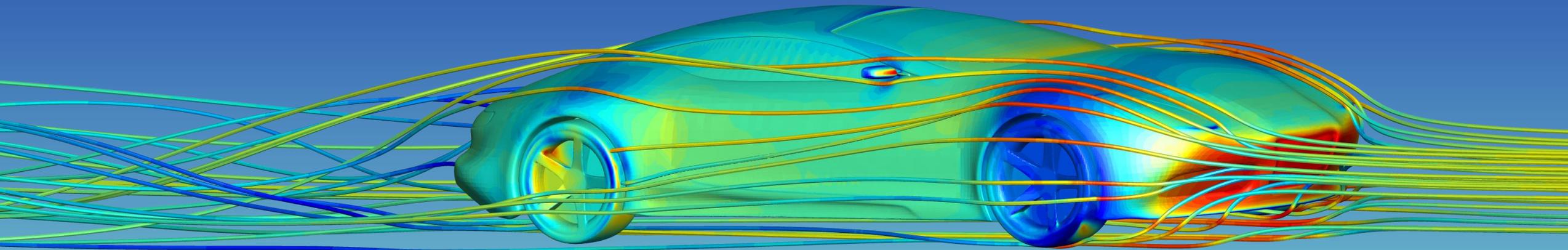


# 工业仿真、人工智能 与数字孪生的深度融合

深圳十洋科技有限公司

施继斌



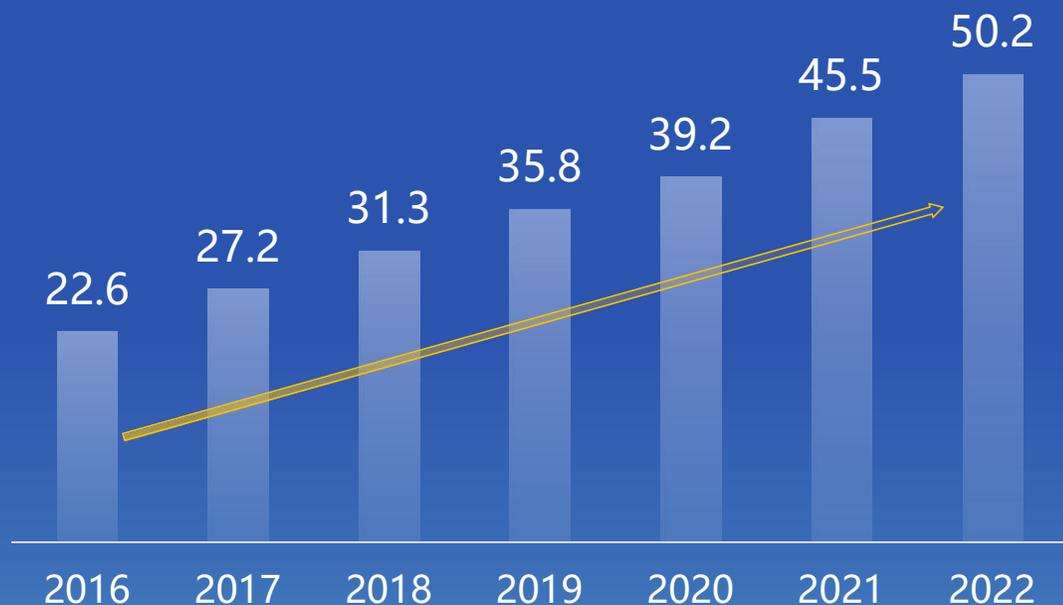
习近平就推进新型工业化作出重要指示强调：把高质量发展的要求贯穿新型工业化全过程，为中国式现代化构筑强大物质技术基础。



中国制造业升级，需要数字技术的支撑



国外巨头在数字技术市场处于强势领先地位，国内企业散弱小



2016-2022年我国数字经济规模 (万亿元)



工业软件



人工智能



数字孪生



大数据



云计算

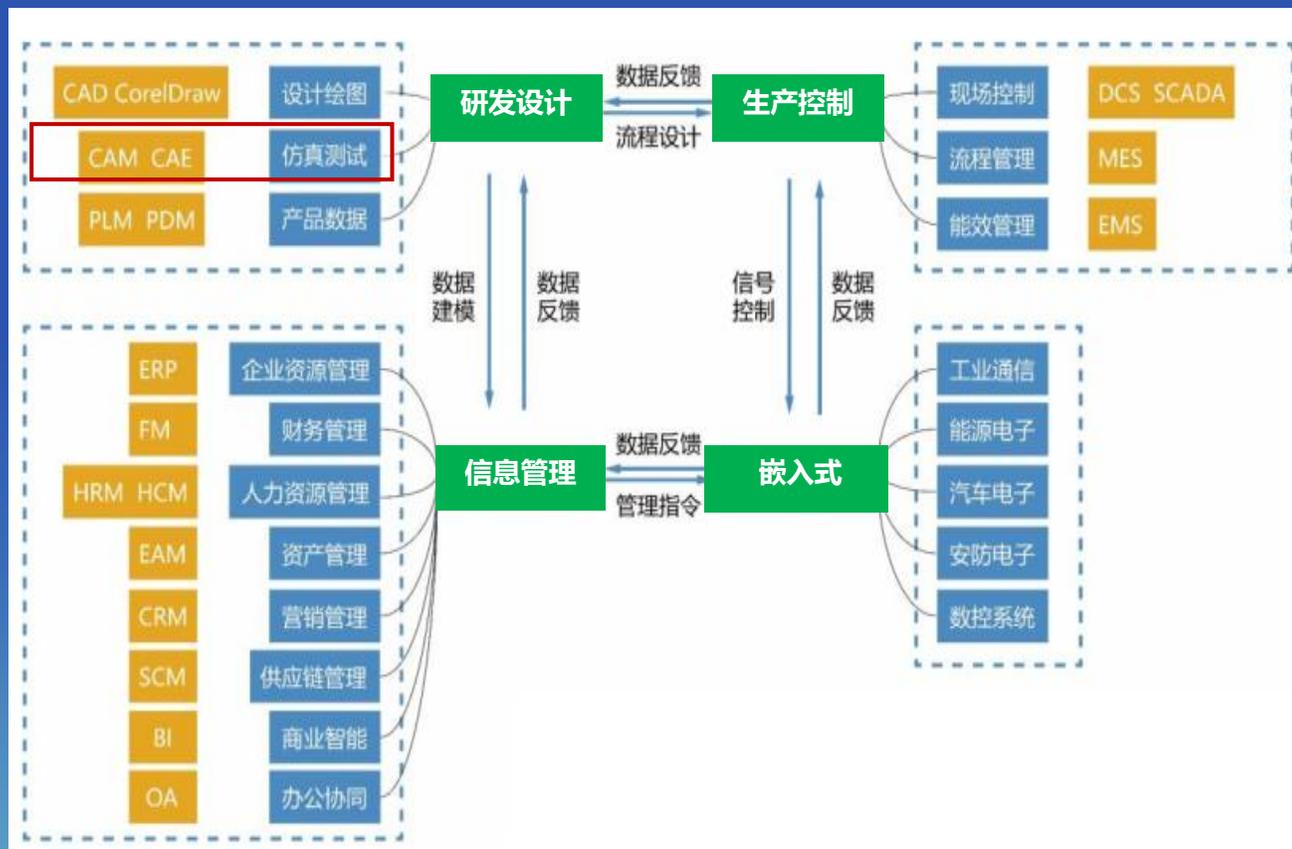


工业互联网

与制造业升级息息相关的数字技术

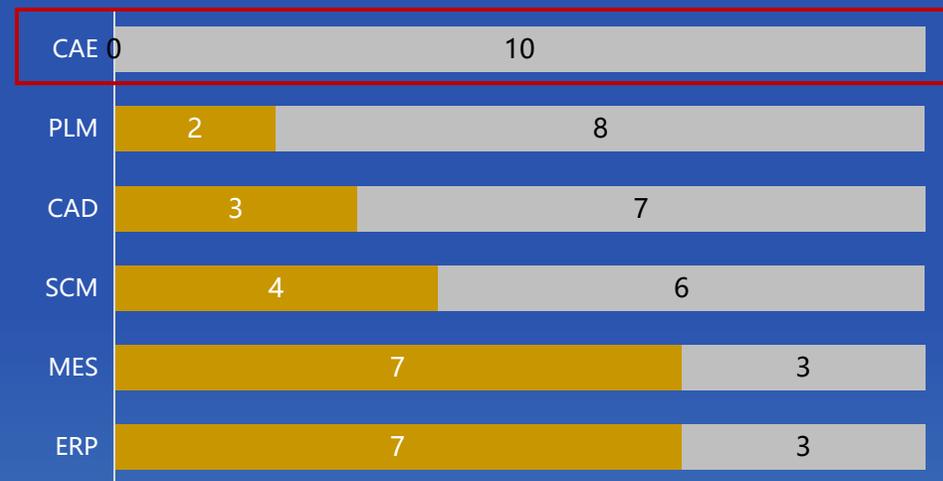
# 工业仿真是工业软件皇冠上的明珠

- 工业软件的本质是将工业知识软件化，将企业在产品的规划、研发等全流程中的经验沉淀融合在软件系统中，用以提升企业全流程的工作效率。



中国工业软件市场 前十大供应商

■ 国内厂商 ■ 国外厂商



数据来源：中国工业技术软件化产业联盟、互联网公开资料

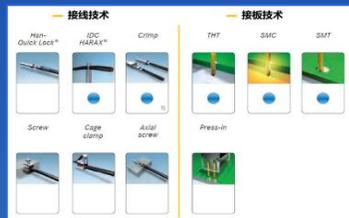
## 机械设计



形状



尺寸



连接方式

## 电气设计



电阻

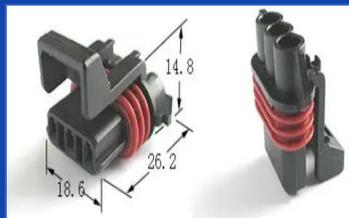


接触损耗



信号调试

## 材料选择



绝缘材料



导电材料

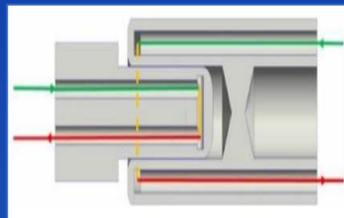


镀层

## 制造生产



加工



组装



产线

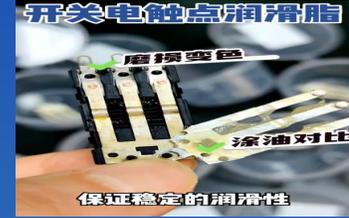
## 运行维护



运行

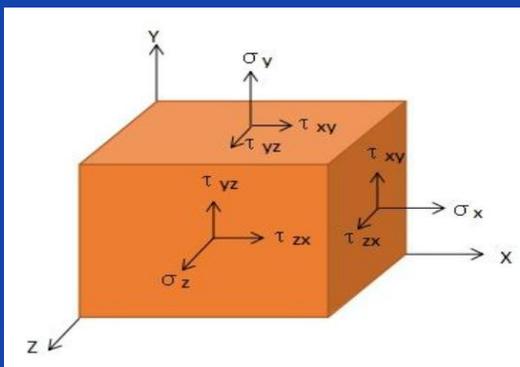


检测



预防性维护

## 理论校核 (近似)

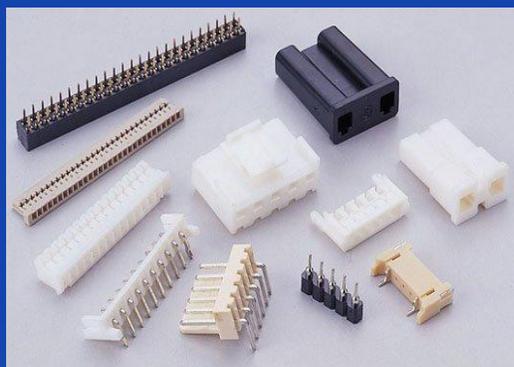


理论模简化型

$$\begin{aligned} \text{拉压 } \sigma_{\max} &= \frac{N}{A_{\text{横截}}}_{\max} \leq [\sigma] \\ \text{剪切 } \tau_{\max} &= \frac{Q}{A_{\text{受剪}}} \leq [\tau] \\ \text{挤压 } \sigma_{\text{挤压}} &= \frac{P_{\text{挤压}}}{A_{\text{挤压投}}} \leq [\sigma_{\text{挤压}}] \\ \text{圆轴扭转 } \tau_{\max} &= \left( \frac{M_T \rho}{I_p} \right)_{\max} = \left( \frac{M_T}{W_p} \right)_{\max} \leq [\tau] \end{aligned}$$

理论公式近似计算校核

## 打样&试验验证 (成本高)



连接器打样较多



大量试验

## 小批量验证 (问题评估难)

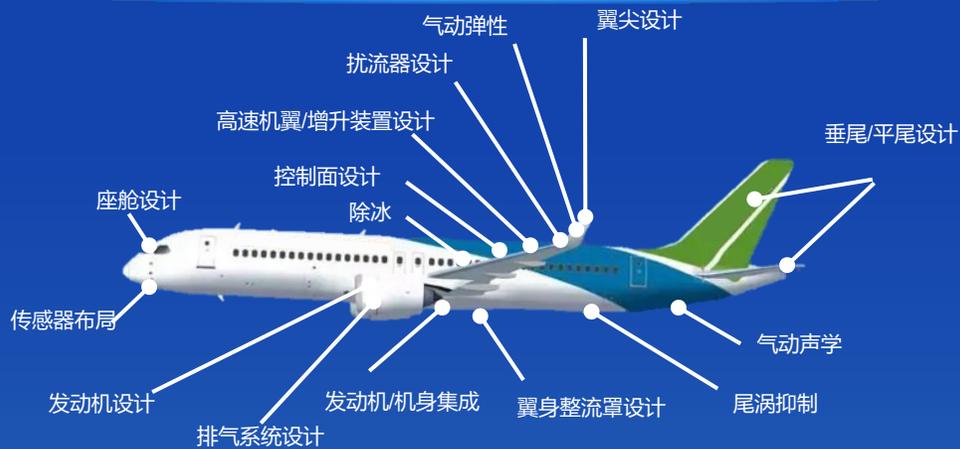


小批量不良率较多



问题分析难评估

## 显著提升产品性能、技术水平及市场竞争力



## 显著缩短研发周期、降低研发成本



[1] Johnson et al., Thirty years of development and application of CFD at Boeing commercial airplanes, Seattle, AIAA 2003-3439.

[2] Spalart & Venkatakrisnan, On the role and challenges of CFD in the aerospace industry, The Aeronautical Journal, 2016(120), 209-232.

1960s -1970s

**CAE技术萌芽**  
1969年NASA与MSC合作推出第一个有限元软件Nastran

1970s - 1990s

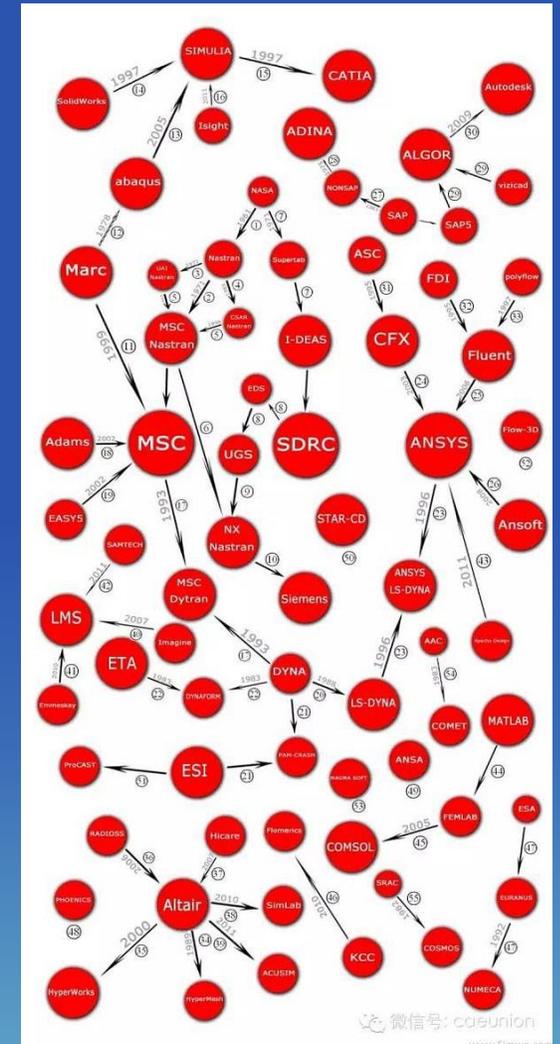
**CAE 软件涌现**  
MARC, I-DEAS, ANSYS, ADAMS, ABAQUS, PHOENICS

1990s- 2000s

**CAE 壮大期**  
市场扩展，功能提升

2000s- 至今

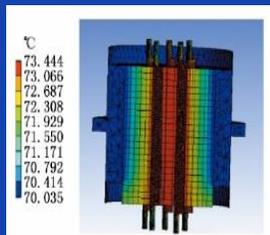
**CAE软件成熟期**  
并购重组，整合市场，横向发展



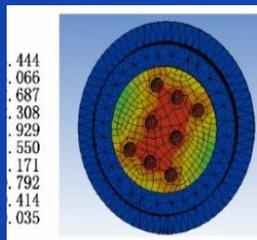
CAE软件家谱图

# CAE技术应用场景

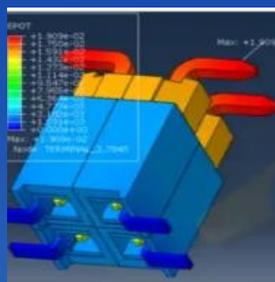
## 热流管理仿真



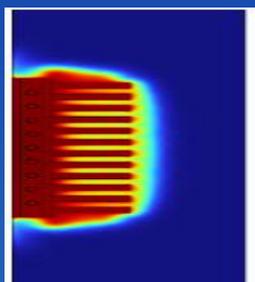
稳态热仿真



瞬态热仿真

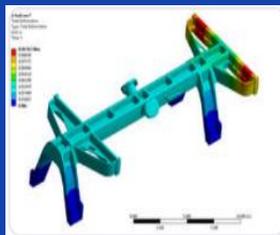


热学仿真

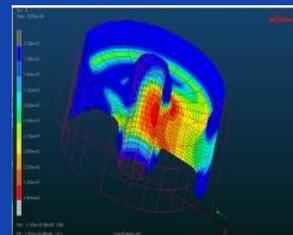


热-电耦合

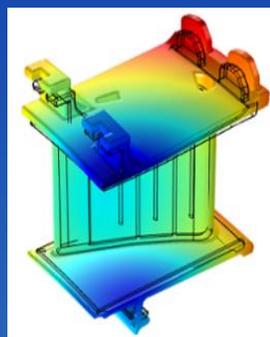
## 固体结构仿真



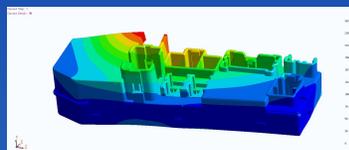
强度与刚度



疲劳与寿命

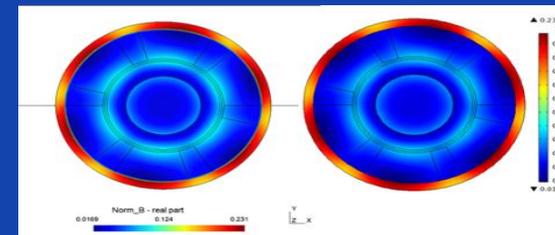


热-结构耦合

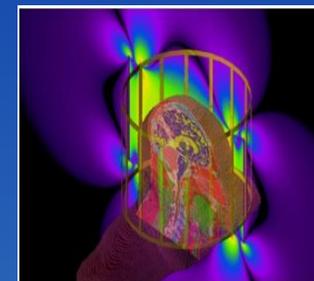


振动模式

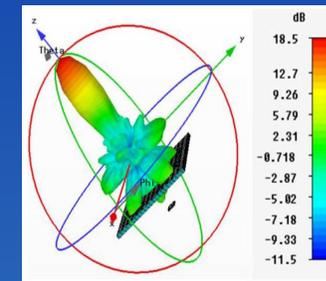
## 微波、毫米波天线高频电磁仿真



电磁场仿真

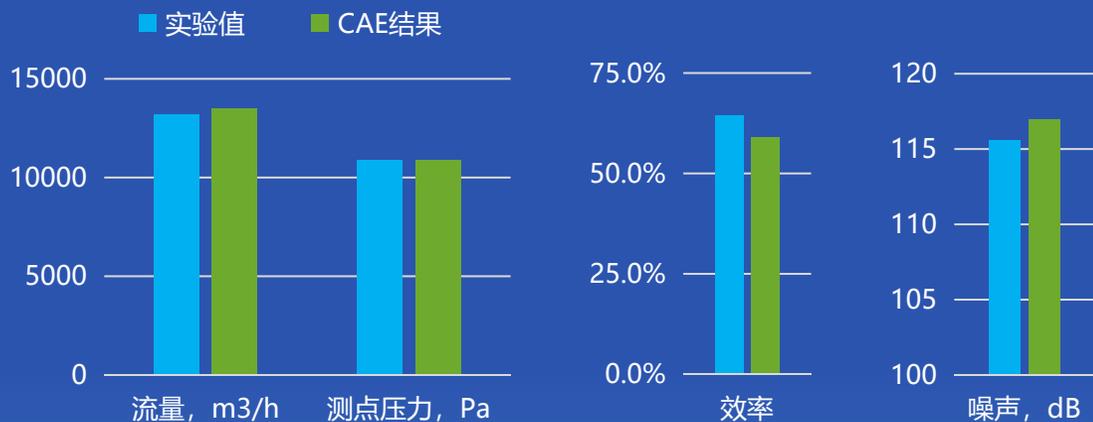


散射仿真

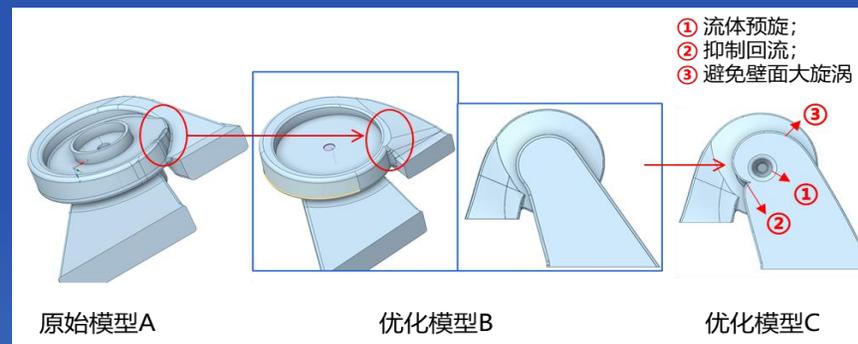


天线仿真

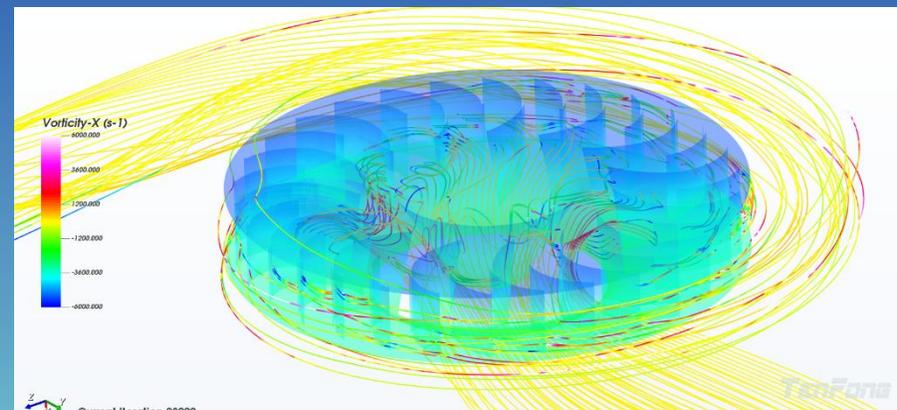
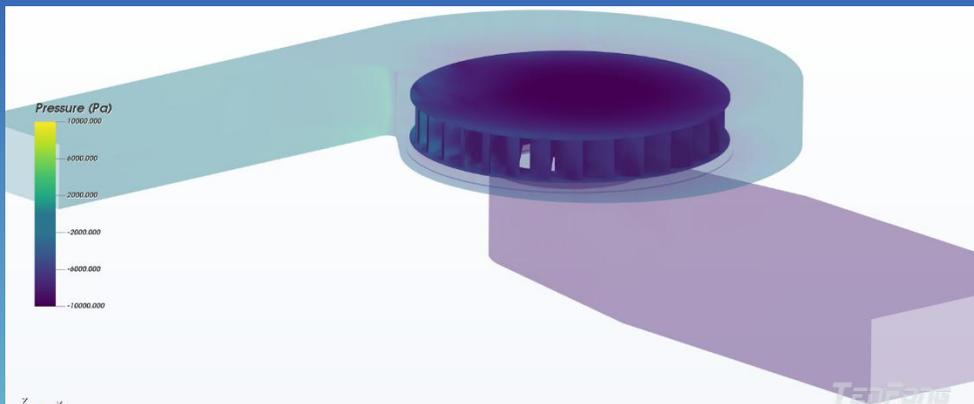
# CAE应用案例 – 风机的参数化建模和优化

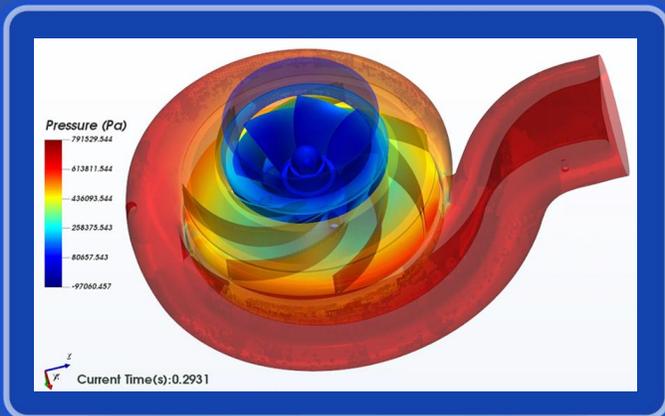


工业风机流道性能仿真



离心风机气动（噪声）优化





多物理场耦合



数字孪生



云原生、云部署



高性能计算



与人工智能的结合

智能制造

定制化设计

智能装备及机器人

生产流程优化

预测性维护

## 精密注塑件表面缺陷检测



## 自然语言处理

问答系统  
机器翻译  
文本生成  
情感分析

## 图像处理

目标检测  
语义分割  
轨迹预测  
图像生成

## 语音处理

语音识别  
语音翻译  
语音变换  
语音生成

## 自动驾驶

三维重建  
环境感知  
智能决策  
车辆控制

1950s - 1960s

萌芽阶段

1960s - 1980s

知识逻辑阶段

1980s - 2010s

机器学习阶段

2010s - 2020年

深度学习阶段

2020年至今

大模型阶段

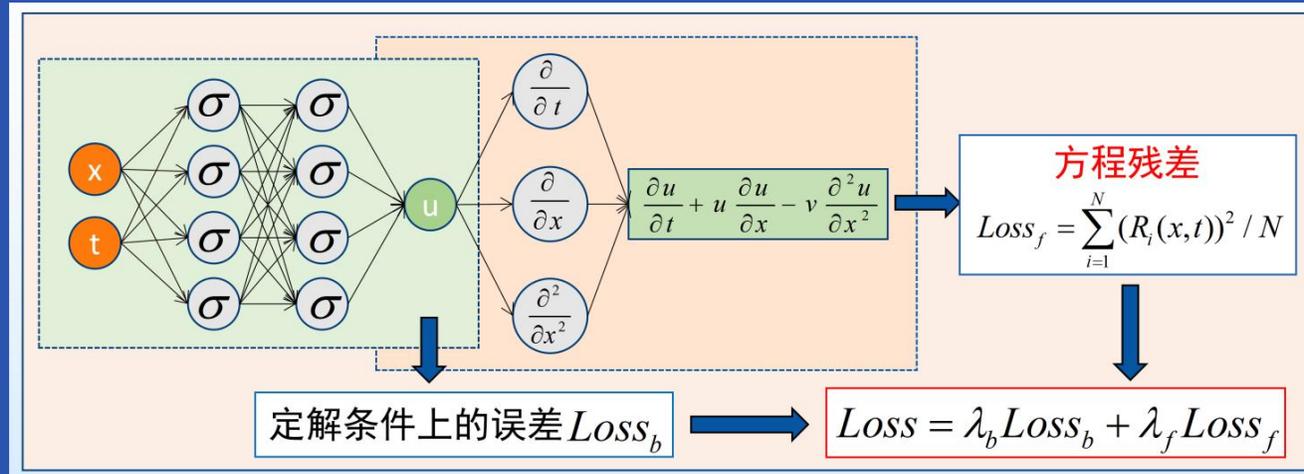
## 传统计算范式下的PDE求解

求解区域离散

控制方程离散

差分方程求解

流场数据处理



PINN (Physics-informed Neural Network) 物理信息神经网络

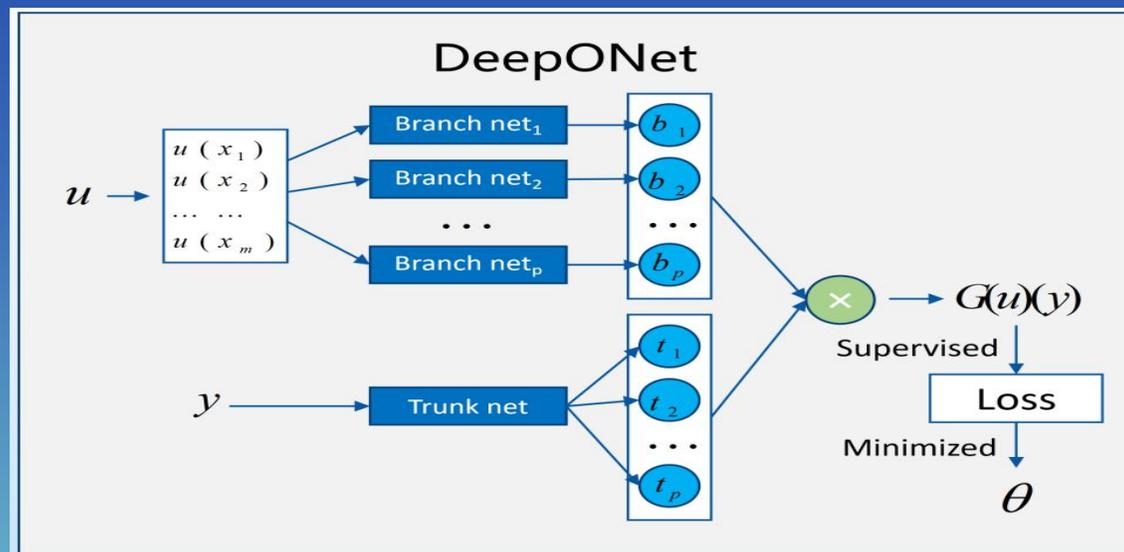
## 智能范式下的PDE求解

网络架构设计

损失加权设计

时空残差采样

网络参数优化



DeepONet (Deep Operator Network) 深度算子网络

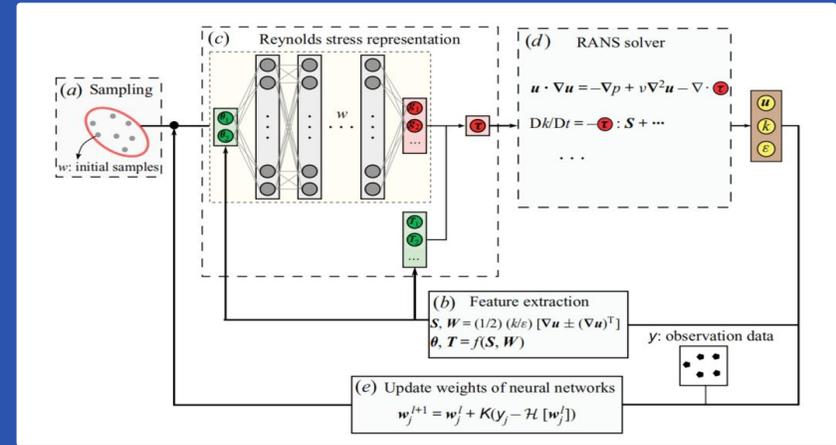
## 理论支撑

$$\tau = a + \frac{2}{3}kI \quad a = 2k \sum_{i=1}^{10} g^{(i)} T^{(i)} \quad g^{(i)} = g^{(i)}(\theta_1, \dots, \theta_5)$$

$$T^{(1)} = S, \quad T^{(2)} = SW - WS \quad \theta_1 = \{S^2\} \quad \theta_2 = \{W^2\}$$

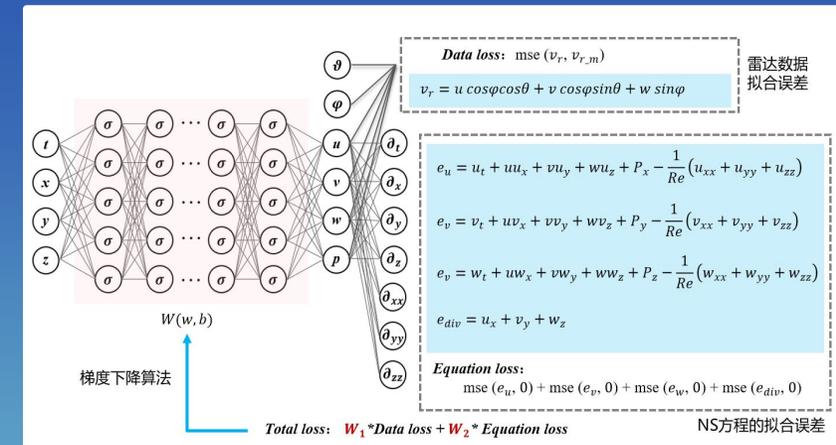
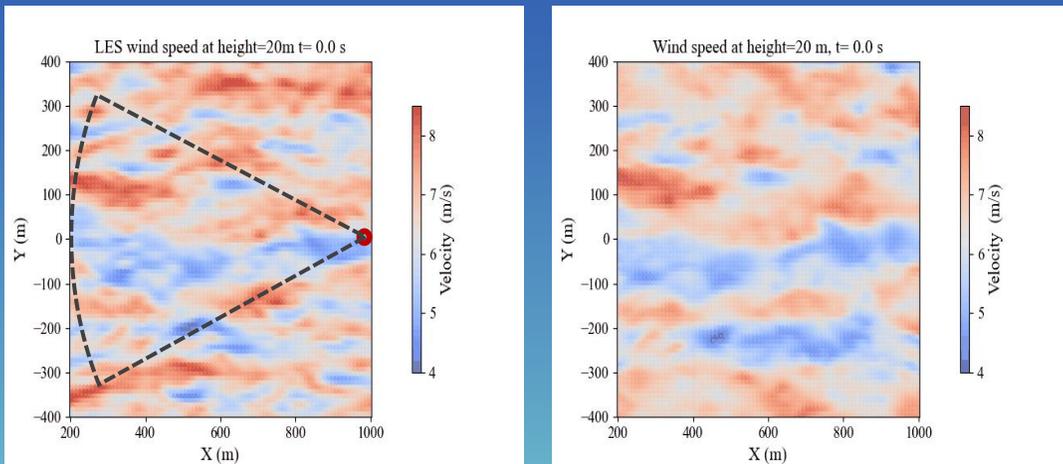
$$T^{(3)} = S^2 - \frac{1}{3}\{S^2\}I, \quad T^{(4)} = W^2 - \frac{1}{3}\{W^2\}I$$

$$S = \frac{1}{2}k/\varepsilon[\nabla u + (\nabla u)^T] \quad W = \frac{1}{2}k/\varepsilon[\nabla u - (\nabla u)^T]$$



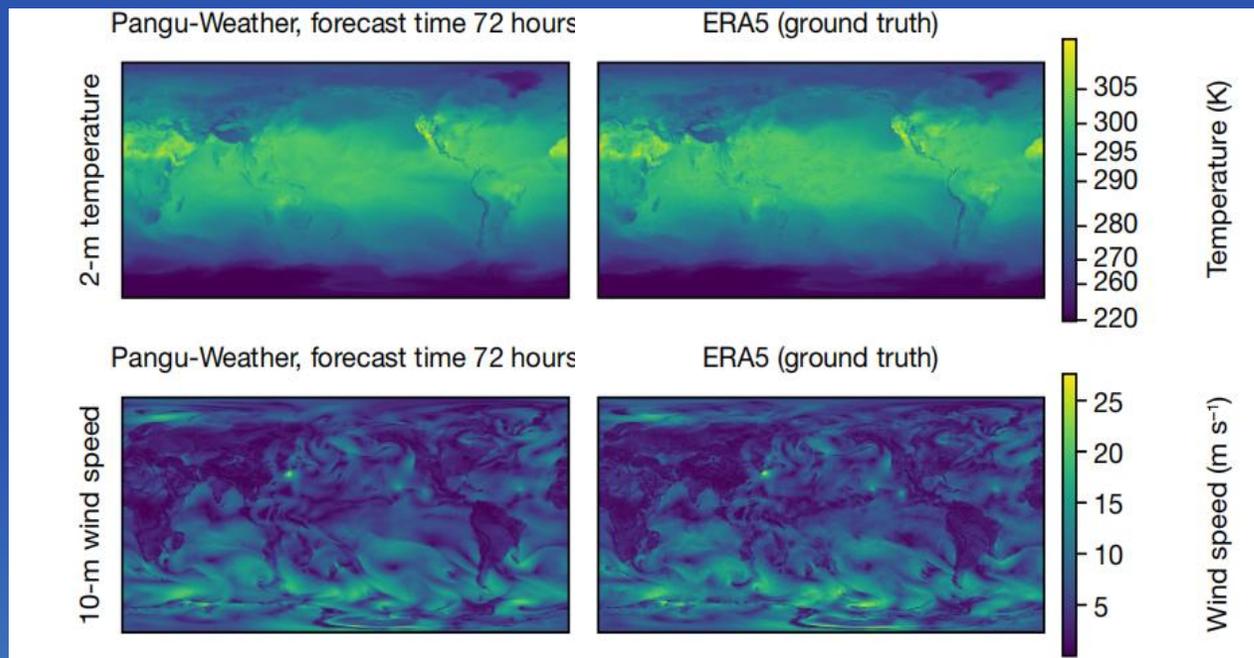
ANN + EnKF

## 同化结果



PINN

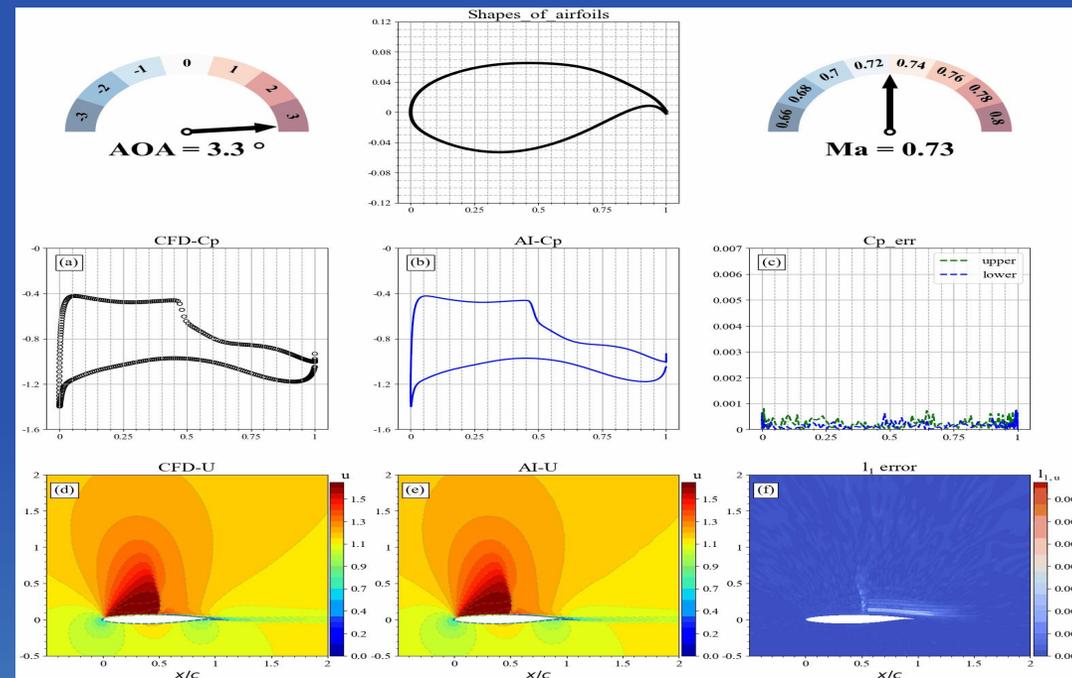
# 人工智能大模型在CAE的应用



盘古气象预测大模型

气象预报精度首次超过传统数值方法

速度提升10000倍以上



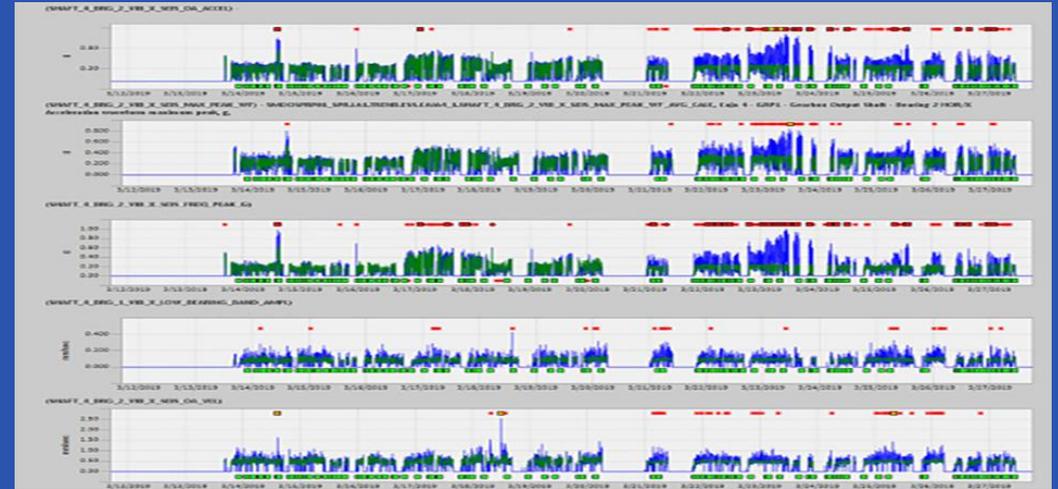
东方翼风大模型

仿真时间缩短至原来的二十四分之一 流场平均误差降低

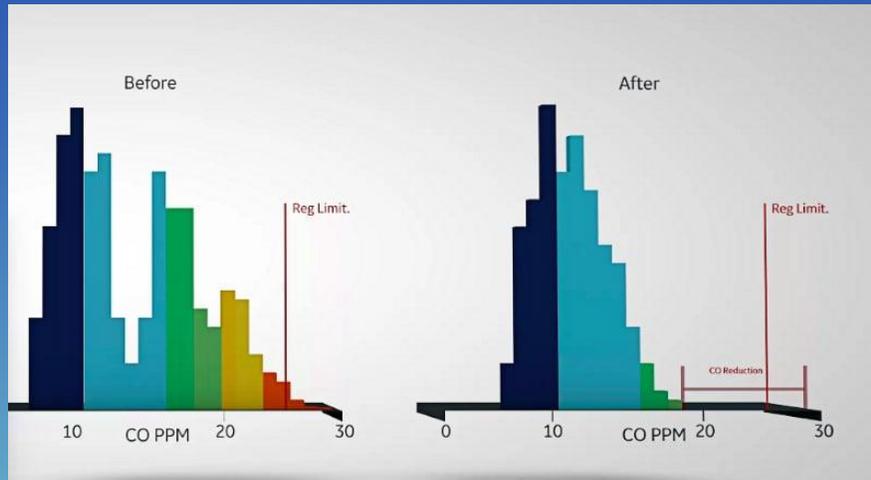
至万分之一量级



GE 燃气轮机部门大量使用了数字孪生技术



数字孪生检测到齿轮箱振动超出模型预测范围并报警



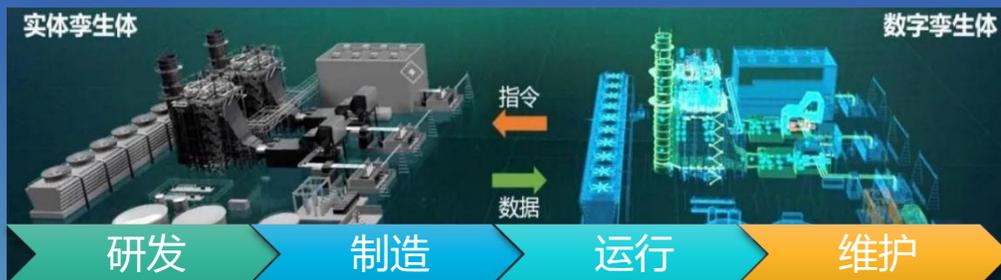
基于机器学习的数字孪生帮助提高燃烧效率，减少有害气体排放



GE 数字孪生的统计数据

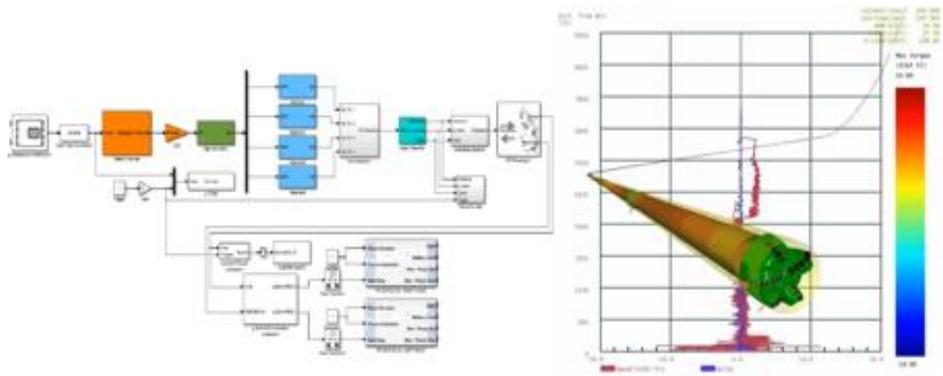
## 什么是数字孪生

- 物理实体或者流程的一一对应的数字镜像
- 贯穿全生命周期
- 连接工业互联网
- 连接数据和模型
- 应用层可以直观的了解孪生体的状态

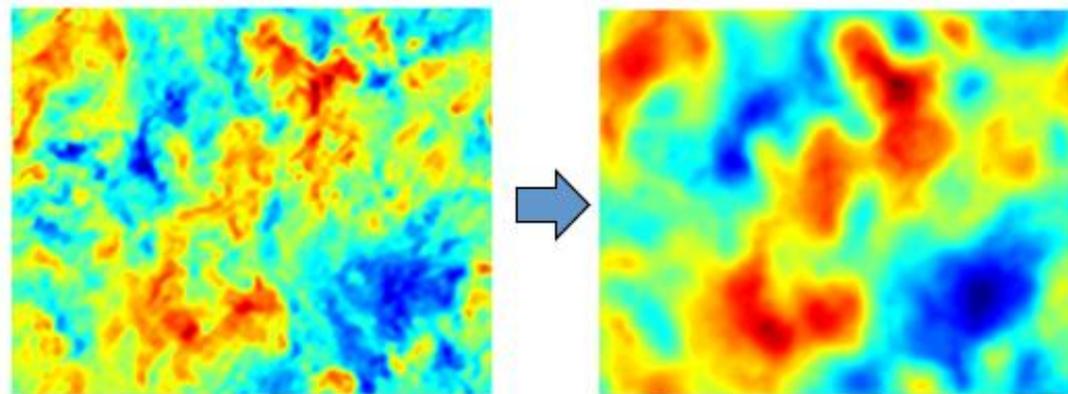


数字孪生基本架构和元素

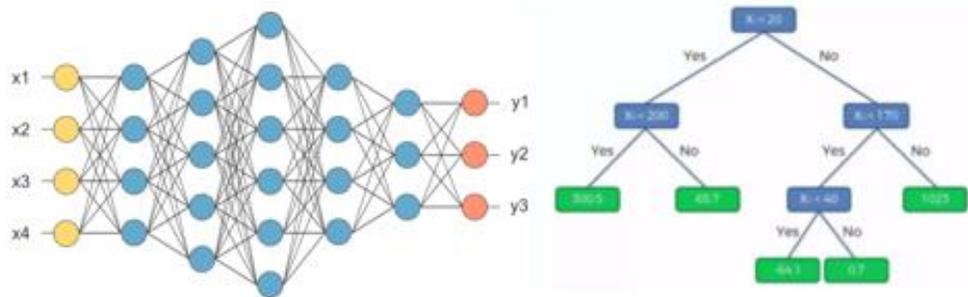
# 数字孪生模型选项



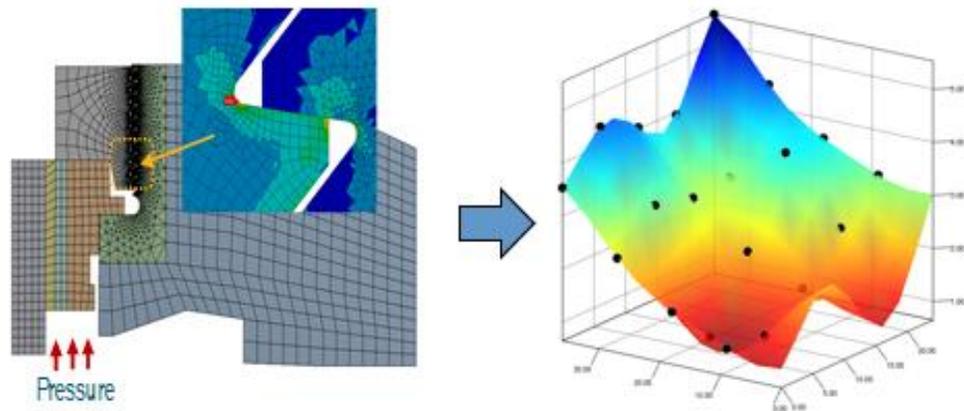
高精度物理模型



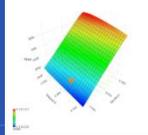
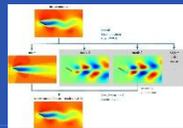
基于物理方程的模型降阶



数据驱动模型



代理模型

	统计方法		线性代数		机器学习
方法	响应面模型 	多项式回归 $y_k = \sum_{i=0}^p \Theta_y^i y_{k-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_x^j e_{k-j} + \sum_{m=1}^r \Theta_x^m x_{k-m}$	投影方法 	线性时域不变模型 $\dot{x} = Ax + Bu$ $y = Cx + Du$	神经网络 
算法	克里金算法	最小二乘法 NARAMX	正交分解法	SINDY NARAMX	MLP LSTM神经网络 傅里叶神经元算子
适用场景	从多组数据寻找映射多维关系	使用多项式和统计方法拟合静态和动态数据	适合流场，温度场	动力学系统控制设计和仿真	静态，动态的，多输入多输出的非线性系统
局限性	仅适用定态系统	适合数据维度较低和较为简单的场景	线性模型	仅适用于零维线性系统	需要大量的训练数据做支撑



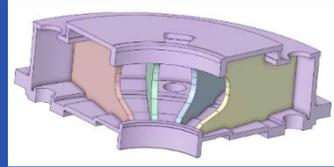
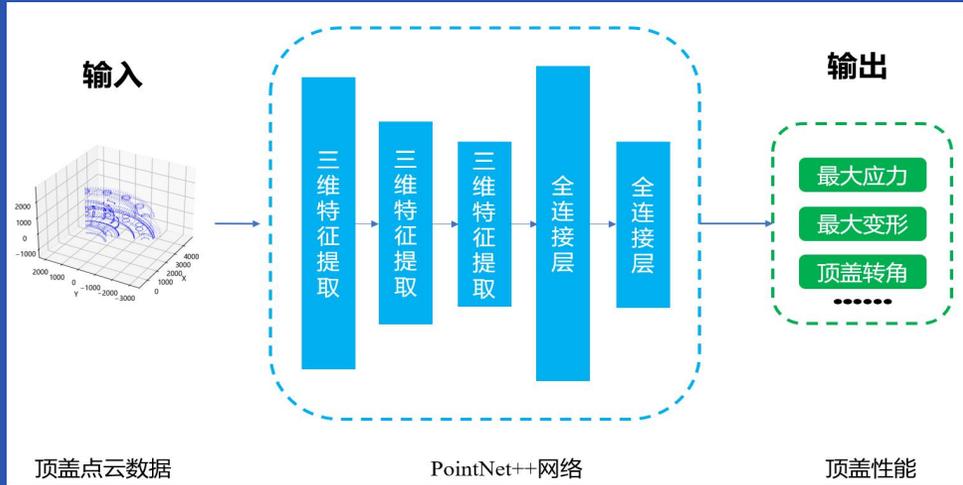
稳态零维: Kriging, Balanced Truncation, Krylov, NARMAX,

稳态多维: POD-RBF, DMD, MLP, LSTM-Net, Encoder-Decoder-Net

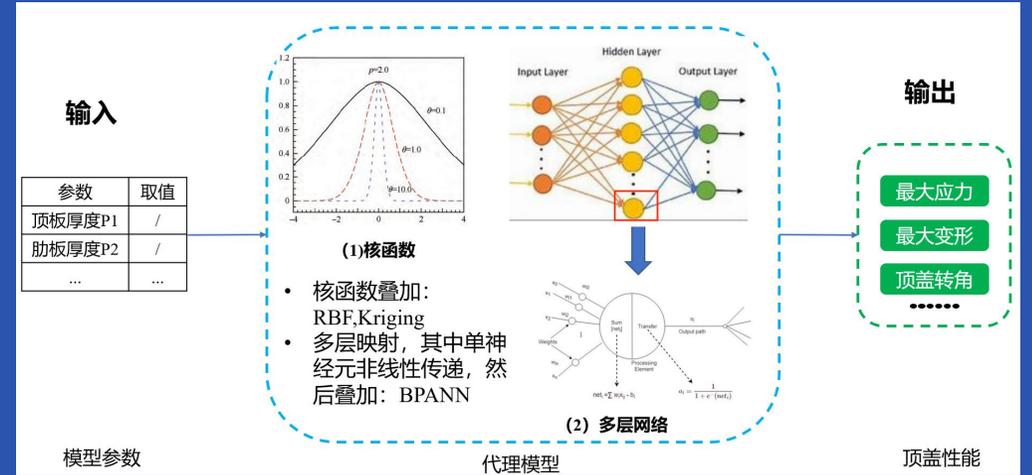
瞬态零维: 稀疏空间非线性系统辨识方法, 多项式自适应模型, MLP

瞬态多维: PINN, CNN, NLP Transformer + Fourier Transform

# 案例 - 结合CAE以及机器学习的模型降阶



顶盖结构有限元分析及降阶模型的建立

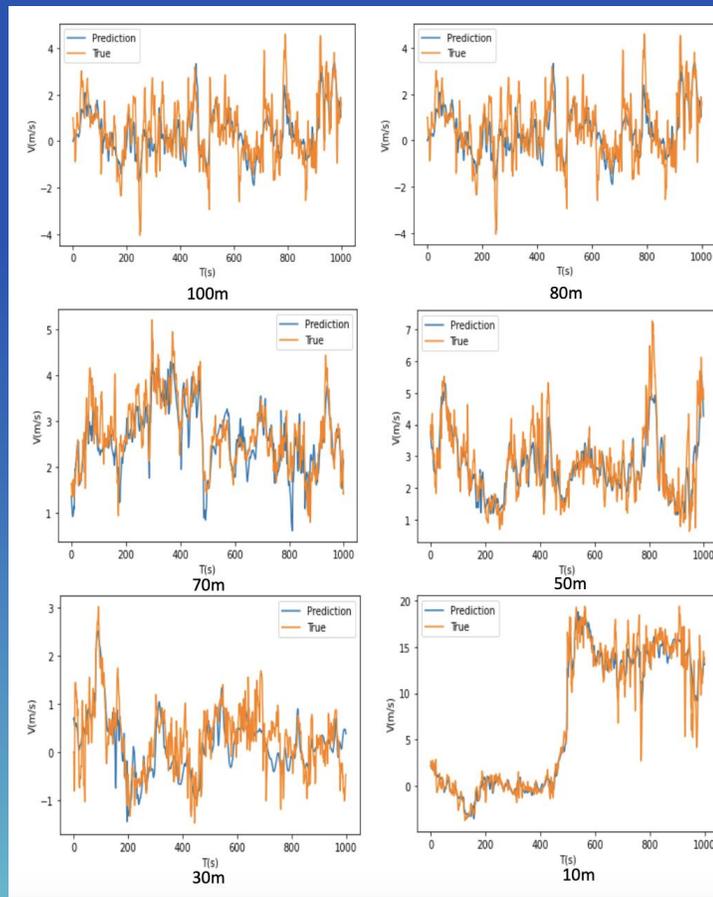
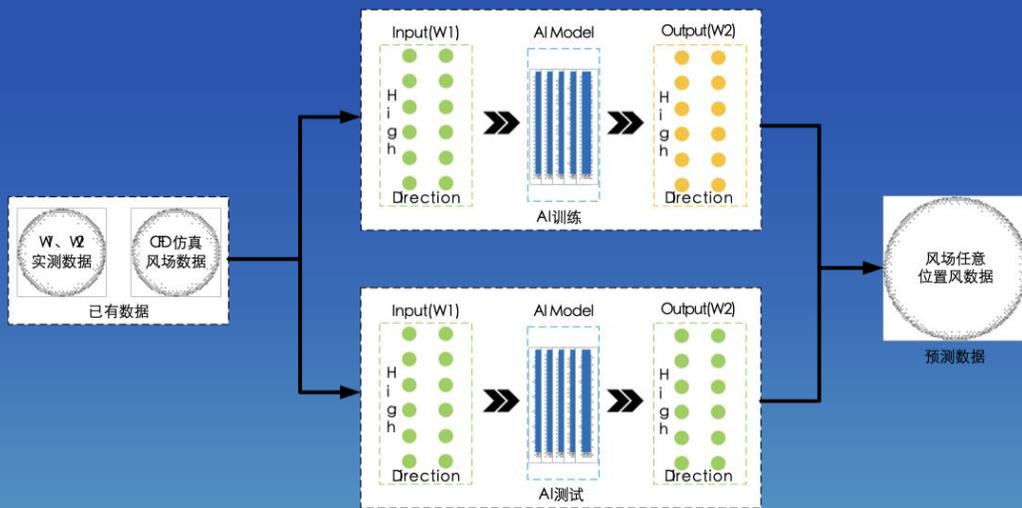
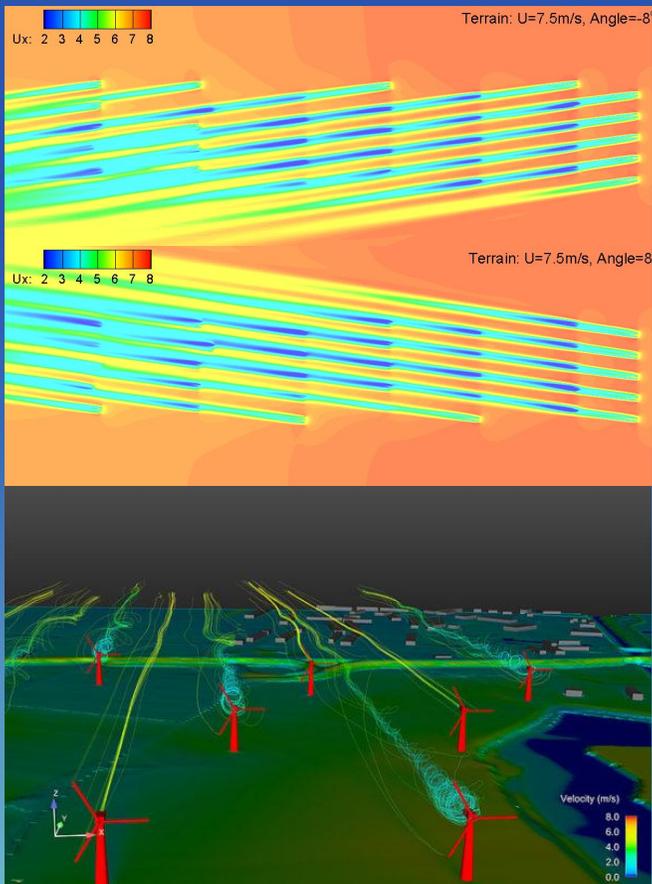


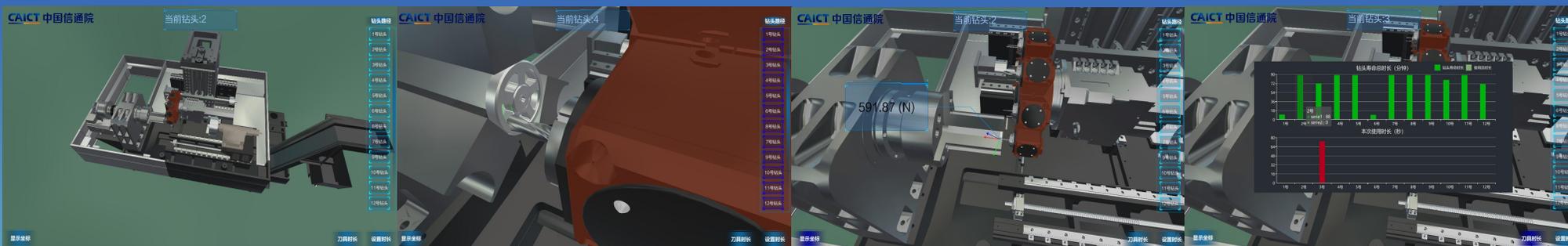
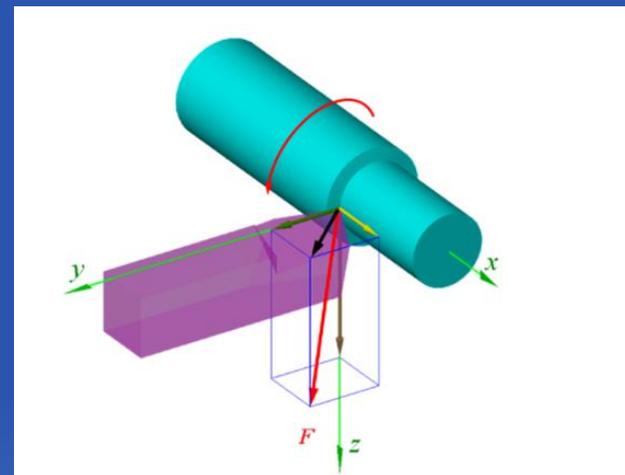
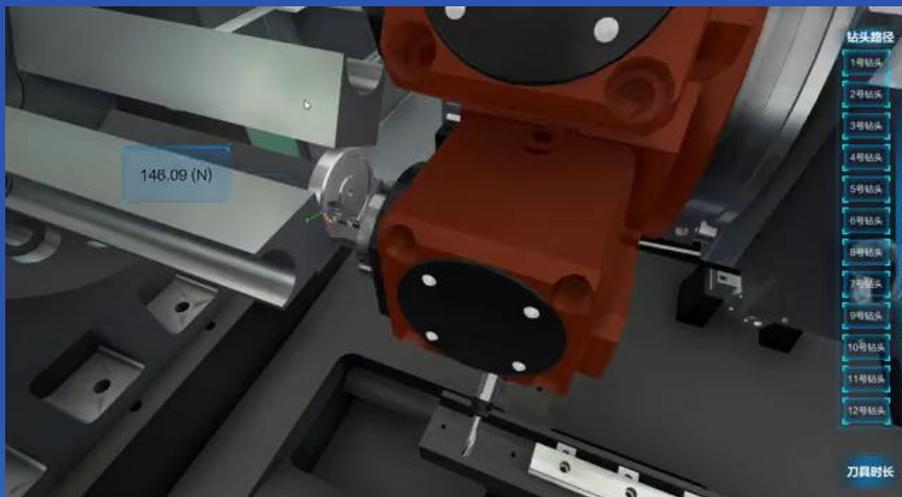
	点云模型方案	代理模型方案
<b>最大误差</b>	应力 < 7.2%	应力 < 4.4%
<b>数据要求</b>	三维模型→点云数据	三维模型→模型参数
<b>优化&amp;敏感性分析</b>	基于点云数据获取参数特征	基于参数易实现优化、梯度信息易得
<b>自学习能力</b>	可自动从数据中学习	仅能针对明确参数学习

# 数字孪生案例：模型降阶

## 基于风场降阶模型的大型风场风速预测

- 针对云南某复杂地形风场，通过测风塔的数据，建立测风塔与风场任意位置的风数据预测模型，并使用其他测风塔的实测风数据对预测模型进行修正





加工过程可视化

刀具路径绘制

刀具受力分析

刀具寿命预测

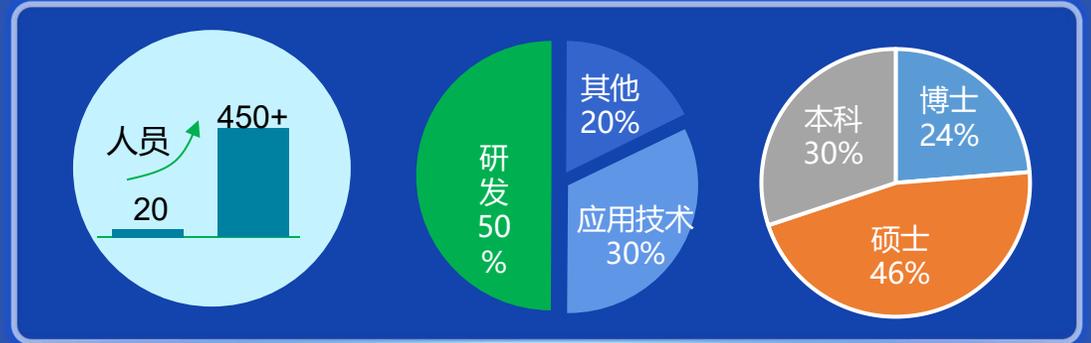
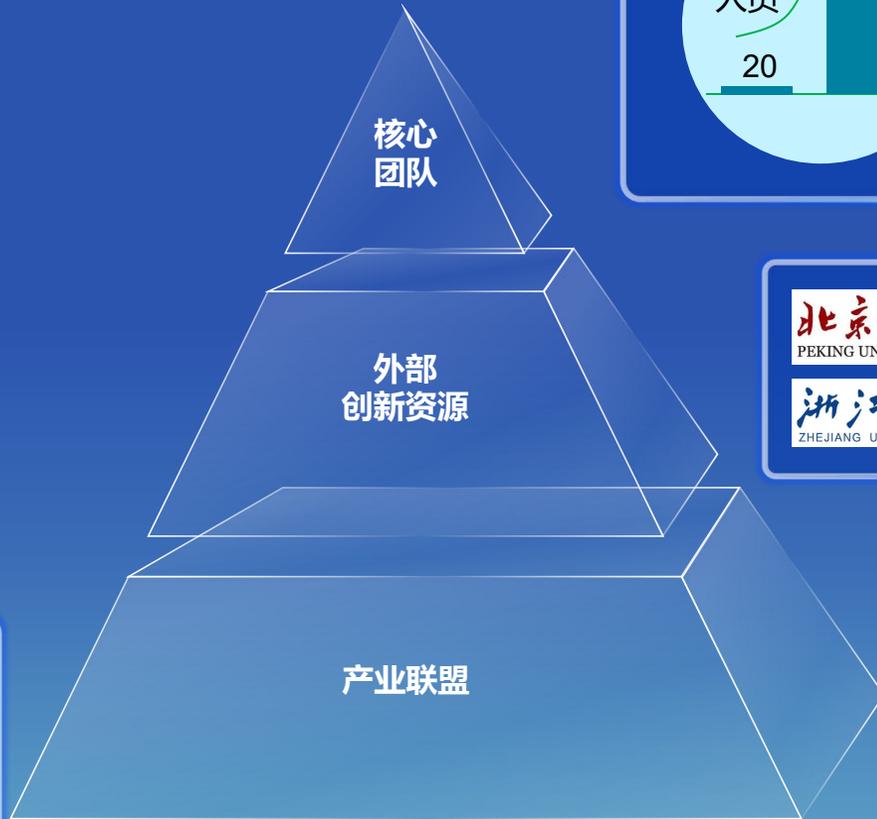


陈十一 院士

全球顶尖的学术带头人

CAE产业界的领军人物

十津科技公司成立于2020年12月, 致力于高端研发设计类工业软件、数字孪生系统与仿真云服务平台自主研发及产业化。 公司总部位于深圳南山, 目前已成立京津冀、长三角、珠三角、华中、西部等区域产业化基地。



**TF-QFLUX: 通用计算流体力学软件**

TF-CFlow: 空气动力学仿真软件

TF-Lattice: 瞬态流体仿真解决方案

TF-SPH: 光滑粒子法动力学软件

TF-Struct: 通用结构力学仿真软件

TF-Dyna: 显式动力学仿真软件

TF-DCAMS: 通用多体动力学仿真软件

TF-DEM: 通用颗粒系统仿真分析软件

**TF-Acoustics: 声学仿真软件**

TF-eMAG: 高频电磁仿真软件

TF-Thermal: 热仿真软件

## 通用核心软件

TF-MetaFactory: 元工厂数字孪生

TF-EnergyOS: 综合能源管控数字孪生

TF-SimCITY: 城市环境模拟器

**TF-Pandroid: 仿真数据管理系统**

ClouDESIGN: 工程仿真云服务平台

TF-AiMDO: 通用数值优化平台

数字智能化平台

行业应用软件

TF-Lattice: 汽车空气动力学仿真软件

TF-Thermal: 电子热管理仿真软件

TF-Turbo: 叶轮机械气动仿真软件

TF-SimFARM: 风资源数值规划软件

TF-ShipL: 船舶吊装仿真软件

## 基于人工智能的湍流模型

通过机器学习等方法训练4个模型参数:  $c_{b1}, \sigma, c_{s1}, c_{s2}$ .

$$\frac{D\tilde{v}}{Dt} = c_{b1}\tilde{S}\tilde{v} - c_{w1}f_w\left(\frac{\tilde{v}}{d}\right)^2 + \frac{1}{\sigma}[\nabla \cdot (v + \tilde{v})\nabla\tilde{v} + c_{b2}\nabla\tilde{v} \cdot \nabla\tilde{v}]$$

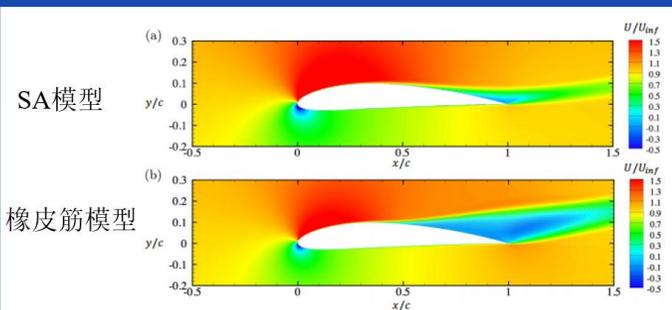
$$v_t = \tilde{v}f_{v1}, \tilde{S} = \Omega + \frac{\tilde{v}}{\kappa^2 d^2} f_{v2}$$

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + 2.433, f_{v1} = \left(1 - \exp\left(-\frac{\chi}{17\kappa}\right)\right)^2, f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}, \chi = \kappa y^+$$

$$f_w = \begin{cases} r, & r \leq 0.4 \\ \frac{1}{c_{w1}}\left(\frac{c_{w1} - 2.433}{r} + 2.433\frac{F_1^2}{F_0^2} + \frac{1}{\sigma}\frac{F_1^2}{F_0^2}\right), & 0.4 < r \leq 1.0 \\ A \tanh\left(\frac{r-1}{B}\right) + 1, & r > 1.0 \end{cases}$$

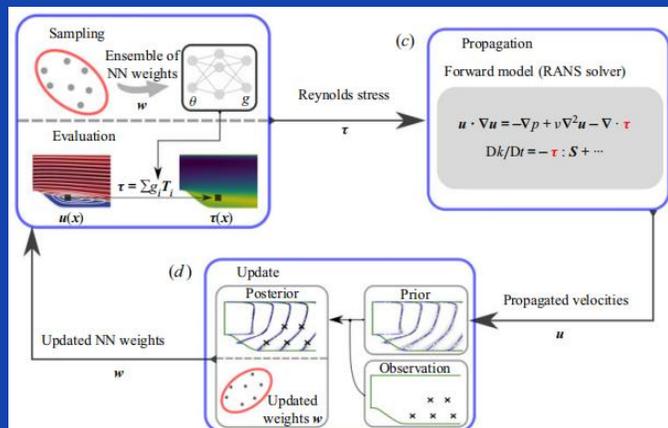
$$r = \frac{\tilde{v}}{\tilde{S}\kappa^2 d^2}, A = 10^{2c_{s1}-1} - 1, B = 10^{4c_{s2}-1}/5.$$

橡皮筋模型

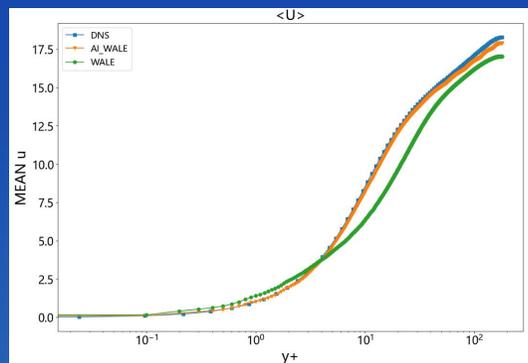


速度对比

## 基于人工智能的数据同化

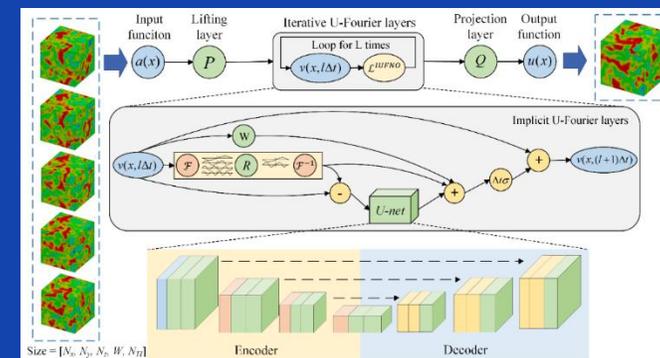


EnKF+AI数据同化

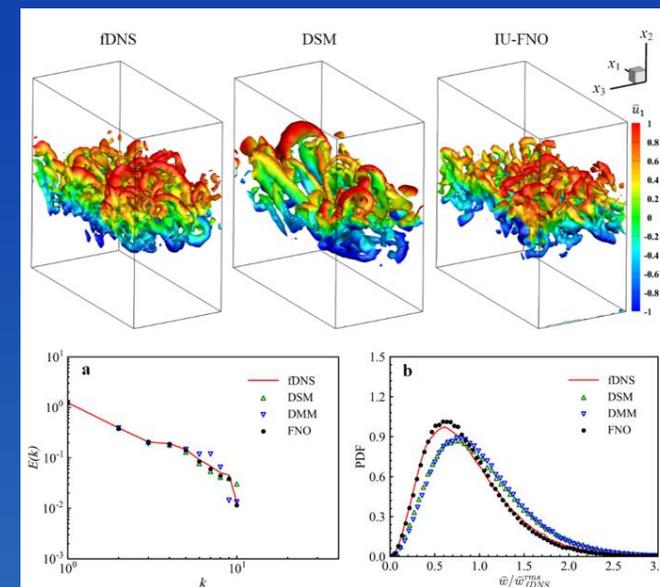


速度对比

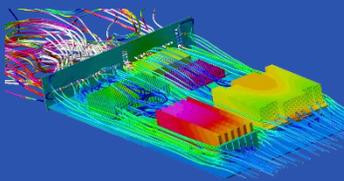
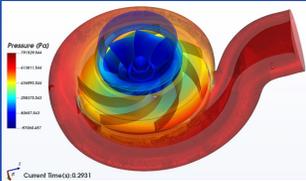
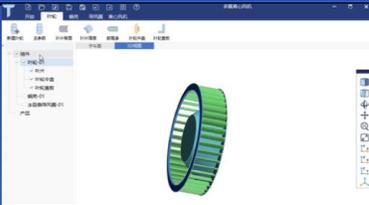
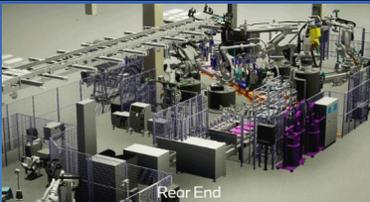
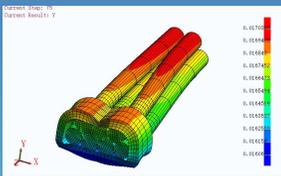
## 基于人工智能的流场快速预测



IU-FNO快速算法



速度谱和涡量PDF

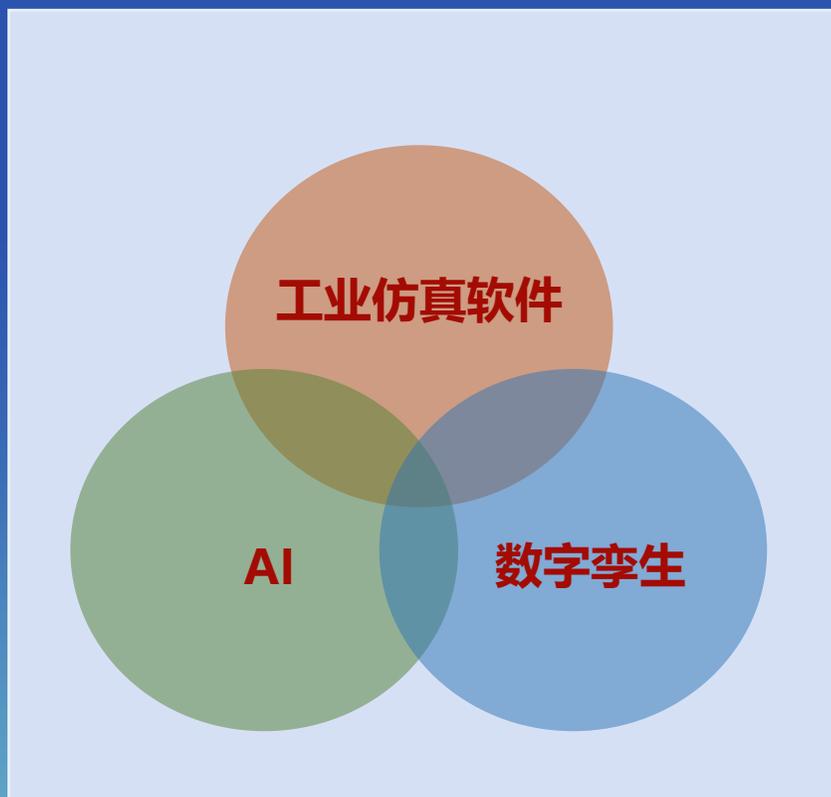
序号	客户	合作内容	主要功能	交付物
1	某全球领先电子企业	流体力学和机电联合仿真		软件工具
2	某水泵厂	水泵的液固声耦合仿真		流固声耦合软件工具
3	美的	多翼离心风机参数化设计和优化软件		软件工具
4	宝马公司	数字产线/智慧工厂		数字孪生
5	某全球领先电子企业	多体/显式动力学仿真软件定制		软件工具

典型用户成功案例

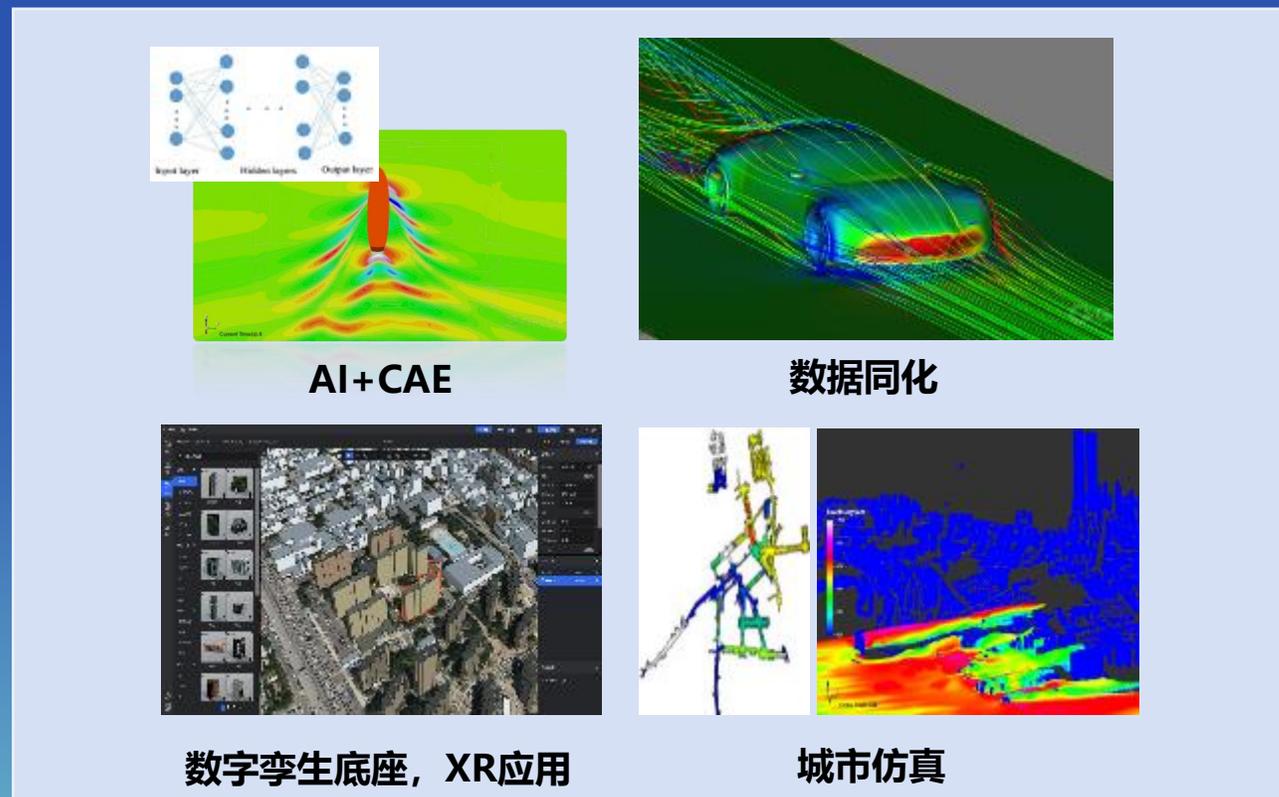


累积大约300家客户

- 深度融合AI技术，进一步提升工业仿真软件的精度和计算速度，降低软件应用门槛，扩大应用场景。
- 强化工业仿真软件与数字孪生应用的结合，完善数字化功能应用。
- 工业仿真软件与人工智能和数字孪生相结合，方能真正促进数字经济发展，创造引领世界的数字化技术水平。



工业仿真软件与AI、数字孪生协同共生共长



以CAE与人工智能、数字孪生的融合应用为例，其将极大促进工业数字化转型