

# 水库进水塔静动力响应分析及抗震安全评价

黄章鑫 沈振中\* 于家傲  
河海大学水利水电学院, 江苏 210098

**摘要:**我国西北地区拟建的某水库进水塔位于高地震烈度区, 高度达56m, 结构复杂。采用三维有限元法, 建立了进水塔及其地基的有限元模型, 运用振型分解反应谱法计算了应力和变形反应, 并评价其抗震安全性。结果表明, 进水塔静动力应力变形特性符合一般规律; 各工况下, 结构压应力远小于混凝土抗压强度, 拉应力除地震工况出现小范围应力集中、超过混凝土抗拉强度外, 亦满足规范要求; 结构抗滑稳定性、抗浮稳定性和基底应力均满足规范要求; 地震工况下, 塔体最大位移小于其高度的0.20‰, 不会发生整体破坏, 结构抗震安全性满足规范要求。进水塔结构设计在技术上是合理的。

**关键词:** 进水塔; 静动力响应; 有限元法; 反应谱法

## 一、引言

水库进水口位于水电站引水发电系统、供水工程等首部, 是用以控制流量、拦截污物的重要建筑物<sup>[1]</sup>。对于高地震烈度区地质条件复杂的进水口, 常需要采用有限元法进行静动力响应分析和抗震安全评价。常用的计算地震作用效应的动力分析方法是振型分解反应谱法。

振型分解反应谱法最早由美国学者于20世纪40年代提出, 通过各正交振型的分解, 把多自由度问题转变为多个单自由度问题进行求解, 在实际工程分析中被广泛应用。Alok Goyal和Anil K. Chopra<sup>[2]</sup>研究了Briones坝进水塔在Taft地震动下的动力反应, 得出了动水压力和结构-地基相互作用对塔体动力反应的影响。费康<sup>[3]</sup>利用ABAQUS有限元软件中内置的反应谱法功能, 研究了某进水塔的地震响应, 按规范分析了进水塔抗倾、抗滑稳定性, 并提出了工程设计的改进意见。陈震等<sup>[4]</sup>用反应谱法分析了长河坝进水塔的危险部位, 得到了提高抗震强度的同时降低投资的合理进水塔体型。由于进水塔具有水工建筑物设计选型的独特性, 不同进水塔间设计差异较大, 因而国内还有许多采用反应谱法对进水塔进行抗震分析的研究。

分析地震影响时, 通常以正常蓄水位工况遭遇地震, 相较于静力工况, 不仅需要增加地震作用, 还应当考虑由地震引起的动水压力。对于地震动水压力, 最早可追溯到1933年Westergaard<sup>[5]</sup>对于垂直刚性坝面动水压力的研究, 而进水塔与重力坝、拱坝等的区别在于塔身四周被水环绕, 且塔内、塔外都存在水。李峰等<sup>[6]</sup>比较了附加质量施加时各向同性和只施加地震方向的区别, 结果显示附加质量的方向对自振频率影响较大, 但对动力响应影响较小。黄虎等<sup>[7]</sup>考虑了进水塔塔体与水体的相互作用, 发现水体对塔体存在附加质量无法模拟的惯性耦合作用。党康宁等<sup>[8]</sup>将进水塔简化为中间空心且有水的矩形悬臂梁结构, 推导出了进水塔动水压力计算的解析式, 并与规范公式比较, 结果显示规范公式偏安全。

我国西部地区拟建的某供水工程位于高地震烈度区, 根据地形地质条件, 其进水口采用背靠岸坡的岸塔式结构, 同时在塔体周围与山体之间回填混凝土以提高稳定性。本文采用设计规范反应谱, 以附加质量法模拟地震动水压力, 对拟建的某进水塔进行静动力应力、变形及稳定性分析, 评价其安全性。

## 二、计算模型与方法

### (一) 工程概况

该供水工程位于我国西部某市, 主要由水库、引水隧洞、引水管线、调蓄水池等建筑物组成。工程规模为Ⅲ等中型, 主要建筑物三级, 次要建筑物四级, 电站建筑物五级, 临时建筑物五级。根据进水口建筑物结构安全级别, 进水塔安全级别为Ⅲ级。进水口采用岸塔式结构, 平底宽顶堰, 堰面以上高度52m, 沿水流方向总长度63.85m, 由引渠

\*通讯作者: 沈振中, 1968年3月, 男, 汉族, 江苏吴江人, 就职于河海大学水利水电学院, 教授, 博士。研究方向: 水工结构安全评价与水工程安全管理。

段、闸室段、阀室段组成，布置消力池，后接无压流隧洞。进水塔采用现浇C25钢筋混凝土，抗渗等级采用W6，塔体周围采用C20混凝土进行回填；基岩呈条形出露，岩坎高于路面2~4m，基岩为混合岩化片岩，以中硬岩为主。

(二) 有限元模型

按照进水塔设计布置和尺寸，忽略楼梯、胸墙、测压管和引水管道等细部结构，建立三维有限元模型。考虑进水塔塔前和塔后地基分别延伸36.00m和39.65m，塔基面以下地基取110.00m、垂直进流方向两侧各延伸30.00m。由于该工程在塔基、塔身与混凝土回填体、混凝土回填体与围岩之间布置了比较密集的锚杆，因此建立计算模型时，认为其为固结。

全部采用八结点线性六面体单元进行网格划分，共有节点168159个，单元154611个，其中塔体以及周围回填混凝土有48625个单元，56387个节点。有限元模型示意图见图1，模型材料参数见表1。

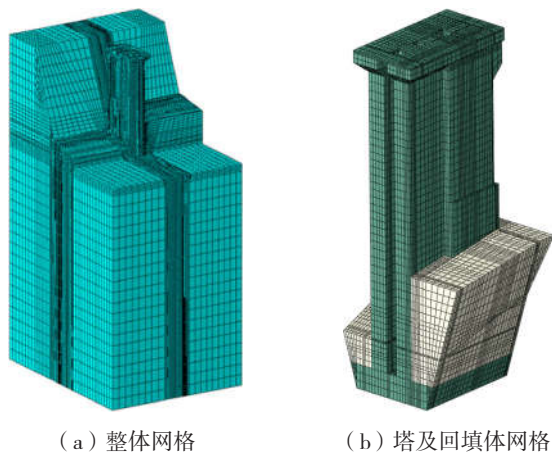


图1 进水塔三维有限元模型示意图

表1 混凝土与地基山体材料参数表

项目	C20回填体	C25塔体	基岩	山体
重度 $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	24.0	24.0	27.2	26.8
弹性模量E (GPa)	25.5	28.0	6.67	3.45
泊松比	0.167	0.167	0.20	0.26
轴心抗压设计值 $f_c$ (MPa)	9.6	11.9	-	-
轴心抗拉设计值 $f_t$ (MPa)	1.1	1.27	-	-

(三) 计算方法

《水工建筑物抗震设计规范》<sup>[9]</sup>规定对设计烈度大于等于八度或者塔高大于40m的钢筋混凝土结构的进水塔，需要采用动力法计算地震作用效应，且宜采用振型分解反应谱法。规范设计反应谱如图2所示。

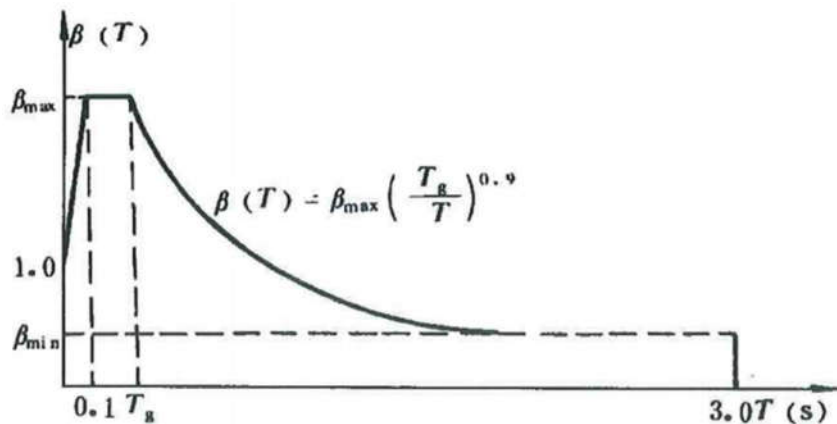


图2 规范设计反应谱

进水塔设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{max}$ 取2.25, 场地类型为Ⅲ类, 场地设计特征周期 $T_g$ 取0.40s。

叠加各振型最大反应时, 需要考虑其发生的时间不同, 因而不能简单相加。目前普遍采用平方和方根法 (SRSS) 或完全二次型方根法 (CQC) 来估计总的结构最大反应。本文进水塔低阶振型频率差大于10%, 因而采用 SRSS法, 即:

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n S_i^2} \tag{1}$$

式中, S ——为结构总的最大地震反应;

$S_i$  ——为第*i*阶振型的地震作用效应。

根据《水工建筑物抗震设计标准》(SL 203-97)<sup>[9]</sup>, 采用动力法计算进水塔地震作用效应时, 塔内、外动水压力可以分别作用于塔体内、外表面的附加质量来考虑, 按照下式计算:

$$m_w(h) = f_m(h) \rho_w \eta_w A \left( \frac{a}{2H_0} \right)^{0.2} \tag{2}$$

式中,  $m_w(h)$  ——为水深*h*处单位高度动水压力附加质量代表值;

$f_m(h)$  ——为附加质量分布系数, 对塔内动水压力取0.72, 对塔外动水压力按规范取值;

$\eta_w$  ——为形状系数, 塔内取为1.0, 矩形塔外按规范取值;

A ——为塔体单位高度平均截面与水体交线包络面积;

a ——为塔体垂直地震作用方向的迎水面最大宽度沿高度的平均值;

b ——为平行于地震作用方向的塔宽。

实际地震动与软件输入到模型的地震不同, 其方向是任意的, 所以计算结果中应力、位移可能是正值, 也有可能是负值。为了得到最不利情况, 在与静力工况计算结果组合叠加时, 分别对静动力计算结果相加减。同时在叠加时, 根据规范对地震作用效应乘以0.35的折减系数。

### 三、应力和变形分析

根据规范<sup>[9]</sup>要求, 各计算工况及相应荷载组合如表2所示。其中, 正常蓄水位为1432.00m, 设计洪水位与正常蓄水位相同; 校核洪水位为1433.07m; 完建工况库内无水; 考虑正常蓄水位作为检修期水位。

表2 计算工况说明表

计算工况	荷载名称						
	自重	静水压力	扬压力	浪压力	风压力	动水压力	地震作用
正常蓄水位工况	√	√	√	√	√	-	-
检修工况	√	√	√	√	√	-	-
完建工况	√	-	-	-	√	-	-
校核洪水位工况	√	√	√	√	√	-	-
地震工况	√	√	√	√	√	√	√

这里, 应力以拉为正, 位移以坐标轴正向为正。

#### (一) 应力

表3 各静力工况下进水塔各部位应力特征值 (MPa)

工况	底板		顶板		胸墙		回填体	
	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$
完建工况	0.20	-1.74	0.19	-0.34	0.23	-1.23	0.94	-2.21
检修工况	1.23	-1.38	0.17	-0.32	0.92	-1.51	0.95	-1.13
正常蓄水位工况	1.36	-1.30	0.17	-0.33	1.21	-1.52	0.99	-1.13
校核洪水位工况	1.40	-1.32	-0.17	-0.33	1.24	-1.54	1.41	-1.49

经有限元法计算和整理，静力作用下进水塔的应力特征值如表3所示，正常蓄水位工况第一主应力分布云图如图3所示。由图3可见，正常蓄水位工况下，拉应力主要分布于上游侧边墩与底板连接处及胸墙底端，存在应力集中现象，最大值为1.36MPa，大部分拉应力区应力值小于1.18MPa。

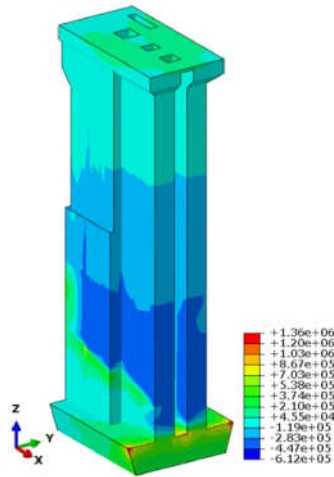


图3 正常蓄水位工况第一主应力分布云图 ( Pa )

由表3可见，在完建工况和检修工况下，进水塔应力均不超过C25混凝土的强度，符合规范要求；在正常蓄水位和校核洪水位情况下，进水塔底板和塔体与周围混凝土回填体接触部位主拉应力会达到1.40MPa左右，超过C25混凝土抗拉强度，但属于应力集中，范围很小，且塔体布置有钢筋，即使因应力集中而出现细微裂缝，也会使拉应力得以释放，不会影响塔体结构安全，故可认为其应力满足要求，但要注意控制混凝土保护层厚度，以免水体侵蚀钢筋。正常蓄水位和校核洪水位工况下，压应力较大值主要集中在塔体与混凝土回填体连接处，和中胸墙和楼梯井底板与边墩连接处。

该进水塔结构前10阶自振频率如表4所示，地震工况下进水塔的应力特征值如表5所示，其中，静力+0.35\*动力情况下的进水塔应力分布云图如图4所示。

表4 进水塔结构前10阶自振频率

阶次	空库自振频率 (Hz)	满库自振频率 (Hz)	阶次	空库自振频率 (Hz)	满库自振频率 (Hz)
1	3.3713	2.9200	6	16.552	14.150
2	4.5999	4.2669	7	24.183	15.493
3	9.6856	8.4189	8	26.492	16.112
4	12.032	11.163	9	27.752	17.022
5	14.490	12.252	10	28.442	17.236

表5 地震工况下进水塔应力汇总表 ( MPa )

模型部位	应力项	工况	
		静力+0.35*动力	静力-0.35*动力
外墙	$\sigma_{max}$	4.96	1.34
	$\sigma_{min}$	-1.66	-6.18
底板	$\sigma_{max}$	1.52	0.86
	$\sigma_{min}$	-1.13	-1.49
顶板	$\sigma_{max}$	0.35	0.13
	$\sigma_{min}$	-0.26	-0.36
胸墙	$\sigma_{max}$	1.38	1.05
	$\sigma_{min}$	-1.42	-2.87

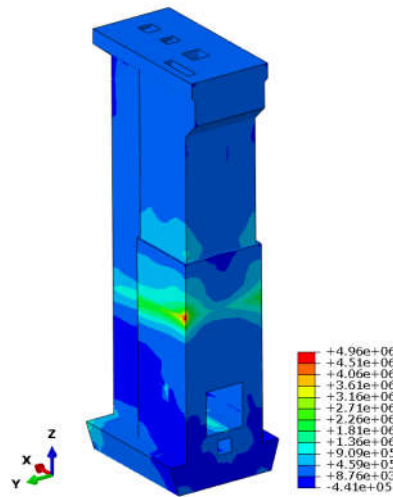


图4 静力+0.35\*动力第一主应力分布云图 ( Pa )

比较表5中两种情况下的应力可知，静力+0.35\*动力情况为拉应力较不利情况，而静力-0.35\*动力情况为压应力较不利情况。

在静力+0.35\*动力情况下，由图4可见：进水塔拉应力较大值出现在塔体与右岸和塔背混凝土回填体交接处，最大值为4.96MPa，应力集中明显，塔墙大部分区域拉应力小于C25混凝土的动态抗拉强度；对于进水塔底板，拉应力较大值分布于底板上游面两侧与混凝土回填体交接处以及底板上游与两侧边墩交接处，最大值为1.52MPa；对于顶板，拉应力较大值出现在拦污栅开孔附近，最大值为0.35MPa；对于胸墙，由图5-7可见：在地拉应力较大值主要出现在前胸墙底端部位，最大值为1.38MPa；对于周围回填混凝土，拉应力较大值出现在左岸回填体与基岩交接处，存在应力集中现象，最大值为2.16MPa。

在静力-0.35\*动力情况下，进水塔压应力较大值出现在进水塔底板与塔墙交接处以及塔背与混凝土回填体交接处，最大值为-6.18MPa；对于底板，压应力较大值主要集中在底板下游侧，最大值为-1.49MPa；对于顶板，压应力较大值出现在顶板与后胸墙连接处，最大值为-0.36MPa；对于胸墙，压应力较大值出现在后胸墙部位，最大值为-2.87MPa；对于周围回填混凝土，压应力较大值出现在左岸回填体与塔体交接处，最大值为-2.33MPa。

综合以上应力响应分析，拉应力除了小范围应力集中外，基本满足混凝土动态抗拉强度，压应力均小于混凝土动态抗压强度，结构整体抗震性能良好。

(二) 变形

经计算整理，各工况下进水塔的各方向位移值如表6所示，在静力+0.35\*动力情况下进水塔各向位移及合位移分布云图如图5所示。可见，静力工况下，竖向位移对合位移起主要作用，而地震工况下，水平向位移影响更大。

在静力+0.35\*动力情况下，进水塔顺水流向最大位移为3.74mm，垂直水流向最大位移为8.01mm，水平两向变形规律为高程越高，位移越大；竖直方向最大位移为-5.10mm，同一高程，中部向下变形大于四周；合位移最大值为9.85mm，进水塔整体倾向库内右岸。在静力-0.35\*动力情况下，进水塔顺水流向最大位移为-3.05mm，垂直水流向最大位移为-7.72mm，水平两向变形规律亦为高程越高，位移越大；竖直方向最大位移为-7.61mm，同一高程，四周向下变形大于中部；合位移最大值为1.12cm，整体倾向山体左岸。

各静力工况下，进水塔塔体位移未超过6mm，小于塔体高度的0.11‰，不影响正常运行；地震工况下，塔体位移小于塔体高度的0.20‰，不至于发生破坏。

表6 各工况下进水塔各方向位移值 ( mm )

工况	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	U <sub>m</sub>
完建工况	1.55	-1.23	-2.81	3.41
检修工况	-0.76	0.38	-5.75	5.77
正常蓄水位工况	-0.76	0.39	-5.77	5.79

续表:

工况	U1	U2	U3	U <sub>m</sub>
校核洪水位工况	-0.79	0.41	-5.85	5.87
静力+0.35*动力	3.74	8.01	-5.10	9.85
静力-0.35*动力	-3.05	-7.72	-7.61	11.2

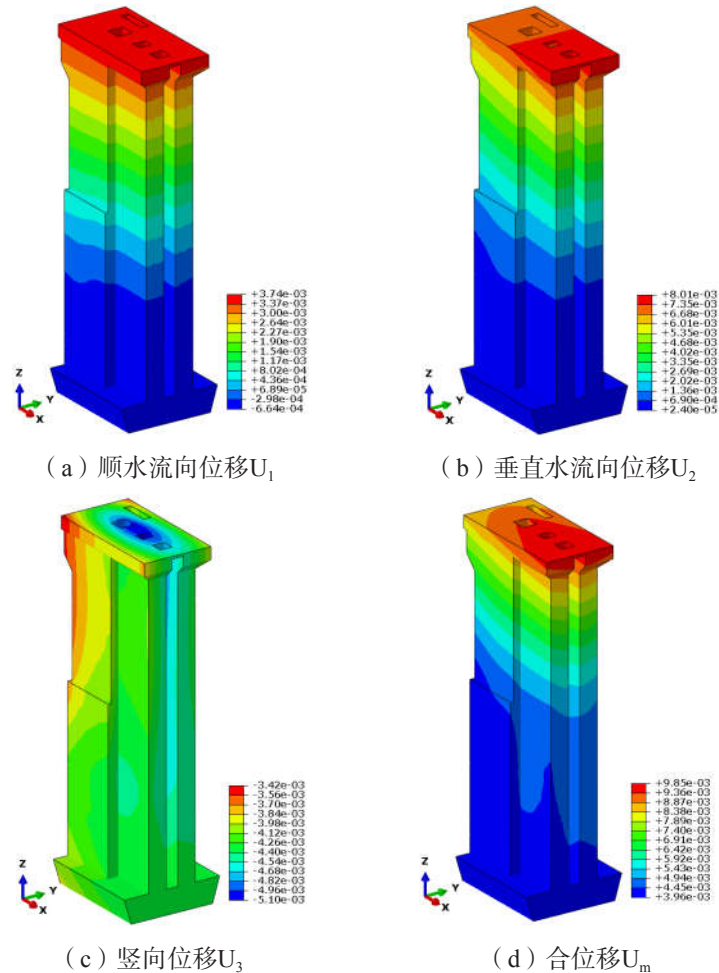


图5 地震工况 (静力+0.35\*动力) 位移场分布 (m)

#### 四、稳定性分析

依据《水利水电工程进水口设计规范》<sup>[10]</sup>, 进水塔抗滑稳定安全系数采用抗剪断强度公式计算, 同时需验算进水塔抗浮稳定性和基底应力。进水塔建基面的抗剪断摩擦系数取1.10, 凝聚力取900kPa。

有限元法计算结果显示, 在各种工况下进水塔建基面的垂直正应力均为压应力, 合力作用线通过建基面的截面核心, 不存在倾覆问题。

表7 进水塔结构抗滑稳定计算表

计算工况	$\Sigma P/10^3\text{kN}$	$\Sigma W/10^3\text{kN}$	K'	允许值
正常蓄水位工况	118.0	128.9	3.16	3
检修工况	118.0	128.9	3.16	2.5
校核洪水位工况	122.4	126.2	2.99	2.5
正常蓄水位+地震	129.9	124.9	2.84	2.3

经计算, 各静力、动力工况下进水塔结构的抗滑、抗浮稳定安全系数如表7、表8所示, 基底应力结果如表9所

示,其中,表内基底应力以压为正。可见,在各种计算工况下,进水塔的抗滑、抗浮与抗倾覆稳定性均可满足规范要求,基底应力小于地基承载力,基底应力不均匀系数满足规范要求。

表8 进水塔结构抗浮稳定计算表

计算工况	$\Sigma U/10^3\text{kN}$	$\Sigma V/10^3\text{kN}$	Kf	允许值
正常蓄水位工况	121.0	187.7	1.55	1.1
检修工况	121.0	187.7	1.55	1.1
校核洪水位工况	123.7	187.7	1.51	1.1
正常蓄水位+地震	121.0	183.6	1.52	1.1

表9 进水塔基底应力统计表

计算工况	完建工况	正常蓄水位工况	检修工况	校核洪水位工况	正常蓄水位+0.35*地震	正常蓄水位-0.35*地震
$\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$	0.910	0.952	0.950	0.969	0.813	1.001
$\sigma_{\text{min}}/\text{MPa}$	0.209	0.186	0.188	0.173	0.807	0.273
$\sigma_{\text{max}}/\sigma_{\text{min}}$	4.35	5.12	5.11	5.60	1.01	3.67

## 五、结束语

采用三维有限元法,计算分析了进水塔的静力响应,以附加质量法模拟了地震动水压力,得到了结构的自振特性,运用振型分解反应谱法复核了进水塔动力响应,评价了进水塔的抗震安全性。

各静力工况下,塔体位移均未超过6mm,小于塔体高度的0.11‰,不会影响正常使用;结构应力不超过混凝土强度,仅在进水塔底板和塔体与周围混凝土回填体接触的极小部位,存在应力集中的主拉应力超过混凝土轴心抗拉设计值的10%左右;各项稳定性均满足规范要求。

满库时进水塔的自振频率较空库时稍小。地震工况下,进水塔位移小于塔体高度的0.20‰,会发生破坏;结构应力不超过混凝土的动态强度,仅在塔体与右岸和塔背混凝土回填体连接处因应力集中现象最大拉应力值达4.96MPa,范围极小;结构整体稳定性满足规范要求。

该进水塔的静动力响应符合一般规律,抗震安全性满足规范要求。结构设计在技术上是合理的。

## 参考文献:

- [1]刘启钊,胡明.水电站[M].北京:中国水利水电出版社,2010,113-115.
- [2]Alok Goyal,Anil K. Chopra. Hydrodynamic and Foundation Interaction Effects in Dynamics of Intake Towers: Frequency Response Functions[J]. Journal of Structural Engineering, 1989,115(6).
- [3]费康.ABAQUS软件在高进水塔动力分析中的应用[J].水利与建筑工程学报,2008,6(004):10-12,19.
- [4]陈震,徐远杰,楚锡华,等.强震区高进水塔抗震动力分析及体型优化设计[J].武汉大学学报(工学版),2010,43(02):218-221+226.
- [5]Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes[J]. Trans Asce, 1933,98(2):418-432.
- [6]李锋,闫喜,王茜.采用ANSYS计算进水塔地震动水附加质量的方法研究[J].西北水电,2015(05):39-41.
- [7]黄虎,李昇,张建伟.基于流固耦合的高耸进水塔动水压力分布研究[J].水力发电,2012,38(06):30-33.
- [8]党康宁,刘云贺,王媛,等.水电站进水塔动水压力研究和探讨[J].水利水电技术,2017,48(04):72-78.
- [9]中国水利水电科学研究院.SL203-97水工建筑物抗震设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [10]周述达,谢红兵,牟春来,等. SL285-2020.水利水电工程进水口设计规范[S].北京:中国水利水电出版社,2020.