



东北电力大学

NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY

基于数字孪生的电力生产智慧运维

吉林省精密驱动智能控制国际联合研究中心
吉林省人工智能及能源电力应用工程实验室

2025 年 6 月

目录

CONTENTS

01

科研团队

02

孪生体系

03

孪生模型

04

融合感知

05

人工智能

06

应用案例



东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY



Part.1

科研团队



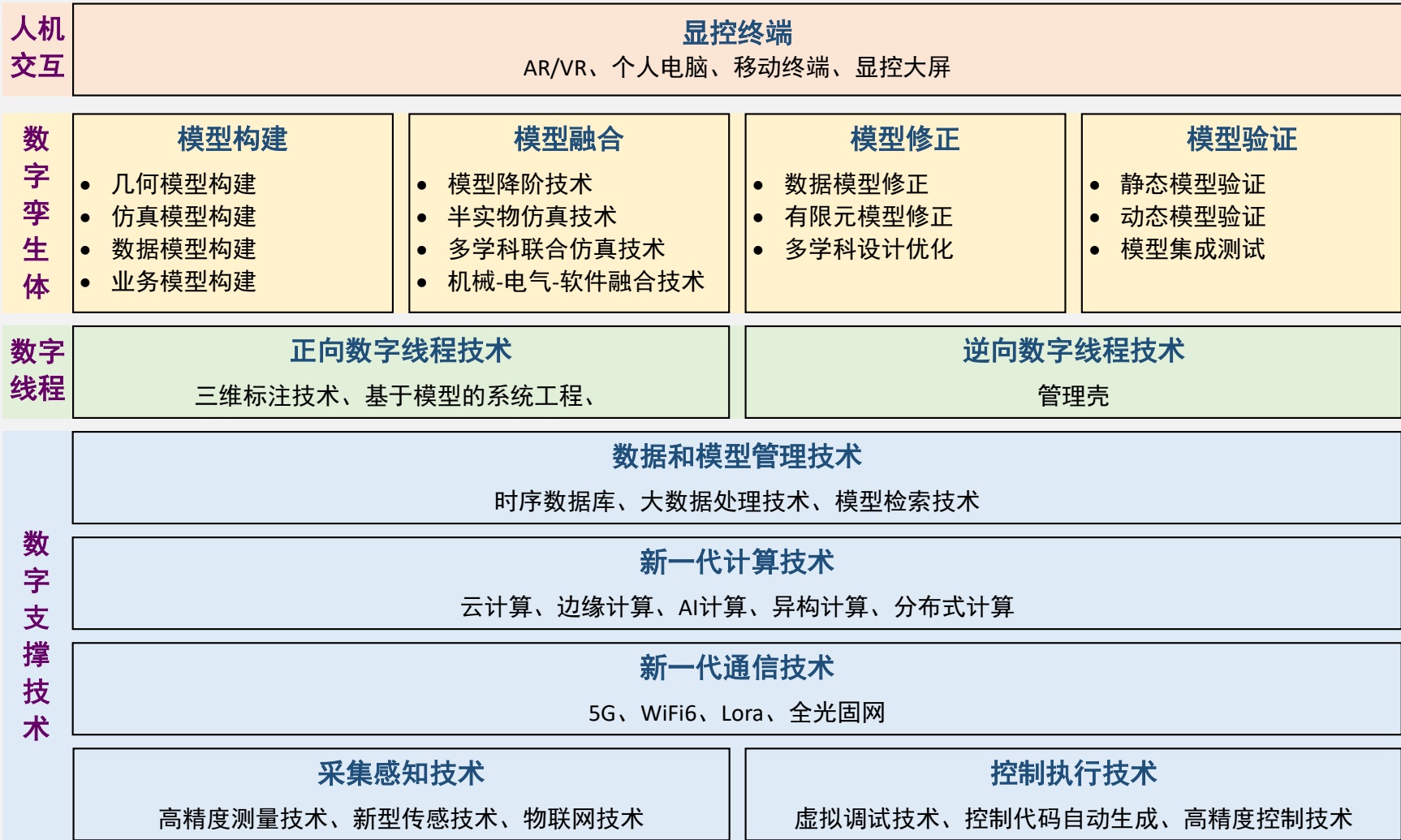
东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY



Part.2

基于数字孪生的智能运维体系

■ Fusion Jet Twin 电力工业数字孪生体系:

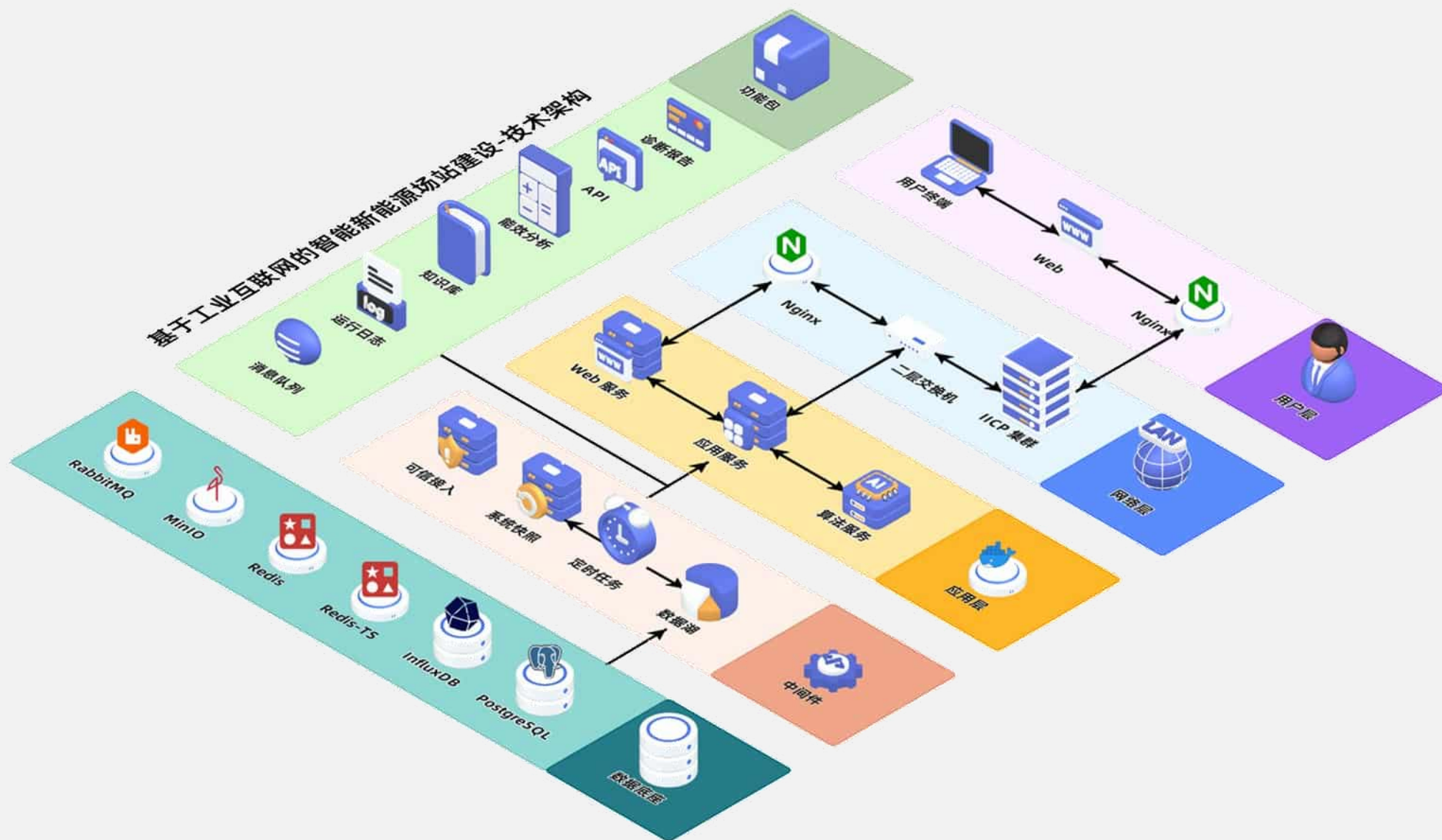
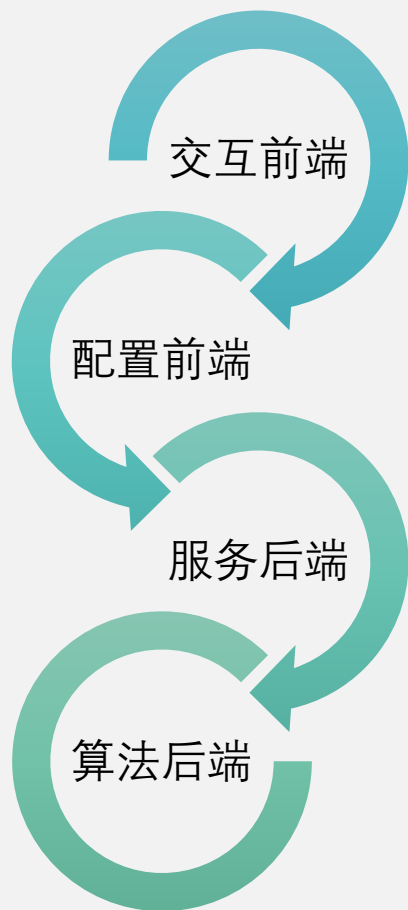


2.1 孪生体系

2.2 技术架构

2.3 平台能力

■ 平台技术架构:



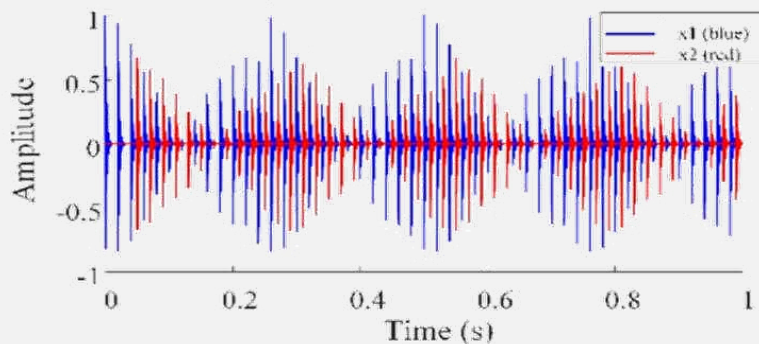
2.1 孪生体系 | 2.2 技术架构 | 2.3 平台能力

异常识别：通过**声学信号分析**进行风机早期异常识别（如齿轮箱、叶片、发电机等），实现叶片振动异常自动识别、螺栓失效自动识别、塔筒故障自动识别、传动链振动异常自动识别等快速故障诊断与维修决策。

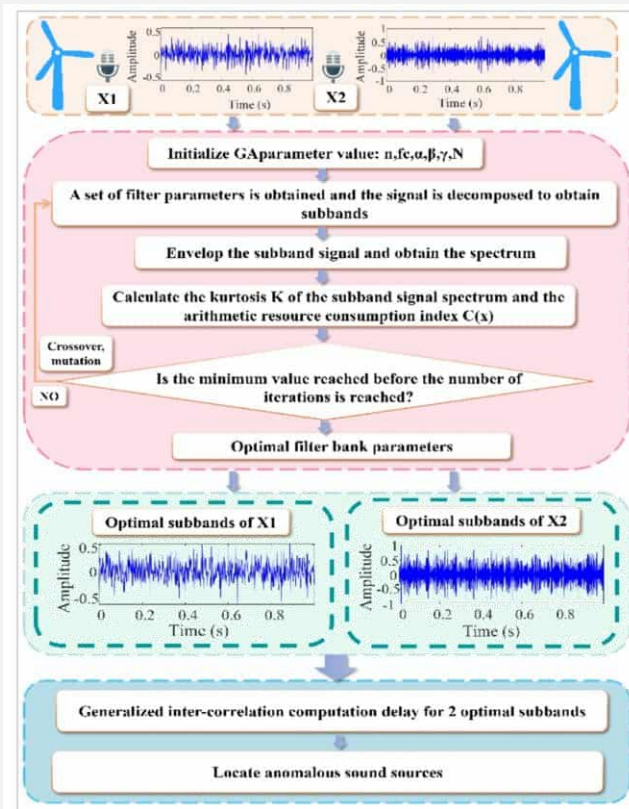


声音传感器

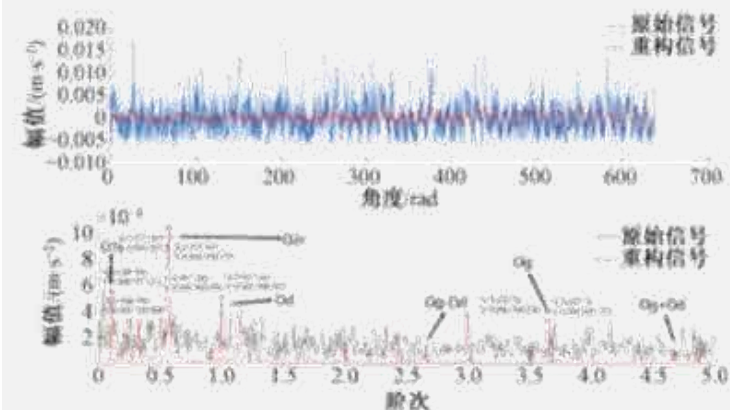
实验平台



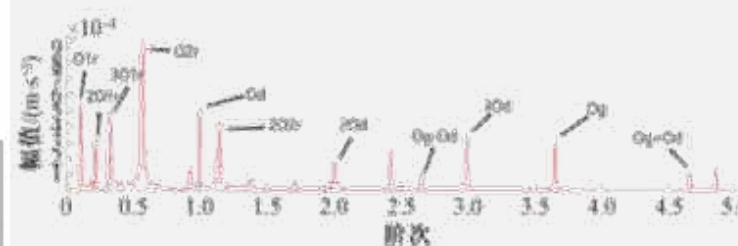
实验数据处理



声纹信号处理流程图



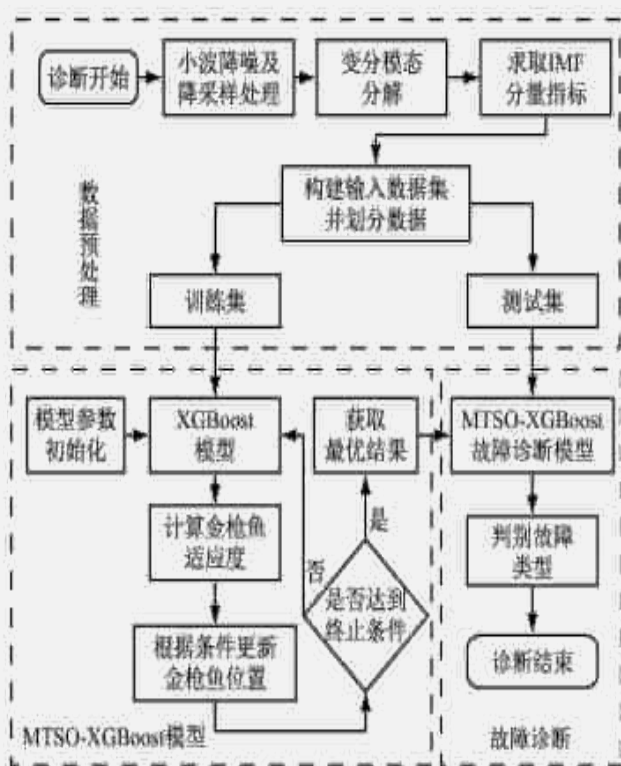
声音信号及重构信号阶次包络与阶次谱



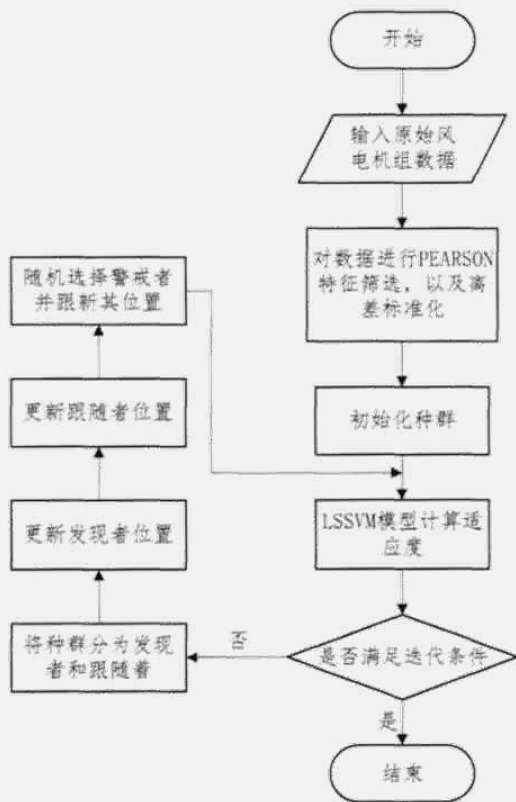
现场重构信号阶次谱

2.1 孪生体系 | 2.2 技术架构 | 2.3 平台能力

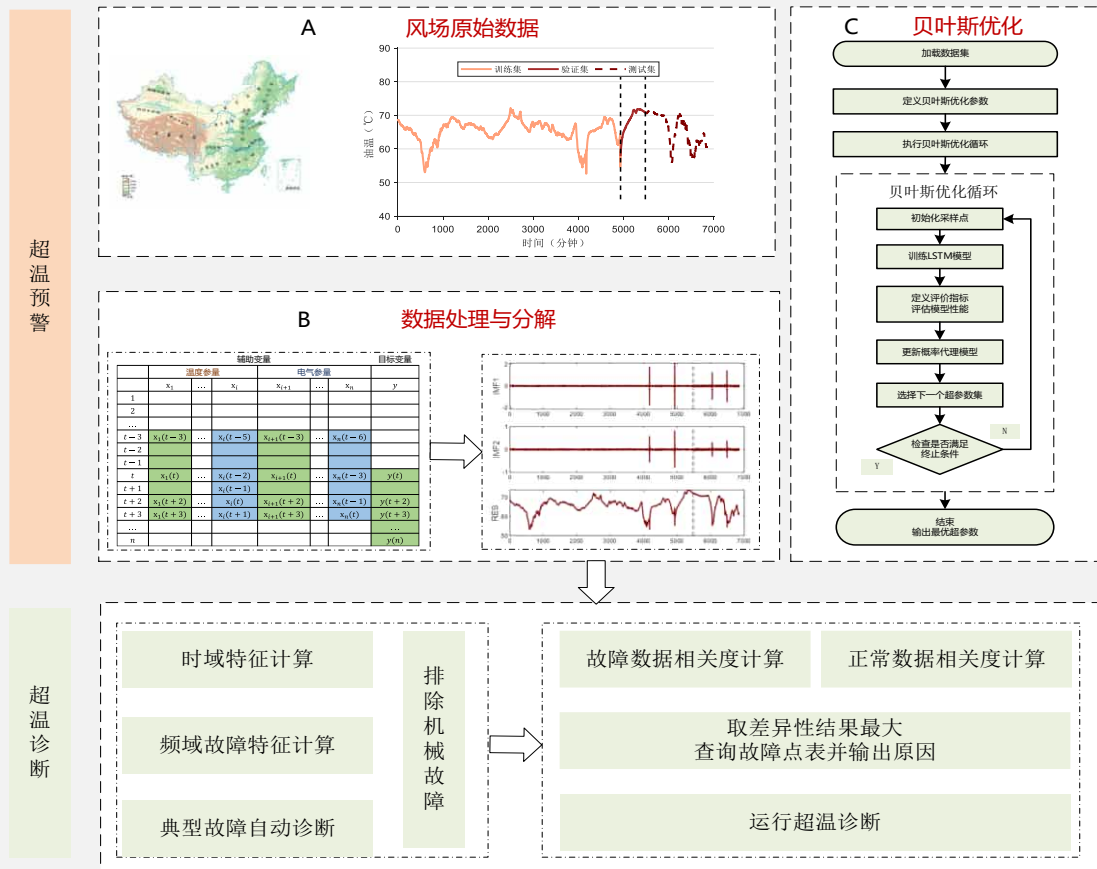
故障预警：基于风机SCADA-CMS多源运行数据，计算**时-频域融合特征**，进行优化求解，完成对主轴轴承、齿轮箱油温、齿轮箱轴承、发电机绕组、发电机轴承等主要部件的超温预警与诊断。



MTSO-XGBoosr算法流程图

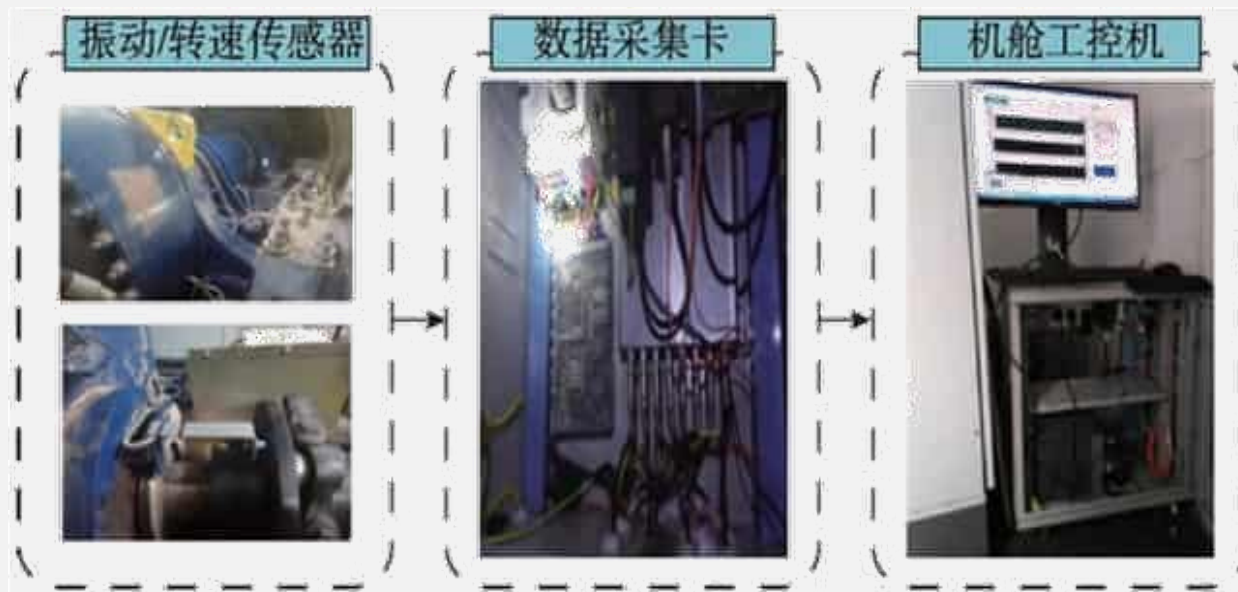


发电机轴承超温预警算法程序流程图

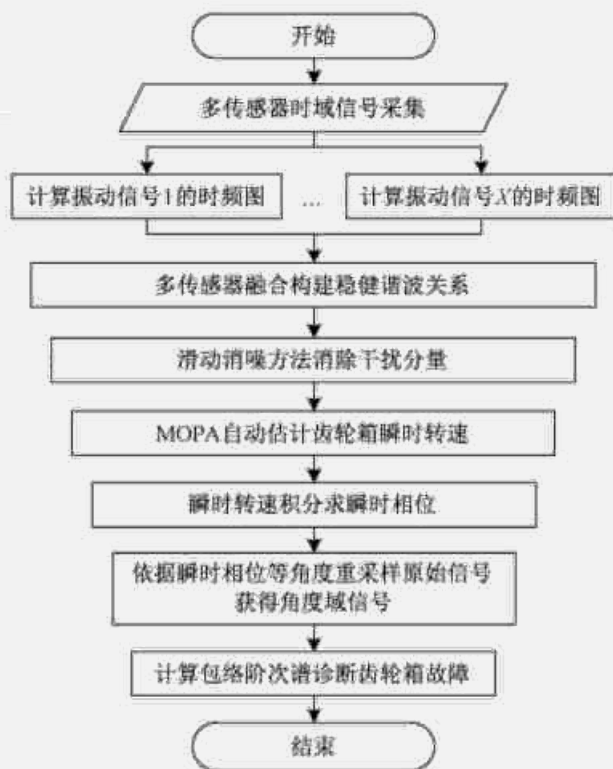


2.1 孪生体系 | 2.2 技术架构 | 2.3 平台能力

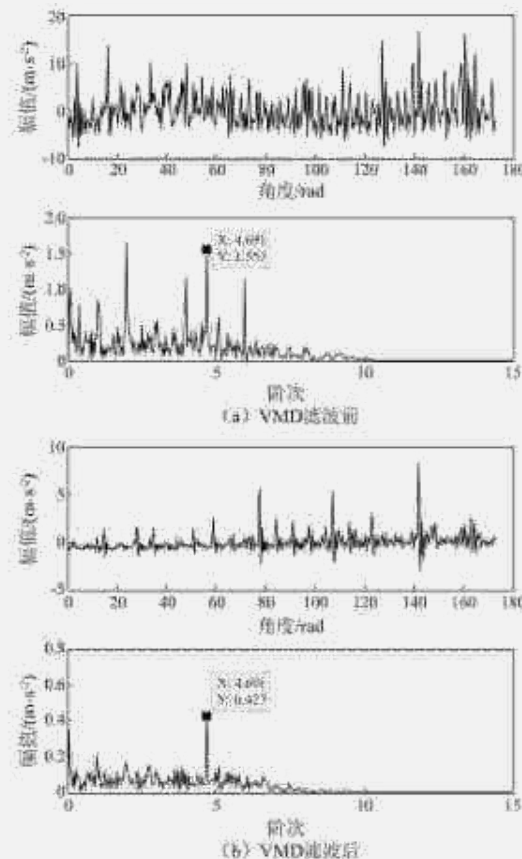
故障诊断：基于**振动信号**分析的风机故障诊断技术，通过时频域特征提取、信号处理及智能算法，实时监测齿轮箱、轴承等关键部件运行状态，识别磨损、失衡等故障，提升风机可靠性并降低运维成本。



风电齿轮箱数据采集系统



风机齿轮箱故障诊断流程



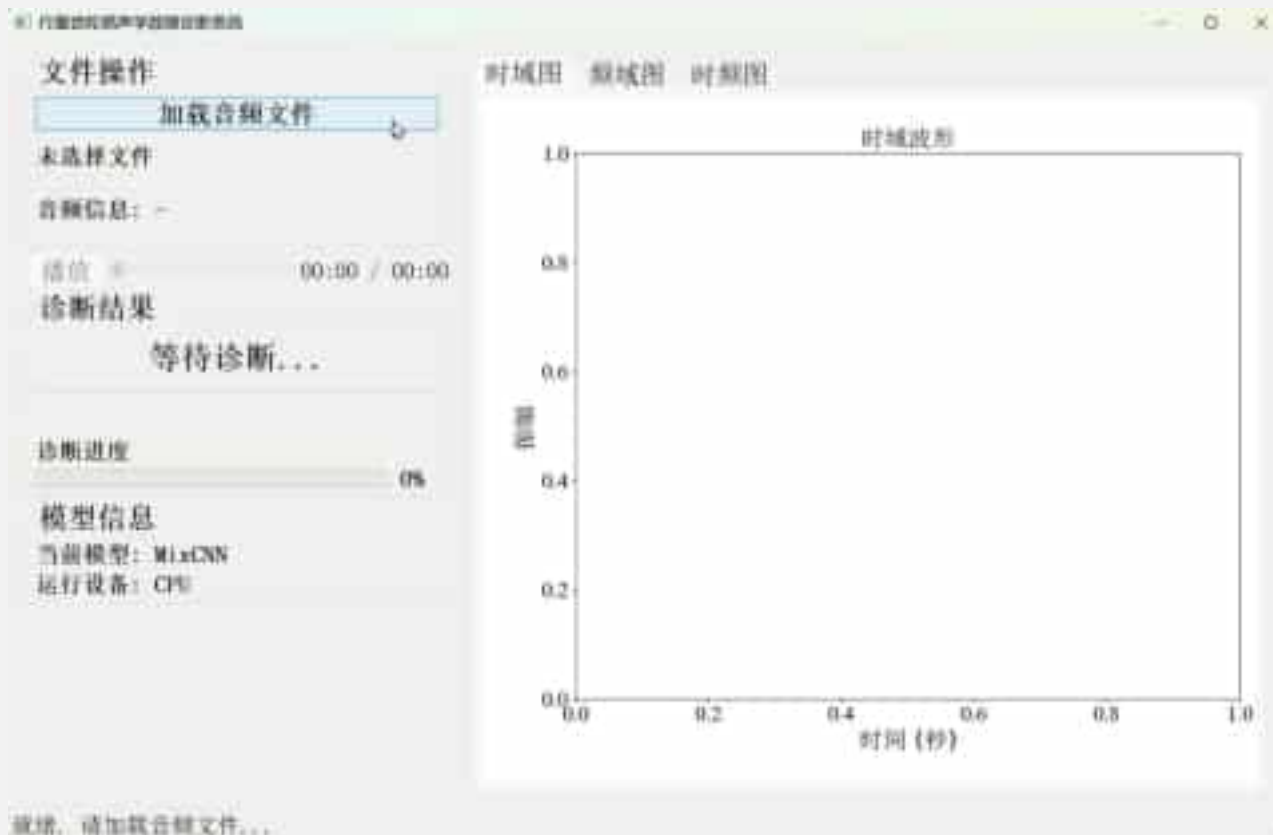
信号辨识

2.1 孪生体系 | 2.2 技术架构 | 2.3 平台能力

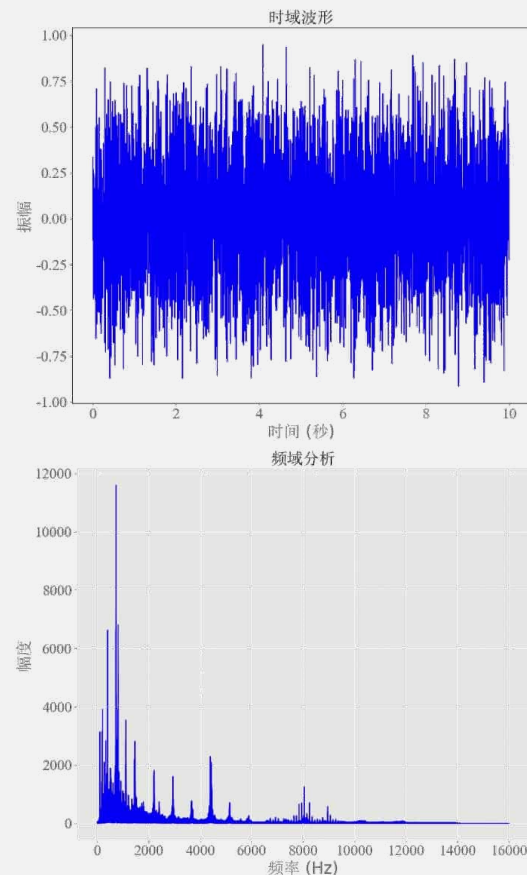
故障诊断：基于**声纹信号**的风机故障诊断技术，通过声学特征提取和模式识别算法，实时监测齿轮啮合、轴承磨损等异常声响，实现早期故障预警，提升运维效率并降低非计划停机风险。



大齿轮裂纹故障



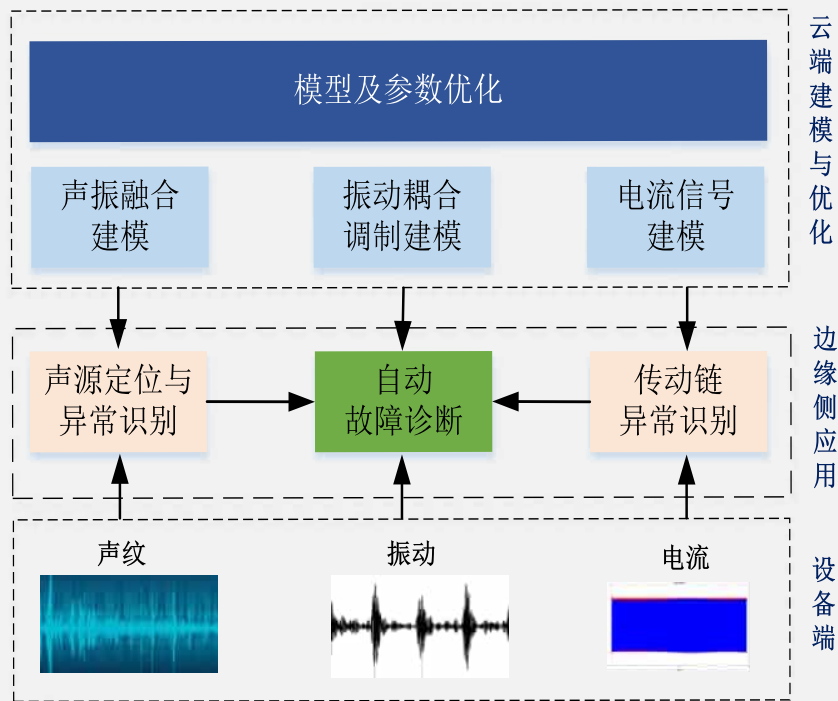
声学故障诊断系统操作视频



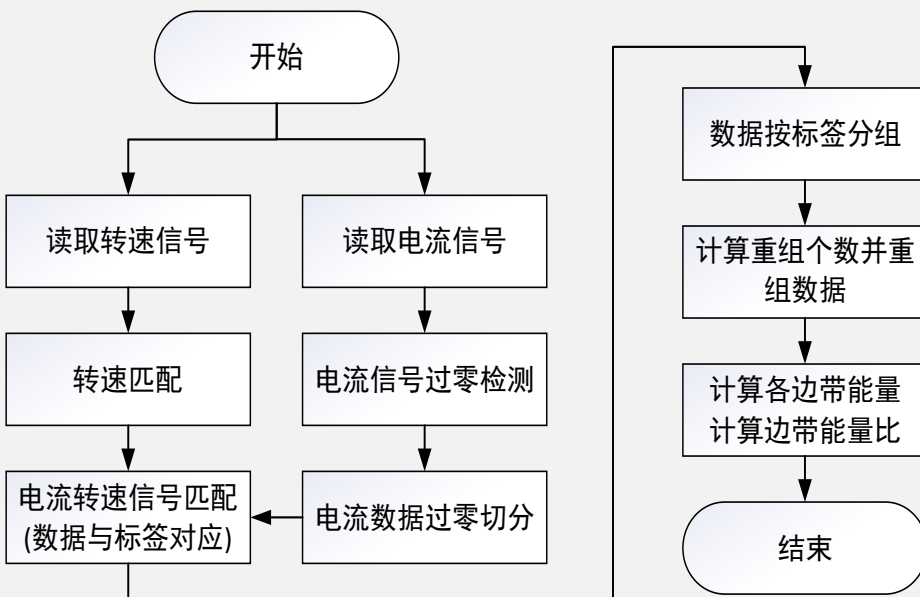
时域、频域波形

2.1 孪生体系 | 2.2 技术架构 2.3 平台能力

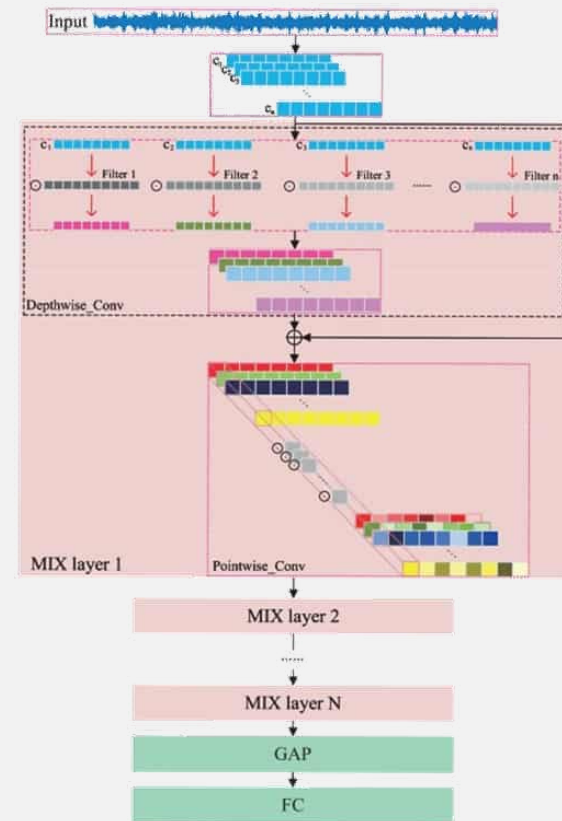
故障诊断：融合振动、温度、电流等**多源信息特征**，结合信号处理与机器学习算法，实现风机齿轮箱、轴承等关键部件的综合故障诊断与健康评估，提升故障识别准确率，优化运维决策效率。



多源信息融合的故障诊断架构



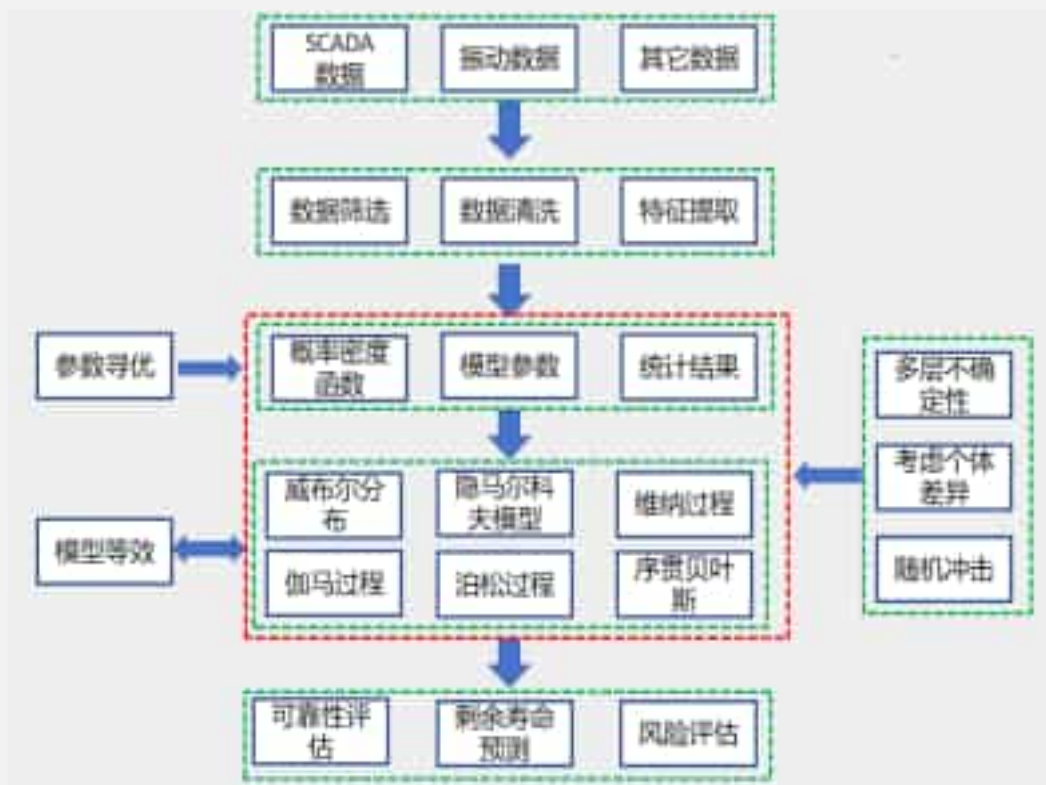
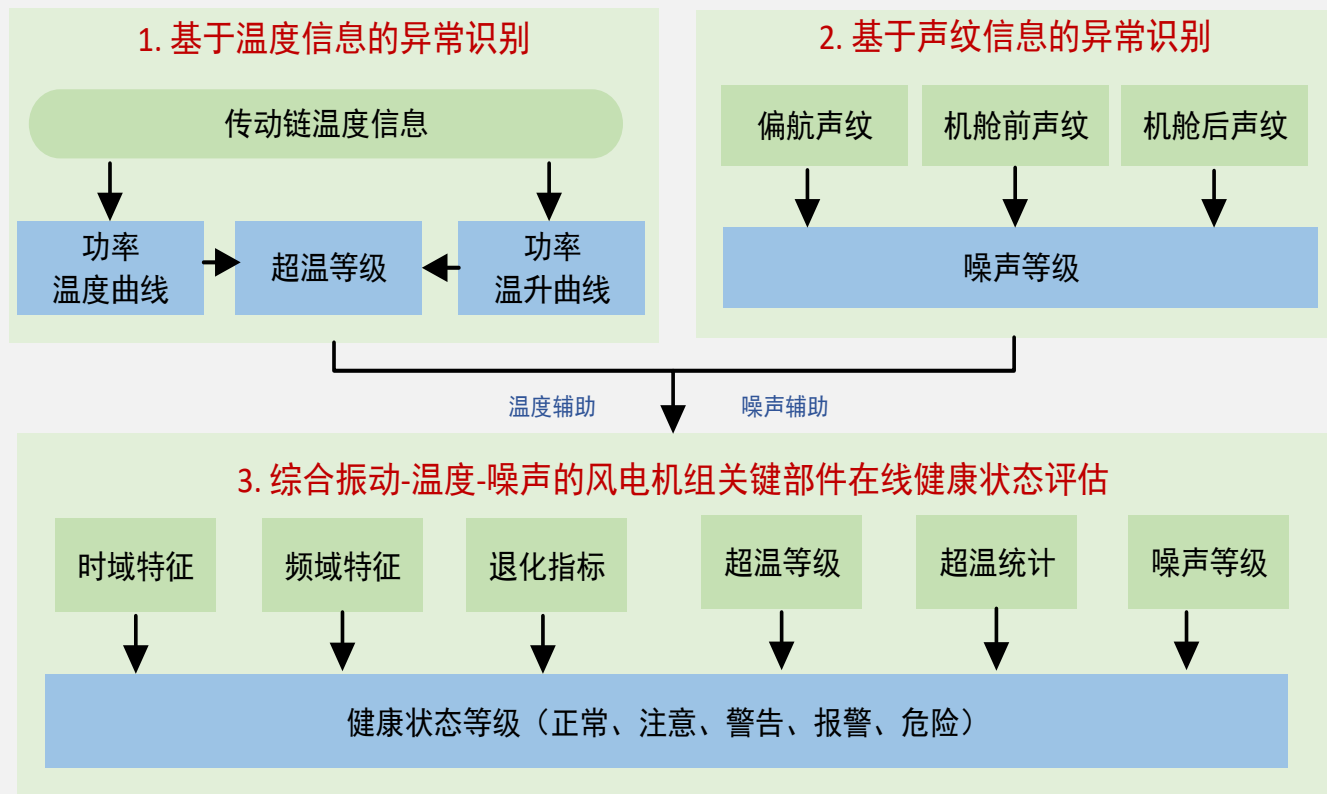
基于定子电流信号的齿轮箱故障诊断流程



基于混合信息CNN算法的故障诊断原理

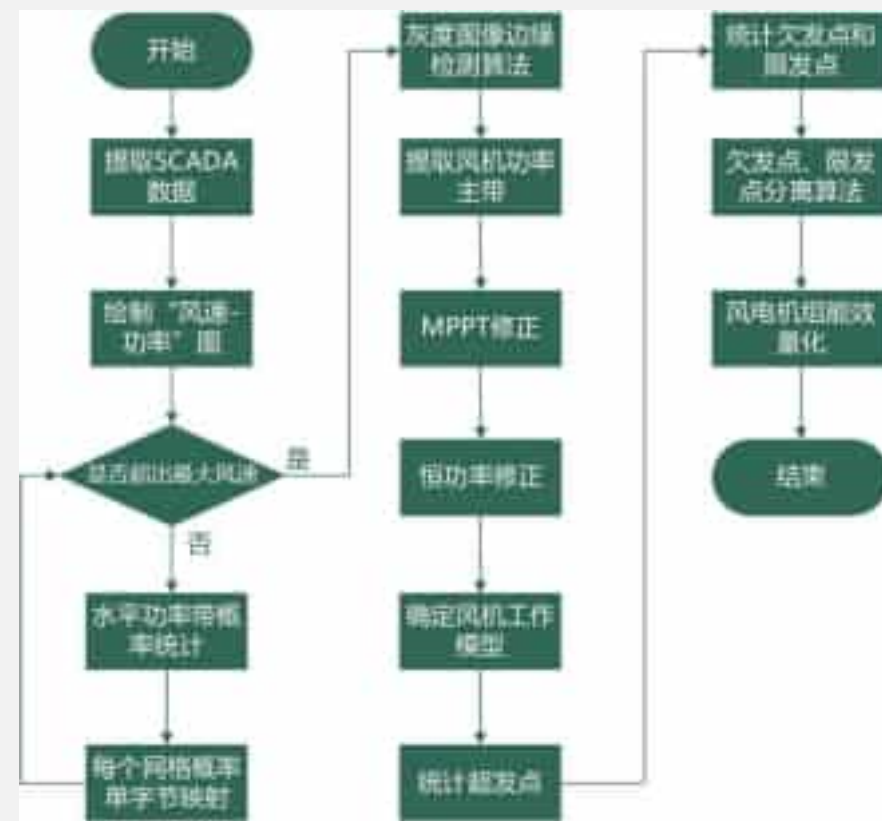
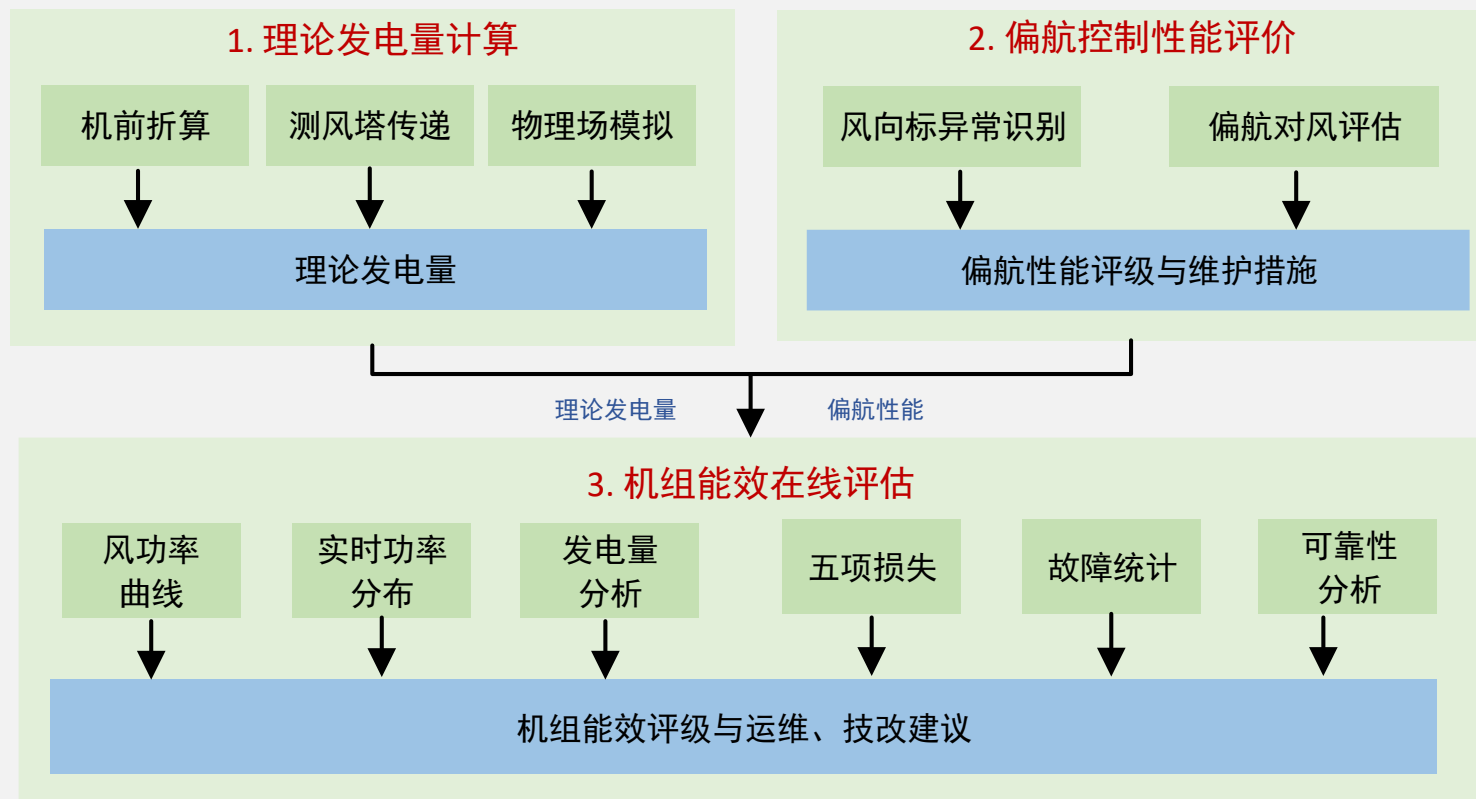
2.1 孪生体系 | 2.2 技术架构 | 2.3 平台能力

健康状态评估：基于振动、声纹等多源特征融合，构建主轴、齿轮箱等设备的随机退化模型，实现异常研判、健康评估及寿命预测。利用历史与实时数据评估其可靠性，助力企业降本增效，防范故障风险。



2.1 孪生体系 | 2.2 技术架构 | 2.3 平台能力

发电效能评估：基于SCADA运行数据完成理论发电量计算、机组风向标状态评估、偏航对风评估、机组出力特性评估、发电量评估、五项损失评估，对机组的综合能效进行**指标量化**及**技改建议**。





东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY

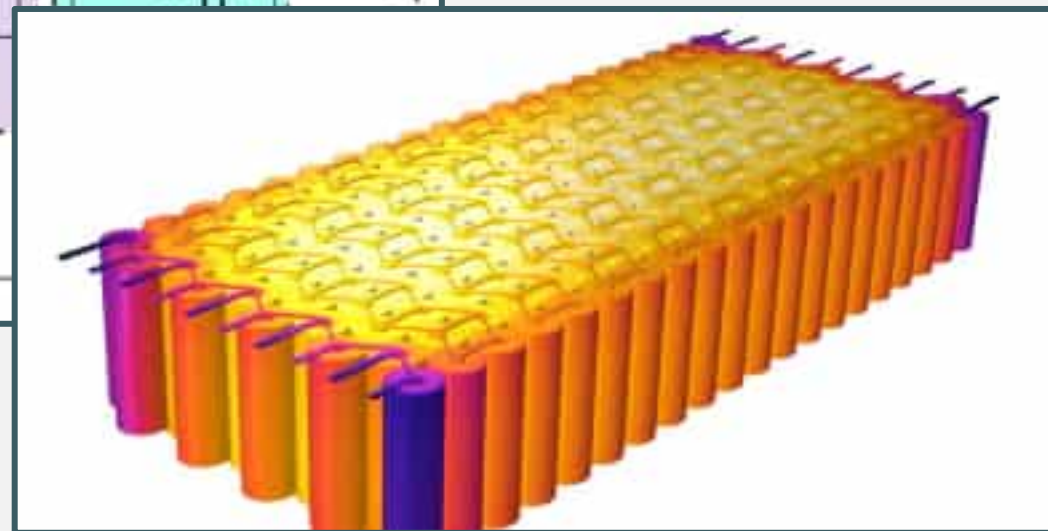
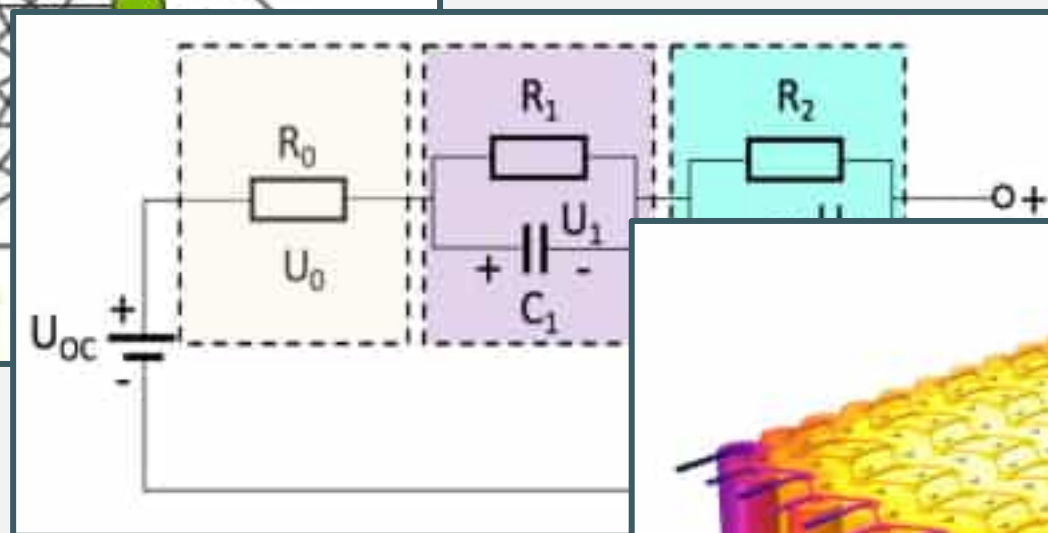
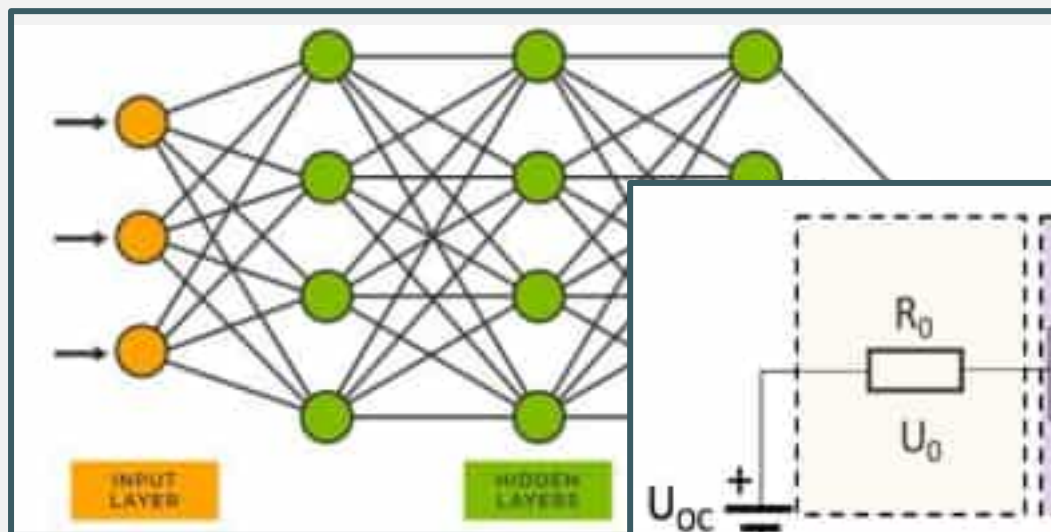


Part.3

数字孪生体

3.1 模型构建 | 3.2 模型融合 | 3.3 模型修正 | 3.4 模型验证

针对电力工业生产中的关键设备，构建其数据驱动的**神经网络模型**、经验/观测驱动的**等效电路模型**、机理驱动的**数值模拟模型**。



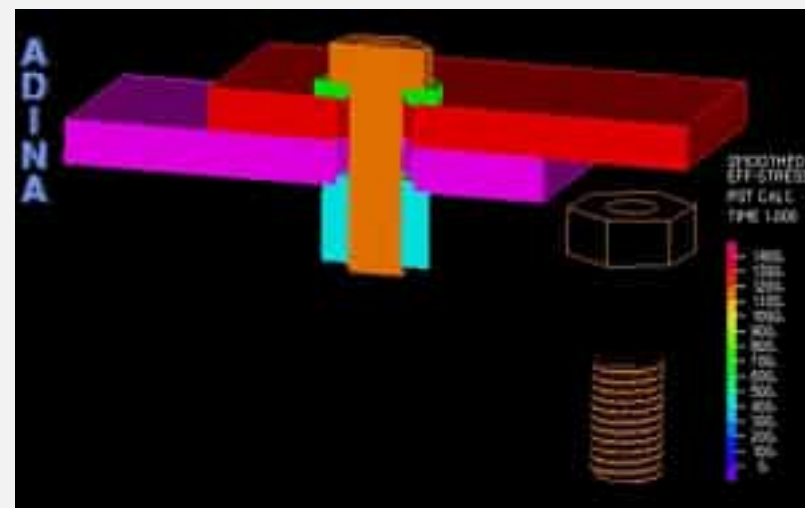
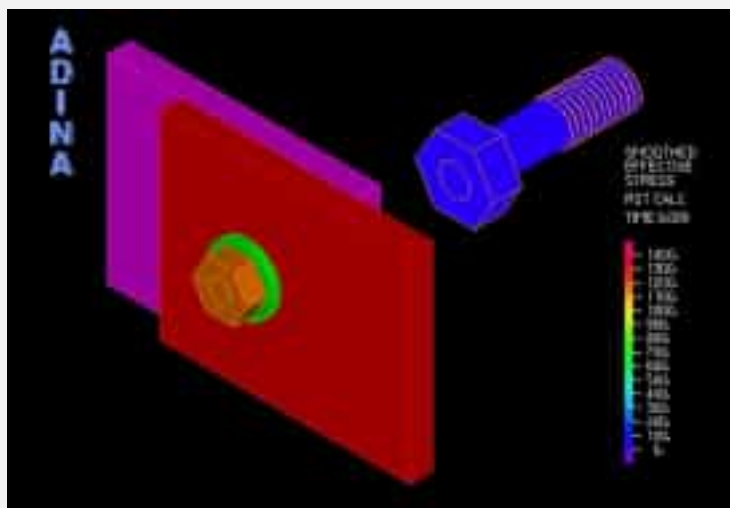
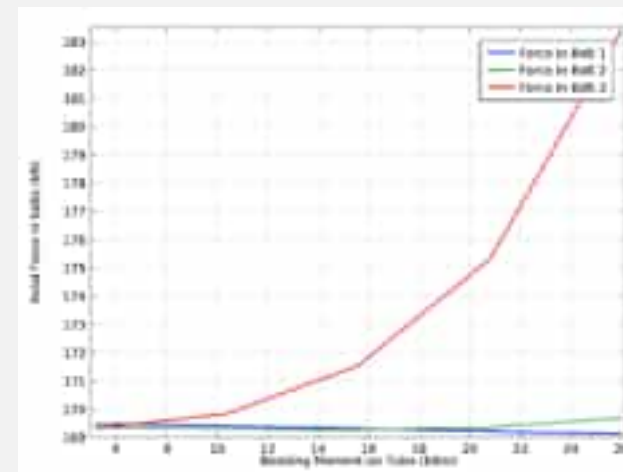
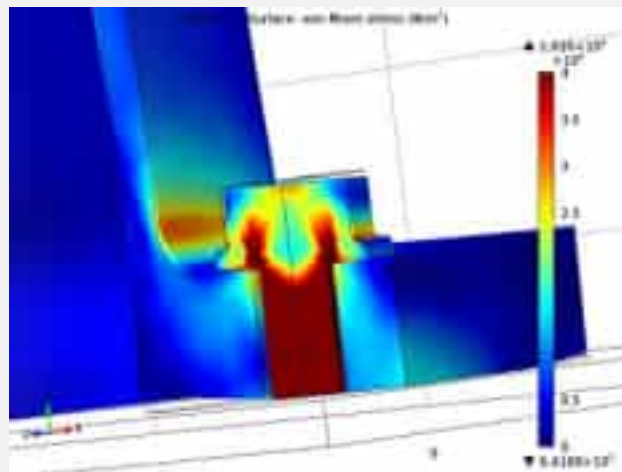
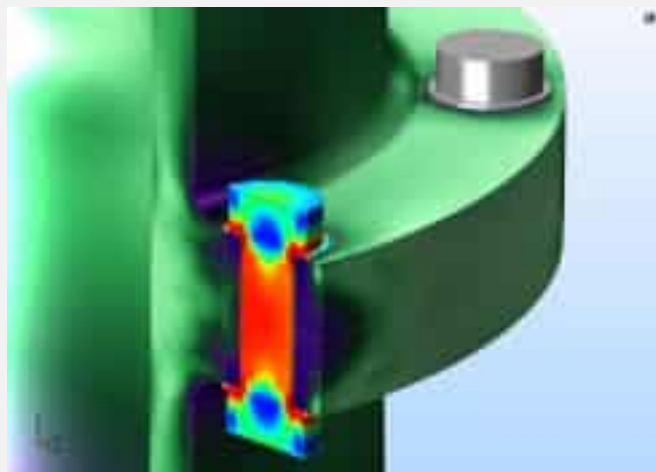
3.1 模型建立

3.2 模型融合

3.3 模型修正

3.4 模型验证

基于多模型融合完成**参数自更新的多物理场仿真**，实现螺栓、法兰、螺母等关键结构部件的建模及机械约束关系的描述；对螺栓紧固、横向窜动、扭摆的应力变化进行有限元分析。



3.1 模型建立 | 3.2 模型融合 | **3.3 模型修正** | 3.4 模型验证

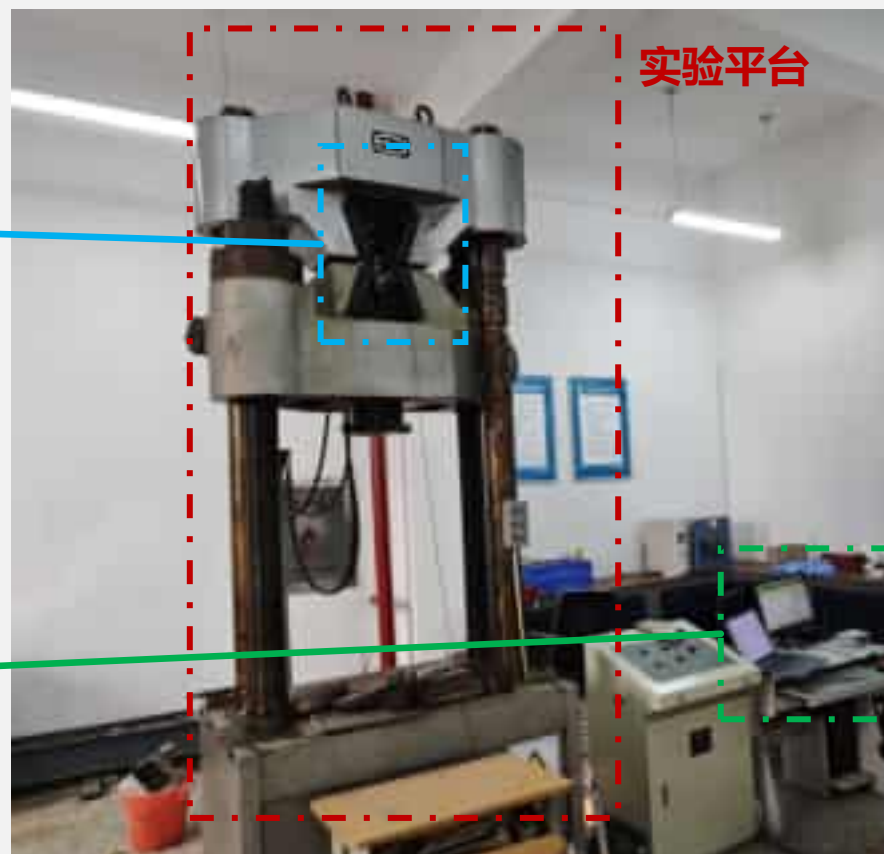
为模拟螺栓在受力情况下的**全生命周期**，在实验台进行了螺栓**拉伸测试实验**，获取螺栓形变-应力曲线，校验、修正模型的参数。



螺栓固定夹具



上位机



实验平台



196.0mm

待拉伸螺栓



220.0mm

$\Delta L=24\text{mm}$

拉伸后螺栓

3.1 模型建立 | 3.2 模型融合 | 3.3 模型修正 | 3.4 模型验证

设计研发了双馈式风力发电机缩比**仿真试验台**，通过硬件设备和模拟技术相结合，对双馈式风力发电机组的**实际运行工况、特性及动态过程**等进行**模拟和重现**。





东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY



Part.4

融合感知

4.1 感知体系

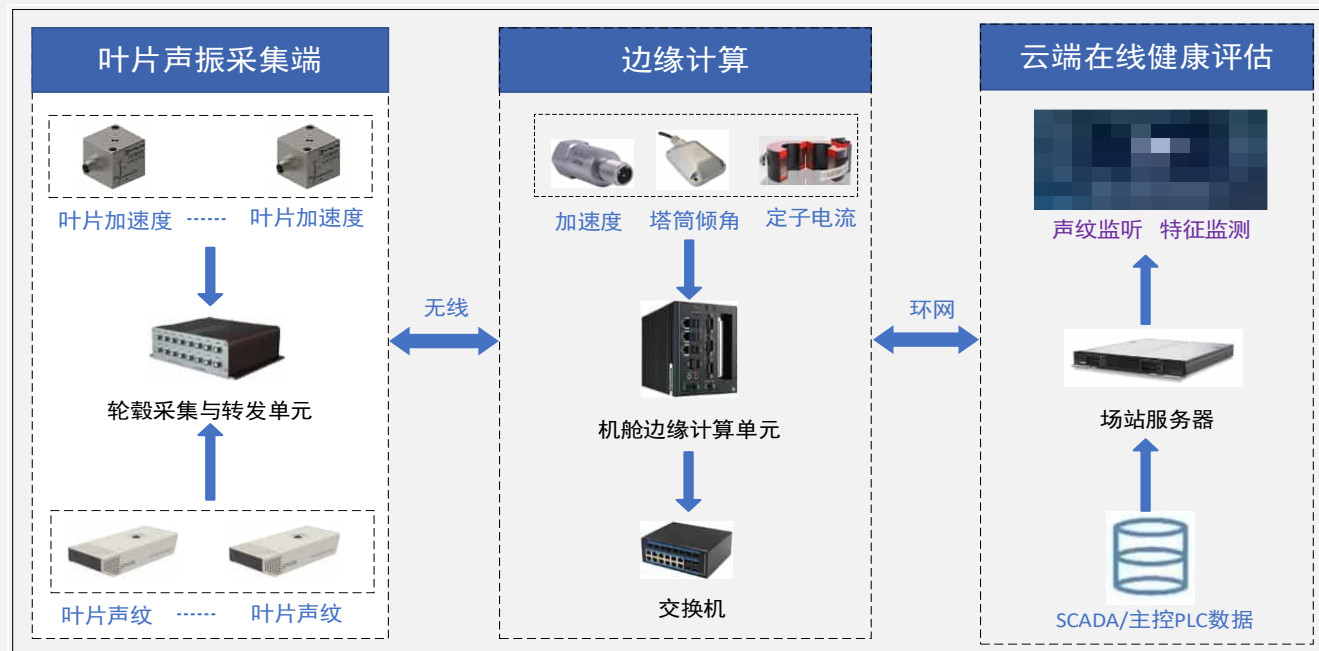
基于国产高性能传感器-高性能FPGA-高性能SoC-高性能服务器的**全链条自主可控融合感知体系**。
磁吸式部署**非侵入式声音、振动传感器**，在不破坏设备本体结构的前提下，获取多维度运行数据。



机舱内部放置的声音传感器



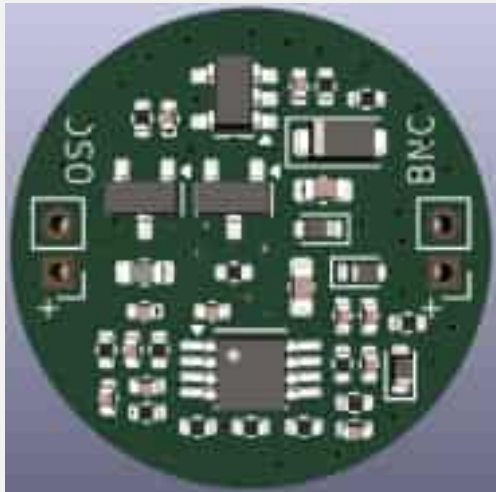
塔筒外放置的声音传感器



4.1 感知体系

基于国产高性能传感器-高性能FPGA-高性能SoC-高性能服务器的**全链条自主可控融合感知体系**。

带温度补偿的精密超声压电陶瓷驱动器及高频超声波测力探头：精度高、一致性好，恒流源二线制接线，磁吸设计，安装方便快捷。研发基于**高云高性能 FPGA 芯片**的 8 通道超声波测力控制盒。



4.1 感知体系

基于国产高性能传感器-高性能FPGA-高性能SoC-高性能服务器的**全链条自主可控融合感知体系**。

基于国产高性能SoC芯片的边缘智能计算终端：基于瑞芯微 RK3576J 芯片开发的工业级全国产芯片边缘智能计算终端，支持-45℃~80℃稳定运行，具有 6 TOPs NPU 算力和高速通讯接口，实现多达数百通道测量数据的实时汇总、解算、智能分析。



4.1 感知体系

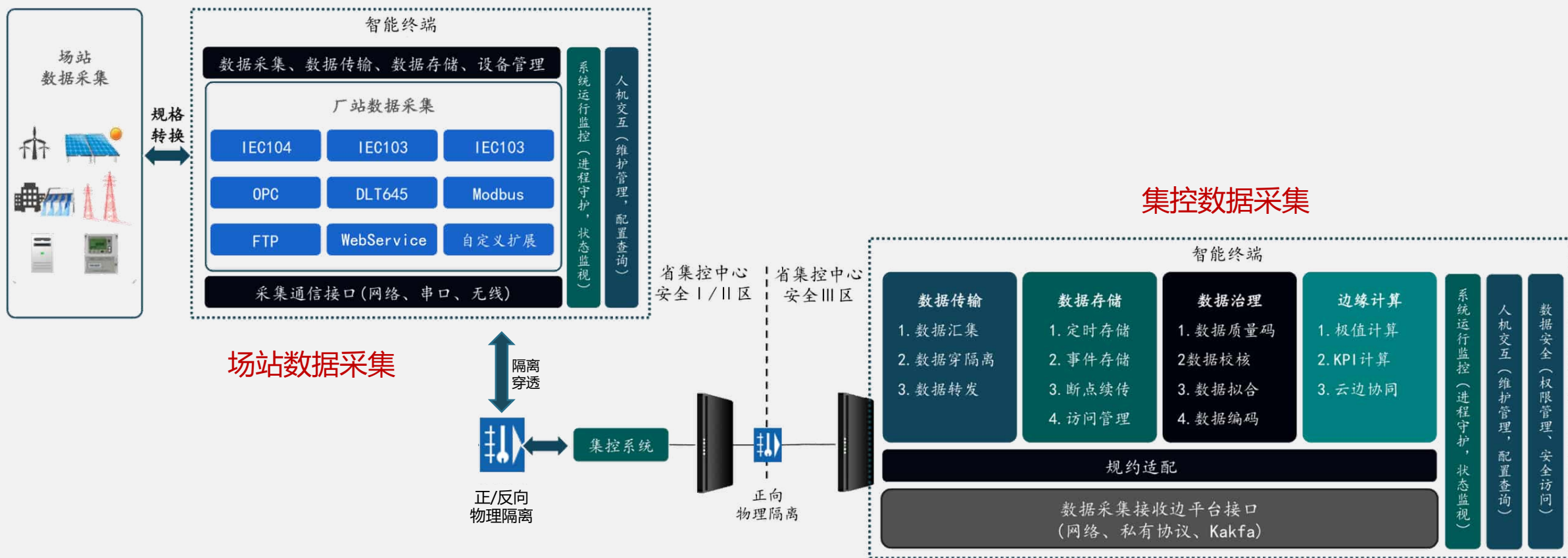
基于国产高性能传感器-高性能FPGA-高性能SoC-高性能服务器的**全链条自主可控融合感知体系**。

基于国产高性能计算服务器部署应用：升压站部署中科曙光高性能云计算服务器，基于中科海光高性能多核架构 CPU，运行银河麒麟 v10 服务器操作系统，技术全面自主可控。



4.1 感知体系

多源信息融合机制：基于升压站云计算服务器实现 CMS、SCADA、螺栓预紧力/塔筒倾角等辅助系统的多源数据收集及时空关联融合，打通风力发电信息孤岛，实现**状态监控与瞬时工况的实时对应**，支撑数字孪生体系下的智能感知、智慧运维。





东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY



Part.5

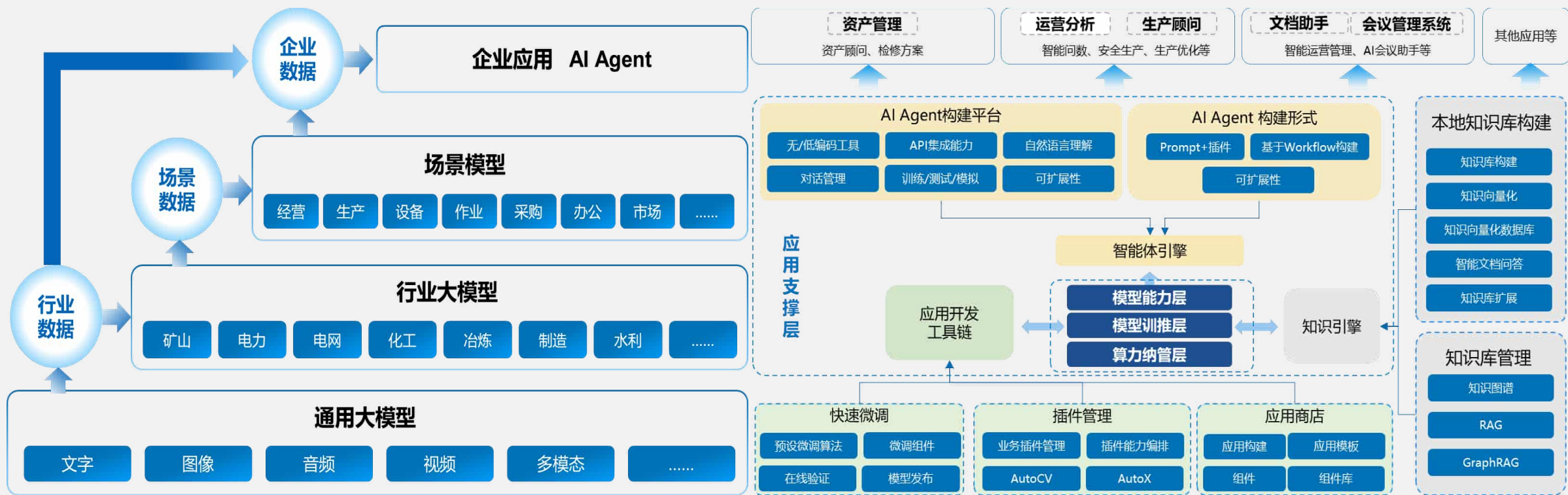
生成式人工智能

5.1 AIGC电力大模型

5.2 专家知识

5.3 AI值班

以通用大模型为技术底座，通过提示工程、检索增强生成、精调、继续预训练/后训练等方式，对电力应用场景下的多模态专业知识和数据进行**私有化学习**，通过**本地化部署**保护客户数据安全，构建该**应用场景垂直大模型**，对该电力场景业务进行**AI赋能**，并进一步结合业务系统实现可落地的智能应用。

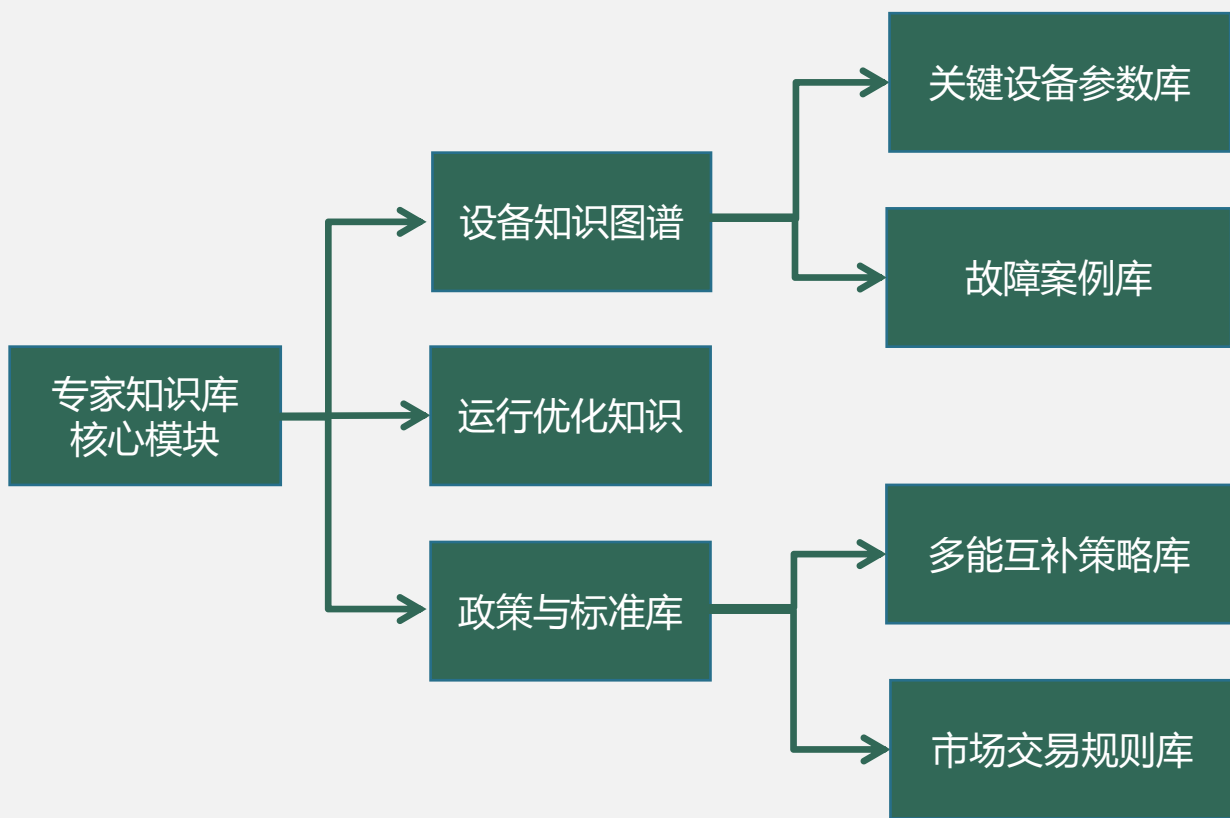


5.1 电力大模型

5.2 专家知识库

5.3 AI值班

整合发电场站设计、运行、维护的全生命周期数据及经验，形成可复用的标准化知识体系，通过**数据驱动决策**，提升场站经济性、安全性与低碳化水平，服务于运维工程师、设计院以及管理层。



用户输入:

“齿轮箱振动值突增至7mm/s，伴随周期性异响，油温正常。”

知识库响应:

1. 特征提取:

- 关键参数: 振动值 (7mm/s), 异响类型 (周期性), 油温 (正常)。

2. 案例匹配:

- TOP1匹配: 内蒙古风电场轴承故障案例 (振动频谱相似度91%)。
 - 建议: 立即停机, 检查轴承轴向/径向游隙。
- TOP2匹配: 江苏风电场齿轮箱故障案例 (异响特征相似度85%)。
 - 建议: 采集油液金属颗粒数据, 若铁含量>100ppm需开箱检查。

3. 辅助决策:

- 紧急操作:
 - 第一步: 振动频谱分析 (定位故障频率是否匹配轴承缺陷特征)。
 - 第二步: 油液采样送检 (重点关注铁、铜元素含量)。
- 关联文档:
 - 《齿轮箱振动诊断国家标准GB/T 29531》
 - 轴承更换SOP操作手册 (附扭矩参数)。

5.1 电力大模型

5.2 专家知识

5.3 AI值班员

高度**专业定制**，在通用大模型的基础上，结构和参数均可调整，功能完善，性价比高；可与其他应用和设备连接，支持广泛范围内协助进行任务调度和问题解决；采用**私有化训练**方法和**本地化部署**方式，确保数据安全。AI 助手能力，可与其他应用和设备连接，支持广泛范围内协助进行任务调度和问题解决。



油浸式电力变压器的专业巡视要点是什么？



油浸式电力变压器的专业巡视要点包括以下内容：

1. 本体及储油柜：检查顶层温度计和绕组温度计的外观，确保完整、密封良好，温度指示正常。检查油位计的外观，确保完整、密封良好，指示符合要求。检查法兰、阀门、冷却装置、油箱、油管路等密封连接处，确保密封良好，无渗漏痕迹。检查铁心、夹件外引接地，确保良好接地。检查油箱及外部螺栓等部位，确保无异常发热。确保无异常振动声响。
2. 冷却装置：检查散热器的外观，确保完好无锈蚀、无渗漏油。检查阀门的开启方向，确保油泵、油路等无渗漏，无掉漆及锈蚀。检查风扇和油泵、水泵的运转情况，确保平稳运转，无异常声音和振动。检查水冷却器的压差继电器、压力表、温度表、流量表的指示情况，确保指示正常。检查冷却塔的外观，确保运行参数正常，无锈蚀、管道无渗漏、阀门开启正确、电机运转正常。
3. 套管：检查瓷套的完好性，确保无脏污、破损、放电。检查防污闪涂料、复合绝缘套管伞裙、辅助伞裙，确保无龟裂老化脱落。检查套管油位的清晰程度，观察窗玻璃的清晰程度，确保油位指示在合格范围内。检查各密封处，确保无渗漏。检查套管及接头部位，确保无异常发热。检查电容型套管末屏的接地情况，确保可靠接地，密封良好，无渗漏油。
4. 吸湿器：检查外观，确保无破损，干燥剂变色部分不超过2/3，油杯的油位在油位线范围内，油质透明无浑浊，呼吸正常。对于免维护吸湿器，检查电源、排水孔畅通、加热器工作情况。
5. 分接开关：检查密封情况，确保无渗漏油。检查档位指示器的清晰度和指示准确性。检查机械操作装置，确保无锈蚀。检查油道，确保畅通无油垢及杂物积存。检查外观整齐清洁，绝缘及导线无破损。检查垫块，确保无位移和松动。进入变压器内检修时，避免踩踏夹持件、支撑件，避免遗留物品。检查并确定绝缘状态，不宜进行预压。

以上是油浸式电力变压器的专业巡视要点。



东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY



Part.6

成果应用案例

6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

传动系统CMS产品已在吉林松原某风场稳定运行7年，实现了3#一级、二级齿圈故障诊断、2#齿轮箱高速轴非驱动端轴承保持架窜动故障诊断，**叶片/轮毂系统**也实现了变桨齿圈磨损、叶片流胶脱落等故障诊断。

该产品已先后在新疆哈密、河北张家口、贵州桐梓、山东东营、蒙东地区多个风场实现批量化部署应用。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

传动系统CMS已在吉林松原某风场稳定运行7年，实现了3#一级、二级齿圈故障诊断、2#齿轮箱高速轴非驱动端轴承保持架窜动故障诊断，**叶片/轮毂系统**也实现了变桨齿圈磨损、叶片流胶脱落等故障诊断。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

SCADA 智能分析系统已在贵州桐梓某风场稳定运行一年，支持智能预警、运维辅助、经济运行、智能控制四大智能分析专题板块。

智能预警

包括传动系统、电气系统、冷却系统、结构系统等风机主要系统的故障预警。



运维辅助

包括功率曲线拟合、偏航对风分析、可靠性分析、超温诊断、预警/故障类型分析、单机偏差分析等主要板块。



经济分析

包括风资源分析、发电量/厂用电量分析、能效分析、三率分析、五损分析、对标考评等主要板块。



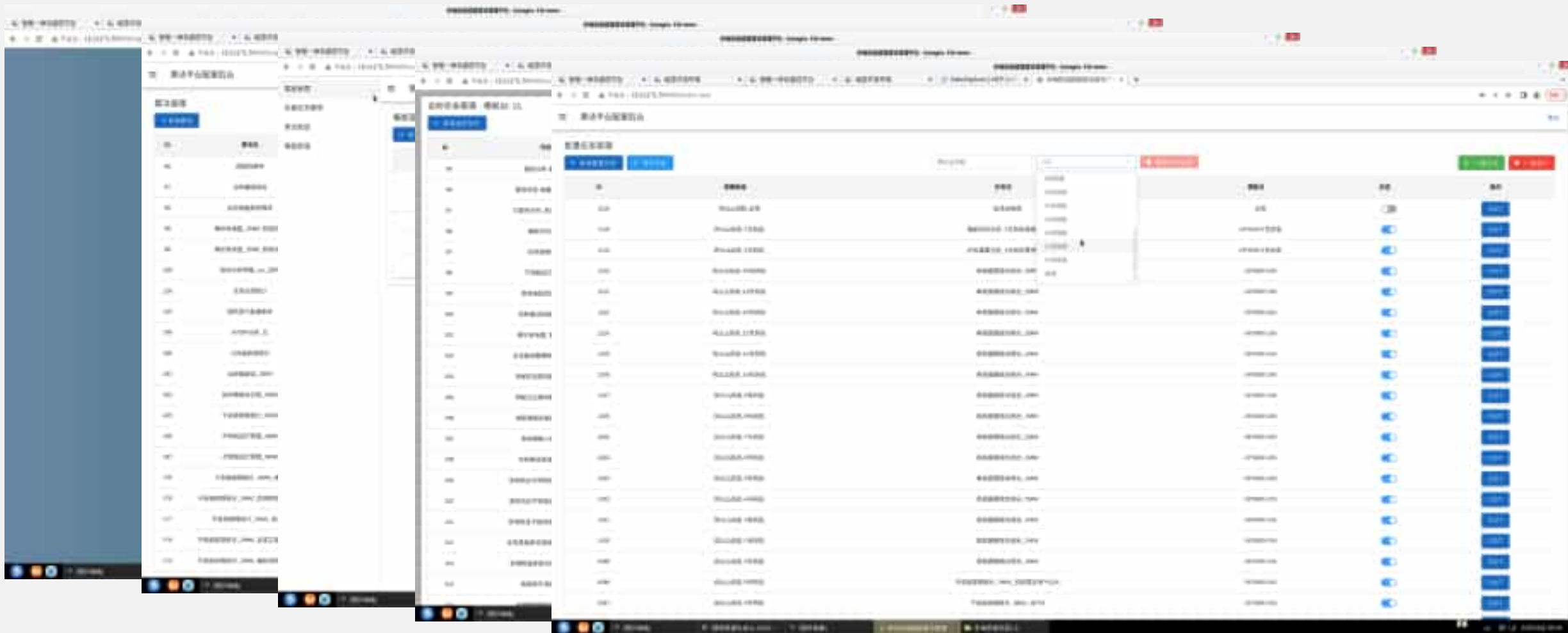
智能控制

包括小风启停推荐、启停能效分析等主要板块。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

SCADA 智能分析系统已在贵州桐梓某风场稳定运行一年，支持智能预警、运维辅助、经济运行、智能控制四大智能分析专题板块。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

螺栓预紧力及缺陷监测系统已在蒙东某风场部署运行，提供螺栓实时预紧状态、标准预紧力对比的直观展示，预紧力异常、螺栓内裂纹/气孔缺陷的及时报警，并支持历史数据的回溯查询。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

螺栓预紧力及缺陷监测系统已在蒙东某风场部署运行，提供螺栓实时预紧状态、标准预紧力对比的直观展示，预紧力异常、螺栓内裂纹/气孔缺陷的及时报警，并支持历史数据的回溯查询。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

针对大规模光伏电站运行管理面临的挑战，研究基于虚实交互构建**全域数字孪生底座**，实现数据采集、建模、监测与智能决策；构建**智能安防体系**，保障电站人员、设备和环境安全；建立**综合能效指标体系**及评估方法，提升电站能效；研究**光功率预测技术**，优化发电调度；基于异构无人载具实现**自主巡检与缺陷诊断**。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

火电燃烧过程精细化控制：采用CFD数值精确模拟和燃烧过程模拟技术相结合，对燃烧设备内部复杂的物理化学过程进行建模分析。建立炉内**温度场**、**成分场**、**流量场**高精度模型，精准地反映炉内不同位置的温度分布、燃烧产物成分浓度以及气流流量等关键参数。模型稳态精度小于**2%**。

控制方程和湍流模型

质量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \rho U_i = -\frac{\partial \rho}{\partial t}$$

动量守恒方程：

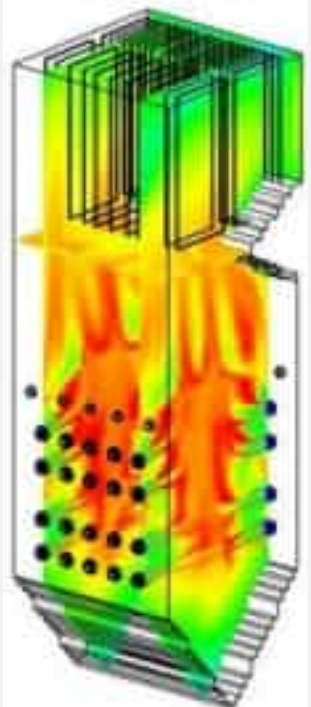
$$\frac{\partial}{\partial t} \rho U_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho U_j U_i = -\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + S_{U_i}$$

化学组分守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho M_a) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j M_a) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \Gamma_a \frac{\partial M_a}{\partial x_j} + R_a$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \tilde{H} - P) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \tilde{H}) = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\Gamma_h c \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_a \Gamma_a H_a \frac{\partial M_a}{\partial x_j} \right] + \text{div} \vec{W}_s + S_{rad} + S_E$$



炉内多场耦合模型

温度场分解

成分场分解

流量场分解

温度场分布

NO浓度场分布

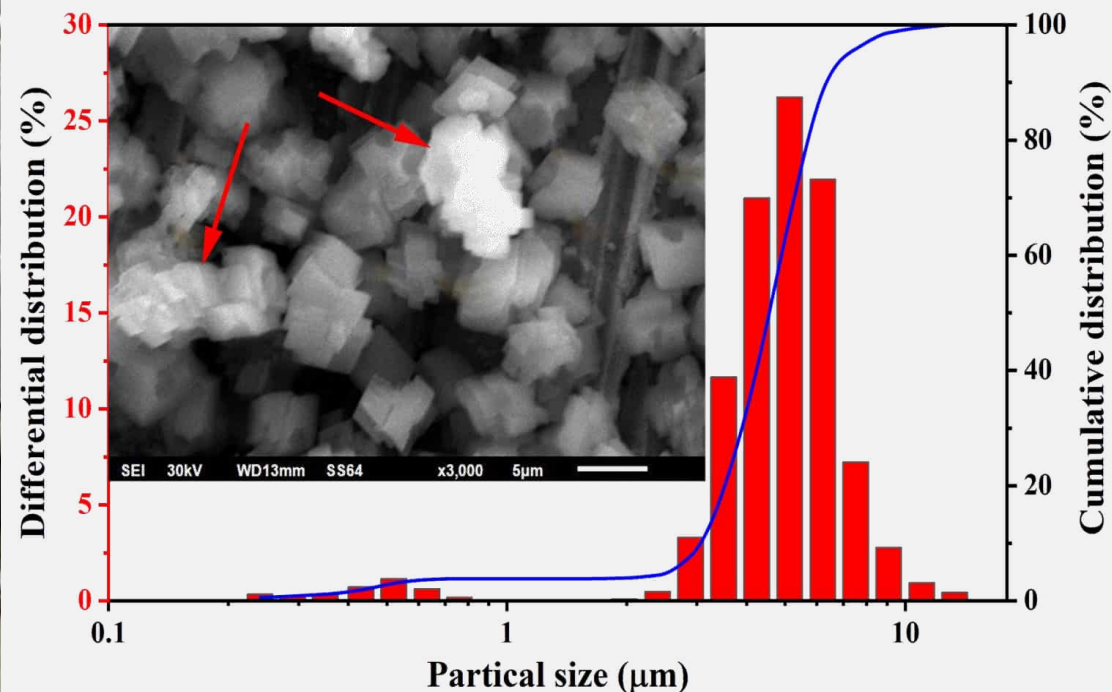
O₂浓度场分布

6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

换热设备防垢抑垢：以自主研发的电磁水处理装置为基础，将表征抑垢状态的特征水质参数电导率和pH值作为反馈信号，形成闭环回路，采用**自适应动态面智能控制策略**输出控制信号调整磁场强度，实现闭环状态反馈，持续保持优化处理效果。通过**自动调整电磁场强度**和**电磁场频率**，实现了完全物理除垢，提高换热系统运行效率。



电磁抑垢实验环境



颗粒大小的微分分布与累积分布

6.1 风力发电

|

6.2 光伏发电

|

6.3 火电、核电

|

6.4 电力系统

汽轮机振动监测：作为工业设备健康管理的核心环节，在火电和核电领域呈现显著的增长潜力，其市场容量的扩张主要由存量机组改造、新建项目配套需求及政策驱动共同推动，通过**实时振动数据**监测与分析，预防汽轮机机械故障（如转子失衡、轴瓦磨损等），保障安全运行并延长设备寿命。

监测指标	正常范围	危险阈值	关联故障
轴振振幅	≤50（大型机组）	>120	转子不平衡、对中不良
瓦振速度	≤2.8	>7.1	轴承磨损、油膜振荡
相位角	稳定±10°	突变>30°	叶片脱落、联轴器故障
频谱特征	1×转速频率为主	出现2×/3×高频	轴弯曲、齿轮啮合问题

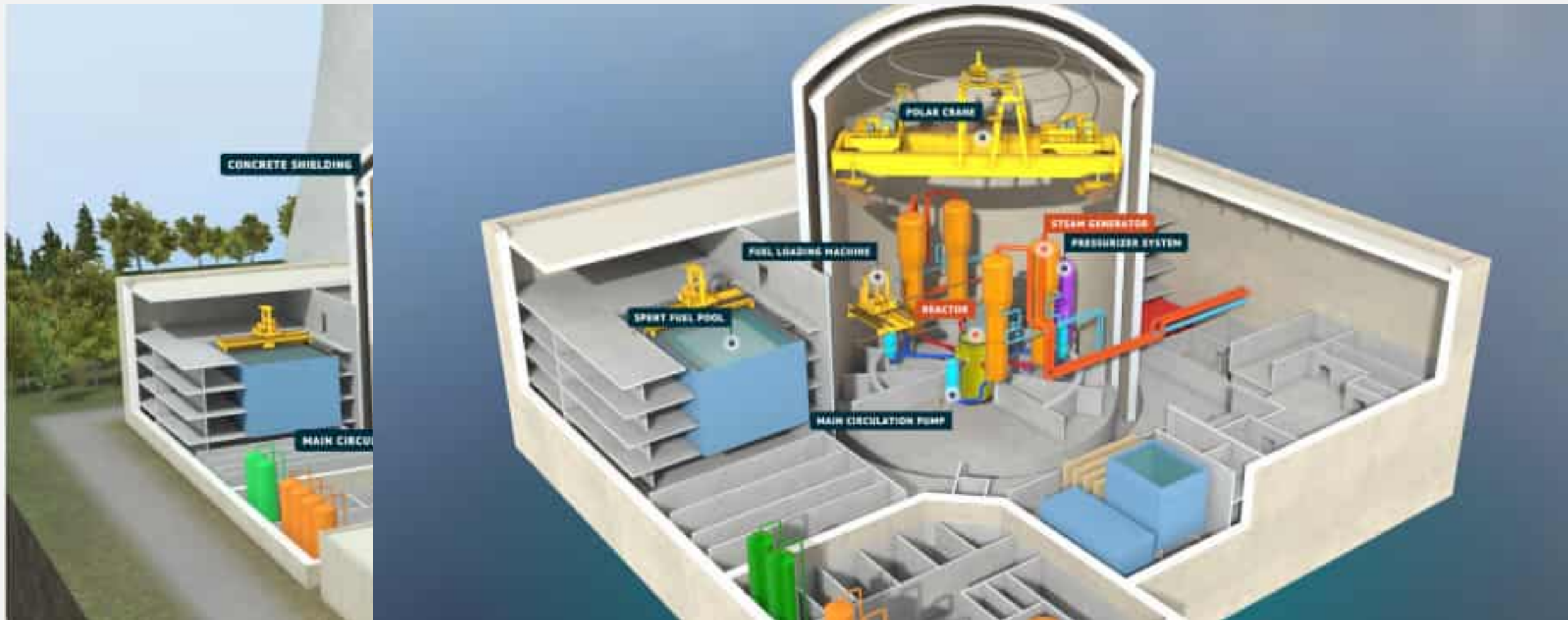
汽轮机振动监测关键参数



本特利转子振动模拟实验台

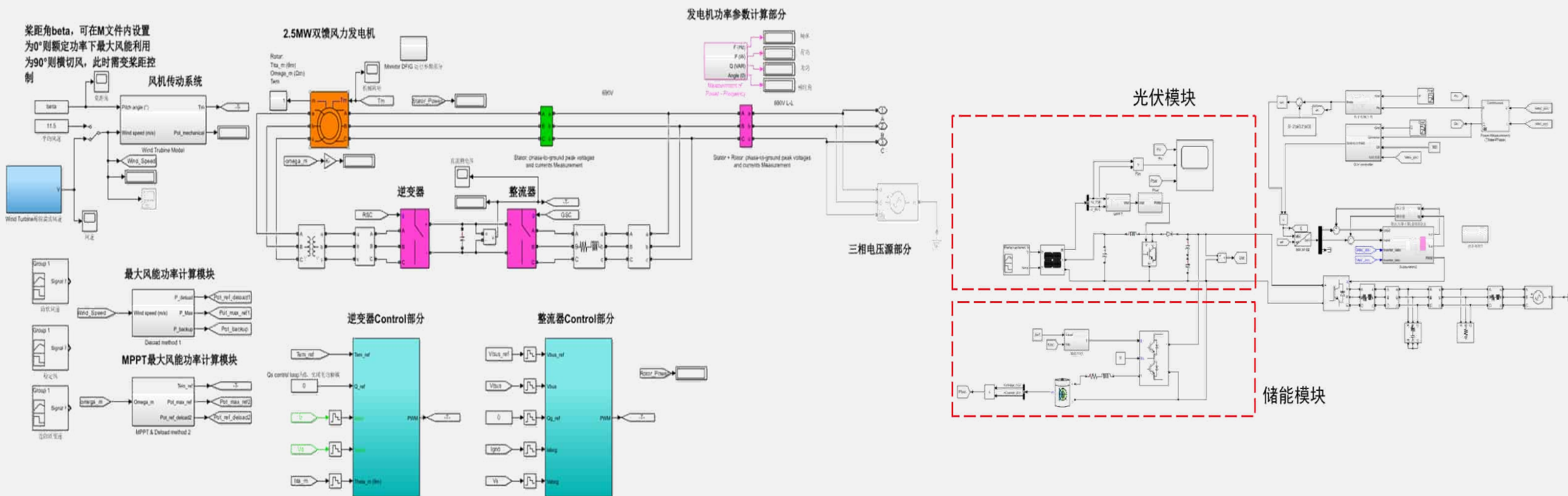
6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.3 火电、核电 | 6.4 电力系统

核电运维检修拟真实训：构建逼真的核电站运行与检修环境，涵盖主设备巡检、故障诊断、应急处置等关键环节。学员可在沉浸式场景中进行实操训练，提升专业技能与应变能力，确保核电安全高效运行。



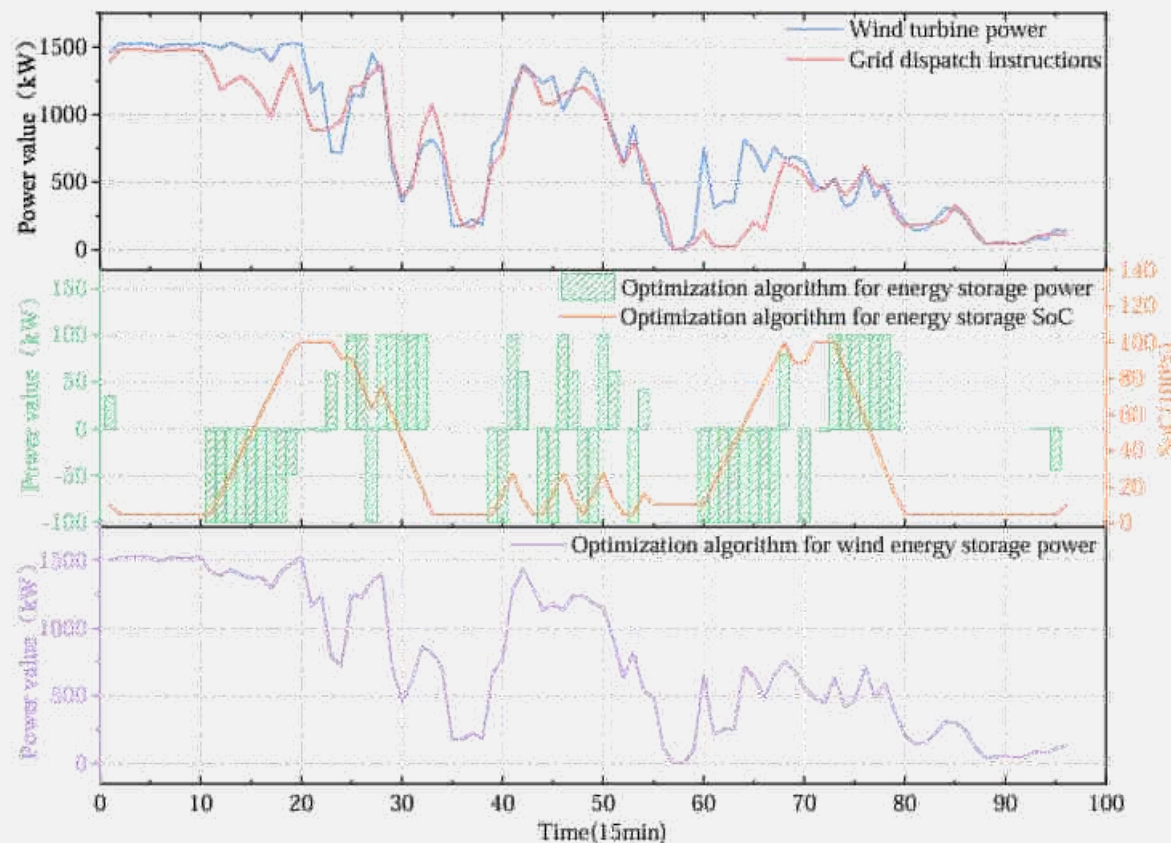
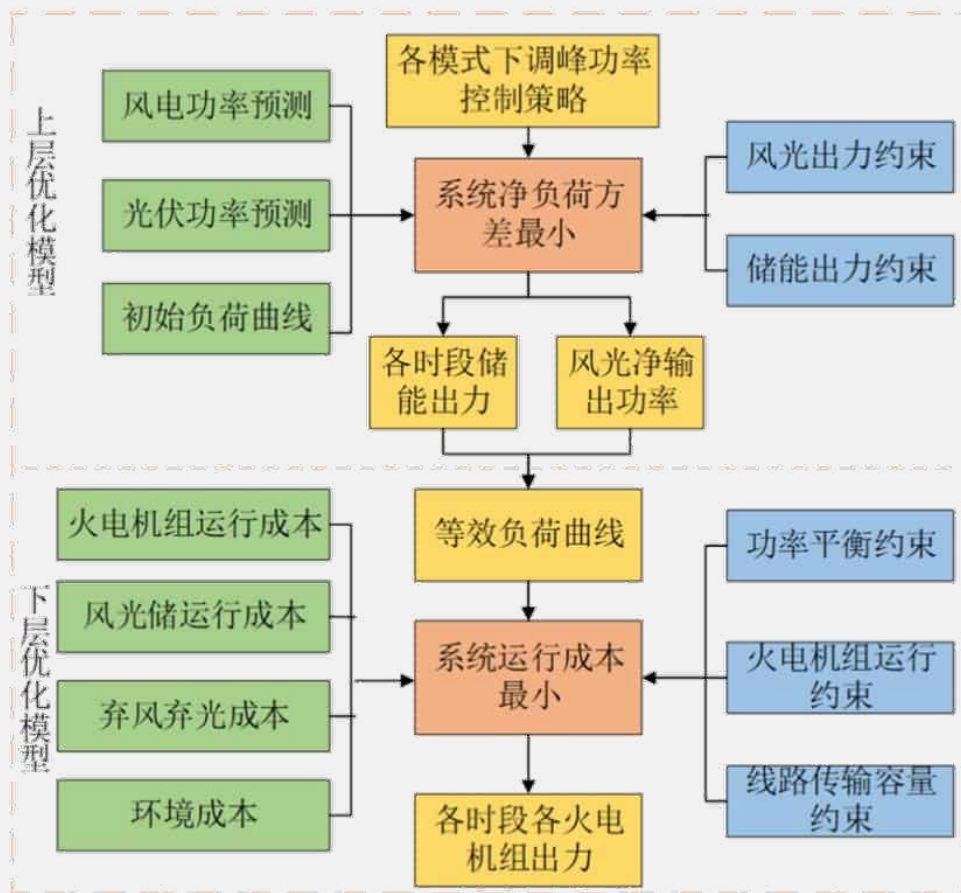
6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.4 电力系统

新能源并网支撑：分析**虚拟同步发电机（VSG）**功频特性并构建**VSG功-频数学模型**，研究建立功率、惯量与阻尼相互支撑的协调控制方法；通过建立**风机超速、减载一次调频控制**方法，以增强风电机组并网的致稳性；通过揭示储能单元出力特性及调控机理，研究建立**高风电渗透系统储能配置方案**，以提高新能源对电网的支撑能力。



6.1 风力发电 | 6.2 光伏发电 | 6.4 电力系统 | 6.4 电力系统

综合能源系统经济运行：储能系统协调参与**峰谷电价套利、弃风消纳、电力市场现货交易、功率预测考核、电力市场辅助服务**，从技术性约束、经济性约束及市场性约束等多个维度约束条件进行考量，确保系统稳定运行的基石。设置**最大化效益、最小化成本**目标函数对运行策略、成本最优配置进行优化求解。





东北电力大学
NORTHEAST ELECTRIC POWER UNIVERSITY

感恩支持，期待合作！



吉林省精密驱动智能控制国际联合研究中心
吉林省人工智能及能源电力应用工程实验室

2025 年 6 月