



大跨度船闸三角闸门的静动力优化设计

梁 碧¹, 朱明涛^{2,3}, 朱召泉³

(1. 安徽省港航建设投资集团有限公司, 安徽 合肥 230092;

2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014; 3. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 结合拟改扩建的裕溪一线船闸下闸首三角闸门的方案设计, 对国内船闸最大口门 34 m 的三角闸门进行静、动力优化设计研究。在对三角闸门初步设计方案进行有限元分析和验算的基础上, 利用 ANSYS 软件的 APDL 语言对三角闸门结构三维有限元模型进行二次优化, 以闸门质量最轻为目标进行静力优化设计和动态特性优化。结果表明, 通过静力优化, 三角门结构质量比初步设计方案下降了 12.5%~14.2%; 通过动态优化, 闸门的一阶自振频率有所提高, 满足不小于 5 Hz 的约束条件。

关键词: 船闸; 大跨度; 三角闸门; 优化设计

中图分类号: TV 663.2; U 641.3⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0012-05

Static and dynamic optimal design of large-span ship lock sector gate

LIANG Bi¹, ZHU Ming-tao^{2,3}, ZHU Zhao-quan³

(1. Anhui Provincial Port & Shipping Construction Investment Group Co., Ltd., Hefei 230092, China;

2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China;

3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Combined with the project design of the sector gate of the lower lock head of Yuxi first ship lock to be rebuilt and expanded, we research the static and dynamic optimal design of sector lock gate with a span of 34 m, which is the largest span in the sector gate of the domestic ship lock. Based on the finite element analysis and checking calculation of the preliminary design of the sector lock gate, we apply APDL of ANSYS to re-develop the 3D finite element model of the sector lock gate, and carry out the static optimization design and dynamic characteristic optimization with the aim of the minimum mass of the gate. The results show that by static optimization, the mass of triangular gate structure decreases 12.5% to 14.2%. Through dynamic optimization, the first order natural vibration frequency of gate is improved, which meets the constraint condition of not less than 5 Hz.

Keywords: ship lock; large-span; lock sector gate; optimal design

三角闸门作为可承受双向水头的闸门^[1], 近年来在国内内河中下游航道的船闸建设中, 得到了越来越多的应用。裕溪一线船闸位于合裕线裕溪河入长江口, 规模为 195 m×14.4 m×2.5 m (闸室有效长度×有效宽度×门槛水深,下同), 设计采用苏联三级标准, 是裕溪闸水利枢纽工程的一部分。于 1969 年建成的船闸闸门为单面板桁架结构横拉门, 并于 1991 年进行过加固处理, 拟改造扩

建的裕溪一线船闸, 按 II 级通航建筑物改建, 建设标准为 2 000 吨级, 闸室尺度拟为 290 m×34 m×5.6 m, 改扩建船闸的工作闸门拟采用三角闸门, 34 m 跨度已是世界内河航运船闸三角门之最。

传统的闸门设计方法是根据设计要求, 凭经验甚至直观判断, 对若干种初步设计方案进行比较, 遴选出较好的方案, 然后再对其强度、刚度、

收稿日期: 2020-04-10

作者简介: 梁碧(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事航道工程项目建设管理。

稳定性进行验算与校核，从而作为最终的设计方案；或者仅分别对闸门的各个构件进行优化，但该类优化设计方法缺乏对设计对象的整体结构分析和严谨的优化准则，具有局限性。本文基于 ANSYS 平台，建立三维有限元模型，对大跨度船闸三角闸门进行静动力优化设计，以期为大型船闸三角门的结构设计提供技术支持。

1 三角闸门的优化设计方法

1.1 闸门优化数学模型

闸门结构优化的方法^[2]，一般是通过建立闸门三维有限元模型，对其进行结构分析，选取某些对其优化目标有影响的主要因素作为设计变量，通过对结构的强度、刚度、稳定性以及几何条件进行约束，建立目标函数，通过优化分析得出使闸门结构最优的解答。

结构优化设计的一般形式为：

求解 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ (1)

使得目标函数 $V(\mathbf{X}) \rightarrow \min$ (2)

满足约束条件 $\begin{cases} a_i \leq x_i \leq b_i & (i=1, 2, \dots, m) \\ h_j(\mathbf{X}) = 0 & (j=1, 2, \dots, n) \\ g_k(\mathbf{X}) \leq 0 & (k=1, 2, \dots, p) \end{cases}$ (3)

式中： x_i 为优化变量； h_j 、 g_k 分别为考虑强度、刚度和稳定性要求的性能约束函数； n 、 m 、 p 分别为优化变量、几何约束条件、性能约束条件的数量； b_i 、 a_i 为 x_i 的上、下限。

1.2 目标函数

三角闸门优化设计的最终目的是为了得出既安全可靠又经济的方案。因此，在满足工程需要和安全的前提下，造价最省的方案即为优化设计的目标。对于钢闸门结构，闸门结构的制作成本往往以平均每吨钢材的造价作为核算标准^[3]。故本文选取三角闸门结构的总用钢量作为目标函数进行结构优化分析。

1.3 设计变量

设计变量为结构设计中所选择描述结构特性的变量，也是设计人员希望调整的设计参数，优化设计的目的即找出设计变量的最优解。设计变

量可以是连续的，也可以是离散的，如构件的厚度、高度、宽度、直径等，均可以作为设计变量。对于大跨度三角闸门结构复杂，设计变量较多，部分设计变量对闸门的目標函数影响较小，因此没必要对所有的设计变量进行优化分析。为了使闸门的优化设计简单可行，提高收敛速率，本文选取设计时的关键变量作为设计变量，既能缩短计算时间，优化的精度也能得到保证。分别选取三角闸门的中心角、面板厚度、支臂截面的径厚、空间网架结构各类杆件截面的径厚以及主梁的翼缘和腹板的宽、厚作为优化变量。

1.4 约束条件

约束条件指结构设计时需要满足的各方面要求，如保证结构正常工作时的强度、刚度和稳定性要求及其他相应规范的要求或规定。

闸门结构的优化设计可分为静力优化和动力优化两大类，在本文三角门的静力优化中，约束条件较为简单，主要有：1)几何约束。即对设计变量的取值加以约束，为显式界限约束。2)应力约束。如正常工作时的最大应力满足强度要求，考虑稳定性时应力不超过临界应力，一般都为隐式约束。3)位移约束。如正常工作时的最大位移满足刚度要求。

强度、刚度和稳定性要求条件须满足《船闸闸阀门设计规范》^[4]要求。闸门结构的动力优化要比静力优化复杂得多，所涉及的约束条件也更多。考虑闸门在水流脉动作用下的振动问题，本文对三角闸门进行动力性能优化时，除上述约束条件外，另取其一阶自振频率 $f \geq 5 \text{ Hz}$ 作为性态约束条件，以避开水流脉动的主频区域。

2 裕溪一线船闸大型三角门的静力优化设计

2.1 建立参数化模型

1)结构布置与基本资料：裕溪一线船闸大跨度三角闸门初步方案采用顶、底枢支承方案，面板采用弧形面板，面板的中心角为 70° ，圆弧半径 $R=18.10 \text{ m}$ ，闸门高 16.12 m ，面板厚度 12 mm ，闸门采用Q345钢材，钢材密度取 7.85 t/m^3 ，泊松

比为 0.3，钢材的弹性模量 E 为 206 GPa。

2)模型选取：为进行闸门结构的优化设计，利用 ANSYS 程序中自带的 APDL 语言对闸门结构进行参数化建模。根据闸门的结构特点，闸门的面板、梁格、浮箱、端柱均采用 Shell63 壳单元来模拟，网架管截面杆件采用 Beam188 梁单元来模拟，顶底枢拉（压）杆采用 Link180 杆单元模拟，顶、底枢枢轴采用 Soild95 实体单元进行简化处理。

3)约束情况：经分析，在关门挡水的反向水头工况对应上游水深为 8.50 m、下游水深为 12.3 m 时，为三角闸门的最不利工况，故以关门工况进行优化约束条件确定。在顶枢处施加水平面内的位移约束，底枢处同时施加水平面内和沿竖直方向的位移约束；关门状态下，两扇闸门中羊角止水侧在水压力作用下产生相互挤压的趋势，单扇闸门建模时在与闸室中心线相垂直的方向施加位移约束。

4)施加荷载：闸门在工作状态下主要受水平水压力、竖直水压力、闸门重力、工作桥荷载的作用。闸门面板上的任意一点作用的静水压力与该点水深 H 成正比，方向为法线方向；竖直水压力主要是浮箱上下表面的竖直水压力差；闸门重力通过施加竖直方向的加速度实现；工作桥上的荷载主要考虑工作桥上的人群活荷载，按规定取 $q=4\text{ kN/m}^2$ 。

在 ANSYS 中建立参数化模型如图 1 所示。

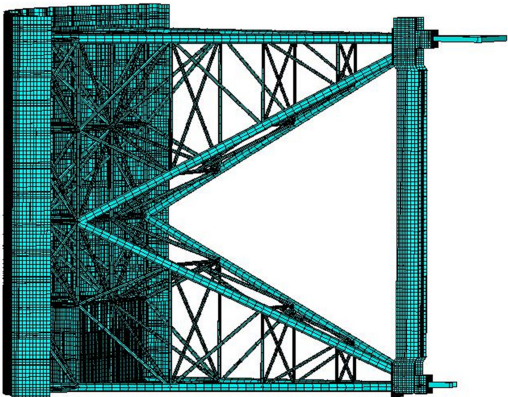


图 1 静力优化的三角闸门参数化模型

2.2 优化变量选取

如图 2 所示，对于口门宽度 34 m 一定时，三角闸门的中心角 α 直接影响到支臂的长度和面板的弧面长度，是三角闸门设计时的重要参数，须对其优化选择。根据以往的设计经验，分别选取中心角 α 为 70° 、 65° 和 60° 进行对比分析，其中 70° 为初步设计所选。除了上述 3 种中心角的备选方案，分别取下列 14 个闸门构件尺寸作为优化变量，主要有：面板厚度 t 、直（斜）支臂圆管外径 D_0 、直（斜）支臂圆管外径 t_0 、空间网架一类杆件圆管外径 D_1 、空间网架一类杆件圆管外径 t_1 、空间网架二类杆件圆管外径 D_2 、空间网架一类杆件圆管外径 t_2 、空间网架三类杆件圆管外径 D_3 、空间网架三类杆件圆管外径 t_3 、空间网架四类杆件圆管外径 D_4 、空间网架四类杆件圆管外径 t_4 、T 型截面主梁翼缘宽度 b_f 、翼缘厚度 t_f 和腹板厚度 t_w 。

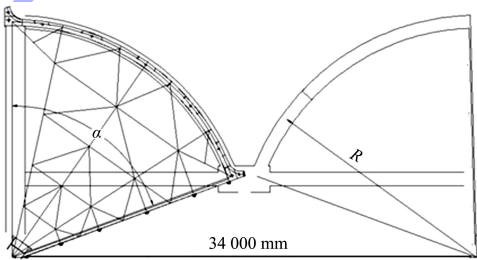


图 2 三角闸门的俯视图及中心角 α

2.3 三角闸门的静力优化结果

以关门挡水条件下反向水头对应的上游水深 8.50 m 和下游水深 12.3 m 的三角闸门的最不利工况为优化荷载条件，进行裕溪船闸大跨度三角闸门的静力优化分析，可得到 3 种不同三角闸门中心角下的闸门质量优化曲线，见图 3。可以看出，三角闸门中心角 α 为 70° 时，经优化后，闸门质量由初始方案的 224.67 t 降为 196.54 t；三角闸门中心角 α 为 65° 时，经优化后，闸门质量由初始方案的 222.16 t 降为 192.05 t；三角闸门中心角 α 为 60° 时，经优化后，闸门质量由初始方案的 220.93 t 降为 189.50 t。

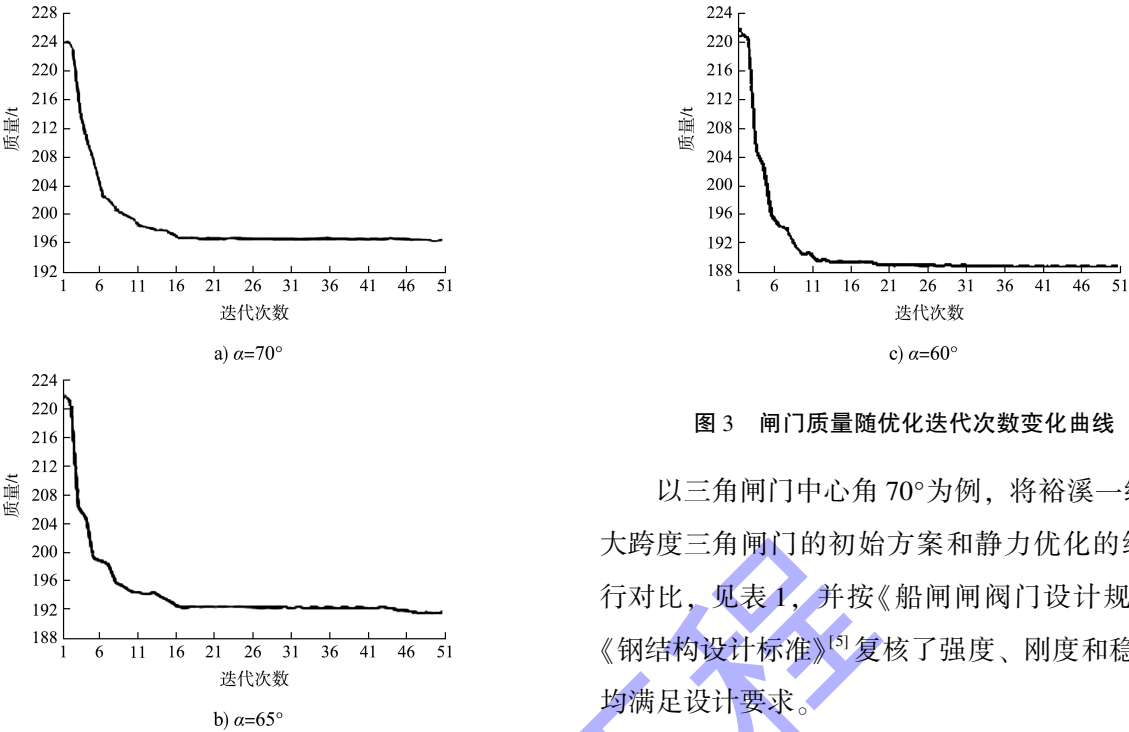


图 3 闸门质量随优化迭代次数变化曲线

以三角闸门中心角 70°为例，将裕溪一线船闸大跨度三角闸门的初始方案和静力优化的结果进行对比，见表 1，并按《船闸闸阀门设计规范》和《钢结构设计标准》^[5]复核了强度、刚度和稳定性，均满足设计要求。

表 1 三角闸门静力优化设计方案与初始设计方案的参数比较

方案	t/mm	D_0/mm	t_0/mm	D_1/mm	t_1/mm	D_2/mm	t_2/mm	D_3/mm	t_3/mm	D_4/mm	t_4/mm	b_t/mm	t_t/mm	t_w/mm	闸门质量/t
初始方案	12	406	20	219	16	168	16	140	14	121	10	500	20	16	233.00
优化方案(取整)	10	480	16	217	15	180	9	127	8	117	8	480	22	12	196.54

考虑到钢材板件和圆钢管的标准化尺寸要求，为降低采购成本(非标准化的板材和圆钢管需要特殊定制而增加成本)，可在表 1 所列静力优化结果的基础上，根据钢材供货和易采购情况进行等效截面取整调整，从而作为最终结构设计的参考依据。

3 裕溪一线船闸大型三角门的动力优化设计

闸门的振动问题是水利工程中普遍存在又极为复杂的问题，大量的工程实例表明：引起闸门强烈振动的根本原因是水流脉动荷载的高能区接近于闸门结构低频范围而引发的低阻尼共振。因此，分析研究闸门动力特性时，可以通过分析闸门的自振频率，与外界水流脉动频率相比较，使闸门的自振频率尽可能远离水流脉动的主频率区，避免由于频率接近而引发的共振，减少闸门振动事故发生的可能性。

以三角闸门中心角 70°为例，对闸门进行动态特性优化，闸门有限元参数模型和优化变量均与

静力优化一致，只是将关门状态下三角闸门第一阶自振频率 $f\geq 5\text{ Hz}$ 增设为约束条件。

采用零阶法对三角闸门进行动力优化分析，收敛容差取 0.001 t，优化过程中三角闸门质量、一阶自振频率变化曲线如图 4、5 所示。可以看出 ANSYS 优化分析时，优化迭代计算 23 次后达到收敛，满足约束条件三角闸门一阶自振频率 $f\geq 5\text{ Hz}$ ，闸门的质量几乎不再变化，优化后的各参数取值见表 2。

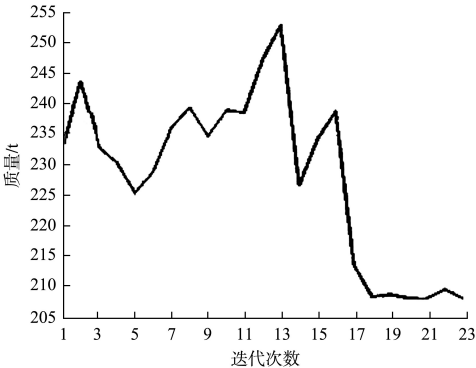


图 4 优化过程中三角闸门质量变化曲线

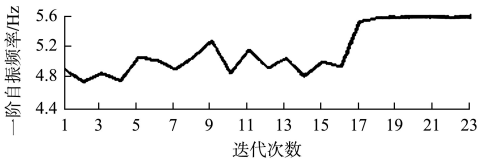


图 5 优化过程中三角闸门一阶自振频率变化曲线

表 2 三角闸门动力优化设计方案与初始设计方案的参数比较

方案	t/mm	D_0/mm	t_0/mm	D_1/mm	t_1/mm	D_2/mm	t_2/mm	D_3/mm	t_3/mm	D_4/mm	t_4/mm	b_f/mm	t_f/mm	t_w/mm	闸门质量/t
初始方案	12	406	20	219	16	168	16	140	14	121	10	500	20	16	233.0
优化方案(取整)	10	450	24	220	12	146	10	121	10	130	10	380	16	12	208.3

4 结论

1)针对三角门中心角 α 为 70° 、 65° 和 60° 的3种初步设计方案,进行静力优化设计,优化后闸门质量分别由初始方案的224.67 t降为196.54 t、222.16 t降为192.05 t及220.93 t降为189.50 t,分别下降了12.5%、13.6%、14.2%。

2)以三角门中心角 α 取 70° 为备选方案,增加三角闸门第一阶自振阶频率 $f\geq 5\text{ Hz}$ 约束条件,进一步对三角门的动力性能进行优化,考虑三角闸门基本构件材料规格的取整基础上,经动力性能优化,三角门质量由233.0 t降为208.3 t,下降10.6%。

3)通过船闸三角闸门优化设计,能够很好地克服以往设计时依赖于主观经验进行闸门结构设计的盲目性,减轻设计人员进行闸门设计和计算的强度。通过优化约束条件的限制,所得到的三角闸门的静、动力优化方案,避免对各构件进行

对于表2所列的三角闸门动力优化结果,按《船闸闸阀门设计规范》和《钢结构设计标准》复核了强度、刚度和稳定性^[6],均满足设计要求要求。而且经过动力特性优化后,闸门的一阶自振频率有所提高,满足了不小于5 Hz的约束条件。

反复调整验算,提高设计效率,优化效果明显。本文的优化设计方法可为工程设计人员进行类似钢闸门结构的合理设计提供参考和借鉴。

参考文献:

[1] 黄伦超,陶桂兰.渠化工程学[M].2版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2016.

[2] 梁醒培,王辉.基于有限元法的结构优化设计:原理与工程应用[M].北京:清华大学出版社,2010.

[3] 朱召泉,陶桂兰.弧形钢闸门结构优化设计[J].工程力学,1994(S1):327-330.

[4] 四川省交通厅内河勘察规划设计院.船闸闸阀门设计规范:JTJ 308—2003[M].北京:人民交通出版社,2003.

[5] 中冶京诚工程技术有限公司.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[6] 曹平周,朱召泉.钢结构[M].4版.北京:中国电力出版社,2016.

(本文编辑 王璁)

(上接第11页)

参考文献:

[1] 李君,赵建钧,洪娟,等.船闸凹岸布置上下游引航道水流条件优化[J].水运工程,2016(12):101-105,131.

[2] 杨宇,李艳富,韩昌海,等.贵州清水江城景水电站通航水流条件优化试验研究[J].水运工程,2016(12):126-131.

[3] 黄骏,赵建钧,辜晋德.大角度弯道河流通航水流条件研究[J].水运工程,2017(4):146-150.

[4] 赵维阳,李靓亮,茆长胜,等.弯曲航道通航宽度和水流条件确定方法探讨[J].长江科学院院报,2013,30(9):37-42.

[5] 李茜希,韩昌海,李艳富,等.河床取料对枢纽通航水流条件的影响[J].水利水运工程学报,2015(6):47-53.

[6] 程璐,赵建钧,辜晋德.S形弯曲河段低水头闸坝枢纽口门区通航水流条件研究[J].水运工程,2016,(12):106-112.

[7] 刘亚辉,王云莉.景洪水电站对下游近坝河段通航条件的影响[J].水利水运工程学报,2012(4):103-107.

[8] 周华兴,郑宝友.再论《船闸引航道口门区水流条件限值的探讨》[J].水运工程,2005(8):49-52.

(本文编辑 郭雪珍)