



省水船闸的布置方案与结构设计

夏小迪，汤建宏

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：近几年，省水船闸越来越多地在国内各个枢纽船闸工程中作为主要设计方案。省水船闸在高水头的山区河流地区具有降低工作水头、降低船闸耗水量、改善高水头船闸引航道内水流条件等优点。以巴江口船闸改扩能项目为例，针对省水形式选择、主体结构设计、布置尺寸、结构内力分析等问题，确定了结构形式并研究了结构的关键受力位置。采用有限元计算方法对比各个工况和主体结构，得出整体式省水船闸结构最薄弱的部位，并对应力较小的位置进行进一步结构优化。

关键词：省水船闸；水工结构；内力

中图分类号：U 641

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)S1-0124-06

Layout scheme and structure design of water-saving ship lock

XIA Xiao-di, TANG Jian-hong

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: In recent years, more and more water-saving ship locks have been used as the main design scheme in various domestic pivot ship lock projects. The water-saving ship locks have the advantages of reducing working head, reducing the water consumption of locks and improving the flow conditions in the approach channel of high head locks in the mountainous river areas with high head. In this paper, taking the capacity expansion project of Baijiangkou Ship Lock as an example, in view of the problems such as selection of water-saving form, the design of main structure, the layout size, and the analysis of internal force of the structure, the structural form is determined and the key stress position of the structure is studied. The finite element calculation method is used to compare the various working conditions and the main structures, and the weakest part of the integral water-saving ship lock structure can be drawn, and further structural optimization is carried out for the position with less stress.

Keywords: water-saving ship lock; hydro structure; internal force

随着国内各地的经济发展需要，适水物资运输需求进一步释放，内河船闸设计中需要考虑的因素日趋复杂。为了解决水资源分布不均引起的建闸地区水资源匮乏等问题、减少船闸耗水量，带有省水功能的船闸越来越多地在船闸设计中被使用。

国外已建省水船闸较多，其中德国是经验最丰富的国家，从莱茵河的班贝格到多瑙河的凯尔海姆全长 171 km、水位差高达 243 m，共建造了 16 座船闸，其中 13 座为省水船闸。

国内项目中，学者对乌江银盘省水船闸、郑

家岗省水船闸等在水动力学、输水系统、运行方式等方面已做出了一定深度的研究，但从水工结构角度，可以配合省水的结构设计方面的布置选型、内力分析、结构优化、工况分析等研究不多。

1 省水船闸结构分类及选型

1.1 分散式省水船闸

分散式省水池方案对闸室结构的影响小，但占地面积较大，且省水池与闸室相连的输水线路较长。场地开阔或不受场地限制时，选择高低错

落的台阶型分散式省水池较为经济合理; 当上、下游水位变幅较大、相应省水池水位变幅也较大时, 一般宜采用分散式布置。

分散式省水船闸布置共有 3 种形式: 单侧台阶式布置、双侧台阶式布置、单侧扇形布置^[1](图 1)。

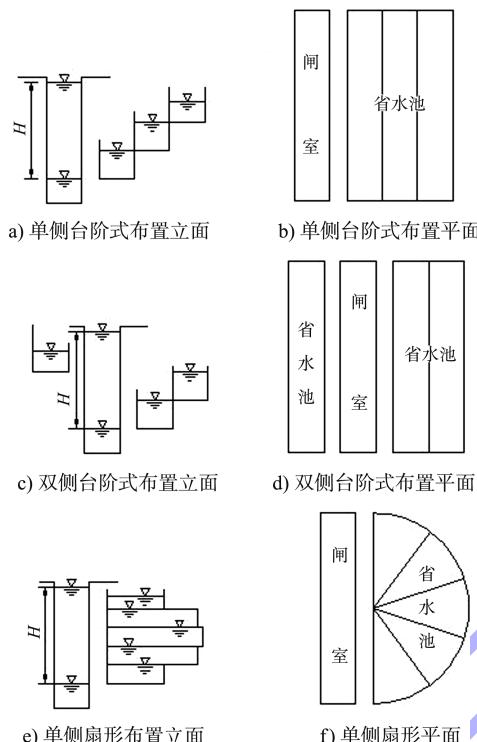


图 1 分散式省水池平面布置形式

根据地形条件来看, 在场地开阔、不需要进行太多开挖的地区, 只要做好省水池的护坡和防渗, 选择台阶型开敞式省水池较为经济合理。考虑到日后货运量增大, 船闸有扩建需求的可能性, 一般不会在省水池两侧布置开敞式省水池, 通常将省水池布置在船闸的一侧。如德国美因河—多瑙河运河上的省水船闸台阶型开敞式省水池^[2]。

新近建成的巴拿马运河第三线船闸采用连续 3 级、每级在一侧布置 3 级台阶型开敞式省水池的布置形式(图 2)。



图 2 巴拿马三线船闸

分别于 2001 年和 2003 年建成的德国省水船闸 Rothensee 和 Hohenwarthe(图 3)为标准的分离式省水池船闸^[3]。



图 3 Hohenwarthe 船闸鸟瞰

1.2 整体式省水船闸

整体式省水船闸也包括 3 种形式: 封闭式省水池纵轴线垂直于闸室纵轴线布置、封闭式省水池纵轴线平行于闸室纵轴线布置、在船闸两侧布置封闭式省水池(图 4)。

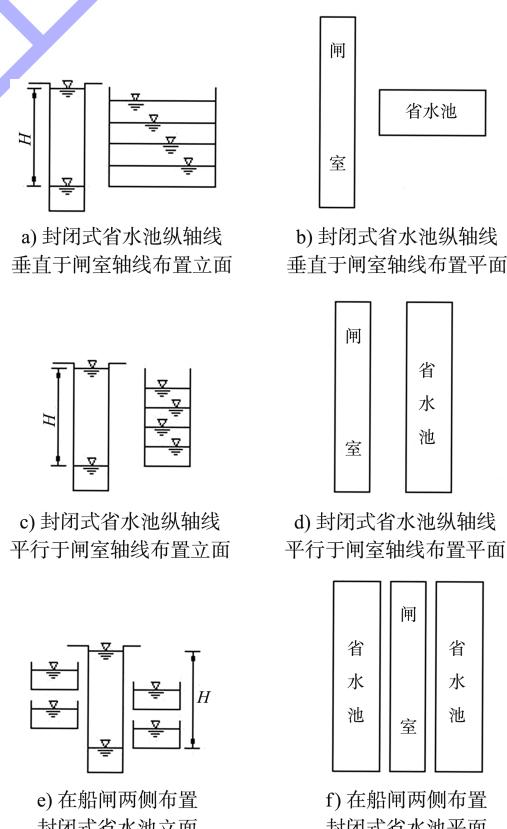


图 4 整体式省水船闸形式

当船闸闸址处没有足够的场地, 可选择整体式布置形式, 这种形式具有布置集中、节省用地等优点, 特定条件下(例如地质条件优良)相对于

分离式布置更为经济。1928 年投入运行的德国中部运河上水头为 14.7 m 的安德滕双线省水船闸采用了重叠封闭式省水池，德国坞城二线船闸 (Uelzen lock II) 也采用整体封闭式结构(图 5)^[4]。

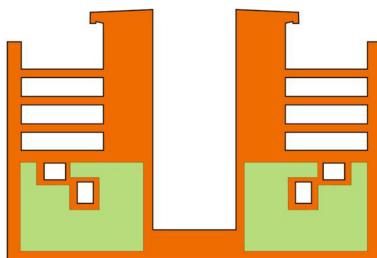


图 5 坞城二线船闸整体式省水池布置断面

整体式布置形式结构相对紧凑，船闸边墙采用多层框架结构，但结构自重较大，对地基承载力要求高。广西桂江巴江口复线船闸主体设计基面高程在 55.34~78.13 m(国家 85 高程)，基岩为中风化砂岩，属较硬岩，节理裂隙少发育，局部较发育，岩体呈厚层状，饱和单轴抗压强度标准值为 42.2 MPa，容许承载力 1.0 MPa，地质条件较为优良。巴江口复线船闸属于扩能改造工程，受地形条件限制，为了节约建设用地，主体结构采用整体式省水布置方案。

2 巴江口省水船闸主体结构设计

闸首闸室的结构形式分为重力式、衬砌式、混合式 3 种。省水船闸不仅要建设船闸主体结构，

还要为省水池留出空间，将省水池设置在主体结构边墩内，省水池更靠近闸室，灌、泄水的路径大大缩短。同时，省水池在边墩内部充当空箱功能，不仅节省建筑材料，还减少了大体积混凝土水化热问题^[5]。巴江口复线船闸的闸基开挖基础为中风化岩，其力学强度较高，作为船闸主体段地基持力层，可以承受较大的地基应力。

2.1 船闸省水池尺寸

根据水文资料，巴江口复线船闸下游最低通航水位(71.13 m)出现的概率较小，而较为常见的下游低水位是 72.13 m，因此计算省水池高程时，以上游正常蓄水位 97.73 m、下游低水位 72.13 m 组合为主要计算条件，兼顾其他水位组合。由此，得出巴江口复线船闸的省水池分级，见图 6。

1) 船闸设置两级省水池，每级在闸室两侧分别布置两个省水池，每个省水池水域面积与闸室水域面积之比为 16.2:23。

2) 第 1 级省水池底高程为 85.93 m，第 2 级省水池顶、底高程分别为 83.93、79.03 m。

在上述省水池分级条件下，根据巴江口复线船闸设计运行方式，当下游水位在最低通航水位与 2 a 一遇洪水水位之间时，采用两级省水运行方式；当下游水位高于 2 a 一遇洪水对应水位时，船闸不再采用省水运行，而直接与上、下游引航道之间进行常规充、泄水^[6]。

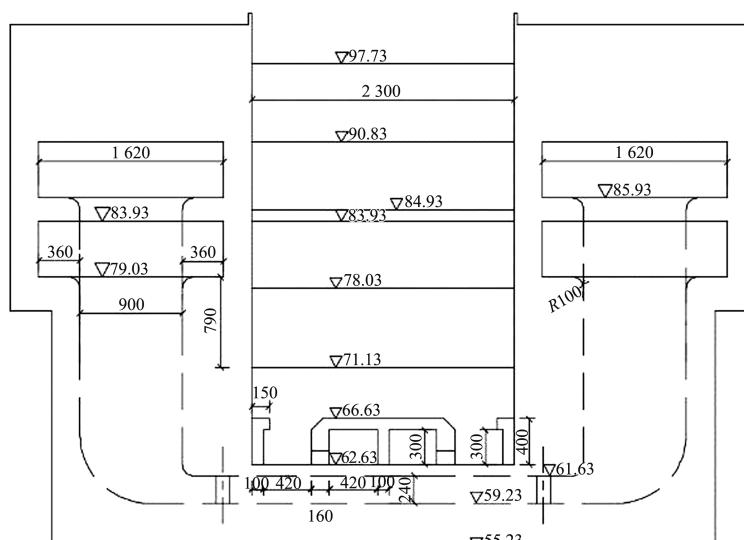


图 6 巴江口省水池断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2.2 主体结构尺寸

2.2.1 上闸首结构

巴江口船闸上闸首采用钢筋混凝土实体板和箱形边墩组成的整体式结构。上闸首平面尺寸为 $40.5\text{ m} \times 65.4\text{ m}$ (长×宽), 其中口门宽度 23 m 、门槛顶高程 88.93 m 。底板顶高程 87.43 m , 底高程 $56.63\sim 78.13\text{ m}$, 厚 9.0 m 。两侧边墩宽度均为 10.6 m , 顶高程 102.13 m 。

上闸首廊道直线段尺寸为 $3.4\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ (宽×高), 廊道底高程 80.63 m , 并在廊道直线段分别布置一道检修阀门、一道工作阀门。

2.2.2 下闸首结构

下闸首采用钢筋混凝土实体板和箱形边墩组成的整体式结构, 平面尺寸为 $38.5\text{ m} \times 65.4\text{ m}$ (长×宽), 其中口门宽度 23 m 、门槛顶高程 66.33 m 。底板顶高程 65.63 m , 底高程 58.63 m , 底板厚 3.0 m 。两侧边墩宽度均为 10.6 m , 两侧边墩顶高程 102.13 m 。

下闸首采用设置消力槛的对冲式消能结构。下闸首廊道直线段尺寸为 $3.4\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ (宽×高), 出口段由分流墩将廊道出口扩大为 $2 \times 6.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ ($2 \times$ 宽×高), 廊道底高程为 61.63 m 。

2.2.3 闸室结构

闸室采用省水船闸结构, 闸室设计尺寸为 $180\text{ m} \times 23\text{ m} \times 4.8\text{ m}$ (长×宽×槛上水深), 底板厚 8.0 m , 单侧闸墙厚度 21.2 m 。闸室底板设 28 个出水支孔, 每个出水支孔尺寸为 $(0.9\sim 1.1)\text{ m} \times 1.35\text{ m}$ (宽×高), 通过出水支孔完成闸室内的灌泄水。每侧闸墙上设 2 个直立的输水阀门井, 下端与闸室底的输水廊道相连, 阀门井身沿高程设树状阀门廊道, 依次与 2 个省水池相连。单个省水池尺寸为 $16.2\text{ m} \times 4.9\text{ m}$ (宽×高), 左右对称布置共 4 个省水池。

3 结构应力、变形分析

3.1 上闸首

3.1.1 应力分析

上闸首根据有限元计算, 分析拉应力超过 $0.45f_t$ ($= 0.643\text{ MPa}$)以上的区域, 取 $C25f_t = 1.27\text{ MPa}$, f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值(N/mm^2)^[7]。

应力集中在省水池下底板上, 底部中间有较大拉应力, Δ 位置应力在 0.643 MPa 以上, 为最大拉应力出现区域, 达到 2.331 MPa , 地震工况最大拉应力为 2.290 MPa , 且较为集中, 其他均为在 0.643 MPa 以下。

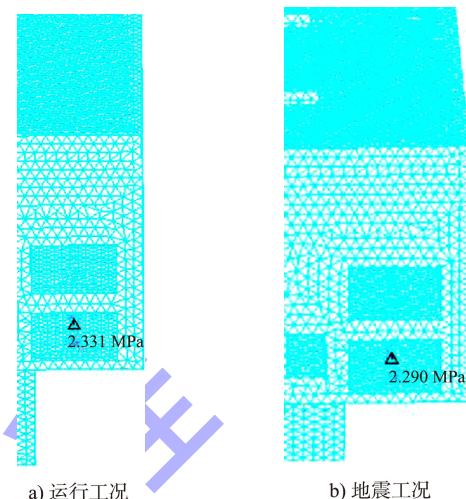


图 7 横河向上闸首拉应力云图

上闸首顺河向拉应力均在底板底部, 且数值较小, 可不考虑。运行工况和地震工况最大、最小应力无较大差别。

3.1.2 变形分析

根据有限元计算, 从上闸首变形分布云图(图 8)可见, 最大变形在 $0.07\sim 0.08\text{ mm}$, 相对变形比为 0.035% 。

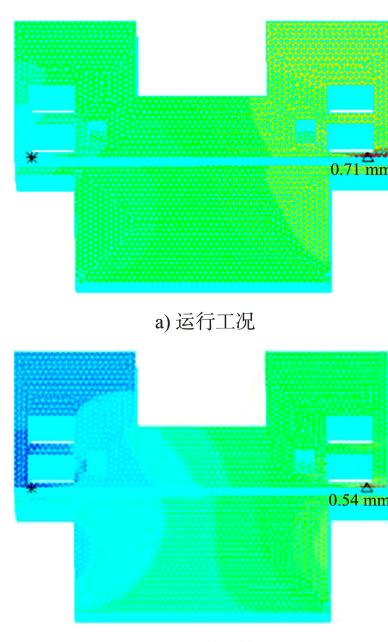


图 8 上闸首变形云图

上闸首运行工况和地震工况变形位置及大小无较大差别。

3.2 闸室

3.2.1 应力分析

根据有限元计算, 闸室拉应力超过 $0.45f_t = 0.643 \text{ MPa}$ 以上的区域需关注(取 $C25f_t = 1.27 \text{ MPa}$)

从横河向拉应力分布云图(图 9)可以看出, 主要应力集中在省水池顶底板上, 顶部和底部均有较大拉应力。 Δ 位置应力在 0.643 MPa 以上, 为最大拉应力出现区, 运行工况最大拉应力为 3.052 MPa , 地震工况最大拉应力为 3.682 MPa , 且较为集中, 其他均为在 0.643 MPa 以下。

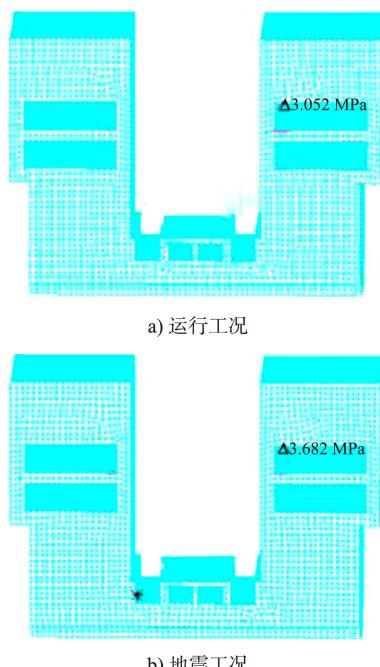
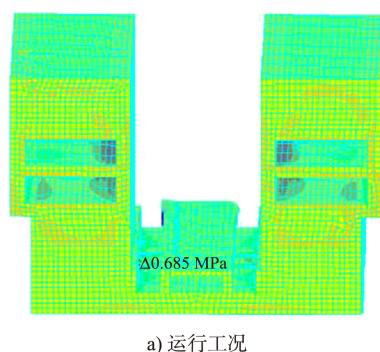
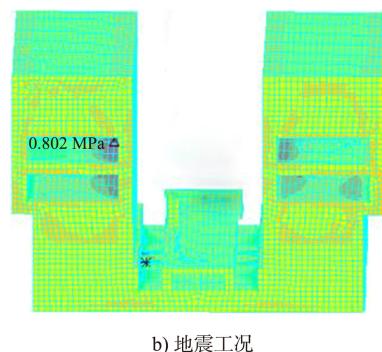


图 9 横河向闸室拉应力云图

闸室顺河向地震工况应力云图(图 10)显示, 整体拉应力较小, 且分布均匀, 无应力集中现象。闸室顺河向拉应力均在省水池隔板, 但数值未超过 1 MPa 。



a) 运行工况



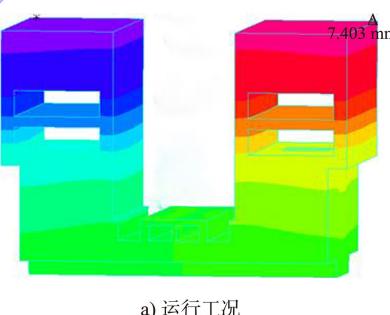
b) 地震工况

图 10 顺河向闸室拉应力云图

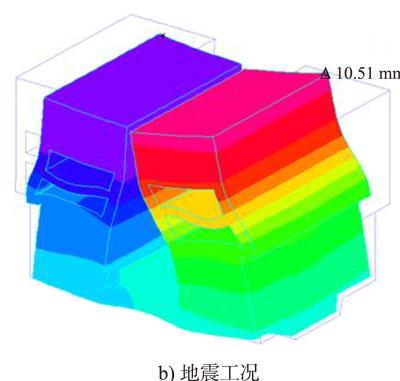
横河向地震工况最大拉应力比运行工况大 20% , 顺河向地震工况最大拉应力比运行工况大 15% , 应力分布基本相似, 除了考虑配筋之外, 应考虑在省水池之间增加立柱或肋梁来提高受力的整体性和增加刚度。

3.3.2 变形分析

从闸室变形分布云图(图 11)来看, 最大变形为 $0.7\sim1.1 \text{ cm}$, 相对变形比为 0.31% , 可以判断相对变形是很小的。



a) 运行工况



b) 地震工况

图 11 闸室变形云图

闸室地震工况相比运行工况变形较大, 在容许范围内; 应力分布基本相似。

3.3 下闸首

3.3.1 应力分析

下闸首分析拉应力超过 $0.45f_t = 0.643 \text{ MPa}$ 以

上的区域需关注(取 $C25f_t = 1.27 \text{ MPa}$)。

从横河向拉应力分布云图(图 12)可以看出: 主要应力集中在省水池下的底板上, 省水池中隔板也有较大应力分布, Δ 位置应力在 0.643 MPa 以上, 为最大拉应力出现区, 运行工况最大拉应力为 1.49 MPa , 地震工况最大拉应力为 1.59 MPa , 且较为集中, 其他均为在 0.643 MPa 以下。

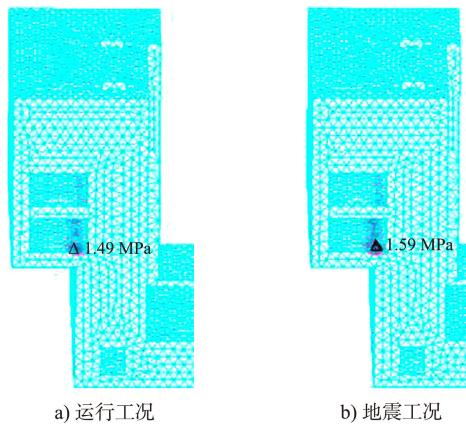


图 12 横河向下闸首拉应力云图

下闸首顺河向拉应力均在底板底部, 且数值较小, 可不考虑。运行工况和地震工况最大、最小应力无较大差别。

3.3.2 变形分析

从下闸首变形分布云图(图 13)可见, 最大变形为 $0.7\sim1.1 \text{ cm}$, 相对变形比为 0.31% , 可以判断相对变形是很小的。

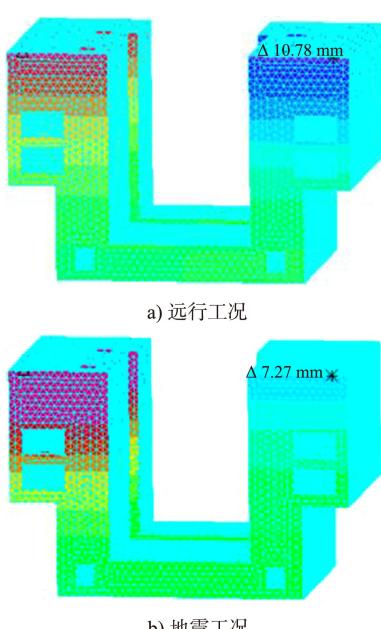


图 13 上闸首变形云图

下闸首地震工况比运行工况变形大, 在容许范围内, 应力分布基本相似。

闸室的侧向刚度比闸首的小, 其变形比闸首大。计算各种工况下巴江口省水船闸闸室结构的内力和位移, 计算结果见表 1。

表 1 闸室各工况下结构计算

计算工况	闸顶横向位移/mm	混凝土最大拉应力/MPa	最大地基应力/MPa
完建工况	8	3.06	2.3
灌水工况	4	3.37	1.4
泄水工况	7	3.06	2.1
检修工况	9	3.11	1.9
地震工况(灌水)	5	3.96	1.6
地震工况(泄水)	11	3.69	2.3

从表 1 可以看出, 地震工况下的各项变形及应力指标均比较大, 其中闸墙最大横向变形为 11 mm , 相对 35.5 m 闸墙高度的变形比小于 $H/3000$ (H 为闸室高度), 可以判断相对变形较小; 结构最大拉应力为 3.96 MPa (局部), 通过配筋能满足混凝土的抗裂需求。综合来看各项指标基本能满足设计需求。

4 结语

1) 在场地受限的情况下, 山区建闸选择整体式省水船闸更需要关注地震工况。

2) 闸室的侧向刚度比闸首小, 因此更需要关注闸室的计算结果。

3) 通过分析闸首、闸室的应力可以得出: 省水池上下顶底面隔板较为薄弱, 可增厚顶底面隔板或增强配筋; 也可在省水池中增加立柱, 增加整体刚度、减小弯矩。

4) 其余应力较小的位置可减少混凝土体积或考虑做空箱结构进行优化。

参考文献:

- [1] 周华兴, 王永成. 省水船闸输水系统设计若干问题综述 [J]. 河海科技进展, 1994(1): 56-63.
- [2] 王晓青, 刘畅. 省水船闸发展及研究现状 [J]. 重庆建筑, 2013, 12(10): 52-54.

(下转第 154 页)