



# 基于 BIM 技术的船闸浮式系船柱结构设计

李超军, 叶雅思, 李金朋

(湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200)

**摘要:** 针对二维设计在处理空间复杂的结构设计及计算问题时手段局限的情况, 运用 BIM 技术在可视化环境下对船闸浮式系船柱进行结构设计, 并基于 BIM 模型进行有限元模拟计算分析, 对船闸浮式系船柱结构开展设计研究。建立固接式和铰接式两种结构形式的船闸浮式系船柱 BIM 模型, 分别从结构构造和力学性能分析等方面进行研究。结果表明: 铰接式船闸浮式系船柱的系缆小车可以很好地解决系缆高度适应性差等问题, 多层系缆小车之间通过连杆柔性连接, 降低了埋件的支承反力, 并在结构安全性及后期维护等各方面均有较大提升, 经多个船闸工程应用实践检验, 可为类似工程设计和改进提供参考。

**关键词:** 船闸浮式系船柱; 结构设计; 柔性连接; BIM 技术; 数值模拟

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0171-06

## Structural design of floating mooring column of ship lock based on BIM technology

LI Chaojun, YE Yasi, LI Jinpeng

(Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

**Abstract:** In view of the limitations of two-dimensional design in dealing with spatial complex structural design and calculation problems, building information modeling (BIM technology) is used to carry out the structural design of the floating mooring column of ship lock in the visual environment. Based on the BIM model, the finite element simulation calculation and analysis are carried out to the design research on the floating mooring column structure of ship lock. Two kinds of BIM models including fixed and articulated of ship lock floating mooring column are built, and studied respectively from the aspects of structure and mechanical property analysis. The results show that the mooring trolley of floating mooring column of articulated ship lock can solve the problem of poor adaptability of mooring height well. The multi-layer mooring trolley is flexibly connected by connecting rod, which reduces the supporting reaction of buried parts and improves the structure safety and later maintenance greatly. The design is tested by several ship lock engineering applications, and it can provide references for the similar engineering design and improvement.

**Keywords:** ship lock floating mooring column; structural design; flexible connection; BIM technology; numerical simulation

近年来, 国内外航运业发展迅速, 船舶不断朝大型化发展, 过船建筑物的规模越来越大, 从而对船闸各结构的可靠性等要求更高, 其中浮式系船柱作为船闸过船的关键金属结构, 其结构设计、工作性能等一直都备受关注。

目前, 传统的船闸浮式系船柱大多为固接式结构, 随着航运规模的扩大, 其结构自身重力大、船舶系缆高度适应性差等问题逐渐凸显。对此, 许多学者对其进行了大量设计研究, 如刘松等<sup>[1]</sup>从系船柱的材料选择、几何造型等方面阐述了一

收稿日期: 2022-12-13

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。

种新型系船柱的研究设计；张星星等<sup>[2]</sup>针对水位的瞬变对系船柱的影响问题，提出新型码头浮式系缆装置，有效解决了装置升降过程的不平衡阻力等关键技术问题；吴俊等<sup>[3]</sup>提出标准条件系缆力的概念与指标，并探讨了一种系船柱结构受力安全监测方法；刘明维等<sup>[4-5]</sup>利用数值模拟方法对船闸浮式系船柱结构进行有限元计算，得到其应力集中区和受力敏感区，为船闸浮式系船柱的结构改进及现场试验方案提供理论基础；尹斌勇等<sup>[6]</sup>、张虎等<sup>[7]</sup>将传统系船架结构调整为系缆小车结构，从而解决船闸浮式系船柱系统高度适应性差的问题，研究成果为船闸浮式系船柱结构的改造升级提供了参考。但由于船闸浮式系船柱复杂的空间结构，根据传统的平面设计，船闸浮式系船柱依然存在结构装配式设计难度大、实际系缆力无法精准考量等问题，亟待解决；另一方面，随着计算机行业的飞速发展，建筑信息模型(building information modeling, BIM)技术逐渐被应用于各行各业，其结构参数化、三维可视化、干涉检验等为复杂结构的设计提供了一条新道路<sup>[8]</sup>。

本文拟采用 BIM 技术对船闸浮式系船柱进行可视化设计，并基于 BIM 模型进行有限元计算，为船闸浮式系船柱结构的改进和优化提供依据与支撑。

## 1 浮式系船柱结构设计

### 1.1 固接式结构

固接式船闸浮式系船柱采用双层系缆，主要由浮筒、上层系船架、导向滚轮装置 3 部分组成，分别采用钢结构焊接制作后通过螺栓连接组成。导向滚轮装置由横向、纵向各 6 组导轮组成，导轮在闸墙导槽内随水位升降上下滚动，从而实现浮式系船柱与水面的相对平衡，确保船舶安全系缆过闸。基于 BIM 技术建立固接式船闸浮式系船模型，如图 1 所示。

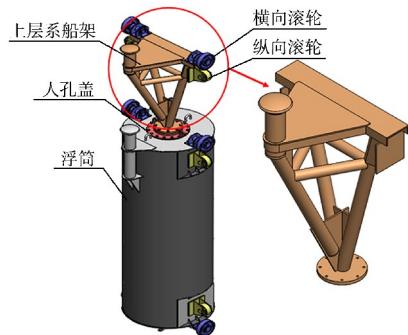


图 1 固接式浮式系船柱 BIM 模型

### 1.2 铰接式结构

铰接式结构针对固接式结构体系存在的系缆高度适应性差、系缆力矩过大等问题，将浮式系船柱的结构由固接式优化为铰接式。利用系缆小车代替传统固接式浮式系船柱中的上层系船架，通过连杆及法兰盘铰接柔性联结，将各层系缆小车与浮筒连为整体。

铰接式船闸浮式系船柱通常采用 3 层(或多层)系缆，主要由浮筒总成(包含浮筒、顶盖、横向滚轮、纵向滚轮)、系缆小车总成(包含系缆小车车架、横向滚轮、纵向滚轮)、连杆、法兰盘等组成，分别采用钢结构焊接制作后通过螺栓连接组成，其中每套系缆小车由小车车架、4 组横向导轮和 2 组纵向导轮组成。基于 BIM 技术建立铰接式船闸浮式系船柱模型，如图 2 所示。

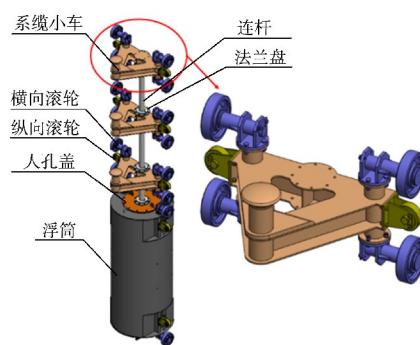


图 2 铰接式浮式系船柱 BIM 模型

## 2 浮式系船柱结构分析

### 2.1 结构构造分析

传统的固接式船闸浮式系船柱的上、下两层

系船柱通过上层系船架和人孔盖固接在一起, 属于刚性连接, 如图3所示。固接结构体系中, 由于制造、安装等精度误差的存在, 上、中、下3组导轮很难共面。最不利工况下, 上、下导轮作为受力支撑点, 中间导轮悬空, 系缆力矩将变得很大。系缆力矩的增大使固接式浮式系船柱结构的强度、刚度设计要求变得更高, 同时埋件支承反力的增大也将导致埋件结构设计要求相应变大。

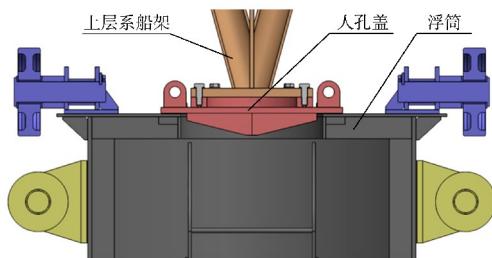


图3 固接式上层系船架与浮筒连接

铰接式船闸浮式系船柱通过连杆将浮筒与系缆小车、系缆小车与系缆小车之间进行柔性连接, 如图4所示。铰接结构体系中, 连杆作为系缆小车与系缆小车、系缆小车与浮筒的连接结构, 通过调整其长度可轻易实现各层系缆高度的调节, 各层系缆小车之间、系缆小车与浮筒之间相对独立。船舶系缆时, 浮筒仅作为浮游装置提供浮力, 其系缆力主要由系缆小车系统承担, 系缆小车受力支撑点为其纵、横向导轮, 系缆力可完全由小车的滚轮系统自平衡后直接传递至埋件, 避免使系缆力传至浮筒或其他系缆小车, 从而大幅减小了力矩及埋件反力, 提高了浮式系船柱结构及其埋件结构的安全性和可靠性。同时, 各层系缆小车的独立性很大程度提高了船闸浮式系船柱的系缆力和系缆高度的适应范围。此外, 铰接式船闸浮式系船柱的系缆小车在使用过程中, 若某个车架或导轮损坏, 不需要更换整个浮式系船柱, 只需更换损坏的结构, 大幅节省了后期维修改造的工程量和费用。

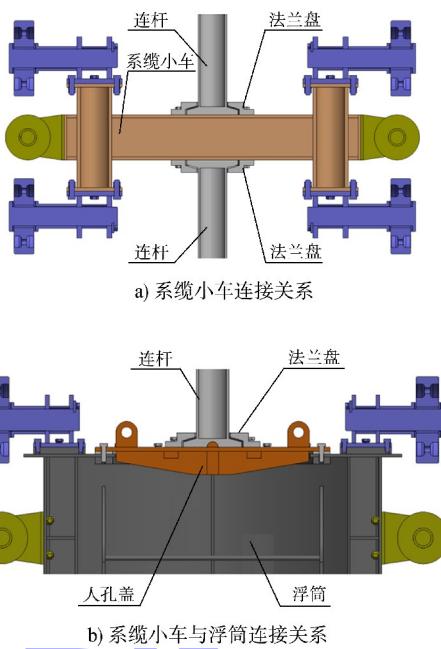


图4 铰接式浮式系船柱连接

## 2.2 结构力学性能分析

### 2.2.1 有限元计算

运用BIM软件Solidworks建立的三维数字模型能实现与ANSYS Workbench的无缝对接, 计算时可直接在Solidworks主界面将处理好的模型导入ANSYS Workbench进行有限元计算分析, 其流程如图5所示。

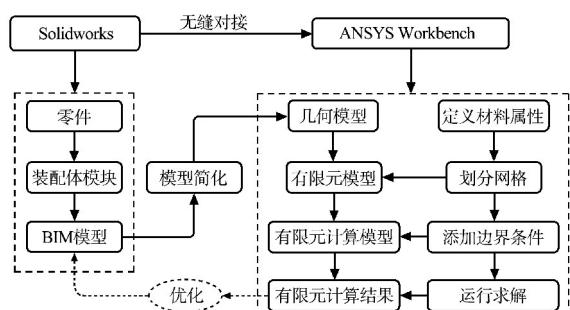


图5 计算分析流程

在进行有限元分析之前, 对几何模型进行必要的简化修改, 将简化后的浮式系船柱BIM模型直接导入ANSYS Workbench中, 定义材料属性, 划分网格得到有限元模型(图6), 添加边界约束条件、加载得到有限元计算模型, 最后运行求解, 得到各个工况的计算结果。



图 6 浮式系船柱结构有限元模型

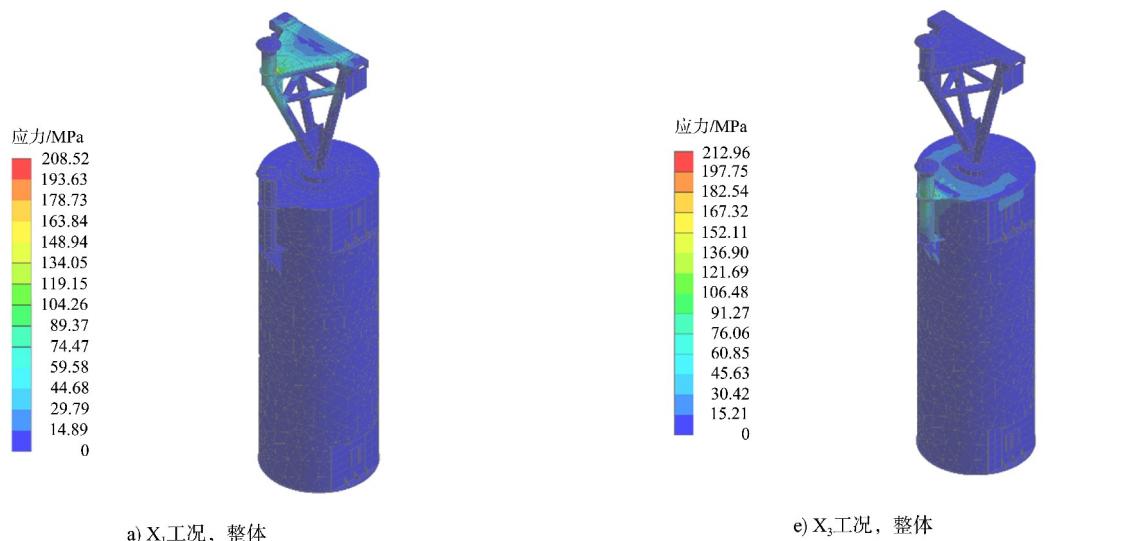
本文以系缆力 150 kN 规格的船闸浮式系船柱为例,选取具有代表性的系缆角( $90^\circ$ 和 $140^\circ$ )进行模拟计算,工况见表 1。

表 1 计算工况

浮式系船柱结构	工况	系缆位置	系缆力/kN	角度/(°)
固接式	X <sub>1</sub>	上层系缆	150	90
	X <sub>2</sub>	上层系缆	150	140
	X <sub>3</sub>	下层系缆	150	90
	X <sub>4</sub>	下层系缆	150	140
铰接式	Y <sub>1</sub>	系缆小车	150	90
	Y <sub>2</sub>	系缆小车	150	140

## 2.2.2 结果分析

对不同工况下的固接式船闸浮式系船柱进行模拟计算,得到的应力云图如图 7 所示。可以看出,固接式船闸浮式系船柱的最大应力主要集中于上层系船柱与上层系船架顶板、下层系船柱与下层系船柱支撑板的交接处。系缆角为 $140^\circ$ 时出现明显的应力集中现象,最大集中应力达到 272.38 MPa。



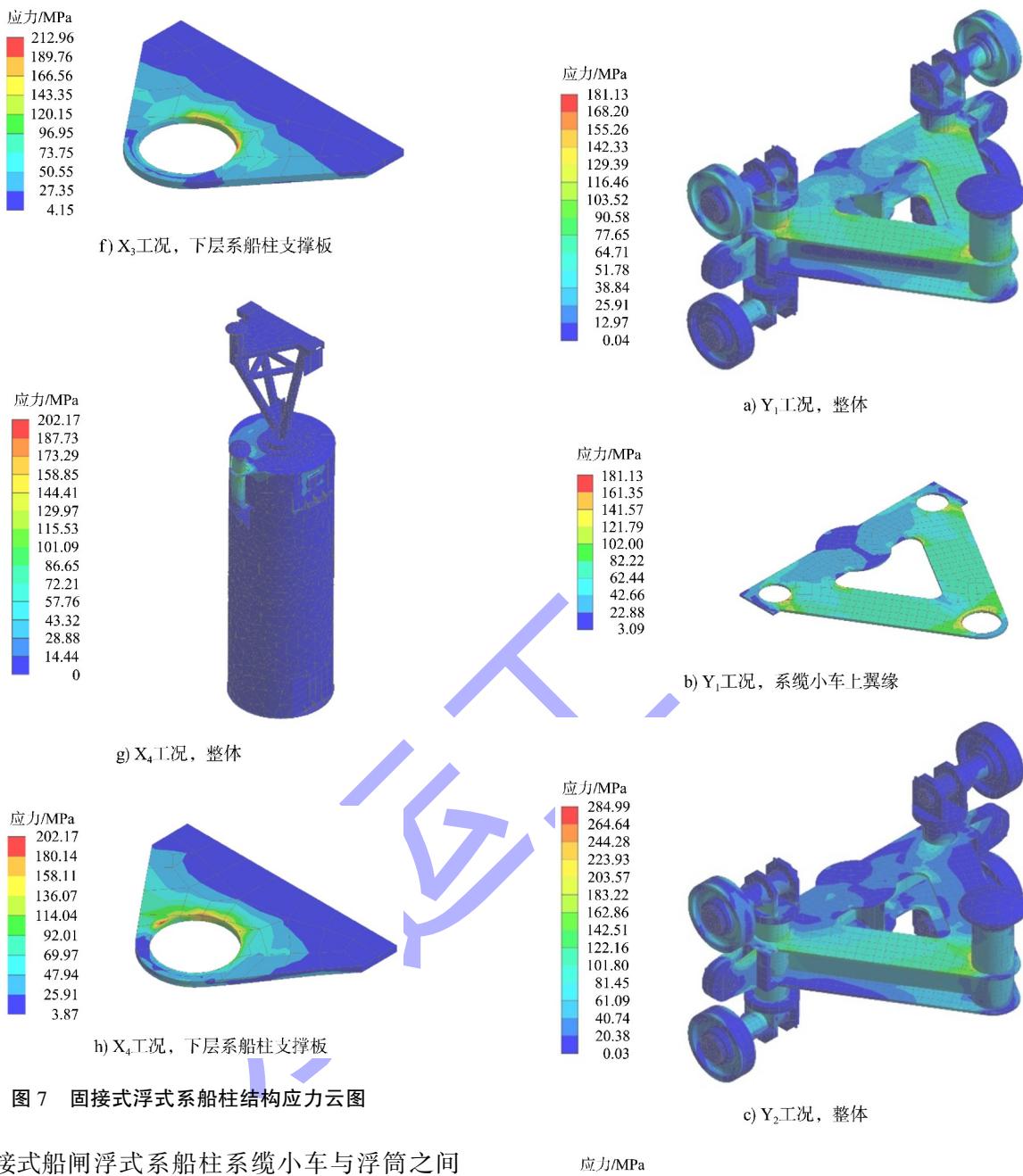


图7 固接式浮式系船柱结构应力云图

铰接式船闸浮式系船柱系统小车与浮筒之间采用铰接连接, 系缆力经由系统小车导向轮传递至埋件和混凝土结构, 各层系统小车从系统力的传递角度均可视作一个独立的系统。浮筒计算原则上不受系统力影响, 可只考虑自身重力、系统小车压力、浮力、水压力。在2种工况下进行模拟计算, 得到的应力云图如图8所示。可以看出, 铰接式船闸浮式系船柱最大应力主要集中于系统小车车架上翼缘与系船柱交接处。系统角140°时, 应力分布偏向系统小车结构的一侧, 出现较明显的应力集中现象。

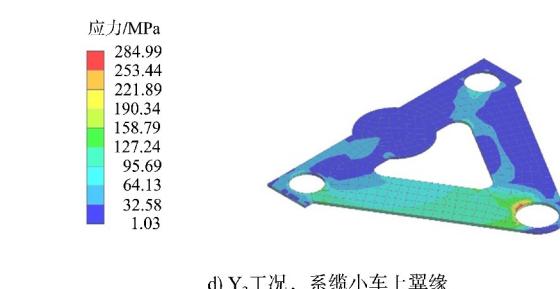


图8 铰接式浮式系船柱系统小车结构应力云图

铰接式结构浮筒应力云图见图9。可以看出, 在只考虑自身重力、系统小车压力、水压力、浮力的条件下, 铰接式结构中浮筒应力较小。因此,

相较于固接式浮式系船柱结构，在满足浮力等条件下，可适当简化浮筒结构、减小浮筒壁厚等几何参数，从而使结构更加简洁化、轻便化。

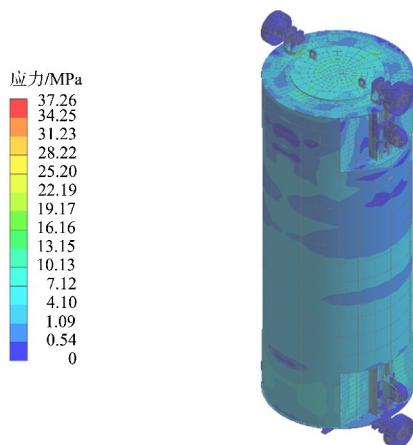


图 9 铰接式浮式系船柱浮筒结构应力云图

基于系统力 150 kN 的工况，对 2 种不同结构形式的船闸浮式系船柱进行模拟计算，得到的最大支座反力见表 2。可以看出，铰接式船闸浮式系船柱支座最大反力整体比固接式船闸浮式系船柱小，并且随着系统角度的增大，最大反力降低程度更为显著。最大支座反力降低的主要原因在于铰接式浮式系船柱系统小车从系统力的传递角度可视为独立系统，上下导轮间距小，继而力矩减小，支座反力也随之减小。

表 2 支座最大反力

结构	系统 角度/(°)	最大反力/kN	
		横向轮	纵向轮
固接	90	86.08	6.65
	140	156.64	68.55
铰接	90	66.22	34.07
	140	72.19	79.44

综上可知，相对于固接式结构，铰接式结构将系统小车与浮筒分为数个独立系统，系统力较均匀地通过系统小车的横、纵向导轮传递至埋件，大幅减小了系统力矩，降低埋件结构的承力要求，使结构在相同系统力情况下具备更高的安全性和可靠性。

### 2.2.3 工程应用案例

该铰接式船闸浮式系船柱结构已成功应用于湘江长沙枢纽船闸（图 10）、湘江湘祁二线船闸、湘江近尾洲二线船闸、澧水青山船闸、澧水艳洲船闸等多个大型水运工程，很好地解决了系统高度适应性等问题，其安全性、可靠性以及可替换性更佳，经多年现场运行反馈效果良好，可为其他船闸工程浮式系船柱的设计改进和优化提供参考。



图 10 湘江长沙枢纽船闸工程铰接式浮式系船柱应用

### 3 结语

1) 将 BIM 技术应用于船闸浮式系船柱结构设计，很好地解决了传统的二维设计在处理空间复杂的结构设计及计算时手段局限的问题。

2) 铰接式浮式系船柱用系统小车代替原有结构的上层系船架，很好地解决了系统高度适应性差等问题。后期运行中若某个系统车架或导轮损坏，可直接单独替换，而无需更换整个浮式系船柱，降低维护成本、提升维修的便捷性。

3) 铰接式浮式系船柱结构中浮筒与系统小车、系统小车与系统小车之间采用柔性连接，可大幅改善浮式系船柱结构及埋件的受力情况，提高浮式系船柱结构的安全性和可靠性。

### 参考文献：

- [1] 刘松, 刘声树, 邹艳春. 一种新型系船柱的研究设计[J]. 水运工程, 2015(2): 168-173.

(下转第 210 页)