

· “高坝通航水力学研究”专栏(7) ·



34 m 口门船闸三角闸门设计要点

戴振华¹, 朱 颖², 黄可璠¹

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014; 2. 河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 船闸三角闸门多采用空间网架结构, 对于34 m 口门船闸而言, 采用三角闸门形式尚属首次。为提高闸门结构设计合理性和安全可靠性, 结合裕线裕溪一线船闸扩容改造工程三角闸门的设计实例, 从门体结构、支承运转装置、防撞系统、止水系统4个方面对大口门船闸三角闸门设计中须解决的关键技术难点进行分析, 选取两组设计水位组合对闸门空间结构进行有限元仿真分析, 并对顶、底枢结构进行针对性设计, 同时在运转件表面强化工艺、防撞系统结构形式、不同部位的止水设计等方面提出解决方案。结果表明: 闸门各结构部件受力在允许范围之内, 运转装置安全可靠, 止水结构适应性良好, 均满足使用要求。

关键词: 大口门船闸三角闸门; 结构设计; 支承运转装置; 防撞系统; 止水系统

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)03-0001-05

Key point of design for sector lock gate of 34 m ship lock

DAI Zhen-hua¹, ZHU Ying², HUANG Ke-fan¹

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The space grid structure is mostly adopted to the sector lock gate of ship lock, and the sector lock gate is the first time to be adopted in the design for 34 m ship lock. To improve the design rationality and safety reliability of gate structure, we combine with the design example of the sector lock gate of the expansion and reconstruction project of Yuxi first ship lock on Heyu line, analyze the key technical difficulties in the design of sector lock gate of the large entrance ship lock from four aspects including the main structure of the gate, the supporting and moving parts, the anti-collision system and the water sealing system, perform finite element simulation analysis of the spatial gate structure for two design water level combinations, design top and bottom pintle structures specifically, and propose solutions in the aspects of surface strengthening technology of moving parts, structural type of anti-collision system and water sealing design. The results show that the stresses of all parts of the gate are within the allowable range, and the moving parts are safe and reliable, the water sealing system has good adaptability. Overall, all of them meet the requirements of use.

Keywords: sector lock gate of large entrance ship lock; structural design; supporting and moving parts; collision avoidance system; water sealing system

三角闸门是由两扇绕垂直轴转动三角形或扇形门构成的船闸闸门, 主要适用于建在感潮河段上的船闸^[1]。三角闸门不但能承受双向水头, 而且能在闸门上、下游有一定的水位差(动水)时启闭, 使用灵活, 尤其适用于受潮汐影响的船闸, 可利用平潮在上、下游有较小水位差的条件下开

放通闸, 从而提高通过能力^[2]。近年来, 在承受双向水头的船闸设计中, 三角闸门已成为最常选用的工作闸门形式。目前, 三角门船闸常见口门宽度有9、10、12、18、23 m等, 国内已建最大口门宽度的三角门船闸为上海赵家沟船闸和台州金清老港通航排水闸, 两座船闸均为25 m宽的三

角门船闸^[3]，某些水利工程口门宽度很大，如常州钟楼防洪闸通航净宽为 90 m，荷兰马斯兰特挡潮闸河道宽达 360 m^[4]，其采用的超大有轨弧形平面双开钢闸门尽管外形与三角闸门相似，但其工作原理、使用功能、结构特点等均与船闸三角闸门存在较大差异，对大口门船闸三角闸门的设计缺乏借鉴意义。针对 34 m 口门船闸的三角闸门设计在国内外交通船闸中尚属首次，存在一系列亟须研究解决的关键性技术问题。

1 工程概况

合裕线航道是合肥经济圈通往长江的唯一水上通道，是全国内河高等级航道布局“两横一纵两网十八线”中的一线，也是江淮运河的重要组成部分。裕溪闸水利枢纽位于裕溪河入长江口门处，是控制巢湖流域防洪、排涝及引水灌溉的综合性水利枢纽，由节制闸、船闸、鱼道、拦河坝、导流堤等组成。随着江淮运河工程的开工建设，作为其主要入江线路，合裕线承担的货运量将逐年增加，为解决航运瓶颈，同时适应船舶大型化的发展，确保安全通航，决定对 1969 年建成的老裕溪一线船闸进行扩容改造。

新建的船闸为Ⅱ级通航建筑物，设计最大船型为 2 000 吨级船舶，船闸基本尺度为 290 m×34 m×5.6 m（闸室长×口门宽×门槛最小水深）。船闸承受双向水头作用，最大正向设计水头 4.98 m，最大反向设计水头 -3.80 m，上、下闸首工作闸门均采用三角门型^[5]。

2 关键技术问题

2.1 门体结构形式与结构布置的合理性

结构选型与总体布置是三角门设计的基础和首要考虑的环节，其布置的合理性直接关系到门体的工程量和造价，也关系到门库的尺寸、圬工体积和闸首造价，并且影响输水过程的水力学条件和船舶停靠的安全性^[6]，具体影响因素主要包括闸门中心角的选取、面板朝向、结构体系设计等。对于 34 m 口门船闸的三角闸门，由于平面尺度的加大，单扇

闸门主弧半径达到 18 m 以上，因此在满足空间体系强度、刚度及稳定性的前提条件下，如何通过结构布置和结构形式优化，以减轻闸门质量，减少门头下垂量是需要重点考虑的问题。

2.2 支承运转装置的可靠性及耐久性

三角闸门支承系统通常包括顶枢和底枢装置，既起到承受门体重力、传递外部水压力的作用，同时又是支承闸门运转的重要部件。34 m 口门船闸的三角闸门的门体重力和总挡水面积的大幅增加，导致支承系统承受更大的荷载，闸门的频繁启闭，势必造成运转部件的磨损。另一方面，由于闸门运行过程的不平稳，支承装置工作环境较差、润滑不畅等原因，进一步加剧支承运转件的偏磨、锈蚀等现象。因此，通过支承装置的结构优化设计，提高闸门在运转过程中的稳定性和可靠性，并采取表面强化处理工艺，增强支承运转部件的耐磨、耐腐特性，对延长船闸大修周期、提高船闸通过能力具有重要意义。

2.3 闸门防撞系统的安全性

近年来，船舶大型化的趋势非常明显，船舶进出闸过程中与闸门擦碰的情况时有发生，传统的三角闸门刚性防撞系统在船舶擦碰时无消能作用，撞击的能量均通过支撑杆件传递给主桁架，易造成防撞系统变形损坏，严重时甚至影响主桁架体系的结构安全。对于 34 m 口门船闸而言，由于闸门门库的迎水面尺寸加大，通航船舶吨位较高，三角门的防撞问题会更加突出。因此，有必要研究船舶撞击对三角闸门的影响，并采用合适的防撞系统设计方案，以改善闸门防撞特性，提高结构安全可靠性。

2.4 止水结构及材料的适应性和稳定性

三角闸门止水通常包括羊角止水和底止水，止水的布置与结构形式不仅关系到闸门的止水效果，也关系到门体关闭时的压紧力矩，同时止水材料自身的特性又直接影响其稳定性和使用寿命，而大口门船闸三角闸门对止水的材料特性、变形适应性等方面有着更高要求。因此，需要对止水材料、止水布置、止水结构形式等进行分析研究，提出合理可行的设计方案，以提高闸门止水自身

刚度和适应性, 达到更好的使用效果。

3 研究过程及设计解决方案

3.1 门体结构设计与有限元分析

3.1.1 总体布置与结构设计

闸门的总体布置影响因素较多, 与闸首结构、

输水系统、启闭机械等均密切相关, 设计采用双开式三角门结构, 闸门中心角为 70° , 主弧半径为 18.1 m, 闸门面板均朝向引航道侧, 上游闸门高度为 14.92 m, 下游闸门高度为 16.62 m (面板高度), 闸门启闭回转角度为 68.5° , 闸门总平面布置见图 1。

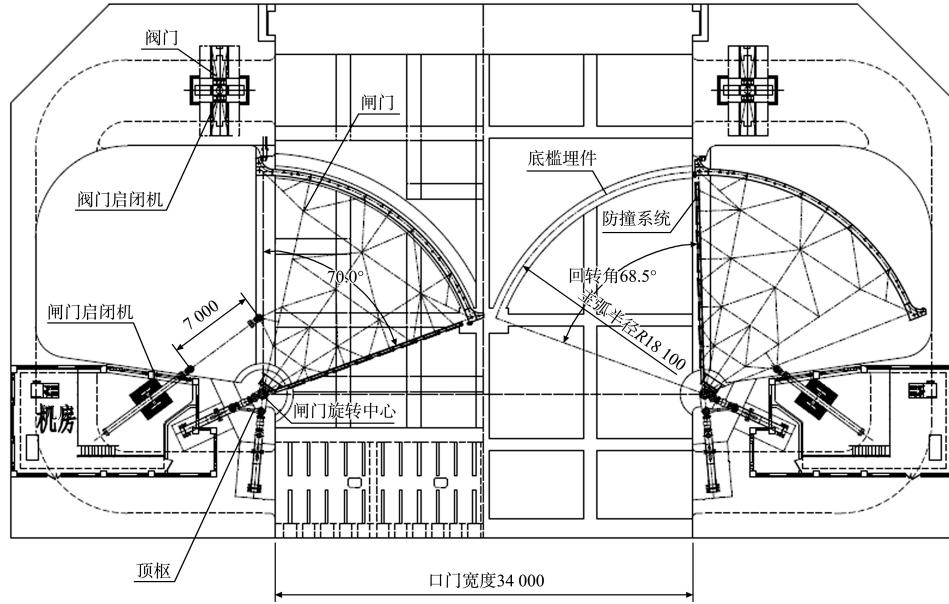


图 1 裕溪一线船闸三角门总平面布置 (单位: mm)

三角门面板系部分采用多主梁式弧形结构, 自上而下共布置 5 道主梁, 梁高为 500 mm, 纵向布置有 6 道横隔板, 与主梁等高连接, 并设置纵、横向 T 形次梁, 用以增强面板的刚度, 各刚架部分采用空间网架结构, 杆件以无缝钢管为主, 通过空心钢球节点连接, 闸门端柱采用组合“工”字结构, 并在闸门面板附近设置浮箱, 以减少门头在水中的下垂量。裕溪一线船闸特征水位及设计水位组合见表 1。

表 1 裕溪一线船闸特征水位及设计水位组合

水位工况	上游水位 (裕溪河侧)/m	下游水位 (长江侧)/m	水位差/ m
设计防洪水位	12.65	13.22	-
设计最高通航水位	12.19	12.30	-
设计最低通航水位	6.21	3.02	-
设计组合 1	8.00(多年平均)	3.02	4.98
设计组合 2	8.50(正常蓄水位)	12.30	-3.80

3.1.2 有限元静力分析

采用三维有限元软件 ANSYS 进行三角门静力分析, 闸门的面板、梁格、浮箱、端柱均采用 SHELL63 壳单元模拟, 空间网架各杆件采用 BEAM188 梁单元模拟, 顶、底枢拉 (压) 杆采用 link180 模拟, 以提取杆件轴力, 闸门有限元模型见图 2。

经计算, 面板系、空间杆系等强度、刚度、稳定性均满足 JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》的相关规定, 各主要部位在设计工况下的最大折算应力见表 2。

表 2 设计工况下三角门主要部件最大折算应力

构件	最大折算应力 σ_{sh} /MPa		各构件的钢材容许应力/MPa
	设计组合 1	设计组合 2	
面板	202	178	342
主横梁、纵向隔板腹板	195	170	228
主横梁、纵向隔板翼缘	206	178	218
水平、垂直次梁	102	182	228
网架式桁架腹杆	168	156	207
支臂	132	103	198

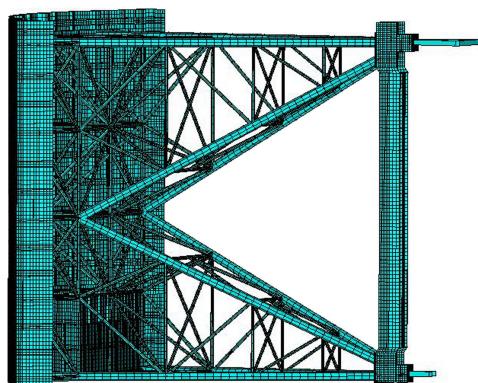


图 2 裕溪一线船闸三角闸门结构有限元模型

3.2 支承运转装置设计与新工艺的应用

3.2.1 顶枢装置设计

传统的三角门顶枢采用花兰螺母的结构形式，由 2 根可以调整的拉杆组成，通过花兰螺母进行长度调节，该结构的缺点是当门扇转动时，在顶枢轴承内产生摩擦弯矩，使拉杆受弯，因而不能传递较大水平力。由于本船闸三角门承受较大的荷载，因此，设计时采用铰接框架式顶枢，通过增设刚性连接板与辅助拉杆，以改善拉杆的受力条件，后端通过三角架预埋件与闸首边墩相连，提高顶枢装置的稳定性。裕溪一线船闸三角门顶枢装置见图 3。

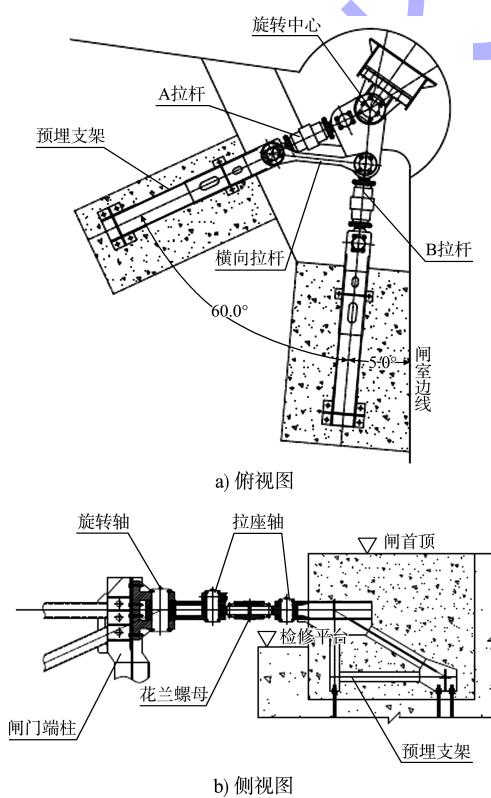


图 3 裕溪一线船闸三角门顶枢装置

3.2.2 底枢装置设计

底枢采用整体式结构配楔块微调，可降低拉杆的长细比和提高抗压能力，并利用楔块的自锁特性保证位置的稳定。裕溪一线船闸三角门底枢装置见图 4。

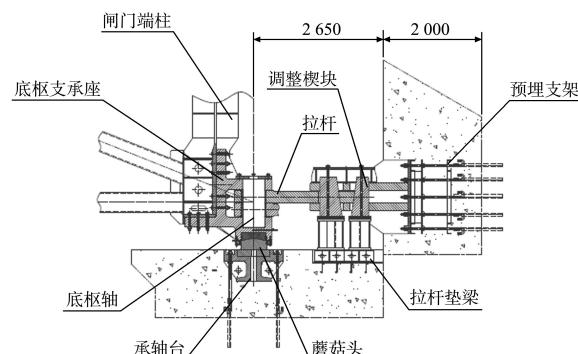


图 4 裕溪一线船闸三角门底枢装置 (单位: mm)

3.2.3 新工艺的应用

船闸闸门运转件表面通常采取强化处理工艺，从而获得更好的耐磨和耐腐特性。传统的表面强化工艺有淬火、镀铬、渗氮处理等，根据已建船闸使用情况来看，上述方案均未能完全解决闸门运转件的磨损问题。本文对闸门顶、底枢轴和蘑菇头等部位采用激光熔覆镍基合金粉末的方案，以达到较好的综合性能，延长其使用寿命。

3.3 防撞系统设计

为了有效减轻闸门质量，减小闸门在船舶碰撞时的能量传递，同时考虑后期维护更换的便利性，本文采用一种刚柔结合的防撞系统，由刚性支架体系与铝合金蜂窝防撞面板组成，与传统的刚性防撞结构相比，该防撞系统具有质轻、消能、易更换等优点，防撞体系构造见图 5。

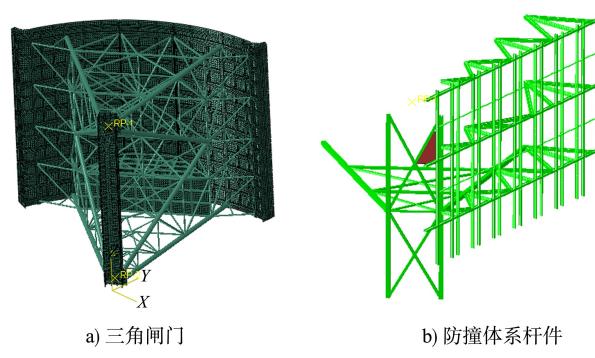


图 5 裕溪一线船闸防撞系统

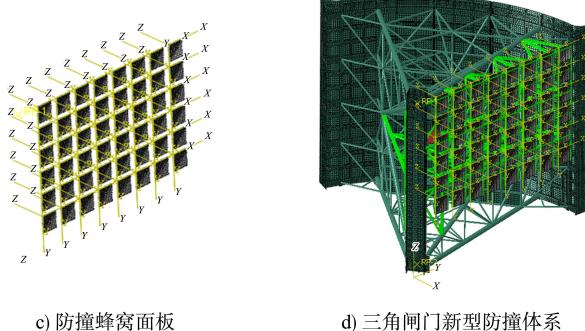


图 5 新型防撞系统结构

3.4 止水结构设计与计算

三角闸门止水系统主要由底止水、边缝止水及中缝止水组成, 根据以往船闸三角闸门止水的设计经验, 本文采用的止水结构形式见图 6。

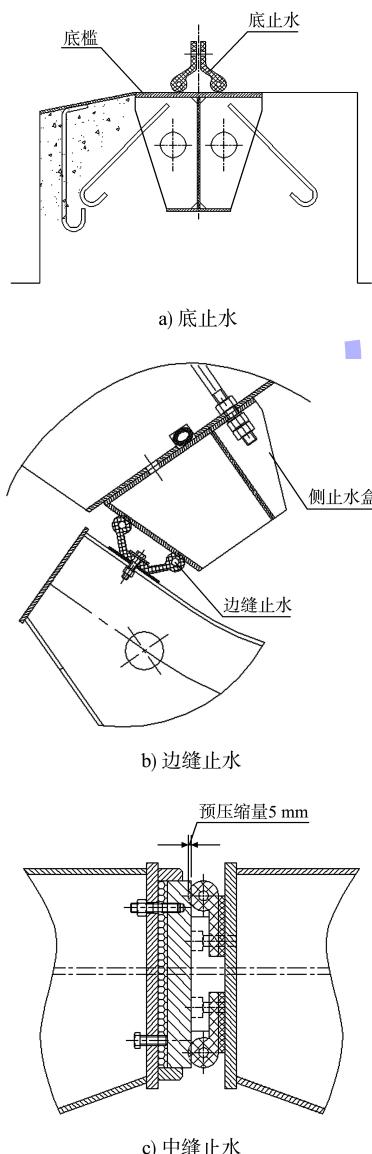


图 6 三角闸门止水结构

考虑到闸门尺度变化对止水结构可能带来的不利影响, 采用 Grasshopper 软件对止水结构形式建模, 并导入有限元软件 ABAQUS 进行分析。不同工况条件下止水结构计算结果见表 3。

表 3 三角闸门止水结构计算结果

设计组合工况	止水最大主应力/ MPa	底止水变形量/mm	边缝止水最小压缩量/mm	中缝止水最大空隙/mm
1	0.21	10.87	3.23	0.41
2	0.34	10.99	3.43	0.40

4 结论

- 空间结构有限元仿真结果表明, 闸门各部件受力满足要求。
- 对于大口门船闸三角闸门, 采用铰接框架式顶枢和楔块调节式底枢, 可改善拉杆的受力条件, 提高结构稳定性。
- 新型三角门防撞系统具有良好的消能特性, 可降低船舶擦碰给闸门造成的损伤。
- 本文采用的止水结构变形适应性良好, 可满足使用要求。

参考文献:

- [1] 程昌华, 刘晓平, 唐寿鑫. 航道工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [2] 陈文辽, 常苏华. 立柱式(钢结构)三角闸门设计[J]. 水运工程, 1995(10): 16-24.
- [3] 周军, 余红刚, 谢立华. 金清老港通航排水闸大型三角闸门设计[J]. 华电技术, 2012, 34(2): 22-23, 78.
- [4] 辛华荣, 顾晓峰, 常语锋, 等. 常州钟楼防洪控制工程与马斯兰特挡潮闸门型对比浅析[J]. 江苏水利, 2013(3): 5-7.
- [5] 中设设计集团股份有限公司. 合裕线裕溪一线船闸扩容改造工程施工图设计[R]. 南京: 中设设计集团股份有限公司, 2019.
- [6] 戴振华, 黄可璠. 三角闸门设计与改进[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(4): 89-90, 107.