

附件 1

东方电气集团-浙江大学联合创新研究院

第三批（2025 年度）科技项目榜单



东方电气集团-浙江大学联合创新研究院

Dongfang Electric Corporation-Zhejiang University
Joint Innovation Research Institute

东方电气集团-浙江大学联合创新研究院

目录

课题 1 大型风电塔筒预应力监测与结构安全预警关键技术和应用.....	1
课题 2 基于 WAAM 打印技术的海上风电流线型节点性能与设计.....	3
课题 3 基于降阶模型的复杂装备耦合系统快速分析技术及其在风电机组设计中的应用.....	6
课题 4 绿色甲醇动力船舶关键技术研究.....	9
课题 5 甲醇燃气轮机宽负荷高效低污染燃烧技术研究.....	12
课题 6 零碳园区多维度碳排放核算与优化建设研究.....	14
课题 7 水电站过流水体泥沙在线监测关键技术及装备研究.....	16
课题 8 特种有机硅低表面能静态海洋防污涂层材料的关键技术开发.....	18
课题 9 锅炉用复杂管路高质量高可靠智能弯曲成形技术及应用.....	21
课题 10 宽范围掺氢低排放燃烧室设计及验证研究.....	24
课题 11 高效大容量风机叶片专用环氧树脂技术.....	26
课题 12 耦合大规模低成本固体储热系统的灵活调峰煤电关键技术研究.....	29

课题 1：大型风电塔筒预应力监测与结构安全预警关键技术和应用

一、研究背景

随着全球能源转型的深入推进，大型风力发电设施逐渐成为新能源开发的核心技术之一。风电塔筒作为支撑风力发电机组的重要结构，其安全性和稳定性直接关系到整个风电系统的运行效率和安全性。风塔预应力在风电领域发挥着重要作用，它不仅增强了风塔的结构稳定性，还延长了设备的使用寿命，并提高了在各种环境下的承载能力。实现风电塔筒预应力监测对结构安全评估和预警至关重要。实时监测预应力变化有助于发现潜在问题并及时采取修复措施，避免结构失效风险，确保塔筒长期稳定运行。通过精准监测与科学评估，优化塔筒的维护周期和策略，减小预应力衰减对塔筒的累积损伤影响，延长结构使用寿命。

然而，现有的应变监测法，只能监测相对应力，无法实现绝对应力监测；振动频率法受到边界条件、阻尼装置、转向块、钢绞线的长度和弯曲刚度等的影响，误差较大。浙江大学建工学院段元锋教授团队首次提出的电磁弹式绝对应力传感器，有望解决这一难题。基于铁磁材料的磁弹效应，建立了一套电磁弹式绝对应力监测系统，并成功地开展了实验室小型构件实验、实验室足尺拉索实验、索厂实索标定实验、安装现场校核实验。基于上述研究成果，电磁弹式绝对应力传感器被证明是非常有潜力的钢结构绝对应力监测技术，具有与被测构

件无机械接触、耐腐蚀、结构简单、不需要了解结构的受力历史便能实现对高精度绝对应力监测等优点。作为一种新型监测设备，电磁弹式绝对应力传感器已在桥梁预应力监测中展现出较好的精度和稳定性，但针对风电塔筒预应力的研发和应用仍处于起步阶段。其潜力在于复杂环境适应性和长期的耐久性，并具备更高的监测独立性和可靠性，为大型风电塔筒的预应力监测提供了新思路。

二、研究内容

1. 针对**新建**大型风电体外预应力混凝土塔筒预应力筋绝对应力监测，设计与优化**套筒式**电磁弹传感器；
2. 开发出完整的预应力监测系统，实现数据采集、传输、分析及索力预警功能，并在实验环境中进行验证；
3. 开展工程应用示范研究，在实际工程场景中进行验证。

三、研究目标

1. **新建**风电体外预应力混凝土塔筒预应力筋绝对应力监测**套筒式**电磁弹传感器及其监测系统，监测精度>98%，传感器耐久性>15年，监测系统软硬件可更换；
2. 应用于典型风电示范项目。

研发周期：24个月

需求单位联系人：东方风电 孙仲泽 18783857072

课题 2：基于 WAAM 打印技术的风电流线型节点性能与设计

一、研究背景

目前我国海上风电项目离岸距离和水深不断增加，传统固定式钢结构风机面临建设成本急剧加大、运维风险大等问题，并出现叶片与结构共振问题，难以满足深海风机基础结构要求。而漂浮式风电机组的占海面积大，投资成本高，适合于无法采用固定式风机塔架的远海海域。因此，针对 30-60 米水深的深海区域，急需开发相应的固定式风机导管架结构。

深海环境下海上风电基础塔架结构受到风致与波浪的长期循环作用，其节点的疲劳性能是结构设计的关键所在，也制约着整个风电结构的尺寸和成本。基于基于应力梯度理论的流线型节点型式，可以显著降低其应力集中现象，提高疲劳寿命。现代 3D 打印制造技术，又称增材制造 (additive manufacturing, AM) 技术，可以实现流线型节点的加工制造，也可以保证节点材质的疲劳性能。

结合大数据 AI 技术，不仅可以实现节点的拓扑优化，也可以提供大量参数分析数据，从而为流线型节点的性能设计理论提供依据。流线型节点的应用将有效的降低整体结构的材料用量，降低塔架自重减少运输成本，并提高塔架结构抗疲劳性能，实现海上风电固定式风机基础塔架结构的优化设计。

二、研究内容

为了进一步提升海上风电基础塔架结构的性能，开展节点优化设计，需要开展以下两方面研究：

1. 基本节点的优化理论和加工制造（可启动）

构建基于应力梯度的流线型节点优化理论，提出基于拓扑优化的基本节点(单支管 T 和 Y 型节点)优化方法,结合 WAAM 的增材制造技术,提出优化基本节点的加工制造方法。

2. 基本节点性能研究（可启动）

开展基本节点静力性能的加载试验，明确其静力响应规律，通过试验开展节点的应力分布研究，获得其破坏模式和承载能力，提出基本节点的设计方法。

3. 海上风电基础关键节点新型材料技术研究（待启动）

基于海上风电结构和荷载工况，开展基础关键节点新型材料技术研究，明确合适海上风电基础关键节点材料性能和制造方式，探明其对于节点性能的影响规律。

4. 海上风电基础关键节点优化技术研究（待启动）

针对基础关键节点，分析风浪耦合工况作用下的节点响应规律，进而提出节点的优化设计方法，明确节点的优化型式以及加工制造方式，提升海上风电基础结构整体性能。

5. 海上风电基础关键优化节点力学性能研究（待启动）

基于优化后的基础关键节点，开展力学性能试验，明确其在静力和

疲劳工况作用下的力学响应，获得其破坏模式和承载能力。

6. 海上风电基础关键优化节点设计方法研究（待启动）

构建基础关键优化节点的数值模型，基于 AI 大数据开展参数分析，明确参数影响规律；基于现有规范，提出基础关键优化节点的设计方法，为工程应用提供依据。

三、研究目标

1. 实现基于应力梯度的流线型基础节点优化设计，明显降低节点的应力集中现象，提高节点的疲劳性能；
2. 通过试验和数值分析，明确基础节点的静力性能并提出设计方法；
3. 提出海上风电基础关键节点新型材料技术；
4. 完成海上风电基础关键节点的优化设计；
5. 明确海上风电基础关键节点的力学性能和承载能力；
6. 提出海上风电基础关键优化节点的设计方法

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：

东方研究院（东福研究院） 陈锋利 13980826962

课题3：基于降阶模型的复杂装备耦合系统快速分析技术及其在风电机组设计中的应用

一、研究背景

随着风电装备的大型化和复杂化，装备设计与性能评估中涉及的复杂耦合分析（如气弹耦合、刚柔耦合等）对精度和效率提出了极高要求。然而，目前的复杂装备耦合仿真分析面临如下问题：

1. **计算复杂度高：**传统全阶模型方法需要对复杂耦合问题进行大规模数值计算，导致计算时间过长，资源需求极高，难以满足实际设计周期和快速优化迭代需求。

2. **效率瓶颈显著：**装备耦合关系复杂，需进行大量的边界条件设定与非线性求解，导致全局计算效率低下，严重制约了风电装备设计效率。

3. **仿真预测精度与速度难以兼得：**当前高保真仿真方法能提供高精度结果，但计算耗时较长；而简化模型方法（如低阶模型或经验公式）虽然效率高，但无法满足实际工程设计对仿真精度的要求，特别是在大型复杂风电装备中的性能优化场景。

此外，在风电装备设计中，复杂全工况载荷作用下的气弹耦合、振动响应等非线性效应复杂交织，而现有分析技术尚不足以在高效仿真的同时兼顾全局精度。

二、研究内容

针对风电机组等重大装备性能分析往往涉及复杂耦合响应，导致分析计算时间长、效率低的共性难题，亟需开展以下研究：

1. 研究基于预训练高保真数据的降阶模态提取方法，通过降阶转移矩阵构建物理信息方程，从而重构复杂装备设计性能分析模型；

2. 提出基于降阶模型参数化深度学习网络构建方法，形成人工智能协同的复杂装备响应分析技术；

3. 研发复杂装备高维非线性响应降维解耦算法，形成考虑全工况时序载荷的关键部件可靠性分析能力，建立耦合响应降阶建模与分析技术；

4. 开展基于降阶模型的大型风电装备耦合快速分析应用验证，加速风电机组叶片、轮廓、传动链、塔筒等关键部件设计性能高精高效分析能力，大幅提升设计效率，减少新机型研发迭代周期。

三、研究目标

1. 基于降阶模型的大型风电装备耦合仿真高精高效分析与设计应用。

2. 提交或者授权发明专利 ≥ 4 项，登记软件著作权 ≥ 3 项，形成基于降阶模型的耦合系统快速分析理论、方法与技术创新体系。

3. 开发1套国产化降阶建模分析工具软件，兼容主流CAE软件，实现：

(1) 风电机组关键部件高保真仿真模型（如气弹耦合、刚柔耦合）的降阶模态提取，实现耦合模型复杂度缩减至原始模型的 20%以内；

(2) 基于深度神经网络的风电机组降阶模型构建，叶片、塔筒等部件的单次仿真时间缩短至传统有限元方法的 10%-20%以内；

(3) 建立覆盖 80%以上设计标准规定的风机运行典型工况高保真预训练数据集，用于风电机组分析设计；

(4) 风电机组叶片、塔筒等关键部件仿真分析效率提升 20%-40%，降阶模型对关键设计性能（如气动载荷、结构应力）的预测误差不超过 5%（与高保真仿真模型对比）。

4. 应用于典型风电机组设计示范项目。

项目周期：15 个月

需求单位及联系人：东方风电 曾宇 15378104107

课题 4：绿色甲醇船舶动力系统关键技术研究

一、研究背景

船舶航运承担着全球 85%以上的国际贸易运输量，每年排放超过 10 亿吨二氧化碳，是全球温室气体排放的主要来源之一。国际海事组织近年来持续加严船舶碳排放标准，明确 2050 年船舶航运达到零碳排放。以绿色甲醇替代或部分替代柴油等传统船舶燃料是从根本上控制船舶航运碳排放的有效途径。2017 年中国船级社将甲醇列入《船舶应用替代燃料指南》。2018 年 IMO 将甲醇燃料船舶技术明确列为高优先项目。2022 年国家工信部等五部委联合发布《关于加快内河船舶绿色智能发展的实施意见》，明确内河航运船舶加快推广甲醇燃料。2024 年交通运输部、国家发改委联合印发《交通运输老旧营运船舶报废更新补贴实施细则》，鼓励推广甲醇等清洁能源船舶发展。甲醇作为船舶动力替代燃料已经得到国内外政府部门的许可，为甲醇燃料上船开展示范运行和产业化推广提供了政策上的保障。当前，甲醇应用与船舶动力仍面临高替代率下点燃/引燃不稳定、高空燃比稀燃组织困难，以及非常规排放、零部件可靠性等问题，开展绿色甲醇在船舶上应用的相关关键技术对于促进船舶减污降碳，助力船舶航运绿色低碳高质量发展具有重要意义。

二、研究内容

针对高替代率下船舶甲醇发动机着火不稳定、高空燃比稀燃组织困难、非常规排放等问题，开展以下研究：

1. 研究受限空间复杂气氛环境下甲醇喷射雾化燃烧特性，探讨喷射压力、喷射孔径、气氛条件等参数对甲醇喷射雾化的影响规律，构建甲醇喷射雾化模型，探究湍流-雾化-化学反应耦合作用对甲醇喷雾火焰形态发展的影响规律；
2. 研究船舶天然气发动机原位改甲醇发动机技术路线及总体方案，开展甲醇船舶发动机台架测试，探讨喷射脉宽、喷射压力、喷射时刻及点火正时等关键控制参数对甲醇发动机功率输出、常规污染物、非常规污染物和缸内燃烧过程的影响规律，构建船舶甲醇发动机综合性能优化方法；
3. 开展船舶大流量宽范围高稳定性甲醇供应系统原理和方案设计，构建典型天然气船舶绿色甲醇改造动力系统总体技术方案，开展典型航线绿色甲醇动力船舶能耗预测及经济性、碳减排评估。

三、研究目标

1. 构建受限空间复杂气氛环境下甲醇喷射雾化模型，厘清湍流-雾化-化学反应耦合作用对甲醇喷雾火焰形态发展的影响规律；
2. 通过对LNG发动机改造升级，开发出155kW级甲醇发动机试验样机，绿色甲醇替代率100%，改造后的船舶甲醇发动机输出功率不低于

原机型，标准工况下氮氧化物排放较企业现有天然气发动机减少50%以上；

3. 针对典型天然气动力船舶，构建绿色甲醇船舶动力系统改造总体技术方案。

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：东方宏华 向溢 15900700607

课题 5：甲醇燃气轮机宽负荷高效低污染燃烧技术研究

一、研究背景

绿色甲醇制备是实现可再生能源大规模消纳的重要途径，绿色甲醇在能源转换和储运方面具有显著优势，其运输成本低，储运安全性好，制备工艺成熟，是一种低成本、可长时储能的绿电消纳良好载体。耦合绿色甲醇燃料的燃气轮机在实现高效、清洁、低/零碳发电，增强电网调峰能力，减少能源发电领域碳排放具有重要意义。

甲醇作为燃气轮机燃料在国外已开展过多次尝试性试验，燃气轮机掺甲醇/纯甲醇运行在技术上被证明是可行的，在排放上具有明显优势。然而，由于甲醇燃料自身的物理化学性质，甲醇在燃气轮机中的应用仍面临诸多严峻挑战，如燃烧室仍存在小负荷熄火风险大、大负荷燃烧脉动强等问题。如何开展甲醇高效燃烧组织并有效避免回火、脱火与局部烧蚀等风险是实现绿色甲醇燃气轮机宽负荷低污染高效运行首先要解决的关键核心问题。

二、研究内容

针对甲醇燃料在燃气轮机上应用的需求和挑战，开展以下三方面研究：

1. 开展甲醇燃气轮机主燃级旋流器、值班级旋流器、甲醇雾化喷嘴等头部结构方案设计，研发甲醇燃料宽负荷低污染分级燃烧头部结

构；开展燃烧室头部多结构参数优化设计研究，构建甲醇燃烧室头部方案设计准则；

2. 采用数值模拟结合燃烧光学诊断手段研究旋流器叶片角度、燃料喷射孔径、喷嘴轴向位置等关键结构参数对甲醇燃烧器流场结构、甲醇浓度分布、火焰结构和污染物排放的影响规律；

3. 研究点火/熄火过程甲醇旋流火焰动态特性，明晰甲醇燃烧器稳燃边界及点/熄火机制。

三、研究目标

1. 研发至少一款甲醇燃气轮机高效低污染头部结构并形成参数化设计方法；

2. 明晰关键气动参数、结构参数对甲醇旋流火焰稳态和动态性能的影响规律，构建甲醇液雾旋流火焰稳态和动态性能数据库；

3. 获得甲醇燃烧器稳燃及点火/熄火机制；

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：东方汽轮机 代廷楷 15183670050

课题 6：零碳园区多维度碳排放核算与优化建设研究

一、研究内容

面向零碳园区规划建设场景，开展园区低碳供能系统配置研究，基于人工智能开展零碳园区智能设计研究，构建零碳园区智能设计系统，快速生成高质量的设计方案；开展涵盖关键供/用能设备和能源转换过程多能流特性分析、主要碳排放源的多碳流特性分析和生产生活材料的多物流特性分析研究，在碳污管控、低碳供能、智慧智能等方向开展耦合/解耦研究，综合考虑园区的能源结构、排放源及其相互关系，以生产型园区或其他场景园区为例完成零碳/近零碳实施路径与技术集成方案设计；针对零碳/近零碳园区碳排放核算与优化需求，研究构建面向园区的多维度碳排放核算体系，研发零碳/近零碳园区碳排放实时监测技术仪器装备，建立园区碳排放的实时监测系统，开发优化运行管理和优化改造提升双目标的能碳综合管理系统；开展零碳/近零碳园区方案技术经济比较研究，开展零碳/近零碳园区政策壁垒对策研究；选取零碳/近零碳园区规划建设案例，进行示范验证。

二、研究目标

研发国内首套具有能源设备选型精准匹配和方案快速优化功能的零碳园区智能设计系统，系统对园区可自动生成三种或以上的零碳/近零碳设计方案；开发基于东方电气集团能源装备的智能化能碳核算管理平台，为智能设计和数字化管理提供支撑；研制碳排放实时监测仪

器，实现工业排放源 CO₂ /N₂ O/CH₄ 同步检测，与标准气体标称值的相对误差 CO₂ 不超过±5%，N₂ O、CH₄ 不超过 10%；以某类园区为例形成零碳/近零碳园区方案技术经济比较和政策壁垒对策报告一份；选取目标园区零碳建设案例，进行系统、平台和设备应用示范验证。

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：东方设计服务 李路遥 18801791300

课题 7：水电站过流水体泥沙在线监测关键技术及装备研究

一、研究背景

水力资源是我国重要的可再生能源，对推动能源结构绿色低碳转型和减少温室气体排放具有重要意义。西部地区水电开发潜力巨大，可开发装机容量占全国 68%，但开发程度仅 1%左右。国家“十四五”规划明确提出要持续推进西部高海拔、高水头水电站与大型水电基地建设。西部地区河流水头落差大、流量大、含沙量高，对水轮发电机组稳定性与可靠性构成挑战。水轮机磨损程度与泥沙颗粒粒径、浓度、成分等参数密切相关，在线获取这些参数对实时评估机组磨损、调整运行模式和预测故障至关重要。

二、研究内容

为了获取过流水体泥沙颗粒粒径、浓度、成分等实时数据，支撑高水头水轮机组研发与应用，需要开展以下几方面研究：

1. 结合水电站实际水流压力、流速、含沙情况等工况信息，开展取水策略与方法研究，保证取水结果具备代表性，且不会对机组正常运行造成影响，不会产生安全隐患。

2. 开展泥沙颗粒多参数在线测量方法研究，探索偏振全息、拉曼光谱等方法测量和识别泥沙颗粒粒径、浓度、形貌、组分的可行性，并通过实验研究验证测量范围和性能指标。

3. 研发上述泥沙在线测量方法的数据处理算法，包括但不限于重建和反演算法、泥沙颗粒识别和多参数测量算法等，并开发人机交互友好的实时处理软件。

4. 基于实验测试平台集成泥沙多参数在线测量原理样机，并在此基础上，通过模块化设计，研制泥沙多参数在线测量工程样机。

5. 对样机开展实验室测试、工程现场实测和验证，并基于测量结果进行评估和优化，同时构建指定水域泥沙颗粒多参数数据库。

三、研究目标

1. 研制完成水轮发电机组过流水体泥沙多参数在线测量原理样机、工程样机各 1 套，指标满足：1) 含沙量测量范围不小于 $0.1\text{--}10\text{ kg/m}^3$ ，测量分辨率优于 0.01 kg/m^3 ；2) 泥沙颗粒粒径测量范围不小于 $1\text{--}1000\text{ }\mu\text{m}$ ，中位粒径测量误差 $<5\%$ ；3) 可对石英、长石、锆石、伊利石等典型矿物组分进行识别，识别准确率不低于 90%。

2. 开发适配样机的数据处理与分析一体化软件，软件包括重建和反演模块、泥沙颗粒识别和多参数测量模块等，处理响应时间优于 1 秒/幅(100 万像素全息图,100 颗颗粒/图像),每小时可统计超过 360000 颗颗粒。

3. 形成指定水域泥沙颗粒多参数数据库。

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：东方电机 陈珏良 18728054080

课题 8：特种有机硅低表面能静态海洋防污涂层材料的关键技术开发

一、研究背景

目前，由东方电气集团研制的拥有完全自主知识产权的全球最大的 26 兆瓦级海上风力发电机组在福建省福清市海上风电产业园下线。此外东方电气将目前也在大力研发和建设漂浮式/固定式海上风电、海上光伏等新能源工程。这些静态海洋设备表面的污损附着问题导致设备的腐蚀加快和发电效率下降，造成巨大的经济损失。因此，突破海洋设施静态防污瓶颈，开发高效、环境友好的海洋静态防污材料符合“一带一路”、“海洋强国”、“军民融合”等国家重大战略要求，对我国的国防建设、对东方电气集团的能源产业和海洋事业等都有极为重要的意义。

二、研究内容

针对当前漂浮式/固定式海上风电、海上光伏、海水制氢及波浪能发电等新型海上能源装备面临严峻的海洋生物污损问题，开展特种有机硅低表面能静态海洋防污涂层材料的设计、合成与规模化制备研究；在有机氟硅链段中引入少量长碳链的季铵盐基团，长碳链的疏水性可与季铵盐的亲水性相互平衡，维持涂层表面能不变，优化设计有机硅链段与长碳链季铵盐基团的比例和结构，实现低表面能特性和抗菌性能的协同作用；基于季铵盐抗菌基团抑菌作用、有机硅链段污损释放作用和微纤毛结构谐动作用等协同防污增强技术，实现长效稳定的静

态防污性能；研究有机硅链段种类和构型对防污涂层疏水性能、机械性能、抗菌性能的影响；考察改性有机硅树脂聚合物链段构象和微相分离对涂层润湿性能和静态防污性能的调控机制；研究微纤毛结构的尺寸、形貌（如圆柱、六边形、三角形等形状）等对防污性能的影响，解析微纤毛结构谐动效应的作用机理；进一步再设计梯度微纤毛结构，调节聚合物组成、纳米粒子含量和制备工艺，实现对微纤毛模量轴向梯度率的精准控制，探索微纤毛模量梯度率、尺寸对其结构稳定性、耐磨性的影响规律，解析梯度模量微纤毛结构与流体介质的相互作用机理，优化设计方案获得具有最佳防污效果的表面微纤毛结构；探究绿色防污剂与主体、辅助树脂的相容性以及树脂结构与涂料配方体系构效关系，突破防污涂层的静态长效防污技术；考察特种有机硅低表面能防污涂料的防污性能，解析多功能表面协同防污机制研究；并开展实海应用性能评价研究，进一步带动海洋装备防护涂层技术整体水平的提升，助力东方电气集团和我国在海洋清洁能源领域的发展和进步。

三、研究目标

1、聚焦当前海工装备存在的静态防污性能不足问题，通过多重功能表面设计，开发特种有机硅低表面能静态海洋防污涂层材料，揭示多机制协同防污机理。

2、设计梯度模量为纤毛结构，阐明梯度模量结构对微纤毛阵列结构稳定性和耐磨性的提升机理，探究流体介质与微纤毛的相互作用机理，进一步考察其对静态防污性能的影响。

3、研制系列用于海上静态防污领域的特种有机硅低表面能海洋防污树脂及涂料，性能达到国际同类产品（如 Hempel X5 等）的先进水平。具体技术指标如下：1）防污涂料的固含量 $\geq 65\%$ ； 2）浅海挂板 2 个海生物生长旺期，污损面积小于 5%；3）实海动态模拟 2 个周期，污损面积小于 5%；4）涂层疏水角 $\geq 100^\circ$ 。

4、开展海洋装备示范验证，助力东方电气集团在海工装备防污领域的技术提升。

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：

东方研究院（东福研究院） 刘虹邑 18683952418

课题 9：锅炉用复杂管路高质量高可靠智能弯曲成形技术及应用

一、研究背景

金属管路系统被誉为工业的血管，被广泛应用于核电、锅炉、燃气轮机等能源装备中。金属管路系统中弯曲段是最薄弱的部位，极易产生各种缺陷，且复杂空间构型的金属管在极端场景中安装、服役，需要高精度、高性能的保障，对金属管件弯曲成形技术与成形装备提出了严苛的要求。目前，由于涉及国防、能源工程重点领域，发达国家对相关技术与装备严格封锁，通过拉制等工艺成形的管材被列入《瓦森纳协议——两用物项和技术清单、武器清单》（1.C. 材料 半成品形式：通过拉制等成形的加工材料，如管材和管件）。为此，国家首台（套）重大技术装备目录将其列为我国亟须重点突破与推广应用的国产化关键装备，研究复杂管路高质量高可靠智能成形技术关键技术，通过智能化性能优化方法提高管件成形质量，对提升东方电气集团高端装备设计制造技术水平，提高弯曲成形装备制造企业自主设计制造能力与技术竞争力，推进我国能源装备自主可控设计制造等具有十分重要的意义。现有锅炉金属管路弯曲成形通常采用试弯方式获取同类管塑变特性，针对不同批次原料管需匹配不同试弯方案，成本高、周期长（如某锅炉装置中单一尺寸管存在 30 个以上弯径规格，用量广、规格多，且直管来源复杂难以精确回溯）；此外现有的金属管件弯曲成形技术可靠性差、精度低，弯管良率控制难，严重拖延锅炉整体交

期、增加装备制造成本。亟待开展锅炉管路高质量高可靠智能弯曲成形技术研究。

二、研究内容

针对锅炉用金属管路弯曲成形存在的问题，开展新一代人工智能方法驱动的金属管路智能弯曲成形关键技术研究，重点研究(1)难加工金属管件塑性失稳机理与皱裂抑制方法；(2) 小弯径管件弯曲成形装备连续弯截面均衡保形技术；(3) 基于物理信息神经网络的弯曲回弹精准预测与补偿技术；(4) 基于多目机器视觉的金属管件在线快速测量及高精度实施补偿技术。结合金属管件塑变特性，构建十万级仿真高保真样本库，训练获得金属管件弯曲成形缺陷高精度预测模型，在微小管段变截面的回弹预测补偿方法、海量仿真驱动的高可靠首尾端位矢与整体包络控制技术等方面取得创新突破，研发锅炉用管路智能弯曲成形系统（包括智能成形装备、模具，在线视觉检测系统，大数据驱动的智能控制系统），在 3 个以上锅炉场景中应用，实现锅炉复杂管件高质量高可靠成形。

三、研究目标

研究锅炉用复杂管路智能弯曲成形关键技术，搭建面向锅炉用复杂管路弯曲成形数据库，包含 30 种以上材料、10 万个金属管弯曲仿真案例，研发锅炉用管路智能弯曲成形系统（包括智能成形装备、模具，在线视觉检测系统，大数据驱动的智能控制系统）。实现每一批次原料管试弯控制在 3 次以内，弯管回弹预测精度达 0.5° ，回弹控制精度

达 1° ，单管弯曲半径偏差小于 $\pm 2\text{mm}$ （满足同一批次料弯管一致性要求：弯曲半径偏差 $0-2\text{mm}$ ），单管三个方向极限位置偏差均控制在 2mm 以内，单管完成后满足锅炉制造标准要求，合格率达 95% 以上，将金属管件智能弯曲成形技术在东方锅炉 3 个以上场景中应用，并进一步推广至核电、燃气轮机等东方电气能源装备中。

研发周期：18 个月

需求单位及联系人：东方锅炉 刘丽兰 18990207973

课题 10：宽范围掺氢低排放燃烧室设计及验证研究

一、研究背景

氢能是全球能源转型的重要方向，掺氢燃气轮机技术在降低碳排放和提升效率方面具有关键作用。西方国家在该领域技术领先，我国虽取得轻型燃机自主化进展，但重型燃机和掺氢燃烧技术仍需突破。本研究聚焦掺氢燃烧室仿真与设计，支持不同掺氢比例的高效燃烧，为技术提升和产业化应用提供支撑。

二、研究内容

为了制定燃气轮机掺氢燃烧室的性能仿真规范和设计方法，实现宽范围掺氢低排放的高效燃烧，需要开展以下三方面研究：

1. 掺氢燃烧过程数值模拟。建立高精度仿真模型，选择合适的湍流模型（ $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 、LES）和燃烧模型（FGM）。模拟掺氢燃烧过程中的燃料分布、火焰稳定性和排放特性，分析关键影响因素。

2. 掺氢燃烧室设计方法研究。分析氢燃料的特性（低密度、高扩散性）对燃烧过程的影响，制定适应 30%、60%、100% 掺氢比例的燃烧室设计原则。探索燃烧室结构优化方案，确保不同掺氢比例下的燃烧稳定性和效率。

3. 性能优化与模型试验验证。优化燃烧室性能，确保掺氢比例变化（30%、60%、100%）时的高效燃烧和低排放特性。通过模型试验验证仿真结果，并完善设计方法和仿真规范。

三、研究目标

1. 制定掺氢燃烧室仿真规范。建立适用于 30%、60%、100%掺氢比例的燃烧室性能仿真规范和计算流程。

2. 实现不同掺氢比例下的高效稳定燃烧。确保燃气轮机燃烧室在氢掺混比例变化时，具备高效率、低排放、火焰稳定性佳的运行能力。

3. 验证研究成果的实用性与可靠性。通过模型试验验证仿真和设计成果，为掺氢燃烧技术的工程应用提供理论和实验支撑。

4. 提升我国燃气轮机掺氢技术水平。支持燃气轮机技术从轻型到重型自主化发展的进程，推动我国掺氢燃烧技术实现产业化和国际化突破。

研发周期：36 个月

需求单位及联系人：东方汽轮机 仝雨航 15008388150

课题 11：高效大容量风机叶片专用环氧树脂技术

一、研究背景

国家发改委和国家能源局发布的《能源技术革命创新行动计划(2016-2030 年)》明确提出，未来风电技术创新需突破百米级叶片轻量化设计与新材料开发等关键技术。在风电平价上网背景下，叶片大型化已成为提升发电效率、降低风电场建设成本的核心路径。当前行业亟需通过材料创新解决大尺寸叶片制造中环氧树脂体系存在的可适用期短、放热峰相对集中、材料强韧性不足、合模粘接断裂风险高等瓶颈问题，以实现增效降本与产业升级目标。

二、研究内容

面向百米级风机叶片制造的专用环氧树脂需求，重点开展以下研究：

1. 固化工艺研究：研制新型胺类潜伏型固化剂，突破凝胶/固化时间与灌注工艺的匹配性瓶颈；建立大型叶片固化动力学模型，解析温度/压力等参数对固化行为的影响规律，形成灌注工艺控制方案。

2. 树脂增强增韧：设计制备有机硅、片状纳米材料等增强增韧改性材料，在保持树脂流动性的同时实现其强度/韧性协同提升；阐明改性剂作用机制，构建兼具防污、耐老化功能的环氧树脂体系。

3. 合模粘接技术：研制高强高韧环氧胶黏剂用聚氨酯改性环氧树脂增韧剂，并用于胶黏剂产品体系，研究相关工艺性能，解决长叶片用胶韧性不足的问题。

4. 光固化修补树脂的研究：通过填料、分子结构、配方设计，研制红外光固化树脂体系，可在室温下快速固化，树脂性能与叶片树脂相匹配，粘接性能良好，实现破损叶片的修补与加固。

三、研究目标

1. 开发胺类潜伏型固化体系 1-2 种，研究固化过程机理，建立大型叶片固化动力学模型，形成灌注工艺方案。

2. 开发有机硅型、片状纳米型环氧树脂改性剂 2-3 种，实现环氧树脂体系拉伸强度 ≥ 80 MPa、冲击韧性 ≥ 70 kJ/m²，初始混合粘度不超过 260 mPa. s，研究改性剂防污、耐老化作用机制，与需求单位共同形成商业化解决方案。

3. 突破聚氨酯改性环氧胶黏剂关键技术，满足断裂韧性（ASTM D5528） > 1000 J/m²，粘度范围 $3 \times 10^4 - 6 \times 10^4$ mPa. s，密度范围 1.00-1.15g/cm³，与环氧树脂具有良好相容性，应用于大尺寸风机叶片制造。

4. 开发基于光热效应的红外光固化树脂一种，拉伸强度 ≥ 80 MPa、冲击韧性 ≥ 70 kJ/m²，固化时间 ≤ 15 min，开发红外光固化装备 1 套，与需求单位共同形成商业化解决方案。

5. 定向培养博士研究生 1 名，发表 SCI 论文 1-2 篇，申请或授权专利 2-3 项。

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：东树新材 钟连兵 13778229511

课题 12：耦合大规模低成本固体储热系统的灵活调峰煤电关键技术研究

一、研究背景

煤电机组耦合储能是提升煤电机组灵活调峰能力、消纳可再生能源电力、低碳经济运营的重要手段。当前，国内外对煤电机组的灵活调峰改造研究以本体改造为主，部分工艺耦合熔盐储热系统，其在调峰深度和变负荷速率方面具有优势，但储能系统成本相对较高，运行维护要求较严，且对储/释能方案设计和机-炉-储协同优化控制要求较高。国内外在固体储热方面，尤其是与煤电耦合鲜有相应研究。现阶段固体储热以混凝土储热为主，成本较高，温度控制困难。固基复合相体作为储热原料来源广泛、超低成本、储能温度区间广(可 $>800^{\circ}\text{C}$)，且储能系统设备构造相对灵活简单，具备技术示范能力和推广潜力，尤其适用于我国风光资源丰富的西北地区。针对大量大型燃煤机组，提出了一套基于固基复合相储热系统的灵活调峰新型煤电耦合系统，基于超焓能源高效利用原理，对非化石能源规模化储纳，释能时加热锅炉入炉介质，实现超大规模超低成本节能低碳提效增益。

二、研究内容

为了提升煤电机组灵活调峰能力、规模化消纳可再生能源，拟开展以下研究：

1. 超大规模超低成本固体储热与灵活调峰煤电耦合热力系统构建与优化研究。分析储热系统与煤电系统在不同工况下的热力匹配关系

及不同储/释能方式对锅炉效率和发电效率的影响规律，评估耦合系统的节能低碳效益，为系统的高效运行提供理论依据。

2. 固基复合相材料储热特性优化研究。对比分析不同固体和复合储热材料的性能特点，研究固基复合相作为储热介质的物性优势，开发高导热性能、高结构稳定性、低成本的固基复合相储热材料，分析新型储热材料掺杂对固基复合相传热性能强化的作用机理和匹配特性，获得适合不同场景条件下的大规模储热应用的最优材料组合。

3. 固基复合相材料核心设备研发。针对电/热调峰电站不同容量的电力/热力储供需求，形成不同储放热介质/固基复合相材料储放热换热器、固基复合相材料储存单元等核心设备方案。进行固基复合相传热强化与经济优化研究。研究不同储放热介质温度梯度与流体路径下换热器的传热性能，流动与换热协同优化，提出超大规模超低成本固体储热与灵活调峰煤电耦合热力系同适配换热器布置方式与换热管结构优化设计导则，开发强化系统换热与经济协同的高效储能适配换热器；进行固基复合相材料储存单元结构设计与经济优化研究。进行不同储存单元结构设计，材料选择，储热性能验证，开发高可靠性低成本固基材料储存单元。

4. 煤电储能超焓系统能源高效利用研究。基于超焓能源高效利用原理，研究大规模煤电储能超焓系统条件下，换热介质特性参数对锅炉整体燃烧效率的作用与影响机制，分析变负荷条件下超焓效能对锅炉性能提效的影响，优化煤电储能超焓系统的换热介质调配控制策略。

5. 固基复合相储热与煤电耦合系统协同控制方法研究。研究固基复合相储热与煤电耦合系统中考虑燃煤工况与非化石能源波动性等的多时间尺度协同控制策略，分析多变量参数对耦合系统匹配性与稳定性的影响，构建多目标的耦合系统全工况匹配优化方法。

三、项目意义

先进性：煤电机组电热耦合储能，是提升煤电机组灵活调峰能力、消纳可再生能源电力、低碳经济运营的重要手段。当前，煤电耦合熔盐储热已在国际上开展了有益尝试，在调峰深度和变负荷速率上具有优势，但储能系统成本相对较高，运行维护要求较严，且对储/释能方案设计和机-炉-储协同优化控制要求较高。其次电锅炉储热和热水储热技术也有一定应用，但储热规模较小，储热温度低，效率不高。现阶段固体储热以混凝土储热、镁砖蓄热为主，成本较高，温度控制困难。本项目提出的固体及其固基复合相体作为储热原料来源广泛、超低成本、储能温度区间广($>500^{\circ}\text{C}$)，且储能系统设备构造相对灵活简单，具备技术示范能力和推广潜力，但目前国内外在固体储热方面，尤其是与煤电耦合鲜有相应研究。

经济性：本项目提出的固体及其固基复合相体主要原料为砂砾、粉煤灰等，储热介质来源广泛、超低成本，且储能系统设备构造相对灵活简单、成熟，设备成本低，可靠性高，可保障长期稳定运行。根据项目组初步估算，固基复合相储热系统较熔盐储热系统单位容量储热成本可下降 40%以上。

灵活性：通过煤电与超大规模超低成本固基复合相储热耦合，可将富余再生能源电力转化为热能，实现对可再生能源的规模化消纳。释能方式选择加热煤电入炉介质如一二次风，对温度控制要求低，易于操作，替代部分燃煤，源头减碳；同时在锅炉低负荷/快速变负荷运行时可快速提高空气温度，**支撑煤电深度灵活调峰，预计可降低度电煤耗、煤电碳排放 10%以上。**

对东方电气集团的意义：此技术研究是煤电与长时储能耦合的一次全新尝试，符合超焓能源高效利用原理系统的建立将促进用户电厂节能低碳提效增益，尤其适用于我国风光资源丰富的西北地区，**可为东方电气集团后续煤电低碳化改造项目和新建综合高能效灵活电厂提供示范引领和有益参照。**同时，储能系统构建核心如固基复合相材料储放热传热及储存设备研发、锅炉灵活调峰改造等，东方电气集团具有深厚的技术积累，通过项目实施可为集团在固体储能市场提供强有力的支撑。

四、研究目标

1. 超大规模超低成本固基复合相储热与煤电耦合超焓能源高效利用系统构建与优化。
2. 高传热性能固基复合相储热材料开发。
3. 固基复合相材料传储热机理研究与小试验证。
4. 固基复合相材料储放热传热及储存关键设备开发与中试验证。

5. 固基复合相储热与煤电耦合系统变负荷协同控制提效策略和方法。

6. 工程示范方案研究，并力争落实示范项目。形成面向 300MW 及以上循环流化床机组及 600MW 及以上等级煤粉机组方案，实现非化石能源替煤率 10%以上，变负荷速率提升 1%Pe/min 以上，机组稳定运行负荷范围 0%-100%。

研发周期：24 个月

需求单位及联系人：

东方锅炉 唐豪杰 15208488263 李有霞 15208289769