

深层搅拌船处理机位置推算 及自动锚泊定位系统设计

魏晓楠^{1,2}, 陈 定^{1,2}, 刘东波^{1,2}

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 依托香港机场第三跑道建设项目, 针对沉桩施工深层搅拌船人工移船缓慢、精度偏差大等问题, 通过查阅国内外相关资料, 研究如何通过 GPS 推算目标桩实时位置, 并在短时间内通过自动锚泊定位将船舶移动到目标位置; 采用高精度坐标系转换、基于船舶空间坐标系桩位推算以及降低船舶摇晃周期影响的滤波算法, 利用高精度传感器及控制单元设计出高精度自动锚泊定位系统, 定位精度在 0.1 m 内, 角度偏差在 0.2° 以内。该系统的成功应用不仅提高了深层搅拌船的施工效率与施工精度, 而且降低了施工人员的劳动强度, 并为类似船舶的移船控制系统设计提供了有效的解决方案。

关键词: 深层搅拌船; 位置推算; 锚泊定位; 自动控制系统

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0113-06

Calculation of processor position and design of automatic mooring positioning system for deep mixing vessel

WEI Xiao-nan^{1,2}, CHEN Ding^{1,2}, LIU Dong-bo^{1,2}

(1.CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2.Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: Relying on the construction project of the third runway of Hong Kong Airport, regarding the problems of slow moving of the deep mixing vessel and the large precision deviation required for the pile sinking construction, by consulting the relevant technical data at home and abroad, this paper studies how to calculate the real-time position of the target pile through the GPS position, and the ship is moved to the target position through automatic mooring and positioning in a short time. Using a high-precision coordinate system conversion algorithm, a pile position calculation algorithm based on the ship's space coordinate system, and a filtering algorithm to reduce the influence of the ship's rolling period, using high-precision sensors and control units, a high-precision automatic mooring positioning system is designed, the positioning accuracy of the system is within 0.1 m, and the angle deviation is within 0.2°. The successful application of this system not only improves the construction efficiency and construction accuracy of the deep mixing vessel, but also reduces the labor intensity of construction workers, and provides an effective solution for the design of ship-moving control systems for similar ships.

Keywords: deep mixing ship; position calculation; mooring positioning; automatic control system

深层搅拌船是港口、海上机场、海上垃圾堆场等建设项目中必不可少的特种工程设备, 为打破日韩企业对其核心技术的垄断、提高公司该领域的核心竞争力, 研发拥有自主知识产权的深层

搅拌船势在必行。搅拌船集成控制系统直接关系到施工效率的高低, 是研发的重点部分。

该研究以中交海建新造的 2 艘深层搅拌船为依托, 研制 1 套集工业控制以太网、现场总线、

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 魏晓楠(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事疏浚工程装备集成监控系统研究和设计开发。

计算机控制、智能仪器仪表等技术于一身的自动锚泊定位系统，为操作人员提供一个集成化的实时施工监控操作平台，提高施工成桩精度与施工效率，降低操作人员劳动强度。

1 位置推算原理

1.1 基于大地坐标的投影转换算法

大地坐标投影转换算法的精确程度直接影响打桩的精度与效率，对降低废桩的产生非常重要。该算法对打桩施工的定位是否准确直接关系到桩位与施工设计能否相符，研究高精度的大地投影坐标转换算法对保证整个系统的正常运行非常必要。

通过查找国内外的投影定位资料，结合船舶高精度的施工需求，添加了如下高精度投影转换算法：通用横轴墨卡托投影 (UTM)^[1]、墨卡托投影^[2]、高斯—克吕格投影^[3]、兰勃特等角投影。

1.2 基于船舶空间三维坐标的计算算法

船舶空间三维坐标计算算法是船体坐标推算成大地坐标必不可少的一个重要步骤，船体 GPS 大地坐标经过算法推算可以得到船体施工位置的精确坐标。

将全船整体的物理坐标看成一个空间立体坐标系，船舶物理位置的每个点均可以通过空间立体坐标系推算出来。通过 RTK 以及其他专业工具将全船空间立体坐标系建立起来，对全船关键位

置进行高精度的建模，并由此开发出计算算法。

任何 2 个不同的空间立体坐标系均可通过旋转、平移将其重合到一起，地理工程位置坐标系和以船为基点的坐标系是不同的，利用高精度 RTK 设备测量船体相对位置的地理工程坐标系，再将船舶自身的坐标系与之关联，从而推算出该船真实精确的地理工程坐标。

1.3 基于船舶横纵倾与船舶摇晃周期的滤波算法

深层搅拌船施工时，会受到外界风、浪、流以及其他因素的影响，船舶不停摇晃、姿态实时发生改变，导致系统计算得出的打桩位置点与实际定位位置的误差不停变化。系统根据采集到的船舶姿态信息对船舶的姿态进行反向补正，进一步减少该部分误差，从而提高打桩精度。

该系统接入横纵倾传感器，利用高频率收集传感器的信号，分析船舶摇晃的周期和规律，利用算法通过规律预测船舶未来几秒内的姿态，并通过船体空间立体坐标系旋转反向修正打桩位置的偏差。

1.4 校核比对结果

对同一时间内高精度手持 GPS 测量坐标和软件推算坐标进行比对，校核点位数 2 个，累计校核次数 9 次。经校核，最大误差为 0.046 8 m，最小误差为 0.002 8 m，平均误差为 0.023 1 m，结果见表 1。

表 1 船体校核比对结果

| 船体校核点 | | X | Y |
|-------|-----------|-------------|-------------|
| 校核点 1 | 软件计算 | 810 376.585 | 821 437.019 |
| | 1 次校核(1) | | |
| | 手持 GPS 实测 | 810 376.584 | 821 437.046 |
| | 误差差值 | 0.001 | 0.027 |
| | 软件计算 | 810 376.635 | 821 437.369 |
| | 2 次校核(2) | | |
| | 手持 GPS 实测 | 810 376.670 | 821 437.380 |
| | 误差差值 | 0.035 | 0.013 |
| | 软件计算 | 810 376.551 | 821 437.027 |
| | 3 次校核(3) | | |
| | 手持 GPS 实测 | 810 376.568 | 821 437.012 |
| | 误差差值 | 0.017 | 0.015 |
| | 软件计算 | 810 376.671 | 821 437.420 |
| | 4 次校核(4) | | |
| | 手持 GPS 实测 | 810 376.658 | 821 437.375 |
| | 误差差值 | 0.013 | 0.045 |

续表1

| 船体校核点 | | | X | Y |
|-------|----------|-----------|--------------|--------------|
| 校核点 2 | 1 次校核(5) | 软件计算 | 810 374. 777 | 821 443. 936 |
| | | 手持 GPS 实测 | 810 374. 782 | 821 443. 928 |
| | | 误差差值 | 0. 007 | 0. 008 |
| | 2 次校核(6) | 软件计算 | 810 374. 701 | 821 443. 770 |
| | | 手持 GPS 实测 | 810 374. 715 | 821 443. 751 |
| | | 误差差值 | 0. 014 | 0. 019 |
| | 3 次校核(7) | 软件计算 | 810 374. 702 | 821 443. 854 |
| | | 手持 GPS 实测 | 810 374. 709 | 821 443. 847 |
| | | 误差差值 | 0. 007 | 0. 007 |
| | 4 次校核(8) | 软件计算 | 810 374. 699 | 821 443. 813 |
| | | 手持 GPS 实测 | 810 374. 701 | 821 443. 815 |
| | | 误差差值 | 0. 002 | 0. 002 |
| | 5 次校核(9) | 软件计算 | 810 374. 632 | 821 443. 876 |
| | | 手持 GPS 实测 | 810 374. 658 | 821 443. 863 |
| | | 误差差值 | 0. 026 | 0. 013 |

2 高精度自动锚泊定位系统

深层地基改良工法(DCM)需要严格管理每个改良桩的位置、与相邻桩的重合宽度,对船舶打桩定位系统的精度要求非常严格。深层搅拌船自动锚泊定位系统由数据采集与监控系统、数据组态展示系统、可编程控制器、带 RTK 功能的 GPS 定位系统、锚绞车驱动单元、锚绞车制动单元和相应传感器组成。船舶的旋转、平动需要通过锚绞车驱动单元、利用驱动电机控制所有锚绞车的收放来完成。

2.1 控制模型

2.1.1 钢丝绳长

绳长模型见图 1,设定锚与海底连接相对固定,固定点为 O ,海水深度为 H ,锚缆海底接触点与海底呈平行状态,将锚缆所在平面进行投影,并分析锚缆的受力情况,得到以下公式^[4-5]:

$$T_h = \frac{\omega h}{2} \left[\left(\frac{s}{h} \right) - 1 \right]$$

（1）

$$a = \frac{T_h}{\omega}$$

（2）

$$X = a \operatorname{arccosh} \left(1 + \frac{h}{a} \right)$$

（3）

$$s = a \sinh \frac{X}{a} = h \sqrt{1 + \frac{2a}{h}}$$

（4）

$$T = \omega (h + a)$$

（5）

$$\theta = \arccos \frac{T_h}{T}$$

（6）

$$s - X = h \sqrt{1 + \frac{2a}{h}} - a \operatorname{arccosh} \left(1 + \frac{h}{a} \right)$$

（7）

式中: T_h 为水平拉力; T_v 为垂直拉力; T 为钢丝绳拉力; s 为锚缆长; θ 为锚缆与水平方向夹角; h 为锚缆高度; X 为水平宽度; ω 为单位长度钢丝绳质量; a 为中间变量。

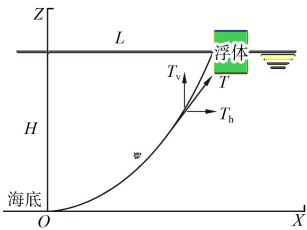


图 1 绳长模型

该船锚缆受力情况有 2 种:第 1 种为锚缆受力较小,此时采用悬线来计算受力;第 2 种为锚缆受力很大,此时可用直线来计算受力。利用 Matlab 对上述情况进行仿真计算可知:锚缆所受力越大,整条锚缆受力情况与直线计算时结果越相近,见图 2。

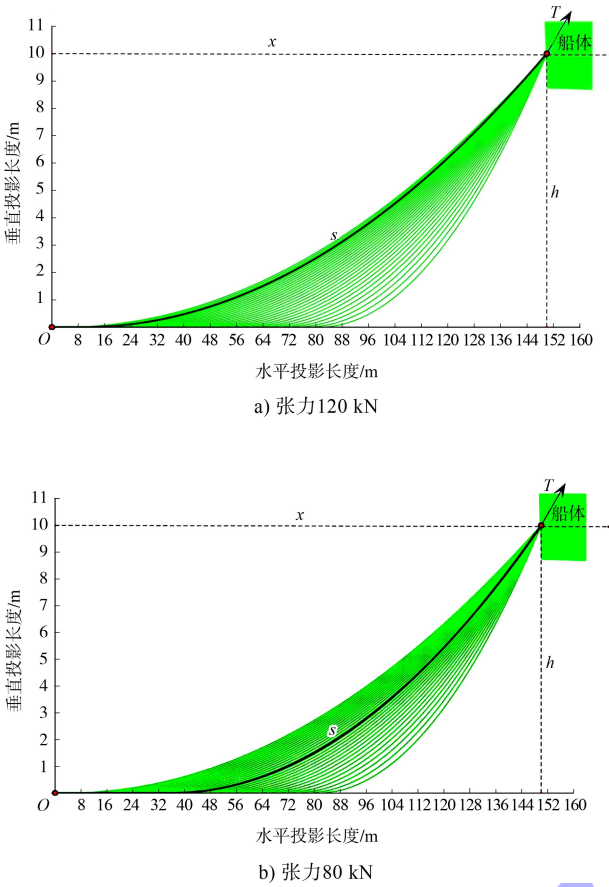


图 2 悬链线模型

2.1.2 船体受力分析

锚缆对船舶产生的拉力可以分为水平方向受力与垂直方向受力，由于锚缆长度较长，垂直方向受力可以由船体向上的力抵消，因此可以简化为只分析水平受力^[6]：

$$\begin{cases} T_x = T \cos \alpha \\ T_y = T \sin \alpha \end{cases} \quad (8)$$

式中： α 为锚缆线条方向与水平方向夹角； T_x 与 T_y 分别为水平拉力沿坐标轴 x 、 y 方向受力。

船体受力分析见图 3，当船到达平衡位置后：

$$\sum F = T_{x1} + T_{x2} + T_{x3} + T_{x4} + T_{x5} + T_{x6} + T_0 = 0 \quad (\text{合力为零}) \quad (9)$$

$$\sum M = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 + M_6 + M_0 = 0 \quad (\text{合力矩为零}) \quad (10)$$

式中： $T_{x1} \sim T_{x6}$ 为船舶受到的 6 个锚的拉力； T_0 为风浪流对船的合力； M_0 为合力矩。

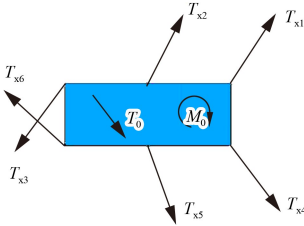


图 3 船体受力分析

根据各锚绞车钢丝绳拉力传感器测得拉力值，通过式(9)(10)可以计算得到外界风浪流对船体的作用力和作用力矩。自动移船过程中，放缆锚反张力的设定值参考该计算结果。

2.1.3 船体旋转分析

船舶的旋转分为向左、右旋转 2 种情况^[7]，见图 4。

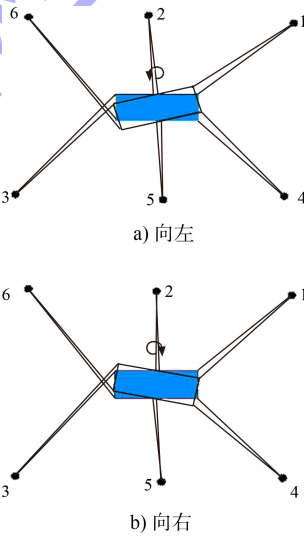


图 4 船舶旋转

如图 4 所示，向左旋转过程中，1、3 锚绞车执行收绳动作，4、6 锚绞车执行放绳动作，2、5 锚绞车收放不确定，此时对 1、3 锚绞车采用速度控制，其余锚绞车采用恒张力控制。向右旋转过程中，4、6 锚绞车执行收绳动作，1、3 锚绞车执行放绳动作，2、5 锚绞车收放不确定，此时对 4、6 锚绞车采用速度控制，其余锚绞车采用恒张力控制。

2.1.4 船体平动分析

船舶的任意平动都可以分解为沿船体方向和垂直于船体方向的运动，这 2 种运动的组合可以将船移动到任意位置，见图 5。

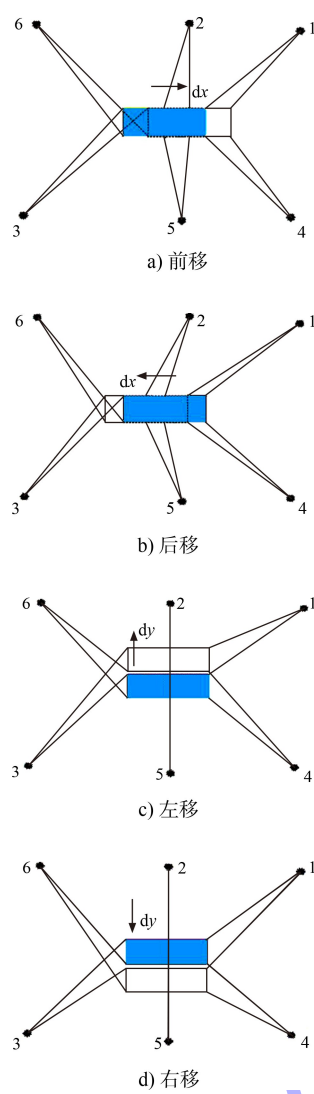


图5 船舶平动

如图 5a) 所示，向前移船过程中，1、4 锚绞车执行收绳动作，3、6 锚绞车执行放绳动作，2、5 锚绞车收放不确定，此时对 1、4 锚绞车采用速度控制，其余锚绞车采用恒张力控制。如图 5b) 所示，向后移船过程中，3、6 锚绞车执行收绳动作，1、4 锚绞车执行放绳动作，2、5 锚绞车收放不确定，此时对 3、6 锚绞车采用速度控制，其余锚绞车采用恒张力控制。如图 5c) 所示，向左移船过程中，1、2、6 锚绞车执行收绳动作，3、4、5 锚绞车执行放绳动作，此时对 1、6 锚绞车采用速度控制，其余锚绞车采用恒张力控制。如图 5d) 所示，向右移船过程中，3、4、5 锚绞车执行收绳动作，1、2、6 锚绞车执行放绳动作，此时对 3、4 锚绞车采用速度控制，其余锚绞车采用恒张力控制。

张力大小根据施工工况确定，通过实时计算位移前后缆绳的长度差来设定锚绞车的速度配比，并在运动过程中根据传感器反馈值实时修正。

2.2 自动移船效果实测

研究成果应用于香港机场第三跑道建设项目中的深层搅拌船，在实际自动移船过程中，船舶在 10 min 内通过自动移船到施工位置，距离偏差为 0.01 m，角度偏差为 0.1°，相比于人工手动移船，效率提升 30% 以上，效益提升明显。自动移船效果见图 6。

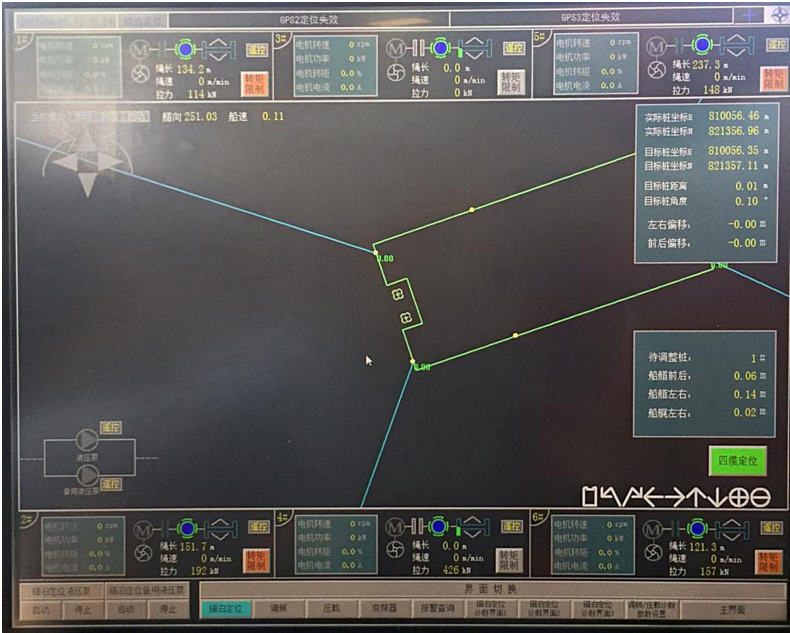


图6 自动移船效果

3 结语

1)采用高精度坐标转换算法、三维坐标推算算法以及船舶姿态与摇晃周期修正算法,可将系统物理计算精度控制在 0.05 m 以内;利用高精度自动锚泊定位系统,将船舶整体定位偏差控制在 0.1 m 内,角度偏差控制在 0.2°以内。

2)经实船应用,平均自动移船时间小于 15 min,定位精度满足施工设计要求,相比于人工手动移船,效率提升 30%以上,效益提升明显。

3)通过该研究,形成了 1 套完整的从定位推算到自动移船系统的技术成果,为类似船舶自动化控制系统设计提供了强力支撑。

参考文献:

[1] 廖鸣,李鹏,陈毅平,等.地心直角坐标和大地坐标转换

算法研究[J].电子科技. 2010, 23(2): 18-21.

[2] 宋天锁,原树兴.一种地心直角坐标到大地坐标转换的高精度算法[J].火力与指挥控制. 2010, 35(5): 90-92.

[3] 孔祥元,郭际明,刘宗泉.大地测量学基础[M]. 武汉:武汉大学出版社,2006.

[4] 苏晓宇,金鸿章,胡晓东.自动锚泊定位系统的张力混合优化算法[J].电机与控制学报, 2015, 19(4): 100-105.

[5] 石建峰,陈红卫,王莉.半潜式钻井平台锚泊定位锚链张力优化[J].计算机测量与控制, 2016, 24(7): 183-186.

[6] 范菊,黄祥鹿.锚泊线的动力分析[J].中国造船, 1999(1): 13-20.

[7] 秦煜婷.锚泊系统的定位控制仿真研究[D].镇江:江苏科技大学,2015.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 98 页)

[2] 沈振锋,张开金,夏雪,等.基于文献计量法的三峡库区消落带研究现状及热点分析[J].水生态学杂志, 2021, 42(1): 26-34.

[3] 薛兰兰,王轶浩,崔云凤.三峡库区消落带水生药用植物筛选体系及栽植建议[J].安徽农业科学, 2021, 49(3): 110-111.

[4] 简尊吉,郭泉水,马凡强,等.生态袋护坡技术在三峡水

库消落带植被恢复中应用的可行性研究[J].生态学报, 2020, 40(21): 7941-7951.

[5] 杜运领,陈晨宇,芮建良.三峡库区开县消落区治理模式的探讨[C]//中国科学技术协会.自主创新与持续增长:第十一届中国科协年会论文集.北京:中国科学技术协会声像中心, 2009: 841-845.

(本文编辑 王璁)

· 消 息 ·

安徽合肥引江济淮工程白山船闸主体完工

近日,一航局承建的安徽合肥引江济淮工程白山船闸主体工程完工。该项目位于合肥白石天河新开航道入巢湖口处,是引江济巢段关键性节点工程。项目于 2019 年 6 月开工建设,航道等级为Ⅲ级,设计代表船舶吨级为 1 000 吨级。项目的建设,将极大缓解淮河流域水资源短缺情况,改善巢湖淮河水生态环境,进一步提升长江、淮河航运能力。

https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202207/t20220707_173511.html(2022-07-07)