

风机混塔钢混结合段吊装工艺优化分析

范银虎

中电建宁夏工程有限公司 宁夏 银川 750001

【摘要】：风机混塔钢混结合段承担上下结构转换及荷载传递任务，构件重量大、接口精度高，吊装中易出现吊点受力差异、空中姿态偏移、法兰对位困难及高调整时间偏长等问题。采用吊点受力校核、专用吊具配置、起吊路径细化、姿态同步调节及测量定位协同控制，减少构件摆动和接口偏差。工艺优化后，就位精度、吊装稳定性及工序衔接效率得到提升，高空二次调整量明显降低，为混塔关键转换段施工提供可靠技术路径。

【关键词】：风机混塔；钢混结合段；吊装工艺；姿态控制；精准就位

DOI:10.12417/2705-0998.26.12.026

引言

大型风电机组不断向高塔筒、大容量方向发展，钢混组合塔筒逐渐承担更高的结构荷载，位于混凝土塔段和钢塔段之间的钢混结合段也成为安装控制中的关键节点。该构件自重大、吊装高度高，连接法兰、预埋件及轴线位置均有较严格的安装精度要求，一旦起吊姿态、吊点受力或落位控制出现偏差，高空找正时间便会增加，甚至影响后续钢塔筒连接质量。施工控制由单纯完成起吊转向受力、姿态、路径、定位协同优化，可使吊装过程从经验操作转变为参数化精细控制。

1 风机混塔钢混结合段吊装技术控制特征

1.1 钢混转换构件结构荷载特性

钢混结合段处于混凝土塔筒向钢塔筒过渡的受力转换位置，吊装阶段不仅承受构件自重，还受到起升加速度、吊索夹角变化、偏心受力及瞬时风荷载共同影响。构件内部通常集成钢制连接件、法兰、锚固构造及局部加强结构，质量分布并非完全均匀，重心偏差会直接改变各吊点受力比例。吊装工艺设计需依据构件实际重心重新校核吊耳位置、索具长度及吊索受力，控制局部应力集中，避免起吊后产生倾斜、扭转或连接区域变形。数字化建模与吊装受力模拟可提前识别高应力区，使吊点布置由经验判断转向参数校核，提高重型转换构件起升过程的可控程度。

1.2 大吨位高空起吊作业条件

钢混结合段吊装具有起重量大、作业半径长、安装标高高的特征，主吊设备额定能力并不能直接等同于实际可用起重量，臂长、工作幅度、吊钩重量、索具重量及现场风速均会压缩安全作业余量。起升过程中，构件离地、变幅、回转、升高和接近塔顶属于不同风险区段，各阶段对吊车动作速度和构件稳定性的要求存在明显差异^[1]。现场控制应将吊装路径拆分为若干受控区间，对回转半径、起升速度、停顿位置和溜绳方向进行预设，同时接入风速、幅度、载荷等实时数据。通过设备工况监测和分级动作控制，减少大吨位构件高空摆幅，降低频繁微调对吊装效率和机械稳定性的影响。

1.3 连接界面安装精度控制要求

钢混结合段最终就位质量取决于中心轴线、标高、法兰水平度及连接孔位的同步匹配，单一尺寸合格并不能保证上下结构顺利衔接。混凝土塔段施工形成的累计偏差会传递至转换接口，钢构件制造误差、运输变形和吊装姿态偏移又可能叠加，使法兰接触面出现局部间隙或螺栓孔错位。吊装前需建立统一测量基准，对塔筒中心、法兰标高、预埋连接件坐标实施复核；构件接近安装面后，应采用全站仪、激光测量或数字化定位数据持续修正平面偏差和倾斜角度。精准吊装不再依赖落位后的反复撬动找正，而是把误差控制前移至起吊、姿态调整和缓慢落位阶段，减少高空二次校正及结构接口附加受力。

2 钢混结合段吊装关键环节偏差成因

2.1 吊点配置不合理引起受力失衡

吊点位置偏离构件实际重心，容易使多根吊索受力差异扩大，局部吊耳承载接近设计上限，构件起吊后出现一侧先离地、整体倾斜或轻微扭转。钢混结合段自重较大，内部钢构件、法兰及加强区域质量分布存在差异，仅按几何中心布置吊点难以保证受力均衡。索具长度误差、夹角设置不当还会进一步放大水平分力，使吊耳、连接板及局部焊缝产生附加应力，导致后续姿态调整频繁。

2.2 起升过程姿态变化造成构件摆动

起升阶段的构件摆动并非单纯由风荷载引起，吊钩加速、回转启停、变幅速度变化及吊索张力重新分配均会改变钢混结合段空间姿态。构件离地后具有较大的惯性，若起升速度控制不连续，微小偏摆会在高空被持续放大；回转与提升动作重叠时，构件还可能形成横摆和扭摆叠加^[2]。高塔筒作业区风场更不稳定，阵风作用下迎风面积产生瞬时侧向力，使溜绳控制难度增加，直接影响接近安装标高后的稳定停靠。

2.3 接口定位误差增加高空找正难度

接口定位偏差主要来自塔筒中心线、法兰标高、孔位坐标及构件倾斜度之间的累计误差。混凝土塔段施工偏差若未提前复测，钢混结合段进入安装面后容易出现中心偏移、法兰接触

不均或螺栓孔无法同步对应。高空状态下构件仍由主吊承载，可调整空间有限，单纯依靠撬动、牵引或反复起落修正，不仅延长吊车占用时间，也容易造成法兰边缘碰撞。测量基准不统一、定位信息传递滞后，还会使吊装指令与实际偏差方向不一致。

3 钢混结合段吊装工艺参数优化设计

3.1 吊点位置校核及专用吊具匹配

吊点位置确定不能仅依据构件外形尺寸进行等距布置，应结合钢混结合段实际重量、重心坐标、吊耳承载能力及吊索夹角进行联合校核。吊装前可依据深化模型提取构件质量分布参数，对各吊点理论受力进行计算，并将吊索水平分力、动态放大系数及偏载因素纳入验算范围，避免局部吊耳超载。专用吊具宜采用平衡梁或可调式吊梁，通过调节吊索长度和连接孔位，使吊钩投影尽量接近构件重心轴线，减小起吊初始倾角。吊具选型还需兼顾吊装净空、钢丝绳弯曲半径和连接卸扣额定载荷，关键受力节点设置防扭转构造。数字化吊装方案可提前模拟不同吊点组合下的构件姿态变化，使吊点布置、吊索长度和吊具尺寸形成可计算、可复核的参数体系。

3.2 起升路径分级控制及速度参数设定

起升路径应根据构件离地、垂直提升、回转变幅、接近安装面和缓慢落位等不同阶段分别设定控制参数，避免全程采用单一速度造成惯性累积。构件离地初期宜低速起钩，使吊索逐步张紧并完成受力复核；进入稳定提升区后，可在主机允许工况内提高起升速度，但回转和变幅动作不宜同时大幅进行^[3]。接近塔顶安装标高后，应降低起升速度，缩小单次动作幅度，将吊钩位移控制由米级转向厘米级。路径设计还需避开塔筒外壁、临时平台及其他突出结构，提前确定回转角度、停钩位置和二次调整区间。通过吊装仿真、风速监测及主机载荷数据联动，可对不同阶段的速度上限进行动态修正，使吊装过程由连续粗放操作转为分区、分速、分级控制。

3.3 构件姿态实时调节及稳定控制

构件姿态控制应贯穿离地、提升、回转和落位全过程，重点限制倾斜角、水平偏移和绕竖向轴线的扭转幅度。钢混结合段起吊后可通过可调吊索、溜绳及辅助牵引装置形成多方向约束，使构件在空中保持接近设计安装姿态。姿态调整不宜依赖人工目测判断，可结合倾角传感器、全站仪或激光测量数据实时获取构件偏斜量，当倾角或轴线偏移超过控制阈值时，及时修正吊索长度、牵引方向及主吊动作。高空接近安装面阶段应降低构件运动速度，避免回转惯性与阵风共同作用产生二次摆动；必要时通过对称牵引限制横向位移。姿态数据、吊机工况和风速信息统一纳入现场监控界面，可减少指挥信息滞后，使构件稳定控制由经验判断转向实时数据驱动。

4 钢混结合段精准就位施工控制方法

4.1 测量基准复核及空间坐标定位

测量控制应从钢混结合段起吊前延伸至最终固定阶段，将塔筒中心轴线、混凝土顶面标高、连接法兰水平度及预埋连接点坐标纳入同一空间基准体系。起吊前利用全站仪复测下部塔段中心坐标和控制点高程，对施工累计偏差进行数据化修正，同时检测钢混结合段底部法兰直径、孔位分布、端面平整度及构件中心位置，防止土建施工误差与钢结构制造误差直接叠加。构件提升至安装标高附近后，通过不少于两个方向的测量控制点连续观测轴线偏移量和高程变化，将空间位置转换为可直接执行的水平修正量、垂直修正量及旋转角度。接近接口时缩短测量反馈周期，以毫米级定位数据指导吊钩微动和牵引调整。数字化测量记录同步关联构件编号、测点坐标及复核结果，可形成吊装定位数据链，避免多套基准转换产生累计误差，为后续法兰精确对接提供稳定坐标依据。

4.2 法兰接口导向及落位顺序控制

法兰接口进入对接区后，控制重点应由整体空间移动转向孔位对应、端面接触及荷载平稳转移。落位前清理上下法兰接触面，对连接孔、定位孔及导向构件进行复查，并依据预先标记的基准方位调整钢混结合段旋转角度，使关键定位孔优先接近设计位置。构件下降至接口上方一定距离后停止大幅回转，利用导向销或专用定位装置限制水平窜动，通过小行程起落配合牵引完成周向修正，避免法兰边缘直接碰撞。落位过程采用分阶段下降方式，先完成基准孔导入，再逐步校正对称位置连接孔，确认端面间隙均匀后继续缓慢下放，使构件自重逐渐传递至支承界面^[4]。螺栓连接不宜利用强制紧固纠正较大孔位偏差，应先消除轴线和角度误差，再按对称、分级方式实施初拧。法兰接触状态、中心偏差及水平度满足控制值后方可解除主吊载荷，减少局部先受力造成的接口变形。

4.3 吊装指挥协同及工序衔接管理

吊装指挥需要把起重机械操作、测量反馈、构件牵引、接口找正和螺栓连接纳入统一作业节拍，避免多工种同时发出调整指令造成动作冲突。主指挥应保持唯一指令出口，测量岗位负责提供偏差方向及修正量，吊机操作端按照标准化指令完成起升、下降、回转和变幅，接口作业端只反馈孔位、间隙及接触状态，不直接改变吊机动作。钢混结合段进入塔顶精调区域后，可将施工过程划分为悬停复测、方向校正、导向进入、缓慢落位、连接固定和卸载复核等连续工序，每一节点设置明确的转换条件，上一环节数据未确认不得进入下一操作。风速、吊机载荷、构件倾角和测量偏差等信息宜集中显示，使现场指令建立在同一数据状态上。螺栓初步固定后仍需保持吊机适度承载，待连接体系达到规定稳定状态再逐级卸载，并同步复测轴线及法兰水平度，防止载荷转移过程中产生新的位置偏移。

5 优化吊装工艺实施效果评价

5.1 构件就位偏差控制效果

优化后的吊装工艺将偏差控制由落位后的被动修正转移到起吊、悬停、对位和卸载多个节点，钢混结合段中心轴线、法兰水平度及孔位对应精度得到同步改善。吊点受力校核降低了初始倾斜量，空间坐标复测减少了土建累计误差对接口位置的传递，导向装置则压缩了构件接近安装面后的横向窜动范围。定位数据连续反馈后，构件姿态调整由经验判断转为量化修正，法兰接触面受力更均匀，孔位错动幅度明显减小，连接螺栓能够按既定顺序完成穿装和初拧。偏差控制结果不仅体现在最终测量值收敛，还反映为二次起落次数减少、接口碰撞概率下降和卸载后的回弹偏移减弱。

5.2 高空调整工时压缩效果

高空调整时间的缩短主要来自前置校核、分级落位和实时测量三类工序的重新组织。构件进入安装区域前，重心、吊索长度、基准方位和接口坐标已完成复核，减少了到达塔顶后重新判断姿态和寻找孔位的时间消耗。落位阶段采用小行程下降配合连续测量，能够直接依据偏差量完成微调，避免频繁起钩、回转和重复悬停^[5]。法兰孔位通过导向措施逐步进入设计位置后，传统依赖撬动、强制牵引和反复试装的操作明显减少，吊车有效占用时间同步压缩。工序衔接更加紧凑后，测量、牵引、

找正和连接不再相互等待，高空人员暴露时间随之降低，也减轻了长时间占用大型起重设备造成的施工组织压力。

5.3 吊装稳定性及施工效率评价

吊装稳定性可从构件摆幅、姿态变化频率、吊机载荷波动和接口调整次数等指标进行评价。采用分级速度控制后，起升和回转过程中的惯性冲击减弱，构件横摆、扭摆更容易保持在可控范围；实时风速和载荷数据参与作业判断，使高空吊装能够根据现场工况及时调整动作节奏。专用吊具和对称牵引降低了单侧受力突变，吊机工作状态趋于平稳，构件接近塔顶后的悬停时间也随之减少。施工效率提升并非单纯追求吊装速度，而是通过减少无效动作、返工次数和接口等待形成更稳定的节拍。数字化监测、标准化指挥及节点化验收结合后，单次吊装过程具有更强的可复制性和参数追溯能力，为同类型混塔施工形成连续化工艺控制基础。

6 结语

风机混塔钢混结合段吊装质量受构件受力、起升姿态、接口定位及工序协同共同制约。优化吊点配置、起升参数、空间定位和精准落位控制，可降低构件摆动及高空调整频次，改善法兰对接精度，压缩大型起重设备占用时间，使吊装过程向精细化、数字化和高效化方向转变。

参考文献：

- [1] 张振利,马会超,李双宝,等.混塔风机在地震作用下的抗灾性能分析[J].防灾减灾学报,2025,41(4):133-143.
- [2] 付煜.混塔风机塔身初始缺陷演化及其对塔体结构动力响应的影响研究[D].大连理工大学,2025.
- [3] 夏元.首批“重庆造”混塔风机稳定运行超7万个小时[N].重庆日报,2025-05-25(003).
- [4] 白彤阳.钢混结合段钢格室自密实混凝土浇筑数值模拟研究[D].南昌大学,2025.
- [5] 于祥坤.跨钢-混凝土混合梁钢混结合段吊装固定及精确定位施工工艺[J].科学技术创新,2022,(12):95-98.