

泄流诱发水工结构振动问题的综合集成研讨

崔广涛, 马 斌

(天津大学建工学院, 天津 300072)

摘要 :以高拱坝泄洪振动为背景,对从水工、水弹性模型到数值模型,从模糊模型到原型观测的广泛研究进行综合概括,探讨大流量泄洪诱发水工建筑物(泄洪拱坝、导墙、挑溢流厂房、闸墩)的振动问题。指出应用水弹性模型和计算机“复合模型”方法最为合理,可达到从定性到定量的转变。表述对大型水利工程(三峡、二滩、小湾、构皮滩、溪洛渡、向家坝等水电站)大流量泄洪振动实际有关的研究,以水弹性模型为主导,以数值为配合,以原型观测为验证的方法是合适的。认为综合集成方法比较符合大型系统的研究。

关键词 :流激振动 综合集成 水弹性模型 正、反分析 等效荷载 反馈分析 小波分析 模糊决策模型
中图分类号 :TV131.61 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)01-0001-010

Comprehensive compound method for flow-induced vibration of hydraulic structures//CUI Guang-tao, MA Bin(School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract :Based on the flow-induced vibration of high arch dams, a comprehensive review on the broad research field including hydraulic models, hydroelastic models and numerical models as well as fuzzy models and prototype measurements was made. The flow-induced vibration owing to large discharge flood release of hydraulic structures such as arch dams, guide walls, jet-over powerhouses and piers was discussed. It was put forward that the compound model based on the hydroelastic models and numerical models was the most reasonable, and would realize the transformation from qualitative analysis to quantitative analysis. With regard to the studies on the flow-induced vibration of some large hydropower station projects such as Three Gorges, Ertan, Xiaowan, Goupitan, Xiluodu and Xiangjiaba, the following procedures were satisfactory: the hydroelastic models were mainly employed in combination with the numerical models, and the prototype measurements were employed for validation. A conclusion is drawn that the comprehensive compound method is more appropriate for the studies on large projects.

Key words :flow-induced vibration; integration; hydroelastic model; positive and negative analysis; equivalent load; feedback analysis; wavelet analysis; fuzzy decision-making model

在水利水电工程中,水流诱发建筑物(包括闸、阀门)振动(即流激振动)时有发生,而且多种多样。在美国,一些工程的消力池导墙由于消力池中水流强烈紊动所产生的脉动荷载、随机振动而遭到破坏。前苏联也有类似事故,如:伏尔加水电站拦鱼墩倒塌,在大洪水时水电站厂房、各坝段产生同步振动,距大坝 3.2 km 处的居民楼也有震感。在我国有贵州山坳拱坝溢流时强烈振动和万安水利枢纽溢流道导墙倒塌等实例。大化水电站溢流坝闸墩在泄流量大于 $4400 \text{ m}^3/\text{s}$ 时强烈振动,泄流量超过 $7000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时观测到最大双倍振幅达 3 mm,远超过允许值。1982 年乌江渡水电站原型观测时发现左岸滑雪道右导墙有强烈“拍振”现象,墙顶一排铁护栏“拍振”,如同蛇行,闸门开度(泄流量)越大“拍振”现象越明

显。1987 年 8 月进一步观测显示:当闸门全开时,最大双倍振幅达 3.1 mm,并发现左导墙出现上下的贯通缝。这些工程在做了专门处理后,才得以安全运行。类似的还有青铜峡水电站导墙等。诸多工程问题已成为高速水流诱发水工结构振动研究的重要课题。我国正在设计、建设中的高拱坝群,高度达 300 m 级,坝身泄洪流量为 $1.0 \text{ 万} \sim 3.0 \text{ 万} \text{ m}^3/\text{s}$,泄洪功率达几千万千瓦甚至上亿千瓦,已成为世界筑坝史上之最(表 1)。工程同时也存在泄洪振动安全和对本身以及周边环境的影响问题。本文以高拱坝泄洪振动为背景,就 30 年来所接触的这一课题,对从水工、水弹性模型到数值模型,从模糊模型到原型观测的广泛研究进行概括性分析。

1 流激振动机制和研究方法

泄流诱发水工结构振动研究,最重要的是正确判断产生振动的机制:①外部诱发的振动;②不确定诱发的振动;③运动诱发的振动。其中最主要的是外部诱发的振动,它是由水流或压强脉动引起的,并不是振动系统所固有的,对此,人们最关心的是接近建筑物固有频率所传给建筑物的能量。对于水工建筑物(拱坝、导墙、隔墙等)来说,振动都是小量级的,都是在其平衡位置附近做相对微幅振动。结构处在弹性阶段的工作状态,是常系数线性系统,即响应是可以叠加而又是齐次的,系统具有常系数,系统的所有基本性质都不随时间变化,常系数的线形系统应具有频率保持性,输出与输入的区别只不过改变了振幅和相位。因此,泄流激振问题主要取决于结构系统和荷载系统2个方面,关系式可以表示为^[1]

G_y(f) = |H(f)|^2 G_x(f) (1)

研究可采用的方法,一是在模型中直接测量水流诱发力 F(t) 的谱密度 G_x(f),应用频响函数 H(f) 计算结构响应的谱密度 G_y(f)^[2-7];二是在水弹性模型(或原型)上直接量测建筑物响应^[8-21]。

第1种方法的优点是节省试验和安装仪器设备的工作量和经费,试验结果(脉动压力)具有普遍性。这就是水力学模型^[2-7]。第2种方法的优点是直观、信息量大、计算工作量较少。研究的目的都是预报可能的共振状态和采取措施防止危险性结构振动。在具体实施上采用第1种方法求脉动荷载,采用计算分析方法求响应,除了个别建筑物外,测试和分析都比较困难。也有一些具体实例对比水弹性模型,

结果令人满意^[22-23]。

另一方面,式(1)显示的是泄洪振动研究中3个主要量的关系,因为是在频率域概念下最简单的数学关系,知道其中2个量就可以算出第3个量,所以就有3类问题:①已知水流荷载谱和传递函数,求响应谱,即正问题;②已知 G_y(f) 和传递函数,求荷载谱,即第1类反问题;③已知荷载谱和动力响应,求传递函数中的频率、振型和材料特性等的第2类反(馈)问题。这对问题的分析十分有用。如表1和图1所示(图中 x 为测点到孔口的距离与孔口开度的比值)。

2 模型与相似准则

关于水流脉动压力和流激振动试验,现已有 SL158—95 规程^[24]。水工泄水建筑物模拟的水力学条件应满足重力相似律,以保证水流作用(荷载)相似。

2.1 水力模拟相似性

水流脉动荷载模拟相似的关键是脉动压力的相似律,也是泄流结构水流-结构耦合模拟的前提条件。练继建等^[5]对系列模型和二滩原型观测研究表明,在强势紊流区,水流脉动压力以一阶或高阶矩描述的振幅特征和以频谱、优势频段、积分尺度描述的频率特征,都符合重力相似律(振幅)和重力相似律的斯特罗哈数准则(频率)。图2为水跃脉动压力占总能量50%的优势频段范围。可见不同比尺的优势频段包络线范围明显不同,频率按斯特罗哈数准则 St = fl/V 进行无量纲处理后有一致的规律,表明脉动压力的优势频率段符合重力相似律,图3、图4为水跃和射流系列比尺的脉动压力频谱图比较,图

表 1 流激振动研究的对象工程

工程名称	坝高/ m	坝身泄流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	泄洪功率/ MW	泄洪消能方式	水垫塘尺寸/m		最大冲击 动水压强/kPa	研究模型	状况	
					长	深				
小湾水电站拱坝	292	校核	15 260	33 900	中孔 $\times$ 6 + 表孔 $\times$ 5	40	48	1:150 水弹性模型	施工	
	292	设计	9 060	19 700	水垫塘	0	42	3 种体型	施工	
溪洛渡水电站拱坝	278	校核	30 902	59 734	中孔 $\times$ 8 + 表孔 $\times$ 7	40	78.6	15.1 $\times$ 9.8	1:100 水工模型	施工
	278	设计	21 717	41 588	水垫塘	0	73.2	8.4 $\times$ 9.8	1:150 水弹性模型	施工
拉西瓦水电站拱坝	250	校核	6 000	12 500	中孔 $\times$ 2 + 表孔 $\times$ 3	21	36	11.5 $\times$ 9.8	1:100 水工模型	施工
	250	设计	3 740	8 350	水垫塘	7	30	11.5 $\times$ 9.8	1:100 水弹性模型	施工
二滩水电站拱坝	240	校核	16 300	26 600	中孔 $\times$ 6 + 表孔 $\times$ 7	33	57	14.1 $\times$ 9.8	1:120 水工模型	建成
	240	设计	13 200	21 500	水垫塘	0	54	14.1 $\times$ 9.8	1:200 水弹性模型	建成
构皮滩水电站拱坝	225	校核	29 100	42 400	中孔 $\times$ 6 + 表孔 $\times$ 7	31	77	14.5 $\times$ 9.8	1:150 水弹性模型	施工
	225	设计	23 600	35 900	水垫塘	1	72	14.5 $\times$ 9.8	1:150 水弹性模型	施工
锦屏一级水电站拱坝	305	校核	9 640	17 400	中孔 $\times$ 4 + 表孔 $\times$ 3	33	52.5		1:100 水工模型	施工
	305	设计	8 290	15 120	水垫塘	6	48.8		水垫塘水弹性模型	施工
向家坝水电站重力坝	161	校核	48 660	40 600	表、中孔联合泄洪 +	24			1:100 水弹性模型	施工
	161	设计	40 240	40 600	消力池	0			1:100 水弹性模型	施工
三峡水电站左导墙	185	校核	102 500	87 980	表、中孔联合泄洪				1:100 水弹性模型	建成
	185	设计	69 800	55 060	挑流消能				1:100 水弹性模型	建成
漫湾水电站	132	校核	22 300		挑越厂房水垫塘				1:70(局) 水弹性模型	建成
飞来峡枢纽	46	校核	27 400		面流				1:50 水弹性模型	建成

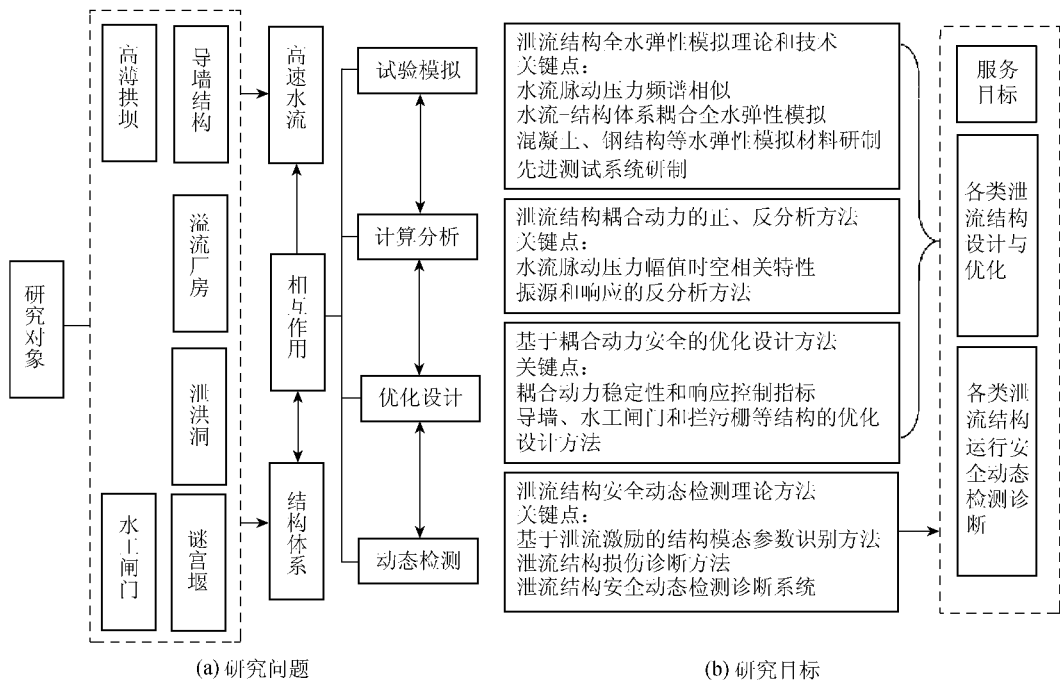


图1 泄流诱发水工结构振动研究的问题和目标示意图

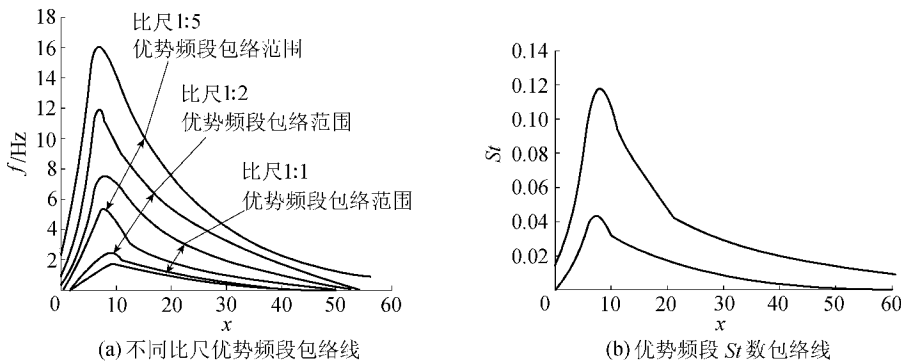


图2 水跃脉动压力优势频段相似律 ($Fr = 6.30$)

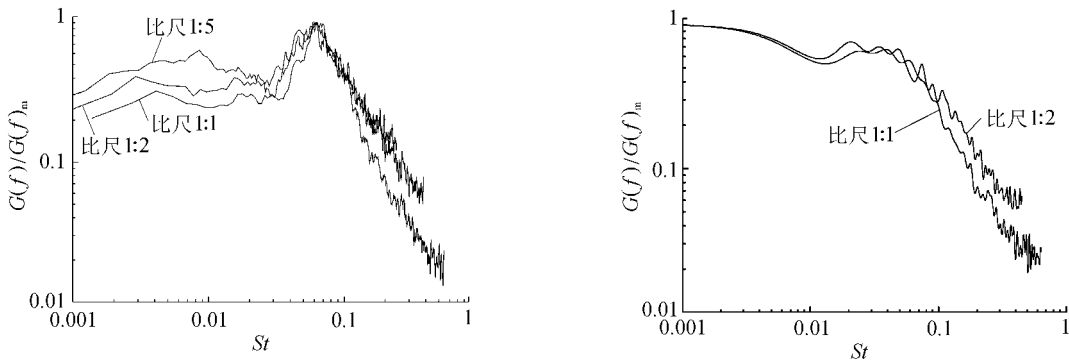


图3 水跃脉动压力频谱相似律 ($Fr = 6.31$)

图4 射流脉动压力优势频段相似律 ($h_t = 8d$)

中 h_t 为下游水深, d 为管径, $G(f)$ 为脉动压力功率谱密度, $G(f)_m$ 为脉动压力功率谱密度最大值, 可见随着比尺的减小, 频谱主频向高频移动, 频率分布范围扩大, 经过 St 数无量纲化后, 不同比尺的谱图无论是峰值位置还是能量分布范围都趋于一致, 说明强势紊流流态的脉动压力频谱符合重力相似律。从二滩水垫塘脉动压力原型和模型试验频谱图对比也证明描述水流脉动压力幅值按频率分布的功率谱

(频谱) 是符合重力相似律的; 不同比尺的水流脉动压力无量纲化的时间积分尺度 L_t 基本集中在一条曲线附近, 沿程分布是一致的, 说明水流脉动压力大尺度相关特征符合重力相似律。

2.2 水弹性模拟相似准则

由水流-结构耦合动力方程推导得

$$M_s \ddot{u} + C_s \dot{u} + K_s u = F_s + F_f \quad (2)$$

式中: M_s , K_s , C_s 分别为结构质量、刚度、阻尼矩阵;

$\ddot{u}$ 、 $\dot{u}$ 、 u 分别为加速度、速度、位移矢量; F_s 为水流动力荷载; F_f 为水流-结构耦合动力效应产生的附加质量、刚度、阻尼效应荷载。

在以水为介质的水力模型上进行全水弹性模拟试验,水流脉动荷载的主体符合重力相似律。根据水动力学相似条件与结构动力学相似条件(包括几何相似条件、物理相似条件、运动相似条件和边界相似条件)相协调的原则,由式(2)可推得水弹性模拟材料应满足^[9,25]:等密度($\lambda_{\gamma_s}=1$)、小弹性模量($\lambda_E=\lambda_L$)、等阻尼比($\lambda_c=\lambda_L^{2.5}$ 或 $\lambda_\xi=1$)、等泊松比($\lambda_\mu=1$)的相似准则。

所以,若保证“二合一”模型相似性,水弹性模型除按重力相似来模拟水流动荷载外,还要求结构材料满足上述相似条件。这种模型称水弹性模型。水弹性模型开发、研制关键有3点:材料研制、测试手段改进以及模型检验——数学模型开发。①按水力学条件和结构动力条件同时满足,重要的是材料弹性模数和密度相似。对混凝土采用了加重橡胶,30年前开始使用了这种材料^[9]。其优点是弹性模量、密度范围有变化余地,工艺相对比较简单,缺点是原来用铅粉加重,现在已忌用。新材料价格便宜、工厂化生产。模型材料生产用热加工,制作模型用冷加工,比较环保、方便,精度高。②大型水弹性模型如几个拱坝水弹性模型,其振动位移都在 $1\mu\text{m}$ 左右。以往的测试手段很困难或信噪比低。2000年以来,整个测试、分析系统进步很大。③计算机软件系统的引进和开发以及数学模型的加入大幅度改善了水弹性模型的某些缺憾。两者互补,推进了流激振动研究定量化的进程。

水弹性模型的地基模拟范围采用数值分析的方法,根据不同对象(拱坝、导墙等)计算地基对自振频率的影响大小,确定地基模拟范围,实际操作上是用数学模型分析基础范围、模型比尺、材料特性变化对模拟要素的影响,例如拱坝,运用有限元分析法,建立了几十个数值模型组,对地基范围和材料特性影响做了专门估算,分析了对模型自振频率和动力响应的影响。综合结论是:①基础深度大于 $1/2$ 坝高后,低阶频率误差小于1%,高阶频率误差在10%以内,坝基上游取自 $1/2$ 坝高,下游截至1倍坝高距离,坝肩深度为 $1/3$ 坝高,即可满足自振频率精度要求。②材料密度对频率影响不大,但对结构位移有较大影响。③材料弹性模量对频率、位移影响都比较大,要求误差控制在10%以内。由于材料是工厂化生产,实验室抽样检查,重点控制其弹性模量和密度,所以整个过程是可控制的。而对其他建筑物,水弹性模型设计都要做类似工作,结论并不完全相

同^[8-9,14]。

3 水弹性模型的应用

水弹性模型作为物理模型,可采用大几何比尺,并直接用水加载,可作为结构模型。例如小湾水电站、拉西瓦水电站的水弹性模型,也作为静力结构模型,进行水荷载和自重作用共同作用下坝体应力和非常难测的坝踵应力测试^[23,26]。但更适合水流诱发振动的研究。水弹性模型所研究的内容主要有3个方面,即在水作用下结构的静、动力特性和动态响应:①当拱坝蓄水深低于 $1/2$ 坝高时,坝顶拱冠几乎没有位移。但当水深超过 $2/3$ 坝高以后变率快速加大^[9],终值平均接近英古里大坝的 $1\text{mm}/\text{m}$ 。从水力学观点出发,高拱坝这一静力特性对水流诱发拱坝振动的抗震性能影响很大。②自振特性在水的作用下有明显的变化:有水(即湿模态),自振频率一般降低10%~20%,而且振型密集是高拱坝明显特征;文献[9]中给出了二滩水电站水弹性模型测取的传递函数,共53个测点,具有159个自由度的159个传递函数拟合而成,具涵盖意义。同时原型27坝段顶部位移功率谱的峰值也表示被激出的各阶自振频率。表2为二滩模型和原型测取的各阶自振频率对比^[9,21]。二滩、小湾、构皮滩、溪落渡、拉西瓦等水电站大型拱坝水弹性模型都表明,基频低、振型密集是这一大型空间结构的动力特点。蓄水后(湿模态),重新排组自振频率大约降低14%~18%,表2中,原型观测值普遍比水弹性模型试验值稍大。原试验报告认为,库水位偏低、坝体灌浆尚未完成等正、负影响尚不明确,而且实测频率的分辨率也只有1Hz。③在水流作用下,动态特性也随之而变化,水弹性模型呈现的振动位移分布是对称形式的(见图5,图中 σ 为振动响应均方根)。

表2 二滩水电站拱坝水弹性模型与原型观测自振频率

阶数	自振频率/Hz			水弹性模型
	原型测点 U2	原型测点 U3	原型测点 U4	
1	1.074	1.074	1.074	1.105
2	1.563	1.660	1.563	1.630
3		2.344	2.344	1.878
4	2.344	2.832	1.930	2.437
5	2.930	3.125	3.418	3.066
6	3.418	3.516		3.536
7	4.297	4.297	4.395	4.266
8	4.993	4.883	4.883	4.779

通过互相关分析,坝体上泄洪振动位移等值线在时间上是同步的^[27]。对这些高拱坝,从水力学观点出发,静、动水压力都很大,如小湾水电站拱坝静水总推力高达1900万t,溪洛渡水电站拱坝为

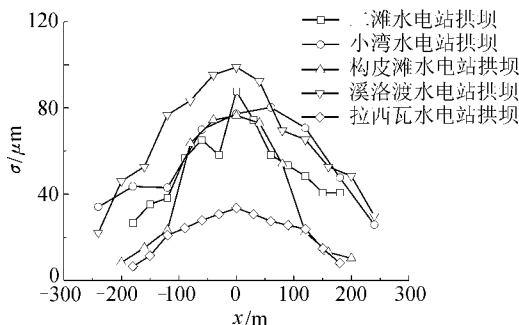


图5 各拱坝振动响应模型试验结果

1500 万 t 二滩水电站拱坝为 960 万 t。其顶拱拱冠最大蓄水变形分别达 40 cm、17 cm 和 20 cm,泄洪振动位移(均方根)是微米级的响应,只是在其平衡位移上的振动。在蓄、泄水后那些振型密集的自振频率可能由重新组合结果来显现。而且由于上部分拱作用明显,变形和变率较大,表孔、中孔开孔尺寸大,位置高,闸墩、挑水坎等附属结构的存在对拱坝整个动力特性,特别是低阶频率特性的影响都很明显,水弹性模型明确地表达了这一点。因此,值得注意的是 ①流激振动动力特性计算需要考虑为带附属结构的基本形式。基本型和简化型对频率影响不大,而对动力位移影响就比较明显。②采用附加质量法及水压力的修正 Westergaard 公式,适合重力坝,对高拱坝也比计入水体有限元法好,有待进一步积累经验。

水弹性模型测试出的泄洪动位移响应是最重要和较可靠的数据,信号清楚,极易辨识。由小湾、溪洛渡、构皮滩、拉西瓦等水电站拱坝水弹性模型试验结果^[10,13-14,23]可得出以下结论:①振动位移响应以基频为主,频率值与数值分析结果很接近,位移最大值在最上层拱冠。②动位移(均方根值)分布为“中间大,两端小,上层大,低层小”,结构约束的远近端有数量级之差。同步测量、互相关分析表明:振动相位同步,可画出等值线。③最大动位移是中表孔联合泄洪的结果。

4 数学模型与水弹性模型互动分析

4.1 反分析——求等效荷载场

水弹性模型比较直观实用,解读能力强。随着计算机的普及,大量实用软件的推出,数学模型很快介入流激振动分析中。在今后的流激振动研究中数学模型将会起到越来越大的作用。

水弹性模型(包括原型)提供的振动响应至少有 3 类随机荷载源:①孔口过流脉动荷载;②冲击水垫塘水荷载;③下游涌浪拍击坝体的浪载,其大小、位置、方向不同。为了弄清楚 3 个振源各自的作用或贡献,笔者提出了等效荷载法。①根据水弹性模型

测得的一些(节)点的响应谱和结构系统动力特性,采用反分析方法计算相应的某个(某些)地点的等效荷载,即第 1 类反问题。反分析方法是基于有限元、振型叠加法,借用有限元节点坐标、单元参数、材料参数、各阶振型函数及其主频率等基本数据,建立起的等效荷载模型^[12,22];②根据典型工况水舌冲击水垫塘,扩散情况和中、表孔位置以及下游涌浪击点选取反分析计算等效荷载节点(荷载等效作用点),这些点每个工况选几个,经过计算可得到等效荷载场、相应结点的均方根值和荷载功率谱,公式推导见文献^[11]和^[23];③水弹性模型的动力响应测试与使用反分析法求各等效荷载的计算结果,即求得相应的等效荷载场。

由于荷载是以面脉动压力形式加在节点上的,所以脉动压力不但需要幅值、频谱值,还需要其点一面关系转换。分析方程如式(1),正分析、反分析一样。该研究都是考虑在常系数线性系统中,其分析式如下^[11]:

$$S_{vk}(\omega) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^n \varphi_{ij}^2 \varphi_{ij}^2 S_{p_{ij}}(\omega) |H_j(\omega)| \quad (3)$$

$$S = \sum_{k=1}^K \theta_k (S_{vk} - S_{vk}^*) \rightarrow \varepsilon \quad (4)$$

式中: S_{vk} 为任一点位移响应功率谱密度的计算值; S_{vk}^* 为位移响应功率谱密度的实测值; ω 为结构第 j 阶振型频率; φ 为模态矩阵; S_p 为结构激励荷载功率谱密度; θ_k 为各测点的权重,一般取 $\theta_k = 1$; $H_j(\omega) = \frac{1}{(\omega_j^2 - \omega^2 + 2i\zeta_j \omega_j \omega) M_j}$,其中, ζ_j 为结构第 j 阶振型阻尼比, M_j 为广义质量矩阵。

式(3)可展开化为矩阵方程求解。假定有 K 个测点的动位移实测值,要反分析出 N 个等效荷载,当 $K < N$ 时,解不唯一;当 $K = N$ 时,有唯一解;当 $K > N$ 时,只能由式(4)求近似解。如果再用正分析求位移响应,把计算和原测试 2 项结果作比较,其典型情况见图 6,可见趋势一致。

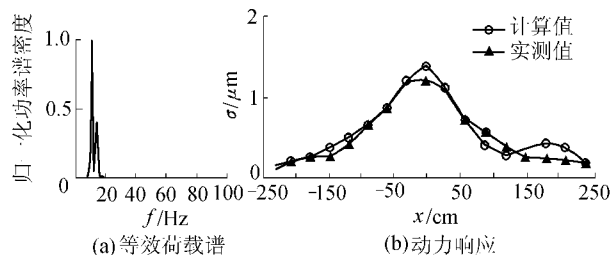


图6 等效荷载谱与动力响应水弹性模型实测值与计算值比较

4.2 反馈分析——修正模型参数

反馈分析在本文与反分析概念稍有不同,属第 2 类反问题,是利用反分析对设计和试验成果或参

数进行修正、检验的过程。采用水弹性模型来模拟水流脉动荷载作用下水工结构的动力响应系统,按模型律的要求,结构模型材料应满足:密度比尺 $\lambda_\rho=1$,弹性模量比尺 $\lambda_E=\lambda_l$ (λ_l 为几何比尺),阻尼比比尺 $\lambda_\xi=1$,泊松比比尺 $\lambda_\mu=1$,其中阻尼比和泊松比相似条件难以满足,其影响应进行适当修正。由于水弹性模型材料采用加重橡胶,其阻尼比和泊松比都偏大,各阶模态阻尼比一般在5%~10%,平均约7%,泊松比为0.35~0.40,而实际的水工结构(如东江、泉水双曲拱坝等)阻尼比为2%左右,混凝土材料的泊松比为0.167。根据实测的动位移响应值和模型的阻尼比和泊松比的实测值,采用反分析方法,求出动力荷载,再根据实际工程结构的阻尼比和泊松比求解动力响应。图7、图8给出了构皮滩水电站拱坝和三峡水电站导墙结构流激振动的阻尼比和泊松比的修正结果。阻尼比修正后,即阻尼比为2%,与7%的动位移响应相比,顶拱拱冠点和导墙顶部的动位移均方根值分别增加了24%和26%;泊松比修正后,顶拱拱冠点和导墙顶部动位移均方根值增加了8%~10%。

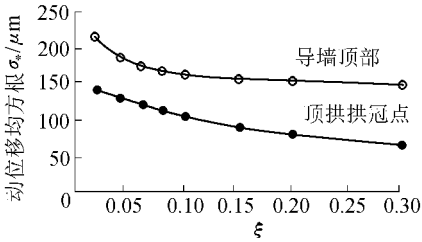


图7 阻尼比对动位移的影响

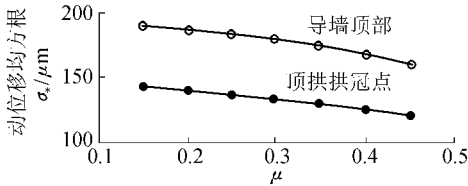


图8 泊松比对动位移的影响

4.3 正、反分析——分析振源、预报响应

上述研究指出:①水流冲击水垫塘与只过坝而不冲击下游水垫时,其位移响应有5%的差异;②涌浪作用对大坝位移响应,根据泄洪流量和孔数的不同,会有2%~8%的差别;③孔口过坝水流过坝而不冲击水垫塘,也无涌浪作用,只限孔口单独作用

时,其动力位移响应的作用(贡献)非常明显。虽然冲击水流功率很大,但由于这些诱发源距坝体还有一段距离,通过地基衰减很快,诱发大坝振动响应的贡献并不比孔口水流直接作用大。实际上,在弄清楚振源情况后,还需要已知大坝实际的阻尼比和泊松比,采用正分析,也就是采用第1种方法计算响应,最为简便,但要先测得3项分荷载。在水弹性或一般水工模型上测试冲击、涌浪可以在水弹性模型上把过坝(中、表孔)水流引走,使水流不冲击水垫塘,只测取孔口过流对坝体作用的振动响应^[9]。因为有脉动压力的点面关系等问题,要求出每一孔口单独水流的随机脉动荷载十分困难。所以,孔口过流诱发振动荷载成为分析的关键。

练继建等^[23,30]根据小湾、构皮滩拱坝水弹性经验,提出孔口荷载可采用式(5)估算:

P' = C_f Q \sqrt{H} \tag{5}

式中:Q为孔口流量;H为孔口水头;C_f为脉动荷载系数,与孔口位置、形式、尺寸有关。

在溪洛渡水电站拱坝水弹性模型还没有建立前,曾在几个水工模型上测得冲击水垫塘脉动荷载和浪荷载,加上用式(5)计算的孔口作用荷载,以等效荷载形式、用正分析求出的动力位移响应与后来的水弹性模型成果有很高的一致性。

对于各路荷载对振动响应的贡献分析,因为各种荷载都是随机的,相位不可能同步,对某处的动力响应不可能是线性叠加,只能是平方和的开方。但它们都是引起坝体振动的重要因素,振动贡献属同级,其主次、大小与工况和作用点位置有关:近坝者大,远离则小;居上者大,居下则小。溪洛渡水电站拱坝实例中各因素作用或贡献如表3所示,其他拱坝结果相似。

图9为水弹性模型分析出的拉西瓦水电站拱坝泄洪振动各振源贡献值。以最大响应点为例,经分析各振源对其振动影响的贡献如下:冲击荷载为41%,孔口过流荷载为64%,涌浪荷载为65%。其他形式的水工结构同样存在多振源分析的问题。例如,三峡水电站左导墙:左边有电站尾水冲击,右边有中、表孔泄水直接(临近孔)和间接(远孔水舌冲地基激励)作用以及排漂孔泄水对导墙的直接作用等

表3 溪洛渡水电站拱坝泄洪振动响应震源贡献分析

实验工况	冲击荷载		涌浪荷载		冲击荷载 + 涌浪荷载		孔口荷载	
	贡献值/ μm	占动力响应比例/%	贡献值/ μm	占动力响应比例/%	贡献值/ μm	占动力响应比例/%	贡献值/ μm	占动力响应比例/%
校核洪水联合泄洪	108	66	75	46	132	80	99	60
表孔单独泄洪	35	51	43	63	35	81	59	59
中孔单独泄洪	49	56	45	52	66	76	64	54

注:总位移响应为162 μm ,贡献总和为“平方和开方”原则叠合。

都是相对独立的振源 ,对导墙同时起激励作用。使用水弹性模型做这样的分析 ,十分重要^[18]。图 10 为二滩水电站拱坝泄洪振动原型观测结果。

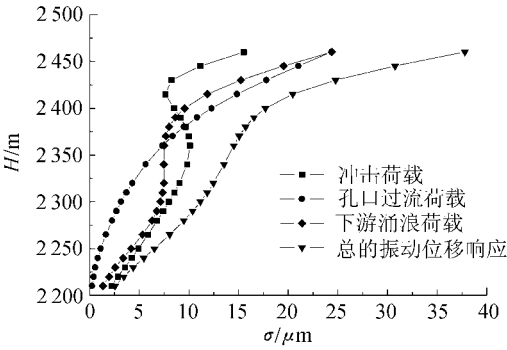


图 9 拉西瓦水电站拱坝泄洪振动各振源贡献值

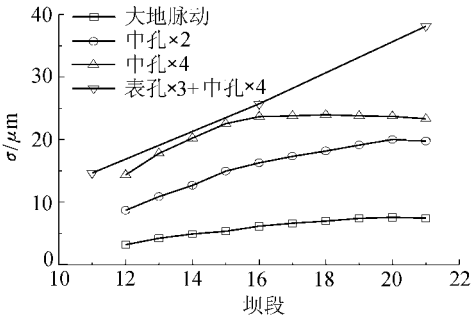


图 10 二滩水电站拱坝泄洪振动原型观测结果

5 流激振动的软科学分析方法

随着软科学技术的飞速发展 ,其应用已渗透到各个学科之中 ,在水工结构流激振动研究领域 ,小波分析方法、人工神经网络、遗传算法等软科学技术已经得到了应用。

5.1 小波分析法

传统的傅里叶变换是将信号分解成一系列不同频率的连续正弦波的叠加 ,从另一角度说是把信号从时间域变换到频率域 ,其关键在于变换按时丢掉时间信息。为此 ,人们耗费巨大智能来解决“窗”问题 ,以满足科技领域的实际需要。

小波分析是一种新的变换分析方法 ,是继傅里叶变换后一个新的“数学显微镜”。20 世纪 80 年代始用于地震波分析 ,在紊流及众多非线性科学领域 ,被认为是分析方法上的重大突破。小波分析的数学基础根据较严密 ,具体实行思路见图 11。图中 S 为原始信号 ,先进行一层小波分解 ,分解为高频 A₁ 和低频 D₁ 两部分 ,然后再分别分解第 2 层高、低两部分 ,依此类推到更深层次分解。分解后各部分的总和为原始信号 ,即 S = AAA₃ + DAA₃ + ADA₃ + DDA₃ + AAD₃ + DAD₃ + ADD₃ + DDD₃。

小波分析具有多分辨率的时频局部化分析特性 ,小波变换可以在多种尺度下把信号中不同频率

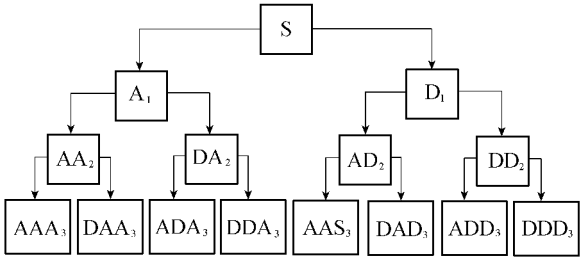


图 11 信号的小波完全分解示意图

的成分分解到不同的子空间中去 ,这是它最重要的特点。所以其处理非平稳性信号颇有成效。因为非平稳信号包含许多奇异点及不规则的突变部分 ,这些部分经常含有比较重要的信息 ,传统的傅里叶变换是研究函数奇异性的主要工具 ,但傅里叶变换不能反映空间局部性 ,它只能确定一个函数奇异性的整体性质 ,难以确定奇异点在空间的位置及分布情况 ,而小波变换能反映空间局部化性质。因此 ,利用小波变换来分析振动信号的奇异性及奇异度的大小是非常有效的 ,被广泛运用在结构的运行状态监测及故障诊断方面。另外 ,快速线性多通道带通滤波特性使小波变换在振动信号滤波降噪等方面有特别的成效。

基于小波分析的上述优点 ,彭新民等^[27]在脉动压力方面进行了研究 ,利用分解所得的低频信号对应大尺度脉动 ,高频信号对应小尺度脉动 ,对不同频段上的信号进行单独分析 ,实现针对不同尺度的脉动信号进行分析 ,从而更微观地分析水流脉动压力的特性。张建伟等^[28]在泄流振动识别方面进行了实践 ,引入小波分析法 ,对水弹性模型有限测点振动响应数据反分析等效激励荷载时程 ,并正分析出整个拱坝结构的动力响应 ,具有一定的开拓性。部分成果见图 12。

5.2 神经网络模型

流激振动的模糊数学方法人工神经网络的辨识是一个计算机仿真过程 ,通过“学习”之后 ,能够较精确地模拟动力或动态系统。流激振动是一个复杂的流固耦合动力系统 ,拱坝振动系统进行计算机仿真的结构动力反分析 ,采用人工神经网络对拱坝振动系统进行计算机仿真 ,有可能更适应非线性状况 ,能实现等效荷载求解 ,并且维持较好的精度。当小湾拱坝表、中孔联合泄洪时 ,可以表示 3 个荷载作用点 ,根据水弹性模型 ,15 个有代表性的响应谱作为输出 ,简化 3 个输入、15 个输出的振动系统。依此建立 1 个输入层 ,2 个隐层 ,1 个输出层的 4 层联合神经网络模型 ,与用反分析方法求荷载的输入 ,输出相对应^[29]。“学习”样本组织也是如此 ,由水弹性模型测试响应与脉动压力作为输入与输出来进行。典

型结果如图 13 所示。人工神经网络的基本功能是学习和联想。联想是在辨识的基础上对系统的新情况或未来发展趋势予以估计或预报。以乌江渡水电站左岸滑雪道左右导墙振动 1982 年、1986 年实测资

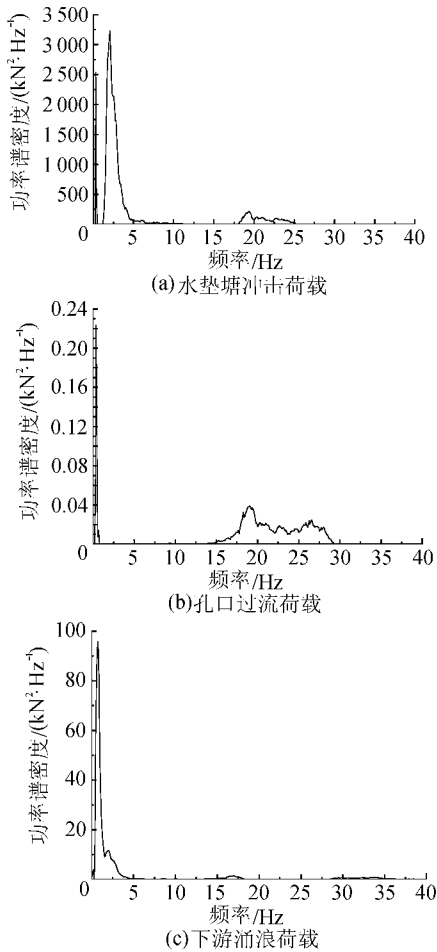


图 12 设计水位下拱坝联合泄洪时各激励源等效荷载谱密度

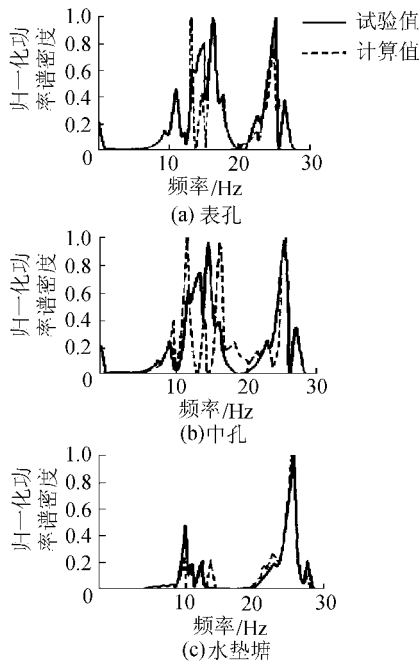


图 13 等效荷载谱计算与试验结果比较

料为例进行计算,用小流量成果进行“学习”,对高水头、大流量工况的导墙振动情况进行预测,取得了与原型观测相吻合的成果^[26](图 14)。

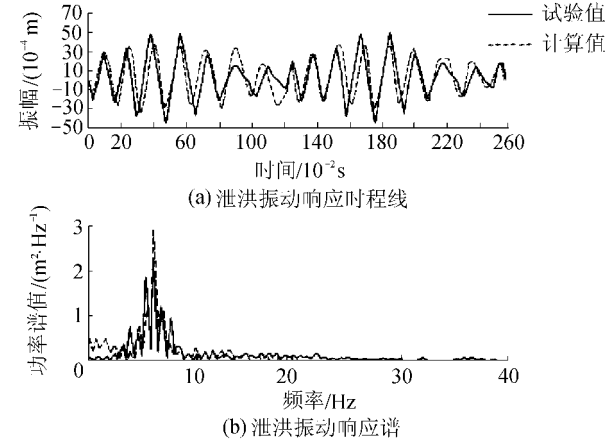


图 14 乌江渡水电站左岸滑雪道右导墙泄洪振动

响应时程线及响应谱的原型^[6]观测值与计算值

5.3 遗传算法

当所测得的动位移测点个数 K 大于反馈求解的面脉动荷载个数 N 时,式(3)没有严格意义上的解,只能求其近似解,而且都是针对常系数线性问题。而遗传算法作为一种高效的优化算法和寻求满意解的最佳工具之一,已经发展成为一种启发式概率性迭代式全局搜索算法,具有解决不同非线性问题的鲁棒性、全局最优性、不依赖于问题的初始模型等特性。因此,可采用遗传算法来求解各等效荷载。

以拉西瓦水电站拱坝为例,以简化体型来反求等效荷载谱^[30]。等效荷载加荷点分别选择在水垫塘水舌落点附近的 5077 号有限元节点处,加载方向垂直于水垫塘底板;表孔附近 3 号节点加载方向为顺河向;下游涌浪荷载施加在水垫塘水位附近 1333 号节点,加载方向为顺河向。选择拱坝顶拱 A-6、A-4、A-2、A0、A2、A4、A6、C0 及 E0 测点的响应谱作为已知条件,反分析计算。各工况下的等效荷载谱及各测点泄流振动响应结果见表 4。

表 4 拉西瓦水电站拱坝坝顶振动响应均方根值 μm

测点	塘底	孔口	涌浪	合计
A6	3.01	0.83	3.54	4.72
A5	5.83	2.41	7.45	9.76
A4	5.69	3.84	6.96	9.77
A3	6.40	4.80	10.55	13.24
A2	10.78	6.20	13.53	18.38
A1	15.33	8.40	11.89	21.14
A0	17.57	9.63	12.83	23.79
A-6	3.41	0.97	4.12	5.43
A-5	6.12	2.59	7.77	10.23
A-4	5.56	3.91	6.82	9.63
A-3	6.38	4.77	10.64	13.29
A-2	10.32	6.22	13.01	17.73
A-1	14.78	8.50	11.70	20.67

注 塘底表示水流冲击塘底引起振动的贡献;孔口表示水流通过孔口引起振动的贡献;涌浪表示涌浪冲击坝体引起振动的贡献。

6 水工结构流激振动研究的综合集成

从定性到定量综合集成方法是钱学森于 20 世纪 90 年代初在系统科学研究的基础上提出的 综合集成方法的实质就是把有关专家、数据和信息、计算机有机地结合起来 在解决复杂问题时能把各种数据和信息通过人的经验、知识、智慧与计算机的多次交互处理集成起来 最终形成最佳的解决方案。水工结构的流激振动问题研究涉及多学科、多领域 从上述的流激振动研究方法可以看出 对水工结构的流激振动进行安全评价是一个复杂的系统决策问题。

流激振动问题研究的综合集成可以采取以下模式 ①根据实际工程需要 提出水工结构流激振动问题(或课题) ②对待研究的课题进行仔细分析 将待研究的课题分解成单个子课题 建立待研究问题的模型库 ③利用流激振动问题的解决方法(方法库) 对各类子课题进行研究 并对研究结果是否可行进行判断 将可行成果列入流激振动安全评价指标知识库 ④根据各类评价指标及专家经验进行综合集成 并进行最终决策。这样做既可充分发挥个人才能 又能激发群体的智慧 其框架结构如图 15 所示。可见 综合集成方法在解决水工结构流激振动这类复杂问题时 运用了多学科交叉优势 并与先进技术相结合 针对不同问题形成了多种解决方法与手段 每种方法对研究某类问题时都具有一定的贡献。在进行解决方法的选择时 应当结合专家经验 将各类方法对某子课题研究问题进行贡献权重评估。以理论解析方法为例 其贡献权重为 $I_1=[\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6]$ 其中 $\alpha_i[0, 1]$ 为理论解析法对水动力荷载特性研究的贡献权重 $\alpha_2[0, 1]$ 为理论解析法对流固耦合特性研究的贡献权重 $\alpha_3[0, 1]$ 为理论解析法对结构共振问题的贡献权重 $\alpha_4[0, 1]$ 为理论解析法对结构疲劳问题的贡献权重 $\alpha_5[0, 1]$ 为理论解析法对结构动力稳定性研究的贡献权重 $\alpha_6[0, 1]$ 为理论解析法对结构疲劳问题的贡献权重。各研究方法的贡献权重 $\alpha_i[0, 1] (i=1, 2, \dots, 6)$ 大小应在咨询众多专家的基础上进行综合确定 最后给出针对某子课题问题研究的最佳解决方法(某一种方法或几种方法的组合) 其他贡献权重 $I_2 \sim I_8$ 的确定以次类推。

7 结 语

水流诱发水工建筑物振动是水利水电工程运行中出现的普遍现象。研究工作的难点在于水力学和结构动力学的矛盾统一。水弹性模型是水流和结构“合二而一”的实物模型 它同时满足水力学和结构力学条件 模拟水工建筑物静力、动力特性和动态特征 较充分地反演水流诱发水工结构振动的物理模型。但是 它和水力学或结构力学单一模型一样存在缩影影响 如存在表面张力、负压、通气、掺气等不相似和材料特性(阻尼比、泊松比)不完全相似、模拟范围有限性等无法克服的问题。正、反分析方法 非线性问题的小波分析法和模糊数学方法的网络(遗传算法、人工神经网络)技术等每一种方法只能从某个侧面解决复杂系统问题 而它们的综合运用是研究水流诱发水工建筑物振动从定性到定量这一复杂问题的有效途径之一。与水弹性模型形成互补 提高水诱发振动的辨识、分析、预报水平是一条合理的思路。30 年来 对水弹性模型开发、研制和使用 如模型材料工厂化的开发不断引入一些新技术 特别是测试、计算机数字分析手段的不断进步 使之成为相当有效的方法。实际上 水弹性模型方法已经成为一种集物理模型和数学模型为一体的“复合模型”。随着高技术和数字技术的发展而进步 充分发挥这种模拟方法的数字、信息、网络、可视化的发展优势 可以有效地解决一些工程实际问题。

7 结 语

参考文献：

[1] KOBUS H. 水力模拟 [M]. 清华大学水利系泥沙研究室, 译. 北京 清华大学出版社, 1988.

[2] 崔广涛, 王日宣. 一种新型厂坝泄洪结构——挑越式厂坝 [C]// 电力工业部科学技术委员会, 华东水利学院. 坝工建设技术经验汇编. 北京 水利出版社, 1981.

[3] 王日宣, 崔广涛. 拱坝溢流水舌冲击下游河床诱发坝体振动的研究 [J]. 水利学报, 1991, 22(2) : 26-34.

[4] 林继镛, 练继建. 二元射流作用下点面脉动壁压的幅值计算 [J]. 水利学报, 1988, 19(12) : 34-40.

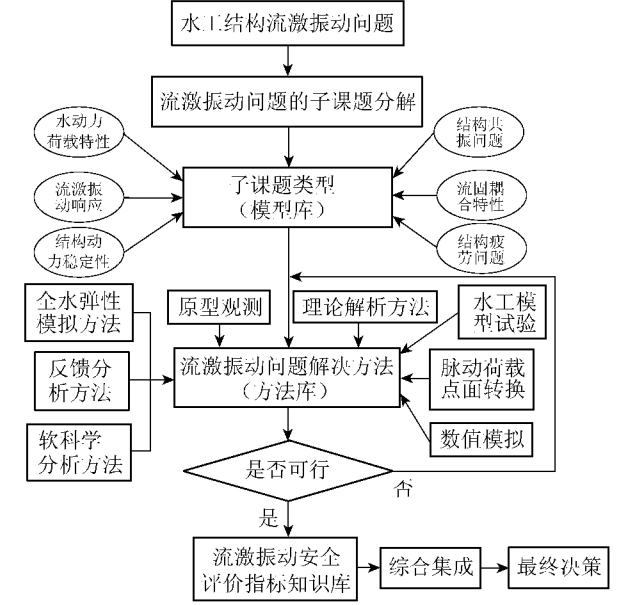


图 15 流激振动研究综合集成总体框架

[5] 练继建,王继敏,辜晋德.水跃区水流脉动压力频谱相似律研究[J].科学通报,2007,52(15):1832-1839.

[6] 崔广涛,彭新民,齐清兰.多级孔板管道壁压脉动特性[J].水利学报,1990,21(9):1-10.

[7] 罗银森,刘倬清,吕飞鸣.苏州河河口水闸流体激振模型试验[J].水利水电科技进展,2007,27(S1):101-105.

[8] 崔广涛,安刚,李军.低水头大流量溢流坝系统水激振动[J].水利学报,1994,25(11):10-18.

[9] 崔广涛,林继镛.二滩拱坝泄洪振动水弹性模型研究[J].天津大学学报,1991,24(1):1-10.

[10] 陶毅.高拱坝大流量泄洪诱发振动研究[D].天津:天津大学,1995.

[11] 陈平.高拱坝大流量泄洪动态仿真及振动影响评估[D].天津:天津大学,1996.

[12] 陈平,崔广涛.闸墩对高拱坝泄洪振动的影响[J].水力发电,1999,25(4):20-23.

[13] 崔广涛,彭新民,苑希民.小湾拱坝泄洪振动仿真研究[J].天津大学学报,1996,29(4):17-25.

[14] 马斌,练继建,杨敏.大比尺高拱坝泄洪振动水弹性模型研究[J].中国工程科学,2008,10(11):23-29.

[15] 彭新民,崔广涛.漫湾水电站厂房泄流振动模拟研究[J].水利水电技术,2001,32(7):44-47.

[16] 苑希民.充水橡胶坝的静力变形与泄洪能力[J].天津大学学报,1997,28(3):305-311.

[17] 彭新民,崔广涛,贾树宝.迷宫堰泄流能力及泄洪振动水弹性模型研究[J].水力发电学报,2004,23(2):22-26.

[18] 练继建,崔广涛,黄锦林.导墙结构的流激振动研究[J].水利学报,1998,29(11):33-37.

[19] 崔广涛,彭新民,练继建.高水头大流量泄洪诱发结构振动研究[C]//水利水电泄水工程与高速水流信息网.

[20] 林继镛,练继建,张文德,等.二滩水电站双曲拱坝泄洪振动原型观测研究[C]//中国水力发电工程学会水工水力学专委会.2000'全国水利水力学学术讨论会论文集.天津:天津大学,2000.

[21] 吴一红,刘之平,李长河,等.二滩水电站拱坝坝身泄洪诱发坝体振动原型观测[C]//中国水力发电工程学会水工水力学专委会学术讨论会论文集.天津:天津大学,2000.

[22] 练继建,崔广涛,董淑芳,等.水工结构流激振动的反分析[J].水利水电技术,1998,29(8):51-54.

[23] 练继建,崔广涛,林继镛,等.高拱坝泄洪振动计算分析与验证[J].水利学报,1999,30(12):23-32.

[24] SL158—95 水工建筑物水流压力脉动和流激振动模型试验规程[S].

[25] 练继建,杨敏,李火坤,等.高坝泄流工程[M].北京:中国水利水电出版社,2008.

[26] 彭新民,郭航忠,张蕊.水流脉动压力的小波分析研究[J].水利学报,2003,34(8):26-31.

[27] 练继建,崔广涛,彭新民,等.水流动力荷载与流固相互作用[M].北京:中国水利水电出版社,1999.

[28] 张建伟,崔广涛,马斌,等.基于泄流响应的高拱坝振源时域识别[J].天津大学学报,2008,41(9):1124-1129.

[29] 苑希民,崔广涛,张玉峰.流激振动系统的神经网络辨识和预报[J].水利学报,1999,30(3):13-19.

[30] 练继建,马斌,李福田.高坝流激振动响应反分析方法[J].水利学报,2007,38(5):575-581.

(收稿日期 2009-05-13 编辑 方宇彤)

· 简讯 ·

“第十三届水利量测技术综合学术研讨会”将在大连召开

中国水利学会水利量测技术专业委员会主办的“第十三届水利量测技术综合学术研讨会”将于2010年10月在大连理工大学召开。会议主要议题如下:①原型测试技术及仪器。包括:水文要素(水位、流速、流量、断面、含沙量、颗分及冰凌等)观测及测流仪器;量水技术及仪器;水利遥感遥测技术与仪器;水质监测技术及仪器;墒情和地下水监测技术及仪器。②模型测试技术及仪器。包括:室内试验观测新技术及仪器;粒子图像测试技术;激光多谱勒测试技术。③安全监测技术及仪器。包括:堤坝隐患探测技术及仪器;洪水险情快速探测技术及仪器;水利水电工程安全监测仪器及系统;水利水电工程施工质量检测、控制技术及仪器;突发性灾害洪水(如堰塞湖、垮坝等)监测技术及仪器。④水信息及自动化技术。包括:新型传感器;水利水电量测技术新进展介绍与评述;水信息采集和处理有关技术;水利测试新软件及系统自动技术。⑤水利计量标准及检定规程。包括:水利计量标准体系及其关键技术;水利计量检定规程体系及其关键技术。⑥港口、海岸和近海水动力模拟及测试技术。包括:波浪、水流的现场和实验室测试技术及应用;浮体运动的现场和实验室测试技术及应用;波浪、潮流等实验室物理模拟技术及现场遥测技术。⑦固态水量测技术及应用。包括:冰雪现场测试技术和应用经验;冰雪物理模拟技术和实例分析;寒区地表和地下水监测技术和仪器;冰凌和冰灾害技术。⑧其他涉及水利和海洋测量的技术及介绍。

(本刊编辑部供稿)