

雷建成, 高孟潭, 吴健, 亢川川. 2011. 梯级电站系统的地震危险性评价方法初步研究. 地震学报, 33(3): 373-385.
Lei Jiancheng, Gao Mengtan, Wu Jian, Kang Chuanchuan. 2011. A preliminary research on the methodology of assessing seismic hazard of cascade hydropower station system. *Acta Seismologica Sinica*, 33(3): 373-385.

梯级电站系统的地震危险性 评价方法初步研究^{*}

雷建成^{1,2)*} 高孟潭¹⁾ 吴健¹⁾ 亢川川²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国成都 610041 四川省地震局

摘要 对梯级电站大坝以及梯级电站系统进行了一些简化和假定, 分析了梯级电站系统地震危险性的主要来源, 重点研究了上游大坝对下游相邻大坝的附加危险性影响, 将全部梯级电站作为一个整体, 提出了梯级电站系统地震危险性评价方法. 以大渡河干流梯级电站系统为分析实例, 考虑汶川 8.0 级地震后地震环境的变化, 评价了该系统在现今地震环境下的危险性. 根据梯级电站系统的特性, 考虑电站规划、设计、施工的技术经济可行性. 经分析指出, 提高梯级电站系统最薄弱的几个电站的设防参数, 是提高系统地震安全性的最有效的途径.

关键词 梯级电站 系统 地震危险性 评价方法

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.03.010

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

A preliminary research on the methodology of assessing seismic hazard of cascade hydropower station system

Lei Jiancheng^{1,2)*} Gao Mengtan¹⁾ Wu Jian¹⁾ Kang Chuanchuan²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

Abstract: Firstly we made some simplifications and hypotheses to cascade hydropower stations and cascade hydropower station system, then analyzed the main components that have influence on seismic hazard of cascade hydropower station system. By taking all the cascade hydropower stations as one unified system and account of the additional seismic hazard from the nearby upstream dam, we propose a new method to assess the seismic hazard of cascade hydropower station system. Taking the change of seismic background after the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake into account, we took the cascade hydropower station system in the trunk stream of Dadu river as a case study and evaluated its system seismic hazard nowadays. Based on the characteristics of cascade hydropow-

^{*} 基金项目 国家科技支撑计划项目(2006BAC13B02-0107, 2006BAC13B01-0604)和中国地震局重点项目“中国地震区划图编制——川西重大工程集中区地震区划图预编”联合资助. 中国地震局地球物理研究所论著 11AC1009.

收稿日期 2010-04-11 收到初稿, 2010-09-26 决定采用修改稿.

⁺ 通讯作者 e-mail: jclei@126.com

er station system and considering the technological and economical feasibilities in its planning, designing and constructing, we think that it is the most effective path to improve the system seismic safety by raising the design seismic parameters of the several weakest hydropower stations.

Key words: cascade hydropower stations; system; seismic hazard; assessment

引言

近年来我国进入了新一轮水电大开发、大发展的时期, 水工建设具有以下几个鲜明特点(潘家铮, 何璟, 2000; 张楚汉, 2004; 陈厚群, 2009): ① 大力发展“龙头”水库和梯级电站, 在十三大水电基地中, 绝大部分为梯级开发, 如金沙江中下游干流规划 12 级, 大渡河干流规划 22 级, 雅砻江干流规划 21 级等; ② 高坝坝型的发展显示出新的特色, 主要集中在重力坝、面板堆石坝、双曲拱坝 3 种坝型; ③ 将设计、建设一批世界级的高坝、大库, 如溪洛渡(273 m)、小湾(292 m)、锦屏一级(305 m)等坝高达 300 m 级, 库容为百亿立方米以上. 与此同时, 水工建设也遇到了许多设计和施工中的难点, 其中大坝地震安全性评价、抗震技术和抗震设计就是一些普遍关注的问题, 地震工况有时甚至还成为设计中的控制工况(陈厚群, 1996, 2005, 2008, 2009; 潘家铮, 何璟, 2000; 张楚汉, 2004; 张楚汉等, 2009; 汪小刚, 2004; 林皋, 2004, 2005). 汶川 8.0 级地震后, 如何评估建设在中国西部地震活动区的高坝的地震安全性, 成为当前面对的关键课题之一(Chen, 2008; 陈厚群, 2009; 张楚汉等, 2009).

在国内外的工程实践中, 不论是采用概率法还是确定性方法, 对大坝场址的地震安全性评价、设计地震的确定工作, 都是针对给定的单个坝址或单个水库进行的. 对于一个流域梯级式建设的水电工程, 可以看成是展布在空间一定区域的一系列单元组成的系统, 系统具有一定的物理结构和功能结构, 系统内的单元之间具有一定程度的相关性. 这种相关性最简单、直接的体现就是地震所引起的大坝漫顶或溃决对下游坝址的影响, 一个单元的破坏失效, 可能导致另一个单元的劣化或破坏失效. 对于这种长距离空间线性展布系统的地震安全性问题, 高孟潭(1993)指出, 系统作为一个整体所遭受的地震危险性与系统构成单元所遭受的地震危险性是有区别的, 对于串联系统而言, 系统的危险性大大高于各单元的危险性. 在地震活动强烈的地区, 空间距离较近的两个相邻大坝, 很有可能在相同的地震事件中同时遭遇到超过其设计地震动参数的地震影响, 从而使两个相邻大坝同时破坏失效, 进而造成系统的破坏失效, 其地震危险性可采用双场点地震危险性分析方法计算得出(雷建成等, 2010a). 以大渡河干流梯级电站为例, 本文将梯级电站系统简化为一个串联系统, 仅考虑地震因素, 着重研究上游大坝对下游相邻大坝的附加危险性影响, 提出了梯级电站系统的地震危险性评价方法, 同时还提出了确定梯级电站系统薄弱环节的方法以及提高系统安全性的可行途径的建议.

1 基本思路

1.1 梯级电站系统的简化分析

1) 把一个流域梯级式建设的水电工程, 假定为由展布在空间一定区域的一系列单元(大坝)组成的串联系统, 单元和系统只有工作和失效两种状态.

2) 梯级电站系统由 n 个梯级单元 S_1, S_2, \dots, S_n 组成, 各单元水库的库容分别为 V_1, V_2, \dots, V_n . 依照相关抗震设计规范、标准的规定, 各单元均采用一定的设计地震峰值加速度进行抗震设防, 各单元的设计地震峰值加速度分别为 a_1, a_2, \dots, a_n .

3) 单元处于某个特定的地震环境中, 会受到一定程度的地震影响, 因而具有一定的地震危险性. 各单元均采用一定的设计地震峰值加速度进行抗震设防, 将达到相应的抗震设防性能目标. 本文假定, 当单元遭遇到的地震作用低于其设计地震峰值加速度时, 单元处于正常工作状态; 当单元遭遇到的地震作用大于等于其设计地震峰值加速度时, 单元可能进入破坏失效状态, 并且, 该破坏失效的可能性随着其设计地震峰值加速度被超越的可能性的增大而增大. 因此, 在研究梯级电站单元及系统的地震危险性时, 本文所述的地震危险性, 主要是指它们遭遇超过其设计地震峰值加速度的地震作用的危险性, 即遭遇超标地震作用的危险性.

4) 当上游单元在地震作用下破坏失效时, 在一定的(库容)条件下, 该单元还将对紧邻的下游单元的地震危险性产生附加影响.

5) 设第 S_i 单元的地震危险性为 $P_i(E)$. 根据可靠性理论(高社生, 张玲霞, 2002), 该单元的地震可靠度 R_i 为

$$R_i = 1 - P_i(E) \tag{1}$$

则梯级电站系统的地震危险性 $SP(E)$ 为

$$SP(E) = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \tag{2}$$

1.2 单元地震危险性的来源分析

在一个流域梯级电站系统中, 设有距离较近的 3 个相邻的大坝单元 S_A, S_B 和 S_C , 其库容分别为 V_A, V_B 和 V_C , 其设计地震峰值加速度分别为 a_A, a_B 和 a_C (图 1). 将大坝单元 S_C 作为分析对象, 其地震危险性由以下 2 部分构成:

1) 自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$. 在给定的地震环境中, 单元 S_C 会直接遭受到超标地震作用而获得的地震危险性, 本文将其称为自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$.

2) 附加地震危险性 $P(E_{\text{add}})$. 同样地, 在给定的地震环境中, 上游大坝单元也可能直接遭遇到超标地震作用, 并且, 在这样的地震作用下, 上游大坝单元具有破坏失效并引发灾难性库水溢出的可能性. 当上游大坝在地震作用下破坏失效时, 由于灾难性库水溢出的传递, 在一定的库容条件下, 将对 S_C 产生附加影响, 本文将这种附加影响称为附加地震危险性 $P(E_{\text{add}})$. 进一步分析, 这种附加地震危险性主要来自 2 部分: ① 紧邻的上游大坝单元 S_B 失效所产生的附加地震危险性 $P(E_{\text{add}}^1)$; ② 相邻的多个上游大坝单元同时失效(如发生大坝连溃)所产生的附加地震

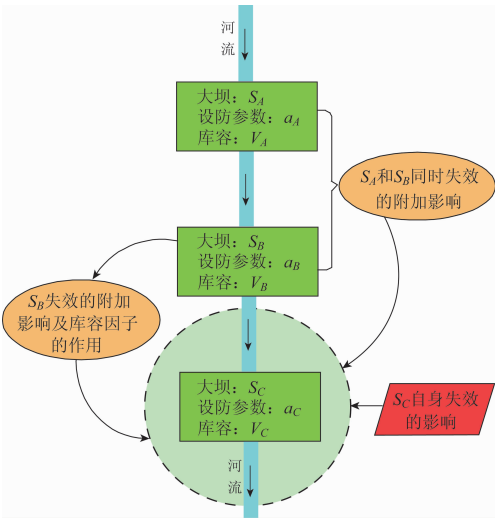


图 1 大坝单元地震危险性的来源分析

Fig. 1 The components of seismic hazard

危险性 $P(E_{\text{add}}^2)$. 在实际的地震环境中, 在同一次地震作用下, 多个大坝单元同时失效的概率, 是随着同时失效大坝数量的增加而急剧降低的. 不失一般性和代表性, 本文仅考虑上游紧邻的 2 个大坝同时失效, 即大坝单元 S_A 及 S_B 同时失效时, 对 S_C 所产生的附加地震危险性.

1.3 库容因素的考虑

在河流上修建水库, 除了可以发电外, 其主要作用还有兴利调节和防洪调节. 防洪调节就是利用水库拦蓄洪水, 削减洪峰流量, 以消除或减轻下游地区洪水灾害的行为. 水库的调洪能力, 与上游洪水流量、水库库容和水库泄洪能力等多种因素有关.

在地震作用下, 作为梯级电站系统的每个大坝单元, 既有产生自身失效的风险, 又有因库水溢出对下游大坝单元产生附加影响的风险. 但与此同时, 在一定条件下, 该大坝单元也可以消减、承接某种数量的上游洪水, 提升梯级电站系统的安全性.

为衡量水库对上游洪水的消减能力, 这里引入一个调洪系数 K . 对于图 1 中的大坝 S_C , 假定地震作用下上游大坝 S_B 失效将产生某个比例 W (如 $W=20\%$) 的库水溢出. 当上游失效溢出洪水总量 ($V_B \times W$) 低于下游大坝 S_C 库容的 $(1/2)W$ (如 $(1/2)W=10\%$) 时, 我们认为大坝 S_C 将完全消减大坝 S_B 失效溢出洪水的附加影响. 于是, 将大坝 S_C 的调洪系数 K_C 定义为

$$K_C = \frac{V_C \times \frac{1}{2}W}{V_B \times W} = \frac{V_C}{2V_B} \quad (3)$$

当 $K_C > 1.0$ 时, 大坝 S_C 将完全消减大坝 S_B 失效溢出洪水的附加影响, 即此时大坝 S_B 失效不会对大坝 S_C 产生附加影响; 而当 $K_C \leq 1.0$ 时, 大坝 S_B 失效将会对大坝 S_C 产生附加影响.

据此, 这里定义一个库容因子 PV , 用以反映地震作用下, 紧邻的上游大坝失效溢出洪水对地震危险性进行传递的可能性. 其取值为

$$PV = \begin{cases} 1.0 & K_C \leq 1.0 \\ 0.0 & K_C > 1.0 \end{cases} \quad (4)$$

虽然出现的可能性极低, 但一旦发生 2 个大坝连溃, 将是一种极端严重的水工灾害情况, 其产生破坏的传播速度和对下游的冲击程度是超乎寻常的, 因此这时不考虑下游水库对连溃洪水的消减作用. 即 K_C 不论取值大小, 上游大坝 S_A 及 S_B 同时失效时, 均会对下游大坝 S_C 产生附加失效影响.

2 梯级电站系统的地震危险性评价方法

2.1 单元地震危险性的计算

为便于分析研究, 考虑到单元的设计目标、环境状态等因素, 将单元的地震危险性详细描述如下.

2.1.1 设计地震危险性 $P(E_{\text{dsg}})$

按照《水工建筑物抗震设计规范(DL5073—2000)》(中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2001)的规定, 为达到相应的抗震设防目标, 不同等级的梯级电站单元要采用不同的危险性水平进行抗震设计. 对于 1 级壅水建筑, 要求以 100 年超越概率 0.02 所对应的地震动

参数进行抗震设计,即大坝采用这个地震动参数进行抗震设防后,未来允许遭遇超标地震作用的危险性为 $P(E_{\text{dsg}}) = 2.00 \times 10^{-4}$.

2.1.2 自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$

参见图 1,第 S_C 单元的自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$ 是指:在给定的地震环境中,该单元遭遇超标地震作用的概率,可以通过单场点地震危险性分析方法计算得到,即

$$P(E_{\text{self}}) = P(A_C \geq a_C | S_C) \quad (5)$$

一般情况下,梯级电站单元的自身地震危险性等同于其设计地震危险性.但当梯级电站单元的周边地震环境发生重大改变(如发生了汶川 8.0 级地震)后,二者不再相同.

2.1.3 附加地震危险性 $P(E_{\text{add}})$

2.1.3.1 紧邻的上游大坝单元 S_B 失效时对下游单元 S_C 产生的附加地震危险性 $P(E_{\text{add}}^1)$

1) 先考虑地震因素.参见图 1,在同一次地震中,假定单元 S_B 和单元 S_C 遭遇到的地震作用分别为 A_B 和 A_C .这时,单元 S_B 和单元 S_C 遭受地震影响的情况有且仅有如下 4 种:① $A_B < a_B, A_C < a_C$; ② $A_B < a_B, A_C \geq a_C$; ③ $A_B \geq a_B, A_C < a_C$; ④ $A_B \geq a_B, A_C \geq a_C$.在第①、②种情况下,单元 S_B 处于正常工作状态,对单元 S_C 无附加影响.对于第③种情况,其发生的概率为

$$P(A_B \geq a_B | S_B \cap A_C < a_C | S_C) = P(A_B \geq a_B | S_B) - P(A_B \geq a_B | S_B \cap A_C \geq a_C | S_C) \quad (6)$$

显然,第④种情况发生的概率为 $P(A_B \geq a_B | S_B \cap A_C \geq a_C | S_C)$.

综合第①—④种情况,上游单元 S_B 失效时对下游单元 S_C 产生的附加地震影响 PE_{add}^1 为

$$PE_{\text{add}}^1 = 0.0 + 0.0 + P(A_B \geq a_B | S_B) - P(A_B \geq a_B | S_B \cap A_C \geq a_C | S_C) + P(A_B \geq a_B | S_B \cap A_C \geq a_C | S_C) = P(A_B \geq a_B | S_B) \quad (7)$$

不难发现,上式可由单场点地震危险性分析方法得到计算结果.

2) 再考虑库容因素.前已述及,在一定的库容条件下,大坝 S_C 将完全消减大坝 S_B 失效溢出洪水的附加影响.根据公式(4)定义的库容因子,考虑库容因素后,上游单元 S_B 失效时对下游单元 S_C 产生的附加地震危险性 $P(E_{\text{add}}^1)$ 为

$$P(E_{\text{add}}^1) = PE_{\text{add}}^1 \times PV \quad (8)$$

2.1.3.2 上游单元 S_A 及 S_B 同时失效时对下游单元 S_C 产生的附加地震危险性 $P(E_{\text{add}}^2)$

在同一次地震中,上游单元 S_A 遭遇到超过其设防参数 a_A 的地震作用,上游单元 S_B 也同时遭遇到超过其设防参数 a_B 的地震作用,该状况出现的概率为 $P(A_A \geq a_A | S_A \cap A_B \geq a_B | S_B)$,其数值可由双场点地震危险性分析方法计算得出(雷建成等, 2010a).由于 2 个大坝连溃,是一种极端严重的水工灾害情况,其产生破坏的传播速度和对下游的冲击程度是超乎寻常的,所以这时不考虑下游水库对连溃洪水的消减作用.因此,上游单元 S_A 及 S_B 同时失效时,对下游单元 S_C 产生的附加地震危险性 $P(E_{\text{add}}^2)$ 为

$$P(E_{\text{add}}^2) = P(A_A \geq a_A | S_A \cap A_B \geq a_B | S_B) \quad (9)$$

2.1.4 联合地震危险性 $P_C(E)$

从上面的分析得知,图 1 中大坝单元 S_C 的联合地震危险性 $P_C(E)$ 为

$$P_C(E) = 1 - (1 - P(E_{\text{self}})) \times (1 - P(E_{\text{add}}^1)) \times (1 - P(E_{\text{add}}^2)) \tag{10}$$

由于 $P(E_{\text{self}})$, $P(E_{\text{add}}^1)$ 和 $P(E_{\text{add}}^2)$ 数值均很小(一般都小于 5.00×10^{-4}), 所以上式可以近似为

$$P_C(E) \approx P(E_{\text{self}}) + P(E_{\text{add}}^1) + P(E_{\text{add}}^2) = P(E_{\text{self}}) + P(E_{\text{add}}) \tag{11}$$

其中

$$P(E_{\text{add}}) = P(E_{\text{add}}^1) + P(E_{\text{add}}^2) \tag{12}$$

这就是说, 单元 S_C 联合地震危险性 $P_C(E)$ 可视为由自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$ 和附加地震危险性 $P(E_{\text{add}})$ 两部分组成, 其数值近似等于对应地震危险性的算术相加.

2.2 梯级电站系统地震危险性的计算

由式(2), 在给定的地震环境中, 系统的地震危险性 $SP(E)$ 为

$$\begin{aligned} SP(E) &= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P_i(E)] \approx 1 - \prod_{i=1}^n \{1 - [P_i(E_{\text{self}}) + P_i(E_{\text{add}}^1) + P_i(E_{\text{add}}^2)]\} \\ &\approx \sum_{i=1}^n [P_i(E_{\text{self}}) + P_i(E_{\text{add}}^1) + P_i(E_{\text{add}}^2)] = \sum_{i=1}^n [P_i(E_{\text{self}}) + P_i(E_{\text{add}})] \\ &= \sum_{i=1}^n P_i(E_{\text{self}}) + \sum_{i=1}^n P_i(E_{\text{add}}) \end{aligned} \tag{13}$$

从上式可以看出, 系统的地震危险性取决于各单元的地震危险性. 近似地, 系统的地震危险性等于各单元联合地震危险性的总和, 也可以看作各单元自身地震危险性总和与各单元附加地震危险性总和之和.

3 大渡河干流梯级电站系统的地震危险性评价

3.1 大渡河干流梯级电站基本情况

四川大渡河是长江流域岷江水系最大支流, 干流全长 1062 km. 根据《四川省大渡河干流水电规划调整报告》, 大渡河干流推荐以下尔呷、双江口、猴子岩、长河坝、大岗山、瀑布沟等形成主要梯级格局的 22 级开发方案(表 1), 规划总装机容量 2340 万千瓦. 在该开发方案中, 有 18 个梯级电站的库容在 1 亿 m^3 以上. 其中库容超过 10 亿 m^3 的电站有 4 个, 坝高超过 100 m 的高坝电站有 12 个. 其中双江口电站土心墙堆石坝高达 314 m, 为世界同类坝型的第一位. 按照河道长度平均, 每 48 km 就有一个梯级电站, 从梯级电站之间的直线距离看, 相邻梯级电站的直线距离为 11—48 km, 平均直线距离为 25 km.

从地震构造环境看, 大渡河干流及邻近地区的地震环境十分复杂、严峻: 大渡河干流位于鲜水河—安宁河断裂带与龙门山断裂带之间, 前者是川滇块体的东边界断裂, 发生过包括 1786 年康定—磨西间 $7\frac{3}{4}$ 级地震在内的 7 次 7 级以上强震; 后者是川青块体的东南边界断裂, 发生过举世闻名的汶川 8.0 级地震. 依据地震地质背景、地震活动性特征、深部地球物理特征, 考虑汶川 8.0 级地震对区域地震环境的作用和影响, 雷建成等(2010b)在大渡河干流及邻近地区划分出甘南川北地震带、川滇块体地震带和四川盆地地震带, 统计确定了各地震带的地震活动性参数, 并在上述 3 个地震带中划分出 120 个不同震级上限的潜在震源区.

3.2 单元的地震危险性

1) 设计地震危险性. 从 1966—2009 年, 在大渡河干流梯级电站的规划、可行性研究、

设计的不同阶段和不同时期，基于对大渡河流域及周边地震环境的不同资料程度和认识水平，中国地震局的多个直属研究所以及四川省地震局等多家单位曾经对其中 20 个梯级电站进行过地震烈度鉴定或地震安全性评价，这些评价结果均经过中国地震局或四川省地震局审定批准，作为电站的抗震设防参数(表 1)。对于暂未开展地震安全性评价的下尔呷和丹巴电站的抗震设防参数，则根据本文划分地震带、潜在震源区、地震活动性参数、地震动衰减关系，采用单场点地震危险性分析方法计算得出。

根据大渡河干流梯级电站的工程规模和等级，按照地震安全性评价结果，我们取 100 年超越概率 0.02 的地震动参数值(表 1)作为各个大坝的抗震设防参数，其相应的设计地震危险性均为 $P(E_{\text{dsg}})=2.00\times10^{-4}$ (表 1)。

2) 自身地震危险性。以表 1 中 100 年超越概率 0.02 的地震动参数值作为各个大坝的抗震设防参数，基于汶川地震后大渡河流域及邻区的地震地质环境、地震活动性特征和地震活动性参数(雷建成等，2010b)，采用单场点地震危险性分析方法，我们计算了各梯级

表 1 大渡河干流梯级电站有关参数^①
Table 1 Parameters for the cascade hydropower stations in trunk stream of Dadu river

序号	梯级电站	坝高 /m	库容 /亿 m ³	设防参数 /cm·s ⁻²	调洪系数 K	设计地震 危险性 /10 ⁻⁴	自身地震 危险性 /10 ⁻⁴	附加地震 危险性 /10 ⁻⁴	联合地震 危险性 /10 ⁻⁴
1	下尔呷	223	28.0	199		2.00	2.000	0.0	2.000
2	巴拉	142	1.277	220	0.023	2.00	2.600	2.000	4.599
3	达维	107	1.4	223	0.548	2.00	2.680	3.489	6.168
4	卜寺沟	133	2.26	194	0.807	2.00	3.190	3.690	6.879
5	双江口	314	29.0	205	6.416	2.00	1.250	1.720	2.970
6	金川	122	6.09	253	0.105	2.00	0.785	1.588	2.373
7	巴底	170	11.66	300	0.957	2.00	0.0	1.130	1.130
8	丹巴	162	6.84	197*	0.293	2.00	2.000	0.0	2.000
9	猴子岩	223.5	6.62	297	0.484	2.00	1.730	2.002	3.732
10	长河坝	238	9.85	387	0.744	2.00	2.020	2.617	4.636
11	黄金坪	61	1.54	482	0.078	2.00	1.970	2.793	4.762
12	泸定	74	3.3	522	1.071	2.00	2.290	1.200	3.490
13	硬梁包	39	0.21	581	0.032	2.00	2.830	3.276	6.105
14	大岗山	210	7.42	549	17.667	2.00	4.040	1.390	5.429
15	龙头石	58.5	1.15	479	0.077	2.00	2.680	4.566	7.245
16	老鹰岩	50	1.43	382	0.622	2.00	3.050	4.969	8.018
17	瀑布沟	186	53.9	200**	18.846	2.00	1.500	1.540	3.040
18	深溪沟	49.5	0.32	239	0.003	2.00	1.290	2.125	3.415
19	枕头坝	86	0.469	221	0.733	2.00	3.100	2.065	5.164
20	沙坪	45	0.21	207	0.224	2.00	6.700	4.360	11.057
21	龚嘴	85	3.1	200**	7.381	2.00	6.610	2.220	8.829
22	铜街子	82	2.02	200**	0.326	2.00	4.830	8.998	13.824

* 未进行地震安全性评价，按本文方案，采用单场点地震危险性分析方法计算得出；** 地震基本烈度Ⅷ度，提高 1 度设防，取 200 cm/s²；调洪系数为本文计算得出

① 资料引自：《四川省大渡河干流水电规划调整报告》(国家电力公司成都勘测设计研究院，2004)；有关水电站地震安全性评价报告；四川水电统计资料(www.sp.com.cn/zgsd/tjzl/sichuan.htm)；国电大渡河流域水电开发有限公司(www.spddr.com)；中国水电顾问集团成都勘测设计研究院(www.chidi.com.cn)；中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院(www.ghidri.com.cn)。

电站超过其设防参数的超越概率，并用式(5)计算得出了各梯级电站的自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$ (表 1). 计算表明，在当前的地震环境下，各个大坝的地震危险性与原设计水平有一定的差别，龚嘴、沙坪、铜街子、大岗山、枕头坝、老鹰岩等电站的自身地震危险性大大超过了设计地震危险性，而巴底电站仍有较大的安全裕度。

3) 附加地震危险性. 根据电站的调洪系数(表 1)，在计算双江口、泸定、大岗山、瀑布沟、龚嘴等 5 个电站的附加地震危险性时，将不考虑其上游紧邻电站的附加影响. 基于汶川地震后大渡河流域及邻区的地震地质环境、地震活动性特征和地震活动性参数，分别采用单场点地震危险性分析方法和双场点地震危险性分析方法(雷建成等，2010a)，考虑了梯级电站的库容因素，由式(12)得出了各梯级电站遭受的附加地震危险性 $P(E_{\text{add}})$ (表 1).

4) 联合地震危险性. 根据各大坝的自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$ 、附加地震危险性 $P(E_{\text{add}})$ ，采用式(10)，计算得到了各个大坝的联合地震危险性 $P(E)$ (表 1).

图 2 直观地表示了各个大坝的设计地震危险性 $P(E_{\text{dsg}})$ 、自身地震危险性 $P(E_{\text{self}})$ 、附加地震危险性 $P(E_{\text{add}})$ 和联合地震危险性 $P(E)$. 从中可见，除下尔呷、巴底、丹巴 3 个梯级电站外，其它 19 个电站的联合地震危险性均高于其设计地震危险性，危险程度最高的几个电站依次是：铜街子、沙坪、龚嘴、老鹰岩、龙头石、卜寺沟、达维、硬梁包等。

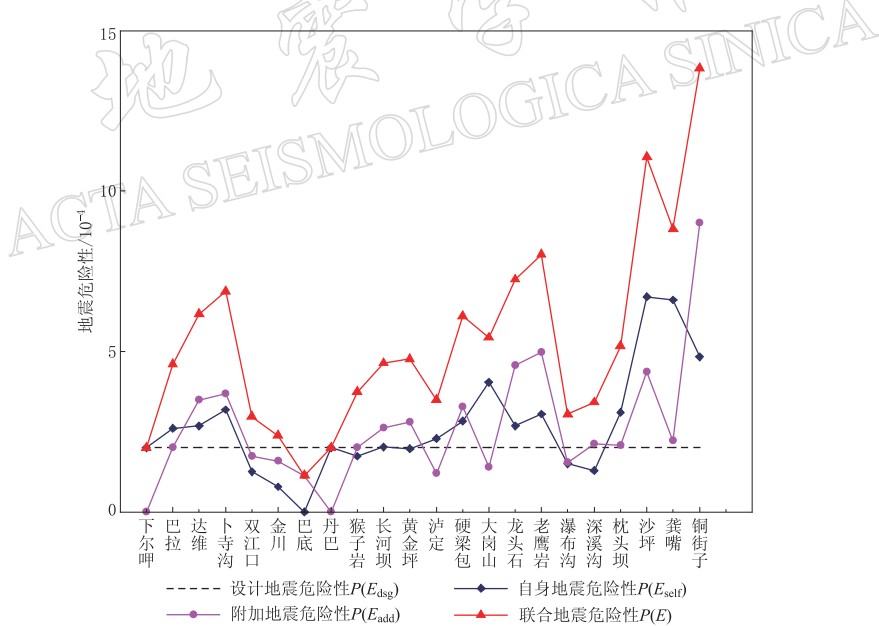


图 2 大渡河干流梯级电站系统各大坝单元的地震危险性

Fig. 2 The seismic hazard of each cascade hydropower station of Dadu river

3.3 大渡河干流梯级电站系统的地震危险性

按照串联系统可靠性评价原理，分别单独使用各大坝单元的设计地震危险性 $P_i(E_{\text{dsg}})$ 、自身地震危险性 $P_i(E_{\text{self}})$ 和联合地震危险性 $P_i(E)$ ，采用式(2)，分别计算了大渡河干流梯级电站系统地震危险性，结果见表 2.

该计算结果表明，当大渡河干流各个大坝单元采用原有地震安全性评价结果(表 1)作为设防参数时，其设计的理论目标为：对单个大坝单元而言，遭遇超标地震作用的概率均为 2.00×10^{-4} ，相应的地震重现期为 5000 年. 但对所有 22 个大坝组成的串联系统而言，

即使不考虑大坝单元的附加影响，该系统的地震危险性也会大大提高，在 228 年内，系统内至少 1 个以上的大坝单元会遭遇到超标地震作用。

表 2 大渡河干流梯级电站系统的地震危险性结果对比

Table 2 Seismic hazards of the cascade hydropower station system in trunk stream of Dadu river

大坝单元的地震危险性	系统的地震危险性/ 10^{-3}	系统的地震重现期/a
设计地震危险性	4.391	228
自身地震危险性	5.898	170
联合地震危险性	11.622	86

上述结果还表明，汶川 8.0 级地震发生后，大渡河流域及邻区的地震环境发生了重大变化。在当前的地震环境下，仍然采用原有地震安全性评价结果(表 1)作为大坝的抗震设防参数，对所有 22 个大坝组成的串联系统而言，即使不考虑大坝单元的附加影响，系统的地震危险性也会高于原定设防目标 34%。在 170 年内，系统内至少 1 个以上的电站会遭遇到超标地震作用。

上述结果还说明，在现今地震环境下，考虑上游大坝的附加影响后，系统总体的危险性还将大大提高，相对于 170 年的重现期，系统总体的危险性还将提高 98%。在 86 年内，系统内至少 1 个以上的电站会遭遇到超标地震作用。由此可见，上游大坝对相邻下游大坝的附加影响，是梯级电站系统地震危险性的一个重要组成部分。

4 提高梯级电站系统地震安全性的途径

分析串联系统的特性(公式(2))可以发现：① 由于 $R_i < 1$ ，系统总体的可靠度低于每个单元的可靠度；② 由于系统可靠度是各单元可靠度的连乘，系统可靠度受单元数量 n 的影响极大，且随着 n 的增加而降低；③ 在组成串联系统的多个单元中，可靠度越低(即 R_i 越小)的单元，对系统可靠度 R 的影响越大。

相应地，提高梯级电站系统地震安全性的途径主要有 3 种：

1) 减少梯级电站系统大坝的数量，但可行性低。由于水电资源具有长期成本低、资源可再生、不会污染环境等优势，面对石油、煤炭等不可再生资源的日益短缺和价格飞涨，大力发展水电建设成为了我国的基本能源战略，对水利资源的流域式、梯级开发是一个重要的手段。对流域水电开发而言，规划设计尽量多的梯级电站，有利于最大限度地利用水利资源，充分发挥资源 and 经济效益；而采用减少梯级电站数量来提高系统安全性的做法，其现实可能性较小。

2) 提高每个电站的可靠度，但不经济，有的电站技术上也不可行。对一个流域梯级电站系统来说，往往由多个梯级电站组成(如大渡河干流梯级电站共有 22 级)。这些梯级电站分布在一个较长的空间内，每个梯级电站所处的地震环境不同，其重要性以及失效后的危害性也不同。全面提高各个电站的安全性，意味着建设成本的全面提高，经济效益不高，有时也不必要。对处于特殊地震环境、施工环境的个别大坝(如大岗山电站等)，在现今设计、施工的技术条件下，已经达到了其允许的极限，再次提高其设计地震动参数，已经没有技术和经济空间。

3) 提高薄弱环节的可靠度，最具技术、经济可行性。由于串联系统的安全性具有“短

板效应”，薄弱环节对系统安全性的影响较大. 对于处于关键空间环节、原来设计地震动参数不高、易于设计和施工的较低等级和规模的薄弱环节电站，提高其可靠度，可以显著地提高系统安全性，具有良好的技术、经济可行性. 这是当前最为现实可行的途径，也是本文研究的重点.

4.1 薄弱环节的确定

从上面的分析得知，单元 S_c 的联合地震危险性 $P_c(E)$ 由自身地震危险性和附加地震危险性两部分构成，其数值可采用式(10)综合得出，它代表了单元的可靠度. 对于大渡河干流梯级电站系统(表 1，图 2)而言，危险程度最高的几个电站依次是：铜街子、沙坪、龚嘴、老鹰岩、龙头石、卜寺沟、达维、硬梁包等.

4.2 提高最为薄弱的几个电站设防参数的作用

沙坪—龚嘴—铜街子河段电站的危险程度最高. 从表 1 可见，这些电站的坝高较低，设防参数也较低，提高其设防参数具有较为简便、经济的技术和经济空间. 我们分别将沙坪、龚嘴、铜街子电站设计地震动参数在原设计参数的基础上同时提高 5%，10% 和 15%，重新计算其联合地震危险性，结果见表 3 和图 3. 从中可见，提高电站的设防参数，将显著

表 3 提高沙坪、龚嘴、铜街子电站设防参数后的联合地震危险性
Table 3 United seismic hazards by raising the design seismic parameters of Shaping, Gongzui and Tongjiezi hydropower stations

电站	原值 / 10^{-4}	提高 5%		提高 10%		提高 15%	
		现值/ 10^{-4}	降低幅度	现值/ 10^{-4}	降低幅度	现值/ 10^{-4}	降低幅度
沙坪	11.057	10.337	7%	9.207	17%	7.81	29%
龚嘴	8.829	8.059	9%	6.699	24%	5.06	43%
铜街子	13.824	12.315	11%	9.677	30%	6.68	52%

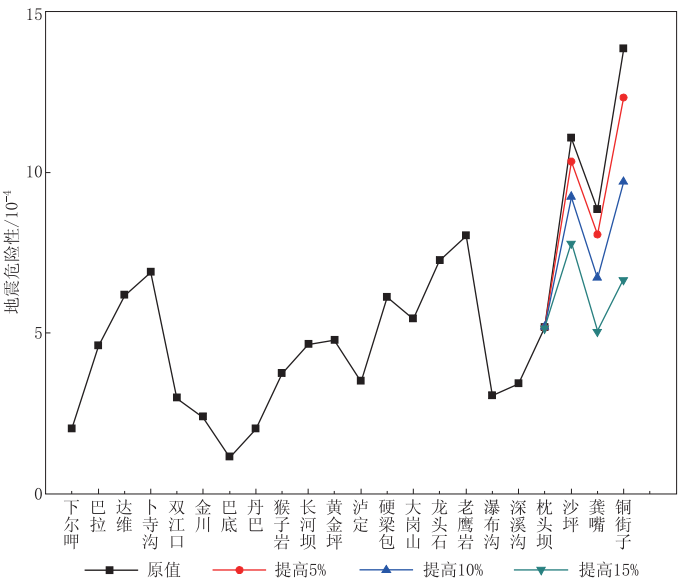


图 3 提高沙坪、龚嘴、铜街子电站设防参数对联合地震危险性的影响
Fig. 3 United seismic hazards by raising the design seismic parameters of Shaping, Gongzui and Tongjiezi hydropower stations

降低其联合地震危险性.

将大渡河干流梯级电站作为串联系统考虑,在同时提高沙坪、龚嘴、铜街子电站设防参数 5%,10%和 15%情况下,依据相关电站联合地震危险性的变化,采用式(5),我们分别计算了系统的危险性(表 4).结果表明,在 22 个梯级电站中,仅仅在一定幅度上提高其中 3 个最薄弱梯级电站的抗震设防参数,对整个体系的地震安全性就有较为明显的改善.

表 4 提高 3 个最薄弱电站设防参数对系统危险性的影响

Table 4 Influence on system hazard by raising the design seismic parameters of the three weakest hydropower stations

系统危险性	原值	提高 5%后	提高 10%后	提高 15%后
可靠度	0.988378	0.988674	0.989182	0.989780
重现期/a	86	88	92	98
危险性/ 10^{-2}	1.162	1.133	1.082	1.022
危险性降低幅度	—	2%	7%	12%

4.3 提高较为薄弱的几个电站设防参数的作用

硬梁包—大岗山—龙头石—老鹰岩河段电站的危险程度虽然小于沙坪—龚嘴—铜街子河段电站,但也位居前列,是较薄弱的几个梯级电站.值得说明的是,该河段的大岗山电站是大渡河干流上最高的双曲拱坝,其设计地震动参数为 549 cm/s^2 ,已达到当今同类大坝的世界之最,其设计和施工的技术难度巨大,额外提高其抗震设防参数面临巨大困难,而提升其上、下游的硬梁包、龙头石、老鹰岩电站的技术和施工条件相对比较容易.在大渡河干流梯级电站系统中,我们保持其它电站的设计地震动参数不变,仅提高硬梁包、龙头石、老鹰岩电站的设计地震动参数(分别同时提高 5%,10%和 15%),重新计算其对有关电站的地震安全性和系统地震安全性的影响(表 5、表 6 和图 4).

表 5 提高硬梁包、龙头石和老鹰岩电站设防参数后的联合地震危险性

Table 5 United seismic hazards by raising the design seismic parameters of Yingliangbao, Longtoushi and Laoyingyan hydropower stations

电站	原值 / 10^{-4}	提高 5%		提高 10%		提高 15%	
		现值/ 10^{-4}	降低幅度	现值/ 10^{-4}	降低幅度	现值/ 10^{-4}	降低幅度
硬梁包	6.105	5.795	5%	5.455	11%	5.125	16%
大岗山	5.429	5.329	2%	5.240	3%	5.150	5%
龙头石	7.245	6.932	4%	6.586	9%	6.254	14%
老鹰岩	8.018	7.198	10%	6.329	21%	5.579	30%

表 6 提高 3 个较薄弱电站设防参数对系统危险性的影响

Table 6 Influence on system hazard by raising the design seismic parameters of the three relative weaker hydropower stations

系统危险性	原值	提高 5%后	提高 10%后	提高 15%后
可靠度	0.988378	0.988555	0.988738	0.988904
重现期/a	86	87	89	90
危险性/ 10^{-2}	1.162	1.145	1.126	1.110
危险性降低幅度	—	1%	3%	4%

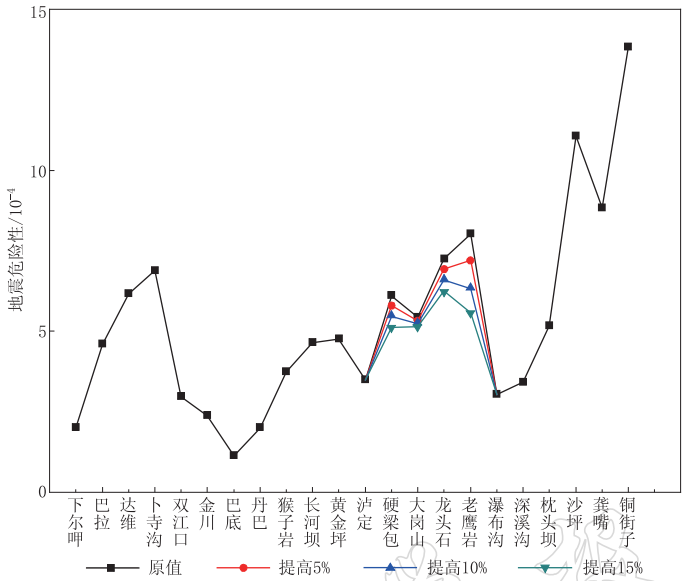


图 4 提高硬梁包、龙头石和老鹰岩电站设防参数对联合地震危险性的影响

Fig. 4 Seismic hazards by raising the design seismic parameters of Yingliangbao, Longtoushi and Laoyingyan hydropower stations

分析表明，直接提高电站的设防参数(如硬梁包、龙头石和老鹰岩电站)，将显著降低其自身的联合地震危险性，但对于其下游一级电站(如大岗山电站)联合地震危险性的影响却很微弱。在 22 个梯级电站中，提高其中 3 个较为薄弱梯级电站的抗震设防参数，对整个体系的地震安全性略有改善，改善的幅度大大低于提高 3 个最薄弱梯级电站的抗震设防参数所带来的结果。这进一步说明，提高梯级电站系统“短板”电站的设防参数，是提高体系安全性的最有效的途径。

5 讨论与结论

梯级电站系统是一个与公共安全密切相关的复杂工程系统，其地震危险性评价工作，需要涉及到地震环境、地震危险性来源分析与计算、上游大坝产生的附加危险性的确定与传递等多个复杂课题。在一定库容条件下，下游大坝单元也可以消减、承接某种数量的上游洪水，文中考虑上、下游水库库容的相互关系，引入一个调洪系数 K 来衡量、评价下游水库对上游洪水的消减能力，尚缺乏严格的理论依据和实际数据支撑。但是，定性分析可知，上游大坝的破坏失效将为相邻下游大坝的破坏失效带来一定程度的附加影响，并影响整个系统的安全性。为抛砖引玉，把定性分析向定量分析、单体研究向系统研究推进，本文对梯级电站大坝以及梯级电站系统进行了一些简化和假定，重点研究地震作用的影响以及相邻大坝的地震安全的相关性，提出梯级电站系统地震危险性评价的新方法，作为该项工作思路与方法的初步探索和实践。相信在众多同道、同仁的不懈努力下，随着研究工作的深入和资料、模型的丰富，包括本文提出的研究思路和方法在内，梯级电站系统地震危险性评价工作会不断向科学化、实用化推进，更好地为我国水电建设的规划、设计和建设服务。

总结本文研究成果，可以得到以下认识：

1) 汶川 8.0 级地震的发生,改变了大渡河流域及邻区的地震环境,龚嘴、沙坪、铜街子、大岗山、枕头坝、老鹰岩等电站现今的地震危险性均大大超过了其设计值,而巴底电站仍有较大的安全裕度。

2) 大坝单元的联合地震危险性由自身地震危险性和上游大坝的附加地震危险性两部分构成。在梯级电站系统的地震危险性评价中,上游大坝的附加地震危险性对评价结果有重大影响,必须予以考虑。

3) 提高梯级电站系统最薄弱的几个电站的设防参数,是提高系统地震安全性的最有效的途径。

在本文的研究中,作者与中国地震局地球物理研究所俞言祥研究员、刘爱文副研究员和胥广银副研究员进行过多次讨论,获益匪浅。在此表示衷心的感谢!另外还要感谢两位评审专家对本文初稿提出的宝贵意见和建议。

参 考 文 献

- 陈厚群. 1996. 高拱坝抗震安全关键技术问题[J]. 世界产品与技术, (6): 32-34.
- 陈厚群. 2005. 大坝的抗震设防水准及相应性能目标[J]. 工程抗震与加固改造, 27(增刊): 1-6.
- 陈厚群. 2008. 水工混凝土结构抗震研究进展的回顾与展望[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 6(4): 245-257.
- 陈厚群. 2009. 汶川地震后对大坝抗震安全的思考[J]. 中国工程科学, 11(6): 44-53.
- 高孟潭. 1993. 空间线性展布系统的地震危险性分析方法[J]. 地震学报, 15(3): 347-452.
- 高社生, 张玲霞. 2002. 可靠性理论与工程应用[M]. 北京: 国防工业出版社: 48-51.
- 雷建成, 高孟潭, 吴健, 亢川川. 2010a. 双场点地震危险性分析方法及其应用[J]. 地震学报, 32(3): 310-319.
- 雷建成, 高孟潭, 吕红山, 亢川川, 陈鲲. 2010b. 地震带划分方案对地震活动性参数的影响[J]. 地震学报, 32(4): 457-465.
- 林皋. 2004. 混凝土大坝抗震技术的发展现状与展望(I)[J]. 水科学与工程, (6): 1-3.
- 林皋. 2005. 混凝土大坝抗震技术的发展现状与展望(II)[J]. 水科学与工程, (1): 1-3.
- 潘家铮, 何璟(主编). 2000. 中国大坝 50 年[M]. 北京: 中国水利水电出版社: 308-316.
- 汪小刚. 2004. 高坝大库震灾机理及安全寿命基础研究[J]. 中国水利, (22): 16-18.
- 张楚汉. 2004. 高坝: 水电站工程中的关键科学问题[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 26(3): 193-197.
- 张楚汉, 金峰, 潘坚文, 寇立芳. 2009. 论汶川地震后我国高坝抗震标准问题[J]. 水利水电技术, 40(8): 74-79.
- 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 2001. 水工建筑物抗震设计规范(DL5073-2000)[S]. 北京: 中国电力出版社: 2.
- Chen Houqun. 2008. Consideration of dam safety after Wenchuan earthquake in China[C]// *Proceedings of the 14th WCEE, Beijing, China*, C001.