

弧形钢闸门主框架的动力稳定分析

邱德修, 朱召泉

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:分析国内外某些低水头弧形钢闸门的失事破坏情况,指出在振动荷载作用下弧形钢闸门的支臂丧失稳定性是引起大多数闸门破坏的主要原因,据此利用 B-R 准则对弧形钢闸门主框架的动力稳定性进行研究,得出了几种简单荷载作用下主框架的动力稳定承载力,由此可知外荷载的类型及频率对结构的动力稳定承载力有显著影响。此研究思路和方法可为弧形钢闸门动力稳定性的深入研究和工程应用提供参考。

关键词:B-R 准则;弧形钢闸门;闸门主框架;动力稳定性

中图分类号:TU391;TU311.2 **文献标识码:**B **文章编号:**1006-7647(2006)03-0049-04

Dynamic stability analysis of main frame of radial steel gates//QIU De-xiu, ZHU Shao-quan(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: From an analysis of failure conditions of some low head radial steel gates at home and aboard, it is found that the instability of the bracing arm of the radial steel gate under vibrating loads is the main cause for their failures in most cases. The dynamic stability of the main frame of radial steel gates was studied by use of the B-R criterion, and the carrying capacities for dynamic stability of the main frame under different simple loads were obtained. It is concluded that the types and frequencies of dynamic loads have significant effects on the critical loads of dynamic stability of the structures. The thought and method of the study provide some references for further research on dynamic stability of radial steel gates.

Key words: B-R criterion; radial steel gate; main frame of gate; dynamic stability

1 问题的提出

随着我国水利水电事业的迅速发展和水利枢纽工程的大量兴建,弧形钢闸门因启闭力小、操作简便、水流条件好等特点,得到了广泛的应用。

通过对国内外弧形闸门事故的调查分析发现^[1-3],尽管失事闸门的运行条件、结构尺寸、构造形式各不相同,破坏时的直接触发原因也多种多样,但从破坏特征来看,有两点共同特征值得注意:①从破坏内因分析,失事闸门全都是因为支臂丧失稳定而遭受破坏的;②从破坏外因分析,失事闸门均是在明显的振动荷载作用下出现的破坏。因此,振动问题以及由此引起的闸门动力反应及动力稳定问题是弧形钢闸门研究中亟待解决的一个重要问题。在 SL74—95《水利水电工程钢闸门设计规范》中也专门指出了对于低水头弧形闸门应特别注意支臂的动力稳定问题,但是由于闸门振动涉及水流条件、边界条件以及闸门自身结构特性等许多方面,问题比较复杂,目前理论上尚未完全弄清楚,也没有比较实用的

方法供工程上采用。因此,迫切需要科研人员对闸门的振动及动力稳定性问题开展深入的理论和试验研究。

2 弧形钢闸门主框架的动力稳定性分析

2.1 结构动力稳定性及其判别准则

俄国数学家 Lyapunov 给出了关于运动稳定性的一般定义及其判别准则,其实质是研究初始条件的扰动对运动微分方程解的稳定性影响。他提出了一种较为常用的判别稳定性的 V 函数法(也称 Lyapunov 直接法),就是对扰动微分方程 $\dot{x} = X(t, x)$ 寻找一个满足一定条件的函数 $V(t, x)$,然后通过 $V(t, x)$ 的导数 $\dot{V}(t, x(t))$ 的符号来判别系统的稳定性。遗憾的是对于弧形钢闸门这样复杂的结构无法寻找到符合要求的 V 函数。因此,根据近年来国内外结构动力稳定性的一些研究思路,本文拟采用 B-R 准则^[4]:当荷载幅值的微小增量导致结构特征响应指标异常变化时,结构可视为动力失稳。此时所对应的荷载定义为结构的动力稳定性临界荷载。

具体操作方法是:以逐步加大的荷载幅值为参数,对应每一荷载幅值作一次非线性动力时程分析,记录结构特征响应,然后绘制荷载幅值与结构特征响应关系曲线,通过该曲线可全面了解结构随荷载幅值增大其动力性状不断变化乃至失稳的全过程。结构的动力稳定性临界荷载也可在这一全过程曲线的基础上参照各计算点的时程响应变化来确定。至于结构的特征响应,一般选取一些特征节点的位移幅值(如压杆中点的挠度值)。

2.2 简单荷载作用下框架结构的动力稳定

如前所述,弧形钢闸门的动力失稳往往是由于支臂在动力荷载作用下丧失稳定所致,支臂是弧形闸门中控制闸门安全的主导构件,且支臂和主横梁组成的主框架是弧形闸门的主要承重构件,故研究由支臂和主横梁所构成的主框架在简单荷载作用下的动力稳定对深入研究弧形闸门的动力稳定有重要的价值。

简单荷载^[5]如三角形脉冲荷载、简谐荷载和阶跃荷载(见图1)。为了便于了解弧形钢闸门主框架在不同荷载作用下的动力稳定性能,取作用着简单动力荷载的框架进行分析,以考察本文方法的可行性。图2所示为一弧形钢闸门的主框架,其构件截面特性参数如下: $I_b = 0.857 \times 10^{-4} \text{ m}^4$, $A_b = 0.0056 \text{ m}^2$; $I_c = 0.249 \times 10^{-4} \text{ m}^4$, $A_c = 0.00308 \text{ m}^2$; $E = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$, $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ 。

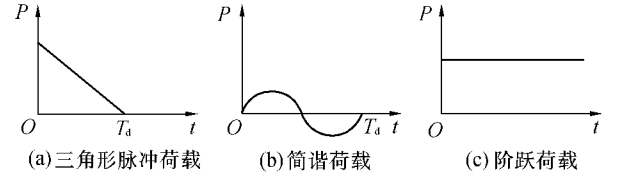


图1 简单荷载

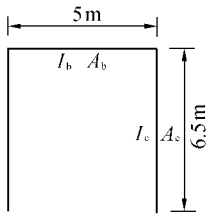


图2 弧形钢闸门主框架截面特性及尺寸

由于横梁和支臂构成的框架在垂直于框架平面方向受到其他构件很强的约束,因此在进行动力计算时只考虑其在框架平面内的振动^[6],而对于平面框架,其所受的主要是支铰和侧向支承导轮的约束,在空间状态下,闸门支铰约束了该节点的5个自由度,只允许绕支铰的销轴转动,简化成平面问题后则该约束成为框架平面内的固定支座,若主横梁两端的侧移支承导轮能限制横梁轴向的平动,可以简化

为铰支座,故该框架的有限元模型如图3所示。在阶跃荷载作用下,由图4可以看出其动力稳定临界荷载为 $7 \times 10^5 \text{ N}$ 。在三角形脉冲荷载作用下,其动力稳定承载荷载随脉冲时间的增加而减小,如图5所示,当脉冲时间为 1 s 时其动力稳定临界荷载为 $8.5 \times 10^5 \text{ N}$,当脉冲时间为 0.5 s 时其动力稳定临界荷载为 $1.2 \times 10^6 \text{ N}$ 。在简谐荷载作用下,其动力稳定临界荷载随着简谐荷载的周期变化而变化(如图6所示),当简谐荷载周期为 0.032 s 时,由于处于主要共振区,所以其动力稳定临界荷载值很低,仅为 $3 \times 10^5 \text{ N}$;当简谐荷载周期为 0.064 s 时,其动力稳定临界荷载值为 $1.15 \times 10^6 \text{ N}$;当简谐荷载周期为 0.016 s 时,其动力稳定临界荷载值也很低,为 $4 \times 10^5 \text{ N}$,因为此时结构处于参数共振区^[7]。

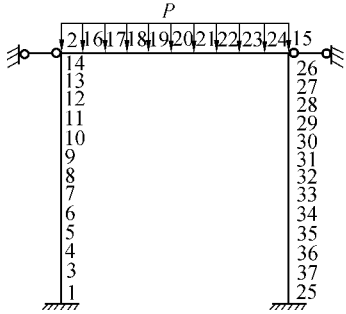


图3 主框架有限元模型

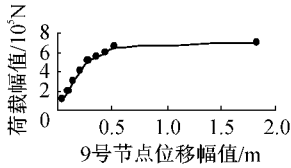


图4 阶跃荷载下的荷载-位移曲线

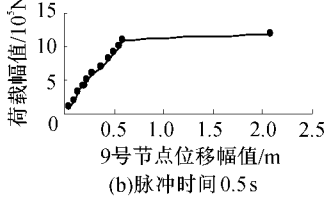
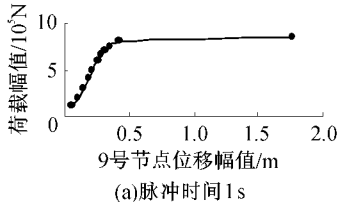


图5 三角形脉冲荷载下的荷载-位移曲线

对于简谐荷载,其频率特性对结构的动力响应有显著影响,为了深入阐明这一问题,需首先研究结构自身的频率特性及其在不同频率简谐荷载作用下的动力稳定性。首先可以通过谐响应分析方法来研究框架的频率特性。谐响应分析就是对结构施加不同频率的正弦荷载,求出其稳态响应,并在频率上给

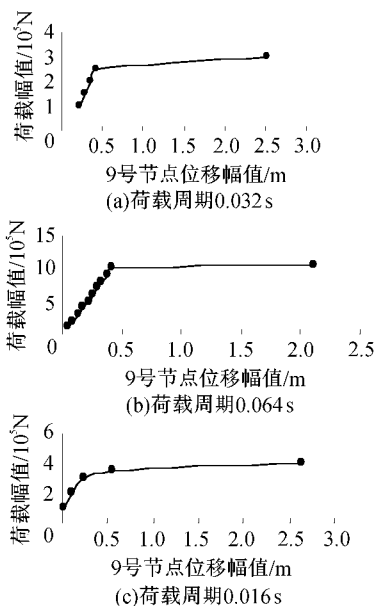


图6 简谐荷载下的荷载-位移曲线

出其稳态响应。在横梁上施加单位的均布荷载,激励频率从 0.05 Hz 逐渐增加到 150 Hz,每增加 1 Hz 计算一次结构的稳态响应,如图 7 所示。可以看出,框架具有几个明显的“共振”频率区。但其共振频率区间并不密集,其动力响应近似为一个“窄带过程”,也就是说在外荷载作用中只有部分频率才能引起结构的较大响应。

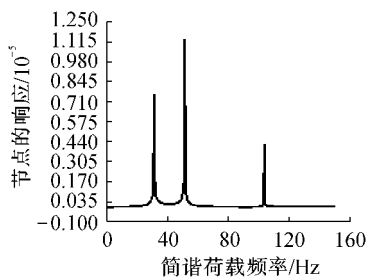


图7 9号节点谐响应曲线

对于 B-R 准则,通过弹塑性时程分析直接根据结构响应来判断其动力稳定性,这种方法要比谐响应分析的计算量大很多,所以不可能计算在很多频率下结构的动力稳定临界荷载,但可以根据谐响应分析的结果适当选取一些有代表性的频率来分析结构的动力稳定性。图 8 系简谐荷载频率与相应的动力稳定性临界荷载关系曲线。从图 8 中可以看出,外荷载频率对结构的动力稳定临界荷载有重要影

响。对照图 7 和图 8 可以观察到主框架结构在不同频率简谐荷载作用下的动力稳定临界荷载与谐响应分析的结果基本上是对应的,稳态响应剧烈的频率对应的动力稳定临界荷载就低。

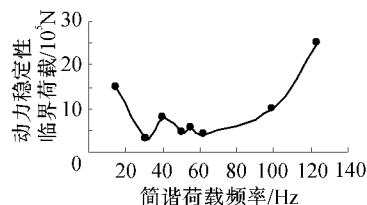


图8 不同频率下框架的动力稳定临界荷载值

对于弧形钢闸门而言,在实际工程中承受的荷载非简谐荷载,但是以上分析结果对于闸门的动力稳定分析有重要意义。可以想象,若动水压力的频谱特性与闸门自身的频谱特性相近时,闸门的动力响应将较大,动力稳定性临界荷载较低。该结论可以解释在不同开度下闸门结构的响应差别很大,当达到“临界开度”时,闸门产生强烈振动,发生动力失稳。

2.3 不同形式主框架的动力稳定性

在弧形钢闸门中,主框架的结构形式除了前面提到的门式主框架外,还有 Π 形直支臂主框架和 Π 形斜支臂主框架两种形式^[6],如图 9 所示。

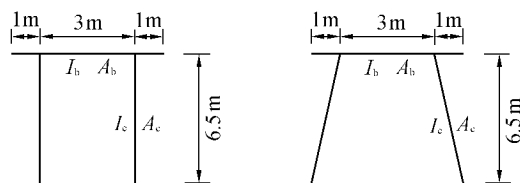


图9 弧形闸门主框架形式

此外,考虑到侧向支承导轮与闸墩侧墙之间的安装误差或间隙,并按有侧移的主框架进行了动力稳定分析,为了便于考察不同形式主框架的动力稳定性,各主框架的支臂和主横梁的长度和截面尺寸均相同。3 种主框架结构、2 种分析模型的计算结果见表 1。从表 1 可以看出, Π 形直支臂或斜支臂主框架的动力稳定临界荷载比门式主框架的大,但差值不大。

3 结 语

a. 本文采用 B-R 准则,通过时程分析直接根据结构响应来判断弧形闸门支臂主框架的动力稳定性,避免了 Lyapunov 直接法寻找 V 函数的困难。

表1 不同形式的主框架在简单荷载作用下的动力稳定临界荷载

10^5 N

框架类型	阶跃荷载		三角形脉冲荷载				简谐荷载			
			$t = 0.5 \text{ s}$		$t = 1 \text{ s}$		主要共振区		参数共振区	
	无侧移	有侧移	无侧移	有侧移	无侧移	有侧移	无侧移	有侧移	无侧移	有侧移
门 形	7	5	12	9	8.5	6	3	2	4	3.5
Π 形直支臂	8	5	14	11	9	7	3.5	2.5	5	4
Π 形斜支臂	8	5	15	11.5	9	7	4	2.5	5	4

b. 作为对弧形闸门动力稳定性问题的初步研究,分析了由支臂和横梁所构成的不同主框架形式在简单荷载作用下对称失稳和不对称失稳情况下的动力稳定性。对本文采用的以 B-R 准则通过时程分析直接根据结构响应来判断弧形闸门支臂主框架的动力稳定性代替构造 V 函数法的可行性进行了验证,从而可以在此基础上对弧形闸门整体动力稳定性进行进一步的深入分析。本文方法对类似问题的分析有一定的参考意义。

参考文献:

[1] 朱召泉,卓家寿,陶桂兰.弧形钢闸门的动力稳定性研究进展[J].水利水电科技进展,1999,19(5):27-32.

(上接第 34 页)

[3] WU Zhi-qiao, MIZUMOTO M. PID type fuzzy controller and parameters adaptive method[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 78(1):23-25.

[4] 谭永红.基于 BP 神经网络的自适应控制[J].控制理论及应用,1994,11(1):84-87.

[5] 陶永华,尹怡欣,葛芦生.新型 PID 控制及其应用[M].北京:机械工业出版社,1998:136-184.

[6] 丛爽.面向 MATLAB 工具箱的神经网络理论及其应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1998:45-73.

[7] 邹进,袁晓辉,李承军,等.基于模糊控制原理的多目标决策方法[J].水利水电科技进展,2003,23(3):28-31.

[8] 梁宏柱,叶鲁卿,孟安波.参数自适应模糊 PID 控制器及其在水电机组调速器中的应用[J].水电自动化与大坝监测,2003,27(6):26-29.

[9] 王日莲,董曼玲.人工神经网络在水文预报中的应用[J].水利水电科技进展,2002,22(5):33-37.

(收稿日期:2005-03-09 编辑:高建群)

[2] 黄廷璞,危盼.我国低水头弧形闸门失事调查和初步分析[J].金属结构,1986(5):23-41.

[3] 阎诗武.水工弧形闸门的振动[J].金属结构,1985(5):21-33.

[4] BUDINSKY B, ROTH R S. Axisymmetric dynamic buckling of clamped shallow spherical shells[J]. NASA TNU-1510, 1962, 5(3):16-21.

[5] 孙建恒,夏亨烹.网壳结构非线性动力稳定分析[J].空间结构,1994,1(1):25-31.

[6] 水电站机电设计手册编写组.水电站机电设计手册:金属结构(一)[M].北京:水利电力出版社,1988.

[7] 符华·鲍洛金.弹性体系的动力稳定性[M].北京:高等教育出版社,1960.

(收稿日期:2005-02-28 编辑:高建群)

(上接第 37 页)

4 结 语

本文结合惠蓄上库溢流坝的泄流特性、运行条件、河道地形等特点,经多方案的模型试验研究,推荐溢流坝采用“坝面削角阶梯+底流消力池”的联合消能方案,工程效果良好。本文的试验研究成果已应用于工程设计中,并可为类似的工程设计参考。

参考文献:

[1] 陆汉柱,黄智敏,陈灿辉,等.惠州抽水蓄能电站下库溢流坝水工模型试验研究[J].广东水利水电,2003(5):32-33.

[2] 陆汉柱,黄智敏,钟勇明.惠蓄下库溢流坝阶梯消能试验研究[J].广东水利水电,2004(5):21-24.

(收稿日期:2005-03-01 编辑:高建群)

· 简讯 ·

国家“863”项目“苏州市城市水环境质量改善技术与综合示范”课题通过验收

2006 年 2 月 20 日,河海大学主持的“苏州市城市水环境质量改善技术与综合示范”课题,在苏州由国家“863”计划资源环境技术领域办公室会同“十五”水专项专家组成员进行验收并顺利通过。

验收专家组通过示范工程现场考察、课题组汇报及现场质询,认为该课题针对苏州河网城市特色和水污染特征,结合学校水利学科特长,提出的以水动力循环为核心、控源为基础、生态工程为补充手段的城市水环境质量改善技术方案极具特色;研究开发的河网水动力分级循环及水量自动控制技术、局部重污染河道水质改善的生物-生态协同调控等技术成果具有创新性;建立的拙政园水质净化与生态修复、苗家河河道水质净化等 7 项示范工程,初步形成了苏州主城区河网水环境实时监测系统。研究成果具有较好的推广应用前景,已申请国家发明专利 3 项。该课题全面达到了合同规定的考核目标和技术经济指标。

“苏州市城市水环境质量改善技术与综合示范”课题是河海大学主持的第一个“863”计划一级项目,该课题的顺利验收不但推动了学校环境学科的发展,也为学校“十一五”期间在资源环境领域的发展奠定了基础。

(本刊编辑部供稿)