

水电站有压输水系统的水力共振

③
12-14, 22

索丽生 周建旭 刘德有

TV732

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘要 揭示了水电站有压输水系统中发生水力共振的可能性, 给出输水系统水力振动特性的评估方法和水电站可能的水力共振的预测及分析方法, 并通过实际水力系统的算例分析说明该方法的应用。

关键词 水电站 有压输水系统 水力振动 水力共振

水力振动是有压输水系统中不同于调压室水位波动及水锤的另一类非恒定流现象, 它是系统中可压缩水体所发生的流量变幅较小、压力变幅较大、频率较高的周期性振荡。

1 水电站水力共振的可能性

水力共振可分为强迫振动引起的水力共振与自激共振两类。前者发生于扰动频率等于或接近于系统的某一阶自振频率时; 后者则因为水力系统本身是不稳定的, 任何引入该系统的压力或流量的扰动都将随时间增强而导致水力共振。

1.1 扰动源引起水力共振的可能性

水力系统常见的扰动源及其相应的频率范围如表 1 所示。

表 1 扰动源及其扰动频率范围

扰动源	振动频率量级/Hz
水库和尾水渠中的波浪	$10^{-1} \sim 10^0$
尾水管涡带	$(0.167 \sim 0.5)n/60$ $10^0 \sim 10^1$
转轮偏心引起的扰动	$n/60, 10^1$
水流撞击转轮叶片引起的扰动	$\Lambda_2 n/60, 10^1 \sim 10^2$
转轮叶片经过导叶时引起的扰动	10^2
闸、阀或导叶的振动	10^2
空化噪声	$10^2 \sim 10^3$

注: n 为转速, r/min ; Λ_2 为叶片数。

水力系统的自振频率可通过自由振动分析求得, 比较精确。图 1 所示的四座典型电站的主要特征见表 2, 前几阶自振频率见表 3。

比较表 1 和表 3 可知, 典型电站水力系统的自振频率均落在扰动频率范围内, 意味着水电站确有潜在水力共振的可能。

这四座典型电站的尾水涡带扰动频率范围分别为: $4.03 \sim 12.09 \text{ rad/s}$, $10.5 \sim 31.4 \text{ rad/s}$, $17.5 \sim 52.3 \text{ rad/s}$ 和 $10.5 \sim 31.4 \text{ rad/s}$, 均有可能接近系统的自振频率, 从而引起水力共振。实践证明, 在所有可能的扰动源中, 尾水管涡带是最常见、最麻烦和最危险的扰动源, 应当予以足够的重视。

1.2 自激共振的可能性

在一般情况下, 水力系统的任一阶自由振动均是衰减的, 表示系统是稳定的, 不会产生自激共振。若系统中存在漏水阀门, 其过流曲线具有反斜率段, 就有可能导致水力系统不稳定, 产生自激共振。可逆式机组水轮机工况区中的某些位置, 机组引用流量随着水头的增大而减小, 即 $\frac{\partial Q_1'}{\partial n_1} > \frac{Q_1'}{n_1}$; 或水泵工况区的某些位置, 机组引用流量随着扬程的增

第一作者简介: 索丽生, 男, 教授, 从事水力发电工程研究, 曾发表《Hydraulic Transients in Rock-bored Tunnels》等论文。

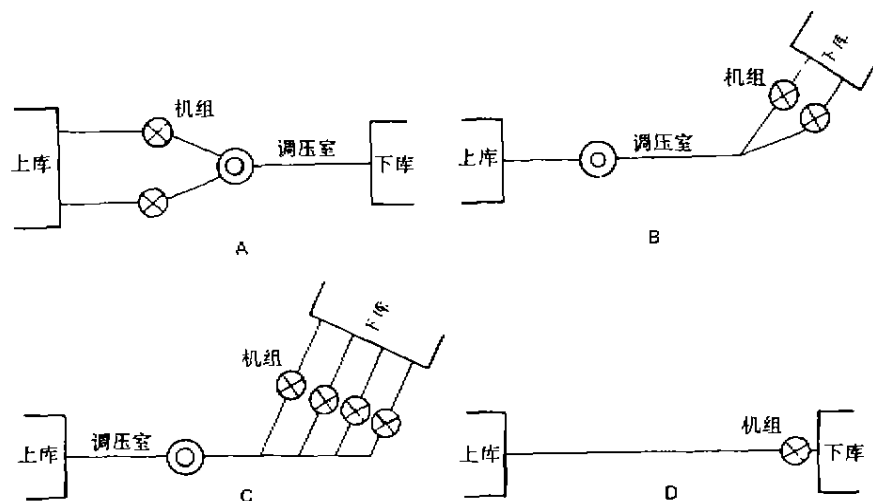


图 1 四座典型电站示意图

表 2 四座典型电站的特征^[1]

电 站	特 征	引水道		管道		尾水道		调压室直径/m
		长/m	直径/m	长/m	直径/m	长/m	直径/m	
A	抽水蓄能, 中长输水道	826.0	5.7	188.0	5.0	890.0	8.1	16.0, 尾调
B	抽水蓄能, 中长输水道	995.9	3.2	29.0	2.0	215.3	2.5	3.4, 上游
C	水电站, 长输水道	2744.0	2.6	136.6	1.0	363.2	2.2	16.0, 上游
D	水电站, 单管单机	无	无	300.0	1.6	忽略不计		无

表 3 四座电站的自振频率

阶次	A				B				C		D	
	水泵工况 1		水泵工况 2		水轮机工况 1		水轮机工况 2		σ	ω	σ	ω
	σ	ω	σ	ω	σ	ω	σ	ω				
第一阶	-0.006	0.053	0.009	0.054	-0.015	0.160	0.011	0.170	-0.008	0.027	-4.722	10.47
第二阶	-0.003	3.620	-0.001	3.610	-0.641	3.890	0.203	3.990	-0.008	6.375	-4.722	20.93
第三阶	-0.005	7.240	0.001	7.230	-0.038	9.990	0.009	9.96	-0.009	7.968	-4.722	31.40
第四阶	-0.003	10.850	-0.001	10.840	-0.021	19.530	0.001	19.420	-0.614	16.931	-4.722	41.87
第五阶	-0.006	14.470	0.001	14.470	-0.063	21.040	0.015	21.040	-1.110	29.587	-4.722	52.34
第六阶	-0.006	18.070	0.001	18.060	-0.317	24.780	0.101	24.680	-0.025	30.290	-4.722	62.81
第七阶	-0.006	21.710	0.001	21.700	-0.632	28.410	0.250	28.15				
第八阶	-0.020	25.290	0.006	25.260	-0.360	30.440	0.180	30.44				
第九阶	-0.005	28.940	0.001	28.920	-0.646	32.970	0.219	33.07				

大而增大, 即 $\frac{\partial Q_1'}{\partial n_1} < \frac{Q_1'}{n_1}$ 。图 2 所示可逆式水轮机的全特性曲线上局部呈“S”形的水力不稳定区, 机组在这些工况下运行时, 可能因水力-机械系统不稳定引起自激共振。

2 水电站水力共振的预测与分析方法

水力共振分析的数值方法主要以振荡水流分析的线性理论为基础, 该理论包括自由

振动分析和频率响应(强迫振动)分析^[1,2]。常用的方法有水力阻抗法、传递矩阵法和两者的混合法。

自由振动是扰动移去后系统中残余的振荡。自由振动分析所关注的是该振动是否衰减, 求解复频 $s_k = \sigma_k + i\omega_k$ ($k = 1, 2, 3, \dots$) 及相应的振型。复频中的虚部 ω 为以 rad/s 计的系统第 k 个自振频率; 实部 σ_k 是频率为 ω_k 的自由振动分量的衰减因子, 表征着指数

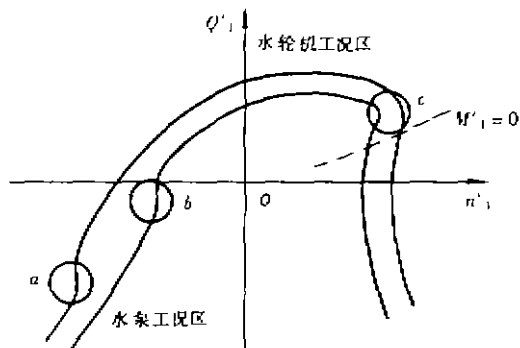


图2 可逆式水轮机局部不稳定区

型衰减 $e^{\sigma_k t}$ 。

强迫振动是在扰动始终起作用的情况下系统产生的振荡。强迫振动分析所关注的是系统对某个频率已知的给定扰动源的响应(即强迫振动)。若扰动频率等于系统的某一阶自振频率,此时产生强烈的压力振荡,即发生水力共振^[1,2]。

评估水力系统特性、预测可能的水力共振方法及步骤如下^[1]:

a. 进行水力系统的自由振动分析,求得复频 $s_k = \sigma_k + i\omega_k$ ($k=1,2,3,\dots$)及相应的振型。

b. 检查复频中是否出现正值的 σ_k 。若出现正值的 σ_k ,则研究中的系统是水力不稳定的,水力共振(自激共振)必定发生。如表3中电站A水泵工况2和电站B水轮机工况2均出现衰减因子为正的情况,这两个工况点恰落在图2所示全特性曲线的“S”形区域,系统中将发生自激共振。若所有 σ_k 均小于零(如电站C和D),无自激共振的可能,可进而检验强迫振动引起水力共振的可能。

c. 确定所有的可能扰动源并估算其频率。频率等于或接近于系统某一阶自振频率而且扰动强度相对较大,数值 $|\sigma_k T_k|$ (其中 $T_k = 2\pi/\omega_k$)较小、位于或接近振型中压力腹点或流量节点的扰动源最为危险。图3为电站B的第五阶、第十阶和第十二阶振型,由图可见,水轮机(扰动源)近似处于第十阶振型流量振荡的节点位置,若扰动频率 ω_k 接近 36.92 rad/s ($k=10$)则可能引起强烈的水

力振动。

d. 根据扰动源的幅值进行频率响应分析,检验系统中压力振荡的强度,必要时,用特征线法验算水力振动的时程过程。

在评价系统水力振动特性时,还应注意调压室失效问题。当调压室处于某压力振荡节点时,调压室水位不发生振荡,无流量进出调压室,此时调压室形同虚设(称为“失效”),引水道(或尾水道)中产生剧烈的压力振荡,此时引水(尾水)隧洞长度 $L = ma\pi/(2\omega)$ ($m=2,4,6,8,\dots$), a 为水锤波速。反之,当调压室处于压力振荡腹点时,位置最佳,此时,引水(尾水)隧洞长度 $L = ma\pi/(2\omega)$ ($m=1,3,5,7,\dots$)。

当电站B发生第五阶和第十二阶谐振时, m 分别为 3.97 和 8.00,近似等于偶数,结合图3(a)和(c)振型可知,此时调压室失效;当发生第十阶谐振时, $m=6.95$,近似等于奇数,结合图3(b)振型可知,此时调压室处于最佳位置。

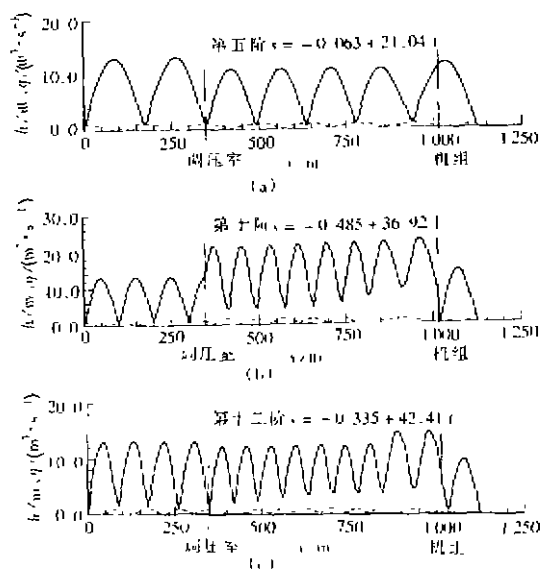


图3 电站B第五阶、第十阶和第十二阶振型

3 结 语

水电站有压输水系统中的水力共振是与水锤特性不同,但危害性很大的一种非恒定流现象,常见布置形式的水电(下转第22页)

$$0.0485 \sin 2\pi \frac{1}{6} t + 0.8333 x_{t-1} - 0.3781 x_{t-2} + 0.1351 x_{t-3} \quad (4)$$

3 结 论

a. 岩溶地下水运动特点有:岩溶含水介质具有多重性。裂隙流与管道流并存;层流与紊流并存;线性流与非线性流并存;连续水流与孤立水体并存等特殊水流的运动规律。

b. 在南方岩溶地区,地下水流以管道流为主或管道流与裂隙流并存,一般不符合达西定律。北方岩溶地区,以裂隙流为主,具有宏观渗流性质。

c. 一般的数值方法常用于裂隙流为主的地区。单元网络数学模拟适用于管道流与裂隙流并存地区。用系统分析方法建立的水文模型适用于不具备岩溶地下水的实测资料,但有地表水系统观测资料的地区,随机方法适用于积累了长期的实测资料而水文地质条件尚未查清的地区。

(上接第5页)

息科学的技术基础,如遥感、GIS、GPS、计算机通信网络、遥测、卫星通信等在水利行业的应用十分广泛。水利工作者不仅要关注地球信息科学的产生,也要为这一 21 世纪的新学科的发展作出贡献。

参考文献

- 1 Michael F. Goodchild. Future direction for geographic information science. In: Proceedings of Geo-Informatics '95, Hong Kong, 1995
- 2 Chen Shupeng. Geo-informatics and regional sustainable development. Beijing: Surveying and Mapping Publications, 1995
- 3 陈述彭,承继成,何建邦. 地理信息系统的基础研究——地球信息科学. 见:资源与环境信息系统国家重点实验室第三届学术委员会第一次会议文件汇编,北京,1997

(收稿日期:1997-12-29 编辑:许宇鹏)

参考文献

- 1 韩行瑞等.岩溶水系统.北京:地质出版社,1993
- 2 邹成杰等.水利水电岩溶工程地质.北京:水利电力出版社,1994
- 3 朱远峰.中国岩溶水系统和岩溶水资源研究进展.见:地矿部环境地质研究所主编.工程地质、水文地质、环境地质论文集.北京:地震出版社,1993.194~199
- 4 钱孝星等.岩溶裂隙水地区某水库的渗漏计算.河海大学学报,1989,17(3):58~63
- 5 夏日元等.岩溶地下水系统单元网络数学模拟方法研究.中国岩溶,1992,11(4):267~278
- 6 庄一筠等.新安江模型在岩溶地区的应用.河海大学学报,1989,17(4):43~50
- 7 朱学愚等.地下水资源评价.南京:南京大学出版社,1987
- 8 马善才等.随机模拟在岩溶地下水系统水位预报及开采资源评价中的应用.工程勘察,1995,(5):32~38

(收稿日期:1996-11-08 编辑:许宇鹏)

(上接第14页)

站都可能受到水力共振的威胁。为了消除或减小水力共振发生的可能性,在水电站水力设计中应进行水力振动分析。

依照文中所述的方法和步骤进行自由振动和强迫振动分析,可以评估水力系统的水力振动特性,在某种程度上预测水力共振发生的可能性,保证水力系统安全和正常运行。

参考文献

- 1 周建旭.水电站有压输水系统水力振动分析:[学位论文].南京:河海大学,1996
- 2 Wylie E B, Streeter V L, Suo Lisheng. Fluid transients in systems. Prentice Hall Inc., 1993

(收稿日期:1997-10-11 编辑:张志琴)

