

平面闸门流激振动分析及防振措施

邓淇, 沈春颖, 马江霞

(昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 在水利枢纽的泄水、引水和通航系统等各种过水孔道上, 平面闸门用于调节上下游水位、控制流量、拦截水流、排放泥沙、放运船只等作用。闸门流激振动往往会危及闸门结构安全, 危害人民生命财产安全。因此闸门结构振动成为水利工程中亟待解决的问题, 本文从平面闸门流激振动研究进展、闸门振动破坏事例和闸门振动机理等方面分析, 重点讨论闸门振动原因及解决措施, 以尽可能避免闸门振动造成的危害。

关键词: 平面闸门; 振动; 措施; 流激振动

中图分类号: TV34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2021) 12—0112—03

平面闸门在水利工程中得到十分广泛的应用, 可用于调节上下游水位、控制流量、拦截水流、排放泥沙等作用。近年来我国经济高速发展, 其中水利行业也在快速发展, 以往高坝发展缓慢, 如今高坝发展迅速。平面闸门承压水头、单宽流量不断增大, 孔口和闸门尺寸等也随之增大, 加之大量闸门需要满足部分开启要求所带来的运行条件的复杂化, 闸门结构的流激振动及安全可靠性等问题凸显。

1 平面闸门流激振动研究进展

1.1 国外研究进展

目前, 许多学者对闸门流激振动进行一系列研究。穆勒^[1]通过实验发现平面闸门振动现象, 并把振动命名为涡激振动, 振动发生要满足两个条件: 闸门开度较小、上下游水位差较小。Hardwike^[2-3]通过实验分析验证穆勒的研究发现, 同时测量作用在闸门底缘的涡激力, 是为了更好叙述闸门的自激过程, 并且采用无量纲的折算速度和闸门的自振频率与阻尼比等相应参数预测闸门的振动形式。Kolkman^[4]和 Vrijer^[5]描述直升闸门振动的流体惯性模式, 认为闸门振动过程中, 闸孔的有效过水面积变化导致流量的脉动, 其流量的脉动与惯性效应在孔口局部产生压力差的变化加速闸门的振动。Jongeling^[6]等研究闸门流激振动条件, 发现闸门流激振动与闸门开度、底部倾角有关, 给出闸门倾角在 45° 或 60° 有利于避免闸门振动发生。

1.2 国内研究进展

王桂青^[7]对陡河水库输水洞工作闸门振动, 进行观测分析, 提出闸门各种工作条件下应采取的措施;

赵欣^[8]对闸门流激振动破坏事例研究, 分析闸门振动原理及特点, 提出避免闸门振动措施; 严根华^[9]通过对现场闸门流激振动参数检测, 寻找闸门振动的原因, 提出预防措施保证闸门安全稳定分析; 肖兴斌^[10]等结合三峡水电站排沙孔工作平板闸门, 分析高水头闸门水力特性, 研究分析闸门底缘后漩涡水流剪切空化引起的闸门振动, 提出相关措施防止闸门空蚀及振动措施, 确保闸门正常进行运行。

国内外学者在流固耦合产生的平面闸门振动问题上取得许多成果, 但目前对诱发平面闸门振动机理尚无清楚的理论解释, 迄今仍没能提出有效分析和处理这种复杂振动现象的理论和方法, 有待进一步探索。而平面闸门的研究基于理论与数值模拟较多, 根据实际工程结合较少。然而模拟与数值分析难与实际工况相吻合, 因此想要精准研究分析, 需要根据实际工程来进行^[11]。

2 流激振动破坏闸门事例

我国刘家峡水电站, 1969 年由于闸门开度过大导致胸墙门体发生水锤, 进一步发生剧烈的振动, 由于剧烈振动泄水道闸门遭到破坏, 第二年刘家峡水电站泄水道闸门正式投入使用后, 工作人员发现闸门出现强烈振动情况, 经相关部门检测, 发现不仅整个门的振动很强, 而且门体的结构应力也很大。这种现象的出现对闸门结构造成极大危害, 经技术部门检查, 闸门振动原因是止水设施出现问题, 进而引起闸门的流激振动^[11-15]。

1995 年, 福尔瑟姆泄水道闸门开启泄水时, 泄水闸出现强烈振动, 导致弧形闸门右支臂向内弯曲, 铰轴因出现剪应力而被断裂, 最终导致闸门破坏。帮捏·威

尔溢流坝 14 米高的平板平面闸门开度较小时会引发剧烈的自激振动；巴克莱坝 15.2m*16.8m 弧形闸门开度较小情况下引起 30HZ 的剧烈振动开度较小时发生振幅^[11-15]。

3 平面闸门振动机理

闸门发生振动有较多因素造成，但专家们通过讨论后一致认为，动水作用不平衡的主要原因是闸门与动水相互接触的一刹那立即发生，振动现象也随着出现。许多情况下，闸门的作用力等同于结构外力。另外一种情况，闸门自身结构与附近质点运动有着相互的作用，平面闸门上有多种作用力时，这些力会对闸门整个结构做功，输入的能量使系统在满足阻尼能量消耗后连续振动^{[9][16]}。国内外学者建议把流激振动划分为三种，见表 1^[15-16]。

表 1 流激振动分类

分类	说明
外部诱发振动	主要是水流波动性产生脉动压力和脉动速度引起闸门振动，但这类振动一般不包括内部因素。
稳定性差诱发振动	主要是水流的不稳定性和反馈机制两种因素共同作用形成外力造成的结果，与振动的闸门内部结构密切相关，不稳定的反馈机制与流体力学中的流体或物体共振有关。
运动诱发振动	主要是闸门本身的结构产生的循环往复的作用力，该作用力可加大结构运动，若结构运动不存在，振动也会随着消失。

加拿大 Weaver^[17] 根据振动特征将流激振动分为水流诱发的强迫、自控、自激振动；美国学者 Blevins^[18] 根据流体引发振动类型分成两类，一类是稳定流动，一类是非恒定流动；德国 Naudascher·E^[19] 根据流体引发结构振动机理分为外部激发振动、不稳定激发振动、运动激发振动、共振流体振动。

目前，许多专家学者对闸门流激振动进行大量研究，但平面闸门振动是一特殊的流体力学问题，涉及到水流条件、闸门结构及其相互作用，属于流体激发振动，其平面闸门结构复杂性、振动现象多变性以及振动机理尚未完全掌握，因此，平面闸门振动研究探索道路依然十分艰辛^[20-21]。

4 闸门振动原因及解决措施

振动破坏的闸门总是和某些水力条件所形成的振源有着密切的关联，当采取相关的措施后，振源得到有效的控制，振动会伴随着消失。为避免振动的发生，所以必须弄清振动发生的原因，找到合理有效的措施进行

治理，根据水力条件可将振源分为以下几类^[22-25]：

(1) 闸门止水漏水因素。由于闸门止水刚度与柔韧度不足，选取的止水类型与闸门不恰当等其他原因，闸门发生振动^[26]。当漏水量达到一定量时，闸门顶止水射出作用于止水部件上，闸门振动发生^[27]。对于上述这种情况，应提高施工质量，保障止水设施具有非常好的气密性。根据材料质量、止水位置及尺寸进行一个有效的规划和安排，将座板和止水紧密接触，尽可能地减少或不发生因闸门漏水，导致闸门不能继续正常的工作而发生闸门振动。

(2) 波浪冲击闸门因素。水闸前水位靠近胸墙周围，上游产生较大风浪、涌潮时会作用胸墙底部与闸门露出水面的部位形成封闭气囊，此时空气会由于形成的压力差而被压缩，会出现较大的气囊冲击力，引发闸门振动。为避免这种情况的发生，在闸门上游因采取恰当的措施：装配浪排、防浪栅等，来降低波浪对闸门造成巨大冲击。同时也可在胸墙底部设置通气孔，目的是在闸门正常泄水起到排气的作用，这样能够有效地降低风浪、涌潮对闸门的冲击，从而避免引发闸门振动。

(3) 平面闸门的底缘型式因素。平面闸门底部设计不合理，则会造成水力条件不能得到满足，进而会导致闸门启闭难度加大，尤其是会引起水流脉动压力增加。若要避免上述情况发生，要注意刀刃形底缘和挑出的角度，根据相应闸门设计规范要求，上游倾角不得小于 45°，下游倾角不得小于 30°，使得闸门底缘流线平顺，有效降低闸门发生振动频率；实际操作时底部主梁宽度大小要小于闸门在实际操作时开度大小，目的是阻碍开度较小的强振区。

(4) 闸后淹没水流引起振动因素。平面闸门开度在适当的范围内，闸门泄水时闸后会出现淹没水跃，水跃对闸门产生剧烈冲击，其原因是水流产生剧烈的脉动压力引发闸门振动，该振动为受迫振动，是在随机荷载下发生。此时应改变运行工况，尽可能使闸孔水流为一个自由出流状态，这样可避免闸门振动现象发生。如果不可避免出现淹没水跃，则尽可能增加闸门悬架结构的支撑结构刚度。

5 结语

国内外因平面闸门振动破坏事故较多，但由于水流流态、闸门结构复杂性成为流激振动中较难分析的重难点

点。现有理论和经验很难解决由于流激振动造成闸门破坏的各种情况,因此闸门设计时应严格按照相应闸门设计规范,加强施工质量。当闸门发生振动破坏时,及时进行分析,对其破坏原因做出准确的判断进而采取相应的措施,防止闸门振动产生的危害。

参考文献:

[1] Kanne. Naudascher and Wang. On the mechanism of self-excited vertical vibration of under flow gate. International Conference on Flow Induced Vibrations. Englang, 1987.

[2] Hardwike. Flow-Induced Vibration of Vertical-Lift Gate. ASCE. Journal of the Hydraulics Division, 1974, HY5:31~54.

[3] Hardwik and Wang. Stability of a rising sector gate. International Conference on Flow-Induced Vibrations. England, 1987.

[4] KOL KMAN PA、VRIJER A. Gate edge suction as a cause of self-exciting vertical vibrations[J]. Proc 17th IAHR Congress, 1977, 17(2):425~437.

[5] VRIJER A. Stability of vertically movable gates[J]. Sym on Practical Experiences with Flow-Induced Vibration, 1980, 30(4): 428~435.

[6] Jongeling T H D. In-flow vibrations of gate edge, International Conf On Flow Induced Vibrations[C]. England, 1987.

[7] 王桂青. 陡河水库输水洞工作闸门振动观测分析[J]. 海河水利, 2016(01):48-50.

[8] 赵欣. 基于水工闸门的流激振动的分析[J]. 水利科技与经济, 2014, 20(05):10-12.

[9] 严根华. 大坝泄水闸门结构流激振动监测及强烈振动控制技术[J]. 大坝与安全, 2016(03):44-54.

[10] 肖兴斌, 王业红. 高水头平板闸门水力特性研究[J]. 水利水电科技进展, 2001(04):29-32+46-70.

[11] 陈扬. 平面钢闸门流固耦合振动特性及稳定性研究[D]. 山东农业大学, 2019.

[12] 郭博文, 鲁立三, 高玉琴, 宋力, 王荆. 基于大涡模拟的水工钢闸门流激振动分析方法[P]. 河南省:CN111507030A, 2020-08-07.

[13] 马斌, 郭乙良. 水工闸门振动研究现状及发展趋势[J]. 水利水运工程学报, 2019(02):55-64.

[14] 陈赞. 闸门流激振动及水流流态数值模拟研究[D].

郑州大学, 2019.

[15] 刘晓燕. 水工钢闸门振动现象及振动特性分析[J]. 现代农业科技, 2010(16):250.

[16] 吕传亮. 水工闸门振动分析及防振措施[J]. 水利规划与设计, 2017(12):118-120+155.

[17] Weaver D S. 论水流引起水工建筑物的振动和减振措施[M]. 北京: 水利电力出版社, 1979.

[18] Blevins P D. 流体诱发振动[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.

[19] Naudascher E. Flow-induced loading and vibration of gates. Lin Proc Int Symp on Hydr for High Dams[C], Beijing, Invited lecture, 1988:1~18.

[20] 牛利敏. 长引水压力隧洞平面闸门启闭力及稳定性试验研究[D]. 天津大学, 2016.

[21] 刘海浪, 陈乐, 蒋建国. 水工平面闸门的流激振动的激励机理[J]. 中国计量学院学报, 2005(02):122-126.

[22] 水工设计手册(第二版), 第七卷[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.

[23] 潘锦江. 闸门振动问题探讨[J]. 水利水电科技进展, 2001(06):36-39.

[24] 史喆琼, 李继栋. 闸门振动分析及防振措施[J]. 科技视界, 2018(18):37-39.

[25] 李明. 弧形闸门动力特性及流激振动数值模拟[D]. 长沙理工大学, 2013.

[26] 严根华. 水工闸门自激振动实例及其防治措施[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(增刊2).

[27] 胡楠. 考虑流激振动的水工闸门受力分析[D]. 南京: 河海大学, 2006.

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(编号: 2020J0056); 昆明理工大学引进人才科研启动基金项目(编号: KKS201904008)。