

水电机组在转子偏心影响下的非线性电磁振动分析

高程林¹, 陈贵清²

(1. 华北理工大学 建筑工程学院, 河北 唐山 063009; 2. 唐山学院 基础教学部, 河北 唐山 063000)

摘要:介绍了水轮发电机组发电机转子在转动过程中的三种偏心: 静偏心、振动偏心和转动偏心, 建立了转子在不平衡电磁力作用下的非线性振动微分方程。采用数值方法分析了转动偏心和静偏心对轴系电磁振动特性的影响, 结果表明, 这两种偏心与电磁力呈非线性关系, 随着偏心的增大使不平衡磁拉力作用不断加强, 机组的横向振动固有频率有所降低, 转子和转轮的振幅不断增大, 倍频共振时的振幅也显著加大, 转子系统展现出非常复杂的非线性动力学特征。

关键词:水轮发电机组; 偏心; 不平衡电磁力; 非线性振动

中图分类号: TM312; O322 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-349X(2015)06-0050-04

DOI: 10.16160/j.cnki.tsxyxb.2015.06.019

An Analysis of Nonlinear Electromagnetic Vibration in the Hydraulic Turbine under the Influence of Rotor Eccentricity

GAO Cheng-lin¹, CHEN Gui-qing²

(1. College of Civil and Architectural Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China; 2. Department of Fundamental Science Teaching, Tangshan College, Tangshan 063000, China)

Abstract: The authors of this paper discuss the three kinds of eccentricity in the rotating process of the hydraulic turbine generator rotor: static eccentricity, vibrating eccentricity and rotary eccentricity, establish a nonlinear vibration differential equation of the rotor in the unbalanced electromagnetic force and analyze the influence of rotary eccentricity and static eccentricity on the characteristics of electromagnetic vibration of the shafting system. The results show that the relationship between the two eccentricities and electromagnetic force is nonlinear, that when the unbalanced magnetic force increase together with eccentricity, the natural frequency of the lateral vibration of the turbine decreases, the amplitude of the rotor and the wheel increases, and the amplitude of the frequency doubling also increases significantly and the rotor system exhibits very complex nonlinear dynamic characteristics.

Key Words: hydraulic turbine; eccentricity; unbalanced electromagnetic force; nonlinear vibration

0 引言

水轮发电机作为大型旋转机械, 是典型的机电耦联系统, 不平衡电磁力是影响水轮发电机组动力学特性的重要因素之一。当转子存在偏心, 定子、转子之间的间隙不均匀或轴具有初始挠度时, 就会导致不均匀磁场的产生, 从而在转子上产生不平衡磁拉力, 进而影响机组的正常运转, 甚至造

成破坏。工程中多采用线性的经验公式计算不平衡电磁力^[1-2], 误差较大。为此, 曲风波等^[3]、姜培林等^[4]、邱家俊等^[5]分别采用不同的方法获得了不平衡电磁力的非线性表达式。目前, 应用较多的解析方法是通过调整气隙磁导求解气隙磁密, 进而得到不平衡电磁力更为准确的解析表达式。由于不平衡电磁力是关于相对偏心的非线性函数, 因此分析

收稿日期: 2015-10-12

基金项目: 唐山市重点实验室课题 (tsxyzdsys-020)

作者简介: 高程林 (1990-), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事结构工程研究。

在各种偏心影响下的非线性电磁振动特性, 对水轮发电机的机电设计和稳定运行具有重要的意义。

1 水电机组转子振动中的三种偏心

图1为水轮发电机转子横截面的偏心示意图。发电机转子偏心包括三种: 静偏心、振动偏心和转动偏心。静偏心是指轴的转动中心与定子内圆中心由于加工原因或者变形而发生的偏差, 振动偏心指轴系振动产生的偏心, 转动偏心是由转子和转轴几何中心的偏差引起的。这三种偏心能够周期性地改变转子与定子之间的气隙磁导, 因而对电磁力有决定性的影响。

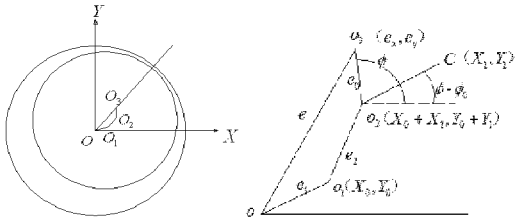


图1 电机偏心转子示意图

设 X_0, Y_0 为静偏心, X, Y 为振动偏心, e_0 为转动偏心, ϕ 为转动角度, ω 为转动角速度, 则总的偏心 e 可表示为:

$$\begin{cases} e_x = X_0 + X + e_0 \cdot \cos \phi \\ e_y = Y_0 + Y + e_0 \cdot \sin \phi \\ e = \sqrt{e_x^2 + e_y^2} \\ \phi = \omega \cdot t \end{cases} \quad (1)$$

2 建立转子系统动力学方程

以图2所示的水电机组主轴系统模型为研究对象建立方程, 只考虑机组的横向振动, 忽略轴向推力对系统的振动影响及转轴的质量, 假设转子和轴承都是刚性的。

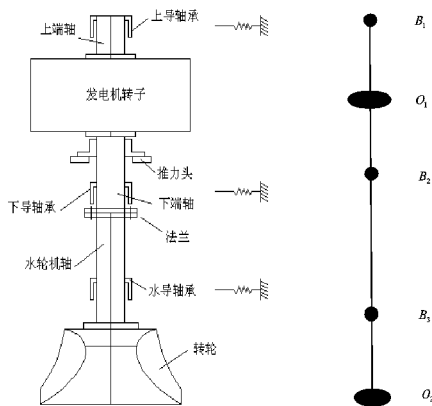


图2 主轴系统结构示意图

m_1, m_2 分别为发电机转子、水轮机转轮的等效质量; e_1, e_2 分别为发电机转子、水轮机转轮的质量偏心距; c_1, c_2 分别是转子、转轮的阻尼系数; k_1, k_2, k_3 分别为上导轴承、下导轴

承及水导轴承的支承刚度; B_1, B_2, B_3, O_1, O_2 分别为上导轴承、下导轴承, 水导轴承、发电机转子、水轮机转轮的几何圆心。设 $|B_1 O_1| = |O_1 B_2| = |B_1 B_2|/2 = a/2, |B_2 B_3| = b, |B_3 O_2| = c$, 设转子轴心的径向位移为 x_1, x_2 , 水轮机轴心的径向位移为 x_3, x_4 。由拉格朗日方程可得机组轴系的运动微分方程为:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + \frac{1}{(a+2b+2c)^2} \left\{ [4k_1(a+b+c)^2 + 4k_2(b+c)^2 + 4k_3 c^2] + [-2ak_1(a+b+c) + 2ak_2(b+c) + 2ck_3(a+2b)] \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right\} x_1 = \\ m_1 e_1 \omega^2 \cos \phi_1 + F_x \\ m_1 \ddot{y}_1 + c_1 \dot{y}_1 + \frac{1}{(a+2b+2c)^2} \left\{ [4k_1(a+b+c)^2 + 4k_2(b+c)^2 + 4k_3 c^2] + [-2ak_1(a+b+c) + 2ak_2(b+c) + 2ck_3(a+2b)] \frac{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}} \right\} y_1 = \\ m_1 e_1 \omega^2 \sin \phi_1 + F_y \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + \frac{1}{(a+2b+2c)^2} \left\{ [k_1 a^2 + k_2 a^2 + k_3(a+2b)^2] + [-2ak_1(a+b+c) + 2ak_2(b+c) + 2ck_3(a+2b)] \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right\} x_2 = m_2 e_2 \omega^2 \cos \phi_2 \\ m_2 \ddot{y}_2 + c_2 \dot{y}_2 + \frac{1}{(a+2b+2c)^2} \left\{ [k_1 a^2 + k_2 a^2 + k_3(a+2b)^2] + [-2ak_1(a+b+c) + 2ak_2(b+c) + 2ck_3(a+2b)] \frac{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}} \right\} y_2 = m_2 e_2 \omega^2 \sin \phi_2 \end{cases} \quad (2)$$

为计算和讨论方便, 引入下列无量纲参量

$$X_i = \frac{x_i}{\delta_0}, Y_i = \frac{y_i}{\delta_0}, i=1, 2, \quad (3)$$

式(2)中, F_x, F_y 为非线性油膜力, 表达式^[6]为:

$$\begin{cases} F_x = ak_m \delta_0 (\epsilon + \frac{5}{4} \epsilon^3) \cos \theta_r \\ F_y = ak_m \delta_0 (\epsilon + \frac{5}{4} \epsilon^3) \sin \theta_r \end{cases} \quad (4)$$

式中, a 为电磁刚度变化系数, 用以表示水轮发电机在运转过程中由于电磁参数的变化导致的电磁刚度的改变; δ_0 为发电机转子正常运行时的平均气隙长度; ϵ 为相对偏心, $\epsilon = e/\delta_0$; k_m 为额定工况下的电磁刚度, $k_m = \pi \mu_0 R L F_m^2 / 2 \delta_0^3$ 。

3 电磁振动特性分析

以某水电机组为研究对象进行电磁振动特性分析。选用的计算参数如下: $m_1 = 1.989 \times 10^6$ kg, $m_2 = 0.445 \times 10^6$ kg, $c_1 = 6 \times 10^6$ Ns/m, $c_2 = 2 \times 10^6$ Ns/m, $k_1 = 8.33 \times 10^8$ N/m, $k_2 = 1.25 \times 10^9$ N/m, $k_3 = 1.45 \times 10^9$ N/m, $e_0 = 0.4$ mm, $e_1 = 0.2$ mm, $e_2 = 0.3$ mm, $\delta_0 = 32$ mm, $a = 5$ m, $b = 7.37$ m, $c = 4.42$ m, $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, $n = f/\omega$ 。其中幅频谱图中 n 为倍频值。用4阶龙格库塔法进行求解并作图, 并考虑各参数下的动态响应特性。为保证计算结果的稳定性, 轴心轨迹图

和相图忽略起振过程,绘制 5~10 s 的运动过程,庞加莱映射图选取 600 到 800 之间的 200 个周期进行绘制。

3.1 转动偏心对转子系统电磁振动的影响

图 3 至图 6 是在只有转动偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 的情况下,转子的轴心轨迹图、相图、幅频谱图和庞加莱映射图。从这些图中可以看出,转动偏心对机组运动状态的改变作用明显。从轨迹图中可以看出,随着转动偏心的增大,振动的幅度明显增大。从幅频谱图上可以发现,随着转动偏心的增大,1 倍频处的幅值增加了 1 倍。当转动偏心为 0.1 mm 时转子庞加莱映射图上的吸引子近似为一封闭圆环,说明此时转子的运动状态为拟周期振动,而当转动偏心为 0.2 mm 时其吸引子表现为 5 个孤立的点,说明此时转子是 5 倍周期运动。由于转动偏心的存在并且随着转动偏心的增大,转子所受到的不平衡磁拉力也随之增大,而不平衡磁拉力的存在相当于在机组各导轴承刚度上加了一个负刚度,使得转子系统的固有频率降低,且转子系统非线性动力学行为不断改变。

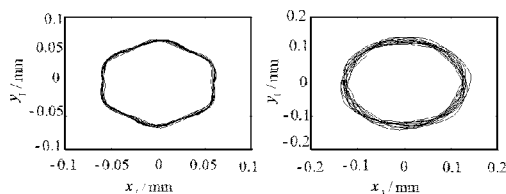


图 3 转动偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的转子轴心轨迹图

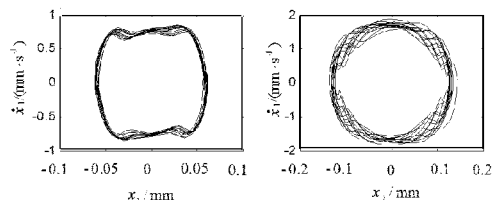


图 4 转动偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的转子相图

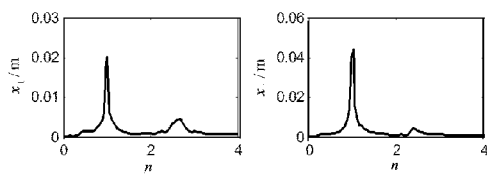


图 5 转动偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的转子幅频谱图

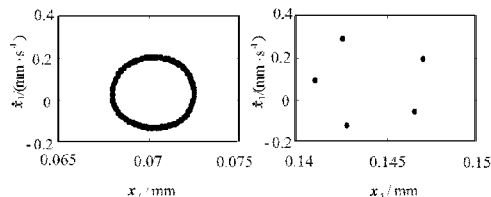


图 6 转动偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的转子庞加莱映射图

3.2 静偏心对转子系统横向振动的影响

图 7 至图 10 是在仅有静偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 的情况下,转子的轴心轨迹图、相图、幅频谱图和庞加莱映射图。从转子的轴心轨迹图中可以看出,随着静偏心的出现,转子的轴心运动轨迹从没有静偏心时的大致规则圆形轨迹畸变成了内 8 形状,并且随着静偏心的增大内 8 轨迹更加明显,而转子的振动幅度也增加明显,从 0.04 mm 左右增大到了 0.2 mm。从转子的幅频图中可以看出,当静偏心为 0.1 mm 时转子特征频率出现在 1 倍频、2 倍频和 3 倍频处;当静偏心为 0.2 mm 时观察到 1 倍频和 2 倍频处的振幅增大非常明显,分别增大了 3 倍和 5 倍,这说明静偏心的增大会明显影响倍频共振时的振动幅度。从图 10 转子的庞加莱映射图中可以看出,随着静偏心从 0.1 mm 增大到 0.2 mm,转子从 4 倍周期运动进入周期运动,这个现象值得关注。由于静偏心的出现并增大使得不平衡磁拉力也随之增大,静偏心的存在对于转子的运动轨迹改变明显,使之出现内 8 形状的运动轨迹。静偏心对于转子系统非线性动力学行为的影响十分显著。

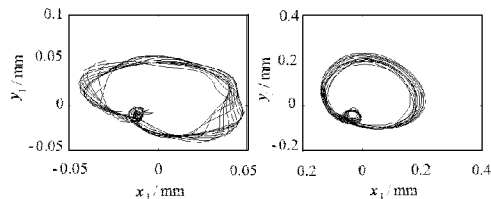


图 7 静偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的转子轴心轨迹图

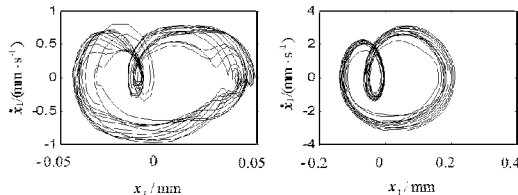


图 8 静偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的转子相图

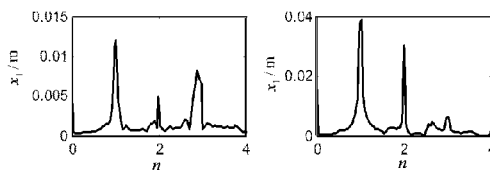


图 9 静偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的转子幅频谱图

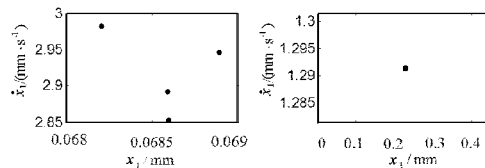


图 10 静偏心为 0.1 mm 和 0.2 mm 时的庞加莱映射图

3.3 转动偏心和静偏心共同作用时对转子系统横向振动的影响

图 11 至图 14 是在转动偏心和静偏心同时为 0.1 mm 或 0.2 mm 的情况下,转子的轴心轨迹图、相图、幅频谱图和庞加莱映射图。可以看出,在转动偏心和静偏心共同作用下,相比单一偏心作用下转子的振幅明显增大,倍频振幅也明显增大,同时从单一作用下的拟周期运动或者周期运动进入了混沌状态。这说明,如在实际情况中同时考虑静偏心和转动偏心共同作用会对不平衡磁拉力的影响更加明显,进而使得其对转子系统的非线性动力学行为影响更为显著。

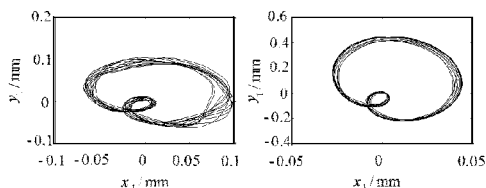


图 11 转动偏心和静偏心同时
为 0.1 mm 或 0.2 mm 时的转子轴心轨迹图

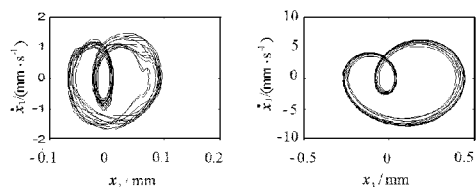


图 12 转动偏心和静偏心同时
为 0.1 mm 或 0.2 mm 时的转子相图

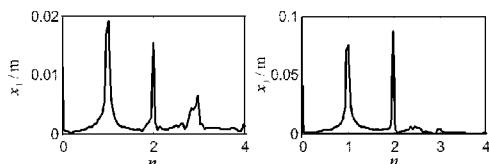


图 13 转动偏心和静偏心同时
为 0.1 mm 或 0.2 mm 时的幅频谱图

4 结论

本文建立了水轮发电机组轴系非线性电磁振动的动力学模型和微分方程,应用数值分析方法分析了在不平衡磁拉

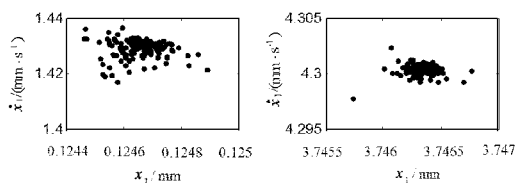


图 14 转动偏心和静偏心同时
为 0.1 mm 或 0.2 mm 时的庞加莱映射图

力作用下水轮发电机组转子系统随转动偏心和静偏心参数变化的非线性动力学响应。得到如下主要结论:

(1)发电机转子的静偏心和转动偏心的增大都会使不平衡磁拉力作用不断加强,使得机组的径向振动固有频率有所降低,发电机转子和水轮机转轮的振幅不断增大,并且随着偏心的增大使得发生倍频共振时的振幅也显著加大。

(2)不平衡磁拉力可以加剧机组的非线性振动,不利于系统的稳定运行。这种状况可通过消除或减小发电机转子的静偏心和转动偏心来降低不平衡磁拉力的作用,减小机组振幅,从而使机组安全稳定运行。

(3)在静偏心和转动偏心共同作用下,转子系统表现出更为复杂的非线性动力学特征。

参考文献:

- [1] 白延年. 水轮发电机设计与计算[M]. 北京:机械工业出版社,1982:248-250.
- [2] 刘保国,张信志. 水轮发电机组主轴系统非线性动力学问题的计算分析[J]. 中国机械工程,2001,12(8):939-942.
- [3] 曲凤波,孙玉田,曲大庄. 水轮发电机的不平衡磁拉力[J]. 大电机技术,1997(4):1-3.
- [4] 姜培林,虞烈. 电机不平衡磁拉力及其刚度的计算[J]. 大电机技术,1998(4):32-34.
- [5] 邱家俊. 机电耦合系统的非线性振动[M]. 北京:科学出版社,1996:153.
- [6] 徐进友,刘建平,宋铁民,等. 水轮发电机转子非线性电磁振动的幅频特性[J]. 中国机械工程,2010,21(3):348-351.

(责任编辑:夏玉玲)

(上接第38页)

- [2] 刘晓冬,张海,庞福. 基于 BP 神经网络的矿井提升机自适应 PID 控制器研究[J]. 煤矿机械,2014,35(7):171-173.
- [3] 彭秋红,成兰. 矿井提升机的模糊 PID 控制器研究[J]. 机电信息,2014(24):148-149.

- [4] 李岚. 自适应模糊控制综述[J]. 山东工业技术,2015(5):209-210.
- [5] 张景元. 基于神经网络的自适应模糊控制系统[J]. 计算机工程与设计,2014,35(10):3613-3616.

(责任编辑:夏玉玲)