



## 扭王字块安装智能引导系统的施工应用

温承永<sup>1,2,3</sup>, 钟敏生<sup>4</sup>, 滕超<sup>1,2,3</sup>

- 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230;
- 中交集团交通基础工程环保与安全重点实验室, 广东 广州 510230;
- 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082;
- 中交四航局第五工程有限公司, 福建 福州 350008

**摘要:** 目前扭王字块水下可视化安装主要采用水下摄像机或声呐成像的方法进行, 该方法对水域能见度要求高或传感器成本高, 且难以实现关键参数的定量化控制。通过对扭王字块吊装工艺及验收要求进行分析, 采用在履带吊、扭王字块等物体上加装传感器及空间点位计算程序设计等方式, 研发出一套扭王字块安装智能引导系统。在防波堤工程施工现场开展典型段验证工作, 实现了防波堤全断面的扭王字块可视化安装, 使得高潮位下仍可进行扭王字块吊装, 增加了施工作业窗口, 有效提高了施工速度。

**关键词:** 扭王字块; 水下安装; 智能引导系统; 现场试验

中图分类号: U656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0259-06

### Construction application of intelligent guidance system for accropode block installation

WEN Chengyong<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Minsheng<sup>4</sup>, TENG Chao<sup>1,2,3</sup>

- CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;
- Key Laboratory of Environment and Safety Technology of Transportation Infrastructure Engineering, CCCC, Guangzhou 510230, China;
- Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory(Zhuhai), Zhuhai 519082, China;
- The Fifth Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350008, China)

**Abstract:** At present, the underwater visual installation of accropode block is mainly carried out by underwater camera or sonar imaging method, which requires high visibility of the underwater environment or high cost of the sensor, and it is difficult to achieve quantitative control of key parameters. Based on the analysis of the construction process and acceptance requirements of the accropode block, the intelligent guidance system for the installation of the accropode block is developed by installing sensors on the objects such as the crawler crane and the accropode block and building the calculation program of spatial points. The verification work is carried out on site by the typical section in the breakwater construction field, and the visual installation of accropode block in the whole section of the breakwater is realized. The system permits the installation work of the accropode block in the high water level condition, increases the construction period and improves the efficiency of construction work.

**Keywords:** accropode block; underwater installation; intelligent guidance system; field test

斜坡式防波堤主要由堤体块石和护面人工块体等散体材料组成, 依靠散体材料间的空隙, 削弱或消除海面的波浪能量, 为港工建筑物提供抵御波浪的外围结构。扭王字块是我国学者在 20 世

纪末结合西方的 Accropode 块体后设计出来的一种护面人工块体, 在我国应用 30 余年, 已成为我国最流行的护面人工块体<sup>[1-2]</sup>。随着社会的快速发展, 大量的海域逐渐被开发, 天然建岸线被充

收稿日期: 2024-03-27

作者简介: 温承永 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程施工技术研究。

分利用,迫使港工建筑物的选址逐渐迈向海浪条件恶劣的区域,因此对扭王字块的水下安装方式提出更高的要求。

针对扭王字块水下安装问题,大量的学者进行深入研究<sup>[3-5]</sup>。许昌峰等<sup>[6]</sup>在大型挖掘机上采用多波束声呐扫描系统,为水下扭王字块的安装提供可视化显示窗口;夏晓露等<sup>[7]</sup>在某深水防波堤工程中,使用声呐成像系统辅助安装海底扭王字块,实现了扭王字块水下安装的姿态控制;刘大为等<sup>[8]</sup>在扭王字块水下安装作业中设计了单全球定位系统(GPS)接收机定位系统,解决了陆地汽车吊无法对水中扭王字块进行精准安装定位的问题。上述研究主要聚焦于为扭王字块水下安装过程中提供一个可视化窗口,以便操作人员及时对扭王字块的姿态进行调整,在施工参数定量控制方面的研究较少。本文基于漳州核电工程防波堤,研发出一套扭王字块安装智能引导系统,该系统不仅能实现扭王字块安装过程的可视化显示,而且能对扭王字块位置、姿态、扭王字块间距等量化信息进行实时监测,并生成扭王字块水下三维竣工图,解决恶劣海况条件下扭王字块水下安装的难题。

## 1 工程概况

漳州核电工程共有北堤、东堤、西堤3处防波堤工程,防波堤总长约9.8 km,为斜坡式结构,除堤头段坡度为1:2外,其他标准段的坡度均为1:1.5,防波堤顶高程为5.0 m、底高程为-11.0 m,平均海平面0.0 m,见图1。本工程扭王字块的质量规格为4 t,扭王字块安装在防波堤护面块石之上,通过削弱波浪的冲击力保护防波堤,共需安装16.8万件扭王字块。

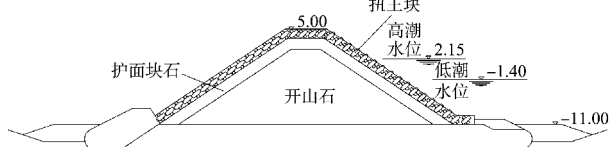


图1 防波堤典型断面(单位:m)

由于扭王字块安装数量庞大,在保障扭王字块的安放密度方面,若采用传统人工测量的方法,精度较差、效率较低、誊抄过程容易出错,且存在一定的安全风险<sup>[9-12]</sup>。此外,有较多的扭王字块需要进行水下安装,由于水下施工无可视化窗口,质量控制难度大,为了降低水下吊装的工作量,堤底扭王字块的安装选择在低潮时进行,有限的作业窗口限制了施工速度。因此,引入扭王字块安装智能引导系统对陆上、水下的扭王字块安装进行控制,解决施工窗口问题,并通过数字化手段获得安装竣工信息。

## 2 智能引导系统的组成和基本原理

### 2.1 系统组成

智能引导系统主要由固定式基站、移动式定位站、长度编码器、激光测距仪、高精度姿态仪及计算机组成,见图2。固定式基站安放在路边较高且无遮挡区域,用于接收北斗卫星的定位信号,并向移动式定位站发射定位信号;移动式定位站安装在扭王字块上方的履带吊的吊臂末端,用于接收路边固定式基站的定位信息;长度编码器安装于履带吊的吊臂末端,编码器滚轮与吊缆定滑轮相接触,由收放吊缆时吊缆定滑轮带动编码器滚轮转动,从而得到缆绳长度;激光测距仪安装在履带吊的吊臂末端,对扭王字块所处的状态进行识别;高精度姿态仪贴在扭王字块表面,实时获取扭王字块所处的姿态,当扭王字块安装到位,自动卸扣的同时,可带动姿态仪,使其从扭王字块表面脱离,进行仪器回收重复利用;计算机在吊装作业安全区,通过无线通信的方式接收传感器发送的位置、姿态信息,并进行实时数据分析及存储。

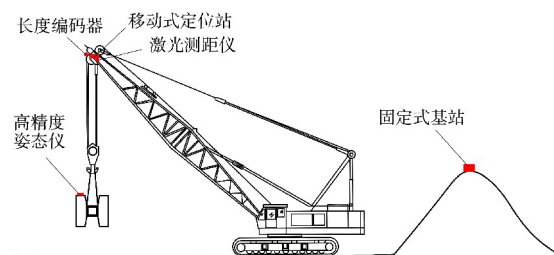


图2 系统组成

### 2.2 基本原理

位于临时堆场处的扭王字块均为三点着地状态(初始姿态相同), 由于扭王字块为规则几何结构, 对该批次扭王字块进行吊装时, 按照规则安装的方式, 每次选择位于结构中间且朝上的面, 在其右上方位置贴高精度姿态仪, 姿态仪安装位置见图 3。以上述位置作为参考点, 以高精度姿态仪的三向数据为参考点的法线信息, 根据刚体平动、转动时内部点位换算关系, 可确定扭王字块上任意点的位姿信息。对高精度姿态仪的数据进行初始化标定, 可在起吊安装的全过程中对扭王字块的姿态信息进行可视化监测, 扭王字块三轴姿态坐标为  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ , 智能引导系统开发框架见图 4。当扭王字块吊起时, 移动式定位站捕获其空间坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z_0$ , 由于安装于履带吊吊臂末端的移动式定位站处于其正上方, 此时扭王字块的平面坐标为  $x$ 、 $y$ 。扭王字块竖直方向的坐标  $z$  须基于移动式定位站竖向坐标  $z_0$ , 经条件判定和相对关系换算而得, 坐标换算关系见图 5。

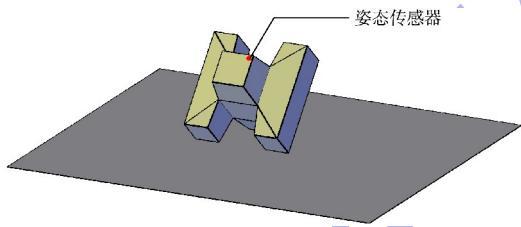


图 3 高精度姿态仪安装位置

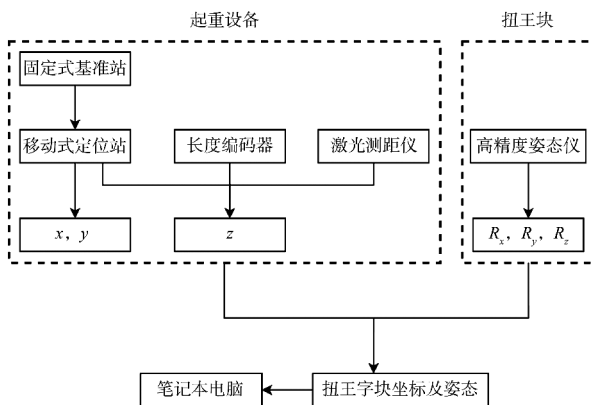


图 4 智能引导系统开发框架

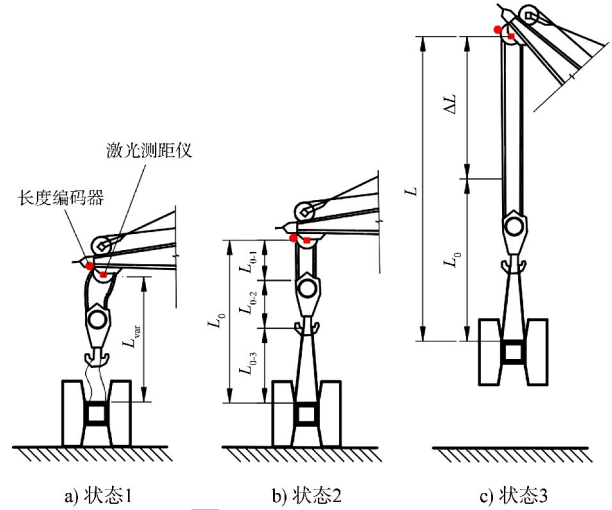


图 5 坐标换算关系

坐标换算原理为: 1) 对首件扭王字块进行吊装前, 履带吊的吊臂降至最低行程, 吊臂处于水平状态, 履带吊的吊缆回缩至最大行程。此时履带吊的吊缆、扭王字块的吊绳均处于松弛状态, 激光测距仪至扭王字块顶面的距离为一个可变数值  $L_{var}$ , 见图 5a)。2) 当履带吊的吊臂逐渐摆正, 扭王字块脱离地面, 由于履带吊的吊缆、扭王字块的吊绳处于绷紧状态, 其长度达到固定长度  $L_{0.1}$ 、 $L_{0.3}$ , 吊钩竖向长度为  $L_{0.2}$ , 此时激光测距仪至扭王字块顶面的距离为一个固定数值  $L_0 = L_{0.1} + L_{0.2} + L_{0.3}$ , 见图 5b)。3) 此后, 履带吊的吊缆逐渐下放, 通过长度编码器可以获取吊缆下放长度  $\Delta L$ , 此时扭王字块竖向坐标  $z = z_0 + L_0 + \Delta L$ , 见图 5c)。

由上述原理, 可以对扭王字块吊起或未吊起的状态进行自动判断, 即在履带吊起吊过程中, 当激光传感器采集到的长度  $L$  与长度编码器采集到的长度  $\Delta L$  之差恒等于  $L_0$  时, 此时扭王字块处于起吊状态, 否则为未吊起或已卸扣状态。

### 3 扭王字块可视化安装应用

#### 3.1 传感器布置安装

在履带吊的吊臂末端打螺丝孔, 采用螺丝拼接的方式, 将长度编码器安装至吊缆定滑轮附近,

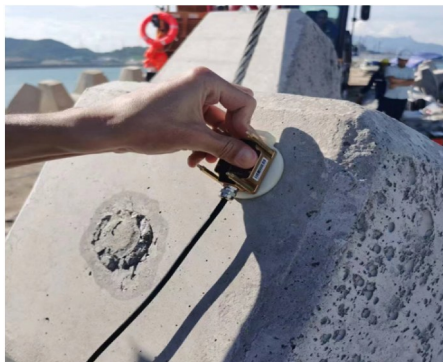
长度编码器滑轮与定滑轮紧紧相贴获取定滑轮的转动量，从而捕获吊缆收放长度。将激光测距仪悬挂在履带吊的吊臂末端，扭王字块起吊过程中，激光信号始终垂直打向扭王字块。移动式基站底座内置磁铁，吸附在履带吊吊臂末端铁板上，固定式基站安放在路边较高且无遮挡位置。姿态仪底部设有塑料板，通过纳米胶将塑料板与扭王字块混凝土面进行粘贴，塑料板连接有小绳，卸扣时吊环带动小绳，将姿态仪回收重复利用。传感器安装见图 6。



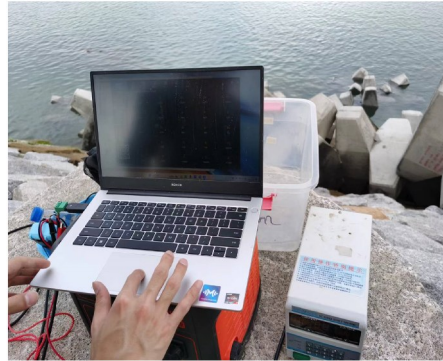
a) 长度编码器



b) 固定式基站



c) 姿态仪

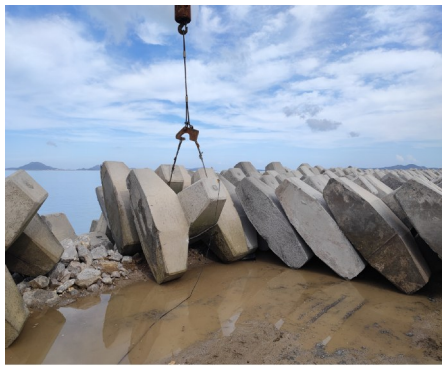


d) 数据采集仪

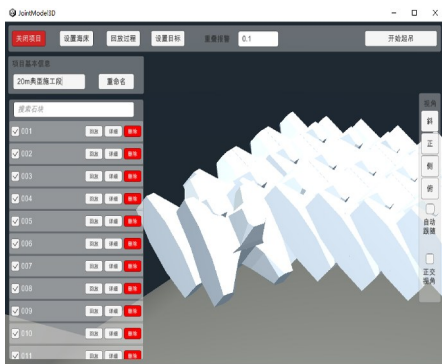
图 6 传感器安装

### 3.2 扭王字块吊装试验

扭王字块安装智能引导系统基于 Unity3D 引擎平台研发，具有较好的三维图形处理能力，集成了多种型号的扭王字块模型库，有效对实际吊装内容进行模拟。内置模块化逻辑功能组件，能有效读取传感器数据，根据自定义逻辑事件，对关键施工信息进行实时数据编译。按照 0.1 s 的时间间隔自动记录整个吊装过程中扭王字块的空间位置、姿态等参数信息，并以表格的形式将数据导出，实现施工信息溯源及二次数据处理。在现场选取一处长度为 20 m 的区域进行典型段施工，按照扭王字块规则堆放的方法，采用扭王字块可视化引导系统，对试验里程内的扭王字块进行全断面安装，见图 7。安装过程中，通过系统的三维模型显示窗口，时刻观察正在吊装的扭王字块与已安装扭王字块、安装基准面等模型之间的相对关系，并进行扭王字块实时平移调整，将扭王字块安装在合适的位置，避免将扭王字块放置在不合适的基准面，导致脱钩后扭王字块的不稳定。准备脱钩前，根据一段时间内  $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  坐标数值及其变化情况，判断水中扭王字块是否到达安装位置，是否处于稳定的坐底状态，以判定是否满足脱钩条件。为了验证可视化引导系统的精准性，对于陆上部分的扭王字块，采用人工测量的方法直接测量安装后扭王字块的实际间距，并将实测数据与可视化引导系统中捕获的数据进行对比。



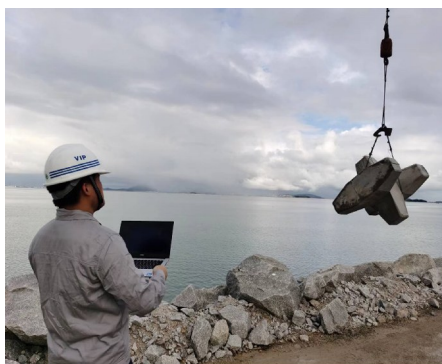
a) 陆上吊装试验



b) 软件操作界面



c) 水下吊装试验



d) 现场数据采集

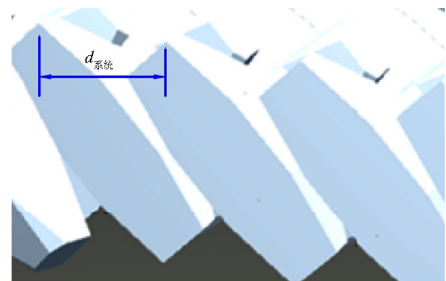
图 7 现场试验

### 3.3 施工质量分析

针对长度为 20 m 的堤顶扭王字块进行安装质量分析, 该范围内共有 160 件扭王字块, 相邻扭王字块的横、纵方向间距的数据共有 292 组。将现场人工实测的间距数据  $d_{人工}$  与引导系统生成的间距数据  $d_{系统}$  进行相减取绝对值  $|d_{人工} - d_{系统}|$ , 得到 292 组安装精度误差数据, 见图 8。其中有 95.5% 的数据误差在 1~7 cm 范围内, 具体分布见图 9。扭王字块安装验收标准为 50 件/100 m<sup>2</sup>, 引导系统安装误差在 8 cm 范围内, 典型段施工结果显示, 通过该系统的辅助施工, 扭王字块最终安装密度可以满足 50 件/100 m<sup>2</sup> 的验收需求。由于扭王字块姿态信息直接由其表面的姿态仪获取, 安装引导系统中呈现的扭王字块三维姿态的误差即为姿态仪的仪器误差, 仪器倾角测量误差为 0.01°, 可以满足安装要求。



a)  $d_{人工}$



b)  $d_{系统}$

图 8 扭王字块间距测量对照

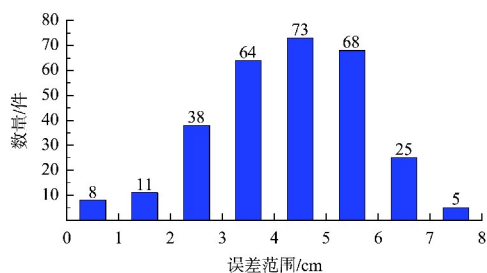


图 9 安装精度误差

### 3.4 施工工效分析

传统的扭王字块水下安装施工,主要凭借操作人员的经验和直觉进行“盲吊”安装,目前水下摄像机或声呐成像等辅助方法也难以实现安装定量控制。对于重要的结构段,通常采用潜水员水下人工引导的安装模式,单块扭王字块坐底阶段,潜水员在水下发出引导信号,操作人员在陆上进行反复移位调整,双方协调工作繁琐,通常消耗十几分钟甚至半小时,人员成本大且具有较大安全风险。本引导系统能有效地为操作人员提供扭王字块水下安装的可视化窗口,实时提供扭王字块位姿数据、相邻扭王字块相对间距、倾角等定量的关键信息。现场典型段施工试验表明,该引导系统可将单块扭王字块水下安装时间压缩至5 min以内,大幅提升了安装功效。此外,通过该系统的数据回放、表格导出等功能,可直接生成所有扭王字块的竣工信息,减少了竣工资料的收集整理工作量。

## 4 结论

1) 本文对扭王字块智能引导系统进行功能框架设计,建立起吊条件判断准则及位姿数据换算关系式,基于激光测距仪、长度编码器、移动式定位站、高精度姿态仪等传感器监测数据,确定了起吊过程中扭王字块的空间坐标及姿态信息。

2) 通过扭王字块安装智能引导系统,按照规则堆放的方法,在施工现场开展了扭王字块可视化安装典型试验,试验表明该系统性能稳定,安装坐标误差在8 cm范围内,倾角误差在0.01°范围内,可以满足现场施工控制及验收的要求。

3) 与传统“盲吊”安装方法相比,该方法能提

供具有定量数据的可视化窗口,可以实现水下安装全过程扭王字块位姿信息的实时监控,可将单次安装时间压缩至5 min内,不仅有效提升了安装施工的效率,而且能大幅减少竣工资料收集整理的工作量。

### 参考文献:

- [1] 陈魁,郑国成.扭王字块规则安放的质量控制[J].中国港湾建设,2014(6):58-60.
- [2] 肖仕宝,邓涛.深水防波堤扭王字块护面压脚设计方案[J].水运工程,2018(9):66-68,123.
- [3] 谢树杰,段建剑,高云龙.扭王字块RTK系统定点安装工艺[J].水运工程,2018(12):216-219.
- [4] 韩健,马振明.用于吊装扭王字块的便携式吊装装置研发[J].水运工程,2020(S1):40-42,66.
- [5] 吴乔,赵瑞东,邓涛.扭王字块随机安放细则[J].水运工程,2019(2):170-176.
- [6] 许昌峰,唐芹,马祖强,等.大型挖掘机及ECHOSCOPE系统在扭王字块安装中的应用[J].中国水运(下半月),2017,17(4):256-257.
- [7] 夏晓露,聂洪斌,刘竞辉.CODA声呐成像系统在防波堤扭王字块可视化安装中的应用[J].广东土木与建筑,2020,27(5):70-74.
- [8] 刘大为,翟永贞.单GPS定位系统在扭王字块水下安装中的应用[J].港工技术,2021,58(6):74-76.
- [9] 刘帅.双层扭王字块在天津港某防波堤工程中的应用[J].水运工程,2023(S2):104-108.
- [10] 李江文,祝健康.恶劣海况下防波堤超大型双层扭王字块护面研究[J].水运工程,2022(11):74-79.
- [11] 肖仕宝,邓涛,齐越.基于英标扭王字块预制安装成套技术[J].水运工程,2019(9):330-334.
- [12] Concrete Layer Innovations. Accropode II technical information document[R]. Paris: CLI, 2015.

(本文编辑 王璁)

## 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部