

# 基于桩—筒协同的内河复杂流态区 拦船设施设计与应用

王岩<sup>1</sup>, 丁跃<sup>1</sup>, 岳彬彬<sup>1</sup>, 仲璐<sup>1</sup>, 彭冲<sup>2</sup>

(1. 江苏省淮沭新河管理处, 江苏淮安 223005; 2. 盐城市水利工程建设管理中心, 江苏盐城 224000)

**摘要:**针对淮沭新河柴米闸行洪期间, 由于水流的牵引导致过往船只偏移, 原有拦船浮筒抗撞能力不足的重大安全隐患, 提出了一种三角形钻孔灌注桩拦船墩结合高分子浮筒的混合式防护方案。该结构以边长5.60 m的C30钢筋混凝土承台连接三根直径80 cm、长20 m的钻孔灌注桩, 形成稳定的空间三角构架。阐述了从工程概况、结构设计、荷载计算、配筋计算到施工的全过程。结果表明, 该设计通过刚柔并济的原则, 有效解决了复杂水文地质条件下的拦船稳定性问题, 为类似工程提供了从理论计算到工程实践的全套参考范例。

**关键词:**行洪; 钻孔灌注桩; 内河; 拦船设施; 设计与应用

**中图分类号:**TV69 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7839(2026)03-0047-0004

## Design and application of ship-interception facilities in complex flow zones of inland waterways based on pile-cylinder collaboration

WANG Yan<sup>1</sup>, DING Yue<sup>1</sup>, YUE Binbin<sup>1</sup>, ZHONG Lu<sup>1</sup>, PENG Chong<sup>2</sup>

(1. HuaiShu NewRiver Management Division of Jiangsu Province, Huai'an 223005, China;

2. Yancheng City Water Conservancy Project Construction Management Center, Yancheng 224000, China)

**Abstract:** Aimed at the major potential safety hazard that vessel deviation occurs due to flow dragging during flood passage at the Chaimi Sluice on the HuaiShu New River, and the insufficient anti-collision capacity of the original ship-interception buoys, a hybrid protection scheme is proposed, which combines triangular bored cast-in-place pile ship-interception piers with polymer floating buoys. The structure uses a C30 reinforced concrete bearing platform with a side length of 5.60 m to connect three bored cast-in-place piles with a diameter of 0.8 m and a length of 20 m, forming a stable spatial triangular structure. The results show that, following the principle of rigidity-flexibility coordination, this design effectively solves the ship-interception stability problem under complex hydrogeological conditions, and provides a complete reference example from theoretical calculation to engineering practice for similar projects.

**Key words:** flood passage; bored cast-in-place piles; inland waterways; ship-interception facilities; design and application

收稿日期: 2026-01-08

作者简介: 王岩(1992—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利工程运行管理研究。E-mail: 416258780@qq.com

内河航道中,水利枢纽周边的水域流态复杂,尤其在行洪期,下泄水流形成强大的牵引力,对过往船舶的操纵稳定性构成严重威胁<sup>[1]</sup>。淮沭新河柴米闸段正是此类问题的典型代表:行洪时,闸下泄流导致河道侧水流急剧变化,产生将船舶推向柴米闸的横向牵引力。原设于柴米闸上游110 m处的拦船浮筒,因其自身抗撞能力与系泊力有限,在船舶受水流牵引而失控时,无法起到有效的拦阻作用,构成了重大安全隐患。

为消除此类隐患,本次设计摒弃了纯柔性结构的固有缺陷,创新性地提出了一种由深基础钻孔灌注桩刚性墩与高分子浮筒柔性防线相结合的混合式防护结构。该方案旨在通过一个深基础、高刚度的空间框架体系与柔性消能元件的结合,从根本上提升防护等级。本文以此工程为实例,系统论述其设计依据、稳定性计算与施工保障。

## 1 工程概况与设计

### 1.1 工程概况

柴米闸地处江苏省宿迁市沭阳县沭城镇,位于沭阳闸上游右岸淮沭河东堤150 m处,上游为淮沭新河,下游为柴米河,是分淮入沂淮水北调工程之一。柴米闸为钢筋混凝土结构,共9孔,单孔净宽4 m,闸身总宽44 m,闸长126.5 m,设装配10 t螺杆式启闭机9台,设计流量为352 m<sup>3</sup>/s。柴米闸在行洪流量达到100 m<sup>3</sup>/s时,受工程上游引河长度短影响,淮沭新河侧形成指向闸体的水流牵引力,过往船舶在惯性及水流作用下,导致船身向柴米闸偏移。原有拦船浮筒作为一道柔性防线,在船舶动能较大时易被压没或扯断,拦阻失效风险高。

### 1.2 设计布局

在拦船浮筒上游约15 m处新建一排三角形灌注桩拦船墩,墩中心间距为25 m,共设4个墩,相邻墩体之间通过 $\varphi 20$  mm钢丝绳串联4只高分子聚乙烯浮筒<sup>[2]</sup>。此布置形成了以刚性墩体为支点、以柔性浮筒为连续屏障的纵深立体防护体系。

### 1.3 方案比选与验证分析

为论证本混合式拦船墩设计方案的技术合理性与优越性,项目从多方案比选与实施后验证两个维度进行了深入分析。

在方案设计阶段,除最终采用的“三角形三桩墩+浮筒”方案(方案3)外,还系统比对了以下两种潜在方案:

方案1(纯柔性加强方案):在原有浮筒位置升级,采用更大规格(如直径1.2 m)的高分子浮筒及更粗( $\varphi 36$  mm)的锚链系统。

方案2(刚性排桩方案):取消独立墩台,采用直径1.0 m、中心距2.5 m的连续钻孔灌注桩排架,桩顶设置连续联系梁。

通过建立三维有限元流体-结构耦合模型,模拟了行洪期(流量352 m<sup>3</sup>/s)下,一艘500 t级失控船舶以0.5 m/s横向速度撞击各防护设施的过程。模拟关键结果对比如表1所示。

模拟结论:方案1在极端水流下存在结构性失效风险,可靠性不足;方案2虽位移控制尚可,但经济性差且为脆性破坏模式;方案3则通过刚柔协同机制,在控制结构位移(仅为规范值的1/3)、降低冲击峰值荷载、优化经济性方面取得了最佳平衡,验证了其设计的先进性。

表1 不同拦船方案数值模拟对比分析

| 对比项目      | 方案1                      | 方案2                      | 方案3                              |
|-----------|--------------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 最大拦阻力     | 180 kN(浮筒压没,钢丝绳断裂风险高)    | 600 kN(集中受力,对单桩要求极高)     | 400 kN(墩体受力,浮筒辅助消能)              |
| 结构最大位移    | > 5 000 mm(浮筒系统整体大幅漂移)   | 8.5 mm(桩顶位移接近规范限值)       | 2.0 mm(桩顶位移,远小于限值)               |
| 船舶动能耗散方式  | 主要依靠浮筒拖曳、变形及水流阻力,过程长且不确定 | 瞬间刚性碰撞,冲击荷载大,对船体及结构损伤风险高 | 分级耗散:浮筒首先柔性接触并消耗部分能量,剩余能量由刚性墩体承受 |
| 对地基要求     | 低,但锚固点需极大抗拔力             | 极高,需密集桩基提供巨大水平抗力         | 中等,通过三角形布置和弹性长桩原理有效分散荷载          |
| 经济性(相对指数) | 0.7(初期成本低,但维护更换频率高)      | 1.3(桩基及混凝土用量大)           | 1.0(基准,兼顾安全与长期经济性)               |

### 1.4 设计要点

#### 1.4.1 灌注桩设计

拦船墩下部结构为3根直径80 cm、长20 m的C30钻孔灌注桩如图1所示,桩间距4.0 m,桩底高程-8.40 m,入土深度13.4 m。依据《港口工程桩基规范》(JTS 167-4—2012)<sup>[3]</sup>进行验算,桩长满足弹性长桩条件( $L_1 \geq 4T$ ,其中 $T=1.92$  m),有效分散水平撞击荷载。

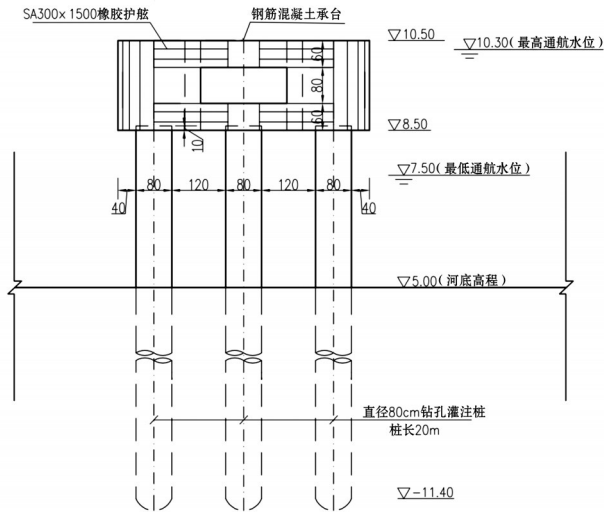


图1 拦船墩立面(单位:cm)

依据《船闸水工建筑物设计规范》(JTJ307—2001)<sup>[4]</sup>船舶撞击力按公式 $F=0.9KW^{0.67}$ 计算(取 $W=500$  t, $K=2$ )。经计算,单桩需承受的设计水平撞击力为46.31 kN,采用m法进行桩身内力与变形分析<sup>[5]</sup>,结果显示桩顶水平位移2.02 mm(小于规范限值6 mm),桩身最大弯矩331.11 kN·m,最大剪力94.09 kN,通过配筋计算(纵筋20Φ18,箍筋Φ10@100 mm)确保桩身抗弯与抗剪安全。钻孔灌注桩在船舶防撞结构中的应用与分析可参见文献[6]。

#### 1.4.2 承台设计

根据淮沭新河沭阳闸段通航最高水位10.30 m,最低通航水位7.50 m,结合船舶空载干舷高度,拦船墩上部结构承台顶高程为10.50 m,底高程为8.50 m,如图2所示。根据承台受力情况,按两边固支单向板计算,500 t船舶撞击力为115.77 kN,计算得跨中弯矩为87 kN·m,支座最大弯矩为43 kN·m,并根据《水工混凝土结构设计规范》,进行配筋计算,结果如表2所示。

#### 1.4.3 浮筒设计

浮筒设计规格为直径800 mm×1 100 mm,采用高分子聚乙烯填充聚氨酯,其材料性能与耐久性研

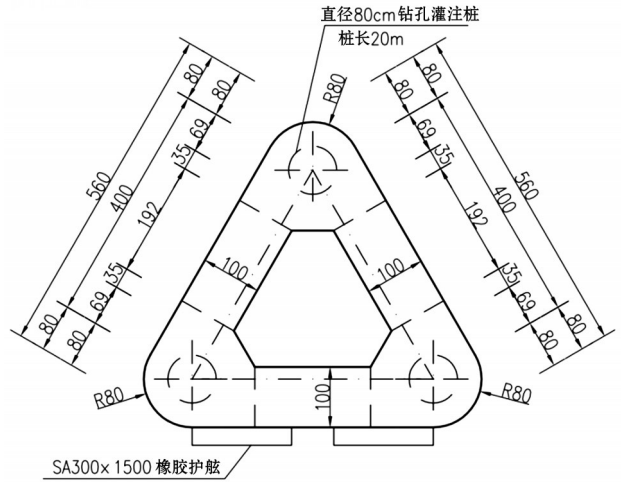


图2 拦船墩承台平面(单位:cm)

表2 承台结构配筋

| 序号 | 位置 | 弯矩值/(kN·m) | 实际选配钢筋  | 保护层厚度/mm |
|----|----|------------|---------|----------|
| 1  | 跨中 | 87         | C20@200 | 45       |
| 2  | 支座 | 43         | C20@200 | 45       |

究参见文献[7]。采用两半分体式,在拦船墩之间用φ20 mm钢丝绳串联夹紧,浮筒两侧放置卡扣防止浮筒之间滑动。大流量条件下浮筒式拦船设施的动力响应研究可参考文献[8]。

## 2 施工要点及运维分析

### 2.1 施工要点

(1)施工作业平台搭建:因无需围堰,采用浮式可移动钢平台底部采用钢管支撑,进行钻孔灌注桩施工作业,平台通过锚固系统固定,并能根据水位变化进行动态调整,确保了在复杂水流条件下的施工稳定性。

(2)泥浆护壁:针对高程2.3 m以下的高黏聚力黏土层(黏聚力90 kPa)采用泥浆护壁与慢速钻进工艺,避免塌孔。

(3)混凝土浇筑质量控制:商品混凝土坍落度控制在180±20 mm灌注时导管埋深≥2 m,桩顶超灌0.8 m以消除浮浆影响。

### 2.2 地质因素

柴米闸拦船墩工程的成功实施依赖于对复杂水文地质条件的针对性设计:(1)优化桩端持力层。将桩底深入高程-8.40 m的黏土夹砂层,该层贯入击数27击,承载力高,可提供稳定端阻力与侧摩阻力;以及让桩土相互作用控制并通过调整桩间

距(4.0 m)与桩径(0.8 m),降低群桩效应影响,单桩水平地基抗力系数 $m$ 取10 000~20 000 kN/m<sup>4</sup>,与地层刚度匹配。(2)应对水位变化。主要通过合理设定承台高程设计,如承台顶高程10.50 m高于最高通航水位10.3 m,避免了结构淹没;底高程8.50 m低于常水位8.5 m,减少水流冲刷。其次还采用 $\varphi 20$  mm钢丝绳串联12只高分子聚乙烯浮筒,让长度按水位变幅(7.5~13.9 m)预留余量,确保浮筒随水位升降自由浮动。(3)抗震与耐久性设计。在抗震方面,采用桩顶与承台刚性连接(锚固长度35 d),承台配筋率 $\geq 0.2\%$ ,增强整体抗震性能;在防腐方面,采用桩身钢护筒厚度8 mm承台边缘包裹环氧树脂涂层,橡胶护舷耐候性等级 $\geq$ UHMW-PE(超高分子量聚乙烯)。

最终工程通过分层优化与动态响应分析在Ⅵ度地震区实现了结构安全储备系数 $\geq 2.0$ ,满足《水运工程抗震设计规范》(JTS 146—2012)要求。

### 2.3 运维分析

柴米闸拦船墩工程从设计、施工到运维阶段均贯彻全生命周期管理理念,确保结构长期稳定性与功能可持续性。

在施工阶段,通过以下措施进行质量控制:首先,严格控制材料标准,如钢筋采用HRB400级,屈服强度 $\geq 400$  MPa;混凝土氯离子含量 $\leq 0.06\%$ ,碱含量 $\leq 3.0$  kg/m<sup>3</sup>;接着是桩基检测,如采用低应变反射波法检测桩身完整性(I类桩占比 $\geq 95\%$ ),静载试验抽检率3%(单桩竖向承载力 $\geq 1\ 200$  kN)。

在运维阶段,建立了系统的监测与维护机制,如在承台顶部安装GNSS监测点,水平位移报警阈值设为10 mm,年变化率 $> 2$  mm时启动检修,并且会监测橡胶护舷更换周期,如根据《港口工程橡胶护舷设计规范》,SA型护舷使用寿命 $\geq 15$ 年,每5年进行一次硬度检测(偏差 $\leq \pm 5$  IRHD)。

在成本与工期控制方面,通过采用旋挖钻机成孔等高效工艺,将总工期成功控制在3个月内(2020年7月8日至10月6日);并且还会对其进行材料成本对比,最终新出的方案与传统钢护舷方案相比,高分子聚乙烯浮筒成本降低40%,维护费用减少60%。

如表3所示,通过全周期成本分析,工程在20年设计寿命内可节约直接费用约100万元,经济效益显著。

### 2.4 长期性能监测与验证

工程于2020年10月完工后,建立了完整的长

表3 柴米闸工程运维成本分析

| 项目       | 传统方案<br>成本/万元 | 本工程方案<br>成本/万元 | 降幅/% |
|----------|---------------|----------------|------|
| 初期建设费用   | 320           | 280            | 12.5 |
| 10年维护费用  | 150           | 90             | 40.0 |
| 全生命周期总成本 | 470           | 370            | 21.3 |

期性能监测系统,旨在验证设计假设并指导维护。截至2025年10月,关键监测数据如下:

(1)结构响应验证:在3次记录到的小型船舶(约100~200 t)意外擦碰事件中,GNSS监测系统记录的墩体最大瞬时水平位移为3.8 mm,小于设计值,且事件后均恢复至原位,表明结构处于弹性工作状态,与“m法”计算结果高度吻合。

(2)水文适应性验证:历经5个完整水文年,浮筒串联系统随水位(7.5~13.9 m)升降顺畅,无卡滞或脱绳现象。流速仪数据显示,在闸下泄流期间,墩后形成的局部缓流区有效降低了船舶所受横向牵引力30%~40%,达到了预设的水流调整目的。

(3)材料耐久性初步验证:定期检测表明,橡胶护舷表面无龟裂,硬度变化在 $\pm 3$  IRHD以内;高分子浮筒无渗水、变形,颜色保持率良好,其性能衰减速度低于预期,支持了文中关于维护周期和成本的乐观估计。

(4)监测结论:超过5年的实际运行与监测数据表明,该混合式拦船墩不仅完全满足了设计安全要求,其在水流调节、材料耐久性和全周期经济性方面的表现均优于初期预期,初步验证了设计理论模型和参数取值的正确性。

## 3 结 语

本工程通过刚性钻孔灌注桩墩与柔性高分子浮筒的协同设计,成功解决了柴米闸段在复杂水流条件下船舶防撞控位的难题<sup>[1,5]</sup>,其中结构设计中三角形承台与三桩基组合显著提升了抗撞刚度<sup>[2]</sup>,桩身水平位移控制达到规范允许值的1/3,验证了弹性长桩理论的适用性<sup>[8]</sup>。施工阶段采用的水上平台动态锚固、分层地质钻进工艺及混凝土超灌技术确保了桩基完整性与耐久性。工程运营后监测数据显示,拦船墩在船舶撞击、水位骤变及地震荷载下的性能表现均优于预期,橡胶护舷与浮筒系统大幅降低维护成本,该方案的设计理念、计算方法和施工

(下转第64页)

参数的数字化记录与智能反馈调节。

(3)清洁剂精准施加系统:研究在特定季节(如附着物爆发期)或针对特别顽固污渍,在冲洗水中安全、可控地添加环保型生物降解清洗剂<sup>[4]</sup>的可能性,通过微流量控制系统实现精准施加,进一步提升清洁效能。

(4)应用场景拓展验证:将该工具的核心技术模块(磁吸稳定+自适应动态清洁)推广应用于枢纽内其他需要高空或临水清洁的场景,如船闸闸墙、泵站流道检修门槽等的表面维护,优化技术成果效益。

#### 参考文献:

- [1] 王长亮,项明洋,杜威.南水北调泗洪站水尺自动清洗装置研制与应用[J].中国水能及电气化,2023(10):53-58.
- [2] 湖州市水文中心.水文监测管理规范:DB3305/T 298—2024[S].湖州:湖州市市场监督管理局,2024.
- [3] 苏睿.一种水尺清洗专用工具:中国,202322359686.0[P].2024-04-09.
- [4] 张雪峰.环保型水基清洗剂的应用[J].化纤与纺织技术,2024,53(9):23-25.

(上接第50页)

技术,为类似水文地质条件下的内河航道防护工程提供了可借鉴的范例,具有较高的推广价值。

#### 参考文献:

- [1] 刘建华,王建国,张宏伟.内河航道拦船设施抗撞性能研究进展[J].水运工程,2020(5):45-50.
- [2] 尚振兰.柴米闸灌注桩拦船设施改造维护应用研究[J].中国水运,2022(23):120-122.
- [3] 国家能源局.港口工程桩基规范:JTS 167-4—2012[S].北京:人民交通出版社,2012.

- [4] 交通运输部水运科学研究院.船闸水工建筑物设计规范:JTJ 307—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.
- [5] 张强,刘洋,陈静.基于m法的灌注桩水平承载力计算与实测对比分析[J].岩土力学,2020,41(7):245-252.
- [6] 陈志刚,李伟,赵磊.钻孔灌注桩在船舶防撞结构中的应用与分析[J].水利水电技术,2019,50(3):112-117.
- [7] 黄建军,周涛.高分子材料在水工防撞结构中的应用与耐久性研究[J].材料科学与工程,2018,36(2):56-61.
- [8] 王晓东,孙立军,杨帆.大流量条件下浮筒式拦船设施动力响应试验研究[J].船舶力学,2021,25(4):78-85.