

# 水下液压打桩锤在海上升压站 基础桩沉桩中的应用

贺明熹

(中国三峡新能源(集团)股份有限公司辽宁分公司)

**摘要:** 为了适应海上升压站在远海海域施工,在三峡大连市庄河 V 海上风电场项目采用了后桩法导管架基础应用 IHC S-1800 水下液压打桩锤的无送桩器沉桩工艺,通过动态能量分级控制、多源融合定位技术及溜桩智能预警系统,顺利完成了海上升压站基础施工,相比于传统水下桩利用送桩器的方式,实现了桩身最大应力 99.4 MPa(仅为设计值的 43%),贯入度控制精度达 $\pm 2$  cm,桩位偏差控制在 2 cm 以内,优于行业标准,缩短了项目工期 22 d,提升了整体经济效益 1 200 万元,验证了其可行性和优势。

**关键词:** 海上升压站;水下沉桩;液压打桩锤;无送桩器工艺

## 0 引言

海上升压站作为海上风电场的重要组成部分,其建设质量和效率直接关系到整个风电场的运行效果。随着海上风电施工海域离岸距离越来越远,水深不断加深,对海上升压站基础施工的要求也越来越高。导管架基础桩作为升压站的主要承重结构,其沉桩施工的质量直接影响基础桩的稳固程度,直接决定了海上升压站在复杂海洋环境下的安全性与可靠性。由于海洋环境复杂多变,受到海浪、潮汐、海流以及海底地质条件等多种因素的综合影响,沉桩施工难度极大。传统的打桩方法在面对这些复杂条件时,往往存在效率低下、精度难以保证等问题,且对海洋环境的影响较大。而水下液压打桩锤的出现,为解决这些难题提供了新的有效途径。

结合三峡大连市庄河 V 海上风电场项目特点,在沉桩施工时采用了水下液压打桩锤工艺,该工艺具有高效、精准、环保的特点。通过对其应用效果的评估与分析,为未来海上风电项目的设计与施工提供了经验借鉴。

## 1 工程概况

大连市庄河海上风电场址 V 项目位于辽宁省大连市庄河市,项目总装机容量 250 MW,包含 28 台风机基础和 1 座海上升压站。风电场场址中心距离岸线约 32 km,水深 27~28 m。升压站下部导管架基础包含桩基础和导管架结构,导管架结

构为导管架+裙桩基础形式。导管架包括 4 根直径 1.5~1.8 m 的钢管,用直径为 1.00 m 横撑、斜撑连成空间桁架结构。导管架基础长 30.66 m,宽 24.66 m,高 40.30 m。桩基础为 4 根直径 2.4~2.8 m 的钢管桩,壁厚为 40~50 mm,桩长 56.55 m,桩顶面高程-11.75 m,入泥 41m,钢管桩与导管架裙桩套管之间采用灌浆连接,每个裙桩套筒外侧设置灌浆管。

本项目采用 IHC S-1800 液压冲击锤进行施工,该锤最大打击能量 1 800 kJ,最小锤击能量 198 kJ。液压锤液压缸、蓄能器和控制阀在密闭的锤帽内,保护性好,使其具备水下沉桩功能,在打水桩时不易发生管线、电缆缠绕挂碰等故障。使用 IHC S-1800 液压锤可直接套锤将钢管桩打至设计高程,无需使用送桩器,可极大减少施工步骤,节省施工时间。

升压站基础施工内容主要包含:导管架及基础桩的海上运输,导管架安装,导管架基础桩沉设,导管架与基础桩间的灌浆连接,升压站上部模块安装座的焊接<sup>[1]</sup>。本文仅对导管架基础桩沉设进行分析。

## 2 工程实施

### 2.1 沉桩可行性分析

根据同类项目施工经验,沉桩过程中,当硬土层下存在软弱土层,上部土层动态侧摩阻力不足以承载上部荷载时,有发生溜桩风险。针对本

项目地质情况，在正式沉桩前，对已掌握的地勘资料进行分析，提前研判可能发生溜桩的地层，利用 GRLWEAP 软件进行沉桩分析计算。因升压

站地质相似，故只选取 1 根钢管桩进行沉桩分析。根据地质参数，升压站钢管桩可打性分析结果见图 1。

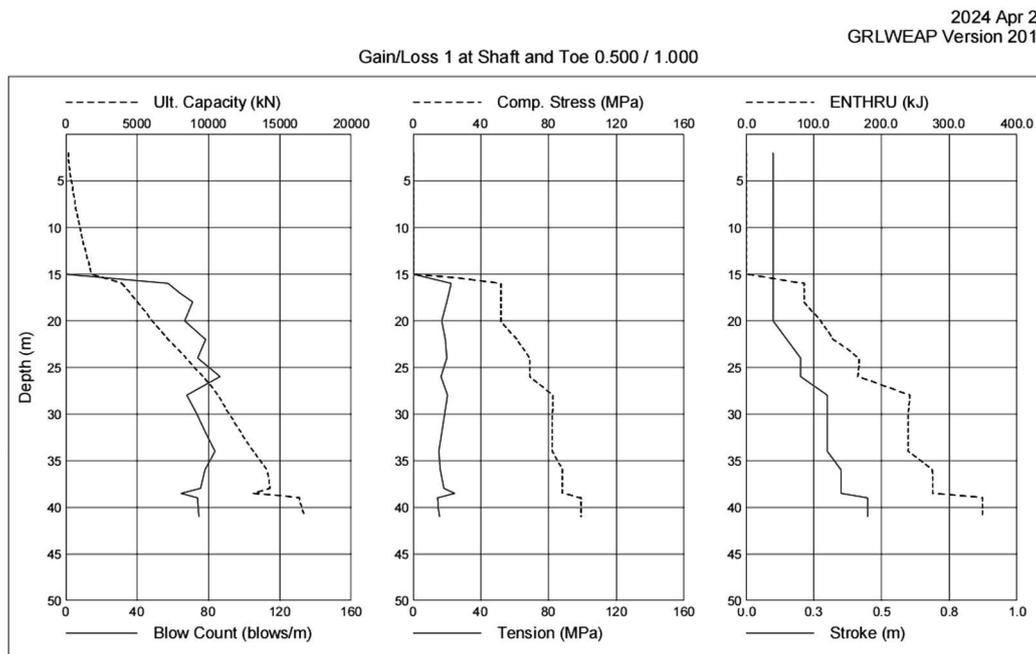


图 1 GRLWEAP 软件可打性分析界面

由计算结果可知，对升压站基础钢管桩采用打桩锤 IHC S-1800 液压冲击锤作业时，累计锤击数为 1 896 击，最大每米锤击数为 87 击，最大拉应力为 24.341 MPa，最大压应力为 99.392 MPa，最后贯入度为 74.6 击/m，使用最大打击能量为 349.5 kJ。桩身的应力最大值小于设计允许值 230 MPa，最大锤击数小于设计要求值 6 000 锤，满足设计要求，沉桩模拟过程中未发现有溜桩现象。

### 2.2 施工流程

本项目海上升压站基础形式为后桩法导管架基础，沉桩施工前须将导管架基础沉放完成，施工流程见图 2。

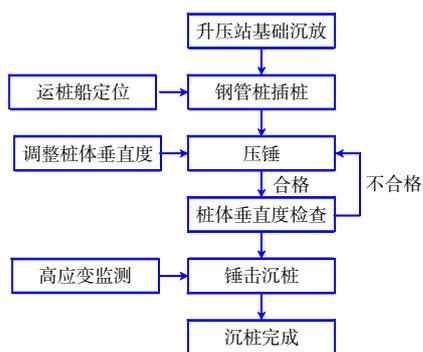


图 2 施工流程图

### 2.3 水下液压打桩锤沉桩

待 4 根钢管桩对角插桩自沉完成后，对角打桩，先打高点位桩，再打低点位桩。应用三阶段锤击控制策略，冲击锤开始用最低能量单击，沉桩时密切注意钢管桩的贯入度，根据地勘资料及相关沉桩分析，钢管桩自沉穿过流塑或软塑等软质地层后，根据实际贯入度情况，调整锤击能量和打击频率继续沉桩。沉桩过程中根据进尺及时调整冲击锤预留吊索具长度，避免锤套脱离钢管桩，造成空打。锤击沉桩时确保桩锤和桩处于同一直线，避免产生偏心锤击，直至沉桩至设计高程。通过测量锤身刻度反算钢管桩顶高程，将 4 根钢管桩全部打至设计高程。

### 3 关键技术难点及应对措施

本项目导管架基础施工过程中的关键技术难点及应对措施如下。

1) 针对升压站设计位置水深较深、涌浪较大导致水下沉桩过程中钢管桩与沉桩导向口对位困难的技术难题，采取了系统性测量控制方案。首先在施工准备阶段，在导管架平台布设高精度测量控制点，通过三维坐标系统计算升压站导管架群套管与控制点之间的相对位置，基于极坐标定

位原理确定钢管桩的插桩位置。施工过程中，在导管架平台关键节点架设全站仪，根据测量数据指导起重船调整位置进行插桩。

2) 针对升压站所在海域水深大、波浪强，导致水下安装钢管桩时定位困难，以及导管架安装后需多次调平且精度要求极高的问题，采取了分阶段精细化施工方案。首先在施工前，于导管架平台上设置测量基准点，通过坐标计算确定每根钢管桩的准确位置。施工时，在平台上架设高精度测量仪器，实时监测钢管桩位置，指导起重船动态调整桩体姿态。安装导管架后，先进行初步调平，待钢管桩下沉到位后再次调平。调平过程中，通过在导管架顶部较低位置安装吊索，配合起重船反复微调提升高度，同时控制液压锤的打击力度，初始阶段正常施力，接近设计深度时减小锤击强度，并暂停作业进行标高测量验证。为降低调平难度，采用对角线交替沉桩的顺序，使荷载均匀分布。最终调平时，结合起重船与专用卡桩装置协同作业，确保导管架整体水平度误差小于0.2%。

3) 针对沉桩过程中因硬土层下方存在软弱夹层导致土层摩擦力不足、可能引发溜桩事故的工程风险，结合同类项目经验制定了分级控制方案。首先基于地质勘察数据，运用GRLWEAP软件进行桩基贯入模拟分析，施工时采取渐进式沉桩策略：在钢管桩接近软弱层顶部时，根据实时计算的桩身摩擦力动态调整液压锤作业参数，必要时采用单击锤击的方法沉桩，沉桩开始时采用最小能量，前期单击轻打，每击一锤后，停锤进行观察，随后逐步增加能量和打击频率，并且做到能量与频率相互匹配<sup>[2]</sup>。

#### 4 技术创新

针对复杂地层条件下的沉桩施工风险与精度控制难题，本项目研发并应用了集成化智能施工控制系统，其核心模块包括：

1) 三阶段能量调控：根据地质雷达数据动态调整锤击参数，在黏土层采用198 kJ单击模式（击打间隔 $\geq 30$  s），在砂砾层切换至349.5 kJ连续击打。

2) 溜桩预警机制：结合GRLWEAP模拟结果与实时贯入度数据，当10 s内贯入度突变 $>50$  cm时，系统自动暂停施工并启动人工复核；高风险地层（地层阻力比 $\geq 0.7$ ）采用能量递减模式（每5

击降幅30%），确保施工安全。

3) 高精度定位系统：利用GPS（水平精度 $\pm 1$  cm）与声呐组合，实时补偿船体晃动，结合卡尔曼滤波动态校正定位数据，桩位偏差控制在2 cm以内。

#### 5 工程适应性分析

##### 5.1 复杂海洋环境的工艺适配性

在庄河V项目中，施工海域面临旋转流涌浪（最大流速2.5 m/s）与软弱夹层交互地层的双重挑战。传统工艺因送桩器能量损耗，在黏土层（动态侧摩阻力仅23 kPa）易引发溜桩，而新工艺通过以下机制实现突破。

##### 1) 地层响应式锤击控制

针对黏土地层，采用198 kJ低能量单击模式（间隔 $\geq 30$  s），利用土体触变性促进桩侧摩阻力恢复；在砂砾层施工时切换至349.5 kJ高能量连续击打模式，通过高频冲击克服高达85 kPa的土层摩阻力，实测贯入速度达1.2 m/min；特别设置过渡层监测机制，当检测到贯入度从20 cm/击突增至50 cm/击时，自动触发能量下调20%的保护程序，防止溜桩发生，通过能量参数与地层阻力的动态匹配，实现了施工安全性与效率的协同优化。

##### 2) 涌浪补偿技术

在涌浪周期（平均8 s）内，通过起重船动态定位系统实时调整吊钩位置，补偿垂向位移（ $\pm 1.2$  m），确保锤-桩轴线偏差 $<0.5^\circ$ 。在施工中，遭遇含贝壳碎屑砂层（摩阻力波动40~90 kPa），系统自动切换击打模式6次，最终桩顶高程误差仅3 cm，较传统工艺精度提升70%。

##### 5.2 设备性能的极限验证

通过对IHC S-1800液压锤在28 m深水工况下的可靠性的系统性测试，在压力等效28 m水深的环境中，锤体连续24 h作业后密封性能达标。抗疲劳试验中，采用扫描电镜（SEM）对1 500次击打后的蓄能器接口进行微观分析，测得微裂纹密度为0.8条/mm<sup>2</sup>（对照组传统工艺为2.4条/mm<sup>2</sup>），疲劳寿命提升3倍。测试数据表明，该设备在极端水深条件下仍能保持结构完整性，为深水桩基施工提供了可靠装备保障。

#### 6 综合优势

传统的海上升压站基础施工工艺，是借助送桩器延长段，把水下桩的施打界面由水下延伸到水面以上，水下液压打桩锤在本项目中的成功应

用,验证其相比于传统工艺具有以下优势。

1) 节约制造成本。单个送桩器的制作成本达400万~500万,而且送桩器均为按项目定制,拥有有限的使用次数和寿命的限制,项目结束后,很少有机会循环使用。

2) 节约租赁成本。在使用送桩器的情况下,液压锤打击能量的传递效率大打折扣,会因为桩与送桩器之间低效的能量转换导致能量损失,送桩器材质为Q345时,沉桩后期能量传递效率约为50%~70%<sup>[3]</sup>,这种能量损失,迫使施工时需要选择更大能量的液压锤导致增加租赁的成本,而水下液压打桩锤施工工艺则可以选择更接近设计打击能量的液压锤,达到节约的效果。

3) 延长设备使用寿命。送桩器作为传力能量的金属构件,液压打桩锤要受到剧烈的冲击和振动,因送桩器导致损失的能量会反作用到锤上,反弹能量进入锤身隐形地增加了设备损坏的风险。

4) 延长工程桩本体寿命。因送桩器导致的能量损失,能量不能全部作用到桩上,遇到恶劣的土质条件就会造成拒锤,桩将受到额外桩疲劳的影响,损伤钢结构,从长远来看,这也将影响桩基的寿命和整个项目的有效性。

5) 缩短项目工期。新工艺减少了送桩器吊装及安装2个作业步骤,提高工作效率,为项目的按期完工提供保障。

## 7 技术局限性

尽管水下液压打桩锤施工工艺成效显著,但仍具有一定技术局限性,需关注以下边界条件。

1) 水深极限。当前验证最大水深为35 m(江苏如东试验),50+ m场景需优化液压管线耐压性;2) 极端地质风险。含孤石地层(粒径>1 m)可能引发锤头偏载,需结合钻孔预处理工艺。

未来将构建桩-土-锤多物理场耦合模型,集成实时应力监测数据与机器学习算法,动态优化击打参数,目标将贯入度控制精度从当前 $\pm 2$  cm提升至 $\pm 1.5$  cm,并通过数字孪生技术实现复杂地层施工的虚拟预演。

## 8 结语

本文介绍了海上升压站后桩法导管架基础水下沉桩施工工艺,通过在本项目中的应用,进一步验证了水下液压打桩锤在实际工程中的可行性和有效性,升压站导管架基础桩的桩位偏差控制在极小范围内,桩身垂直度偏差远低于设计要求,施工工期较原计划提前,具有显著的经济效益。

随着海上风电与其他海洋产业的融合发展,如海上风电与海洋牧场、海水淡化等相结合,水下液压打桩锤也将在综合性海洋开发项目中得到更广泛的应用,为推动海洋经济的多元化发展提供有力支持。

## 参考文献:

- [1] 陈风云,范肖峰,叶兆艺,等.江苏某海上升压站导管架基础施工关键技术[J].水电与新能源,2022,36(2):54-58.
- [2] 李斌.IHC-S1800 液压打桩锤在海上风电深海施工中的应用研究[J].建设机械技术与管理,2022,35(6):35-37,40.
- [3] 李森,胡晓明,张谦.海上风电送桩器沉桩的高应变动力测试研究[J].广东水利水电,2022(9):10-15.