

白山抽水蓄能电站拦污栅条振动研究

王涌涛^{1,2}, 崔莉³

(1. 河海大学环境科学与工程学院, 南京 210098; 2. 苏州科技学院环境科学与工程系, 苏州 215011;
3. 大连理工大学土木系, 大连 116024)

摘要: 本文介绍了白山抽水蓄能电站进、出口拦污栅条振动的研究方法和成果, 通过测量栅条的激振力频率和结构自振频率, 判断栅条发生共振的可能性, 对栅条疲劳进行了计算, 并对栅条寿命作出了估算。

关键词: 水利水电工程; 寿命; 流激振动; 拦污栅条; 抽水蓄能电站

中图分类号: TV32⁺ 3

文献标识码: A

Vibration test and study on trash rack at Baishan pumped storage hydropower project

WANG Yongtao^{1,2}, CUI Li³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098;
2. Department of Environmental Science and Engineering, Suzhou College of Science and Technology, Suzhou 215011;
3. Department of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: This paper introduces the method and results of the vibration study on trash rack of power intake and outlet at Baishan pumped storage hydropower project. By measuring the frequency of the exciting force on trash rack and the free vibration frequency of the trash rack structure, possible resonance occurrence can be judged, metal fatigue strength and lifetime of trash rack can be calculated.

Key words: hydropower project; lifetime; flow excited vibration; trash rack; pumped storage hydropower project

1 引言

抽水蓄能电站的上、下库引水口处, 一般均设有拦污栅。由于具有抽水蓄能两种功能, 进出口可互换。发电时上游进口为收缩流, 水流经过栅面, 流速不高, 分布较均匀, 栅体起拦污作用。下游出口为扩散流, 水流需经过喇叭口扩散段抵达栅面, 流速分布不均匀。抽水时则反之, 所以进/出水口均要满足正、反向水流的要求, 从而使得过栅水流条件较为复杂^[1]。在实际工程运用中, 抽水蓄能电站拦污栅的振动破坏是比较频繁的。主要原因还是水流的激振, 拦污栅本身结构特性对其振动关系较大, 拦污栅的边界条件对结构的自振频率有较大的影响^[2]。对大型水电站工程, 可采用物理模型与数学模型相结合的实验模态分析方法研究拦污栅的振动。

白山发电厂位于吉林省桦甸市白山镇, 第二松花江上游, 白山发电厂梯级枢纽由“一厂、三站”组成, 总装机容量 170 万 kW, 其中, 位于右岸的常规电站安装了 3 台国产单机 30 万 kW 混流式水轮发电机组, 在常规电站大坝下游左岸山体扩建的抽水蓄能电站安装了 2 台国产单机 30 万 kW 可逆式发电机组, 距白山电站下游 39km 处的红石电站安装了 4 台国产单机 5 万 kW 轴流定浆式水轮发电机组。

白山抽水蓄能电站, 将已建成的红石水库做下库, 白山水库做上库, 利用东北电网低谷时多余的电能抽水, 增加白山水库调节水量, 抬高调度运行水位, 进而提高白山电站常规机组峰荷发电量, 该电站在系统中担负调峰、填谷、事故备用等任务。电站采用地下式布置, 主要由下库进水口, 上库出水口, 输水隧洞和地下厂房等建筑物组成, 输水系统下库侧采用两机两洞, 每洞分成两跨, 共设四个拦污栅。上库侧采用两机一洞方式布置, 一洞分成四

收稿日期: 2004-08-11

作者简介: 王涌涛, 1969 年生, 男, 博士生, 讲师

* 东北勘测设计院科学研究所. 白山抽水蓄能电站进/出水口水工整体模型试验报告. 1999 年 3 月

跨,共设置四个拦污栅。本文是在大比尺模型试验的基础上研究拦污栅条的振动。

2 模型试验系统

2.1 模型设计与制作

模型按重力相似与弹性相似准则设计^[3],主要物理量的比尺见表1。经分析比较后,选择模型试验用栅条长91.6cm,宽4.66cm,厚0.6cm,密度为7190kg/m³,弹性模量为6.8×10¹⁰Pa,经验算符合相似条件。模型试验系统及测点布置见图1。

表1 栅条模型物理量的相似比尺

Table 1 Similarity scales of model terms of screen rack						
物理量	长度	流速	应变	弹性模量	应力	频率
符号	λ_l	λ_v	λ_ε	λ_E	λ_σ	λ_f
比尺值	3	$\lambda_l^{0.5}$	1	$\lambda_l \cdot \lambda_\rho$	$\lambda_l \cdot \lambda_\rho$	$\lambda_l^{-0.5}$

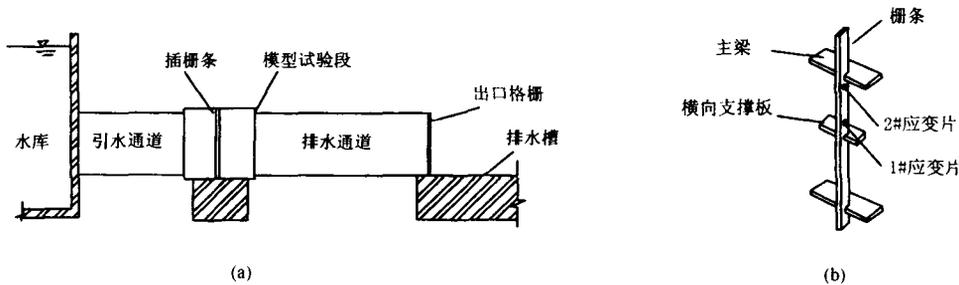


图1 栅条水弹性模型试验系统

Fig.1 Model test system for exciting force on screen rack

2.2 运行工况的模拟

拦污栅在水流作用下的动力反应特性,主要是由在一定的运行及边界条件下拦污栅处的流场特性引起的。模型试验中依据实际抽水与发电时流速分布实测资料进行模拟,如图2所示。模型试验中断面流速分布通过调节输水通道出口格片来实现。模型试验流速0.94m/s~1.32m/s,采用二维激光测速仪测量流速。

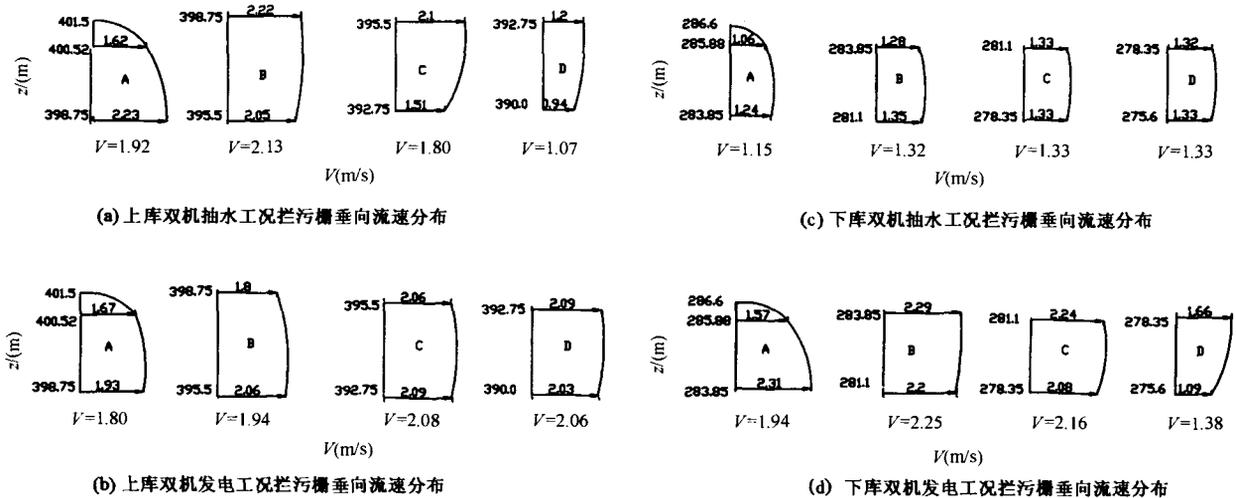


图2 过栅流速分布图(原型)

Fig.2 Distribution of velocity through screen rack(prototype)

2.3 不同流场作用下的栅条反应特性

栅条在水流作用下的反应特性,是通过采用应变片作为传感器与动态应变仪、计算机联合使用,输出应变过程并经随机数据处理给出时域、频域特性而得到的^[4]。

1. 发电情况下平均流速在(0.94~1.32)m/s的范围内,位于主梁附近的2*测点水流扰动大些,随机性明显些。1*测点应变过程呈近似窄带随机噪声,2*测点类似宽带随机噪声。而抽水工况时,1*测点又显现宽带随机噪声的特点。如图3所示。

2. 栅条在水流作用下的振动反应的幅值域特性与频域特性

发电工况下1*、2*测点的应变变幅有所差异,1*测点在46~53με,而2*测点为47~62με。1*测点的应变幅

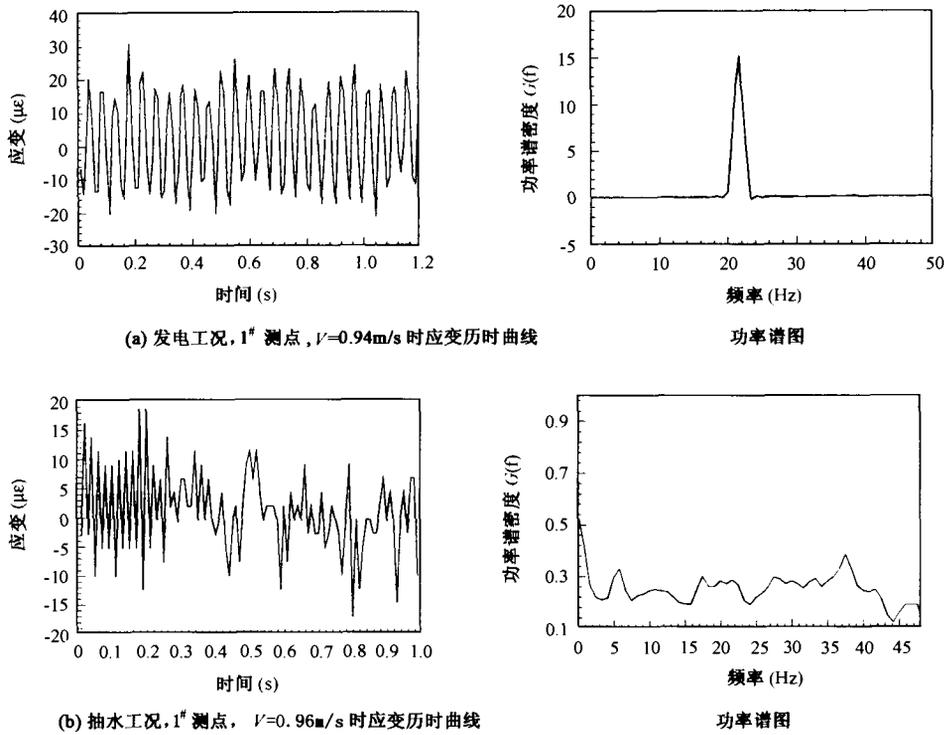


图3 两种工况下,1#测点应变历时曲线及功率谱图

Fig.3 Strain process and power spectrum on 1# spot in two cases

度、方差与峰频谱值均随平均流速的增加而变大。但谱的峰值(15~20)对应的频率却在21Hz左右几乎无变化。2#测点规律性不大,频谱无明显的尖峰值,但也存在谱值最大值所对应的频率,一般也在21Hz左右,谱函数值较1#测点小(5~6)。

抽水工况下,1#测点应变幅值均在 $31 \sim 38 \mu\epsilon$ 左右,方差在平均流速小时显得大些,谱密度函数无明显峰值,但谱密度也较小。

3 栅条流激振动分析

3.1 栅条的前缘涡激振频率

本试验所用栅条断面的宽厚比为 $c/d = 7.76$ mm,为中间值,由矩形拦污栅剖面的振动机理研究可知,此时在剪切层中形成的前缘涡进入尾流,在尾缘发生碰撞,使前缘涡与尾流耦合,这样,尾缘增加了漩涡强度,诱发振动。这时水流激振频率主要为前缘涡诱导的激振频率^[5]。如图4所示。

前缘涡的平均迁移速度 V_c 近似为流速的0.6倍,又栅条边长为 c ,则前缘涡诱导的激振频率为:

$$f = \frac{V_c}{c} = \frac{0.6V}{c} \quad (1)$$

对于本试验,栅条水流最大行进流速为 $V = 1.3$ m/s,栅条宽度 $c \approx 4$ cm。则前缘涡诱导的激振频率大约为: $f = \frac{0.6 \times 1.3}{0.04} = 20$ Hz

这与1#、2#测点在发电、抽水工况各平均流速下测得的动应变功率谱函数的峰频值为21Hz左右相吻合。

3.2 拦污栅单个栅条的固有频率与共振分析

拦污栅单根栅条的横向固有频率可由下式计算^[6]:

$$n = \frac{\alpha}{2\pi} \sqrt{\frac{EIg}{WL^3}} \quad (2)$$

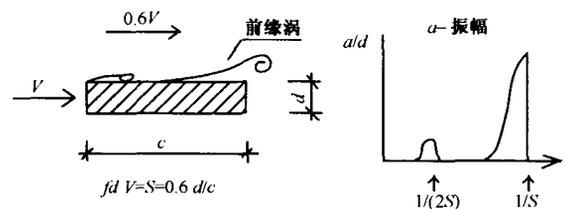


图4 矩形拦污栅剖面的振动机理

Fig.4 Vibration mechanism of rectangle screen rack

对于本试验,栅条端部的弹性固定系数 $\alpha \approx 17$,重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$,栅条重量 $W = 10.2 \text{ N}$,弹性模量 $E = 6.88 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,惯性矩 $I = 8.39 \times 10^{-10} \text{ m}^4$,栅条长 $L = 0.292 \text{ m}$,代入(2)式得: $n = 127 \text{ Hz}$ 。

即栅条在此栅架系统中在水下的自振频率为 127 Hz 左右。栅条的前缘涡激振频率如前所述为 $f = 20 \text{ Hz}$,这时 $n > 2.5f^{[7]}$,因此,该栅条设计对于水流激振来说有较大的安全余地,不会发生单根栅条的共振。

3.3 栅条的挠度

考虑图 5 所示的简支梁,长度为 l ,横截面惯性矩为 I ,弹模为 E ,在中间施加作用力 P 下的挠度为 f ,经理论推导可以得到

$$f = \frac{\epsilon \cdot l^2}{6h} \quad (3)$$

式中 l ——梁的长度; ϵ ——应变; h ——梁的厚度。

将单根栅条看作为简支梁,栅条在发电、抽水各工况下的最大应变幅度大

约为 $\Delta\epsilon_{\max} = 50\mu\epsilon$,代入式(3)得栅条在水流作用下的最大挠度为: $f_{\max} = \frac{\epsilon \cdot l^2}{6h} = 0.12 \text{ mm}$

换算到原型,原型栅条在水流作用下的最大挠度为: $f_{\max} = 0.12 \times 3 = 0.36 \text{ mm}$,原型栅条长 2.75 m ,在水流作用下的最大挠度为 0.36 mm ,还是可以接受的。

另外,栅条不加横向支撑板时 $l = 0.583 \text{ m}$,这时测得发电、抽水工况栅条中间部位横向最大应变为 $100\mu\epsilon$,当栅条加横向支撑板时 $l = 0.292 \text{ m}$,这时测得发电、抽水工况栅条中间部位横向最大应变为 $50\mu\epsilon$ 。即在栅条其它条件不变时,栅条在水流作用下的应变与栅条支撑梁间的长度成正比。这与公式(3)当 E 、 P 、 h 、 I 一定时, $\epsilon \propto l$ 相一致。同时说明缩短栅条支撑间距会提高栅条的安全性。

3.4 拦污栅单根栅条的疲劳计算

拦污栅经较长期运行应考虑材料及焊缝的疲劳而产生的损坏^[8]。对承受动力荷载重复作用的钢结构构件及其连接,当应力变化的循环次数 $m > 10^5$ 次且出现拉应力时,应进行疲劳计算^[9]。

对常幅疲劳,按下式进行疲劳计算:

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma] \quad (4)$$

$$[\Delta\sigma] = \left(\frac{c}{m}\right)^{1/\beta} \quad (5)$$

式中 $\Delta\sigma$ ——对焊接部位为应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$;

σ_{\max} ——计算部位每次应力循环中最大拉应力(取正值);

σ_{\min} ——计算部位每次应力循环中最小拉应力或压应力(拉应力取正值,压应力取负值);

$[\Delta\sigma]$ ——常幅疲劳的容许应力幅(N/mm^2);

m ——应力循环次数;

c 、 β ——参数,按不同的构件和连接类别而不同,分为 1~8 类,对拦污栅,为安全起见,取疲劳强度较低的 7 类, $c = 0.65 \times 10^{12}$, $\beta = 3$,显然这是保守的。

由(4)、(5)式,我们令 $\Delta\sigma = \left(\frac{c}{m}\right)^{1/\beta}$,整理,得

$$m = \frac{c}{(\Delta\sigma)^\beta} \quad (6)$$

由模型试验知,模型栅条在发电、抽水各工况平均流速下的最大应变幅度为 $\Delta\epsilon_m = 50\mu\epsilon$,则原形栅条的应力幅为: $\Delta\sigma = \Delta\sigma_p = E_p \cdot \Delta\epsilon_p = E_p \cdot \Delta\epsilon_m \cdot \alpha_\epsilon = 10 \text{ N/mm}^2$,代入(6)式得, $m = 6.5 \times 10^8$ 次,即原形栅条的应力循环次数为 6.5×10^8 次。

又由实验知,模型栅条在发电、抽水工况下水流激振频率为 21 Hz ,换算到原型,栅条激振频率为 $f_0 = 21 \times \frac{1}{\sqrt{3}} = 12.1 \text{ Hz}$ 。

若原型栅条 1 天运行 10 小时,1 年运转 360 天,则原型栅条在 1 年内的振动次数为 $m_1 = 12.1 \times 3600 \times 10 \times 360 = 1.57 \times 10^8$ 次。

由此,可得原型栅条的使用寿命为: $\frac{m}{m_1} = \frac{6.5 \times 10^8}{1.57 \times 10^8} = 4.1$ 年

上述是按常幅疲劳计算的,实际上栅条在水流作用下的应力随时间而变化,属于变幅荷载作用,但上面是按最大应力幅作为常幅疲劳进行计算的,显然是保守的。

4 结论

通过对长度比尺为3的单根拦污栅栅条在水流作用下的振动进行水弹模型试验研究,可以得出以下结论:

(1)栅条不加横向支撑板时,横向最大应变幅度为 $100\mu\epsilon$ 左右,最大挠度为0.94mm,换算到原型为2.83mm,应变及应力较大。当栅条加横向支撑板时,测得发电、抽水工况栅条中间部位横向最大应变幅度为 $50\mu\epsilon$ 。栅条在水流作用下的最大挠度为0.12mm,换算到原型为0.36mm,对于2.75m长的栅条来说是可以接受的。

(2)在栅条其它条件(E 、 P 、 h 、 I)不变时,栅条在水流作用下的应变与栅条支撑梁间的长度成正比。这与公式(3)相一致。

(3)发电、抽水工况各平均流速下栅条的应变幅度都在 $40\sim 60\mu\epsilon$ 左右,发电工况,栅条的应变-历时曲线比较规则,平均流速的增加几乎没有影响到优势载荷频率(21Hz),抽水工况由于水流紊动增强,造成应变-历时曲线不规则性更强,功率谱函数的峰频表现为一很宽的频带。

(4)该栅条设计对于水流激振来说有较大的安全余地,不会发生单根栅条的共振。

(5)由钢材的疲劳计算可得原型栅条的使用寿命约为4年。

参考文献:

- [1] 林勤华.抽水蓄能电站拦污栅的流激振动[J].泄水工程与高速水流,1992,(2):19~23.
- [2] 才君眉,马俊等.天荒坪抽水蓄能电站拦污栅漩涡脱落模型试验研究[J].水力发电学报,1996,(3):15~23.
- [3] 左东启等.模型试验的理论和方法[M].北京:水利电力出版社,1983年4月.
- [4] 华东水利学院.模型试验量测技术[M].北京:水利电力出版社,1983年3月.
- [5] Thang D Nguyen and Eduard Naudascher. Vibration of Beams and trashracks in Parallel and Inclined Flows[J]. ASCE, 1991,117(8):1056~1075.
- [6] 皮仙槎.抽水蓄能电站拦污栅的设计[J].水力发电学报,1990,(4):86~93.
- [7] 张邵春,赵钟民,陈兆新.邦朗电站进水口拦污栅振动试验研究[J].水力发电学报,2003,(1):76~82.
- [8] 阎诗武.水电站拦污栅的振动[J].水利水运工程学报,2001,(2):74~77.
- [9] 北京钢铁设计研究总院等.钢结构设计规范 GB50017-2003.

(上接第89页)

- [3] Mccorquodale J A., Hamam M A. Modeling surcharged flow in sewers[R]. On Urban Hydrol., Hydr. And Sediment control, University of Kentucky, Lexington, Ky., 1983:331~338.
- [4] 樊红刚,陈乃祥.明满混合瞬变流动仿真计算分析[J].清华大学学报(自然科学版),2001,11:63~66.
- [5] 陈乃祥,钱涵欣,梅祖彦.抽水蓄能电站过渡过程仿真自动建模[J].水利学报,1994,10:47~52.
- [6] 李辉,陈乃祥,樊红刚,刘立宪.具有明满交替流动的三峡右岸地下电站的动态仿真[J].清华大学学报,1999,39(11):29~31.