

文章编号: 1000-4750(2006)02-0153-04

水闸钢拉索的不稳定振动分析

*罗银淼, 应祖光

(浙江大学力学系, 杭州 310027)

摘 要: 水电站事故闸门启闭系统普遍采用钢索拉杆传动, 水轮机诱发的闸门振动将会导致钢索的大幅振动, 而造成系统的失效破坏。基于对某水电站快速闸门系统振动破坏的实验和理论分析, 建立等效索的参外激振动方程, 根据 Floquet 理论进行运动稳定性分析。通常当闸门的水平摆动频率接近索的固有频率时, 将产生横向共振。而闸门的铅直波动将引起索的主、超、亚谐波失稳, 产生大幅振动, 是导致其失效破坏的一个主要原因。

关键词: 水闸门; 钢拉索; 参激振动; 不稳定性; 模态分析

中图分类号: TV312, O323 **文献标识码:** A

UNSTABLE VIBRATIONS OF A STEEL CABLE IN WATER-GATE SYSTEM

*LUO Yin-miao, YING Zu-guang

(Department of Mechanics, Zhejiang University, Hnagzhou 310027, China)

Abstract: Many accident gates in water power station are controlled by tension cable-poles. The vibration of the gates generated by water turbines may induce the strong vibration of the cables, which may damage the water-gate system. Based on the experimental and theoretical analyses of the vibration damage of a watergate, the parametrically and externally excited equations of motion of an equivalent cable are established in this paper. The stability of the cable is then analyzed according to the Floquet theory. In general, the flexural resonance occurs when the frequency of horizontal motion of the gate approaches the natural frequency of the cable. However, the vertical motion of the gate will cause the instability of fundamental, super and sub-harmonic waves in cables and generate strong vibrations, which is an important cause of damage.

Key words: water-gate system; steel cable; parameter-excited vibration; instability; modal analysis

水电站的闸门系统是控制发电与泄洪的关键设施, 其振动特性长期受到人们的关注。一般考虑是使设计的闸门固有频率远离泄洪水流的高能脉动主频率段, 以保证闸门的安全^[1]。但是由于闸门振动是一个复杂的水力学、振动力学等多学科交叉性课题, 经常有电站因为闸门失事而遭受损失。尽管目前对闸门振动已经有了许多研究^[2,3], 但是早期设计运行的闸门仍然有不少存在振动危害, 如快速事故闸门失事。快速事故闸门设置在进水口, 其功

能一旦水轮机出现紧急状态, 必须在极短时间内快速落下, 阻隔进水口的水流。因此事故闸门在一般情况下是处于全开状态, 通常这类闸门的设计考虑了闸门自重静载荷与进水口水流的水力学附加载荷, 应该能够保证其正常使用。

广东某水电站的 2# 进水口快速闸门在近 25 年的运行期间, 出现 5 次自行下坠, 一般后果是闸门启闭系统严重损坏, 每次影响发电 10~20 天, 成为该水电站的无法克服的事故隐患。根据运行记录,

收稿日期: 2004-05-16; 修改日期: 2004-07-10

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(101046)

作者简介: *罗银淼(1965), 男, 浙江宁波人, 副教授, 从事工程力学研究(E-mail: luoyimiao@zju.edu.cn);

应祖光(1963), 男, 浙江临海人, 教授, 博士, 从事动力学与控制研究。

几次破坏的现象基本类似,首先是在极大的噪声中,快速闸门缓慢下滑,并且下滑速度迅速增加,然后出现强烈震动。设备破坏情况为:钢丝绳断裂,制动器闸瓦破碎;启闭机减速箱齿轮轴断裂,断口具有疲劳裂纹特征;其它动力设备一概损坏。

该水电站进水口的快速闸门系统,由钢丝绳、动滑轮、拉杆(18#工字钢)组成,拉杆之间采用铰接;其中钢丝绳联系在卷扬机上,拉杆悬挂平板闸门,闸门背水面设置有止水橡胶,通过门槽限制左右运动。经调查发现,在多年的发电运行中,该快速闸门的钢索拉杆系统振动严重;特别是洪水季节,由于水力学因素,进水口附近出现大漩涡,由于发电出力要求水轮机的导叶开度频繁变动,使该系统振动更加剧烈。

根据多方面的分析,其振动根源在于水轮机运行时导叶的水锤激振作用,致使闸门有轻微的水平与铅直波动,从而引起钢索的横向振动。通常认为共振是导致索剧烈振动的主要原因^[4-6],而本文将从参激运动的稳定性角度进行分析,基于实际参数得到失稳是等效索大幅振动从而产生疲劳破坏的主要原因。

1 等效索的振动方程

将闸门悬挂系统简化为等效索如图1所示,其纵向与横向索运动方程如下^[7-9]

$$m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial u}{\partial t} = (T + EA\varepsilon) \frac{\partial^2 u}{\partial s^2} + EA \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} \frac{\partial u}{\partial s} \quad (1a)$$

$$m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + c_2 \frac{\partial v}{\partial t} = (T + EA\varepsilon) \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} + EA \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} \frac{\partial v}{\partial s} \quad (1b)$$

式中 u 、 v 分别为索的纵向与横向位移, m 为索单位长度质量, c_1 、 c_2 为阻尼系数, T 为索的静张力, EA 为索的拉伸刚度, s 为弧坐标, 纵向线应变

$$\varepsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

设索下端闸门的铅直与水平运动分别为 $u_B(t)$ 、 $v_B(t)$ 。作变换

$$u = \tilde{u} + \frac{s}{L} u_B \quad (3a)$$

$$v = \tilde{v} + \frac{s}{L} v_B \quad (3b)$$

式中 $\tilde{u}$ 、 $\tilde{v}$ 分别为索相对于 B 端的纵向与横向位移。将式(3)及(2)代入运动方程(1), 并利用小振幅时 $s \approx x$, 可得关于 $\tilde{u}$ 、 $\tilde{v}$ 的方程

$$m \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2} + c_1 \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = (T + EA\varepsilon) \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} + EA \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \left(\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} + \frac{u_B}{L} \right) - \frac{x}{L} (m\ddot{u}_B + c_1 \dot{u}_B) \quad (4a)$$

$$m \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial t^2} + c_2 \frac{\partial \tilde{v}}{\partial t} = (T + EA\varepsilon) \frac{\partial^2 \tilde{v}}{\partial x^2} + EA \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} + \frac{v_B}{L} \right) - \frac{x}{L} (m\ddot{v}_B + c_2 \dot{v}_B) \quad (4b)$$

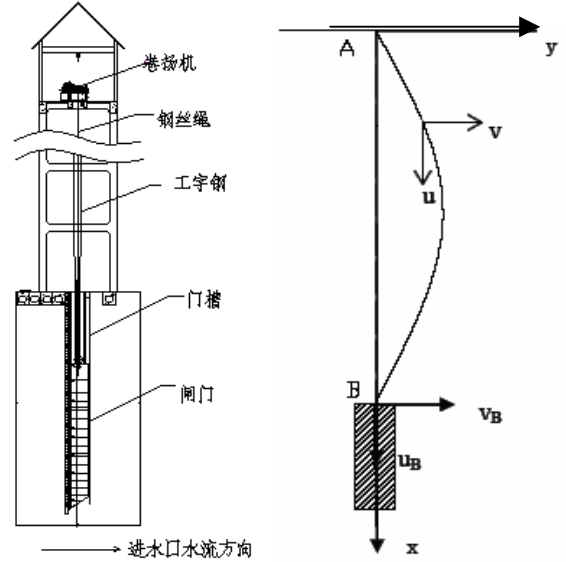


图1 闸门启闭系统及等效振动索示意图

Fig.1 Scheme of water-gate on-off system and its equivalent vibration cable

原索的边界条件为 $x=s=0$ 时, $u=v=0$; $x=s=L$ 时, $u=u_B$, $v=v_B$ 。将其代入式(3)得关于 $\tilde{u}$ 、 $\tilde{v}$ 的边界条件为

$$x=0, \quad \tilde{u} = \tilde{v} = 0; \quad x=L, \quad \tilde{u} = \tilde{v} = 0 \quad (5)$$

因索的纵向运动较小,略去其惯性力、阻尼力、位移梯度等可简化式(4a),再积分并利用边界条件得到 $T + EA\varepsilon$ ^[6]。然后,将其代入式(4b),无量纲化后,得到索横向运动方程

$$\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + c \frac{\partial w}{\partial t} = k \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + f_1(z, t) \quad (6)$$

式中各无量纲量为

$$w = \frac{\tilde{v}}{L}, \quad z = \frac{x}{L}, \quad c = \frac{c_2}{m}, \quad k = \frac{T + EA w_B}{mL^2}, \quad (7)$$

$$w_B = \frac{u_B}{L}, \quad f_1(z, t) = \frac{(\ddot{v}_B + c\dot{v}_B)z}{L}$$

通常索振动中主模态成分占优,可设横向位移

$$w = q(t) \sin \pi z \quad (8)$$

显然,它满足变换后索的边界条件(5)。将式(8)代入(6),两边乘以 $\sin \pi z$ 并积分得到索的参激振动方程

$$\ddot{q} + c\dot{q} + \pi^2 k(t)q = f(t) \quad (9)$$

式中刚度系数 k 随闸门运动 w_B 而变化,

$f(t) = -2(\ddot{v}_B + c\dot{v}_B)/(\pi L)$ 。可见闸门的横向摆动可引起共振,但其纵向波动将会导致参激不稳定振动,成为更重要的破坏因素。

2 不稳定性分析

设索下端闸门的纵向周期运动为

$$w_B = \mu \sin \omega t \quad (10)$$

式中 μ 为波动幅值, ω 为波动频率,则时变参数

$$k(t) = \frac{1}{mL^2}(T + EA\mu \sin \omega t) \quad (11)$$

因存在阻尼与外激,振动方程(9)不完全等同于 Mathieu 方程。其稳定性取决于扰动解 $\tilde{q}$ 的性态,扰动方程为

$$\ddot{\tilde{q}} + c\dot{\tilde{q}} + \pi^2 k(t)\tilde{q} = 0 \quad (12)$$

由于阻尼 c ,相应的系统是耗散型的。按照 Floquet 理论,可将扰动解 $\tilde{q}$ 表示为^[10]

$$\tilde{q} = e^{\lambda t} \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{i=1}^{\infty} (a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t) \right] \quad (13)$$

式中 λ 、 a_0 、 a_i 、 b_i 为常数。将式(13)代入(12)并比较系数,可得代数方程组

$$DX = 0 \quad (14)$$

式中向量 $X = [a_0/2, a_1, b_1, a_2, b_2, \dots]^T$, D 为系数矩阵。若要 $\tilde{q}$ 存在,则向量 X 非零,从而有

$$|D(\lambda)| = 0 \quad (15)$$

由方程(15)可解得一组特征值 λ 。当其中存在一个特征值的实部大于零时, $\tilde{q}$ 将随时间不断增大,于是方程(9)的解或索系统(6)的振动将不稳定,由失稳导致大幅振动。通常,按照分析频率确定式(13)中的 $i\omega$,并多取若干项即具有足够的不稳定结果精度。

根据实际闸门悬挂系统[图 1(a)],确定等效索的参数 $L=27.7\text{m}$; $m=16\text{kg/m}$; $c_2=0.28/16\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; $T=2.5 \times 10^5\text{N}$; $EA=6.0 \times 10^8\text{N}$ 。索的基频为 $\omega_1=2.3\text{Hz}$ 。对于给定的闸门上下波动幅值 μ 与频率 ω ,由方程(15)计算特征值 λ 并确定不稳定性,最后得到平面 (μ, ω) 上的不稳定区如图 2 所示。在索的基频 $\omega_1=2.3\text{Hz}$ 附近存在不稳定区,在半个基频 $\omega_1/2=1.2\text{Hz}$ 附近也存在不稳定区,而在两倍基频 $2\omega_1=4.5\text{Hz}$ 附近存在更大的不稳定区。因此索将会出现主谐波振动与超谐波振动失稳,更容易出现亚谐波振动失稳。主振动区的一个不稳定振动的时程曲线如图 3 所示。不稳定区大致呈倒三角形,且随参激频率增加下限降低。进入不稳定区域的扰动极小,如在较低频率段

$\mu \approx 0.5 \times 10^{-4}$,即 1.38mm 量级。而对于悬挂系统而言,特别是闸门附近水流不稳定时,这个位移量级是不大的,因此闸门悬挂系统很容易出现失稳。

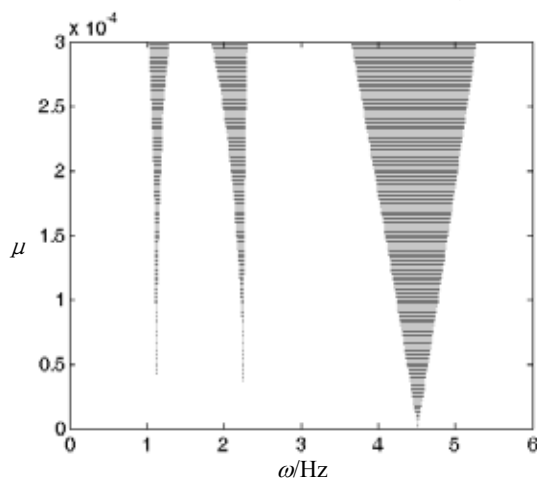


图 2 振动不稳定区

Fig.2 Unstable vibration region

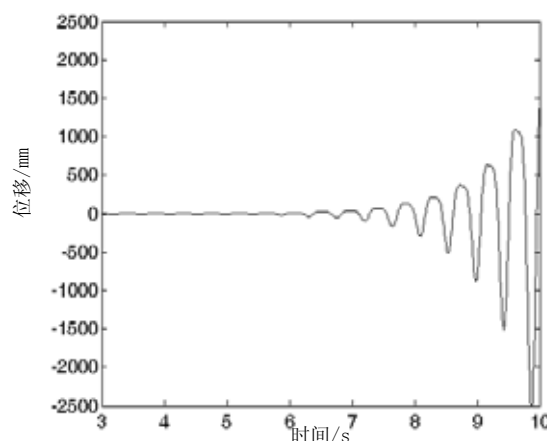


图 3 不稳定振动

Fig.3 Unstable vibration

3 现场试验

对某水电站工作状态下闸门索系统进行动力特性测试与水轮机运行时的振动监测。布置加速度传感器,在 2#水轮机关闭时,采用锤击法测试索系统的固有频率,采用东方所的 INV306F 数据采集系统及 INV618 振动分析系统,得到索系统横向振动的前 5 阶固有频率,如表 1 所示。其基频与等效索相近。

表 1 索系统横向振动的实测固有频率

Table 1 Experimental natural frequencies of the cable system in horizontal vibration

模态阶数	1	2	3	4	5
频率值/Hz	2.26	5.37	7.73	13.97	39.44

在 2#机并网运行时,测试并分析得到频域的加速度响应如图 4 所示。水锤激振频率在 14.2Hz,接近索系统第 4 阶固有频率,由图可见第 4 阶(13.97Hz)模态振动响应较大,而第 1 阶(2.26Hz)模态振动响应更大,该现象与共振机理不相吻合。而按照亚谐波失稳分析,在二分之一激振频率,即第 2 阶固有频率附近可能失稳,但因第 2 阶模态反对称,在上下基本对称的索系统不易发生。从而二分之一第 2 阶固有频率,或四分之一激振频率,即基频(2.26Hz)附近将失稳,产生大幅振动,由此可解释这一特殊实测结果。某测点(60.2m 水位)开始一段时间的加速度响应如图 5 所示,中间较大峰是由于某个冲击因素引起,总体上可以看到振动幅值不断增大的趋势。

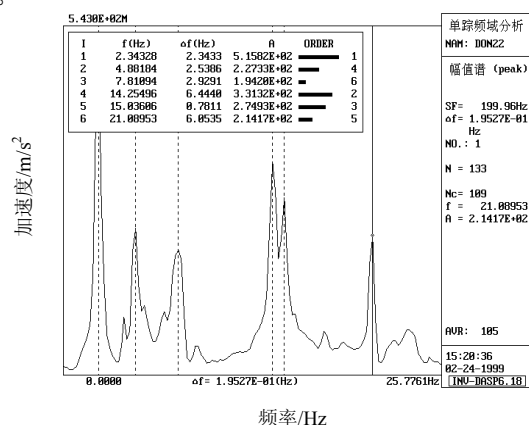


图 4 索系统的加速度谱

Fig.4 Acceleration spectrum of a cable system

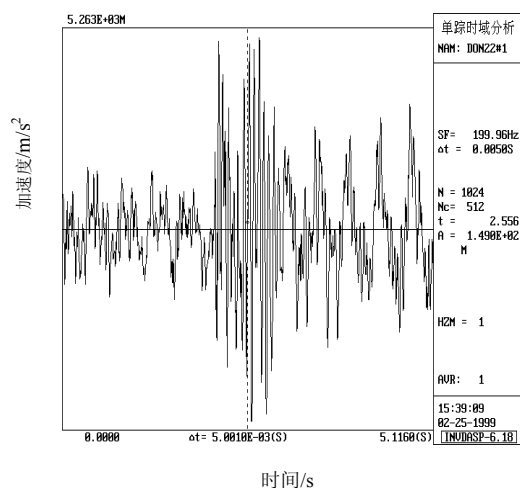


图 5 60.2m 水位拉索横向振动加速度响应

Fig.5 Horizontal acceleration response of a cable system at 60.2m water level

当然因阻尼及非线性等因素,振动幅值不可能

无限增大。测试期间索系统并未破坏,但这种大幅振动将加速其疲劳破坏。实际破坏情况主要是启闭机减速箱齿轮轴断裂与钢拉索的折断。

4 结论

本文研究了水闸钢拉索的不稳定振动问题。将闸门悬挂系统简化为等效索,建立其参外激运动方程,说明闸门的水平摆动可引起索的共振,但闸门的铅直波动将导致索的参激不稳定振动,它将是产生破坏的更主要因素。基于 Floquet 理论,分析了有阻尼参激振动的不稳定性,建立不稳定区的求解方法,并得到不稳定区,通过相应的不稳定振动模拟计算验证。分析结果较好地解释了某电站闸门悬挂系统的特殊实测结果。上述分析方法与计算结果对类似结构的设计分析具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 水电站机电设计手册. 金属结构(一)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [2] Design Handbook of electromechanical Equipment for Hydropower Station. Metal Structures I [M]. Beijing: Water Conservancy and Hydropower Press, 1988. (in Chinese)
- [3] I Knisely. Flow-induced vibration of shell-type long-span gate [J]. J. Fluids Struct., 1992, 6: 681~703.
- [4] J Ling. Flow-induced self-excited in-flow vibration gate plates [J]. J. Fluids Structures, 1988, 2: 541~566.
- [5] A P da Costa, J A C Martins. Oscillation of bridge stay cables induced by periodic motions of deck and/or towers [J]. J. Engrg. Mech., 1996, 7: 613~622.
- [6] M E Attar, A Ghobarah. Non-linear cable response to multiple support periodic excitation [J]. Engrg. Struct., 2000, 22: 1301~1312.
- [7] H Yamaguchi, M Alauddin. Control of cable vibrations using secondary cable with special reference to nonlinearity and interaction [J]. Engrg. Struct., 2003, 25: 801~816.
- [8] H M Irvine. Cable Structures [M]. Cambridge: MIT Press, 1981.
- [9] V N Pilipchuk, R A Ibrahim. Strong nonlinear modal interaction in shallow suspended cables with oscillating ends [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1997, 8: 637~657.
- [10] V Gattulli, M Lepidi. Nonlinear interactions in the planar dynamics of cable-stayed beam [J]. Int. J. Solids Struct., 2003, 40: 4729~4748.
- [11] A H Nayfeh, D T Mooh. Nonlinear oscillations [M]. New York: John Wiley & Sons, 1979.