



# 八堡船闸钱塘江侧通航兼顾挡潮闸门 门型方案比选研究

夏 平, 王培林, 常海存

(浙江数智交院科技股份有限公司, 浙江 杭州 310030)

**摘要:** 八堡船闸作为京杭运河二通道杭州段终点, 是国内在强涌潮河段双线同时建成的 1 000 吨级船闸, 兼顾通航与挡潮的重要功能。该船闸所处的钱塘江涌潮河段水流条件复杂, 涌潮荷载对闸门运行影响显著, 因此合理选择闸门门型至关重要。针对八堡船闸运行的实际工况, 从通航顺畅性、挡潮可靠性、结构稳定性等多个维度, 对多种常见的闸门门型(如人字门、平面挡潮门、三角闸门等)进行全面系统的方案比选研究。结果表明, 人字闸门和平面挡潮门的组合设计在通航顺畅性、挡潮可靠性上优势表现突出, 能更好地适应八堡船闸强涌潮环境下的通航与挡潮需求, 为八堡船闸的安全运行提供技术保证。

**关键词:** 强涌潮; 通航与挡潮; 人字闸门; 平面挡潮门

中图分类号: U641.3+3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0185-07

## Comparation and selection of gate type schemes for Qiantang River side navigation and tide blocking of Babao ship lock

XIA Ping, WANG Peilin, CHANG Haicun

(Zhejiang Institute of Communications Co., Ltd., Hangzhou 310030, China)

**Abstract:** As the endpoint of the Hangzhou section of the second channel of the Beijing–Hangzhou Grand Canal, the Babao ship lock is a thousand ton level ship lock built simultaneously on both tracks in strong tidal bore river sections in China, which plays an important role in both navigation and tide blocking. The water flow conditions in the Qiantang River tidal bore section where the ship lock is located are complex, and the tidal bore load has a significant impact on the operation of the gate. Therefore, it is crucial to choose a reasonable gate type of ship lock. A comprehensive and systematic comparative study is conducted on various common gate types (such as herringbone gate, flat steel gate, triangular gate, etc) from multiple dimensions, including navigation smoothness, tide blocking reliability, and structural stability, on the basis of the actual operating conditions of Babao ship lock. The results show that the combination design of herringbone gates and flat steel gates has outstanding advantages in navigation smoothness and tide blocking reliability, and can better adapt to the navigation and tide blocking needs of the Babao ship lock in strong tidal environments, providing technical guarantees for the safe operation of the Babao ship lock.

**Keywords:** strong tidal bore; navigation and tide blocking; herringbone gate; flat tide blocking gate

钱塘江以强涌潮现象闻名于世, 涌潮是由天体引潮力和特殊的河口地形共同作用形成的。钱塘江入海口呈喇叭状, 口大肚小, 当大量潮水涌入狭窄的河道时, 水体涌积, 潮头陡立, 流速加快, 形成高达数米的涌潮, 其最大流速可达数米

每秒, 冲击力巨大。据观测, 涌潮的最大波高可达 3 m 以上, 瞬间冲击力可超过  $100 \text{ kN/m}^2$ 。

钱塘江强涌潮的独特水文条件, 使得八堡船闸在通航过程中面临着巨大的挑战。涌潮的强大冲击力可能对船闸设施造成严重破坏, 影响船闸

的正常运行和使用寿命。此外,受潮水涨落的影响,船闸的水位变化频繁且幅度较大,这对船舶的安全通航提出了极高的要求。

近年来,国内外学者围绕通航与挡潮闸门的设计开展了大量研究,取得了许多研究成果。王正中等<sup>[1]</sup>对国内外大跨度挡潮闸应用进行简述,对各类型闸门结构功能特性及适用性、优缺点进行分析;金海等<sup>[2]</sup>积极借鉴国外在河口三角洲地区防洪控制工程中的经验,提出挡潮闸门的重要性;徐泽平等<sup>[3]</sup>针对俄罗斯圣彼得堡防洪工程中闸门进行历史经验总结,提出防潮闸的重要性;朱世哲等<sup>[4]</sup>对在曹娥江上应用的新型双拱钢管结构闸门进行介绍,双拱桁架承载结构用以承受向海侧荷载和上游河道水荷载的双水头作用。

然而,针对八堡船闸这种特定地理位置和复杂水文条件下的通航兼顾挡潮闸门的研究仍存在不足。现有的研究大多是针对单一功能的船闸闸门或特定的强涌潮条件,对于八堡船闸既要满足通航要求,又要有效抵御钱塘江强涌潮冲击的双重功能需求,缺乏系统、全面的综合研究。本文基于钱塘江水文特征与工程实际需求,综合运用数值模拟、物理模型试验及通航安全原则,系统比选不同门型方案的通航顺畅性、挡潮可靠性、结构安全性与经济性,为八堡船闸工程的设计优化提供理论支撑,同时为类似河口枢纽工程的门型选择提供参考。

## 1 工程概况

京杭运河是我国重要的南北水运大通道,依托其优越的水运条件和腹地内丰富的矿产资源,对区域经济持续发展发挥了重要的作用。为了缓解京杭运河浙江段运量快速增长,同时从保护大运河文化传承的角度出发,在根本上解决京杭运河堵航及杭州市河的通航瓶颈问题,新开辟京杭运河第二通道<sup>[5]</sup>。

京杭运河“二通道”(博陆—八堡段)航道里程 26.4 km,八堡船闸是京杭运河沟通钱塘江二通道

中最重要的节点工程,船闸等级为Ⅲ级,最大设计船舶为 1 000 吨级,船闸尺度为 300 m×23 m×4.2 m(有效长度×宽度×门槛水深)。八堡船闸坐落于钱塘江畔,作为京杭运河二通道杭州段的关键节点,承担着通航与挡潮的双重重任,其所处的钱塘江河口段七堡弯段,水流湍急、涌潮冲击力强,给船闸的运行带来了极大挑战。

## 2 涌潮荷载数据分析及工况

钱塘江是浙江省最大的河流,发源于安徽省休宁县境内的怀玉山主峰六股尖,行经新安江水库,在建德市梅城与支流兰江汇合后,再经富春江水库进入河口区,从镇海外游山南北断面注入东海,全长 668 km。

拟建二通道工程水域潮汐在 1 个月内有 2 次大、小潮的变化。潮汐年际变化,除与天文因素有关外,还与径流丰枯引起的钱塘江江道地形、沙坎高程和尖山河湾主槽走向有关,变化规律大致为:在枯水年或连续枯水年,江道淤积严重,尖山河湾主槽弯曲走南,河床及沙坎高程高的情况下,潮汐动力条件减弱,潮差小;反之遇丰水年或连续丰水年,江道冲刷,江道主槽走向趋直则潮汐动力条件加强,潮差也大。

根据专题研究报告<sup>[6]</sup>,其 20 a 一遇极端高潮位为 7.78 m,50 a 一遇极端高潮位为 8.08 m,100 a 一遇极端高潮位为 8.30 m,300 a 一遇极端高潮位为 8.66 m。

涌潮强弱还决定于当时的江道地形,尤其是尖山河段河槽曲直及钱塘江沙坎顶端高程。尖山河段主槽弯曲向南、沙坎高程高,涌潮较弱;主槽顺直、沙坎高程低,则涌潮较强。

### 2.1 涌潮高度

涌潮强度习惯上采用涌潮潮头高度表征,根据 1987、1990 和 2000 年同潮观测资料,并考虑涌潮高度与潮差的关系进行估计。涌潮随后的快水测点流速一般为 6~9 m/s,最大达 10 m/s,持续时间 15 min 左右。

## 2.2 涌潮压力

涌潮压力大小与涌潮高度关系密切, 根据八堡船闸涌潮压力物理模型试验, 不同涌潮高度对应的涌潮压力分布见图 1。其中图 1a)、c)、d)对非线性段的涌潮压力进行了简化处理, 简化成线性。

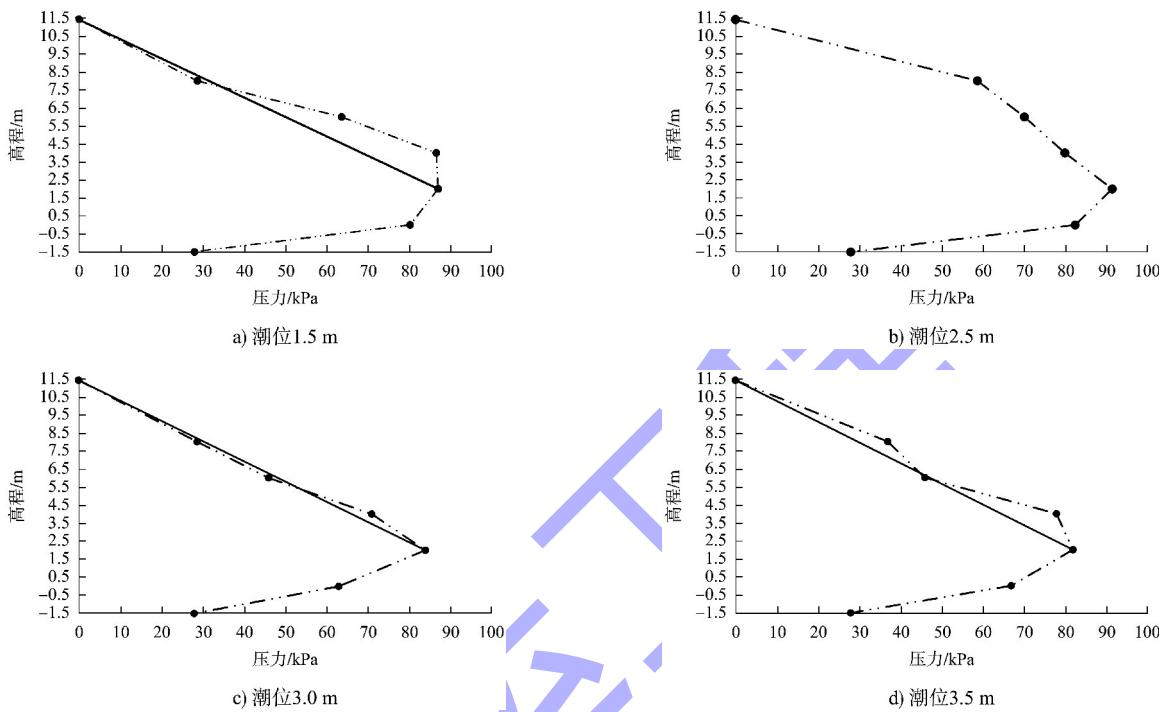


图 1 涌潮压力  
Fig. 1 Surge pressure

## 3 门型方案比选

八堡船闸钱塘江侧闸门主要考虑 3 种方案: 方案 1 为船闸口门段建设宽度 45 m 的平面拱形挡潮闸门+船闸人字闸门; 方案 2 为船闸钱塘江侧闸首设三角闸门通航兼顾挡潮; 方案 3 为船闸钱塘江侧闸首设人字闸门+平面挡潮闸门。本文从结构计算、船舶通航安全、挡潮等方面进行分析比选。

经过对涌潮荷载的分析, 形成 4 种工况组合:

工况 1 为潮位 1.5 m, 内河侧水位 0.6 m; 工况 2 为潮位 2.5 m, 内河侧水位 0.6 m; 工况 3 为潮位 3.0 m, 内河侧水位 0.6 m; 工况 4 为潮位 3.5 m, 内河侧水位 0.6 m。

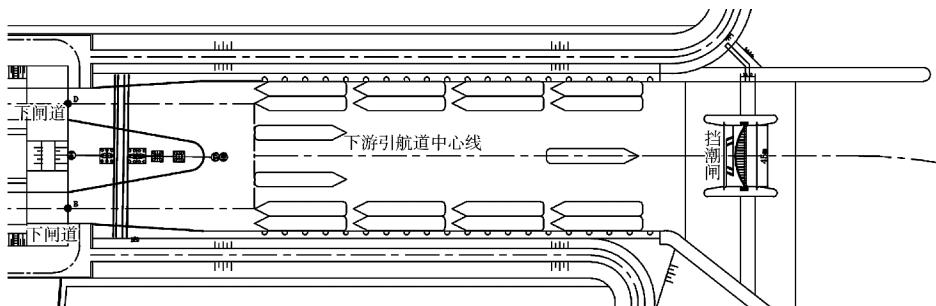


图 2 口门 45 m 平面拱形挡潮闸门+人字闸门平面布置  
Fig. 2 General layout of 45 m arched tide blocking gate and herringbone gate at entrance

## 3.1 口门 45 m 宽平面拱形闸门(挡潮)+船闸人字闸门(通航)

船闸人字闸门+平面拱形挡潮闸门的平面布置见图 2。挡潮闸总长 48 m, 高度 9 m, 厚度 8287 mm, 为拱形式桁架梁结构, 拱形为二次抛物线, 桁架结构朝向钱塘江侧, 结构材料选用 Q355B 钢, 主拱管架直径 550 mm、壁厚 12 mm, 主梁高为 1 000 mm, 拱高度为 7 000 mm, 见图 3。

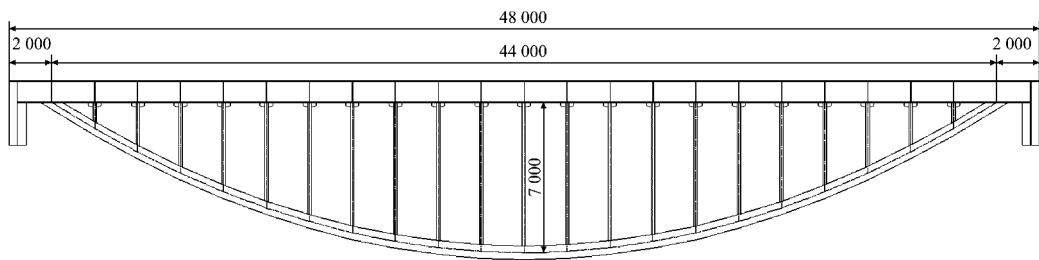


图 3 口门 45 m 平面拱形挡潮闸门 (单位: mm)  
Fig. 3 45 m flat arched tide blocking gate at entrance (unit: mm)

考虑到涌潮压力为动载, 在计算结构强度的时候考虑动载系数 1.2, 计算挠度时不予考虑。计算模型见图 4, 按照 4 种工况进行有限元计算分析<sup>[7]</sup>。4 种工况下的计算结果见表 1。

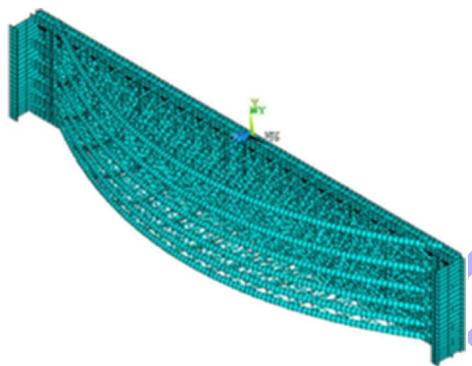


图 4 45 m 平面拱形挡潮闸门模型  
Fig. 4 45 m flat arched tide blocking gate model

表 1 平面拱形挡潮闸门计算结果  
Tab. 1 Calculation results of flat arched tide blocking gate

工况	主梁 Mise 应力/MPa	主拱轴向力/ kN	主拱 Mise 应力/MPa	挠度/mm
1	230.6	2 320	209.3	34.3
2	218.7	2 250	195.6	33.8
3	252.9	2 630	235.4	39.1
4	245.1	2 450	221.1	36.1

经计算, 结构强度满足材料强度要求, 挠度满足支撑跨度 43 m 的 1/750 的规范要求<sup>[8]</sup>, 主梁、拱稳定性满足规范要求。

45 m 平面拱形闸门在结构技术上可行, 但闸门较重, 单扇质量为 500 t, 考虑通航净空 7 m 的情况下, 启闭设备若采用固定式卷扬机, 启闭房会很高且对启闭设备的要求也很高。同时, 根据已经完成的船模航行试验结果, 即使采用 60 m 口

门宽度, 船队仍无法安全进出挡潮闸, 而单船能够安全进出挡潮闸的口门宽度为 45 m 以上。挡潮闸建设方案比较复杂, 从有利于通航的角度是口宽越大越好, 但该处水文泥沙条件异常复杂<sup>[9]</sup>, 只有提升门比较适合, 因此其口宽有受到挡潮闸平面位置、闸门结构尺度、质量、提升设备等多种因素的制约, 设计难度极大, 存在较大的技术风险。该闸的建设有利于船闸运行调度, 在大中潮期间可以减少船舶待闸时间、适当提高通过能力; 并且对于减少引航道内淤积、减小涌潮对船闸下闸首建筑物及闸门的冲击具有显著的作用, 但是挡潮闸的设置会对船舶进出引航道口门产生通航安全上的不利影响, 故此方案不可行。

### 3.2 三角闸门(通航兼顾挡潮)

三角闸门是由两扇绕垂直轴转动的三角形或扇形门扇构成的船闸闸门, 可承受双向水头的作用, 在低水头条件下, 可利用门缝输水。三角闸门多采用空间网架结构, 闸门关闭挡水时, 水压力由面板梁格系传递至网架结构, 再通过端柱传递给顶、底枢支承, 门体自身重力等竖向荷载主要由底枢承担。当三角闸门关闭时, 靠两侧羊角产生的力矩差保持闸门可靠压紧, 作用于面板上的水压力合力与旋转轴之间的偏心很小, 因此合力对旋转轴的力矩不大, 闸门启闭力较小, 能在动水中启闭, 可在低水头条件下(通常指动水头 30 cm 以下)开通闸运行, 以提高通过能力。

八堡船闸钱塘江侧三角闸门兼顾通航和挡潮的功能。三角闸门结构由面板、面板支撑梁(主横

梁、主纵梁、次横梁、次纵梁)、浮箱面板、浮箱面板支撑梁、后支撑刚架、连接杆件和支座等部分构成, 三角门平面布置见图 5。



图 5 八堡船闸钱塘江侧三角闸门平面布置  
Fig. 5 General layout of triangle gate on Qiantang River side of Babao ship lock

在 4 种工况下对三角闸门进行有限元数值分析。采用考虑薄膜应力的四边形薄板单元——平板型壳单元模拟闸门面板和浮箱面板、空间刚架单元模拟面板支撑梁、空间桁架单元模拟连接杆件和支座, 以平板型壳单元、空间刚架单元、空间桁架单元及它们的组合作为三角闸门结构的计算模型<sup>[10]</sup>, 三角闸门模型见图 6, 主要构件尺寸见表 2。

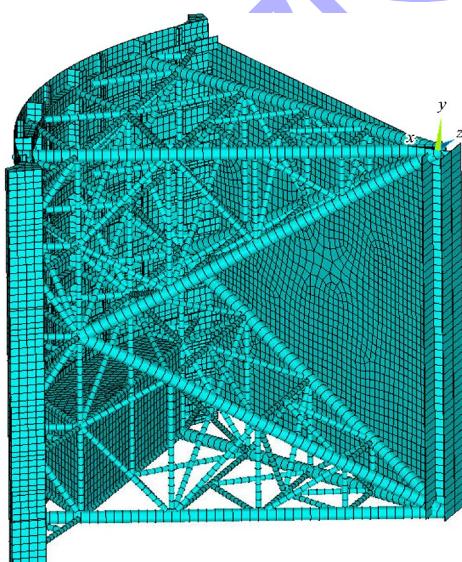


图 6 三角闸门模型  
Fig. 6 Triangle gate model

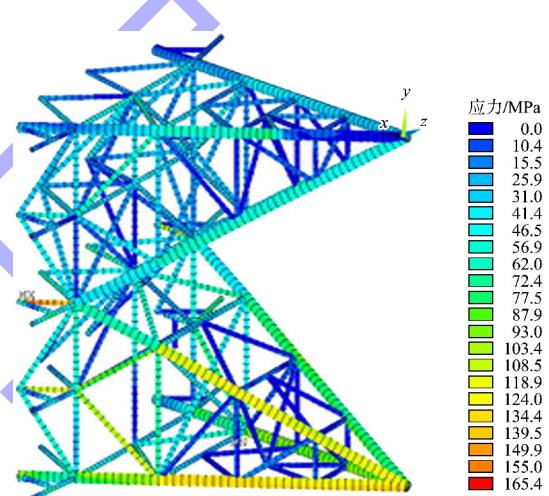
表 2 三角闸门主要构件尺寸

Tab. 2 Main component dimensions of triangular gate

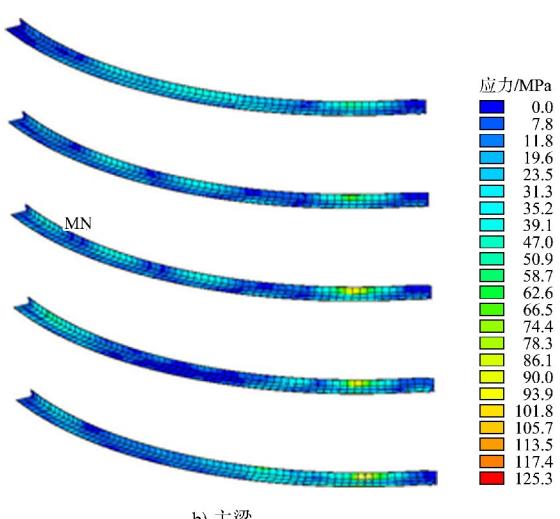
构件	高度 $H/\text{mm}$	宽度 $W/\text{mm}$	厚度 $t/\text{mm}$
主横梁	500	400	12
主纵梁	500	400	12
次横梁	400	300	12
次纵梁	400	300	12
浮箱次梁	400	300	12

注: 主臂架直径 377 mm、壁厚 14 mm, 其余桁架直径 168 mm、壁厚 12 mm。

桁架和主梁 Mise 应力计算结果见 7。可以看出, 桁架最大 Mise 应力为 165.0 MPa, 主梁最大 Mise 应力为 125.2 MPa, 满足材料的强度要求。



a) 桁架



b) 主梁

图 7 桁架和主梁的 Mise 应力计算结果  
Fig. 7 Mise stress calculation results of truss and main beam

桁架结构中底水平桁架支臂杆件内力最大, 直径为 377 mm、壁厚 16 mm, 长度为 2.49 m, 由图 8 可以看出, 杆件最大内力为负向的 2.72 MN。

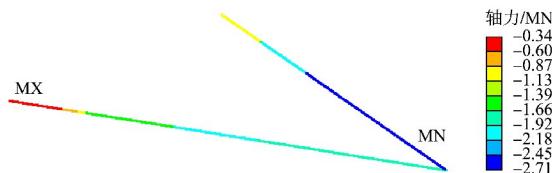


图 8 上、下水平支撑杆轴力图

Fig. 8 Axial diagram of upper and lower horizontal support rods

经过计算, 在 4 种工况下, 结构强度满足材料强度要求, 挠度满足主梁跨度的 1/600 的规范要求。

考虑到三角闸门关门期间, 是依靠边羊角和中羊角之间的面积差形成的一个挤压力, 但是涌潮作用下存在一定的不确定性, 有限元计算中考虑涌潮压力是整体作用在闸门上, 但是实际中有可能是打在局部打在某一处, 如果局部打在边羊角处的话, 闸门油缸超过一定压力之后, 溢流阀会打开, 闸门会被涌潮冲开, 存在一定的安全隐患。基于以上这些考虑, 不推荐采用三角闸门。

### 3.3 人字闸门(通航)+平面挡潮闸门(挡潮、门机+液压抓梁进行启闭)

八堡船闸在无潮水期间, 平面挡潮闸门长期搁置在闸首侧的储门库内, 日常运行期间采用人字闸门进行挡水<sup>[11]</sup>。当有涌潮来临时, 提前 0.5 h 采用门式起重机吊装平面挡潮门进入工作门槽, 平板提升门已经在三堡船闸中得到应用, 但本文船闸口门宽度为 23 m, 远大于三堡船闸的 12 m 口门; 本文工程位置更靠近河口, 涌潮力较三堡也更大, 闸门质量较大, 考虑闸门开启后的门下通航净空高度( $\geq 7$  m)要求, 需要建造非常高的启闭机平台(地面以上约 25 m), 平板门提升后高高上挂的视觉及景观效果不佳, 对结构抗震也较为不利。

人字闸门面向钱塘江侧布置, 门轴线与船闸横轴线成 22.5°夹角, 人字门外形尺寸: 13 584 mm  $\times$  1 400 mm  $\times$  9 000 mm (宽  $\times$  厚  $\times$  高), 底槛高程

-1.5 m, 门顶高程 7.5 m。闸门承受最大水头为 6.4 m, 反向水头及涌潮力由挡潮平板闸门承受。人字闸门+平面挡潮闸门效果图见图 9, 八堡船闸钱江侧现状见图 10。



图 9 人字闸门+平面挡潮闸门效果图

Fig. 9 Rendering of herringbone gate+flat tide blocking gate



图 10 八堡船闸钱塘江侧现状

Fig. 10 Current situation of Babao ship lock on Qiantang River side

平面挡潮闸门面向下游布置, 闸门外形尺寸: 24 500 mm  $\times$  2 746 mm  $\times$  12 900 mm(宽  $\times$  厚  $\times$  高), 底槛高程-1.5 m, 门顶高程 11.4 m。闸门选用多主横梁结构平面闸门, 主梁共计 9 根, 主梁间距按照等荷载原理布置。闸门由门体承重结构、侧滚轮、正向滑块、反向滑块、止水装置、限位装置、及人行桥等组成。其中门体承重结构由挡水面板、主横梁、水平次梁、纵向隔板、边梁及背拉杆等组成, 门体材质均为 Q355B 钢。侧滚轮主要起闸门横移及入槽导向作用, 主材是铸钢件 ZG310-510, 轴套为铜基镶嵌自润滑轴承。侧止水和底止水均布置在上游侧, 侧止水为 L 形橡塑止水, 底止水为一字形止水与侧止水形成连续槽形折线。正向滑块布置在上游侧, 反向滑块布置在下游侧, 均

为铜基镶嵌自润滑材料。平面挡潮闸门的有限元模型见图 11。

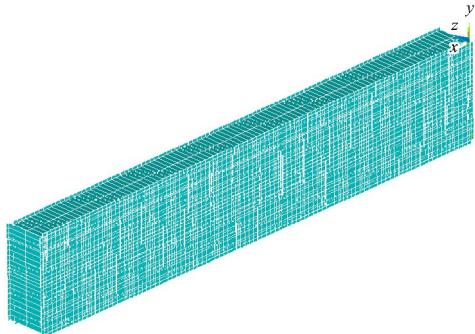


图 11 平面挡潮闸门有限元模型  
Fig. 11 Finite element model of flat tide blocking gate

经过计算, 结构强度、刚度、稳定性满足规范要求, 结果见表 3。经过上述分析, 考虑对平板门方案进行优化, 提出了人字闸门+平面挡潮闸门的方案, 平面挡潮闸门布置于人字闸门的下游侧(钱塘江侧), 船闸正常运营期间, 利用人字闸门进行挡水, 在钱塘江潮差大于 1 m 需要避潮停航时, 涌潮到来之前约 0.5 h 将平面挡潮闸门关闭, 利用该门抵抗涌潮的冲击, 待潮后钱塘江具备通航条件时, 再开启平面挡潮闸门通航。由于平面挡潮闸门仅在中、大潮时使用, 且每潮启闭仅 1 次, 使用频率相对不高, 采用提升一定高度后平移至门库的方案, 大幅降低了门架的高度。平面挡潮闸门同时可兼作检修闸门使用, 也作为人字闸门挡水运行时的事故闸门, 进一步提高了工程的安全性。

表 3 平面挡潮闸门计算结果  
Tab. 3 Calculation results of flat tide blocking gate

工况	主梁	主梁	主梁	主梁
	最大压应力/ MPa	最大拉应力/ MPa	最大剪应力/ MPa	最大挠度/ mm
1	80.3	130.7	2.4	22.7
2	110.0	157.6	2.1	29.1
3	65.3	112.0	2.3	18.8
4	98.5	128.0	1.8	21.5

#### 4 结语

1) 本文从通航顺畅性、挡潮可靠性、结构稳定性等多个维度对闸门进行全面系统的比选, 创

新提出人字闸门+平面挡潮闸门方案。

2) 京杭运河浙江段三级航道整治工程八堡船闸口门段涌潮荷载强度大, 本文创新提出选用平面闸门挡潮和人字闸门通航的组合门型, 能更好地适应八堡船闸强涌潮环境下的通航与挡潮。

3) 未来随着科学技术的发展, 新材料和新门型的发展, 将会有新的门型适应通航和挡潮。

#### 参考文献:

- 王正中, 徐超. 国内外大跨度挡潮闸应用评述[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(12): 1-11.  
WANG Z Z, XU C. Overview on global applications of large-span storm surge barriers [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(12): 1-11.
- 金海, 王建平, 姜付仁, 等. 国外大型挡潮闸工程的经验借鉴[J]. 中国水利, 2016(10): 56-60.  
JIN H, WANG J P, QIANG F R, et al. Drawing on experiences from foreign countries for large tidal sluice[J]. China water resources, 2016(10): 56-60.
- 徐泽平, 郭军. 俄罗斯圣彼得堡防潮工程建设的若干历史经验[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(4): 305-310.  
XU Z P, GUO J. Introduction of experiences of the construction of St. Petersburg flood protection barrier[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(4): 305-310.
- 朱世哲, 罗尧治. 新型双拱钢管结构闸门的应用与研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(1): 35-41.  
ZHU S Z, LUO Y Z. Application and study of a steel tubular double-arch lock [J]. China civil engineering journal, 2008, 41(1): 35-41.
- 金国强, 张一鸣, 程巍华, 等. 京杭运河(浙江段)三级航道整治工程可行性研究报告[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2011.  
JIN G Q, ZHANG Y M, CHENG W H, et al. Feasibility study report on class III waterway regulation project of Beijing-Hangzhou Canal (Zhejiang section) [R]. Hangzhou: Zhejiang Provincial Institute of Transport Planning, Design and Research, 2011.

(下转第 238 页)