

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230149

水电机组轴系瞬时涡动特征提取与振动平稳性评估

姬联涛¹, 王璞², 荆岫岩², 李泽², 何鸿翔³, 李超顺³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031;
3. 华中科技大学土木与水利工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为有效判别水电机组振动平稳状态, 研究了转子振动过程的涡动特征和轴系振动平稳性评估方法。首先推导了瞬时涡动角速度的理论表达结果, 并分析涡动角速度的特征参数, 然后提出轴系振动过程的全息涡动速度分析方法, 建立轴系振动过程的涡动特征指标和振动平稳性评价指标, 最终将本文理论用于浙江仙居抽水蓄能电站轴系振动数据分析, 提取振动的关键涡动特征指标并评估轴系平稳性。结果表明, 所建立的特征指标具有良好的轴系振动平稳性表达能力, 对于实际水电机组振动状态监测和性能评估有广阔的应用前景。

关键词: 水电机组; 特征提取; 涡动角速度; 全息涡动分析; 振动平稳性

中图分类号: TV734.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)12-0182-04

1 引言

水电在风光发电系统中具有重要的保障作用。因此, 水电安全是电力系统安全稳定的基础。机组状态监测分析中应用最广泛的是通过振动信号进行机组故障诊断^[1-2]。转子进动是振动的一种运动形式, 也称为转子涡动。1993年, Bently公司提出全谱理论^[3], 将转子的椭圆轴心轨迹分解成正进动过程和反进动过程。廖明夫等^[4-5]剖析了转子运动的进动规律, 导出进动圆面积和周长定理, 并通过进一步研究转子进动特征^[6-7], 将转子运动分解为正反进动分量; JAHROMI A F等^[8]研究了具有陀螺效应的转子前向进动和反向进动行为, 验证了转子在下降滑行过程中存在反向进动现象; XIE J等^[9]提出旋转周期内轴心轨迹瞬时涡动速度的概念, 研究了瞬时转速的瞬态特性并用于转子裂纹深度检测。转子涡动现象广泛存在于各种旋转机械中, 现有对旋转机械转子涡动的研究主要是对涡动过程的宏观分析, 如涡动方向判别, 而无法有效识别轴系振动健康状态, 在实际中缺乏应用指导作用。鉴此, 本文针对振

动稳定性评估问题, 从水电机组转子涡动规律研究出发, 通过分析轴系振动的瞬时涡动特征, 提取涡动特征参数, 最终实现实际机组复杂振动过程分解量化分析, 通过振动轴心轨迹和涡动特征量化指标评估轴系振动的平稳性, 试验表明所提指标特征可描述轴系运行平稳程度, 具有较高的实用价值和技术可行性, 可有效提升机组状态识别和安全保障水平。

2 研究方法

2.1 轴系振动分析

轴系振动时, 转子轴的中心与理想状态不同, 不是静止的, 而是出现整体运动, 这种转子绕轴旋转同时出现轴的空间运动称为涡动^[10]。根据动力学原理可得振动响应为:

$$\begin{cases} x(t) = a \cos(\omega t + \varphi_x) \\ y(t) = b \sin(\omega t + \varphi_y) \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 、 b 分别为振动幅值; ω 为信号角频率; φ_x 、 φ_y 分别为信号初相位。

2.2 转子振动瞬时涡动角速度分析

轴心轨迹表达了某一截面的转子轴心振动位

收稿日期: 2023-02-07, 修回日期: 2023-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279085); 湖北省重点研发计划项目(2021BAA193)

作者简介: 姬联涛(1985-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为大型同步电机变速运行控制、常规水电及抽水蓄能设备可靠性分析, E-mail: jiliantao@epri. sgcc. com. cn

通讯作者: 李超顺(1983-), 男, 教授, 研究方向为水电、风电等清洁能源优化运行与控制、发电设备智能维护及人工智能的应用, E-mail: csli@hust. edu. cn

置变化规律,表达轴心在平面上的运动全貌,展示了转子中心与理想状态的轴心位置偏差。角速度是圆周运动的一个重要特征,是圆周上点相对圆心位置的相位变化速度。类似的,将椭圆上的点相对中心的角位置变化速度作为轴心涡动角速度。如图 1,点 P 表示轴心当前位置。由图 1 可知, OQ 的角速度 ω 为恒定值,相对可看出 P 在椭圆上运动时旋转角速度不是 ω ,且其大小是随时间和 P 的位置变化。

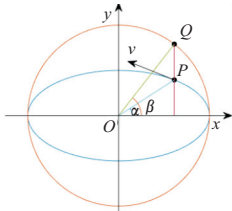


图 1 转子轴心运动过程

Fig. 1 Rotor whirling process

基于 x 、 y 正交测量到的振动位移数据,瞬时涡动角速度分析过程如下。以 O 为坐标中心, x 、 y 与两个传感器测量的方向保持一致,用矢量 $r = \vec{OP}$ 表示轴心 P 的位置。为了分析运动的时变性,轴心运动的全过程可表示为:

$$r = x(t) + iy(t) \tag{2}$$

由式(2)求取 OP 的相位 $\varphi(t)$:

$$\varphi(t) = \arctan[y(t)/x(t)] \tag{3}$$

涡动角速度定义为相位对时间的变化速率,即:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{d\{\arctan[y(t)/x(t)]\}}{dt} = \frac{1}{1 + [y(t)/x(t)]^2} \frac{x(t)y'(t) - x'(t)y(t)}{x^2(t)} \tag{4}$$

对实际转子的转子系统,各轴承面处的振动可用类似方程表示,代入 $\omega(t)$ 可计算出:

$$\omega(t) = \frac{1}{x^2(t) + y^2(t)} \omega_{ab} \cos(\varphi_x - \varphi_y) \tag{5}$$

$\omega(t)$ 为时间的函数,说明转子轴心在不同位置的运动特征会发生变化。 $\omega(t)$ 的大小与 $r^2(t) = x^2(t) + y^2(t)$ 的倒数成正比。

图 2 为 $\omega(t)$ 通过仿真分析的时域波形,轴心在轨迹上运动一周 $\omega(t)$ 会呈两个周期变化,分

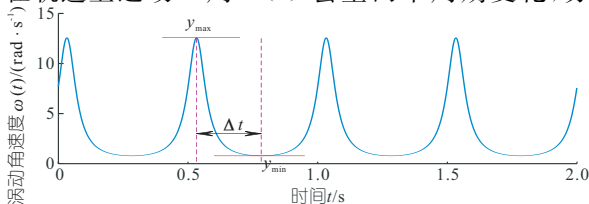


图 2 瞬时涡动角速度图

Fig. 2 Instantaneous whirling angular speed diagram

析图 2 中极值可得:

$$y_{\max}/y_{\min} = m^2/n^2 \tag{6}$$

$$y_{\max}y_{\min} = K/(m^2n^2) \tag{7}$$

式中, y_{\max} 、 y_{\min} 分别为瞬时涡动角速度的极大、极小值; m 为椭圆轨迹半长轴的大小; n 为半短轴的大小; K 为常数,与 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的幅值和相位有关。

各极大值和极小值点处的值其实反映了椭圆轨迹的长轴和短轴参数特征。

3 轴系涡动特征及稳定性分析

3.1 复杂轴心轨迹全息涡动分析方法

实际中水电机组的轴心轨迹复杂多变,可能呈椭圆形、香蕉形、外 8 形、内 8 形及花瓣形等形状且还有附加噪声。本文建立轴系振动全息涡动分析方法,更深入、准确地识别轴系振动状态和运行规律,且对于复杂多变的轨迹具有普遍适用性。

轴系振动全息涡动分析步骤如下。

步骤 1 获取轴系截面振动的正交测量信号,进行信号预处理,如消除趋势、去除噪声。

步骤 2 分析振动信号的频率成分,根据两个方向信号的频谱分量的能量大小,确定信号主要频率成分,则 $x(t)$ 、 $y(t)$ 振动信号可表示为:

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{k=1}^N a_k \cos(k\omega t + \varphi_{xk}) \\ y(t) = \sum_{k=1}^N b_k \sin(k\omega t + \varphi_{yk}) \end{cases} \tag{8}$$

式中, N 为选定的主信号分量个数。

步骤 3 通过频谱分析结果,合成各频率分量对应的振动轨迹,针对每个轨迹进行瞬时涡动角速度特征分析。

步骤 4 基于信号主频率分量可重构信号,得到纯净轴心轨迹,而利用去噪的轴心轨迹可分析轴系涡动的总体过程,利用微分计算方法,分析轨迹上的点相对中心的角位置变化速度作为轴心涡动角速度,可表达轴系涡动的变化过程,轴心在第 i 个轨迹点处的瞬时涡动速度 ω_i 为:

$$\omega_i = (\theta_{i+1} - \theta_i) / \Delta t \tag{9}$$

式中, θ_i 为轴心相对中心的角位置。

步骤 5 通过分量涡动信号的深入特征挖掘与总体轨迹涡动特征表达联合分析轴系振动状态特征。

3.2 轴系涡动特征

理想状态下的轴系振动轴心轨迹为圆形,且振动幅度小,轴系保持稳定的运动状态。针对轴系涡动,构建主要特征如下。分量轨迹离心率 e 。

计算公式为：

$$e = \sqrt{m^2 - n^2} / m \quad (10)$$

涡动速率波动方差 ω_{var} 计算公式为：

$$\omega_{\text{var}} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega})^2 \quad (11)$$

涡动速率周期平均离散度 ω_{div} 计算公式为：

$$\omega_{\text{div}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\omega_i - \bar{\omega}| \frac{\Delta t}{2\pi} \quad (12)$$

峰值系数 ω_f 计算公式为：

$$\omega_f = \frac{|\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}|}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i^2}} \quad (13)$$

偏度因子 ω_{sf} 计算公式为：

$$\omega_{\text{sf}} = \frac{1}{N} \frac{\sum_{i=1}^N (|\omega_i - \bar{\omega}|)^3}{\left(\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i^2} \right)^3} \quad (14)$$

3.3 轴系振动稳定性评估

轴系涡动是水电机轴系的瞬时运动状态，通过轴系涡动过程特征构建稳定性指标。建立综合评估轴心轨迹图形与瞬时涡动特征参数的轴系振动稳定指标。

(1) 轨迹畸变度。评价估计振动偏心距离波动程度 O_{tor} ：

$$O_{\text{tor}} = \text{var}(r_0) / [\max(r_0) - \min(r_0)] \quad (15)$$

式中， r_0 为轴心与中心位置的距离。

(2) 轨迹分频涡动稳定度。提取涡动速率波动方差 ω_{var} 、涡动速率周期离散度 ω_{div} 、峰值系数 ω_f 、偏度因子 ω_{sf} 。为评价轨迹总涡动稳定性，定义分频涡动稳定度 W_{WI} ：

$$W_{\text{WI}} = \sqrt[4]{\omega_{\text{var}} \omega_{\text{div}} \omega_f \omega_{\text{sf}}} \quad (16)$$

(3) 涡动综合稳定度。综合多分量振动轨迹与涡动信号特征，构建分量涡动平稳性指标 F_{FWI} ：

$$F_{\text{FWI}} = \prod_{i=1}^n \frac{m_i + n_i}{2 \sqrt{m_i n_i}} \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n \frac{1 + W_{\text{WI}_i}}{1 - e_i}} \quad (17)$$

式中， n 为频率分量个数； W_{WI_i} 为第 i 个频率分量的涡动稳定度。

(4) 轴系振动综合稳定指数 S_{SI} 。为了评估轴系振动平稳性，综合分析轴系振动轨迹图形特征、总体涡动过程和分量振动特征，建立轴系振动综合稳定评价指数 S_{SI} ：

$$S_{\text{SI}} = \alpha |1 - O_{\text{tor}} W_{\text{WI}}| + (1 - \alpha) F_{\text{FWI}} \quad (18)$$

式中， α 为线性权重因子， $0 < \alpha < 1$ 。

4 实例分析

试验分析所用数据为浙江仙居抽水蓄能电站机组的轴承摆度数据，试验选取机组在同一发电工况下机组上导轴承、下导轴承和水导轴承处测得的振动数据，各包含了 x 、 y 两个互相垂直方向的信号。数据采集频率为 640 Hz，分析数据包含 2 048 个采样值。

4.1 全息涡动分析

由 3 组振动信号时域波形及由振动信号合成的轴心轨迹可知， x 、 y 两个信号具有相同的频率成分。重构信号的分量选取原则是提取原始信号频谱中幅度最大的频率分量，去除高频干扰成分，选择主要分量频率结果见表 1。其中，数据 1、2、3 分别代表上导轴承、下导轴承和水导轴承监测数据。

表 1 重构信号分量频率

Tab. 1 Frequency of reconstructed signal			Hz		
数据 1	数据 2	数据 3	数据 1	数据 2	数据 3
0.94	0.31	0.31	20.00	20.00	12.19
5.00	0.94	1.87	25.00	25.00	20.00
10.00	5.00	5.00	30.00		35.00
15.00	15.00	10.00	35.00		40.00

基于重构的轴心轨迹直接计算轴系涡动速度，以数据 1 为例分析全息涡动特征，选择其中幅值最大的几个主要低频成分用于分析，计算分频涡动特征见图 3。由图 3 可看出，不同的频率信号合成的轴心轨迹均为椭圆，低频分量的幅值相对较大。图 3 中还分别得到了全息运动轨迹下的瞬时涡动角速度结果，并标出一个振动周期内的涡动速度平均值，轨迹与圆的偏差较大，说明机组可能存在轴系不平衡。

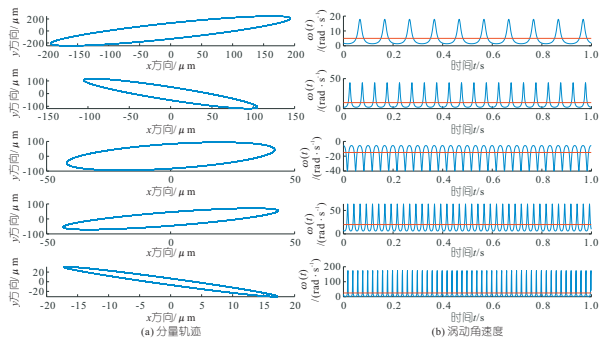


图 3 全息谱分析与分频涡动角速度

Fig. 3 Holo-spectrum analysis and whirling angular velocity

4.2 涡动特征分析

根据式(10)~(14)量化分析轨迹参数和涡动特征，分析图 4 所示总体涡动和分频涡动特征的特征值，结果见表 2、3。

由表 3 可知，总体涡动特征显示出数据 2 各项特征值最小，代表轴系运行平稳，数据 1、3 数值更大，体现平稳性较弱。对于分频涡动特征，按不同特征指标将 3 组数据绘成折线图，对每一种特

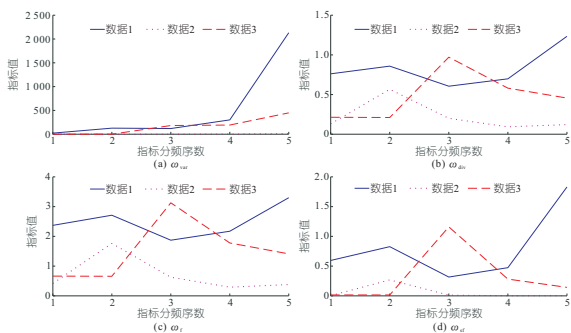


图 4 主要分频涡动特征指标结果

Fig. 4 Chief frequency decomposed whirling feature

表 2 总体涡动特征分析结果

Tab. 2 Total whirling feature analysis results

数据	ω_{var}	ω_{div}	ω_f	ω_{sf}
1	3 662.25	3 586.34	11.62	5.95
2	36.53	0.25	1.20	0.03
3	590.17	0.98	4.95	0.71

表 3 分频涡动特征分析结果

Tab. 3 Frequency decomposed whirling feature analysis results

数据	频率/Hz	m	n	e	ω_{var}	ω_{div}	ω_f	ω_{sf}
1	5.000	302.32	84.59	0.960	23.210	0.76	2.37	0.590
	10.000	154.10	35.63	0.973	127.850	0.86	2.71	0.830
	15.000	96.94	36.07	0.928	119.320	0.60	1.87	0.320
	20.000	79.53	24.95	0.949	301.330	0.69	2.17	0.470
	25.000	35.27	4.09	0.993	2 132.420	1.23	3.30	1.830
2	0.310	13.77	11.17	0.580	0.002	0.13	0.42	0.004
	0.940	54.73	22.03	0.910	0.380	0.57	1.76	0.270
	5.000	560.06	408.41	0.680	1.260	0.20	0.63	0.010
	15.000	41.70	36.03	0.500	2.410	0.09	0.29	0.001
3	25.000	14.86	12.28	0.560	11.410	0.12	0.38	0.003
	1.875	18.20	13.02	0.690	0.200	0.21	0.66	0.020
	5.000	275.06	197.25	0.700	1.390	0.21	0.66	0.020
	10.000	140.42	25.75	0.980	182.470	0.97	3.13	1.160
	20.000	22.08	8.61	0.920	192.780	0.58	1.78	0.280
40.000	22.46	10.81	0.880	448.660	0.46	1.41	0.140	

征指标,比较 3 组数据的特征值分布关系,观察表 3 及图 4 中 3 组数据的计算结果,对比不同振动过程之间的关联和差别,仅用 e 难以准确有效判断振动平稳状态。由图 4 可知,3 种数据的特征可大致分为 3 层,数据 2 的特征值较小,轨迹也相对更稳定,数据 1、3 的数值相对更大,轨迹则呈较大波动,变化剧烈。比较数据 2、3 的结果,两种轨迹具有一定的相似性,但数据 3 扰动较多,特征值更大。可见特征指标可有效表征振动稳定性。

4.3 振动稳定性分析

对于复杂的振动过程,需构建全面准确评估振动状态的综合平稳性指标。取 $\alpha = 0.5$,由式 (15)~(18) 获得分频涡动特征分析结果见表 4。由表 4 可知,数据 2 的各项特征值均相对较小,总的 S_{SI} 值也最小,表明轴系该部分运行较稳定,数据 3 的稳定性则相对不足,而数据 1 的数值均较

表 4 分频涡动特征分析结果

Tab. 4 Whirl feature analysis results

数据	O_{tor}	W_{WI}	F_{FWI}	S_{SI}
1	20.06	173.61	802.54	2 141.90
2	16.02	0.77	0.74	6.07
3	14.93	6.71	24.17	61.67

大,振动平稳性最低,轴承可能受到电磁力的影响。轨迹畸变度 O_{tor} 的分布规律与 W_{WI} 、 F_{FWI} 不同,仅通过 O_{tor} 无法准确判别轴系振动状态,而联合轨迹特征与涡动特征可综合评估轴系振动的总体与内在特征,具有更高的可靠性。

5 结论

a. 针对水电机组轴系振动状态稳定性评估难题,研究了转子的瞬时涡动特征,提出了基于瞬时涡动信号的稳定性评估指标。

b. 通过真实机组振动过程数据分析,确定提出的涡动特征参数和振动平稳性评价指标对不同振动过程具有较强的敏感性,可深入挖掘振动特征信息,有效量化评估轴系振动状态的稳定性。

参考文献:

- [1] 胡晓,肖志怀,刘东,等. 基于 VMD-CNN 的水电机组故障诊断[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 137-141.
- [2] 杨彤,王卫玉,张培,等. 基于 CEEMDAN 和混合灰狼算法优化 SVM 的水电机组故障诊断方法[J]. 水电能源科学, 2022, 40(3): 195-198.
- [3] GOLDMAN P, MUSZYNSKA A. Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics[J]. Orbit, 1999, 20(1): 17-21.
- [4] 廖明夫,汪玉,谭大力. 转子进动分析的 4 个定理[J]. 航空动力学报, 2008(2): 281-285.
- [5] 廖明夫,赵清周. 转子进动定理的扩充和完善[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(6): 1216-1220, 1243.
- [6] 廖明夫. 转子振动的进动分析方法及其应用(一)[J]. 中国设备工程, 2003(8): 47-48.
- [7] 廖明夫. 转子振动的进动分析方法及其应用(三)[J]. 中国设备工程, 2003(10): 51-52.
- [8] JAHROMI A F, BHAT R B, XIE W F. Forward and backward whirling of a rotor with gyroscopic effect[C]//Vibration engineering and technology of machinery. Springer, Cham, 2015: 879-887.
- [9] XIE J, CHEN J, PENG Y, et al. A new concept of instantaneous whirling speed for cracked rotor's axis orbit[J]. Applied sciences, 2019, 9(19): 4120.
- [10] 李鹏飞. 轴心轨迹识别及其在汽轮机组振动监测诊断中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.

是裂隙内尖端之间先产生裂纹并交汇贯通,随后裂隙外尖端产生裂纹并平行于加载方向向两侧传递至上下两侧,致使最终岩体发生宏观破坏。

参考文献:

- [1] 张波,李术才,张敦福,等.含充填节理岩体相似材料试件单轴压缩试验及断裂损伤研究[J].岩土力学,2012,33(6):1647-1652.
- [2] 付金伟,朱维申,曹冠华,等.岩石中三维单裂隙扩展过程的试验研究和数值模拟[J].煤炭学报,2013,38(3):411-417.
- [3] 孙熙震,李杨杨,江宁,等.类岩石材料三维裂纹传播规律试验研究[J].岩土力学,2016,37(4):965-972,980.
- [4] WONG R H C, CHAU K T, TANG C A, et al. Analysis of crack coalescence in rock-like materials containing three flaws-part I: experimental approach[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 2001,38(7):909-924.
- [5] SAGONG M, BOBET A. Coalescence of multiple flaws in a rock-model material in uniaxial compression[J]. International journal of rock mechanics and mining sciences,2002, 39(2): 229-241.
- [6] REYES O, EINSTEIN H H. Failure mechanisms of fractured rock-a fracture coalescence model[C]// Paper presented at the 7th ISRM congress. Germany: Aachen,1991.
- [7] 蒋明镜,陈贺,张宁,等.含双裂隙岩石裂纹演化机理的离散元数值分析[J].岩土力学,2014,35(11): 3259-3268,3288.
- [8] 李术才,陈卫忠,朱维申,等.加锚节理岩体裂纹扩展失稳的突变模型研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(10):1661-1666.
- [9] 孙宗顺.如何判断在各种加载下的断裂模式: I 型还是 II 型[J].三峡大学学报(自然科学版),2004,26(1):27-30.
- [10] 余华中,阮怀宁,褚卫江.岩石节理剪切力学行为的颗粒流数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2013,32(7):1482-1490.

Numerical Simulation of Uniaxial Compressive of Crossing Multi-fractured Rock Mass Based on Particle Flow Code

SHU Yang¹, SUN Shao-rui², SONG Zhang¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to study the mechanical characteristics such as fracture mode, crack propagation characteristics, and strength characteristics of intersecting multi-fractured rock masses in uniaxial compression tests, the particle flow program was used to simulate the mechanical characteristics of intersecting multi-fractured rock masses in uniaxial compression tests. The impact of the angle between intersecting cracks on the strength characteristics, failure mode, microcrack development and evolution law of multi-fractured samples during uniaxial compression was analyzed. The experimental results show that the failure strength of the cross multi-crack specimen exhibits a slow bottom "U" shaped characteristic with the increase of crack angle; The failure mode of intersecting multi-crack specimens is mainly tensile shear failure, with some specimens exhibiting shear failure; The failure process of intersecting multi-crack specimens first involves the generation and intersection of cracks between the tips inside the cracks, followed by the generation of cracks at the outer tips of the cracks and their transmission parallel to the loading direction to both ends of the rock mass, ultimately leading to macroscopic failure of the rock mass. The results of this study contribute to the understanding of the mechanical mechanism of cross fissured rock masses in compression failure, and are a supplement to the research on the mechanical properties of cross fissured rock masses.

Key words: rock mass; crossing multi-fractured; uniaxial compressive; macro and micro characteristics; particle flow code

(上接第 185 页)

Instantaneous Whirling Feature Extraction and Stability Assessment of Hydropower Unit Shaft Vibration

JI Lian-tao¹, WANG Pu², JING Xiu-yan², LI Ze², HE Hong-xiang³, LI Chao-shun³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To effectively judge the vibrational stationary state of hydropower units, the whirling characteristics of the rotor vibration and the evaluation method of stability of shaft vibration were studied. The theoretical expression of instantaneous whirling velocity was derived, and the characteristic parameters of whirling velocity were analyzed. A holographic whirling velocity analysis method for shaft vibration was proposed. The whirling characteristics indicators and vibration stability evaluation index of shaft vibration were established. Finally, the theory of this paper was applied to the shaft vibration data analysis of Zhejiang Xianju pumped storage power station. The key characteristic indicators of vibration were extracted and the shafting stationary was evaluated. The results show that the established characteristic indicators have good performance in evaluating the stationary of shaft vibration, and have broad application prospects for the monitoring and performance evaluation of actual hydropower units.

Key words: hydroelectric units; feature extraction; whirling velocity; holo-whirling; vibration stationary