

文章编号:1001-5485(2009)09-0062-04

水轮发电机组的随机振动分析

肖黎

(武汉大学 土木建筑工程学院,武汉 430072)

摘要:为了研究大型水电机组在复杂水力荷载作用下的振动规律,依据机组随机振动理论,建立了机组随机振动的数值计算模型,用反应谱法对机组轴系的动力响应进行了数值计算和分析,同时也采用先进的测试技术对大型水电机组进行了随机振动试验研究。计算与试验结果表明:机组振动能量主要集中在基频附近,随机水荷载产生的振动主要是低频振动,对水轮机振动影响明显,而对机组轴系其它部位的振动影响较小。计算结果与试验数据一致,说明理论分析的正确性。

关键词:水轮发电机组;随机振动;反应谱法;试验

中图分类号:TV734 **文献标识码:**A

水轮发电机组轴系是一个机、电、液耦合作用的复杂体系。作用在机组轴系上的机械不平衡力主要是发电机转子和水轮机转轮的质量偏心荷载,电磁力主要是作用在发电机转子上的不均匀磁拉力,作用在转轮上的水荷载分为周期性的和非周期性的水推力。对于机组在机械偏心荷载、不平衡电磁力、周期性水推力等周期性荷载共同作用下的振动,目前已有不少的研究^[1~8]。在周期性荷载作用下的机组响应计算,即不平衡响应计算,只适用于模拟机组在额定工况或者较优工况下稳定运行时的振动。

而在各种瞬时工况下,如机组开机、停机、增减负荷和甩负荷时,作用在机组转轮上的水推力具有很强的随机性,它包含一个很宽的频率范围,从零点几赫兹到几十赫兹。频率成分有转频、水轮机叶片频率、导水叶片频率或者是它们的一个谐和分量等等^[8]。此时的振动已不符合稳态不平衡响应的运动规律,相应的计算理论也不适用,用随机振动的理论进行研究和分析是可取之举。

本文是在作者本人对机组的自振特性、稳态振动和瞬态动力时程响应研究^[5~7]之后,所做的进一步研究和探讨。鉴于机组随机振动问题的普遍性与复杂性,本文尝试用数值分析与试验研究相结合的方法对机组的随机振动进行分析和研究。

1 机组随机振动计算

数值研究随机振动问题,目前较好的数值计算方法是反应谱法,马震岳等^[8]提出了机组随机振动

数学模型,本文将采用该模型并结合大型计算机软件ANSYS进行计算分析。

1.1 振动计算的物理模型

本文的计算物理模型与作者前面的研究一致,将水轮发电机组的整个轴系,即:主轴、发电机转子、水轮机转轮及各轴承支承条件耦合成一个整体,考虑机组轴系的质量、转动惯量及摆动惯性。具体可见参考文献^[5~7]。

1.2 随机振动数值模型

根据文献^[8]中给出的机组随机振动数学模型,并参考有关机组随机振动理论^[9~11],假设水力荷载与频率的函数关系为

$$G(\omega) = \begin{cases} g_1^2 \omega^n & 0 \leq \omega \leq \omega_1; \\ g_2^2 \omega^{-n} & 0 \leq \omega \leq \omega_2. \end{cases} \quad (1)$$

ω_1 为功率谱的截断频率; ω_2 为功率谱的上限频率; g_1 和 g_2 为功率谱系数。

可以根据下式确定 g_1 和 g_2 的值,

$$F_{\max}(1\%) = 2.57 \sqrt{\int_0^{\omega_2} G(\omega) d\omega} = 2.57 \sqrt{\int_0^{\omega_1} g_1^2 \omega^n d\omega + \int_{\omega_1}^{\omega_2} g_2^2 \omega^{-n} d\omega} \quad (2)$$

在频率 ω_1 处应有

$$G(\omega) = g_1^2 \omega_1^n = g_2^2 \omega_1^{-n} \quad (3)$$

得

$$g_1 = g_2 \omega_1^{-n} \quad (4)$$

所以有

$$g_2 = - \frac{F_{\max}(1\%)}{2.57 \sqrt{\omega_1^{-2n} \int_0^{\omega_1} \omega^n d\omega + \int_{\omega_1}^{\omega_2} \omega^{-n} d\omega}} \quad (5)$$

设水力荷载服从高斯分布, 设其 1% 的概率下力的最大值为 $F_{\max}(1\%)$ 。机组的动力响应可表示为

$$U(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (6)$$

$H(\omega)$ 为频率响应函数, 是一个复矩阵, 可以用其实部和虚部表示:

$$H(\omega) = a(\omega) + ib(\omega) \quad (7)$$

轴系统的动力平衡方程为

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F(t) \quad (8)$$

设动荷载为

$$F(t) = e^{i\omega t} \quad (9)$$

则

$$U = H(\omega)e^{i\omega t} \quad (10)$$

代入上列动力平衡方程(8)式, 并令方程两端实部和虚部相等, 得到

$$a(\omega) = C^{-1}(AC^{-1}AC^{-1}A + \omega^2 I)^{-1}C^{-1}; \quad (11)$$

$$b(\omega) = -\omega(C^{-1}AC^{-1}A + \omega^2 I)^{-1}C^{-1} \quad (12)$$

式中, $A = K - \omega^2 M$ 。

动力响应的功率谱密度函数为

$$Y(\omega) = H(\omega)^2 G(\omega) \quad (13)$$

在整个频率区间内积分得到响应的均方根值为

$$\sqrt{\int_0^\infty Y(\omega) d\omega} = \sqrt{\int_0^{\omega_2} H(\omega)^2 G(\omega) d\omega} \quad (14)$$

1.3 数值计算及结果分析

某机组的额定转速为 200 r/min, 根据机组的试验资料, 计算工况取机组水力强振区的工况, 并且取机组的截断频率 $\omega_1 = 3.35$ Hz, 上限频率为 $\omega_2 = 34$ Hz, $n = 2$ 。取系列 ω 值, 根据式(1)计算出相应的谱值 $G(\omega)$, 可得到机组荷载功率谱图。图 1 所示为水力荷载功率谱图。

将水力荷载功率谱输入计算模型可以得到机组主轴系统各点的动力响应功率谱, 典型位置的动力

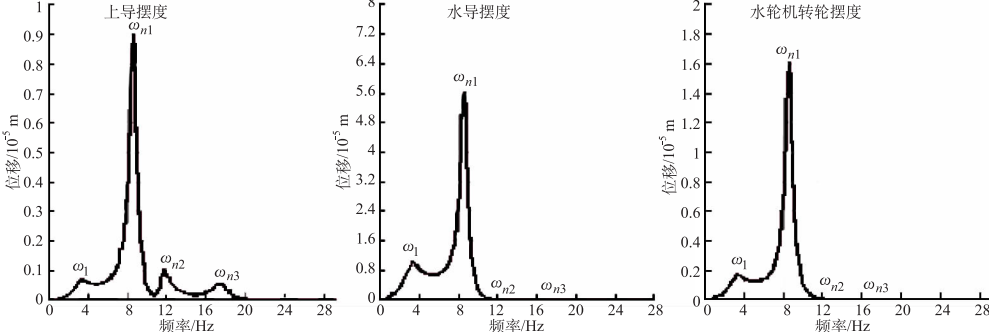


图 2 机组轴系典型位置动力响应功率谱

Fig. 2 Response power spectrum in typical location of the unit shaft

响应功率谱计算

结果图 2 所示, 图中 ω_{n1} , ω_{n2} 及 ω_{n3} 是系统的前三阶横向自振频率。

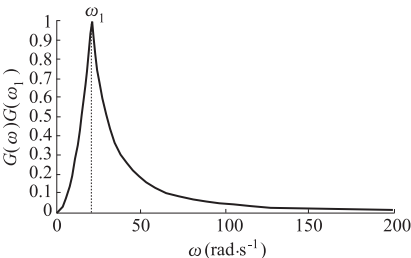


图 1 水力荷载功率谱

Fig. 1 Power spectrum of hydraulic load

从图 2 可以看出: 机组的响应峰值点主要在机组的前三阶自

振频率点以及截断频率 ω_1 处; 在基频点机组响应幅值最大, 在截断频率 ω_1 处的响应幅值也较大, 而二、三阶频率点响应幅值相对较小, 因为振动能量主要集中在基频附近。

从计算结果也可以看出: 与其它位置相比较, 水轮机附近的摆度相对较大, 说明随机水荷载对机组轴系各点振动的影响程度是不一致的, 对上导、发电机等离水轮机较远的部位影响较小, 各种水压脉动主要是使水轮机及附近各点的振动加大。振动能量在截断频率附近及至基频范围内均较大。

所以各种低频成分对水轮机及周围的振动有较显著的影响。

2 机组随机振动试验

机组的随机振动现象既普遍存在, 又难于研究。试验的分析方法在机组振动的研究中起着非常重要的作用, 特别是在计算理论不够成熟, 计算参数难以选取时, 试验研究不但可以检验理论模型和数值求解的正确性, 而且还能为数值计算所用的方法提供实践依据和求解思路。

本文对机组分别作了 4 种工况的试验: 起机过程试验、停机过程试验、变负荷试验及甩负荷试验。实验中获得了较丰富的试验数据, 选取部分有代表

性的数据和图表,分析了机组的随机振动现象。

2.1 低频幅值分析

低频振动是指机组在振动频率低于机组转频时的振动,低频振动往往是各种水力因素引起的^[12]。图3中分别绘出了上导轴承和水导轴承处的低频振动测试值。

由图可知:上导的摆度对负荷的变化不是很敏感,与上导摆度相比,水导随负荷的变化而波动较大。可以推知,各种非稳定工况下转轮附近振动摆度随机性较大,作用在水轮机上的低频荷载是影响水轮机及附近摆度的一个重要因素,这与计算所得到的结论具有一致性。

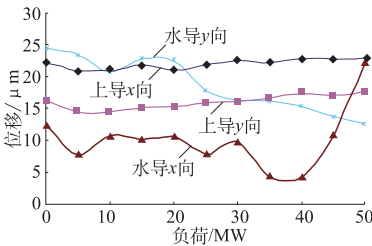


图3 低频幅值比较
Fig. 3 Comparison of the low-frequency-amplitudes

2.2 时域分析

图4列举了机组停机过程试验典型量的时程曲线。由图可知:上导摆度的振动强度变化不大,并且以高频分量为为主,而水导摆度从微弱的振荡开始,迅速发展为频率较低的强烈振动,后期振动开始衰减。水导振动强度的变化与蜗壳、尾水管的水压脉动的变化有一致性。与蜗壳脉动水压相比,尾水管的脉动强度要高很多。

2.3 频谱分析

机组非平稳运行中的典型频谱图如图5所示。从图中可以看出,在随机振动过程中,机组的主要振动频率有机组的基频9.22 Hz,机组的转频3.35 Hz,也包含机组的倍频振动(2倍频6.80 Hz)以及少量高阶频率,还有明显的低频成分存在(0.73, 1.70 Hz)。机组的水压脉动主频为:0.24, 0.49, 0.73, 0.97, 1.70, 2.43 Hz,其中尾水管处的脉动频率最为复杂,这些频率成分与机组的横、竖向的低频振动相一致,是导致机组低频振动的主要原因。

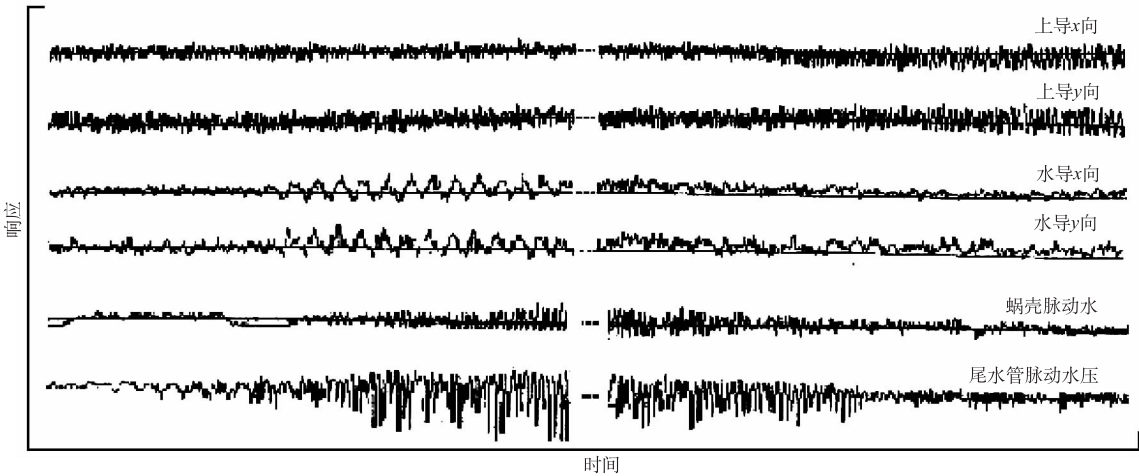


图4 典型振动量的时程曲线
Fig. 4 Time course curve of the typical vibration value

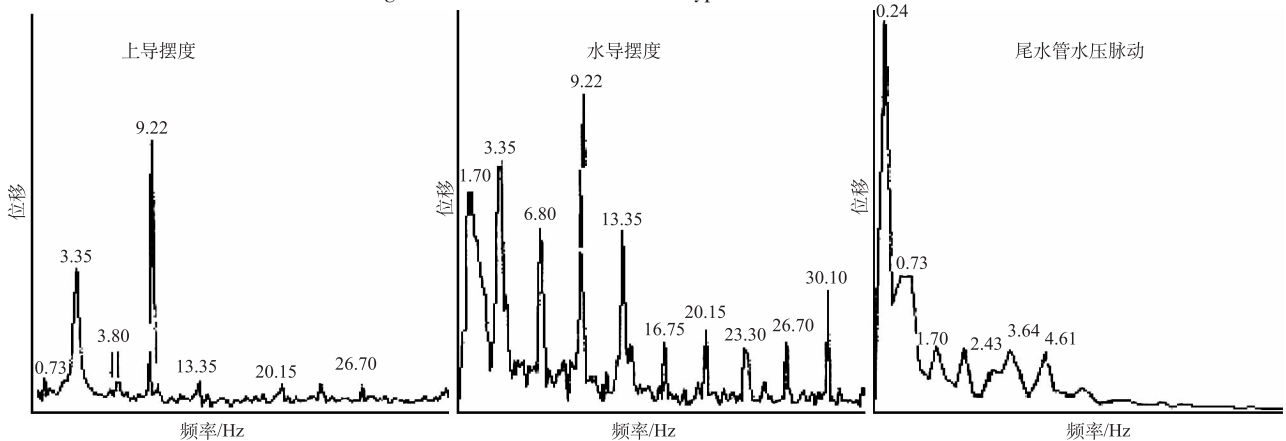


图5 机组振动的典型频谱图
Fig. 5 Typical frequency spectrum of the units

从振动能量来看,上导附近的横向振动主要受基频的影响,受其它频率成分影响的程度低,而水导轴承附近的振动频率较为复杂,并且各种频率成分的振动能量均较大。可以推断,机组的随机振动过程中,水轮机处的随机振动较为显著,较为复杂。

3 结 论

- (1) 机组启动、停机、变负荷、甩负荷等非稳定工况下,机组的随机振动现象比较明显,适合用随机振动理论分析。
- (2) 计算结果表明:机组振动能量主要集中在截断频率附近及至基频范围内,各种低频成分对水轮机及周围的振动有较显著的影响,造成机组发生低频振动的主要原因是各种低频水荷载。
- (3) 各项试验数据也表明机组的水轮机附近的振动频率相对复杂,振动强度高,尾水管附近的压力脉动比较明显。这与计算结果相一致。
- (4) 测试得某机组的低频振动成分为0.24, 0.49,0.73,0.97,1.70,2.43 Hz。
- (5) 本文的振动计算问题既依赖于试验研究成果,又用试验结果去验证理论分析的正确性。本文将理论、数值计算与试验密切结合,是研究水电机组随机振动的一个重要尝试。

参考文献:

[1] 冯辅周,褚福磊,张正松,等. 大型抽水蓄能机组轴系的动特性研究. 振动、测试与诊断[J],1999,(4):313-319.

[2] 李 苹,窦海波,王 正. 水轮发电机组主轴系统的建

模及其非线性瞬态响应[J]. 清华大学学报,1998,38(6):123-128.

[3] 李郁侠,吴子英,原大宁,等. 基于传递矩阵法的大型水轮发电机组主轴系统非线性瞬态响应数学模型[J]. 水利水电技术,2002,33(7):21-23.

[4] 王 洪,沈 东,张思青,等. 水轮发电机组转子轴承系统的振动机理和振动响应研究. 云南水力发电[J],2002,(2):69-72.

[5] 肖 黎,常晓林. 基于有限单元法的大型水轮发电机组自振特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2006,(4):5-8.

[6] 肖 黎,张咏梅. 大型水轮发电机组横向振动的有限元分析[J]. 长江科学院院报,2006,(5):37-40.

[7] 肖 黎,张咏梅. 大型水轮机组瞬态动力时程响应分析[J]. 长江科学院院报,2008,(1):76-79.

[8] 马震岳,董毓新. 水轮发电机组动力学[M]. 大连:大连理工大学出版社,2003.

[9] BLOTIN V V. Random Vibrations of Elastic Systems[M].The Hague, the Netherlands: Martinis Inhofe Publishers, 1984.

[10] LIN J H,ZHANG W S,WILLIAMS F W. Pseudo-excitation Algorithm For No stationary Random Seismic Response. Engineering Structures[J],1994,16(4):270-276.

[11] LIN J H,ZHANG W S, LI J J. Structural Responses To Arbitrarily Coherent Stationary Random excitation. Computers and Structures[J],1994,50(5):629-633.

[12] 黄汤敏,黄竹霞. 水力发电机组的振动特征. 水利水电技术[J],2003,(7):53-57.

(编辑:王 慰)

Random Vibrations’ Analysis of Hydroelectric Generating Set

XIAO Li

(School of Civil Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to study the unit’s movement law, in this paper, according to the theory of random vibration, the calculating model is established, and the response spectrum method and advanced testing technology are used in testing and calculation of large hydro-electric generating sets. The results show that the vibration energy is mainly concentrated in the vicinity of the fundamental frequency, and random vibration of the water load is mainly low-frequency vibration, which affects the vibration of the turbine significantly, but has little affect on the other parts of the shaft. The calculated results agree well with the measured data, which shows the correctness of the theory analysis.

Key words: hydrogenerator set; random vibration ; response spectrum method ; test