



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtq.2016.05.022

苏晨辉, 宋志强, 耿聆. 水电站地面厂房地震响应分析研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(5): 137-145. SU Chen hui, SONG Zhi qiang, GENG Dan. Present situation and prospect of seismic response analysis of surface hydropower house[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(5): 137-145. (in Chinese)

# 水电站地面厂房地震响应分析研究综述

苏晨辉, 宋志强, 耿聆

(西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048)

**摘要:** 水电作为我国重要的能源组成部分, 多集中在强震频发的西南、西北地区, 水电站地面厂房有明显区别于其它工业厂房的动力响应特点, 整体来看, 其地震响应分析的研究进展相对滞后。当前水电站厂房地震响应分析的研究主要涉及计算方法、响应特点、地震动选取、结构有限元模型、响应评价和抗震措施等, 有关规范修订也为水电站厂房地震响应分析提出了新的要求。通过总结当前研究现状指出当前制约研究工作迅速推进的主要难点, 提出了值得开展或更深入探索的若干研究方向, 如流道内动水压力的模拟, 结构非线性分析, 近断层地震动对水电站厂房动力响应的影响, 抗震减震措施的研究与应用等, 并针对部分问题提出了初步研究思路。

**关键词:** 水电站厂房; 地震响应; 有限元; 响应评价; 发展趋势

**中图分类号:** TV 312    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2016)05-0137-09

## Present situation and prospect of seismic response analysis of surface hydropower house

SU Chen hui, SONG Zhi qiang, GENG Dan

(Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract** Hydropower, which mainly distributes in southwest and northwest of China, is an important energy component of China. The seismic response characteristics of surface hydropower house is obviously different from those of other industrial plants. Overall, studies on seismic response analysis of surface hydropower house relatively lag behind. Current studies on seismic response analysis of surface hydropower house mainly involve seismic calculation methods, seismic response characteristics, considerations of ground motion, finite element model, evaluation on seismic response, aseismic measures and so on. The modification of code on seismic response analysis of hydropower house puts forward the tentative idea in this filed. Based on current achievements, research should be developed on simulation of dynamic water pressure, structural nonlinear analysis, effects of near fault ground motions, and aseismic measures.

**Key words:** hydropower house; seismic response; finite element; response evaluation; developmental tendency

能源紧缺是人类文明发展所始终面临的主要问题之一, 水力发电作为一种重要的能源获取方式, 已成为我国仅次于火力发电的重要能源获取途径, 且在科学规划、全面论证的前提下仍极具开发潜

力<sup>[1-3]</sup>。

我国水能资源主要集中在强震频发的西南、西北, 因此对处在高烈度设防区的重要水工建筑物必须进行结构地震响应分析与评价, 以避免强震中破

收稿日期: 2016-04-13    修回日期: 2016-05-23    网络出版时间: 2016-08-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160818.2129.012.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51479165)

Fund: National Natural Science Foundation of China(51479165)

作者简介: 苏晨辉(1988-), 男, 陕西延安人, 主要从事水工结构抗震方面研究。E-mail: suchenhui1933@163.com

通讯作者: 宋志强(1981-), 男(锡伯族), 辽宁开原人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构抗震和水电站机组厂房振动方面研究。E-mail: szhiq2004@126.com

坏和引发次生灾害。当前的地震响应分析研究主要着眼于失事后果严重的大坝和形状高耸的进水塔,针对水电站厂房的研究相对较少。

汶川震后调查发现,水工建筑物中大体积混凝土结构的震损小,而以梁、柱、墙结构为主的附属建筑物震损严重<sup>[4]</sup>。由大量梁、柱、墙结构组成的水电站厂房是水电站电能生产的核心部位<sup>[5]</sup>,若在地震中出现损毁,将直接危及工作人员安全,中断生产,并影响抢险救灾的电力供应,后果严重。因此,高烈度震区的水电站厂房抗震设计必须重视。本文以水电站地面厂房的地震响应分析为对象,基本循照结构动力有限元分析步骤,结合国内外已发表文献,介绍其研究现状,并提出一些有价值的研究方向和思路。

## 1 水电站地面厂房分类

水电站地面厂房主要分河床式、坝后式和岸边式,三类厂房的结构形式和动力特性各有特点,分析难点和关注重点也有所区别。河床式水电站的厂房兼有挡水作用,上下游静动水压力构成了其荷载的主要部分,显著影响厂房结构的动力特性,使其动力分析更为复杂。坝后式厂房通常与非溢流坝段衔接,可设纵向沉降缝将厂坝分离,此时厂房结构受力明确,可作独立分析;当不设沉降缝而与大坝整体相连时,厂房下部结构同大坝连为一体,坝体的部分荷载与位移都会对厂房产生明显影响,其下部结构的应力状态更为复杂。岸边式厂房由于选址的限制,易受山体崩塌、滑坡、滚石和飞石等次生地质灾害破坏。

厂房边机组段和中间机组段的动力特性因边界条件的不同也有所区别,主要表现为边机组段相对中间机组段在垂直水流向的边界条件不对称,在地震动作用下整体上可能表现出扭曲变形。

## 2 计算方法

水电站地面厂房地震响应分析方法有拟静力法、反应谱法和时程分析法三种,三种方法都可以不同程度的反映厂房结构的地震响应和破坏情况,为抗震设计提供理论依据。拟静力法在应用中较为方便,反应谱法能暴露出结构的薄弱部位,时程分析法可以精确反映结构在时程上的地震受力与地震响应过程,且计算结果与震害调查吻合度最好<sup>[6]</sup>。

厂房下部结构的抗震计算原则和方法同混凝土重力坝,上部结构抗震措施参照《水工混凝土结构设计规范》和《建筑抗震设计规范》的相关规定<sup>[7]</sup>。对规模大、安全级别高或处于高烈度区的厂房,建议采用时程法计算<sup>[6,7]</sup>。鉴于当前水电站厂房规模越来

越大,且现有文献多采用基于有限元理论的时程分析法,本文将仅就基于有限元动力时程分析的相关研究进行总结和讨论。

时程分析可分别通过振型叠加和直接积分两种方法实现。振型叠加法是指通过将结构在各阶振型下的响应线性叠加后得到结构实际响应的方法,其核心原理是利用振型正交的特点通过正则变换将方程组解耦,该方法简单易行,但由于成立前提是在结构的动力响应过程中质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵均保持不变,因此仅限于解决线性问题;直接积分法是指通过直接积分来求解动力微分方程并最终得到结构实际响应的方法,中心差分法、Newmark法是其最常用的数值解法<sup>[8]</sup>,可用于求解线性与非线性问题,但计算代价通常相对高。

随着非线性相关理论的发展以及计算机运算能力的提高,将水电站厂房作为非线性体系进行动力分析逐渐成为趋势,因此直接积分法更值得推广。针对其计算代价高的缺点,可以采取部分非线性的方法,即仅将对研究结果产生显著影响的部分考虑为非线性,以此缩短计算时间;同时可以开展新的数值解法研究,获得保证精度前提下效率更高的解法。

## 3 响应特点

相较于其它类型工业厂房,水电站地面厂房的地震响应有其特别的地方:上部框架鞭梢效应明显和流道内动水压力模拟复杂。

水电站厂房跨度大、高度高。一方面,下部为大体积混凝土,上部为梁、柱、墙为主的钢筋混凝土和钢结构,上、下两部分间刚度差异明显,在地震动荷载作用下将产生鞭梢效应,造成上部结构响应明显放大<sup>[9]</sup>;另一方面,主厂房下游侧通常设有与其整体相连的二层低跨副厂房,增大了主厂房下游侧结构的刚度,造成地震中上、下游侧结构顺水流向的变形不协调,导致吊车的大位移和钢屋架的大变形,对工作人员的人身安全造成威胁,且极大地增加了震后抢修的难度<sup>[10]</sup>。

随着水电机组单机容量的增大,厂房流道内水体对厂房动力特性和地震响应的影响愈发显著,但流道形状复杂且所包含水体巨大,很难精确得到流道内水体的动水压力,这也是当前此领域的一个研究热点和难点。

## 4 地震动选取

计算分析中,地震动的选取与工程所在地的场地、地基条件密切相关,可以选取实际地震动数据,

也可以通过时域方法、频域方法和考虑相位谱在时域与频域内进行综合调整的方法等获得人工地震波<sup>[11]</sup>。实际地震波的优势在于真实,且可靠的时程记录越来越多,但对地震这一相对小概率的随机事件而言,要求得到一组同时满足同一反应谱统计特征和特定场地条件的地震波组时,通过人工拟合的方法更易获得,对于重要的工程,需要同时考虑实际地震波和人工拟合波下结构的地震响应,二者互为补充。

近断层地震动对结构的影响是当前结构抗震研究的热点之一。在震源距较小的区域内,地震波中的近场项和中场项不能被忽略,此时这个区域内的地震动就被称为近断层地震动<sup>[12]</sup>。它本身的破裂方向性效应、滑冲效应、上盘效应等重要特性,和对高层建筑、大坝等结构的破坏机理均是地震工程界的难题<sup>[13]</sup>。由于近断层地震动的研究开展时间并不久,目前还鲜见关于近断层地震动对水电站地面厂房破坏影响的文献发表。文献<sup>[14]</sup>详述了一种近断层脉冲型地震动的合成方法,并在此基础上对比了地下洞室分别在近断层地震动与远场地震动下的响应情况,可以在此基础上尽早开展近断层地震动对水电站地面厂房的地震响应影响的研究。

针对平面尺寸较大的水电站厂房,文献<sup>[15]</sup>分析了行波效应的影响,分析结果表明,不考虑行波效应对厂房结构的设计偏安全,并建议若地震波速不大时可适当考虑行波效应,以期得到更经济合理的设计方案。

## 5 结构有限元模型

### 5.1 人工边界

大量观测和计算结果均表明辐射阻尼效应的考虑与否对结构的地震响应分析结果有显著影响<sup>[16-19]</sup>。辐射阻尼效应是指从结构反馈的能量向半无限地基中辐射出去的现象,在有限元分析中,通常是建立一个人工边界来模拟这种现象,现有人工边界包括全局人工边界和局部人工边界两种<sup>[20]</sup>。

全局人工边界是对半无限地基的精确模拟,但计算复杂且运算量巨大;局部人工边界是从半无限地基中截取有限部分作为处理对象,具有时空解耦性,数值解法简单且单元数目相对少,应用广泛。

局部人工边界又分无质量地基、透射边界和黏弹性边界三类。无质量地基采用无质量单元和固定约束边界,它不能模拟地基的辐射阻尼效应,结构响应被人为放大,不适合用于精确分析,随着理论日益成熟且运算能力大幅提高,这种方法已显出被淘汰

的趋势;透射边界是通过对所截取界面单元的定义,保证波在通过人工边界时完全透射,但这一方法的实现过程相对复杂,且自身存在稳定问题<sup>[20][21]</sup>;黏弹性边界由黏性边界发展而来<sup>[22]</sup>,黏性边界通过在边界单元上增加阻尼器以消耗结构反馈的能量,从而达到模拟能量向半无限远域耗散的效果,但黏性边界的模拟精度不高,易在低频失稳,黏弹性边界在黏性单元上增加了弹簧,模拟出边界单元的弹性恢复能力,提高了精度并解决了低频失稳的问题。

通过以上比较可以看出,通过建立黏弹性边界来模拟辐射阻尼效应的方法最为简单可靠,文献<sup>[23-25]</sup>详述了黏弹性边界在实际应用中的原理和实现方法,并尝试了多种简化的地震荷载施加方式。黏弹性边界在水电站厂房的动力响应分析中应用已经很多,文献<sup>[26]</sup>针对河床式水电站厂房进行了基于黏弹性边界的地震响应分析,将其分析结果同无质量地基固定边界的分析结果对比,得到辐射阻尼效应明显减小了河床式厂房上部结构的地震响应的结论。文献<sup>[27-28]</sup>在针对地下厂房的动力分析中也通过建立黏弹性边界完成了模拟辐射阻尼的模拟。

### 5.2 流固耦合

厂房内外的水体一方面会改变结构的动力特性,另一方面产生的动水压力也将显著影响厂房的地震响应。

通常使用附加质量法来模拟河床式水电站上下游水体与厂房的耦合效果<sup>[29-31]</sup>,它具有很好的精度保证,在多类水工建筑物的响应分析中广泛应用,其原理是将动水压力等效为与流道壁一起运动的刚度为零的附加质量单元,从而大大降低计算解耦的计算成本。

部分研究者选择简化考虑或忽略厂房内部水体对结构响应的影 响,但随着水电机组单机容量的增大,其影响越来越不容忽视,又由于流道结构形状复杂且其中水体庞大,准确模拟难度大,成为当前该领域的研究难点和热点,目前被较多采用的模拟方法是附加质量法和势流体单元法。

附加质量法不能够模拟脉冲压力和对流压力,在大尺寸流道中的计算精度很低,为此文献<sup>[32]</sup>尝试使用修正后的进水塔附加质量公式,并最终在水电站厂房模态分析中得到了具有较高精度的结果,但此种修正并不具普适性,须谨慎借鉴。

势流体单元法基于线性无穷小速度公式,通过流体单元的速度来表征力的作用,以此来实现流体与固体的耦合。对于势流体单元有如下假定:(1)无粘,无漩,无热传递;(2)可微压或者几乎不可压;(3)

流体边界有相对很小的位移或没有位移;(4)实际的流体速度远远小于声速或者可以认为流体不会发生流动<sup>[33]</sup>。坝后式和岸边式厂房通常可以采用此法,文献[33]和文献[34]讨论了该方法的具体应用,并得到大尺寸流道内水体对厂房的动力特性的影响不可忽略的结论。

为达更精确的模拟效果,针对于水电站厂房流道的复杂特性,有学者提出了强耦合法<sup>[35]</sup>和全耦合模型<sup>[36]</sup>两种尝试。前者开创性地将声场理论同有限元方法相结合来分析厂房的动力特性;后者建立了全流道湍流-结构模型,用于分析厂房动力特性和振动传递路径,这两种方法都是对流道内水体全面且精确的模拟。

在水电机组高水头、大容量的实际需求大背景下,厂房内部的流固耦合问题已成为制约其动力响应分析的一个重要瓶颈,亟需研究者继续深入探索,找到一种相对简单易用且精度有保障的方法。计算流体动力学的理论与应用已比较成熟,通过场域间边界区数据交换来实现多场域耦合分析相较于附加质量法等弱耦合方法可获得更精确的结果,是值得研究人员尝试和深入探索的一个方向。

### 5.3 阻尼

阻尼是对结构在动力反应过程中能量耗散现象的描述,其成因复杂且表现形式多样,针对不同的研究对象或研究目的,研究者提出了诸多阻尼模型,在结构动力分析中应用最广泛的是等效粘滞阻尼器模型,线弹性体系在该模型下的阻尼矩阵不会随时间发生变化,但非线性体系因损伤或接触等原因,阻尼矩阵时刻发生改变,因此在非线性动力分析中需要确定合理的阻尼矩阵构造方法来反映这种改变,当前应用最为广泛的构造方法是考虑了质量比例阻尼和刚度比例阻尼的Rayleigh阻尼模型。

Rayleigh阻尼模型在具体应用中,通常直接利用结构前两阶自振频率确定质量矩阵系数和刚度矩阵系数,但经验证这样的系数取法并不适用于所有结构<sup>[37-38]</sup>,特别对长周期结构,如地震中的大跨度拱桥<sup>[39]</sup>和超高层建筑<sup>[40]</sup>等,此法并不能准确反映其动力过程中的实际阻尼效果,甚至有相当大偏差,文献[41]提出对长周期结构的阻尼系数选取应综合考虑结构自振特性和外部动力激励的频谱特性,而水电站厂房上、下部结构刚度差异明显,前两阶振型往往仅反映上部结构动力特性,因此不能保证其对反应有显著贡献的振型阻尼比取值的合理性,因此有必要研究地面式水电站厂房这一类结构形式的阻尼系数取法,可行的研究思路之一是:在线弹性体系内,

首先通过振型叠加法对水电站厂房有限元模型进行动力响应分析,并以此作为精确解,然后通过不同的阻尼矩阵构造方法构造阻尼矩阵,分别用于直接积分法并得到同一模型的动力响应,将此响应结果分别同精确解作对比,从而确定最接近精确解的阻尼矩阵构造方法作为非线性体系中最合适的阻尼矩阵构造方法。

### 5.4 线性与非线性模型

限于运算资源相对不足等原因,对水电站厂房地震响应的分析常常选择忽略结构的材料和接触等非线性特性而仅在线弹性范围内研究讨论<sup>[42-45]</sup>。随着该领域研究的深入和基于性能的抗震设计要求,更符合实际的非线性动力分析必然成为今后的研究趋势。

结构地震反应分析较多用到的非线性本构模型包括弹塑性模型和损伤塑性模型等。弹塑性模型可以反映混凝土材料在荷载作用后产生不可恢复变形的特性,通过对屈服条件、流动法则和强化法则的规定和假设,能够较好反映材料在复杂加载路径和加载历史下的应力应变状态;基于Lubliner等人和Lee等人成果而建立的混凝土损伤塑性模型,采用各向同性弹性损伤结合各向同性拉伸与压缩塑性理论表征材料的非弹性行为,引入损伤因子描述损伤的累积发展,能够较好反映混凝土在低围压条件下的单调受拉和受压力学行为,合理描述混凝土在循环荷载下的刚度转换和损伤,可以同时考虑材料初始损伤和受力过程中的损伤累积。

文献[46]和文献[47]等研究了蜗壳外围混凝土的损伤及发展,前者更考虑了钢蜗壳同外围混凝土间的非线性接触行为,使蜗壳外围混凝土损伤的研究更进一步。文献[48]基于三峡水电站15#机组厂房的静力分析结果,计算考虑损伤后的厂房动力特性,得到蜗壳外围混凝土开裂对厂房整体自振特性影响较小的结论。文献[49]和文献[50]基于时程分析法对水电站厂房整体进行了非线性地震响应分析,并同线性模型计算结果进行了比较,证明非线性分析的实时仿真优势。

有关混凝土材料的动力本构模型和粘结-滑移理论研究仍进行如火如荼,其研究成果将为各类混凝土结构的非线性动力分析提供越来越精准的依据,使结构设计向基于性能的抗震设计目标越靠近。

## 6 地震响应评价

现有文献中,鲜有专门针对水电站厂房地震响应评价体系的研究或说明,通过文献阅读与总结,本

文认为评价可从三个层次展开。

(1) 承载能力。承载能力是结构力学性能的最基本要求,应力水平是衡量结构承载能力的重要指标,通过特征位置,如钢蜗壳外围混凝土、楼板、梁、柱、墙、屋顶网架等特征位置混凝土、钢筋和钢网架的应力水平,来表征和评价厂房结构的强度,可以在相当程度上准确反映厂房的响应强弱,并可据此对厂房结构是否会破坏做出判断。

(2) 变形及变形协调性。由于鞭梢效应以及上、下游墙柱体系存在刚度差异,水电站厂房的变形必然成为评价体系中的重要一环。特征位置处的位移峰值、层间位移、上下游排架轨顶相对位移、裂缝分布与发展等,均可表征厂房结构在震中及震后的变形安全水平。

(3) 对机组及其控制设备的影响。地震工况属偶然工况,结构在保证“小震不坏,中震可修,大震不倒”的前提下,应尽早恢复电能生产,为抢险救灾提供能源保障,因此,在满足前两项要求的前提下,还应考虑地震对机组及其控制设备的影响。文献[51]以三峡水电站厂房为例,结合机电设备抗震设计和机组有限元计算,讨论了地震对水电站机组的影响。我国尚未制定这方面的强制标准,文献[52]通过归纳总结国内外相关振动控制标准,提出了一套水电站厂房振动控制标准建议值,但此标准是面向水电站厂房的正常工况提出,地震工况下楼板、机墩等部位的反应极可能大大超出标准中建议值,因此怎样借鉴和引入该标准仍需深入研究和讨论。

## 7 震损表现与抗震措施

地面厂房上部结构刚度小且鞭梢效应明显,同时是影响工作人员安全最直接的部分,因此抗震设计的关注重点应放在减弱上部结构的响应上,汶川震后调查同样表明,在满足“大震不倒”的前提下,水电站地面厂房的震损主要表现为填充墙开裂、排架柱剪切裂缝和基础沉降等<sup>[53-55]</sup>。

现有文献中,针对水电站地面厂房的具体抗震措施专项研究并不多见。结合建筑抗震设计思路,可从三个方向考虑其抗震措施设计:一是减小地震能量输入,如设置抗震缝、隔震支座等,但这类措施可能造成结构刚度的削弱,屋顶桁架和面板与排架柱筒支比较接更有利于上下游排架柱顶的变形协调,也可考虑采用滑移支座来减弱屋顶网架的应力水平;二是提高结构刚度、强度,如提高混凝土强度和增加配筋等,但这类措施可能大幅提高工程造价,汶川震损调查中出现大量箍筋弯钩脱开的现象,因

此可以考虑在排架节点、柱脚等规范要求加密箍筋的位置将箍筋端部以焊接替代弯钩,以增强抗剪能力;三是消能减震,如增设阻尼器等,文献[56]对在水电站厂房中通过设置阻尼器来减震的方法进行了探索,通过在某厂房发电机层楼板与上游墙、尾水平台与下游排架之间设置了若干粘滞阻尼器来减小薄弱部位的地震响应,经分析对比,减震效果明显。

汶川地震中,沙牌、草坡等水电站厂房受滑坡、滚石等次生地质灾害的影响严重<sup>[57]</sup>,滚石击穿填充墙等现象大量存在,因此对于不利的地形环境,地面厂房应在选址过程中遵循“先避让,后处理,再保护”的指导思想,尽量减轻次生地质灾害对地面厂房的破坏。

自福岛核电站危机以来,针对核电站、火电站厂房抗震、减震措施的探索成为新的研究热点,目前已有研究成果应用于新、扩建工程<sup>[58-61]</sup>,能否将同类技术应用于水电站厂房设计是值得深入研究的一个方向,需注意的是由于水电站厂房的安装运行要求,在其它工程中应用较多的阻尼器、减震器和剪力墙等的布置往往严重受限,因此大规模应用还应有进一步的技术论证和经济方案比较。

同其它类型电站相比,水电机组有相对方便廉价的启闭能力,通过细化并严格执行地震相关应急制度,从制度层面减弱厂房地震响应,将震害降至最低,也可以成为今后此领域研究的新方向。

## 8 规范修订

DL 5073-2000《水工建筑物抗震设计规范》执行已历14余载,期间我国境内发生了波及众多水工建筑物的汶川、玉树两次强震。NB 35047-2015《水电工程水工建筑物抗震设计规范》由国家能源局于2015年4月2日发布,同年9月1日起正式实施,替代原有DL 5073-2000《水工建筑物抗震设计规范》,限于本文作者水平,仅就新规范中有关水电站厂房部分的修订做简单介绍,希望引起工程与科研人员的注意。

(1) 由基于经验的安全系数法向基于可靠度理论的分项系数法“转轨”,同时引入表征非随机性不确定性的结构系数,这符合潘家铮院士提出的“积极慎重,转轨套改”的指导思想,从理论上更符合基于性能的抗震设计要求。

(2) 场地分类将原 $\tilde{N}$ 类场地( $v_s \geq 500$  m/s,  $v_s$ 为场地覆盖层等效剪切波速,下同)细分为 $\tilde{N}_0$ ( $v_s \geq 800$  m/s)和 $\tilde{N}_1$ ( $800$  m/s  $\geq v_s \geq 500$  m/s)。基础和场地的优劣直接影响着反应谱的形状和幅值大小,

相对于普通民用建筑, 水工建筑物对基础和场地的选择要求通常高很多, 对  $v_s \geq 800 \text{ m/s}$  这类地质条件很好的场地, 依照基于性能的抗震设计要求, 有必要单独列出与之相适应的标准设计反应谱。相对  $\tilde{N}_1$  类场地,  $\tilde{N}_0$  类场地所对应反应谱特征周期取值减小, 即平台段缩短, 这将使计算结果变小, 更真实反映结构在设计地震下的响应水平。

(3) 标准设计反应谱中动力系数公式的衰减系数由 0.9 改为了 0.6。由于水电站厂房前 3 阶自振周期通常位于反应谱下降段, 因此此项修订将显著影响反应谱法和通过反应谱获取地震动时程荷载的时程计算结果, 使所得响应更强烈。

(4) 规定特征周期按《中国地震动参数区划图》查询后还应按特征周期调整表进行调整。相对原规范中对特征周期的选取, 新规范通过对调整表的规定, 同时兼顾了场地和震中距对标准设计反应谱的影响, 更贴近各地各工程的实际。GB 18306-2015《中国地震动参数区划图》将于 2016 年 6 月 1 日起正式实施, 取消了不设防地区, 并将地震动参数明确对应到乡镇, 为水工建筑物抗震计算和设计提供了更细致准确的基础依据。

(5) 将水电站厂房等建筑物的阻尼比建议值调整为 7%, 此项修订将使时程计算所得响应减弱, 对于不同结构形式的建筑的响应减弱幅度还需具体分析。

## 9 总结

水电站地面厂房有明显区别于其他工业厂房的动力响应特点, 其震损情况直接影响到其内工作人员的人身安全和震后救灾的能源保障, 因此应重视其地震响应分析的研究工作。

围绕水电站厂房地震响应分析, 学者们从计算方法、地震动选取、建立结构有限元模型、结构响应评价、抗震措施等方面做了大量研究, 其中, 辐射阻尼效应模拟、流固耦合模拟和结构非线性分析是当前三个主要研究热点并已经取得了部分进展; 近断层地震动和阻尼矩阵构造方法对水电站厂房动力响应分析结果的影响, 抗震减震措施的研究与应用等方面的研究工作, 仍亟待科研和工程人员继续深入。

《水电工程水工建筑物抗震设计规范》等一批有关水电站厂房抗震设计的新规范已陆续发布, 希望引起工程和科研人员的注意, 并据此把握该领域的发展趋势。

汶川、玉树地震后, 关于水电站厂房地震响应分析的研究已在向前快速推进, 希望本文可以为读者

带来一定帮助, 共同为此领域的发展加瓦添砖。

## 参考文献(References):

- [1] 汤鑫华. 论水力发电的比较优势[J]. 中国科技论坛, 2011(10): 67-68. (TANG Xir hua. Study on the comparative advantages of water power[J]. Forum on Science and Technology in China, 2011(10): 67-68. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1002-6711.2011.10.011
- [2] 汤鑫华. 论水力发电对生态环境的影响[J]. 水电与新能源, 2010(5): 67-73. (TANG Xir hua. Impacts of water power on ecological environment[J]. Hydropower and New Energy, 2010(5): 67-73. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1671-3354.2010.05.027
- [3] 左东启. 水力发电与环境生态[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(2): 1-7. (ZU O Dong-qi. Hydroelectric power generation and ecological environment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(2): 1-7. (in Chinese)) doi: 10.3880/j.issn.1006-7647.2005.02.001
- [4] 晏志勇, 王斌, 周建. 汶川地震灾区大中型水电工程震损调查与分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (YAN Zhi yong, WANG Bin, ZHOU Jian. Investigation and analysis of damage of hydropower projects in Wenchuan Earthquake[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009. (in Chinese))
- [5] 练继建, 王海军, 秦亮. 水电站厂房结构研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (LIAN Ji jian, WANG Hai jun, QIN Li ang. Study on the structure of hydropower house[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [6] 张志国, 杨阳, 牟春来, 等. 水电站地下厂房结构抗震计算方法探讨[J]. 岩土力学, 2014, 35(增 1): 319-327. (ZHANG Zhi guo, YANG Yang, MOU Chun lai, et al. Discussion on seismic calculation methods of underground structure of hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(Z1): 319-327. (in Chinese))
- [7] NB 35047-2015. 水电工程水工建筑物抗震设计规范[S]. (NB 35047-2015. Code for seismic design of hydraulic structures of hydropower project[S]. (in Chinese))
- [8] Anil K. Chopra. Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
- [9] 张汉云, 张燎军, 李龙仲, 等. 水电站地面厂房鞭梢效应及抗震分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 88-92. (ZHANG Han yun, ZHANG Liao jun, LI Long zhong, et al. Whiplash effect of ground hydropower house and its aseismic analysis[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(1): 88-92. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1000-7709.2012.01.024.
- [10] 裘民川. 水电站厂房的抗震设计问题[J]. 工程抗震, 1997(2): 1-5. (QIU Min chuan. Issue on seismic design of hydropower house[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1997(2): 1-5. (in Chinese))
- [11] 张运良, 李建波. 水工建筑物抗震计算基础[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015. (ZHANG Yun liang, LI Jian bo. Basic for seismic calculation of hydraulic structures[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2015. (in Chinese))

- [12] 刘启方,袁一凡,金星,等.近断层地震动的基本特征[J].地震工程与工程振动,2006,26(1):1-10. (LIU Qifang, YUAN Yifan, JIN Xing, et al. Basic characteristics of near fault ground motion[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(1): 1-10. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1000-1301.2006.01.001
- [13] 杨迪雄,赵岩.近断层地震动破裂向前方向性与滑冲效应对隔震建筑结构抗震性能的影响[J].地震学报,2010,32(5):579-587. (YANG Dixiong, ZHAO Yan. Effects of rupture forward directivity and fling step of near fault ground motions on seismic performance of base isolated building structure[J]. Acta Seismologica Sinica, 2010, 32(5): 579-587. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.0253-3782.2010.05.007
- [14] 崔臻,盛谦,冷先伦,等.近断层地震动对大型地下洞室群地震响应的影响研究[J].岩土力学,2013,34(11):3213-3220,3228. (CUI Zhen, SHENG Qian, LENG Xianlun, et al. Effects of near fault ground motion on seismic response of underground caverns [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3213-3220, 3228. (in Chinese))
- [15] 张启灵,伍鹤皋.行波效应对大型水电站厂房地震响应的影响[J].振动与冲击,2010,29(6):76-79. (ZHANG Qiling, WU HEGAO. Traveling wave effect on seismic response of large scale hydropower house[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(6): 76-79. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1000-3835.2010.06.019 doi:10.3969/j.issn.1000-3835.2010.06.019
- [16] 李志全,杜成斌,艾亿谋.地基辐射阻尼对结构地震响应的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(4):400-404. (LI Zhiquan, DU Chengbin, AI Yimou. Effect of radiation damping on seismic response of structures[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(4): 400-404. (in Chinese)) doi: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.008
- [17] 陈厚群.坝址地震动输入机制探讨[J].水利学报,2006,37(12):1417-1423. (CHEN Houqun. Discussion on seismic input mechanism at dam site[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(12): 1417-1423. (in Chinese)) doi: 10.3321/j.issn:0559-9350.2006.12.004
- [18] 王璨,张伯艳,李德玉.考虑地震输入机制的强度折减动力有限元方法[J].中国水利水电科学研究院学报,2015,13(2):100-105. (WANG Can, ZHANG Boyan, LI Deyu. A strength reduction dynamic FEM including the seismic input mechanism[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(2): 100-105. (in Chinese)) doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2015.02.003
- [19] 吴健,金峰,张楚汉,等.无限地基辐射阻尼对溪洛渡拱坝地震响应的影响[J].岩土工程学报,2002,24(6):716-719. (WU Jian, JIN Feng, ZHANG Chuhuan, et al. Effects of radiation damping of infinite foundation on seismic response of the Xiluodu arch dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 716-719. (in Chinese)) doi: 10.3321/j.issn:1000-4548.2002.06.009
- [20] 赵密.粘弹性人工边界及其与透射人工边界的比较研究[D].北京:北京工业大学,2004(ZHAO Mi. Study on the viscous spring boundary and the transmitting boundary [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2004 (in Chinese))
- [21] 廖振鹏,黄孔亮,杨柏坡,等.暂态波透射边界[J].中国科学:A辑,1984,27(6):556-564. (LIAO Zhenpeng, HUANG Kongliang, YANG Baipo, et al. Transmitting boundaries to transient wave[J]. Science in China, Ser. A, 1984, 27(6): 556-564. (in Chinese))
- [22] Deeks A J, Randolph M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 1994, 120(1): 25-42. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1994)120:1(25)
- [23] 杜修力,赵密.基于黏弹性边界的拱坝地震反应分析方法[J].水利学报,2006,37(9):1063-1069. (DU Xiuli, ZHAO Mi. Analysis method for seismic response of arch dams in time domain based on viscous spring artificial boundary condition[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(9): 1063-1069. (in Chinese)) doi: 10.3321/j.issn:0559-9350.2006.09.006
- [24] 苑举卫,杜成斌,陈灯红.基于ABAQUS的三维粘弹性边界单元及地震动输入方法研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2010,32(3):9-13. (YUAN Juiwei, DU Chengbin, CHEN Denghong. Study of 3D viscoelastic boundary elements based on ABAQUS and earthquake input method [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2010, 32(3): 9-13. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1672-948X.2010.03.003
- [25] 何建涛,马怀发,张伯艳,等.黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J].水利学报,2010,41(8):960-969. (HE Jiatao, MA Huafafa, ZHANG Boyan, et al. Method and realization of seismic motion input of viscous spring boundary [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 960-969. (in Chinese)) doi: 10.13243/j.cnki.slx.2010.08.015
- [26] 喻虎圻,何蕴龙,曹学兴,等.基于粘弹性边界的河床式厂房地震动响应分析[J].武汉大学学报:工学版,2015,48(1):27-33. (YU Huqi, HE Yunlong, CAO Xuexing, et al. Seismic analysis of powerhouse in river channel based on viscoelastic boundary [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(1): 27-33. (in Chinese)) doi: 10.14188/j.1671-8844.2015.01.006
- [27] 张运良,韩涛,侯攀,等.大型水电站地下厂房的水力振动数值分析[J].水力发电,2011,37(8):35-38,58. (ZHANG Yunliang, HAN Tao, HOU Pan, et al. Numerical analysis on hydraulic vibration of large scale underground hydropower powerhouse [J]. Water Power, 2011, 37(8): 35-38, 58. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.0559-9342.2011.08.011
- [28] 张运良,马艳晶,刘晋超.大型水电站地下厂房的地震反应特点初探[J].水利水电科技进展,2011,31(增1):1-4,44. (ZHANG Yunliang, MA Yanjing, LIU Jinchao. Preliminary study on seismic response characteristics of large scale underground hydropower powerhouse [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(Z1): 1-4, 44. (in Chinese))
- [29] 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. (LIAN Jijian,



- WANG Haijun, WANG Rixuan. Study on dynamic characteristics of the powerhouse structure of run of river power plant[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2004, 35(8): 37-40. (in Chinese) doi: 10.3969/j.issn.1000-0860.2004.08.011
- [30] 曹伟, 张运良, 马震岳, 等. 厂顶溢流式水电站厂房振动分析[J]. 水利学报, 2007, 38(9): 1090-1095. (CAO Wei, ZHANG Yurliang, MA Zheyue, et al. Vibration analysis of roof overflow powerhouse[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(9): 1090-1095. (in Chinese) doi: 10.3321/j.issn:0559-9350.2007.09.010
- [31] 樊锐, 陈尧隆, 刘武军, 等. 河床式水电站厂房坝段三维有限元抗震分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, 20(5): 131-134. (FAN Rui, CHEN Yaolong, LIU Wujun, et al. Finite element analysis of the earthquake resistance of the riverbed hydropower station[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009, 20(5): 131-134. (in Chinese)
- [32] 徐国宾, 张婷婷, 王海军, 等. 河床式水电站流道水体附加质量计算方法研究[J]. 水利水电技术, 2012, 43(3): 19-22, 62. (XU Guobin, ZHANG Tingting, WANG Haijun, et al. Study on method of calculation on additional mass of water in flow-channel of hydropower station in river channel[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(3): 19-22, 62. (in Chinese) doi: 10.3969/j.issn.1000-0860.2012.03.006
- [33] 张存慧, 马震岳, 周述达, 等. 大型水电站厂房结构流固耦合分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31(6): 192-197. (ZHANG Cunchui, MA Zheyue, ZHOU Shuda, et al. Analysis of fluid solid interaction vibration characteristics of large scale hydropower house[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(6): 192-197. (in Chinese)
- [34] 孙伟, 何蕴龙, 苗君, 等. 水体对河床式水电站厂房动力特性和地震动力响应的分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 119-127. (SUN Wei, HE Yunlong, Miao Jun, et al. Effects of water body on dynamic characteristics and seismic responses of run of river hydropower house[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(9): 119-127. (in Chinese) doi: 10.11660/slfdx.b.20150916
- [35] 张辉东, 周颖. 大型水电站厂房结构流固耦合振动特性研究[J]. 水力发电学报, 2007, 26(5): 134-137, 111. (ZHANG Huidong, ZHOU Ying. Study of fluid solid interaction vibration characteristics of the large scale powerhouse structure[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(5): 134-137, 111. (in Chinese) doi: 10.3969/j.issn.1003-1243.2007.05.026
- [36] 张燎军, 魏述和, 陈东升. 水电站厂房振动传递路径的仿真模拟及结构振动特性研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 108-113. (ZHANG Liaojun, Wei Shuhe, CHEN Dongsheng. Simulation of transmission path and study on structural vibrations of hydropower house[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(1): 108-113. (in Chinese)
- [37] 李小军, 侯春林, 潘蓉, 等. 阻尼矩阵选取对核电厂结构地震响应的分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(1): 110-117. (LI Xiaojun, HOU Chunlin, PAN Rong, et al. Effect of damping matrix selection on seismic response of nuclear power plant structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(1): 110-117. (in Chinese) doi: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.01.020
- [38] 潘日光, 高莉莉. Rayleigh 阻尼系数解法比较及对结构地震反应影响[J]. 工程力学, 2015, 32(6): 192-119. (PAN Danguang, GAO Lili. Comparison of determination methods for rayleigh damping coefficients and effects on seismic responses of structures[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(6): 192-119. (in Chinese) doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.12.1190
- [39] 楼梦麟, 张静. 大跨度拱桥地震反应分析中阻尼模型的讨论[J]. 振动与冲击, 2009, 28(5): 22-26. (LOU Menglin, ZHANG Jing. Discussion on damping models for seismic response analysis of long-span bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(5): 22-26. (in Chinese) doi: 10.3969/j.issn.1000-3835.2009.05.006
- [40] 楼梦麟, 隋磊, 沈飞. 不同阻尼矩阵建模对超高层结构地震反应分析的影响[J]. 结构工程师, 2013, 29(1): 55-61. (LOU Menglin, SUI Lei, SHEN Fei. Effects of damping matrix modeling on seismic responses of super high rise structures[J]. Structural Engineers, 2013, 29(1): 55-61. (in Chinese) doi: 10.3969/j.issn.1005-0159.2013.01.009
- [41] 董云, 楼梦麟. 基于结构基频确定 Rayleigh 阻尼系数的优化方法及其讨论[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(2): 8-13. (DONG Yun, LOU Menglin. An optimization solution for rayleigh damping coefficients based on the fundamental frequency of structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(2): 8-13. (in Chinese)
- [42] 马震岳, 董毓新, 郭永刚, 等. 三峡水电站厂房结构动力分析与优化[J]. 水电能源科学, 2000, 18(3): 26-28, 53. (MA Zheyue, DONG Yuxin, GUO Yonggang, et al. Kinetic analysis and structural optimization of the buildings for the Three Gorges Project[J]. Water Resources and Power, 2000, 18(3): 26-28, 53. (in Chinese) doi: 10.3969/j.issn.1000-7709.2000.03.009
- [43] 于倩倩. 河床式水电站厂房结构的地震响应分析方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2012(YU Qianqian. The research on seismic analyzing approaches of the run of river hydropower station[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012(in Chinese)
- [44] 程恒, 张燎军, 林斌, 等. 水电站厂房钢管混凝土排架结构抗震性能[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37(5): 586-590. (CHENG Heng, ZHANG Liaojun, LIN Bin, et al. Seismic behavior of concrete filled steel tube bent structure of hydropower stations[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(5): 586-590. (in Chinese) doi: 10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.018
- [45] 陈婧, 姚锋娟, 马震岳, 等. 河床式水电站主副厂房不同连接形式抗震分析[J]. 水利水电科技进展, 2010, 30(1): 48-51, 67. (CHEN Jing, YAO Fengjuan, MA Zhenyue, et al. Seismic analysis for various connection patterns between main and auxiliary powerhouses of water retaining power stations[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, 30(1): 48-51, 67. (in Chinese) doi: 10.3880/j.issn.1006-7647.2010.01.011



- [46] 张存慧. 大型水电站厂房及蜗壳结构静动力分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (ZHANG Cur hui. Static and dynamic analysis of large scale hydropower house and spiral case structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1001-2184.2009.02.001
- [47] 王海军, 练继建, 闫晓荣, 等. 三峡水电站钢蜗壳外围混凝土损伤分析[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2006, 38(4): 24-28. (WANG Hai jun, LIAN Ji jian, YAN Xiao rong, et al. Concrete damage analysis of the spiral case structure of Three Gorges Power Station[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2006, 38(4): 24-28. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1009-3087.2006.04.006
- [48] 欧阳金惠, 陈厚群, 张超然, 等. 三峡电站 15# 机组厂房结构动力分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(2): 137-142. (OUYANG Jin hui, CHEN Hou qun, ZHANG Chao ran, et al. Dynamic response analysis on No. 15 unit powerhouse structure in the Three Gorges Hydropower Station[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2007, 5(2): 137-142. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1672-3031.2007.02.010
- [49] 张辉东, 王日宣, 王元丰. 大型水电站厂房结构地震时程响应非线性数值模拟[J]. 水力发电学报, 2012, 26(4): 96-102. (ZHANG Hui dong, WANG Ri xuan, WANG Yuan feng. Seismic time history and nonlinear numerical simulation of large scale power house structure[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 26(4): 96-102. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1003-1243.2007.04.019
- [50] 王海军, 练继建, 王日宣. 水电站厂房结构地震响应非线性分析[J]. 水电能源科学, 2008, 26(3): 88-91. (WANG Hai jun, LIAN Ji jian, WANG Ri xuan. Seismic response nonlinear analysis of hydropower house structure[J]. Water Resources and Power, 2008, 26(3): 88-91. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1000-7709.2008.03.026
- [51] 徐波, 张雅琦, 李友平. 水电站机组抗震设计在西南区域地震中的意义[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 128-137. (XU Bo, ZHANG Ya qi, LI You ping. Significance of aseismic design of hydrogenerator units in southwest China[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015, 34(9): 128-137. (in Chinese)) doi: 10.11660/sldxb.20150917
- [52] 马震岳, 董毓新. 水电站机组及厂房振动的研究与治理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004(MA Zhen yue, DONG Yuxin. Vibration and its corrective action of water turbine generator set and power house[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004(in Chinese))
- [53] 宋胜武, 蒋峰, 陈万涛. 汶川地震灾区大中型水电工程震损特征初步分析[J]. 四川水利发电, 2009, 28(2): 1-7, 22. (SONG Sheng wu, JIANG Feng, CHEN Wan tao. Preliminary analysis on seismic damage characteristics of large and medium scale hydropower projects in the Wenchuan Earthquake stricken area[J]. Sichuan Water Power, 2009, 28(2): 1-7, 22. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.1001-2184.2009.02.001
- [54] 周建平, 杨泽艳, 范俊喜, 等. 汶川地震灾区大中型水电工程震损调查及主要成果[J]. 水利发电, 2009, 35(5): 1-5, 20. (ZHOU Jian ping, YANG Ze yan, FAN Jun xi, et al. Seismic damage investigation on large and medium sized hydropower projects in Wenchuan Earthquake Area[J]. Water Power, 2009, 35(5): 1-5, 20. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.0559-9342.2009.05.001
- [55] 王斌, 周建平. 汶川地震灾区水电工程震损调查及分析概述[J]. 水利发电, 2009, 35(3): 1-5. (WANG Bin, ZHOU Jian ping. Investigation and analysis of earthquake damage to hydropower projects in the Wenchuan Earthquake stricken Area[J]. Water Power, 2009, 35(3): 1-5. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.0559-9342.2009.03.001
- [56] 张启灵, 伍鹤皋, 李端有. 水电站地面厂房抗震措施研究[J]. 水力发电学报, 2012, 31(5): 184-190. (ZHANG Qi ling, WU He gao, LI Duan you. A seismic measure of surface hydropower house[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(5): 184-190. (in Chinese))
- [57] 郑声安, 王仁坤, 章建跃, 等. 汶川地震对岷江上游水电工程的影响分析[J]. 水利发电, 2008, 34(11): 5-9. (ZHENG Sheng'an, WANG Ren kun, ZHANG Jian yao, et al. Influence analysis of Wenchuan Earthquake on the hydropower projects in the upstream of the Minjiang River[J]. Water Power, 2008, 34(11): 5-9. (in Chinese)) doi: 10.3969/j.issn.0559-9342.2008.11.002
- [58] 邢国雷, 王勇拳, 薛涛. 设置铅阻尼器的某常规岛主厂房耗能减震分析[J]. 世界地震工程, 2014, 30(4): 107-112. (XING Guo lei, WANG Yong quan, XUE Tao. Analysis of energy consumption of a main machine hall in conventional island with lead dampers[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(4): 107-112. (in Chinese))
- [59] 高永武, 戴君武, 金波. 基于性能目标的一种核电站抗震设计方法研究[J]. 世界地震工程, 2015, 31(2): 148-155. (GAO Yong wu, DAI Jun wu, JIN Bo. Research on performance objective based seismic design method of nuclear power plant[J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(2): 148-155. (in Chinese))
- [60] 陈华霆. 减震技术在发电厂主厂房结构中的应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013(CHEN Hua ting. Research on application of vibration control technology in main buildings of thermal power station[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013(in Chinese))
- [61] 李荣, 张博, 薛涛. 设置铅阻尼器的某大型火力发电厂耗能减震分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(4): 67-72. (LI Rong, ZHANG Bo, XUE Tao. Energy consumption analysis of a main machine hall for the thermal power plant with lead dampers[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(4): 67-72. (in Chinese)) doi: 10.16226/j.issn.1002-8412.2015.04.010