

我国大跨度闸门应用趋势与抗振对策

严根华

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 在分析我国大跨度闸门研制开发进展、应用现状和趋势的基础上,指出大跨度闸门的研发和应用既丰富和提高了我国水利工程建设水平和挡泄水结构的多样性,又表明我国的金属结构设计和制造水平得到显著提高,但由于结构尺寸的增大和运行方式的不同,闸门结构的流激振动问题也日益突出,成为影响工程安全运行必须考虑的首要问题之一。为此,文中阐述了各类新型闸门的运行特征和流激振动特点,给出闸门结构的动态优化和振动控制措施。

关键词: 大跨度闸门; 应用趋势; 流激振动; 抗振对策

中图分类号: TV66

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0134-09

随着我国水利水电、水运工程建设的快速发展,以及对航运、水环境和生态要求的日益提高,具有综合功能的新型大跨度闸门结构近年来不断诞生。在原有常规的直立式平面闸门和弧形闸门门型基础上,开发应用了如弧形上翻式闸门、平面有轨对拉式闸门、底轴翻板式闸门、桁架式平面闸门等新门型,丰富了我国闸门结构的多样性,提高了闸门结构的设计水平。但由于大跨度闸门结构尺寸大,结构刚度相对较弱,闸门产生强烈振动或共振的机率大大增加。因此,需根据工程具体情况,进行抗振优化设计,提出控振对策,确保工程安全。

1 大跨度闸门应用趋势

大跨度闸门形式多样,随工程对象、所处位置和功能要求而变化,目前我国已建或正在规划设计中的大型闸门均具有不同特色,形式和功能多样,开始实现水利工程功能化、景观化于一体的环保型工程的目标。

1.1 弧形上翻式闸门

弧形上翻式闸门又称护镜门,最早诞生于荷兰,该闸门主要用于挡潮。江苏南京秦淮河三汊河口水闸采用这种设计理念,建成了我国第一座具有防洪、冲淤、排污换水及调节河道景观水位的综合性效益的城市水利枢纽工程(见图1)。该水闸对改善南京市的城市水环境、提高居民的生活质量起到很大作用。

秦淮河三汊河口水闸门型采用双孔护镜门,为大跨度、大宽高比(达5.7:1)的圆弧型箱体结构,单孔闸门净宽40 m,高7 m(水位5.15~6.65 m可调),闸门为半圆形的三铰拱结构,是目前国内外尺寸最大的轻型护镜式景观闸门,圆半径为22 m。双孔护镜门的半圆形闸门门叶两侧的拱脚用铰链连接后支承在边墩和中墩上。闸门在水平状态时挡水或门顶过流,闸门上的活动门叶升降以调节水位。采用盘香式启闭机启闭。荷兰挡潮闸有类似外形的闸门,但结构形式和运行功能简单,仅起挡潮作用。而本工程闸门同时在弧形大门上设置垂直升降的6扇小门,属世界首创。具有大门关闭蓄水、开启泄洪及冲淤,小门调节水位并溢流形成景观瀑布等功能,该闸门景观效果极佳。但体型特殊、运行条件复杂,国内外尚无类似工程的设计和运行资料。

收稿日期: 2009-03-18

作者简介: 严根华(1956-),男,上海人,教授级高级工程师,主要从事水工水力学、结构流激振动及动态优化设计研究。

E-mail: ghyan@nhri.cn

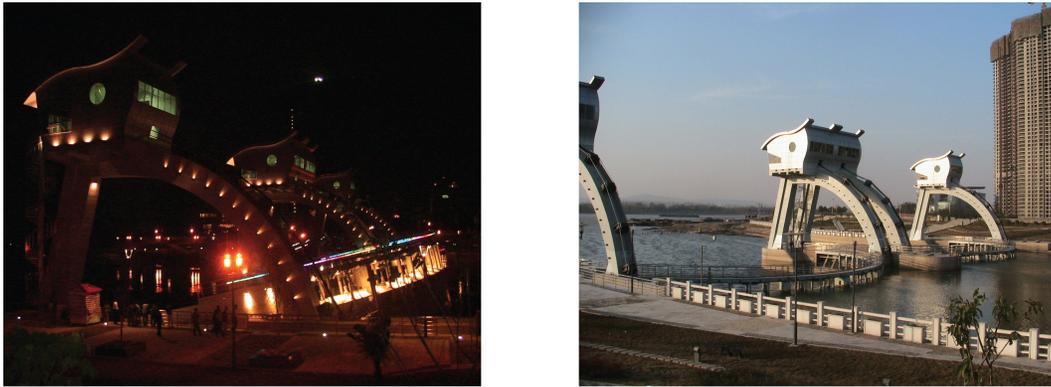


图1 南京秦淮河三汊河水闸

Fig.1 Sluice of Sancha River in Nanjing

1.2 大型平面有轨弧形对开型闸门

位于江苏常州的钟楼防洪控制工程以大型平面有轨弧形对开型闸门为主体工程,是我国首座修建在平原水系,需要同时满足防洪、航运、环境等多方面要求的水利枢纽工程.该方案按照“不设梯级、不阻航、特大洪水断航”的原则进行设计,力求节制闸具有安全、可靠、新颖特点.在水闸的设计理念、科学研究方法和施工工艺技术等方面均具有开拓创新性.

该闸门采用大跨度平面轨道弧形双开门结构,孔口净宽 90.0 m,弧面半径为 60.0 m,弧形门浮箱面板外侧面板总弧长 58.325 m,门高 7.5 m;门底高程-1.00 m,门顶高程 6.5 m;支铰中心高程 5.027 m.支臂采用 3 根 $\Phi 520 \times 18$ mm 钢管组成的格构杆.弧门支铰采用 $\Phi 600$ mm 球关节轴承.根据本工程闸门启闭的特点,平面弧门启闭采用固定卷扬式启闭机.启闭机的启闭容量为 500 kN,钢丝绳直径 50 mm.

平面轨道弧形对拉门是一种圆弧形新门型,国际上虽有类似工程,但结构构造形式不同,启闭方式亦不同.本工程在水闸体型上充分吸收国外先进理念,结合我国实际,采用具有创新特征的平面轨道对拉式闸门,为我国大型水闸设计走出了一条新路(见图 2).



图2 常州钟楼水闸

Fig.2 Sluice of Changzhou in Jiangsu province

1.3 大跨度底轴翻板式闸门

上海苏州河河口水闸工程位于金山路苏州河河口,具有双向挡水功能.闸门总跨度 102 m,采用卧倒式结构,系我国跨度最大的大型挡潮结构^[1],水闸枢纽布置见图 3.根据黄浦江潮位变化及内河水位调控要求,水闸需要承担最大高潮位 6.26 m,内河 2.8 m 水位的反向挡潮,及最低潮位(0.24 m)下内河正常水位 3.5 m 时正向挡水两种基本工况的操作运行,以保证苏州河正常的观光效果.

该水闸采用卧倒式结构,门叶与底轴刚性联接,并将底轴上的轴承座与基础固结,布置在二岸侧的液压

启闭机通过联轮带动底轴旋转从而实现水闸的启闭操作。

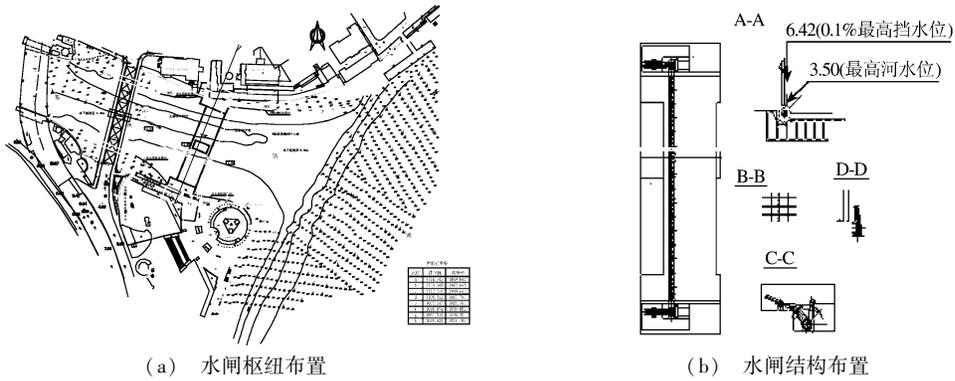


图3 上海苏州河河口水闸
Fig.3 Sluice at Suzhou River estuary in Shanghai

1.4 大宽高比弧形闸门的开发与应用

水工闸门一般的宽高比为 1 : 1 ~ 2 : 1 或 1 : 1 ~ 1 : 2,大宽高比弧形闸门一般指宽高比大于 3 : 1 的闸门结构。

某工程水闸总宽度 90.4 m,泄水孔总长 22 m,闸底板高程为-3.8 m.泄水孔不设检修门,工作门为弧形钢闸门.闸门面板弧长 7.33 m,门宽 34.8 m.宽高比 $B/H=4.74 : 1$.水闸由闸室段、上游进口段、海漫、护坦、上下游防冲槽等组成.上下游翼墙形式均为直立式扶壁和悬臂挡墙结构,顺接两岸堤防.水闸枢纽布置和闸门结构布置见图 4.

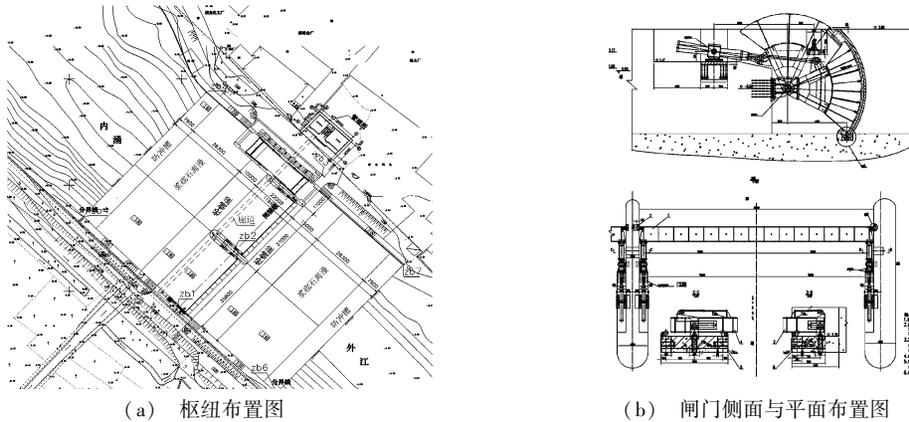


图4 水闸枢纽布置和闸门结构
Fig.4 Sluice key position and gate structure

采用大宽高比门型的优点,就是在满足结构的强度和刚度的基础上,合理减少孔数或启闭机械,节约工程成本.此外,可以减少工程运行管理成本。

1.5 空间桁架平面直升式闸门的应用

平面闸门的振动原因很多,如临门水跃作用、水封自激振动、底缘不稳定重附着引发的水流脉动作用力等.对于需要满足双向挡潮功能的闸门结构而言,同时需要满足正向挡水和反向挡潮两种工况的作用,结构的变形和强度亦需考虑双向挡水要求.采用空间桁架结构有助于增强结构的受力合理性,减小闸门底缘的扰动力,并有效降低闸门自重,节省工程成本。

某工程挡潮闸采用大跨度平面桁架式直升式闸门,闸门宽度 20 m,门高 4.5 m,宽高比为 4.4 : 1,闸门梁系采用空间桁架体系,闸门材料采用强度高,并有较好冲击韧性的低合金结构钢 16 Mnq.工作闸门的启闭

设备采用活塞式液压启闭机,启闭机容量为 $2 \times 1\,600\text{ kN}$. 液压缸内径 400 mm , 活塞杆直径 180 mm . 工程布置与闸门结构体型见图 5.

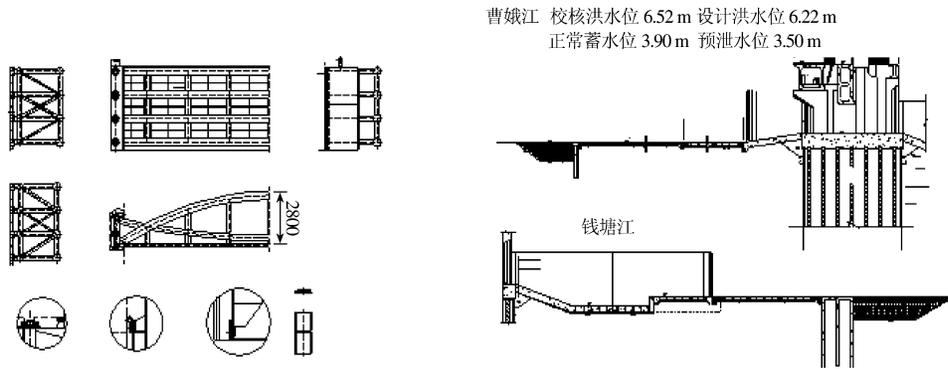
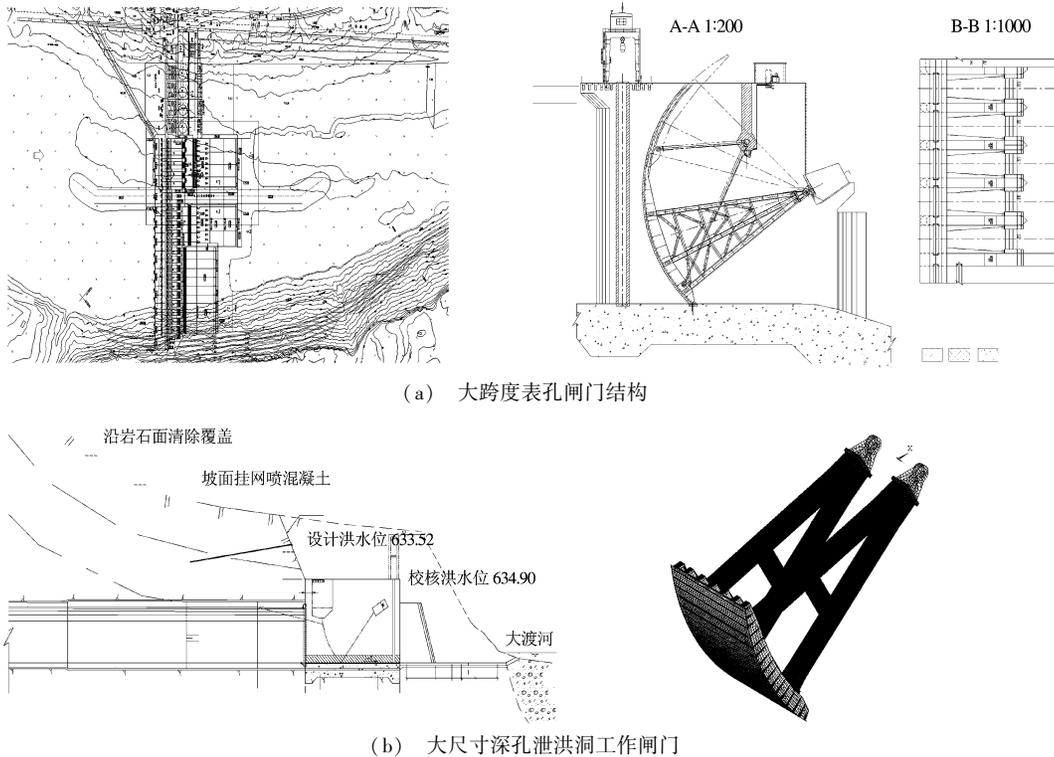


图 5 大跨度平面桁架式直升式闸门结构布置
Fig. 5 Layout of pennins gate structure with braced arch

1.6 大尺寸深孔弧形闸门的应用^[2]

表孔和深孔弧形闸门的结构尺寸也具有日益增大的趋势,其主要原因在于水库大坝泄水建筑物下泄流量不断加大. 典型的大尺寸闸门结构见图 6.



(a) 大跨度表孔闸门结构
(b) 大尺寸深孔泄洪洞工作闸门
图 6 典型的大尺寸闸门结构
Fig. 6 Typical large size gate structure

嘉陵江某航电枢纽泄洪闸洪水峰高量大,且要求工程枢纽排洪能力尽可能大. 因此,在紧临左岸厂房布置 5 孔冲沙闸,每孔净宽 14.8 m ;右岸布置泄洪闸 15 孔,每孔净宽 13.0 m ;冲沙闸采用宽顶堰堰型,堰顶高程为 178.0 m ,采用闸室分缝的分离式结构. 冲沙闸闸门最大开启高度为 27 m ,支臂长度达 40 m ,正常挡水高度为 25 m . 受液压启闭机制造水平的限制,闸门无法全开,只能局部开启运行.

某工程泄洪洞由导流洞改建而成.在洞尾设孔口尺寸 $10.5\text{ m}\times 12.0\text{ m}$ (宽 \times 高)的弧形钢闸门一座,工作水头近 60 m .该闸门在运行过程中将经历自由水跃、临门水跃和淹没水跃等多种流态,闸门结构面临严峻的流激振动问题^[3].

2 闸门结构流激振动特点和振源分析

大跨度闸门的不断开发和应用,极大地提高和丰富了我国水利工程建设水平和挡泄水结构的多样性,使我国的金属结构设计和制造水平亦得到显著提高.但由于结构尺寸的增大,运行过程中结构的流激振动问题也日益突出,成为影响工程安全运行必须考虑的首要问题之一.不同的门型将具有不同的振动特点,因此,需采用具有针对性的抗振措施.

工程实践表明,诱发闸门结构的振源和振动现象一般有以下几个方面:①水流脉动压力诱发的闸门结构共振;②弧形闸门支臂因动力失稳而破坏;③水封自激振动引发闸门结构强振;④临门水跃作用引发结构冲击性振动等.对于特型大跨度闸门而言,上述振动现象一般均会在具体工程中以特有形式出现.对于在建或拟建工程,闸门振动问题可通过模型试验进行正确反演与预报,并采取动态优化和抗振措施予以解决.

2.1 大型护镜式闸门的流激振动特点^[4]

大型护镜式闸门在开启泄洪或排污过程中,闸下流态具有如下特点:闸门局部开启时,闸下开度成弯月形,过流特性复杂;闸门后流态成向心汇流型,并随着下泄流量的变化,闸门结构将经历自由水跃、临门水跃、淹没水跃等动力作用.需关注如下问题:①闸门弯月形开度下,闸后向心汇流的水力特性及闸后的消能防冲情况;②冲淤换水工况下,闸门小开度时会出现共振现象,这将严重威胁闸门安全;③闸门结构由于自重作用引起较大挠度变形,使门体出现局部应力集中超标现象,从而引起闸门结构的局部疲劳损伤而破坏;④大门关闭、小门溢流时,闸门结构在波浪、浮动力以及小门溢流脉动作用下亦可诱发闸门的较强振动.这些问题均会给工程安全运行带来严重威胁,必须进行深入地研究分析.典型工况下闸门出现的不稳定振动具有如下特征:小开度下,闸门下游水位出现临界出流状态时,闸门结构下游脉动压力将激发闸门的强烈振动,振动响应参数包括振动位移、加速度、应力等均出现谐振状态.

水弹性振动试验表明:大门结构在上游水位 5.5 m 、下游水位 3.0 m 、开启 0.5 度小开度情况,发生巨幅共振现象.振动优势频率为 4.9 Hz ,相应原形结构频率为 1.1 Hz ,此时水动力荷载激发了闸门结构的低阶振型,导致出现低频大幅度振荡.闸门径向振动最大、侧向次之、垂向略小,3个方向的最大振动均方根值分别达 18.23 、 8.50 和 2.60 m/s^2 ;径向最大振动位移均方根值达 162.9 mm ,侧向为 135.5 mm ,垂向 63.5 mm ;最大振动应力均方根值为 15.9 MPa ,位于闸门中部左侧第一和第二扇小门之间闸墩下方的上主横梁部位,为横向弯曲应力.底缘下方底主横梁的横向振动应力均方根值小于上主横梁的动应力,最大动应力均方根值为 14.2 MPa ;最大纵向动应力均方根值为 3.1 MPa ,这是闸门的构造特点所决定的.

2.2 大型平面有轨弧形对开型闸门流激振动特点

由流激振动模型试验可见,随着闸门轨道处的自重压力下降到某一临界值时,闸门首先出现低频小幅度的上下振动,当门内水体进一步减小时,闸门出现低频大幅度的振动,门体并不是完全悬浮在水里振动,而是出现上下剧烈振动,浮起后又下压到活动轨道上,此时的闸门类似一把锤子,冲击活动轨道后又浮起,循环上下运动.对闸门模型停止进一步抽水,可见闸门仍然保持低频大幅度的振动,发生强烈振动时的振动加速度最大量级达到 $3\sim 4\text{ m/s}^2$.由于门体尾部在门槽内,且起到一定锁定作用的钢丝绳尾部亦在相近位置,因此,闸门振动时门槽及钢丝绳组对门体有一定的约束作用,门体端部(河道侧)与尾部(门库侧)振动不在一个水平面内,形成闸门端部(河道侧)上翘或下跌状扭转振动.典型工况下的振动加速度时域过程、功率谱密度见图7.可见,闸门在泄流条件下,随门内水位的变化,闸门结构出现平稳、逐渐起振、强烈振动、恢复平稳等过程.将发生闸门强烈振动时段的振动信号作时域截取后进行频域分析,结果显示,闸门强烈振动的主能量集中在 $1.1\sim 1.5\text{ Hz}$ 范围内(模型值),相应原型值约为 $0.246\sim 0.336\text{ Hz}$.起振时的振幅值与发生强振时的数

值差别较大,振幅大小与上下游水位、门内液位等密切相关。

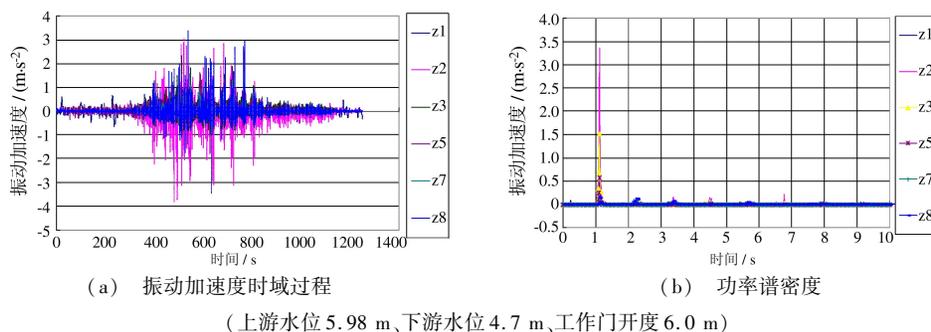


图7 典型工况下闸门振动加速度时域过程和功率谱密度

Fig. 7 Gate vibration acceleration domain and spectral density under typical operation mode

2.3 大尺寸深孔弧形闸门强振特点

水弹性振动试验显示,某泄洪洞工作闸门在正常设计工况下,闸门作部分开启运行时发生强烈振动,闸门3个方向的振动量 $V_z > V_\theta > V_\rho$ 。试验测到的横向(Z向)最大振动均方根值为 0.597 m/s^2 ,切向(θ 向)最大振动均方根值为 0.549 m/s^2 ,顺水流向(ρ 向)最大振动均方根值为 0.524 m/s^2 。

在相同的闸门开度和上游库水位时,闸门振动量随下游水位升高而增加。当闸门相对开度 $n=0.25$ 、下游高水位运行时,闸门结构出现类似共振现象,振动量级显著增加。从频谱分析可以看出闸门振动能量集中在 100 Hz 频率范围以内,发生共振时激发的模型振动频率为 $8 \sim 10 \text{ Hz}$,相应原型振动频率为 $1.6 \sim 2.0 \text{ Hz}$,与结构低阶流固耦合共振频率接近^[5-7]。

3 闸门结构流激振动的模型反演技术和抗振优化方法

闸门结构的安全运行与振动控制密切相关,而有效的控振措施取决于正确研究与揭示结构的流激振动特征尤其是强振现象。因此,闸门结构的流激振动模型反演技术及其抗振优化设计成为保障未来工程安全运行的重要途径。

3.1 结构流激振动的模型反演技术

在水动力荷载作用下,闸门结构的运动可表示为:

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = P(t) \quad (1)$$

式中: M, C, K 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; δ 为结点位移; $P(t)$ 为水动力荷载。

根据上述结构运动方程,考虑到振动试验一般在水介质中进行,因此,闸门的水弹性模型应当同时满足几何尺寸、质量密度、阻尼、弹性模量、水流动力等参数的相似性。根据相似原理,经推导可得几何比尺 L_r ; 质量密度比尺 $\rho_r = 1$; 弹性模量比尺 $E_r = L_r$; 泊松比比尺 $\mu_r = 1$; 阻尼比尺 $C_r = L_r^{2.5}$ 或 $\xi_r = 1$ 。显然,目前市场上没有同时满足上述参数的型材,需专门研制。一般对闸门结构的特种材料可采用重金属粉、高分子材料等进行多组分特种材料研制,并对研制材料力学性能进行测试。对于坝工结构的水弹性振动研究也可采用加重橡胶、乳胶水泥等材料进行配置。

3.2 结构抗振优化设计方法

鉴于结构振动响应与荷载的统计特征和结构本身的固有特性关系密切,减小动荷载作用应是减振的首选方案,但在水动力荷载无法改变时,优化闸门结构的动特性,可有效减轻振动。结构的动特性灵敏度分析技术可以优化结构的动力特性,成为抑制结构最大动位移的有效手段。

水动力荷载是诱发结构振动的外因,而影响其振动强度的内因则是结构自身的动力特性,研究两方面的“个性”及其相互关系并采取相关措施是解决工程问题的关键。结构在水动力荷载作用下的动力响应谱密度为:

$$S_x(\omega) = \sum_{r=1}^N \sum_{s=1}^N H_{xP_r}^*(\omega) H_{xP_s}(\omega) S_{P_r P_s}(\omega) \quad (2)$$

式中: $S_x(\omega)$ 为水动力荷载作用下结构的响应谱; $H_{xP_r}^*(\omega)$, H_{xP_s} 为结构中所论点与激励点 P_r (或 P_s) 之间的传递函数, 反映了结构特性; $S_{P_r P_s}(\omega)$ 为输入力 r, s 之间的互谱密度, 表征作用力的性质. 可见, 调整结构特性或改变外荷载的作用均能改变结构的动力响应. 结构的动特性反映了结构固有特征, 包括振动固有频率、振型、阻尼、刚度和质量等参数. 这些参数是振动分析的基础, 并由此构成三维动态数学模型.

对于特定的泄水建筑物结构体型, 在一定外力作用下系统响应的量级取决于传递函数, 并由下式计算:

$$H(s) = \sum_{k=1}^N \left(\frac{u_k}{j\omega - S_k} + \frac{u_k^*}{j\omega - S_k^*} \right) \quad (3)$$

式中: u_k, u_k^* 为 k 阶模态特征向量; $S_k, S_k^* = \sigma_k \pm j\omega_k$ ($k = 1, 2$) 为 k 阶模态特征值, σ_k, ω_k 分别表示 k 阶模态阻尼系数与频率. 显然, 系统传递函数包含结构动特性全部模态信息. 因此, 一旦取得系统的传递函数并经参数识别后就可完整得出表征结构动特性的模态参数.

结构动态优化设计的原则应力求避免结构在水动力荷载作用下发生共振及动力失稳. 灵敏度分析技术则能正确有效地指出结构的动态薄弱部位及修改方向. 模态参数灵敏度给出了结构物理参数改变对模态参数的影响程度, 并由下式计算:

$$\frac{\delta h_{r'q}}{\delta p_m} = -C_k - I_k + \sum_{m=1}^n (E_{k,m} + G_{k,m}) \quad (4)$$

$$\frac{\delta \lambda_k}{\delta p_m} I = -h_{k,r'q}^{-1} A_k \quad (5)$$

式中: $h_{r'q} = \sum_{k=1}^n \frac{h_{krq}}{j\omega - \lambda_k} + \sum_{k=1}^n \frac{h_{kr'q}}{j\omega - \lambda_k^*}$ 为柔度矩阵的子矩阵; P_m 为结构参数; $C, I, E_{k,m}, G_{k,m}, A_k$ 为与柔度矩阵及其导数有关的子矩阵.

根据结构的灵敏度信息, 对原结构进行动态修改, 则新系统的运动方程为:

$$(M + \Delta M)\ddot{\delta} + (C + \Delta C)\dot{\delta} + (K + \Delta K)\delta = F(t) \quad (6)$$

式中: M, C, K 为原结构刚度、质量、阻尼矩阵; $\Delta M, \Delta C, \Delta K$ 为结点质量、阻尼及刚度的修改量. 通过对上式作坐标变换和傅氏变换及系列运算后可得:

$$\left. \begin{aligned} (\omega^2 I + 2\omega \Phi' \Omega_n'^2 + \Omega_n'^2) q &= V' F \\ I &= W^T A W \\ \Omega_n'^2 &= W^T D W \\ \Omega'^2 &= W^T B W \\ q &= W'_q; V' = V W \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: W 为系统的特征向量; A, B, D 为与结构物理参数修改量有关的矩阵; V 为坐标变换矩阵. 由(6), (7)式可求得修改结构的振动模态参数.

4 闸门结构动态优化和振动控制措施

水工闸门结构的流激振动研究最早始于荷兰代尔夫特大学的 P. A. Kolman 教授对挡潮闸门振动问题的研究, 但限于当时的技术水平, 在水弹性振动模型的研制方面仅采用质量分布相似、结构刚度变态相似的方法进行研究. 虽然该模型在整体上能有效反映结构的振动特性, 但难以取得闸门结构关键部位的应力分布状况, 局部弹性变形振动也不相似, 因此对工程设计具有局限性. 德国卡斯鲁尔大学的 Naudascher 教授^[5]在试验室对平面闸门的受力情况进行研究, 取得不少成果, 但对大宽高比闸门结构的受力特性没有专项研究, 更没有考虑因结构弹性变形振动引起的动荷载变化. 因此这些研究成果无法指导当代新型水闸的抗振设计、建设和管理.

对上述工程采用现代最新科学技术(包括计算机技术、试验技术、水弹性振动新材料技术及随机数据处理技术等),运用流激振动模型试验和理论分析、有限元数值分析以及现场流激振动原型观测研究相结合的一体化研究技术,全面系统地研究闸门结构的动荷载、结构动特性、流激振动响应特性及抗振优化,从而取得完整的水力结构参数,提出合理结构布置方案,确保工程运行安全.从而使我国在流激振动试验研究技术方面进入国际领先行列^[8,9].

4.1 弧形上翻式闸门的抗振优化与控振措施

弧形上翻式闸门属于大跨度、低刚度结构,其强烈振动主要由小开度时门后出现临界出流及底缘水流扰动引起的.从闸门结构的模态参数可知,结构的一阶基频为1.17 Hz,反映闸门面板的沿拱圈弯曲变形振动;二阶频率为1.35 Hz,反映面板的扭曲振动变形;三阶以上频率反映闸门的横向和切向高阶弯扭振动变形.水弹性振动试验结果显示,当闸门开启至0.5度左右时,闸门下游出现临门水跃,对闸门结构产生激励,导致门体出现低频大幅振动,其他开度的振动较小.闸门强振时,优势频率约1.1 Hz,说明水流脉动压力的主能量激发了闸门结构的一阶基频,引发了结构共振.其控振措施是只要避开该开度,闸门就能平稳进行局部开启运行.

4.2 大型平面有轨弧形对开型闸门

闸门水弹性振动试验采用全相似水弹性模型和非恒定流控制方法模拟闸门开启、关闭及局部开启泄流条件下的振动情况,实现对闸门流激振动特性的正确反演.通过水动力荷载、结构动力特性及水弹性振动研究成果的综合分析,提出了增加闸门支臂联结刚度、调整箱体端部体型的抗振优化方案.推荐方案不仅对保证闸门箱体和支臂的抗振能力,加强其整体性具有显著效果,而且改善了门体绕流条件,减小了水动力作用,增强了运行平稳性.此外,通过对门内液位与闸门强烈振荡相互关系的规律性研究,提出了不同上下游水位时箱内液位控制要求,确保闸门结构平稳运行.

优化结构试验结果显示,修改方案的最大振动量值比原方案减小69%,抗振优化效果明显,在很大程度上减弱了闸门振动响应,提高了闸门抗振性能和安全性.

4.3 深孔弧形闸门控振措施

对于门后经历复杂流态的闸门结构而言,可通过优化结构的动力特性和改善水动力作用特性来控制闸门结构的强烈振动.对于大尺寸闸门,尤其是闸后经历临门水跃作用情况,在支臂间增设拉杆等措施并不是有效的办法,而采用增设闸门侧向导轮、确保水封约束功能等措施是比较现实和有效的措施.

为详细考察闸门顶水封和侧向导轮对闸门振动及由此而引起的闸门振动加速度、动位移、动应力的影响,针对图6(b)所示工程深孔泄水道工作闸门,进行了水弹性振动模型试验.试验中在闸门顶部安装了软体顶水封和侧向导轮,并针对前述引起共振现象的相近各工况进行了对比试验.原先由于下游动水作用和临门水跃拍击而引起的闸门共振现象已消失,试验测得的最大振动加速度为 0.338 m/s^2 ,最大动应力为 1.013 MPa ,较无顶水封和侧轮时均有大幅度降低.说明闸门运行时,顶水封、侧水封及侧向导轮的安装有利的抑制闸门振动,从而保障闸门的安全运行.但由此也说明闸门运行过程中,因闸门止水的损坏,亦有可能激发闸门的流激振动,甚至引发共振,导致闸门破坏.因此,在工程建设(包括闸门结构制造、水封制作和安装精度)和运行管理中需高度重视.

5 结 语

大跨度闸门在我国的应用开始进入规模时期,推动了水利水电水运工程建设的不断进步,同时也提高了金属结构的制造安装技术.由于闸门结构构造的多样性,水动力荷载作用又随工作水头、闸门体型尤其是底缘和端部体型以及门后流态的改变而变化,闸门的水弹性振动特性又与荷载和结构的刚度与质量分布密切相关,因此,在应用新型门型时需做好闸门结构的水弹性振动研究,进行优化设计和修改,以满足不同工程在特定运行工况下闸门的抗振安全.

参 考 文 献:

- [1] 严根华. 苏州河河口水闸金属结构数学模型分析研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(增刊1): 67-72. (YAN Gen-hua. Mathematic model for metal structure of Suzhou Creek sluice project[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource, 2007, 27(Suppl): 67-72. (in Chinese))
- [2] YAN Gen-hua. Project application and anti-vibration problem of gate with vast aspect ratio[C]//Proceedings of 16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [3] 严根华, 赵建平, 刘永胜, 等. 大型泄洪冲沙闸弧形工作闸门流激振动试验研究[C]//张春生. 水工机械技术论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 304-316. (YAN Gen-hua, ZHAO Jian-ping, LIU Yong-sheng, et al. Experiments and research on flow-induced vibration of large radial working gate in sand sluicing chamber[C]//ZHANG Chun-sheng. Technology for Hydraulic Machinery. Beijing: China WaterPower Press, 2008: 304-316. (in Chinese))
- [4] 严根华, 陈发展, 赵建平. 南京市三汊河口闸门水弹性振动试验研究[J]. 振动工程学报, 2005, 18(增刊): 123-127. (YAN Gen-hua, CHEN Fa-zhan, ZHAO Jian-ping. The hydro-elastic vibration study on outfall gate of Sancha River in Nanjing [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(Suppl): 123-127. (in Chinese))
- [5] NAUDASCHER E. Flow-induced structural vibrations[C]//IUTAM-IAHR Symposium. Berlin: Springer-Verlog, 1974.
- [6] 严根华, 赵建平. 淹没水跃作用下大宽高比闸门的流激振动试验研究[J]. 振动工程学报, 2005, 18(增刊): 128-132. (YAN Gen-hua, ZHAO Jian-ping. Flow-induced vibration experiment study on the great width to high-scale gate under submerged jump[J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(Suppl): 128-132. (in Chinese))
- [7] 严根华, 陈发展, 赵建平, 等. 泄洪闸弧形闸门流激振动原型观测与运行调度研究[C]//第二届全国水利学与水利信息学学术大会. 成都: 四川大学出版社, 2005: 75-82. (YAN Gen-hua, CHEN Fa-zhan, ZHAO Jian-ping, et al. Prototype observation of the release sluice flow-induced vibration and operation dispatch [C] // 2005 Advance in Hydraulics and Hydroinformatics in China. Chengdu: Sichuan University Press, 2005: 75-82. (in Chinese))
- [8] 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 Gen-hua. Research development of flow-induced vibration[J]. Hydro-Science and Engineering, 2006(1): 66-73. (in Chinese))
- [9] YAN Gen-hua. Study of design techniques for dynamic safety of radial gates in hydraulic engineering [C] // Structure Engineering World Wide 1998, Structural Engineers World Congress 1998. San Francisco: Elsevier Science Ltd, 1998.

Application tendency and anti-vibration countermeasure of large and wide gates in China

YAN Gen-hua

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: On basis of analyses on development and application of large and wide gates in China, this paper points out that these gates have improved the construction level of hydraulic engineering the variety of outlets and the patterns of retaining structures. Besides, the design and manufacturing level of metal structures have also been developed. Meantime, because of structural size, much bigger than before, and different ways of gate operation, flow-induced vibration problems of gate structures are also conspicuous, and become one of important controlling factors affecting engineering safety operation. Operation characteristics and flow-induced vibration of these new types of gates and sluices are expounded, and basic vibrating sources for different types of gates are also given. Modeling techniques of the gate flow-induced vibration and the way of anti-vibration optimization are introduced, and different types of gates and vibration controlling and optimization methods are put forward.

Key words: large and wide gates; application tendency; flow-induced vibration; anti-vibration measurement