



# 海上码头群桩基础桩间距计算方法

黄家坪

(中交烟台环保疏浚有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 海上码头群桩基础桩位布置密集, 沉桩施工受环境影响因素大、定位易产生偏差、存在一定的碰桩风险。在设计过程中, 往往为预留沉桩施工作业空间须进行桩体距离验算。以往采用的桩间距计算方法均有一定局限性, 不能快速、准确地计算出桩基础中空间最短间距及产生位置, 为桩身间距核算带来了困扰。通过解析几何的方法, 研发出遍历法与线性盒约束法两套数学模型, 可依据设计桩参数快速计算两桩之间最短间距以及产生最短间距的位置。为保障沉桩施工过程中桩体安全, 利用该桩间距算法对含有各类桩型的群桩基础进行计算, 结果精准、应用效果良好。

**关键词:** 群桩基础; 海上沉桩施工; 碰桩验算; 数学模型

**中图分类号:** U 656.1+32

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2022)S2-0099-04

## Pile spacing calculation method of pile group foundation in offshore wharf

HUANG Jia-ping

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

**Abstract:** The pile position of pile group foundation in offshore wharf is densely arranged, so the pile sinking construction is greatly affected by environmental factors, the positioning is prone to deviation, and there is a certain risk of pile collision. In the design process, it is often necessary to check the distance between piles to reserve the working space for pile driving. The pile spacing calculation methods used in the past have certain limitations, and cannot quickly and accurately calculate the shortest space spacing and the generation position in the pile foundation, which brings difficulties to the calculation of the pile body spacing. Through the analytical geometry method, two sets of mathematical models, the ergodic method and the linear box constraint method, are developed, which can quickly calculate the shortest distance between two piles and the position where the shortest distance occurs according to the design pile parameters. To ensure the safety of the pile body during the pile driving process, these pile spacing algorithms are used to calculate the pile group foundation with various types of piles, and the results are accurate and the application effect is good.

**Keywords:** pile group foundation; offshore pile sinking construction; pile collision checking calculation; mathematical model

海上大吨位码头基础形式多采用钢管桩群桩基础, 但是由于海上施工过程打桩船锤击贯入土体时, 施工精度要求高、易受周围环境影响, 且桩体布置较为密集、桩型较为多样的群桩基础往往伴随着桩体距离过近的现象, 存在一定的碰桩风险, 需要在设计、施工时予以规避。

依据《港口工程桩基规范》<sup>[1]</sup> 要求, 应在桩基础施工前, 结合沉桩允许偏差校核各桩是否相碰。在群桩基础设计过程中的桩体碰撞校核, 是基于设计桩位置结合桩身结构尺寸进行的, 其中绘图验算法无法求出公垂距离, 易产生设计不合理的问题, 难以保证沉桩施工顺利开展。赵玉起<sup>[2]</sup> 介

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 黄家坪(1984—), 男, 高级工程师, 从事施工技术管理工作。

绍了一种计算两桩最短距离的方法,先用极值方法求解两桩的轴线在同一高程内水平面的位置,然后通过作图或计算得出桩的碰桩值,但判断两斜桩是否碰桩的情况中,两桩间的最短距离并不一定在同一水平高程上,该方法未考虑这一问题也未考虑桩长的因素,求解公垂线与桩的交点可能在桩身延长线上。纪成林等<sup>[3]</sup>研发了一套求解异面直线最短距离的数学模型,该方法通过 3 个平面相交于一点来确定两异面直线的交点,根据空间两点的距离公式求解出异面直线的最短距离,但是难以确定可能的碰撞点在桩身上的具体位置。几乎所有的碰桩算法均未考虑施工中桩顶允许偏差。在实际沉桩施工过程中,当桩数量多、布置密集时,已施打完成后的桩位、坡比、扭角与设计值往往存在一定偏差<sup>[4]</sup>,偏差将会影响后续沉桩施工作业过程。由于实际沉桩的偏差,有可能导致碰桩的发生。本文介绍了两种算法,可快速计算正在施打的桩与周围已施打完成的邻近桩的距离并确定最近距离产生位置,用以降低施工中碰桩的可能性。

### 1 工程概况

工程位于北方某港区石化园区配套码头作业区岸线,建设 1 个 5 万吨级液体化工泊位及其配套设施,泊位长度 330 m,占用岸线总长 367 m。基础包括码头桩、引桥桩、墩台桩,桩基础形式为直桩与斜桩相结合,斜桩的斜率分别为 6:1 和 4.5:1,共计钢管桩 223 根,基础形式见图 1。



图 1 群桩基础布置

### 2 桩间距与防碰撞算法

该群桩基础布置较为复杂,在施工过程中,

桩底部分在深部土层内存在交汇碰撞的风险,需要根据桩截面及可能出现的偏位值(最大允许偏位)对两桩之间距离的安全性进行判断。为此,需要计算两桩中轴线间的允许最短间距<sup>[5]</sup>,并指示出桩身产生最小间距的位置。

#### 2.1 遍历法计算模型

遍历法的原理是按一定间距取施打桩、已完成桩轴线上的点,通过遍历计算两桩轴线上每两点之间空间连线距离,求解桩轴线间最短距离,对比两桩轴线上所有空间连线的距离,取最小值即为桩轴线间的最短距离。

具体过程为:设  $A=(x_1,y_1,z_1)$  为施打桩桩顶中心的坐标,  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为施打桩体倾角与扭角,  $h$  为施打桩桩长,施打桩体桩底中心  $B$  的坐标为:

$$\begin{cases} x_2=x_1-h\sin\alpha\cos\beta \\ y_2=y_1-h\sin\alpha\sin\beta \\ z_2=z_1-h\cos\beta \end{cases} \quad (1)$$

施打桩桩底中心坐标  $B$  与施打桩桩顶中心的坐标  $A$  共同求取该桩轴线向量为  $\overrightarrow{AB}$ , 即向量  $\mathbf{a}$ 。以施打桩为基准,桩体桩顶、桩底为坐标界限,分段选取施打桩轴线上点。应用遍历法依次计算出两桩体轴线间最小距离,令轴线上最小距离对应位置为  $C$ 、 $D$ , 两点间距离为:

$$d=\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2+(z_1-z_2)^2} \quad (2)$$

由此可以得到两桩之间最小距离  $d'$  为:

$$d'=d-r_1-r_2 \quad (3)$$

式中:  $r_1$ 、 $r_2$  为两桩轴线间距方向的半径。

再由两桩轴线最小距离对应位置  $C$ 、 $D$  求取两桩之间最短距离法线向量  $\overrightarrow{CD}$ , 即向量  $\mathbf{b}$ , 实际位置见图 2。

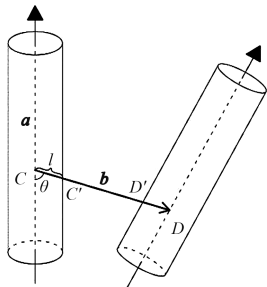


图 2 向量距离实际位置

$l$  为向量  $\mathbf{b}$  与桩体表面的交点距离轴线对应位置(轴线与向量  $\mathbf{b}$  交点)的距离,  $\theta$  为向量  $\mathbf{a}$  与向量  $\mathbf{b}$  之间的夹角, 由此可推断出桩体碰撞位置:

$$l = \frac{r}{\sin\theta} \quad (4)$$

对于点  $C$ 、 $D$ , 通过  $l$  与向量  $\mathbf{b}$  的方向向量  $\mathbf{b}/|\mathbf{b}|$ , 求取向量  $\mathbf{b}$  与两桩体表面的交点  $C'$  与  $D'$ , 即为两桩体碰撞位置。

## 2.2 线性盒约束法

线性盒约束法是通过参数方程判断桩轴线间距离, 采用几何向量进行预判断, 计算桩轴线间距离与桩直径之差, 作为预判断距离, 当预判距离小于预设值时, 采用参数方程进行距离及最近点位置的精确计算, 确定距离及最近点位置。通过盒约束非线性优化, 修正了之前算法中两桩轴线最近距离连线可能超出桩顶或桩底、不在桩身上

的问题。

采用向量法计算桩轴线间距离, 计算出两轴线的公共法向量  $\mathbf{n}$  与两轴线上任意两点的连接线段在公共法向量上的射影长。设任意两点所连成的向量为  $\mathbf{m}$ ,  $\mathbf{m}$  与  $\mathbf{n}$  的夹角为  $\theta$ , 两轴线距离为:

$$d_z = |\mathbf{m}| |\cos\theta| = |\mathbf{m}| \frac{|\mathbf{mn}|}{|\mathbf{m}| |\mathbf{n}|} = \frac{|\mathbf{mn}|}{|\mathbf{n}|} \quad (5)$$

得到预判断距离为:

$$d_{\text{pre}} = d_z - r_1 - r_2 \quad (6)$$

当预判距离  $d_{\text{pre}}$  小于预设值时, 桩参数方程分为斜桩与直桩两种情况讨论:

1) 斜桩参数方程。在三维空间内, 确定方向向量  $(M, N, P)$ , 以其对应的空间直线  $\frac{x-x_0}{M} = \frac{y-y_0}{N} = \frac{z-z_0}{P}$  ( $M^2+N^2 \neq 0$ ) 为轴、 $r$  为半径的圆柱面参数方程可以写为:

$$\begin{cases} x = x_0 + r \frac{N}{\sqrt{M^2+N^2}} \cos u + r \frac{MP}{\sqrt{M^2+N^2}\sqrt{M^2+N^2+P^2}} \sin u + Mv \\ y = y_0 - r \frac{M}{\sqrt{M^2+N^2}} \cos u + r \frac{NP}{\sqrt{M^2+N^2}\sqrt{M^2+N^2+P^2}} \sin u + Bv \\ z = z_0 - r \frac{\sqrt{M^2+N^2}}{\sqrt{M^2+N^2+P^2}} \sin u + Pv \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u$  为圆柱面角度 ( $0 \sim 360^\circ$ ),  $0 \leq u \leq 2\pi$ ;  $v$  为圆柱面长度 (一般情况下  $v_{\min}$  为零、 $v_{\max}$  为约束位置最大桩长),  $v_{\min} < v < v_{\max}$ 。

2) 直桩参数方程, 即  $M=N=0$  时, 参数方程可以写为:

$$\begin{cases} x = x_0 + r \cos u \\ y = y_0 + r \sin u \\ z = z_0 + v \end{cases} \quad (8)$$

3) 求解  $i$  桩  $(x_i, y_i, z_i)$  与  $j$  桩  $(x_j, y_j, z_j)$  两桩距离, 以距离平方作为目标函数:

$$\text{obj}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2 \quad (9)$$

则梯度函数为:

$$\text{gra} = \begin{cases} \frac{d(\text{obj})}{du_i} \\ \frac{d(\text{obj})}{dv_i} \\ \frac{d(\text{obj})}{du_j} \\ \frac{d(\text{obj})}{dv_j} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $(u_i, v_i)$  与  $(u_j, v_j)$  这两组数据分别代表  $i$  桩和  $j$  桩  $u$ 、 $v$  这两个参数取值的上下限, 采用盒约束非线性优化问题迭代方法 BFGS 算法<sup>[6]</sup>, 根据桩参数设置  $u_i$ 、 $v_i$ 、 $u_j$ 、 $v_j$  上下限, 求解目标函数最小值  $d_{\min}$ , 平方根即为最小距离:

$$d_{\min} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \tag{11}$$

最小值出现的位置与上下限间距，其算法数学表达式如下：

$$\begin{cases} [u_i]_{\min} \leq u_i \leq [u_i]_{\max} \\ [v_i]_{\min} \leq v_i \leq [v_i]_{\max} \\ [u_j]_{\min} \leq u_j \leq [u_j]_{\max} \\ [v_j]_{\min} \leq v_j \leq [v_j]_{\max} \end{cases} \tag{12}$$

3 计算实例

在实际工程应用中，使用遍历法与线性盒约束两种算法分别计算 3 根斜桩之间最近距离与桩身上产生最近距离所在位置，结果见表 1。

两斜桩碰撞验算结果显示：计算方法 1 的两桩间距结果偏安全，两算法差异值随两桩设计间距变大而变大，但均在误差允许范围内。

表 1 两斜桩碰撞验算结果

桩号	坡度	扭角/(°)	直径/m	桩长/m	柱顶坐标/m			1-2A 与 2C-D 两斜桩碰撞/m		2C-D 与 1-3A 两斜桩碰撞/m	
					X	Y	Z	遍历法	线性盒约束法	遍历法	线性盒约束法
1-2A		244.642 2			53.18	98.24	1.2			-	-
2c-D	1/6	334.642 2	0.8	39.5	54.18	98.72	1.2	0.56	0.31		
1-3A		244.642 2			59.08	97.16	1.2	-	-	33.86	37.07

4 结论

1)使用遍历法与线性盒约束法，推导出了群桩基础中两桩最短距离与产生位置的数学模型，均修正了之前算法中存在的精度低以及产生最短间距的位置不合理的问题。

2)两种方法均可依据设计桩参数中的平面位置、桩长、坡度、扭角等信息计算出桩间距，并指示出两桩最近距离的确切位置，精度均满足计算要求。

3)在海上沉桩施工过程中，运用本算法可采用打桩船抱桩器桩位数据实时计算其与周围已施工完毕或设计的临近桩之间距离，可提高沉桩施工作业安全管控水平。

4)桩间距算法模型实现了桩距的精准计算。在施工前规避碰桩风险；施工时可设置距离报警阈值，将沉桩前碰撞检查与施工过程实时监测预

警相结合，保障沉桩过程的完全可控，有效避免各类事故隐患。

参考文献：

[1] 中交第三航务勘察设计院有限公司.港口工程桩基规范:JTS 167-4—2012 [S].北京:人民交通出版社,1998.

[2] 赵玉起.桩位碰撞问题的计算方法[J].水运工程,1995(3): 41-44.

[3] 纪成林,门茂林,李睿,等.避免碰桩的计算数学模型[J].港口科技,2010(1): 15-17.

[4] 寇本川,苏航.嵌岩桩的碰桩验算及调整优化[J].水运工程,2015(12): 153-156,160.

[5] 门茂林,施洪景,谢义林.碰桩计算的误差分析[J].工程勘察,2010,38(8): 73-76.

[6] 卜璞,李朝奎,杨文涛,等.D-InSAR 与最优化算法的采空区几何参数反演[J].测绘科学,2021,46(5): 143-152.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 58 页)

[2] 谢瑞桃,黑臭河流底泥在绿化种植中的资源化利用研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2017.

[3] 胡育峰,官厅水库底泥的农业资源化利用[D].北京:中国农业大学,2005.

[4] 蒋士磊,重金属污染底泥堆肥改良及资源化利用[D].合肥:安徽建筑大学,2015.

[5] 张茅,杨迎春,郑琳琳,等.固化淤泥作为河湖堤岸绿化

草种植土的应用研究[J].施工技术,2020,49(18): 13-15,19.

[6] 刘宏,田涛,杨磊,等.疏浚底泥微波干燥及其作为种植土的性能研究[J].盐科学与化工,2017,46(4): 24-29.

[7] 王向辉,周鑫,吴高蓉,等.美舍河清淤底泥分析评价及土地资源化利用[J].科学技术与工程,2019,19(15): 360-364.

(本文编辑 郭雪珍)