

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.02.008

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(2): 55-64. (MA Bin, GUO Yiliang. Current research status and development trend of hydraulic gate vibration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2019(2): 55-64. (in Chinese))

水工闸门振动研究现状及发展趋势

马 斌, 郭乙良

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350)

摘要: 随着我国高坝大库的建设, 闸门结构的设计安装要求不断提高。闸门振动往往会影响大坝的正常运行, 而闸门振动是一个复杂的结构性问题, 研究难度较大。为解决振动问题, 需清楚闸门振动的诱因并采取相应措施。基于现有的理论方法和成果, 从振动现象、闸门振动等级标准、研究方法、闸门振动诱因分析及结构优化措施、弧形闸门动力稳定研究、振动的主动控制方法等多方面出发, 详细介绍了闸门振动问题的研究进展, 并提出了闸门振动急需解决的问题和未来6个研究方向, 为闸门振动问题的研究提供一定参考。

关 键 词: 闸门振动; 研究方法; 闸门振动诱因; 振动控制

中图分类号: TV663

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2019)02-0055-10

随着我国高坝大库的建设, 闸门设计朝着大孔口、大流量、高水头方向发展, 钢闸门的建设安装要求也不断提高。水工钢闸门按门页的外观形状主要分为平板钢闸门和弧形钢闸门两类。平板钢闸门的挡水面是板式平面, 具有构造简单可靠, 制造安装难度小、运输较方便等优点; 弧形钢闸门挡水面为圆柱体的部分弧面, 闸门不设门槽, 启闭力较小, 水力学条件较好, 故常作为工作闸门应用于各种形式的水库大坝中。

历史上不乏闸门因振动失稳导致大坝失事事故。1995年7月, 美国加利福尼亚州福尔瑟姆坝溢洪道闸门在例行开闸泄水过程中, 闸门产生巨大振动, 进而弧形闸门右支臂向内侧弯曲, 闸门支铰铰轴被剪断, 导致闸门破坏, 闸门右半边部分被冲到库区下游^[1]; 2014年, 付亮等^[2]的研究中提及湖南省溪水电厂7#和8#进水口工作闸门在机组甩负荷工作和过速试验两种情况下均发生了剧烈振动, 最终导致闸门的反向支撑损坏, 给水电站运行带来巨大的安全隐患。由此可见, 闸门振动会对水电站的安全运行构成巨大威胁, 闸门振动已成为当今水利工程中一个重要课题。本文就此介绍了闸门振动现象的研究现状和未来研究方向, 为以后研究提供参考。

1 水工钢闸门振动现象的描述与认识

1.1 闸门振动现象及分类

水工钢闸门(包括闸门门叶、支承结构、止水部件等)属于弹性体系, 在某些因素(如高速水流冲击)作用下会发生振动现象。当水头较低, 扰动较小时, 振幅和频率较小, 振动对水电站安全运行基本无影响; 但当水头较高、流量较大时, 振幅和频率相应增大, 闸门振动加剧, 危及大坝水库安全运行。因此, 控制闸门振动

收稿日期: 2018-07-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0401705); 国家自然科学基金面上项目(51779167, 51779166); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51621092)

作者简介: 马 斌(1979—), 男, 安徽宿州人, 副教授, 博士, 主要从事高坝泄洪消能安全研究。

E-mail: mabin97@tju.edu.cn 通信作者: 郭乙良(E-mail: guoyl95@163.com)

是水库大坝安全运行的一项重要课题。

实际研究中发现,闸门振动往往是在流固耦合作用下产生的,国内外学者对流激振动激励机理已有了较多研究,下面介绍几种代表性的分类方法。

首先是美国学者 Blevins^[4]按照流体诱发的振动类型将其分为稳定流动和非稳定流动两大类,又根据诱发振动的原因细分出了多种振动形式,如图 1 所示。

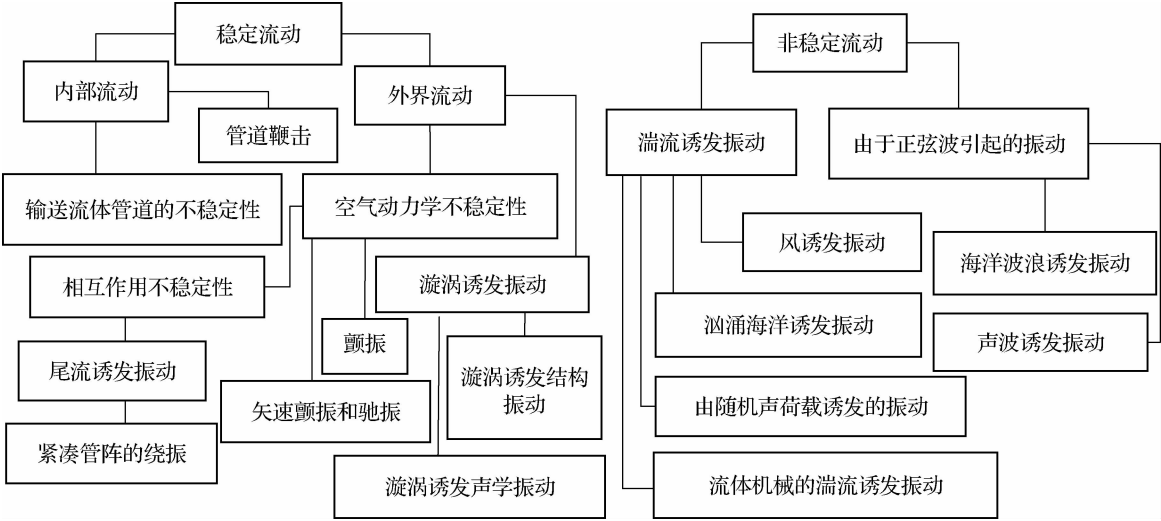


图 1 Blevins 流体诱发振动分类

Fig. 1 Fluid-induced vibration classification given by Blevins

德国学者 Naudascher^[5]按激励原理将振动类型分为 3 类:(1) 外部原因诱发振动。由于水流具有波动性,水流波动产生的脉动压力或脉动速度引发闸门振动,此种振动通常不包括振动系统内部因素。(2) 不稳定原因引起闸门振动。由不稳定水流引起的作用力,这种情况在工程中很常见,比如当水流流经闸门底缘处时,由于流态的变化产生不稳定旋滚以及交变剪切流在闸门底部的相互作用。(3) 运动引起的振动(自激振动)。这种振动的产生是由闸门自身结构运动引发周期性作用力,再反作用于闸门上引起的,振动会随着闸门运动的消失而逐渐减弱并消失。后两种振动往往具有较大的振幅,实际情况中闸门振动往往是由多种原因引起的,需要具体分析。

练继建等^[6]研究表明,对闸门安全影响最大的振动类型是大幅度不稳定性振动和闸门的自激振动,并给出了负阻尼失稳和负刚度失稳两种形式。针对前文所述的两种振动类型,在前人研究的基础上,分别给出了弧形闸门、大跨度壳式闸门和水力自控翻板的振动稳定性指标,为设计无大振幅不稳定性振动的闸门提供了很好的参考依据。

1.2 闸门振动等级标准

当今工程设计和运行中还不能完全避免闸门振动的现象,当出现闸门振动时,需要对闸门振动的剧烈程度给出具体的评判等级。在水利水电工程中,建议将振动对闸门的危害程度分为 4 个等级:

- (1) 基本不振:属于 1 级,振动量一般可以忽略不计,在工程中比较少见。
- (2) 微小振动:属于 2 级,其振动量可控制在允许范围之内,无危害性,在工程中普遍存在。
- (3) 中等振动:属于 3 级,振动量接近于允许的最大值,因该等级振动会对闸门结构安全构成威胁,需要加强监测并采取一定的措施控制振动。
- (4) 严重振动:属于 4 级,振动量值达到甚至超过允许值,该种振动非常危险,不允许出现。

参照以上 4 个等级,采取以下两种准则作为振动的评判依据。具体准则如下:

- (1) 采用振动的均方根位移值作为振动的参考值,依照美国 Arkansas 河闸门振动危害程度标准判定,

动应力值不应大于结构材料允许应力值的 20%,可简化称为“位移和动应力”判据^[7]。具体判别标准为:平均位移 $0 \sim 0.0508 \text{ mm}$, $0.0508 \sim 0.2540 \text{ mm}$, $0.2540 \sim 0.5080 \text{ mm}$, 大于 0.5080 mm ; 对应振动危害程度为忽略不计(可正常运行)、微小危害、中等危害和严重危害。

(2) 结构部件的动态响应振幅与频率之间的关系应满足 Patrikat 公式,即结构构件的振幅 A 与结构构件频率 f 的综合效应,在对数坐标上将危害程度划分为稳定、合理稳定、可以采用、稍不稳定、不稳定和很不稳定 6 个区域,并且给出了安全临界振幅 A 应小于某频率 f 的函数表达式,即:

$$\lg A < 3.14 - 1.16 \lg f$$

该准则可简称为“振幅与频率的关系”^[8]。

2 闸门振动研究方法及先进技术

闸门振动属复杂的水弹性力学问题,至今仍未搞清楚振动的发生机理。闸门流激振动问题的研究方法目前主要分为原型观测、模型试验和数值模拟三类。除此之外,基于混沌理论对闸门振动机理进行研究是近年来比较新的一种研究思路。

2.1 原型观测

由于闸门振动的复杂性,原型观测是最常用的研究方法。针对闸门振动问题,主要指水工钢闸门动水压力、动力响应和结构动力特性的观测。

2.1.1 动水压力观测 在闸门局部开启或动水启闭过程中由于水流脉动压力的作用引起闸门振动,当脉动水压力的频率接近结构低频区时,会出现共振现象,进而导致结构破坏。故在动水压力的观测中需要观测脉动水压力的频谱特征,及脉动水压力的最大值、最小值和均方根值。脉动水压力的测量主要采用压电式脉动压力传感器。由于实际测量中需要在面板上打孔安装传感器,这样的操作容易导致面板结构受损。严根华等^[10]在实际测量中,将底缘螺栓取出后把传感器安置在螺栓孔中,也测得了较为理想的脉动压力特征信息。对于原型观测数据的分析处理,多采用随机函数的方法来估计数据的频谱特征,分析振动的内在机理。

2.1.2 动力响应观测 闸门的动力响应观测内容包括振动加速度、振动应力和振动位移。通过应变片测得应变大小,依据胡克定律计算得到测点应力值。在闸门不同部位安装加速度传感器,通过传感器来采集振动加速度。压电式加速度传感器因具有体积小、重量轻、频域宽及可靠性高等优点得到了较为广泛的应用。通过对振动加速度信号的二重积分来获取振动位移,也可采用目前精度最高、定位最准确的三维摄影测量技术采集^[11]。该技术从不同视角拍摄同一事物,通过三角测量原理对图像中同一特征点的像素位置相差值进行计算,最终得到该特征点的三维坐标^[12]。测量数据完成后,运用随机函数理论和谱分析方法处理数据,得到闸门振动量级大小和相应的谱特征。

2.1.3 结构动力特征 闸门失稳通常是因闸门共振所致,因此有必要对闸门结构的动力特性进行观测,观测内容包括结构的固有频率、阻尼比、振型等。大型结构的动力特性测量方法主要包括试验模态分析法和工作模态分析法。试验模态分析法又具体分为共振法、脉动法和锤击法 3 种,一般试验往往采用锤击法。在天生桥弧门^[13]和万安枢纽弧门^[14]的原型观测中,从不同方向对闸门整体和支臂局部进行测试,最终得到共同的规律,即支臂局部相比于整体在同一振动方向上的测量结果偏大。

2.2 模型试验

在模型上量测闸门振动特性和应力状态,要求模型同时满足水流相似和结构相似条件。因相似率和模型材料的限制,同时在一个模型上满足水流相似和结构相似难以实现,故闸门振动试验通常分为水流试验和结构试验,在不同的模型上分别量测闸门的结构特性和水流脉动特性。因此无法获得实际运行时结构与水流相互作用的振动特性,这就使闸门运行安全性的判定只能通过间接比较的方法进行。这种判断往往不

够准确,因为按水流相似条件制作的闸门模型,只保证了与水流接触面的几何相似,不考虑弹性力与质量力的影响,实际上闸门与水流之间的相互作用会对结构的振动特性产生很大影响,不可忽略;另一方面,按照结构相似条件制作的闸门模型,由于没有合适的模型材料,模型难以承受较高水压,且闸门的结构振动试验只能在空气中进行,无法考虑流固耦合作用的影响,因此这种试验也不尽合理。

针对该问题,相关学者做了大量研究,提出了水弹性模型试验方法。水弹性模型试验的关键就是找到满足相似条件的材料,但由于满足水弹性相似条件的材料比较难找,在 20 世纪 80 年代就出现了变态水弹性模型。此类模型采用 PVC 材料制作,通过增加材料的厚度使模型刚度近似达到相似,并通过在模型上粘贴附加质量使质量分布近似相似。历史上进行了许多这样的闸门振动试验:1992 年,长江科学院曾采用这种方法进行过三峡船闸输水廊道反弧段闸门的动力特性和流激振动模型试验研究^[15]。这种模型可近似地揭示闸门的流激振动特性,但存在一定误差,且不能进行动应力测量。

近年来,水弹性模型材料问题已基本解决,全水弹性模型试验也越来越普遍^[16-17]。马斌^[18]针对高拱坝模型试验问题,详细论述了水弹性模型的相似原理和模拟范围、针对材料特性对拱坝动力特性的影响,给出了水弹性模型的模拟范围,并实际应用到了拉西瓦高拱坝及反拱形水垫塘流激振动响应问题中;李火坤等^[19]根据水弹性相似要求,模拟制作了闸门-支撑结构-启闭系统水弹性模型,在局部开启的条件下进行了流激振动试验,研究了弧形闸门流激振动各水力学要素的变化趋势,了解了弧形闸门振动的部分特性。

2.3 数值模拟

水工钢闸门受水流影响会发生变形和运动,变形和运动又会反过来影响流场,这种相互作用称为流固耦合。流固耦合一般可分为两类,一类为仅发生在流体与固体交界面上的耦合作用,例如闸门振动、船舶工程中的船舶表面与水接触的相互作用都属于此类耦合作用;另一类为发生在流体和固体两项域内部的耦合作用,例如水利工程中的渗流问题,流体会渗入土体内部,二者在土体内部相互作用、相互影响。

流固耦合的概念源于 20 世纪 30 年代,后经不断发展,其研究也逐步加深。现在运用计算机模拟流固耦合作用的数值模拟方法已经基本普及,该法首先对耦合作用的控制方程进行离散,对离散后的各个微元逐步求解,最终可达到求解整个控制方程的目的。其中对控制方程的离散通常采用有限元法、边界元法和有限体积法。

Kizenkidwicz 给出了求解流固耦合问题有限元法的一般格式^[20]。而有限元法中的欧拉法因其克服了拉格朗日法中的一些弊端且求解方程更简单,故其一般格式常作为有限元法的基本方程。潘文祥^[21]采用有限元软件 ANSYS 计算了弧形闸门的干湿模态,分析并给出了闸门支臂的优化方案。借助边界元法可将三维的流固耦合问题转化为一维问题,该法适用于求解接触型耦合问题。严根华等^[22]将流体和闸门结构的耦合作用看作求解流体运动的边值问题,通过三维边界元和有限元的混合模型计算了闸门的自振频率,计算结果和模态试验结果吻合较为理想。有限体积法则通过积分形式计算每个网格的积分方程最终求解整个求解域。董克青等^[23]运用 CFD 计算软件 FLUENT 建立了水库、引流道、工作闸门和蜗壳的三维数值模型。利用有限体积法计算了闸门动水闭门过程,并对实际工况和设计工况进行对比分析,发现在两个剪断销剪断情况下闸门无法闭门的原因是摩擦力过大,并指出随闸门开度减小,闸门会发生垂向振动。

目前用数值模拟方法求解流固耦合问题已得到了较为普遍的应用^[24-25],但现有计算方法中忽略了水体附加阻尼、附加刚度等问题,针对闸门复杂边界问题模拟的效果也不理想,今后需加强这些方面的研究。

2.4 混沌理论在闸门振动问题中的应用

混沌源于非线性体系,即在确定的体系中出现看似无规律的现象,以及在看似无规律、无序的现象中隐藏特有的规律性。早在 19 世纪末混沌理论就已经被提出;1963 年,气象学家 Lorenz^[26]在数值试验中发现“确定性的非周期流”现象;1984 年郝柏林编写的《混沌》一书对我国混沌理论的发展具有深远影响。

闸门振动是一种非常复杂的、非线性现象,无法通过简化模型的方式来研究复杂的振动规律;因其振动本身为非线性的,故在测量原型或水弹性模型试验后,通过混沌理论分析数据即可得到流激振动的混沌特

性,了解闸门振动的内在规律。混沌理论为闸门振动的研究提供了一种新的思路。近年来也有学者开始了这方面的研究,2014年,罗贝尔^[27]以闸门振动中实测数据为依据,以混沌理论为基础,分别运用混沌初步识别方法、相空间重构理论、混沌特征量对比分析等方法,研究了闸门振动过程中高速水流的运动特性和振动加速度中蕴含的规律,揭示了闸门振动中存在的混沌现象及特征;2018年,张健等^[28]在研究弧形闸门支臂振动时运用混沌理论,识别出了弧形闸门支臂振动时的混沌非线性动力学行为,并利用 MATLAB 进行数值模拟,发现了混沌现象产生的途径。

3 闸门振动诱因分析及闸门优化措施

闸门振动会影响水电站运行安全,严重时会引起重大事故,因此有必要研究闸门振动失稳的原因。根据研究成果,将闸门振动诱因分述为以下几点,并针对不同诱因相应地提出了闸门优化措施。

3.1 闸门止水漏水引起的振动

闸门止水因刚度不足、水封设计不当、水封构造不合适或止水底板安装不平整等原因,导致闸门局部漏水而引起的闸门振动^[29]。从止水与闸门底板处漏出的高速水流作用于止水部件上,引起止水部件振动并带动闸门振动,当漏水量较大时,水流从闸门顶止水射出,直接作用于闸门梁格引起闸门振动^[30]。对于该种情况,应提高施工质量,保证闸门面板、水封、胸墙平整度,严控止水密封性,定期维护和更换水封,消除因水封局部漏水所形成自激振动的隐患^[31]。皎口水库底孔弧形闸门止水曾因水封设计不当,顶止水发生翻卷导致局部漏水,在小开度和较大开度运行时闸门支臂剧烈振动,最终闸门失稳引发严重事故,后通过改进水封设计,优化闸门结构解决了闸门振动问题^[32]。

3.2 波浪冲击闸门引起的振动

当闸前水位接近胸墙底部或略低于胸墙时,较大的风浪、涌潮现象会在胸墙底部或弧形闸门漏出水面的部位形成封闭气囊。空气被压缩后产生较大的压力作用于闸门上,引起闸门振动,当振动过大时会发生弧门支臂失稳。为保证泄流过程的排气通畅,应在胸墙底部设置通气孔,并在门前设防浪栅,可有效减小涌浪对闸门的冲击,从而避免闸门产生振动^[30]。

3.3 因平面闸门底缘形式不当引起的振动

平面闸门底缘形式不当同样会引起闸门振动。不合适的底缘形式会造成闸门底缘处流线不平顺,在闸底处易产生负压,闸门启闭难度增大,水流脉动压力突增,最终引起闸门强烈振动。为避免出现这种情况,在设计平板闸门时,应力求通过闸门底部的流线顺畅,按照闸门设计规范,平板闸门底缘倾角以上游倾角不小于 45° ,下游倾角不小于 30° 为宜;当不能满足设计角度要求时,应采用适当的补气措施;对于高水头大流速的情况应考虑把闸门底主梁设计为封闭式结构,以求闸底过流畅通,改善水流流态^[33];且在运行过程中尽量保证闸门开度不小于底部主梁宽度,闸后无淹没出流。

3.4 平板闸门门槽空蚀引发的闸门振动

闸门在运行过程中,当水流流经门槽部位时,因门槽的突变导致水流流态突变,在门槽附近发生负压空化,造成空蚀破坏,水流产生的负压引起闸门振动。针对这种情况,需要在满足过流要求的前提下,尽可能降低门槽处的突变,保证水流流态平稳,具体细节应严格按照规范^[34]要求并严控施工质量;对于一些高水头、大流速的异型门槽,在必要情况下需进行数值模拟和减压试验来保证闸门不会出现振动现象^[33]。

3.5 闸后淹没出流引发的闸门振动

在某些运行工况下闸后会发生淹没出流,闸后淹没水跃对闸门产生强烈冲击,巨大的脉动水压力会引发闸门的强迫振动,威胁闸门的安全运行。为避免出现这种情况,首先应考虑如何将闸后涡流尾迹推至远离闸门的下游,保证闸后流态平稳;例如根据实际运行需求调整运行工况,避免靠近闸门下游段产生淹没水

跃;若无法调整运行工况,则建议提高闸门及闸门悬吊结构、支撑结构的刚度来保证闸门的安全运行^[33]。

3.6 支承结构不当、运行工作参数等引起的闸门爬行振动

研究发现,闸门的支承结构设计不当、运行工作参数不宜、支承结构直径过小、闸门自重过轻或闸门止水漏水均有可能引起闸门发生大幅度爬振现象。爬振现象最早被发现于机械领域^[35],在数控机床低速运行时经常会出现移动部件时快时慢、忽跳忽停的现象,这样反反复复的运动现象称为爬振。近些年在水工平板钢闸门运行过程中也发现了类似现象。具体如图2所示,根据波形特点,将持住力划分为AB、BC和CD段。首先随着事故门的不断下落,闸门上所受的水推力逐渐增大,支承结构的摩阻力也相应增加。对于闸门启闭速度较慢的情况,当闸门自重、所受下吸力等竖直向下的合力不足以克服闸门所受的摩擦力时,闸门停止下落,此时钢丝绳微松,闭门持住力减小,对应于图中AB段;紧接着因水流脉动的影响,闸门在某一时刻受到的竖直向下的力增大,支承结构处的静摩擦力转变为动摩擦力,闸门突然开始向下运动,持住力迅速增大,对应于图中BC段;当持住力不断上升至C点时,闸门即完成了一个典型周期的爬振。最终,若水流脉动引起的下吸力也不足以克服闸门摩擦力时,闸门无法完全闭门,持住力降低至零。这样的过程称为闸门的爬振现象。对于平板闸门的爬行振动,需通过改变闸门的支承结构、降低上游工作水位、提高闸门启闭速度、增大支承结构直径或适当增加闸门配重等方式来减轻甚至消除爬振现象。

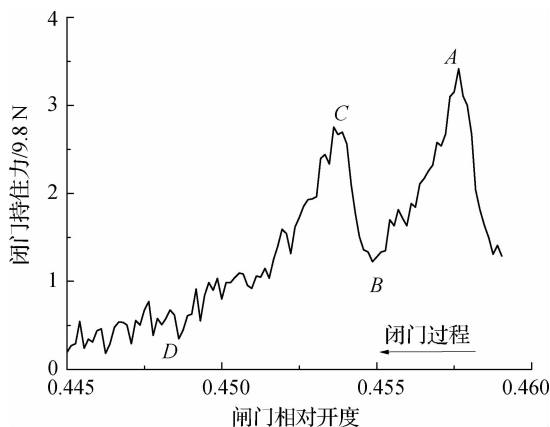


图2 闸门爬振特性分析示意

Fig.2 Schematic diagram of gate vibration characteristics

除上述6种引起闸门振动的诱因,在某些特殊情况下闸门也会发生振动,如某些低水头弧形闸门,当闸前水位高于弧形闸门门顶高程时,产生闸顶和闸底“双层过流”的复杂情况,恶劣的过流条件会在闸后形成水流旋滚不断冲击闸门,引起闸门的强烈振动;又比如某些深孔泄洪洞中的闸门,在闸门开启或关闭过程中会在闸后出现明满流交替的恶劣水流现象,水流剧烈翻滚引起闸门强烈振动^[36];在一些运用了液压启闭机的表空弧形闸门中,双缸不同步或启闭机液压油缸静密封过紧,造成在启闭闸门过程中活塞杆卡阻,都会引起闸门振动^[37]。对于这些特殊情况下的闸门振动,需针对性地设计解决方案。如针对潜孔式闸门需注意闸后通风补气的设计,在闸后段设置通气孔,在流道内充水过程中可帮助闸后段向外排气,在流道泄水过程中向流道内补气,减轻闸门振动。

3.7 特殊情况下的闸门振动

除上述6种引起闸门振动的诱因,在某些特殊情况下闸门也会发生振动,如某些低水头弧形闸门,当闸前水位高于弧形闸门门顶高程时,产生闸顶和闸底“双层过流”的复杂情况,恶劣的过流条件会在闸后形成水流旋滚不断冲击闸门,引起闸门的强烈振动;又比如某些深孔泄洪洞中的闸门,在闸门开启或关闭过程中会在闸后出现明满流交替的恶劣水流现象,水流剧烈翻滚引起闸门强烈振动^[36];在一些运用了液压启闭机的表空弧形闸门中,双缸不同步或启闭机液压油缸静密封过紧,造成在启闭闸门过程中活塞杆卡阻,都会引起闸门振动^[37]。对于这些特殊情况下的闸门振动,需针对性地设计解决方案。如针对潜孔式闸门需注意闸后通风补气的设计,在闸后段设置通气孔,在流道内充水过程中可帮助闸后段向外排气,在流道泄水过程中向流道内补气,减轻闸门振动。

4 弧形闸门动力稳定

弧形闸门是水工钢闸门中十分重要的一类。针对弧形门振动的相关研究也一直是国内外研究的重点。但到目前为止,关于弧形闸门振动的研究还处于理论探索阶段,包括弧形闸门设计方法在内的很多的问题还未能得到有效解决。

相关学者通过多种研究方法对弧形闸门振动问题进行了深入研究。姬锐敏等^[9]对弧形闸门原型观测中运用到的观测方法、技术手段和分析处理方式进行了讨论。针对典型的几类弧形闸门运用现有的闸门振动安全评价方法进行评价,发现不同方法得出的结论之间有一定偏差,闸门振动的安全评价缺少统一的评价标准。赵兰浩等^[38]结合模型试验和数值模拟两种方法,将模型试验上测得的水流脉动压力转化为节点荷载,作为输入条件施加于有限元模型上,利用随机振动法计算弧形闸门流激振动的应力响应和位移响应,既

节约了时间,又具有一定准确性,为大型弧形闸门的安全评估提供了参考依据。针对弧形闸门发生的参数共振,章继光等^[39]调查分析了20余座失事的低水头轻型弧形闸门,认为闸门失稳是由于支臂发生失稳所致。但其分析的闸门均为低水头轻型弧形闸门,并不能准确反映高水头弧形闸门的空间框架效应。总之,弧形闸门因参数振动导致动力失稳是闸门发生振动失稳的主要原因,但目前关于参数振动的研究还十分有限,缺乏统一的评价标准,需加强这些方面的研究。

5 水工钢闸门的振动控制

水工钢闸门振动控制的主要目的是为保证闸门在任何开度下均可正常高效运行。下面着重介绍通过主动和被动控制的方法来解决闸门振动问题。2014年,廖国江^[40]针对磁流变弹性体(MRE)在振动控制应用中存在的问题,对吸振和隔振问题做了相应研究,解决了MRE在振动控制中的器械设计和控制算法问题,初步实现了MRE的工程应用;2017年,盛涛等^[41]运用液体质量双调谐阻尼器(TLMD)技术成功实现了阻尼器对结构振动的有效控制。虽然MR阻尼器的原理还未研究清楚,阻尼器的振动控制理论未研究透彻,包括MR阻尼器的具体布置位置、参数设置等问题都没有形成完整的技术体系,可是从已有的研究成果来看,MR阻尼器无疑可对闸门振动起到很好的控制作用,越来越多的学者也开始关注如何通过阻尼器件主动控制闸门振动,运用数值模拟和全水弹性模拟相结合的方法,具体研究如何通过MR阻尼器件解决闸门振动问题^[42]。

6 未来研究方向

虽然已经有了一些研究成果,但闸门振动问题并未完全解决,还需持续深入地研究。对于未来的研究方向,可参考以下几点:

(1) 关于水工钢闸门强迫振动和自激振动已有的研究成果,可考虑设计一套动力计算体系,为实际工程提供相应的计算指导。

(2) 水工钢闸门的参数振动研究尚停留在数值模拟和理论分析阶段,对闸门参数振动的机理性研究还需加强,同时需加强闸门模型试验和原型观测的相关研究,加快完善闸门参数振动的相关理论。

(3) 在实际工程中,参数振动、自激振动、强迫振动三者往往会同时发生,关于三者同时发生时的相互耦合状态研究尚存空白,需加强这方面的研究。

(4) 关于闸门振动的主动控制理论、具体操作方法尚未研究清楚;针对闸门振动研究方法中混沌理论的具体应用还处于刚刚起步的状态;对于引发闸门爬振现象的诱因尚处于研究阶段,在后续研究中仍需加强,为闸门的设计和安全运行提供更为全面的技术指导。

参 考 文 献:

- [1] HINDLEY M. 福尔瑟姆坝溢洪道闸门失事调查[J]. 水利水电快报, 1996, 17(13): 12-14. (HINDLEY M. Investigation on the wreckage of the spillway of Folsom Dam[J]. Express Water Resources and Hydropower Information, 1996, 17(13): 12-14. (in Chinese))
- [2] 付亮, 陈龙, 张晓曦, 等. 柘溪水电厂事故闸门振动原因及减振措施研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(1): 207-214. (FU Liang, CHEN Long, ZHANG Xiaoxi, et al. Study on the cause and suppression of emergency gate vibrations at Zhexi hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2014, 33(1): 207-214. (in Chinese))
- [3] LEWIN J. Hydraulic gates and valves in free surface flow and submerged outlets [M]. London: Thomas Telford Publishing, 2001.
- [4] 白菜文斯 P D. 流体诱发振动[M]. 吴恕三, 荆志彪, 王觉等, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983. (BLEVINS P D. Fluid-

- induced vibration[M]. Translated by WU Shusan, JIN Zhibiao, WANG Jue, et al. Beijing: Mechanical Industry Press, 1983. (in Chinese))
- [5] NAUDASCHER E. Flow-induced loading and vibration of gates[C]//Proc Int Symp on Hydr for High Dams, Beijing, 1988: 1-18.
- [6] 练继建, 彭新民, 崔广涛, 等. 水工闸门振动稳定性研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 1999, 32(2): 171-176. (LIAN Jijian, PENG Xinmin, CUI Guangtao, et al. On the stability of gate vibration[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology), 1999, 32(2): 171-176. (in Chinese))
- [7] 李火坤. 弧形闸门流激振动特性及其结构优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2004. (LI Huokun. Study on the flow-induced vibration characteristics of radial gate and its structural optimization[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [8] 李炳源, 王小峰. 水利水电工程钢闸门振动分析与评价[J]. 科技资讯, 2017(33): 78, 80. (LI Bingyuan, WANG Xiaofeng. Vibration analysis and evaluation of steel gates in water conservancy and hydropower engineering[J]. Science and Technology Information, 2017(33): 78, 80. (in Chinese))
- [9] 姬锐敏, 蒋昌波, 许尚农, 等. 弧形闸门流激振动原型观测方法探讨[J]. 交通科学与工程, 2013, 29(2): 71-78. (JI Ruimin, JIANG Changbo, XU Shangnong, et al. Prototype observation method of radial gate flow-induced vibration[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2013, 29(2): 71-78. (in Chinese))
- [10] 严根华, 陈发展. 溢流坝表孔弧形闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(2): 140-145. (YAN Genhua, CHEN Fazhan. Prototype observation and study of flow-induced vibration of radial gate at spillway dam outlet[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(2): 140-145. (in Chinese))
- [11] 胡木生, 杨志泽, 张兵, 等. 蜀河水电站弧形闸门原型观测试验研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(2): 90-100. (HU Musheng, YANG Zhize, ZHANG Bing, et al. Study on prototype experiment of radial gates at Shuhe hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(2): 90-100. (in Chinese))
- [12] 李美菊, 苏显渝. 投影数字散斑的立体匹配[J]. 激光技术, 2004, 28(5): 550-553. (LI Meiju, SU Xianyu. Stereo matching by means of digital speckle [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 550-553. (in Chinese))
- [13] 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. (YAN Genhua, PEI Shiwu, FAN Baokang, et al. A study of flow-induced vibration for the high-head and large dimension gate[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2001(4): 65-75. (in Chinese))
- [14] 吴杰芳, 张晓平. 大坝底孔弧形闸门原型振动试验研究[J]. 人民长江, 1993, 24(3): 5-9, 63. (WU Jiefang, ZHANG Xiaoping. Prototype study on bottom sluice tainter gate vibration[J]. Yangtze River, 1993, 24(3): 5-9, 63. (in Chinese))
- [15] 吴杰芳, 曹晓丽, 张晓平, 等. 闸门流激振动水弹性模型材料研制及其应用[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(2): 38-40, 43. (WU Jiefang, CAO Xiaoli, ZHANG Xiaoping, et al. Development and application of hydroelastic model materials used for simulating flow-induced gate vibration[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(2): 38-40, 43. (in Chinese))
- [16] 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. (YAN Genhua. Research development of flow-induced gate vibration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1): 66-73. (in Chinese))
- [17] 辛华荣, 王建, 严根华, 等. 大型平面有轨对拉式弧形闸门流激振动特性及抗振措施[J]. 水利水运工程学报, 2012(6): 87-94. (XIN Huarong, WANG Jian, YAN Genhua, et al. Flow-induced vibration characteristics of large and flat rail pull radial gate and vibration control measures[J]. Hydro-Science and Engineering, 2012(6): 87-94. (in Chinese))
- [18] 马斌. 高拱坝及反拱水垫塘结构泄洪安全分析与模拟[D]. 天津: 天津大学, 2007. (MA Bin. Safety analysis and simulation of flood discharge of high arch dam and counter-arch plunge pool[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [19] 李火坤, 练继建. 水工弧形闸门流激振动特性物模-数模联合预测与安全分析[J]. 水力发电学报, 2007, 26(3): 69-76. (LI Huokun, LIAN Jijian. Joint prediction and safety analysis of the flow-induced vibration of hydraulic radial gate using physical and numerical model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(3): 69-76. (in Chinese))
- [20] 王辉, 岑章志, 杜庆华. 粘性流体中弹性板振动的有限元耦合问题[J]. 固体力学学报, 1998, 19(2): 95-105. (WANG Hui, CEN Zhangzhi, DU Qinghua. Vibration analysis of elastic plate submerged in incompressible viscous fluid by coupling finite element method[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1998, 19(2): 95-105. (in Chinese))

- [21] 潘文祥. 泄洪底孔弧形闸门-闸墩耦合动力特性及支臂优化研究[D]. 天津: 天津大学, 2013. (PAN Wenxiang. Study on the coupled dynamic characteristics of the radial gate and the pier of bottom outlet flood discharge and its arm optimization [D]. Tianjin: Tianjin University, 2013. (in Chinese))
- [22] 严根华, 阎诗武. 水工弧形闸门三维水弹耦合共振频率的数值计算[J]. 水利水运工程学报, 1993(1): 47-53. (YAN Genhua, YAN Shiwu. Numerical calculation of the frequencies of 3-dimensional coupled hydroelastic resonant vibrations of radial gate[J]. Hydro-Science and Engineering, 1993(1): 47-53. (in Chinese))
- [23] 董克青, 桂林, 刘凯. 水电站工作闸门动水关闭数值模拟分析[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2014, 40(3): 428-433. (DONG Keqing, GUI Lin, LIU Kai. Numerical simulation about fast gate hydrodynamic closing of hydropower[J]. Journal of Southwest Minzu University(Natural Science Edition), 2014, 40(3): 428-433. (in Chinese))
- [24] 严根华. 水动力荷载与闸门振动[J]. 水利水运工程学报, 2001(2): 10-15. (YAN Genhua. Hydrodynamic load and gate's vibration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(2): 10-15. (in Chinese))
- [25] 张维杰, 严根华, 陈发展, 等. 深孔弧形闸门静动力特性及流激振动[J]. 水利水运工程学报, 2016(2): 111-119. (ZHANG Weijie, YAN Genhua, CHEN Fazhan, et al. Static and dynamic characteristics of high pressure radial gate and its flow-induced vibration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 111-119. (in Chinese))
- [26] LORENZ E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1963, 20(2): 130-141.
- [27] 罗贝尔. 基于混沌理论的高速水流和流激振动特性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014. (LUO Beier. Research on the characteristics of high-velocity flow and flow-induced vibration based on chaos theory[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014. (in Chinese))
- [28] 张健, 谢智雄. 弧形闸门支臂结构的非线性振动及混沌现象[J]. 水力发电, 2018, 44(3): 66-69. (ZHANG Jian, XIE Zhixiong. Nonlinear vibration and chaos phenomenon of arm structure in radial gate[J]. Water Power, 2018, 44(3): 66-69. (in Chinese))
- [29] 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): 203-208, 230. (YAN Genhua. Self-induced vibration case and controlling measure of Hydraulic gate[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2013, 33(Suppl2): 203-208, 230. (in Chinese))
- [30] 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. (HU Nan. Stress analysis of gate under flow-induced vibration[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [31] YAN Genhua. Study of design techniques of dynamic safety for hydraulic radial gates[C]//Structural Engineering Work. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1998.
- [32] 顾谦甫, 王年潮. 皎口水库底孔闸门振动的振源[J]. 水利水运科学研究, 1985(1): 51-54. (GU Qianfu, WANG Nianchao. Vibration source of bottom gate vibration of Jiaokou reservoir[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Reserach Institute, 1985(1): 51-54. (in Chinese))
- [33] 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. (LYU Chuanliang. Vibration analysis and anti-vibration measures for hydraulic gates[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(12): 118-120, 155. (in Chinese))
- [34] SL 74—2013 水利水电工程钢闸门设计规范[S]. (SL 74—2013 Design specification for steel gates for water conservancy and hydropower engineering[S]. (in Chinese))
- [35] 黄民双, 王晓青. 机床液压系统的爬行振动分析及试验研究[J]. 现代机械, 1998(4): 40-44. (HUANG Minshuang, WANG Xiaoqing. Analysis and experimental research on creeping vibration of machine tool hydraulic system[J]. Modern Machinery, 1998(4): 40-44. (in Chinese))
- [36] 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: 天津大学, 2016. (NIU Limin. Study on the hoisting force and stability of the plane gate located in the middle of long water diversion tunnel [D]. Tianjin: Tianjin University, 2016. (in Chinese))
- [37] 宁辰校, 张戌社. 液压启闭机液压系统振动与噪声研究[J]. 液压与气动, 2013(2): 64-66. (NING Chenxiao, ZHANG Xushe. Study on vibration and noise for the hydraulic system of hydraulic hoist[J]. Hydraulic and Pneumatics, 2013(2): 64-66. (in Chinese))
- [38] 赵兰浩, 骆鹏. 大型水工弧形钢闸门流激振动物理模型—数值模型计算分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(12): 173-

177. (ZHAO Lanhao, LUO Peng. Calculation and analysis of flow-induced vibration in large-scale hydraulic steel radial gate through numerical and physical models[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(12): 173-177. (in Chinese))
- [39] 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. (ZHANG Jiguang, LIU Gongren. Light radial steel gate accident analysis[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1992(3): 49-57. (in Chinese))
- [40] 廖国江. 磁流变弹性体的力学性能及其在振动控制中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014. (LIAO Guojiang. Mechanical properties of magneto rheological elastomers and its applications in vibration control[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014. (in Chinese))
- [41] 盛涛, 金红亮, 李京, 等. 液体质量双调谐阻尼器(TLMD)的设计方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(8): 197-202. (SHENG Tao, JIN Hongliang, LI Jing, et al. A study on the design method of tuned liquid and mass damper (TLMD)[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(8): 197-202. (in Chinese))
- [42] 王正中, 张雪才, 刘计良. 大型水工钢闸门的研究进展及发展趋势[J]. 水力发电学报, 2017, 36(10): 1-18. (WANG Zhengzhong, ZHANG Xuecai, LIU Jiliang. Advances and developing trends in research of large hydraulic steel gates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(10): 1-18. (in Chinese))

Current research status and development trend of hydraulic gate vibration

MA Bin, GUO Yiliang

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of water conservancy and hydropower, many hydropower engineering projects having high dams and large reservoirs have been built or are currently under construction. In the meantime, the design and installation requirements of the hydraulic gate structure are constantly improving. In order to solve the frequent vibration problems of the hydraulic gates in engineering practice, a lot of research and analysis have been carried out by relevant scholars. The hydraulic gate vibration seriously affects the normal operation of the dam, and even threatens the development of the national economy and the safety of people's lives and property. Therefore, it is necessary to find out the causes of the hydraulic gate vibration and take corresponding measures to avoid the adverse vibration. Based on the current theoretical methods and findings, the research progress of the hydraulic gate vibration is introduced in detail in this paper from the aspects of vibration phenomena, gate vibration grade standards, research methods, analysis of gate vibration inducement and corresponding gate structure optimization measures, dynamic stability of radial gate and active vibration control methods. And problems that need to be solved urgently and six research directions in the future are put forward, which can provide technical support and reference for further research on the hydraulic gate vibration.

Key words: gate vibration; research methods; vibration source analysis; vibration control