



有切角三角门船闸闸首结构优化设计*

苏超, 姜念堂, 王金玺

(河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要: 针对船闸闸首结构建模复杂、工作量大的特点, 通过Vb语言和Fortran语言实现了船闸的参数化建模和自动剖分, 并在此基础上采用粒子群优化算法, 开发了有切角三角门船闸闸首结构优化系统。在工程实例中, 以混凝土使用量最小为目标函数, 验证了该优化系统的正确性和实用性, 计算结果可为船闸的设计提供参考。

关键词: 三角门船闸; 粒子群优化算法; 有限元; 优化设计

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)05-0124-06

Optimization design of chamfer triangular gate lock structure

SU Chao, JIANG Nian-tang, WANG Jin-xi

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the complex lock structure model and heavy workload, on the basis of the Vb language and Fortran language, we realize the lock parametric modeling and automatic subdivision, and develop the chamfer triangular gate lock structure optimization system using particle swarm optimization algorithm. Taking the minimum usage of concrete as the objective function, we verify the validity and practicability of the system optimization in the engineering project. The results may serve as reference for the lock structure design.

Key words: triangular gate lock; particle swarm optimization algorithm; finite element; optimization design

我国流域面积广、水量充沛, 具有发展水运事业的天然优越条件^[1]。船闸是通航建筑物的主要形式, 而且船闸规模和过水能力的大小、船闸布置和各构筑物的优劣均将对全航道起控制作用, 是航道通畅的关键^[2]。一般来说, 由于船闸闸首结构复杂, 目前传统的设计方法是先根据工程经验拟定结构尺寸, 然后进行三维有限元整体应力位移计算, 验证结构的合理性^[3-7]。目前国内对船闸闸首结构设计所做的工作主要有: 河海大学于20世纪90年代用Fortran语言编制的软基上船闸结构计算程序、船闸闸首的三维有限元计算系统开发应用^[8-12]等。传统的优化过程一般是通过工程经验拟定4~5组结构尺寸合理的方案, 然后经过方案对比选出较优的设计方案。由于受不同设计者经

验的限制, 确定的最终方案往往不是理想的最优方案, 而只是可行方案^[13], 而且设计周期长, 工作效率低。本文开发了有切角三角门船闸闸首结构优化系统, 是在众多可行设计方案中寻找最适宜的设计方案。可以将计算、绘图, 剖分及调用Abaqus有限元软件和优化程序全部由计算机自动完成, 并在约束条件内通过一定的优化算法, 寻求为达到目标函数极值的设计参数, 使船闸的结构优化设计效率有了很大提高, 省时省力, 并可作为以后的船闸设计提供参考。

1 闸首建模参数

1.1 闸首结构形式

闸首结构见图1。

收稿日期: 2012-10-30

*基金项目: 江苏省交通科学研究计划项目(KY2009-09Y28-01); 南通市科技项目(BK2012083)

作者简介: 苏超(1960—), 男, 教授、博士生导师, 从事水工结构工程、水运工程数值计算方法与实验研究。

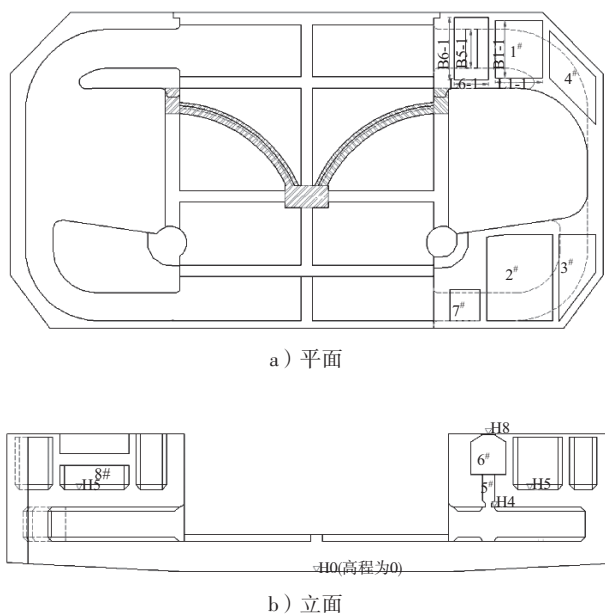


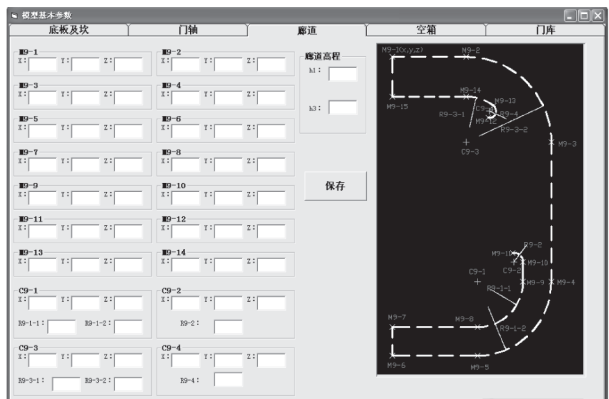
图1 有切角三角门船闸结构

1.2 基本参数

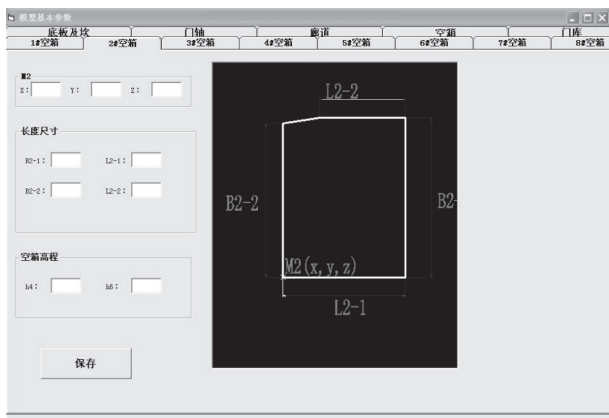
结合现有的某船闸工程施工图纸,对闸首结构的基本形状和结构进行分析总结,提取出闸首最基本的实体结构模型,包括:输水廊道、门库、空箱、阀门启闭机、阀门井、闸门启闭室、闸门及闸门门轴。用基本参数确定闸首的实体结构,通过Vb可视化界面输入基本参数即可完成建模^[14-15]。以廊道、空箱参数为例,见图2。

1.3 优化参数

由船闸设计规范知,船闸廊道尺寸是由水力学特性设计规范求得,因此不作为设计变量。根据船闸工程地质资料和地基开挖状况,可确定船闸模型的外轮廓尺寸,表达外轮廓尺寸的基本参数不可作为设计变量。



a) 廊道



b) 空箱

图2 有切角三角门船闸输入参数界面

根据船闸结构特点,从最大限度地减少混凝土用量的角度出发,优化设计变量选定为部分空箱(主要是矩形空箱)尺寸和部分高程尺寸。设计变量原始参数和变化范围见表1,变量意义见图1。

表1 设计变量参数

设计变量	位置说明	原始参数/m	变化范围/m
B_{1-1}	1#空箱顺河向长度	2.8	$2.8 \leq B_{1-1} \leq 4.0$
L_{1-1}	1#空箱横河向长度	2.7	$2.7 \leq L_{1-1} \leq 3.1$
B_{5-1}	5#空箱顺河向长度	5.4	$5.4 \leq B_{5-1} \leq 5.9$
B_{6-1}	6#空箱顺河向长度	3.1	$3.1 \leq B_{6-1} \leq 3.4$
L_{6-1}	6#空箱横河向长度	5.7	$5.7 \leq L_{6-1} \leq 5.9$
H_5	空箱底高程	8.5	$7.3 \leq H_5 \leq 8.5$
H_8	闸首顶高程	11.4	$11.3 \leq H_8 \leq 12.0$

其中: L 为横河向长度, B 为顺河向长度, H 为高程。采用85高程系。

2 粒子群优化算法

粒子群优化算法(PSO算法)的原理:群体中的每个个体都有一个速度(反映位置的改变),粒子根据速度在搜索空间运动,而且每个个体都有一个记忆单元,记下它曾经到达过的最优位置,整个寻优过程就是个体根据自己先前到达过的最优位置和其邻域中其他个体到达过的最优位置来改变自己的位置和速度,从而趋向全局最优值的聚集加速过程^[16]。

3 网格自动剖分

根据船闸闸首结构特征,按照网格划分的

原则, 确定不同的网格分份参数, 并确定分份比例, 各个块的网格分份参数和比例必须是独立的, 从而建立有限元网格数据。一组独立的参数来表示各个块体3个方向的剖分份数, 设置参数时要考虑块体之间的衔接, 也就是说块体在公共边方向的份数要相同。

利用Fortran语言编制网格剖分程序^[17-18], 导入每个块的分份参数和分份比例, 得到节点和单元的有限元数据。将节点信息和单元信息导入有限元计算软件Abaqus当中, 得到船闸闸首结构的有限元模型。

4 约束条件及目标函数

根据船闸的结构形式建立几何约束(表1); 满足船闸设计规范所规定的各种荷载作用下的应力约束, 主拉应力和主压应力不能超过相应的容许值(各不同工况的容许应力可以有所不同); 船闸设计规范所规定的各种荷载作用下稳定约束, 其中包括抗滑稳定约束、抗倾稳定约束、抗浮稳定约束^[19]。

本文以船闸经济性指标进行优化设计, 即满足约束条件的前提下, 船闸闸首混凝土体积最小 $F(x) \rightarrow \min$ 。不同尺寸的船闸结构的混凝土方量可在Abaqus计算结果文件当中直接提取。

5 结构优化系统流程

结构优化系统流程见图3。

6 模型材料参数及计算工况

6.1 模型材料参数

以某一船闸工程实例验证优化系统的正确性。该船闸是对称结构形式, 计算中取模型的一半计算, 闸首地基的水平范围可取闸首底部轮廓宽度的2~4倍, 地基深度可取闸首底部轮廓宽度的1.0~1.5倍。地基基础为岩石, 部分空箱回填砂砾石, 闸首结构采用C25混凝土。材料参数见表2。

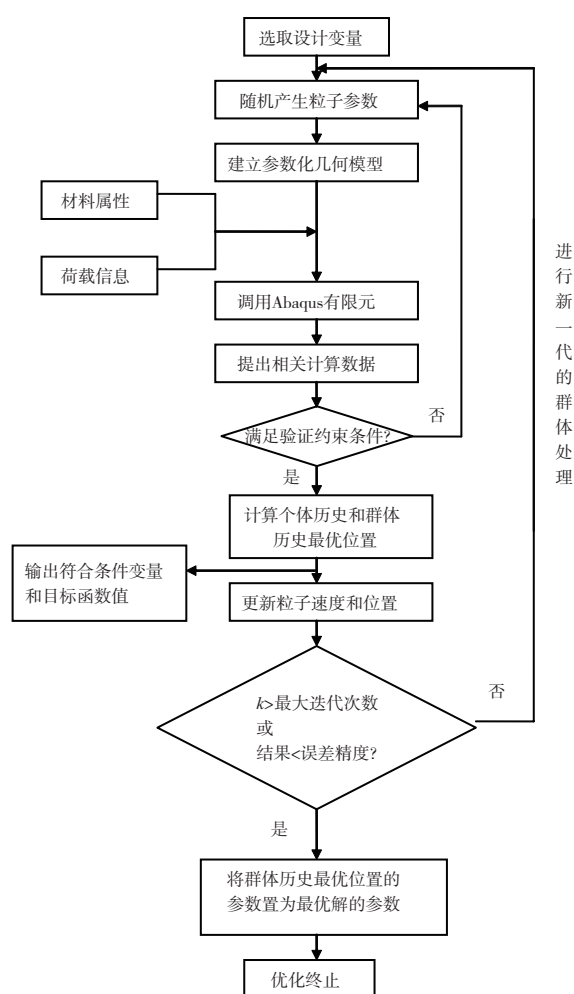


图3 结构优化系统流程

表2 材料物理力学参数

材料属性	弹性模量/ GPa	泊松比	凝聚力/ MPa	摩擦 系数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
混凝土	28	0.167			2 400
基础岩体	30	0.150			
回填砂砾石			0	0.7	1 850

6.2 计算工况

计算工况的荷载水位情况, 水位组合见表3。

1) 正常蓄水位运行期工况(运行工况): 上游设计水位+相应下游水位+扬压力+边墩、底板等自重+回填土压力及地面活荷载;

2) 完建工况: 边墩、底板等自重+回填土压力及地面活荷载;

3) 检修工况: 扬压力+边墩、底板等自重+回填土压力及地面活荷载;

4) 特殊工况: 上游洪水位+相应下游水位+

扬压力+自重+回填土压力及地面活荷载。

表3 闸首各计算工况水位组合

组合工况	上游水位	闸室内水位	下游水位
运行工况	9.63	9.63	7.75
完建工况	无水	无水	无水
检修工况	9.63	无水	7.75
特殊工况	9.63	9.63	9.63

7 优化成果对比和应力变形分析

提取优化后该船闸有限元模型(图4),地基和闸首结构共13 040单元、16 512节点,单元采用8节点6面体单元。

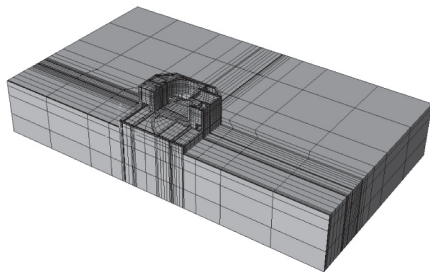


图4 优化后船闸有限元模型

7.1 优化结果对比

提取船闸优化后设计变量和目标函数,与初始参数进行比较(表4)。

由表4可见,经船闸优化后混凝土用量减少6.57%。通过程序优化后的船闸模型参数对比可

表4 优化前后设计变量和目标函数对比

变量、目标函数	优化前变量/m	优化后变量/m
B_{1-1}	2.8	4.0
L_{1-1}	2.7	3.0
B_{5-1}	5.4	5.9
B_{6-1}	3.1	3.4
L_{6-1}	5.7	5.9
H_5	8.5	7.4
H_8	11.4	11.9
$F(X)$	3 411.2	3 187.8

以发现廊道上部的实体层厚度(H_5H_4)明显变薄,厚度减小0.9 m;1#空箱顺水流向可加大1.2 m,横河向长度可加大0.3 m;6#启闭器空箱尺寸可以适当加大,从而减少混凝土用量。(H_4 为廊道顶高程)

7.2 应力变形分析

通过Abaqus有限元软件分析,在满足一切约束条件的前提下,船闸整体受压,只有在船闸闸首顶部、廊道拐角处、门库内与侧壁的结合处、船闸闸首切角处等区域出现不同程度的主拉应力区,主拉应力极值出现在在廊道与侧壁的连接处的顶部,量值不大,最大不超过0.938 MPa;主压应力最大不超过2.304 MPa,位于廊道与侧壁的拐角处的顶部。闸首结构整体横河向位移量值、顺河向位移量值、竖向位移量值都不大,数值介于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m量级。应力位移极值见表5和表6。

表5 应力极值及位置

工况	主压应力极值/MPa	主压应力极值位置	主拉应力极值/MPa	主拉应力极值位置
完建工况	2.304	廊道与侧壁的拐角处的顶部	0.938	廊道与侧壁的连接处的顶部
检修工况	2.304	廊道与侧壁的拐角处的顶部	0.938	廊道与侧壁的连接处的顶部
运行工况	2.120	廊道与侧壁的拐角处的顶部	0.656	廊道与侧壁的连接处的顶部
特殊工况	0.001	廊道与侧壁的拐角处的顶部	0.459	廊道与侧壁的连接处的顶部

表6 位移极值及位置

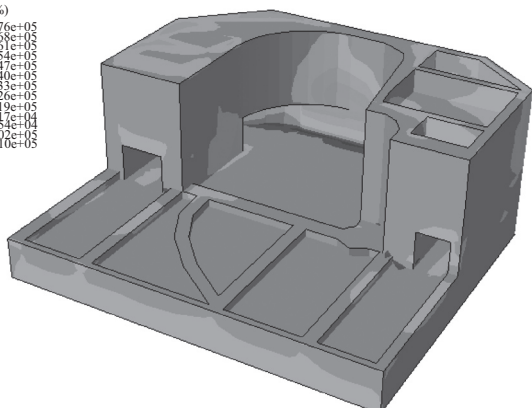
工况	横河向最大位移/mm	横河向极值位置	顺河向最大位移/mm	顺河向极值位置	铅直向最大位移/mm	铅直向极值位置
完建工况	0.54	门库与侧壁相接处的中部	0.16	上游闸首的切角处	0.22	廊道入水口的顶部
检修工况	0.55	门库与侧壁相接处的中部	0.16	上游闸首的切角处	0.18	廊道入水口的顶部
运行工况	0.47	门库与侧壁相接处的中部	0.17	上游闸首的切角处	0.17	空箱顶部
特殊工况	0.44	空箱与侧壁相接处的中部	0.15	上游闸首的切角处	0.16	廊道入水口的顶部

通过表5可以看出：主压应力极值都远小于C25混凝土的抗压设计标准值，主拉应力极值都小于C25混凝土的抗拉设计标准值1.78 MPa，满足应力约束条件；位移都较小满足位移约束条件。

完建工况，检修工况时产生的拉应力较大，由于篇幅有限就完建工况进行应力应变成果分析，图5分别为闸首结构主拉应力、主压应力分布云图（拉应力为正，压应力为负）。从中可以看出，船闸结构总体受压，船闸闸首顶部、廊道出入水口、廊道拐角处、门库与侧壁的结合处、空箱内壁等区域出现不同程序的主拉应力区，主拉应力极值出现在廊道与侧壁的连接处的顶部，量值不大，为0.938 MPa；主压应力的极值为2.304 MPa，发生在廊道与侧壁的拐角处的顶部。

S,Max, Principal
(Avg: 75%)

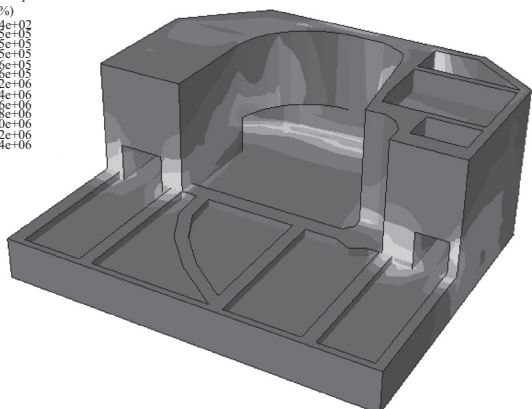
9.376e+05
8.398e+05
7.361e+05
6.354e+05
5.347e+05
4.340e+05
3.333e+05
2.326e+05
1.319e+05
3.110e+04
-6.954e+04
-1.702e+05
-2.710e+05



a) 主拉应力

S,Min, Principal
(Avg: 75%)

5.784e+02
1.915e+03
3.835e+03
5.755e+03
7.676e+03
9.596e+03
1.152e+04
1.344e+04
1.536e+04
1.728e+04
1.920e+04
2.112e+04
2.304e+04



b) 主压应力

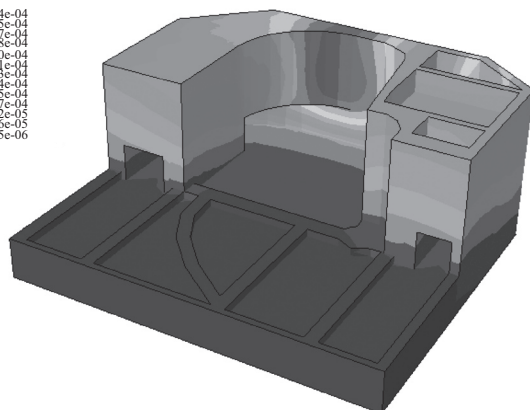
图5 闸首结构分布云图（单位：Pa）

图6分别为闸首结构的顺河向水平位移、横河向水平位移、竖向位移分布云图。从中可以看

出，由于闸首横河向位移总体左右侧对称，左侧结构的横河向位移指向左侧，右侧结构的横河向位移指向右侧。在完建计算工况下，闸首结构整体横河向位移量值不大，数值介于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m量级，由于侧壁土压力的作用极值出现在门库与侧壁相接处的中部，大小为0.54 mm；闸首整体结构顺河向位移总体指向下游，顺河向位移量值较小，数值介于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m量级，在土压力作用下，极值位于上游闸首的切角处，大小为0.16 mm；受结构自重等荷载的影响，闸首结构大部分沿自重方向向下，位移量值较小，数值介于 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ m量级，在廊道入水口、出水口、2#空箱与船闸启闭机中间、5#空箱的顶部位移相比船闸其余结构较大，极值位于廊道入水口的顶部，大小为-0.22 mm。

U, U1

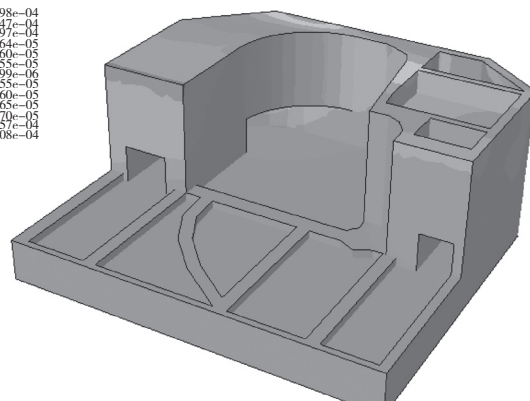
5.444e-04
4.995e-04
4.547e-04
4.098e-04
3.650e-04
3.201e-04
2.752e-04
2.303e-04
1.855e-04
1.407e-04
9.582e-05
5.096e-05
6.105e-06



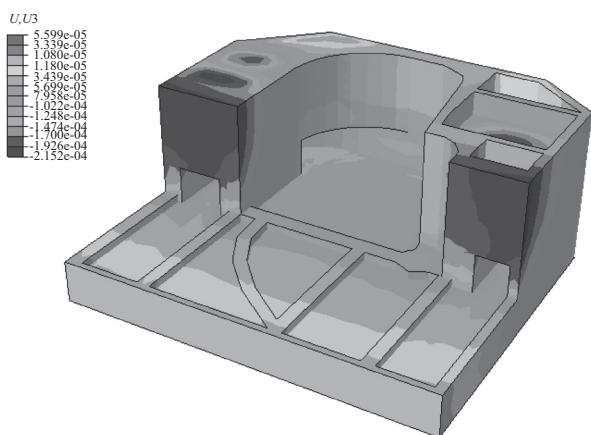
a) 横河向水平位移

U, U2

1.598e-04
1.347e-04
1.097e-04
8.464e-05
5.960e-05
3.455e-05
9.499e-06
1.555e-05
4.090e-05
6.565e-05
9.070e-05
1.157e-04
1.408e-04



b) 顺河向水平位移



c) 竖向位移

图6 闸首结构分布云图(单位: m)

8 结语

本文以某船闸工程为例,采用粒子群优化算法原理,结合Abaqus有限元计算软件,调用参数化模型和自动剖分程序,以混凝土方量最少为目标函数进行船闸结构优化,经优化后船闸结构安全合理,混凝土方量由原来的 $3\,411.2\text{ m}^3$ 减小为 $3\,187.8\text{ m}^3$,共减小6.57%。根据船闸的实际受力分析,Abaqus有限元软件计算的应力应变是正确、合理的,可为船闸配筋提供内力参考。充分验证了参数化建模系统及优化系统的正确性和实用性。本系统的开发为船闸的结构设计节省大量的人力、物力和财力,具有巨大的实用价值。

参考文献:

- [1] 杨利华. 我国水运基础设施建设五十年成就辉煌[J]. 水运工程, 1999(10): 8-10, 51.
- [2] 李悟洲, 李传光. 水运工程建设五十年[J]. 水运工程, 1999(10): 3-7.
- [3] 赖瑞山. 潮州供水枢纽船闸设计[J]. 吉林水利, 2004(10): 12-15.
- [4] 麦建清. 乐滩水电站船闸设计[J]. 红水河, 2006, 25(2): 62-68.
- [5] 杨斌, 朱旭. 船闸闸首非线性有限元计算分析[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 537-541.
- [6] 徐炳林. 船闸闸首三维非线性有限元分析[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [7] 李炳华, 王金玺, 刘志奇, 等. 船闸闸首结构应力应变三维有限元分析[J]. 水利科技与经济, 2011, 17(6): 1314.
- [8] 苏超, 王仙美, 曹建中, 等. 船闸结构仿真计算方法研究[J]. 水运工程, 2010(9): 97-99.
- [9] 唐小骏, 苏超. 船闸计算机辅助设计软件的开发构想[J]. 水运工程, 2006(4): 73-76.
- [10] 唐瑜. 坞式闸室结构可视化设计系统的开发与应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [11] 刘华. 计算机在船闸设计应用上的探索(二) [J]. 重庆交通学院院报, 1994(3): 89-95.
- [12] 彭晓平. 三角门船闸闸首结构计算系统的开发与利用[D]. 南京: 河海大学, 2008.
- [13] 蔡新, 郭兴文, 张旭明. 工程结构优化设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 6-9.
- [14] 殷佩生, 丁兆铭. 基于AutoCAD的船闸闸首三维实体模型[J]. 计算机应用, 2000(S1): 104-105.
- [15] 贺小康, 樊宇娇, 邓武彬, 等. 基于AutoCAD与VB的船闸下闸首建模[J]. 黑龙江水专学报, 2007, 34(4): 126-128.
- [16] 黄友悦. 智能优化算法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [17] 朱伯芳. 有限元法原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- [18] 聂耳清, 苏超. VB与TrueGRID软件在船闸闸首三维有限元网格自动剖分中的应用[J]. 水运工程, 2009 (10): 138-142.
- [19] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)