

钢混组合塔架风力发电机组混塔段安装垂直度控制关键技术的研究

黎 龙

西北水利水电工程有限责任公司 陕西 西安 710000

摘 要：本文聚焦钢混组合塔架风力发电机组混塔段安装垂直度控制关键技术，系统分析吊装对位、拼接连接、预应力张拉及环境干扰等核心影响因素，研究全站仪激光投点、动态纠偏等技术路径，提出全过程精度控制与误差补偿方案。经工程验证，该技术可将单段垂直度偏差控制在1‰以内，整塔累计偏差满足H/1000规范要求，提升机组运行稳定性与结构安全性，为风电混塔工程高质量安装提供技术支撑。

关键词：钢混组合塔架；风力发电机组；混塔段；安装垂直度；控制关键技术

引言：随着陆上风电单机容量向5MW+升级、塔筒高度突破120米，钢混组合塔架因兼具运输便捷、成本可控与刚度优异的优势，成为风电工程主流选型。但混塔段多节拼装、高空作业频繁、钢-混界面受力复杂，导致垂直度控制面临累积误差大、风载变形敏感等挑战，直接影响机组载荷分布与长期运行安全，亟需构建精准、可复制的管控体系，保障混塔安装质量与风电项目运维效益。

1 钢混组合塔架风力发电机组混塔段安装相关基础理论

1.1 钢混组合塔架混塔段结构特性

(1) 混塔段结构组成：混塔段主要由下部混凝土段、上部钢塔段及过渡段构成，形成上下衔接的一体化结构。其中混凝土段多采用预制管片装配式拼接，施工便捷且质量可控；钢塔段与混凝土段通过法兰连接，配合预应力锚固增强连接可靠性。各部件材料特性差异显著，混凝土段具备良好的抗压性能，钢塔段则抗拉、抗剪性能优异，二者协同作用满足风机运行的力学需求。(2) 混塔段受力特点：混塔段在吊装、安装及运行全流程承受多种载荷，包括自重、风载荷等稳定载荷，以及风机运行产生的循环载荷。垂直度偏差会改变结构受力分布，导致局部应力集中，影响结构稳定性和使用寿命，为后续垂直度控制指标的合理设定提供了核心理论支撑。

1.2 混塔段安装工艺流程

(1) 前期准备阶段：核心流程包括基础验收、场地处理、吊装设备选型与调试、混塔段构件进场检验。其中基础平整度直接影响底段安装精度，吊装设备性能需匹配构件重量，构件进场需严格检验尺寸偏差和外观质量，为垂直度控制奠定基础。(2) 核心安装阶段：按底段、中段、顶段顺序开展吊装、对接与固定，关键工序

包括预制管片精准拼接、法兰密封对接、预应力张拉。各工序需严格遵循操作规范，控制对接间隙和张拉力度，避免因工序偏差导致垂直度超标。(3) 收尾阶段：重点完成垂直度最终检测、偏差修正及防腐处理，采用专业仪器检测整体及单段垂直度，对超标偏差及时调整，防腐处理则保障结构长期抗腐蚀能力，确保安装质量符合标准^[1]。

1.3 垂直度控制相关标准与指标

(1) 相关标准规范：梳理《混凝土结构工程施工质量验收规范》《建筑变形测量规范》等国内外标准，明确混塔段垂直度需采用高精度仪器检测，规定检测频次和方法，明确不同高度混塔段的允许偏差范围。(2) 垂直度控制指标：结合混塔段结构高度、受力特性及风机运行要求，确定核心控制指标：单段垂直度偏差 $\leq 1‰$ ，整体垂直度偏差 $\leq H/1000$ (H为混塔段总高)。该指标既兼顾结构力学安全，又符合工程实践可行性，为安装质量控制提供明确依据。

2 钢混组合塔架风力发电机组混塔段安装垂直度影响因素分析

2.1 构件自身质量因素

(1) 预制构件精度偏差：混凝土管片的尺寸偏差、平整度偏差，钢构件的加工精度不足，是导致混塔段垂直度超标的基础诱因。混凝土管片若存在边长、厚度偏差，或端面平整度未达规范要求，装配式拼接后会形成整体几何错位；钢塔段构件加工时出现焊缝变形、法兰面倾斜，会直接破坏连接面的水平度，使得各部件拼接后无法形成垂直轴线，累计误差最终影响混塔段整体垂直度。(2) 构件损伤与变形：混塔段构件在运输、堆放过程中，易因吊装碰撞、堆载不均出现局部磕碰损伤、

弯曲变形；混凝土段养护阶段若养护不到位，易产生收缩裂缝、不均匀沉降变形，破坏构件原有垂直几何形态。这种先天形态缺陷会传递至安装环节，即使后续施工操作规范，也难以修正构件自身的变形偏差，进而引发垂直度超标。

2.2 施工工艺因素

(1) 吊装工艺偏差：吊装设备选型与混塔段重量、高度不匹配，会导致起吊过程中设备稳定性不足；吊点设置偏离构件重心，易使混塔段起吊后发生倾斜、晃动；吊装速度控制不当，过快的起升或移动会加剧构件摆动，难以精准对位，直接造成单段吊装垂直度偏差，为后续整体安装埋下隐患。(2) 对接与固定工艺：法兰连接时，密封胶涂抹不均会导致连接面受力不均，螺栓紧固力度不足或单侧紧固易引发连接面松动、偏移；管片拼接时座浆料密实度不够，会降低拼接结构的整体性，导致对接处出现缝隙位移；临时支撑设置不牢固，无法有效限制安装过程中构件的晃动，均会使混塔段安装后位置偏离垂直轴线，影响垂直度。(3) 预应力张拉影响：预应力钢绞线张拉力度偏差，过大或过小的张拉值会导致混塔段结构产生不均匀压缩或拉伸；张拉顺序不合理，会使构件各部位受力不均，引发局部变形，进而破坏混塔段的垂直轴线，尤其是过渡段和下部混凝土段，这种变形易导致整体垂直度超标。

2.3 环境与设备因素

(1) 环境因素：施工现场风速是吊装作业的关键影响因素，当风速超过8m/s时，风荷载会对起吊中的混塔段产生明显晃动，难以控制其空间位置，导致吊装对位偏差；温度变化引发构件热胀冷缩，尤其是大高度混塔段，不同部位温差会导致构件伸缩量不一致，产生相对变形，破坏原有垂直形态，影响垂直度。(2) 设备因素：检测设备（全站仪、激光测平仪等）精度不足，无法精准捕捉混塔段垂直度偏差数据；设备未及时校准，会导致检测结果存在系统误差，无法真实反映实际偏差；吊装设备运行不稳定，如卷扬机卡顿、支腿沉降，会使吊装过程中混塔段位置持续偏移，进而影响安装垂直度^[2]。

2.4 人为操作因素

(1) 操作人员技能不足：施工人员对吊装、对接、检测等核心工序操作不熟练，缺乏专业培训，无法精准把控吊装速度、吊点位置、螺栓紧固力度等关键参数；对垂直度偏差的识别能力不足，易在操作中出现失误，直接导致垂直度偏差产生。(2) 现场管理不到位：施工过程中缺乏完善的质量管控体系，工序交接检查不严格，未在吊装、对接、张拉等关键工序节点开展垂直度实时

检测；对发现的偏差未及时采取纠正措施，导致微小偏差逐步累积，最终超出规范允许范围，影响混塔段整体安装垂直度。

3 钢混组合塔架风力发电机组混塔段安装垂直度控制关键技术研发

3.1 构件预制与进场质量控制技术

(1) 预制构件精度控制：针对混凝土管片、钢构件预制精度偏差问题，优化预制工艺，建立全流程精度管控体系。混凝土管片预制时，强化模具设计与验收，采用高精度钢模，安装后严格检测垂直度、平整度，杜绝模具变形引发的偏差；首件完成后，全面检测尺寸、厚度、端面平整度等关键参数，合格后批量生产，批量生产中每批次随机抽检复检，及时调整工艺参数。钢构件加工优化焊接工艺，采用自动焊接设备减少焊缝变形，加工后打磨法兰面、连接面，严控加工精度，确保尺寸偏差、平整度符合设计及规范要求，从源头减少垂直度偏差隐患^[3]。(2) 构件进场检验与处理：建立严格的进场检验制度，明确检验流程、标准及责任分工，杜绝不合格构件入场。构件进场后，专业检测人员采用全站仪、激光测平仪等设备，全面检测尺寸、外观、力学性能，重点检查混凝土管片拼接面、钢构件法兰连接面，排查尺寸偏差、磕碰损伤、变形、裂缝等问题。轻微损伤、变形构件经专业修复后重新检测，合格方可使用；损伤严重、无法修复、力学性能不达标或尺寸偏差超标的构件，坚决报废，从源头保障混塔段安装垂直度的基础质量。

3.2 吊装过程垂直度精准控制技术

(1) 吊装方案优化：结合混塔段的重量、高度、结构特性及施工现场环境，进行吊装方案专项设计与优化，确保吊装过程的稳定性和精准度。合理选型吊装设备，根据混塔段单段重量及吊装高度，选用额定起重量符合要求、稳定性良好的吊装设备，避免设备选型不合理导致的吊装偏差；优化吊点设置，通过受力计算确定吊点位置，确保吊点与构件重心重合，减少起吊过程中的倾斜，同时采用“主吊+副吊”协同吊装方式，主吊负责起升构件，副吊辅助调整构件姿态，控制吊装速度，匀速起升、缓慢移动，避免速度过快引发构件晃动，减少吊装过程中的垂直度偏差，确保构件精准对位。(2) 吊装过程动态监测：研发吊装过程动态监测系统，利用无人机、360°全景摄像头配合风速仪，实现吊装全过程的实时监测与预警。无人机搭载高清摄像头，从空中实时捕捉混塔段的吊装姿态，精准识别构件倾斜角度；360°全景摄像头覆盖施工现场，实时监控吊装设备运行状态及构件对接情况；风速仪实时监测现场风速，设定8m/s为预警值，当

风速接近预警值时,系统自动发出预警信号,操作人员及时暂停吊装作业,待风速降至安全范围后再恢复作业,有效避免风力导致的构件晃动,保障吊装过程中混塔段的垂直度^[4]。

3.3 对接与固定阶段垂直度修正技术

(1) 精准对接技术:研发混塔段精准对接技术,采用三维定位技术与激光校准技术相结合的方式,实现法兰面的精准对位。对接前,利用三维定位系统精准定位构件位置,调整构件姿态,确保上下段混塔段的轴线重合;采用激光校准仪对法兰连接面进行实时校准,控制法兰间隙 $\leq 0.5\text{mm}$,间隙均匀一致。法兰对接时,涂抹连续饱满的密封胶,确保密封效果的同时,增强连接面的整体性;高强螺栓紧固采用对称同步原则,按照预设扭矩分步紧固,避免单侧紧固导致的法兰面倾斜,确保对接质量,减少对接过程中的垂直度偏差^[5]。(2) 偏差实时修正:建立对接过程垂直度实时检测与修正机制,利用全站仪、激光雷达等高精度检测设备,实时检测对接过程中混塔段的单段垂直度与轴线偏差,检测数据实时传输至控制终端,便于操作人员及时掌握偏差情况。针对检测中发现的偏差超标的部位,精准分析偏差原因,采用调整临时支撑高度、补浇座浆料、微调螺栓紧固力度等方式进行实时修正,避免微小偏差逐步累积,确保每一段混塔段对接完成后,垂直度均符合控制指标,为整体垂直度控制奠定基础。

3.4 垂直度检测与全过程管控技术

(1) 多维度检测技术:研发混塔段垂直度多维度检测技术,结合全站仪全场检测与激光测平仪局部检测,实现单段垂直度与整体垂直度的全面、精准检测。全站仪用于混塔段整体垂直度检测,通过多点测量、数据拟合,精准计算整体垂直度偏差,确保检测范围覆盖整个混塔段;激光测平仪用于局部垂直度检测,重点检测法兰连接面、管片拼接处等关键部位的局部偏差,弥补全站仪检测的细节盲区。检测操作严格遵循《混凝土结构

工程施工质量验收规范》《建筑变形测量规范》等相关标准,规范检测流程,确保检测数据精准、可靠,为垂直度控制提供数据支撑。(2) 全过程管控体系:建立“事前预防、事中控制、事后验收”的全过程垂直度管控体系,明确各工序的质量控制点、控制标准及责任分工。事前预防阶段,重点做好构件预制、进场检验、吊装方案优化等工作,从源头规避垂直度偏差隐患;事中控制阶段,加强吊装、对接、固定等关键工序的实时监测与偏差修正,做好工序交接检查,上一道工序垂直度合格后方可进入下一道工序;事后验收阶段,对混塔段整体垂直度进行全面检测,验收合格后出具检测报告,确保混塔段安装垂直度符合设计及规范要求,实现全过程、全方位的垂直度管控。

结束语

本研究验证了全站仪激光测量、动态纠偏、环缝精准灌浆等关键技术的有效性,形成混塔段安装垂直度全过程控制体系,实现单段偏差 $\leq 1\%$ 、整塔偏差 $\leq H/1000$ 的目标,满足现行规范与工程验收要求。该技术有效解决多节拼装累积误差等痛点,提升塔架稳定性与机组可靠性。未来需结合智能监测技术,推动垂直度控制向实时化、智能化升级,为风电混塔工程高质量发展提供更完善支撑。

参考文献

- [1]赵勇,周峰池.风电场风力发电机组塔架基础设计分析[J].电力系统及自动化,2023,18(2):86-89.
- [2]朱东,吕伟荣.频率法在风电机组混塔预应力索索力检测中的可行性分析[J].四川水泥,2024,5(12):43-45.
- [3]张振利,贾克勤.基于频率法的风电机组混塔索力识别影响因素分析[J].风能,2024,13(9):68-72.
- [4]肖厚全,高汇川.风电机组混塔施工技术与风险管控[J].风能,2024,20(1):84-89.
- [5]李建刚,宋强,刘利.混合塔架风力发电机组基础预应力管道安装技术研究[J].建筑科学,2024,(9):143-146.