



考虑门杆耦合效应的反弧门自振特性分析*

王新¹, 胡亚安¹, 陆阳², 严秀俊¹

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,

通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 中水东北勘测设计研究有限责任公司, 吉林长春 130021)

摘要: 针对高水头船闸大型反弧门结构动力设计安全问题, 进行阀门、门杆系统自振特性三维有限元计算, 探讨门杆耦合特性及主要结构尺寸的敏感性。研究表明, 门杆耦合系统模态更加丰富, 自振特性由吊杆起决定性作用, 系统基频 11.59 Hz, 为吊杆单独弯曲振动, 吊杆-门体耦合自振频率略低于门体, 吊杆长度对系统自振特性影响较大, 支臂外包面板厚度基本没有影响。

关键词: 船闸; 反弧门; 自振特性; 门杆耦合

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0026-05

Self-vibration characteristics analysis of reversed tainter valve considering coupling effect of valve and boom

WANG Xin¹, HU Ya-an¹, LU Yang², YAN Xiu-jun¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,

Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;

2. China Water Northeastern Investigation, Design & Research Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: In view of the dynamic design safety problem of large reversed tainter valve of high water head ship lock, self-vibration characteristics' 3D FEM calculation about the valve and the system of the valve and boom is conducted to study the coupling effectiveness and sensitiveness of the main structure's dimension. It reveals that the boom is dominant for the self-vibration characteristics of the system. The basic frequency of the system is 11.59 Hz and vibration mode is bending vibration of the boom itself. The self-vibration frequency of the valve and boom is slightly lower than that of the valve itself. The self-vibration characteristics of the system are affected obviously by the length of the boom and the thickness of the arm plate has little effectiveness.

Keywords: ship lock; reversed tainter valve; self-vibration characteristic; valve-boom coupling

阀门是船闸输水系统的咽喉, 确保其安全可靠高效运行十分重要。船闸阀门多采用平面阀门和反向弧形阀门两种形式, 低水头(20 m左右及以下)的船闸多采用平面阀门, 高水头船闸(20 m以上)则普遍采用启闭特性、抗空化性能更优的反弧门。阀门空化及流激振动一直是高水头船闸工程的关键技术难题, 尤其近年来单级船闸日益大

型化, 工作水头、阀门尺寸不断增大, 阀门的空化及流激振动问题更加突出。

阀门流激振动问题非常复杂, 存在明显的水流与结构相互作用^[1]: 水流脉动压力是振动的诱因, 一般为低频激励, 主要脉动能量在 10 Hz 内; 阀门结构的动特性是振动的内因, 要求基频尽量脱离水流激励的高能区, 以免发生共振或剧烈振

收稿日期: 2016-09-19

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402001); 国家自然科学基金(51479124, 51479125)

作者简介: 王新(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 从事水工水力学试验与研究。

动^[2]。因此,阀门结构动力设计较为关键,尤其对于总体刚度偏弱的反弧门。通常阀门结构体系中,门叶刚度>支臂刚度>吊杆刚度,可见吊杆是阀门结构中的薄弱环节,而系统的基频也往往由薄弱构件决定,在阀门自振特性分析时应当包括门体和吊杆^[3]。结构自振特性研究通常采用模态试验和数值计算两种方法。大量研究表明,数值计算结果与试验结果基本一致,而且具有诸多优点,故有限元数值计算方法得到广泛应用^[4]。

某单级大型船闸阀门最大工作水头 40.25 m,阀门处廊道孔口尺寸 5.0 m×5.5 m(宽×高),阀门采用双面板全包反向弧形门,反弧外面板半径为 8.2 m,内面板半径为 7.3 m,阀门底缘与底板初始夹角为 90°,摆杆长度 14.9 m,内径 460 mm,外径 500 mm,结构布置见图 1。为了考察结构动力设计的合理性,并为结构优化提供依据,本文采用数值计算方法对该高水头大型阀门、门杆系统自振特性进行研究分析,探讨门杆耦合效应。

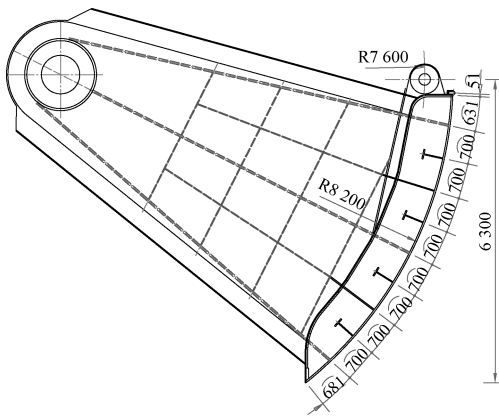


图1 阀门结构布置

1 分析方法及模型

结构动力平衡方程为:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (1)$$

式中: M 、 C 、 K 分别为系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; \ddot{U} 、 \dot{U} 、 U 分别为结点加速度、速度和位移列阵; F 为荷载列阵。自振特性是系统固有属性,是在无外部激励条件下可能发生的振动状态的集合。多自由度体系的自振特性分析是计算结构的自振频率和振型,并忽略阻尼的影响:

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (2)$$

对弹性系统,式(2)的解可写为:

$$U = \varphi_i \cos \omega_i t \quad (3)$$

式中: ω_i 为第 i 阶自振圆频率; φ_i 为对应的振型向量。

建立阀门门体与吊杆(摆杆)三维有限元模型,精确模拟各部分结构。坐标系:阀门径向为 X 轴,下游面板外法向为正;侧向为 Y 轴,向左侧为正;切向为 Z 轴,向上为正。模型采用八节点六面体实体等参单元离散,单元总数为 572 280,节点总数为 794 548,其中,阀门门体单元数为 556 720,吊杆单元数为 15 560(图 2)。

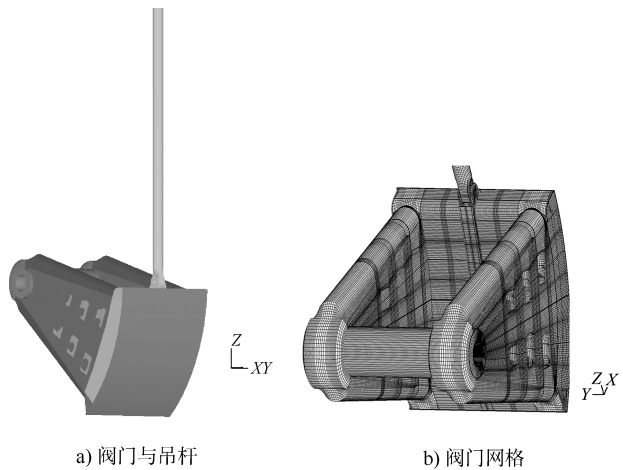


图2 有限元模型

为探讨门杆耦合效应,进行了阀门及门杆系统的自振特性分析。在阀门本体计算中吊杆不参与,但从吊耳的约束处理上来反映吊杆对门体自振特性的影响:当吊耳无约束时,即忽略了吊杆对门体的约束作用,其自振频率偏低;当吊耳采用固定约束,其约束作用强于吊杆对其实际的约束作用,其自振频率偏高。因此,吊杆影响下门体的自振频率介于两种约束条件之间。

计算中钢材弹模取 206 GPa,泊松比 0.296,密度 7 850 m³/s,不考虑水体影响。阀门支铰采用 3 个方向位移约束,吊杆参与时其端部采用 3 个方向位移约束。

2 自振特性

2.1 阀门

在吊杆不参与计算的情况下,通过吊耳自由

状态和吊耳固定约束状态 2 个边界工况计算，能够包住吊杆对门体自振特性的影响。2 个工况阀门前六阶自振频率及振型描述见表 1，前四阶振型分别见图 3 和图 4。可以看出，在不考虑吊耳约束的情况下，阀门门体第 1 阶频率为 13.46 Hz，表现为门体沿侧向的振动，门体基频较高，已脱离水流脉动压力的高能区，不会发生共振或剧烈振动；

门体第 2 阶频率为 16.97 Hz，表现为阀门沿切向的振动；门体第 3 阶自振频率为 24.17 Hz，表现为阀门沿侧向的扭振；第 4 阶自振频率为 61.95 Hz，表现为阀门支臂对称的弯曲振动；第 5 阶自振频率为 70.83 Hz，表现为阀门支臂同向弯曲振动；第 6 阶自振频率为 86.47 Hz，表现为阀门支臂对称的弯曲扭振。

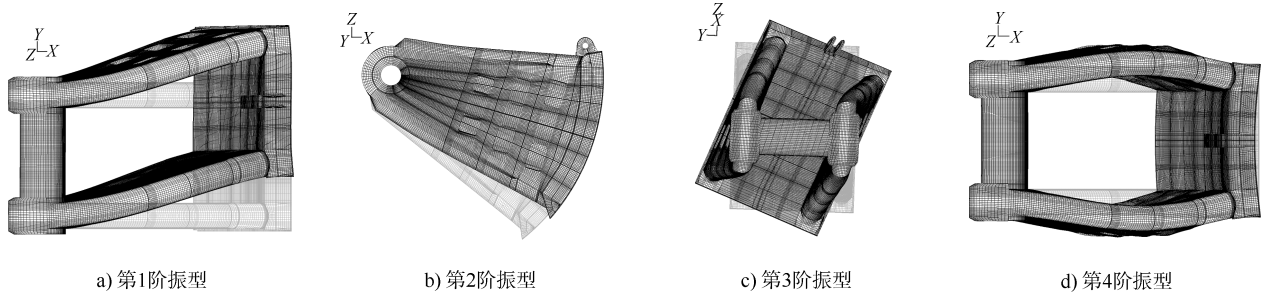


图 3 吊耳无约束时前 4 阶振型

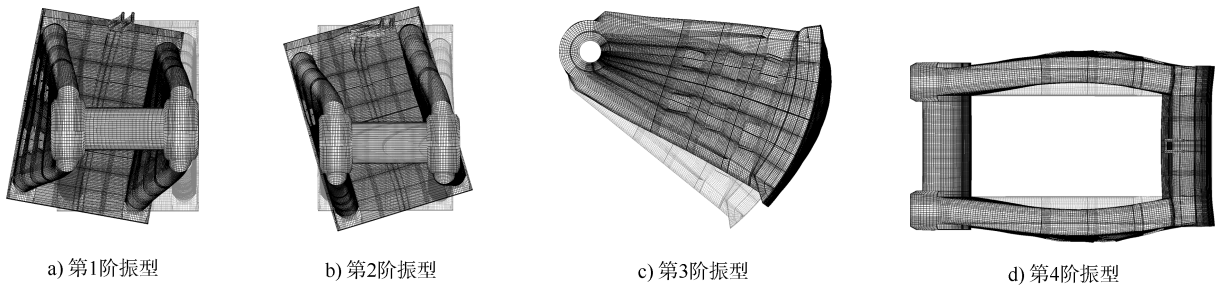


图 4 吊耳固定约束时前 4 阶振型

表 1 阀门自振特性

约束条件	阶数	频率/Hz	模态
吊耳无约束	1	13.46	阀门结构沿侧向摆振
	2	16.97	阀门结构沿切向振动
	3	24.17	阀门结构沿侧向扭振
	4	61.95	支臂沿侧向对称弯曲振动
	5	70.83	支臂沿侧向同向弯曲振动
	6	86.47	支臂沿侧向对称扭振
吊耳固定约束	1	17.04	阀门结构沿侧向摆振
	2	33.18	阀门结构沿侧向扭振
	3	55.35	阀门结构沿切向振动
	4	62.73	支臂沿侧向对称弯曲振动
	5	71.13	支臂沿侧向同向弯曲振动
	6	87.00	支臂沿侧向对称弯曲扭振

型发生一定变化，对高阶频率计振型影响不大。第 1 阶频率为 17.04 Hz，基频提高约 2.5 Hz，表现为门体沿侧向的摆振，但受吊耳约束影响，阀门振动略偏斜；门体第 2 阶频率为 33.18 Hz，提高非常显著，表现为阀门沿侧向的扭振，与吊耳自由状态时的第 3 阶振型相同；门体第 3 阶自振频率为 55.35 Hz，表现为阀门沿切向的振动，与吊耳自由状态时的第 2 阶振型相同。可见，受约束影响，吊耳自由状态时的 2 阶和 3 阶频率发生交换，原第 2 阶沿切向振动受到影响最大，由 16.97 Hz 提升至 55.35 Hz；第 4 阶后自振频率和振型基本一致，可见高阶频率及振型变化不大。

从 2 种吊耳约束情况计算结果可以看出，考虑吊杆影响时，阀门门体基频介于 13.46~17.04 Hz 之间。

在考虑吊耳固定约束的情况下，阀门门体自振频率相对吊耳自由状态时均有所提高，低阶振

2.2 门杆系统

吊杆分为多节铰接相连, 最下一节摆杆下端与门体吊耳相连, 上端受滑槽水平约束、受上节吊杆竖直向约束, 因此, 考虑摆杆参与计算, 分析门体与吊杆系统的自振特性。一般情况下, 吊杆刚度偏低, 是系统的薄弱构件, 其参与会导致系统的自振频率降低。

门杆系统前 6 阶自振频率及振型描述见表 2, 前 6 阶振型见图 5。可以看出, 在吊杆参与后, 系统的自振特性与门体的自振特性相比有明显改变。吊杆自身的振动首先被反映出来, 如系统第 1 阶自振频率为 11.59 Hz, 表现为吊杆自身沿侧向的弯曲振动, 第 2 阶自振频率为 12.38 Hz, 表现为吊杆自身沿径向的弯曲振动; 随后门体的振动才体现出来, 如第 3 阶自振频率为 13.04 Hz, 表现为吊杆-门体系统沿侧向的弯曲振动, 仍然吊杆振动占优, 导致该阶自振频率略低于阀门自身的第 1 阶自振频率, 同样, 系统第 4 阶自振频率为 19.16 Hz, 表现为吊杆-门体系统沿切向的上下振动, 第 5 阶自振频率为 22.36 Hz, 表现为吊杆-门体系统沿侧向的扭转振动, 均略低于相同振型的门体自振频率, 吊杆的参与造成系统的频率略偏低; 高阶模态中, 吊杆自身的高阶弯曲振动又得到体现, 如第 6 阶和第 7 阶, 第 8 阶表现为支臂的对称弯曲振动。

表 2 门杆耦合自振特性

阶数	频率/Hz	模态
1	11.59	吊杆沿侧向弯曲振动
2	12.38	吊杆沿径向弯曲振动
3	13.04	吊杆及阀门沿侧向弯曲振动
4	19.16	吊杆及阀门沿切向上下振动
5	22.36	吊杆及阀门沿侧向扭转
6	34.03	吊杆沿径向 2 阶弯曲振动
7	34.31	吊杆沿侧向 2 阶弯曲振动
8	59.47	支臂沿侧向对称弯曲振动

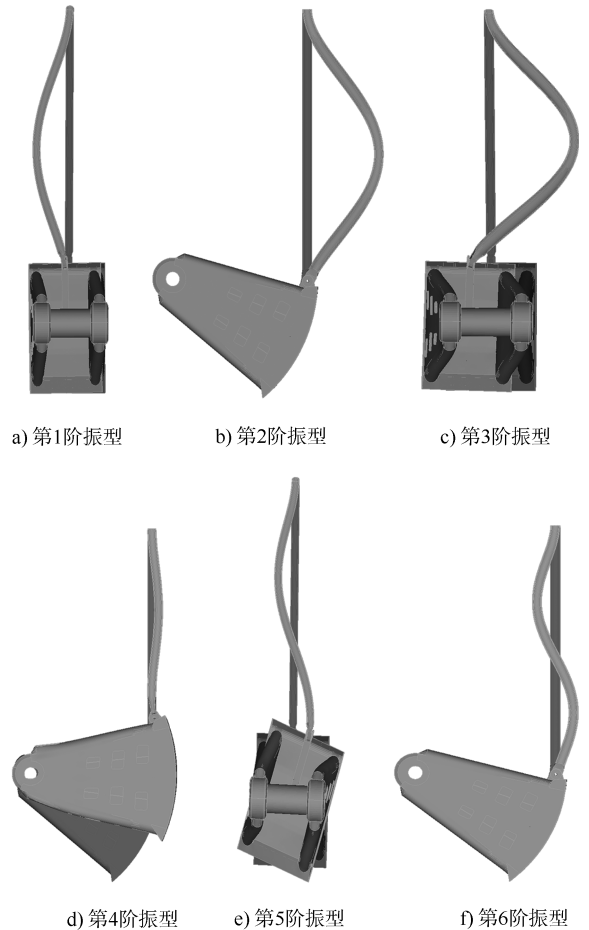


图 5 门杆系统前 6 阶振型

总体上看, 吊杆-门体系统的自振频率低于门体的自振频率, 吊杆刚度对系统频率起控制作用, 但基频较高(11.59 Hz), 已脱离水流脉动的高能区, 正常情况下不会发生强烈振动, 吊杆的参与计算, 使阀门的相同振型的自振频率略微降低, 体现了吊杆的影响。

2.3 主要结构尺寸敏感性分析

从门体-吊杆结构体系可知, 吊杆刚度最弱, 其次是支臂, 因此, 从对自振频率的影响出发, 研究摆杆长度、支臂外包面板厚度等主要结构尺寸的敏感性。摆杆长度在 14.9 m 的基础上增减 2 m, 支臂面板厚度在 45 mm 相对较强的基础上减至 35 mm 和 25 mm, 前 6 阶自振频率分别见表 3 和表 4。可以看出, 吊杆对系统自振频率影响较明显,

尤其以吊杆振动为主的振型，频率变化率已超过了杆长变化率，摆杆长度越长，自振频率越低，摆杆增长至 16.9 m 时，1 阶、2 阶自振频率已经低于 10Hz，而支臂外包面板厚度对系统自振特性影响微乎其微，因为吊杆对系统刚度起了决定性作用。

表 3 摆杆长度影响

阶数	自振频率/Hz		
	杆长 12.9 m	杆长 14.9 m	杆长 16.9 m
1	12.45	11.59	9.37
2	15.86	12.38	9.74
3	16.27	13.04	12.70
4	19.84	19.16	18.62
5	22.70	22.36	21.97
6	44.53	34.03	26.82

表 4 支臂外包面板厚度影响

阶数	自振频率/Hz		
	支臂 25 mm	支臂 35 mm	支臂 45 mm
1	11.34	11.50	11.59
2	12.38	12.38	12.38
3	12.71	12.91	13.04
4	19.17	19.22	19.16
5	20.79	21.70	22.36
6	34.01	34.02	34.03

2.4 讨论

众所周知，实际工程中阀门结构的自振特性受到水体、约束等因素影响。其中水体会以附加质量的形式使工作阀门的自振频率降低。大量研究表明，水体的耦合作用一般会导致自振频率降低 20%~30%；而约束条件影响相对较大，如阀门的侧止水、顶止水、底止水等，在试验或计算中是未予考虑的，实际工程中止水约束会使自振频率大幅提高。部分工程阀门自振特性试验及原观数据见表 5。可以看出，原型实测的阀门基频普遍高于模型研究结果。从自振特性研究的角度，无论是模型试验还是数值计算，在不考虑水体、约束等因素影响的情况下，与实际情况相比总体偏于安全。因此，对于该工程大型反弧门，分析得到门杆系统的基频较高，结构设计总体合理，阀门支臂面板厚度在满足结构设计强度允许的情况下，可以适当减薄。

表 5 阀门自振特性

工程	工况	模态频率/Hz			
		1 阶	2 阶	3 阶	4 阶
五强溪船闸反弧门	1:15 模型	17.83	60.99	83.21	141.46
	原型	75.69	96.83	118.31	150.01
水口船闸反弧门	1:15 模型	9.35	30.22	66.75	70.33
	原型	44.37	50.61	55.56	72.59
三峡船闸反弧门	1:10 模型	16.3	24.2	33.2	38.7
	原型	27.5	62.5	115.0	125.0

3 结论

1) 吊杆不参与计算，利用吊耳两种不同约束方式，分析获得考虑吊杆影响的门体自振基频介于 13.46~17.04 Hz 之间，表现为阀门沿侧向的摆振。

2) 门体-吊杆耦合系统，吊杆刚度相对较弱起决定性作用，系统前 2 阶振型表现为吊杆的单独振动，自振频率分别为 11.59 Hz 和 12.38 Hz，第 3 阶表现为吊杆与阀门的耦合振型，吊杆侧向弯曲振动、阀门侧向摆振，自振频率为 13.04 Hz，吊杆参与后，系统的自振频率相对阀门自身略有降低，耦合系统模态更加丰富。

3) 吊杆长度对系统自振特性影响明显，支臂外包面板厚度影响很小，吊杆长度较合适，在满足结构强度的情况下，可以对支臂外包面板厚度适当减薄。

4) 阀门结构设计总体合理，门体及门杆耦合系统的自振频率均较高，已完全脱离动水激励的高能区，正常情况下吊杆及门体不会发生剧烈的流激振动。

参考文献:

[1] 王新,严秀俊.船闸平板输水阀门动力优化及流激振动特性分析[J].水运工程,2013(12):151-154.
 [2] 邢磊,李同春,王新.淮阴三站灯泡式贯流泵抗振安全度评价[J].水电能源科学,2008,26(5):116-118.
 [3] 严根华,阎诗武,樊宝康,等.高水头大尺寸闸门流激振动原型观测研究[J].水力发电学报,2001(4):65-75.
 [4] 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.