

水电站厂房相邻机组段振动传播规律研究

王海军^{a,b}, 白冰^{a,b}, 李康^{a,b}

(天津大学 a. 水利工程仿真与安全国家重点实验室; b. 建筑工程学院, 天津 300072)

摘要: 针对水电站厂房相邻机组段间振动传播影响问题,以一大型地下水电站厂房为研究对象,通过对相邻机组段原型振动观测数据分析和三维有限元仿真模拟,对相关规律进行了研究。分析结果表明:中频的激振力对相邻机组段振动影响较低频和高频更加明显;地基是相邻机组段相互振动传递的主要路径之一。研究所得相关结论可为水电站厂房结构设计提供支持。

关键词: 水电站; 原型观测; 数值模拟; 谐响应分析; 振动传播

中图分类号:TV731.1

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)01-0141-06

Research on vibration propagation regular of adjacent unit – blocks for hydropower house

WANG Haijun^{a,b}, BAI Bing^{a,b}, LI Kang^{a,b}

(a. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety;

b. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In view of the problem of vibration propagation of adjacent unit – blocks of hydropower house, the paper used a large scale underground hydropower house as the research object, and used the prototype vibration observation data to carry out 3D numerical simulation and studied the relative law. The results showed that the middle frequency vibration loads has greater influence on the vibration of the adjacent unit – block. The foundation is one of main vibration transfer paths between adjacent unit – blocks. The result can provide support for the structural design of hydropower house.

Key words: hydropower station; prototype observation; numerical simulation; harmonic response analysis; vibration propagation

1 研究背景

随着我国水电开发的快速发展,近年来我国大型水电站建设越来越多。由于水电站空间结构复杂,并且逐渐向着高水头,大容量,高转速发展^[1],使得水电站厂房结构尺寸和单机容量不断增加。伴随而来的水电站厂房的振动问题日益凸显,对水电站厂房产生了一系列不可忽视的振动问题^[2-3]。目前水电站厂房振动研究的方法有很多,比如现场原型观测试验、有限元数值分析、理论分析等研究方法。但几乎都是针对单台机组自身内部的振动问题进行分析研究,对于水电站厂房相邻机组段振动影响的研究几乎为空白。孙美凤等^[4]分析了不同参

数不同工况对机组间水力干扰的影响,提出了改善机组水力干扰的措施。徐军等^[5]给出了水电站甩负荷后机组间相互影响的水力计算原理和具体方法。杨为城^[6]利用双层逐步优化算法,实现了多种模式的不同机组负荷最优分配。李守义^[7]与张存慧等^[8]通过数值模拟流固耦合方法对水电站厂房振动特性进行分析。于倩倩^[9]以及孙伟等^[10]对河床式水电站厂房动力特性及地震响应分析进行了相关研究。张路路等^[11]通过采取遗传算法研究了水电站机组运行时的振动荷载反演分析,并取得了较好的研究结果。王海军等^[12]对水电站相邻机组段间振动相互影响进行了初步探讨,分析了不同工况下相邻机组段厂房结构振动影响比例,但并没有对

收稿日期:2015-11-01; 修回日期:2015-12-04

基金项目:国家创新研究群体科学基金项目(51321065);高等学校学科创新引智计划项目(B14012)

作者简介:王海军(1978-),男,江西萍乡人,博士,副教授,研究方向:水工建筑物静动力分析。

其振动规律进行深入研究。论文以一大型水电站地下厂房为研究对象,通过对原型振动观测数据的信息挖掘,研究了相邻机组段振动影响。并采用三维有限元方法模拟了相邻机组段振动通过地基传播的特性,与原型观测数据对比分析,开展水电站厂房相邻机组段振动传播规律研究。

2 原型观测分析

一大型地下式水电站厂房,厂房结构尺寸庞大,主厂房宽度 25.5 m,高度 65.4 m。电站共 6 台机组,单机额定功率为 550MW,机组额定转速 142.9 r/min。为了获取厂房相邻机组段厂房振动相互影响规律,在相邻两机组段的上下机架、顶盖和下机架基础、定子基础、风罩、楼板、梁等部位安装低频振动位移传感器(DPS),蜗壳进口和尾水管进入门处安

装水压脉动传感器。采用了 NI 采集系统,采样的频率 300 Hz。测试工况主要有:

(1)4[#]机组和 5[#]机组的单机组运行,运行工况为 20、50、100、150、200、250、300、350、400、450、500、550 MW;

(2)4[#]机组和 5[#]机组分别以 100、200、300、400、500、550 MW 进行了两机组联合测试,共 36 组。数据分析中,机组部位振动测试值采用 95% 双幅值,混凝土结构测点振动值采用均方差。

坐标系规定如下:水平横河向为 X 方向,水平顺水流向为 Y 方向,垂直向上为 Z 方向,三者之间符合右手螺旋定则。限于篇幅以下将对 185 m 水头时测试结果进行分析。图 1 和图 2 分别为 4[#]机和 5[#]机单机运行时的振动值,表 1、2 为双机联合振动测试部分结果。

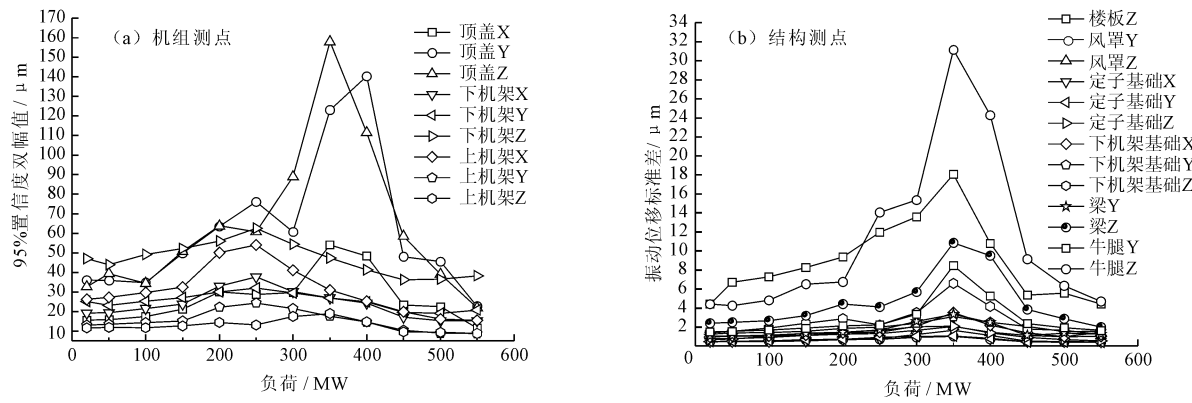


图 1 4[#]机单机运行时机组和结构测点振动值

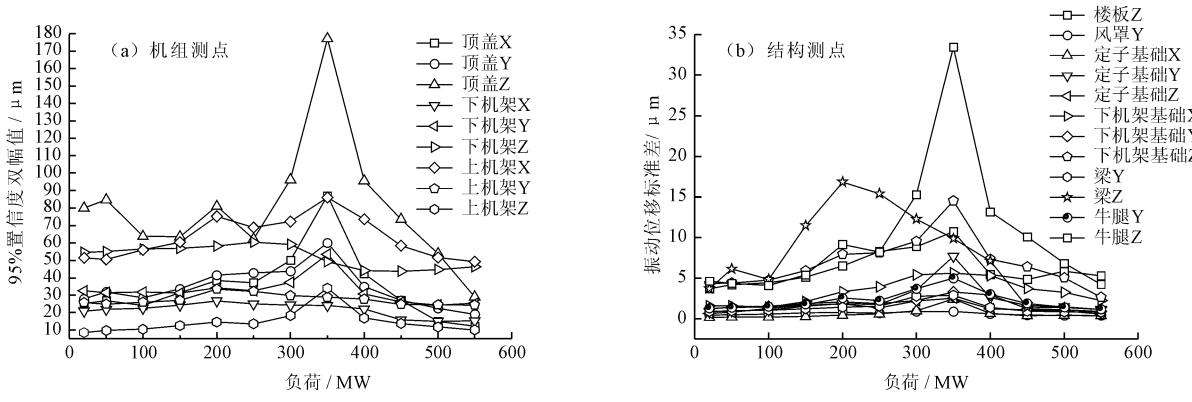


图 2 5[#]机单机运行时机组和结构测点振动值

根据文献[3]中相关振源频率计算公式,可得到该电站的尾水涡带频率范围在 0.4~0.8 Hz,蜗壳不均匀流场引起的脉动频率为 30.96 Hz。从图 1 中可知,单机运行时,4[#]机组顶盖、上机架、下机架在 200~400 MW 范围内振动较大,最大振动幅值多出现在 250~350 MW,此时振动主频为 0.55~0.70

Hz(强涡带区)。另外顶盖振动在 350~400 MW 负荷时达到了 158 μm,超出了规范的允许值(90 μm)。4[#]机结构测点在 300~400 MW 负荷时出现峰值,如楼板垂向在 350 MW 时,振动位移标准差达到 18.07 μm。

从各测点振动位移主频来说,主要有两个,一为

尾水涡频(0.55 ~ 0.7 Hz),一为蜗壳不均匀流场引起的脉动频率(30.96 Hz),可见这两振源是引起结构振动的主要因素。

从图 2 中可知,单机运行时,5#机顶盖、上机架、下机架及定子基础的各向振动在 200 ~ 400 MW 范围内受尾水脉动影响较大,最大振动幅值大多出现在 250 ~ 350 MW 的强涡带区内(脉动频率为 0.55 ~ 0.7 Hz);顶盖垂向振动在 300 ~ 400 MW 负荷时

出现超标现象,顶盖水平 X 向振动在 350 MW 时出现振动量超标,上机架水平 X 向振动在 200 ~ 400 MW 负荷时出现振动量超标。5#机结构测点在 200 MW 和 350 MW 时都出现了峰值。楼板垂向振动位移均方差在 350 MW 时,达到了 10.82 μm,对应的主频为 31 Hz。各测点振动主频与 4#机的结构测点基本相同,主要为尾水涡频或蜗壳不均匀流场引起的脉动频率。

表 1 4#、5#机组联合运行时 4#机部分测点振动值 μm

测点位置	4#负荷/ MW	5#负荷/MW						单机运行	与单机运行 相差百分比/%
		100	200	300	400	500	550		
顶盖 Z	100	33.78	32.83	35.93	39.05	37.43	39.74	34.42	-4.61 ~ 15.46
	300	70.80	87.49	87.20	81.05	95.33	70.98	88.88	-20.34 ~ 7.27
	550	24.23	25.21	32.64	25.75	21.45	32.23	22.01	-2.54 ~ 48.3
下机架 Z	100	50.22	50.00	53.27	51.32	49.14	52.39	49.22	-0.16 ~ 8.23
	300	66.13	53.52	53.74	56.45	55.64	57.32	54.45	-1.7 ~ 21.45
	550	37.29	36.90	37.17	36.63	37.98	38.39	38.30	-4.36 ~ 0.23
定子基础 Z	100	1.12	1.09	1.15	1.16	1.12	1.12	1.02	6.86 ~ 13.73
	300	2.32	1.99	2.23	2.22	2.31	2.08	2.03	-1.97 ~ 14.29
	550	0.66	0.65	0.69	0.59	0.56	0.67	0.55	1.82 ~ 25.45

表 2 4#、5#机组联合运行时 5#机部分测点振动值 μm

测点位置	5#负荷/ MW	4#负荷/MW						单机运行	与单机运行 相差百分比/%
		100	200	300	400	500	550		
顶盖 Z	100	97.23	71.31	71.44	56.83	58.73	70.07	63.80	-10.92 ~ 52.40
	300	135.80	115.88	122.12	100.32	140.95	152.13	96.23	4.25 ~ 41.12
	550	55.05	43.71	40.67	46.07	41.43	47.10	29.04	40.05 ~ 89.57
下机架 Z	100	53.60	53.21	56.21	53.20	54.25	54.71	56.58	-5.96 ~ -0.65
	300	63.92	64.72	59.03	62.64	56.11	56.56	59.17	-5.17 ~ 9.38
	550	42.81	43.73	45.53	43.49	46.46	41.69	46.30	-7.54 ~ -9.96
定子基础 Z	100	0.85	0.74	0.90	0.97	0.73	0.83	1.25	-40.80 ~ -22.40
	300	2.73	2.63	2.64	2.81	3.06	3.33	2.20	19.55 ~ 51.36
	550	1.18	1.30	1.23	1.22	1.27	1.28		

从表 1 和表 2 中可知,4#机组负荷不变时,随着 5#机组的负荷变化,机组测点顶盖和下机架垂向的振动值与单机运行时比较,最大变幅达到了 48.3%;定子基础垂向最大变幅达到了 25.45%。5#机组负荷不变,随着 4#机组负荷变化,机组测点顶盖和下机架垂向的振动值与单机运行时比较,最大变幅达到了 89.57%,出现在顶盖位置,分析原因可能为相邻电站尾水管水体发生了干扰造成;定子基础垂向最大变幅达到了 51.36%。当然由于结构测点的振

动值相对机组测点数值较小,测试精度和环境干扰对其有一定的影响。联机振动测试结果时,同一测点出现峰值的负荷与单机运行时基本相同,只是数值上由于受到相邻机组的影响发生了较大的变化。另外,通过各测点频谱进行对比分析,可知导致厂房结构振动的振源有多种。以定子基础测点为例(见图 3),双机运行时较单机运行时主要频率对应的功率谱密度值基本上有不同程度的增大。与单机运行测点类似,蜗壳不均匀流场、尾水涡带等为引起

各测点振动的主要因素。

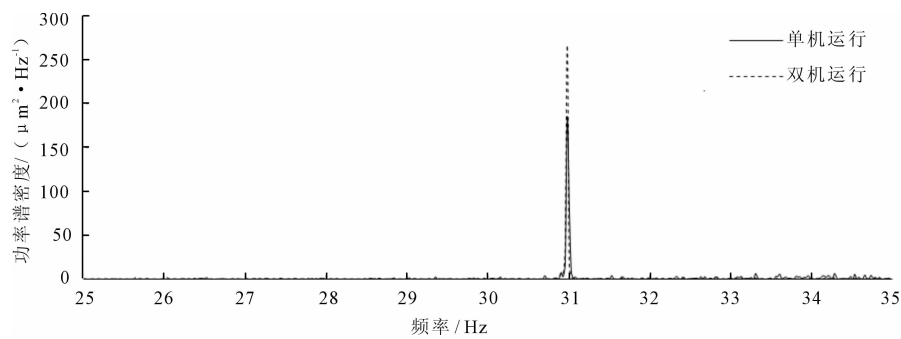


图3 定子基础 X 向频谱对比图

3 振动传递数值仿真

3.1 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS 对水电站厂房机组段间振动传播规律进行模拟,并与实测数据进行对比,分析其相邻机组段相互影响的规律。模型模拟范围:厂房上下游及高度方向均为一倍厂房跨度,横河向基础两倍。边界条件为底部全约束,四周法向约束。模型 Z 向为垂向方向,X 向为横河向方向,Y 向为顺河向方向。图 4 为有限元网格模型图。加载方式为以距机组中心 31 m(即一个机组段长度)基岩位置处为中心,将 1 000 t 的简谐激振力等效加载于相应的节点位置上。

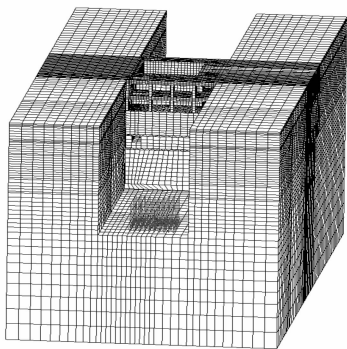


图4 有限元网格模型图

进行分析计算时混凝土结构和围岩的材料按线弹性考虑,具体材料参数见表 3。

表 3 厂房结构材料参数			
材料	容重/ (KN/m ⁻³)	动弹性 模量/Pa	泊松比
混凝土	25	3.64 × 10 ¹⁰	0.167
钢	78	2.06 × 10 ¹¹	0.3
岩石	27	2.99 × 10 ¹⁰	0.27

为了研究不同频率激振力对相邻机组机墩的振动影响规律,按谐响应分析对有限元模型进行计算分析,计算的频率范围为 0 ~ 119 Hz。并分别按 3 种不同加载方向进行分析,即垂向(Z 向)、顺河向(Y 向)及横河向(X 向)。

3.2 计算结果分析

为了直观地表征振幅计算结果受邻机振动影响程度,把加载中心处节点的振幅作为基准值 1,机墩其他部位分析点结果均以此为基准进行相应的比例转化。根据谐响应计算分析结果,得到厂房结构各部位受邻机组段不同频率下简谐力作用的振幅变化曲线。图 5 为定子基础上测点受相邻机组段简谐荷载作用下的位移幅值变化曲线图。

从图 5 可知,水平顺河向加载对邻机组段机墩振动的影响最小,而水平横河向及垂向加载相对而言对相邻机组段机墩振动影响起主要作用。部分中频激振力明显对相邻机组段机墩部位影响较大;而居于两侧的低、高频对振动影响均较小。其中,在 12 Hz 附近以及 30 Hz 附近的激振频率对振动影响明显。在现场实测和振源理论分析时,并不存在 12 Hz 左右的振源频率。而 30 Hz 附近的频率范围与蜗壳不均匀流场的脉动频率(30.96 Hz)接近,此时振动比例幅值在 20% ~ 30% 之间。

为了更加全面的分析,对激振力在典型频率下的结构振动响应进行计算分析。频率值分别为:尾水涡带频率(0.60 Hz)、机组转频 2.38 Hz 及其倍频、蜗壳不均匀流引起的激振频率 30.96 Hz 及其倍频作为典型频率进行具体分析。相邻机组段机墩部位在典型频率激振荷载振动影响下的比例振幅情况见表 4 所示。

根据表 4 可以知道,频率为涡频 0.6 Hz 以及转频 2.38 Hz 及其倍频 4.76Hz 等低频时的激振力,对邻机机墩部位产生的振动影响较小。

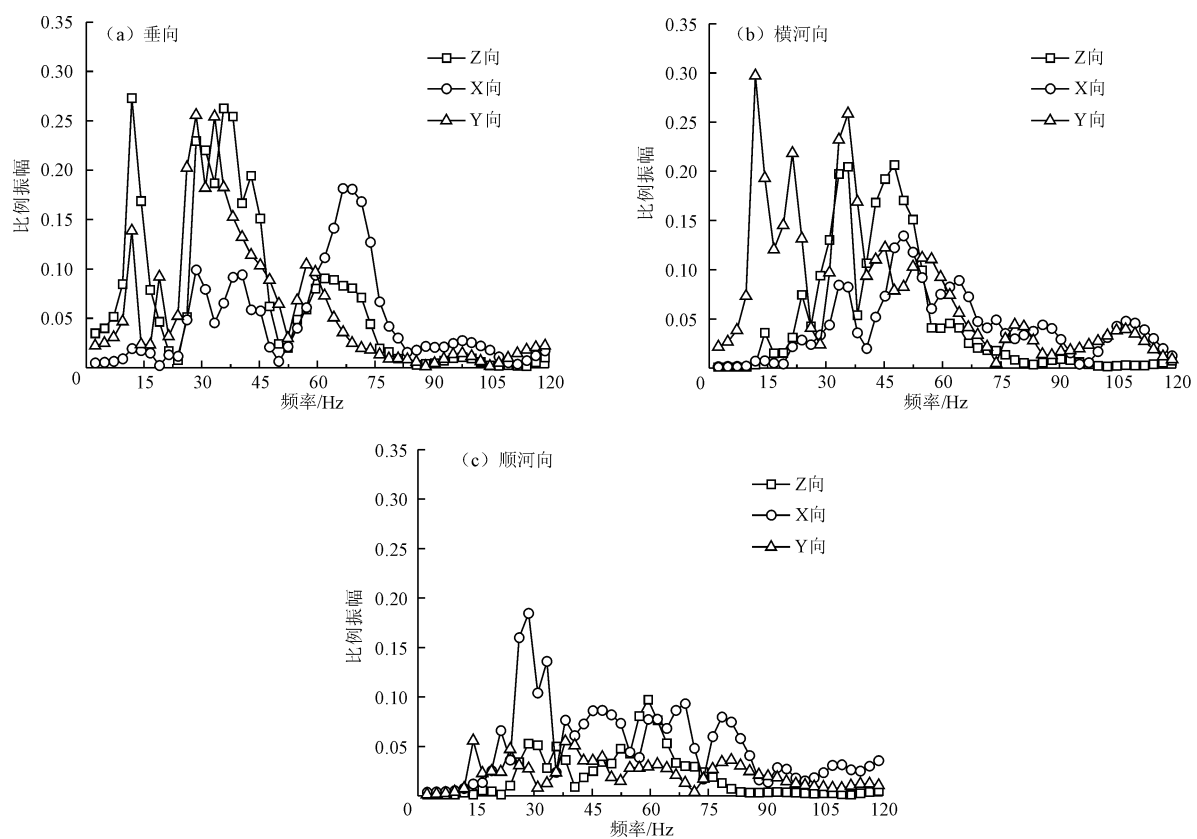


图 5 定子基础振动幅值随频率变化曲线

表 4 典型频率激振力对邻机机墩振动影响比例幅值

激振力		定子基础			下机架基础		
		X 向	Y 向	Z 向	X 向	Y 向	Z 向
0.60Hz	X 向	0.001	0.020	0.001	0.001	0.023	0.0004
	Y 向	0.003	0.001	0.0004	0.004	0.001	0.001
	Z 向	0.005	0.022	0.034	0.005	0.021	0.035
2.38Hz	X 向	0.001	0.022	0.0004	0.0004	0.024	0.0004
	Y 向	0.004	0.002	0.0004	0.004	0.001	0.001
	Z 向	0.005	0.022	0.035	0.005	0.021	0.037
4.76Hz	X 向	0.001	0.027	0.0003	0.0004	0.029	0.0003
	Y 向	0.004	0.002	0.0004	0.004	0.001	0.001
	Z 向	0.005	0.024	0.040	0.006	0.024	0.042
30.96Hz	X 向	0.044	0.097	0.130	0.027	0.111	0.135
	Y 向	0.104	0.008	0.051	0.105	0.022	0.033
	Z 向	0.080	0.182	0.220	0.048	0.205	0.226
61.92Hz	X 向	0.083	0.074	0.045	0.042	0.084	0.035
	Y 向	0.077	0.032	0.076	0.050	0.038	0.079
	Z 向	0.111	0.073	0.090	0.043	0.097	0.064

蜗壳不均匀流诱发的频率 30.96 Hz 在典型频率中对机墩部位产生的振动影响明显高于其他各频率;当加载方式为垂向(Z 向)加载时,下机架基础部

位比例幅值出现最大值为 0.226。61.92Hz 产生的最大比例幅值为 0.111;出现在垂向加载定子基础部位。由此可见,对于该电站而言,几种典型频率

中,对机墩部位振动的主要影响来源于蜗壳不均匀流引起的激振力。

3.3 对比分析

通过对比可知,由实测数据分析可知蜗壳不均匀流诱发振动频率及其倍频对各个部位都有较大的影响,这与数值分析中得到的 30Hz 附近中频对振动影响较大的规律一致。数值模拟表明受相邻机组段振动影响最大比例幅值在 20% ~ 30% 左右,与实测数据基本相当。这也说明,相邻机组段间的振动的相互传播地基是其主要通道。另外,在实测数据中低频的振动频率在部分测点方向也起到了较大作用,这与数值模拟的结果有些出入,分析原因为相邻机组段振动影响,除了激振荷载通过地基等相互传递影响之外,相邻尾水管及其下游水体之间的水力干扰也是因素之一。

4 结 论

论文针对一大型地下厂房,基于现场原型观测和数值仿真模拟,开展了相邻机组段振动传播规律研究,主要结论如下:

- (1)低频和高频激振荷载对相邻机组段结构振动影响较小,而中频率范围内的激振力对其影响较大。
- (2)垂向和水平横河向的激振荷载是对相邻机组段结构振动产生影响的主要荷载,水平顺河向激振荷载对其影响较小。
- (3)地基是相邻机组段相互振动传递的主要路径之一。

参考文献:

- [1] 徐国宾,乔海娟,王海军,等.水电站地下式厂房边界条件的识别及动力特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4): 7-10.
 - [2] 宋志强,马震岳,陈婧,等.龙头石水电站厂房振动分析[J]. 水利学报, 2008, 39(8): 916-921.
 - [3] 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.
 - [4] 孙美凤,陆桂明.高水头引水式水电站机组之间水力干扰的研究[J]. 中国农村水利水电, 2002(9): 55-58.
 - [5] 徐军,鞠小明.水电站甩负荷后机组间相互影响的水力计算研究[J]. 四川水力发电, 2002, 21(3): 63-66.
 - [6] 杨为城.棉花滩水电站机组间负荷最优分配研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(1): 74-76.
 - [7] 李守义,吕汶蔚.河床式水电站厂房结构流固耦合振动特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(3): 205-209.
 - [8] 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.
 - [9] 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.
 - [10] 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影响分析[J]. 水力发电学报, 2015, 34(9): 119-127.
 - [11] 张路路,徐国宾,王海军.基于遗传算法的地下厂房荷载参数反演识别[J]. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 26-29.
 - [12] 王海军,张林彬,何龙军.水电站厂房相邻机组段振动相互影响研究[J]. 中国科技论文在线, 2012, 1-6.
-
- (上接第 140 页)
- [5] 黄漫国,樊尚春,郑德智,等.多传感器数据融合技术研究进展[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(3): 5-8+12.
 - [6] 严怀成,黄心汉,王敏.多传感器数据融合技术及其应用[J]. 传感器技术, 2005, 24(10): 1-4.
 - [7] 李月,徐余法,陈国初,等.D-S 证据理论在多传感器故障诊断中的改进及应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(Z1): 102-106.
 - [8] 鲁睿,张力.基于 D-S 证据理论的传感器网络数据融合算法[J]. 信息通信, 2015(3): 14.
 - [9] 刘鹏,王曙钊,白剑林.一种空间信息融合的 D-S 算法研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 242-244.
 - [10] Qian Ding, Peng Zhenghong, Liu Tianzhen, et al. Multi-sensor building fire alarm system with information fusion technology based on D-S evidence theory[J]. Algorithms, 2014, 7(4): 523-537.
 - [11] 洪昭艺,高勋章,黎湘.基于 D-S 理论的混合式时空域信息融合模型[J]. 信号处理, 2011, 27(1): 14-19.
 - [12] 李茹,李弼程,李斗. D-S 证据理论在时空信息融合中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2005(13): 174-176.
 - [13] 李正周,方朝阳,顾园山,等.基于无线多传感器信息融合的火灾检测系统[J]. 数据采集与处理, 2014, 29(5): 694-698.