

船舶锚缆高精度自动监测调整技术应用研究

李建如^{1,2}, 刘玉宝^{1,2}, 韦博^{2,3}, 朱莹耀⁴, 孙卫东⁴, 杨森鑫⁴

(1. 中交一航局第一工程有限公司, 天津 300456; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461; 3. 中交天津港湾工程研究院有限公司, 天津 300222; 4. 中国能源建设集团东北电力第一工程有限公司, 辽宁 沈阳 110179)

摘要: 工程海域潮差大、潮水涨落速度快、潮流作用明显, 钢管桩施工过程中船舶锚缆及锚力受潮水涨落发生变化, 影响施工船舶定位精度, 进而影响施工效率。为实现大潮差环境下船舶高精度自动驻位及长时间驻位保持, 针对船舶锚缆高精度自动监测调整技术进行研究, 在钢管桩打设施工过程中对船舶位置进行监控, 根据船舶打桩 GPS 定位系统提供的船舶当前定位坐标和目标桩位坐标, 实时计算得到当前船舶各个缆绳实际长度的调整量, 由锚机的控制系统通过锚机卷筒的收放输出调整缆绳的长度和拉力实现精准定位, 减少因人员操作带来的误差, 实现智能化作业, 提高施工效率。相关技术在厦门第二东通道钢管桩打设过程中进行了实际应用, 效果良好, 船舶定位偏差精度控制在 5 cm 以内, 可供类似工程参考借鉴。

关键词: 打桩船; 锚缆自动调整; 自动驻位; 驻位保持

中图分类号: U655.55 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2025)01-0085-05

doi: 10.7640/zggwjs202501014

Application research on high-precision automatic monitoring and adjustment technology for ship anchor cable

LI Jian-ru^{1,2}, LIU Yu-bao^{1,2}, WEI Bo^{2,3}, ZHU Ying-yao⁴, SUN Wei-dong⁴, YANG Miao-xin⁴

(1. No. 1 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China; 2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China; 3. Tianjin Port Engineering Institute Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 4. China Energy Engineering Group Northeast No.1 Electric Power Construction Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110179, China)

Abstract: The project sea area has large tidal range, fast tidal fluctuation and obvious tidal current effect. During the construction of steel pipe piles, the ship's anchor cable and anchor force are subject to tidal fluctuation, which affects the positioning accuracy of construction ships and further affects the construction efficiency. In order to achieve high-precision automatic mooring and long-term mooring hold of ships in the environment of large tidal range, the high-precision automatic monitoring and adjustment technology for ship anchor cables was studied. During the construction of steel pipe piling, the ship's position was monitored. According to the ship's current positioning coordinates and target pile position coordinates provided by the GPS positioning system for ship piling, the adjustment amount of the actual length of each current ship's cable was calculated in real time. The control system of the windlass adjusts the length and tension of the cable through the retracting and releasing output of the windlass drum to achieve accurate positioning, reduce the error caused by personnel operation, realize intelligent operation, and improve the construction efficiency. Relevant technologies have been applied in the process of steel pipe pile driving of Xiamen Second East Passage, and the effect is good. The accuracy of ship positioning deviation is controlled within 5 cm. The relevant technology can be used as a reference for similar projects.

Key words: pile driving vessel; automatic adjustment of anchor cable; automatic mooring; mooring hold

0 引言

随着海洋技术的不断发展，船舶作为海上交通及开发工具越来越常见，船舶系统定位技术的研究也逐渐深入，20 世纪 50 年代以来，出现了动力定位技术^[1-2]。动力定位是通过自动控制系统，使船舶或浮动平台利用自身的动力抵御海上风、波浪和海流的影响，自动就位并保持在设定位置或方位上的一种定位方法。目前船舶常用的定位技术主要有锚泊系统定位技术、动力系统定位技术及动力定位辅助锚泊系统定位技术^[3]。随着全球海洋经济的蓬勃发展和海洋资源的深度开发，船舶锚泊定位技术在海洋工程领域扮演着越来越重要的角色。特别是在海洋施工、海上平台安装、海洋救援等领域，对船舶锚泊定位的准确性和稳定性要求极高^[4]。然而，传统的锚泊定位方法多依赖于人工操作和经验判断，存在效率低下、精度难以保证等问题，特别是在复杂多变的海洋环境中，这些问题尤为突出^[5]。

当前，随着信息技术的快速发展和智能化水平的提高，自动化、智能化的锚泊定位技术逐渐成为研究热点。国内外学者和工程师们纷纷致力于研发新的锚泊定位技术和系统，以提高船舶锚泊定位的精度、效率和安全性^[6]。其中，自动锚缆监测调整系统作为一种新型锚泊定位技术，通过实时监测锚缆状态、自动调整锚缆参数，能够实现高精度定位和长时间驻位保持，为海洋工程领域的发展提供了新的解决方案^[7]。然而，目前自动锚缆监测调整系统仍面临一些挑战和问题。首先，系统的复杂性和集成度较高，需要综合考虑船舶结构、锚缆特性、海洋环境等多种因素，才能实现精确控制和稳定运行。其次，系统的智能化水平还有待提高，需要进一步优化算法和控制策略，以实现更高效的自动化和智能化控制。此外，系统的可靠性和稳定性也需要进一步加强，以确保在复杂多变的海洋环境中能够稳定可靠地运行^[8]。

针对以上问题，本文旨在介绍一种自动锚缆监测调整系统，该系统通过集成船舶现有设备资源，对锚机、绞车、数控操作等系统进行升级改造，并结合先进的 GPS 信号输出系统和自动锚力数据接收系统，实现了锚缆长度、角度以及拉力的实时监测与自动调整。该系统不仅具有高精度定位和长时间驻位保持的功能，还具有数据共享传输功能，能够与 GPS 打桩系统等其他施工设备

无缝对接，实现施工过程的实时监控和数据分析。本文将从系统原理、设计实现、应用效果等方面对系统进行详细介绍和分析，以期为自动锚缆监测调整系统的研究和应用提供有益参考。

1 工程概况

厦门第二东通道工程跨海桥梁桩基采用钢管复合桩，承台及墩身为预制拼装结构，上部结构为钢箱梁结构。项目海中区桥梁共需安装 72 根钢管桩，桩长范围 23~38.2 m。为确保钢管桩施工的顺利进行，采用了打桩船与移动导向架相结合的沉桩工艺。主要施工步骤涵盖船舶驻位、移动导向架定位、钢管桩吊装进入移动导向架并自沉、振动锤初打以及液压冲击锤复打等多个环节。本工程对钢管桩的施工精度要求极高，垂直度允许偏差须小于 1/250，平面偏位须控制在 80 mm 以内。这一高标准对施工船舶的定位精度提出了极大的挑战。

本工程海域潮汐类型属规则半日潮，工程区域潮汐特征值见表 1，最大潮差约为 7 m，平均潮差约为 4 m，潮差较大，按照平均潮差计算潮水涨落速度约为 65 cm/h，潮水涨落速度快且明显。施工区域受潮流影响明显，流速为 0.86 m/s。潮汐的快速涨落和显著潮流对船舶锚缆及锚力产生显著影响，进而影响施工船舶的定位精度。鉴于施工海域潮汐与潮流的显著影响，传统的船舶定位方法难以满足高精度施工要求。因此，研发船舶锚缆高精度自动监测调整技术显得尤为重要。该技术通过实时动态监测船舶坐标，在潮汐变化时自动调整锚缆长度，以保持高精度驻位，减少人为操作带来的误差，实现智能化作业，提升施工效率。

表 1 厦门海洋站潮汐特征值(基准面:1956 高程)
Table 1 Tidal characteristic values of Xiamen Ocean Station(Datum: 1956 Elevation)

潮汐特征	数值
最高潮位	4.54
最低潮位	-3.30
平均高潮位	2.47
平均低潮位	-1.41
最大潮差	6.92
最小潮差	0.99
平均潮差	3.98

2 自动锚缆监测调整系统

2.1 自动锚缆监测调整原理

自动锚缆监测调整系统原理示意图如图 1 所示, 通过集成高精度 GPS 系统、用户友好的控制指令输入界面、先进的测量技术以及智能核心运算单元, 保证了船舶锚泊定位高精度和灵活性。该系统的核心在于其实时数据监测与动态调整能力。GPS 系统为系统提供船舶的三点实时位置数据, 确保船舶位置的精确追踪。同时, 通过用户友好的控制指令输入界面, 操作人员可以轻松设定船舶的目标移动位置, 实现快速而准确的锚泊定位。更为关键的是, 系统配备了先进的测量技术, 能够实时监测各个锚机的缆绳张力、缆绳长度以及绳速等关键参数。这些实时动态数据不仅为核心运算单元提供了精确的控制依据, 还为锚泊过程中的风险评估提供了宝贵的数据支持。

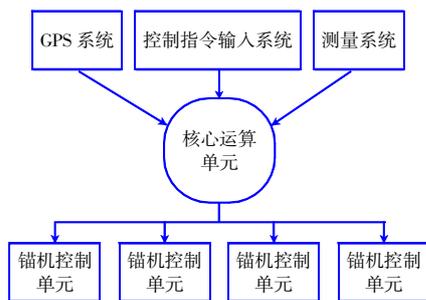


图 1 自动锚缆监测调整系统原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the principle of automatic anchor cable monitoring and adjustment system

而系统的核心运算单元, 则是整个系统的“大脑”, 负责接收来自 GPS 系统、控制指令输入界面以及测量系统的数据, 经过高速运算后, 生成精确的控制指令, 并通过锚机控制单元, 实现对各个锚机的精确控制。这种闭环控制机制确保了船舶能够按照预定的位置锚泊, 并在遇到风浪等不利条件时能够迅速调整锚缆参数, 保持船舶的稳定。

2.2 组成及功能

自动锚缆监测调整系统是一套基于工业以太网技术的智能化系统, 它集成了多个关键组成部分, 以确保船舶锚泊过程的精确控制和安全稳定。系统核心是一个高性能的核心运算单元, 负责接收和处理来自各个子系统的数据, 并据此发出控制指令。这些指令通过工业以太网高效传输, 确保指令的及时性和准确性。锚缆的状态监测是系

统的关键功能之一, 为此系统配备了 4 个测量系统, 每个测量系统对应 1 个锚机, 通过张力传感器和旋转编码器实时监测锚缆的张力、长度以及绳速等关键参数。这些测量数据经过转换器转换为标准信号后, 直接输入到对应锚机控制单元的 PLC 控制器中, 为控制决策提供准确依据。锚机控制单元作为系统的执行机构, 由 PLC 控制器和手动/自动转换电路单元构成, 结构示意图如图 2 所示。PLC 控制器接收来自测量系统的数据, 并结合核心运算单元的控制指令, 实现对锚机电机、刹车系统和离合器等设备的精确控制。手动/自动转换电路单元允许在手动控制和自动控制之间自由切换, 以应对不同情况下的需求。

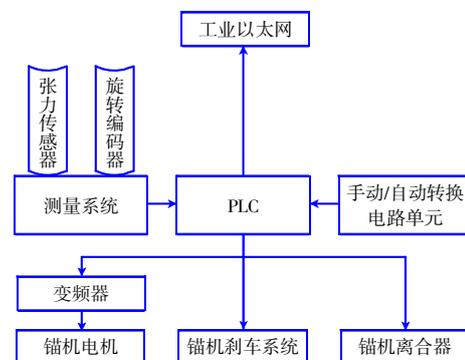


图 2 锚机控制单元结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the windlass control unit

此外, 系统还配备了 GPS 系统, 用于实时获取船舶的位置数据, 为核心运算单元提供锚泊定位的基础信息。同时, 控制指令输入系统允许操作人员输入目标位置等控制指令, 实现对锚泊过程的精确控制。为了便于操作人员监控和管理, 系统还配备了 4 个数据显示终端挂载在工业以太网上, 与 4 个锚机一一对应。这些终端实时显示锚机的运行状态和关键参数, 如缆绳张力、长度、绳速、变频器数据以及锚机其他部件的状态, 为操作人员提供直观的监控界面。

3 自动锚缆监测调整控制方法

3.1 布锚与初始定位

在布锚过程中, 通过 GPS 系统和各个锚机的测量系统获取船舶运动过程中的数据, 船舶驻位标准示意图如图 3 所示。核心运算单元基于这些数据计算出 8 个锚点的坐标, 为后续的定位控制提供基础数据。

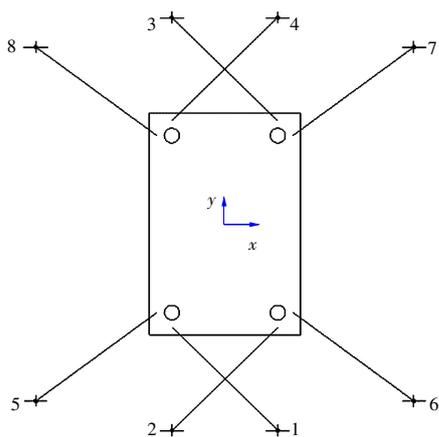


图 3 船舶驻位标准示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ship mooring standard

3.2 船首向与缆绳长度计算

完成布锚后，利用 GPS 系统获取船舶的实时位置数据。核心运算单元根据三点 GPS 坐标计算出船首向，并以此为基础绘制虚拟坐标系。在虚拟坐标系中，结合船体结构和出锚点位置计算出 4 个出锚点的坐标。进一步根据 8 个锚点的坐标信息，计算出 8 根缆绳在投影面上的长度。

3.3 船舶运动控制

核心运算单元根据船舶在坐标系中的目标定位位置，计算出船体当前位置与目标定位位置的偏差量。偏差量包括 X 轴偏差量、Y 轴偏差量和船首向偏差角度。基于这些偏差量和初始数据(如锚点坐标、投影面长度等)，计算出 8 根缆绳的收紧长度控制数据。然后，生成对各个锚机的运动控制指令，并通过对应的锚机控制单元实现锚机的精确控制。通过调整缆绳的长度，实现船舶的平移和旋转，使船舶逐步移动到目标位置。

3.4 控制策略与优化

在锚机动作过程中，GPS 系统和各锚机的测量系统实时向核心运算单元反馈数据。核心运算单元根据反馈的数据进行闭环自动控制，确保船舶运动的稳定性和精度，并防止锚机拉力过载。此外，可采用鲁棒控制方案或 PID 控制方案对锚机进行控制。PID 控制方案通过定期调整电机转速来适应当前的偏差，提高系统的响应速度和稳定性。

当船舶运动到位后，采用缆绳拉力控制实现船舶位置的锁定与维持。通过采集缆绳拉力数据并结合绳长计算结果实时调整每根缆绳的拉力值，使其保持在设定的范围内，这有助于防止走锚并

确保船舶定位的准确性。在施工过程中，由于潮汐变化、风浪等自然因素的影响，定位后的船舶可能会出现偏移。此时，通过缆绳张力补偿及偏移量补偿算法对船舶进行微调。缆绳的张力是控制船舶位置的重要依据。通过控制锚机调整缆绳张力，使船舶在海上保持平稳的施工作业状态。张力补偿算法将反馈的张力传感器数据和 GPS 数据带入控制模型计算得到补偿值，并将其输出到锚机实现微调。

4 应用效果

4.1 船舶自动驻位

通过本系统实现的船舶自动驻位功能，不仅提高了锚泊的精准度，还极大地减少了人工操作的时间和成本。如图 4 所示，系统根据 GPS 给定的坐标，结合锚缆长度及角度的自动调整，实现了船舶的全过程自动驻位。在距离目标桩位坐标 9 m 处，船舶开始自动驻位流程。系统通过精确计算和实时调整，仅经过 4 次拉力平衡调整，总计耗时 8 min，便成功地将船舶定位到目标位置，展现了高效且高精度的自动驻位能力。

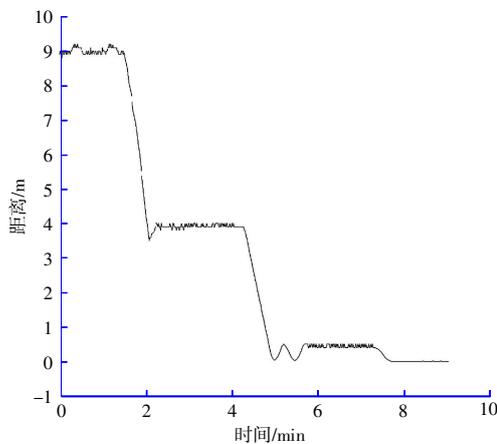


图 4 船舶自动驻位数据

Fig. 4 Data of ship automatic mooring

4.2 船舶驻位保持

在复杂的海洋环境中，施工海域潮差大、流速快、潮汐变化迅速等情况下，保持船舶的稳定驻位是一项具有挑战性的任务。结合钢管桩的实际打桩需求，本系统在船舶自动精准驻位完成后，进行了驻位保持试验。如图 5 所示，在长达 3.5 h 的驻位保持期间，尽管潮汐变化高度达到了 2.2 m，但自动锚缆监测调整系统展现出了卓越的驻位保持能力。系统通过实时监测船舶位置的变化自动调整锚缆拉力进行实时纠偏，成功将船舶定

位偏差精度控制在5 cm以内,确保了船舶在复杂海洋环境下的稳定驻位。

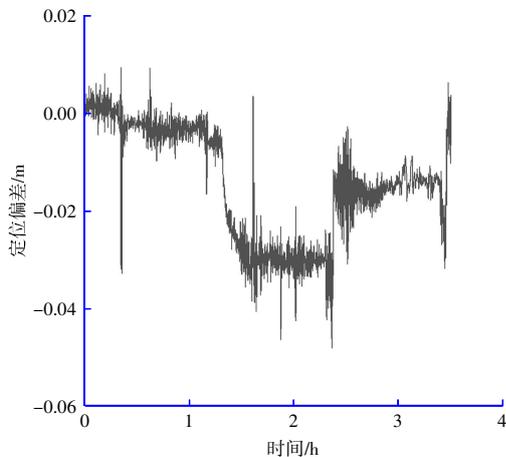


图5 船舶驻位保持偏差数据

Fig. 5 Deviation data of ship mooring hold

4.3 实时监控与数据分析

自动锚缆监测调整系统不仅实现了船舶的自动驻位和驻位保持,还提供了实时监控和数据分析的功能。系统通过实时收集船舶位置、锚缆状态、拉力变化等数据,结合先进的算法进行分析处理,为操作人员提供准确的船舶状态信息和锚泊性能评估。这使得操作人员能够及时了解船舶的锚泊情况,及时发现并解决问题,确保船舶的安全和稳定。

5 结语

1) 系统通过精确计算,确保了船舶在复杂海况下能够准确锚泊定位。这不仅提高了定位的准确性和稳定性,还为船舶的安全运行提供了有力保障。

2) 船舶锚缆高精度自动监测调整技术实现了在钢管桩打设施工过程中对船舶位置的实时监控和自动调整。通过全过程自动坐标纠偏、拉力调整以及锚缆长度调整,系统能够在大潮差环境下实现近距离船舶的高精度定位,并长时间保持驻位状态,极大地提高了施工效率,降低了人为操作误差。

3) 在厦门第二东通道钢管桩打设过程中,船舶锚缆高精度自动监测调整技术得到了实际应用和检验。通过实际测试,系统展现出了良好的自动驻位和长时间驻位保持功能,船舶定位偏差精

度控制在5 cm以内,充分证明了该技术的有效性和可靠性。

自动锚缆监测调整系统为船舶锚泊定位提供了一种新的解决方案,其在提高定位精度、保证施工安全、提升施工效率等方面具有显著优势。随着技术的不断发展和完善,该系统将在未来海洋工程领域发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] 郑荣才,宋健力,黎琼,等. 船舶动力定位系统[J]. 中国惯性技术学报, 2013, 21(4): 495-499.
ZHENG Rong-cai, SONG Jian-li, LI Qiong, et al. Dynamic positioning system of ship[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2013, 21(4): 495-499.
- [2] GOPMANDAL F, GHOSH A, KUMAR A. LQ optimal robust multi-variable PID control for dynamic positioning of ships with norm-bounded parametric uncertainties[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 113054.
- [3] 高立兵. 船舶动力定位辅助锚泊系统控制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
GAO Li-bing. Research on control technology of dynamic positioning assisted mooring system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [4] 杜佳璐,杨杨,郭晨,等. 基于高增益观测器的船舶动力定位系统的输出反馈控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(11): 1486-1491.
DU Jia-lu, YANG Yang, GUO Chen, et al. Output feedback control of ship dynamic positioning system based on high gain observer[J]. Control Theory and Application, 2013, 30(11): 1486-1491.
- [5] 王会峰,矫健,张凯,等. 海洋半潜式平台多点锚泊系统设计与分析[J]. 中国造船, 2022, 63(4): 183-191.
WANG Hui-feng, JIAO Jian, ZHANG Kai, et al. Design and analysis of spread mooring system for offshore semi-submersible platforms[J]. Shipbuilding of China, 2022, 63(4): 183-191.
- [6] 倪伟平,曾巍,陈莹霞. 第四代 82000 DWT 散货船锚泊设计[J]. 船海工程, 2024, 53(1): 87-91.
NI Wei-ping, ZENG Wei, CHEN Ying-xia. Anchoring design of the 4th generation 82 000 DWT bulk carrier[J]. Ship & Ocean Engineering, 2024, 53(1): 87-91.
- [7] 吴纪坤. 工程船锚泊系统定点控制及张力分配研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2023.
WU Ji-kun. Research on fixed-point control and tension distribution of mooring systems for engineering ship[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2023.
- [8] 张弘,王瑞阳,王锋,等. 维修型半潜船推进器辅助锚泊定位能力分析[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(21): 92-96.
ZHANG Hong, WANG Rui-yang, WANG Feng, et al. Research on thruster assisted anchoring positioning in semi-submerged maintenance ship[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(21): 92-96.