

# 浅谈抗震阻尼器在大岗山水电工程中的应用

曾宪<sup>1</sup>, 吴楠<sup>2</sup>

(1. 国电大渡河流域水电开发有限公司, 四川成都 610041;

2. 国电大渡河大岗山水电开发有限公司, 四川石棉 625409)

**摘要:** 目前, 水水电工程抗震阻尼器尚无成功应用的先例, 大岗山水电站结合自身工程特点开展了探索性的试验研究, 设计并开发了短行程、低速度、大吨位的新型拱坝抗震阻尼器, 并且通过自动监测系统实现对阻尼器运行状态的监控, 为研究水电站地震工况下阻尼器抗震效果创造了条件。

**关键词:** 阻尼器; 特点; 设计; 性能检测

中图分类号: U211.9; TV741; O434.19

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2016)02-0115-04

## 1 概况

粘滞阻尼器已经在建筑、桥梁、铁路、工业、军事等领域广泛应用。发挥着抗风、抗震、增加阻尼比、减振等保护结构本身或其内部附属结构、设备的功能。但是在国内外水电工程建设中尚无应用的实例。大岗山水电站坝址工程场地地震基本烈度为Ⅷ度, 混凝土双曲拱坝设计地震加速度代表值的概率水准取基准期 100 年内超越概率 P100 为 0.02, 相应基岩水平峰值加速度为 557.5 cm/s<sup>2</sup>, 在国内外已建和在建的 200 m 级高拱坝中, 大岗山设计地震动参数最高。

## 2 阻尼器的发展

阻尼器是以内部填充物提供运动的阻力, 耗减运动能量的装置, 达到减振消能的效果。阻尼器的性能主要取决于内部填充物的性能和密封装置的可靠性。阻尼器最初利用硅胶作为中间介质, 但是硅胶受温度影响较大, 阻尼器改进为液体介质。液压粘滞阻尼器经历三代发展: 第一代阻尼器是在一个密封容器内充满硅油, 由一活塞杆带动一组平板运动, 与另一组平板产生剪切运动, 起到阻尼作用, 这种阻尼器效率低, 受温度影响也比较大。第二代阻尼器采用圆管缸体形式, 一侧设置拉杆, 连接布有小孔活塞, 充满硅油, 当活塞运动时硅油从高压侧有控制的向低压侧流动, 通过调节油压室起到平衡作用。第三代阻尼器是在第二代单杆的基础上改为双杆, 改进密封技术, 取消内设油室, 进一步提高了阻尼器的稳定性和可

靠性、阻尼器体积也较第二代大大减小。

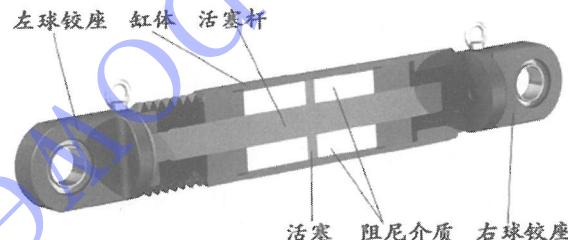


图 1 阻尼器结构形式

## 3 大坝抗震阻尼器的特点

目前阻尼器在大型建筑、桥梁、铁路、工业领域都有广泛应用, 特别是在桥梁、建筑领域已经制定了阻尼器的技术规范, 但在水电领域的应用目前还是一片空白。大岗山水电站大坝抗震阻尼器与这些工程相比是有差异的, 大坝主要抵抗地震荷载, 其特点是吨位大、行程短、速度低; 建筑主要承受地震和风荷载, 桥梁工程主要是承受过往车辆和风荷载, 因此阻尼器行程较长; 核电主要受运行过程振动荷载, 对阻尼器的要求有限位闭锁装置, 敏感性高, 行程短、频率高。基于荷载与特点的不同, 阻尼器的性能要求也不一样。

## 4 大岗山水电站抗震阻尼器的设计

### 4.1 拱坝抗震设计

结合工程建设条件和国内大坝抗震大岗山拱坝抗震设计主要技术措施如下:

(1) 大坝采用双曲拱坝体型和拱端嵌深方案;

(2) 采用大坝适当加大中心角的方式, 增加拱的作用以承担大部分地震力。大坝中心角最终确定为: 顶拱中心角 92.40 度; 最大中心角 93.54

度(高程 1 090 m);

(3)采用坝体只设深孔的泄洪方式,增加拱坝上部结构的整体性;

(4)拱坝上下游边坡采用混凝土进行回填贴角处理,增强整体性;

(5)大坝坝体混凝土强度等混凝土指标根据受力状况采取分区方案;

(6)大坝坝体上下游面配置梁向抗震钢筋,以限制地震裂缝的开度;

(7)大坝坝顶横缝部位设置抗震阻尼器;

(8)两岸拱肩抗力体布置预应力锚索,增强两岸坝肩的动力稳定性;

(9)左右岸均布置抗力体排水洞,降低岩体内的渗透压力;

(10)大坝上游面坝前基坑 950 m 高程以下回填天然粉砂,增强坝踵部位基岩裂隙自愈作用,同时有利于改善坝体下部温度场及温度应力分布。

#### 4.2 拱坝抗震阻尼器的布置

大岗山拱坝基频约为 1.7 Hz。多种非线性有限元分析表明,考虑地基辐射阻尼,设计地震作用下,大坝横缝最大开度约 12 mm;顺河向动位移最大值约 20 cm;大坝最大拉应力约为 3~5 MPa,出现在中高高程下游面坝体中部梁向;大坝最大压应力约为 15~17 MPa,出现在低高程下游坝趾附近。考虑无质量截断地基,坝体横缝,坝体非线性损伤断裂,在设计地震条件下,计算得到大坝横缝最大开度约为 25 mm。考虑地基辐射阻尼和坝体材料非线性,在设计地震时,大坝横缝开合的最大相对速度约 200 mm/s。

因横缝张开过大,可能危及上游止水结构,设置阻尼器的目的主要是减小上游面的张开度,所以考虑在坝体上游面设置阻尼器,而从未设阻尼器时横缝张开度的分布情况来看,坝体右侧横缝开度普遍较小,左侧横缝开度较大,尤其是 15#、16#缝,不仅坝顶开度较大,且在第二、第三高程也出现了较大的张开。为此,设计院初步建议的阻尼器布设方案为:坝体左侧的 9#至 17#缝坝顶上游侧设置阻尼器,15#缝 1120 高程、1090 高程,16#缝 1120 高程设置阻尼器,以上各位置均设置 8 台阻尼器,共布设阻尼器 96 台,其总 C 值为  $6.8 \times 10^4$  KN v0.08。按此方案阻尼器对减少横缝

法向张开度是有效的,正常蓄水位横缝最大张开度(16#缝)可由 5.93 mm 下降到 4.67 mm,下降 27%;运行低水位横缝最大张开度(15#缝)由 8.95 mm 下降到 7.35 mm,下降 22%。但是布设阻尼器而对坝体应力状态的影响很小,大坝的控制性主拉、压应力几乎没有变化。

2013 年,抗震专题咨询专家从增强拱坝稳定性方面认为大岗山拱坝可不设置抗震阻尼器,但考虑大岗山水电站未来遭遇强震可能性较大,建议在坝顶开度较大横缝设置一定数量阻尼器,研究阻尼器抗震效应,为将来应用积累现场科研成果。设计院经研究确定在几个横缝张开度较大的坝段布置阻尼器,最终在 2#、14#、16# 3 条横缝每个断面设置 4 台 2 500 kN 抗震阻尼器,总共布置 12 台阻尼器。

#### 4.3 阻尼器技术规格

阻尼器生产厂家根据设计要求提供的设计方案如下:

表 1 大岗山水电站拱坝阻尼器技术规格表

序号	项 目	参数大小
1	阻尼系数 $C(kN \cdot (s/m)^\alpha)$	2 715
2	阻尼指数 $\alpha$	0.09
3	最大阻尼力 $F(kN)$	$\pm 2 500$
4	极限阻尼行程 $s(mm)$	$\pm 50$
5	满足阻尼方程	$F = CV^\alpha$

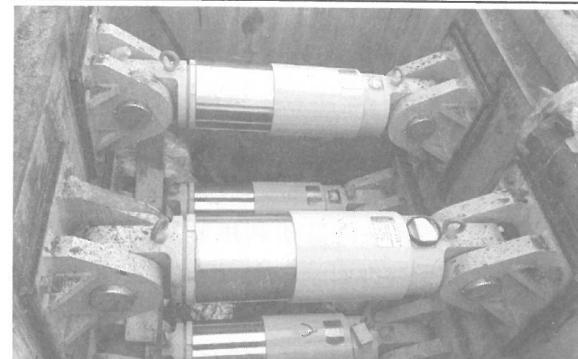


图 2 大岗山水电站 14#横缝抗震阻尼器

##### 4.3.1 阻尼器材质

阻尼器主要由活塞杆、销轴、关节轴承、缸体、缸体防护、左右球铰座等零部件组成,主要采取合金钢材,表面通过镀锌及防腐涂装处理。

##### 4.3.2 密封系统

密封系统是阻尼器性能的关键,为保证阻尼器在长期工作条件下密封性能,在动密封结构设计中独创性地采用了多重动密封结构设计,大岗

山抗震阻尼器结构由两重密封结构组成,第一重是不锈钢弹簧,能自动补偿密封圈的磨损;另一重密封结构为U型结构密封件。

#### 4.3.3 阻尼介质

目前国内外阻尼器中的阻尼介质几乎都是采用硅油,主要因硅油具有比其它高分子合成材料更好的热稳定性及耐辐照和耐候能力,并且具有无毒、无腐蚀、难燃、电绝缘等优异性能。

#### 4.5 阻尼器监测

为保证阻尼器的可靠性,收集在地震过程中阻尼器的运行状况,对阻尼器发挥的作用进行评价,大岗山工程在设置阻尼器的同时也增加了阻尼器的健康监测。监测系统需对抗震阻尼器两端的相对位移和加速度、抗震阻尼器活塞力、抗震阻

尼器油缸的压力和温度等多种参量进行采集、监测、存储、分析。

减振阻尼器健康监测光纤传感系统主要由光纤应变计、温度计、位移计和加速度计等光纤光栅传感器和光纤传感分析仪构成。

光纤光栅传感系统使用光纤作为测量元件和信号传输介质,为提高光纤对温度及应力、应变的敏感程度及准确定位能力,采用国际最先进的光纤局部加工技术,在普通单模光纤上制作一系列的温度敏感区——光纤光栅,这些敏感区可以精确、灵敏地探测到周围温度的细微变化,而光纤的其他部分只是用于信号传输,对机械应力和环境干扰不敏感,从而保证整个光纤光栅传感系统的高灵敏性和可靠性。

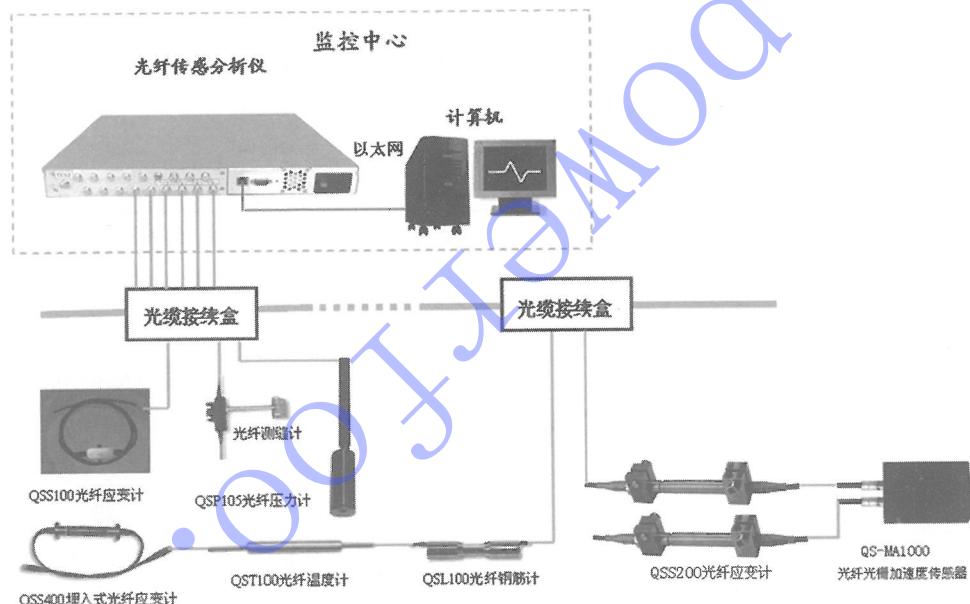


图3 光纤光栅传感系统原理

其基本原理是利用光纤光栅传感器内部敏感元件——光纤光栅反射的光学频谱对温度、应力变形、振动的敏感特性,通过光纤传感分析仪内部各功能模块完成对光纤光栅传感器的输入光源激励/输出光学频谱分析和物理量换算,以数字方式给出各监测点的物理量测量值,并根据预先设定的数据采集、存储、处理机制和通信程式把信息汇集到监测自动化系统。

#### 5 阻尼器的性能检测

为确保阻尼器性能,大岗山公司要求厂家对所有阻尼器都要进行自检,并且在自检合格的基础上,又抽检部分阻尼器送交广州大学抗震中心

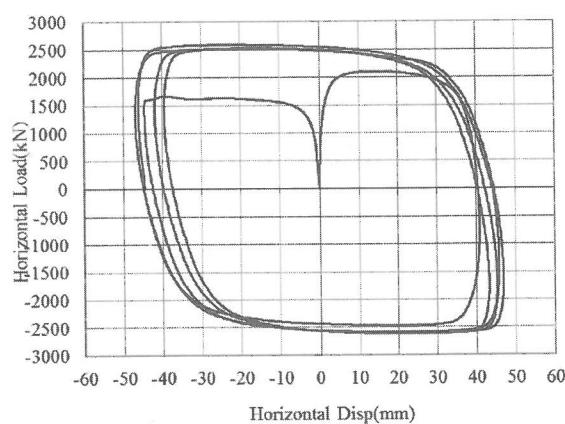


图4 阻尼器力-位移曲线

进行第三方检测。结合大岗山工程特性设计检测要求及标准如下:

### 5.1 总行程测试

在试验机设备上作总行程测试,检测是否满足 $\pm 50$  mm的总行程要求。

### 5.2 最大阻尼力测试

以最大设计荷载2 500 kN(最大速度0.4 m/s)对阻尼器施加5个完整的位移循环,检测阻尼

器能否满足设计要求。

### 5.3 阻尼力规律性测试(动力测试)

在简谐振动荷载条件下,速度为最大设计速度的1%、5%、10%、20%、30%、40%、50%、75%、100%时,分别对抗震阻尼器各项数据进行动力测试。大岗山拱坝基频仅为11.7 Hz,广州大学根据要求开展了以下频率阻尼力检测:

### 5.4 疲劳性能测试

表2 阻尼器动力测试成果表

序号	f(Hz)	A(±mm)	v(mm/s)	理论值 $F_0$ (±kN)	实测值 F(±kN)	误差(%)	备注
1	0.01	15.70	1	1 456.13	1 453.34	-0.19	
2	0.05	31.90	10	1 793.95	1 824.81	+1.72	
3	0.1	32.10	20	1 910.8	1 957.60	+2.45	
4	0.2	32.30	41	2 034.48	2 101.07	+3.27	
5	0.4	32.40	81	2 166.22	2 266.15	+4.61	
6	1	30.50	191	2 339.42	2 508.70	+7.24	各5个 循环周期
7	1.2	37.90	286	2 425.58	2 610.38	+7.62	
8	1.5	44.40	418	2 510.02	2 510.34	+0.01	
9	1.8	43.10	488	2 545.04	2 454.07	-3.57	

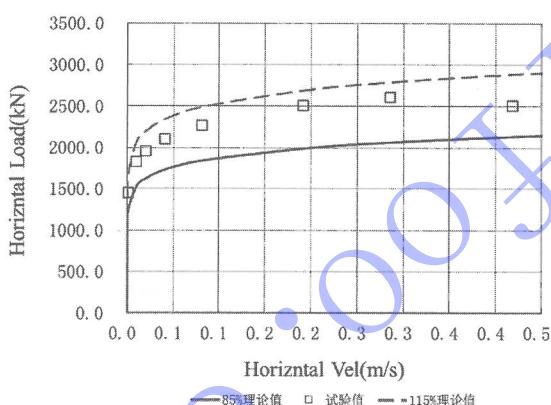


图5 阻尼力理论值与试验值曲线

阻尼器以速度200 mm/s往复运动10周期,检验阻尼器的抗疲劳性能。

### 5.5 频率相关性测试

考察阻尼器在各种频率下的性能情况,在最大速度下,以不同的频率进行测试。

### 5.6 温度相关性测试

根据大岗山实际气温情况,分别在-5 °C、25 °C、45 °C的温度下,对阻尼器温度相关性进行测试。

鉴于大岗山工程阻尼器设计的特殊性,为验

证阻尼器自身摩擦阻力,在以上检测的基础上又开展了慢速测试和摩擦力测试。

## 6 结语

目前,水电工程抗震阻尼器尚无成功应用的先例,大岗山水电站结合自身工程特点开展了探索性的试验研究,设计并开发了短行程、低速度、大吨位的新型拱坝抗震阻尼器,并且通过自动监测系统实现对阻尼器运行状态的监控,为研究水电站地震工况下阻尼器抗震效果创造了条件。“5·12”汶川地震以后,地震安全性问题越来越受关注,大岗山水电站地处高地震烈度区,工程抗震设防等级较高,因此开展阻尼器等抗震新技术研究具有十分重要的意义,研究成果将为今后水电工程拱坝抗震设计提供参考。

### 作者简介:

曾宪(1987-),女,四川遂宁人,毕业于华北电力大学自动化专业,助理工程师,主要从事水电工程建设管理工作;  
吴楠(1985-),男,四川营山人,毕业于四川大学水利工程专业,工程师,主要从事水电工程建设管理工作。

(责任编辑:卓政昌)