

全漂浮整平锚泊自动定位技术应用研究

王富敬

(中交一航局第二工程有限公司)

摘要:为提高全漂浮整平船在复杂海况下的施工精度与效率,研发并应用了一套集成高精度 GNSS-RTK 定位技术、智能控制算法与多传感器实时反馈的锚泊自动定位系统。该系统通过实时计算船体位置偏差,自动控制 6 台锚机收放缆绳,实现船体的精确移动与稳定。大连湾海底隧道工程的应用表明:该系统能将船舶位置偏差精确控制在 ± 5 cm 以内,与传统人工操作相比,显著提升了作业效率并降低了操作风险。该自动定位技术成功解决了传统人工操作在深水及复杂海况下精度与稳定性不足的问题,为类似海洋工程提供了高效、可靠的技术解决方案,具有广泛的推广应用价值。

关键词:自动定位;船体控制;海洋工程;GNSS 定位

0 引言

随着全球海洋工程的快速发展,特别是深水隧道、桥梁以及海洋能源开发等项目的增加,船舶的精确定位和作业稳定性已成为海洋工程成功的关键因素^[1]。随着海洋工程项目对船舶定位精度和施工效率要求的不断提高,传统的人工控制和定位方法,虽然能满足作业需求,但在潮汐变化、风浪波动等环境因素影响下,人工操作的精度和稳定性难以保障^[2]。近年来,越来越多的海洋工程项目开始采用自动定位技术,尤其是在全漂浮作业中^[3]。集成高精度的 GNSS 定位技术、智能控制算法和实时数据反馈,自动定位系统能够高效、精确地控制船舶的锚缆系统,实现船舶的自动定位和稳船^[4-5]。

1 工程概况

1.1 项目背景

大连湾海底隧道工程是中国沿海重要的基础设施项目之一,旨在为大连湾区域的交通运输提供更加高效的通道,大连湾海底隧道工程平面图见图 1。该工程沉管隧道的基础位于岩质海床,基槽边坡为岩质斜面。传统的桩腿式定位整平船作业时,需将桩腿支撑于海底。若在岩质斜坡上作业,桩腿放置极不稳定,存在船舶倾覆的巨大安全风险。为解决这一难题,曾深入研究“半漂浮”整平方案,即部分依靠桩腿、部分依靠锚泊系统定位。但研究发现,在复杂的岩基边坡上,半漂浮模式仍难以完全规避桩腿支撑带来的安全性与稳定性问题。

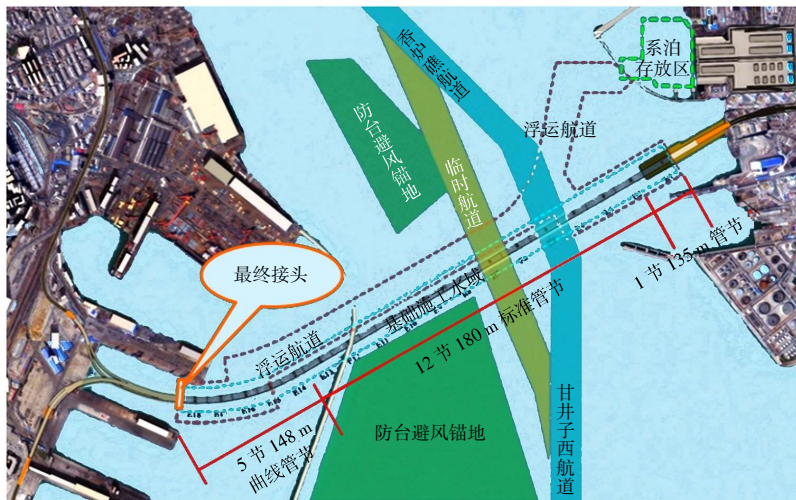


图 1 大连湾海底隧道工程平面布置图

为确保作业安全与施工精度,采用技术难度更高但安全性更优的“全漂浮”方式进行施工,即以锚泊系统作为船舶定位和稳定的唯一方法。通过采用全漂浮碎石基床技术,完成沉管铺设,并以全漂浮整平船作为核心施工设备^[6]。

1.2 重难点分析

该工程作业海域具有挑战性,尤其是潮汐、流速和风流等因素的变化。风速在6级以内,偶尔出现较强的风力变化,需定位系统具有强大的动态调节能力。最大波高可达到0.4 m,波周期通常为6 s。根据项目要求,整平船的定位精度必须达到 ± 5 cm以内^[7]。在船舶移动过程中,快速精确地控制锚缆的收放成为系统设计的关键难点。

1.3 自动定位系统设计思路

作业过程中,船员根据船体定位信息,通过手动控制锚机收放M1—M6锚缆,调整船体位置。为了提高整平精度、减少人工干预,并提升作业效率,对现有系统进行改造,增加自动定位功能。利用高精度GNSS系统和智能控制算法,实现船舶位置的自动调整^[8]。系统要求在 ± 5 cm的误差范围内完成定位,自动进行稳船操作。全漂浮自动定位算法实时计算船舶当前位置与目标位置之间的偏差,自动控制锚机收放缆绳,实现船体精确移动。高精度GNSS系统采用RTK(实时动态定位)技术,提供厘米级的定位精度,使船舶在复杂海况下能够精准定位^[9]。

船员只需输入目标位置,系统将自动完成锚机控制、缆绳调整和稳船操作。系统应具备自动报错与报警功能,在出现故障时及时停止操作,切换到手动模式。系统能实时监测和调整缆绳张力,保障船舶在作业过程中不偏离目标位置。船舶的目标位置与实际位置的偏差控制在 ± 5 cm以内,满足高精度的整平作业需求。系统内部的反馈机制,实时监控船位与缆绳张力,及时调整操作策略,以应对海况变化,保障作业连续性和精度。

为了提高定位精度,每台锚机配备三轴张力传感器和位置传感器,实时监测缆绳的张力和位置^[10]。系统的所有操作与监控界面都集成在统一的人机界面(HMI)中,便于操作员实时监控船舶运行状态。采用西门子S7-1500系列PLC作为主控单元,利用Profibus-DP通讯协议与其他子系统进行实时数据交换。

2 自动定位系统的设计与实现

自动定位系统是全漂浮整平船在大连湾海底隧道工程中实现精确船舶定位的关键技术之一。核心目标是集成先进的定位技术和智能控制算法,保证船舶在复杂海况下能够精确地移动至目标位置,保持稳定。

2.1 系统架构与核心组件

自动定位系统的设计基于高度集成的硬件和软件架构,涵盖高精度GNSS定位、传感器监测、锚机控制系统和实时反馈机制四大核心部分。自动定位系统使用的核心定位技术为GNSS-RTK,该系统利用2个或多个GNSS接收器提供实时的船体位置数据。接收高频率的GNSS信号,系统能够实时计算船舶的三维位置,保证定位精度可达到厘米级。

传感器系统包括三轴张力传感器和位置传感器。每台锚机上安装的张力传感器实时监控缆绳的张力变化,确保在不同操作状态下,船舶的稳定性和精度控制。整平船配备了6台40 t电动变频锚机,每台锚机均由控制系统管理。实时反馈机制是自动定位系统中最为关键的部分之一。系统能够根据实时数据(如船体位置、缆绳张力、风速、潮汐等)自动调整船舶的定位策略。当系统检测到船体偏离目标位置时,能够及时调整缆绳张力,保障船体稳定在目标位置。

2.2 自动定位系统的核心功能

在船体移动过程中,系统调整6台锚机的缆绳张力,使船舶朝向目标位置精确移动。当船舶接近目标时,系统减慢调整速度,精确计算和小幅度调整,确保船体精确达到目标位置。稳船过程中,系统不断调整缆绳张力和船体位置,船体不因外部因素(如潮汐、流速等)而产生过大的偏差。自动定位系统涵盖目标定位、船体调整、稳船功能和实时监控。自动定位系统通过输入目标船位坐标,利用GNSS定位系统实时计算船体与目标位置之间的偏差。系统根据实时船位数据,计算出各锚缆应调整的长度变化量。

2.3 控制算法

自动定位系统的核心在于其控制算法。每根缆绳的长度变化决定了船舶在水中的移动方向和速度。锚机控制系统根据缆绳的变化量,自动调整缆绳的张力。根据船舶当前位置和目标船位之间的空间偏差,系统通过几何计算得出每根缆绳

的变化量。

2.4 自动定位系统的实现流程

布锚时全漂浮自动定位系统自动跟踪缆绳长度和出缆位置，通过智能算法精准计算各个锚点坐标与缆绳角度。系统根据实时计算的船体位置与目标位置之间的偏差，自动控制6台锚机收放缆绳，精确控制船体朝向目标移动，控制过程见图2。在此过程中，系统分阶段调整船舶位置，精度不断提高。当船舶达到目标位置后，系统自动收紧缆绳至设定张力值，并开启船位坐标动态跟踪功能，保证船体位置控制在工程要求范围。

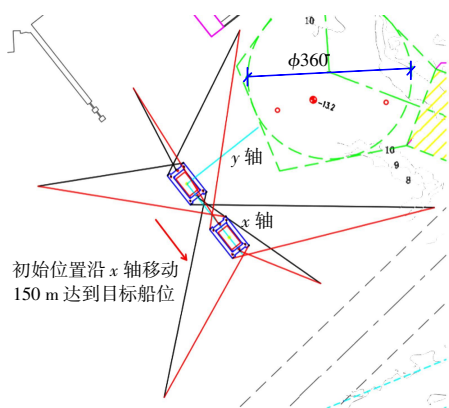


图2 整平船由初始位置移动至目标船位示意图

2.5 系统的安全性与保障措施

系统冗余设计，保证在主控制系统出现故障时，能够迅速切换到备用系统，保证船体作业不受影响。系统具备实时故障诊断功能，能够检测到系统异常，利用声光报警通知操作人员进行处理。

3 自动定位系统的实施与调试

在实施和调试过程中，依托精确的控制算法和实时反馈机制，结合现场数据对系统性能全面验证。该过程不仅涉及系统硬件和软件的集成，还对每个控制模块进行精细的调试，以确保系统在复杂的海况下精确控制船舶位置，满足高精度定位要求。自动定位系统的实施分为硬件安装、软件集成、系统调试和性能验证4个主要步骤。每步经过精心规划和反复测试，确保系统的高效性与安全性。

3.1 硬件安装

自动定位系统的硬件安装聚焦GNSS定位设备、传感器、锚机控制单元及其辅助设备的安装。整平船的船首和船尾各安装GNSS接收器，接收器实时提供船体的坐标数据，利用无线通讯模块与主控系统进行数据交换。每台锚机都配备三轴

张力传感器，监测缆绳的张力变化。船舶配备6台40t电动变频锚机，锚机电液一体化控制系统执行缆绳的收放动作。

3.2 软件集成

主控单元采用西门子S7-1500系列PLC，通过Profibus-DP协议与各个子系统(如GNSS系统、传感器、锚机)进行数据交换，保证信息的实时传递。为了系统的定位精度与稳定性，开发了精确的自动定位算法。自动定位系统通过Profibus-DP协议与现有船体控制系统实现数据交换，保障两者之间的信息流畅传递。

3.3 系统调试

自动定位系统的调试是确保系统能够精准稳定运行的关键环节。在调试过程中，按照严密的流程逐步进行各项测试，保证系统各项功能正常运行，在海况变化的情况下实现稳定定位。

1) 安全性测试

测试过程中，当系统出现故障或通讯中断时，操作人员可通过操作面板切换至手动模式。系统停止自动控制信号，操作人员可人工接管船舶控制。当检测到船舶的定位偏差超出设定的安全范围时，系统自动触发紧急停机操作，切断自动控制信号，并报警提示操作人员进行处理。

2) 单点测试

手动与自动模式的切换，确认每台锚机的收缆、放缆操作是否能够准确执行，并确保船舶在操作过程中保持稳定。分别对6台锚机进行测试，确保它们能够根据控制指令准确收缆和放缆。

3) 全功能测试

模拟不同的船体位置偏差，测试系统在自动定位过程中能否精确将船体移至目标位置。测试结果表明，系统能够在5cm以内的误差范围内完成定位，符合项目要求。在海况较为复杂的情况下，系统能够实时监测船位偏差，并通过调整缆绳张力和船体位置，确保船体维持在目标位置。

3.4 性能验证

在实验室和模拟环境测试通过后，需要进行现场测试，验证系统在实际海况下的表现。现场测试包括不同时间段的定位精度验证、稳船能力测试和数据监测。

在实际海域条件下，船体从目标位置偏差约9m时，经过动态调整后船体定位偏差都能稳定在5cm以内。

3.5 系统优化

在实施和调试过程中,发现潜在的优化空间,特别是在自动调整系统对潮汐变化的适应性方面。根据现场测试数据,优化控制算法,提升系统对快速潮汐变化的响应速度和精准度。通过调整定位算法中的迭代计算方式,提高了船舶的自动调整精度。在整个自动定位系统测试过程中,持续收集并分析了大量的作业数据。系统实时数据采集,监控了船体的动态位置、缆绳张力、风速、潮汐变化等多个参数。根据数据分析结果,自动定位系统对控制算法进行了优化,提升了船舶在极端潮汐变化下的定位精度和响应速度。优化后的系统能够在5 s内对偏差进行修正,最大限度减少了船体位置的误差。在3个月的海上作业测试中,船舶的位置偏差始终保持在 ± 5 cm以内,稳定性和精度满足要求。

3.6 系统的安全性保障

自动定位系统不仅要求高精度和稳定性,还需要具备完善的安全保障机制。主控系统采用冗余设计,确保系统在出现故障时能够迅速切换至备用系统。系统内置了实时故障诊断功能,在发生设备故障时及时报警,提供故障排查建议。当船舶的定位偏差超过设定的阈值时,系统会自动发出警告信号,并采取措施恢复定位。当系统检测到船舶因潮汐变化导致的偏差超出规定范围,通过调整缆绳张力进行修正,保证船舶回到目标位置。在系统关键控制部分设置备用控制模块,主控制系统出现故障时,备用系统接管,避免停机导致作业中断。

4 应用效果

自动定位系统应用于大连湾海底隧道项目中,经过多轮试验和现场测试,自动定位系统不仅提升了整平船作业效率,还显著提高了定位精度,降低了人为错误的可能性。

4.1 定位精度

大连湾海底隧道项目面临的海况涵盖潮汐变化、风浪波动等,都会影响船舶的稳定性和定位精度。在自动定位系统应用前,通过人工控制锚缆,进行目标位置的移动测试,测得船舶位置偏差通常在10~15 cm之间。引入自动定位系统后,实时调整缆绳的张力和长度,确保船舶定位精度。

在船舶接近目标位置的过程中,自动定位系统通过精调算法进行微调,确保定位精度控制在

5 cm以内。在多次测试中,船舶在5 min内完成从偏差9 m到目标位置的调整,且每次调整后,船体定位偏差都能够快速恢复到目标精度范围。

4.2 稳船能力与作业效率

在潮流和风浪较大的条件下,系统能够保持船舶稳定,不发生剧烈偏移。引入自动定位系统,操作员的干预次数显著减少,降低了操作错误的可能性并提升了作业效率。在多次试验中,船舶从偏差10 m处调整到目标位置的时间,由人工操作所需的约8 min缩短至4 min以内。

4.3 经济效益

自动定位系统不仅提高了船舶作业的精度和效率,有效避免了船舶在定位过程中各种人为因素带来的安全风险,还为项目带来了显著的经济效益。通过自动化操作,船舶的调整时间大幅减少,缩短了施工周期,节省了人工和时间成本。

5 结语

通过引入自动定位技术,系统实时监控和调整锚缆张力,实现船体的稳定定位,有利于船舶在潮汐、风浪等外部因素变化下,始终保持在目标位置上。全漂浮自动定位系统在大连湾海底隧道项目中成功应用并取得了显著成果,将船舶定位偏差控制在 ± 5 cm以内,远超传统人工操作的定位精度,验证了在复杂海况下的高精度和高稳定性,为类似项目提供了可借鉴的技术方案,也为海洋工程中自动定位技术的应用提供了宝贵经验。

参考文献:

- [1] 王仁强,赵越.基于Sigmoid函数的限制水域船舶避障路径建模[J].广州航海学院学报,2019,27(1):25-28,33.
- [2] 谢新连,何平,何傲,等.复杂水域船舶避碰路径规划研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(12):1-7.
- [3] 蒋美芝,吕靖.基于Pareto蚁群算法的船舶风险规避路径优化[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(1):192-199.
- [4] 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.
- [5] 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,2017.
- [6] “津平1”全漂浮整平自动定位系统改造升级方案汇报材料[R].大连:中交大连湾海底隧道项目总经理部第四工区,2021.
- [7] 天威锚泊自动定位系统项目总结[R].深圳:天威科技有限公司,2020.
- [8] “津平1”全漂浮整平定位自动化系统改造升级方案汇报材料[R].大连:中交大连湾海底隧道项目总经理部第四工区,2021.
- [9] “津平1”全漂浮整平定位自动化及自动调平系统实施方案[R].大连:中交大连湾海底隧道项目总经理部第四工区,2021.
- [10] 漂浮整平锚缆自动定位与船体调平系统研发与改造设计任务书[Z].大连:中交大连湾海底隧道项目总经理部第四工区,2021.