

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230414

基于动态应变的水轮机顶盖运行状态测试研究

陈勇旭, 郝亚鹏

(国能大渡河猴子岩发电有限公司, 四川 甘孜 626000)

摘要: 常规采用磁电式速度传感器测试顶盖振动时,受传感器固有特性和测试工况影响易出现失真,数据不能真实有效反映水轮机顶盖的运行状态。通过振动理论分析和顶盖结构受力计算,明确了激振力、振动与应变三者之间的相关性。以有限元结构分析确定顶盖刚强度的薄弱部位,提出基于该部位的动态应变值作为评价水轮机顶盖运行状态的指标参数,并以稳定运行区域的振动值和动态应变值为基准,建立应变与振动的映射关系,解决顶盖振动测值不准的问题。最后以某电站机组为例,验证了该方法的可行性。

关键词: 失真; 振动理论; 受力计算; 有限元; 动态应变; 映射; 可行性

中图分类号: TK730.4; [TV734.1]

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)09-0185-04

1 引言

顶盖为水轮机重要的支撑与过流部件,隔绝流道与水车室,防止水淹厂房。顶盖失效主要因振动超标所致^[1,2],由于水轮机顶盖振动的频率成分最低能达到1/5~1/3转频^[3],要求测试振动的传感器具有良好的低频特性,目前常用的DP型低频速度传感器尚无法有效解决相位的非线性导致的波形畸变^[4]以及弹簧振子运动的不可靠和不理想的低频特性导致波形的畸变^[5]。此外,由于水轮机内部流态的复杂性,部分工况下顶盖振动不是规则的简谐振动,王海等^[6]针对二滩电站顶盖振动测试的失真问题,发现DP型低频速度传感器对顶盖“冲击型”、“鼓面运动型”的运动特性,测试效果较差;彭兵等^[7]对比了顶盖振动值在不同测量位置的差异,进一步表明以振动值作为顶盖运行状态评价参数的不足。为此,本文以顶盖运行过程中的动态应变作为状态评价的指标参数,解决振动测试数据部分工况下不可靠问题,为机组状态在线监测系统提高状态数据准确性提供参考,助力智慧水电企业建设。

2 振动—应变关系分析

顶盖振动属于受迫振动,驱动力来源于主轴传递的机械力和转轮上腔的水动力,受力越大,振动越大。同时,顶盖属于固定部件,受力引起结构

形变,结构的刚度公式表明,受力和结构的应变呈正比关系。由此可得,以受力为中间纽带,顶盖振动与应变存在一定的联系。

2.1 顶盖振动与受力的关系

顶盖的振动可简化为有阻尼的受迫振动,即一个与旋转机械近似的模型,当其位移、速度和加速度分别与刚度、阻尼和质量相乘,组合起来,力的时间函数描述式为:

$$F(t) = KX + C\dot{X} + M\ddot{X} \quad (1)$$

式中, K 为刚度或对长度变化的阻力; X 为振动位移; C 为阻尼或流体对运动的阻力; \dot{X} 为振动速度; M 为重量; \ddot{X} 为振动加速度。

由式(1)可知,造成结构振动的位移、速度和加速度与施加在结构上的力有关,位移、速度和加速度是振动不同特征的三个量,而并非同一个量的三种名称^[8]。顶盖通过联接螺栓固定在水轮机座环上,主要受到转轮上腔的水动力和主轴通过水导轴承传递交变机械动力,这些力势必引起顶盖结构的应变,力以周期的形式出现,引起应变的周期变化,即动态应变,因此通过监测顶盖的应变,进而换算为顶盖的振动位移是可行的。

2.2 振动与应变的关系

顶盖振动的振型可近似为鼓面运动,根据顶盖的结构形式,从轴向和径向两方面阐述应变与振动的关系。

2.2.1 轴向

顶盖为一个复杂的机械结构,其外缘通过联

收稿日期: 2023-03-19, 修回日期: 2023-05-04

作者简介: 陈勇旭(1985-),男,硕士、工程师,研究方向为水电站生产技术管理,E-mail:12111280@ceic.com.cn

接螺栓固定在水轮机座环上,轴向主要受水轮机转轮上腔的水压力,为便于分析,可将该结构简化为一个悬臂梁结构。

因为梁上作用有连续分布载荷,所以在梁的全长上,弯矩可用一个函数描述,即无需分段。从坐标为 x 的任意截面处截开,因为固定端有两个约束力,考虑截面左侧平衡时,建立的弯矩方程比较复杂,所以考虑右侧部分的平衡,得到弯矩方程为:

$$M(x) = -q(l-x)^2/2 \quad 0 \leq x \leq l \quad (2)$$

式中, q 为受力; l 为悬臂梁长度。

顶盖的变形为小扰度变形,将式(2)代入到小扰度微分方程,得到:

$$E_1 w'' = -M = q(l-x)^2/2 \quad (3)$$

式中, E_1 为悬臂梁的弯曲刚度; w 为扰度。

积分后,得到:

$$E_1 w' = E_1 \theta = -q(l-x)^3/6 + C \quad (4)$$

$$E_1 w = q(l-x)^4/24 + Cx + D \quad (5)$$

式中, C 、 D 均为积分常数。

利用约束条件确定积分常数,固定端的约束条件为 $x=0, w=0, \theta = dw/dx = 0$, 得到 $C = ql^3/6, D = -ql^3/24$ 。求得扰度点切向角 $\theta = -\{4w[(l-x)^3 - l^3]\}/[(l-x)^4 + 4l^3x - l^4]$ 。

假设 x 处的应变为 ϵ_x , 可得:

$$\epsilon_x = \frac{d(l'_x - l_x)}{dl_x} = \frac{dl'_x}{dl_x} - 1 \quad (6)$$

而 $\cos\theta = dl_x/dl'_x$, 代入式(6)得到 w 与 ϵ_x 的关系:

$$\arccos\left(\frac{1}{\epsilon_x + 1}\right) = -\frac{4w[(l-x)^3 - l^3]}{(l-x)^4 + 4l^3x - l^4} \quad (7)$$

进一步得到:

$$w = -\frac{\arccos\left(\frac{1}{\epsilon_x + 1}\right) [(l-x)^4 + 4l^3x - l^4]}{4[(l-x)^3 - l^3]} \quad (8)$$

由式(8)可看出,对特定的位置, x 为常数,因此在实际的工程应用中,通过实测顶盖不同径向位置的 ϵ_x , 换算该处的垂直振动是可行的。

2.2.2 水平方向

顶盖水平主要受水轮发电机组主轴旋转中的径向力影响,文献[9]通过顶盖径向刚度的优化计算,指出顶盖的水平振动与刚度有关,径向刚度 K 的计算公式为:

$$K = F/\delta \quad (9)$$

式中, F 为径向力; δ 为顶盖径向变形量。

由垂直振动与应变的关系也可推导出变形量 δ 与应变 ϵ 具有相同的物理意义。由式(9)可知,

通过实测顶盖的应变,换算该处的水平振动可行。

3 测试方法

顶盖为一个复杂的机械构件,采用动态应变测试方法,在水轮机顶盖的状态监测中尚未采用过,因此需研究应变测试的部位和方法。

有限元通过用较简单的问题代替复杂问题后再求解,由于大多数实际问题难以得到准确解,而有限元不仅计算精度高,且能适应各种复杂形状^[10]。通过有限元分析,可近似得出顶盖受力后垂直和水平向的应变情况。通常来说,对于固定部件,应变最大处是最有可能造成疲劳破坏的部位,也就是需应变测试部位。

应变测试一般的方法是将应变片/计贴在被测定物上,使其随着被测定物的应变一起伸缩,通过测量应变片/计电阻的变化而测定应变。不考虑采集系统的采样频率等性能,应变测试可做到极低的频响,冲击、鼓面运动等振型的响应也可完整记录下来。根据测试的目的和要求,测试流程图见图1。

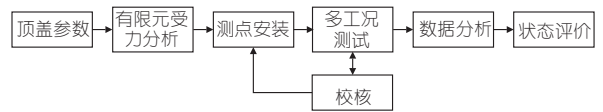


图1 基于动态应变的顶盖状态测试流程图

Fig.1 Flow chart of top cover state test based on dynamic strain

4 实例

某电站在运行过程中,顶盖振动频繁超标报警,为查明原因,对该电站顶盖运行状态进行测试分析。该电站顶盖属于周期对称结构,其水轮机及顶盖参数见表1,结构尺寸见图2。

表1 某电站水轮机及顶盖参数

Tab.1 Parameters of hydraulic turbine and head cover of a power station

参数	取值	参数	取值
额定水头/m	130.0	机组安装高程/m	1 686
最大水头/m	147.6	额定转速/(r·min ⁻¹)	125
升压水头/m	210.0	活动导叶数/个	24

4.1 有限元结构分析

该电站顶盖属于周期对称结构,根据其结构特点,选取包含四个导叶孔的1/6顶盖作为计算模型。依据结构实际主要材料属性赋予结构计算模型材料参数,顶盖结构主要材料属性见表2。

整个计算模型均采用块体单元划分网格,单元类型为 Solid187,采用分区域划分结构网格,生

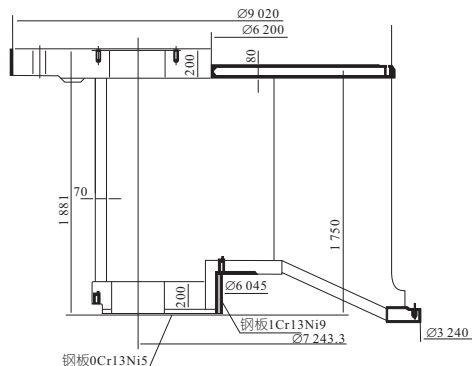


图 2 某电站顶盖结构尺寸图(单位:mm)

Fig. 2 Structural dimension diagram of the top cover of a power station

表 2 某电站顶盖结构材料属性

Tab. 2 Roof structure material property of a power station

参数	取值	参数	取值
比重/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7.85×10^3	屈服强度/MPa	205
杨氏模量/MPa	2.100×10^5	直径/mm	9 020
泊松比	0.33		

成有限单元数 114 728 个,节点数 204 572 个,有限单元模型见图 3。

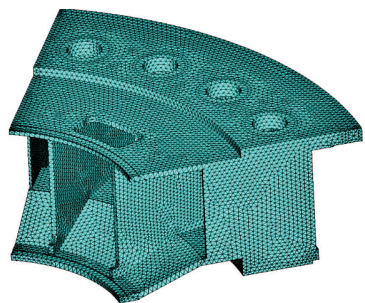


图 3 顶盖有限元计算网格图

Fig. 3 Finite element calculation grid of top cover

在顶盖剖切出的两个对称面上加周期对称边界条件,顶盖的外法兰面螺栓分布圆上约束 z 方向的自由度。顶盖运行分为正常运行和过压工况,后者对顶盖的破坏可能是瞬间且具有决定性的,因此有限元结构分析时主要采用过压工况。施加的径向力采用 100 000 N 进行计算,发现该电站顶盖垂直应变最大的部位发生在导叶套筒上部,而径向应变最大的部位发生在靠近主轴中心处。

4.2 测试分析过程

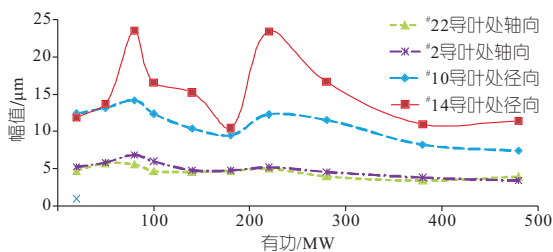
本文测试除在相应部位安装应变测点外,从有限元的结构分析可看出,应变最大的部位不受主轴密封水影响,因此在同样部位加装了 DP 型低频速度传感器作为正常工况下的校核。该机组运行区域按负荷从低至高分为禁止运行区、过渡运行区、限制运行区和稳定运行区,测试的工况点全覆盖这四个区域,每个负荷点稳定测试时间不少于 5 min,测试数据见表 3,顶盖应变和振动幅值随负荷变化的趋势见图 4,选取 220 MW 时

表 3 某电站顶盖振动和应变测试数据

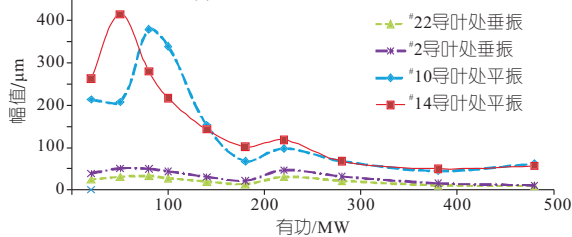
Tab. 3 Data for vibration and strain testing of the top cover of a certain power station

工况 /MW	轴向应变/ $\mu\epsilon$		径向应变/ $\mu\epsilon$		垂振/ μm		平振/ μm	
	# 22 导叶	# 2 导叶	# 10 导叶	# 14 导叶	# 22 导叶	# 2 导叶	# 10 导叶	# 14 导叶
20	4.8	5.3	12.4	11.9	25	39	213	263
50	5.8	5.9	13.2	13.7	31	51	207	415
80	5.6	6.9	14.2	23.5	33	50	379	280
100	4.7	6.0	12.4	16.5	28	44	339	217
140	4.6	4.8	10.4	15.3	20	31	153	143
180	4.8	4.8	9.5	10.5	14	22	68	102
220	5.0	5.2	12.3	23.4	31	47	98	118
280	4.0	4.6	11.5	16.6	22	32	68	68
380	3.4	3.8	8.2	11.0	11	16	45	50
480	4.0	3.4	7.4	11.5	10	11	62	57

注:表中应变和振动值为平均峰值;轴向应变对应垂振,径向应变对应平振。



(a) 变负荷顶盖应变幅值趋势图



(b) 变负荷顶盖振动幅值趋势图

图 4 变负荷顶盖应变、振动幅值趋势图

Fig. 4 Trend diagram of strain and vibration amplitude value of variable load top cover

的 # 10 导叶处径向应变和平振作为特征点进行频谱分析,见图 5。

对比图 4(a)、(b)可看出,应变和振动峰峰值变化趋势基本一致,全负荷段主要出现两个峰值,分别为禁止运行区和限制运行区,前者受偏离最优工况的紊乱水流影响,后者受尾水管低频涡带影响,从禁止运行区(低负荷段)的表现来看,顶盖两个测点的水平振动分别在 50、80 MW 达到峰值,而应变的峰值均出现在 80 MW,更加契合水轮发电机组的运行特点。由图 5 频谱的对比来看,应变占据主导作用的三个频率分量分别为 0.488 Hz(低频涡带频率)、2.1 Hz(1 倍频)、4.15 Hz(2 倍频),与相同位置的顶盖平振频谱一致,从频响上证明了应变与振动的相关性。

在禁止运行区,监测到的顶盖平振几乎均超过 200 μm ,超过标准的要求,也远大于制造厂家

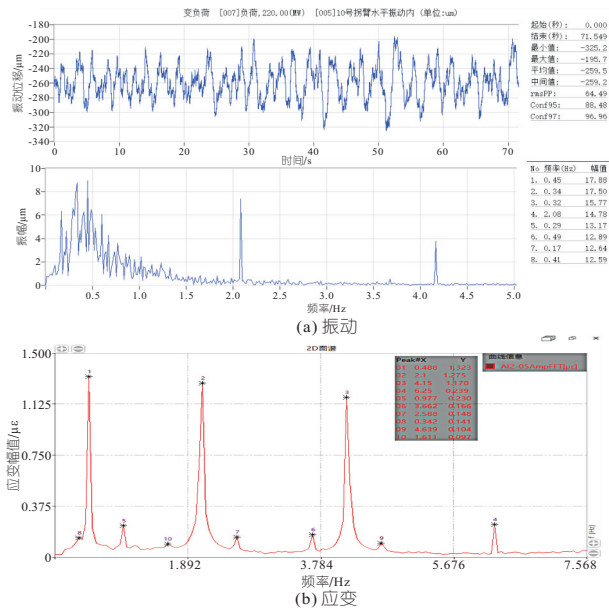


图5 220 MW时#10导叶处振动和应变频谱
Fig. 5 Vibration and strain spectrum at #10 guide vane at 220 MW

的允许值,这也是该电站顶盖振动频繁报警的直接原因。为进一步探究顶盖振动的真实性,有必要对低负荷下振动和应变的频率进行分析,80 MW时#10导叶处的顶盖平振时域波形显示有较为明显的冲击型波形,主要频段在0.5 Hz左右,接近该型传感器频响的下限,在此情况下,有理由怀疑该工况振动数据的准确性,而应变的频谱主要以转频为主,符合该处顶盖的运行特性。

综合幅值趋势和频率响应看,以动态应变作为指标参数,具备评价顶盖运行状态的条件,甚至在低负荷区域,相比较振动,应变幅值更加可靠。

4.3 建立映射关系

目前的行业标准、国家标准均采用顶盖振动作为评价依据,以该型机组为例,标准规定顶盖水平振动不超过0.07 mm,垂直振动不超过0.09 mm。以应变作为评价参数,尚无规程规范的要求,因此需建立应变和振动的映射关系,将应变值换算为振动值进行评价。

在全负荷段稳定运行区基本无紊乱水流和常规压力脉动的影响,480 MW时振动和应变的测值处于稳定的状态,幅值最小,以该区域两者的比值作为基准,换算得到的其他工况振动值见表4。由表4可知,因应变与振动的趋势一致,由应变换算的振动值与原振动值变化趋势较为一致,但换算值总体幅值较原振动值小,尤其是低负荷段更加明显。相比较原振动值在低负荷段动辄数百微米的振幅,换算的振动值尽管略微超标,但尚未达到完全无法接受的程度,通过图6可看出,其波形也无明显的畸变现象。

表4 换算得到的顶盖振动幅值

Tab. 4 Converted vibration amplitude of top cover

工况 /MW	垂振(原振 动值)/μm		垂振(应变换算 的振动值)/μm		平振(原振 动值)/μm		平振(应变换算 的振动值)/μm	
	# 22 导叶	# 2 导叶	# 22 导叶	# 2 导叶	# 10 导叶	# 14 导叶	# 10 导叶	# 14 导叶
20	25	39	12	17	213	263	104	59
50	31	51	14	19	207	415	110	68
80	33	50	14	22	379	280	119	117
100	28	44	12	19	339	217	104	82
140	20	31	12	16	153	143	87	76
180	14	22	12	15	68	102	80	52
220	31	47	13	17	98	118	103	116
280	22	32	10	15	68	68	97	82
380	11	16	9	12	45	50	69	54
480	10	11	10	11	62	57	62	57

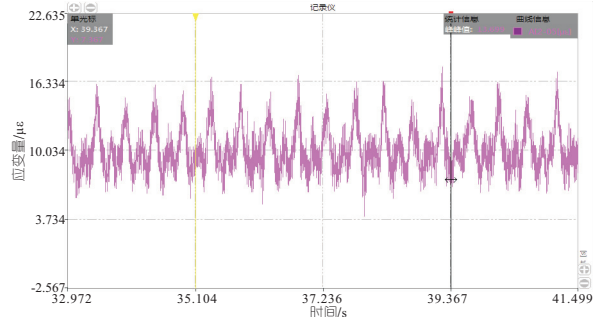


图6 80 MW时#10导叶处径向应变录波图
Fig. 6 Radial strain oscillograph at #10 guide vane at 80 MW

需要说明的是,本文试验选取的基准仅是单点单次的的数据,存在一定的统计误差,影响映射关系的精确度,后续可通过数据的积累,采用大数据技术进一步修正映射关系。

5 结论

a. 通过分析顶盖受力、振动、应变三者之间的关系,在理论上解决了以动态应变评价顶盖运行状态的可行性,结合有限元结构分析可快速定位顶盖的薄弱点。

b. 某电站机组的实测表明,顶盖振动和应变在不同的工况下频谱高度一致,幅值变化趋势基本一致,分别从幅值响应和频率响应两方面证明了振动和应变的相关性,甚至在低负荷段,相比较振动数据的异样,应变幅值更加可靠。

c. 以稳定工况区数据作为基准,建立起应变和振动的映射关系,用应变值换算出振动值,可作为顶盖运行状态评价的依据。

d. 针对顶盖振动测试不准的情况,作为一次有益的尝试和验证,本文提供了基于动态应变的一种全新测试方法,一定程度上弥补了当前顶盖状态监测的不足。

optimization of hydropower unit based on stress measurement of Francis Turbine runner[J]. *Frontiers in energy research*, 2022,10. Doi:https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.885634.

[2] 寇攀高. 水轮发电机及其调速系统的参数辨识方法与控制策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.

[3] 周攀, 周建中, 赖昕杰, 等. 基于精细化模型的抽水蓄能机组低水头开机多目标优化[J]. *水电能源科学*, 2019,37(9):128-132.

[4] 张玲, 张钺. 佳点集遗传算法[J]. *计算机学报*, 2001, 24(9):917-922.

[5] 孙文涛, 蔡晖, 张文嘉, 等. 基于 IOLBBO 算法的水轮机非线性模型参数辨识[J]. *水电能源科学*,

2018,36(1):152-155.

[6] 杨堃, 杨侃, 华萍, 等. 基于改进鲸鱼算法的三峡水电站经济运行模型及其应用[J]. *水电能源科学*, 2020,38(6):46-49.

[7] BAN JIANMIN, PAN XINYU, GU MINMING. Electrical characteristics estimation of photovoltaic modules via cuckoo search-relevant vector machine probabilistic model [J]. *Frontiers in energy research*, 2021, 9. Doi: https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.610405.

[8] 段绍米, 罗会龙, 刘海鹏. 人群搜索和樽海鞘群的混合算法优化 PID 参数[J]. *系统仿真学报*, 2022, 34(6):1230-1246.

Startup Optimization of Hydroelectric Generating Set Based on Improved Grey Wolf Search Coupled Cuckoo Algorithm

LI Bai-lin, GONG Zi-rui, YANG Lin-ming, YANG Jian, HE Qiang

(College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: In order to shorten the start-up time of the hydroelectric generating set and improve the stability of the generating set's start-up process and non-loading, a start-up optimization strategy of hydropower unit based on improved grey wolf search coupling cuckoo algorithm was proposed. This fitness function weighs the two index values of the unit's start-up frequency ITAE index and the unit's start-up time and standardizes them. Two penalty functions of unit frequency overshoot and unit frequency steady-state error are introduced to effectively improve the start-up performance evaluation index of the hydroelectric generating set. An improved grey wolf search coupled cuckoo algorithm (IGWSCSA) based on good point set theory to improve the initial population is proposed to optimize the start-up parameters of the generating set. Based on the simulation experiment of the refined model of the speed control system, the optimal parameters are obtained to shorten the start-up adjustment time of the generating set, and the overshoot is reduced from 0.235 to 0.004, which greatly optimizes the start-up speed and frequency fluctuation of the hydroelectric generating set.

Key words: hydroelectric generating set; startup optimization; per-unit value; good point set; swarm intelligence algorithm; parameter optimization

(上接第 188 页)

参考文献:

[1] 谭文胜, 万元, 夏代雄, 等. 大型水轮机顶盖动态特性数值模拟与试验研究[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(9):175-178.

[2] 练继建, 王婷杰, 王海军, 等. 基于原型振动测试的水轮机顶盖螺栓疲劳分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(3):248-253.

[3] 周劲松. 耦合故障下水轮机振动特性分析[J]. *中国农村水利水电*, 2015(10):194-196, 201.

[4] 俞阿龙, 黄惟一. 振动速度传感器幅频特性改进方法的研究[J]. *自动化仪表*, 2004(5):4-7.

[5] 江学文. 水轮发电机组振动保护工程应用研究[J].

中国农村水利水电, 2012(6):128-131.

[6] 王海, 郑莉媛, 冯正祥, 等. 水轮发电机组低频振动异常信号分析研究[J]. *水力发电*, 2003(3):31-34, 46.

[7] 彭兵, 李友平, 曹长冲, 等. 大型水轮机顶盖振动传感器安装位置对比分析[J]. *大电机技术*, 2016(2):33-36, 56.

[8] J. S 米切尔. 机械故障的分析与监测[M]. 北京:机械工业出版社, 1990.

[9] 袁东东. 混流式水轮机顶盖径向刚度分析和优化[J]. *电机技术*, 2016(6):33-35.

[10] 贾伟, 李建伟, 刘晶石, 等. 某轴流式水轮机顶盖有限元分析及结构优化设计[J]. *电力学报*, 2014, 29(4):349-352.

Research on Test of Hydraulic Turbine Top Cover Running State Based on Dynamic Strain

CHEN Yong-xu, HAO Ya-peng

(Guodian Dadu River Houziyan Hydropower Construction Co., Ltd., Ganzhi 626000, China)

Abstract: When the magnetolectric velocity sensor is used to test the vibration of the top cover, distortion is easy to occur due to the inherent characteristics of the sensor and the test conditions, and the data can not truly and effectively reflect the operation state of the water turbine top cover. The correlation among excitation force, vibration and strain was clarified through vibration theoretical analysis and stress calculation of top cover structure. Using finite element structural analysis to determine the weak position of the rigidity and strength of the top cover, the dynamic strain value based on this position was proposed as an indicator parameter for evaluating the operation status of the hydraulic turbine top cover. Based on the vibration value and dynamic strain value in the stable operation area, a mapping relationship between strain and vibration was established to solve the problem of inaccurate vibration measurement of the top cover. Taking a power plant unit as an example, the feasibility of the proposed method was verified.

Key words: distortion; vibration theory; force calculation; finite element method; dynamic strain; mapping; feasibility