



船闸浮式系船柱升级改造设计与应用

李超军¹, 周钦², 叶雅思¹, 陈虹宇², 陈杨柳二²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200;
2. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011)

摘要: 随着船舶大型化的推进, 部分船闸无法较好地满足过闸船舶安全系统。以株洲一线船闸为例, 在浮式系船柱井槽不变的前提下, 对浮式系船柱进行升级改造设计。通过改变浮式系船柱结构形式, 优化系统高度、浮筒直径以及吃水深度等关键参数, 将系统力提升至 100 kN, 双层系统高度分别提高至 1900 和 3700 mm。经过有限元计算分析验证, 系船架结构的强度、刚度均满足要求。工程实践表明: 改造后的浮式系船柱边界参数与井槽尺寸匹配合理, 投产后运行可靠, 船舶过闸系统解缆效果良好, 可为类似船闸工程浮式系船柱的升级改造设计提供参考。

关键词: 船闸浮式系船柱; 升级改造; 系缆高度; 浮筒优化; 有限元计算

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)05-0173-06

Upgrade design and application of lock floating bollard

LI Chaojun¹, ZHOU Qin², YE Yasi¹, CHEN Hongyu², CHEN Yangliuer²

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha, 410200, China;
2. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha, 410011, China)

Abstract: With the advancement of large-scale ships, some locks are unable to meet the safety mooring of ships passing through the locks. Taking the first-line lock in Zhuzhou as an example, this paper upgrades and designs the floating bollards under the premise that the floating bollard groove remains unchanged. By changing the type of floating bollard structure, optimizing key parameters such as mooring height, pontoon diameter and draft, the mooring force is increased to 100 kN, and the height of the double-layer mooring is increased to 1900 and 3700 mm, respectively. After finite element analysis and verification, the strength and stiffness of the mooring frame structure meet the requirements. The engineering practice shows that the boundary parameters of the modified floating bollards are reasonably matched with the size of the well, the operation is reliable after putting into operation, and the unplugging effect of the ship mooring cable is good, which can provide reference for the upgrading and transformation design of floating bollards in similar lock projects.

Keywords: lock floating bollard; upgrade; mooring height; pontoon optimization; finite element calculation

随着我国水运事业的发展, 国内众多航道扩能升级进程迅猛, 带来大量的新改扩船闸建设, 许多枢纽扩建二线船闸后, 在通航水位满足船舶过闸的前提下, 仍可统一调度一线船闸缓解通航压力。但由于船舶大型化, 一线船闸浮式系船柱

往往无法较好地适应过闸船舶, 当大型船舶系统力及系统高度超出当前船闸浮式系船柱的设计极限, 将威胁到船舶停泊安全及闸室结构的安全^[1]。近年来, 学者们建立船闸浮式系船柱的受荷响应力学模型, 研究了船闸浮式系船柱系统安全监测

收稿日期: 2023-09-06

作者简介: 李超军 (1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程设计和 BIM 技术研究。

方法^[2-3]。通过利用连杆铰接代替传统的三角架支撑，提出了一种新型浮式系船柱结构，即解决系缆高度不足的多层铰接式浮式系船柱^[4-5]。然而在扩建更高级别船闸时，如何对相邻老旧船闸浮式系船柱进行改造升级，以适应运营需求的问题并未得到妥善解决。因此，本文重点研究如何在已建船闸浮式系船柱并不变，并槽空间有限的条件下对浮式系船柱进行升级改造，提升已建船闸对船舶大型化的运营适应能力。

1 工程概况

2019 年，湘江二期工程大源渡二线船闸建成通航，湘江衡阳蒸水河口—岳阳城陵矶河段航道由Ⅲ级航道全面提升至Ⅱ级。随着航道等级的提升，湘江大源渡航电枢纽—城陵矶河段往来船舶日渐增长，为了提高整个湘江二期工程河段的船舶通过能力，二线船闸过闸拥堵时，在通航水位

满足船舶过闸的前提下，可通过一线船闸缓解通航压力，提高船闸运行效率。

通过统一调度，株洲一线船闸、大源渡一线船闸丰水期能实现 2 000 吨级船舶通航，但随着船舶大型化的推进，其浮式系船柱的系统力及系缆高度已无法较好地适应 2 000 吨级船舶安全系缆，亟待改造升级。列举湘江二期工程航道内 4 座船闸浮式系船柱的主要特征参数见表 1。

以株洲一线船闸为例，浮式系船柱改造前设计系统力 50 kN，已无法适应大型船舶过闸，因此需要改造提升系统力至 100 kN，达到二线船闸系统力设计水平；其两层系统高度分别为 948 和 2 790 mm，下层系统柱仅高出水面 948 mm，船闸运行过程中，船舶满载系缆时下层系统柱常位于干舷以下，船员向下系缆困难且存在安全隐患，因此亟需提高系统高度，以方便系缆，并确保安全。

表 1 船闸浮式系船柱主要特征参数

船闸	船闸级别	系统力/kN	浮筒直径/mm	吃水深度/mm	总质量/kg	系统层数/层	系统高度(2 层)/mm	建成时间/年
株洲一线船闸	Ⅲ级	50	1 040	2 890	2 434	2	948/2 790	2004
株洲二线船闸	Ⅱ级	100	1 350	2 745	3 943	2	1 680/3 480	2018
大源渡一线船闸	Ⅲ级	50	1 040	2 460	2 350	2	1 378/3 220	1998
大源渡二线船闸	Ⅱ级	100	1 350	2 745	3 943	2	1 680/3 480	2019

本文结合船闸船舶大型化对系统力和系统高度的需求，从结构形式选择、关键参数拟定及结构计算分析等多方面对株洲一线船闸浮式系船柱进行升级改造设计分析。

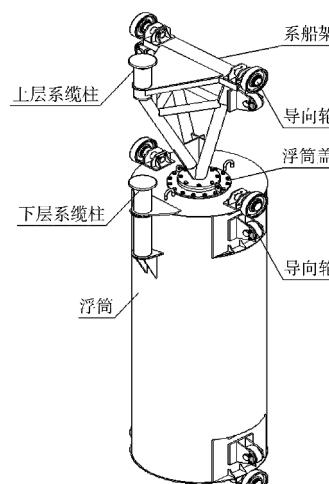
2 改造设计

2.1 结构形式选择

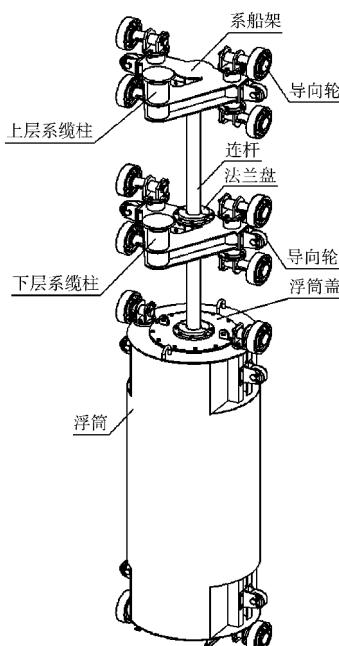
船闸浮式系船柱结构形式多样，通常根据船闸通航需求选择结构类型。本次改造的浮式系船柱并不作变动，并槽断面尺寸有限，浮筒直径无法有效增大。改造前的浮式系船柱为双层滚轮固接式浮式系船柱（见图 1a），其上层系船架与浮筒采用刚性固接，在浮筒直径无法有效增大的情况下

下，该结构形式浮式系船柱系统力提升有限，且上层系船架不便于调节系统高度，如继续采用此结构形式难以满足升级改造需求。

双层滚轮铰接式浮式系船柱结构形式，见图 1b)，其浮筒与系船架、系船架与系船架之间均通过铰接柔性连接，系船架之间通过连杆支撑，法兰盘锁定，连杆与法兰盘之间留有一定的径向活动空间，浮筒和连杆主要提供竖向承载作用。在浮筒直径无法有效增大的情况下，通过调节系船架的规格尺寸可提升系统力，通过调节浮筒与系船架、系船架与系船架之间的连杆高度可任意调整系统高度^[6]，有效适应改造条件的局限性。因此，将浮式系船柱结构形式由双层固接式优化为双层铰接式。



a) 改造前双层滚轮固接式



b) 改造后双层滚轮铰接式

图1 浮式系船柱结构形式

2.2 关键参数设计

2.2.1 系缆高度优化

本次改造的核心之一是提高系缆高度, 改善过闸船舶系缆条件。浮式系船柱系统高度应以满足船员在甲板上较方便地系缆, 同时适用范围尽可能更广为原则, 综合考虑二线船闸空载干舷高度设计值为2 200 mm, 初步拟定下层系缆高度1 900 mm, 上

层系缆高度3 700 mm。此时, 始终满足系缆高度在干舷之上, 消除了向下系缆的可能性, 且大多数情况下可较方便地站立系缆、解缆。

2.2.2 浮筒尺寸优化

改造前浮式系船柱浮筒直径1 040 mm、浮筒高度3 468 mm、吃水深度2 890 mm。本次改造浮式系船柱并不变, 因此浮筒直径只能在满足井槽尺寸要求的前提下微调。根据浮式系船柱井槽断面(图2)可知, 浮式系船柱井内净空最大内切圆直径1 147 mm, 考虑导向轮与导轨间距, 浮式系船柱应适当地预留活动空间, 经初步测算, 拟将浮式系船柱浮筒直径由1 040 mm增大至1 080 mm。

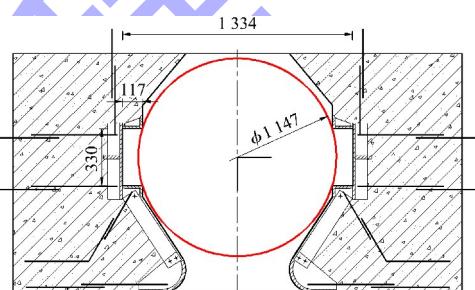


图2 浮式系船柱井槽断面 (单位: mm)

改造前浮式系船柱下层系船柱布置在浮筒顶部, 浮筒除了提供浮力外, 还需要支承系缆力, 因此对结构强度要求较高。改造后浮式系船柱浮筒仅提供浮力和支撑系船架自重力, 浮筒壁对结构强度的要求大幅降低。因此, 将浮筒面板厚度由原来的8 mm优化至6 mm, 减轻结构质量。

2.2.3 吃水深度计算

双层滚轮铰接式浮式系船柱主要包括浮筒、浮筒盖、系船架、横向滚轮装置、纵向滚轮装置、连杆、法兰盘等构件。运用SolidWorks创建浮式系船柱BIM模型, 并提取结构质量等关键属性值^[7](图3), 改造后的浮式系船柱质量为2 392.98 kg, 由此计算得出吃水深度2 700 mm, 浮筒高度可由3 468 mm降低至3 000 mm。

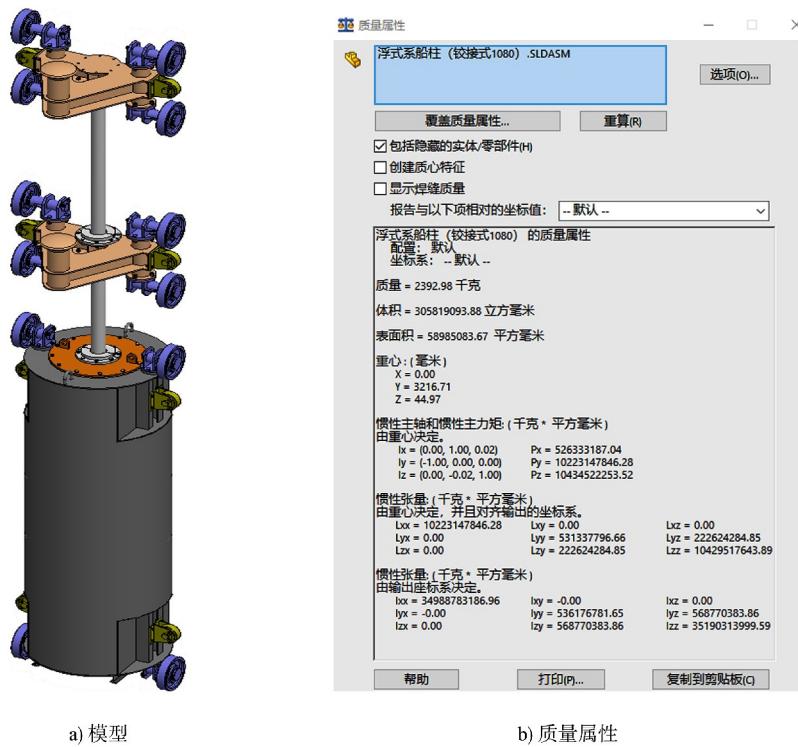


图 3 浮式系船柱 BIM 模型及质量属性

3 结构仿真计算

3.1 计算工况

本次改造采用的铰接式浮式系船柱，其浮筒与系船架通过连杆和法兰盘铰接柔性连接，仅提供浮力，受系缆力的影响可忽略不计，因此仅对系船架进行有限元计算分析。浮式系船柱设计最大系缆力 100 kN，最大系缆角度为 140°，计算时考虑 2 种典型工况分别为：1) 系缆力 100 kN、系缆角度 90°；2) 系缆力 100 kN、系缆角度 140°。

3.2 有限元模型建立

基于 SolidWorks 创建系船架三维模型，经模型简化后得到系船架几何模型。运用 SolidWorks Simulation 创建算例，添加材料属性(系船架主体材料均采用 Q355B，弹性模量 210 GPa、泊松比 0.3、密度 7 850 kg/m³)，施加约束(下翼缘连杆支撑区域竖直方向约束位移为 0 mm，2 个纵向滚轮座板顺水流方向约束位移为 0 mm，4 个横向滚轮座板垂直水流方向约束位移为 0 mm)，定义载荷(自重力、系缆力 100 kN)，然后进行网格划分(采用实体网格划分，单元大小 10 mm，创建节点 40,970 8 万个、单元 24,635 4 万个)，建立有限元计算模型见图 4。

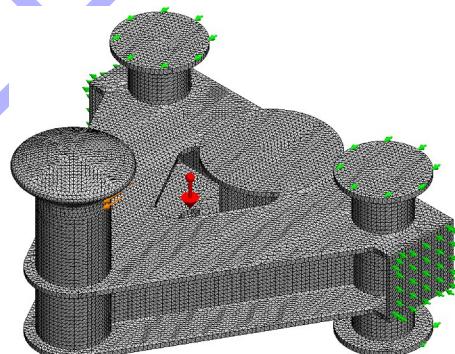
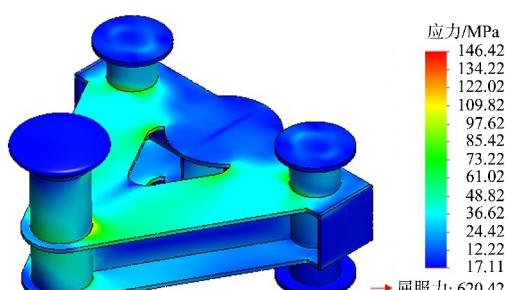


图 4 浮式系船柱系船架有限元模型

3.3 计算分析

3.3.1 计算结果

工况 1 系缆力 100 kN、系缆角 90°；工况 2 系缆力 100 kN、系缆角 140°，两种工况下运行分析系船架有限元模型得到计算结果，见图 5。



a) 工况1应力结果

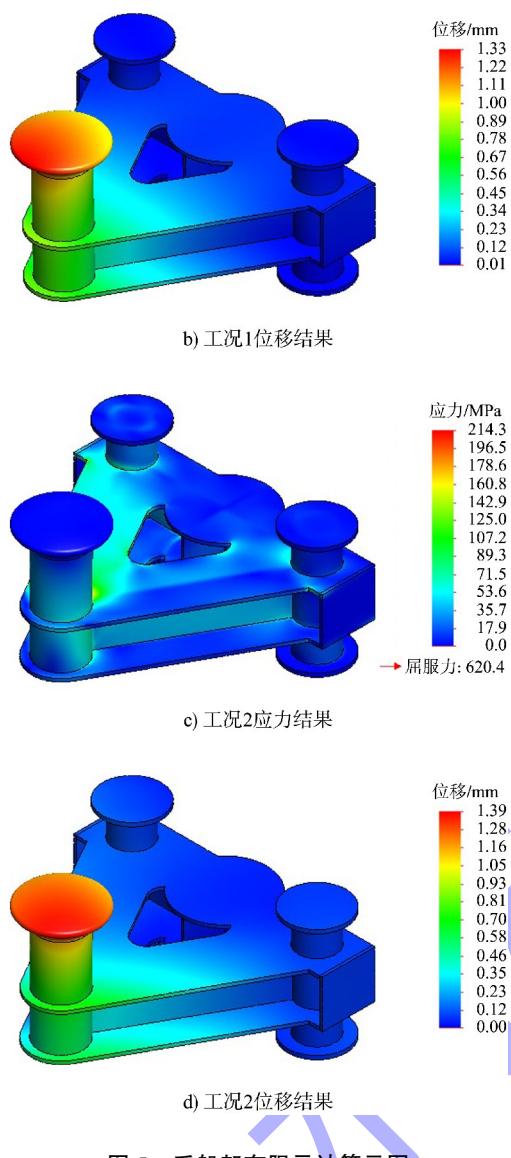


图5 系船架有限元计算云图

3.3.2 结果分析

由图5可知,工况1运行时,系船架最大应力为146.4 MPa,最大位移为1.33 mm,均满足设计要求;工况2运行时,系船架最大应力为214.3 MPa,最大位移为1.39 mm,均满足设计要求。两种工况的应力、位移分布情况一致,其中最大应力均分布在系缆柱与上翼缘板交界位置,且存在较明显的应力集中现象,最大位移均分布在系缆柱上部。浮式系船柱系缆运行过程中,在最不利的受力工况下,系船缆绳套在系船柱上端与系船帽交接位置,该处变形最大,计算分布情况与实际运行情况相符。

4 边界参数配合校验

4.1 井槽横断面参数配合

为确保浮式系船柱安装就位后在井槽内运转灵活,无卡阻现象、碍航问题及碰壁情况,浮式系船柱结构与井内应适当地预留活动空间。浮式系船柱相关尺寸及井槽尺寸见表2。

表2 浮式系船柱与井槽尺寸配合校核

校核项目	浮式系船柱尺寸/mm	井槽尺寸/mm	是否满足要求
横向滚轮宽度	318	330	满足
横向尺度	1 324	1 334	满足
纵向尺度	1 299	1 380	满足
中轴线至闸室边距	759	780	满足
浮筒直径	1 080	1 147	满足

浮式系船柱横向导轮直径与改造前保持一致,取值318 mm,导槽横向宽度330 mm,单边预留6 mm活动间隙;浮式系船柱结构总体横向尺寸1 324 mm,导槽横向尺寸1 334 mm,单边预留5 mm活动间隙;浮式系船柱结构中轴线至闸室边距759 mm,导槽中轴线至闸室边距780 mm,系船柱无碍航问题;浮式系船柱浮筒直径取值1 080 mm,浮式系船柱井内净空最大内切圆直径1 147 mm,四周均预留超过33 mm活动间隙,远大于导向轮与导槽间距,浮筒不存在碰壁情况。浮式系船柱结构与井槽断面布置见图6,结构尺寸与井槽尺寸配合均合理,满足设计要求。

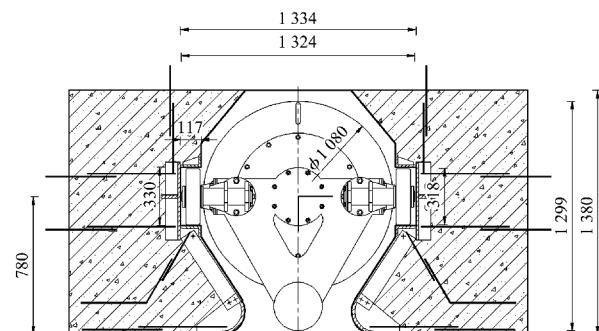


图6 改造后的浮式系船柱井断面布置(单位: mm)

4.2 井槽纵断面参数配合

最高通航水位及最低通航水位运行工况下,浮式系船柱系缆高度与闸室顶底高程及通航水位

关系见图 7, 可知不会出现触顶与搁浅现象, 系缆高度取值合理, 满足设计要求。

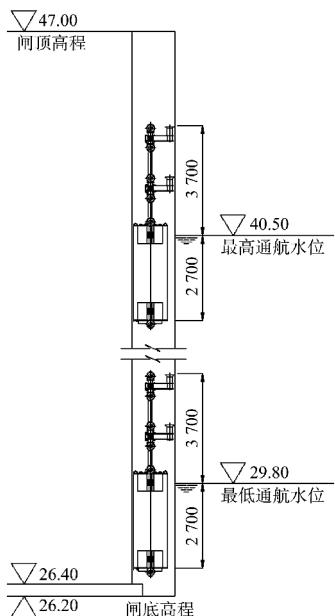
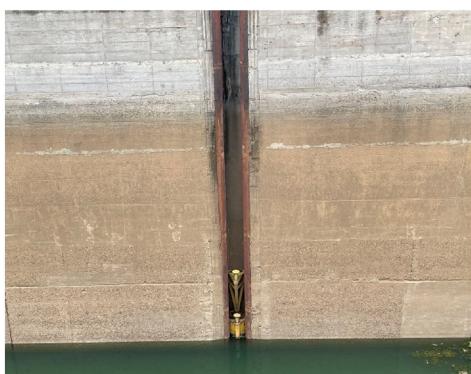


图 7 浮式系船柱系缆高度与闸室高程及通航水位关系 (尺寸: mm; 高程: m)

5 工程应用

为了能适用更大吨位船舶过闸, 改善系缆解缆条件, 在维持原有浮式系船柱井槽和埋件不变的基础上, 采用双层铰接式结构形式, 对株洲一线船闸浮式系船柱进行升级改造, 将原有浮式系船柱全部更新换代, 改造设计成果已于 2022 年成功投产应用(图 8)。浮式系船柱改造投入运营后运行可靠, 船舶过闸系缆、解缆效果良好。



a) 改造前



b) 改造后

图 8 浮式系船柱改造前后实景对比

6 结语

1) 在船闸浮式系船柱井槽不变的情况下, 进行浮式系船柱升级改造, 可采用双层滚轮铰接式浮式系船柱, 通过调节系船架的规格尺寸将系统力由 50 kN 提升至 100 kN; 通过调节连接浮筒与系船架、系船架与系船架的连杆长度将双层系缆高度由 948 和 2 790 mm 分别提高至 1 900 和 3 700 mm, 较好地满足大型船舶过闸的安全系缆要求。

2) 针对系统力 100 kN, 系缆角分别 90°、140° 的两种工况进行有限元仿真分析, 对改造后的浮式系船柱系船架进行计算校验, 计算结果表明应力、位移均在容许值范围内, 结构改造满足设计要求。

3) 改造后的浮式系船柱结构尺寸与井槽尺寸配合全部合理, 浮式系船柱安装就位后在井槽内无卡阻现象、碍航问题及碰壁情况, 且最高通航水位及最低通航水位运行工况下, 浮式系船柱均不会出现触顶与搁浅现象。

4) 株洲一线船闸浮式系船柱的升级改造完成, 新的浮式系船柱投入运营后大型船舶过闸系缆、解缆效果良好, 可为类似船闸工程浮式系船柱的升级改造设计提供参考。

(下转第 184 页)