

深远海风电柔直高效送出关键技术与核心装备



报告人：钟建英



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd.

智慧电气

系统服务

高效能源

2021年9月中国电气装备集团有限公司重组成立，是唯一一家千亿级电力装备央企，是国务院国资委监管的国有重要骨干企业，拥有6家上市公司、16个国家级创新平台、8个国家级质量检测中心、1个国家工程实验室、3个院士工作站和4个博士后工作站。



新时达股份有限公司



河南平高电气股份有限公司
HENAN PINGGAO ELECTRIC CO., LTD.

XD 中国西电集团有限公司
CHINA XD GROUP CO., LTD.

SDEE
山东电工电气

我们的新定位

- 电气技术引领者
- 能源革命推动者
- 绿色发展践行者

我们的新目标

建设成为世界一流智慧电气装备集团

核心技术一流 | 经营实力一流 | 产品服务一流
公司治理一流 | 人才团队一流 | 品牌价值一流





2022年9月，科学技术研究院挂牌成立，作为集团**一级研发机构**，承担战略性科技投资功能。

责任使命：

- 新技术策源地
- 新产品孵化区
- 新机制试验田
- 新效益增长点

发展目标：

- 全面建成国际领先科技型企业
- 技术实力世界一流
- 人才团队世界一流
- 体制机制世界一流





中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

03 | 核心装备与智能运维

04 | 研究展望



海上风电背景

“十四五”末，我国海上风电累计装机容量需预计达到1亿千瓦以上，到2030年累计达2亿千瓦以上，到2050年累计不少于10亿千瓦。2050年全球海上风电累计装机容量至少达到20亿千瓦。我国海上风资源70%集中在远海，大规模远海风电集中开发与送出成为趋势。



中国--海上风电的最大市场

3009GW 可开发装机容量

≈130个 三峡水电站装机容量

中国“十四五”时期已规划大于 65GW

欧洲2021-2025年海上风电将新增装机 21.8GW



海上风电汇集与送出

目前海上风电送出系统主要包括交流、柔性直流两类送出方案。交流送出方案主要适用于离岸70km以内的应用场景；直流送出方案大多适用于70km及以上的应用场景。

海上风电交流送出解决方案



适用于离岸距离70km以内、容量小于1000MW的近海风电场送出。需提供海上升压站、陆上集控中心及海缆的设计部署。



海上风电柔性直流送出解决方案



适用于大规模、大容量（1000MW到2000MW）距离超过70km及以上的深远海风电场送出。需提供海上换流站平台及设备的设计部署。





» 深远海风电柔性直流送出

深远海风电柔直送出是全球未来发展的重要趋势。2023年，德国、荷兰完成了14个 $\pm 525\text{kV}/2000\text{MW}$ 工程招标合同。我国起步相对较晚，但得益于多个陆上柔直工程建成投运、技术积累丰富，目前已投运、在建、规划了多个深远海风电柔直工程。

序号	项目名称	容量	直流电压	投运时间
1	DolWin6	900MW	$\pm 320\text{kV}$	2023
2	DolWin5	900MW	$\pm 320\text{kV}$	2024
3	BorWin5	900MW	$\pm 320\text{kV}$	2025
4	BorWin6	1030MW	$\pm 320\text{kV}$	2027
5	如东工程	1100MW	$\pm 400\text{kV}$	2021
6	阳江青洲五七工程	2000MW	$\pm 500\text{kV}$	计划2024
7	汕头中彭二	1000MW	$\pm 320\text{kV}$	规划中
8	福建长乐外海	2100MW	$\pm 500\text{kV}$	规划中
9	汕头国管海域	6000MW	$\pm 500\text{kV}$	规划中

国内外深远海风电柔直送出工程



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

03 | 核心装备与智能运维

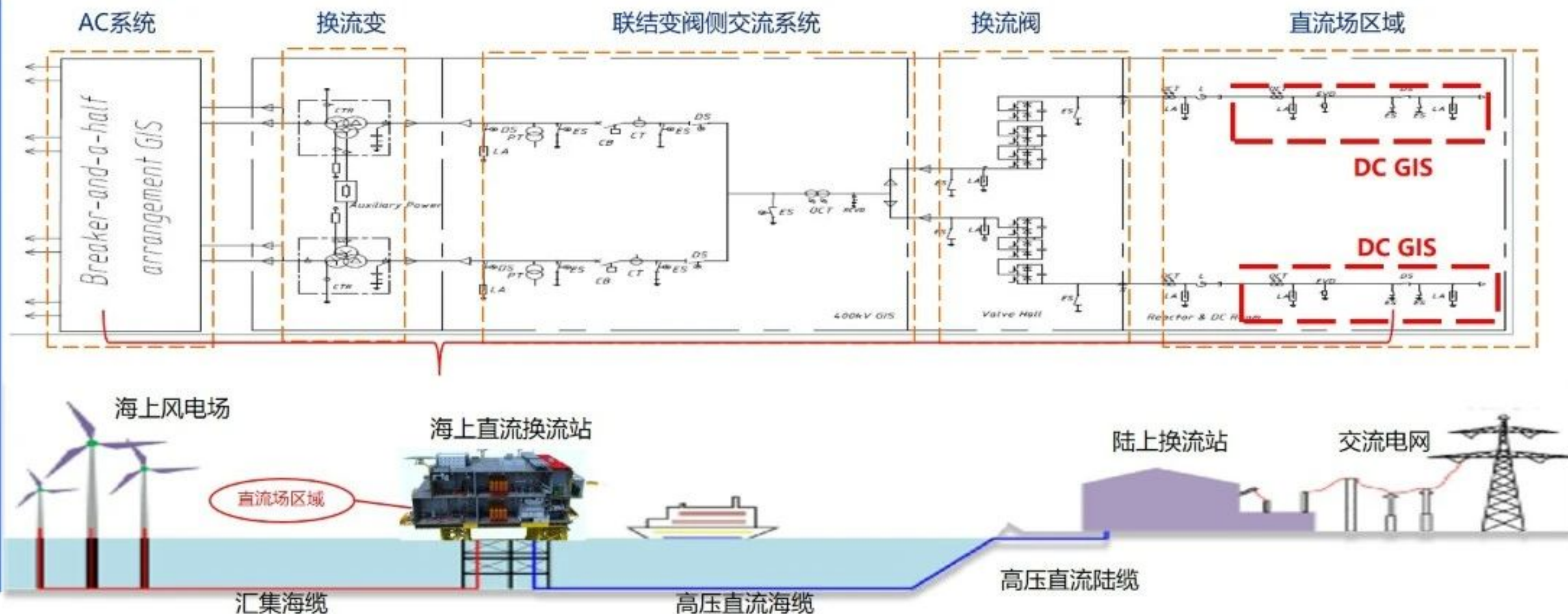
04 | 研究展望



深远海风电柔直送出关键技术

- 海上风电柔直送出系统主要包括海上风电场、汇集系统、海上换流平台、高压直流海缆、陆上换流站等部分
- 如何保证大规模深远海风电柔直系统**高效送出与安全稳定并网**，是亟待解决的重点问题
- 中国电气装备围绕上述问题开展了风场110kV汇集、宽频振荡抑制、核心装备紧凑轻型化设计及智能运维等关键技术研究

海风柔直送出系统及主接线



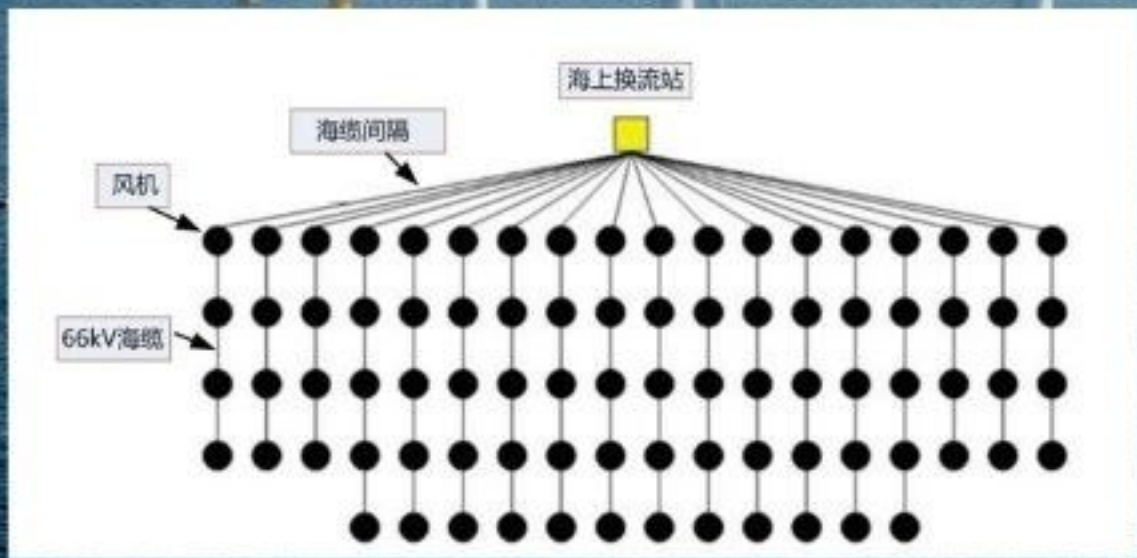


海上平台110kV交流汇集

□ 深远海风电柔直送出系统中，经测算采用**110kV交流**汇集相较于66kV汇集方案，综合造价降低约25%

60% 110kV海缆进线间隔数量

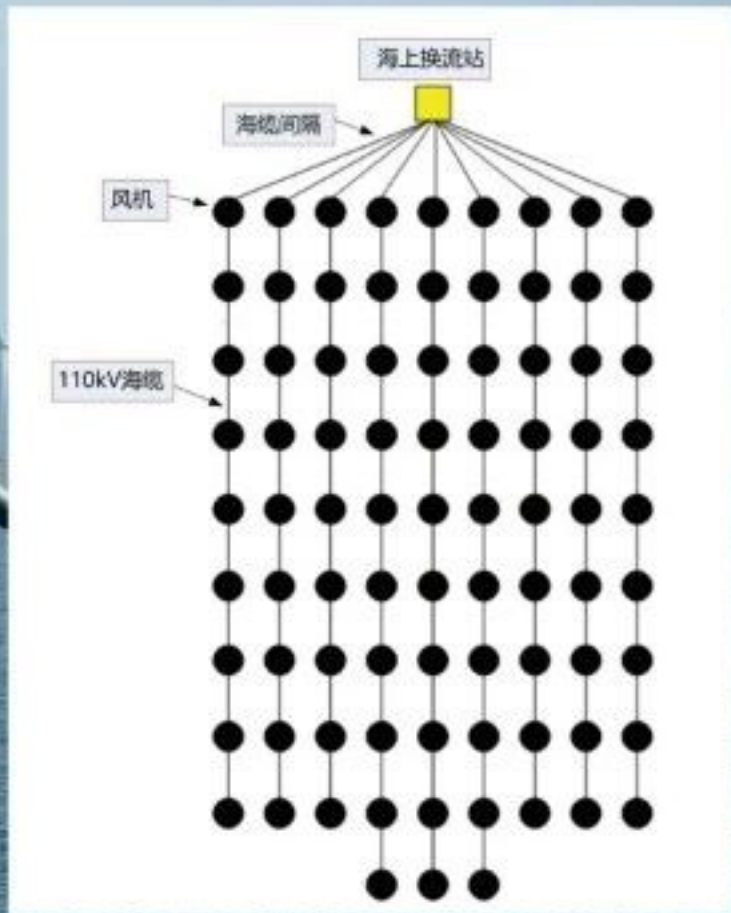
相同载流能力下，110kV海缆容量是66kV海缆容量的**1.66倍**。在总传输容量相同的条件下，110kV海缆的间隔仅为66kV海缆间隔数量的**60%**，节省30%海缆用量。



66kV汇集

25%

综合对比，在相同工程条件下，110kV汇集方案造价比66kV汇集方案造价低25%。



110kV汇集

5% 110kV海缆耗材造价略高

相同载流能力下，110kV海缆耗材造价比66kV耗材价格高5%左右。



海上平台110kV交流汇集

□ 深远海风电柔直送出系统中，对于单机容量15MW以上的海上风电场，采用110kV交流汇集是更高效、更紧凑、更可靠、更符合中国国情的技术路线

➤ 更高效

- 更高的电压等级，更大的输送容量，更低的传输损耗，更简单的网络结构

➤ 更紧凑

- 海上平台更少的海缆进线、更小的GIS间隔需求，更节约的平台占地

➤ 更可靠

- 更为成熟的产品与运行经验，保证传输线路更为可靠

➤ 更符合中国国情

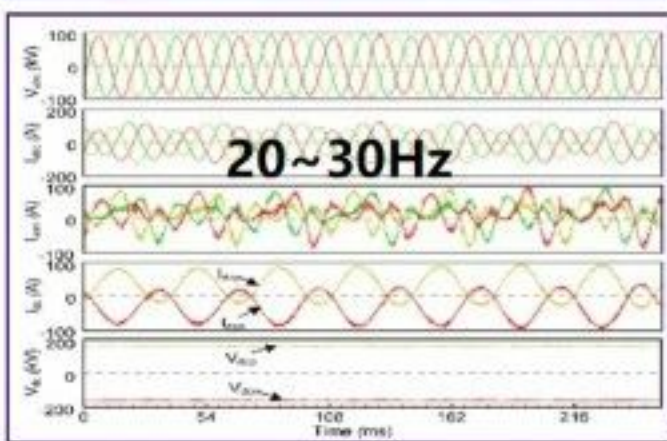
- 中国标准电压等级序列
- 丰富的技术积累
- 专业的配套产线
- 先进的专家团队
- 丰富的应用实例
- 强大的设备制造集群



宽频振荡自适应抑制-现状

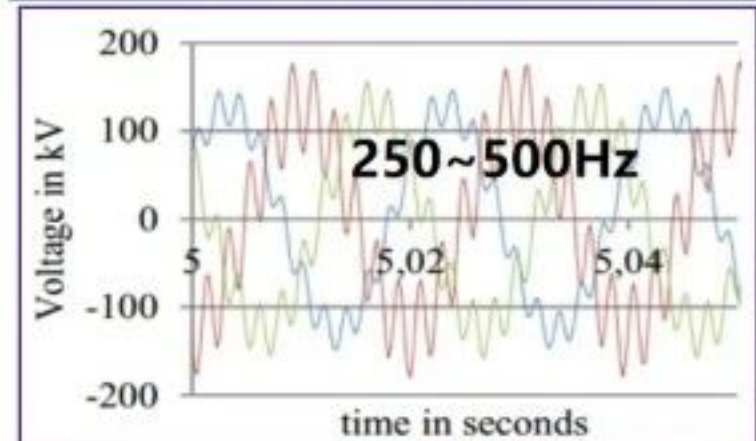
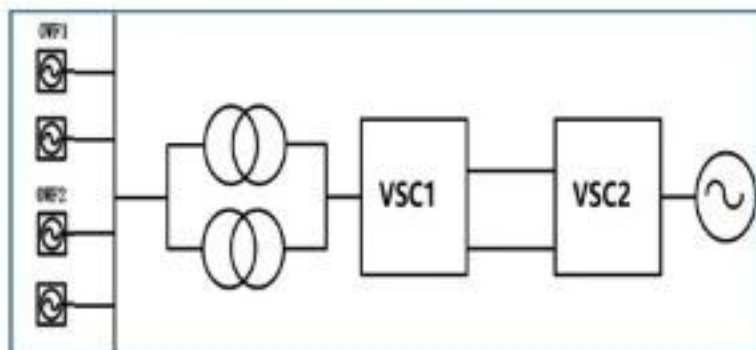
目前国内已投运的新能源柔直并网工程频繁发生不同频段的振荡现象，呈现出振荡频带宽(数Hz~数kHz)，振荡频率漂移、幅频大范围时变等特点，成为制约新能源送出和消纳的重要因素之一

低频、次/超同步振荡 ($<100\text{Hz}$)



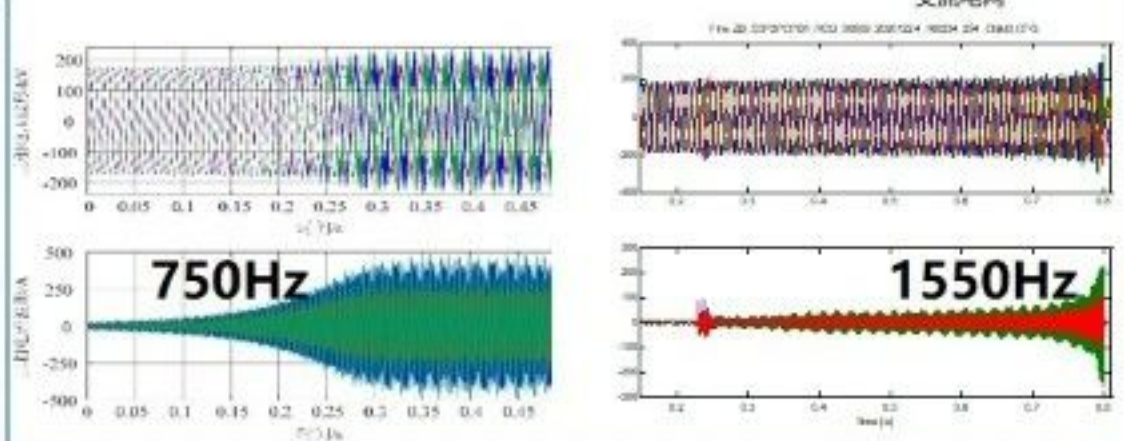
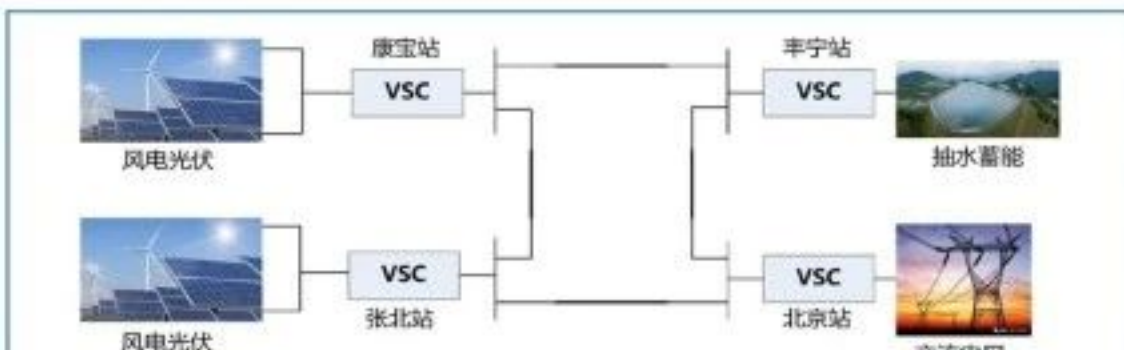
南澳柔直工程—世界首个
风场经多端柔直并网工程

中频振荡 (100~1kHz)

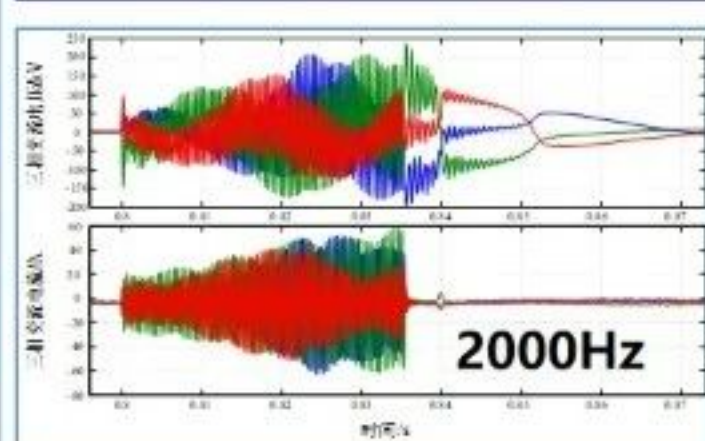
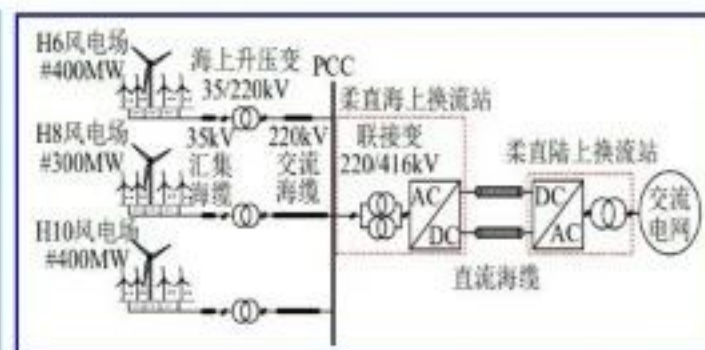


Borwin1 HVDC工程—世界
首个海上风电柔直并网工程

高频振荡 ($>1\text{kHz}$)



张北工程—世界首个新能源柔直多端
电网工程



如东工程—我国首个海风柔直并网
工程



宽频振荡自适应抑制-研究方法

宽频振荡主要有状态空间特征值、时域仿真、阻抗建模等分析法，中国电气装备联合上海交大开展基于阻抗法宽频振荡自适应抑制技术攻关，该成果将应用于海外海风柔直送出工程（目前在阻抗建模、机理研究方面取得了阶段性研究成果）

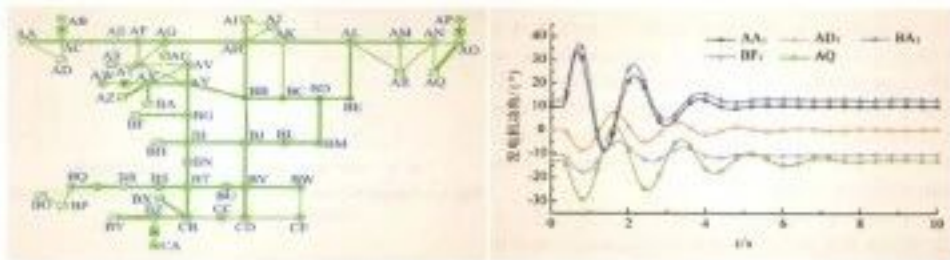
状态空间特征值分析法

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ \dot{y}(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases}$$

优点：可准确得到参数变量对系统稳定性影响

不足：1) 物理意义不清晰；2) 复杂系统时计算量大，求解困难；3) 电路拓扑改变时模型需要重构，适用性较弱

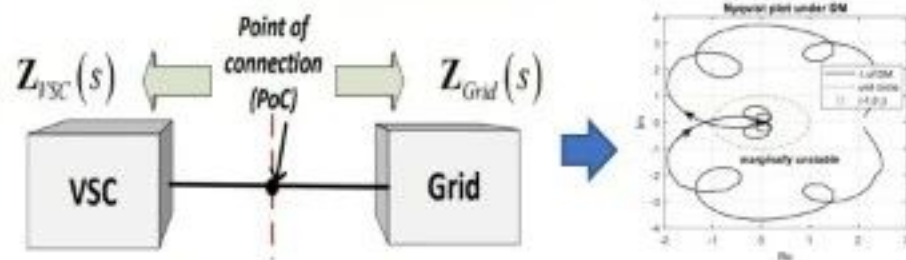
时域仿真分析法



优点：准确判断稳定状态，对分析方法进行检验

不足：1) 不足以揭示振荡事故的产生机理；2) 无法为稳定运行控制设计提供理论指导

阻抗分析法



优点：1) 物理意义清晰直观；2) 对于复杂系统，可通过实测获取阻抗模型，方便简洁

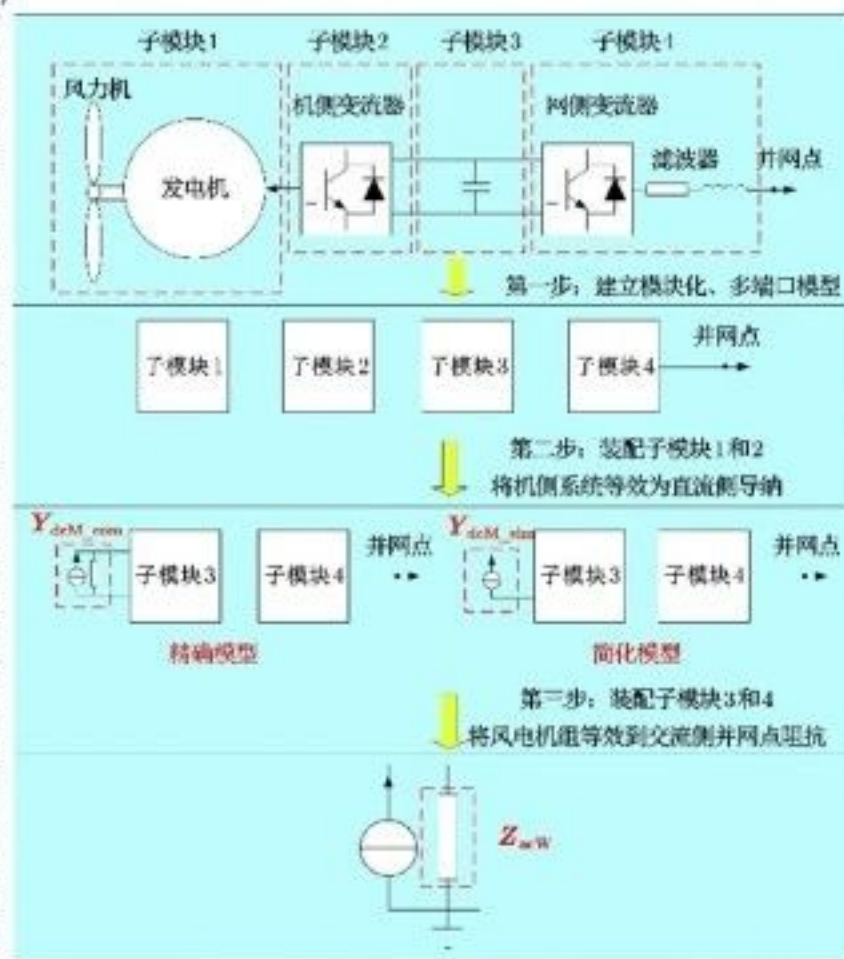
不足：聚合模型会忽略部分系统动态信息

阻抗分析法可表征新能源发电及电力电子装置在不同频率小信号扰动下的响应特性，适用于复杂系统下黑箱模型，在新能源并网工程宽频振荡领域应用广泛

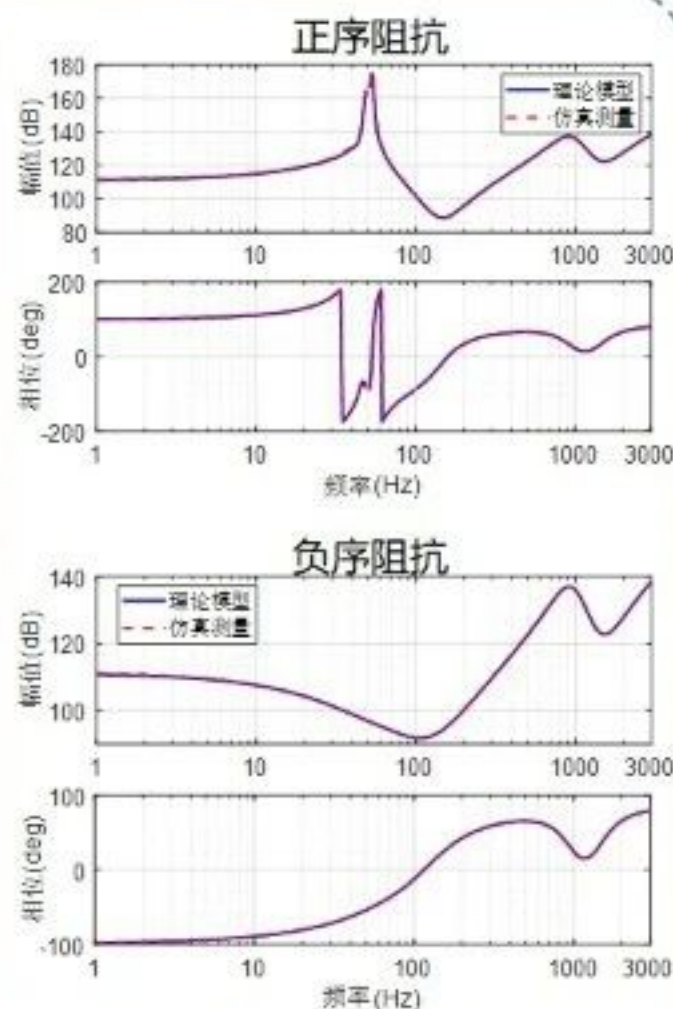


宽频振荡自适应抑制-精细化阻抗建模

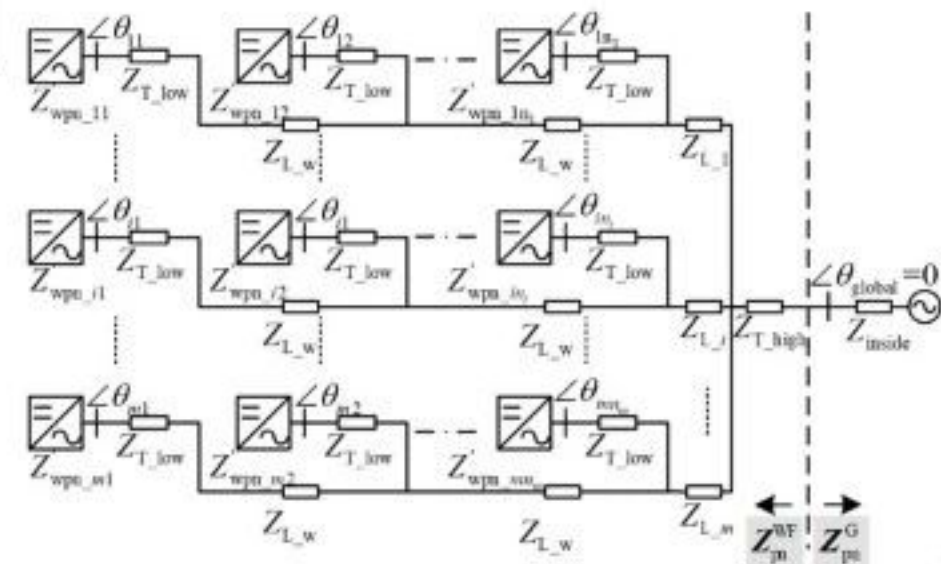
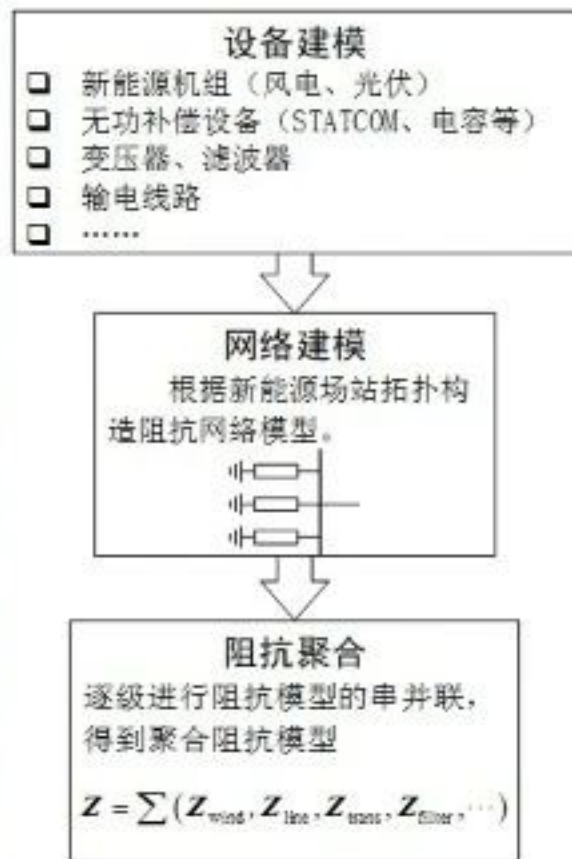
- 提出基于模块化、多端口的频域阻抗建模方法，建立了直驱风机、双馈风机等**新能源发电单元的精细化宽频阻抗模型**，并通过扫频验证了其具有较高的准确性
- 创新性提出了基于节点导纳矩阵的风电场频率耦合阻抗聚合建模方法**，适用于准确评估宽频稳定性



模块化多端口频域阻抗建模步骤



直驱风机阻抗模型验证

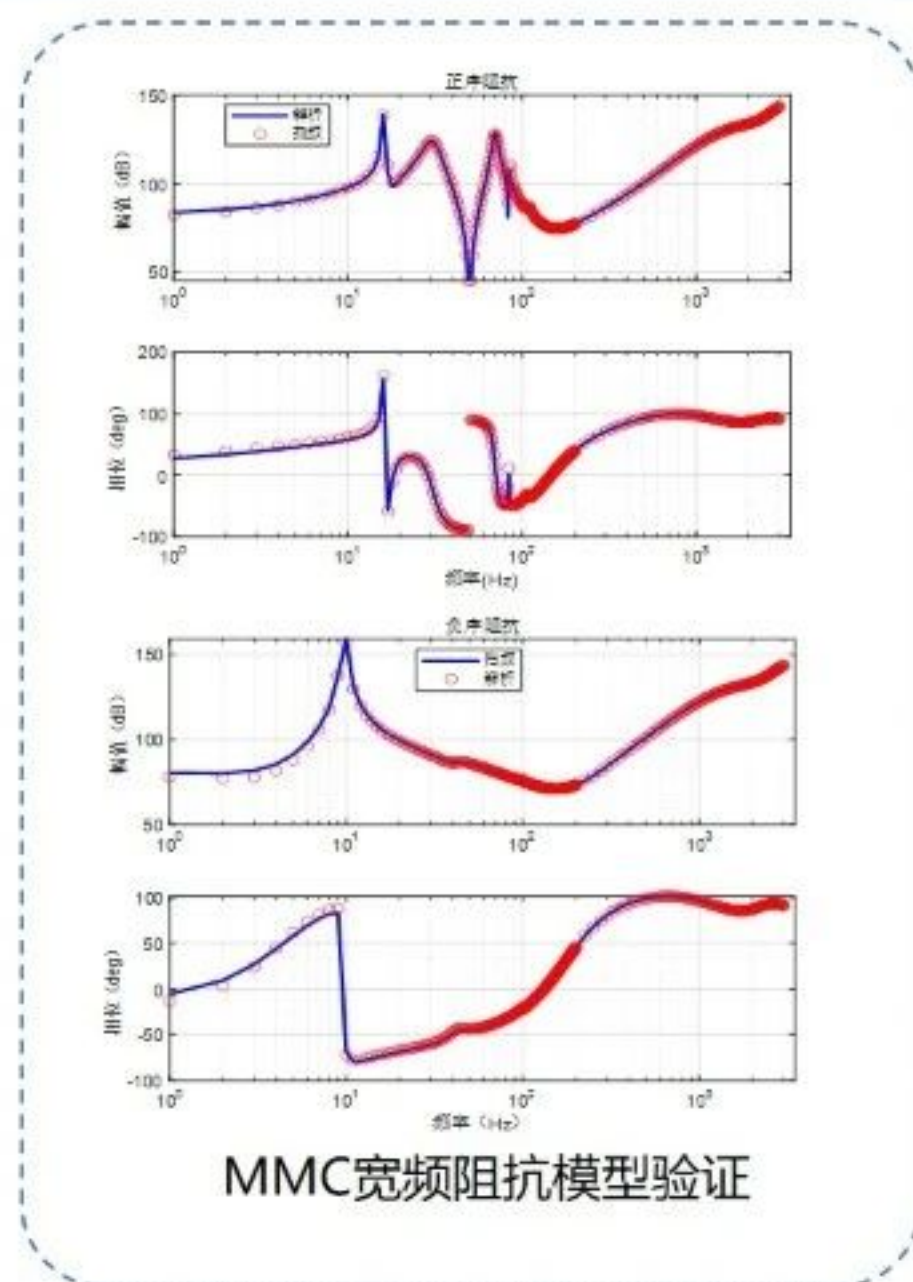
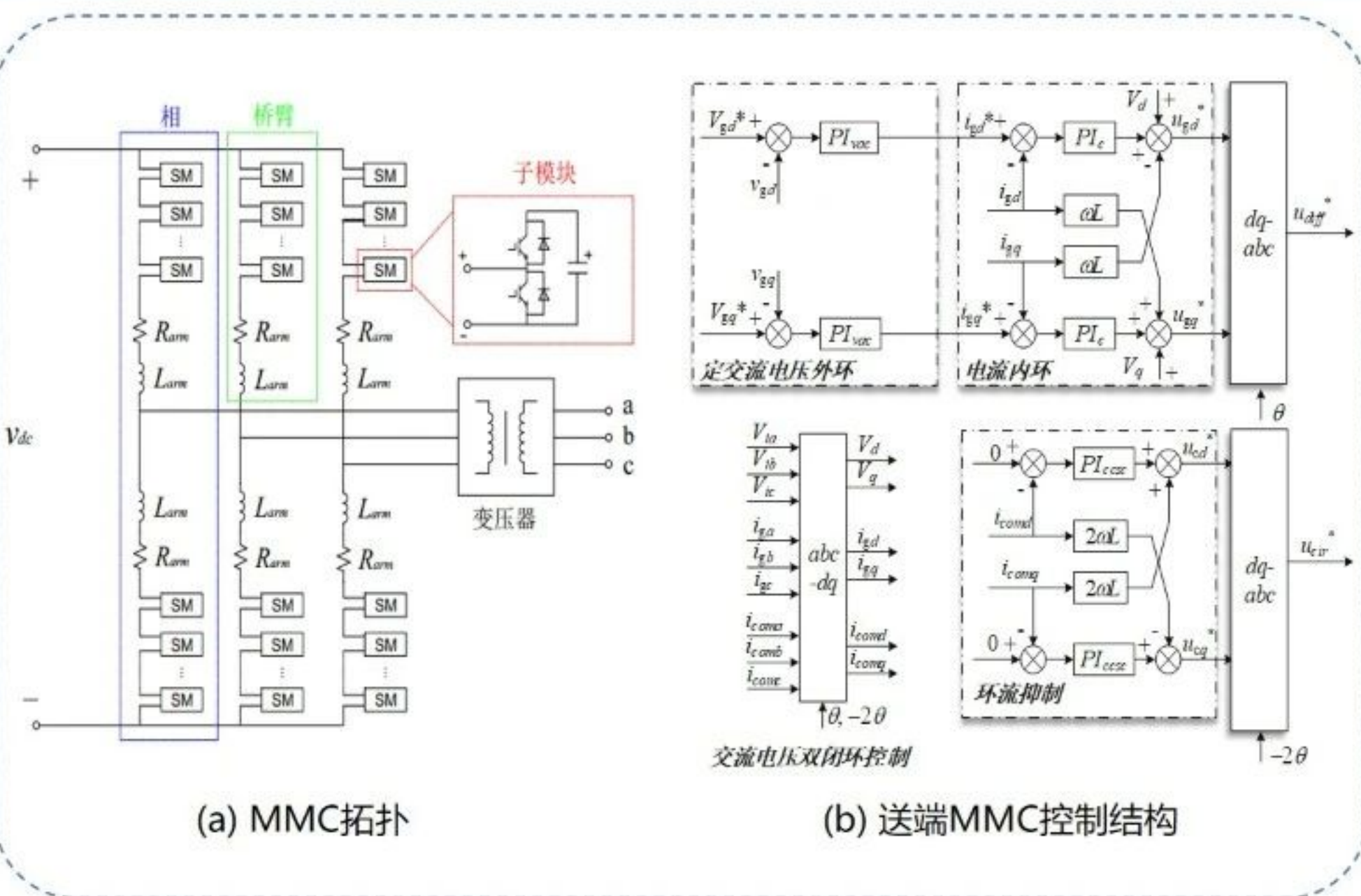


新能源场站阻抗网络聚合建模



宽频振荡自适应抑制-精细化阻抗建模

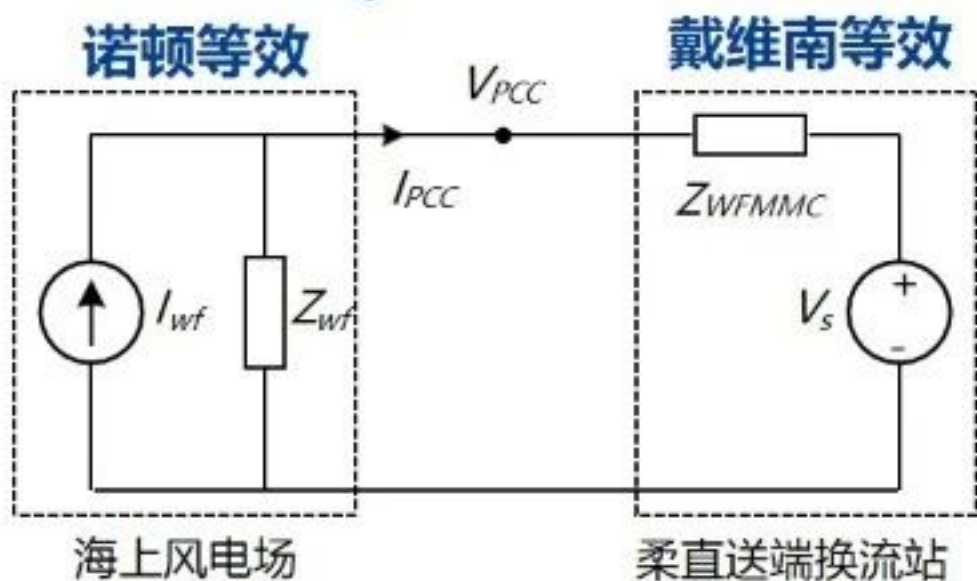
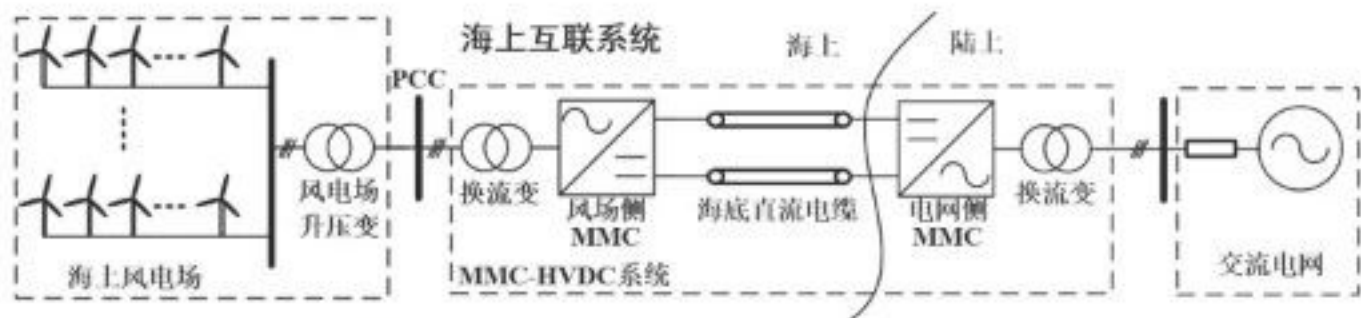
针对MMC换流器多谐波特征，提出基于谐波状态空间(HSS)的柔直MMC动态建模方法，宽频阻抗模型可计及内部谐波动态和所有控制环节



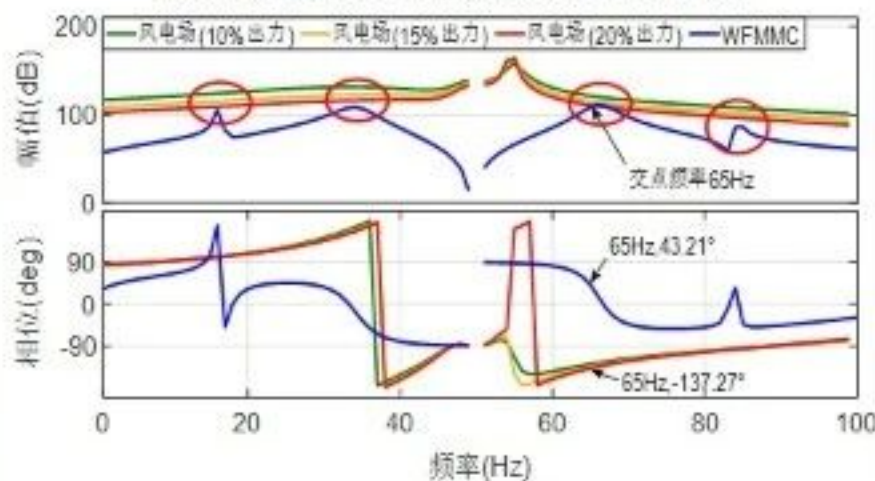


宽频振荡自适应抑制-次/超同步振荡机理

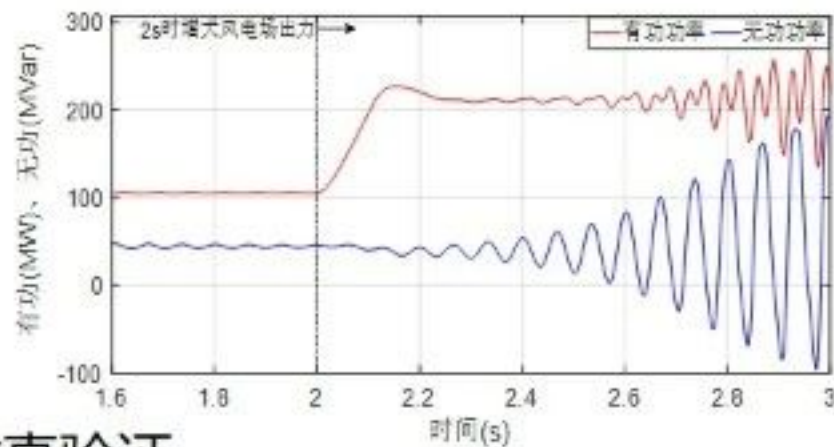
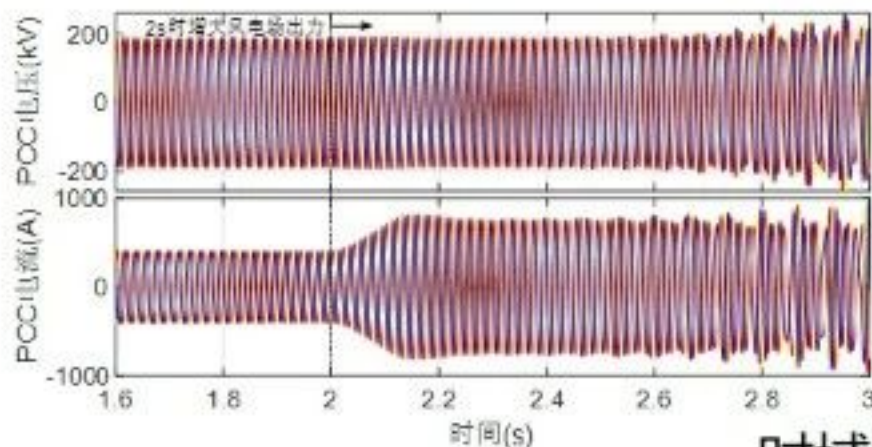
- 次同步振荡机理($< 50\text{Hz}$): 风电场的感性负电阻特性与柔直送端MMC的容性特性相互作用
- 超同步振荡机理($50-100\text{Hz}$): 风电场的容性负电阻特性与柔直送端MMC的感性特性相互作用



次/超同步振荡机理分析



- 结论
- ◆ 次/超同步频段主导因素:
 - ✓ 风电变流器直流电压外环、锁相环等控制环节引入负阻尼
 - ✓ 柔直海上MMC电流内环和内部动态引入谐振峰



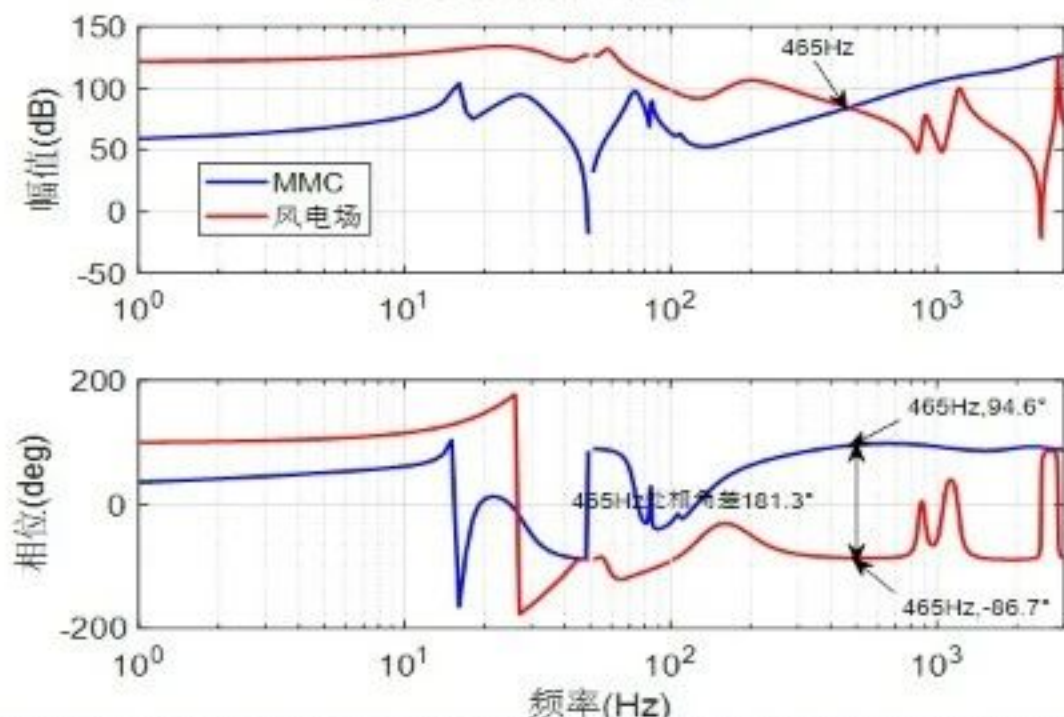
时域仿真验证



宽频振荡自适应抑制-中/高频振荡机理

□ 中/高频振荡机理($>200\text{Hz}$): 柔直海上MMC的感性负电阻特性与风电场的容性特性相互作用

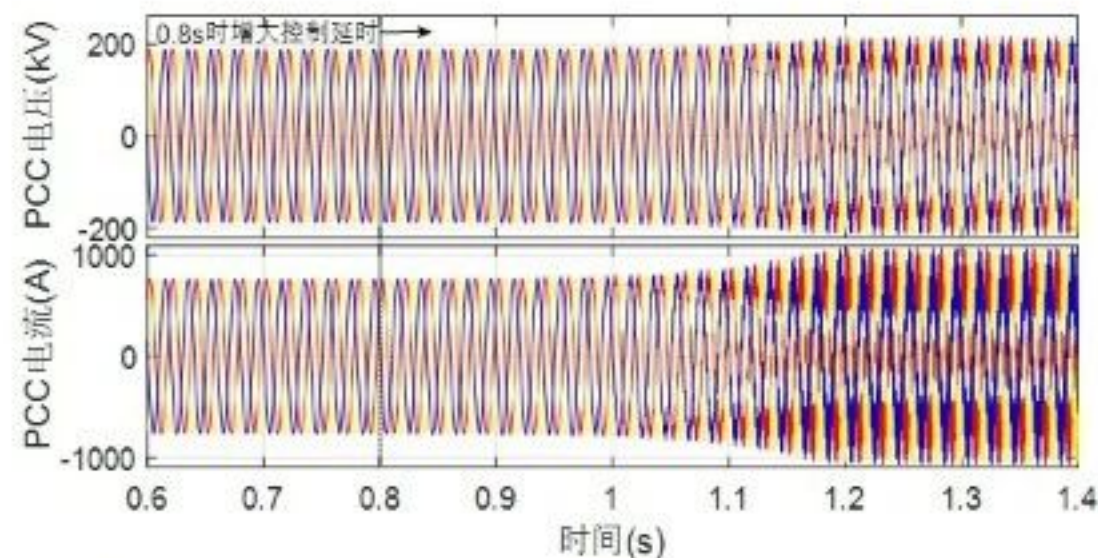
中/高频振荡机理



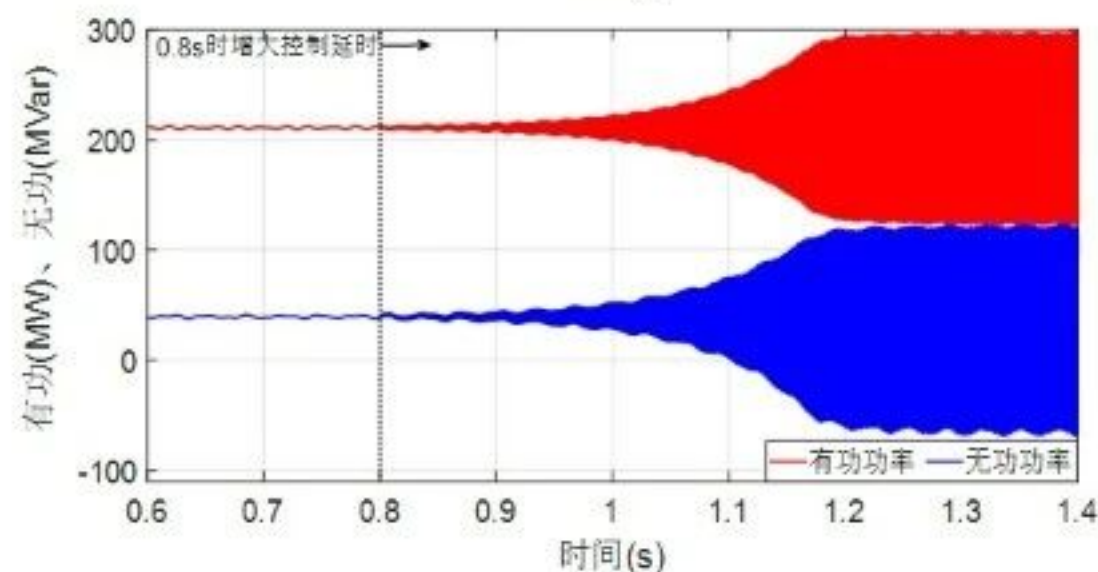
◆ 中/高频段主导因素:

结论

- ✓ MMC内外环控制、电压前馈等环节控制延时引入负阻尼
- ✓ 海上风电场的容性元件 (如: LC滤波器、海底电缆的电容效应等)



电压电流波形



有功无功波形

时域仿真验证

下一步工作: 开展基于多目标优化的新能源机组和柔直换流器的通用主动阻尼控制策略研究及验证, 开发控保产品

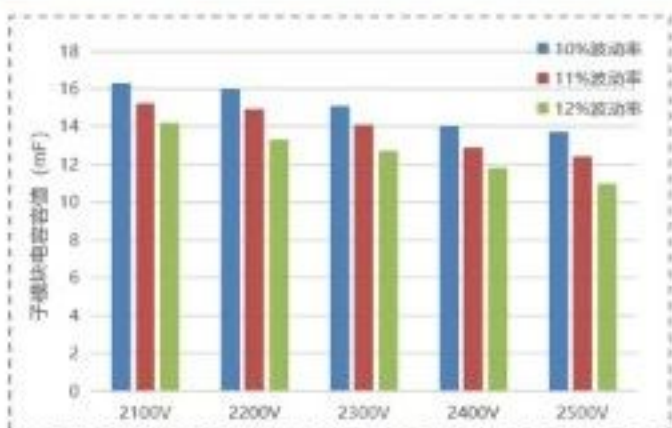


海上高功率密度柔直换流阀关键技术1

针对采用对称双极拓扑的 $\pm 500\text{kV}/3000\text{MW}$ 系统（海上侧采用 66kV 交流系统,陆上侧接入 500kV 交流电网），分别从子模块容值对动态换流特性的影响规律、基于桥臂主动环流注入的电容参数优化设计、低容值下电压波动平抑控制策略开展研究

1、子模块容值对动态换流特性的影响规律

子模块额定电压、传输功率等对电容波动率影响

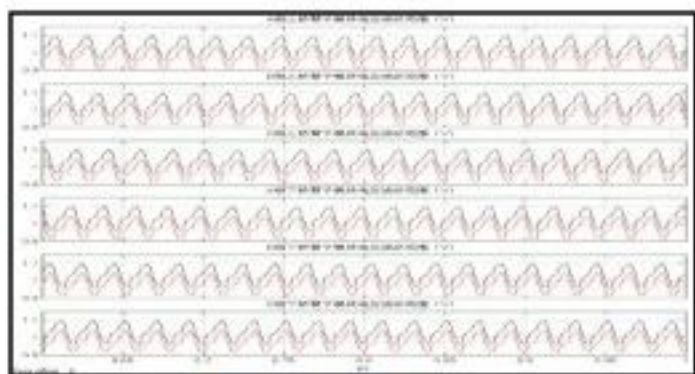


子模块额定电压与电容波动率关系

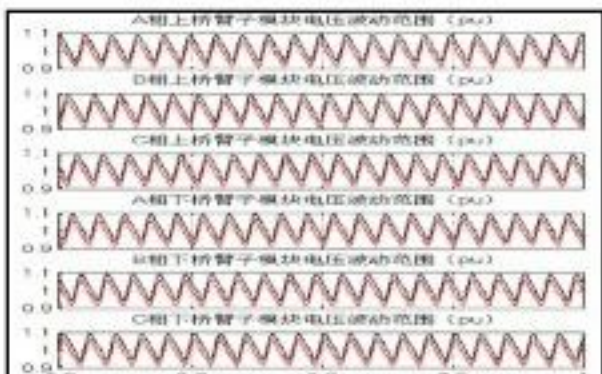
环流抑制、开关频率优化等策略对电容波动率影响

有功功率 (pu)	调制度	功率因数	电容电压波动率
1	0.82	0.98	-9%~+10%
0.75	0.825	0.95	-7%~+8%
0.5	0.84	0.85	-6%~+6%
0.25	0.855	0.58	-5%~+6%
0	0.875	0	-4%~+6%

传输功率与电容波动率关系

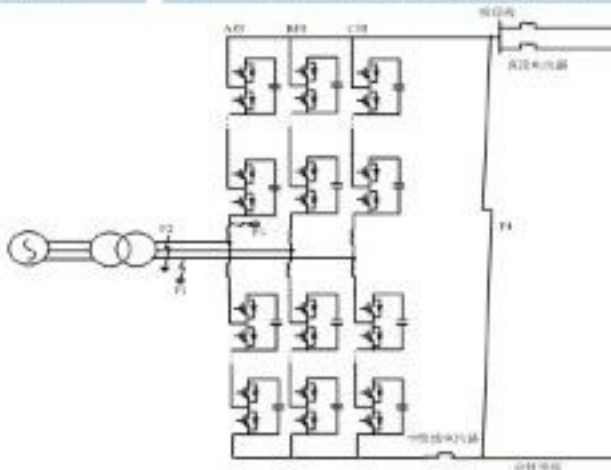


环流抑制使能

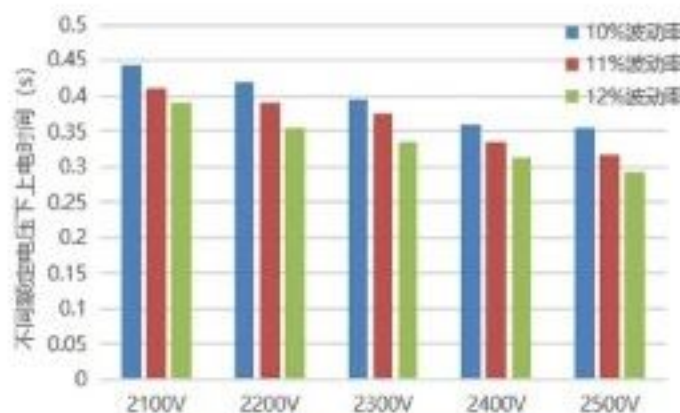
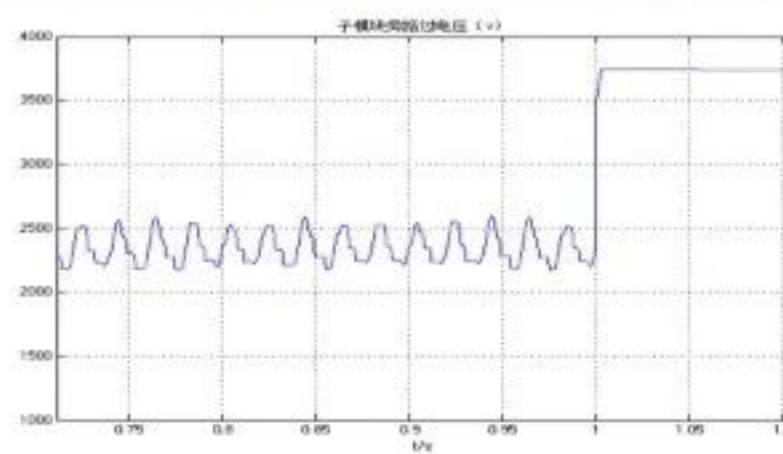


开关频率优化策略使能

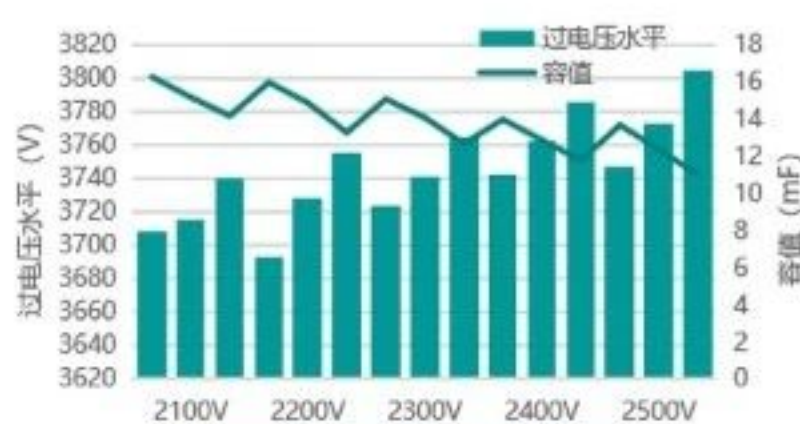
不同容值与子模块额定电压对取能电源上电影响



不同工况对子模块容值需求规律



不同额定电压下启动时间



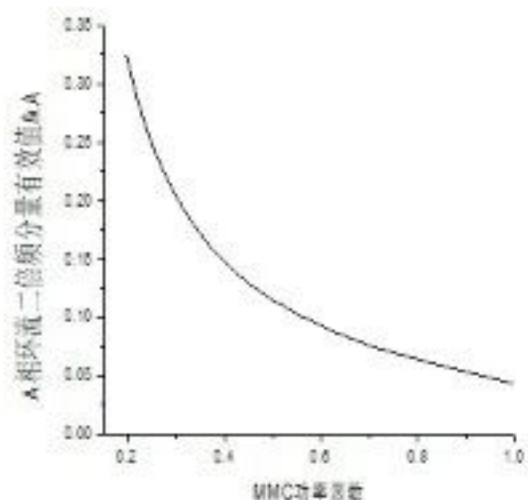
不同容值下子模块旁路过电压



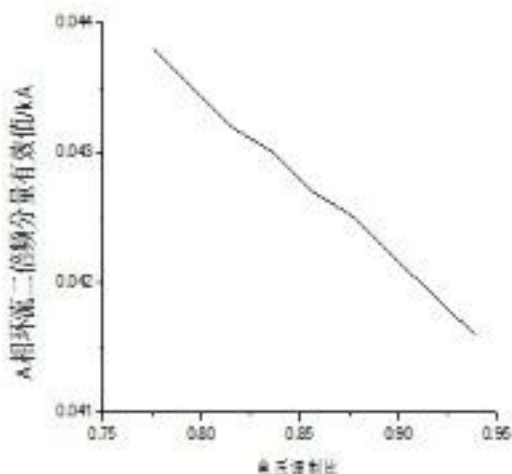
海上高功率密度柔直换流阀关键技术2

2、基于桥臂主动环流注入的电容参数优化设计

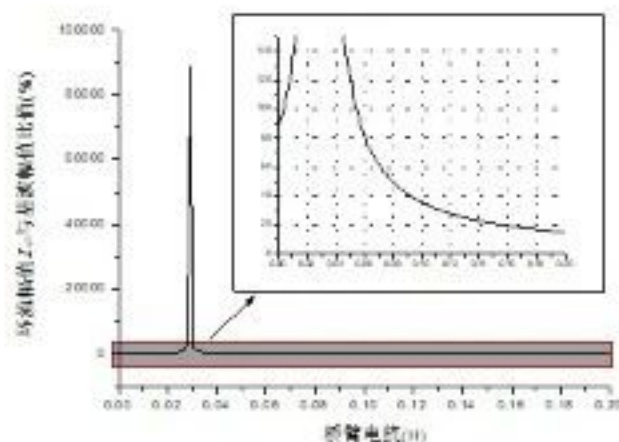
功率因数、电压调制比、桥臂电抗器、环流抑制控制、环流注入控制等对电容波动率的影响



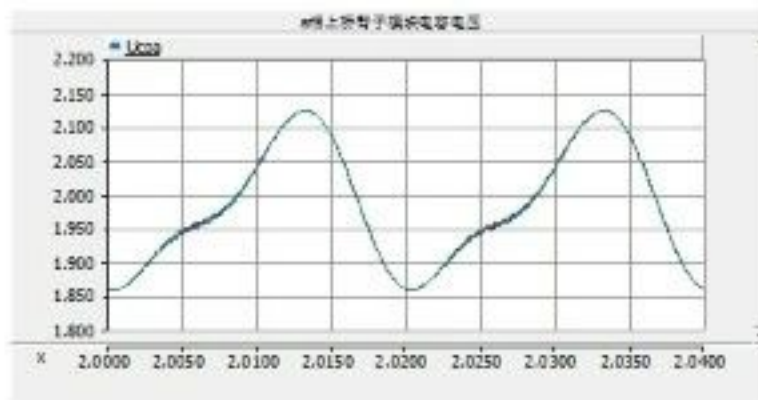
功率因数与环流关系



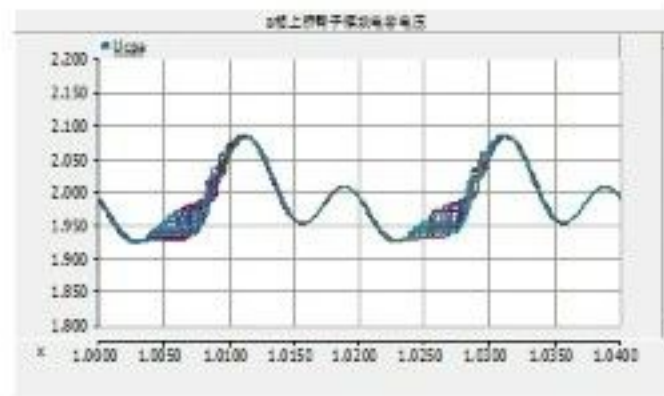
电压调制比与环流关系



桥臂电抗与环流关系



环流抑制控制器



环流注入控制器

功率因数：对电容波动率影响较大，功率因数越大，环流则越小

电压调制比：环流随着电压调制比的增大而减小，对于海上柔直工程，由于采用半桥子模块，电压调制比变化范围小，因而影响较小

桥臂电抗器：在大于谐振点处，较小范围内，相环流二倍频分量将随着桥臂电抗的增大而减小

环流抑制控制：控制目标是桥臂电流有效值最小，降低2.5%的电容波动率，有利于降低换流阀损耗

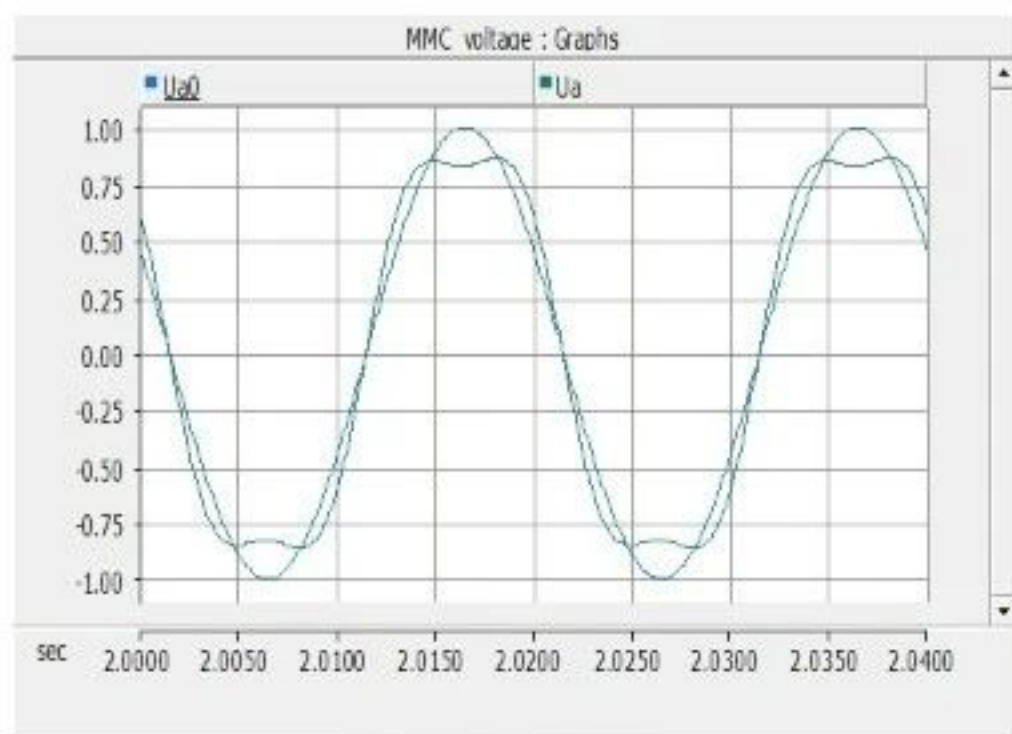
环流注入控制：电容波动率降低5个百分点以上，但桥臂电流有效值会大幅上升



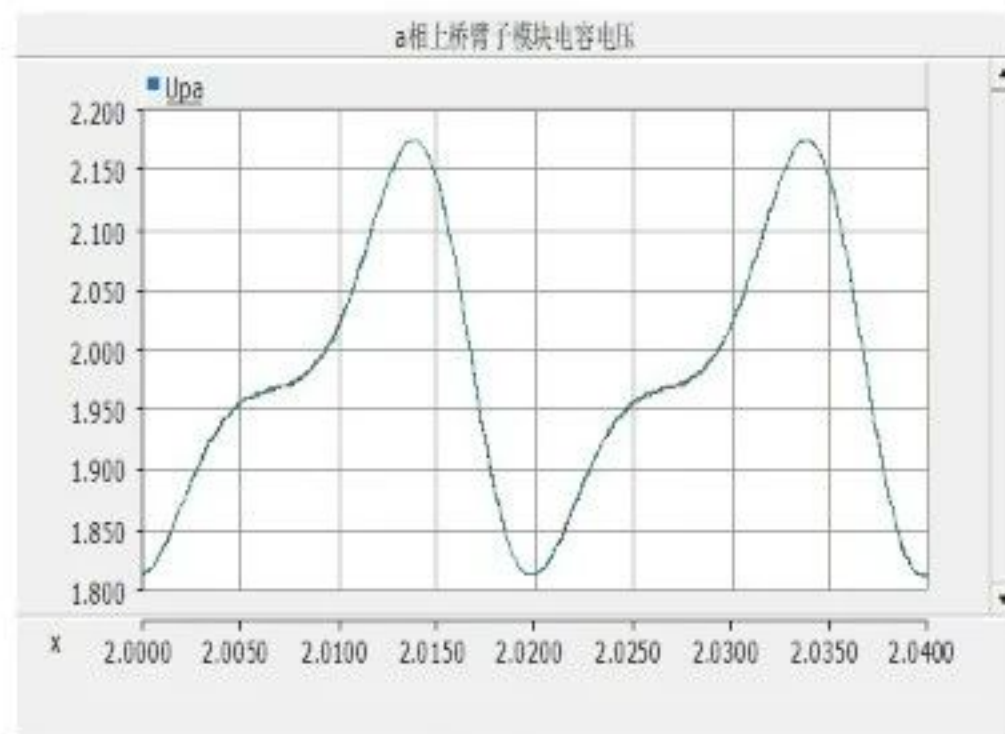
海上高功率密度柔直换流阀关键技术3

3、低容值下电压波动平抑控制策略

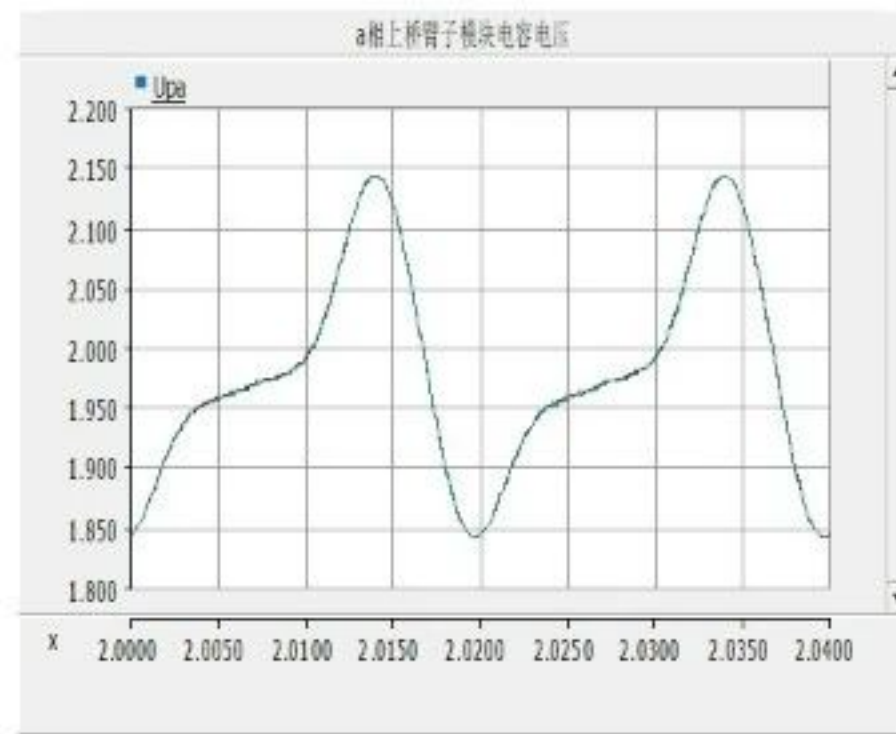
三次谐波注入平抑控制策略对电容波动率影响



阀侧电压波形对比



无三次谐波注入下波形图



三次谐波注入下波形图

□ 桥臂电流有效值和电容电压波动率均有大幅降低，电容电压波动率降低**1.5%**，桥臂电流降低**9%**



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

03 | 核心装备与智能运维

04 | 研究展望



海上风电核心装备

中国电气装备具备全产业链的设计、供货、运维、试验等能力，先后为三峡如东海上风电、华电阳江青洲海上风电、三峡新能源福建长乐海上风电等多个工程提供塔筒变压器、塔筒开关设备、交直流GIS、柔直换流阀、直流耗能装置、柔直变压器、测量装置、避雷器、套管、干式变压器、电力电缆等全套设备





海上风电紧凑型交流GIS

□ 通过高压开关关键技术攻关，研制了海上风电用系列化紧凑型GIS，电压等级涵盖72.5kV、126kV、252kV、363kV、550kV产品，具有**高可靠性、高通流、紧凑型、轻量化、高防腐性**等技术特点。此外，还研制了**风机塔筒用72.5kV紧凑型GIS(SF₆型、环保型)**。部分产品已成功中标三峡阳江青洲五、七海上风电项目



风机塔筒用72.5kV
GIS (SF₆型)



风机塔筒用72.5kV
GIS (环保型)



72.5kV GIS



126kV GIS



252kV GIS



363kV GIS



550kV GIS

海上风电紧凑型系列化交流GIS产品



直流GIS与低频GIS

□ 率先研制了国内首台套 $\pm 210/\pm 350/\pm 550$ 千伏直流GIS，并通过了长期带电考核、适海性C5-H级防腐、海洋9级抗震验证及国家级鉴定，技术水平处于国际领先。72.5kV/252kV低频GIS应用于世界首个高压大容量低频换频站——亭山和中埠换频站。40.5kV低频开关柜应用于国内首个示范站——浙江台州柔性低频输电工程



ZZF1-210(L)型直流GIS



ZZF1-350(L)型直流GIS



ZZF1-550(L)型直流GIS



72.5kV低频GIS



252kV低频GIS



40.5kV低频开关柜

- ◆ 直流GIS技术参数高于国际标准，达到国际领先水平；
- ◆ 72.5/252kV低频GIS通过中国机械工业联合会鉴定，整体技术水平国际领先，取得首台套成果；
- ◆ 国内首家通过20Hz开关柜全套试验的产品；



220千伏亭山-中埠柔性低频输电示范工程



台州40.5千伏柔性低频输电工程



换流阀与耗能装置

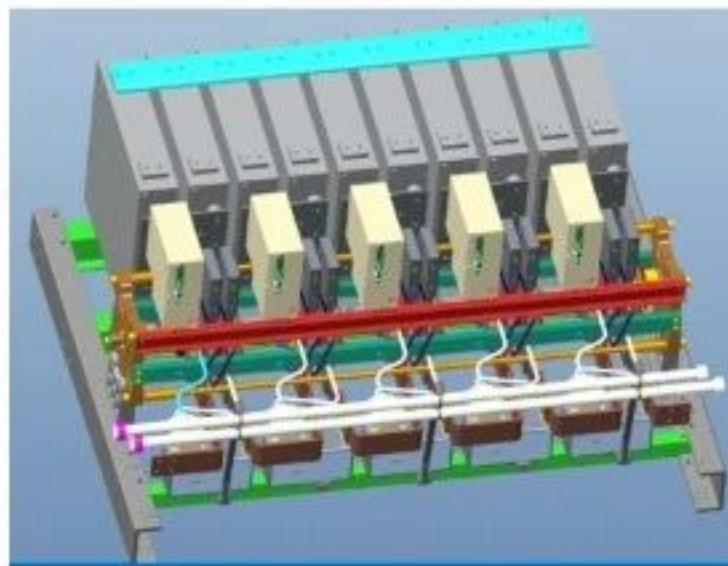
- 具备 $\pm 800\text{kV}/5000\text{MW}$ 及以下全系列柔直换流阀产品的设计、生产、试验能力，是目前国内首家，也是唯一一家具有海上柔直换流阀与直流耗能装置运行业绩的公司。自主研发的海上平台柔直换流阀产品和直流耗能装置成功通过中国机械工业联合会行业鉴定，综合性能指标均居于国际领先水平，并且海上平台柔直换流阀产品入选“2021年度能源领域首台（套）重大技术装备项目”
- 依托国家重点研发计划课题“海上柔性直流高功率密度换流阀关键技术及装置研制”，结合系统设计方案，完成高功率密度换流阀子模块电气设计与阀组件设计。基于工程参数需求，完成换流阀阀塔结构设计，其中阀塔长度方向优于目标值18.8%，重量优于目标值5%



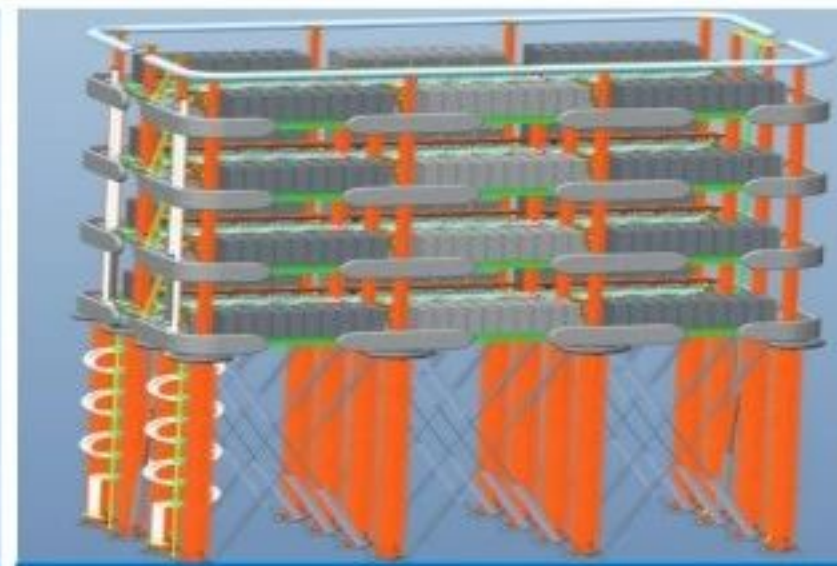
如东工程换流阀



如东工程陆上站耗能阀



阀组件效果图



完整阀塔效果图

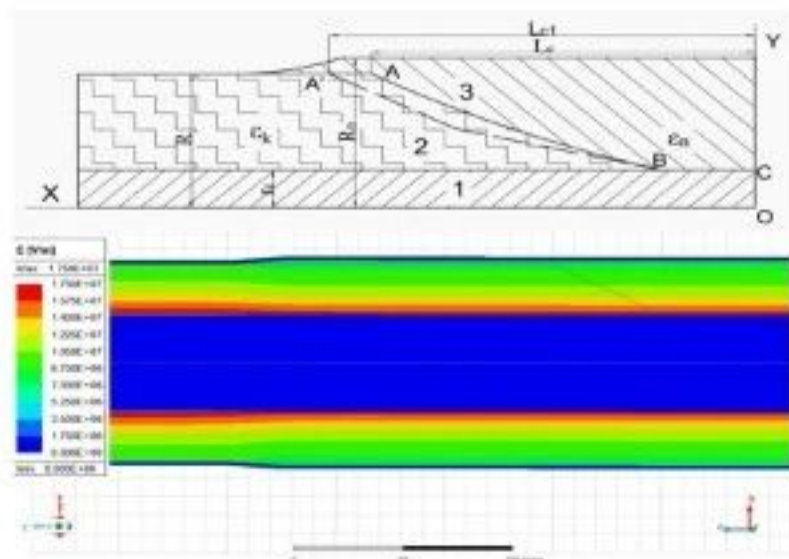


海缆

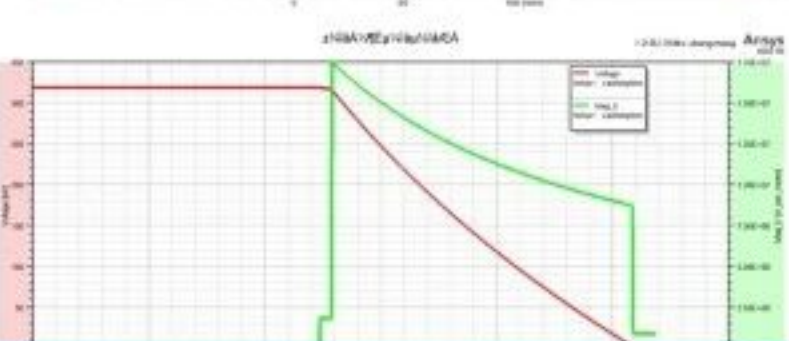
- 中国电气装备新建海缆生产基地(山东泰昇海缆有限公司)位于山东威海, 总占地面积400亩, 设计产能65亿, 总投资30亿元
- 掌握220kV海缆软接头结构设计方法, 实现通过仿真分析几何参数、绝缘界面缺陷对电气性能的影响
- 掌握220kV海缆软接头导体焊接、绝缘挤出硫化等关键制备工艺, 实现通过仿真对工艺参数的优化设计



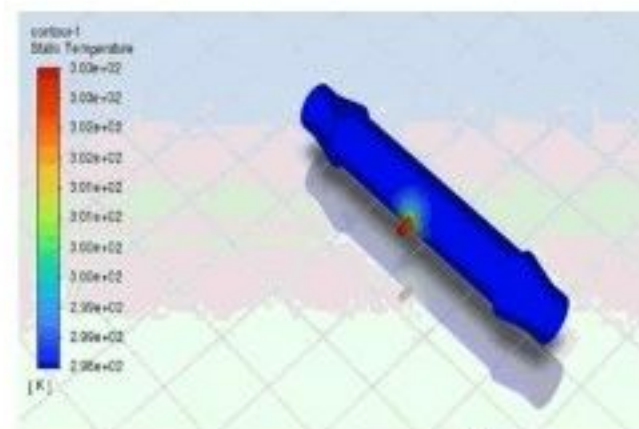
威海海缆生产基地



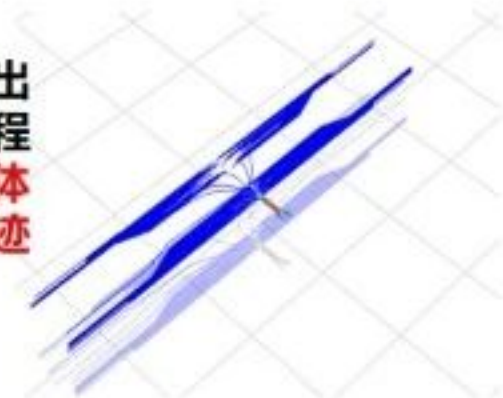
2.5U₀下设计结构电场分布云图与曲线



软接头绝缘挤出过程仿真



挤出过程流体轨迹



硫化过程剖面温度分布

绝缘挤出与硫化回复



海缆软接头相关制备工艺



智能运维

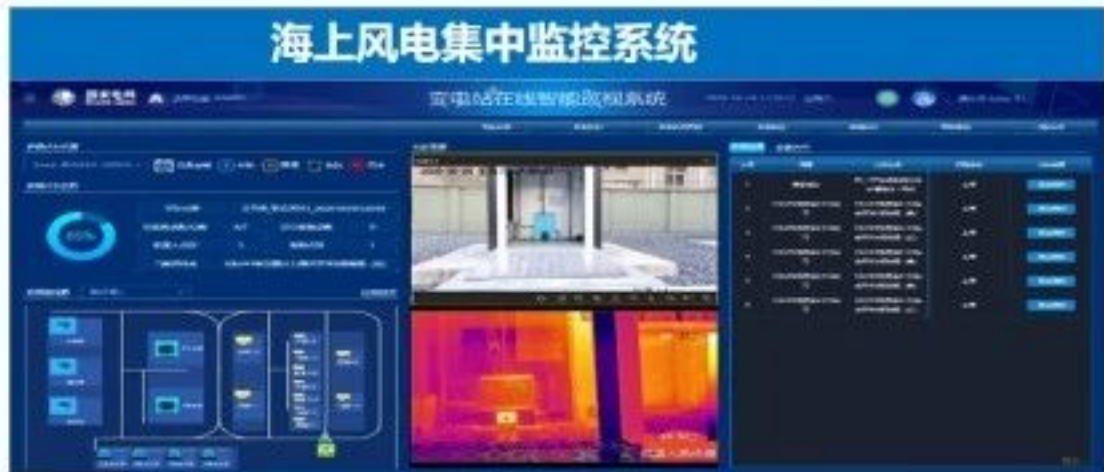
研制了海上风电电气装备物联网传感器、智能运检装备、集中监控系统



海底电缆巡检机器人

水下机器人 (ROV)

工作水深200米，最高速度5.8节，最大载荷50千克，可搭载**图像声纳、姿态航向参考系统、水下摄像机和TSS350海缆探测系统**等多种设备，能够完成**海缆巡检、路由探测、故障定位**等任务，已在**舟山海域**应用。



GIS

气体状态

机械特性

局部放电

隔离开关位置

导体温度、视频



变压器、电抗器

油温、油位

油色谱

微水监测

接地电流

局部放电



中压开关

机械特性

剩余电寿命

局部放电

弧光监测

视频监测



电容器、避雷器

容性设备监测

避雷器监测



电力线缆

电缆测温



整站辅助监控

整站视频监控

SF₆泄漏监测

关键部位红外测温

三维电子图档



发电机断路器

气体状态

机械特性

电寿命

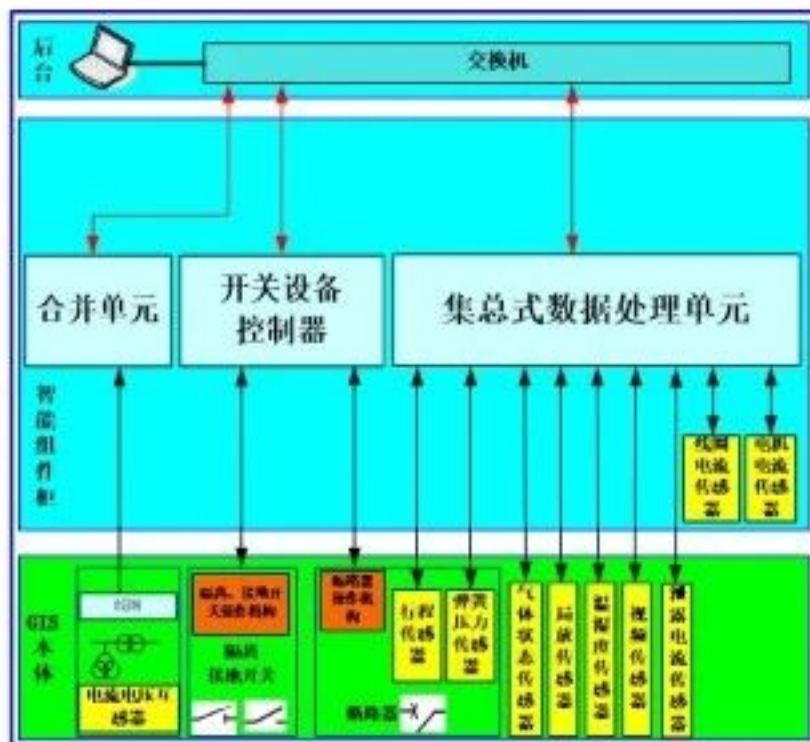
隔离开关位置

导体温度、视频



关键装备：智慧GIS

□ 智慧GIS是在常规GIS基础上集成了状态监测（核心大脑）、智能控制和互感器等三大系统。通过**气体状态、机械状态、绝缘状态、隔离开关触头状态、避雷器状态**等设备运行关键信息的全面监测，满足底层数据采集需求；通过智能传感器设计，实现**局放、机械、气体状态以及位置**等底层数据的就地边缘计算后的实时上送，减少了终端数据处理量，提升系统运行效率



252kV智慧GIS系统架构图



监测系统户外长期带电运行测试



252kV GIS状态全面感知



关键装备：智慧GIS

□ GIS数字孪生系统可实现**设备全生命周期数字化管理**，依托现场数据采集与数字孪生体分析，提供**产品故障分析、寿命预测、远程管理**等增值服务，提升用户体验，降低运维成本

应用层

距离准确掌握设备状态、实现预测预警、精准刻画故障发展过程、预测设备寿命的目标存在较大差距，**运维智能化水平低，劳动强度大。**

模型层

尚未实现**数字和物理模型融合**，监盘显示不直观，缺乏有效的设备状态监测、评估模型、故障诊断模型以及相关业务模型等。

数据层

未能实现**开关设备全状态感知**；数据存储的类型和格式各异，而且**数据无法共享**，难以综合各类监测数据对设备运行状态进行综合评价和诊断预警。

数字孪生设备

全景视频监控

多维信息呈现

设备状态分析

设备故障诊断

运检业务管理

设备资产管理

知识技能培训

传统电站
存在问题





关键装备：数字化换流阀

□ 以换流阀智能运维为目标，梳理实际业务需求，依托实际工程积累的运行数据，综合**知识图谱、机器学习和深度学习**等技术构建数据处理模型，对换流阀运行状态综合分析，实现换流阀“可观、可测、可控”，保障设备可靠和作业人员安全

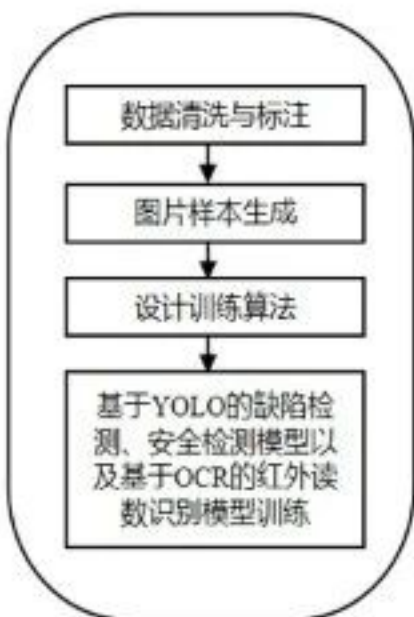
难点

- 如何进行传感量测单元最优化部署？
- 有限测量的多源数据多元特征感知？
- 数据-模型如何混合驱动？

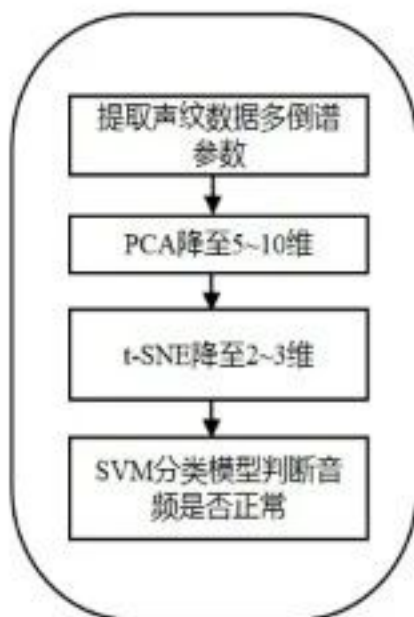
关键技术攻关

- 研究海上换流阀全景感知量测单元融合与最优部署方法
- 研究海上换流阀多源数据治理技术
- 研究海上换流阀全景感知、故障诊断、主动预警技术

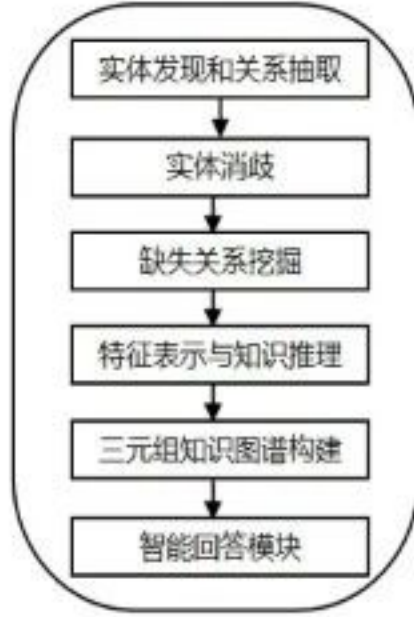
图像识别/视频分析



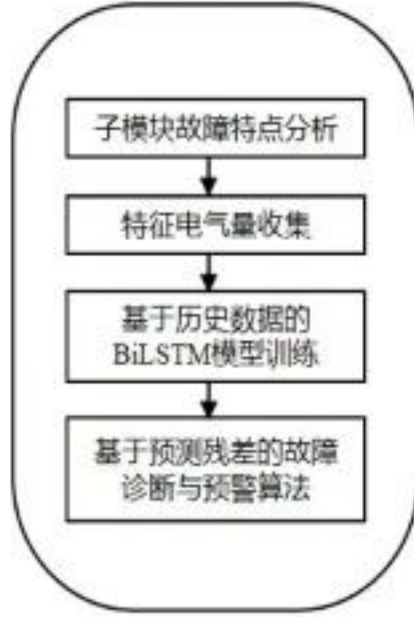
声纹识别



虚拟AI监控助手



故障诊断与主动预警



四类人工智能服务组件构建

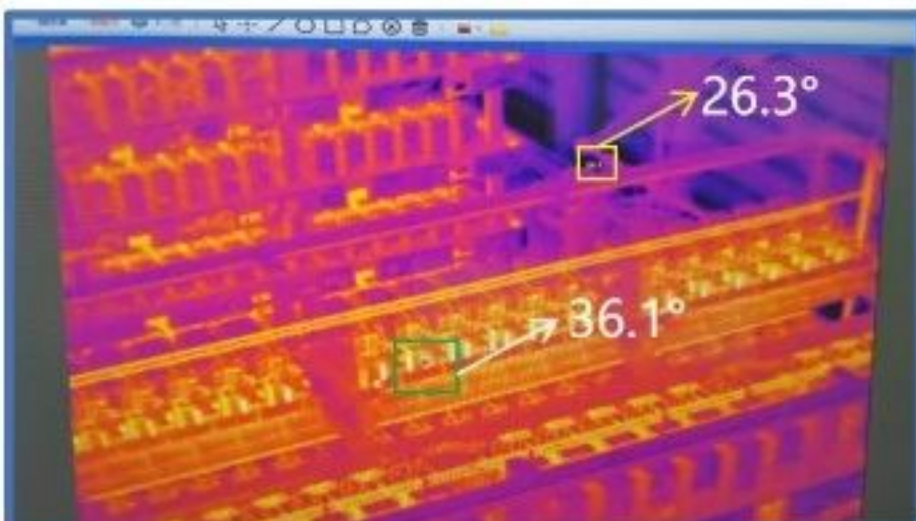


数字化换流阀---图像识别/视频分析组件(1)

□ 基于人工智能图像识别技术，针对海上风电阀厅的**违章作业行为、水冷系统漏水、阀塔红外读数**等进行智能检测，研发柔直阀智能感知分析系统，实现设备状态可知、人员作业行为可观



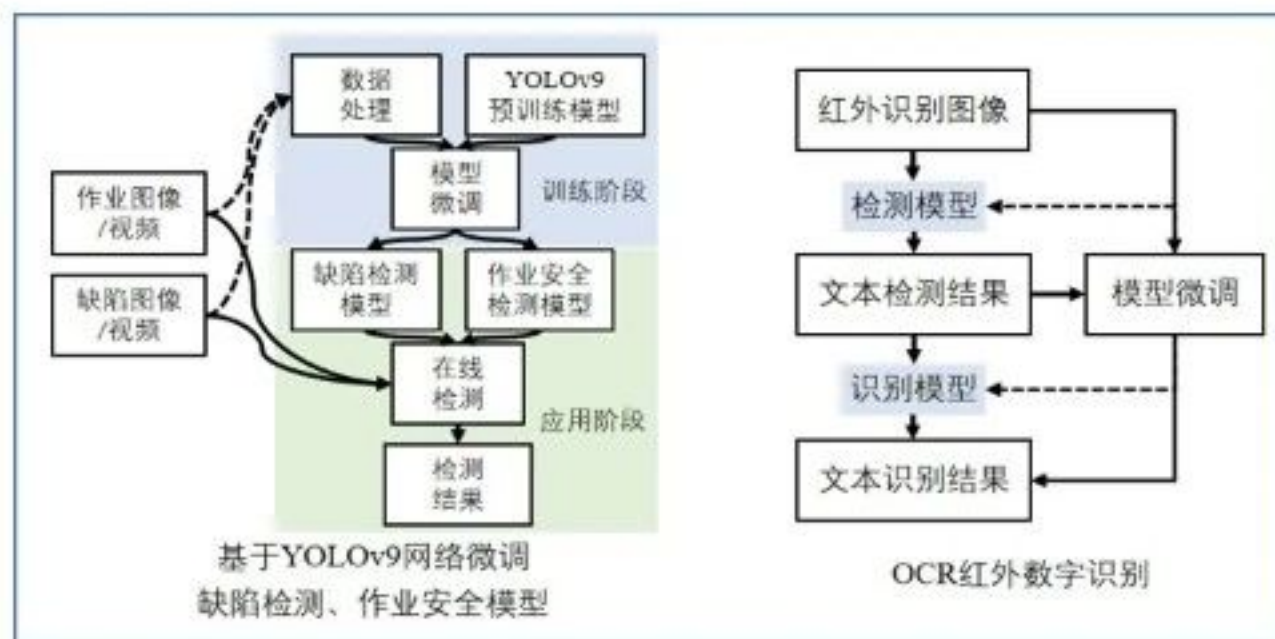
阀厅设备-人员-环境自动检测（安全帽+安全带+阀塔污秽+漏水...）



阀塔红外图像自动读数



柔直换流阀智能感知分析系统



关键技术

- 基于保护裁剪、MixUp等技术扩增数据集，对于缺陷数据使用GAN、Diffusion等进行样本扩充
- 利用预训练YOLOv9模型在安全作业数据集和缺陷检测数据集上分别训练检测模型，调节学习率、损失函数、优化策略等调优
- 双阶段OCR算法进行红外识别。第一阶段，训练EAST、DB等文本检测网络定位数字的位置，第二阶段，利用基于CTC或者基于注意力的网络实现将数字序列转换成文本

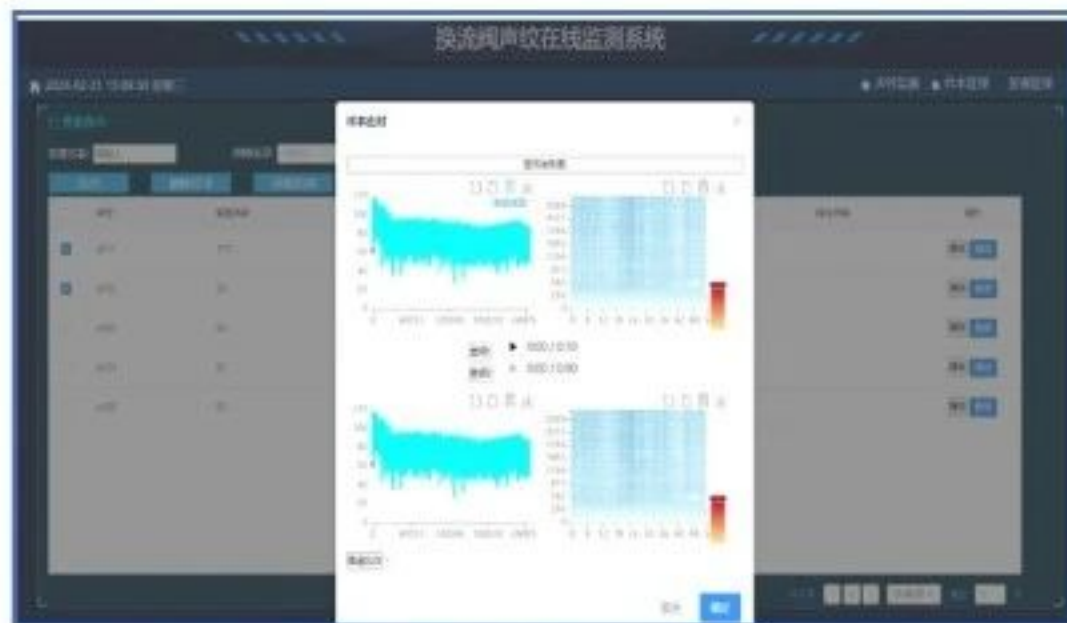


数字化换流阀---声纹识别组件(2)

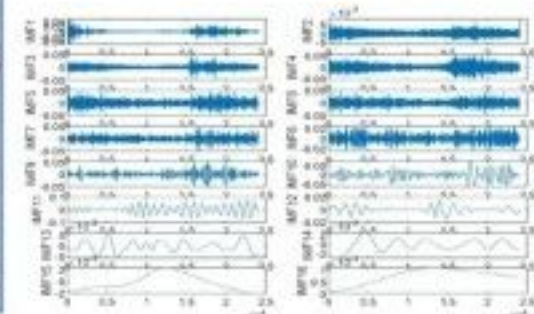
□ 搭建实际带电试验环境，加装声音传感器，针对采集的声音信号，采用**CEEMDAN-小波阈值联合去噪方法**以及**Mel-MobileNetV2网络**进行换流阀异响声纹特征提取，准确率 $\geq 95\%$



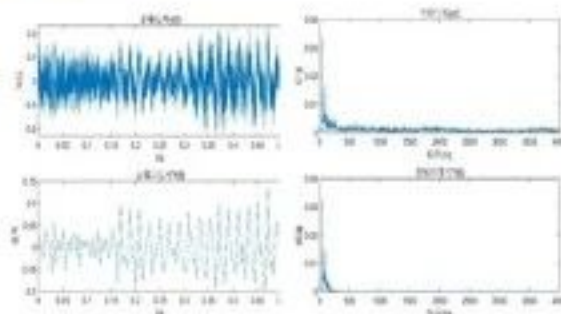
声音数据采集 (过压击穿、旁路断路器开合等)



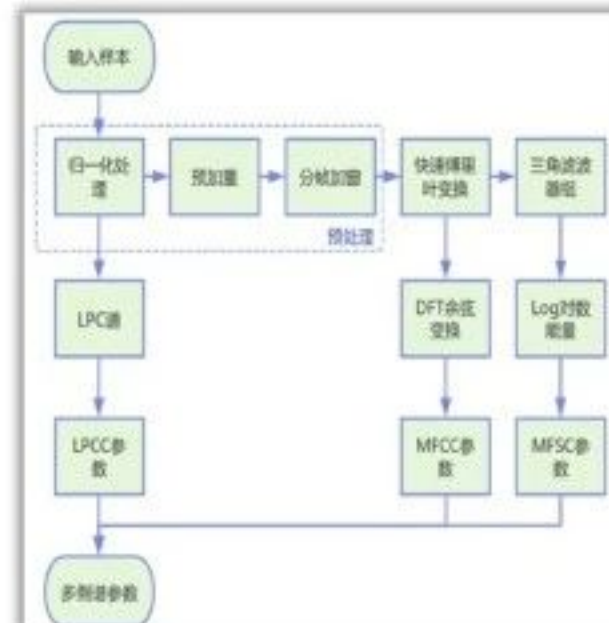
换流阀声纹在线监测系统



短路重合闸声信号CEEMDAN分解



声信号去噪前后时域与频谱图



换流阀声纹多倒谱参数提取



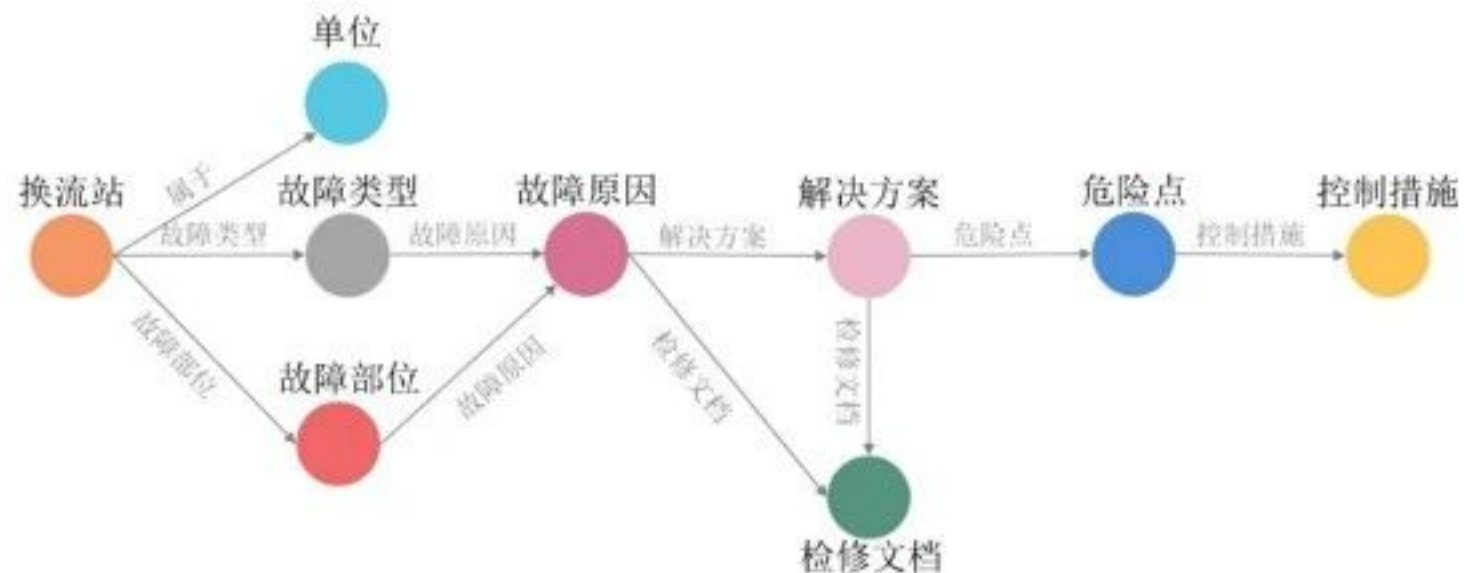
换流阀声纹异常诊断流程

关键技术

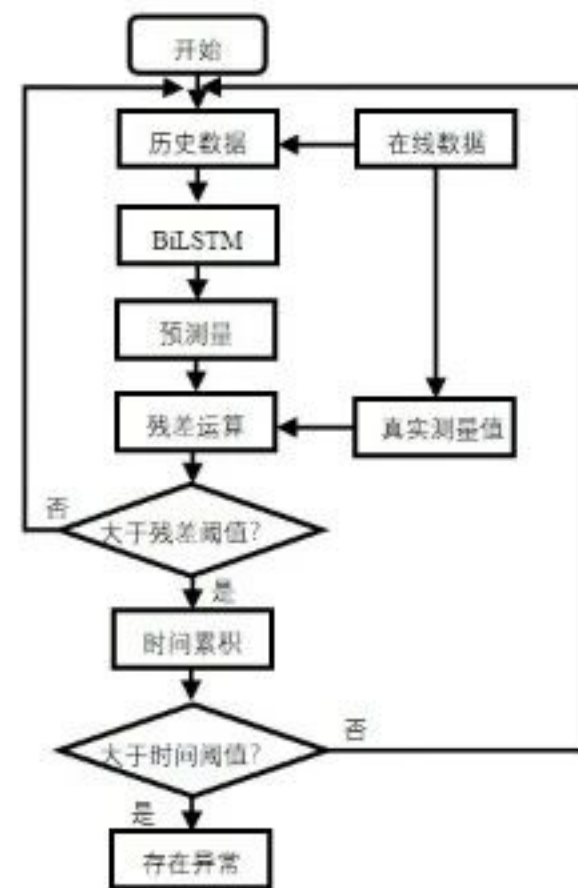
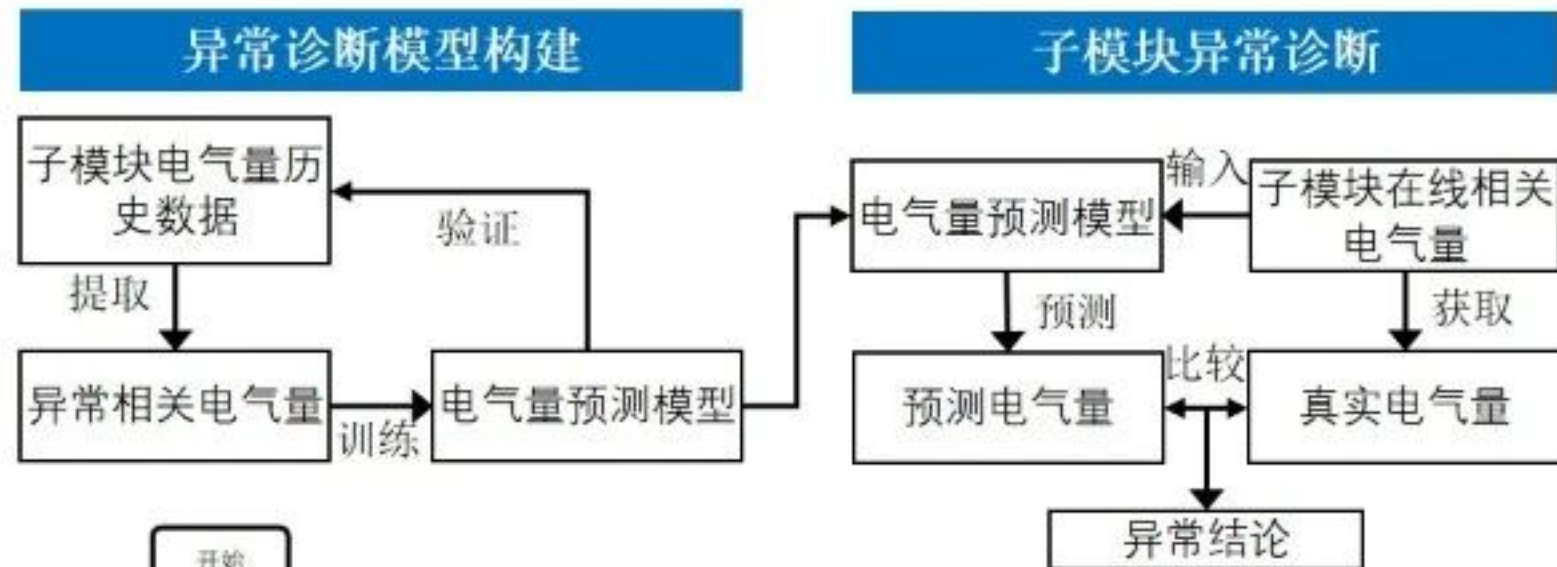
- 结合PCA算法的去噪、降维能力和t-SNE算法的降维，提取特征进行聚类分析，解决样本掺杂噪声和异常样本不足问题
- 基于CEEMDAN-小波阈值联合去噪方法，实现短路重合闸故障声音去噪
- 基于Mel-MobileNetV2网络识别阀异响声纹信号



数字化换流阀---虚拟AI助手组件(3)



数字化换流阀---故障诊断与主动预警组件(4)



基于预测残差的故障预测方法

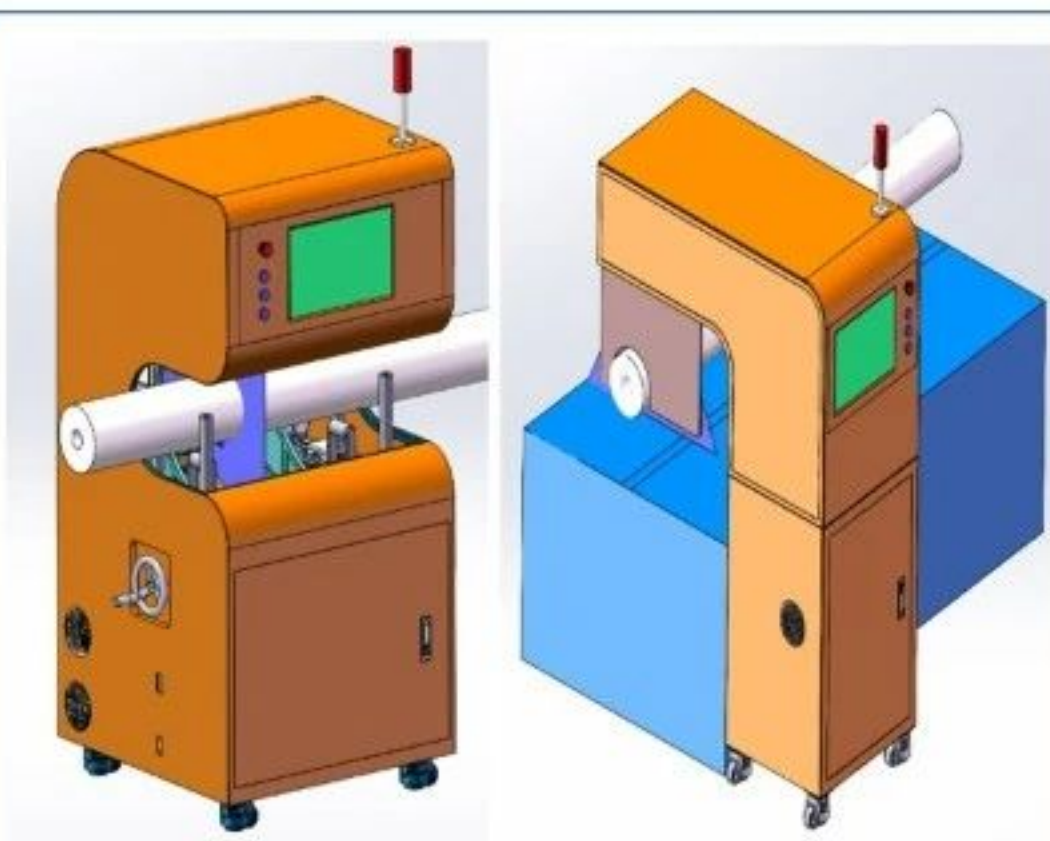
关键技术

- 归纳得到7种子模块故障，设计迭代查询故障诊断算法实现子模块IGBT及反并联二极管的批量化故障判断和定位
- 提出基于残差分析的换流阀模块异常检测方法，基于收集到的正常电气量结合双向长短期记忆网络对残差进行预估，如真实残差大于预估则判定异常



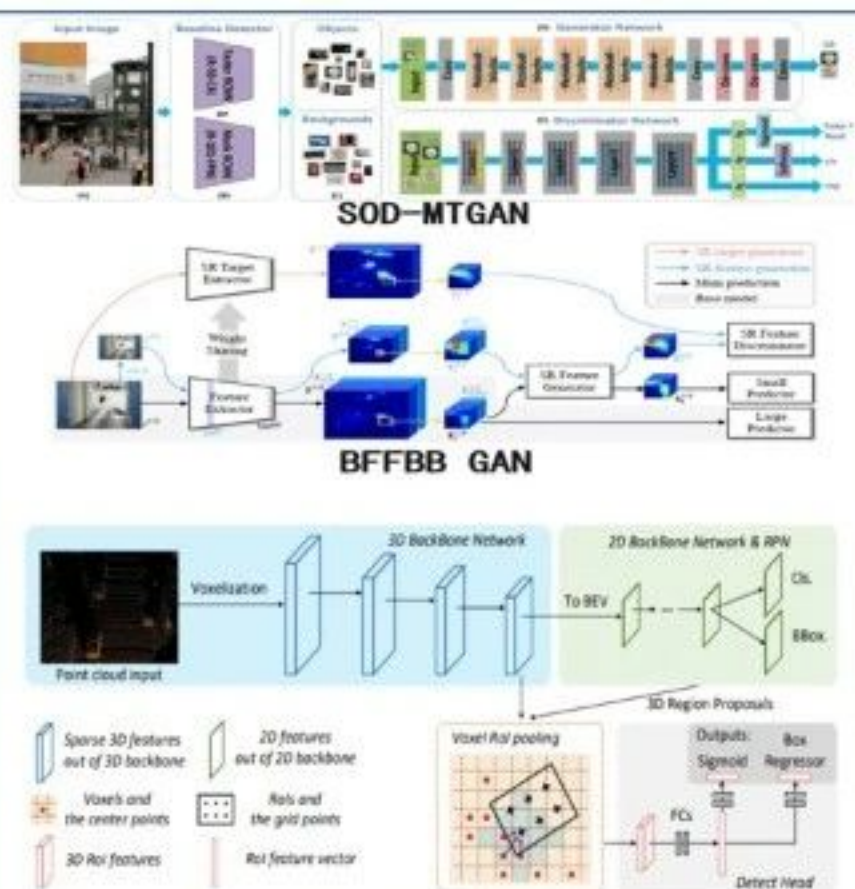
海缆---生产过程智能质检

□ 研发海缆生产过程的机器视觉检测系统，实现产品关键环节质检100%全覆盖，**用AI替代人工质检**，大幅度降低质检人员运营成本，有效提高质检效率

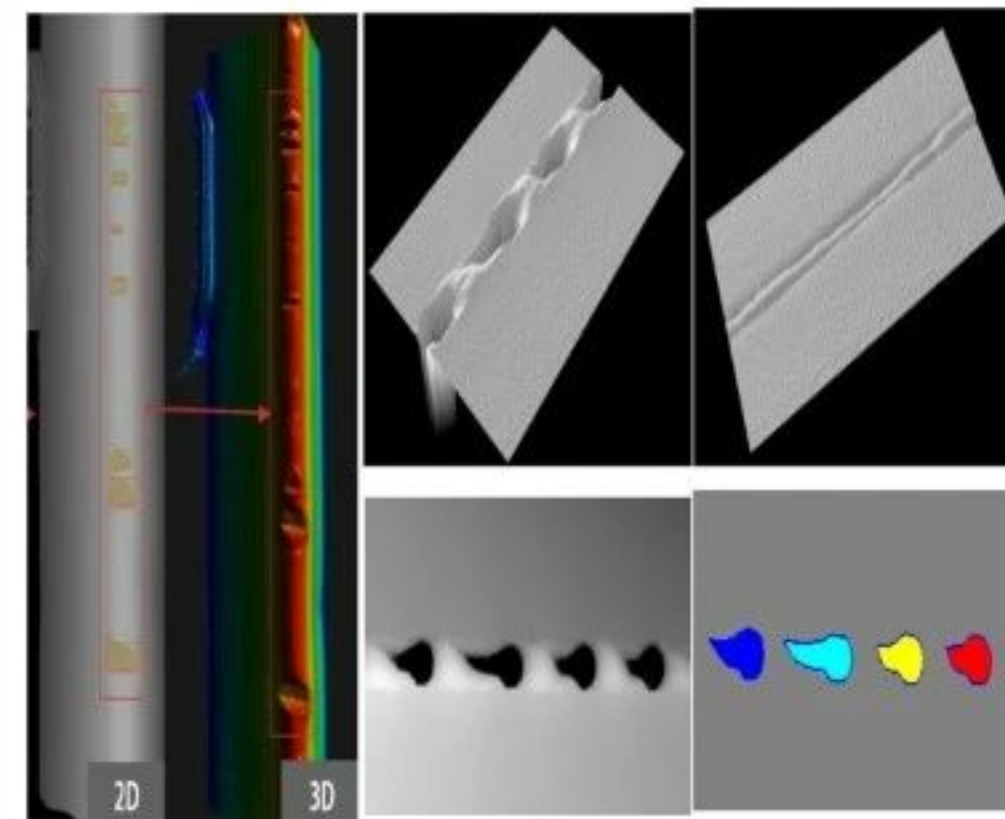


海缆360度表面质检仪

海缆铝护套焊缝质检仪



小样本二维/三维数据融合检测算法



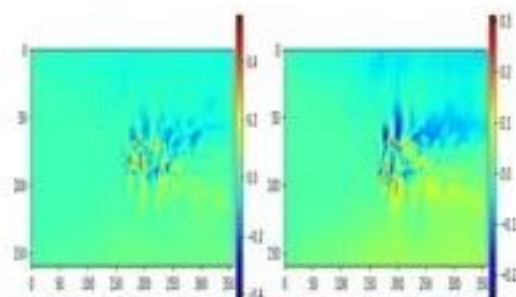
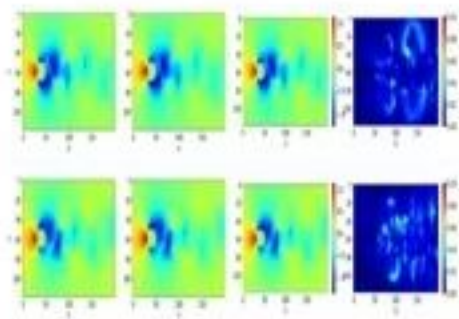
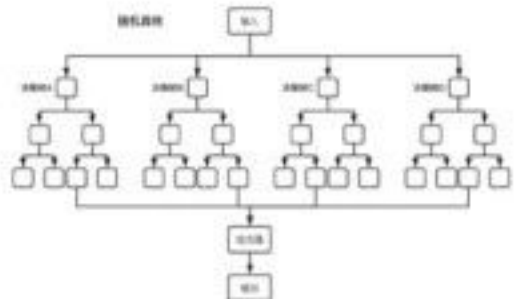
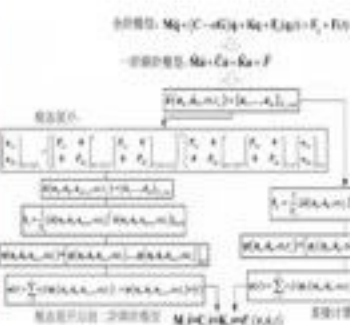
海缆表面缺陷识别效果

技术攻关：针对海缆生产过程缺陷种类多、样本少、目标小等问题以及检测实时性要求，攻关小样本迁移学习技术、高保真缺陷样本自动增广等技术

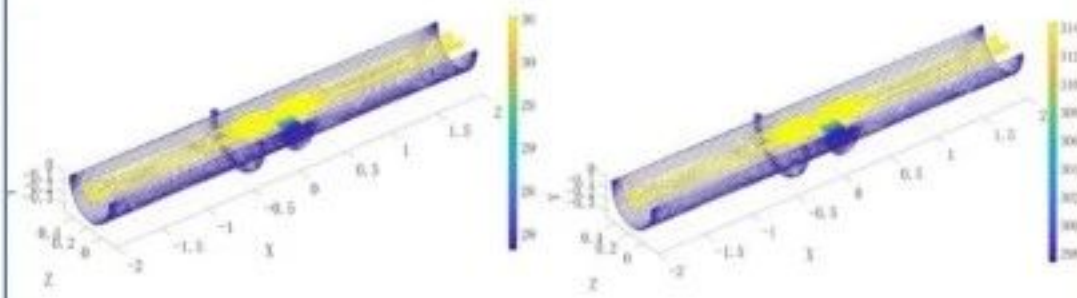


面向数字孪生应用的装备轻量化降阶技术

- 针对输变电装备结构复杂、仿真模型计算量大且实时性差等问题，研发了高精度多物理场仿真模型的降阶技术，开发了标准的通用高阶仿真模型降阶工具或软件，大幅降低模型降阶的技术门槛，实现**电力设备多物理场仿真秒级或分钟级快速计算**。目前在**高压GIS开关、换流阀**等设备的智能运维上进行应用验证



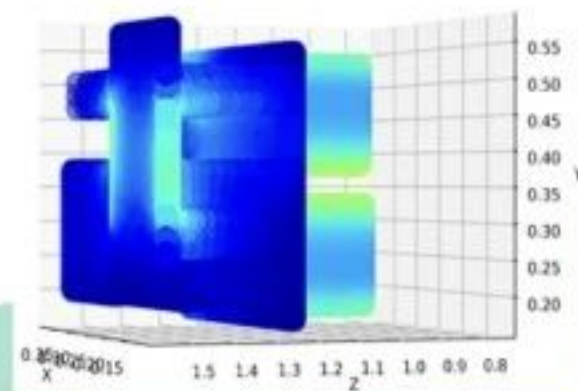
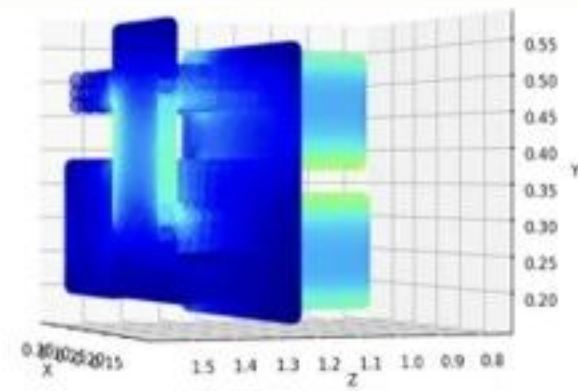
上：基于POD及其改进算法、随机森林算法
下：基于自编码器、卷积自编码器的CAE降阶模型



真实值（左）及预测结果（右）点云图对比

样本序号	输入参数			相对误差	预测时间 (s)
	电流(A)	环境温度(K)	充气压力(Pa)		
4	4000	273.15	550000	0.059	0.123
6	6000	273.15	550000	0.034	0.120
16	4000	313.15	550000	0.069	0.118
23	5000	273.15	600000	0.049	0.111

不同参数下预测误差及预测相对误差所需时间



磁场强度原始物理场（上）
降阶后重构物理（下）



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

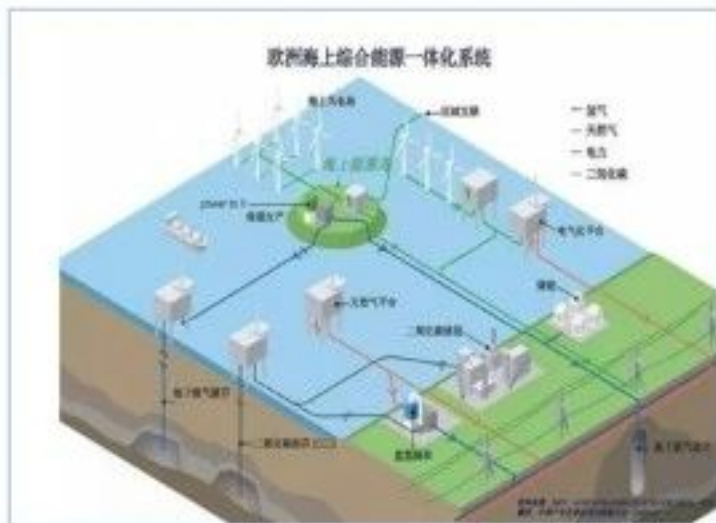
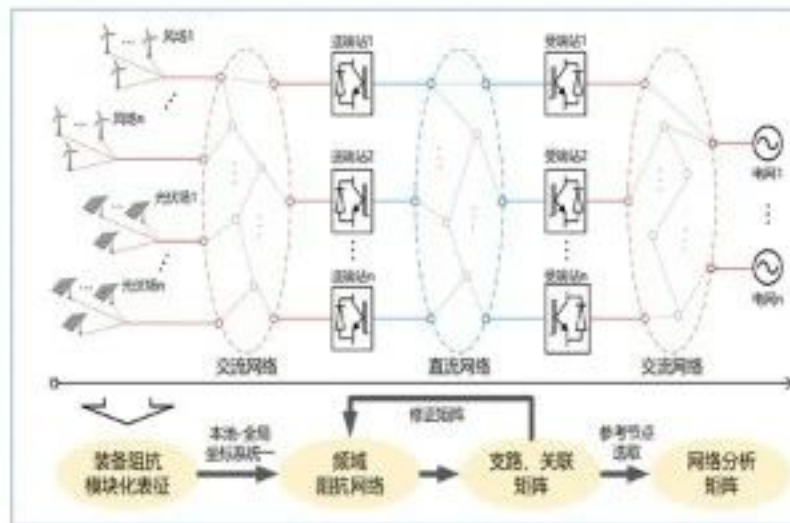
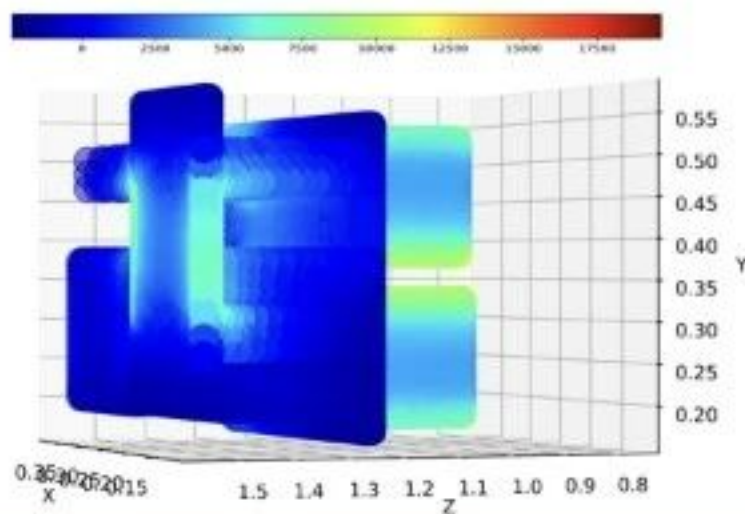
03 | 核心装备与智能运维

04 | 研究展望



研究展望（共性、前瞻、基础技术）

- 通过优化绝缘水平、设备参数、采用**模块动态冗余策略**等进一步提升海上换流站轻型化紧凑化设计水平，通过**柔直多端组网、源网协同**等技术提升海风柔直送出系统可靠性与稳定性
- **宽频振荡在线评估技术**：基于人工智能大数据-知识融合驱动的振荡风险在线评估及振荡定位等
- 深化应用**人工智能、大数据、数字孪生**等技术，实现关键装备缺陷至故障状态特征提取、故障诊断与主动预警等功能，进一步提升海上风电核心装备数字化、智能化水平



- 深化深远海风电柔直送出关键技术研发和核心装备研制，充分利用数字化技术，实现装备运行状态全面感知、认知！

**敬请各位专家批评指正！
谢谢！**





高电压技术

HIGH VOLTAGE ENGINEERING

主管：国家电网有限公司 主办：国家高电压计量站 中国电机工程学会

月刊

ISSN 1003-6520

CN 42-1239/TM



核心期刊

首页

期刊介绍 ▾

投稿指南 ▾

学术诚信 ▾

宣传服务 ▾

新闻公告

行业资讯

English

联系我们 ▾

Q 检索



作者登录



专家审稿



编辑办公



主编审稿

A square QR code with a white background. In the center of the QR code is a circular logo. The logo has a white background and contains the text "ELECTRIC INSULATION" in red, uppercase letters. Below this text, the Chinese characters "高电压技术" are written in black, bold font.

ELECTRIC INSULATION
高电压技术



电话：027-59258042

网址：<http://hve.epri.sgcc.com.cn>

邮箱：hve@epri.sgcc.com.cn

微信投稿与宣传合作：

[027-59258041/qintian@hve.ac.cn](https://t.me/qintian@hve.ac.cn)

高电压 高科技 高品质

《高电压技术》
入选“中国科技期刊卓越行动计划”



《高电压技术》

入选《能源电力领域高质量科技期刊分级目录》T1级



深远海风电柔直高效送出关键技术与核心装备



报告人：钟建英



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd.

智慧电气

系统服务

高效能源

2021年9月中国电气装备集团有限公司重组成立，是唯一一家千亿级电力装备央企，是国务院国资委监管的国有重要骨干企业，拥有6家上市公司、16个国家级创新平台、8个国家级质量检测中心、1个国家工程实验室、3个院士工作站和4个博士后工作站。



新能集团有限公司



中国西电集团有限公司
CHINA XD GROUP CO., LTD.



河南平高电气股份有限公司
HENAN PINGGAO ELECTRIC CO., LTD.



山东电工电气

我们的新定位

- 电气技术引领者
- 能源革命推动者
- 绿色发展践行者

我们的新目标

建设成为世界一流智慧电气装备集团

核心技术一流 | 经营实力一流 | 产品服务一流
公司治理一流 | 人才团队一流 | 品牌价值一流





2022年9月，科学技术研究院挂牌成立，作为集团**一级研发机构**，承担战略性科技投资功能。

责任使命：

- 新技术策源地
- 新产品孵化区
- 新机制试验田
- 新效益增长点

发展目标：

- 全面建成国际领先科技型企业
- 技术实力世界一流
- 人才团队世界一流
- 体制机制世界一流





中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

03 | 核心装备与智能运维

04 | 研究展望



海上风电背景

“十四五”末，我国海上风电累计装机容量需预计达到1亿千瓦以上，到2030年累计达2亿千瓦以上，到2050年累计不少于10亿千瓦。2050年全球海上风电累计装机容量至少达到20亿千瓦。我国海上风资源70%集中在远海，大规模远海风电集中开发与送出成为趋势。



中国--海上风电的最大市场

3009GW 可开发装机容量

≈130个 三峡水电站装机容量

中国“十四五”时期已规划大于 65GW

欧洲2021-2025年海上风电将新增装机 21.8GW



海上风电汇集与送出

目前海上风电送出系统主要包括交流、柔性直流两类送出方案。交流送出方案主要适用于离岸70km以内的应用场景；直流送出方案大多适用于70km及以上的应用场景。

海上风电交流送出解决方案



适用于离岸距离70km以内、容量小于1000MW的近海风电场送出。需提供海上升压站、陆上集控中心及海缆的设计部署。



海上风电柔性直流送出解决方案



适用于大规模、大容量（1000MW到2000MW）距离超过70km及以上的深远海风电场送出。需提供海上换流站平台及设备的设计部署。





» 深远海风电柔性直流送出

深远海风电柔直送出是全球未来发展的重要趋势。2023年，德国、荷兰完成了14个 $\pm 525\text{kV}/2000\text{MW}$ 工程招标合同。我国起步相对较晚，但得益于多个陆上柔直工程建成投运、技术积累丰富，目前已投运、在建、规划了多个深远海风电柔直工程。

序号	项目名称	容量	直流电压	投运时间
1	DolWin6	900MW	$\pm 320\text{kV}$	2023
2	DolWin5	900MW	$\pm 320\text{kV}$	2024
3	BorWin5	900MW	$\pm 320\text{kV}$	2025
4	BorWin6	1030MW	$\pm 320\text{kV}$	2027
5	如东工程	1100MW	$\pm 400\text{kV}$	2021
6	阳江青洲五七工程	2000MW	$\pm 500\text{kV}$	计划2024
7	汕头中彭二	1000MW	$\pm 320\text{kV}$	规划中
8	福建长乐外海	2100MW	$\pm 500\text{kV}$	规划中
9	汕头国管海域	6000MW	$\pm 500\text{kV}$	规划中

国内外深远海风电柔直送出工程



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

03 | 核心装备与智能运维

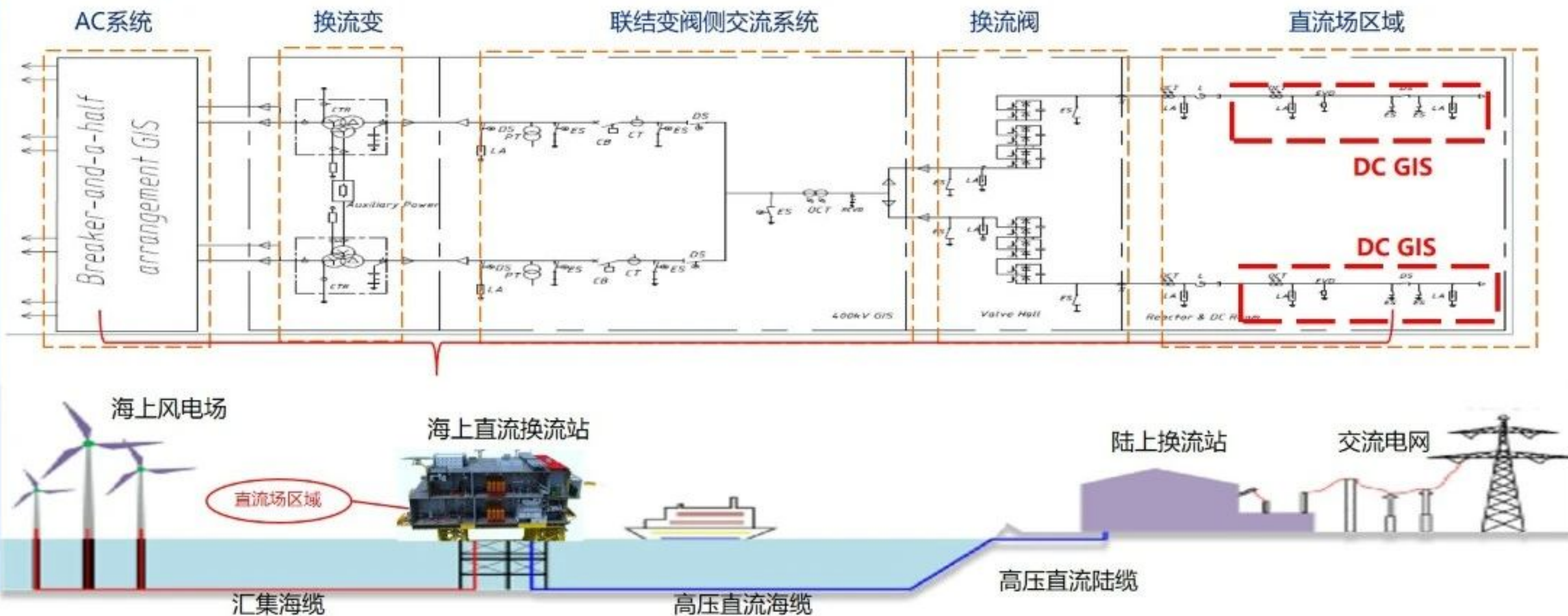
04 | 研究展望



深远海风电柔直送出关键技术

- 海上风电柔直送出系统主要包括海上风电场、汇集系统、海上换流平台、高压直流海缆、陆上换流站等部分
- 如何保证大规模深远海风电柔直系统**高效送出与安全稳定并网**，是亟待解决的重点问题
- 中国电气装备围绕上述问题开展了风场110kV汇集、宽频振荡抑制、核心装备紧凑轻型化设计及智能运维等关键技术研究

海风柔直送出系统及主接线



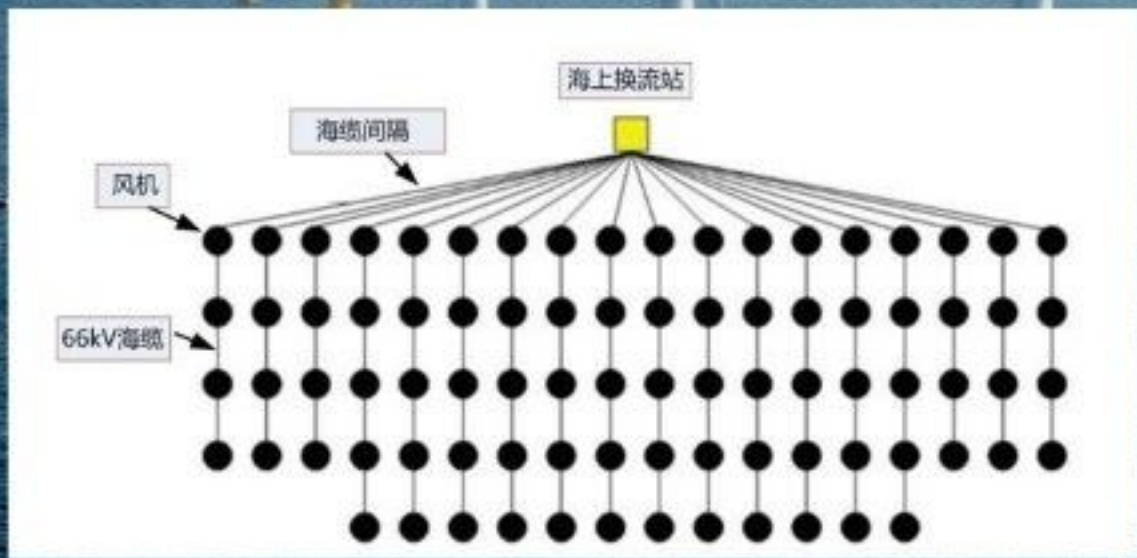


海上平台110kV交流汇集

□ 深远海风电柔直送出系统中，经测算采用**110kV交流**汇集相较于66kV汇集方案，综合造价降低约25%

60% 110kV海缆进线间隔数量

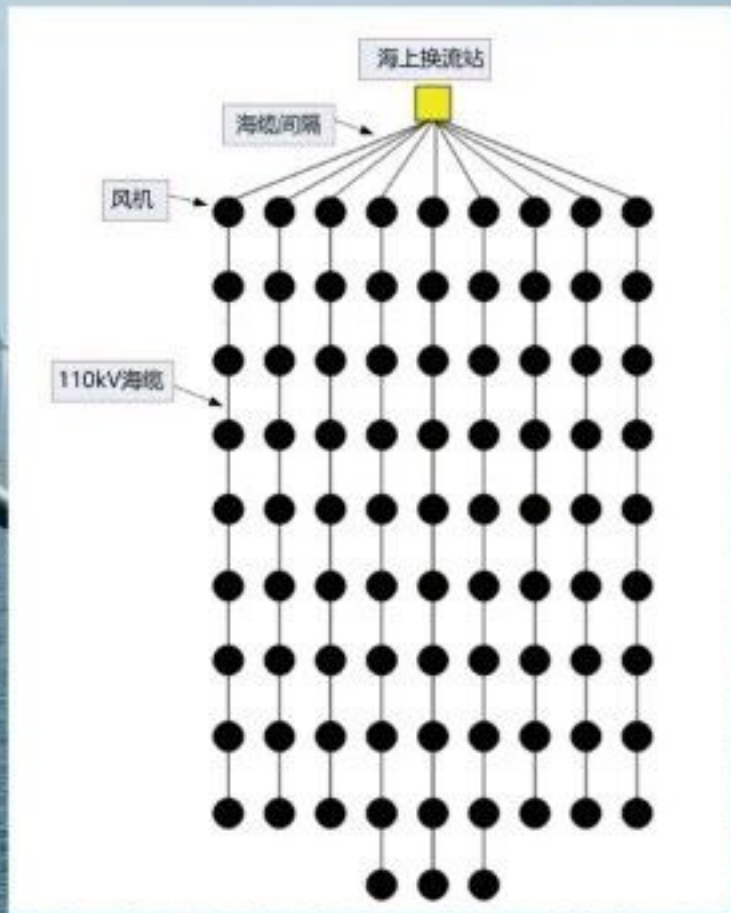
相同载流能力下，110kV海缆容量是66kV海缆容量的**1.66倍**。在总传输容量相同的条件下，110kV海缆的间隔仅为66kV海缆间隔数量的**60%**，节省30%海缆用量。



66kV汇集

25%

综合对比，在相同工程条件下，110kV汇集方案造价比66kV汇集方案造价低25%。



110kV汇集

5% 110kV海缆耗材造价略高

相同载流能力下，110kV海缆耗材造价比66kV耗材价格高5%左右。



海上平台110kV交流汇集

□ 深远海风电柔直送出系统中，对于单机容量15MW以上的海上风电场，采用110kV交流汇集是更高效、更紧凑、更可靠、更符合中国国情的技术路线

➤ 更高效

- 更高的电压等级，更大的输送容量，更低的传输损耗，更简单的网络结构

➤ 更紧凑

- 海上平台更少的海缆进线、更小的GIS间隔需求，更节约的平台占地

➤ 更可靠

- 更为成熟的产品与运行经验，保证传输线路更为可靠

➤ 更符合中国国情

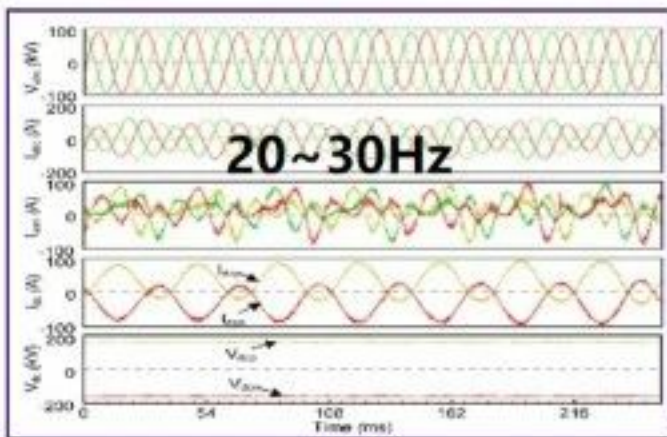
- 中国标准电压等级序列
- 丰富的技术积累
- 专业的配套产线
- 先进的专家团队
- 丰富的应用实例
- 强大的设备制造集群



宽频振荡自适应抑制-现状

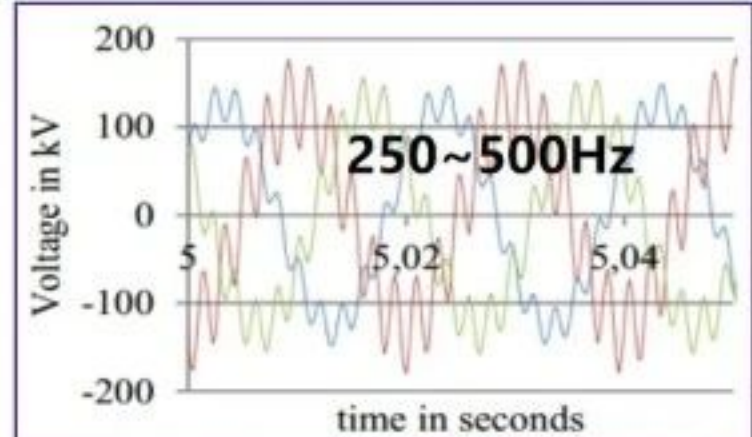
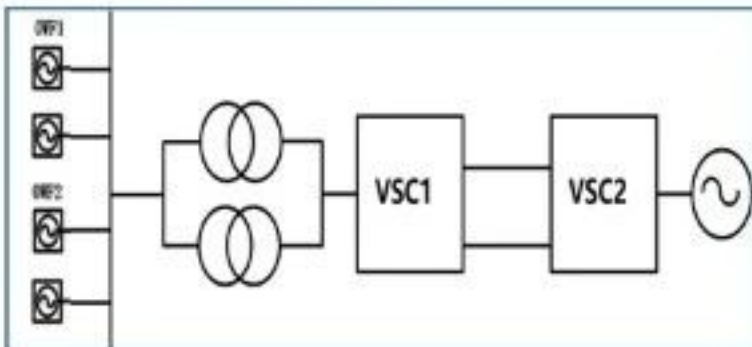
目前国内已投运的新能源柔直并网工程频繁发生不同频段的振荡现象，呈现出振荡频带宽(数Hz~数kHz)，振荡频率漂移、幅频大范围时变等特点，成为制约新能源送出和消纳的重要因素之一

低频、次/超同步振荡 ($<100\text{Hz}$)



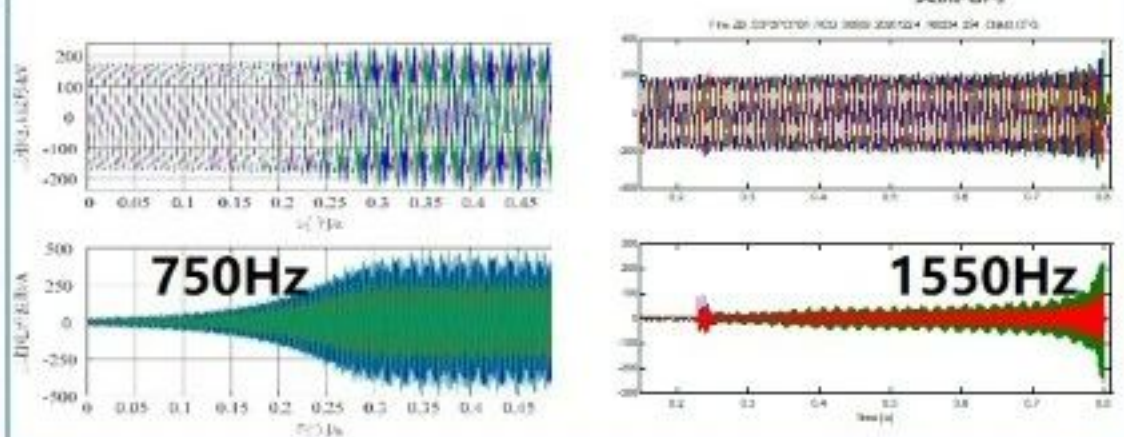
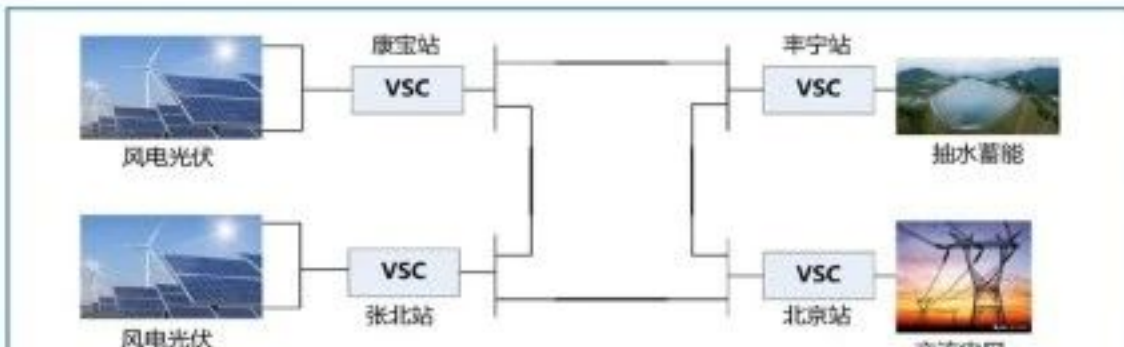
南澳柔直工程—世界首个
风场经多端柔直并网工程

中频振荡 (100~1kHz)

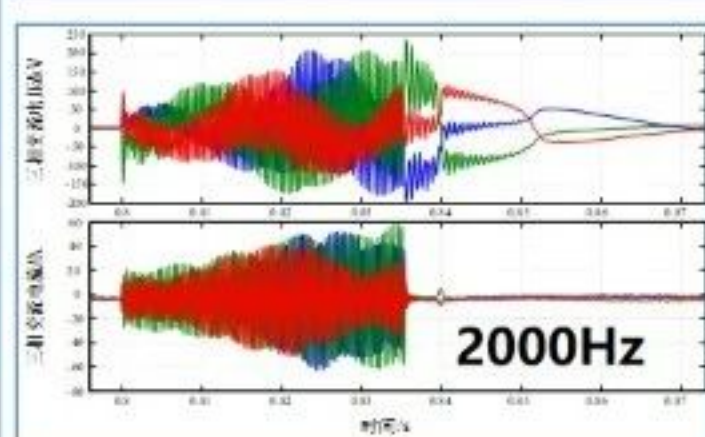
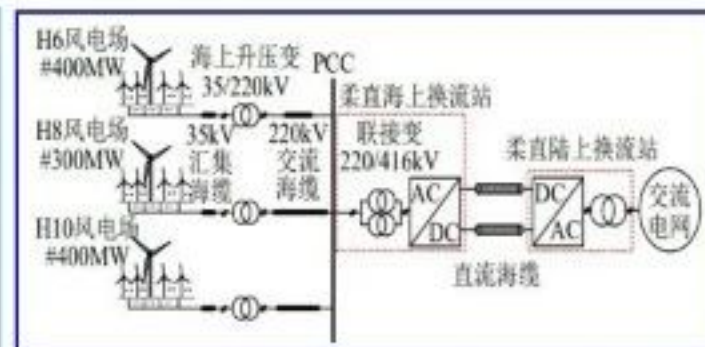


Borwin1 HVDC工程—世界
首个海上风电柔直并网工程

高频振荡 ($>1\text{kHz}$)



张北工程—世界首个新能源柔直多端
电网工程



如东工程—我国首个海风柔直并网
工程



宽频振荡自适应抑制-研究方法

宽频振荡主要有状态空间特征值、时域仿真、阻抗建模等分析法，中国电气装备联合上海交大开展基于阻抗法宽频振荡自适应抑制技术攻关，该成果将应用于海外海风柔直送出工程（目前在阻抗建模、机理研究方面取得了阶段性研究成果）

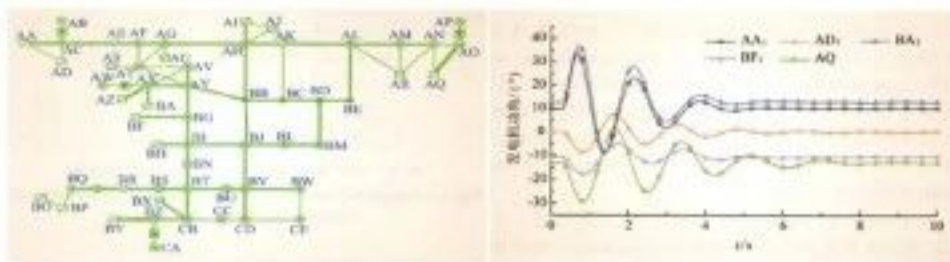
状态空间特征值分析法

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ \dot{y}(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases}$$

优点：可准确得到参数变量对系统稳定性影响

不足：1) 物理意义不清晰；2) 复杂系统时计算量大，求解困难；3) 电路拓扑改变时模型需要重构，适用性较弱

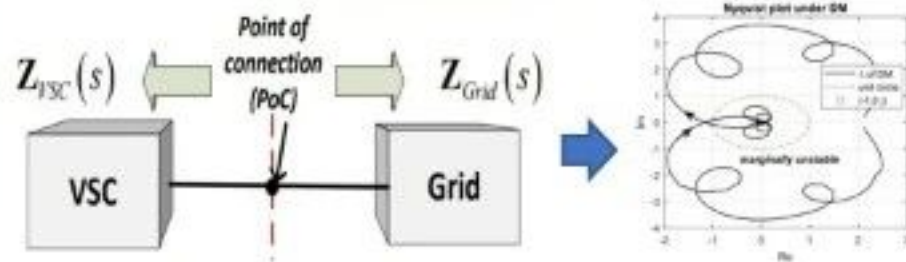
时域仿真分析法



优点：准确判断稳定状态，对分析方法进行检验

不足：1) 不足以揭示振荡事故的产生机理；2) 无法为稳定运行控制设计提供理论指导

阻抗分析法



优点：1) 物理意义清晰直观；2) 对于复杂系统，可通过实测获取阻抗模型，方便简洁

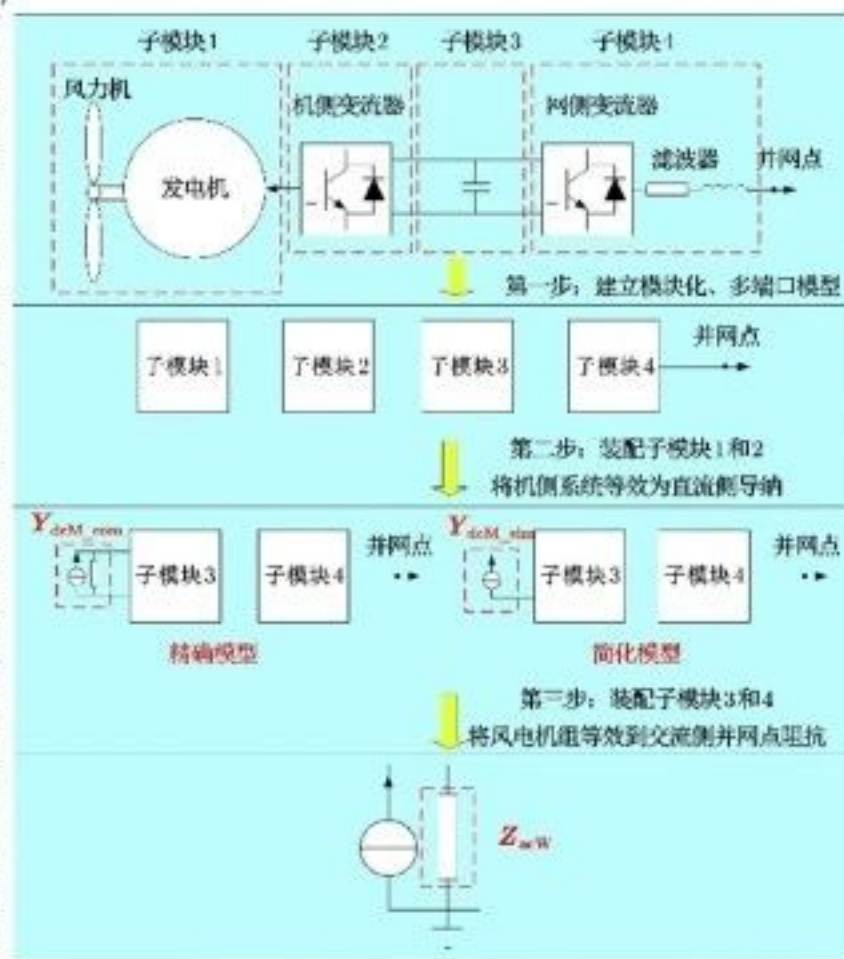
不足：聚合模型会忽略部分系统动态信息

阻抗分析法可表征新能源发电及电力电子装置在不同频率小信号扰动下的响应特性，适用于复杂系统下黑箱模型，在新能源并网工程宽频振荡领域应用广泛

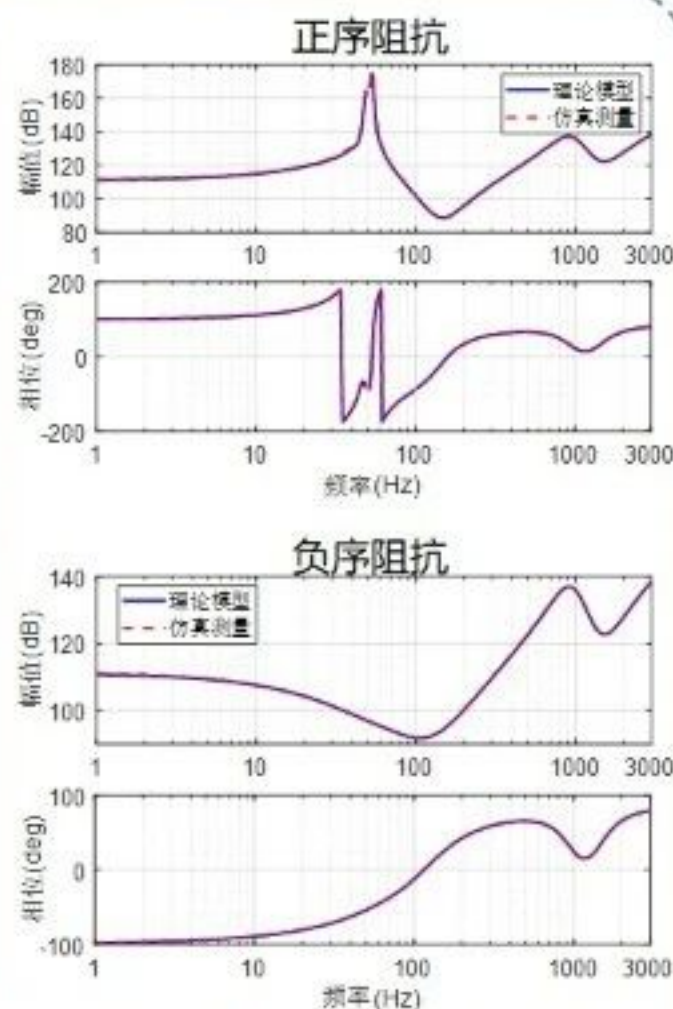


宽频振荡自适应抑制-精细化阻抗建模

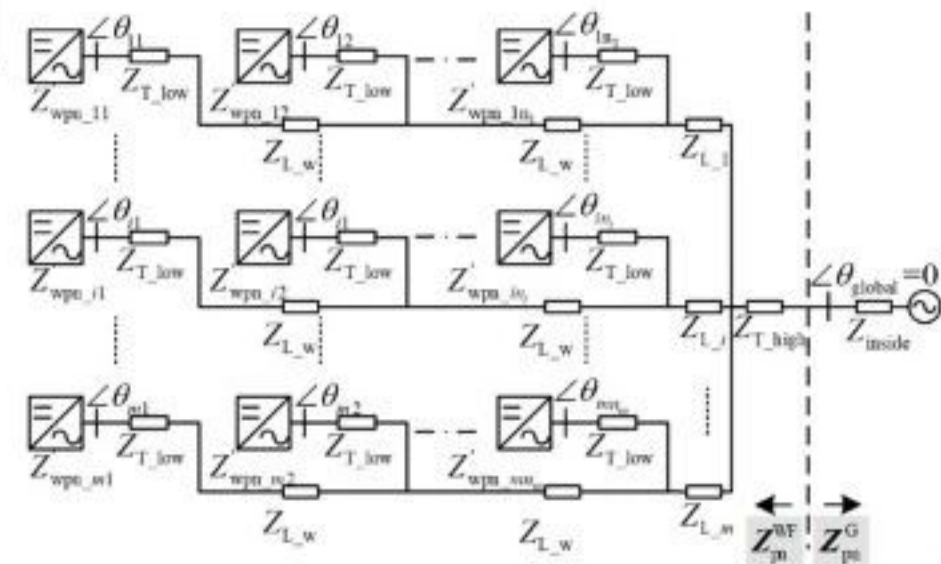
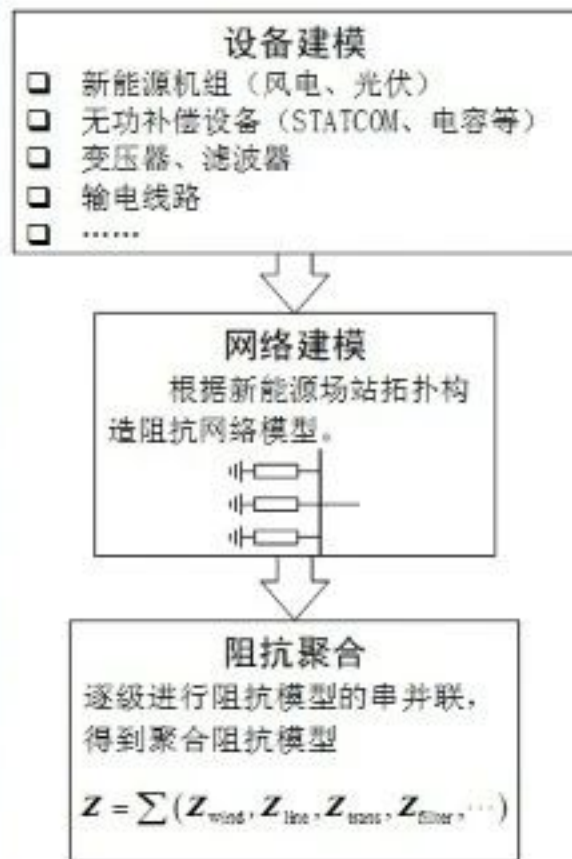
- 提出基于模块化、多端口的频域阻抗建模方法，建立了直驱风机、双馈风机等**新能源发电单元的精细化宽频阻抗模型**，并通过扫频验证了其具有较高的准确性
- 创新性提出了基于节点导纳矩阵的风电场频率耦合阻抗聚合建模方法**，适用于准确评估宽频稳定性



模块化多端口频域阻抗建模步骤



直驱风机阻抗模型验证

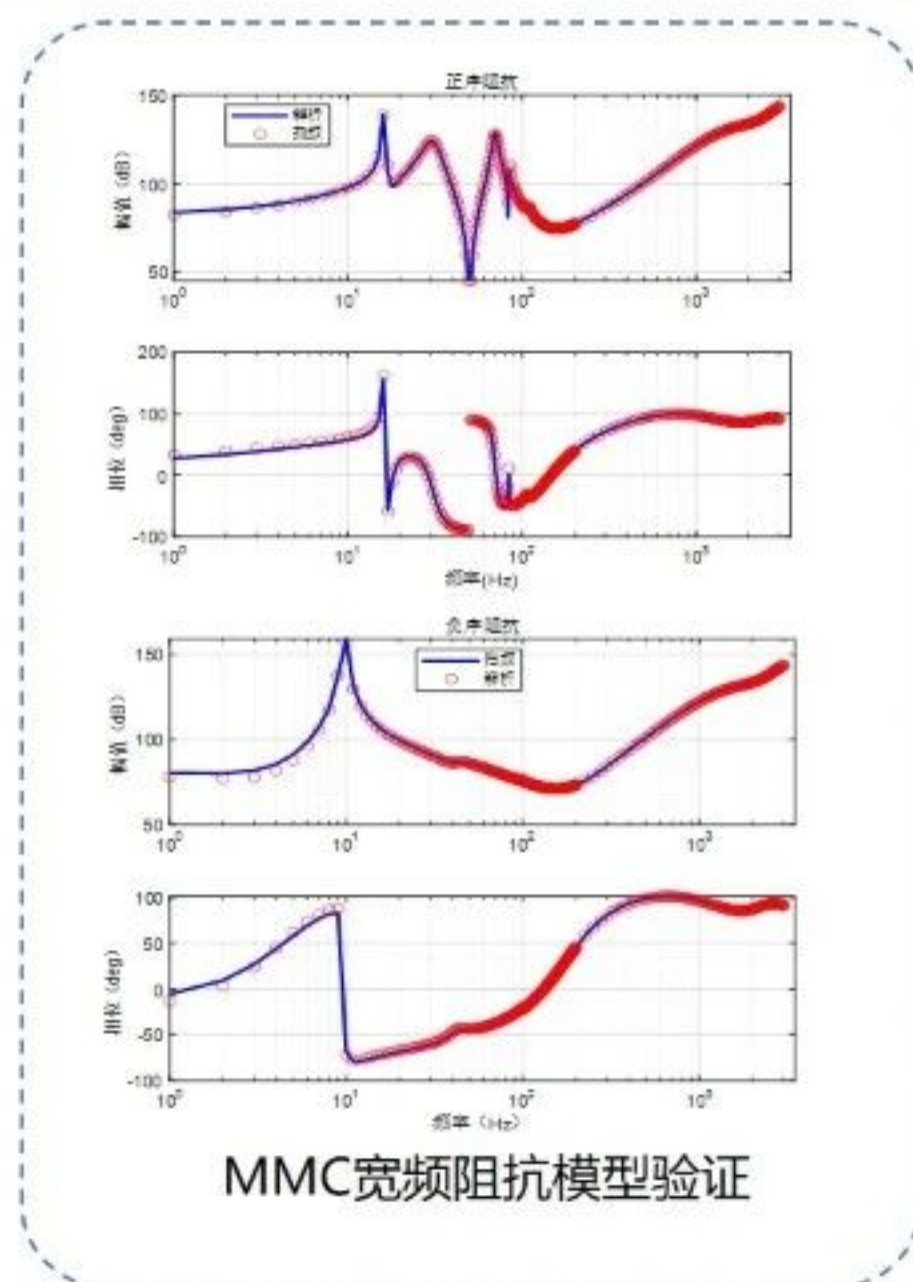
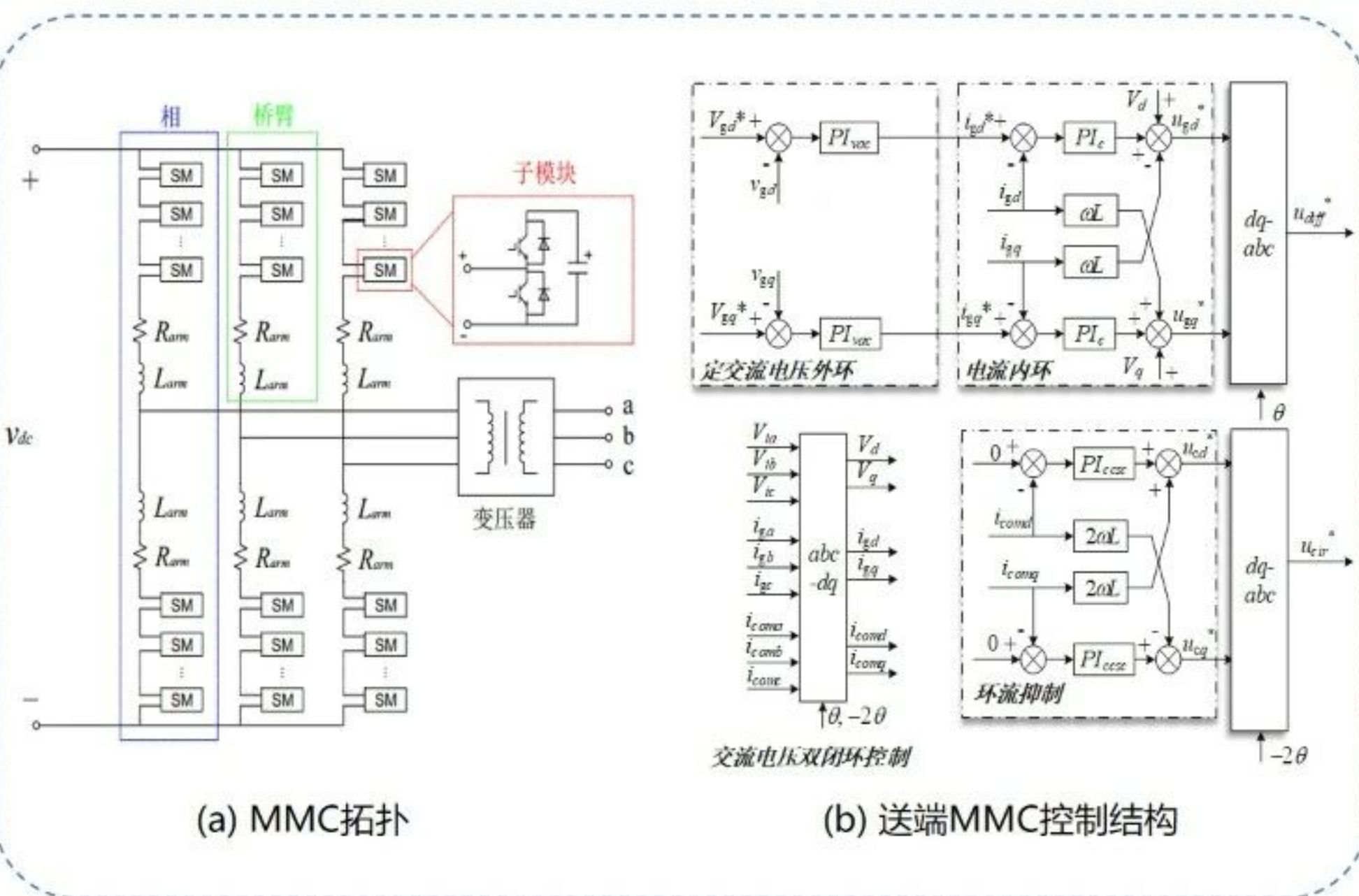


新能源场站阻抗网络聚合建模



宽频振荡自适应抑制-精细化阻抗建模

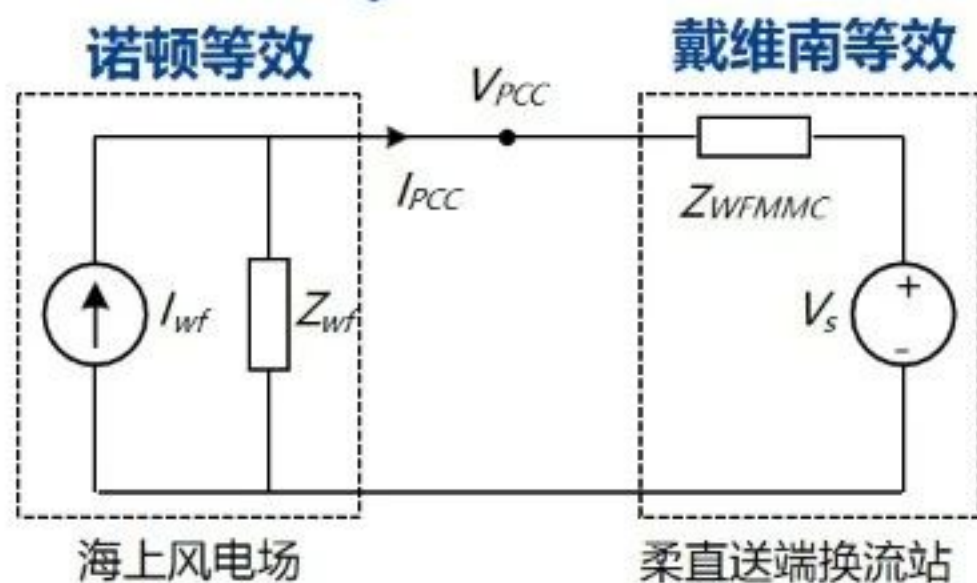
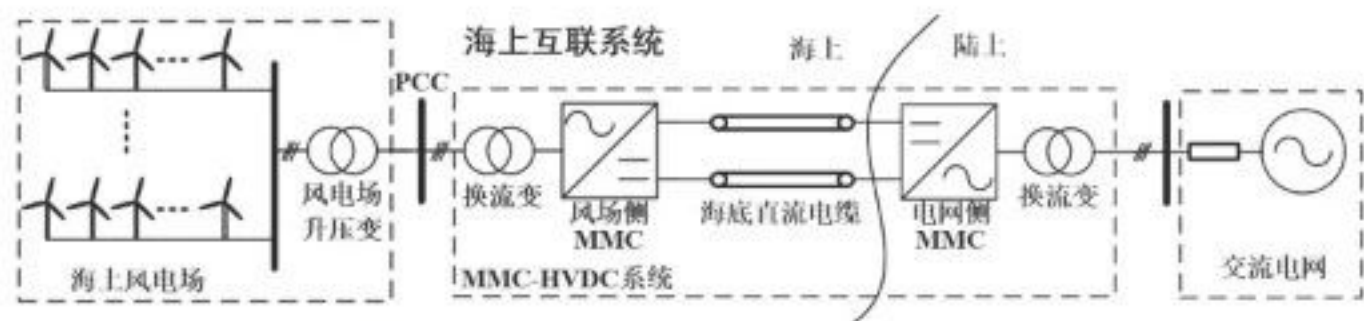
针对MMC换流器多谐波特征，提出基于谐波状态空间(HSS)的柔直MMC动态建模方法，宽频阻抗模型可计及内部谐波动态和所有控制环节



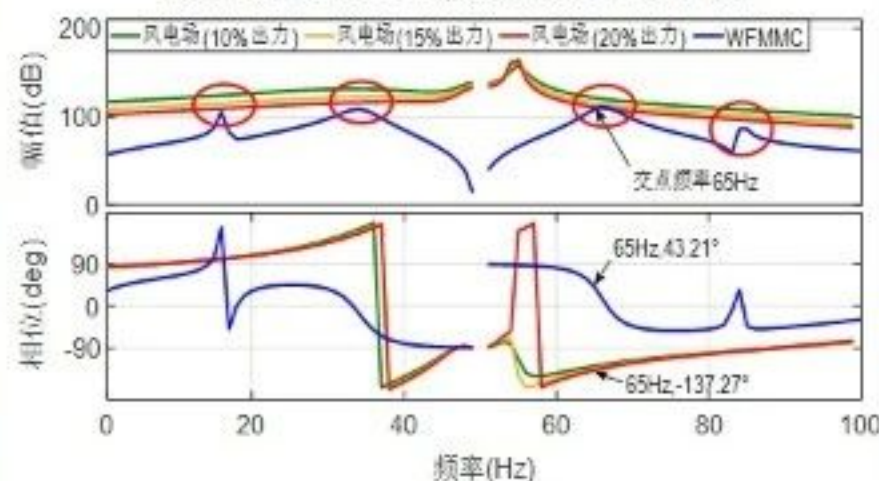


宽频振荡自适应抑制-次/超同步振荡机理

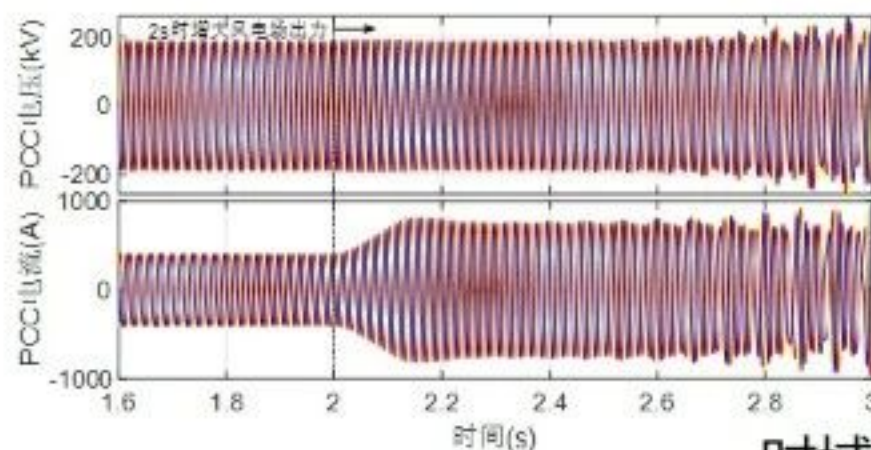
- 次同步振荡机理($< 50\text{Hz}$): 风电场的感性负电阻特性与柔直送端MMC的容性特性相互作用
- 超同步振荡机理($50-100\text{Hz}$): 风电场的容性负电阻特性与柔直送端MMC的感性特性相互作用



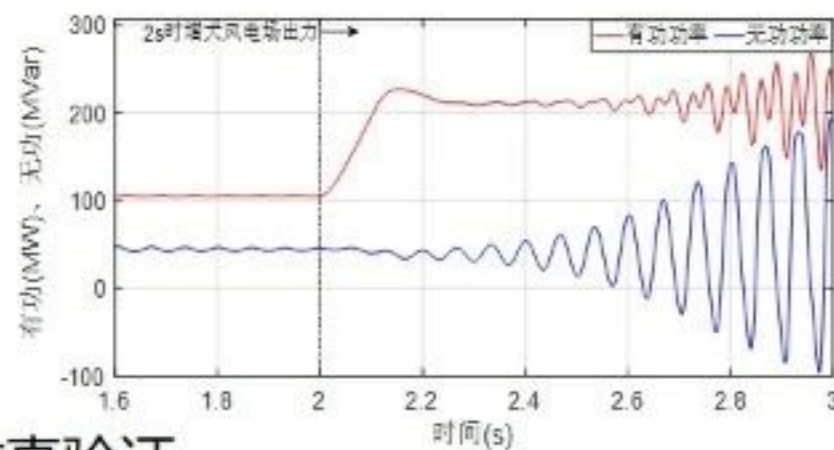
次/超同步振荡机理分析



- 结论
- ◆ 次/超同步频段主导因素:
 - ✓ 风电变流器直流电压外环、锁相环等控制环节引入负阻尼
 - ✓ 柔直海上MMC电流内环和内部动态引入谐振峰



时域仿真验证

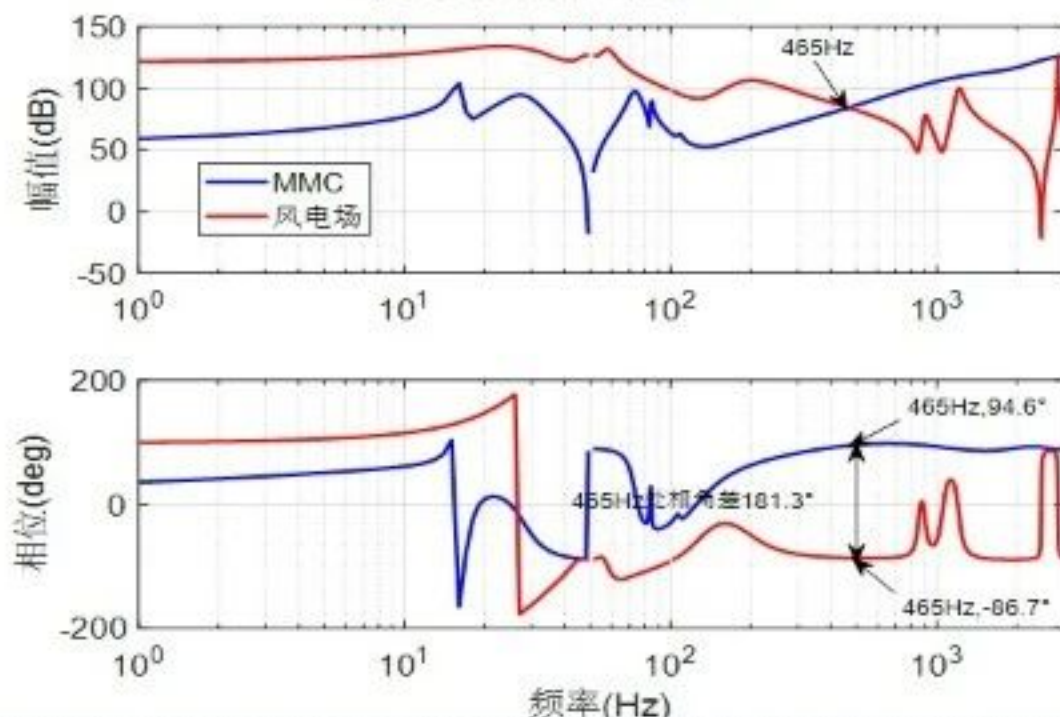




宽频振荡自适应抑制-中/高频振荡机理

□ 中/高频振荡机理($>200\text{Hz}$): 柔直海上MMC的感性负电阻特性与风电场的容性特性相互作用

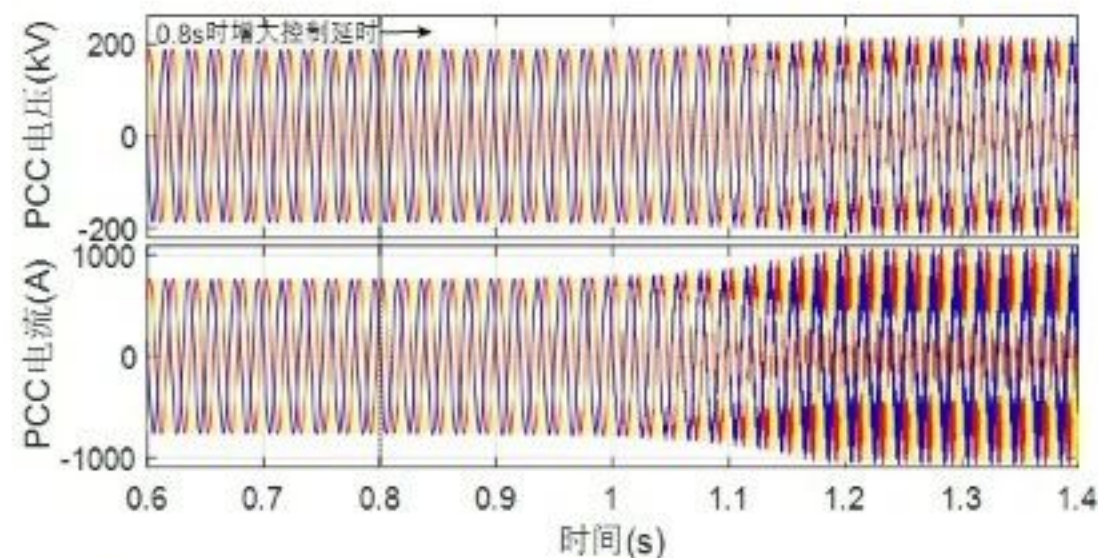
中/高频振荡机理



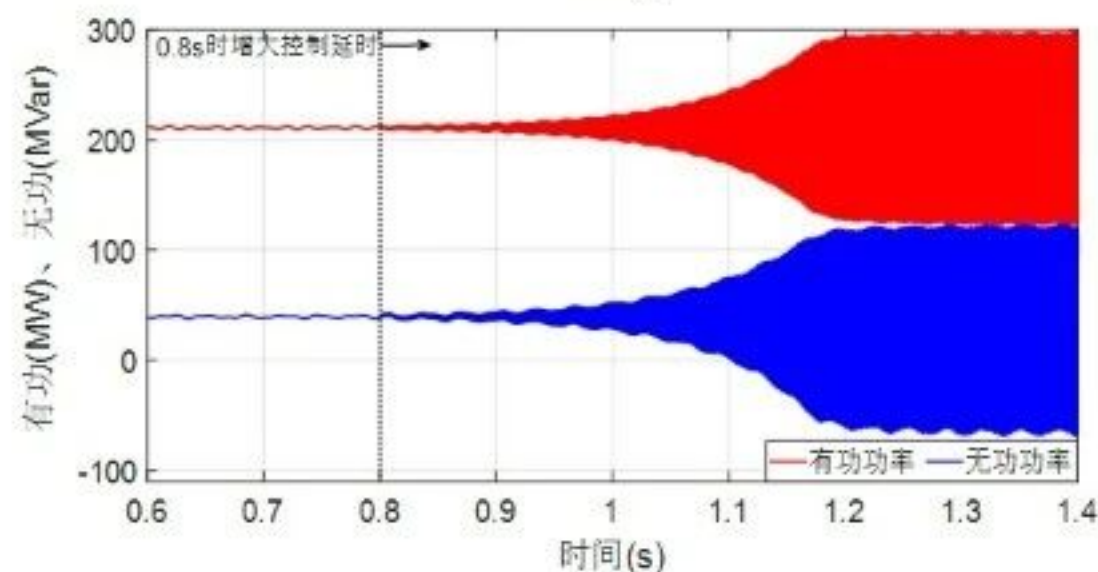
◆ 中/高频段主导因素:

结论

- ✓ MMC内外环控制、电压前馈等环节控制延时引入负阻尼
- ✓ 海上风电场的容性元件 (如: LC滤波器、海底电缆的电容效应等)



电压电流波形



有功无功波形

时域仿真验证

下一步工作: 开展基于多目标优化的新能源机组和柔直换流器的通用主动阻尼控制策略研究及验证, 开发控保产品

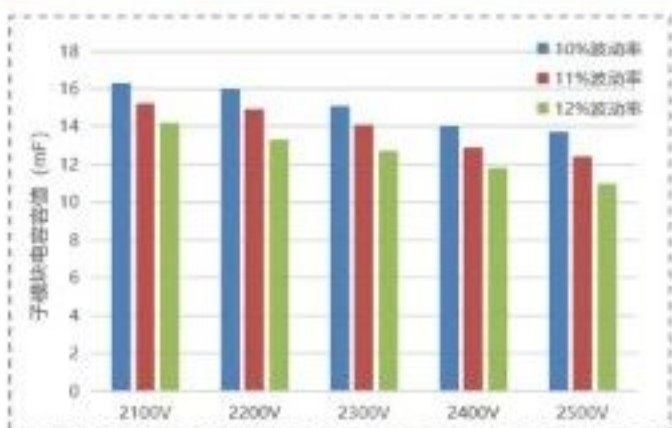


海上高功率密度柔直换流阀关键技术1

针对采用对称双极拓扑的 $\pm 500\text{kV}/3000\text{MW}$ 系统（海上侧采用 66kV 交流系统,陆上侧接入 500kV 交流电网），分别从子模块容值对动态换流特性的影响规律、基于桥臂主动环流注入的电容参数优化设计、低容值下电压波动平抑控制策略开展研究

1、子模块容值对动态换流特性的影响规律

子模块额定电压、传输功率等对电容波动率影响

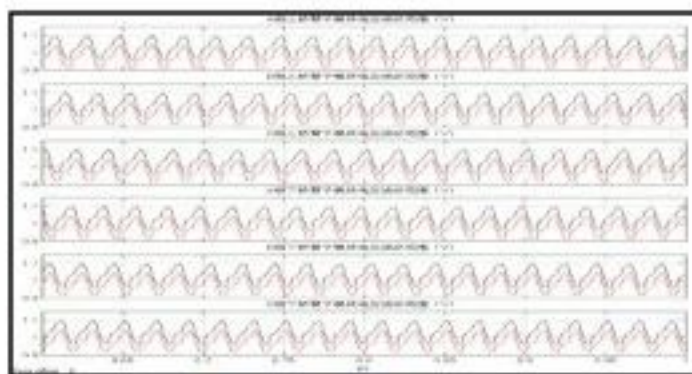


子模块额定电压与电容波动率关系

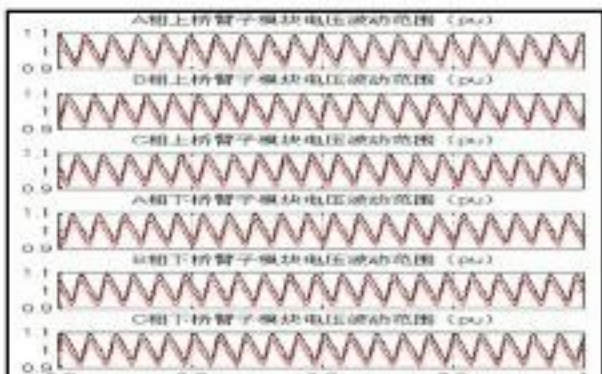
环流抑制、开关频率优化等策略对电容波动率影响

有功功率 (pu)	调制度	功率因数	电容电压波动率
1	0.82	0.98	-9%~+10%
0.75	0.825	0.95	-7%~+8%
0.5	0.84	0.85	-6%~+6%
0.25	0.855	0.58	-5%~+6%
0	0.875	0	-4%~+6%

传输功率与电容波动率关系

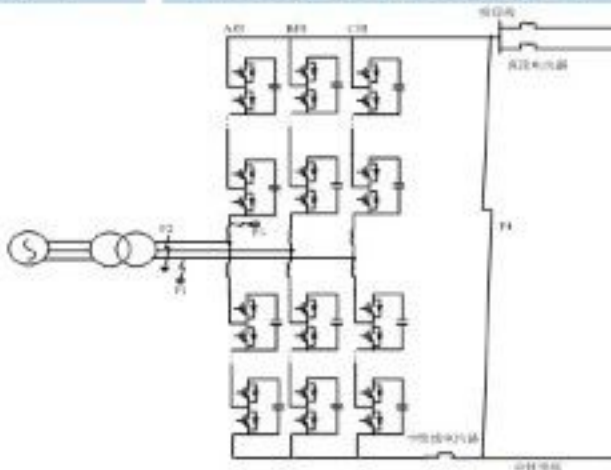


环流抑制使能

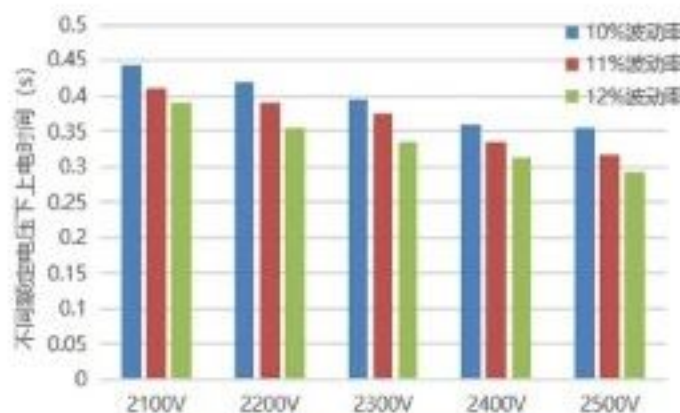
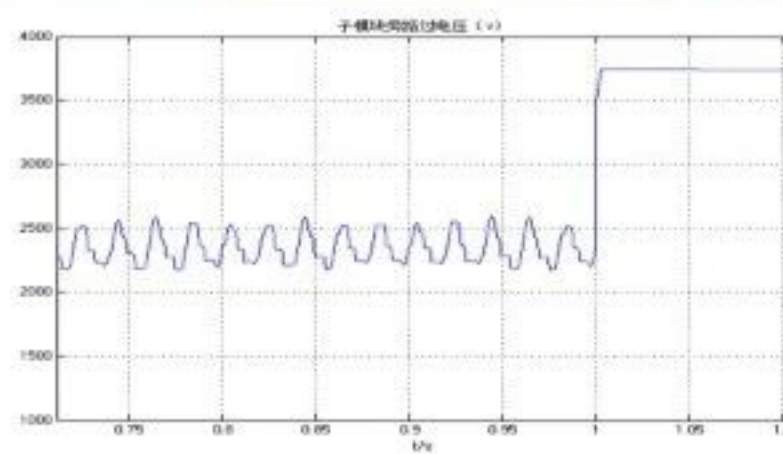


开关频率优化策略使能

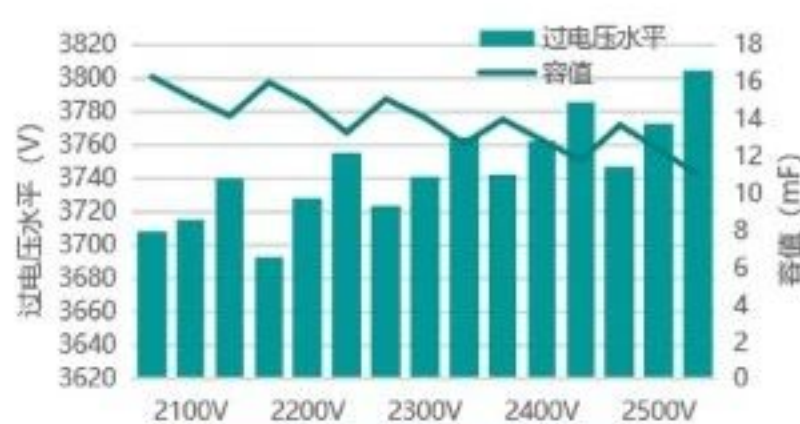
不同容值与子模块额定电压对取能电源上电影响



不同工况对子模块容值需求规律



不同额定电压下启动时间



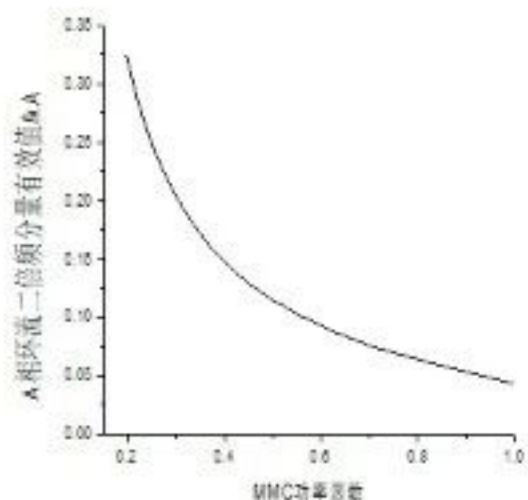
不同容值下子模块旁路过电压



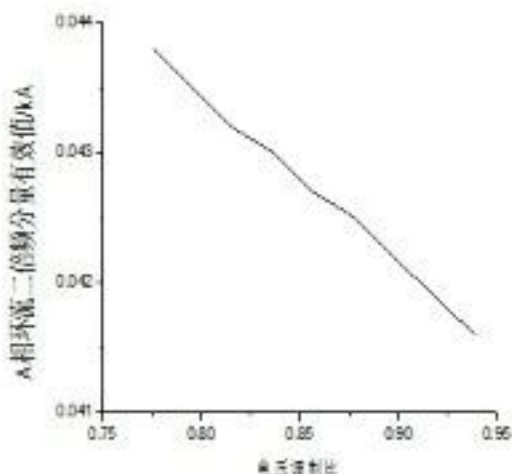
海上高功率密度柔直换流阀关键技术2

2、基于桥臂主动环流注入的电容参数优化设计

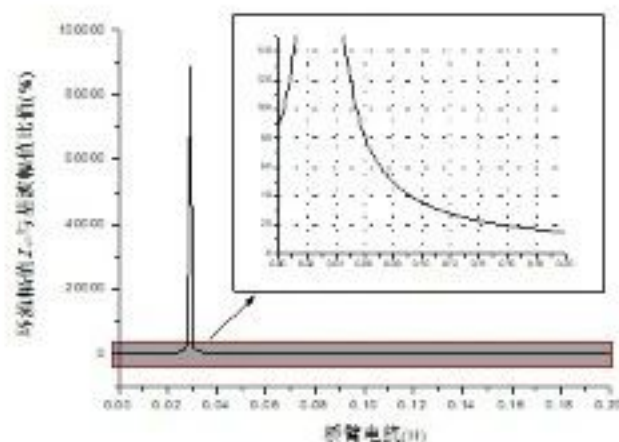
功率因数、电压调制比、桥臂电抗器、环流抑制控制、环流注入控制等对电容波动率的影响



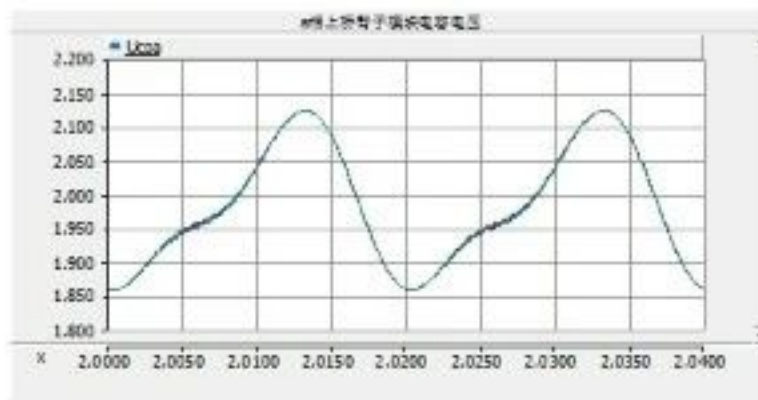
功率因数与环流关系



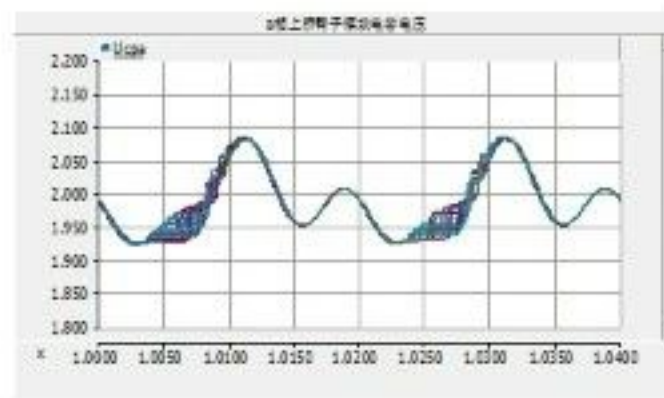
电压调制比与环流关系



桥臂电抗与环流关系



环流抑制控制器



环流注入控制器

功率因数：对电容波动率影响较大，功率因数越大，环流则越小

电压调制比：环流随着电压调制比的增大而减小，对于海上柔直工程，由于采用半桥子模块，电压调制比变化范围小，因而影响较小

桥臂电抗器：在大于谐振点处，较小范围内，相环流二倍频分量将随着桥臂电抗的增大而减小

环流抑制控制：控制目标是桥臂电流有效值最小，降低2.5%的电容波动率，有利于降低换流阀损耗

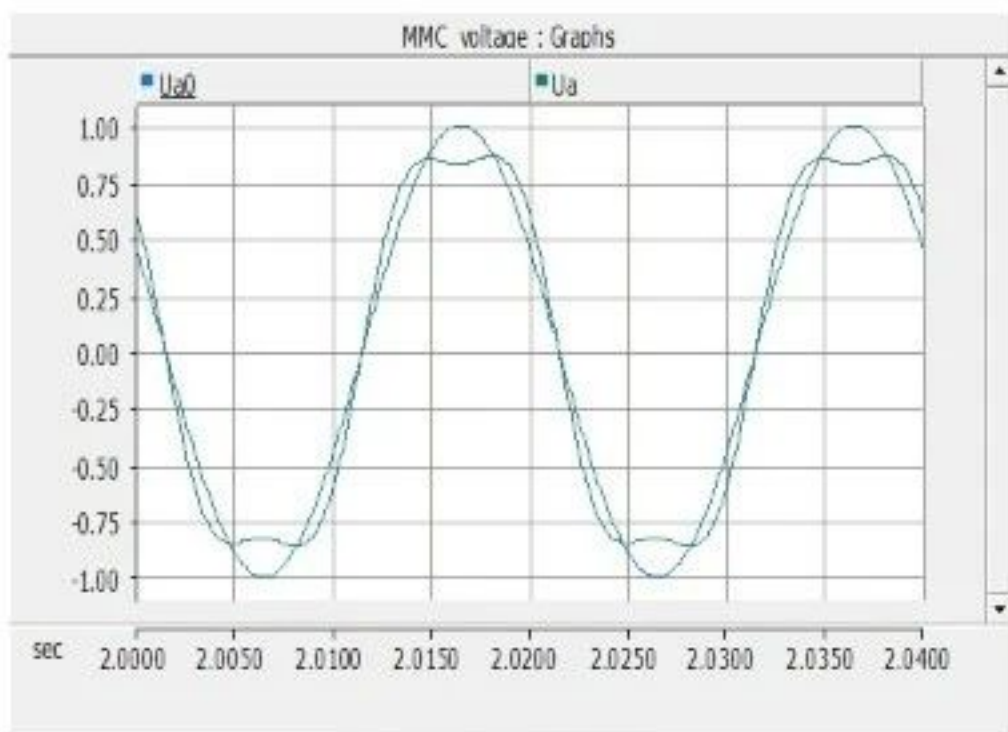
环流注入控制：电容波动率降低5个百分点以上，但桥臂电流有效值会大幅上升



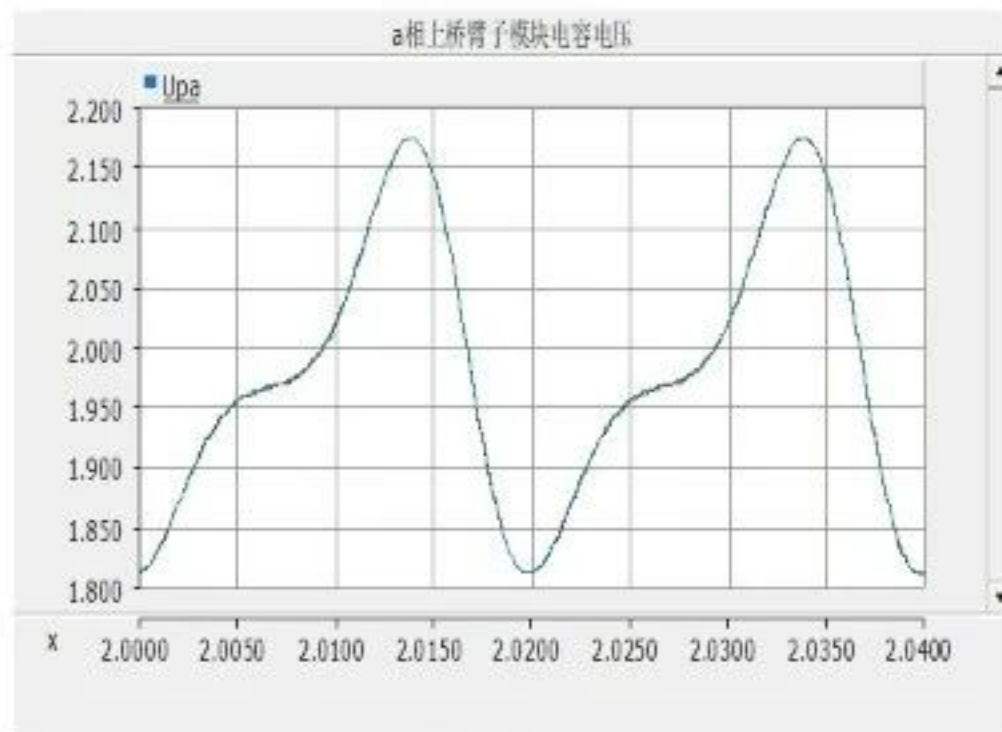
海上高功率密度柔直换流阀关键技术3

3、低容值下电压波动平抑控制策略

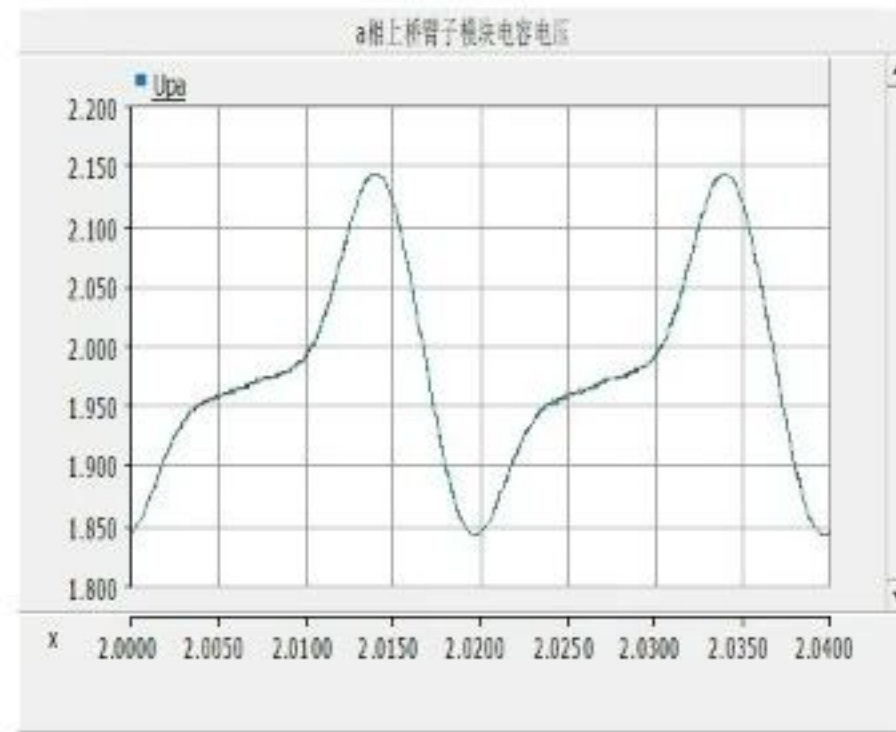
三次谐波注入平抑控制策略对电容波动率影响



阀侧电压波形对比



无三次谐波注入下波形图



三次谐波注入下波形图

□ 桥臂电流有效值和电容电压波动率均有大幅降低，电容电压波动率降低**1.5%**，桥臂电流降低**9%**



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

03 | 核心装备与智能运维

04 | 研究展望



海上风电核心装备

中国电气装备具备全产业链的设计、供货、运维、试验等能力，先后为三峡如东海上风电、华电阳江青洲海上风电、三峡新能源福建长乐海上风电等多个工程提供塔筒变压器、塔筒开关设备、交直流GIS、柔直换流阀、直流耗能装置、柔直变压器、测量装置、避雷器、套管、干式变压器、电力电缆等全套设备





海上风电紧凑型交流GIS

□ 通过高压开关关键技术攻关，研制了海上风电用系列化紧凑型GIS，电压等级涵盖72.5kV、126kV、252kV、363kV、550kV产品，具有**高可靠性、高通流、紧凑型、轻量化、高防腐性**等技术特点。此外，还研制了**风机塔筒用72.5kV紧凑型GIS(SF₆型、环保型)**。部分产品已成功中标三峡阳江青洲五、七海上风电项目



风机塔筒用72.5kV
GIS (SF₆型)



风机塔筒用72.5kV
GIS (环保型)



72.5kV GIS



126kV GIS



252kV GIS



363kV GIS



550kV GIS

海上风电紧凑型系列化交流GIS产品



直流GIS与低频GIS

□ 率先研制了国内首台套 $\pm 210/\pm 350/\pm 550$ 千伏直流GIS，并通过了长期带电考核、适海性C5-H级防腐、海洋9级抗震验证及国家级鉴定，技术水平处于国际领先。72.5kV/252kV低频GIS应用于世界首个高压大容量低频换频站——亭山和中埠换频站。40.5kV低频开关柜应用于国内首个示范站——浙江台州柔性低频输电工程



ZZF1-210(L)型直流GIS



ZZF1-350(L)型直流GIS



ZZF1-550(L)型直流GIS



72.5kV低频GIS



252kV低频GIS



40.5kV低频开关柜

- ◆ 直流GIS技术参数高于国际标准，达到国际领先水平；
- ◆ 72.5/252kV低频GIS通过中国机械工业联合会鉴定，整体技术水平国际领先，取得首台套成果；
- ◆ 国内首家通过20Hz开关柜全套试验的产品；



220千伏亭山-中埠柔性低频输电示范工程



台州40.5千伏柔性低频输电工程



换流阀与耗能装置

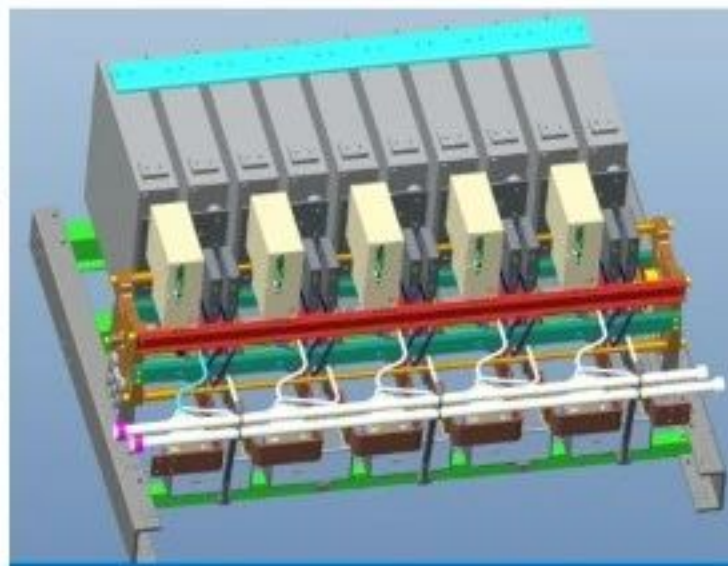
- 具备 $\pm 800\text{kV}/5000\text{MW}$ 及以下全系列柔直换流阀产品的设计、生产、试验能力，是目前国内首家，也是唯一一家具有海上柔直换流阀与直流耗能装置运行业绩的公司。自主研发的海上平台柔直换流阀产品和直流耗能装置成功通过中国机械工业联合会行业鉴定，综合性能指标均居于国际领先水平，并且海上平台柔直换流阀产品入选“2021年度能源领域首台（套）重大技术装备项目”
- 依托国家重点研发计划课题“海上柔性直流高功率密度换流阀关键技术及装置研制”，结合系统设计方案，完成高功率密度换流阀子模块电气设计与阀组件设计。基于工程参数需求，完成换流阀阀塔结构设计，其中阀塔长度方向优于目标值18.8%，重量优于目标值5%



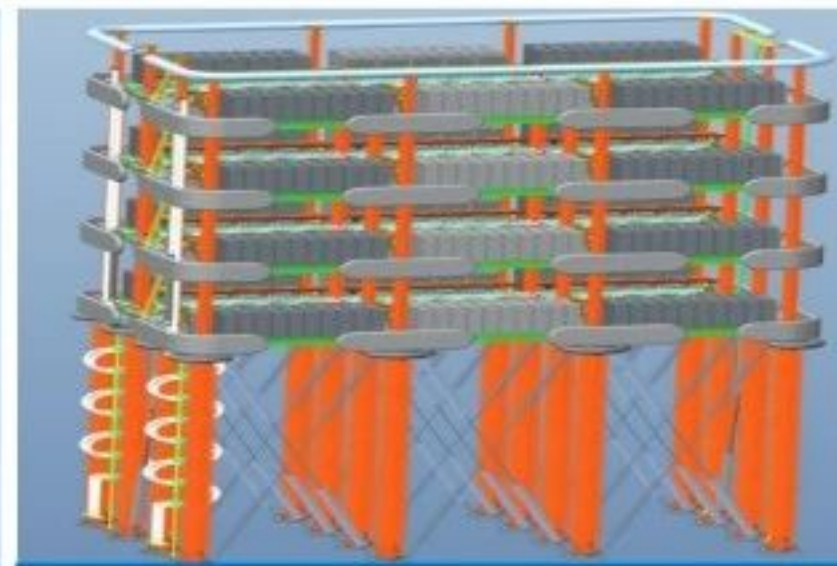
如东工程换流阀



如东工程陆上站耗能阀



阀组件效果图



完整阀塔效果图

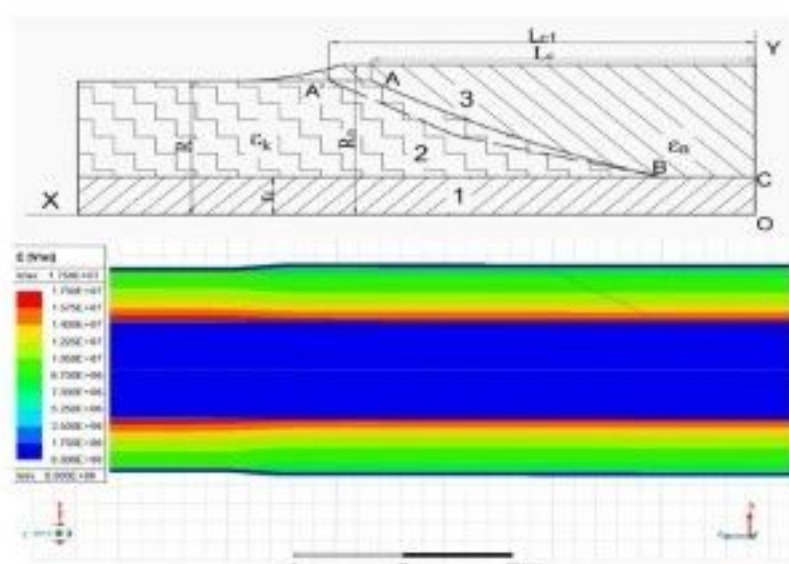


海缆

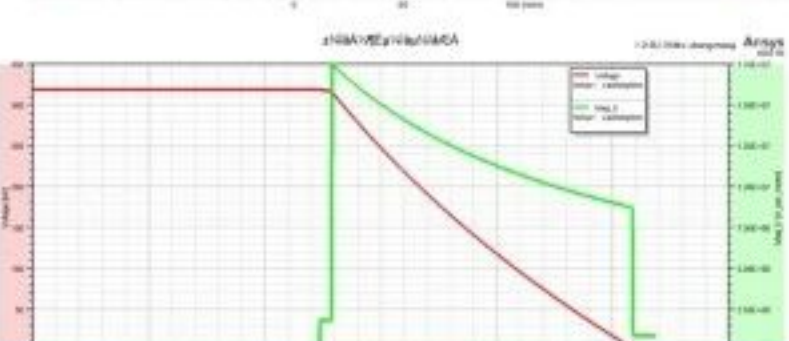
- 中国电气装备新建海缆生产基地(山东泰昇海缆有限公司)位于山东威海，总占地面积400亩，设计产能65亿，总投资30亿元
- 掌握220kV海缆软接头结构设计方法，实现通过仿真分析几何参数、绝缘界面缺陷对电气性能的影响
- 掌握220kV海缆软接头导体焊接、绝缘挤出硫化等关键制备工艺，实现通过仿真对工艺参数的优化设计



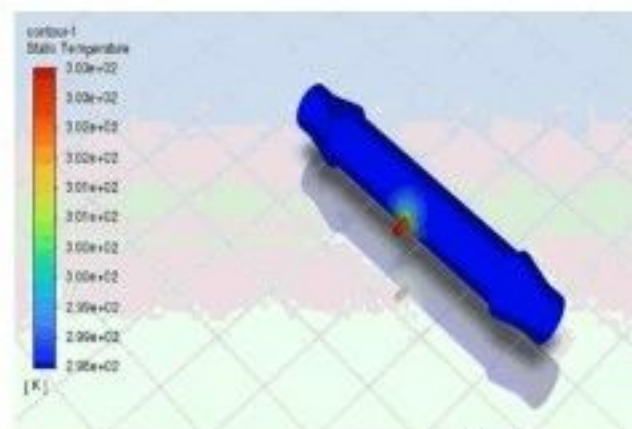
威海海缆生产基地



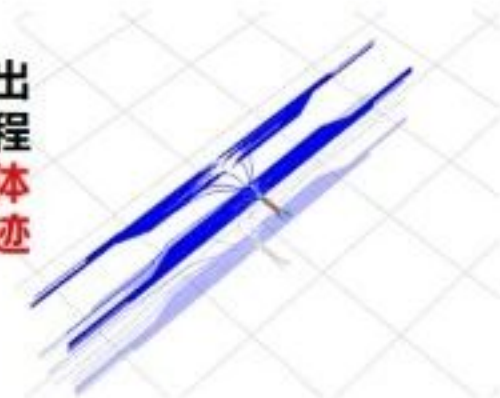
2.5U₀下设计结构电场分布云图与曲线



软接头绝缘挤出过程仿真



挤出过程流体轨迹



硫化过程剖面温度分布

绝缘挤出与硫化回复



海缆软接头相关制备工艺



智能运维

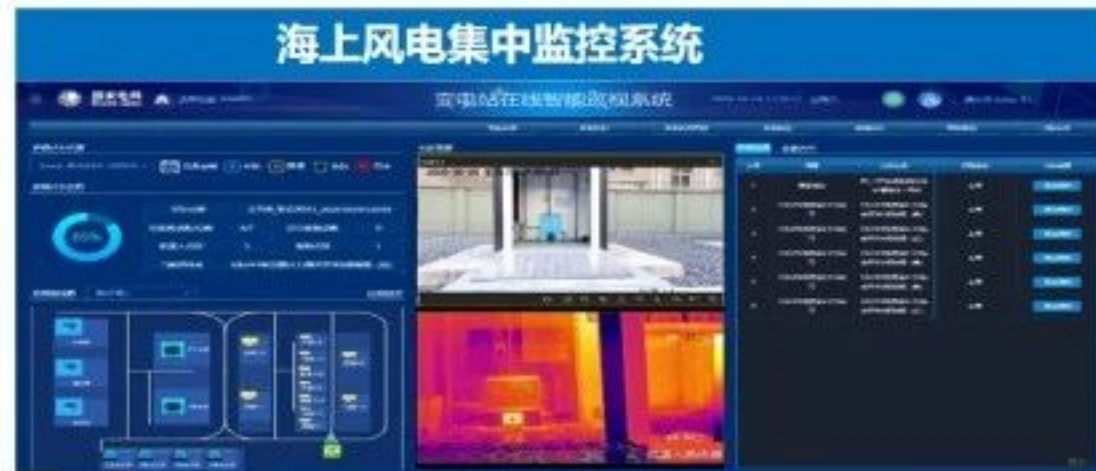
研制了海上风电电气装备物联网传感器、智能运检装备、集中监控系统



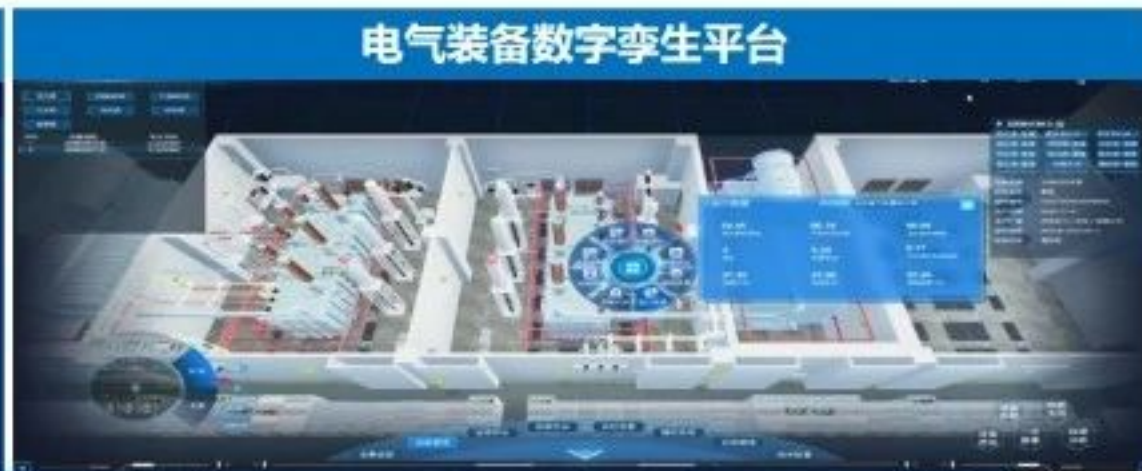
海底电缆巡检机器人

水下机器人 (ROV)

工作水深200米，最高速度5.8节，最大载荷50千克，可搭载**图像声纳、姿态航向参考系统、水下摄像机和TSS350海缆探测系统**等多种设备，能够完成**海缆巡检、路由探测、故障定位**等任务，已在**舟山海域**应用。



海上风电集中监控系统



电气装备数字孪生平台



GIS

气体状态

机械特性

局部放电

隔离开关位置

导体温度、视频



变压器、电抗器

油温、油位

油色谱

微水监测

接地电流

局部放电



中压开关

机械特性

剩余电寿命

局部放电

弧光监测

视频监测



电容器、避雷器

容性设备监测

避雷器监测



电力线缆

电缆测温



整站辅助监控

整站视频监控

SF₆泄漏监测

关键部位红外测温

三维电子图档



发电机断路器

气体状态

机械特性

电寿命

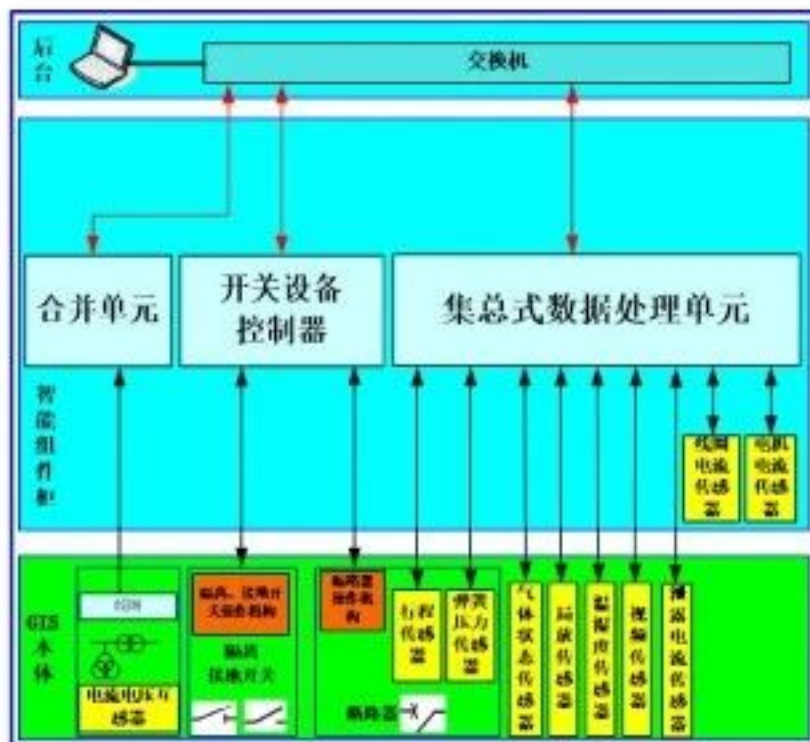
隔离开关位置

导体温度、视频



关键装备：智慧GIS

□ 智慧GIS是在常规GIS基础上集成了状态监测（核心大脑）、智能控制和互感器等三大系统。通过**气体状态、机械状态、绝缘状态、隔离开关触头状态、避雷器状态**等设备运行关键信息的全面监测，满足底层数据采集需求；通过智能传感器设计，实现**局放、机械、气体状态以及位置**等底层数据的就地边缘计算后的实时上送，减少了终端数据处理量，提升系统运行效率



252kV智慧GIS系统架构图



监测系统户外长期带电运行测试



252kV GIS状态全面感知



关键装备：智慧GIS

GIS数字孪生系统可实现**设备全生命周期数字化管理**，依托现场数据采集与数字孪生体分析，提供**产品故障分析、寿命预测、远程管理**等增值服务，提升用户体验，降低运维成本

应用层

距离准确掌握设备状态、实现预测预警、精准刻画故障发展过程、预测设备寿命的目标存在较大差距，**运维智能化水平低，劳动强度大。**

模型层

尚未实现**数字和物理模型融合**，监盘显示不直观，缺乏有效的设备状态监测、评估模型、故障诊断模型以及相关业务模型等。

数据层

未能实现**开关设备全状态感知**；数据存储的类型和格式各异，而且**数据无法共享**，难以综合各类监测数据对设备运行状态进行综合评价和诊断预警。

数字孪生设备

全景视频监控

多维信息呈现

设备状态分析

设备故障诊断

运检业务管理

设备资产管理

知识技能培训

传统电站
存在问题





关键装备：数字化换流阀

□ 以换流阀智能运维为目标，梳理实际业务需求，依托实际工程积累的运行数据，综合**知识图谱、机器学习和深度学习**等技术构建数据处理模型，对换流阀运行状态综合分析，实现换流阀“可观、可测、可控”，保障设备可靠和作业人员安全

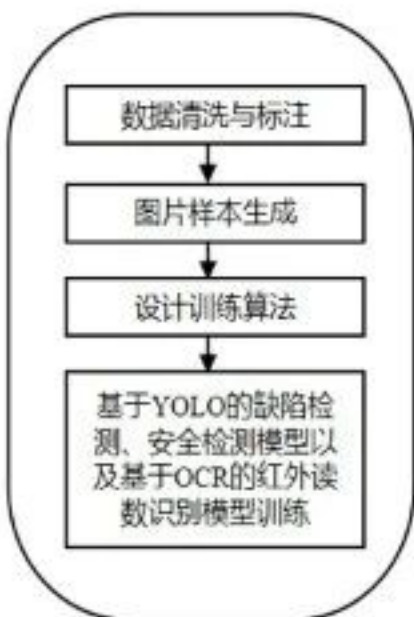
难点

- 如何进行传感量测单元最优化部署？
- 有限测量的多源数据多元特征感知？
- 数据-模型如何混合驱动？

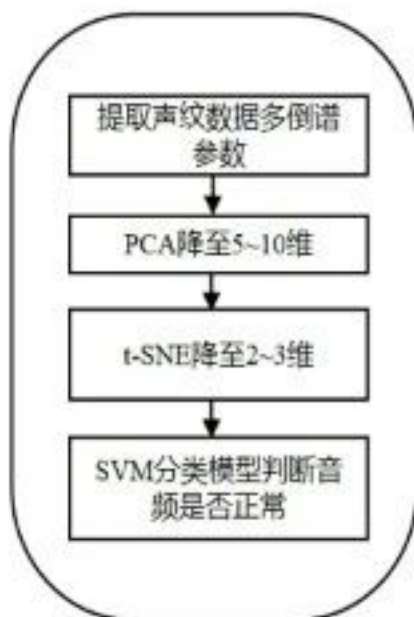
关键技术攻关

- 研究海上换流阀全景感知量测单元融合与最优部署方法
- 研究海上换流阀多源数据治理技术
- 研究海上换流阀全景感知、故障诊断、主动预警技术

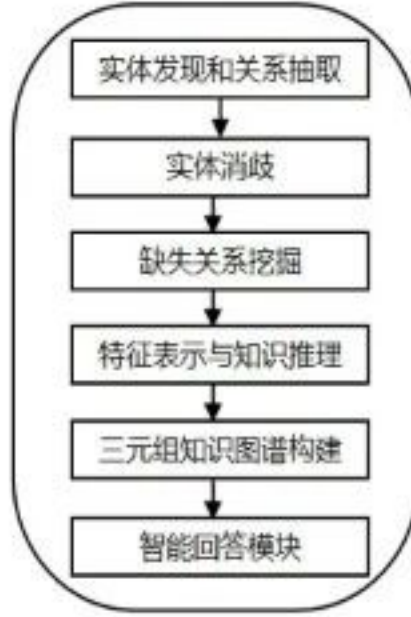
图像识别/视频分析



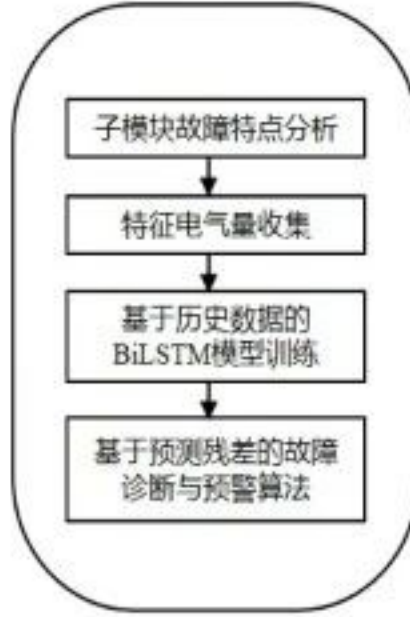
声纹识别



虚拟AI监控助手



故障诊断与主动预警



四类人工智能服务组件构建

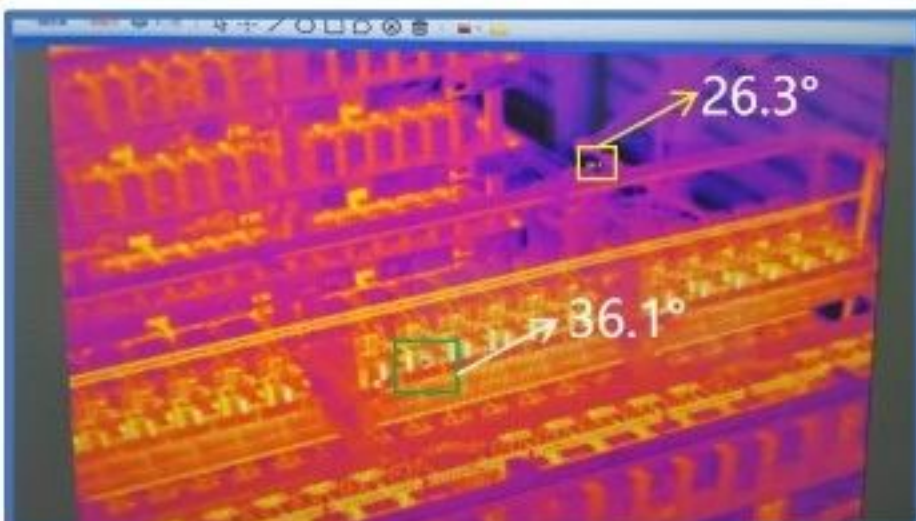


数字化换流阀---图像识别/视频分析组件(1)

基于人工智能图像识别技术，针对海上风电阀厅的**违章作业行为、水冷系统漏水、阀塔红外读数**等进行智能检测，研发柔直阀智能感知分析系统，实现设备状态可知、人员作业行为可观



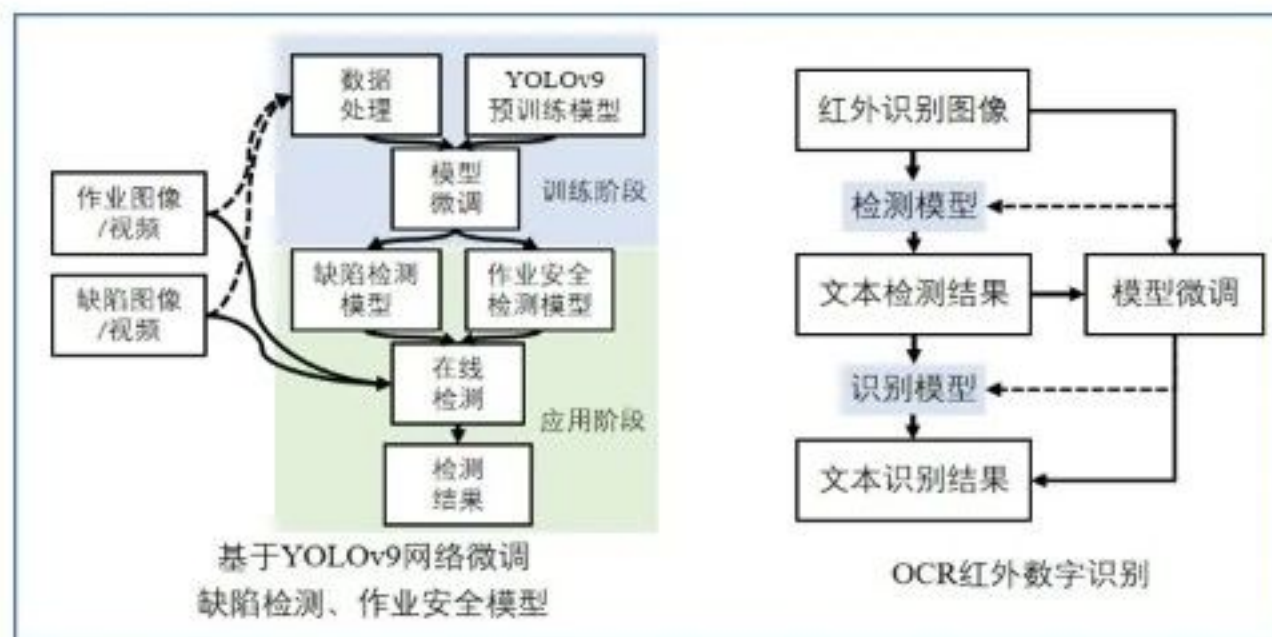
阀厅设备-人员-环境自动检测（安全帽+安全带+阀塔污秽+漏水...）



阀塔红外图像自动读数



柔直换流阀智能感知分析系统



关键技术

- 基于保护裁剪、MixUp等技术扩增数据集，对于缺陷数据使用GAN、Diffusion等进行样本扩充
- 利用预训练YOLOv9模型在安全作业数据集和缺陷检测数据集上分别训练检测模型，调节学习率、损失函数、优化策略等调优
- 双阶段OCR算法进行红外识别。第一阶段，训练EAST、DB等文本检测网络定位数字的位置，第二阶段，利用基于CTC或者基于注意力的网络实现将数字序列转换成文本

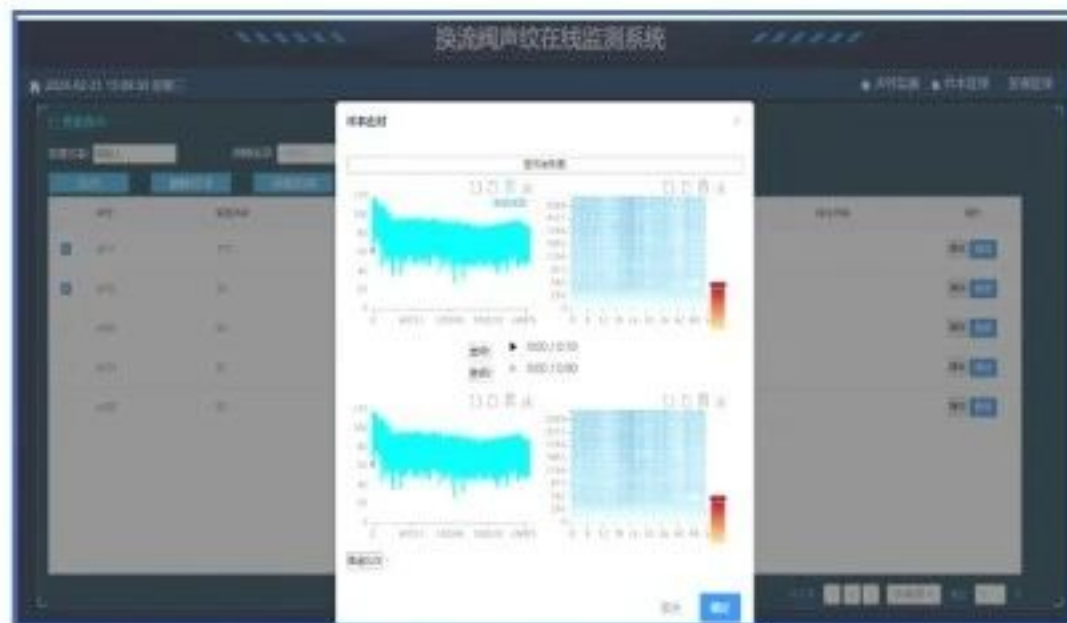


数字化换流阀---声纹识别组件(2)

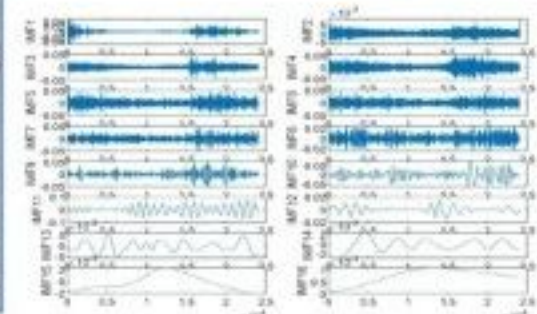
□ 搭建实际带电试验环境，加装声音传感器，针对采集的声音信号，采用**CEEMDAN-小波阈值联合去噪方法**以及**Mel-MobileNetV2网络**进行换流阀异响声纹特征提取，准确率 $\geq 95\%$



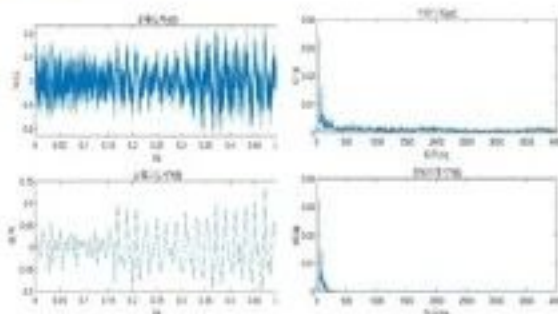
声音数据采集 (过压击穿、旁路断路器开合等)



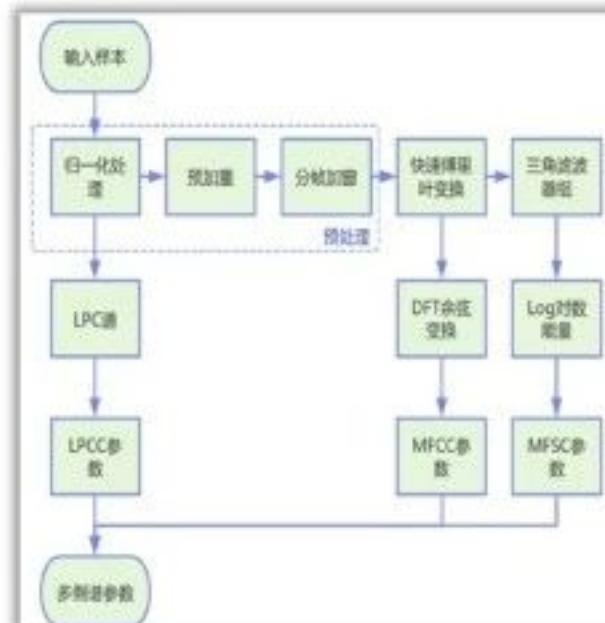
换流阀声纹在线监测系统



短路重合闸声信号CEEMDAN分解



声信号去噪前后时域与频谱图



换流阀声纹多倒谱参数提取



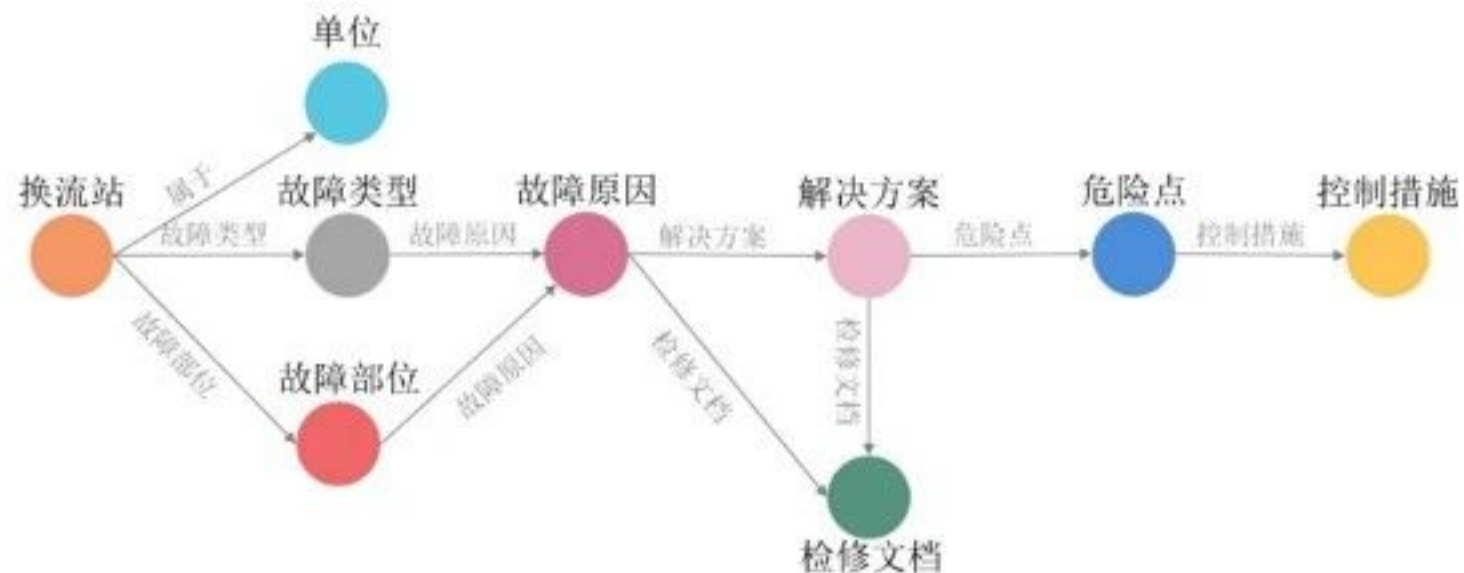
换流阀声纹异常诊断流程

关键技术

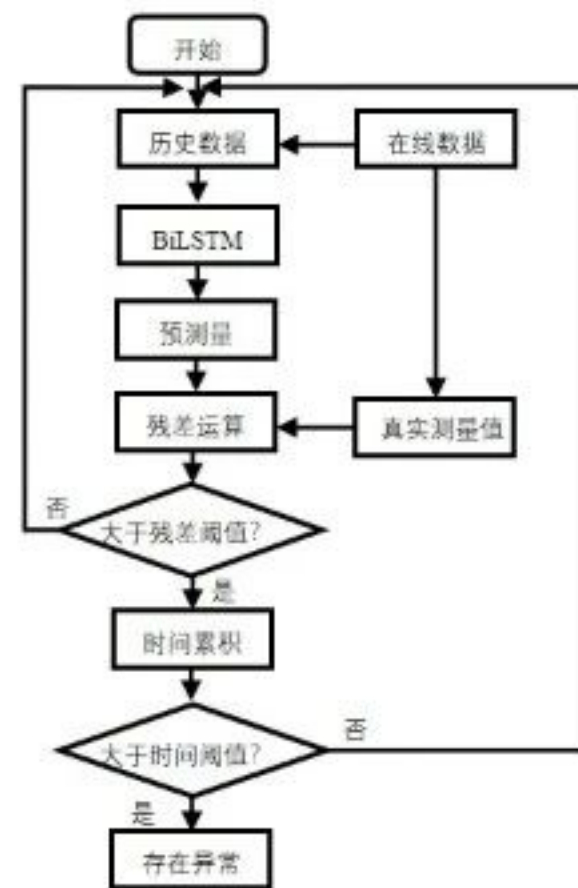
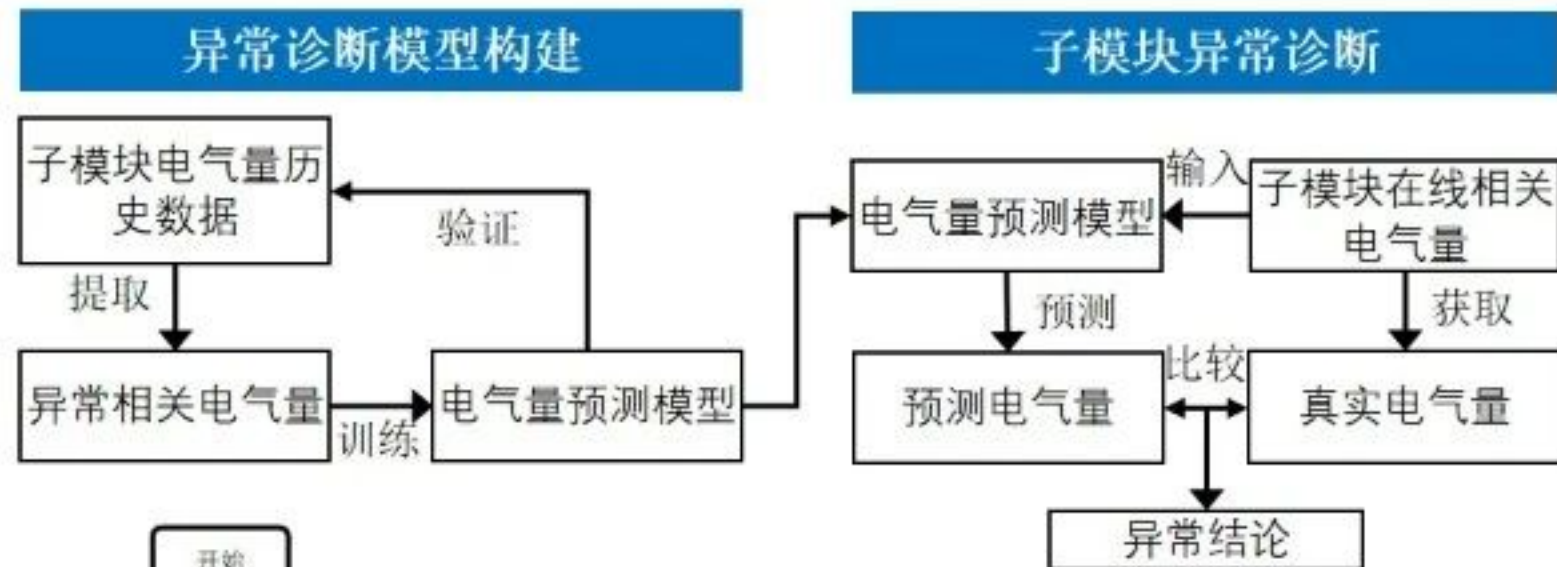
- 结合PCA算法的去噪、降维能力和t-SNE算法的降维，提取特征进行聚类分析，解决样本掺杂噪声和异常样本不足问题
- 基于CEEMDAN-小波阈值联合去噪方法，实现短路重合闸故障声音去噪
- 基于Mel-MobileNetV2网络识别阀异响声纹信号



数字化换流阀---虚拟AI助手组件(3)



数字化换流阀---故障诊断与主动预警组件(4)



基于预测残差的故障预测方法

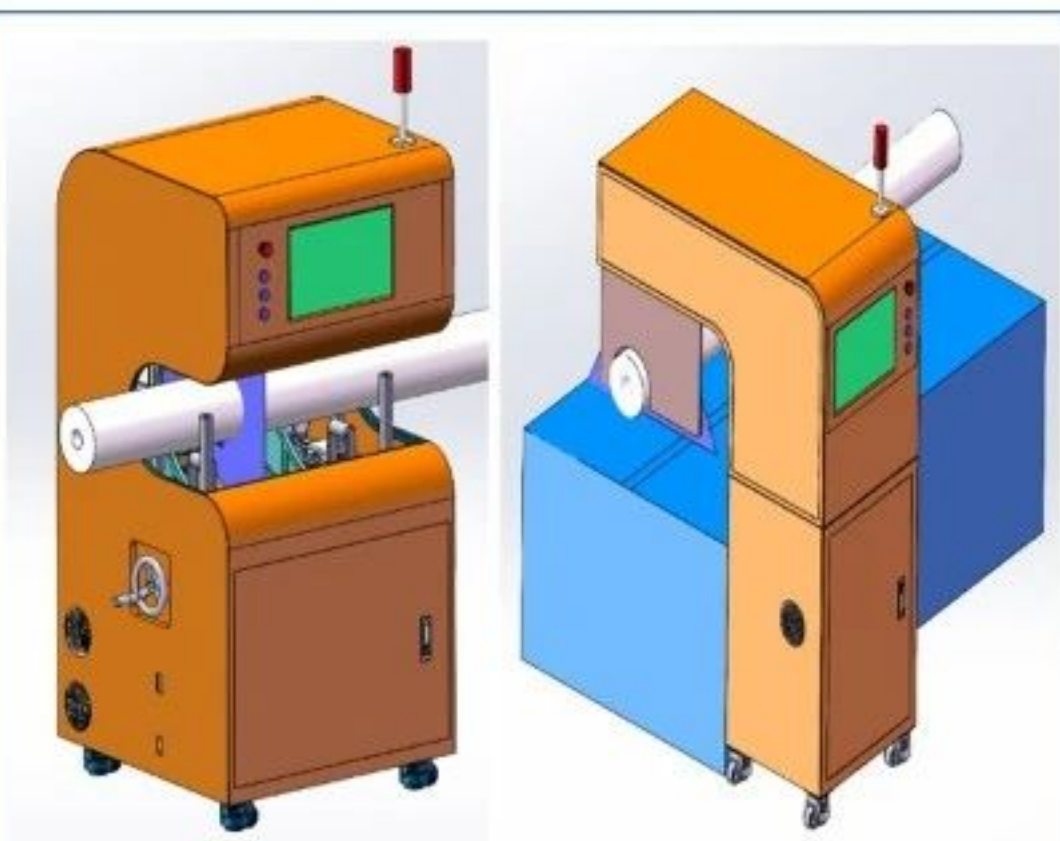
关键技术

- 归纳得到7种子模块故障，设计迭代查询故障诊断算法实现子模块IGBT及反并联二极管的批量化故障判断和定位
- 提出基于残差分析的换流阀模块异常检测方法，基于收集到的正常电气量结合双向长短期记忆网络对残差进行预估，如真实残差大于预估则判定异常



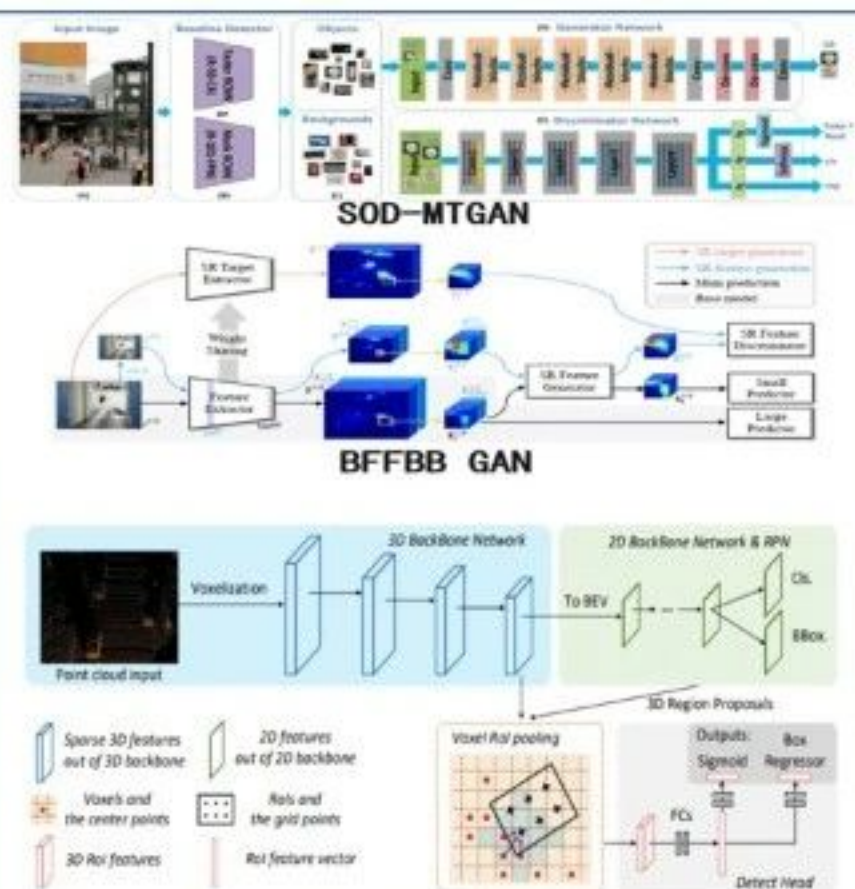
海缆---生产过程智能质检

□ 研发海缆生产过程的机器视觉检测系统，实现产品关键环节质检100%全覆盖，**用AI替代人工质检**，大幅度降低质检人员运营成本，有效提高质检效率

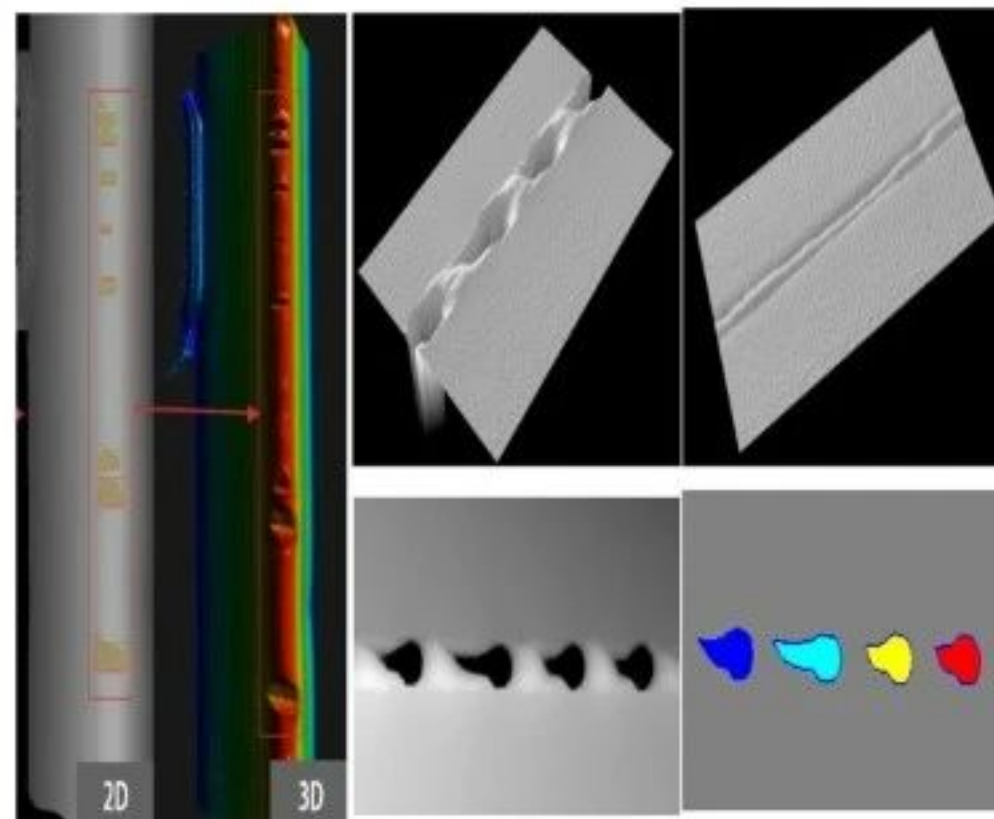


海缆360度表面质检仪

海缆铝护套焊缝质检仪



小样本二维/三维数据融合检测算法



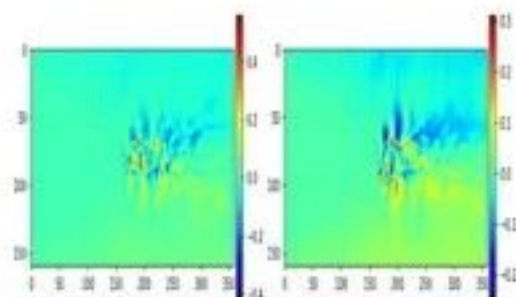
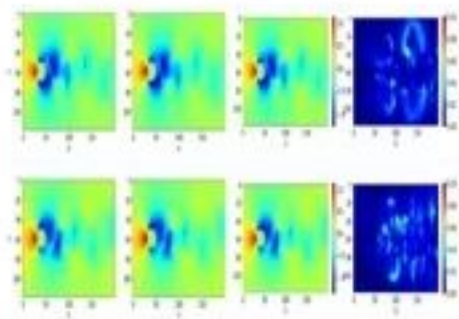
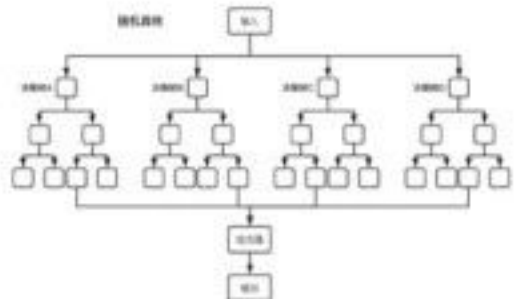
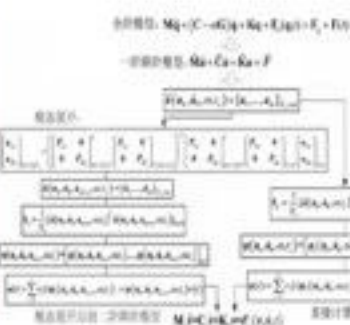
海缆表面缺陷识别效果

技术攻关：针对海缆生产过程缺陷种类多、样本少、目标小等问题以及检测实时性要求，攻关小样本迁移学习技术、高保真缺陷样本自动增广等技术

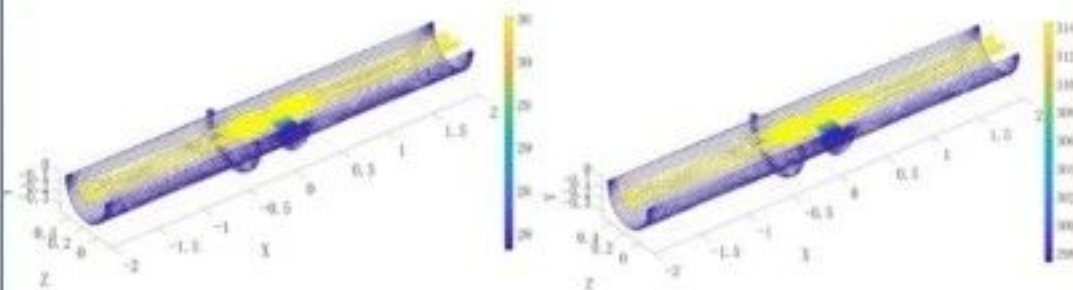


面向数字孪生应用的装备轻量化降阶技术

- 针对输变电装备结构复杂、仿真模型计算量大且实时性差等问题，研发了高精度多物理场仿真模型的降阶技术，开发了标准的通用高阶仿真模型降阶工具或软件，大幅降低模型降阶的技术门槛，实现**电力设备多物理场仿真秒级或分钟级快速计算**。目前在**高压GIS开关、换流阀**等设备的智能运维上进行应用验证



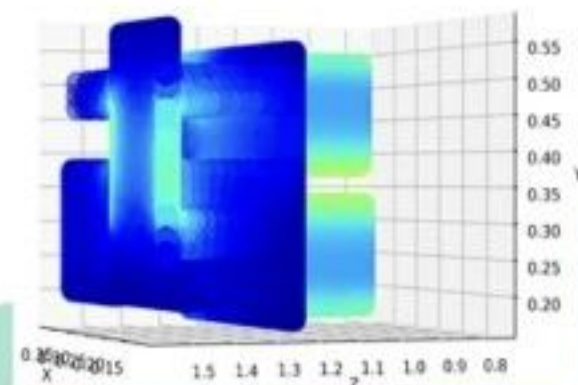
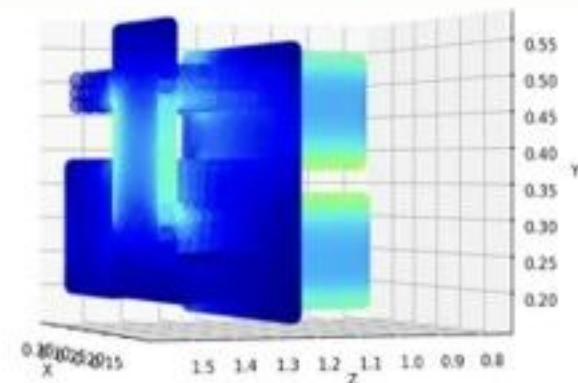
上：基于POD及其改进算法、随机森林算法
下：基于自编码器、卷积自编码器的CAE降阶模型



真实值（左）及预测结果（右）点云图对比

样本序号	输入参数			相对误差	预测时间 (s)
	电流(A)	环境温度(K)	充气压力(Pa)		
4	4000	273.15	550000	0.059	0.123
6	6000	273.15	550000	0.034	0.120
16	4000	313.15	550000	0.069	0.118
23	5000	273.15	600000	0.049	0.111

不同参数下预测误差及预测相对误差所需时间



磁场强度原始物理场（上）
降阶后重构物理（下）



中国电气装备
China Electrical Equipment

中国电气装备集团科学技术研究院有限公司
China Electric Equipment Research Institute of Science and Technology Co., Ltd



目录

01 | 海上风电发展背景

02 | 柔直送出关键技术

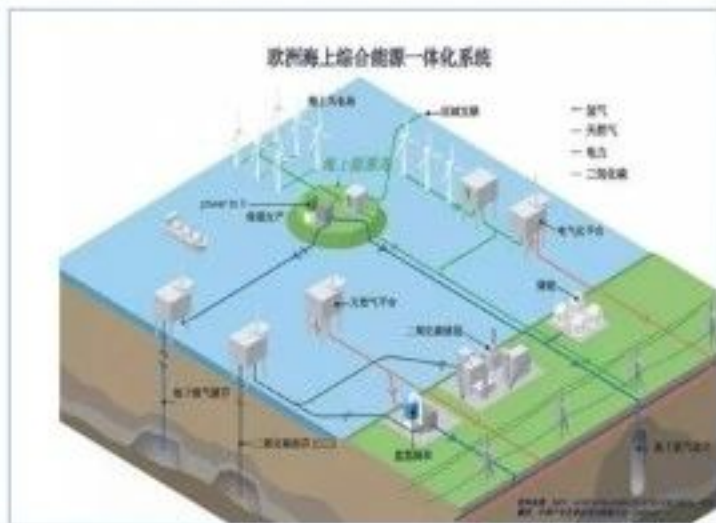
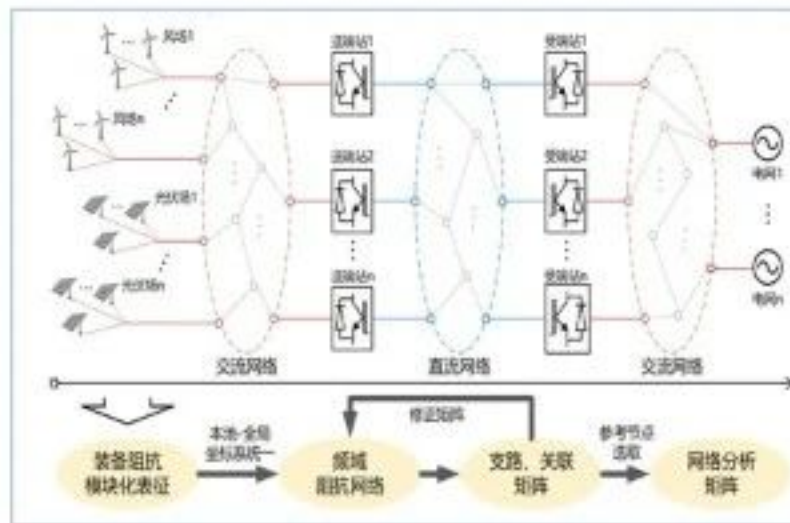
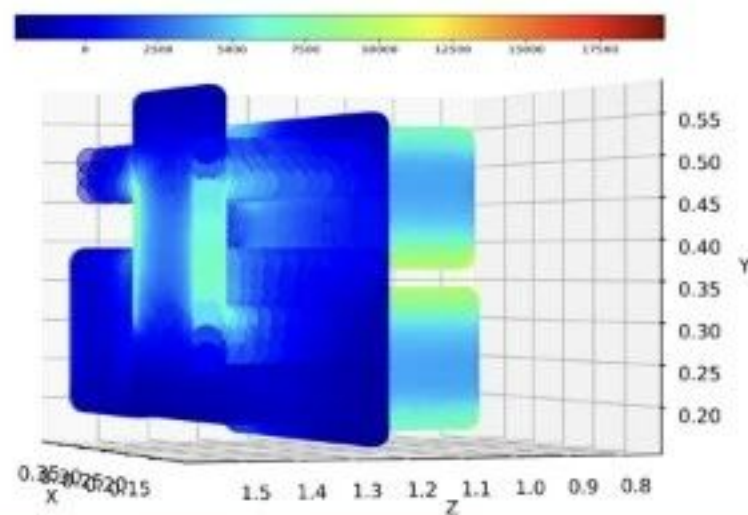
03 | 核心装备与智能运维

04 | 研究展望



研究展望（共性、前瞻、基础技术）

- 通过优化绝缘水平、设备参数、采用**模块动态冗余策略**等进一步提升海上换流站轻型化紧凑化设计水平，通过**柔直多端组网、源网协同**等技术提升海风柔直送出系统可靠性与稳定性
- **宽频振荡在线评估技术**：基于人工智能大数据-知识融合驱动的振荡风险在线评估及振荡定位等
- 深化应用**人工智能、大数据、数字孪生**等技术，实现关键装备缺陷至故障状态特征提取、故障诊断与主动预警等功能，进一步提升海上风电核心装备数字化、智能化水平



- 深化深远海风电柔直送出关键技术研究和核心装备研制，充分利用数字化技术，实现装备运行状态全面感知、认知！

**敬请各位专家批评指正！
谢谢！**

