

长有压输水系统水电站水力振动特性分析

毕程敏,周建旭,胡 明

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要 结合长引水式水电站运行过程中经常发生并会造成破坏的水力振动问题,特别针对长有压输水系统的水力振动进行数值计算分析,提出了水力振动分析阶数的选择方法,结合模型试验及试验成果的功率谱分析,进一步研究探讨长有压输水系统的频率特性。数值分析和试验研究表明,需要分析和掌握长有压输水系统较高阶的水力振动特性,特别是相应频率位于功率谱主导频率范围之内

的水力振动特性,为避免和降低水力振动的危害性提供依据。

关键词 水电站;长有压输水系统;水力振动;水力共振;试验研究

中图分类号 :TU311.3 ;TV73 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)02-0005-04

Analysis of hydraulic vibration characteristics of long pressurized piping system in hydropower station//BI Cheng-min, ZHOU Jian-xu, HU Ming(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Due to the hydraulic vibration problems that occur frequently and often cause damage to long diversion-type hydropower stations, especially to the hydraulic vibration of long pressurized piping systems, a deep numerical calculation analysis is carried out. The method of deciding on reasonable orders for hydraulic vibration analysis is provided. The frequency characteristic of long pressurized pipelines is discussed further through power spectrum analysis of the model test results. The results of numerical analysis and experimental research indicate that, to avoid and reduce the damage of hydraulic vibration, higher hydraulic vibration characteristics of long pressurized pipelines should be analyzed, especially those with frequencies located in the dominant frequency range of the power spectrum figure.

Key words : hydropower station; long pressurized piping system; hydraulic vibration; hydraulic resonance; experimental research

在水电站中,非定常的管流会引起管道的振动,管线若长期受到振动引起的交变应力的作用,即使设计满足强度要求也可能产生疲劳破坏而引起生产事故。目前,有压输水系统非恒定流计算包括水锤计算、调压室水位波动计算和水力振动计算,并侧重于前 2 项的计算,而对水力振动方面的研究则比较少,文献[1]给出了输水系统水力振动特性的评估方法及可能出现的情况。虽然国内外诸多水电站存在明显的水力振动现象,可能造成较大的局部破坏,严重影响水电站的安全稳定运行,甚至引发事故,但是水电站的水力振动并没有引起人们足够的重视,主要原因可能是在大多数水电站中水力振动可以通过相应的补气等措施被合理地调控而加以控制和解决^[2],从而有效控制了振动的破坏程度。从长远来看,随着具有长有压输水系统抽水蓄能电站或大型常规水电站的发展,为了提高水力系统运行的可靠度,保证水电站

的安全稳定运行,进行相应的水力振动分析是必要的。鉴于此,笔者结合数值计算和模型试验分析长有压输水系统水电站的水力振动特性。

1 水力振动的危害情况举例

水力振动会对水电站产生比较大的危害,若有压输水系统中产生水力振动的振荡压力持续增大到较大数值,有可能引起结构强烈振动、压力钢管爆裂、引水隧洞局部严重破坏等事故。水力振动的危害性主要表现在极小的扰动就可以引起水力系统中很大的压力振荡,并且高压振荡不仅局限于外部扰动附近,还可能发生在水力系统的任何部位。以下是因水力振动而导致的较为典型的水电站事故。

a. Kandergrund 隧洞事故^[3]。某电站经长期运行,在隧洞中相同的地方先后出现 3 次沿轴向的水平裂缝,最后 1 次裂缝形成山脚下 1 个泉眼,最终导

致山体滑坡。分析表明,产生裂缝的原因是引水道中第 11 阶谐波型水力共振,且调压室恰好处于压力节点位置(即调压室失效),导致引水隧洞局部产生过大的压力振荡,最终造成严重破坏。

b. 岩丰水电站事故^[4]。岩丰水电站投入运行后的第 8 个月发生钢管严重爆裂事故,以后在不到 11 个月的时间内又接连发生 4 次爆裂事故,每次均沿纵焊缝开裂。事故分析表明:进口斜拉滑板闸门局部开启时形成负压,严重时产生空蚀和振动,进而掺气水流下移至输水管高压区,产生气团压缩起爆振动,引起引水管道的谐振,造成较大的破坏。

c. 中国南方某水电站事故^[5]。该水电站在运行期间,有压输水系统曾多次发生不同程度的水力振动,轻时在机组附近可感到明显的振动及由此产生的噪声,但不影响水电站的运行;重时机组部位发生强烈振动,从而影响水电站的运行,并导致输水系统局部结构破坏。事故分析表明各种局部破坏是由不同频率的扰动源引起的谐振造成的。事故发生后采取向尾水管补气 and 输水系统局部加强等措施,有效抑制了振动发生,保证了电站的正常运行。

2 长输水系统水力振动的数值分析

2.1 长输水系统水力振动的特点和分析方法

水力振动分析可以用来评价抽水蓄能电站或常规水电站在水力系统全频域内的振动特性,并且可结合管道结构和机组等的振动特性进一步研究压力管道共振和机组振动现象。水电站有压输水系统中水力振动分析的主要内容^[6]包括自由振动分析、强迫振动分析和自激振动分析。通过自由振动分析可以详细了解水力系统频域内的振动特性,主要的分析方法包括水力阻抗法和传递矩阵法,两者相结合可广泛用于较复杂系统的水力振动分析。另外,基于水力振动理论提出的压力管道内水体的精确弹性模型,以及其不同的近似展开形式也可用于长有压输水系统的振动特性分析,特别是采用变分方法和 Ritz-Galerkin 近似法得到的弹性模型^[7]可以广泛用于长有压输水系统频率域内或时间域内的高阶振动特性分析。

2.2 水力振动分析阶数的选择

对于给定的长有压输水系统,通过自由振动分析可以得到全频域范围内的水力振动特性,即得到各阶自振频率、相应的衰减因子和振型。但是,考虑到水锤波速不可避免地存在一定的误差等因素,更高阶水力振动特性的分析精度会降低,同时,阶数越高,能量衰减越快。因此,对于长有压输水系统而言,必须选择需要研究和分析的水力振动分析最小

阶数,而更高阶水力振动特性的研究就没有具体的实际意义。水力振动分析中最小阶数的选择主要考虑以下因素:

a. 系统中可能存在的扰动频率^[8],特别是尾水管涡带扰动频率、与机组转速相关的扰动频率,以及接近机组转频的扰动频率,水力振动分析的频率范围至少应涵盖上述扰动频率,即分析的最高阶振动频率应大于扰动频率的最大值。

b. 因水力系统的基频振动频率较低,低于电力系统的低频振荡,若需要充分考虑水力系统和电力系统振动特性的相互影响,则必须计及水力系统的高频振动特性,即需要充分了解长有压输水系统的较高阶水力振动特性。文献[9]中指出:对于具有长有压输水系统的水电站而言,水力振动分析的最小阶数为 3 较为合适,具体可如下选择: $0.0\text{ m} < l \leq 148.0\text{ m}$,最小阶数为零阶; $148.0\text{ m} < l \leq 485.0\text{ m}$,最小阶数为 1 阶; $485.0\text{ m} < l \leq 810.0\text{ m}$,最小阶数为 2 阶; $810.0\text{ m} < l \leq 1135.0\text{ m}$,最小阶数为 3 阶。

2.3 算例分析

某水电站引水发电系统采用首部式地下厂房,引水道为单管单机供水,单机引用流量为 $418.1\text{ m}^3/\text{s}$,额定水头为 209 m,尾水系统采用 3 台机组共用 1 个调压室及 1 条尾水洞的布置方式,管道布置见图 1,其中管段 1、3 和 5 为圆形压力钢管,相应的水锤波速近似取为 1100 m/s ;管段 2、4、6~11 均为城门洞形混凝土衬砌断面,考虑城门洞形隧洞的水锤波速一般为 $800\sim 900\text{ m/s}$ ^[10],近似取水锤波速为 900 m/s 。管道的主要参数见表 1。

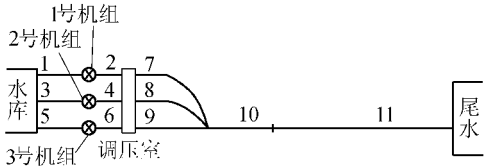


图 1 发电单元管道布置平面示意图

表 1 管道参数

管道 编号	长度/ m	当量 直径/m	管道 编号	长度/ m	当量 直径/m
1	220.4	10.00	7	217.0	15.40
2	149.0	15.40	8	177.0	15.40
3	205.4	10.00	9	137.0	15.40
4	149.0	15.40	10	371.0	18.54
5	190.4	10.00	11	981.0	20.67
6	149.0	15.40			

结合 3 个具体的工况分析该电站有压输水系统的水力振动特性,即 1 号机组单机发电运行工况 1,1 号和 2 号机组双机发电运行工况 2,三机发电运行工况 3,各工况均对应水库正常蓄水位 600.0 m ,下游设计尾水位 405.01 m 。根据自由振动

分析理论及方法,计算该电站在每一种工况时系统的自振频率及相应的振型,结果见表2。

由表2可以得出3种工况下第1阶自振周期 T_1 依次为210.02s,197.07s,192.76s,而理论计算调压室波动周期 T_s 依次为205.47s,193.85s,189.91s。在各工况下均满足 T_1 略大于 T_s ,主要是由于在 T_s 的计算中未计及摩阻的影响,而 T_1 的计算中则考虑了摩阻,使系统的第1阶自振周期略大于调压室周期,若忽略摩阻引起的偏差,二者基本一致。在各工况下, σ 始终为负值,说明机组在正常运行工况下每一阶自振均是衰减的,即系统本身是稳定的,随着运行机组台数的增加,系统的振动特性存在一定的差别,主要表现在各阶振动的衰减因子总体呈增大的趋势,较低阶(第1阶至第5阶)振动频率总体亦呈增大的趋势。图2给出了工况3下的2阶典型振型。

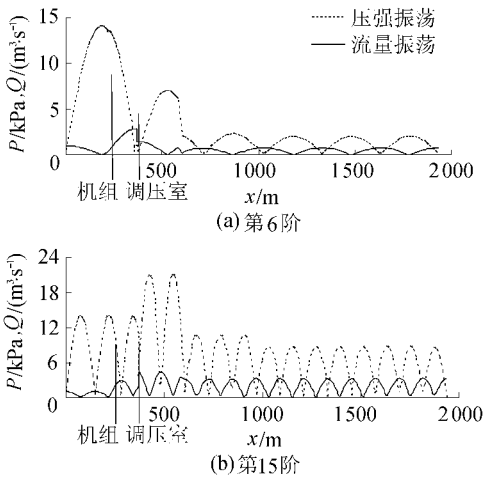


图2 工况3下的系统自振振型

3 试验研究

3.1 试验模型布置和量测

在实验室内建立图1所示的长输水系统水电站的整体模型,模型包括引水道、尾水管、尾水调压室、尾水支洞、尾水主洞、尾水渠及出口下游局部河道,用该模型进行输水系统的振动特性试验。由于输水系统中的主导作用力为水体重力,故采用重力相似准则进行分析计算。整体水工模型的比尺 $\lambda_1=60$,

机组由一针阀节流装置模拟,输水系统上下游水位分别由平水槽控制。

在尾水管、调压室底部、分岔点、止坡点和直段平洞中点安装了高灵敏度的压力传感器,采用200Hz的采样频率进行实时数据采集,得到模型试验数据,从而进行进一步的分析。

3.2 试验数据分析

3.2.1 水锤波速的影响分析

与有压输水系统频率特性密切相关的参数是水锤波速,水锤波速的选择或数值范围的界定直接影响到各阶振动频率的数值大小,且随着阶数的增大水力振动频率分析的精度逐渐降低。因此,必须在确定模型管道波速范围的前提下,分析水锤波速对输水系统振动特性分析的影响。

设模型管道上2个压力传感器之间的模型距离为 Δl ,在机组甩荷或增荷工况下,2个传感器采集到的动态压力曲线起止点的时间差为 Δt (Δt 亦可定义为到达波峰或波谷的时间差),则试验中水锤波速 a 的计算公式为 $a=\Delta l/\Delta t$ 。

试验分别量测了三机甩荷或增荷工况下各传感器位置的动态压力曲线,鉴于压力传感器2和传感器3之间为顺直的尾水平洞,故以此来分析模型的水锤波速,其中压力传感器2和传感器3之间的模型管道长度 $\Delta l=8.43\text{m}$,分析结果见表3。

表3 城门洞形模型管道水锤波速分析结果

工况	分析组次	$\Delta t/\text{s}$	$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
三机甩荷 工况	1	0.08	105.4
	2	0.10	84.3
	3	0.12	70.3
	4	0.07	120.4
三机增荷 工况	1	0.09	93.7
	2	0.15	56.2
	3	0.13	64.8
	4	0.11	76.6

由表3分析可知:因实际电站的整体模型边界条件比简单的单管系统复杂,计算分析得到的城门洞形模型管道的水锤波速变化范围较大,相应的范围为56.2~120.4m/s,平均水锤波速为84.0m/s。

表2 自由振动计算结果

阶 型	工况1				工况2			工况3	
	σ	ω	f	σ	ω	f	σ	ω	f
第1阶	-0.0007	0.030	0.005	-0.0016	0.032	0.005	-0.0023	0.033	0.005
第2阶	-0.0006	1.676	0.267	-0.0010	1.828	0.291	-0.0015	1.897	0.302
第3阶	-0.0006	3.555	0.566	-0.0011	3.783	0.602	-0.0017	3.925	0.625
第4阶	-0.0006	5.293	0.843	-0.0013	5.470	0.871	-0.0024	5.666	0.902
第5阶	-0.0005	7.218	1.149	-0.0012	7.218	1.149	-0.0027	7.276	1.159
第10阶	-0.0028	16.039	2.554	-0.0095	16.478	2.624	-0.0104	16.477	2.624
第k阶	-0.0006	39.389	6.272	-0.0018	39.459	6.283	-0.0049	39.740	6.328

注: σ 、 ω 和 f 分别为各阶自振衰减因子、自振角频率和自振频率。

根据水锤波速的模型比尺 $\lambda_v = \lambda_l^{0.5} = 7.746$,以及城门洞形隧洞的原型水锤波速为 $800 \sim 900 \text{ m/s}$,换算得到模型的水锤波速应为 $103.3 \sim 116.2 \text{ m/s}$ 。虽然该平均值比实测的模型平均水锤波速值大 ,但是介于实测的模型水锤波速范围之内。由于在原型中水锤波速是一个变化值 ,只有当扰动频率值与系统自由振动频率值相差 25% 以上时系统才不会发生共振。显然 ,实测的模型水锤波速相对于原型水锤波速来说介于此误差范围之内。因此 ,对于城门洞形隧洞而言 ,采用水锤波速的比尺将模型管道的频率特性参数换算成原型的频率特性参数 ,以便于与数值分析成果进行对比验证 ,这样的方法是合理的。

3.2.2 功率谱分析

结合工况 3 (水库正常蓄水位 600.0 m ,下游设计尾水位 405.01 m ,3 台机组均正常运行发电)进行长有压输水系统的特性试验 ,并且对采集到的试验数据进行功率谱分析 ,结果见图 3。

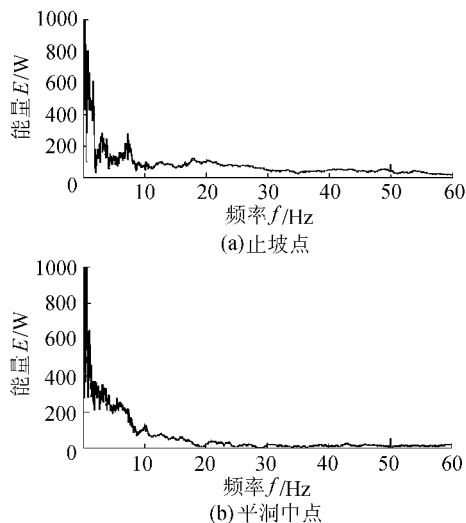


图 3 尾水隧洞压力的功率谱

由尾水隧洞部分特征断面压力的功率谱分析可知 ,该电站整体模型长输水系统压力脉动的主导频率范围为 $0 \sim 20 \text{ Hz}$,并且存在 1 个单一的主导频率 50 Hz 。

3.2.3 与数值分析成果的对比较证

依据波速的模型比尺 $\lambda_v = 7.746$,由功率谱分析得到的模型管道主导频率范围为 $0 \sim 20 \text{ Hz}$,相应的原型电站长输水系统压力脉动的主导频率范围为 $0 \sim 2.58 \text{ Hz}$,以及单一主导频率为 6.455 Hz ,与系统自由振动的数值分析结果(表 2)比较可知 :对于长度接近 1000 m 的长输水系统而言 ,重点关注的是前 3 阶自振特性以及与扰动频率密切相关的自振特性 ,而实测长输水系统压力脉动的频率范围已涵盖了系统的前 10 阶自振频率 ,并且单一主导频率接近表 1 所列的第 k 阶高阶自振频率 ,说明长输水系统

中存在的扰动频率极有可能与系统的某一阶自振频率接近从而发生共振。因此 ,在合理控制波速的模型相似率条件下 ,长输水系统振动特性的模型试验结果可以反映实际系统的自振特性。

4 结 语

国内外诸多水电站发生了明显的水力振动现象 ,而且可能造成较大的局部破坏 ,严重影响水电站的安全稳定运行 ,因此 ,对长有压输水系统进行相应的水力振动分析尤为重要。笔者将数值计算和模型试验相结合 ,分析了水电站长有压输水系统的水力振动特性 ,结果表明 :①对于长有压输水系统而言 ,必须依据实际需要选择水力振动分析的最小阶数 ,而更高阶水力振动特性的研究就没有具体的实际意义。结合算例分析可知 ,通常水力系统本身是稳定的 ,其中第 1 阶自振周期近似等于调压室理论波动周期 ,不同运行工况对应的系统振动特性存在一定的差别。②在合理控制波速的模型相似率条件下 ,长输水系统振动特性的模型试验结果可以反映实际系统的自振特性 ,实测长输水系统压力脉动的频率范围涵盖了系统的前 3 阶自振特性以及与扰动频率密切相关的自振特性。

参考文献 :

- [1] 索丽生 ,周建旭 ,刘德有 .水电站有压输水系统的水力共振[J]. 水利水电科技进展 ,1998 ,18(4) :12-14.
- [2] 周建旭 ,张健 .有压输水系统减振措施分析[J]. 水利水电科技进展 ,2004 ,24(6) :10-12.
- [3] JAEGER C. 水力不稳定流[M]. 王树人 ,刘天雄 ,彭天玫 ,译. 大连 :大连理工大学出版社 ,1987.
- [4] 林忠桑 .岩丰水电站压力钢管事故分析兼谈水力振动的危害性[J]. 广东水力水电 ,1988(2) :45-47.
- [5] 周建旭 ,索丽生 ,郭锐勤 .水电站水力振动实例分析[J]. 水力发电学报 ,1998 ,17(4) :50-55.
- [6] WYLIE E B ,STREETTER V L ,SUO Li-sheng. Fluid transients in systems[M]. New Jersey :Prentice Hall Englewood Cliffs ,1993.
- [7] 王源 ,周建旭 .水力-机械系统特性分析中管道水体弹性模型研究综述[J]. 水利水电科技进展 ,2008 ,28(1) :91-94.
- [8] 王珂仑 .水力机组振动[M]. 北京 :水利电力出版社 ,1986.
- [9] 周建旭 .水电站水机电系统振动特性和稳定性研究[D]. 南京 :河海大学 ,2006.
- [10] 张祖莲 .几种常见截面形式的水锤波速及其影响因素的分析[J]. 云南水力发电 ,1997(4) :40-45.

(收稿日期 2008-09-09 编辑 高建群)