

# 钢混塔架风电机组吊装模式研究分析

刘晓东 彭龙飞 贾峰

华润电力投资有限公司中西分公司 河南郑州 450003

**【摘要】**本文对钢混塔架风电机组吊装模式进行分析，主要通过对三种吊装模式的优劣势分析，从工期、质量、安全、造价各方面进行对比，并结合行业调研及行业发展状况，经论证形成相应推荐性结论。

**【关键词】**风力发电；风电机组；钢混塔架；砼塔；吊装模式

Study and analysis of lifting mode of steel tower wind turbine

Liu Xiaodong Peng Longfei Jia Feng

China Resources Power Investment Co., LTD.Zhongxi Branch, Zhengzhou, Henan 450003

**【Abstract】**This paper analyzes the hoisting mode of steel-concrete tower wind turbine, mainly through the analysis of the advantages and disadvantages of the three hoisting modes, and compares them from the aspects of construction period, quality, safety and cost. Combined with industry research and industry development status, the corresponding recommended conclusions are formed after demonstration.

**【Key words】**wind power generation; wind turbine; steel and concrete tower; concrete tower; lifting mode

## 引言

随着风电行业的发展,风电机组机型更新换代的速度越来越快,风电机组叶片直径越来越大,塔架也越来越高。在高塔架风电机组塔架的选用上,风电机组塔架由传统的“全钢式”塔架,向着“钢混式”塔架发展。

现阶段,因砼塔塔架的安装施工工艺复杂、拼接数量多、施工单位人员经验缺乏等,成为项目施工管控的重点和难点,针对采用钢混塔架风电机组的项目,合理选用风电机组吊装模式对项目的安全、质量、工期、造价具有重要影响。本文通过对以往采用钢混塔架机组的项目在砼塔施工中遇

到的问题进行整理、思考、论证,对钢混塔架风电机组吊装模式进行了多角度分析,并形成推荐性的结论和建议。

## 1 砼塔发展历程

### 1.1 砼塔发展初期及存在问题

十三五期间,风电机组钢混塔架技术初步发展,各风机厂商的砼塔形式差异明显,主要的技术路线及投运情况如表1所示。

表1 风机厂商的砼塔技术路线及投运情况

技术路线	样机或批量风电场最早投运时间(地点)
MAX Bogle/圆环2片式	2013年(新疆达坂城)
Ventur/八面体式	无
ATS/八片式	2018年(河南安阳)
整环式	2018年(江苏盐城)
Acciona/圆环2或4片式	2019年(新疆昌吉自治州)
圆环2或4片式	2019年(湖北应城)

此阶段,砼塔技术均为专利技术,风机厂家与砼塔供应商及吊装施工单位相互高度绑定,从质量控制、技术管理方面较难分割。因此,十三五期间,高塔架风电项目风电机组

招标范围基本都包含风电机组、砼塔供货及安装施工。

十三五期间各砼塔技术路线在实施过程中暴露出一些问题:

(1) 部分厂商采用的砼塔技术路线，砼塔节拼接过程中均需要灌浆填缝，灌浆料凝固周期长，施工较慢；

(2) 部分厂商采用整环式砼塔方案因混凝土塔筒环无法分片，砼塔节直径较大导致运输困难；

(3) 部分厂商混塔品控较差，运行阶段出现了砼塔掉块、渗水问题；

(3) 部分厂商选用的技术方案较优，但因专利技术，难以大批量推广。

### 1.2 砼塔方案优化设计

十四五期初，针对砼塔在制造、施工、运输等过程中暴露的出问题，各风机厂家、砼塔供应商经相互学习、借鉴，对各自的砼塔技术方案进行了调整及优化。目前各主要厂家的砼塔形式多采用2片/4片式，基本趋于一致，技术差异较小，均可实现标准化预制，制造质量大大提高，并且可根据运输路况将混砼塔环段分成2片或5片式，便于远距离运输，同时砼塔段表面加工精度较高，采用高强螺栓进行环段拼接安装，采用灌浆料/结构胶/密封条密封，采用预应力钢绞线张拉预紧，整体质量、进度控制较好。

基于砼塔技术逐渐发展成熟，技术壁垒已经打破，目前风机厂家与砼塔供应商及吊装施工单位紧密性已经减弱，风机厂家、砼塔供应商、砼塔吊装施工单位已逐渐开始解绑。

2023年开始，部分业主单位已采用风电机组和砼塔、砼塔施工安装分开招标的模式。

## 2 采用砼塔技术的风电机组吊装模式的对比分析

### 2.1 砼塔机组的吊装模式

经过统计分析，风电机组吊装模式主要分为以下3种：

模式一：风机厂家负责砼塔、钢塔及风电机组吊装；

模式二：风机厂家负责砼塔段吊装，主体施工单位负责钢塔及风电机组吊装；

模式三：主体施工单位负责砼塔、钢塔及风电机组吊装。

后续主要通过几个砼塔项目在执行时反馈的情况来对比分析这几种风电机组吊装模式的优劣势。

### 2.2 典型项目及采用的吊装模式优缺点分析

#### 2.2.1 典型项目整体概况

表3 各吊装模式下典型项目情况介绍

吊装模式	项目	机型/高度	吊装工期	吊装台数	单台机组吊装周期
模式一：风机厂家负责砼塔、钢塔及风电机组吊装	项目 a	121-2.0/130	2019年2月-2020年5月	45	10天/台
	项目 b	121-2.0/130、14X-2.5/130	2019年2月-2020年12月	48	13.8天/台
	项目 c	19X-5.X/160	2023年3月-2023年11月	38	7.1天/台
	项目 d	19X-5.X/160	2023年6月-今	6	25天/台
模式二：风机厂家负责砼塔段吊装，主体施工单位负责钢塔及风电机组吊装	项目 e	14X-2.5/140	2020年4月-2020年12月	40	6天/台
	项目 f	171-4.5/160	2022年9月-2022年11月	5	12天/台
	项目 g	19X-6.0/160、19X-5.0/160	2023年6月-今	7	21.4天/台
模式三：主体施工单位负责砼塔、钢塔及风电机组吊装	项目 h	146-2.5/140	2022年2月-2022年12月	40	7.5天/台

#### 2.2.2 吊装模式的优缺点分析

在风电项目建设中，不同的吊装模式各有优劣。

模式一，风机厂家负责砼塔、钢塔及风电机组吊装。其优势在于风机厂家主导，综合技术实力强，供货与吊装均由其负责，能较好把控质量，避免后续质量扯皮。然而，该模式也存在诸多问题。主体施工单位负责的场内道路修整质量不佳，与风机厂家在主吊进出场及设备运输方面常因道路问题扯皮，延误工期；道路协调无统一牵头方，双方重复协调且“等靠”，导致阻工；风机厂家无施工总承包资质，与吊

装施工单位联合体投标时责任分界不清；风机厂家缺乏施工管理经验，所选施工单位资质低，应对阻工缺乏有效措施。

模式二，风机厂家负责砼塔段吊装，主体施工单位负责钢塔及风电机组吊装。优点是风机厂家选用专业队伍负责砼塔吊装，安装周期短、质量好，且砼塔供货与吊装统一，减少质量扯皮。但存在法律风险，如风机厂家无施工总承包资质采用分包方式；多单位多工序交接易因搭接问题导致窝工，需业主大量协调；风机厂家和主体施工单位重复道路协调增加造价。

模式三,主体施工单位负责砼塔、钢塔及风电机组吊装。其长处是施工责任边界清晰,主体施工单位多为大型单位,资质高、抗风险与协调能力强。不过,砼塔供货与吊装分属不同主体,出现质量缺陷如缺棱掉角、混凝土掉块、渗漏水等问题时,存在扯皮风险,且砼塔安装工艺复杂,对作业人员管控要求高。

### 2.3 吊装模式综合对比分析

在风电项目建设中,对不同施工模式从安全、质量、工期和造价四个关键维度展开对比,有助于全面评估各模式的适用性与优劣。

安全层面:已实施的项目均未遭遇安全风险。从吊装施工单位资质、综合实力,以及安全管控制度完善程度、措施费用投入等方面考量,模式三展现出更为卓越的安全管控水平。相较于模式一和模式二,模式三在安全保障体系构建上更为坚实,为项目施工安全奠定了良好基础。

质量维度:整体而言,各项目均未出现重大质量问题,不过部分项目砼塔存在掉块、渗水现象,这主要归因于砼塔生产环节质量把控欠佳,与吊装施工模式关联性较小。通过

综合分析各模式优缺点,模式一和模式二在吊装施工队伍选用上,更倾向于专业能力强、施工工序熟练的团队,并且质量验收由风机厂家或砼塔供应商严格把关,从而确保了较高的质量水准,在质量管控方面优于模式三。

工期视角:总体来看,模式三的平均单台机组吊装周期最短。然而,由于各项目所处环境各异,施工条件、吊装单位综合能力以及施工作业面安排均有所不同,这使得工期的横向对比存在一定的不确定性。结合各模式的优劣势,模式三在工期管控方面表现最为出色,模式二次之,模式一则相对较弱。

造价方面:鉴于招标时期不同,受市场价格波动影响较大,各项目投标报价存在差异,使得造价横向对比难度增加。从责任边界划分、工作搭接协调以及协调费计取次数等方面综合分析,模式三在造价控制上效果最佳,模式一次之。

三种风电机组吊装模式针对安全、质量、工期、造价方面的对比采用“0-4”评分法。安全、质量、工期、造价重要性系数均按0.25取值,综合评价结果如表4所示。

表4 三种风电机组吊装模式综合评分表

吊装模式	安全评分	质量评分	工期评分	造价评分	综合评分
	权重 0.25	权重 0.25	权重 0.25	权重 0.25	
模式一	3	5	1	4	3.35
模式二	3	5	4	1	3.25
模式三	6	2	7	7	5.50

根据综合评分结果,模式三的综合评分最高,既采用“主体施工单位负责砼塔、钢塔及风电机组吊装”的模式较优。

塔及风电机组吊装”的模式。为了慎重考虑,从以下几个方面进一步分析“模式三”的可行性,并给出合理性建议。

## 3 总结及建议

### 3.1 主流风机厂家、砼塔供应商意见

根据上述分析,推荐采用“主体施工单位负责砼塔、钢

#### 3.1.1 风机厂家意见

表5 主流风机厂商的意见

风机厂家	砼塔供货和安装分离是否可行	建议
厂家一	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。
厂家二	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。
厂家三	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。
厂家四	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。
厂家五	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。
厂家六	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。

## 3.1.2 砼塔供应商意见

表 6 主流砼塔供应商的意见

砼塔供应商	砼塔供货和安装分离是否可行	建议
供应商一	可行	建议由砼塔供应商负责砼塔段吊装施工。
供应商二	可行	主体施工单位或砼塔供应商负责吊装都可行。
供应商三	可行	建议由砼塔供应商负责砼塔段吊装施工。
供应商四	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。
供应商五	可行	建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。
供应商六	可行	主体施工单位或砼塔供应商负责吊装都可行。
供应商七	可行	主体施工单位或砼塔供应商负责吊装都可行。

综合风机厂家和砼塔供应商的意见,从技术层面“砼塔供货和安装分离”是可行的。从质量管控方面,部分砼塔供应商建议由砼塔供应单位负责砼塔段吊装施工。从施工组织方面,部分风机厂家强烈建议吊装由业主统一委托主体施工单位负责。

## 3.2 近期砼塔风机安全事故及原因分析

## 3.2.1 事故一

2022 年,某砼塔机组发生倒塔事故,砼塔吊装由风机厂家负责。

事故原因:叶片质量问题,叶片断裂后产生较大的不平衡载荷,导致风机倒塔。

## 3.2.2 事故二

2023 年,某砼塔机组发生倒塔事故,砼塔吊装施工由业主单独委托的吊装施工单位负责。

事故原因:主要为施工质量问题,张拉时导致砼塔受力结构破坏而倒塔。

事故一与风电机组吊装模式关系不大,事故二中风电机组吊装采用“模式三”,因砼塔施工质量问题而倒塔,因此采用“模式三”对砼塔施工质量控制方面存在一定的风险,需业主加强质量管控、制定针对性的质量监督管理措施。

## 3.3 结论及建议

综上所述,采用“主体施工单位负责砼塔、钢塔及风电机组吊装”的模式可行性分析如下:

(1) 随着风电行业砼塔技术发展,砼塔技术逐渐发展成熟,技术壁垒已经打破,风机厂家与砼塔供应商及吊装施工单位紧密性已经减弱,风机厂家、砼塔供应商、砼塔吊装施工单位已逐渐开始解绑。

(2) 风机厂家负责吊装施工的模式已经暴露出一些弊端,如风机厂家施工管理能力弱、选用的施工单位综合实力不强、协调能力差、联合体责任范围及工序搭接产生扯皮及

窝工等一系列问题。

(3) 部分项目建设人员、风机厂商强烈建议采用“主体施工单位负责砼塔、钢塔及风电机组吊装”的模式。

(4) 砼塔质量管控措施已逐渐成熟,如国家能源局 2021 年发布了《风电机组混凝土塔筒设计规范》(NB/T10907)、《风电机组混凝土-钢混合塔筒施工规范》(NB/T10908),风电砼塔的协会也已制定了相关标准。

结合行业发展方向及最近两起砼塔风机事故,并参考风机厂家、砼塔供应商、各项目相关人员意见,采用“主体施工单位负责砼塔、钢塔及风电机组吊装”的模式,建议如下:

(1) 做好培训工作,砼塔吊装前风机厂家与砼塔供应商联合制定砼塔安装手册,并对主体施工单位作业人员做好培训,考核合格后方可上岗。

(2) 加强技术交底工作,交底必须到作业人员,并且作业人员必须熟知并理解质量把控的风险要点。

(3) 提升施工过程质量监督,业主和监理要加强现场监督,必要时委托风机厂家或砼塔供应单位安排专业人员进行全程监督指导,并在风电机组采购合同中增加相关要求。

(4) 强化过程验收管理,砼塔张拉之前要进行砼塔验收,并取结构胶试块进行试验,张拉之后、运行之前均要进行砼塔验收。

(5) 做好砼塔到货验收,界定清楚砼塔保管责任,避免因交接、保管、安装时出现砼塔质量缺陷而产生扯皮问题。

(6) 砼塔节数较多,且需要在风机吊装平台拼装,吊装平台的临时租地需要考虑砼塔拼装占用面积,建议吊装平台的临时租地不小于 60m × 60m。

(7) 砼塔如果由风机厂家提供,考虑到砼塔厂家的垫资能力较弱,风机合同中应增加一定比例的砼塔投料款,便于砼塔供应商采购原材料,保证项目砼塔及时供货。

## 参考文献

- [1]NB/T 10908-2021, 风电机组混凝土-钢混合塔筒施工规范[S].  
 [2]NB/T 10907-2021, 风电机组混凝土-钢混合塔筒设计规范[S].