



# 中高水头船闸三角门流固耦合动力特性分析

祝智卿, 朱召泉

(河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

**摘要:** 船闸三角门考虑流固耦合作用下的自振特性是分析闸门流激振动的关键因素。采用空间有限元数值模拟, 分析得到了三角闸门在不同水位条件下的自振频率和振型模态。计算表明, 流固耦合作用对闸门自振特性的影响, 总是使闸门的自振频率下降, 振型模态也相应发生转变。在计算分析的基础上, 对船闸三角门的安全运行操作提出了合理化建议。

**关键词:** 三角闸门; 有限元数值模拟; 流固耦合; 动力特性

中图分类号: TV 663

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0119-004

## Dynamic characteristics of middle-high waterhead sector gate with fluid-structure interaction effect considered

ZHU Zhi-qing, ZHU Zhao-quan

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

**Abstract:** With fluid-structure interaction effect considered, the key factor in the analysis of flow-induced vibration of the sector gate is to get self-vibration characteristics. Adopting the finite element numerical method, we get the self-vibration frequency and the modal characters of the sector gate in different water level conditions. The gates are made to decrease its self-vibration frequencies and change modal characters, which are shown by calculations. Reasonable suggestions on the safe operation of the gate are put forward on the basis of computation and analysis.

**Key words:** sector gate; finite element numerical method; fluid-structure interaction; dynamic characteristics

船闸三角门可承受双向水头, 也能够动水中启闭, 近年来在长江下游沿江附近的中低水头船闸建设中, 三角闸门得到了不断应用<sup>[1]</sup>。正在建设中的南水北调中线工程的引(长)江济汉(江)工程中, 汉江航道上的高石碑船闸中, 也采用了三角工作闸门, 该闸门除了承受双向水头外, 还可起洪水季节的挡洪、泄洪作用。以往建成的船闸三角门结构, 主要用在能够承受双向水头的感潮河段的船闸上, 可利用平潮开通闸来提高船闸的通过能力。但兼具通航和挡洪、泄洪作用的高石碑船闸的门扇高度为国内现役和在建船闸三角门之最, 已属于中高水头船闸。闸门结构在满足静

载强度、刚度和稳定性的前提下, 其动力性能如何, 将对闸门结构在运行过程中的廊道输水、门缝泄流等条件下的流激振动和动力反应有重要影响。

从以往的闸门事故原因分析得知: 许多闸门破坏时, 往往发生强烈振动<sup>[2-3]</sup>。而对于闸门振动问题研究, 需从两方面入手<sup>[4-5]</sup>: 一是闸门结构自身的动力特性分析; 二是外界激励荷载的属性。水动力荷载和结构动特性的不利组合作用往往是造成水工闸门强烈振动的根本原因, 而水动力荷载高能区位于闸门结构低频范围造成低阻尼结构共振则常常是闸门振动的主要特征<sup>[6-8]</sup>。实际闸门在运行时受到频率成分丰富的脉动压力作用, 虽

收稿日期: 2012-11-01

作者简介: 祝智卿(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为钢结构。

然每一频率成分的脉动能量很小,但是一旦与闸门固有频率接近即会引起振动,如果干扰力所含能量较大的频率成分与结构固有频率接近就会引起强烈震动<sup>[9]</sup>。

本文采用数值模拟方法,利用ADINA软件进行高石碑船闸三角门流固耦合动力特性分析。考虑流固耦合作用就是考虑流体与闸门结构之间,流体动力、结构弹性与惯性力之间的相互耦合作用,更能反映闸门的实际动力特性。通过闸门结构自身的动力特性研究,并与水流脉动频率的比较,可了解闸门流激振动的可能性,为工程安全运行管理提供技术支持,以保障闸门运行安全。

## 1 工程背景

湖北省高石碑船闸布置在引江济汉通航段出口处,船闸所采用的工作门属于中高水头三角闸门。该船闸承受双向水头,最大水头差达到10.93 m。门叶采用弧形面板,面板中心角65°,圆弧半径 $R=13\ 000$  mm,面板展开后弧长 $L=15\ 520$  mm,闸门高 $H=18.940$  m,面板厚12 mm。主横梁采用H型截面梁,纵向隔板、水平次梁和垂直次梁采用T型截面梁,三角门的支臂结构为圆管球节点空间结构体系,外部支承为顶、底枢支承形式。

## 2 闸门结构有限元分析模型

弧形闸门的自振频率属于低频范围,可以忽略流体速度和可压缩性的影响,结构振动方程为

$$(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_f) \times \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}_s \times \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}_f$ 为水体附加质量矩阵。式(1)的一个特解为

$$\mathbf{u} = \boldsymbol{\varphi} e^{i\omega t} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)可得

$$[\mathbf{k} - \omega^2(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_f)] \times \boldsymbol{\varphi} = 0 \quad (3)$$

因为 $\mathbf{u} \neq 0$ ,所以

$$|\mathbf{k} - \omega^2(\mathbf{M}_s + \mathbf{M}_f)| = 0 \quad (4)$$

由此可以得到结构的自振频率。

高石碑船闸三角门是由弧形面板、梁格、网架式支臂、立柱、浮箱等组成的板、梁、杆复杂空间结构。本文利用ADINA软件对三角闸门进

行计算分析。通过ADINA动力分析中的模态分析(Frequencies/Modes)来进行三角闸门的流固耦合动力特性计算。为准确反映闸门各个构件的实际工作状态,面板、梁格、立柱、浮箱采用壳单元模拟<sup>[9]</sup>,球节点连接的网架式杆件采用梁单元进行模拟。水体采用ADINA三维8节点势流体单元。水体模型长度取10倍水深<sup>[10]</sup>。闸门和考虑流固耦合的闸门有限元分析模型分别见图1和2。

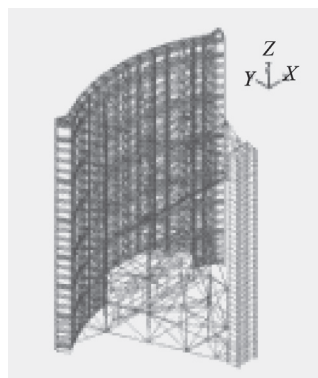


图1 三角闸门有限元模型

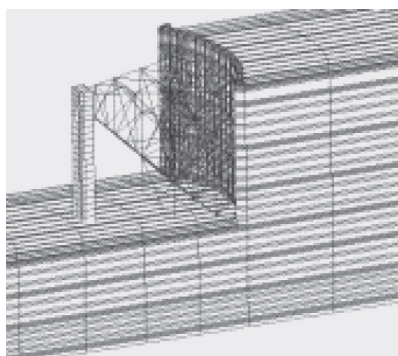


图2 三角闸门和水体有限元模型

根据闸门的工作情况,对于闸门顶枢,沿两个拉杆方向施加水平面内的位移约束,释放其绕竖轴的转动约束;对于闸门底枢,在枢座中心处施加竖直方向的位移约束,沿两个拉杆方向施加水平面内的位移约束,释放其绕竖轴的转动约束。闸门关闭状态时,在羊角接触处,施加与闸室中心线相垂直方向的位移约束。闸门开启时沿液压启闭杆处在水平面内施加沿杆轴方向的位移约束。

## 3 三角闸门自振特性分析

为了分析三角闸门在不同工况下的动力特性,分别计算在无水状态和不同水头条件下考虑

流固耦合影响下的三角闸门自振频率。根据闸门实际运行条件, 选取的5种计算工况如下:

工况1, 无水条件, 即无需考虑流固耦合影响; 工况2, 开门通航过程中, 上游最低通航水位, 水位高程31.21 m, 考虑流固耦合影响; 工况3, 开门通航过程中, 下游最高通航水位, 水位高程38.40 m, 考虑流固耦合影响; 工况4, 闸门关闭时, 正向水位高程为30.10 m, 反向水位高程为27.20 m, 考虑流固耦合影响; 工况5, 闸门关闭时, 正向水位高程为31.21 m, 反向水位高程为42.14 m, 考虑流固耦合影响。其中, 正向水头为面板凹面侧水头, 反向水头为面板凸面侧水头。闸门面板底高程为23.88 m。

提取各工况下闸门前20阶自振频率, 见表1。

振型	工况				Hz
	1	2	3	4	
1	3.42	3.32	3.16	8.30	3.88
2	9.76	8.72	5.17	10.53	6.53
3	11.27	9.48	8.86	10.68	7.35
4	13.80	11.27	10.73	13.84	10.54
5	14.84	13.61	10.91	15.08	10.63
6	15.89	13.84	11.57	15.91	13.86
7	17.14	15.08	13.87	17.18	14.41
8	17.39	15.92	15.08	17.44	15.08
9	17.41	17.21	15.40	17.47	15.45
10	17.54	17.46	15.94	17.60	15.94
11	17.87	17.48	17.21	17.62	16.92
12	18.13	17.61	17.48	17.96	17.23
13	18.16	17.97	17.49	18.14	17.48
14	18.23	18.20	17.61	18.20	17.51
15	18.35	18.20	17.97	18.30	17.61
16	18.97	18.30	18.20	18.42	17.88
17	19.07	18.42	18.30	18.87	17.96
18	19.10	19.05	18.31	19.04	18.20
19	19.24	19.08	18.42	19.17	18.31
20	19.64	19.18	18.57	19.32	18.33

闸门的前20阶自振频率比较密集, 第1阶主频率最低, 无水时为3.42 Hz, 而水位高程为38.40 m, 考虑流固耦合影响, 第1阶主频率降为3.16 Hz。根据以往的闸门水流实测统计分析, 大多数闸

门(93%以上的闸门), 其过闸水流脉动主频在1~20 Hz, 其中有48.3%在1~10 Hz, 超过20 Hz的极少<sup>[11]</sup>。因此闸门较低的主频可能会诱发三角闸门的低频振动。

图3为不考虑流固耦合作用下三角闸门的前4阶振型图。前3阶振型均为三角闸门的整体振动, 分别为绕顶、底枢竖向轴的水平向左右振动、绕径向水平轴的整体扭转、沿竖向轴的上下振动。

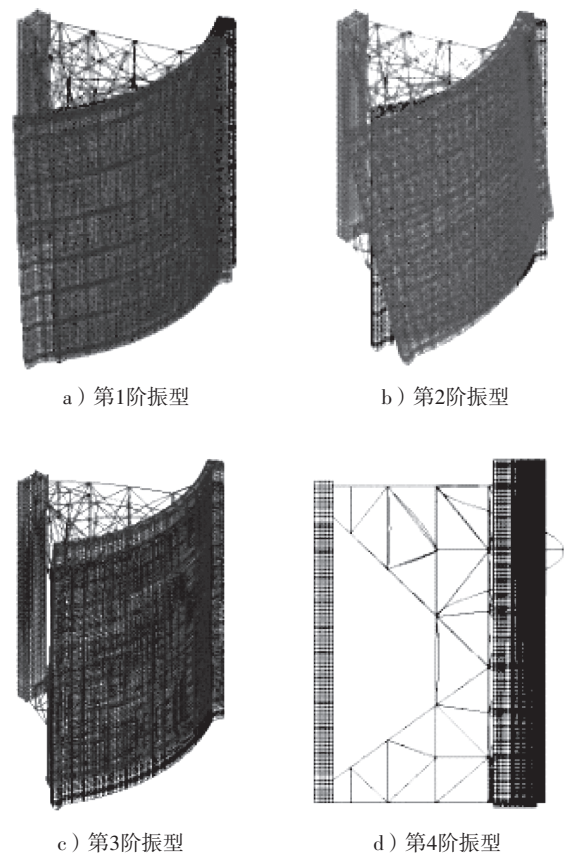


图3 三角闸门

由于水平方向约束较弱, 所以三角门绕顶底枢竖向轴发生水平左右振动可能性更大, 与常规的分析结果一致。三角门4阶以后的各阶振型均为闸门的局部振动, 且多为空间网架结构各杆件自身的局部振动, 自振频率较高, 可避开水流的激振主频率。

由表1可以看出, 考虑流固耦合作用影响时, 三角闸门的自振频率均出现了不同程度的降低, 工况3与工况1相比, 前10阶频率都出现了大幅降低, 其中第2阶频率受流固耦合影响最为显著,

降幅达到47.03%。而第11阶以后的高阶频率受水体影响较小,这是由于高阶频率多为支承网架杆件的局部振动,部分杆件远离流固耦合作用的面板,受流固耦合效应影响较小。另一方面也可看出,随着水头高度的增加,闸门自振频率呈现出下降趋势。这是由于随着水头高度的增加,导致作用在闸门面板上的水体附加质量增加。

闸门关闭状态时,闸门中羊角接触处,两扇闸门产生相互挤压的趋势,闸门羊角约束增加。第1阶频率由开门通航时的绕竖轴的转动转变为沿闸门径向振动,且自振频率提高。对比工况4与工况5,随着水头差的增加,闸门频率降低,第1阶频率降低最为显著,达到53.24%。可见闸门径向振动受流固耦合作用明显。

分析流固耦合情况下三角门的振型可以发现,随着耦合水头的增加,三角闸门振型发生改变。考虑流固耦合作用后,闸门振型都表现出了水头作用范围内的径向振动。工况2与工况3中,闸门的第3阶振型为绕水平轴的转动,第4阶振型为竖向振动,第5阶振型为绕水平轴的转动且都伴随着闸门的径向振动,并且面板梁格系统的振动也出现在高阶振型中。进一步说明,随着水头高度的增加,水体附加质量对闸门动力特性的影响越来越明显,振型模态发生转变,闸门高阶振型模态逐渐向低阶振型模态转变,表现出更多的低阶振型模态特性。闸门的整体振动更加容易诱发。此外,随着闸门前后水头高差越来越大,闸门径向振动越来越明显,径向振动几乎伴随着所有的整体振型之中。水体对闸门切向振动(闸门绕竖轴的转动)的影响较小,对于闸门径向振动(闸门沿径向振动)影响明显。闸门面板梁格系统其自身刚度较大、频率较高,但是随着附加水体质量的增加,面板梁格系统的频率降低较快,所以更容易出现在低阶频率,应当引起注意。

#### 4 结语

1) 三角闸门自振频率分布比较密集。低阶频

率表现为闸门的整体振动,高阶频率为闸门局部杆件振动。

2) 水流对闸门的影响总是使闸门的自振频率降低,振型模态发生变化。随着水头的增加,三角闸门的高阶振型模态,逐渐向低阶振型模态转变,降低了闸门的自振频率,使其更易进入水流脉动频率范围,故流固耦合效应不能忽视。

3) 水体对闸门径向振动影响较大,存在高水头差时,这种作用尤为明显。面板梁格系统自振频率降低明显,更容易出现在低阶模态中。

4) 闸门通航过程中的自振频率较关闭状态时低,通航过程中容易诱发闸门振动,需引起注意。

#### 参考文献:

- [1] 罗家安,孙保虎,黄亚栋,等.中高水头大型三角闸门静力数值分析[J].水运工程,2011(12):127-130.
- [2] 朱召泉,卓家寿,陶桂兰.弧形钢闸门的动力稳定性研究进展[J].水利水电科技进展,1999(5):27-29.
- [3] 章继光,刘恭忍.轻型弧形钢闸门事故分析研究[J].水力发电学报,1992(3):49-57.
- [4] 赵兰浩,李同春,汪凌.水工闸门流激振动响应的一种计算方法[J].河海大学学报:自然科学版,2005(4):404-408.
- [5] 林敦志.闸门振动现象及振动特性分析[J].科技资讯,2010(6):116.
- [6] 严根华.水工闸门流激振动研究进展[J].水利水运工程学报,2006(1):66-73.
- [7] 古华,严根华.水工闸门流固耦合自振特性数值分析[J].振动,测试与诊断,2008(9):242-246.
- [8] 韩璞,薛惠芳,何青.北疆大型水工平面闸门的振动测试[J].河海大学学报:自然科学版,2011(3):332-337.
- [9] 石春霞,刘恭忍,王克成,等.水工弧形钢闸门动力特性研究[G]//中国力学学会.第三届全国结构工程学术会议论文集.北京:清华大学出版社,1994:987-990.
- [10] 邱德修,朱召泉,邱琳.弧形钢闸门流固耦合自振特性分析[J].广东水利水电,2010(1):10-12.
- [11] 徐振东,杜丽惠,才君眉.平面闸门流固耦合自振特性研究[J].水力发电,2001(4):39-43.

(本文编辑 武亚庆)