

# 风电混塔预制拼装施工工艺的创新应用

牛瑞军

上海电力能源科技有限公司 上海 200000

**【摘要】**：破解高兆瓦风电机组发展伴生的塔架承压、施工效率与环境适配难题，本文聚焦采购成品构件后的现场吊装施工环节，研究风电混塔预制拼装施工工艺创新。构件创新设计、核心技术原理优化及适配性要求筑牢基础，剖析现场模块化吊装、精准连接及预应力施加等关键施工工艺，建立生产施工质量控制体系，结合典型工程验证施工效率提升与成本优化的应用效益。研究显示，此类工艺可适配不同地域与机组需求，实现塔架建设高质量与高效益统一，为风电行业规模化发展提供技术支撑。

**【关键词】**：风电混塔；预制拼装；施工工艺创新；质量控制；工程应用

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.080

## 引言

风电产业向高兆瓦、高海拔、低风速复杂场景拓展，传统混凝土塔筒施工工艺面临构件承载不足、施工周期长、地域适配性差瓶颈，制约行业发展。预制拼装工艺凭借高效优质绿色特性，成为风电混塔建设创新方向。立足行业发展需求，聚焦采购成品构件后的现场施工环节，梳理风电混塔预制拼装施工工艺创新基础，分析关键创新技术与质量管控体系，结合工程实践探讨应用效益，为推动风电混塔施工技术升级、助力新能源产业高质量发展提供理论与实践参考。

## 1 风电混塔预制拼装施工工艺创新基础

### 1.1 预制混塔构件创新设计

预制混塔构件创新设计围绕标准化、高性能化与适配性展开，打破传统构件设计单一化瓶颈<sup>[1]</sup>。完成9种标准模块化管节系统设计，构建灵活组合构件体系，可按项目需求快速适配120米-300米不同高度塔架建设，应用UHPC超高性能混凝土材料，构件强度较普通混凝土提升4-6倍，寿命延长50%，解决高兆瓦机组载荷提升带来的结构承压难题。华东院针对低风速地区平原风电项目特点，创新分片预制装配式构件设计，常德鼎城风电项目混塔单片最大重量控制在16吨，降低运输难度，为现场高效吊装提供便利，结构优化后混凝土塔筒部位高度达131.7米，满足160米机舱高度设计需求。远景能源通过载荷-结构耦合模型优化钢混比例，在185HH混塔设计中实现结构轻量化与稳定性平衡，规避共振风险，适配大功率机组复杂受力环境。

### 1.2 预制拼装核心技术原理优化

预制拼装核心技术原理优化聚焦流程协同与性能提升，匹配预制工艺与结构力学需求<sup>[2]</sup>。TU Wien提出创新半预制双壁构件拼装原理，将塔架分解为环形分段，每段由半预制钢筋混凝土双壁构件在现场预组装区拼接，双壁构件几何形状经测算，保障运输经济性与现场快速定位，拼装后于水平接缝上方浇筑混凝土形成连续无缝结构，填充混凝土与预制构件牢固连接，提升整体抗疲劳性能。华东院自主研发“免灌浆干式连

接”技术原理，突破传统灌浆连接效率瓶颈，通过构件接口设计与连接构造优化实现管片快速拼接，解决传统连接易渗水、精度难控问题，相关技术成果已实现国产化与规模化应用。“体内预应力”技术原理，通过灌浆料使钢绞线与塔筒融合，隔离外界腐蚀环境，预应力损失更可控，无需长期监测即可满足全寿命周期抗震要求，为拼装结构长期稳定性提供核心支撑（见图1）。

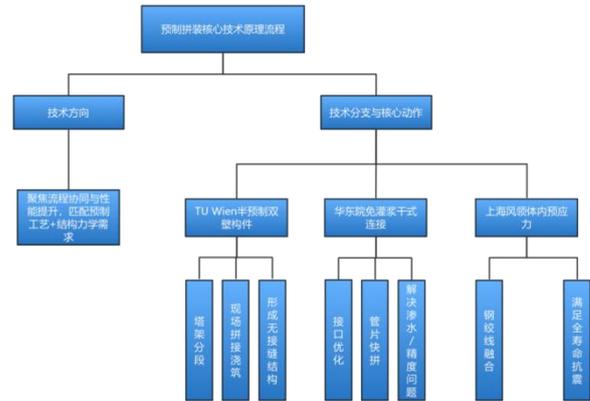


图1 预制拼装核心技术原理流程

### 1.3 现场施工适配性要求

现场施工适配性要求立足不同地域环境、气候条件与工程地质特点，构建差异化施工适配体系<sup>[3]</sup>。极端气候适配上，针对-25℃至-30℃低温场景，优化预制构件现场拼接工艺与养护技术，采用专用胶粘剂保障管片间粘结强度7天内100%达标；东南沿海台风区域和西部超高速风环境下，选用120米UHPC混塔构件，通过现场施工工艺优化提升抗风载能力。复杂地质适配中，面对粉砂层地质，采用“外围井点降水+木桩支护+黄土换填+支模护壁”基坑处理方案，与构件底部安装需求精准匹配，解决地下粉砂层易塌方、基坑难成型对吊装施工的影响。机型与地域协同适配方面，模块化构件可适配8.5MW、10MW等不同单机容量机组，高hub高度混塔构件适配高风速地区风资源捕获需求，分片预制构件则更适配中东部低风速地区运输

与现场吊装条件。

## 2 风电混塔预制拼装施工关键创新工艺

### 2.1 现场模块化吊装施工工艺

现场模块化吊装施工工艺依托标准化流程、精准定位技术与协同作业模式，实现预制构件高效安装。制定“构件进场检验-预组装区拼接-整体吊装定位”标准化流程，构件进场后严格检测几何尺寸、强度及接口精度，合格后方可进入吊装环节。采用塔吊吊装技术突破高度与重量限制，支撑300米以下轮毂高度混塔高效吊装，搭配专业吊装设备与人员分工协同，提升吊装稳定性。针对分片预制构件，优化吊装顺序与受力平衡控制，避免构件吊装过程中变形，保障拼装精度。通过模块化吊装模式，减少现场作业面占用，提升施工安全性与效率。

### 2.2 现场模块化拼装连接创新技术

现场模块化拼装连接创新技术聚焦快速化、精准化、可靠化，突破传统拼装效率低、质量难控瓶颈<sup>[4]</sup>。华东院自主研发“免灌浆干式连接分片预制装配式”技术，在国家电投常德鼎城风电项目成功应用，无需传统灌浆工序，依托构件接口设计实现管片快速拼接，配合管片建档立卡管理与吊装现场指导手册，单台混塔吊装时间控制在7天左右，拼装误差等关键指标优于行业标准。远景能源针对管片拼缝抹胶质量难题，开发超高强结构胶施工工艺，通过施工流程控制与材料性能优化保障拼缝粘结强度，依托GTS全栈塔架平台整合施工数据，实现拼装过程数字化协同与精准把控，特变丰宁新隆鱼儿山250兆瓦项目中，该技术保障批量并网项目拼装质量与效率。TU Wien半预制双壁构件拼装技术创新采用现场预组装区拼接模式，先将双壁构件组装成环形分段再整体吊装定位，定位后向双壁构件内浇筑混凝土并填充水平接缝，形成连续无接缝连接结构，提升拼装效率的同时，通过现浇混凝土增强连接部位整体性与抗疲劳性（见图2）。

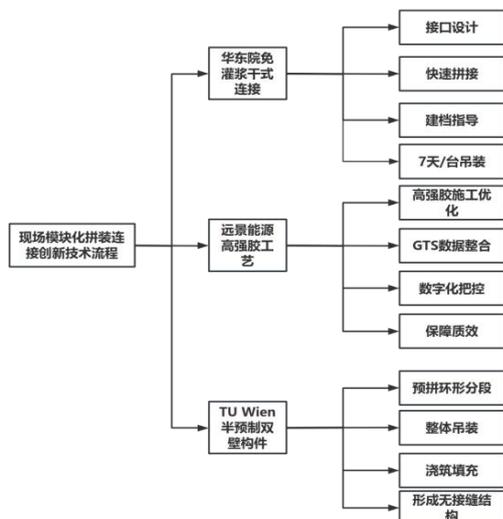


图2 现场模块化拼装连接创新技术流程

### 2.3 现场预应力施加与整体成型工艺

现场预应力施加与整体成型工艺聚焦结构稳定性与耐久性提升，实现预应力控制与整体结构融合。优化“体内预应力”现场施工工艺，以专用灌浆料实现钢绞线与塔筒主体结构紧密结合，隔绝外界腐蚀环境，满足全生命周期抗震规范要求，控制预应力损失，无需长期监测即可保障结构安全。某风电场180米hub高度项目中，该工艺使混塔段高度达157.4米，混凝土强度维持150MPa，结构稳定性显著提升。采用半预制整体成型现场施工工艺，通过环形分段叠加组装与连续浇筑填充混凝土，使各分段形成牢固整体，原型机验证显示，形成的塔架结构抗疲劳性良好，相同建设高度下可优化材料成本。通过载荷-结构耦合分析优化现场预应力施加参数，实现钢混结构协同受力，规避共振风险，配合全流程质量管控保障预应力施加均匀，极端环境下仍维持结构整体稳定性。

## 3 现场施工质量控制体系

### 3.1 预制构件进场质量管控

预制构件进场质量管控聚焦源头把控，构建全维度检验体系。建立构件进场“双验收”制度，一方面核查供应商提供的质量检测报告、生产参数记录等技术资料，另一方面对构件外观、几何尺寸、强度、接口精度等关键指标进行现场实测，不合格构件严禁进入施工环节。为每个模块化管节建立唯一标识，记录进场检验数据、构件批次等关键信息，确保质量问题可精准溯源。针对UHPC构件等特殊材料，额外检测其耐久性、抗渗性等指标，保障构件性能符合现场施工与长期使用要求。

### 3.2 现场拼装施工质量动态控制

现场拼装施工质量动态控制依托数字化监测、精细化管理与闭环验收机制，实现拼装全过程精准把控与实时调整。国家电投常德鼎城风电项目实行管片建档立卡制度，为每片预制构件建立唯一身份信息，记录生产、运输、拼装等各环节数据，编制混塔吊装现场指导手册，推行“一机一策、一机一小组、一环一验收、一日一巡查”管理模式，联合咨询公司实时监督高空对接质量，确保拼装误差等关键指标优于行业标准。远景能源将数字化技术融入动态控制，集成索力、位移、沉降、振动等监测功能的智能设备实时采集拼装数据，上传至“伽利略”平台，结合GTS全栈塔架平台协同优化，对拼装偏差及时预警调整。特变丰宁新隆鱼儿山项目中，该动态控制模式保障批量混塔拼装质量一致性。TU Wien在半预制双壁构件拼装现场，连续监测吊装定位精度与混凝土浇筑质量，实现“吊装-定位-浇筑”连续化流程控制，确保水平接缝填充混凝土与预制构件形成牢固整体，规避连接缺陷。

### 3.3 现场施工质量风险防控措施

现场施工质量风险防控聚焦关键风险点预判、规避与化解，构建全流程管控体系。极端环境施工风险应对中，冬季施

工前通过仿真分析与实验室测试验证低温环境胶粘剂固化性能,优化养护工艺,实现-25℃至-30℃条件下7天内强度100%达标,规避低温粘结失效风险。基础施工风险防控上,联合设计、施工、监理制定针对性基坑处理方案,应对地下粉砂层易塌方、基坑难成型问题;针对大体积混凝土易开裂问题,通过优化配合比、控制水化热、强化养护工艺解决,化解基础施工风险。结构稳定性风险防控中,通过荷载-结构耦合模型仿真预判结构共振风险,优化现场拼装顺序与预应力施加参数,规避结构稳定性风险;定期检查吊装设备性能与安全状态,保障高空作业安全。

## 4 创新工艺工程应用效益与实践

### 4.1 施工效率提升效益

创新工艺应用提升风电混塔施工效率,预制生产至现场拼装全流程压缩工期。标准化、模块化工厂预制体系,每条完整生产线每1-3天完成一套混凝土塔筒生产,较传统现场浇筑工艺效率提升显著;塔吊吊装技术突破高度与重量限制,支撑300米以下轮毂高度混塔高效吊装。国家电投常德鼎城风电项目采用华东院免灌浆干式连接分片预制装配技术,搭配“一机一策、一环一验收”管理模式,单台混塔吊装时间控制在7天左右,较传统周期缩短30%以上,刷新湖南新能源建设速度纪录。远景能源依托GTS全栈塔架平台实现设计-生产-施工-运维协同优化,结合40余家工厂生产基地规模化布局提升交付效率;特变丰宁新隆鱼儿山250兆瓦项目实现批量并网,彰显创新工

艺在大型项目的适配能力。

### 4.2 工程成本优化效果

创新工艺依托材料优化、效率提升与运维减负,优化工程全生命周期成本。材料成本层面,TU Wien半预制双壁构件施工法在相同塔高和抗疲劳性能要求下,可采用更低标号混凝土,较传统预制工艺材料成本降低10%-15%;采用的UHPC材料单价较高,但强度提升实现构件截面优化,减少材料用量的同时降低运输成本<sup>[5]</sup>。施工成本层面,国家电投常德鼎城风电项目7天/台的吊装效率,减少现场施工机械租赁、人工投入等费用;远景能源通过自建工厂与供应链整合实现规模化生产,摊薄单位生产成本。运维成本层面,“钢-UHPC体内预应力混塔”段实现终身免维护,较传统钢塔筒减少法兰、锚栓等易损部件更换与维护费用,全生命周期运维成本降低40%以上。

## 5 结语

风电混塔预制拼装施工工艺创新形成涵盖设计、技术、适配性的完整体系,关键工艺与质量控制技术突破,提升施工效率、优化工程成本,增强结构耐久性与环境适配性。典型工程应用验证创新工艺的可靠性与适用性。未来需强化跨场景技术融合与智能化升级,推动创新成果规模化推广,持续提升风电混塔建设经济性与安全性,为“双碳”目标下风电产业持续健康发展提供技术保障。

## 参考文献:

- [1] 吴子俊.风电混塔的安全检测手段[J].中国战略新兴产业,2025,(36):66-68.
- [2] 张振利,李双宝,唐圣博,等.风电混塔结构技术综述[J].风能,2025,(11):106-111.
- [3] 吴子俊.风电混塔安全设计研究[J].现代工程科技,2025,4(18):17-20.
- [4] 王军,刘文龙,罗西,等.风电混塔C100预制混凝土管片裂缝分析与控制技术[J/OL].混凝土与水泥制品,1-8[2026-01-06].
- [5] 李琪.风电混塔安装工艺的标准探讨与实践应用[J].安装,2025,(03):52-55.