

基于 RTK 与 5G 技术的港口靠泊系统研究

蒋军, 许丽菊*

(重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 国际海上贸易日益增长的需求, 促使船舶和港口朝着智能化、高速化、低碳化的方向迅速发展。而运输货物的超大型船舶的安全进出港及靠离泊成为迫切需要关心的问题。通过对船舶进出港问题的研究, 提出了基于 RTK 技术和 5G 技术多传感器融合的港口靠泊系统。该系统通过 RTK 精准定位船舶和港口停泊节点的位置, 通过 5G 实时同步船舶与停靠点的相对位置信息, 为船舶进出港和靠泊过程提供精准引航, 这对船舶进出港一体化的管理, 提高靠泊作业的效率和安全系数起到了重要作用。

关键词: RTK 技术; 港口安全; 船舶靠泊; 多传感器融合; 5G 应用

中图分类号: U653.2 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2024)05-0016-06

doi: 10.7640/zggwjs202405003

Port berthing system based on RTK and 5G technology

JIANG Jun, XU Li-ju*

(Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The growing demand for international maritime trade has prompted ships and ports to rapidly develop towards the direction of intelligence, high-speed and low-carbon. However, the safety of the very large ships transporting goods entering and leaving the port and berthing has become an urgent concern. Based on the research of ship entering and leaving port, a port berthing system based on multi-sensor fusion of RTK technology and 5G technology was proposed. The system accurately positions ships and port berthing nodes through RTK, synchronizes the relative position information of ships and docking points in real time through 5G, and provides accurate pilotage for the berthing process of ships entering and leaving ports, which plays an important role in providing integrated management of ships entering and leaving ports and improving the efficiency and safety factor of berthing operations.

Key words: RTK technology; port security; ship berthing; multi-sensor fusion; 5G application

0 引言

随着贸易全球化、国际贸易自由化以及全球航运服务一体化体系的建立, 特别是现代物流的蓬勃发展, 中国港口已成为了世界供应链上重要的环节。约 90% 的进出口贸易商品通过海上运输, 因此保证船舶安全靠泊成为港口运输中的重要关注点。传统的大型船舶靠泊主要依靠引航员/船长目视、对讲机沟通、航道测绘图等手段进行引航,

主要依靠工作经验^[1], 引航人员必须精确掌握各种相关信息, 包括船舶的速度、与岸线的距离、海上环境的变化, 尤其是夜晚, 当遇到恶劣的天气条件, 将给港口的安全带来极大的威胁。2014 年 12 月 4 日, 荷兰籍散货船“EUROGRACHT”在靠泊过程中导致工作人员伤亡。2017 年 10 月 23 日, 中远海运集装箱船“飞云河”在靠泊时与码头发生碰撞事故^[2]。根据 IMO 统计, 全球海损事故中的

收稿日期: 2023-10-13 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 交通运输部关键核心技术攻坚专项 (GJ-2022-TOS-02); 重庆市教育委员会人文社科项目 (23SKGH141); 重庆市研究生联合培养基地 (JDLHPYJD202 2002)

作者简介: 蒋军 (1983—), 男, 湖北荆州人, 博士, 副教授, 从事港口、航运与综合物流研究。

*通讯作者: 许丽菊, E-mail: 2269023511@qq.com

80%是引航事故, 引航事故中的 80%是由人为失误造成^[3]。特别是在夜间, 据不完全统计在 2010 年以后, 夜间发生碰撞的风险约为白天的 1.3~1.5 倍^[4]。为了有效避免不利因素对海上船舶航行造成不良影响, 保障海上船舶运输航行的安全, 迫切需要通过新技术、新设备, 替代人工引航, 使得船舶实现独立靠泊、精准靠泊。港口船舶实现靠泊作业将具有更加安全、经济、环保、高效的特点, 也更加符合“智慧、绿色、安全”的港口发展理念^[5]。

1 靠泊技术现状

近年来, 国际海事组织和各大船级社相继提出了关于港船靠离泊技术的规范和要求, 国内大

部分高等院校和企业 在靠离泊技术方面的研究处于理论研究阶段, 以小型渡轮、拖轮、试验船、训练船等为 载体开展了应用探索与功能测试。国外关于船舶靠离泊的研究起步较早, 在辅助/自动靠离泊技术及系统方面做了大量理论研究, 一定程度上推动了港船靠离泊技术的发展。

现在船舶通常利用全球导航卫星系统和罗经设备来获取船舶的辅助信息, 但是现有设备的精度不能满足实际近岸船舶靠泊时的需求。靠泊船舶需要合适的传感器设备来获取精确的船舶辅助信息。越来越多的研究者尝试通过不同的传感器和方法来获取靠泊船舶的辅助信息, 不同传感器对比如表 1 所示。

表 1 不同传感器在获取船舶靠泊辅助信息应用上的特点对比

Table 1 Comparison of the characteristics of different sensors in the application of acquiring ship berthing auxiliary information

序号	传感器类型	优点	缺点	应用情况
1	可见光摄像头	获取目标容易, 得到的目标清晰	海上应用可靠性较差, 受雨雾天气遮挡影响大	较多
2	红外摄像头	通过边缘特征获取目标较容易	受环境光线变化影响很大	较多
3	导航雷达	测量距离较远, 运算要求较低	对目标的识别精度很低	较多
4	毫米波雷达	受雨雾等天气影响较小	覆盖区域呈扇形, 存在盲区区域, 测量精度较低	极少
5	激光雷达	360°无死角扫描, 测距精度较高, 能全天候工作	易受雨雾天气影响	逐渐增多

RTK 技术具有测距精度高、获取物体空间三维信息能力强等优点, 吸引了众多研究者基于 RTK 来进行靠泊船舶辅助信息研究。本文所讨论的基于 RTK 与 5G 技术的港口靠泊系统特点如下: 经由港口码头的各个停靠节点的 RTK 组网形成固定基站, 船舶 RTK 作为流动站, 进而确定各点所处位置。由于网络 RTK 技术能够提供多种参考站, 这样就能够有效减少误差源, 尤其是与时间有关的差错。达到厘米级高精度定位, 从而使精确确定船舶码头停靠点和船尾、船首之间距离的设想成为现实。

2 系统功能需求

在 5G、大数据、互联网等技术不断进步的背景下, 智慧港口的建设是港口行业未来的发展趋势^[6]。利用人工智能、云计算、边缘计算、物联网监测技术和安全预警调控等技术手段, 构建岸基系统, 建立智能船舶靠离泊监测、调度、预警系统, 对进出港及靠离泊的船舶所处的通航环境数据进行实时监测记录, 实现信息的自动获取。在此基础上, 实现对所采集信息的一体化处理, 为智能船舶航行及靠离泊提供支撑, 为港口建设做出示范。

2.1 操作环境的可视化

码头现场的实时摄像反馈是港口远程管理者掌握现场环境的最重要依据之一。管理者可以根据现场各个码头停靠点多角度、多方位的实时录像, 来确定船舶是否有异常情况及码头停靠点的周围环境。船舶上的显示界面实时指示船舶与码头停靠点距离和停靠点下发的航行路线以及周边船舶的位置、自身船舶的姿态信息, 系统应能够满足船长根据显示的信息在不依靠引航的情况下驾驶船舶停靠码头。

2.2 低延迟多势态的环境感知

港口靠泊系统需给船舶提供码头停靠点距离以外的多姿态环境感知信息, 包括船舶的航行速度、航行方向、三轴角度信息、舱内外温湿度、船舶振动情况。需给码头停靠点提供除实时录像以外的环境感知信息, 包括降雨情况、风速风向情况、温湿度情况。在大风大雨情况下, 应当提醒在港船舶或者静止船舶进出港。

2.3 系统自检与上报

为了保障现场作业人员的安全, 港口智能靠泊系统应该具有模块的自检和故障上报功能。系统还应能够通过用户界面和云端平台向船长和港

口管理者提供故障反馈和告警,并生成对应的错误码,维修人员可以根据对应的错误码进行维修更换。

3 靠泊系统方案设计

3.1 系统框架

针对智能船舶的靠离泊问题,本文提出的基

于 RTK 技术和 5G 技术的多传感器融合的港口靠泊方案分为船舶端、港口端和云端。整体框图如图 1 所示。通过 RTK 定位将港船双方的位置精确显示在地图上,软件实时显示双方相对位置等信息,如此对于保证码头停靠点和船舶位置准确、船舶靠泊安全是非常有利的。

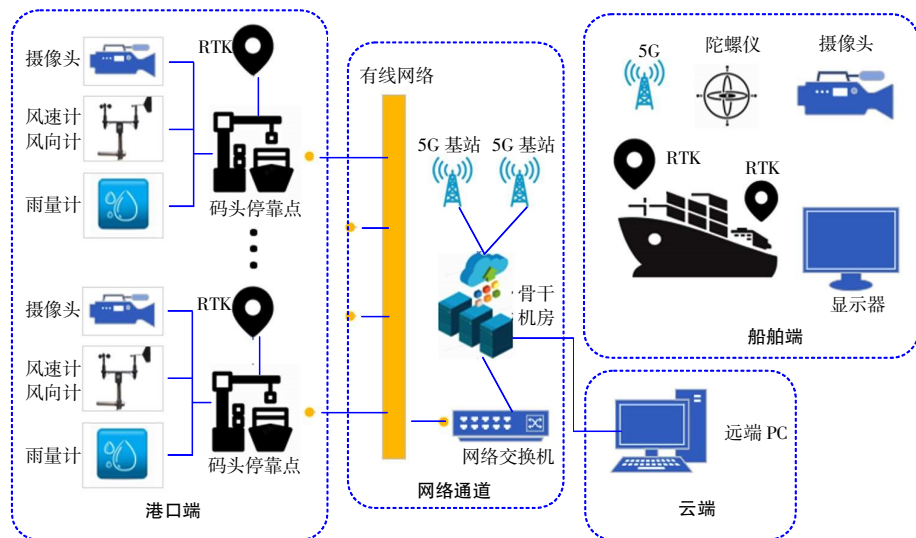


图 1 港口靠泊系统框图

Fig. 1 Block diagram of port berthing system

系统采用“云+端”的框架结构,实现全方位一体化管控目标^[7],整体包括船舶端的 IMU 惯性传感器,实时判断船舶的航向、航速、三轴倾斜角度等信息,装在船舶船首和船尾的 RTK 能将船首和船尾的定位精度保持在厘米级别,利用 5G 无线通信实现船舶端与码头停靠点、云端平台之间的信息传输。

当船舶要停靠在港口码头的停靠点时,此时离岸较近,船舶端 5G 信号良好,船长在驾控室操作页面通过 5G 方式进入云端平台,找到对应需要进入的港口,根据需要的码头服务以及码头空闲状态,查询并选择需要停靠的空闲码头。对应码头接收到停靠请求后,码头停靠点节点与船舶之间通过 5G 建立连接,同时码头停靠点实时获取船舶 RTK 的位置,通过与自身 RTK 位置对比计算,输出一个实时动态最优航线,将实时航线发送更新至船舶端,船长根据屏幕上的实时航线控制船舶靠泊。

当船舶想要离开码头时,船长将通过驾控室的云平台页面选择离港,对应停靠点接收到离港请求后,输出实时最优离港航线下发到船舶端,船长根据实时航线驶离港口。

云端显示各个港口码头停靠点的空闲状态,可查询各个靠离泊船舶的航线及当前实时航向、航速等信息以及可以通过停靠点的摄像头进行远程监控查看。船舶在靠离泊过程中,停靠点的补光灯会自动开启,方便船舶靠泊以及摄像头补光。在无船舶靠离泊作业时,补光灯关闭。云端也会显示靠泊系统的故障信息和错误码,当出现系统内部损坏时,可提示维修人员及时进行维修更换。

3.2 港船定位

港口靠泊系统通过采用网络 RTK 实现厘米级精度的港口和船舶的位置定位。网络 RTK 相比于传统的 RTK 技术有很大的差异。传统的 RTK 可以在移动网络信号覆盖不到的地方使用,而且它的稳定性也很强,但是用户需要在本地建立参考站,并且还需要已知的控制器,这样才能保证测量的准确度和可信度。所有 RTK 数字连接都需要在某个点上进行一次点校准,但是随着时间的增长,偏差也会加大,从而大大降低可靠性和可行性,并且限制了流动站和参考站相互之间的差距^[8]。此外,由于传统 RTK 数据通信使用无线电手段(普通无线电台),因此,流动站和参考站之间的位置深受基础电台天线高度和阻力的限制。在电台

模式下, 需要使用一个 GPS 接收机来作为基站, 而 RTK1+1 则只能被视为一个信号。

港口靠泊系统所采用的网络 RTK 技术中, 码头 RTK 一旦部署后, 先由多个固定的基准站组成的基准站网络来提供差分信号用以确定自身位置, 是用定位处区域型的 GNSS 网络误差模型替代单点的 GNSS 误差模型^[9], 无需建设自身的参考站, 能够有效减少误差源, 尤其是与时间有关的差错^[10]。如图 2 所示, 在码头 RTK 部署定位时, 基准站网络的每个基准站将各自的定位数据通过 GNSS 发给中央服务器。中央服务器会根据这些定位数据, 在码头 RTK(流动站)附近模拟出一个“虚拟基准站”, 用以提高码头 RTK 的定位精度。

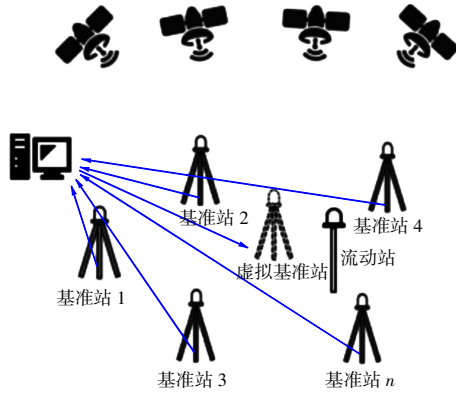


图 2 网络 RTK 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of network RTK

网络 RTK 中用到的最小二乘与卡尔曼滤波是构建观测模型的关键步骤。假设有 2 台 GPS 载波接收机可以同时接收 $K+1$ 颗卫星, 那么第 i 个历元的载波相位双差观测方程可以写成式(1)或式(2)^[11]。

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{Y} - \mathbf{L} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B \\ A_2 & B \\ \vdots & \vdots \\ A_n & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ N \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: \mathbf{V} 为 n 维真误差向量; \mathbf{A} 为 $n \times m$ ($n = k \times n_1$, $m = k + 3$) 维系数矩阵; \mathbf{Y} 为 m 维待估参数向量; \mathbf{L} 为 n 维双差观测向量。

法方程的系数阵为:

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (3)$$

由最小二乘得到的参数估计值为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L} \quad (4)$$

在确定权阵 \mathbf{P} 时, 选用卫星高度角来构造权阵的参考因素, 如式(5)、式(6)。

$$\mathbf{Q}_i = \begin{bmatrix} 1 + \frac{\sin E_{r1}}{\sin E_b} & 1 & \cdots & 1 \\ 1 & 1 + \frac{\sin E_{r2}}{\sin E_b} & \cdots & 1 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ 1 & 1 & \cdots & 1 + \frac{\sin E_{r(K-1)}}{\sin E_b} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{Q}_i^{-1} \quad (6)$$

式中: \mathbf{Q}_i 为第 i 个历元构成的协因数阵; \mathbf{P}_i 为该历元的权阵; E_b 为参考卫星的高度角; E_{r1} , E_{r2} , \cdots , $E_{r(K-1)}$ 为 $K-1$ 颗卫星各自的卫星高度角。根据不同的历元双差观测值互不相关, 在 n_1 个历元中总的协因数阵为一对角阵, 如式(7)。

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_{n1} \end{bmatrix} \quad (7)$$

通过最小二乘估计得到模糊度和位置参数的浮点解以及相应的方差协方差阵, 在此基础上求解得到准确的模糊度固定解再代入求得位置参数的固定解。在整周模糊度确定之后动态条件下只要共视卫星保证在 4 颗以上就可以求得厘米级的定位结果。

3.3 信息传输

港口靠泊系统港船之间通信采用的是第五代移动通信技术, 5G 网络的低延时、大带宽两大特性, 解决了其他无线网络在移动场景下带宽、延时、可靠性不足的问题^[12]。港口靠泊系统都在室外开阔场地, 5G 通信的穿透力弱不会对系统产生影响, 同时 5G 拥有更高的传输速率, 更低的传输延时能够让港口与船舶之间的通信更加可靠, 港口获取船舶位置和运行姿态更加准确, 从而实时航线的规划也能变得更加精准, 提高了船舶在海上航行的安全性。

第五代移动通信技术可以实现 D2D(设备到设备)功能, 当船舶在近港航行时, 当船舶的 5G 与港口的 5G 处于同一个基站下, 船舶的 5G 与港口的 5G 可以实现两者直接通信, 不需要经过基站转发, 能够实现更高速率更低延时的通信。在码头停靠点之间采用有线网络连接, 并最后连接到公网。

3.4 环境感知

港口靠泊系统配备丰富的传感系统, 在船舶端有 IMU 惯性传感器、振动传感器、舱内外温湿度传感器。码头停靠点有摄像头图像传感器、温

湿度传感器、雨量传感器、风速风向传感器,系统传感器部分框图如图3所示。船上IMU惯性传感器采集船舶的三轴加速度和三轴角度信息,当船舶航行时倾角过大会报警;振动传感器采集船舶受风浪影响的振动情况,如果振动强烈也会告

警;温湿度传感器采集内外温湿度用于船长判断仓储货物是否需要除湿等操作,便于货物存储。港口的摄像头记录停靠点的录像,便于远程管理者查看现场情况;雨量计、风速计采集降雨、风速情况,遇到大风大雨天气会向云端告警。

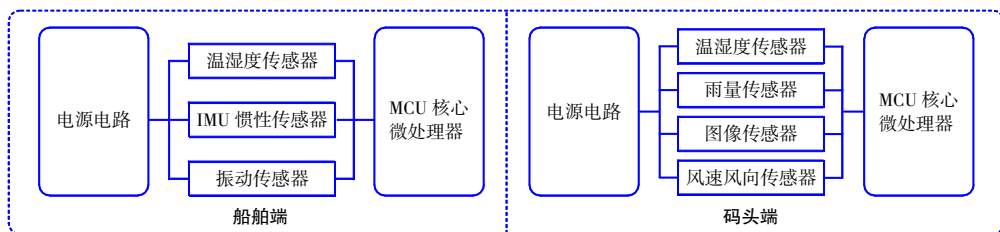


图3 系统传感器框图

Fig. 3 System sensor block diagram

港口靠泊系统的各个传感器参数如下:

1) 温湿度传感器 HDC2022: ①RH 测量范围: 0~100%。②温度测量范围: -40~125℃。③湿度精度: $\pm 2\%$ (典型值), $\pm 3\%$ (最大值)。④温度精度: $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (典型值), $\pm 0.4^\circ\text{C}$ (最大值)。

2) IMU 惯性传感器 ICM20602: ①陀螺仪灵敏度误差: $\pm 1\%$ 。②陀螺仪噪声: $4\text{ mdps}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。③加速度计噪声: $100\text{ }\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

3) 振动传感器 CT1005L: ①灵敏度: 50 mV/g 。②频率范围: $0.5\sim 5\text{ kHz}$ 。③带宽分辨率 1 mg 。④测量范围: 100 g 。⑤非线性范围: $\pm 0.1\%$ 。

4) 雨量计 WXT530: ①累计降雨分辨率 0.01 mm 。②雨强观测范围: $0\sim 200\text{ mm/h}$ 。③雨强分辨率: 0.1 mm/h 。

5) 图像传感器 IMX258: ①1200万像素 $1/3.06\text{ inch}$ 。②帧率: 30 FPS 。③最大分辨率: 3840×3104 。④角度: 120° 广角。

3.5 软件系统架构

港口靠泊系统的船舶端软件框图如图4所示。

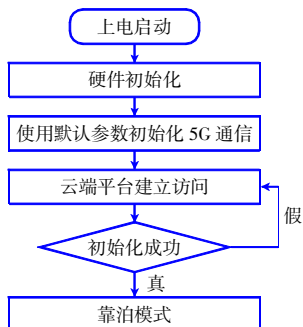


图4 船舶端软件流程图

Fig. 4 Flow chart of ship terminal software

船舶端的软件主要处理一些姿态传感器的数

据采集,实时获取船舶的运行状态,并将状态信息上传到码头,用于码头计算航线和云平台显示船舶位置。船舶端软件还需要实现与码头的5G通信,将船舶端与码头建立连接,实现信息交互。除此之外还有船舶端的显示界面,用于实时显示船舶位置和航线,以及船舶的状态信息,方便船长更好地驾控船舶。

船舶端所有软件程序都运行在船舶MCU微处理器之上。软件功能主要包括硬件模块的初始化、传感器驱动控制与传感数据采集、5G模组网络通信实现,云端平台页面的显示与访问。

港口靠泊系统的码头停靠节点软件框图如图5所示。

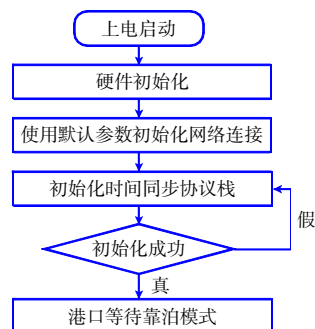


图5 港口停靠节点软件流程图

Fig. 5 Software flow chart of port docking nodes

码头停靠节点所有软件程序都运行在码头端MCU微处理器之上。软件功能主要包含硬件模块的初始化、传感器驱动控制与传感器数据采集、驱动器控制、5G网络通信、以太网通信、航线实时规划。

云端平台功能主要包括港口项目的建立与管理、项目内进出港船舶的绑定与解除、项目内各

个停靠节点的空闲状态实时显示、停靠节点硬件设施的编辑与显示、船舶实时动态航线显示、停靠节点摄像头直播查看功能、远程控制补光灯开关、港口以及船舶的一些设备故障报错功能。如图6所示,船长根据需靠泊的港口在港口列表选择对应港口,同时出现对应港口下的各个码头列表,点击进入对应的码头可以看到该码头的设备配置以及空闲状态。港口管理者可以看到各个码头的工作状态。



图6 云平台港口界面

Fig. 6 Cloud platform port interface

如图7所示,可以看到附近的船舶位置以及自身船舶与码头停靠点的实时路线,船长可以根据船舶中控台上画面实时路线不断修正船舶运行姿态,实现精准靠泊,港口管理者同样可以看到该界面,实现远程辅助以及可以看到整个港口进出的船舶位置。

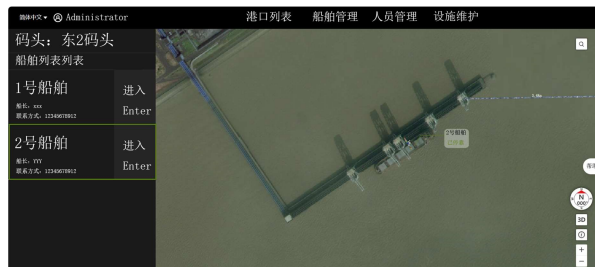


图7 云平台码头界面

Fig. 7 Cloud platform dock interface

4 结语

利用5G技术和RTK高精度的定位技术,港口靠泊系统可以为海上船舶在港口靠离泊过程中不间断提供持续、高效的实时航线,能够实时准确地提供船舶在靠离码头过程中的船舶高精度位置、船舶移动速度及方向、船首向等信息,船长根据实时航线不断修正航行路线,港口靠泊系统可以用于指导船舶在雾季等视野不良的情况下安全航行和靠泊,大大降低引航员在高强度作业过程中的人为判断失误,保障船舶和港口的航行安全,解放引航员这一高危职业,促进港口走向智能化管理,从而大大增强我国港口的运行效率和

提升我国港口的竞争实力。

参考文献:

- [1] 章海峰,吴洪良.大型船舶靠泊监测系统[J].港口装卸,2023(4):55-57.
ZHANG Hai-feng, WU Hong-liang. Design of berthing monitoring system for large ships[J]. Port Operation, 2023(4): 55-57.
- [2] 谢涵清.船舶自主靠泊研究[D].上海:上海交通大学,2020.
XIE Han-qing. Autonomous berthing system for ships[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [3] 徐建豪,孙长涛.引航员心理素质与引航安全[J].世界海运,2015,38(3):43-45.
XU Jian-hao, SUN Chang-tao. Pilot psychological quality and pilot safety[J]. World Shipping, 2015, 38(3): 43-45.
- [4] 李学东,李军.我国港口放开夜航限制有关问题研究[J].中国港湾建设,2021,41(7):24-26,76.
LI Xue-dong, LI Jun. Study on issues relating the liberalization of night voyage restrictions in China's ports[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(7): 24-26, 76.
- [5] 高峰,唐友钢,聂晓彤.港口船舶自动系泊系统研发与应用综述[J].中国港湾建设,2022,42(9):11-15.
GAO Feng, TANG You-gang, NIE Xiao-tong. Review of research and application on automatic mooring system of ships in ports[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(9): 11-15.
- [6] LIU Cui-lian, ZHAN Si-qi, HE Li-na. Evaluation of smart port development level based on entropy weight TOPSIS method[C]// International conference on frontiers of traffic and transportation engineering, Lanzhou, 2022.
- [7] 吴向中,陈韬.港航工程中智慧安全管理系统的设计与应用[J].中国港湾建设,2021,41(9):68-72.
WU Xiang-zhong, CHEN Tao. Design and application of smart safety management system in port and shipping engineering[J]. China Harbour Engineering, 2021, 41(9): 68-72.
- [8] CH/T 2009—2010,全球定位系统实时动态测量(RTK)技术规范[S].
CH/T 2009—2010, Specifications for global positioning system real-time kinematic (RTK) surveys[S].
- [9] WU J, JIANG J, ZHANG C, et al. A novel optimal robust adaptive scheme for accurate GNSS RTK/INS tightly coupled integration in urban environments[J]. Remote Sensing, 2023, 15(15): 3725.
- [10] 吴晓群,邓晨斌.网络RTK定位精度及可靠性研究[J].江西科学,2015,33(4):553-557.
WU Xiao-qun, DENG Chen-bin. Research of network RTK positioning accuracy and reliability[J]. Jiangxi Science, 2015, 33(4): 553-557.
- [11] 郑嘉慧.GNSS网络RTK高精度定位方法研究与应用[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
ZHENG Jia-hui. Research and application of GNSS network RTK high-precision positioning method[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [12] 卞东良,何均均.5G+智慧港口研究及实践[J].江苏通信,2023,39(1):13-18.
BIAN Dong-liang, HE Jun-jun. Research and practice of 5G+ smart port[J]. Jiangsu Communication, 2023, 39(1): 13-18.