

文章编号:1671-1637(2012)06-0048-07

大型船舶辅助靠泊仪设计

彭国均¹, 刘洋¹, 张杏谷¹, 吴勇军¹, 樊明辉²

(1. 集美大学航海学院, 福建 厦门 361021; 2. 福州大学物理信息工程学院, 福建 福州 350108)

摘要:为了准确控制大型船舶安全靠泊,分析了大型船舶特点及其靠泊过程,建立了大型船舶辅助靠泊仪数学模型,设计了大型船舶靠泊仪及其软件终端显示系统。采用两点定位差分全球定位技术(DGPS)、船舶自动识别技术(AIS)和无线网络通信技术(WiFi)完成靠泊仪的设计和数据的传输,结合大型船舶辅助靠泊仪数学模型,计算船舶靠泊时船首和船尾相对码头的距离、速度、船首向与船舶转向率等船舶移动数据,并将这些数据通过WiFi发送到软件终端,为引航员引导船舶安全靠离港提供参考信息。测试结果表明:大型船舶靠泊仪的水平定位精度可达60 cm,速度精度可达到 $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,数据刷新频率为 $5 \text{ 次} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

关键词:大型船舶靠泊仪;数学模型;软件终端;两点定位差分全球定位技术;自动识别技术;无线网络通信技术

中图分类号:U666.1 文献标志码:A

Design of auxiliary berthing instrument of large ship

PENG Guo-jun¹, LIU Yang¹, ZHANG Xing-gu¹, WU Yong-jun¹, FAN Ming-hui²

(1. School of Navigation, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China; 2. School of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: In order to accurately control the safe berthing of large ship, the characteristics and berthing process of large ship were analyzed, the mathematic model of its auxiliary berthing instrument was established, and the berthing instrument and its display system of software terminal were designed. The two-point position differential global positioning system (DGPS) technology, automatic identification system (AIS) technology and wireless fidelity (WiFi) technology were used to complete the design of berthing instrument and the data transmission, and the berthing mobile data including the relative distances and speeds between bow, stem and wharf, the heading and the steering rate were calculated, which were sent via WiFi to the software terminal for the pilots to guide the safe berthing and unberthing of ship. Test result shows that the berthing instrument's horizontal positioning accuracy is 60 cm, the speed precision is $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, and the data refreshing frequency is 5 times $\cdot \text{s}^{-1}$. 1 tab, 12 figs, 11 refs.

Key words: berthing instrument of large ship; mathematic model; software terminal; two-point position DGPS; AIS; WiFi

Author resume: PENG Guo-jun(1973-), male, associate professor, PhD, +86-592-6183845, penggj1314@126.com.

收稿日期:2012-07-12

基金项目:国家863计划项目(2012AA12A211)

作者简介:彭国均(1973-),男,福建厦门人,集美大学副教授,工学博士,从事交通信息工程及控制研究。

0 引言

早期的船长和引航员主要靠经验判断,估计本船的速度、与码头距离等参数,容易出现较大的偏差,是不可靠的。随着现代科技的发展,国内外部分发达港口的码头开始安装各种测速仪,可测出船舶靠泊时的船速,即岸基式靠泊仪。施修祥介绍了声纳靠泊仪,作用距离短,只有 200 m,且极易产生散射、折射、发射等现象,测量精度差^[1];焦友浩介绍了基于红外线的靠泊辅助系统,将红外探测仪器安装在码头上来测量船舶与码头的距离,然后将船舶动态数据通过码头的大屏幕显示出来,没有报警功能,且只有船舶靠近码头时才有用,对天气能见度要求比较高;蔡长泗介绍雷达靠泊仪,将雷达设备放于码头,探测船舶与码头之间的距离,但雷达对天气的要求比较高,特别是在雨雪天气,雷达回波受到干扰,系统精度大大下降^[2];陈航等提出基于激光技术的靠泊系统,将 2 个激光探头安装在码头上,分别探测船首、船尾到码头的距离,并通过连续探测可得到船舶的入泊角和船体的移动速度^[3-4],但此种靠泊设备寻找目标的能力较差,故障率极高,并且不同大小的船舶对探头之间的距离要求也不同,因此,使用不便。

还有一种靠泊仪叫做船基式靠泊仪,由引航员携带登轮,具有精度高,安装方便,可适用于任何一个码头,不受天气等不良因素的影响等优点。此种靠泊仪在国内的研究还是空白,国外已有一些研究,如 Oda 等提出将 DGPS(差分)技术用于船基式靠泊仪^[5-6],实现船舶的高精度定位,定位精度可达 0.8 m。本文研究船基式大型船舶辅助靠泊仪,在引航过程中,靠泊仪为引航员提供精确的船位数据、电子海图底图显示、精确的移动速度与码头岸线距离等重要信息。

1 大型船舶靠泊过程

因大型船舶质量与体积大、不易操作等特点,都需要拖轮的协助才能完成靠离泊,并且在靠离泊过程中容易造成与码头、码头设施及其他船舶的碰撞。大型船舶拖轮协助靠泊方式有 2 种:平行靠泊法^[7-8]和角度靠泊法。平行靠泊法是指船舶在靠码头的过程中保持船舶首尾线与码头平行,以尽可能低的横移速度贴拢码头的过程^[9-10]。平行靠泊法是一种理想状态,现实中往往由于环境的变化以及操作上的时间延误或者不当,使得船舶在实际操纵中很难做到整个船身以接近于 0 的速度贴拢码头,有时候为

为了让船首和船尾同时贴近码头,盲目使用外力达到平行,从而忽略了船首、船尾之间可能存在着较大的偏转力矩,必将导致其中的一端因为速度过快而产生偏转或者反弹,造成船舶损毁码头与设施的事故。因而在大型船舶实际靠泊过程往往带有一定靠拢角度靠泊,即角度靠泊法。在采用角度靠泊法的过程中,引航员需要尽可能保证船舶靠拢角度小,在此条件下,船舶一端首先贴拢码头,而后,另一端在拖轮辅助下慢慢靠拢码头,从而实现安全靠泊。在这个过程中,无论是船舶的哪一端先靠近、靠拢码头,引航员同样要保证靠拢速度尽可能小,一般应当严格控制贴拢码头速度(表 1)。同时,靠拢角度要尽可能小,而另一端则在缆绳、拖船或者侧推器的帮助下实现平行靠拢。

表 1 靠泊速度

Tab. 1 Berthing speeds

船舶排水量 Δ/t	横向速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	
	有掩护码头	开敞式码头
$\Delta \leq 1\ 000$	0.20~0.25	0.25~0.45
$1\ 000 < \Delta \leq 5\ 000$	0.15~0.20	0.20~0.40
$5\ 000 < \Delta \leq 10\ 000$	0.12~0.17	0.17~0.35
$10\ 000 < \Delta \leq 30\ 000$	0.10~0.15	0.15~0.30
$30\ 000 < \Delta \leq 50\ 000$	0.10~0.12	0.12~0.25
$50\ 000 < \Delta \leq 100\ 000$	0.08~0.10	0.10~0.20
$\Delta > 100\ 000$	0.06~0.08	0.08~0.15

从表 1 可知,船舶排水量越大,船舶横向靠泊速度就越小,通常情况下大型船舶应低于 $8\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,而超大型船舶应控制在 $5\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。无论是平行靠泊还是角度靠泊,都要将船首、船尾、船舶横移速度以及船舶的转向率严格控制在一定的范围之内,只有控制好这些船舶运动参数,才可以实现安全靠泊。

2 大型船舶辅助靠泊仪数学模型建立

2.1 建立辅助靠泊仪模型坐标系

为了更好地理解靠泊功能算法的实现,采用船舶运动坐标系 xOy (图 1)描述船舶运动,以驾驶台中心为坐标原点,以正北向上为纵轴与以正东向右为横轴建立坐标系,船舶左右两舷与船首为辅助靠泊仪定位终端放置点,利用平面直角坐标系解算各个靠泊功能模块。由图 1 可知,船舶是不规则的长方体^[11],为了更准确地描述当前船舶与码头的位置关系,坐标系中 $M、N$ 为码头两端, E 为船首, F 为船尾, $E、F$ 为船体俯视图矩形中的 2 个端点, $A、$

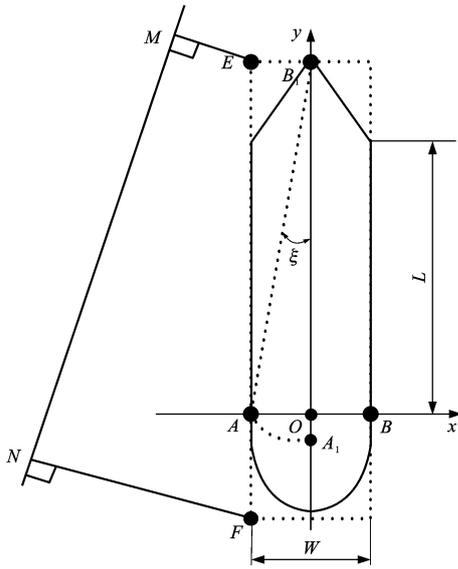


图 1 靠泊坐标系

Fig. 1 Berthing coordinate system

B 分别为船舶的左右舷, O 为船舶中心点, A_1 为船舶驾驶台中心, B_1 为船首点, L 为船长, W 为船宽, ξ 为 AB_1 与 A_1B_1 之间的夹角。

2.2 船首、船尾相对码头距离与速度计算

为了计算船首 E 与船尾 F 垂直于码头的距离和速度, 首先需要确定 2 个变量: 船舶中心点 O 和当前的船首向。

首先确定船舶中心点 O , 规定驾驶台中心为船舶中心, 码头前沿点 M, N 是已知的, 以此两点确定码头岸线相对于坐标的直线方程 $L_1: ax + by + c = 0$ 中的参数 a, b, c 。按照定位终端使用位置不同, 确定中心点 O 的坐标有 2 种方式, 第 1 种方式定位终端分别位于船舶两舷点 A 和 B ; 第 2 种方式定位终端分别位于船首和船舶左舷, 如点 B_1 和 A_1 。

第 1 种方式中船舶中心点 x, y 向坐标分别为

$$\begin{cases} O_x = \frac{1}{2}(A_x + B_x) \\ O_y = \frac{1}{2}(A_y + B_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_x, A_y 与 B_x, B_y 分别为船舶左右舷在 x, y 向的坐标。

采用第 2 种方式计算船舶中心点坐标时, 根据定比分点公式计算中心点 O 坐标为

$$\begin{cases} O_x = \frac{B_{1x} + \lambda A_{1x}}{1 + \lambda} \\ O_y = \frac{B_{1y} + \lambda A_{1y}}{1 + \lambda} \\ \lambda = \frac{B_1O}{OA_1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} A_{1x} \\ A_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S \\ S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\xi + \eta) \\ \sin(\xi + \eta) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1x} \\ B_{1y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: η 为直线 B_1A 与 x 轴正方向的夹角; S 为 2 个定位终端点之间的距离, 即 B_1A ; (A_{1x}, A_{1y}) 为船舷定位终端位置; (B_{1x}, B_{1y}) 为船首定位终端位置。

设定初值时刻默认为船首正北向上, 则在后面任何一个时刻船首向所指角度都可以由点 A, B 坐标与船舶中心点 O 确定, 作为一个整体, 船上任意一点在下一刻的位置都可以看为这个点围绕新的中心点旋转一定角度后的新坐标, 而这个角度 γ 可根据当前船首向确定。

假定此时船舶恰好行驶到 T_1 时刻, 定位终端点 A, B 所在坐标接收到新的数据后进行更新, 根据式(1)或式(2)计算新的船舶中心点位于 (O'_x, O'_y) , 此时 y 轴正方向与船首所在直线 OH 的逆时针夹角为 γ , 则在新的时刻船首点为

$$\begin{bmatrix} E'_x \\ E'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta + \gamma) \\ \sin(\beta + \gamma) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O'_x \\ O'_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

同理可计算新的船尾点为

$$\begin{bmatrix} F'_x \\ F'_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R' \\ -R' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta' + \gamma) \\ \sin(\beta' + \gamma) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O'_x \\ O'_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: R 为初始时刻船首点 E 到中心点 O 的直线距离; R' 为船尾点 F 到中心点 O 的距离; β 为初始时刻矢量 \vec{OE} 与 x 轴正方向的夹角; β' 为初始时刻矢量 \vec{OF} 与 x 轴正方向的夹角。

在 T_0 时刻船首、船尾到码头岸线的距离分别为

$$\begin{cases} D_1 = \frac{|aE'_x + bE'_y + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \\ D_2 = \frac{|aF'_x + bF'_y + c|}{\sqrt{a^2 + b^2}} \end{cases} \quad (6)$$

同理可求得 T_1 时刻船首、船尾到码头岸线距离 D'_1 和 D'_2 。通过连续测量可以得到连续 2 次测量的时间差与船首、船尾距离码头岸线的距离差, 则当前状况下船首与船尾相对码头岸线的横移速度为

$$v = \frac{\Delta_d}{\Delta_t} \quad (7)$$

式中: Δ_d 为 2 次计算船首、船尾到码头岸线 MN 的距离差; Δ_t 为相邻 2 次测量的时间差, 为了更精确地获取船舶首尾移动速度, 当按照第 2 种方式运行时, 系统将直接利用点 A, B 放置的定位采集系统所获取的速度作为系统船首与船尾的速度。

船舶中心距离码头岸线的距离与速度分别为

$$D = \frac{aO_x + bO_y + c}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (8)$$

$$V = \frac{\Delta D}{\Delta t} \quad (9)$$

式中: ΔD 为 2 次测量点 O 距离码头岸线 MN 的距离差。

2.3 船首向与船舶转向率计算

图 2 为靠泊功能计算坐标系下的一部分,其中矢量 \vec{OH} 为船首线所在矢量,此时 θ 是按照以 x 轴为起始位置逆时针旋转得到的角度,图 2(a)。船首向由基准北线顺时针旋转而得,故需要转换为当以向上为 0° 顺时针旋转的船首向表达见图 2(b), ϵ 为船首向角

$$\epsilon = 90^\circ - \theta \quad (10)$$

船首向的取值范围是 $0^\circ \sim 360^\circ$,因此,需要对所求的 ϵ 做周期化处理,使它介于 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间。若 $\epsilon > 360^\circ$,则减 360° ;若 $\epsilon < 0^\circ$,则加 360° 。

船舶转向率为

$$\omega = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad (11)$$

式中: $\Delta \epsilon$ 为 2 个时刻船首向之差。

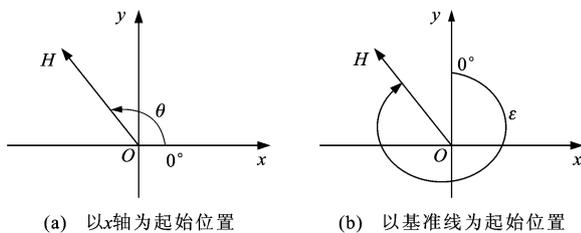


图 2 船首向计算

Fig. 2 Bow course calculation

3 大型船舶辅助靠泊仪设计与实现

根据大型船舶辅助靠泊仪模型,设计大型船舶辅助靠泊仪定位终端和在 IOS 系统环境下开发软件系统,实现对大型船舶靠泊时船速、船首和船尾距码头岸线的距离等信息在 IPAD 上绘制与显示。

设计思路为:通过解析来自定位终端的 DGPS 信息与 AIS 信息,应用靠泊算法求得船首、船尾与码头前沿的垂直距离等船舶运动信息,在 IPAD 上重新绘制靠泊船型,并显示辅助船舶的靠泊信息。具体实现过程为:首先辅助靠泊仪显示终端与定位终端建立 WiFi 连接后,接收来自定位终端的 DGPS 报文,系统解析接收到的报文,通过辅助靠泊仪算法计算船舶运动参数,根据参数将船舶以图形和文字显示在 IPAD 屏幕

上,同时系统将自动保存航迹与速度等船舶运动信息,用于系统回放时使用,根据靠泊功能设计必要的显示界面。

3.1 靠泊仪定位终端硬件设计与实现

辅助靠泊仪定位终端硬件见图 3,定位终端硬件设计分为 A 机和 B 机 2 种,A 机由 ARM 嵌入式模块、AIS 模块、DGPS 模块、WiFi 模块与锂电池模块组成,B 机由 ARM 嵌入式模块、DGPS 模块、WiFi 模块与锂电池模块组成。这种设计是考虑到仅依靠一个 GPS 接收机定位的传统船舶引航系统中,船舶进行靠离泊操作时,由于速度较慢甚至接近静止,使得由卫星信号受到干扰而造成定位漂移,由此获取的船首向就会因速度的下降而出现大角度摇摆,无法通过设备看到稳定且精确的数据显示。在进行靠泊船位显示时,辅助靠泊仪只有正确显示船舶与所靠码头岸线的相对位置才能辅助船长/引航员进行安全作业。通过采集 2 种定位信息,结合长宽等船舶尺寸,系统可正确画出船舶的相对位置图形。根据大型船舶靠泊功能算法模型,此系统将建立 2 种基于上述 2 种方案的使用方式。

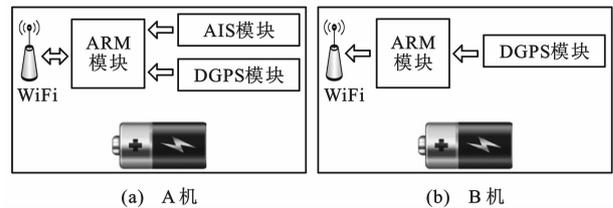


图 3 靠泊仪硬件终端

Fig. 3 Hardware terminals of berthing instrument

3.1.1 A 机定位终端

A 机组成原理见图 4。A 机一般选择放置于船舶左舷,其中 ARM 模块采用 ARM920T 处理器,DGPS 接收机采集到定位信息后经 RS232 串口发送至 ARM 处理器,WiFi 模块接收来自于 B 机的定位信息,然后通过 RS232 串口传输给处理器,处理器将从 A 机和 B 机接收到的数据经过重新捆绑后,将报文通过 RS232 串口径 WiFi 模块发向辅助靠泊

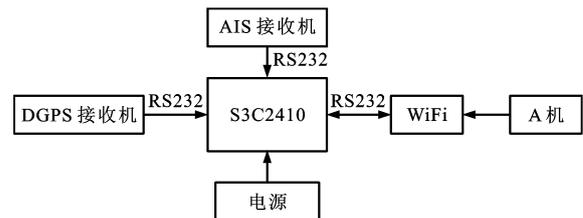


图 4 A 机组成原理

Fig. 4 Composed schematic of device A

仪显示终端(IPAD), AIS 接收到的 AIS 报文经处理后也将由 WiFi 模块负责将新报文发送到 IPAD, 这里 WiFi 模块兼有收发功能。

为保证辅助靠泊仪显示终端 IPAD 每次都可获得包括 A、B 机定位数据的一组报文, 同时保证 A、B 机定位信息尽可能同步, 设计 A 机在接收到自身机的定位数据后将等待 100 ms, 检查是否有 B 机传输来的定位信息, 再由 A 机将 B 机和自身接收的定位数据报文重新打包后, 再由 A 机通过 WiFi 将信息发送给 IPAD, 否则将 A 机接收到的定位信息丢掉后等待下一组数据。

3.1.2 B 机定位终端

B 机组成原理见图 5。B 机与 A 机相比没有 AIS 模块。当 ARM 模块接收到来自 DGPS 接收机发来的定位信息, 经过报文加工处理后再将报文由 WiFi 发向 A 机。B 机有 2 种放置方式, 可选择放置于船首或者船舶右舷^[7]。

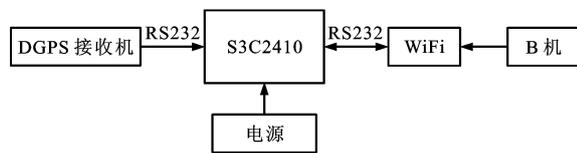


图 5 B 机组成原理

Fig. 5 Composed schematic of device B

3.2 靠泊仪软件系统设计与实现

系统工作采用 C/S 架构, 客户端实时获取服务端发送来的定位数据, 并解算后以图形化实现再显示。定位终端相当于靠泊仪软件系统的服务器端, 不断地采集定位信息以及 AIS 信息经处理后发送给辅助靠泊仪软件系统。辅助靠泊仪软件系统相当于客户端, 当接收到定位终端采集的 AIS 数据与 DGPS 数据后, 根据靠泊算法对数据进行计算处理, 并将最终的结果显示在海图平台上。本文主要阐述客户端部分设计与实现。

3.2.1 软件系统构成

根据模块化设计原则, 采用分块设计大型船舶辅助靠泊仪的软件系统, 软件系统构成见图 6。在图 6 中, 采用分层结构使得应用软件具有硬件无关性, 即不依赖于具体硬件的独立性: 首先, 系统中所有的硬件设备都由 IOS 操作系统接管, 靠泊系统不直接对硬件进行访问; 其次, 所有涉及硬件的操作都通过应用程序接口函数来完成, 软件系统包含了通信模块、靠泊数据处理模块、历史数据回放模块、用户接口模块。通信模块采用 WiFi 实现定位终端与辅助靠泊仪软件系统的网络通信, 定位终端通过

WiFi 网络播发接收到的定位信息, 辅助靠泊仪软件系统负责接收信息, 此处所讲的通信模块主要是指大型船舶辅助靠泊仪显示终端通信接收模块的软件实现; 历史数据回放模块是把系统记录的船舶引航靠泊时的船舶动态信息以回放的形式显示在辅助靠泊仪显示终端上; 用户接口模块相当于靠泊显示终端应用程序前台, 主要负责建立辅助靠泊仪显示终端与用户之间的联系, 包括接收来自用户的请求和返回请求结果。

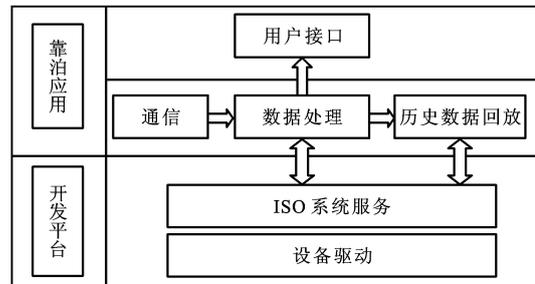


图 6 软件系统

Fig. 6 Software system

3.2.2 靠泊数据处理模块的实现

靠泊数据处理模块是大型船舶辅助靠泊仪显示终端的核心模块, 主要负责解析报文和靠泊数据计算, 其流程见图 7。

系统建立通信连接之后, 启动靠泊数据处理模块, 首先解析 A 机发送来的定位信息, 解析后程序将以靠泊作业港区作为限定范围再次判断解析后的经纬度信息是否超出作业范围, 如果超出, 则丢掉这一组数据, 等待下一组数据到来, 如果正常, 将数据送入靠泊功能算法模块进行计算。IPAD 接收的 DGPS 报文是由放在船舶左舷 A 机发送过来, 它整合了 A 机 DGPS 报文信息以及 B 机的定位信息、速度信息与速度方向。

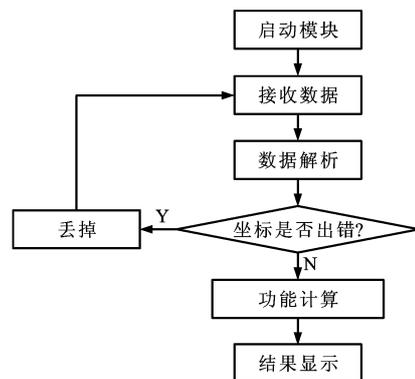


图 7 靠泊数据处理流程

Fig. 7 Processing flow of berthing data

4 应用结果分析

希腊籍一大型油轮(长度为 328 m,宽度为 57 m)靠泊唐山曹妃甸原油码头,码头长度为 515 m,两碰垫间隔为 120 m,前沿水深为 40 m,见图 8。

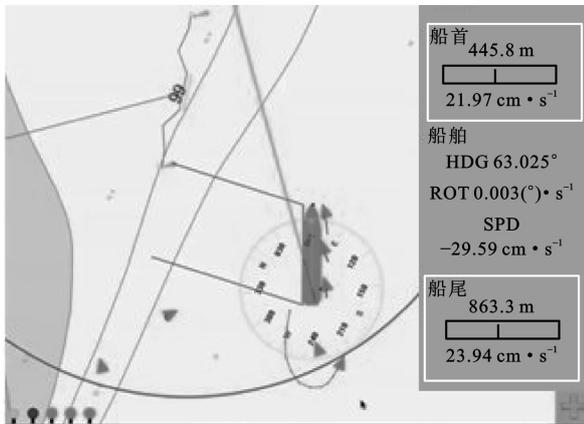


图 8 码头
Fig. 8 Wharf

引航员登船前,首先采集位于蝶形码头 2 个碰垫沿的位置信息,设定泊位信息。靠泊当天,唐山曹妃甸原油码头海况良好,从引航员登船到船舶安全停靠,一共用时 2 h,靠泊模式为左舷 A 机与船首 B 机,参数设置见图 9。



图 9 参数设置
Fig. 9 Parameter setting

对此次靠泊仪辅助结果数据分析如下:船首向变化见图 10,船舶靠泊时首尾速度变化很小,船首向变化一直保持在(0.5°, -0.5°)范围内,虽有一定程度的摆动,但无大范围跳动。

船首尾速度见图 11,船首尾相对码头距离见图 12,靠泊仪获取的船舶首尾速度和距离连续且相对稳定,无明显的大范围跳动。

大型船舶辅助靠泊仪在实际应用中,由于 A、B

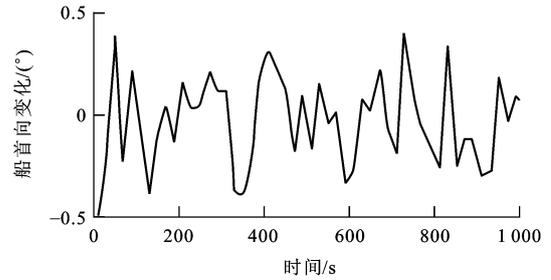


图 10 船首向变化
Fig. 10 Bow change

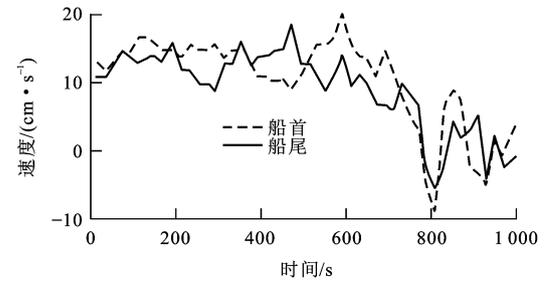


图 11 船首尾速度
Fig. 11 Speeds of bow and stern

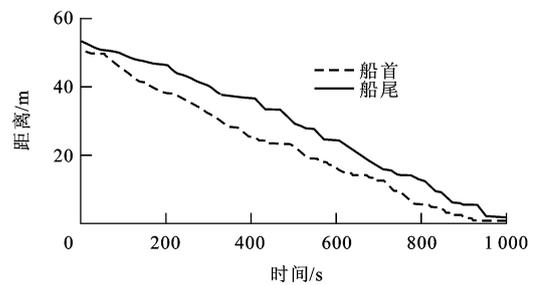


图 12 船首尾距离
Fig. 12 Distances of bow and stern

机采用定向天线,故在使用时尽可能对好角度,减少信号误差。靠泊仪可正常接收并计算船舶移动数据,具有一定参考性。

5 结 语

通过设计大型船舶辅助靠泊仪,很好地实现了快速、准确获得船首尾距离码头的垂直距离与相对码头运动的速度、船首向与船舶转向率,辅助大型船舶安全靠泊。然而,辅助靠泊仪还有很多待完善的地方:完善辅助靠泊仪的功能;进一步优化靠泊仪算法,以减小误差影响,或采用更先进的定位技术减小定位误差;对系统硬件进行全面改装,使其天线抗风能力更强,散热性与抗腐蚀能力更好,硬件内部零件更紧固;增加辅助决策与引航靠泊等助航平台,拓展靠泊仪的功能。

参考文献:

References:

- [1] 施修祥. 靠泊声纳研制成功[J]. 应用声学, 1982(2): 41-42.
SHI Xiu-xiang. Successful development of berthing sonar[J]. Applied Acoustics, 1982(2): 41-42. (in Chinese)
- [2] 蔡长泗. 靠泊作业监控系统集成[J]. 水运工程, 2001(1): 17-19.
CAI Chang-si. Monitoring system integration for berthing and mooring operation[J]. Port and Waterway Engineering, 2001(1): 17-19. (in Chinese)
- [3] 陈航. 激光靠泊技术研究与工程实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
CHEN Hang. The research on the laser docking system in the terminal's operations[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [4] 卜仁祥, 刘正江, 胡江强. 欠驱动船舶非线性滑模靠泊控制器[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(4): 24-29.
BU Ren-xiang, LIU Zheng-jiang, HU Jiang-qiang. Berthing controller of underactuated ship with nonlinear sliding mode[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(4): 24-29. (in Chinese)
- [5] ODA H, HORIE S, HAMAMOTO N, et al. New berthing support system with starfire DGPS[C]// University of New South Wales. The 2004 International Symposium on GNSS/GPS. Sydney: University of New South Wales, 2004: 1-14.
- [6] ODA H, OKUYAMA E, KAWAMORI Y. New berthing support system using high accuracy differential GPS[J]. Journal of Interactive Media in Education, 2009, 44(1): 1-12.
- [7] 茅开松. 大型集装箱船平行靠泊研究[J]. 港口科技, 2011(3): 25-29.
MAO Kai-song. Study on parallel berthing of large-sized container ship[J]. Science and Technology of Ports, 2011(3): 25-29. (in Chinese)
- [8] 杨东晓. 关于船舶平行靠泊的思考[J]. 世界海运, 2010(7): 48-51.
YANG Dong-xiao. Thinking about ship's parallel berthing[J]. World Shipping, 2010(7): 48-51. (in Chinese)
- [9] 刘芳华. 基于 ARM 的 WiFi 无线通信终端的研究与实现[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2010.
LIU Fang-hua. Research and implementation of WiFi wireless communication terminal based on ARM[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [10] 刘洋, 彭国均, 张杏谷, 等. 基于 AIS 的新一代船舶引航信息系统[J]. 世界海运, 2011(6): 50-53.
LIU Yang, PENG Guo-jun, ZHANG Xing-gu, et al. New generation pilotage information system based on AIS[J]. World Shipping, 2011(6): 50-53. (in Chinese)
- [11] 张志明, 王海霞, 张保华. 码头靠泊船舶控制参数与确定方法探讨[J]. 水运工程, 2011(3): 49-53.
ZHANG Zhi-ming, WANG Hai-xia, ZHANG Bao-hua. Berthing vessels' control parameters and determination method[J]. Port and Waterway Engineering, 2011(3): 49-53. (in Chinese)
- (上接第 40 页)
- XU Chuan-lai, MI Cai-ying, LI Fu. Structural fatigue strength analysis of wheel for freight car base on axisymmetric model[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2008, 8(6): 20-23. (in Chinese)
- [5] VERMEULEN P J, JOHNSON K L. Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces[J]. Journal of Applied Mechanics, 1964, 31(2): 338-340.
- [6] KALKER J J. Simplified theory of rolling contact[J]. Mechanical and Aeronautical Engineering and Shipbuilding, 1973(1): 1-10.
- [7] SHEN Z Y, HEDRICK J K, ELKINS J. A comparison of alternative creep-force models for rail vehicle dynamic analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 1983, 12(1/2/3): 79-83.
- [8] KALKER J J. Wheel-rail rolling contact theory[J]. Wear, 1991, 144(1/2): 243-261.
- [9] POLACH O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit[J]. Wear, 2005, 258(7/8): 992-1000.
- [10] 黄运华, 李 芾, 付茂海, 等. 新型铁道车辆液气缓冲器动态特性[J]. 交通运输工程学报, 2005, 5(4): 1-5.
HUANG Yun-hua, LI Fu, FU Mao-hai, et al. Dynamic characteristic of new hydro-pneumatic buffer for railway vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(4): 1-5. (in Chinese)
- [11] 常崇义, 王成国, 马大伟, 等. 2 万 t 组合列车纵向力计算研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(2): 89-94.
CHANG Chong-yi, WANG Cheng-guo, MA Da-wei, et al. Study on numerical analysis of longitudinal forces of the T20 000 heavy haul [J]. Journal of the China Railway Society, 2006, 28(2): 89-94. (in Chinese)
- [12] TB/T 2403—1993, 货车高摩擦系数合成闸瓦[S].
TB/T 2403—1993, the compose brake shoe with high friction coefficient for the wagon[S]. (in Chinese)
- [13] 杨 岗, 李 芾. 基于 LQR 的高速受电弓最优半主动控制研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(11): 34-40.
YANG Gang, LI Fu. Semi-active control for high-speed pantograph based on the optimal LQR regulator[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(11): 34-40. (in Chinese)