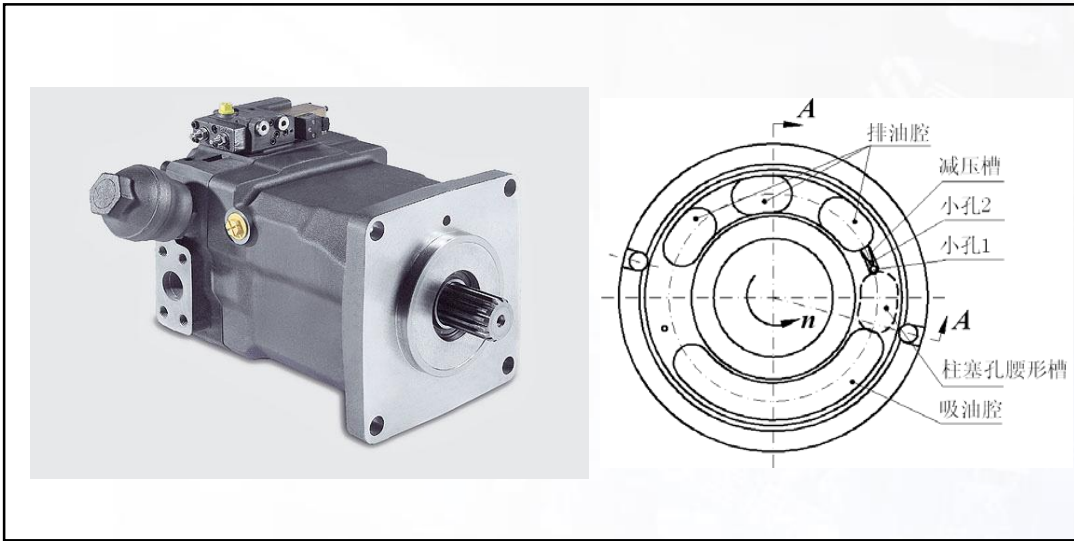


应用案例 Case Study



智能设计（多学科仿真设计优化、快速设计）：轴向柱塞泵智能设计平台

Intelligent Design (Multi-physics and multi-discipline): Axial Piston Pump



客户痛点 Painpoint

- **产品设计优化困难**：产品三维建模到仿真分析依赖人工，且仿真软件割裂，多学科仿真分析耗时长、流程复杂，导致优化设计迭代慢。

Challenges in design optimization: manual process from CAD to CAE; isolation between CAEs; long computation time of multi-physics and multi-discipline simulation.

雪浪方案 Xuelang Solution

- **建模仿真一体化**：打通三维建模与仿真分析，实现流程一体化、自动化。柱塞泵机电液控系统联合仿真分析，流场、声场、应力场多物理场仿真分析。

Integration with both modeling and simulation. Co-simulation including flow field, sound field, stress field in one platform.

- **仿真优化加速**：使用降阶模型代替多学科仿真模型，加速仿真优化过程。

Model order reduction to increase simulation speed.

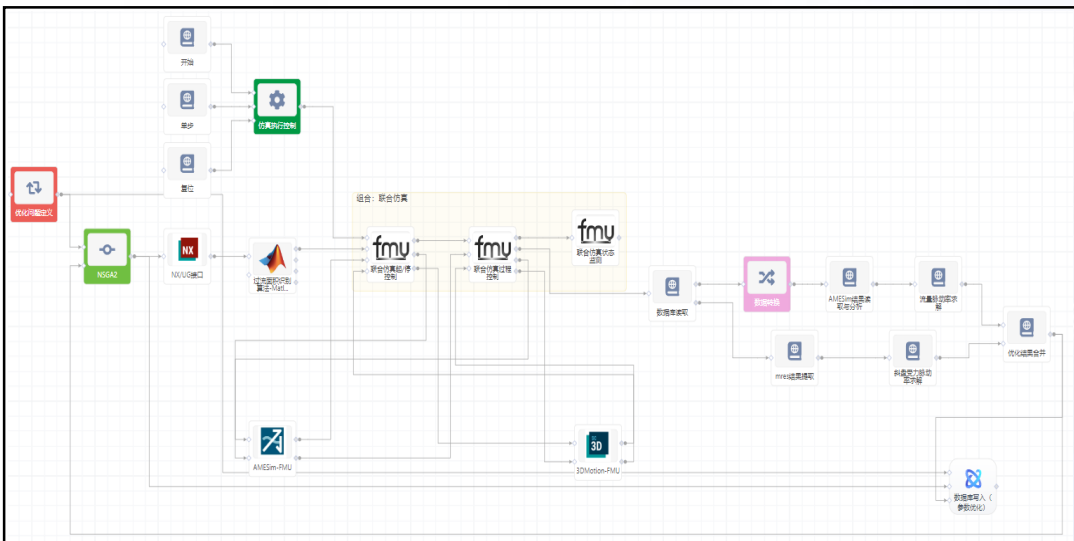
效果&意义 Impact and Values

- **工具一体化**：智能设计功能对标西门子Heeds，一体化平台实现国内首创，实现设计-仿真-优化一体化。

Localized integrated platform including design-simulation-optimization, benchmarking against Siemens Heeds.

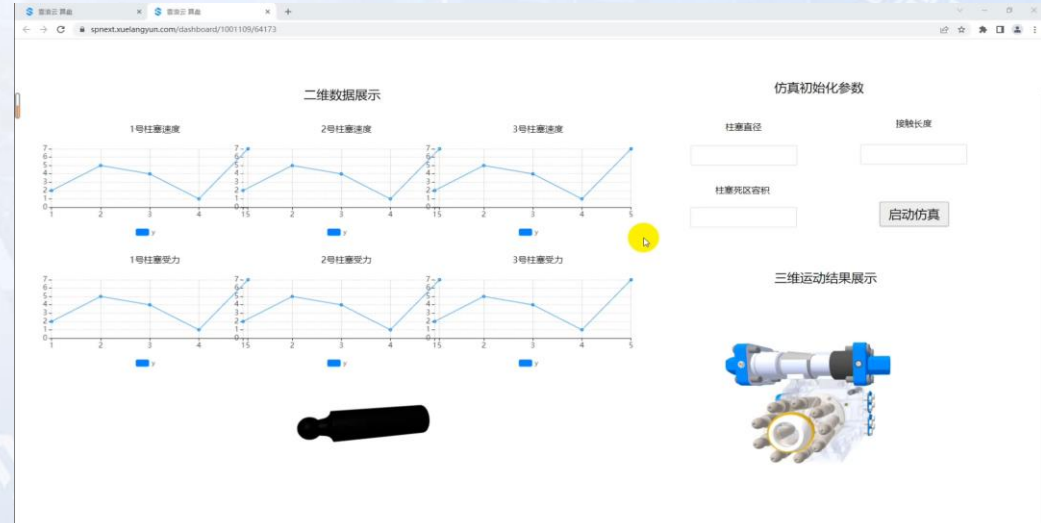
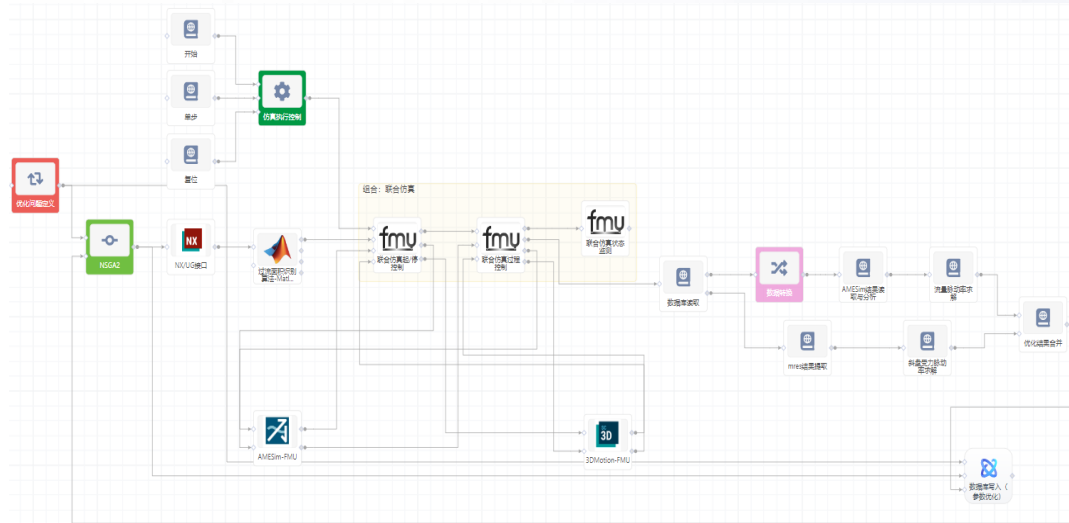
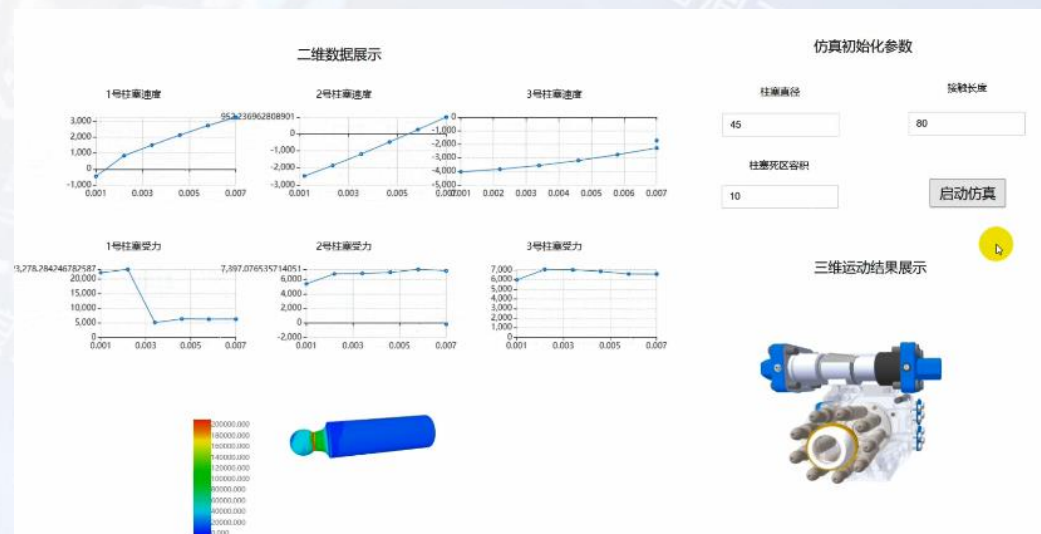
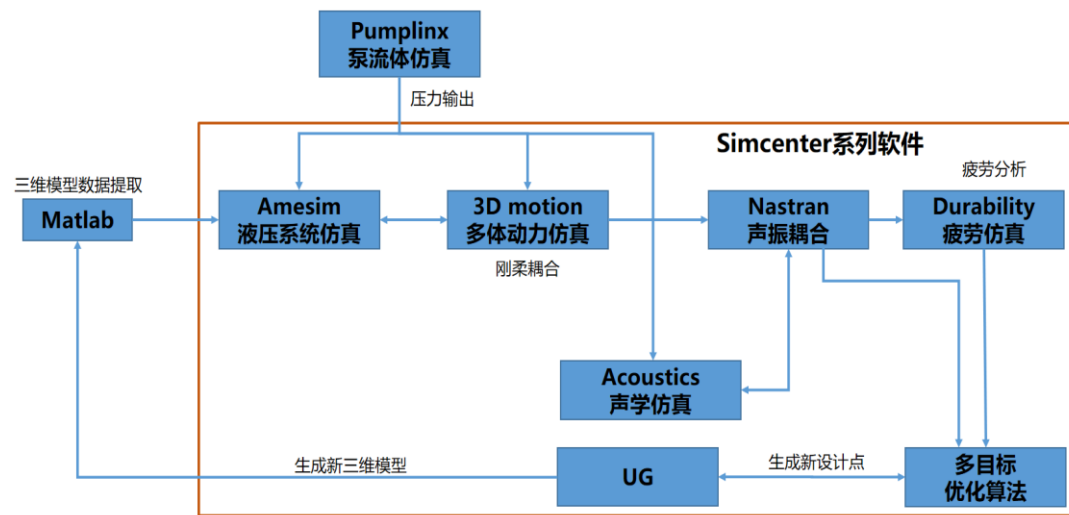
- **产品快速设计**：多型号柱塞泵的设计仿真优化在平台便捷化、通用化实现，形成面向柱塞泵产品的快速设计软件。

Rapid design: New Axial Piston Pump design software for multiple models.



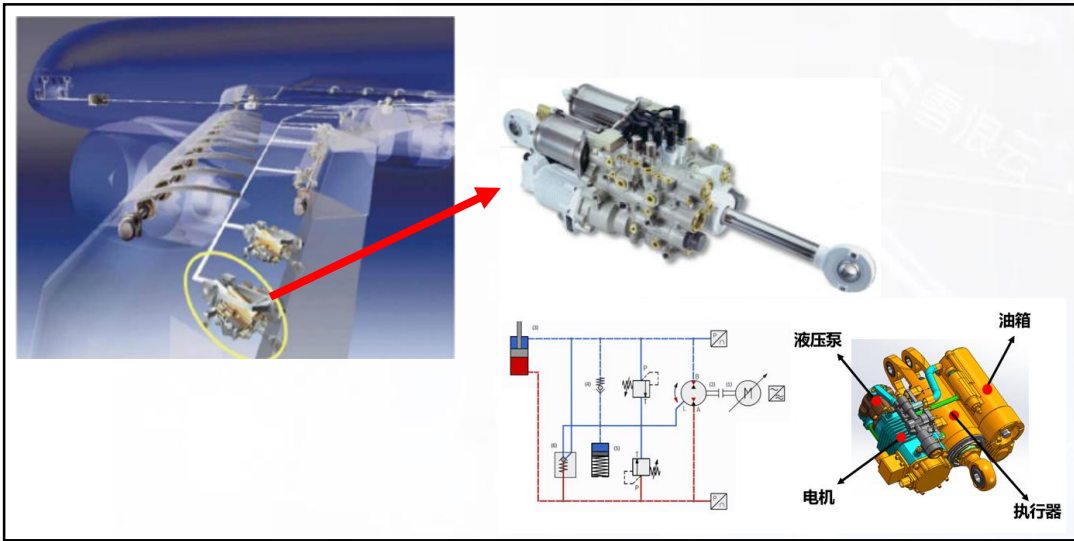
Intelligent Design (Multi-physics and multi-discipline): Axial Piston Pump

业务框架 Architecture



智能运维（故障模拟、综合运维）：电动静液压执行器（EHA）数字孪生平台

Intelligent Maintenance (Fault Simulation, Comprehensive Maintenance): Electro-Hydrostatic Actuator



客户痛点 Painpoint

- **数字孪生搭建困难**：EHA是高度集成的机电液装备，模型涉及系统仿真模型与多物理场仿真模型，数字孪生体搭建与融合困难，需要数字孪生工具集。
- **数据稀缺，运维服务、动态机制分析应用开发困难**：需要大量数据，构建运维与分析模型（故障诊断训练、传感映射规律分析、失效机理分析等），但故障模拟物理试验难度大、成本高，故障数据、失效数据、传感数据稀缺。

EHA as a highly integrated electromechanical hydraulic equipment, needs multi-physics and multi-discipline co-simulation. Lack of faulty data to achieve intelligent maintenance.

雪浪方案 Xuelang Solution

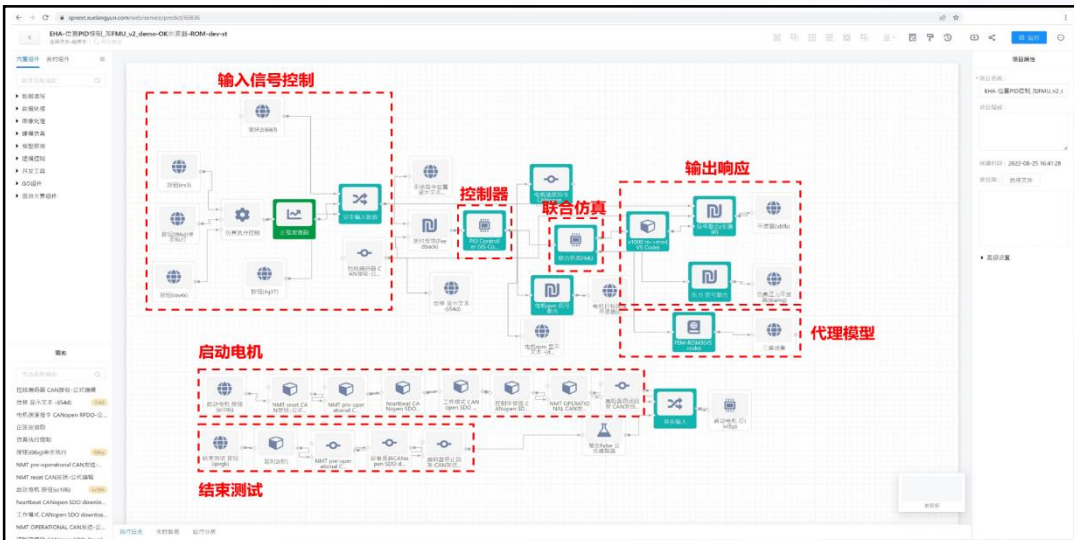
- **基于集成平台搭建EHA数字孪生**：试验数据接入系统仿真与场仿真降阶模型进行实时计算，WebGL+UE5+VR混合动态展示EHA数字孪生体，开发数字孪生平台。
- **基于高精度数字样机的故障模拟**：基于EHA标定后的高精度数字样机开展虚拟故障模拟试验，快速积累大量数据，以供运维人员进行失效特征挖掘、敏感性分析。

Integration with real-time testbed data and simulation data in 3D visualization. Plenty of accurate fault simulation data after model calibration.

效果&意义 Impact and Values

- **复杂装备数字孪生体构建与混合动态呈现**：实现多模型多场耦合模型的数字孪生体构建，数字孪生体混合呈现减少人机交互障碍。
- **故障模拟实现数据积累、助力分析与应用**：便捷的虚拟故障模拟试验实现故障数据、传感数据的快速积累，分析模型（故障诊断模型开发、有限传感映射规律分析、失效机理分析）与应用开发（健康管理）难度得到降低、准确度得到提升。

Improve the design to overcome coupling effect by co-simulation and achieve predicative maintenance by plenty of simulated faulty data.



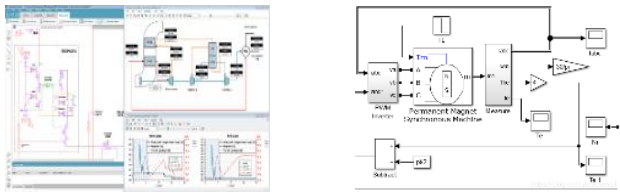
智能运维（虚拟试验、综合运维）：电动静液压执行器（EHA）数字孪生平台

Intelligent Maintenance (Virtual Experiment, Comprehensive Maintenance): Electro-Hydrostatic Actuator

业务框架 Architecture

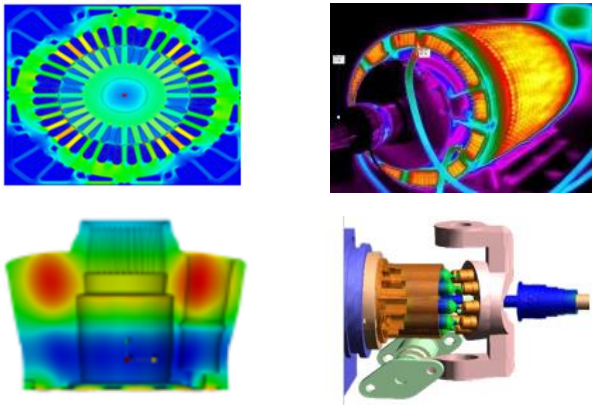
数字样机（机理模型）

系统机理模型

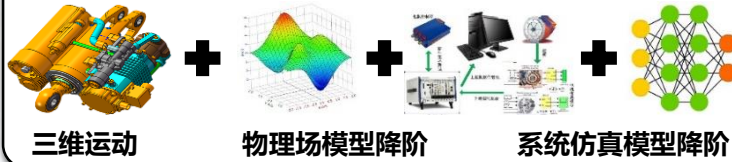


+

物理场机理模型



数字孪生体 (几何模型+物理模型)



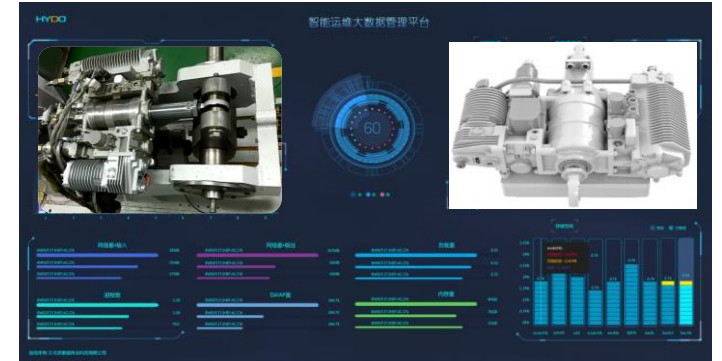
物理实体



数字孪生体 (行为模型+规则模型)



可视化（应用）



资产管理

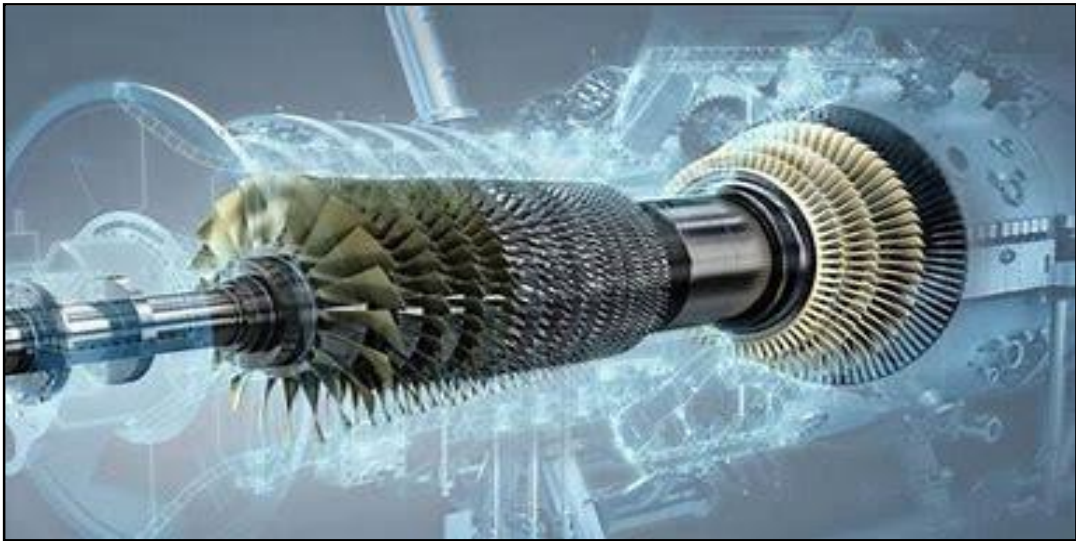
状态监测

控制优化

健康管理

其它应用

智能设计、运维（基于历史数据的智能设计、虚拟试验、综合运维）：燃气轮机数字孪生平台 Intelligent Design & Maintenance (based on historical data): Gas Turbine



客户痛点 Painpoint

- **系统仿真与场仿真关联弱**：系统仿真与关键部件流场仿真分离，流场仿真耗时长，优化设计进程缓慢；仿真模型与实物关联弱，精度有待提升。
- **物理试验周期长难度大**：需要孪生模型进行虚拟实验，为关键部件（压气机）物理试验提供试验指导，以及代替真机进行危险工况的虚拟实验。
- **运维服务缺乏**：燃机运维服务不全且依赖人工，大量运行数据缺乏挖掘。

No co-simulation of flow field simulation and system simulation leads to inaccuracy of digital prototyping. Expensive physical experiment and lack of real faulty data.

雪浪方案 Xuelang Solution

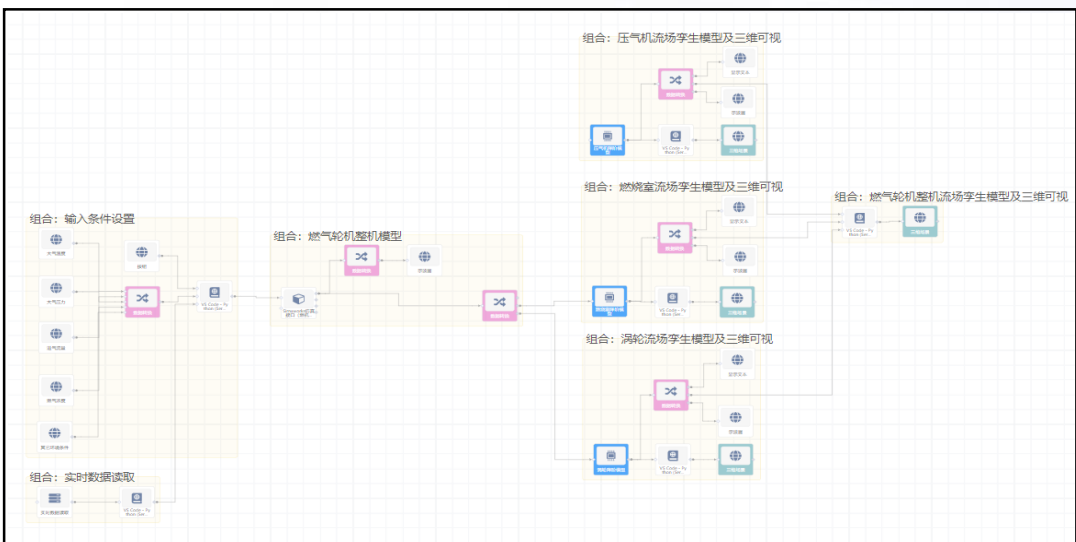
- **构建燃机整机数字样机与孪生模型**：打通系统仿真软件（Simuworks）和流场仿真软件（Numeca等），构建整机的数字样机，降阶构建整机三维流场孪生模型。
- **燃机孪生模型辅助物理试验**：三维流场孪生模型接入实时数据，开展虚拟试验。
- **开发燃机智能运维平台**：开发燃机整机故障诊断、关键部件（热锻件等）寿命预测等运维服务，运行数据与运维模型集成于运维平台，对燃机进行健康管理。

Integrated with Simuworks and Numeca in one platform for easy co-simulation. Virtual experiment is used to achieve predictive maintenance.

效果&意义 Impact and Values

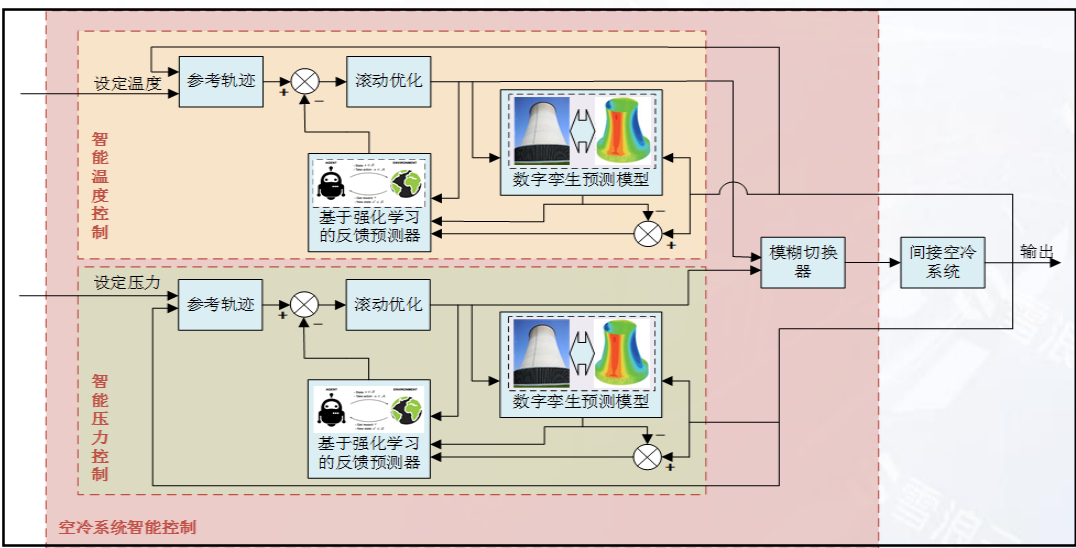
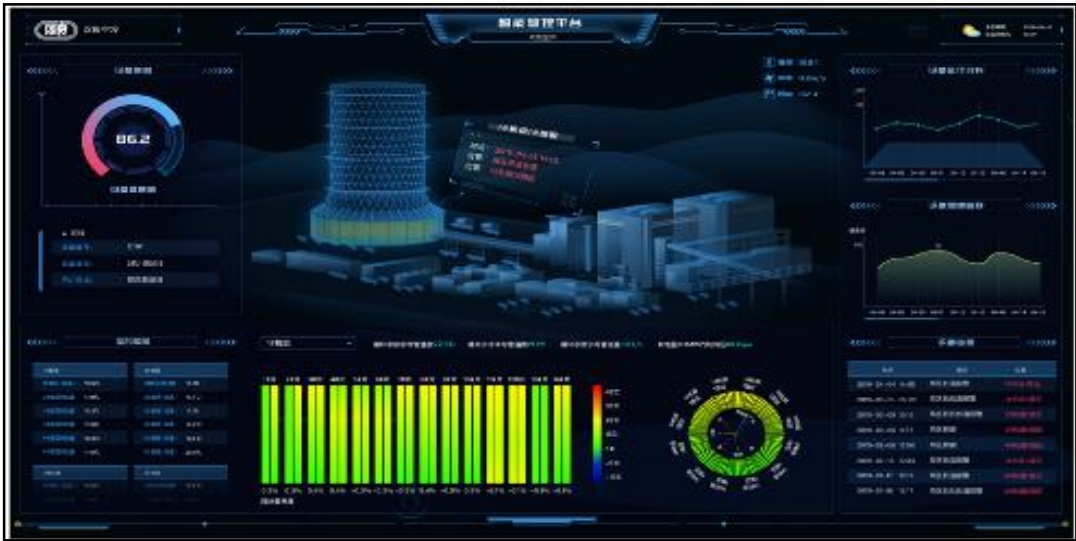
- **设计优化与物理试验效率提升**：提升了模型精度，构建了燃机完整、精确的数字样机和数字孪生，基于数字孪生的虚拟实验实现物理实验指导、危险工况试验代替，提升了物理试验效率。
- **运维服务完善与智能化**：有效挖掘燃机大量历史数据构建运维应用，实现燃机故障排查的智能化、关键部件的预测性维护等，实现燃运维服务完备化与智能化。

Achieve complete, accurate digital prototyping of gas turbine to realize virtual experiment for corner cases. Increase physical validation efficiency and realize predictive maintenance.



智能运维（状态监测、优化控制）：火电厂空冷塔数字孪生平台

Intelligent Maintenance (Condition Monitoring, Control Optimization): Air cooling tower in thermal power plant



客户痛点 Painpoint

- **温度控制滞后：**人工控制滞后，反应不及时，散热器数量多，温度控制不精准且不稳定。
- **维护难度大：**环境气流复杂，无法自适应，散热器冬季防冻压力大，容易损坏管路系统。
- **运行效益低：**汽轮机背压较高，汽轮机组运行效益低。

Manual control process leads to high maintenance cost and low operational efficiency.

雪浪方案 Xuelang Solution

- **孪生模型实现快速预测：**借助模型降阶技术，建立火电厂数字孪生预测模型，实现温度、压力核心指标的快速预测。
- **孪生模型驱动优化控制：**基于火电厂数字孪生模型，采用预测控制和最优控制策略，输出冷端最优运行方案。

Digital twin to achieve rapid prediction and optimized operational control.

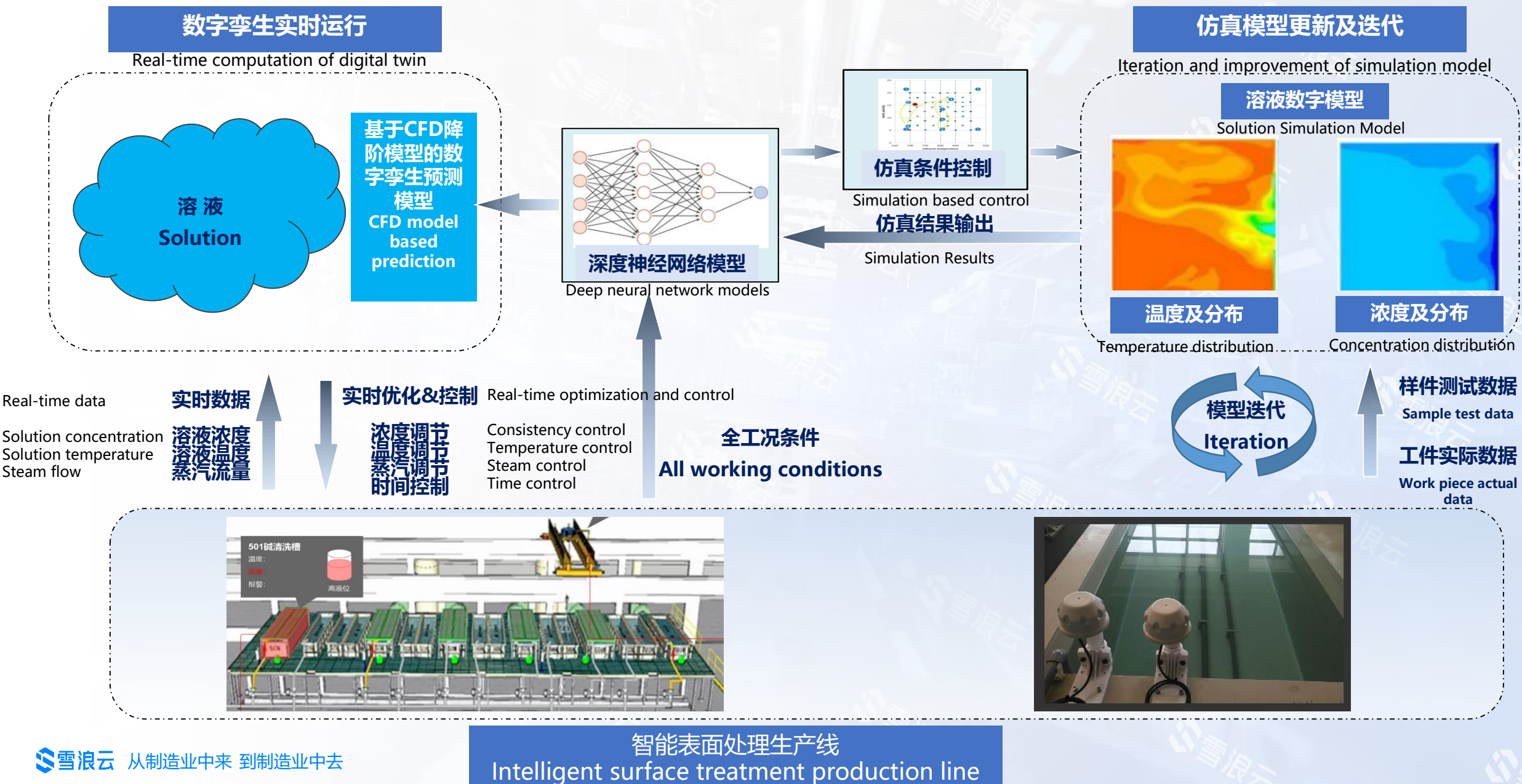
效果&意义 Impact and Values

- **控制策略智能化：**以孪生模型预测结果驱动性能控制的最优决策，实现火电厂温度、压力等的智能控制，提高系统安全裕度，助力火电厂降低冷端的临界低温并提高燃煤效率。水温控制精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，系统临界低温降低 5°C 。
- **运行成本降低：**年度人力成本降低50%，节省燃煤约1%。

Water temperature control accuracy $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, labor cost saving 50%, coal saving 1%

智能运维（状态监测、优化控制）：酸洗钝化车间数字孪生平台

Intelligent Maintenance (Condition Monitoring, Control Optimization): Pickling passivation workshop





感谢观看
Thanks



从制造业中来 到制造业中去

