

## · 信息技术 ·



# 打桩船沉桩施工定位与碰撞预警 实时监控系统开发与实现

田会静<sup>1</sup>, 秦亮<sup>2</sup>, 王天祥<sup>1</sup>, 刘世远<sup>1</sup>, 吴明昕<sup>3</sup>

(1. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202;

2. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 3. 中交烟台环保疏浚有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 针对复杂工况条件下海上打桩船施工定位与老旧码头改造、扩建过程中的海上打桩施工需求, 研发了1套具有打桩船的精准导航、施工定位过程全要素实时三维立体化展示、桩身防碰撞预警以及竣工数据输出等功能的辅助定位系统。从需求分析、功能设计、核心算法、代码级实现方式以及实测应用方面对其进行阐述。该系统通过工前预控、辅助定位与竣工数据留存, 精确评估施工安全性, 可实现对整个海上打桩施工定位过程的全方位精准管控, 满足施工人员的安全质量管控需求。

**关键词:** 码头工程; 海上打桩; DFD设计; 实时动态定位技术

中图分类号: U 656.1+32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)S2-0129-05

## Development and implementation of real-time monitoring system for pile sinking construction positioning and collision early warning of pile driving barge

TIAN Hui-jing<sup>1</sup>, QIN Liang<sup>2</sup>, WANG Tian-xiang<sup>1</sup>, LIU Shi-yuan<sup>1</sup>, WU Ming-xin<sup>3</sup>

(1.CCCC(Tianjin) Eco-Environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd. Tianjin 300202, China;

2.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

3.CCCC-TDC Yantai Environmental Protection Dredging Co., Ltd., Yantai 264000, China)

**Abstract:** According to the requirements of offshore piling construction during the construction positioning of offshore piling barge and the reconstruction and expansion of old wharf under complex working conditions, a set of auxiliary positioning system with the functions of accurate navigation of piling barge, real-time three-dimensional display of all elements in the construction positioning process, anti-collision pre alarm of pile body and completion data output is developed. This paper expounds from the aspects of demand analysis, function design, core algorithm, code level implementation and practical application. Through pre-construction control, auxiliary positioning and completion data retention, the system accurately evaluates the construction safety, which can realize all-round accurate control of the positioning process of the entire offshore piling construction and meet the safety and quality control needs of the construction personnel.

**Keywords:** wharf engineering; offshore piling; DFD design; real time dynamic positioning technology

码头、桥梁以及海上风电等工程中存在大量的海上沉管灌注桩沉桩基础施工, 打桩过程的顺利与否直接关系到上部结构质量与结构安全<sup>[1]</sup>, 打桩船施工定位是整体基础施工的重要环节。但是由于打桩施工均为水上作业, 定位过程受各类限制较多,

桩体精确定位难度大、易产生偏差, 对实际桩位的状态并不能随时掌握<sup>[2]</sup>。当打桩数量多且布置较为复杂时, 产生的偏差将会影响后续沉桩过程。尤其在老旧码头改造、扩建过程中, 常存在原设计图纸缺失或既有水工建构筑物与设计图纸存在偏差的情

况, 仅能采用实测桩参数辅助打桩施工, 存在施工桩与既有桩体发生碰撞的可能, 严重影响施工进度, 不利于施工的统筹规划和质量把握。

针对复杂工况条件下沉桩施工需求, 亟需研发 1 套具备水上打桩施工工前预控、定位过程全要素实时三维展示、桩身防碰撞预警、竣工数据更新及输出功能的系统, 从而在水上打桩施工项目中提高沉桩施工效率、避免碰桩风险, 满足施工人员的安全管控需求。

## 1 系统构架与基础算法

### 1.1 系统需求分析

打桩船定位过程的影响因素包括: 1) 高精度三维定位。高精度定位是实现所有功能的基础, 系统需同步接入打桩船测量仪器采集的定位数据, 实现船体与桩身高精度三维实时定位。2) 施工全要素三维可视化。系统可将桩基础设计参数、地形数据、水位参数与船参数导入, 实现打桩定位施工全要素三维可视化, 直观指导施工定位; 同时应用渲染技术实时更新三维模型, 使用不同颜色更新桩状态, 以便在沉桩施工过程中判断桩体布置形式及状态。3) 桩间距算法及其可视化表达。实时计算两桩最近间距, 并对产生最近距离的发生位置进行提示, 在三维视角实时显示, 对施工中的碰撞风险进行预警。4) 竣工数据更新与留存。

竣工数据作为企业的重要资产之一, 具有极高留存价值。依据现场实时数据更新并导出竣工桩参数, 同步更新模型; 同时预留数据接口, 以备未来对接企业级数字工地管理平台(数字天航 2.0)。

### 1.2 系统 DFD 设计

DFD( data flow diagram ) 设计即数据流设计, 涉及系统的逻辑功能、数据在系统内部的逻辑流向和逻辑变换过程<sup>[3]</sup>。根据系统需求, 梳理出 3 套核心算法, 并将算法融入本地数据库调用、存储与更新流程中, 见图 1。

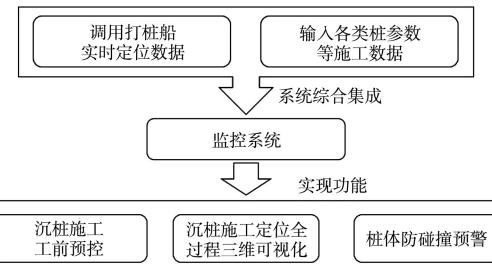


图 1 数据流设计

### 1.3 系统功能设计

为实现功能需求, 依据数据流设计了以下功能, 并在界面中予以展示, 包括打桩船实时三维定位、抱桩器实时三维定位、施工区域地形、水位三维展示、预警距离内桩间距实时计算、碰撞预警与竣工数据输出, 在系统界面中展示各功能工作状态, 见图 2。

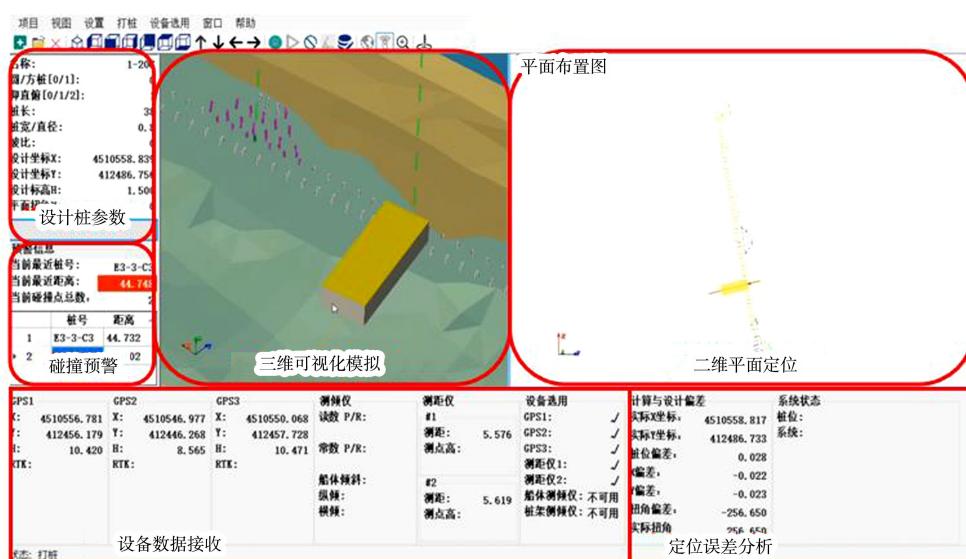


图 2 系统界面功能

## 2 定位数据处理与解析

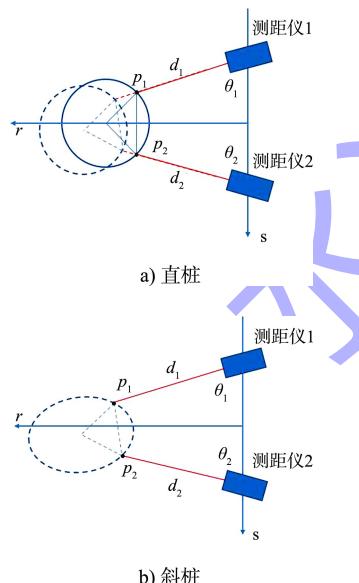
### 2.1 船体与抱桩器实时定位算法

#### 2.1.1 基础测量数据的调用

打桩船施工过程中, 使用 PC 端调用打桩船实时定位数据, 包括 3 台 RTK 与 2 台测距仪。打桩船依据施工需求定位过程中, 仅仅依靠测量数据难以完成打桩船桩中心定位, 还需要将施工数据(如桩参数)合并计算<sup>[4]</sup>。

#### 2.1.2 数据处理与解析

数据处理的目的是使用调用接收设备参数、设备实测数据及设计桩参数信息计算出桩中心设计水平面工程坐标, 实现施打桩体位置的获取并随设备实测数据实时动态刷新<sup>[5]</sup>。具体过程中通过 2 个测距仪空间距离进行几何运算, 其中最困难的是求取 2 个测距仪设计水平面相对高程<sup>[6]</sup>, 见图 3。



注:  $P_1$ 、 $P_2$  为两台测距仪射线的桩身反射点;  $d_1$ 、 $d_2$  为测距仪与桩身反射点之间的直线距离;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为测距仪射线方向与两台测距仪连线之间的夹角。

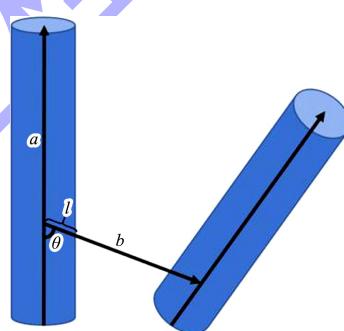
图 3 桩平面

该过程主要分为以下 4 步: 第一步, 依据打桩船 3 个 GPS 实测高程观测量值差值与其在船固坐标系中高程差值的变化, 计算打桩船船体倾角, 即横倾和纵倾; 第二步, 利用船体倾角将船固坐标转换为船固水平坐标, 由此得到测距仪、GPS

在船固水平坐标系下坐标值; 第 3 步, 通过船固坐标系下任意 2 点船固坐标转换为工程坐标, 计算得到转换 4 参数, 利用 4 参数将船固水平坐标转换为工程坐标; 第 4 步, 通过迭代计算得出测距仪平面高程转换为设计高程平面高程的 7 参数, 并最终将测距仪平面高程转换为设计水平面相对高程。

### 2.2 桩间距与防碰撞算法

桩体避碰的实现途径是使用几何遍历法计算轴线上的点间距, 求解轴线间最小距离以及轴线上对应位置即两桩之间最可能发生碰撞点(图 4), 进行粗判断后再通过线性盒约束进行二次判断, 达到桩体避碰的目的, 该部分通过 MathNet. Numerics 数理方程计算包编写实现。



注:  $a$  为单桩轴线向量;  $b$  为两桩之间最短距离法线向量;  $l$  为向量  $b$  与桩体表面的交点距离轴线对应位置(轴线  $a$  与向量  $b$  交点)的距离;  $\theta$  为向量  $a$  与向量  $b$  之间的夹角。

图 4 桩体最小间距及其发生位置

## 3 系统交互式功能实现

### 3.1 平面与三维可视化表达

#### 3.1.1 施工全要素分析

海上打桩施工定位的影响因素分为静态和动态施工要素, 其中施工水位和地形面为严格意义上的静态要素, 在时间维度上没有变化, 故使用单次参数化建模方式进行可视化表达, 即导入参数后作为施工背景使用。打桩船和抱桩器中的待打桩为动态施工要素, 位置不断变化, 待打桩部分在时间维度下为静态施工要素, 但可以手动修改其状态, 依据不同施工状态(未完成、已完工、目标桩)展示对应效果, 见图 5。

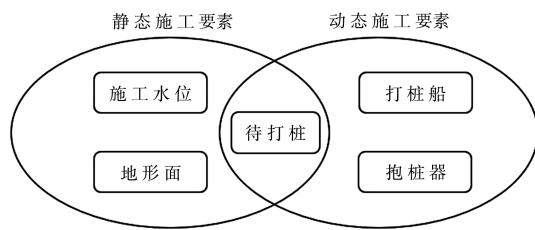


图 5 各施工要素间相互关系

### 3.1.2 平面与可视化表达途径

VTK(Visualization ToolKit)可视化工具包可用于三维计算机图形可视化和图象处理，在面向对象原理的基础上设计和实现，具有优异的三维显示效果和速度，本系统为 C#在 .NET 平台上开发、VTK 在 C#.NET 的实现，运用了 ActiViz (3D Visualization ToolKit for .NET/C#) 工具包。运用 ActiViz 定义打桩系统中各类施工要素三维实体，其中静态施工要素作为施工背景，动态施工要素依据测量数据实时动态刷新；运用 .NET 下 GIS 库 DotSpatial 将各要素定位在同一个工程坐标系内，并提供各视角展示功能，最终实现了定位过程中的施工全要素实时表达，见图 6。

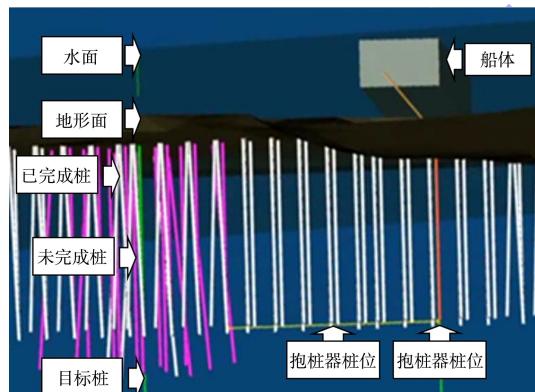


图 6 施工全要素三维展示效果

### 3.2 桩体避碰分析

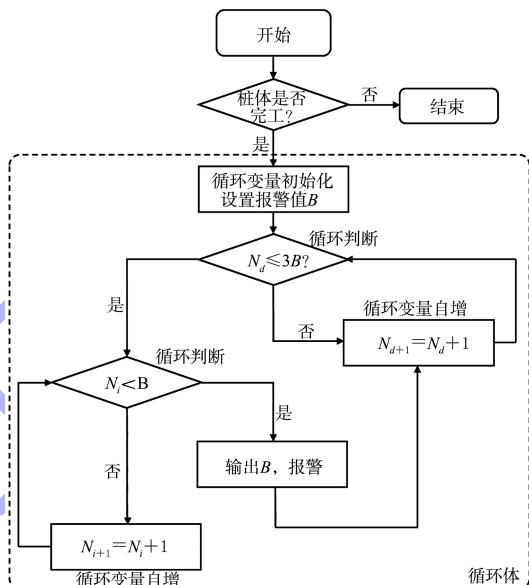
#### 3.2.1 避碰分析功能实现

系统在桩体定位过程中实时计算正在施工的桩体与已完成施工的各个桩体间的最近间距，并显示产生最近间距的位置。最近间距一旦小于设置预警阈值，系统将提醒打桩船及时调整，实现沉桩施工过程中桩体防碰撞预警功能。

#### 3.2.2 阈值判断流程

打桩船定位过程中位移速率约为 0.2~0.5 m/s，

系统内循环速率设定为 1 s 循环一次，二维、三维展示刷新率与循环速率同步。整个打桩工程中，桩数总量可能多达上百根，基于目前的计算机硬件性能实现并行计算待打桩与每 1 根已完成桩相互位置关系并不现实。为此，系统在桩间距计算循环体中采用 2 次条件判断，根据打桩船定位信息筛选出高风险桩，减少计算量，大大减轻了硬件计算压力，实际操作中无卡顿现象出现，见图 7。



注： $i$  为桩号； $N_i$  为桩间距； $N_d$  为桩底间距； $B$  为报警值。

图 7 桩间距阈值判断流程

### 3.3 竣工数据库与数据流

依据功能设计如下数据接口，使用 Newtonsoft 调用各类数据文件存储到本地，详细定义如下：1) 编号：顺序编号，无实际意义；2) 仰俯：0 仰桩、1 直桩、2 俯桩；3) 桩型：0 圆桩、1 方桩；4) 桩长：设计桩身完整长度；5) 桩宽：圆桩时为桩直径，方桩时为桩边长；6) 扭角：以竖直向上（正西）方向为正方形基准，顺时针旋转至俯视图中，桩顶至桩脚连线的角度（图 8）；7) 坡比：斜桩与水平面夹角的正切值  $\arctan\alpha$ ；8) X、Y：设计文件中设计水平面桩中心平面坐标；9) 桩顶高程：桩顶平面高程；10) 设计高程：设计文件中设计水平面高程，一般低于桩顶平面高程 0.8~1.2 m，该多余部分一般用于插入混凝土承台内固定；11) 桩号：设计文件中桩名称；12) 打桩状态：0 没打、1 正在打、2 已打完。

系统设计桩参数输入与竣工桩参数输出均采用此格式数据接口, 通过该接口生成的竣工模型可检查沉桩施工定位的准确性, 竣工数据输出后不仅方便与设计桩参数对比, 检验沉桩定位误差是否满足设计要求, 还可将该竣工数据作为 2 次施工的基础数据, 也可用于对接企业级智慧工地管理平台。见图 9。

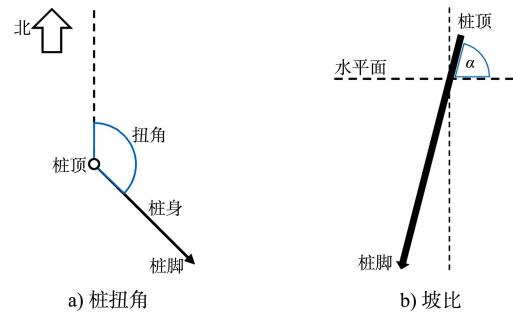


图 8 桩扭角和坡比

设置桩参数												
导入文件		选中并完成		导出CSV								
编号	俯仰	桩型	桩长	桩宽	扭角	坡比	X坐标	Y坐标	设计高	桩顶高	名称	状态
1	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510447.28	412499.3185	1.2	2	1-1A	2
2	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510453.182	412498.2397	1.2	2	1-2A	2
3	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510459.084	412497.1609	1.2	2	1-3A	2
4	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510464.988	412496.0822	1.2	2	1-4A	2
5	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510471.38	412494.9135	1.2	2	1-5A	0
6	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510476.791	412493.9246	1.2	2	1-6A	0
7	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510482.693	412492.8459	1.6	2.4	1-7A	0
8	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510488.598	412491.7671	1.2	2	1-8A	0
9	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510494.497	412490.6883	1.2	2	1-9A	0
10	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510500.4	412489.6096	1.2	2	1-10A	0
11	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510506.302	412488.5308	1.2	2	1-11A	0
12	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510510.237	412487.8116	1.2	2	1-12A	0
13	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510516.139	412486.7329	1.2	2	1-13A	0
14	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510522.041	412485.6541	1.2	2	1-14A	0
15	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510527.943	412484.5753	1.2	2	1-15A	0
16	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510533.846	412483.4966	1.2	2	1-16A	0
17	2	0	39.5	0.8	274.6422	6	4510539.748	412482.4178	1.2	2	1-17A	0
18	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510545.65	412481.339	1.2	2	1-18A	0
19	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510551.582	412480.2603	1.2	2	1-19A	0
20	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510557.455	412479.1815	1.2	2	1-20A	0
21	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510563.357	412478.1027	1.2	2	1-21A	0
22	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510569.259	412477.024	1.2	2	1-22A	0
23	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510573.194	412476.3048	1.2	2	1-23A	0
24	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510579.098	412475.226	1.2	2	1-24A	0
25	2	0	39.5	0.8	244.6422	6	4510584.998	412474.1472	1.2	2	1-25A	0

图 9 数据接口与格式

### 3.4 系统工程应用

本系统在盘锦港工作船码头工程中指导打桩施工定位, 期间共施打钢管桩 42 根。应用过程中系统桩体定位精准, 误差在 5 cm 范围内; 三维立体化模型显示正常, 桩体平面定位与三维可视化模型同步更新; 系统碰撞预警功能中桩轴线间距计算精准, 桩体定位完成后能够准确计算出施打桩与已完成施工的各个桩体间的最小距离, 计算误差在 1% 内。

### 4 结论

1) 针对海上沉桩施工定位功能需求与技术特点, 开发了安装于打桩船上的软辅助定位系统, 在实际应用过程中, 展现了良好的实用性和可靠性, 具有广泛推广价值。

2) 该系统通过打桩船的精准导航、施工定位过程全要素实时三维立体化展示、桩身防碰撞预警以及竣工数据输出等功能, 实现了对整个沉桩施工过程的全方位精准管理。

3) 该系统可用于复杂工况条件下以及老旧码头改造、扩建过程中的海上沉桩施工。通过工前预控、辅助定位与竣工数据留存, 精确评估施工安全性, 满足施工人员的安全质量管控需求。

### 参考文献:

- [1] 康思伟.海洋工程基础打桩船的技术现状与发展动态[J].船舶工程, 2021, 43(2): 1-7, 47.
- [2] 莫文晖.GNSS-RTK 打桩引导系统的设计与数据分析研究[D].广州: 华南理工大学, 2016.
- [3] 杨帆, 林吉兆, 谢义林, 等.基于 GPS-RTK 的海上打桩远程监控系统设计[J].测绘工程, 2014, 23(12): 76-80.
- [4] 王超, 杨帆.基于 GPS-RTK 高程的海上打桩桩顶高优化处理[J].工程勘察, 2013, 41(4): 69-73.
- [5] 陈士清.星站差分 GPS 在远海打桩定位中的应用[J].铁道建筑技术, 2019(12): 147-152.
- [6] 韦长算, 彭振中, 李君.一种基于 GPS、倾斜仪及测距仪的融合打桩新模型[J].测绘通报, 2020(5): 161-164.