

河床式水电站主副厂房不同连接形式抗震分析

陈 婧 姚锋娟 马震岳 张运良

(大连理工大学土木水利学院 辽宁 大连 116024)

摘要 结合四川省某河床式水电站的工程实例,通过建立包括主厂房和副厂房在内的厂房坝段整体三维有限元模型,研究了在主厂房和副厂房之间不同的连接形式下厂房整体结构的固有振动特性,并进行共振复核。采用反应谱分析方法对模型进行抗震分析,考察了主厂房和副厂房不同连接形式对厂房(尤其是副厂房)主要构件地震反应的影响规律,提出了合理的连接方案,为该河床式厂房的抗震设计提供科学依据。

关键词 河床式水电站 水电站厂房 连接形式 谱分析 抗震设计

中图分类号 :TV312 ;TV731 文献标识码 :B 文章编号 :1006-7647(2010)01-0048-04

Seismic analysis for various connection patterns between main and auxiliary powerhouses of water-retaining power stations//CHEN Jing, YAO Feng-juan, MA Zhen-yue, ZHANG Yun-liang(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract :Based on the practices of a water-retaining power station in Sichuan Province, a three-dimensional finite element model was established for the powerhouse integrity including the main and auxiliary powerhouses. The free vibration characteristics and the possibility of resonance of the powerhouse integrity under various connection patterns between the main and auxiliary powerhouses were studied. The spectral analysis was employed to analyze the seismic characteristics of the model. The influences of various connection patterns between the main and auxiliary powerhouses on the seismic responses of the main components of the powerhouses(especially the auxiliary powerhouse) were investigated. A rational scheme for the connection was proposed, and it would provide scientific basis for the seismic design of the water-retaining power station.

Key words :water-retaining power station ;powerhouse ;connection pattern ;spectral analysis ;seismic design

我国河流的水能资源非常丰富,可开发量居世界第 1 位。但地区分布很不均衡,其中 67.8% 位于西南地区^[1]。该地区地震烈度相对较高,地震活动频繁,尤其是发生 5.12 汶川大地震后,对处于该地区的水电站建筑物进行抗震复核就显得尤为重要,抗震问题成为该地区水电工程设计、运行和管理的关键问题之一。河床式水电站厂房本身既是发电建筑物,又是挡水建筑物,副厂房通常布置在主厂房下游侧,底部坐在尾水管顶板上。厂房整体结构复杂,刚度变化较大,同时上下游面均与水体直接接触,这就使得厂房结构的抗震稳定性问题变得更加重要,厂房结构的抗震安全对保证电站的正常发电运行和工程防洪安全均有重要的意义。目前国内外对水电站厂房振动的研究颇多,但对河床式水电站厂房振动的研究还较少^[2-4],而且均以主厂房为研究对象,没有考虑副厂房。近来,由于受地质、地形、施工等

条件的影 响,一些河床式水电站将变压器和高压组合开关等大型电气设备也布置在副厂房中,导致副厂房结构较高,顶部高于主厂房顶部,主、副厂房间的连接形式对主、副厂房的抗震性能会产生一定的影响,尤其对于副厂房结构,由于其刚度低于主厂房刚度,连接形式对其抗震特性的影响将较大。本文通过建立四川省某河床式水电站厂房坝段三维有限元模型,研究了主厂房和副厂房间不同的连接形式对厂房(尤其是副厂房)结构抗震特性的影响,提出了合理的连接高程(缝底部高程)和结构设计方案。

1 有限元计算模型

某河床式水电站位于四川省境内,是大渡河干流规划的一级电站。电站装机容量为 660 MW,安装 4 台单机容量为 165 MW 的水轮发电机组。电站厂房坝段布置在河床右岸,工程等别为二等工程。厂

房坝段顺水流方向宽 90.0 m,沿坝轴线方向总长度为 139.92 m,由 3 个长度为 33.98 m 和 1 个长度为 37.98 m 的坝段组成,各厂房坝段间设置有结构缝。副厂房位于主厂房下游侧,高度约 40 m,底部坐在尾水管顶板上,为框架结构。厂房坝段结构如图 1 所示,从图 1 中可看出主厂房结构刚度较大,副厂房结构刚度较小。

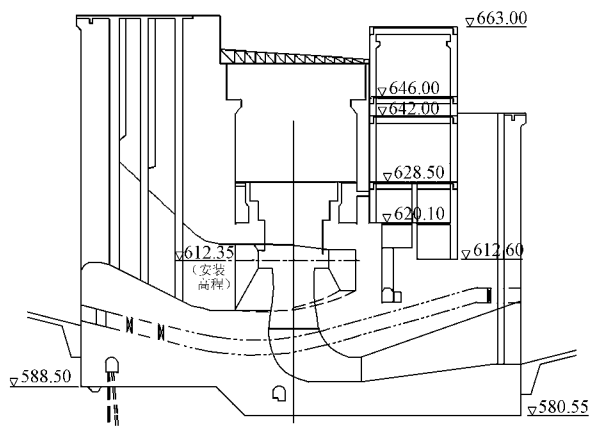


图 1 厂房坝段结构示意图(单位:m)

选取中间厂房坝段结构进行三维有限元计算。地基基础的模拟范围为:沿顺河向分别从上游侧和下游侧向上游和下游各延伸 160 m,竖向从底部向下延伸 160 m。将地基视为无质量的弹性地基,只考虑其对厂房结构的约束作用。边界条件为:岩石底边界固定,四周边界法向约束,混凝土结构外边界均为自由,各层楼板与梁柱按整体连接考虑(整体浇筑)。厂房坝段结构(不考虑岩石)有限元模型网格剖分如图 2 所示。

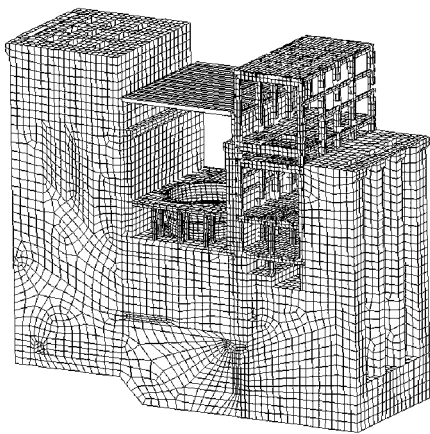


图 2 厂房坝段结构有限元模型网格剖分

根据主厂房和副厂房之间连接形式的不同,共建立了 5 种计算模型。①模型 1:副厂房上游侧连接高程为 620.10 m,下游侧连接高程为 612.60 m;②模型 2:副厂房上下游侧连接高程均为 628.50 m;③模型 3:副厂房上下游侧连接高程均为 642.00 m;④模型 4:副厂房上游侧连接高程为 642.00 m,下游

侧连接高程为 612.60 m;⑤模型 5:副厂房上游侧连接高程为 620.10 m,下游侧连接高程为 642.00 m。

2 计算荷载和计算方法

抗震计算时的上游水位为正常蓄水位,下游水位为最低尾水位。静荷载包括:结构自重、设备重、楼面活荷载、外水压力、内水压力、扬压力和泥沙压力等,动荷载包括机组正常运行动荷载和地震荷载。

地震荷载作用下厂房结构的动力反应计算采用振型分解反应谱分析方法,主要研究结构的抗震强度。设计反应谱依据 DL 5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》^[5],反应谱曲线见图 3,其中最大值代表值 $\beta_{\max} = 2.25$,根据场地类别 I 类取场地的特征周期 $T_g = 0.20$ s。根据 5.12 汶川地震后四川省地震局 5 月 21 日提出的“5.12 汶川地震一级重灾区地震烈度情况表”,该河床式水电站厂房的水平向设计地震加速度代表值为 $0.15g$,竖向设计地震加速度代表值取水平向的 $2/3$,为 $0.1g$ 。阻尼比取 5%。为保证计算精度,考虑到厂房结构振型的密集和复杂性,取前 50 阶进行振型计算,地震作用效应不超过 0.1% 的高阶振型略去不计,各振型的地震作用效应按 DL 5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》^[5]规定的平方和方根法(SRSS 法)组合。计算时考虑结构有效质量及动水压力,分别施加顺河向、横河向、竖向反应谱,再按 SRSS 法叠加各分量反应,竖向地震作用效应遇合系数取 0.5。在评价安全度时,地震作用效应折减系数取 0.35。

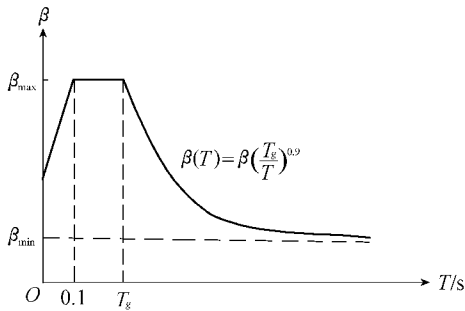


图 3 DL 5073—2000 中的反应谱曲线

地震时,上下游动水压力对厂房坝段的影响十分显著。由于计算库水可压缩性影响因素的复杂性以及其影响与不可压缩水体相差不大^[6],因此在实际工程的抗震计算中,通常不考虑水体的可压缩性影响。一般按照 DL 5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》^[5]推荐的坝工界普遍采用的维斯特伽特(Westergaard)公式进行计算,即

$$P_w(h) = \frac{7}{8} a_h \rho_w \sqrt{H_0 h} \quad (1)$$

式中: $P_w(h)$ 为水深 h 处的地震动水压力代表值; a_h

为水平向设计地震加速度代表值; ρ_w 为水的密度; H_0 为总水深。

进行动力计算时,将按式(1)计算的地震动水压力折算为与单位地震加速度相应的坝面附加质量。

3 固有振动特性分析结果

各模型的前10阶自振频率计算结果见表1。5种模型的前3阶振型相同,均表现为副厂房结构的顺河向、横河向和水平扭转振动,模型1的第5阶振型和后4种模型的第4阶振型均为主厂房上游坝体结构的横河向振动,模型1的第8阶振型、模型2的第7阶振型以及后3种模型的第5阶振型均表现为主厂房上游坝体结构的顺河向振动。

表1 厂房结构自振频率					Hz
阶次	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
1	0.92	1.16	1.73	1.68	1.70
2	1.05	1.32	1.97	1.89	1.92
3	1.15	1.44	2.19	2.12	2.15
4	2.47	2.54	2.54	2.54	2.53
5	2.53	2.81	3.45	3.45	3.40
6	2.77	3.20	4.86	4.50	4.09
7	3.09	3.43	5.62	4.78	4.82
8	3.40	3.53	5.87	5.59	4.99
9	4.09	4.49	6.44	5.71	5.82
10	4.50	4.90	7.23	5.84	6.09

计算结果表明:主、副厂房间连接形式的不同对副厂房自振频率的影响较大,主要是由于副厂房结构的刚度比主厂房结构的刚度小很多,连接高程越高,副厂房相同振型的自振频率越大,即副厂房的刚度越大;主、副厂房间连接形式的不同对主厂房自振频率的影响很小,相同振型的自振频率基本没有变化,说明连接高程的变化对主厂房的刚度基本没有影响,副厂房上(或下)游侧连接高程较低时,副厂房自振频率随着下(或上)游侧连接高程的变化幅度大于副厂房上(或下)游侧连接高程较高时的对应变化幅度,对比模型4和模型5,副厂房上游侧连接高程较高时的自振频率略小于副厂房下游侧连接高程较高时的自振频率,主要是由于主厂房下游墙的刚度小于尾水墩的刚度。总之,5种连接形式中副厂房刚度从低到高次序分别为:模型1、模型2、模型4、模型5、模型3。

引起水轮发电机组振动的原因很多,大致可分为机械、电磁和水力3种^[7]。本电站机组的主要振源频率特性为:尾水管低频涡带频率为0.30~0.51 Hz,转速频率及其倍频为1.52 Hz和3.03 Hz,飞逸转速频率为4.05 Hz,电磁频率为50 Hz,水轮机转轮叶片数频率为9.09 Hz,导叶后压力脉动频率为18.18 Hz。从表1中可以看出:①厂房结构与尾水管

低频涡带、水轮机转轮叶片数频率、导叶后压力脉动以及电气高频发生共振的危险性基本不存在,频率保持有足够的错开度;②由于2倍转频和飞逸转频出现的概率比正常转频低,可不作重要问题研究;③后3个模型的第1阶频率、模型2的第2和第3阶频率与机组转速频率较为接近,结构有发生共振的可能。建议有条件时考虑将副厂房上、下游框架修改为框架-剪力墙结构或实体墙结构,使结构整体沿高度不致出现大的突变,尽量降低产生共振的可能性。

4 地震单独作用计算结果分析

地震作用下各典型部位最大总振动位移、振动速度和振动加速度以及最大动应力随副厂房刚度(连接形式)变化如图4所示。

分析计算结果可知:①地震作用下,副厂房结构的振动反应较大,主厂房结构的振动反应较小,说明副厂房结构的刚度较小;各部位振动位移从低到高逐渐增大,最大值均位于顶部,其中各模型副厂房顶层楼板的振动反应最大。②各种模型下,副厂房结构各部位的最大振动位移基本随刚度的增加逐渐减小,但最大振动速度和加速度随刚度增加而变化的规律除下游柱表现为逐渐增加外,其余则各不相同,没有规律,整体最大振动速度和加速度表现为模型4最大,模型1最小。主厂房下游墙的最大振动位移和振动速度随其与副厂房上游柱的连接高程的增加逐渐减小,振动加速度随连接形式的不同变化较小。其余主厂房结构的振动反应幅值基本相同,说明主、副厂房的连接形式对其影响很小。③厂房坝段各部位的动拉应力响应大部分都在0~1 MPa,但是在几何尺寸突变处和结构各部分的连接处,如发电机层楼板与风罩连接处、上游坝体与水轮机层地面连接处、主厂房下游墙牛腿上部以及上下游闸墩根部等部位产生了应力集中,但应力集中的范围很小。各部位最大动拉应力随刚度的变化规律各不相同,但整体结构的最大动拉应力表现为模型1最大,模型2最小。

5 动静力叠加计算结果分析

厂房结构的抗震分析需要考虑地震荷载和正常运行动静荷载的共同作用。各模型在动静荷载共同作用下各典型部位的最大振动位移和振动应力随副厂房刚度的变化见图5。

动静荷载叠加后,主厂房下游墙及副厂房结构的最大位移和拉应力随连接形式的不同变化相对较

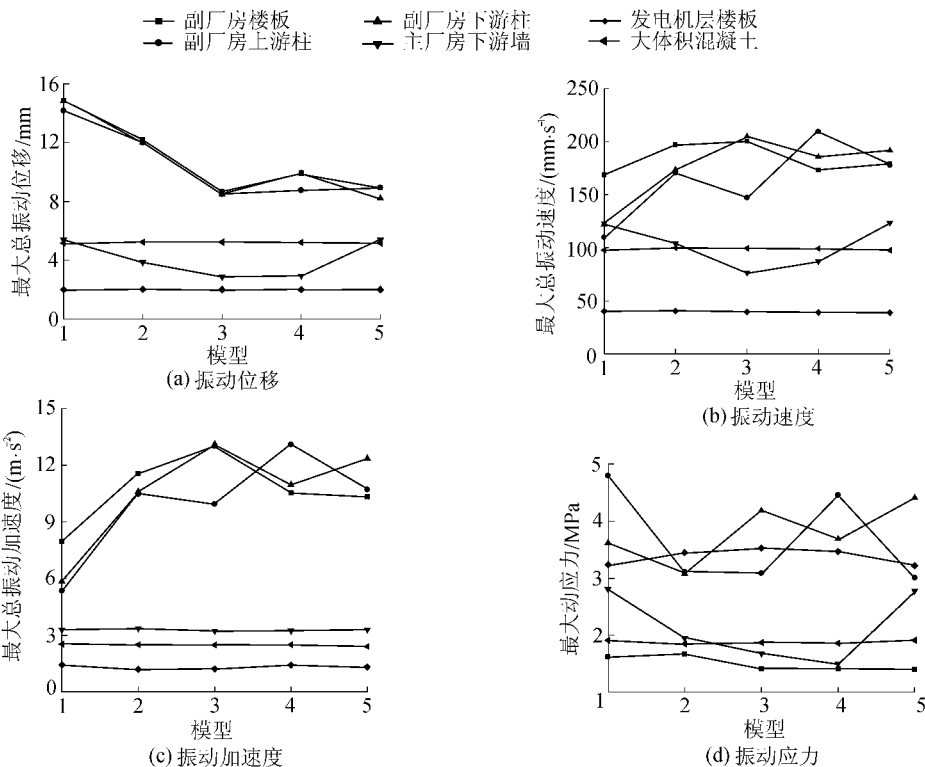


图4 地震作用下各模型各部位最大振动反应幅值和振动应力幅值

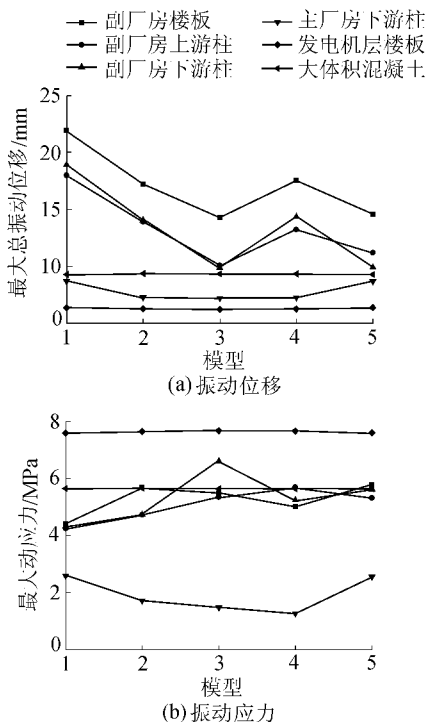


图5 叠加后各模型各部位振动位移幅值和振动应力幅值大,其中各部位的最大位移基本随连接高程(刚度)的增高而减小,最大拉应力变化则无规律,副厂房整体结构的最大拉应力表现为随刚度的增加而增大;其他部位的位移和应力随连接形式的不同基本不变。最大总振动位移仍然出现在副厂房顶层楼板处,最大为21.87 mm;其次为副厂房立柱顶部,最大为18.88 mm,小于规范^[5,8]规定的允许值,厂坝结构

各部位超过1 MPa的应力范围均比地震荷载单独作用情况的有所增加,其中发电机层楼板处增加最大,主要是由于活荷载较大。与地震荷载单独作用时的结果对比,上游闸墩、主厂房下游墙及副厂房结构叠加后地震荷载对位移起主导作用,主厂房下游墙和副厂房立柱结构叠加后地震荷载对应力起主导作用,其余部位叠加后正常运行动静荷载对位移和应力起主导作用。

6 结 论

a. 主厂房和副厂房间连接形式的不同对副厂房自振频率的影响较大,对主厂房自振频率基本没有影响。主要是由于副厂房结构的刚度较小,主厂房结构的刚度较大。连接高程越高,副厂房相同振型的自振频率越大,即副厂房的刚度越大。

b. 抗震分析结果表明,主、副厂房间不同的连接形式对副厂房和主厂房下游墙结构的影响较大,对主厂房其余结构基本没有影响。连接高程越高,副厂房的振动位移越小,即刚度越大,但振动速度、加速度和应力并没有随之增大或减小,表明连接高程越高虽然副厂房刚度越大,但对抗震的影响不大。地震单独作用时副厂房结构最大振动速度和加速度表现为模型4最大,模型1最小,最大动拉应力表现为模型1最大,模型2最小。动静荷载叠加后副厂房整体结构最大拉应力随连接高程的增高而增大,整体结构最大拉应力随连接高程的增高基本不变。

(下转第67页)

由文献[7]或式(6)求得 β_K ;由式(5)求得临界水深 h_K 。

3.2 计算正常水深步骤

根据已知条件由式(8)(9)求 P 和 P^* ;由文献[8]或式(11)求得 β_n ;由式(10)求得正常水深 h_n 。

3.3 算例^[4]

已知某 U 形断面渠道 $i = 0.001$, $n = 0.014$, $r = 1.0\text{ m}$, $\theta_0 = 80^\circ$,求 $Q = 4.859\text{ m}^3/\text{s}$ 时水流是急流还是缓流。

3.3.1 临界水深

由式(3)(4)得 $K = \alpha Q^2 / (gr^5) = 2.4067$, $K^* = \left[\theta_0 - \frac{1}{2} \sin 2\theta_0 \right]^3 / (2 \sin \theta_0) = 0.9339$ 。

因为 $K > K^*$,所以
 $C_1 = 0.1742\theta_0^3 - 0.7924\theta_0^2 + 1.1313\theta_0 + 0.3291 = 0.83806$
 $D_1 = -0.1044\theta_0^3 + 0.4063\theta_0^2 - 0.4901\theta_0 + 0.4533 = 0.27691$

由式(6)得

$$\beta_K = C_1 K^{D_1} = 1.069$$

由式(5)得

$$h_K = r\beta_K = 1.069$$

(精确解为 1.064 ,误差为 0.448%)

3.3.2 正常水深

由式(8)(9)得 $P = nQ / (\sqrt[8]{ir^{\frac{8}{3}}}) = 2.1512$, $P^* = \left[\theta_0 - \frac{1}{2} \sin(2\theta_0) \right]^{\frac{5}{3}} / (2\theta_0)^{\frac{2}{3}} = 0.707481$ 。

因为 $P > P^*$,所以
 $C_2 = -0.1842\theta_0^3 + 0.4657\theta_0^2 - 0.2385\theta_0 + 0.9369 = 1.0104$
 $D_2 = 0.2322\theta_0^3 - 0.6956\theta_0^2 + 0.8909\theta_0 + 0.0821 = 0.6020$

由式(11)得

$$\beta_n = C_2 K^{D_2} = 1.602$$

由式(10)得

$$h_n = r\beta_n = 1.602$$

(精确解为 1.600 m ,误差为 0.146%)
 $h_n > h_K$,故此时水流状态为缓流。

4 结 语

a. 通过对 U 形渠道明渠均匀流方程和临界流方程恒等变形 ,选择适当的变量并应用优化拟合原理 ,得到了 U 形断面的正常水深和临界水深的显式公式。通过以上误差分析及实例计算表明显式计算式具有形式较简洁、计算精度较高的特点 ,方便工程设计人员在 U 形断面渠道工程设计中的直接使用。

b. 正常水深计算相对误差稍大 ,还需进一步研究。

c. 目前本文研究的 U 形渠道定义域仅为中心半角取值范围 $\theta_0 \in [70^\circ, 90^\circ]$ 无量纲水深取值范围 $\beta \in (0, 2]$ 的情况 ,今后要进一步研究适应范围更广的直接计算公式。

参考文献 :

[1] 常发强. 偏离水力最佳断面渠道运行效益分析计算[J]. 水利水电科技进展 2009 29(3) :14-16.
[2] 杨复刚. 梯形渠道水力最佳断面应用浅析[J]. 水利经济 2003 21(4) 35-36.
[3] 陈平 ,程吉林 ,欧建锋. 梯形衬砌渠道边坡的优选方法[J]. 河海大学学报 :自然科学版 2000 28(5) 25-29.
[4] 张志昌 ,李银才 ,刘亚菲 ,等. U 形渠道水力最优断面的计算[J]. 陕西水力发电 2001 17(2) 25-27.
[5] 陕西省水利水土保持局. U 形渠道[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1986.
[6] 吴持恭. 水力学[M]. 北京 :高等教育出版社 ,1982.
[7] 李风玲 ,文辉 ,彭波. 圆形过水断面临界流的近似水力计算[J]. 人民长江 2008 39(11) :77-78.
[8] 文辉 ,李风玲 ,黄寿生. 圆管明渠均匀流的新近似计算公式[J]. 人民黄河 2006 28(2) 67-68.

(收稿日期 2009-05-05 编辑 :方宇彤)

(上接第 51 页)

c. 综合比较分析 ,建议主、副厂房的连接形式采用模型 α (地震动拉应力最小) 。有条件时考虑将副厂房上、下游框架修改为框架-剪力墙结构或实体墙结构 ,以提高其抗震性能。

参考文献 :

[1] 董毓新. 中国水利百科全书 :水力发电分册[M]. 北京 :中国水利水电出版社 2004.
[2] 练继建 ,王海军 ,王日宣. 河床式水电站厂房结构动力特性研究[J]. 水利水电技术 2004 35(8) 37-40.

[3] 邹德兵 ,张建海 ,刘麟 ,等. 土卡河水电站厂房坝段应力应变研究[J]. 水利水电科技进展 2005 25(1) 28-30.
[4] 党国强 ,李守义 ,鞠静春 ,等. 河床式水电站厂房坝段动力分析[J]. 电网与水力发电进展 2008 24(3) :70-73.
[5] DL5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S].
[6] 陈厚群 ,侯顺载 ,杨大伟. 地震条件下拱坝库水相互作用试验研究[J]. 水利学报 ,1989(7) 26-28.
[7] 马震岳 ,董毓新. 水轮发电机组动力学[M]. 大连 :大连理工大学出版社 2003.
[8] DL50011—2001 建筑抗震设计规范[S].

(收稿日期 2009-04-27 编辑 :方宇彤)