

# 沉管隧道基床抛石整平船自动移船控制系统设计与应用

华晓涛<sup>1,2,3,4</sup>, 李涛<sup>1,2,3,4</sup>, 王金绪<sup>1</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040; 3. 交通运输行业交通基础设施智能建造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 4. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京 100120)

**摘要:** 针对传统沉管基床抛石整平船移船定位精度差、效率低的问题, 以襄阳市东西轴线道路工程鱼梁洲段项目为依托, 采用 GPS 定位技术和分步阶段性控制策略, 设计了一种沉管隧道基床抛石整平船自动移船控制系统, 实现了船舶一键自动化移位。实船测试结果显示, 该控制系统性能优越, 与传统的人工移船相比平均定位精度提高了 38%、平均移船时间节省了 88%, 对该项目提供了技术支撑。

**关键词:** 沉管隧道; 基床抛石整平船; GPS 定位技术; 一键自动化移位

中图分类号: U674.31 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2021)01-0062-05

doi: 10.7640/zggwjs202101014

## Design and application of automatic ship shifting control system for bed riprap leveling vessel of immersed tube tunnel

HUA Xiao-tao<sup>1,2,3,4</sup>, LI Tao<sup>1,2,3,4</sup>, WANG Jin-xu<sup>1</sup>

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology of Ministry of Communications, Wuhan, Hubei 430040, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 4. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100120, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of poor positioning accuracy and low efficiency of traditional immersed tube bed riprap leveling ship, based on the Yuliangzhou section of the east-west axis road project in Xiangyang City, this paper uses GPS positioning technology and a step-by-step control strategy to design a kind of automatic ship shifting control system for bed riprap leveling vessel of immersed tube tunnel, which realizes the automatic ship shifting with one key. The test results of the actual ship show that the control system has superior performance, improves the average positioning accuracy by 38% and saves the average shifting time by 88% compared with the traditional manual ship shifting, which provides technical support for the project.

**Key words:** immersed tube tunnel; bed riprap leveling vessel; GPS positioning technology; one-key automatic shift

整平船在抛石施工时需要对船舶缓慢移动进行定位, 目前整平船的移动方法一般是由 4 个人分别控制安装在整平船四个角上的电动绞车来收放缆绳, 船移动的位置由 4 个人通过对讲机人工协调, 从而实现船的定位<sup>[1-3]</sup>。但人工操作频繁容

易疲劳、工作效率低, 而且由于人为操作的局限性, 控制精度不高<sup>[4]</sup>。因此, 需要开发一套整平船自动移船系统, 实现船的自动化移位。

### 1 工程简介

襄阳市东西轴线道路工程鱼梁洲段项目是联

系樊城老区与东津新城的城市主通道, 隧道全长 5 400 m, 采用沉管方案两次下穿汉江, 水深 15~26 m, 沉管段总长 1 011 m, 属内河沉管隧道。其中, 汉江西汉布置 4 节管节, 合计 351 m; 东汉布置 6 节管节, 合计 660 m<sup>[5-6]</sup>。为避免沉管基础局部高点, 确保其底板受力均匀, 底板与地基

之间设高精度整平的基础垫层作为基床, 故需整平精度较高的专用船舶进行施工<sup>[7]</sup>。中交二航局自主研发的高精度浮式基床抛石整平船, 船长 55 m, 宽 15.3 m。船体甲板上配备 4 台 10T 液压绞车, 2 台 GPS, 抛石整平装备以及整平行走轨道, 如图 1 所示。

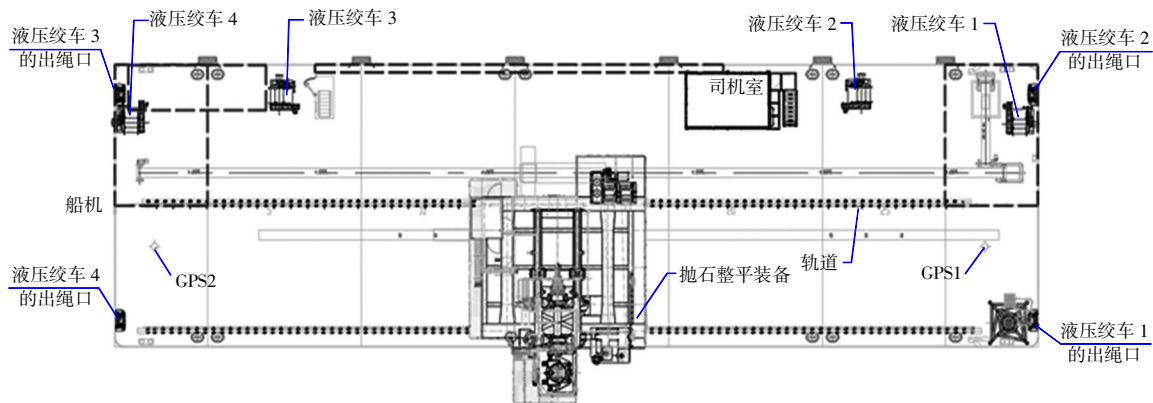


图 1 整平船甲板设备分布图

Fig. 1 Distribution of deck equipment of leveling ship

整平船每施工完一垄碎石后, 需要通过操作整平船上的 4 台液压绞车使船横向移动 2 m, 移动后使纵向保持不变, 由于施工时基床碎石垄较多, 因此船舶需频繁移位, 传统人工操作效率低、精度差, 一般的人工控制移船精度平均在 $\pm 15$  cm, 移船时间平均约 20 min, 难以满足现场施工的要求。因此, 本文提供了一种自动移船控制系统, 该系统需达到的施工要求为: 移动精度为 $\pm 15$  cm, 操作时间小于 10 min。

## 2 自动移船控制系统的组成及功能

### 2.1 自动移船控制系统的组成

#### 2.1.1 控制系统硬件组成

基床抛石整平船自动移船控制系统是一套基于 GPS 定位的计算机控制系统, 由测量系统、控制系统和执行系统组成。

##### 1) 测量系统

测量系统包括 4 个编码器、4 个轴销传感器和 2 个 GPS。在抛石整平船 4 台液压绞车上分别安装 1 个编码器和轴销传感器, 在船艏和船艉分别安装 1 个 GPS。编码器用于检测液压绞车缆绳收放的速度, 编码器供电电压 24 V, 最大测量转速 5 000 r/min, 输出类型为 NPN; 轴销传感器用于检测液压绞车缆绳的拉力, 轴销传感器供电电压 5~12 V, 额定载荷 10 t, 输出信号为 4~20 mA,

测量精度 0.5%。GPS 用于检测船舶的位置数据, 型号为 Trimble R9s。

##### 2) 控制系统

控制系统包括 1 台计算机、下层控制器和上层控制器。计算机用于人机交互, 方便操作者控制自动移船系统; 下层控制器用于接收编码器和轴销传感器采集的液压绞车数据, 并将数据传送给上层控制器, 同时下层控制器还可以接收上层控制器发送的绞车运动指令, 直接控制液压绞车运动; 上层控制器用于接收 GPS 数据、下层控制器发送的绞车运动速度和缆绳拉力数据、计算机发送的绞车控制指令, 同时还可以向下层控制器发送绞车运动控制指令。计算机采用 PPC-190C 工业平板电脑; 下层控制器为西门子 S7-200; 上层控制器为西门子 S7-1200。

##### 3) 执行系统

执行系统包括 4 台液压绞车, 液压绞车的规格为: 卷筒负载 100 kN、绳索直径  $\phi 32$  mm、最大绳长 400 m。4 台液压绞车位于抛石整平船上, 缆绳出口分别位于整平船的四个角上。

#### 2.1.2 控制系统通讯方式

系统的通讯方式主要包括两部分: 下层控制器与上层控制器的通讯、上层控制器与计算机的通讯(图 2)。下层控制器与上层控制器采用串口

RS485 通讯；上层控制器与计算机采用以太网通讯。首先下层控制器采集各个液压绞车的运行参数，并将运行参数传送给上层控制器；接着上层控制器根据计算机预先设定的控制参数以及 GPS 所采集的船舶位置信息，由上层控制器运用相应的控制算法，将各个绞车缆绳的缩放指令以及缩放速度传送给下层控制器；最后下层控制器控制各个液压绞车运动，以实现船舶的自动化移位。在移船过程中，上层控制器与计算机实时通讯，将液压绞车的运行参数传送给计算机实时显示。

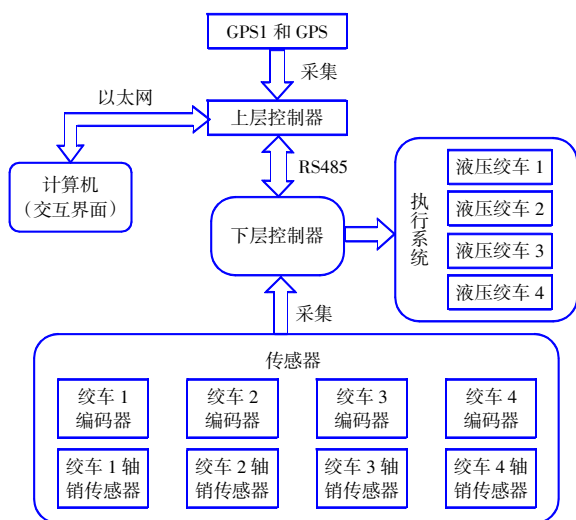


图 2 控制系统通讯

Fig. 2 The communication of control system

## 2.2 自动移船控制系统主要功能

基床抛石整平船自动移船控制系统可以实现一键自动化移船，系统采用分步阶段性控制策略，具有施工工艺参数设置、施工坐标文件导入、施工参数实时显示，船位动态化显示等功能，可以实现对整个施工过程的监测与控制。系统主要功能如下：

### 1) 施工工艺参数设置功能

该系统采用分步阶段性控制策略，将整个移船过程分为粗定位、中间定位和精定位，因此绞车控制过程也相应分为粗控制、中间控制和细控制。系统可以在定位计算机操作软件的控制参数页面修改控制参数，以使船舶在移位时的平稳性和精度达到最优状态。

### 2) 施工坐标文件导入功能

在移船之前，可以将所有船位坐标以 dat 文件格式保存在系统操作文件夹下，自动移船时系统可以直接导入读取船位坐标的 dat 文件，此功

能省去将所有船位坐标逐个输入的繁琐。

### 3) 施工参数实时显示功能

系统可以根据 4 台液压绞车上安装的编码器和轴销传感器，实时显示绞车实际移动速度，绞车实际控制距离，绞车实际拉力，绞车控制速度，绞车收放缆状态。

### 4) 船位动态化显示功能

导入施工区域的工程地图和原始测深文件，并结合 GPS 船位测量系统，利用计算机人机界面可显示船舶的轮廓和船舶在施工区域的位置。

### 5) 一键自动移船功能

自动移船功能通过 PLC 控制器和定位计算机实现。当船舶需要移位时，通过点击移船键将整平船以一键移船的方式移动到指定的位置，在移船过程中不断修正船艏向以保持艏向。当船舶到达指定施工位置，并已经完成定位时，自动控制系统将发出船舶位置锁定指令到绞车液压控制系统。

## 3 自动移船控制原理及方法

### 3.1 基本方案

本抛石基床整平船要实现自动移船功能，需由控制系统实时根据当前位置坐标信息及目标位置坐标信息，输出绞车动作信号，实现 4 台绞车的收放缆动作，驱动船舶沿给定轨迹移船，从而实现驳船的自动移船功能，整个系统为一个典型的闭环控制系统<sup>[8]</sup>。自动移船控制系统流程图如图 3 所示。

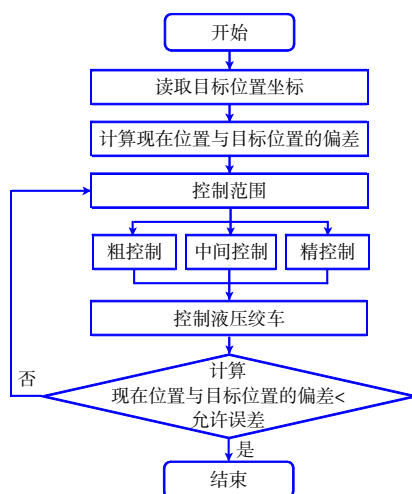


图 3 自动移船控制系统流程图

Fig. 3 Flow chart of automatic ship shifting control system

### 3.2 移船控制策略及纠偏方法

该项目工程要求基床抛石整平船每次沿船体

横向移动 2 m(即沿沉管纵向)。设船体当前位置为  $L_p$ , 需要移动到的目标位置为  $L_o$ , 船体每次需要平移的距离为  $\Delta d$ , 控制误差为  $\sigma$ , 其控制的最终目标为:

$$||L_p - L_o| - \Delta d| \leq \sigma \quad (1)$$

### 3.2.1 移船控制策略

为实现船体的移船定位, 控制系统在控制策略上采用分步阶段控制方法, 将整个移船过程分为粗定位、中间定位和精定位。如图 4 所示, 设出绳点 F1 处开始制动前的坐标为  $(X_{F1}, Y_{F1})$ , 与其对应的锚点坐标为  $(X_B, Y_B)$ , 制动后的坐标为  $(X'_{F1}, Y'_{F1})$ ; 出绳点 F2 处的制动前的坐标为  $(X_{F2}, Y_{F2})$ , 锚点的坐标为  $(X_A, Y_A)$ , 制动后的坐标为  $(X'_{F2}, Y'_{F2})$ ; 出绳点 F3 处的制动前的坐标为  $(X_{F3}, Y_{F3})$ , 锚点的坐标为  $(X_D, Y_D)$ , 制动后的坐标为  $(X'_{F3}, Y'_{F3})$ ; 出绳点 F4 处的制动前的坐标为  $(X_{F4}, Y_{F4})$ , 锚点的坐标为  $(X_C, Y_C)$ , 制动后的坐标为  $(X'_{F4}, Y'_{F4})$ 。那么移动需要控制的绳缆长度分别为:

$$L_{F1} = \sqrt{(X'_{F1} - X_B)^2 + (Y'_{F1} - Y_B)^2} - \sqrt{(X_{F1} - X_B)^2 + (Y_{F1} - Y_B)^2} \quad (2)$$

$$L_{F2} = \sqrt{(X'_{F2} - X_A)^2 + (Y'_{F2} - Y_A)^2} - \sqrt{(X_{F2} - X_A)^2 + (Y_{F2} - Y_A)^2} \quad (3)$$

$$L_{F3} = \sqrt{(X'_{F3} - X_D)^2 + (Y'_{F3} - Y_D)^2} - \sqrt{(X_{F3} - X_D)^2 + (Y_{F3} - Y_D)^2} \quad (4)$$

$$L_{F4} = \sqrt{(X'_{F4} - X_C)^2 + (Y'_{F4} - Y_C)^2} - \sqrt{(X_{F4} - X_C)^2 + (Y_{F4} - Y_C)^2} \quad (5)$$

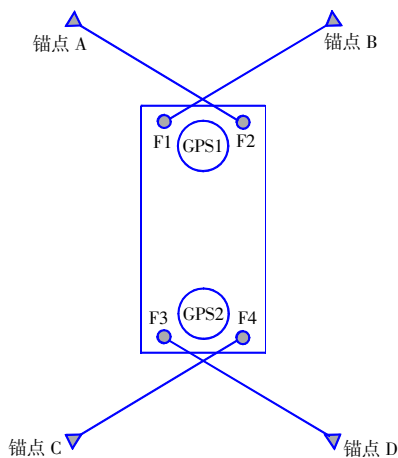


图 4 缆绳锚固示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cable anchorage

船体上 F1、F2、F3 和 F4 的坐标可由船上安

装 GPS1、GPS2 的测量坐标和各 GPS 与出绳点的相对安装距离间接得到。粗定位时的控制绳长为大于 1 m, 当粗定位时采用 1.5 m/min 的高速控制绞车转动; 精定位时的控制绳长为小于 0.4 m, 当精定位时采用 0.5 m/min 的低速控制绞车转动; 中间定位的控制绳长为 0.4~1 m, 中间定位时采用绞车转速为高速和低速的平均值。

### 3.2.2 移船纠偏方法

基床抛石整平船在移船定位时, 船位偏差分 3 种情况: 船体横向偏差、船体纵向偏差和船体角度偏差。3 种情况或单独出现, 或 3 种情况组合出现, 即便出现组合偏差, 也可分解成 3 种情况并采取相应的措施。

#### 1) 船体横向偏差

横向位置未达到目标位置, 此时同步控制 4 台锚机, F1、F3 收缆, F2、F4 放缆。

#### 2) 船体纵向偏差

纵向位置未达到目标位置, 此时同步控制 4 台锚机, F3、F4 收缆, F1、F2 放缆。

#### 3) 船体角度偏差

出现第 3 种偏差情况, 同时启动 F1、F2、F3 和 F4 锚机, F2、F3 收缆, F1、F4 放缆。

每次进行一次精定位操作或者一次纠偏操作后, 等待数秒, 由系统来判断船舶的位置, 并决定下一次操作是精定位还是纠偏操作。直到系统判断船位的定位误差在精度许可范围内<sup>[8-9]</sup>。

### 4 移船实施工艺

本系统采用液压绞车锚泊, 通过自动移船控制实现一键自动化移船功能, 控制系统移船实施工艺如下:

1) 在施工区域打入锚桩, 测量各锚点的点位坐标。

2) 以文件形式向控制系统中输入要移动的所有目标坐标。将所有船舶要移动的坐标以 dat 文本文件格式保存在该控制系统的根目录下, 系统会自动读取, 并在主界面上显示。

3) 将上述锚桩点坐标输入控制系统, 并下锚。在控制系统主界面上, 通过插入锚桩功能将所有锚桩点位坐标输入, 并通过下锚功能确定当前使用的锚桩。

4) 选择要移动的船位。在控制系统主界面的目标船位的下拉菜单中选择目标位选择, 目标船位被选择后目标船位会以颜色填充。

5) 按下控制激活, 船位移动。在目标船位的下拉菜单中选择控制激活, 则船舶会按照本控制系统的控制策略和方法自动移动。

6) 当移到目标位置后, 船停下。

7) 重复 3)~5) 选择下一个目标点位进行移船。

## 5 测试结果

在襄阳市东西轴线道路工程鱼梁洲段隧道项目的东汉水域进行该控制系统的实船测试, 选择现场 D26、D27 和 D28 三个船位测试, 共进行 10 次移船, 测试结果如表 1 所示。

表 1 移船测试数据

Table 1 Test data of the ship shifting

序号	船位控制	GPS1 偏差/m	GPS2 偏差/m	时间/s
1	D26-D27 移船	0.08	0.15	150
2	D27-D28 移船	0.01	0.07	130
3	D28-D27 移船	0.02	0.06	145
4	D27-D26 移船	0.08	0.13	152
5	D26-D28 移船	0.09	0.05	137
6	D28-D27 移船	0.07	0.12	155
7	D27-D26 移船	0.15	0.08	134
8	D26-D27 移船	0.09	0.14	137
9	D27-D28 移船	0.12	0.06	150
10	D28-D27 移船	0.06	0.07	140
平均值		0.077	0.093	143

从表 1 实船测试的结果可以得到以下结论:

1) 船体 GPS1 和 GPS2 的偏差都在 15 cm 内, 表明该自动移船控制系统的绝对移船精度在 15 cm 内。而该系统实现的平均移船精度为 9.3 cm, 比传统的人工移船精度 15 cm 提高了约 38%。

2) 该自动移船控制系统的绝对移船时间都在 155 s 内, 而平均移船时间为 143 s, 比传统的时间(1 200 s)节省了约 88%。

3) 从移船精度和移船时间上, 该自动移船控制系统都体现出比传统施工方法的优越性。系统满足了移船设计要求, 大大提高了移船精度和移船效率。

## 6 结语

本文创新性的设计了一种沉管隧道基床抛石整平船自动移船控制系统, 通过船舶自动移船控制系统实现船体智能追踪目标位置的自动化快速移船, 显著降低了施工人员的数量和劳动强度, 大大提高了施工效率。因此采用液压绞车的自动移船控制系统完全具备可行性和可靠性, 将有力

的支撑依托项目, 并推动沉管隧道基床整平施工的发展。

## 参考文献:

- [1] 张红升. 抓斗挖泥船移船绞车动态定位控制技术[J]. 中国港湾建设, 2017, 37(7): 69-71.  
ZHANG Hong-sheng. Dynamic positioning control technology of shifting winch for grab dredger[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(7): 69-71.
- [2] 张贵进, 张乐. 浅谈钢丝网兜底抛石的施工[J]. 中国水运, 2012, 12(8): 233-234.  
ZHANG Gui-jin, ZHANG Le. The introduction of rock riprap with steel wire cage[J]. China Water Transport, 2012, 12(8): 233-234.
- [3] 中交第二航务工程局有限公司. 一种抛石船自动移位控制系统和控制方法: 中国, 201910372253.4[P]. 2019-09-20.  
CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd. An automatic displacement control system and control method for riprap ship: China, 201910372253.4[P]. 2019-09-20.
- [4] 肖汉斌, 张永涛, 路世青, 等. 疏浚抓斗平挖运动研究与仿真[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2017, 37(3): 482-485, 490.  
XIAO Han-bin, ZHANG Yong-tao, LU Shi-qing, et al. Research and simulation on flat dredging kinematics of the dredging clamshell[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2017, 37(3): 482-485, 490.
- [5] 任耀谱, 赵志武. 襄阳汉江沉管隧道干坞选址比选研究[J]. 工程建设与设计, 2019(12): 121-122.  
REN Yao-pu, ZHAO Zhi-wu. Research on the comparison of the dry dock site selection for the immersed tunnel in Xiangyang Han River[J]. Construction & Design for Engineering, 2019(12): 121-122.
- [6] 任耀谱. 襄阳汉江沉管隧道基础设计[J]. 中国水运, 2019(6): 107-109.  
REN Yao-pu. Foundation design of Hanjiang immersed tunnel in Xiangyang[J]. China Water Transport, 2019(6): 107-109.
- [7] 杨秀礼, 邵曼华, 徐杰. 港珠澳大桥沉管碎石垫层铺设船(平台)抛石整平总体方案选型[J]. 施工技术, 2014, 43(11): 17-19, 35.  
YANG Xiu-li, SHAO Man-hua, XU Jie. The overall scheme selection of rubble leveling for gravel cushion laying ship on Hongkong-Zhuhai-Macao Bridge[J]. Construction Technology, 2014, 43(11): 17-19, 35.
- [8] 丁志兵, 陈鹏. 基于抛石驳船的自动定位控制系统设计与实现[J]. 江苏驳船, 2020, 37(1): 35-37.  
DING Zhi-bing, CHEN Peng. Design and implementation of automatic positioning control system based on riprap barge[J]. Jiangsu Ship, 2020, 37(1): 35-37.
- [9] 宋江伟, 马宗豪. 海上挤密砂桩测量定位系统技术应用[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(5): 49-51, 61.  
SONG Jiang-wei, MA Zong-hao. Technology application of measurement positioning system for sea sand compaction pile[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(5): 49-51, 61.