



5月28日 2024 | 北京

---

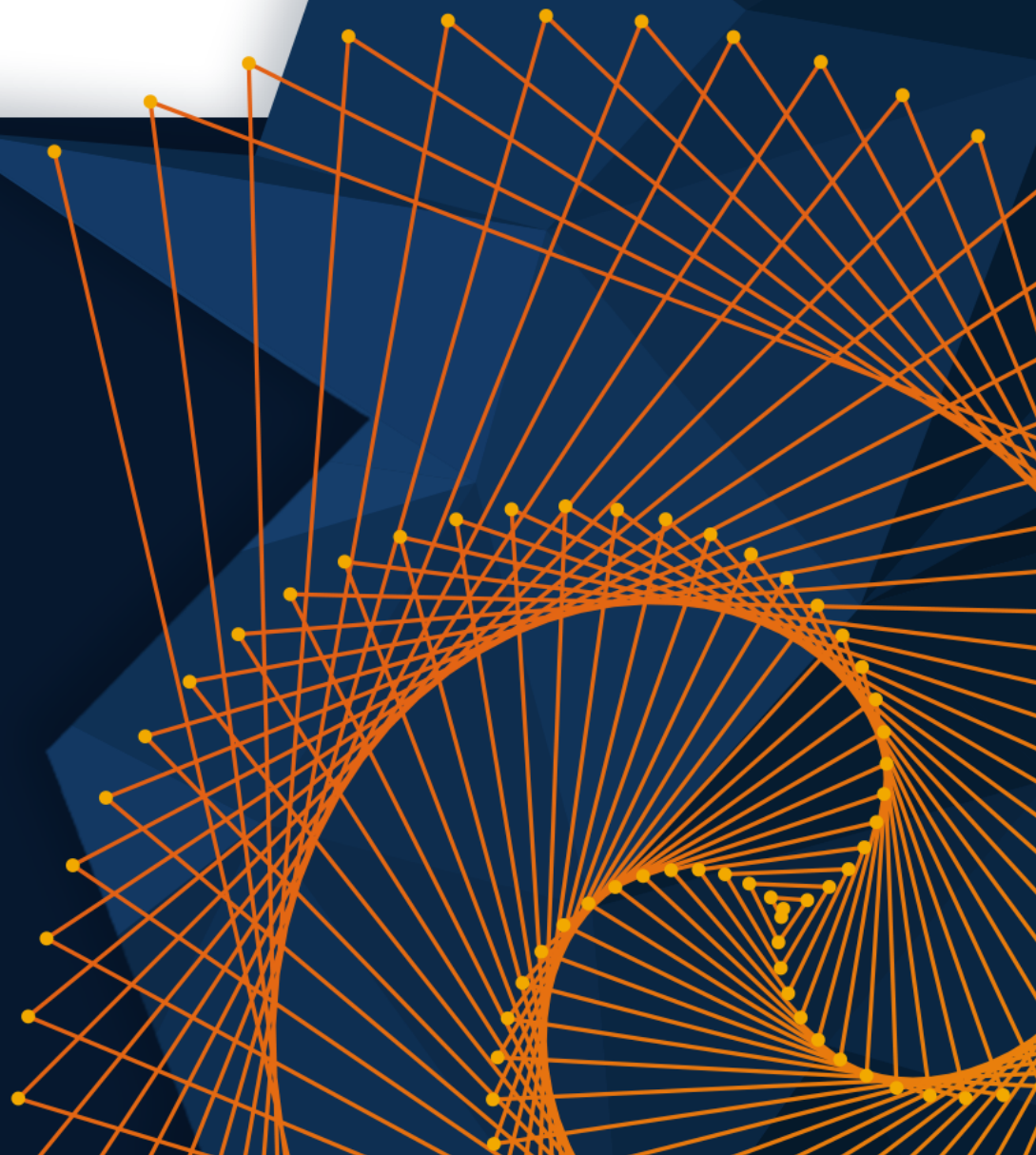
## 仿真技术推动风电走向智能化

于迟, 金风科技股份有限公司



智能技术团队负责人/高级工程师

MATLAB EXPO





1. **金风科技简介**
2. **风电行业面临的挑战**
3. **数字孪生驱动的智能风机**
4. **风电场仿真优化控制**
5. **智慧风电展望**

# 金风科技简介

金风科技是全球可信赖的清洁能源战略合作伙伴，致力于构建“**可持续·更美好**”的未来社会能源基础，在清洁能源开发、装备、服务与应用领域提供可信赖的产品与解决方案，以不断创新的智慧能源帮助城市与企业满足经济、生态与社会责任综合可持续发展需求。



**6大洲36个**国家  
金风科技全球业务网络



**1,420+** 亿元  
金风科技总资产



**504+** 亿元  
金风科技2023年营收



**2** IPOs  
金风科技实现两地上市



**10,000+** 员工  
其中超3,000名研发人员



**114** GW  
截止2023年累计装机



“国之重器”海上16MW风电机组

# 金风科技简介

## 高温、极寒、强震、台风，没有什么阻挡人类对清洁能源的渴望

我们智能风机的差异化设计使产品具备卓越的环境适应性，全面覆盖资源利用、机组效率优化、度电成本降低、全生命周期的资产管理等四大关键点，助力开发企业效益增长

中国·四川·黄茅埂

高海拔区域  
3,800-4,000m

中国·黑龙江·鹤岗

高寒地区  
-30 °C

中国·广州·徐闻

台风区域  
60m/s 最大风速

中国·湖北·桃花山

超低风速区域  
5.04m/s

厄瓜多尔·洛哈省

地震区域  
8.0级强震

巴基斯坦·信德省

高温地区  
45 °C

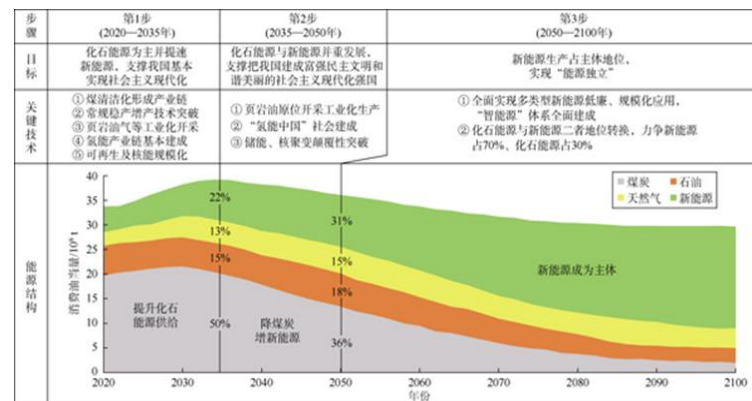
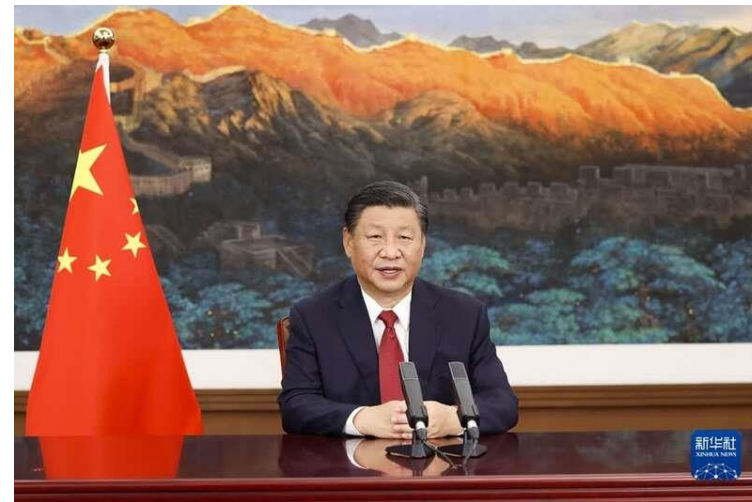


1. 金风科技简介
2. 新能源面临的挑战
3. 数字孪生驱动的智能风机
4. 风电场仿真优化控制
5. 智慧风电展望

# 风电行业面临的挑战

## 双碳目标，任重道远

- 2020年9月22日，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上的重要讲话中郑重阐明中国立场、作出庄严承诺：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”
- 2023年，我国总发电量94564.4亿千瓦时，其中火电占比66%，清洁能源占比34%（风电9%，光伏6%，水电14%，核电5%）；
- 我国风电/光伏为主的新能源占比将逐步增大，2060年之后新能源占比将逐步达到70%，成为主力电源。



数据来源：煤炭行业知识服务平台

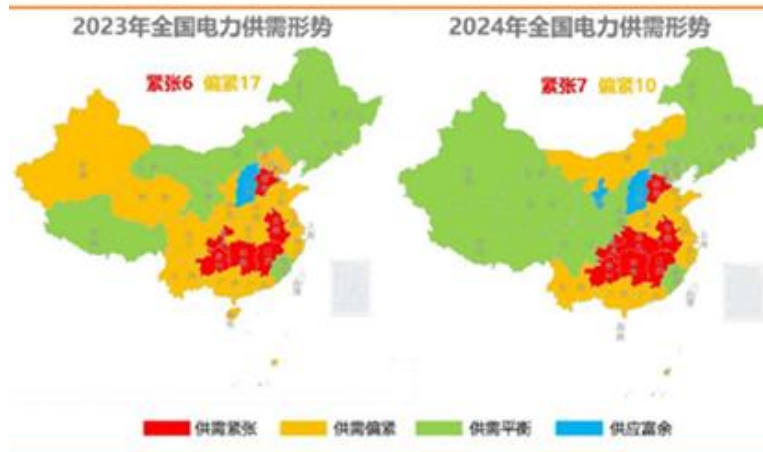
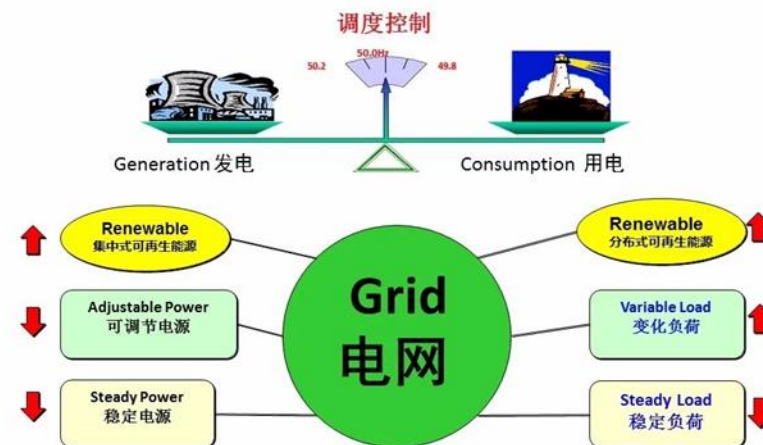
# 风电行业面临的挑战

## ——新能源规模增长带来电网稳定性风险

### ■ 新能源的不确定性与电网负荷的稳定性形成冲突

1. 电力系统惯性降低：新能源是柔性接入电网，减弱了电网的惯性；
2. 极端天气影响严重：水电、新能源出力与气象高度相关，如2021年美国德州大停电、2021年中国东北大停电、2022年四川大停电等；
3. 调节难度加大：电力负荷的不可预测性，电动汽车、AI大模型等。

### ■ 需求：增强风电稳定性，提升对电网的支撑能力



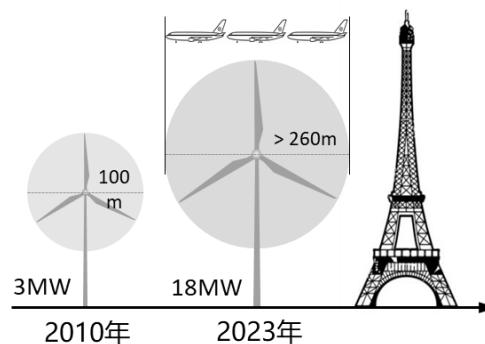
数据来源：电规院微信公众号

# 风电行业面临的挑战

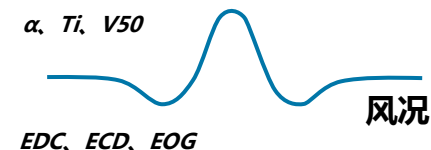
## ——机组大型化的风险

- **安全性**：为了增强经济性，机组大型化发展加速，随之带来一定安全风险；
- **维护成本**：沙戈荒、深远海等不可达场景，机组故障的维护成本很高；
- **自适应**：环境、机组状态、电网条件的变化，都会影响机组的运行效率；
- **需求**：提升机组智能化程度，提升运行效率

### 机组大型化



### 复杂环境

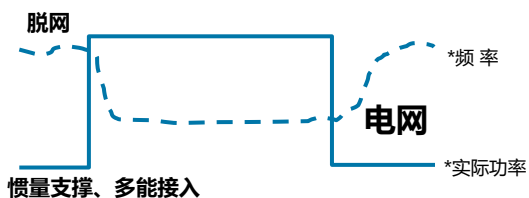


沙尘、冻雨



环境

高低温、盐雾

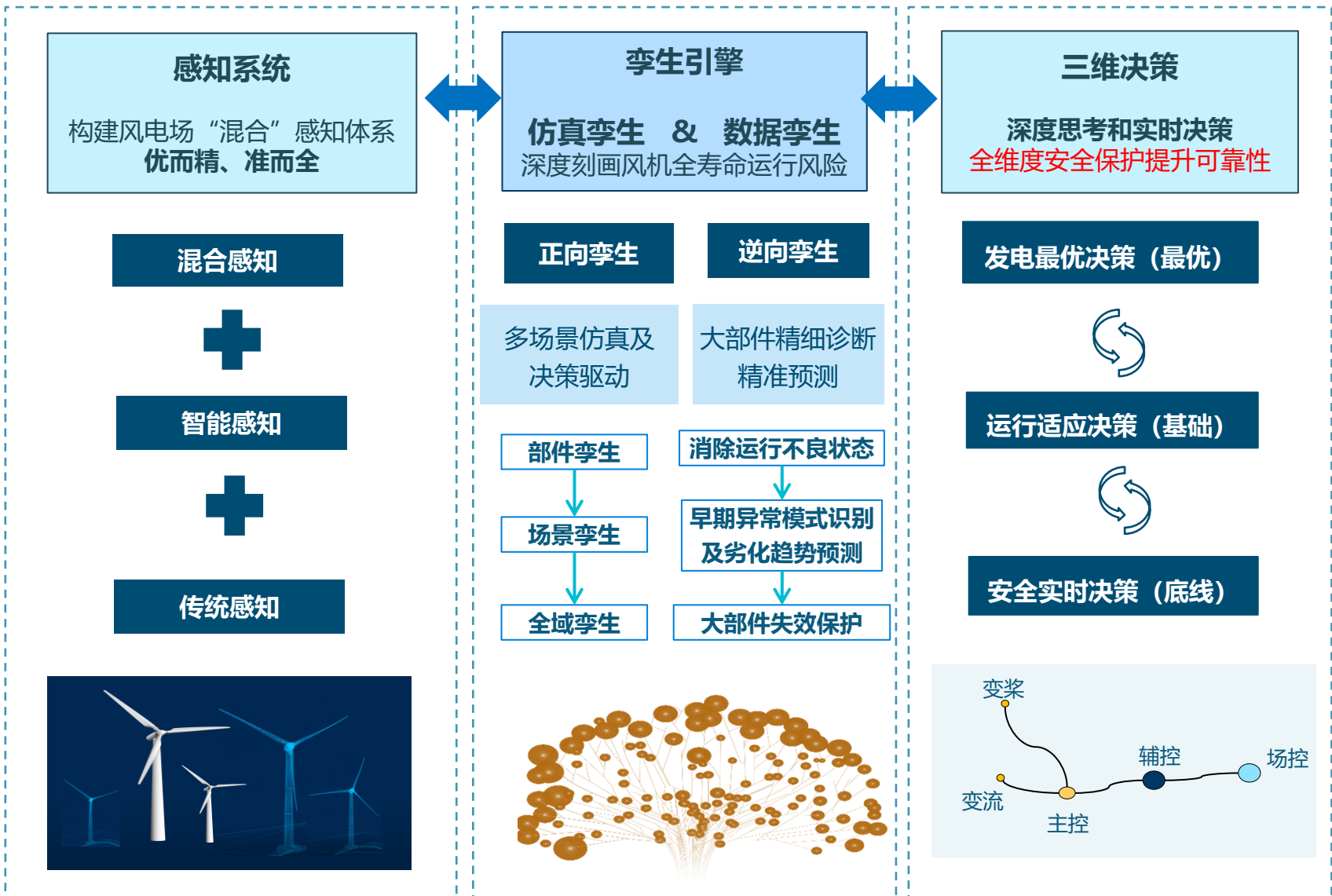






1. 金风科技简介
2. 风电行业面临的挑战
3. 数字孪生驱动的智能风机
4. 风电场仿真优化控制
5. 智慧风电展望

# 智能风机总体要素



基于最精物理传感、数字孪生双引擎，面向多场景的风机智能决策进化。

**智能进化的风机**  
信息融合的多场景自适应决策  
“极致”安全 + “极致”发电收益

# 先进感知系统

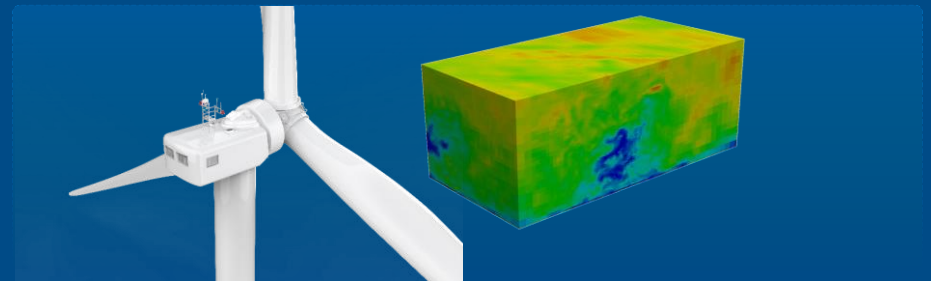
## 智能汽车感知

## 智能风机感知

环境建模  
/场景重构



场景数字孪生  
重构算法



环境特征  
生成/提取



道路特征



交通标识

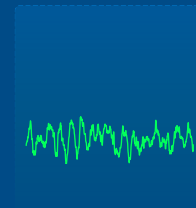
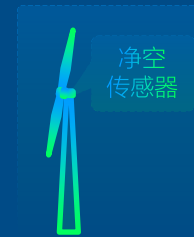
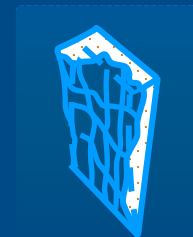


静物特征



运动物特征

环境特征  
提取算法



数据  
采集层



激光雷达



高清摄像机



毫米波雷达



超声波雷达

传感器自动标  
定及信息融合



机舱式激光  
雷达



净空激光  
雷达

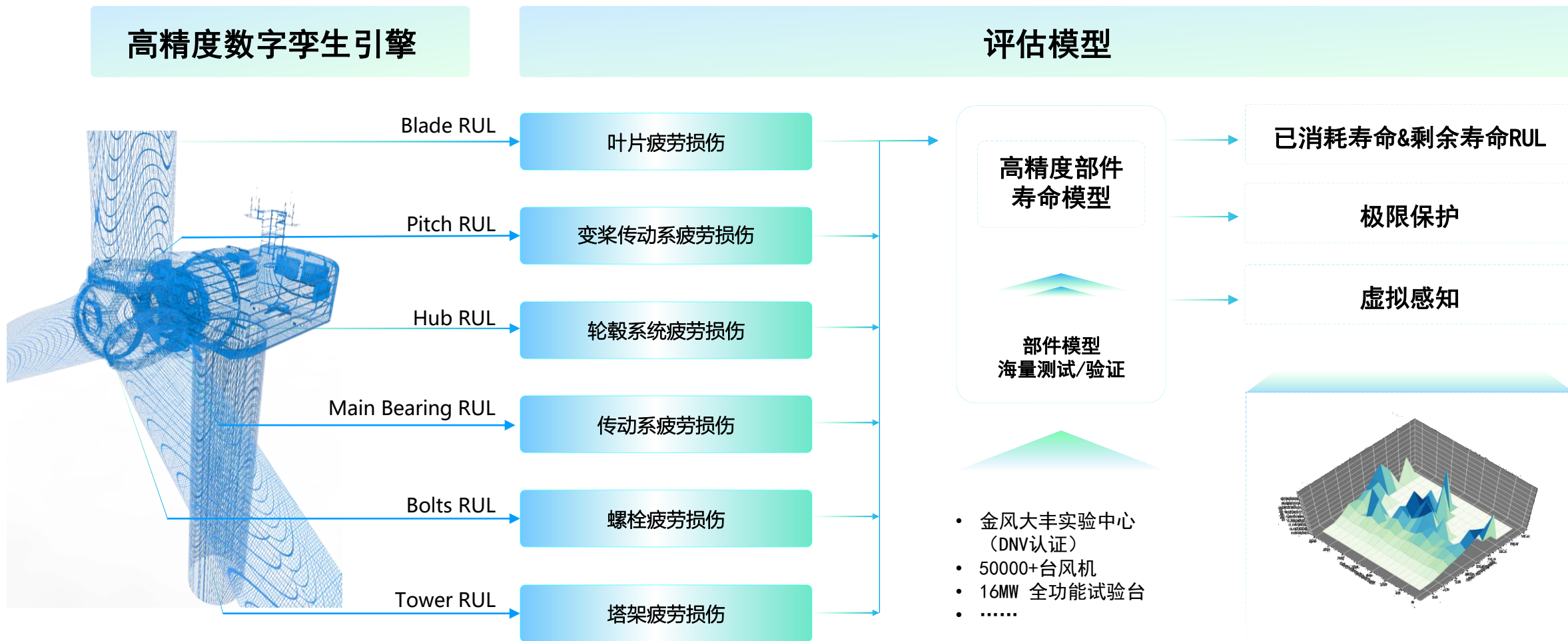


高清摄像机



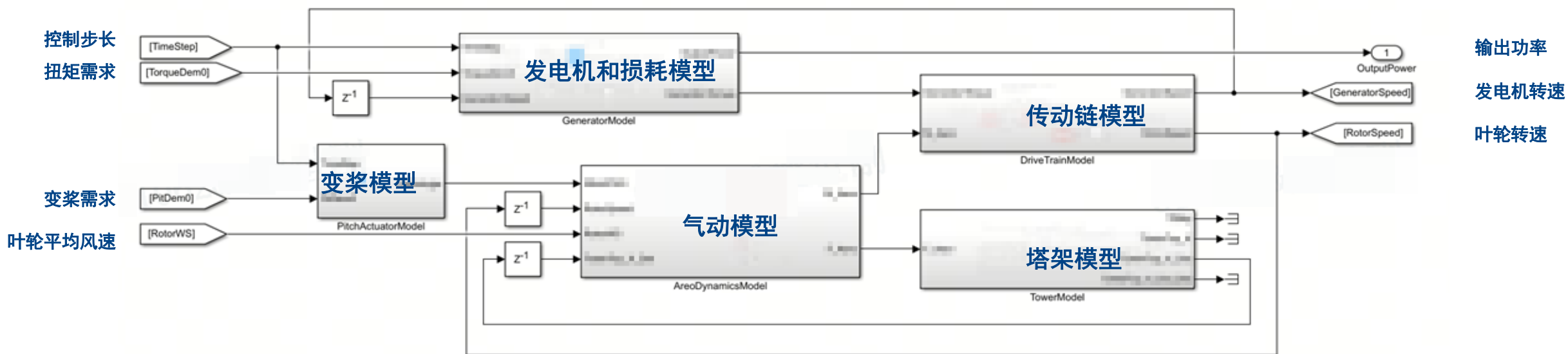
载荷/振动  
传感器

# 高精度动力学数字孪生引擎 – GTSim



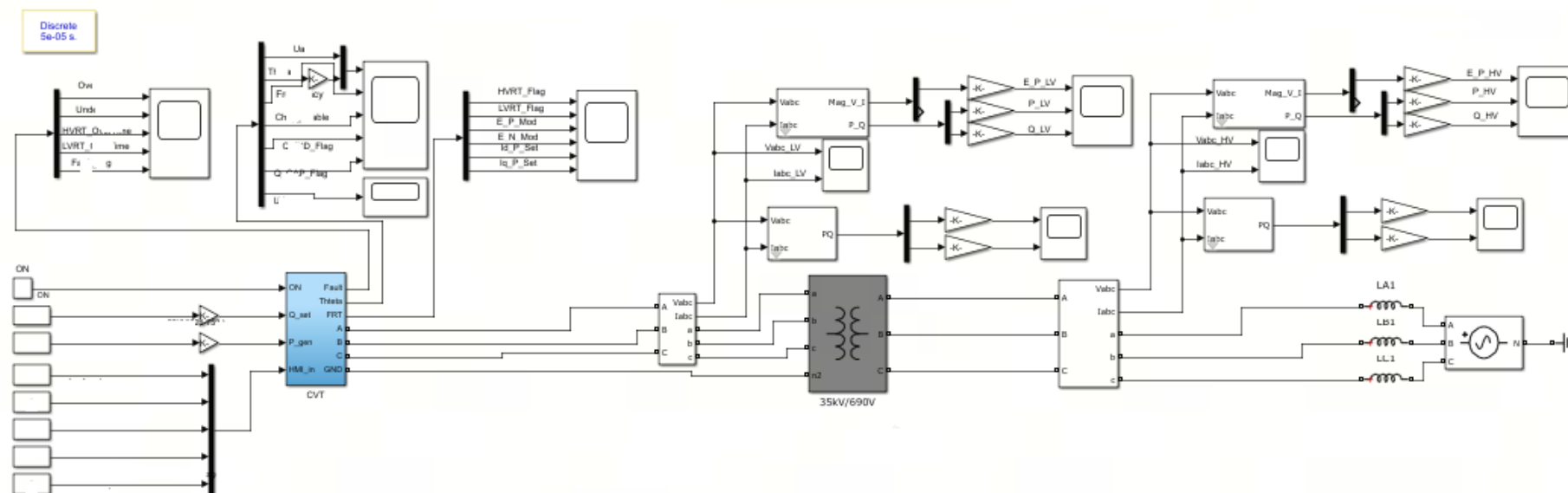
# 在线数字孪生 – 基于Simulink集成GTSim模型

- 在风电机组边缘侧控制器内部，集成各关键子系统的简化动力学模型，实现在线动力学数字孪生。
- 其中叶片气动、传动链、塔架部分通过FMI接口集成GTSim动力学模型；
- 部分模块搭建简化Simulink模型；



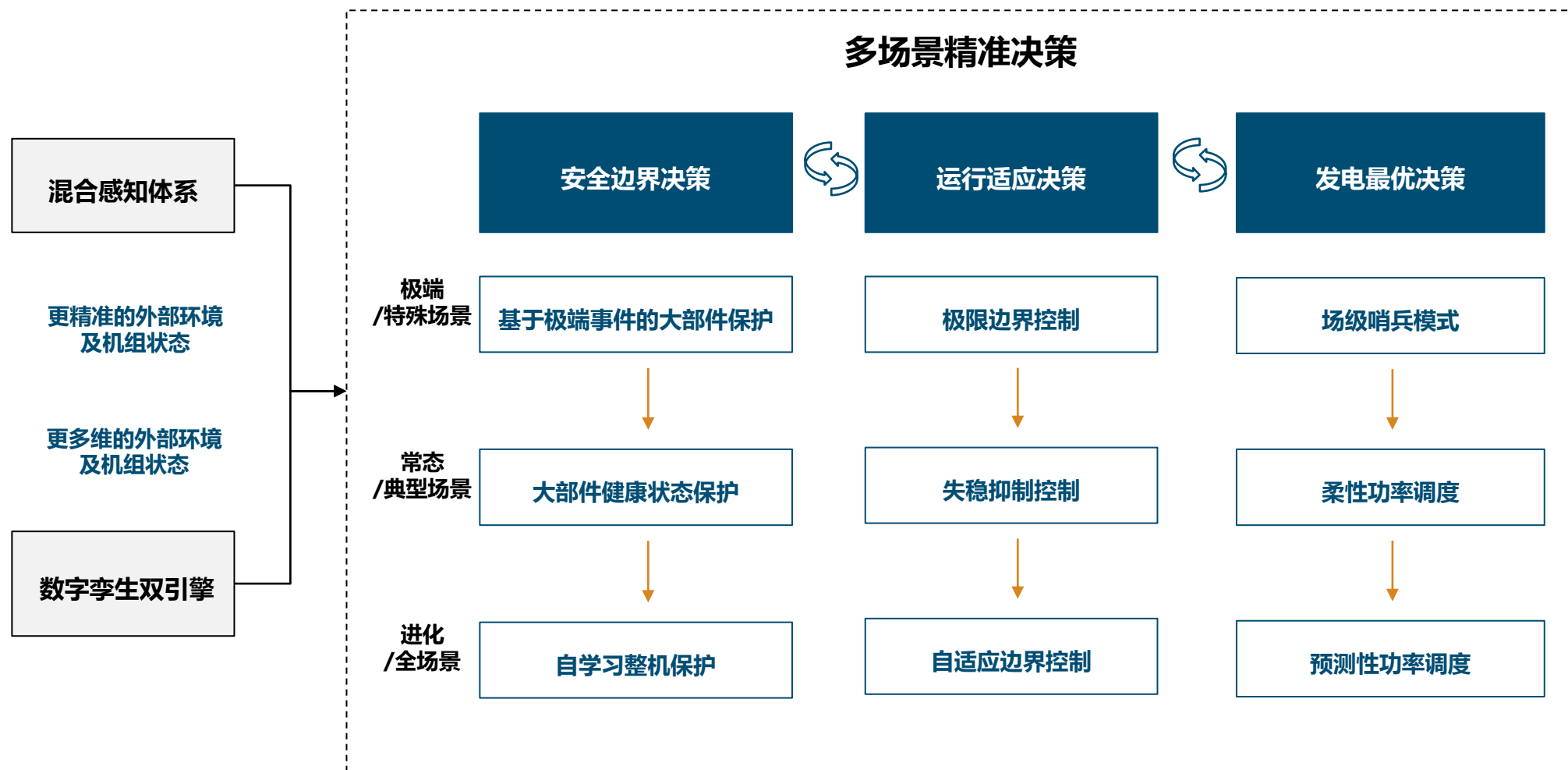
# 在线数字孪生 – 基于Simulink的电气模型

- 基于Simulink搭建风电机组电气系统模型，实现变流器电气性能仿真；
- 包含变流器机侧、网侧、直流母线、机侧储能、变压器等部分；
- 支持直驱机型、中速永磁机型、双馈机型等不同技术路线；
- 支持跟网型、构网型机组；



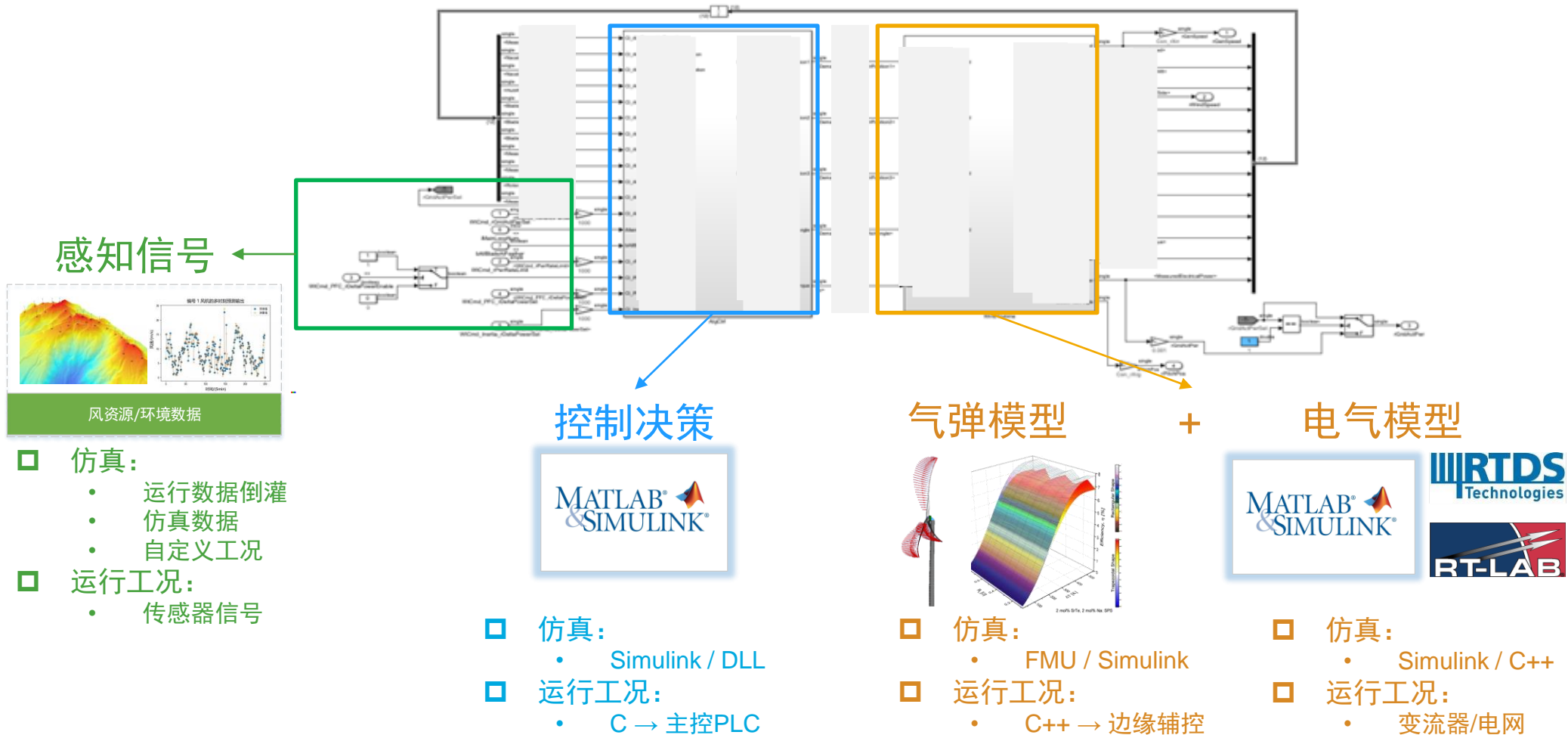
# 控制决策体系

通过多场景精准决策，执行**安全实时决策**、**运行适应决策**和**发电最优决策**，实现极端复杂工况下机组安全保护、常态运行下机组部件延寿和性能提升、全场景下自适应运行发电，从而达到极致成本、极致安全、极致性能三重目标。



# 数字孪生的集成控制

- 利用Simulink的强大兼容性，实现对感知、数字孪生、控制决策三个环节的仿真，可以实现对各种复杂工况的优化设计；
- 机组开发效率由2~3新机型/年，提升至50~70新机型/年；
- 模型运行在边缘侧算力上，实现在线数字孪生。



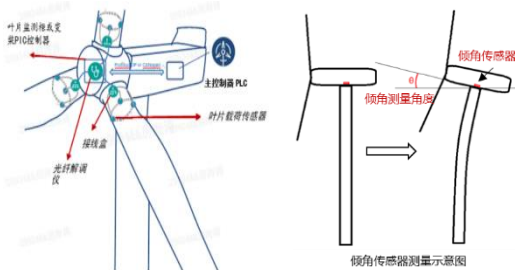


# 智能风机运行效果

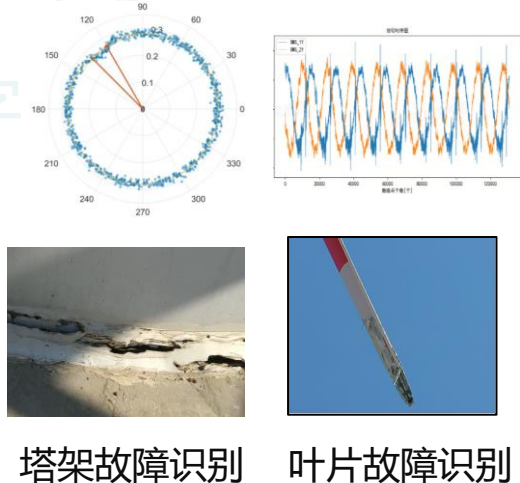
- 机组安全可靠——极大程度上避免叶片断裂造成的倒塔，实现“断而不倒”；
- 故障成本降低——实现对大部件的预测性维护，风电场从“有人值守”走向“少人值守”；
- 环境自适应——对于环境变化，通过学习算法实现自我调节，保持最优发电状态。

## ◆ 极限边界控制技术

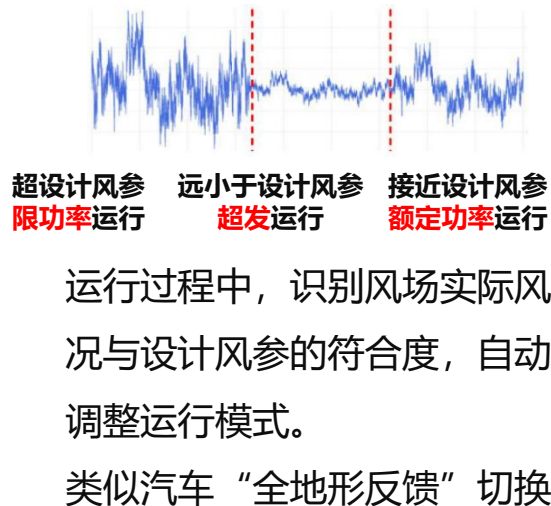
基于载荷实时测量、边缘侧在线数字孪生，实时监测机组真实载荷变化，保护极限，降低疲劳，保证机组安全。



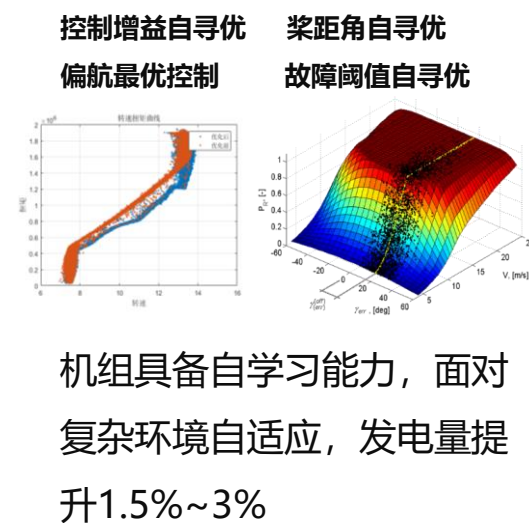
## ◆ 大部件精确保护



## ◆ 最优运行模式自适应控制技术



## ◆ 智能寻优控制

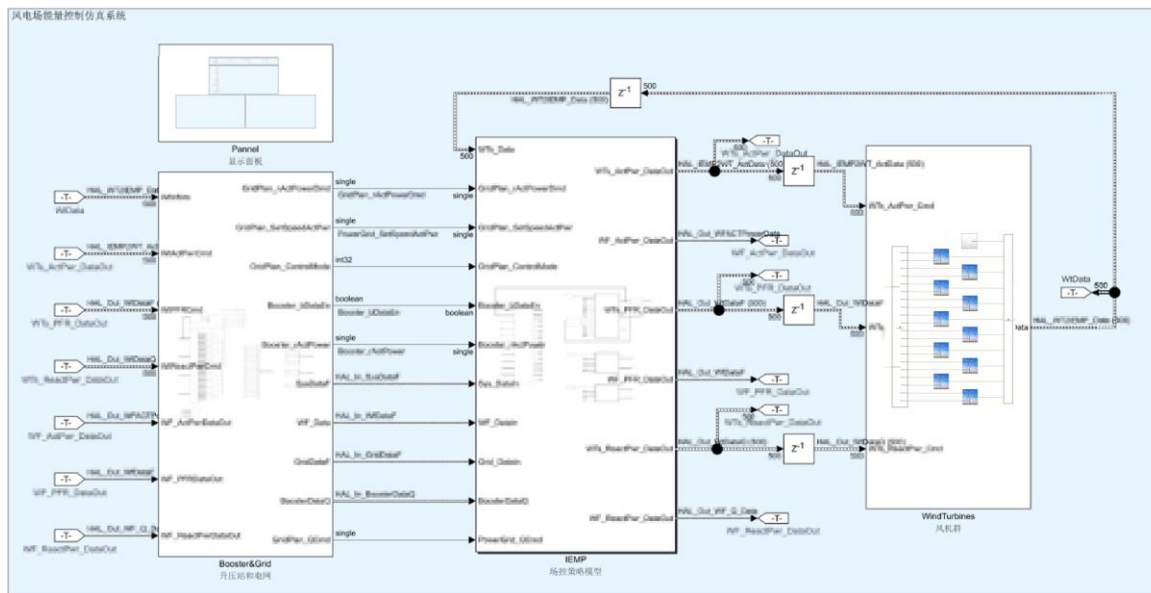
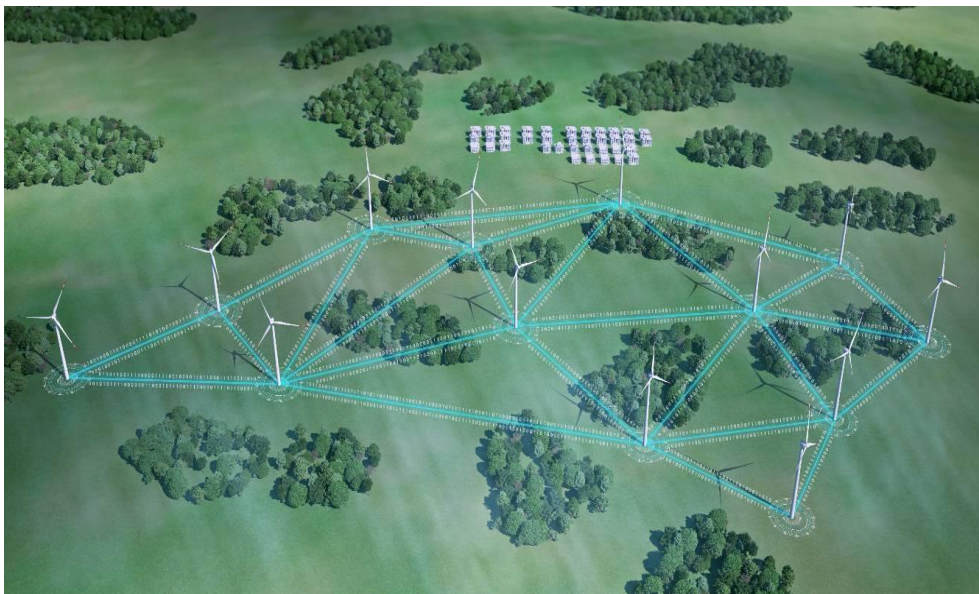




1. 金风科技简介
2. 风电行业面临的挑战
3. 数字孪生驱动的智能风机
4. 风电场仿真优化控制
5. 智慧风电展望

# 风电场能量仿真平台

为提高风电控制技术的开发效力，利用Matlab/Simulink工程软件，建立**风电机组&风电场仿真系统**，全方位模拟不同应用场景下的风电场特性，**用MBD方式开发**应对不同电网、不同场景、各种复杂工况下的控制算法，验证**Goldwind机组&场站的发电性能、载荷特性和并网友好性能**。



## 6大应用场景

- 集中式
- 分散式
- 大基地
- 海上/平原
- 丘陵/山地
- 风光储

## 电网/场站设备

- 频率变化
- 电网指令
- 储能/无功SVG

## 风电场控制

- 功率控制
- 协同控制
- 环境控制

## 风机群

- 机组动力学
- 风况模拟
- 环境参数

# 风电场能量仿真平台

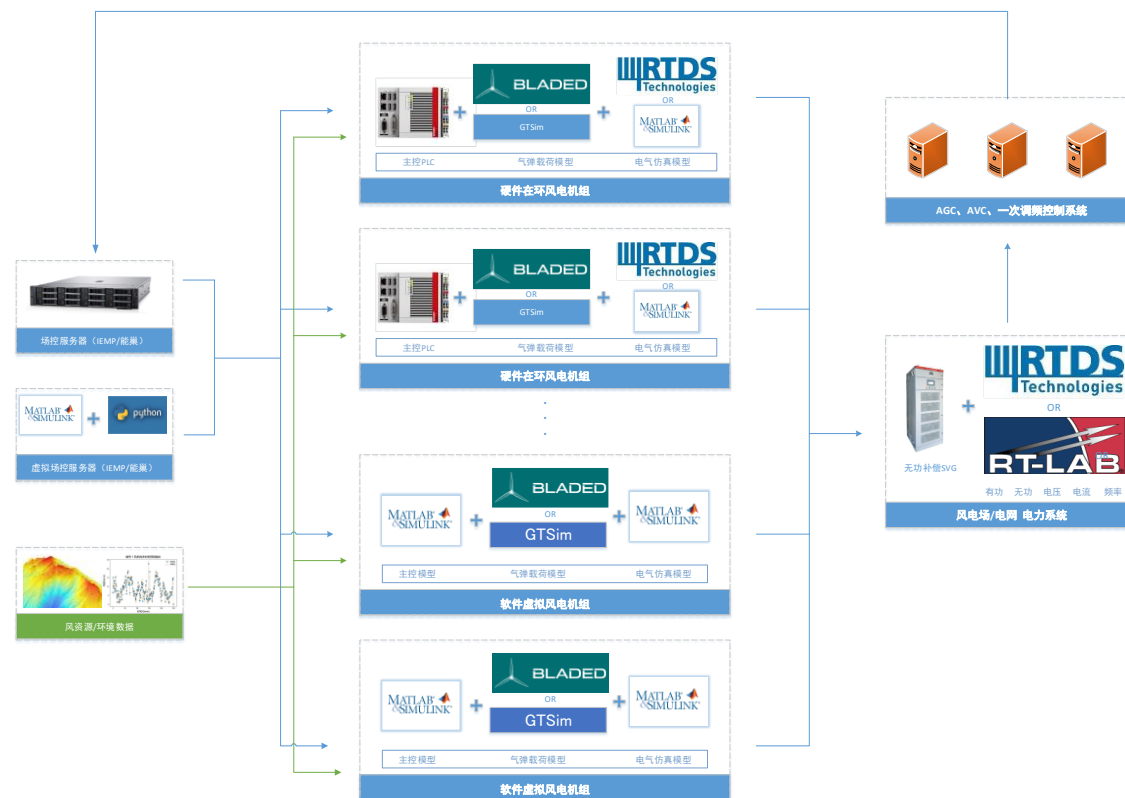
- 为满足场级仿真的复杂需求，建立硬件在环的风电场联合仿真试验环境，充分Simulink仿真工具的兼容性，集成多种仿真工具软硬件的结合。
- 实现200+机组、弱电网环境、复杂风资源的联合仿真，为风电场规划设计、控制策略设计提供高效开发平台。



金风风电机组控制仿真中心

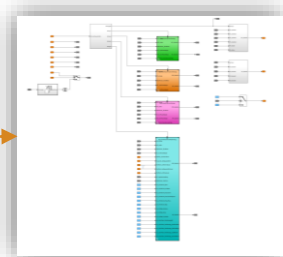
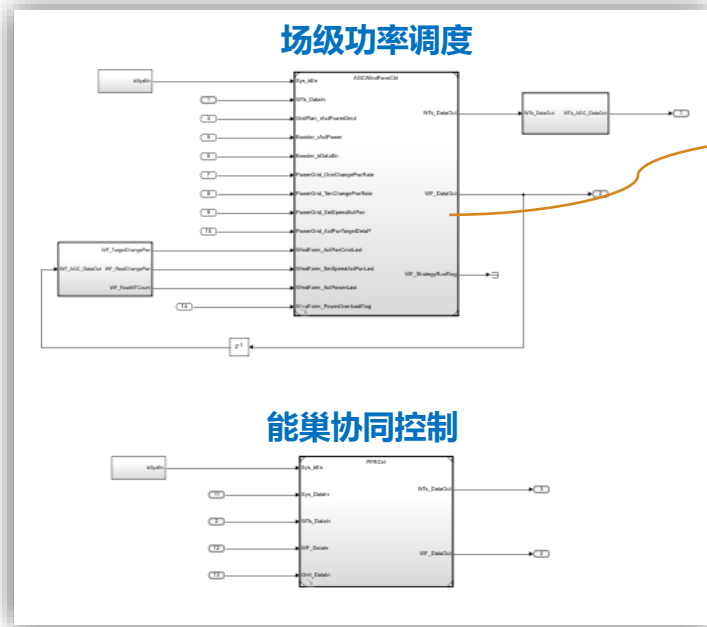


金风RTDS仿真中心

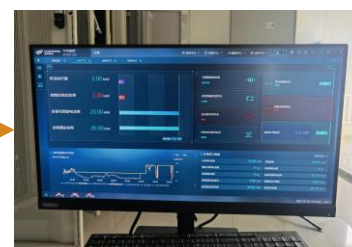


# 风电场优化控制

- 风电场能量控制系统IEMP，实现风电场功率控制策略的验证优化，打通**电网—场控—环境—风机—载荷**的仿真链条；
- 自动生成C++代码集成在能量管理平台IEMP系统；
- 使金风风场可满足全球不同地区的电网要求，如澳洲、南非等弱电网地区的严苛精度、速率要求；
- 利用仿真手段，半年内实现300+次版本迭代，大幅减少场验时间，减少场验电量损失500万元+；

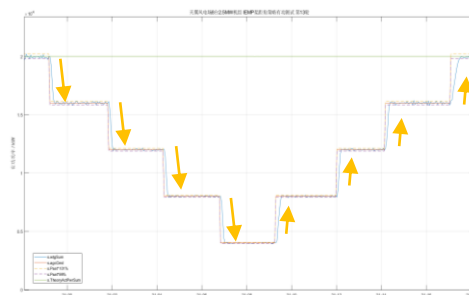


C++  
代码

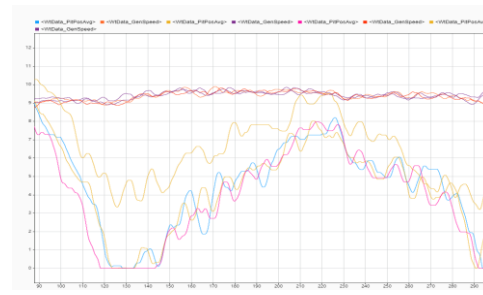


IEMP能管平台

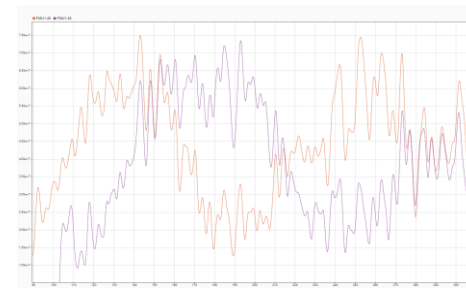
- 负荷友好的场级有功分配策略
- 场级一次调频&惯量分配策略
- 场级无功分配策略
- 风/光/储综合分配



有功阶梯测试-功率变化



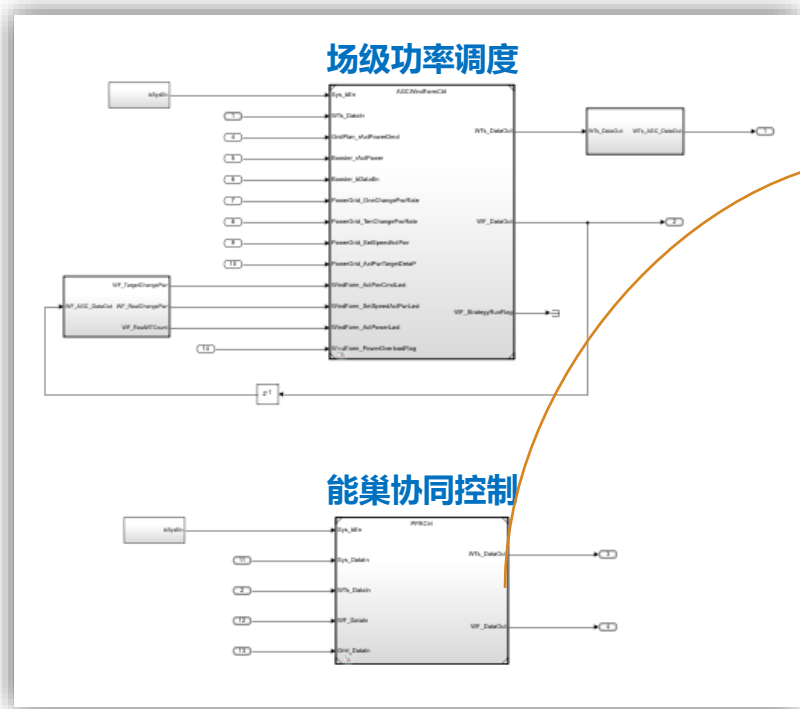
不同策略风机转速、桨距角对比



不同策略风机塔底My载荷对比

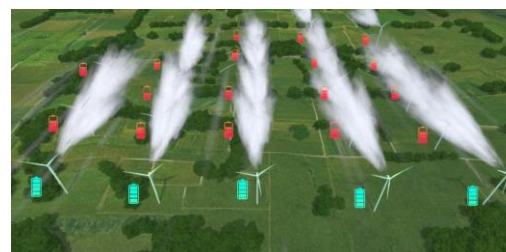
# 风电场优化控制

风电场协同控制能巢系统，实现风电场群综合效能管理，支撑全生命周期发电性能最优，实现环境友好控制。

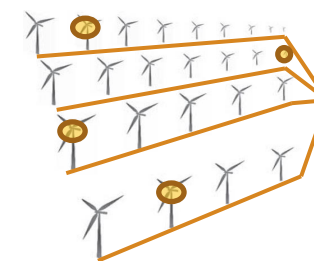


能巢场控系统

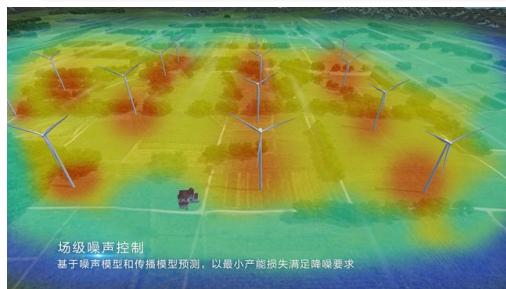
- 尾流控制
- 哨兵控制
- 寿命调度
- 光影、噪声控制



某风场尾流控制



哨兵阵风控制



风场噪声控制



风场光影控制



1. 金风科技简介
2. 风电行业面临的挑战
3. 数字孪生驱动的智能风机
4. 风电场仿真优化控制
5. 智慧风电展望

# 演进：仿真技术助力控制技术迭代更新

①

## 基于模型的软件设计

### 需求管理

- ✓ 分级需求管理
- ✓ 设计文档自动生成



### 模型开发

- ✓ 开发效率提升
- ✓ 不同专业软件兼容性



### 代码生成

- ✓ 主控/辅控/场控代码生成
- ✓ 人为BUG→0



### 模型测试

- ✓ 自动测试平台，测试用例管理
- ✓ SIL/HIL 全工况覆盖
- ✓ 仿测一致性验证



②

## 基于模型的孪生控制

### 气弹力学孪生模型

- ✓ 直驱/中速/高速机型
- ✓ 跟网型/构网型



### 边缘侧模型集成

- ✓ 模型降阶
- ✓ 边缘侧实时边界保护
- ✓ 安全风险降低70%



### 诊断算法开发

- ✓ 正向诊断算法
- ✓ 逆向数据训练
- ✓ 准确率90%



### 边/场/云协同控制

- ✓ 云端数据平台，模型孵化
- ✓ 场端数据湖，协同控制
- ✓ 边端控制优化，发电量提升2~5%



③

## 基于模型的预测决策

### 气象预测

- ✓ 基于神经网络的风速风向预测
- ✓ 极端天气预测
- ✓ 海况水文预测



### 机组寿命预测

- ✓ 大部件寿命预测
- ✓ 寿命调度控制



### 负荷/电价预测

- ✓ 用电侧负荷变化
- ✓ 电价变化趋势
- ✓ 风、光、储、氢协同控制



### 运维工单管理

- ✓ 人、车、备件调度
- ✓ 综合成本最优控制





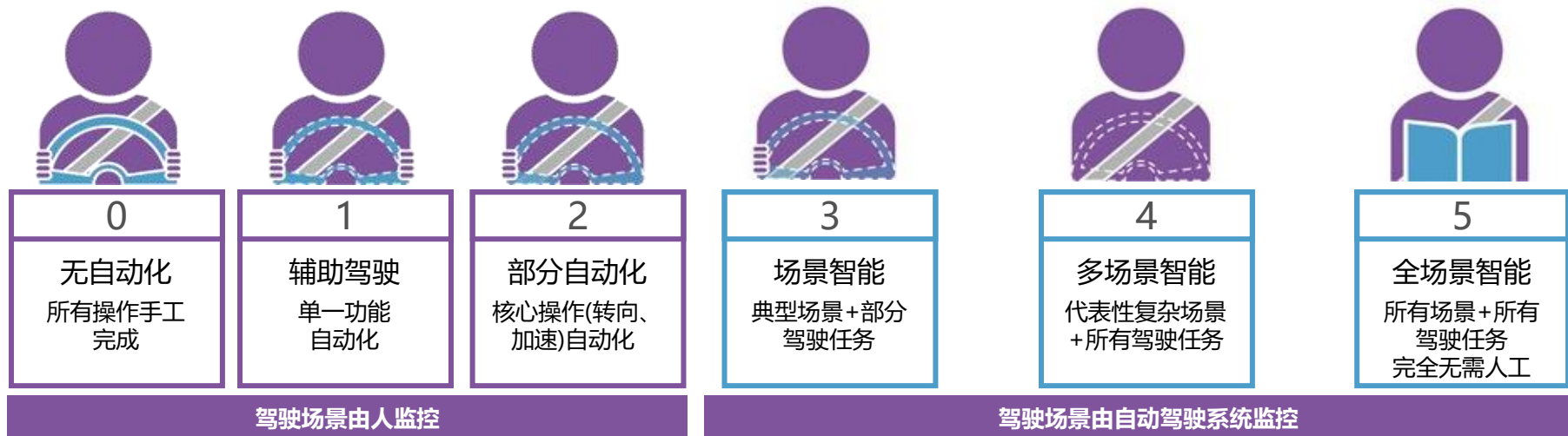
# 风电行业新形势：智能化水平稳步提升

对标汽车行业，风电行业智能化领先水平将进入3.0时代

## 风电机组智能化分级 行业智能化水平迅速提升



## 自动驾驶分级 汽车工程师学会 SAE



# MATLAB EXPO

## Thank you



© 2024 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.

