

基于 ANSYS 的护镜门振动特性分析

盛韬桢¹, 胡友安¹, 厉丹丹²

(1. 河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 护镜门作为大孔口跨度的新式闸门,特殊的力学结构导致其振动特性较为复杂。以南京三汊河双孔护镜门为实例,针对闸门在动水中启闭时,闸门振动频率与闸门开度和振型阶数的关系,基于 ANSYS 模态分析模块,采用广义 Westergaard 公式模拟流固耦合中的附加质量,对于护镜门的振动特性进行研究。结果表明:在低阶模态时,考虑附加质量法的流固耦合模型基本符合真实工况;闸门有发生共振和动力失稳的风险,需要优化闸门结构和改进启闭机构。文章可为之后护镜门设计和优化提供参考。

关键词: 护镜门; ANSYS; 流固耦合; 附加质量; 振动特性

中图分类号:TV663

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)02-0163-05

Analysis on vibration characteristics of goggles gate based on ANSYS

SHENG Taozhen¹, HU Youan¹, LI Dandan²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: As a new type long-span gate, goggles gate's special mechanical structure result in its complex vibration characteristics. This article took Nanjing Sancha River double hole goggles gate as an example, revealed the relation between gate's vibrational frequency, gate opening and modal order when the gate is opened and closed in the flowing water, simulated the added mass in fluid-structure interaction by generalized Westergaard formula based on ANSYS modal analysis module, and researched on goggles gate's vibration characteristics. The results indicate that fluid-structure interaction which considered added mass conforms to real working condition in the low order modes. The gate is discovered that it has risk of resonance and dynamic instability. Gate structure and hoist mechanism need to be improved. The article can provide a reference for later design and optimization on goggles gate.

Key words: goggles gate; ANSYS; fluid-structure interaction; added mass; vibration characteristics

1 研究背景

钢闸门是水工建筑物的重要组成部分,其在挡水和启闭的过程中,闸前的脉动水流会导致闸门发生共振或动力失稳,最终造成闸门结构破坏^[1-3]。护镜门作为一种大孔口跨度的新式闸门,采用半圆弧拱形作为活动门体,在受到水流的径向均布荷载时,根据拱本身的力学特性,理论上仅受到沿拱轴线方向的轴向力,而不存在弯矩和剪力,且沿弧长方向每个受力截面上的荷载相等,因此其受力特性相较于常见的平面、人字闸门有所差异^[4]。同时,与大

部分闸门的挡水面板为一整体不同,护镜门的门体上存在多个可升降的活动小门用以在闸门闭合时调整水位,这导致其自振特性较为复杂。

目前,对于大跨度水工闸门动力特性的研究多集中于平面闸门和弧形闸门^[5-7],同时由于目前国内建成的护镜式闸门仅有3座,因此对于护镜门的研究较为稀少,仅有学者对与护镜式闸门结构相近的大跨度上翻式拱形钢闸门的振动特性进行了研究^[8]。但上翻式拱形钢闸门与护镜门相比,其门体弧度仅为140°,而护镜门则为180°的半圆弧,因此虽然结构类似,但是动力特性仍有较大差异,需进一

收稿日期:2017-10-25; 修回日期:2017-12-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401605); 水利部公益性行业科研专项(201501033)

作者简介:盛韬桢(1994-),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为水工金属结构。

通讯作者:胡友安(1963-),男,湖北黄陂人,博士,教授,硕士生导师,研究方向为水工金属结构。

步研究。

本文以南京三汊河双孔护镜门为实例,运用 ANSYS 模态分析模块对闸门动力特性进行研究。分析时考虑闸门面板与闸前水体的流固耦合效应^[9-10],采用广义 Westergaard 公式模拟附加质量,得到闸门在干、湿模态下不同开度时的振动频率,对比和评估了闸门的安全性能。可为今后护镜门的结构设计和动力学研究提供参考依据。

2 计算方法

2.1 流固耦合基本理论

在动水作用下,闸门结构的运动方程为:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F_s(t) + F_G(t) \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为闸门的质量、阻尼和刚度矩阵; $\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u 分别为振动加速度、速度和位移阵列; $F_s(t)$ 为流体脉动压力引起的荷载阵列; $F_G(t)$ 为作用在结构上的其他荷载阵列。

考虑到水流与闸门的相互作用,水体的振动会显著影响门体的振动特性,因此可将(1)式补充为下述的流固耦合运动方程:

$$(M + M_f)\ddot{u} + (C + C_f)\dot{u} + (K + K_f)u = F_s(t) + G_G(t) \quad (2)$$

式中: M_f 、 C_f 、 K_f 分别为附加质量矩阵、附加阻尼矩阵和附加刚度矩阵,代表水体对于门体的不同作用^[11]。

由于金属闸门自身的结构阻尼对动力特性影响较小,而水体的附加刚度影响不大,且结构上的其余荷载相较于水流荷载可忽略不计,所以闸门的流固耦合只需重点考虑水体附加质量对闸门振动特性的影响,运动方程可简化为:

$$(M + M_f)\ddot{u} + Ku = F_s(t) \quad (3)$$

2.2 附加质量的模拟

在闸门有限元计算中,闸门结构被离散为节点单元,对于闸门挡水面板上的节点 i ,本文采用广义 Westergaard 公式^[12]模拟水体的附加质量:

$$P_i = \frac{7}{8}\rho \sqrt{H(H - Z_i)} \ddot{u}_{ni} \quad (4)$$

式中: P_i 为作用在节点 i 上的动水压力, N/m^2 ; H 为闸门设计水位, m ; Z_i 为节点 i 与闸门底缘的距离, m ; $\ddot{u}_{ni}$ 为节点 i 在流固耦合面上的法向加速度, m/s^2 。

借助辅助面积法,假设在节点附近的面积上动水压力为一常量,则可以将节点上的压力转化为节

点质量力,即下式:

$$M_{ni} = -P_i A_i \quad (5)$$

式中: M_{ni} 为节点的等效法向附加质量力, N ,即为 MASS21 质量单元的 x 方向实常数; A_i 为与节点 i 相关的辅助面积, m^2 , $A_i = \sum_k A_i^{(k)} = \sum_k (A^{(k)} / N^{(k)})$; k 为节点 i 所依附的单元编号(例如采用四边形网格划分模型时,1 个节点一般依附 4 个单元); $A^{(k)}$ 为 k 单元在挡水法向的面积, m^2 ; $N^{(k)}$ 为 k 单元上的节点总数。在 ANSYS 中, A_i 可利用命令流中 `arnode(i)` 命令提取。

3 模态分析

3.1 有限元模型

本文的有限元模型以南京三汊河护镜门为背景,该闸门内圆拱半径 21.2 m,外圆拱半径 22.8 m,门高 6.5 m,吊点中心距 42 m,内外河面板与两根水平主梁成薄壁箱梁结构,门体所受荷载由内外河面板、门柱、水平主梁、竖直次梁和边梁等构件共同承担(图 1)。基于闸门以上特点,采用 shell63 单元模拟闸门面板、梁格和支铰,beam188 单元模拟工字钢和管件, mass21 单元模拟附加质量。闸门主要材料为 Q235B,取弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.274$,密度 $\rho = 7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。护镜门在 ANSYS 中的有限元网格划分如图 2 所示。

3.2 约束工况

闸门闭合时,闸门支铰处所有节点收到 x 、 y 、 z 3 个方向的位移约束和绕 y 、 z 轴的转动约束,闸门底缘所有节点收到铅垂方向的位移约束。

闸门开启时,闸门支铰处所有节点收到 x 、 y 、 z 3 个方向的位移约束和绕 y 、 z 轴的转动约束,闸门吊点处受到沿启闭钢缆方向的位移约束。

3.3 模拟结果

此次研究根据护镜门的运行工况,分别按照仅考虑闸门自身振动特性(干模态)和考虑到流固耦合效应(湿模态)两种情况进行模拟。闸门水位采用设计水位组合:闸门秦淮侧(内河)水位 6.5 m,长江侧(外河)水位 2.1 m,运用水位的降低来模拟闸门开度的变化。由于闸门低阶振动频率较低,与水流脉动频率较为接近,容易发生共振,而高阶振动仅表现为结构的局部振动,对整体结构安全基本不会造成影响,因此本文仅对护镜门的前 10 阶振型进行分析(表 1)。

表 1 护镜门模态分析结果 Hz

阶数	闭合		开度 1 m		开度 2 m		开度 3 m		开度 4 m		开度 5 m		全开
	干模态	湿模态	干模态	湿模态	干模态	湿模态	干模态	湿模态	干模态	湿模态	干模态	湿模态	干模态
1	2.443	1.304	2.442	1.431	2.442	1.590	2.443	1.822	2.445	2.129	2.447	2.363	2.595
2	5.228	2.492	4.091	2.674	4.081	2.957	4.066	3.280	4.047	3.590	4.022	3.887	3.112
3	10.812	4.908	5.212	3.021	5.211	3.273	5.210	3.682	5.210	4.334	5.212	4.942	5.486
4	13.989	6.322	10.799	5.479	10.797	6.247	10.796	7.373	10.794	8.942	10.791	10.259	8.686
5	20.219	6.852	12.892	7.047	12.856	7.973	12.808	9.396	12.748	11.335	12.679	12.242	11.364
6	20.416	6.898	13.951	7.653	13.947	8.868	13.944	10.581	13.942	11.481	13.941	13.239	12.483
7	20.435	7.786	17.971	7.714	17.878	8.928	17.770	11.052	17.648	15.309	17.512	16.838	14.221
8	20.570	7.814	20.168	8.710	20.125	9.878	20.074	11.111	20.018	17.094	19.957	19.352	18.460
9	20.756	8.852	20.424	8.737	20.420	10.093	20.416	12.573	20.413	18.393	20.411	20.106	20.407
10	20.603	8.853	20.427	9.271	20.427	10.157	20.427	12.635	20.427	18.499	20.427	20.406	20.428

4 结果分析

4.1 干湿模态对比

由表 1 可以看出,闸门在干模态和湿模态下的振动频率有着明显差距,当闸门处于闭合工况时,湿模态约比干模态下的振动频率低 46% ~ 67%;随着闸门开度的增大,干模态与湿模态振动频率的差距越来越小;当闸门全开时,由于门前无水,因此干模态和湿模态的振动频率相同。

图 3、4 分别为闸门在干模态和湿模态下的一阶

振型。由图 3、4 可知,闸门在干模态和湿模态下的一阶振型基本相同,均为闸门面板绕两侧支铰的扭转变形,干模态下的最大振幅约为湿模态的 2 倍。图 5、6 分别为闸门在干模态和湿模态下的二阶振型。由图 5、6 可知,闸门在干模态和湿模态下的二阶振型也基本相同,均为闸门面板中部径向向弯曲变形,干模态下闸门的振动幅度较之湿模态更加强烈。10 阶内的其余模态也基本符合上述特性,因此可得出结论,即流固耦合不会改变闸门振动的振型,只会改变闸门的振幅。

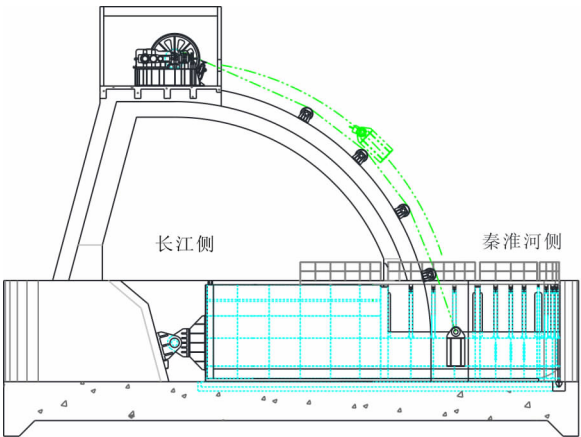


图 1 护镜门结构示意图

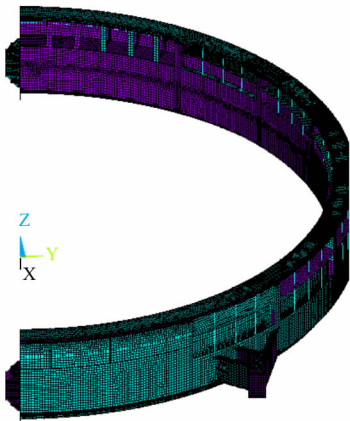


图 2 护镜门网格划分示意图

4.2 开度变化的影响

图 7、8 分别为干、湿模态闸门振动频率与开度的关系。

由图 7 可知,在干模态分析中,除闸门闭合工况,其余闸门不同开度时的频率差距不大。这是因为在不考虑流固耦合的有限元计算中,不同开度闸

门的质量矩阵,阻尼矩阵不变,仅刚度矩阵中的约束刚度会由于闸门起吊角度的不同产生变化,所以整体频率基本不变。而闸门闭合时除了起吊点具有约束,其底缘也具有竖向约束,因此振动频率高于其余工况。

由图 8 可知,在湿模态分析中,闸门开度不变

时,闸门的振动频率随着振型阶数的提高而增大,并且振型阶数越高,振动频率的变化就越大;振型阶数不变时,闸门的振动频率随着闸门开度的提高而增

大,即门前水位越低,闸门振动频率越高,其原因是随着水位的降低,闸前水体的附加质量也随之下降,闸门整体质量矩阵减小,流固耦合效应得到削弱。

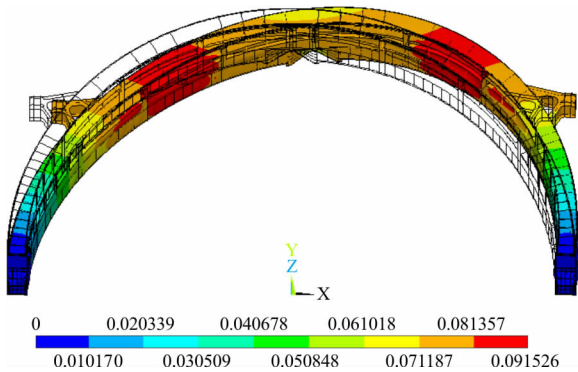
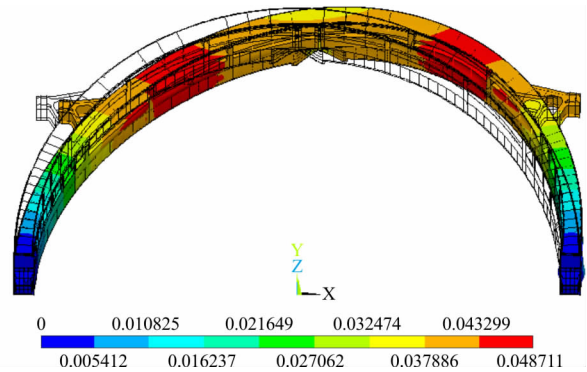


图3 闸门一阶振型(干模态)



~1.5 Hz 左右,与闸门小开度时的一阶频率十分接近,会引起闸门底部的共振和动力失稳,因此闸门在启闭时应避免长时间在开度 1° 处停留。建议今后护镜门设计时优化闸门中部底缘形式,改善水流的流动条件,同时增大底止水的刚度,提高闸门的自振频率^[14]。

护镜门跨度较大且闸门的启闭点与闸门支铰相距较远,闸门开启时启闭力与闸门重心存在较大的偏心距,因此启闭机的振动也会通过启闭钢缆对于闸门产生影响。三汊河护镜门采用固定盘香式卷扬启闭机作为启闭机构,根据李平等^[15]对于高卷扬启闭机主传动扭振系统的研究,闸门由静止到提升过程中启闭机的一阶扭振频率约为 1.95 Hz,十分接近于闸门开度 2~4 m 时湿模态的一阶振动频率。尽管由于启闭钢缆的刚度较低,启闭机振动传递到闸门吊点后引发共振的可能性较小,但仍需重视闸门启闭至小开度时启闭机的振动工况,因此建议今后在护镜门设计时选择液压启闭机对门体进行启闭,其传动平稳且易于实现无级变速,有利于闸门安全运行。

5 结 论

本文利用 ANSYS 模态分析模块对护镜门的振动特性进行研究,分析得到如下结论,可为同类闸门的结构设计与安全优化提供参考:

(1)护镜门振动特性会受到门前水体的影响,流固耦合效应不可忽视。考虑流固耦合效应的湿模态相较于无水的干模态而言,其自振频率降低、振型基本不变、振幅减小。护镜门振动频率随闸门开度的增大而提高,同时闸门振型阶数越高,则振动频率变化越大。

(2)在低阶模态时,采用广义 Westergaard 公式模拟附加质量的流固耦合模型基本符合真实工况。

(3)为防止闸门发生共振以及动力失稳,可以优化闸门中部底缘形式,增大底止水的刚度同时采

用液压启闭机作为启闭机构。

参考文献:

- [1] 孙小峰,马益全. 水工闸门振动问题研究现状及发展趋势浅析[J]. 中国科技信息,2010(23):152+154.
- [2] 赵欣. 基于水工闸门流激振动的分析[J]. 水利科技与经济,2014,20(5):10-12.
- [3] 胡剑杰,胡友安,王煦. 基于 ANSYS 的弧面三角闸门自振特性研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2014,36(6):24-27.
- [4] 谢丽生. 拱形结构在大跨度闸门中的应用研究[D]. 上海:同济大学,2009.
- [5] 谢智雄,贺高年,黄峻,等. 大跨度平面闸门的自振特性研究[J]. 中国农村水利水电,2006(6):69-72.
- [6] 牛文宣,赵冉,苏林王,等. 大跨度弧形闸门静动力学数值分析[J]. 水电能源科学,2013,31(7):173-176.
- [7] 潘树军,王新. 大型平面钢闸门流激振动模型试验与数值模拟[J]. 水电能源科学,2011,29(8):148-151.
- [8] 黄红,高振海,严根华,等. 大型上翻式拱形钢闸门流固耦合静动力特性分析研究[J]. 固体力学学报,2011,32(S1):376-381.
- [9] 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,2008,28(3):242-246.
- [10] 张学森. 基于流固耦合数值模拟的深孔平面钢闸门底缘结构型式研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2011.
- [11] 薛惠芳,王游. 基于 ANSYS 的平面闸门流固耦合振动特性的有限元分析[J]. 安徽农业科学,2012,40(8):5007-5009.
- [12] 王均星,焦修明,陈炜. 龙滩工程底孔弧形闸门的自振特性[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(5):31-34.
- [13] 许兴武. 新型闸门应力变形及振动原型观测实验[J]. 人民长江,2007,38(11):170-173.
- [14] 刘鹏,高振海,严根华,等. 大跨度上翻式拱形钢闸门振动特性及抗振优化[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):74-79.
- [15] 李平,刘晓星,吴涛,等. 高卷扬启闭机主传动扭振系统的建模及其动态性能的研究[J]. 机械设计,2008,25(12):44-47.