

大型水闸三角闸门的优化设计

董顾春, 朱召泉

(河海大学 土木工程与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 三角闸门以往的优化设计往往是将闸门简化成为平面体系, 或者对其各个构件分别进行优化. 前者忽略了三角闸门作为一个空间体系各构件之间的联系, 而后者各个构件的最优并不能等同于整体结构的最优. 按照三角闸门真实的三维情况, 利用 APDL 语言对三角闸门有限元模型进行二次优化, 融合了有限元法结构分析的准确性与优化方法求极值问题的高效性, 成功地解决了三角闸门的三维优化问题, 为三角闸门结构的优化设计提供了一种有效方法.

关键词: 三角闸门; 优化设计; APDL; ANSYS

中图分类号: TV663.2

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)02-0083-04

三角闸门因其可承受双向水头、并可利用平潮开闸以加快船舶过闸, 近年来在江苏沿江附近的船闸建设中已成为常用的工作闸门型式. 同样, 平面双开式三角闸门因其能承受双向水头, 且不需像以往提升式平面闸门和弧形闸门那样采用升降式启闭而建造较高的启闭机房(会影响河道的通航), 近年来在具有通航要求的大型防洪挡潮水闸中也得到了逐步应用, 如江苏常州钟楼防洪控制工程中的大型挡潮闸, 口门宽度 90 m, 即采用了平面双开式双扇三角闸门. 与船闸三角门的结构布置不同, 大型水闸三角门为了避免底枢长期浸没于水下不便维护及减少门库开挖量, 往往只布置高出水面的顶枢支座而不再设置底枢. 因此, 在此类三角门中, 由面板和梁格组成的门叶结构在主支臂以下形成了较大的悬伸部分. 对此类大跨度三角门进行合理的结构布置和优化设计将具有重要的理论意义和工程应用价值.

传统的闸门优化设计是根据设计要求, 凭经验甚至直观判断, 对几种初步设计方案进行比较, 遴选出较好的方案, 再对其强度、刚度、稳定性进行验算与校核, 从而选出最终设计方案, 或者仅分别对闸门的各个构件进行优化. 这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, 具有其局限性^[2]. 本文基于 ANSYS 软件平台, 首先根据三角门的初步设计方案建立闸门三维有限元模型, 再根据闸门有限元分析结果进行闸门结构的强度、刚度和稳定性验算, 进而利用 APDL 语言对三角闸门结构三维有限元模型进行二次优化. 在此基础上对三角闸门进行优化设计, 以期得到闸门结构的最优方案.

1 大型三角闸门的优化设计

1.1 闸门优化数学模型

闸门结构的优化设计, 一般通过建立闸门三维有限元模型对其进行结构分析, 选取某些对优化目标有影响的主要因素作为设计变量, 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, 经过优化分析得出使闸门结构最优的解. 结构优化设计的一般形式^[2]为

$$\text{选定设计变量} \quad x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \cdots \quad x_n]^T \quad (1)$$

$$\text{建立目标函数 } f(x), \text{ 追求} \quad \max f(x) \quad \text{或} \quad \min f(x) \quad (2)$$

且满足约束条件

收稿日期: 2012-10-20

作者简介: 董顾春(1987-), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要从事钢结构研究. E-mail: dongguchun@qq.com

$$G_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

$$H_k(x) \leq 0, k = 1, 2, \dots, p \quad (4)$$

$$H_l(x) = 0, l = 1, 2, \dots, q \quad (5)$$

式(1)~(5)中: n 为设计变量的个数; m 为性能约束条件个数; p 为几何约束条件个数; q 为设计变量之间约束条件的个数.

1.2 目标函数

大型三角闸门优化设计的最终目的,是为了得出既可靠又经济的方案.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.对于闸闸门结构,闸门结构的制作成本,往往以闸门的总用钢量作为核算标准^[3].因此,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

由于闸门设计变量较多,相互之间的关系复杂,部分设计变量对目标函数的影响较小,因此不可能也没有必要对全部的设计变量进行优化.为了使含有较多参数的闸门优化设计简单可行,提高收敛速度,缩短设计时间,本文经过比选,仅选取弧门设计中的几个关键参数作为设计变量.这样既能有效缩短优化时间,又能确保计算精度为工程设计所接受.

1.4 约束条件

约束条件分为几何约束和性态约束.几何约束条件要求各设计变量要满足构造要求,如型钢、圆管等要满足规格要求、钢板厚度要取整数,按规范^[4]要求,钢结构受力构件及其连接中,钢板厚度不宜小于6 mm等.闸门的性态约束条件,即是三角门每个备选设计方案中各构件需要满足的强度、刚度和稳定性条件.强度条件包括各类梁格的弯曲正应力、弯曲剪应力和折算应力、面板的折算应力、轴心受力和偏心受力构件的正应力强度验算;刚度条件主要为各类梁格的挠曲变形、轴心受力和偏心受力杆件的长细比控制;稳定条件为各类梁格、轴心受压和偏心受压杆件的整体稳定和局部稳定条件.各相关构件的强度、刚度和稳定性验算根据《水利水电工程钢闸门设计规范》^[4]的规定进行.

2 工程算例

2.1 工程概况

某河道防洪闸的备选方案为大型三角闸门,单孔净宽40.00 m,闸门弧面半径21.28 m,弧形门叶的门体厚1.56 m.从关门挡水位置运行到门库中运行角度为70°,门顶高程为5.00 m.闸门门叶结构初步布置4道实腹式主横梁.为减少门库开挖量,只布置顶枢,而不再布置底枢,故只在闸门上部顶枢附近布置支承支臂.支臂结构采用三根钢管组成的格构式结构,在面板受力段沿总水压力作用线对称布置.三角闸门的面板是圆弧形,面板上承受水压力作用,面板与主梁、次梁、横隔板固接.根据水闸三角门的几何特性,为更好地模拟闸门的受力特点,选取Shell63单元来模拟闸门门体面板与横隔板(见图1),用Beam188单元来模拟主横梁、小纵梁、直支臂以及三角形空间桁架的杆件.根据闸门的刚度和质量,将闸门离散成为具有10 357个单元、9 388个节点的空间结构体系.其中Shell63单元9 649个,Beam188单元708个.

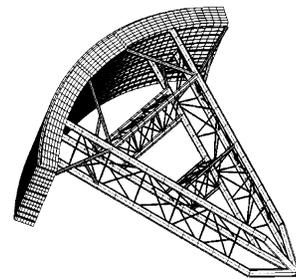


图1 大型三角闸门有限元模型

Fig. 1 FEM model of the large-scale sector gate

2.2 三角闸门优化变量选取

本文选取包括面板厚度、主梁、支臂断面尺寸,弧面夹角共11个主要设计变量.

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_{11}]^T \quad (6)$$

式中: x_1 为面板厚度; x_2, x_3 分别为主支臂杆圆管截面的内外径; x_4, x_5 分别为连接弦杆(近面板处)圆管截面

的内外径; x_6, x_7 分别为连接弦杆(近支铰处)圆管截面的内外径; x_8 为工字型主梁翼缘宽度; x_9 为主梁翼缘厚度; x_{10} 为主梁腹板厚度; x_{11} 为弧面夹角.前10个变量为闸门主要构件的截面参数,通过这些变量的改变,进行各主要构件截面尺寸的优化.而第11个变量为闸门的拓扑变量.如图2所示,三角闸门弧面夹角 α 的大小,将直接影响三角闸门门叶的面板弧长以及支臂的长度和受力情况,也是水闸三角闸门结构整体布置时的重要参数.在孔口净宽一定时,支臂长度与弧面夹角的正弦值成反比,表现为

$$R = l / (2 \sin \alpha) \quad (7)$$

式中: R 为支臂长度; l 为孔口净宽; α 为弧面夹角.

当 α 减小时,面板部分弧长减小,面板用钢量减少,但是另一方面,支臂长度增加,该部分的用钢量也随之上升.与之相反,当 α 增大时,面板用钢量随之增大,但支臂部分用钢量下降.因此,设置弧面夹角作为一个重要的优化变量,通过约束条件来寻求平衡点,使闸门总体重量最轻.

以三角闸门的总用钢量作为优化目标函数,其中包括了门叶结构、主支臂、支臂连接弦杆等各部分用钢量.在ANSYS有限元分析软件中,目标函数值可通过*GET命令直接提取.

2.3 优化工况及优化结果

为保证闸门的安全运行,对闸门在汛期时关门挡水的情况下进行整体优化.根据设计资料,关门挡水时,取上游水位4.50 m,下游水位3.50 m.结合ANSYS平台APDL建立的弧形闸门有限元程序,在上述约束条件下进行了该弧形闸门的优化分析,所得优化结果见表1所示.优化前闸门总质量为60 216 kg,整体优化后,质量减轻为45 926 kg,闸门总质量降低了23.7%.

结果表明,基于该方法的优化设计,能有效减轻弧形闸门的重量,从而可减少工程造价.

表1 优化设计方案与初始设计方案的参数比较

| | 设计变量 | | | | | | | | | | | 闸门总用 钢量/kg |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|---------------|
| | x_1 | x_2 | x_3 | x_4 | x_5 | x_6 | x_7 | x_8 | x_9 | x_{10} | x_{11} | |
| 初始方案 | 12 | 414 | 450 | 362 | 402 | 215 | 245 | 120 | 20 | 15 | 70 | 60 216 |
| 优化方案 (取整) | 8 | 384 | 420 | 310 | 330 | 180 | 210 | 100 | 16 | 12 | 67 | 45 942 |
| 优化率/% | 33 | 7 | 6.7 | 14 | 18 | 16 | 14 | 17 | 20 | 20 | | 23.7 |

3 结 语

基于ANSYS平台APDL的三角闸门优化设计,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,减轻了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,避免了对各构件进行反复验算,提高了设计效率,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三角闸门结构的合理设计提供参考和借鉴.

参 考 文 献:

- [1] 钱令希. 工程结构优化设计[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (QIAN Ling-xi. Optimum design of engineering structures[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [2] 梁醒培, 王辉. 基于有限元法的结构优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010. (LIANG Xing-pei, WANG Hui.

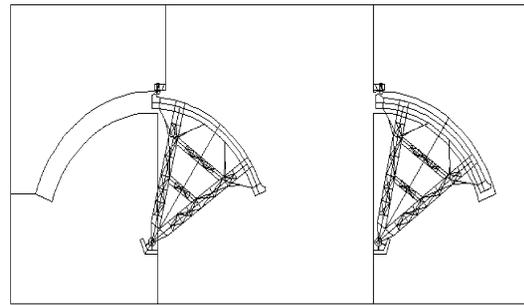


图2 大型三角闸门俯视图
Fig.2 Vertical view of the large-scale sector gate

- Structure optimization design based on finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese))
- [3] 朱召泉, 陶桂兰. 弧形钢闸门结构优化设计[J]. 工程力学, 1994(增刊): 327-330. (ZHU Zhao-quan, TAO Gui-lan. Optimization design of radial gate structure[J]. Engineering Mechanics, 1994(Suppl): 327-330. (in Chinese))
- [4] SL 74-95, 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. (SL 74-95, Hydraulic and hydroelectric engineering specification for design of steel gate[S]. (in Chinese))
- [5] 曹平周, 朱召泉. 钢结构[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008. (CAO Ping-zhou, ZHU Zhao-quan. Steel structure[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese))
- [6] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. (ZHU Bo-fang. The finite element method theory and applications[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1998. (in Chinese))
- [7] 蔡元奇, 李建清, 朱以文, 等. 弧形钢闸门结构整体优化设计[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2005(6): 20-23. (CAI Yuan-qi, LI Jian-qing, ZHU Yi-wen, et al. Integrated optimization of structural design of radial gate[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005(6): 20-23. (in Chinese))
- [8] 李旭东, 彭晓平. 拓扑优化理论在二维深孔弧形闸门设计中的应用研究[J]. 西北水电, 2008(3): 54-56. (LI Xu-dong, PENG Xiao-ping. Application of topology optimization in the two-dimensional design of deep orifice radial gate[J]. Northwest Water Power, 2008(3): 54-56. (in Chinese))
- [9] 李典庆, 唐文勇, 张圣坤. 基于浮点编码遗传算法的钢闸门主梁设计[J]. 中国农村水利水电, 2003(4): 29-31. (LI Dian-qing, TANG Wen-yong, ZHANG Sheng-kun. Optimization design of steel gate beam based on floating-coding generic algorithm[J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(4): 29-31. (in Chinese))
- [10] 王业交, 吴传惠, 罗华, 等. 引江济汉工程超大型闸门设计研究[J]. 水电与新能源, 2012(3): 7-10. (WANG Ye-jiao, WU Chuan-hui, LUO Hua, et al. Design of large-scale gate of the water transfer project from the Yangtze River to Han River [J]. Hydropower and New Energy, 2012(3): 7-10. (in Chinese))

Optimum design of a large-scale sector gate

DONG Gu-chun, ZHU Zhao-quan

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

Abstract: Generally, the optimum design of a sector gate is simplified as a planar system, or only to optimize various components. The former ignores the link between each component for the sector gate as a space system, while the latter, the optimization of various components, cannot be equivalent to the optimization of the whole gate structure. In this paper, according to the real three-dimensional situation of a sector gate, we use ANSYS Parametric Design Language (APDL) to re-develop the finite element model for the sector gate. This method can combine the accuracy of FEM structural analysis with the high efficiency in solving extreme value problems, so it resolves the sector gate's three-dimension optimization problem successfully.

Key words: sector gate; optimum design; APDL; ANSYS