

# 船闸三角门静力数值分析

高 卓, 胡友安\*

(河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 以滁河汊河集船闸为研究背景, 基于有限元分析软件 ANSYS, 建立了下闸首三角门的有限元模型。详细介绍了三角门的结构, 综合考虑水压和闸门自重等主要载荷影响, 利用空间有限元法对闸门在防洪水位、通航水位和蓄水位情况下进行静力学分析, 提取危险工况下闸门支座反力、应力及变形结果, 经过强度、刚度和稳定性验算后得出三角门结构设计合理并满足规范要求结论。

**关键词:** 三角门; 空间有限元法; 静力分析; ANSYS; 船闸

**中图分类号:** [TV691]      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2017) 08-0038-05

## Numerical analysis on static force of triangular lock gate

GAO Zhuo, HU Youan\*

(College of Mechanical & Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, Jiangsu)

**Abstract:** Taking Chaheji lock as a research background, a finite element model of triangular lock gate was established based on the finite element analysis software ANSYS. The spatial structure of triangle gate was introduced in detail. Considering the major load effects like pressure and gate weight comprehensively, the spatial finite element method was used to analyze static force on the lock gate in the condition of flood control level, navigable stage and pool level. The reaction force, gate bearing stress and deformation results of the support under dangerous condition were extracted. After checking the strength, rigidity and stability, the conclusion that the design of triangular lock gate was reasonable and satisfied with specification requirements was summed up.

**Key words:** triangular lock gate; spatial finite element method; static force analysis; ANSYS; lock

## 0 引言

滁河汊河集船闸改建工程的规模为  $180\text{ m} \times 23\text{ m} \times 4.0\text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  门槛水深)。闸门采用可在动水中灵活启闭的弧面三角门, 弧面朝外, 能承受双向水压<sup>[1]</sup>, 正向设计最大水头为  $12.3\text{ m}$ , 反向设计最大水头为  $12.2\text{ m}$ 。该种闸门能在局部开启的条件下利用门缝输水, 必要时能快速开启航道, 启门时只需克服闸门自重以及止水和铰轴摩擦阻力

对轴心的阻力矩, 启闭力小<sup>[1]</sup>。闸门的设计采用传统的平面体系设计方法, 未考虑闸门结构间的相互作用, 并且缺乏整体协调性, 另外三角门结构复杂、单侧向受较大水压力, 所以三角闸门整体空间结构的有限元分析不可或缺。分析闸门各工况下的应力变形情况, 可为闸门的结构设计提供理论参考。

## 1 计算模型及计算工况

收稿日期: 2017-04-10

作者简介: 高卓 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为钢结构。

通讯作者: 胡友安 (1963-), 男, 教授, 研究方向为计算力学与机械设计。

### 1.1 闸门参数和计算模型

汉河集船闸三角门是由空心圆截面管、工字梁和薄壁壳体组成的空间结构。闸门整体结构由端柱、门叶、空间桁架体系、浮箱和防撞板构成, 闸门空间结构如图 1 所示。下闸首底槛高程  $-1.50\text{ m}$ , 门顶高程  $12.80\text{ m}$ , 闸门中心角为  $70^\circ$ , 门叶厚度为  $10\text{ mm}$ , 半径为  $12.39\text{ m}$ 。门叶上分布有 7 根主梁, 6 根隔板, 10 根竖直次梁和 11 根水平次梁, 均为 T 型截面梁, 翼缘和腹板的厚度均为  $10\text{ mm}$ 。

利用大型有限元分析软件 ANSYS 建立下游三角门有限元模型, 如图 2 所示, 采用 Shell63 模拟闸门门叶、隔板、端柱、防撞板和浮箱结构, 采用 Beam188 模拟空间桁架体系和梁结构。三角门整体划分成含有 58137 个节点和 65301 个单元的有限元模型。由于闸门结构采用 Q235, ANSYS 中给定参数为弹性模量  $E=2.06\times 10^{11}\text{ Pa}$ , 泊松比  $\mu=0.3$ , 重力加速度为  $9.8\text{ m/s}^2$ , 闸门密度  $\rho=9800\text{ kg/m}^3$ 。

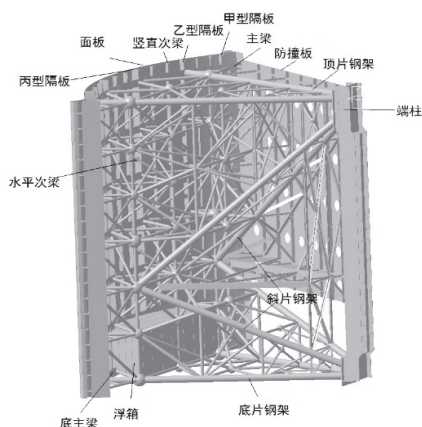


图 1 三角门空间结构图

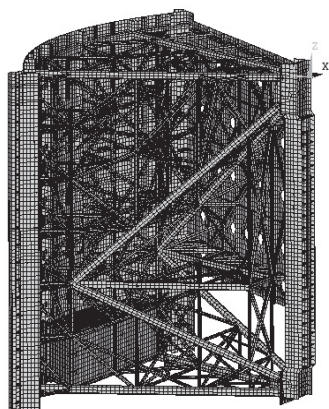


图 2 三角门有限元模型

### 1.2 计算工况及约束条件

三角门的静力数值分析是在闸门完全闭合状

态下进行的, 此时闸门主要承受自重和水压, 忽略风载荷的影响, 闸门约束较复杂, 表 1 所示为下闸首三角门计算工况和约束条件。

表 1 三角门计算水位和约束条件 (单位: m)

工况	计算水位	约束条件
工况一	闸室侧水位 12.3, 下游侧水位 2.5	顶枢水平方向位移约束 X、Y
工况二	闸室侧水位 11.7, 下游侧水位 2.5	底枢水平方向和竖直方向上的约束 X、Y、Z
工况三	闸室侧水位 6.31, 下游侧水位 12.2	启闭点水平方向上的约束 X、Y
工况四	闸室侧水位 6.31, 下游侧水位 11.6	中缝羊角处的对称约束
工况五	闸室侧无水, 下游侧水位 5.0	边止水处与闸室边接触面的法向位移约束

## 2 强度、刚度和稳定性评判标准

通过对闸门的结构设计后, 闸门厚度均小于  $16\text{ mm}$  (属于钢材组第一组), 其材料容许应力  $[\sigma]=160\text{ MPa}$ ,  $[\tau]=95\text{ MPa}$ , 对大中型闸门结构强度进行验算时, 取容许应力修正系数  $k=0.9025$ , 修正后闸门的容许应力  $[\sigma]=144.4\text{ MPa}$ ,  $[\tau]=85.74\text{ MPa}$ , 材料局部承压容许应力  $[\sigma_{cd}]=240\text{ MPa}$ , 计算的最大应力值不得超过容许应力的 5%, 即  $252\text{ MPa}$ <sup>[2]</sup>; 验算面板强度时, 应考虑面板的局部弯应力与面板兼作主、次梁翼缘的整体弯应力相叠加, 叠加后的折算应力应小于  $1.1\alpha[\sigma]$ , 其中  $[\sigma]$  为修正后的容许应力,  $\alpha$  为弹塑性调整系数, 与面板区格的划分有关, 由于面板区格长边与短边的长度比小于 3, 故取  $\alpha=1.5$ , 则面板的折算应力应满足  $\sigma_{zh} \leq 1.1\alpha[\sigma]=238.3\text{ MPa}$ <sup>[3]</sup>。

对三角门的刚度验算需计算受弯构件的挠度, 汉河船闸门属于露顶式闸门, 主梁长度约为  $14.056\text{ m}$ , 计算的挠度应小于计算跨度的  $1/600$ , 即最大允许挠度为  $23.43\text{ mm}$ <sup>[4]</sup>。

根据文献得出轴心受压构件的稳定性验算主要根据公式<sup>[5]</sup>:

$$\frac{N}{\varphi A} \leq f \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{l}{i} = \frac{l}{\sqrt{\frac{I}{A}}} \quad (2)$$

式中:

$\varphi$ —轴心受压构件稳定系数,此参数根据换算长  $\lambda\sqrt{f_y/235}$  细比所得(闸门钢材为 Q235, 所以  $f_y=235$  MPa);

$\lambda$ —长细比;

$N$ —构件轴向压力, kN;

$A$ —钢管截面积,  $\text{mm}^2$ ;

$l$ —杆件计算长度, m;

$i$ —杆件截面惯性半径, m;

$I$ —截面惯性矩,  $\text{m}^4$ 。

在 ANSYS 中钢管简化为一根线, 用梁单元 beam188 模拟, 计算得到的应力为  $\sigma=N/A$ , 要保证

钢架不失稳, 要求  $\sigma/\varphi = \frac{N}{\varphi A} \leq f$ ,  $f=160$  MPa。

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 三角门强度校核

在两侧水压共同作用下, 闸门应力分布较为复杂, 按第四强度理论应力进行校核<sup>[5]</sup>; 闸门在防洪水位下应力达到最大, 随着水深增加闸门面板上的应力分布也更集中, 面板和底主梁的焊接处应力集中明显, 最大应力值为 232 MPa, 属于局部应力, 满足强度要求。图 3、图 4、图 5 分别为面板底主梁和下游三角门整体结构以及面板在工况一(危险工况)下的等效应力云图; 表 2 为闸门面板、底主梁、三种类型隔板和浮箱在各工况下的等效应力。

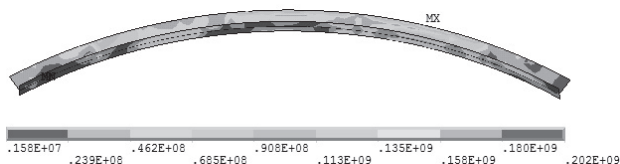


图 3 底主梁等效应力(单位: MPa)

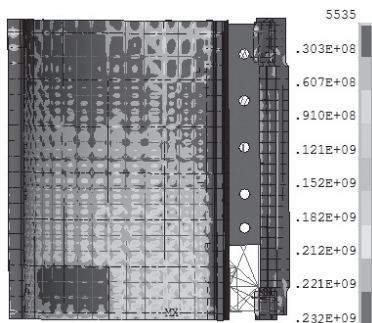


图 4 闸门整体等效应力(单位: MPa)

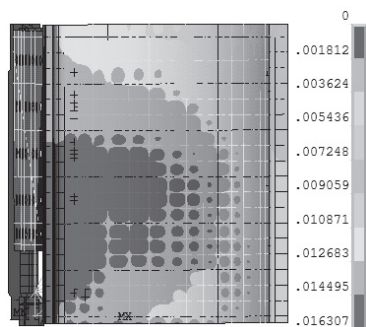


图 5 面板等效应力(单位: MPa)

#### 3.2 三角门刚度校核

图 6 所示为闸门整体结构和面板在防洪工况下的变形云图, 由图可知, 在水压力作用下, 闸门

表 2 闸门各构件的等效应力

(单位: MPa)

工况 构件	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
面板	232.0	228.0	219.0	206.0	122.0
底主梁	202.0	192.0	156.0	152.0	46.9
甲型隔板	57.5	54.4	47.0	43.1	34.8
乙型隔板	152.0	145.0	123.0	117.0	38.0
丙型隔板	121.0	115.0	108.0	105.0	21.9
浮箱	222.0	213.0	156.0	152.0	44.7

主要变形是面板的径向变形, 水压力越大, 变形也越大; 变形较大位置主要集中于面板中缝羊角中下侧, 最大变形为 16.307mm, 小于计算跨度的 1/600, 故满足刚度要求。表 3 为闸门各构件的变形。

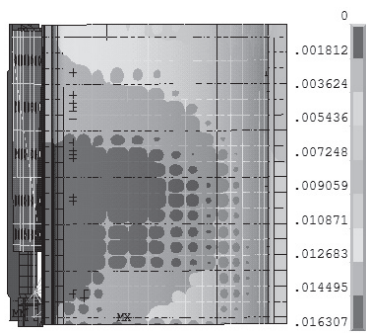


图 6 闸门整体变形云图 (单位: mm)

3.3 三角门稳定性校核

闸门空间桁架中部分腹杆在水压力作用下呈受压状态, 当水压较大时, 这些杆件极有可能发生弯曲、失稳, 为了保证闸门的运行寿命满足要求, 对闸门顶片钢架、底片钢架、中片钢架和斜片钢架中的腹杆进行稳定性验算。工况一和工况二为反向工况, 闸门整体结构受拉, 局部受压杆件轴向压力较小, 故不必进行稳定性验算; 表 4 所列各钢架在正向工况下的最大轴向压力。

由表 4 可知, 闸门在正向水压力作用下, 中片四的腹杆产生最大轴向压力, 以工况三为例校核杆件的稳定性; 轴向压力最大的腹杆计算长度为 2 m, 圆环截面直径为 168 mm, 轴向压力  $N=626\text{ kN}$ , 属于 a 类轴心受压构件, 经公式 (2) 得出  $\lambda=47.62$ , 查文献<sup>[5]</sup>附录得  $\varphi=0.923$ , 代入公式 (1) 计算后得出  $N/\varphi A=30.6\text{ MPa} < f$ , 故闸门各杆件满足稳定性要求。

3.4 三角门支反力分析

三角门的支反力主要分为顶枢支反力、底枢支反力和启闭点支反力。支反力坐标系如图 2 所示。根据 ANSYS 计算结果提取出闸门在各工况下的支反力, 如表 5 所示。

由表 5 可知:

(1) 工况一、工况二是反向设计工况, 所以顶枢和底枢主要受拉; 工况三、工况四、工况五是正向设计工况, 所以顶枢和底枢主要受压。

(2) 由工况一、工况二、工况三和工况四 (浮箱淹没在水中) 在 Z 方向上的支座反力可知闸门在水中的重力为 820.8 kN; 由工况六 (只受自重) 可知, 闸门自重为 1222.59 kN; 综上所述, 下闸首浮箱产生的浮力约为 401.79 kN, 闸门设计中使用浮箱可以使闸门在水体中重力减小 32.86%; 增设

表 3 闸门各构件的变形

(单位: mm)

工况 构件	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
面板	16.30	15.01	12.37	11.05	5.55
底主梁	14.32	13.07	10.40	9.15	3.78
甲型隔板	15.18	13.79	11.56	10.10	3.90
乙型隔板	14.71	13.31	11.40	9.93	3.59
丙型隔板	14.44	13.07	11.09	9.66	3.56
浮箱	16.12	14.92	10.25	9.01	3.59

表 4 钢架最大轴向压力

(单位: kN)

工况	顶片钢架	底片钢架	上斜片	下斜片	中片一	中片二	中片三	中片四	中片五
三	-330	-303	-140	-246	-250	-297	-266	-626	-395
四	-278	-269	-125	-216	-220	-257	-237	-556	-353
五	-83	-122	-58	-71	-79	-52	-51	-185	-87



表 5 闸门支座反力

(单位: kN)

工况	支反力	顶枢	底枢	底止水
工况一	$F_x$	-113.990	<b>348.950</b>	0.000
	$F_y$	-4607.600	<b>-7629.000</b>	0.000
	$F_z$	0.000	515.360	305.440
工况二	$F_x$	-100.460	318.190	0.000
	$F_y$	-4091.500	-7016.900	0.000
	$F_z$	0.000	503.750	317.050
工况三	$F_x$	83.525	-256.360	0.000
	$F_y$	3623.500	5230.000	0.000
	$F_z$	0.000	144.840	675.960
工况四	$F_x$	70.276	-225.220	0.000
	$F_y$	3113.200	4620.400	0.000
	$F_z$	0.000	156.570	664.24
工况五	$F_x$	9.249	-82.844	0.000
	$F_y$	779.760	2100.700	0.000
	$F_z$	0.000	248.600	<b>973.980</b>
工况六	$F_x$	-3.372	1.568	0.000
	$F_y$	17.060	-3.466	0.000
	$F_z$	0.000	325.040	897.550

注:表中“-”号表示支反力方向与坐标轴方向相反;加粗表示最大支反力,无水压表示闸门只受自重。

浮箱可以有效的减少闸门在水体中的自重,并且可以使闸门的重心靠近旋转轴线。一方面,可以改善顶枢拉杆的受力形式,减轻闸门顶枢和底枢拉杆轴套的磨损及避免了闸门下垂现象;另一方面,也可以降低底枢蘑菇头处的压应力,从而降低蘑菇头的磨损等。因而,在三角门的面板内侧增设浮箱是保护闸门的必要措施。

## 4 结语

(1)通过对弧形三角门空间有限元静力分析后,可知该闸门整体和各构件满足强度、刚度和稳定性要求,局部发生应力集中部位需设置加强筋。

(2)由于三角闸门重心远远外悬于门体支座,顶枢和底枢在 Y 方向上的支反力较大,尤其在闸门受反向水压情况下。因此,浮箱结构的设计和布置十分重要,非对称式浮箱不仅解决了这个问题,而

且也减小了由于布置防撞板而加大的偏心距。

(3)闸门受正向水压力时,闸门空间桁架主要受压,轴力较大位置主要位于底片钢架和中部的中片钢架上,为防止支臂和腹杆压弯,应加强对这些杆件的设计。

## 参考文献:

- [1] 迟朝娜. 船闸三角闸门结构的有限元分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] SL74-95, 水利水电工程钢闸门设计规范[S].
- [3] 安徽省水利局勘测设计院. 水工钢闸门设计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1980.
- [4] JTJ 308-2003, 船闸闸阀门设计规范[S].
- [5] 曹平周, 朱召全. 钢结构[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1999.

(责任编辑: 王宏伟)