

混塔风电建设全过程质量管理

王启明

五凌电力有限公司新能源分公司 湖南 长沙 410004

摘要：混塔风电建设在当前能源转型中占据重要地位。本文探讨了混塔风电建设中的全过程质量管理问题，分析了设计、生产、安装及运维等环节存在的挑战，如技术标准不完善、生产质量控制难、安装安全风险大等。通过谨慎设计选型、建档立卡管理、标准化施工工艺、研发自动监测系统等措施，实现了混塔建设质量的显著提升。实践证明，该管理模式有效提高了施工效率，降低了成本，为后续混塔风电项目管理提供了宝贵经验。

关键词：混塔风电；建设全过程；质量管理

1 研究背景及意义

在我国能源转型和双碳目标的推动下，风电作为技术成熟、成本可控的可再生能源，已成为我国能源结构调整的核心方向之一。然而，随着优质风资源区（如“三北”地区）开发趋于饱和，中东南部等低风速区（年均风速5.5-6.5m/s）风资源开发成为趋势。在新能源电价逐步实行市场化的大背景下，降低项目建设成本，控制设备、建安成本成为行业焦点。项目为满足经济技术指标要求，大机型、高塔架是实现项目经济型的另一途径。提高塔架高度进而提高发电量，但传统钢塔在技术和经济性上难以满足要求。目前平原风电轮毂高度130m以上已成趋势，个别项目轮毂高度达185米，传统钢塔在运输、吊装和结构强度上面临瓶颈。在此背景下，风电混合塔架（简称“混塔”）因其经济性、高适应性及技术可行性，成为行业重点发展方向。

由于混塔技术应用近几年刚刚兴起，各设计单位及厂家按照各自的技术优势在推广使用，覆盖混塔设计、生产、安装、运维的“全过程质量管理”框架暂未形成统一的国家标准。覆盖设计、预制、吊装、运维全链条质量管理措施与做法是目前混塔风电项目急需解决的问题。

2 混塔风电建设质量管理存在问题

某风电项目作为公司第一批混塔风电项目，质量控制面临着严峻挑战。混塔的生产及安装工艺直接关系到整个混塔结构的安全性、稳定性和耐久性。为解决上述问题，确保混塔施工质量，项目部成立混塔施工质量管理小组，通过广泛实地调研，发现混塔设计、生产、安装过程中存在一些问题，主要包括：

（1）现阶段的混塔设计、安装等过程技术标准不完善。由于混塔的应用实践时间较短，可供参考的成熟案例并不多，行业内暂未形成成熟的混塔生产及应用标准，行业规范欠缺。加上各项目现场实际情况不尽相

同，导致各类型的混塔施工质量良莠不齐。

（2）管片生产质量控制难度大。由于混塔管片的砼强度高，钢筋密集，尺寸精度高，加上成熟的技术工人欠缺，往往导致管片生产合格率不理想。原材料的质量、砼的配合比、模具的刚度及稳定性、养护措施和方法、操作工人的技术能力是影响管片合格率的直接原因。强度不够、预埋件位置偏差、蜂窝麻面、气孔、裂缝等现象较多。

（3）管片安装安全质量风险大。混塔管片拼装及安装施工细节多、工艺复杂，技术要求较高。管片拼装时，定位、涂胶、紧固螺栓环节的技术精准度操作工人往往把握不够精准，容易造成管片开裂、错缝、错台或者拼缝不严密。高空作业过程存在安全质量监管盲区，混塔垂直度和水平度易产生偏差。作业现场人员多、设备多，起重作业、高空作业、交叉作业多，安全风险大^[1]。

（4）混塔运行安全监测及预警系统无相关成熟案例。行业仅要求开展预应力锚索索力监测，对混塔的振动、倾斜、裂缝等无明确监测要求，行业未建立统一规范的混塔运行安全监测预警系统。

3 解决方案

质量管理小组以该混塔风电项目为依托，认真分析研究各环节的质量控制难点并针对性的采取创新措施。设计谨慎选型，生产建档立卡，安装工艺标准化，运维监测自动化。做到对混塔设计选型、生产制造、施工安装、运行监测等全过程、全寿命周期的质量追本溯源和实时监测。

3.1 谨慎设计选型，控制源头

混塔风电设计选型的核心逻辑是“以项目条件为基础、以机组匹配为核心、以规范要求为底线、以全生命周期经济性为目标”。结合该风电项目地理环境、地质条件、交通运输条件。协同材料、施工、运维等多专业

因素。经多轮比选，最终项目确定免灌浆干式连接分片（四片）预制装配式钢-混组合塔架，有效解决了项目地质条件差、作业平台小、道路交通受限等难题。通过模具形式立模和卧模使用效果的实地调研，和两种模具在实际使用中的优缺点对比，在管片气孔、麻面、龟裂等表观质量控制上立模优于卧模。通过管片实际生产过程和拼装过程的观察，无倒角的管片在运输、安装过程中边角更易破损，建议制作管片模具时做倒角，以降低管片安装环节破损率^[2]。

3.2 管片生产建档立卡，建立“身份”信息

（1）严把管片生产“五关”大幅提升生产优良率。通过严把管片生产方案、原材料准入、工序验收、管片养护、出厂验收“五关”，做到“一片一档”，抓住混塔管片生产质量控制重点，解决管片生产质量不稳定、缺陷多、良莠不齐的难题。通过“五关”的严格控制措施，管片生产报废率降低1.3%。

（2）管片“身份”信息包括基础信息、原材料及构配件信息、预制生产过程记录、质量验收与试验信息、运输与安装信息、其他辅助信息等诸多关键元素。档案信息随管片全生命周期同步更新，确保可追溯性，为混塔的施工质量控制、运维及后期评估提供可靠依据。为后期运维自动监测功能实现奠定基础。

3.3 编制作业指导手册，施工工艺标准化

（1）优化提升混塔安装质量施工标准。研究分析设计单位施工工艺指导标准的合理性，发现不合理或者

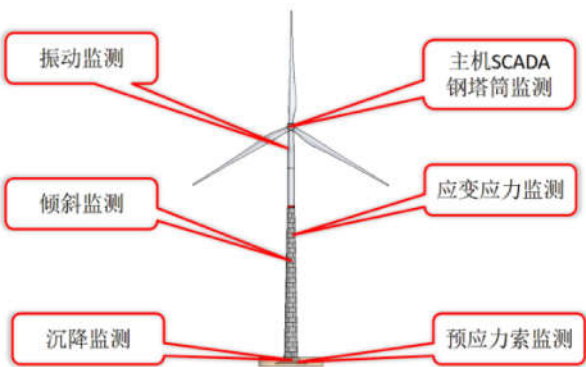
有必要提高标准时及时纠正，及时编制项目混塔安装工艺标准指导手册，便于形成统一的可操作的作业标准，指导现场操作工人工作标准。塔节水平度和垂直度指标是混塔安装质量控制要点，为确保混塔安装质量指标，增加塔节吊装垂直度测量频次，将垂直度测量频次由每5环一次提升至每环一次，水平度做到每环必测。安装工艺质量效果明显提升，塔节安装垂直度偏差由行标的H/1200提升至H/2000，水平度偏差由设计限值5mm提升至3mm^[3]。

（2）通过工艺标准化，提高了工人的施工效率，混塔的安装施工周期由行业的10天，降低到8天，平均每台节约工期2天。

3.4 研发自动监测系统，实现早期预警维护

研究实施全面的混塔运行安全监测。在行业内无成熟案例可借鉴的情况下，经过研究讨论，确定并实施了全面的混塔运行期安全监测方案，对混塔关键部位安装相应的传感器，使混塔运行期间的各项关键指标都能进行实时监测，为长期安全稳定运行提供技术支撑。

混塔风机的安全自动监测系统，结合结构整体响应监测（基础沉降、塔架振动、倾斜）与局部响应监测（索力、应力应变、拼缝开合度），并融合无人机定期巡检技术，实现了对混塔全寿命周期的状态评估与预警。系统通过多源传感器网络、混合数据传输方案及智能分析平台，显著提升混塔风机的安全运维效率。



混塔运行安全监测系统及仪器布置情况

3.5 组织管理措施

（1）创新混塔项目施工组织管理方式。团队改善以往粗犷的安装管理模式，针对混塔安装施工细节多、工艺复杂问题。混塔施工现场管理采用“一机一小组”、“一队一交底”、“一环一验收”、“一平台一监理”等安全质量管理实时监督管理措施，同时聘请专业的混

塔吊装监理团队对管片的拼装和吊装质量高空旁站监督。并将涂胶、定位、测量关键指标留存影像记录，进行精准把控，将各级安全质量管理要求落到实处^[4]。

（2）编制混塔建设企业标准。依托项目管理实践，组织编制了混塔风电项目设计选型技术指引、混塔管片生产技术规程、出厂验收规程、施工技术规程等企业标

准，解决了行业标准技术要求不完善的痛点，为项目建设管理人员提供了明确的依据和指南，促进了混塔项目高质量建设。

4 主要成效

4.1 技术成效

(1) 将塔节安装垂直度偏差由行标的H/1200提升至H/2000，水平度偏差由设计限值5mm提升至3mm。

(2) 混塔管片拼装一次合格率高达99.53%，管片破损报废率降低1.3%。

(3) 缩短混塔安装周期，该混塔安装平均时长为8天，较行业平均10天缩短2天。

4.2 经济效益

通过管理创新提高管片生产和施工合格率，提升施工效率，节约混塔施工工期，混塔单台施工时间从10天缩短至8天，降低了设备租赁费、人工费等施工费用。创新管理降本增效作用明显，项目节约成本477.68万元，提前发电增收102.99万元。

4.3 管理成效

(1) 建立了一套混塔管理模式。建立了一套覆盖选型设计、生产质量控制、施工管理的混塔项目建设管理模式，为后续混塔项目管理创建了样板，树立了标杆。

(2) 编制了一套混塔企业标准。依托混塔项目建设管理实践，编制了混塔管片选型、生产、验收、施工企

业标准，并主编集团混塔建设手册，为公司、集团混塔风电项目施工提供了技术参考。

(3) 获得了多项荣誉。该项目“风电混塔吊装质量控制”获得2024年湖南省优秀质量管理小组活动一等奖，“混凝土-钢混合塔筒风电项目建设全过程质量管理创新”获第二届全国电力行业工程建设管理创新成果特等奖。

结语

该风电项目作为公司旗下首个混塔风电项目，亦是湖南省内首个规模化混塔风电工程，其成功建成不仅填补了区域技术空白，更以系统性的管理创新与实践突破，成为湖南平原低风速区域风电开发的标杆范例，为后续类似项目的开发建设积累了宝贵经验。

参考文献

[1]傅玲,洪海.浅析风电建设工程管理措施探究[J].电力工业设计,2020,(05):57-59.

[2]侯涛.风电建设管理中的问题与应对策略[J].华北电力大学,2022,(12):136-137.

[3]曾亮宏.风电项目施工质量控制策略分析[J].大众标准化,2024,(03):41-43.

[4]邹元杰.探究风力发电工程项目的施工现场管理[J].电气技术与经济,2024,(08):312-314.