

江苏省振动工程学会

第一届学术交流会

论文集

一九八九年十月

江苏省振动工程学会
第一届学术交流会
论文集

江苏工业学院图书馆
藏书章

一九八九年十月

江苏省振动工程学会
第一届学术交流会论文集

目 录

一、结构动态设计、分析与有限元模型修正

1	水工弧形闸门的动特性及其优化方法	阎诗武	1
2	CKLE飞机颤振模型的结构动态设计	周传荣等	13
3	复杂转子整机振动计算	苏 民等	31
4	系统之间撞击力的求解	林砺宗	39
5	凝固系统的结构动力修改	陈时雨等	46
6	确定结构有限元动力模型边界条件的模态参数法	陈时雨等	56
7	动态子结构法在多分支轴系横振计算中的应用	邹春平等	64
8	结构振动特征值问题的分部矩阵摄动法	王家庠等	86
9	用双协调动态子结构法求农用三轮车架动态特性	杨其武等	93
10	离合器从动盘的动态分析	张 准等	104
11	双曲拱坝模态分析	王义锋	116
12	舒适性驾驶座椅的动态设计	吴国梁	124

13 管道液流的模糊振荡	张庙康	13.2
14 水工弧形闸门的水弹性耦合自振特性研究	严根华等	142
15 任意系统之间碰撞的终了速度	林励宗	158
16 振动理论在弹性碰撞中的应用	唐堃楦	167
17 C R A S 动力修改原理	郑万淦	173
18 用计算机辅助分析板架结构的动特性	樊宝康	191
19 南炼机组烟气透平弹性支承的振动特性	周达三等	201
20 线性振动系统广义模态的非唯一性和正交关系	陈振藩	209
21 复合结构振动分析的数值方法	陈 前等	222
22 一种新的约束阻尼梁有限元模型	薛国新	234
23 螺旋桨——减速器——发动机耦合系统扭转振动固有特性计算	顾仲权等	248
24 振动元件位置坐标的重要作用——一种建立系统矩阵方程的新方法	蔡秋生等	261
25 动结合面动态特性的研究之一——滚珠丝杠副	张 思	269
26 多自由度系统的反共振规律研究	胡海岩	279
27 对多自由度系统固有振型节点规律的反思	胡海岩	294

二、振动参数识别和测试技术

28 模态识别广义频域法	李岳峰等	307
29 用共振法测定纸板的弹性模量	葛文美等	314
30 微机在传感器幅值线性度校准数据处理中的应用	马玲等	318
31 微机在加速度计横向灵敏度校准数据处理中的应用	张松晖等	323
32 传递函数的无偏差测量方法	林励宗	330
33 爆破地震效应试验观测研究	江苏地震局 地球物理室	336
34 油锯系统频率响应函数的测定	杨德华等	350
35 丝鸣的测定及其机理分析	冯志华等	357
36 锤击模态试验中的几个问题	林励宗	368
37 横流中圆柱结构的响应预测方程及激振力识别	孙保苍等	376
38 用双加速度计法测量振动强度	张保平	385
39 振动校准中的激励控制	吴慧新等	396
40 短路环对电动式振动台工作频率上限的影响	邱景湖	403
41 相离圆双振幅测量器和平行线双振幅测量器	也宝庆	409

42 土壤密实度的振动测量和 M S C—1 型密实度测量仪	陆永颐等	413
43 脉冲锤的研制及校准	孙培林等	419
44 汽轮机叶片振动频率, 动应力测试数据采集	臧朝平等	423
45 电动激振器的开发及其在工程中的应用	赵淳生等	436
46 Q D 5 9 型全封闭制冷压缩机振动, 噪声频谱分析	归振华	445
47 球墨机动态载荷谱的研究与测试	姜大志	454

三、振动、噪声控制和振动利用

48 带阻尼吸振块梁的自由振动	宗福开	462
49 平方阻尼缓冲系统的定性研究	陈振藩	470
50 柴油机双层隔振系统的研究与计算	王振鸿等	484
51 简单振动结构中的有源消振	赵其昌等	493
52 减小螺旋桨激起的船体振动	李昌龙	499
53 静不稳定系统低频强迫振动的控制	陈行健	508
54 改善轮式拖拉机驾驶座平顺性的探讨	薛霁云	512
55 全金属钢丝绳隔振器的综合特性研究	胡丰年	521

56 声振技术在航海仪器中的应用	王寿荣等	532
57 丝织机梭子、皮结峰值压力回归分析及其降低的探讨	冯志华	540
58 土壤压实度动态检测的理论研究	张克仁等	466
59 Y 1 6 压路机驾驶舱的降噪研究	季振宇等	557
60 船舶典型结构的结构噪声传递及其传递效率	蔡承德等	564
61 振动对工业机器人运动精度影响初探	周学正	570

四、机械故障的振动诊断

62 单桩承载力的附加质量法	韩晓林等	579
63 海军 7 2 2—II 艇发动机的振动监测和诊断	翁维熊	586
64 排除转子振动故障的一种方法	黄太平	590
65 4 0 9 型燃气轮机陆上试验和排故中振动监测的应用	汪帼华	598
66 齿轮故障的振动检测与分析	钱济国等	604
67 微电脑在水轮发电机组常规振动监测动态分析装置中的应用	姬长幸	611
68 滚动轴承的故障识别	鲍 明等	624

水工弧形闸门的动特性及其优化方法

阎 诗 武

水利部

(交通部 南京水利科学研究院)

能源部

提 要

本文在分析水工弧形闸门结构的构造特征及实验模态分析的基础上,提出用灵敏度分析方法进行动态特性优化计算的原理。通过工程实例计算了弧形闸门动特性的优化结果。还指出了弧形闸门构造不适应动态要求的某些固有缺点。

一、引 言

弧形闸门已广泛用于水利水电工程。虽大部运行良好,但仍有不少弧形闸门在运行中发生强烈振动,有的甚至失事造成巨大损失。因而,弧门的振动问题已引起了广泛的关注。已往闸门结构设计主要考虑静力强度问题,简化为平面问题进行计算。动力问题则很少考虑。

弧门结构的总体布置主要由弧面半径 R 及门高 H 来控制。规范〔1〕指出 R/H 应为:

$$\text{平水式 } R/H = 1.1 \sim 1.5 \quad (1)$$

$$\text{深水式 } R/H = 1.5 \sim 2.5 \quad (2)$$

而面板梁格系统与支臂的单位刚度也应保持一定的比例。实复式主梁与支臂的单位刚度比 K 应为:

$$K = \frac{J_1 L_2}{J_2 L_1} = 4 \sim 10 \quad (3)$$

式中: J_1, J_2 与 L_1, L_2 分别表示主梁与支臂的截面惯矩及计算长度。

这样,弧门结构系统的启闭杆、面板梁格系与支臂的刚度比例则满足下式〔2〕

$$J_{\text{杆}} < J_{\text{支臂}} < J_{\text{面板}} \quad (4)$$

文献〔3, 4〕已提出某些修改意见。根据以上原则设计的弧形闸门,从静力强度,变位以及减少启闭力等方面考虑可能是经济合理的,但动力方面则存在明显的缺点。

50年代以来,我国已对产生强烈振动的闸门进行了大量的原型观测。闸门的动态特性为利用传统的冲击法进行,根据响应信号一般只能取得闸门结构的第一自振频率〔5, 6〕。

* 严根华同志参加了试验,计算工作得到本院计算中心樊宝康同志的大力支持。

应用这种方法取得的资料不完整、精度也差。80年代笔者才首次应用先进的实验模态分析技术,研究弧形闸门为主要部件的动特性〔7〕。嗣后,又应用这种先进技术成功地取得了弧形闸门空间结构的完整资料〔8〕。结果证明:建立在现代试验技术,计算机及计算技术基础上的实验模态分析方法,研究象弧形闸门这样复杂空间结构的动态特性是行之有效的。

结构动特性虽是分析振动问题的重要资料,但实际工程关心的是闸门在运行中是否发生强烈振动,而不是动态特性本身。因此,研究结构动态特性的修改、优化动态特性应是研究动态特性的目标。已往对结构进行动态特性的修改,往往凭经验进行,有相当的盲目性,无一定把握。

80年代初, p. Vanhonacker〔9〕在实验模态分析的基础上,利用伴随结构理论分析了结构动特性的灵敏度。应用此法可计算结构参数的改变对结构动特性的修改效应,能方便地找到最佳修改方案,即能找到影响动特性最灵敏的修改部位及结构修改的量级。因此,结构动特性的灵敏度分析就成为结构动态优化设计的理论基础。例如可以修改结构的模态频率避免共振,可以限制某些重要部件的变位以保证结构的正常运行;还可以进行阻尼层设计以改善结构的运行条件,提高结构的抗疲劳能力等等。本文利用结构动特性灵敏度分析方法,对弧形闸门结构进行动特性优化使之能安全运行。

二、结构动特性的灵敏度分析与动态优化

通过试验模态分析可得到结构完整的模态参数(模态频率、模态阻尼与模态振型,以描述结构的动态特性。对于实际工程,研究结构动力问题应该是结构在动力作用下能否安全运行,而不是动特性本身。取得结构动特性数据后,只能作为分析结构是否能够安全运行的基本资料。修改结构,从而改变结构的动特性使符合安全运行的要求才是研究结构动力问题的根本目标。这样,研究如何最有效的修改设计,改变结构的动特性使之能适应安全运行的要求是灵敏度分析的目的。因此,结构动特性的灵敏度分析是计算结构动态优化的有效手段。灵敏度分析将结构参数与模态参数紧密地联系起来。从图1可以看出两类参数之间的关系。图1的上部为结构参数,下部为模态参数,实线表示结构参数修改对模态参数的效应;而虚线则表示某种改变产生的附加影响。

n 个自由度、粘性阻尼、线弹性系统的运动可以用下式描述:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \quad (5)$$

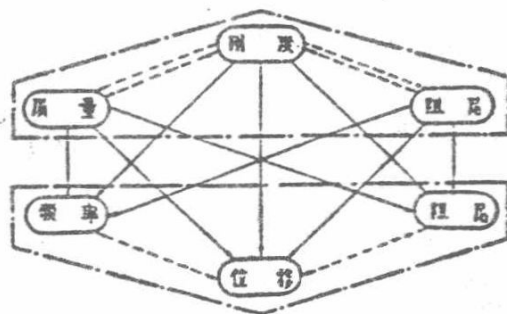


图1 模态参数与结构参数的关系

式(5)经付里变换可将时域的运动变换到频域考查:

$$(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])\{X\} = \{F\} \quad (6)$$

式中: $\{X\}$ 与 $\{F\}$ 是位移与力向量; $[M]$, $[K]$ 与 $[C]$ 是系统的质量、刚度与阻尼矩阵。

由方程(6)可得频域的传递矩阵 $[H]$:

$$[H] = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\{U_k\}}{j\omega - S_k} + \frac{\{U_k^*\}}{j\omega - S_k^*} \right) \quad (7)$$

$$\text{式中: } S_k, S_k^* = \sigma_k \pm j\omega_k \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

为 k 阶模态特征值, σ_k 与 ω_k 分别表示 k 阶模态阻尼系数与频率, 符号“*”表示共轭, 相应的留数 U_k 与 U_k^* 可用下式表示:

$$\{U_k\} = \{u_k\} \{u_k\}^T / a_k \quad (9)$$

$$\{U_k^*\} = \{u_k^*\} \{u_k^*\}^T / a_k^*$$

式中: $\{u_k\}$, $\{u_k^*\}$ 为 k 阶振型; a_k , a_k^* 为标量因子。

当 $a_k = a_k^* = 1$, $k=1, 2, \dots, n$ 时, 可得规一化动柔度 $[H']$:

$$[H'] = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\{h_k^!\}}{j\omega - S_k} + \frac{\{h_k^{!*}\}}{j\omega - S_k^*} \right) \quad (10)$$

$$\text{其中: } \{h_k^!\} = \{u_k^!\} \{u_k^!\}^T, \{h_k^{!*}\} = \{u_k^{!*}\} \{u_k^{!*}\}^T \quad (11)$$

$$\text{或 } \{h_{rq}^!\} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\{h_{k,rq}^!\}}{j\omega - S_k} + \frac{\{h_{k,rq}^{!*}\}}{j\omega - S_k^*} \right) \quad (12)$$

式中: $\{u_k^!\}$; $\{u_k^{!*}\}$ 为规一化振型。

显然, 动柔度中包含了所有模态参数的信息。将规一化动柔度对结构参数 p_m 求导可得结构动特性的微分灵敏度:

$$\begin{aligned} \frac{\delta \{h_{rq}^!\}}{\delta p_m} = & \sum_{k=1}^n \frac{1}{j\omega - S_k} \frac{\delta \{h_{k,rq}^!\}}{\delta p_m} + \sum_{k=1}^n \frac{\{h_{k,rq}^!\}}{(j\omega - S_k)^2} \frac{\delta S_k}{\delta p_m} \\ & + \sum_{k=1}^n \frac{1}{j\omega - S_k^*} \frac{\delta \{h_{k,rq}^{!*}\}}{\delta p_m} + \sum_{k=1}^n \frac{\{h_{k,rq}^{!*}\}}{(j\omega - S_k^*)^2} \frac{\delta S_k^*}{\delta p_m} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{其中 } \{h_{k,rq}^!\} = \{u_{rk}^!\} \{u_{qk}^!\}^T, \{h_{k,rq}^{!*}\} = \{u_{rk}^{!*}\} \cdot \{u_{qk}^{!*}\}^T \quad (14)$$

$\{u_{rk}^!\}$ 表示 k 阶模态中 r 点的子列

根据伴随结构理论^[10]有:

$$\frac{\delta(h_{r,q}^!)}{\delta p_m} = - (h_{r,i}^!) \frac{\delta(-\omega^2(M_{ii}) + j\omega(C_{ii}) + (K_{ii}))}{\delta p_m} (h_{i,q}^!) \quad (15)$$

式中: (M_{ii}) , (K_{ii}) , (C_{ii}) 为结构参数 p_m 影响的质量, 刚度及阻尼阵中的子阵。

$$\text{令 } (K_{ii}^!) = -\omega^2(M_{ii}) + j\omega(C_{ii}) + (K_{ii}) \quad (16)$$

将(12)代入(15)式后展成部分分式再与(13)比较可得

$$\frac{\delta(h_{k,r,q}^!)}{\delta p_m} = - (C_k) - (I_k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^n ((E_{k,m}) + (G_{k,m})) \quad (17)$$

$$\frac{\delta S_k}{\delta p_m} (I) = - (h_{k,r,q}^!)^{-1} (A_k) \quad (18)$$

$$\text{式中 } (A_k) = (h_{k,r,i}^!) \left(\frac{\delta(k_{ii}^!)}{\delta p_m} \right) j\omega = S_n \cdot (h_{k,i,q}^!) \quad (19)$$

$$(C_k) = (h_{k,r,i}^!) \left(\frac{d}{dj\omega} \cdot \frac{\partial(k_{ii}^!)}{\partial p_m} \right) j\omega = S_n (h_{k,i,q}^!) \quad (20)$$

$$(I_k) = (h_{k,r,i}^{!*}) \cdot \left(\frac{\partial(k_{ii}^!)}{\partial p_m} \right) j\omega = S_n \frac{(h_{k,i,q}^{*})}{S_k - S_k^*} + \frac{(h_{k,r,i}^{*})}{S_k - S_k^*} \left(\frac{\partial(k_{ii}^!)}{\partial p_m} \right) j\omega = S_n (h_{k,i,q}^!) \quad (21)$$

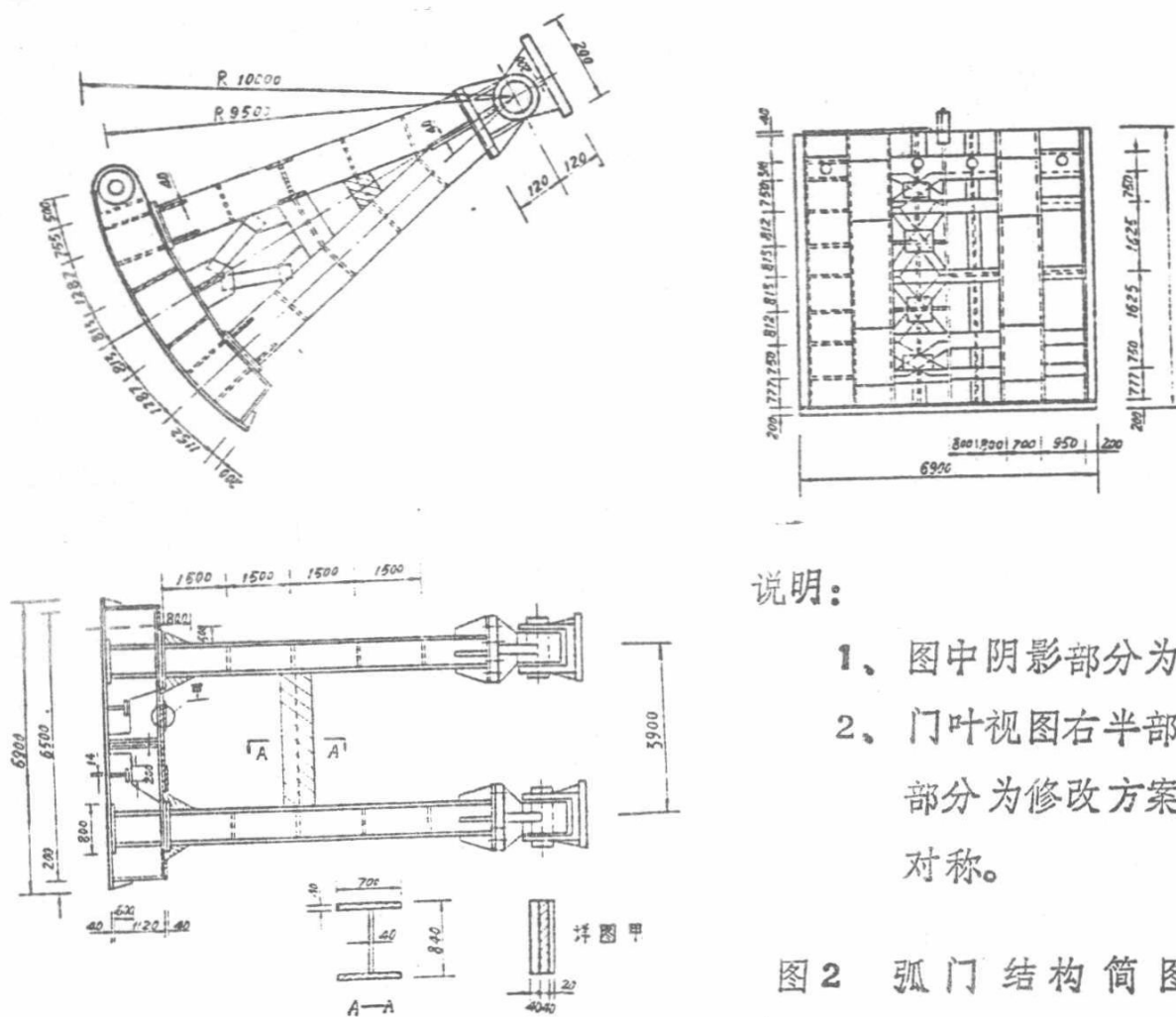
$$(E_{k,m}) = (h_{k,r,i}^!) \cdot \left(\frac{\partial(k_{ii}^!)}{\partial p_m} \right) j\omega = S_n \cdot \frac{(h_{m,i,q}^!)}{S_k - S_m} + (h_{k,r,i}^!) \left(\frac{\partial(k_{ii}^!)}{\partial p_m} \right) j\omega = S_n \cdot \frac{(h_{m,i,q}^{*})}{S_k - S_m^*} \quad (22)$$

$$(G_{k,m}) = \frac{(h_{m,r,i}^!)}{S_k - S_m} \cdot \left(\frac{\partial(k_{ii}^!)}{\partial p_m} \right) j\omega = S_n (h_{k,i,q}^!) + \frac{(h_{m,r,i}^{*})}{S_k - S_m^*} \left(\frac{\partial(k_{ii}^!)}{\partial p_m} \right) j\omega = S_n (h_{k,i,q}^!) \quad (23)$$

三、应用实例

某工程泄洪中孔 $6 \times 5 \text{ M}$ 高压弧形工作闸门如图 2 所示。面板与支臂均系薄板构成的组合构件。承压面板后为主纵式箱式梁格。支臂为空心矩形断面。试验时将弧门结构离散为 66 个节点，其中左、右两个支臂为 12 个节点，面板为 42 个节点。节点的位置与编号标于图 3。每个节点考虑 ρ (径向)、 θ (切向)、 Z (侧向) 三个方向。这样，闸门结构将有 198 个自由度。

首先通过实验模态分析识别弧门结构的模态参数，然后分析计算弧门结构动特性的灵敏度。计算出动特性修改的最灵敏位置与量级。据此，可通过修改结构参数来修改模态参数，以达到动特性优化的目的。



说明:

- 1、图中阴影部分为结构修改后加强部位
- 2、门叶视图右半部分为原设计，左半部分为修改方案，修改后结构保持对称。

图 2 弧门结构简图

1. 弧门结构的构造特征

弧门面板梁格系为迎水面板及其后纵、横梁格组成。主要有二纵梁与二横梁。四条支臂在梁格交点与面板梁格相接。左、右为二条支臂在铰点会合，将面板承受的载荷传至铰座。经估算该门构造的特征值为:

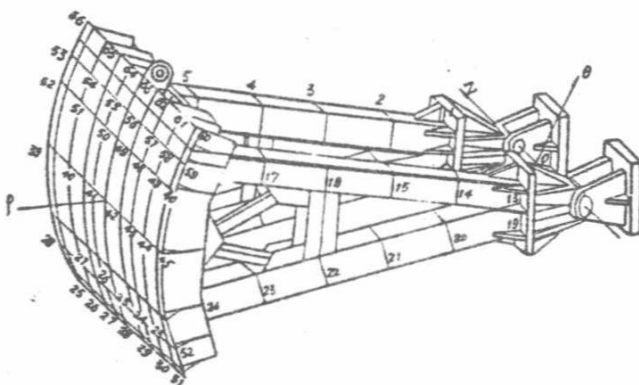


图 3 弧门测点布置图

$$R/H=2 \quad ; \quad K = \frac{J_1 L_2}{J_2 L_1} = 6.7$$

符合规范要求。显然，面板梁格的刚度远大于支臂。两大部件仅用螺栓联接。左右支臂间无任何联接件，因而闸门的整体性较差，部件的个性易于表现，不利于抗振。

2、计算方法

结构动特性灵敏度分析是计算机辅助结构动力分析的重要组成部分。它是结构局部修改，子结构综合及阻尼层设计的基础。结构动特性的灵敏度分析是实验模态分析的发展。因此，在灵敏度分析之前必须首先取得结构的模态参数。关于实验模态分析的理论与方法在此不再赘述，有兴趣的读者可参阅文献〔7、8〕。计算的过程见框图4。

计算时将分别考虑弧门整体及分部件两种情况。信号处理的采样间隔 Δt 取 $100\mu s$ 。根据采样定件，分析的最大频率为 5000Hz ，为了减少混淆与泄漏，经抗混淆滤波器滤波，取滤波后的频带为 $0\sim 2500\text{Hz}$ 。因此，计算分析的最高频率为 2500Hz 。

采用多自由度时域曲线拟合法计算平均模态参数。与频域拟合算法相比，缩短了计算时间，提高了精度。极点数选取误差最小的拐点，本计算为17个极点，共识别了17个模态。由于计算机容量关系，选用前10个模态，不影响对工程安全的分析。为了便于分析，经灵敏度计算可得各个节点之间的灵敏度，选出各模态最灵敏的5个部位，这样就可以找到最有利的修改部位及修改的量级。

3、计算结果与比较

(1) 原设计方案

弧门结构(图2)的平均模态参数及其部件的模态频率列于表1。振型图绘于图5。从表1可以看出原设计弧门基频仅 5.89Hz 。支臂的基频为 $6\sim 8.5\text{Hz}$ ，Z向最低，即弧门整体结构的基频与支臂Z向基频接近说明主要体现了支臂的“个性”。这与前面对弧门结构构造特征的分析相符。

经灵敏度计算可得到十个模态最灵敏的五个位置及灵敏度值，位置用节点号~节点号表示。量级的单位是 $\text{Hz}/\text{N}(\text{S})/\text{M}$ 即结构每改变牛顿/米所能改变的模态

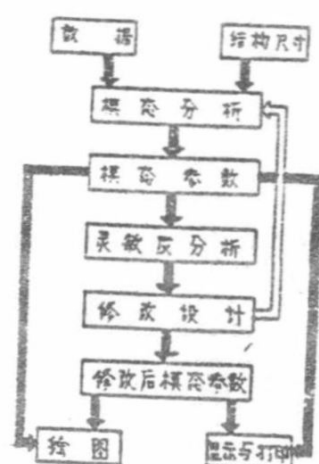


图4 计算框图

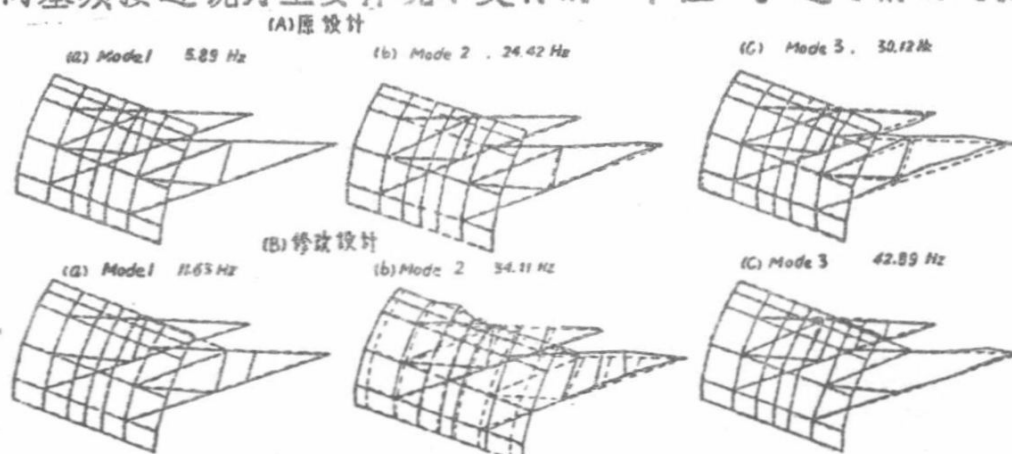


图5 振型图

频率数。弧门整体及分部件前三个模态的灵敏度值分别列于表2。

(2)修改设计方案

根据弧门构造特征,与前述动特性及灵敏度分析的结果可以看出,要提高弧门结构的基频及其前数阶的自然频率,应从改变闸门的刚度入手,主要增加联接构件以提高闸门的整体刚度。为便于对比,修改设计方案亦绘于图2,增加的杆件用影线表示。

修改方案的弧门平均模态参数及其部件的模态频率亦列于表1。前三个模态的振型图绘于图5。显然,弧门前5阶自然频率明显增大,基频变为 11.63Hz 。从部件的模态频率来看,增加并不多,这说明弧门整体刚度增加使闸门的整体模态频率增加较多。

前三个模态的灵敏度值亦列于表2。最灵敏的位置有所改变。灵敏度的量级降低数拾倍以上,即再要提高闸门的自振频率所需增加结构刚度的量级大大增加。

(3)方案比较

从闸门的模态频率及其灵敏度分析的结果(表1与2)来看,图2所示的修改方案增加的构件不多(仅增加约6吨钢材),对增加弧门结构的刚度与提高模态频率有明显的效果。而且,基频 11.63Hz 的谱峰很小,再结合水流可能激励的频带与能量来看,如果设有特殊的作用力,闸门将不会产生危及运行安全的振动。

四、结 语

计算机辅助结构动力分析(CADA)方法是80年代才发展起来的一种先进技术。结构动特性的灵敏度分析是CADA方法的基础。它将结构参数与模态参数联系起来,有效地指出结构修改对模态参数产生的最有效的部位与量级,从而指导动特性的优化计算,改变以往在动态修改方面的盲目性。经初步应用于某实际工程弧形闸门的动态设计,说明结构在满足静力强度的要求下,进行结构动力分析(CADA)计算,通过动特性的灵敏度分析,可以找到结构构造方面的问题并可按照要求对结构进行动态优化,使结构能充分利用材料并能安全运行,取得了明显的效果。

参 考 文 献

- (1) 水利电力部闸门规范修订组:《水利水电工程钢闸门设计规范SDJ13-70》(试行),水利电力出版社,1973年11月
- (2) 阎诗武:水工弧形闸门的振动,《金属结构》1985年5期。

- (3) 章继光: 关于弧形闸门主框架单位刚度比的合理取值问题,《金属结构》
1985年4期。
- (4) 宋许成, 李雪春: 弧形闸门实复式主横梁与支臂单位刚度比的研究, 水利水电科学研究院结构材料所, 1985年10月
- (5) 阎诗武: 江苏省嶂山闸弧形闸门振动及启闭力观测试验报告, 1966~1978年研究报告汇编, 水工分册(一), 南京水利科学研究所, 1983年。
- (6) 章继光: 国内水工闸门振动研究的动向, 《水力发电》, 1985年1期
- (7) 阎诗武: 皎口水库孔闸门振动的原型观测研究, 《水利水运科学研究》,
1985年1期。
- (8) 阎诗武: 应用实验模态分析技术识别弧形闸门的模态参数, 《水利学报》,
1987年5期。
- (9) p. Vanhonacker, Differential and Difference Sensitivities
of Natural Frequencies and Mode Shapes of Mechanical
Structures, AIAA Journal, Vol. 18, December 1980
- (10) Van Belle, H., Theory of Adjoint Structures, AIAA
Journal, Vol. 14, July 1976

表 1、

弧门平均模态参数

模态序号	弧门整体						面板梁格系												支 臂								
	频 率 (Hz)			阻 尼 因 子 (%)			ρ 向 频 率 (Hz)			θ 向 频 率 (Hz)			Z 向 频 率 (Hz)			ρ 向 频 率 (Hz)			θ 向 频 率 (Hz)			Z 向 频 率 (Hz)					
	原设	修改	差	原设	修改		原设	修改	差	原设	修改	差	原设	修改	差	原设	修改	差	原设	修改	差	原设	修改	差	原设	修改	差
	计	设计	值	计	设计		计	设计	值	计	设计	值	计	设计	值	计	设计	值	计	设计	值	计	设计	值	计	设计	值
1	5.59	11.63	5.74	66.76	38.53		16.13	15.94	-0.19	10.63	21.67	2.04	11.63	11.37	-0.26	8.47	8.73	0.26	7.88	9.02	1.64	6.1	7.19	1.09			
2	24.92	34.11	9.19	32.48	11.07		31.17	33.25	2.08	30.01	34.33	4.32	16.55			27.83	25.27	-2.56	31.45	33.50	2.05	26.23	34.64	6.41			
3	30.12	42.89	12.77	7.75	6.61		41.12	45.09	3.97	42.41	45.57	3.16	28.98	33.94	4.96	33.18	34.06	1.48	34.19	34.87	6.68	31.27	43.27	12.00			
4	41.26	54.59	13.33	9.25	11.77		52.18	57.86	5.68	47.05	53.39	6.34	40.40	41.47	1.07	40.82	43.04	2.22	43.25	48.13	4.88	46.37	46.83	0.46			
5	58.92	65.61	6.69	8.51	14.21		61.30	69.21	7.91	58.81	58.00	-0.81	52.82	50.05	-2.77	55.00	54.96	-0.04	59.40	60.11	0.65	56.33	64.53	8.20			
6	70.92	70.07	-0.85	17.92	11.63		72.59			76.18	68.52	-7.66	59.46	58.16	-1.3	66.06	70.90	4.84	67.59	68.57	0.98	60.63	73.08	12.45			
7	81.73	78.72	-3.01	6.75	6.72		80.07	82.04	1.97	81.64	89.00	7.36	72.71	69.80	-2.91	80.22	80.64	0.42	83.44	92.00	8.56	65.42	74.87	9.45			
8	95.87	96.85	0.98	9.29	4.63		82.63	95.32	12.69	95.13	105.30	10.17	81.28	88.83	7.55	95.94	99.57	3.63	90.92	98.9	7.88	80.25	90.01	9.76			
9	104.43	106.21	1.28	4.97	6.87		98.36	106.00	7.64	105.27	104.65	-0.62	93.45	96.35	2.90	102.79	107.64	4.85	101.66	107.61	5.95	94.57	97.83	3.26			
10	118.75	114.99	-3.76		8.24		108.62	117.04	8.42	119.15	114.02	-5.13	102.23	101.55	-0.68	109.04	118.94	0.99	107.04	117.12	10.08	105.76	111.42	5.66			

表 2-1

弧门整体灵敏度 (HZ/N(S)/M)

模 态 序 号	P 向				O 向				Z 向			
	原 设 计		修 改 设 计		原 设 计		修 改 设 计		原 设 计		修 改 设 计	
	位 置	灵 敏 度	位 置	灵 敏 度	位 置	灵 敏 度	位 置	灵 敏 度	位 置	灵 敏 度	位 置	灵 敏 度
1	25~66	0.11056E-02	10~21	0.31116E-04	5~27	0.46947E-02	9~21	0.26288E-04	9~38	0.36301E-02	7~10	0.17599E-03
	25~53	0.97255E-03	10~15	0.29183E-04	3~27	0.42651E-02	9~20	0.25859E-04	9~25	0.29661E-02	6~10	0.16350E-03
	10~66	0.81246E-03	10~37	0.23094E-04	5~19	0.38459E-02	21~62	0.21775E-04	9~39	0.27096E-02	10~53	0.13361E-03
	63~66	0.74446E-03	10~35	0.22071E-04	5~29	0.35491E-02	20~62	0.21431E-04	9~40	0.26099E-02	10~62	0.13353E-03
	38~66	0.71805E-03	10~20	0.21389E-04	5~28	0.35296E-02	10~21	0.20157E-04	10~38	0.22973E-02	10~54	0.12872E-03
	38~66	0.47837E-03	10~38	0.79136E-05	5~15	0.10488E-02	9~12	0.53562E-05	7~10	0.17217E-02	7~38	0.26430E-04
2	25~66	0.43474E-03	10~39	0.67791E-05	5~13	0.98057E-03	2~12	0.47635E-05	10~20	0.17023E-02	7~25	0.24266E-04
	38~53	0.40615E-03	10~37	0.66155E-05	5~16	0.96169E-03	12~18	0.45284E-05	10~14	0.16135E-02	1~19	0.24017E-04
	25~53	0.36695E-03	9~38	0.64230E-05	5~19	0.93160E-03	3~12	0.43494E-05	7~9	0.14227E-02	2~38	0.23486E-04
	12~38	0.30196E-03	10~25	0.62097E-05	5~31	0.88549E-03	10~12	0.43092E-05	9~20	0.13864E-02	7~39	0.23401E-04
	16~25	0.34919E-04	7~10	0.32561E-05	3~27	0.10313E-03	21~24	0.24327E-05	7~13	0.88823E-03	2~19	0.24018E-04
	19~25	0.29563E-04	7~27	0.29626E-05	3~28	0.76698E-04	20~24	0.24201E-05	7~16	0.56444E-03	1~19	0.21529E-04
3	16~38	0.27875E-04	7~32	0.29207E-05	3~29	0.75692E-04	2~62	0.23900E-05	9~13	0.51556E-03	2~10	0.19449E-04
	19~38	0.23119E-04	7~45	0.28049E-05	8~27	0.74002E-04	20~62	0.23750E-05	2~13	0.49859E-03	1~27	0.17910E-04
	22~25	0.22128E-04	5~7	0.27509E-05	9~27	0.73403E-04	19~62	0.19494E-05	4~13	0.46649E-03	2~27	0.17687E-04