

600 MW 汽轮发电机组轴系非线性动力学响应分析

焦映厚¹, 陈照波¹, 荆建平², 曲秀全¹

(1. 哈尔滨工业大学机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 上海交通大学国家振动、冲击和噪声重点实验室, 上海 200030)

摘 要:采用等参元有限元法建立了国产 600 MW 汽轮发电机组轴系的非线性动力学模型, 利用有限元分析程序 ADINA 对某国产 600 MW 汽轮发电机组轴系的非线性动力学响应进行了分析和计算。在计算中通过 ADINA 程序提供的用户接口, 考虑了滑动轴承的非线性油膜力, 并与线性动力学分析计算结果进行了比较, 计算结果表明, 利用 ADINA 程序结合非线性动力学理论对大型实际机组轴系进行非线性动力学分析和计算是必要的和可行的。从而为大型实际机组轴系进行非线性动力学稳定性分析和优化设计提供了依据。

关 键 词:非线性; 转子; 轴承; ADINA

中图分类号: O322; TH133 文献标识码: A

1 引 言

汽轮发电机组是电力大系统中的原动机, 实现其安全稳定运行是提高效率的前提。近年来汽轮发电机组的容量和运行参数不断提高, 转轴向大跨度、轻载和柔性方向发展。目前, 厂家生产了超临界及正在组织生产的超超临界 600 MW 以上的大型机组, 其机组的安全问题日益受到关注。

实际机组轴系稳定性问题历来是机组设计、制造和运行中的一个突出问题。机组轴系失稳将导致灾难性毁机事故。机组发生失稳事故的主要原因是汽轮发电机组中存在着油膜力、密封力和不均匀蒸汽间隙力等强非线性激励源, 其中非线性油膜力是最主要的非线性激励源。

传统的机组轴系稳定性动力学设计基于线性理论^[1-3]。然而实际机组具有强非线性特性, 基于线性理论的设计往往不能精确反映机组的运行规律, 可能按线性设计应为安全的机组在工作转速下提前

发生油膜振荡导致事故, 也可能设计偏于安全而造成浪费, 为此必须采用非线性动力学理论才能深入揭示机组的真实运动规律。而迄今对大型机组轴系的非线性动力学问题的研究还不成熟^[4-5], 因此对大型机组轴系的非线性动力学问题的研究将是转子动力学领域一段时间内研究的热点问题。

本文针对实际机组转子—轴承系统为一局部非线性动力学系统的特点, 以 600 MW 汽轮发电机组轴系为研究对象, 采用等参元有限元法建立了国产 600 MW 汽轮发电机组轴系的非线性动力学模型, 利用大型有限元计算软件 ADINA 程序提供的用户接口, 将非线性轴承油膜力作为外载荷施加到转子上, 利用有限元分析程序 ADINA 对机组轴系的非线性动力学响应进行了分析和计算, 其结果将对工程实际中具有非常重要的指导意义和实用价值。

2 数值计算及结果分析

2.1 非线性油膜力模型

滑动轴承非线性油膜力采用短轴承理论, 由文献^[6]油膜力沿 x 和 y 方向的分量 F_x, F_y 为:

$$\begin{aligned} F_x &= -\partial_x [3xV(x, y, \alpha) - G(x, y, \alpha)\sin\alpha - 2S(x, y, \alpha)\cos\alpha] \\ F_y &= -\partial_y [3yV(x, y, \alpha) - G(x, y, \alpha)\cos\alpha + 2S(x, y, \alpha)\sin\alpha] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: x 和 y 是轴颈中心坐标; $\alpha = \arctg \frac{y+2x'}{x-2y'} - \frac{\pi}{2} \operatorname{sign} \left(\frac{y+2x'}{x-2y'} \right) - \frac{\pi}{2} \operatorname{sign}(y+2x')$;

收稿日期: 2004-05-28; 修订日期: 2004-11-08

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E0220); 黑龙江省自然科学基金重点基金资助项目(ZJG 03-1);

黑龙江省博士后启动基金资助项目(LRB00012)

作者简介: 焦映厚(1962-), 男, 黑龙江绥化人, 哈尔滨工业大学副教授, 博士。

$$A = \frac{[(x - 2y')^2 + (y + 2x')^2]^{1/2}}{1 - x^2 - y^2};$$

$$G(x, y, \alpha) = \frac{2}{(1 - x^2 - y^2)^2} \left[\frac{\pi}{2} + \arctg \frac{y \cos \alpha - x \sin \alpha}{(1 - x^2 - y^2)^{1/2}} \right];$$

$$S(x, y, \alpha) = \frac{x \cos \alpha + y \sin \alpha}{1 - (x \cos \alpha + y \sin \alpha)^2};$$

$$V(x, y, \alpha) = \frac{2 + (y \cos \alpha - x \sin \alpha) G(x, y, \alpha)}{1 - x^2 - y^2};$$

$\delta = \mu \omega R L (R/c)^2 (L/2R)^2$ 为 Sommerfeld 数。

2.2 单盘柔性转子—轴承系统非线性动力学响应分析

为考察 ADINA 程序与 Runge-Kutta 法对单盘柔性转子—轴承系统非线性动力学响应分析结果的差别, 按照简单离散方法将图 1 中的转子系统模型进行离散, 离散为 3 个质点, 把轴段处的质量分别离散到轴承和轮盘处, 油膜力分别作用在两个轴承处的质点上, 如图 2 所示。转子系统动力学方程为:

$$\begin{cases} \ddot{x}_2 = -\frac{k}{m_2}(x_2 - x_1) + \frac{1}{m_{22}}f_x \\ \ddot{y}_2 = -\frac{k}{m_2}(y_2 - y_1) + \frac{1}{m_{22}}f_y - G \\ \ddot{x}_1 = -\frac{\alpha}{m_1}x_1 - \frac{2k}{m_1}(x_1 - x_2) + \rho \cos \tau \\ \ddot{y}_1 = -\frac{\alpha}{m_1}y_1 - \frac{2k}{m_1}(y_1 - y_2) + \rho \sin \tau - G \end{cases} \quad (2)$$

其中: x_1 和 y_1 轴颈中心坐标; x_2 和 y_2 轴承中心坐标; 无量纲坐标 $x_i = X_i/c, y_i = Y_i/c, G = g/(c\omega^2)$ —无量纲外载荷, $\tau = \omega t$ —无量纲时间; e —偏心量; c —轴承半径间隙; k_p —轴的扭转刚度; $\rho = e/c, m_{22} = m_1 \omega^2 c / \hat{q} \alpha = D_1 / \omega, k = k_p / \omega^2, f_x = F_x / \hat{q}, f_y = F_y / \hat{q}$ 其中轮盘质量 $m_1 = 374 \text{ kg}$, 轴承质量 $m_2 = 27 \text{ kg}$, 润滑油粘度 $\mu = 18 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 轴承半径间隙 $c = 0.2 \text{ mm}$, 轴承长度 $L = 28.5 \text{ mm}$, 轴承半径 $R = 57 \text{ mm}$; 轮盘阻尼 $D_1 = 3.0 \times 10^2 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, 不平衡量 U 认为集中在轮盘处 $U = u/c = 0.1$ 。

由于轴承中非线性油膜力是轴颈位移及速度的函数, 用有限元法分析转子系统的动力学响应时很难直接将其作为载荷填入数据卡。为此, 在 ADINA 源程序的基础上, 针对非线性油膜力的特点将其加入到源程序中提供的用户载荷接口处。但因 ADINA 程序庞大, 将其应用到实际转子系统前, 需对修改后的程序进行考核。选取如图 1 简单的单盘对称转子为对象, 非线性油膜力模型采用 2.1 节短轴承理论获得。转子对称地支撑在两个滑动轴承上, 其有限元

模型见图 2 所示, 采用等参梁单元, 其中单元每个节点有 x, y 方向的平动和转动共 4 个自由度, 轴向的平动和转动自由度被约束掉。整个转子分 8 个单元, 9 个节点, 轮盘质量和轴承质量作为集中质量分别加到相对应的节点上。为了进行数值比较, 分别采用有限元法和 Runge-Kutta 法计算该转子—轴承系统的动力学响应。求解过程中采用相同的初值、时间步间隔和求解步数, 其中时间间隔取 $\Delta t = \pi/1000$, 求解步数 200 000, 取 140 000 步后的结果作为稳态解。图 3 和图 4 分别为系统在 $\omega = 300 \text{ rad/s}$ 和 $\omega = 500 \text{ rad/s}$ 时左侧轴承轴颈中心的轨迹图。由图可看出, 采用有限元法所得结果与数值积分结果相比误差很小。在其它转速和工况下, 同样能得到类似的结果。说明利用 ADINA 程序提供的用户接口分析转子—轴承系统的非线性动力学响应具有较高的可信度。

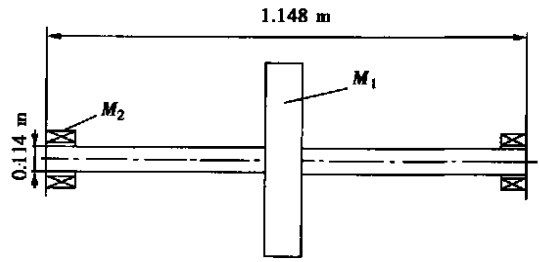


图 1 单盘转子—轴承系统

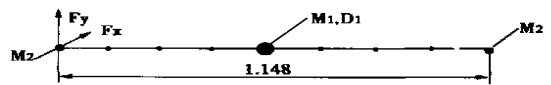


图 2 转子系统有限元模型

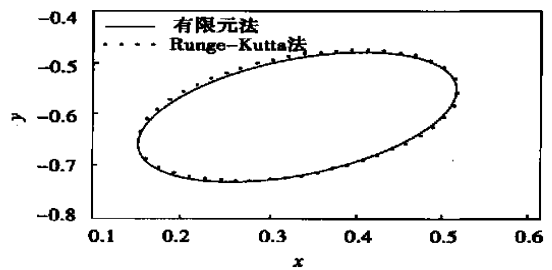


图 3 滑动轴承轴颈中心运动轨迹
($\omega = 300 \text{ rad/s}$)

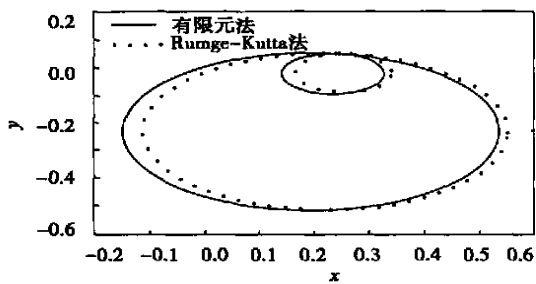


图4 滑动轴承轴颈中心运动轨迹
($\omega=500 \text{ rad/s}$)

2.3 600 MW 汽轮发电机组轴系非线性动力学响应分析

如图5所示,实际600MW汽轮发电机组的整个转子轴系,考虑局部非线性油膜力对轴系进行动力学响应分析。由于实际机组在运行过程中,在7号和8号轴承处曾出现过低频分量。因此为简化轴系的复杂处理过程,出于实际机组中7号和8号轴承的低频分量与其它轴承相比较,为了计算方便,在计算中主要考虑7号和8号滑动轴承非线性油膜力的影响,其余轴承分别作为一个等效的支撑刚度来处理,其有限元模型见图6,其中每个节点为4个自由度,采用等参单元分析,整个轴系共采用了330个单元。其中,轴段、轮盘和轴承质量作为集中质量分别叠加到相对应的节点上。

如图5所示,在600MW汽轮机发电机组轴系模

型中,7号和8号滑动轴承的参数为 $R=481.6 \text{ mm}$, $L=267 \text{ mm}$, $c=0.97 \text{ mm}$, $\mu=18 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$,无量纲偏心 $p=e/c=0.01$ 。图7给出了采用ADINA程序计算得到的低压转子LP2的动力学响应,图7中 x 和 y 的位移值为转子真实位移与油膜间隙的比值。

从图7可以看出,转子在 300 rad/s 转速下出现了明显的低频分量,而且振幅大大超过了转子的工频振幅,因此是比较危险的。而实际该类型转子在运行过程中也出现过低频振动,在更换其它类型轴承后,低频成分消失。可见以上的非线性动力学分析与实际是吻合的。

为考察非线性动力学分析与线性动力学分析的差别,本文采用线性动力学方法对整个轴系进行了分析,分析过程中不考虑非线性油膜力因素,各轴承采用等效的支撑刚度。图7给出了采用线性动力学方法,不考虑非线性油膜力因素计算得到的低压转子LP2的动力学响应。

比较图7和图8可以看出,采用线性和非线性动力学方法所得的结果差别很大,线性动力学方法的结果表明:转子的振动只有一个稳定的工频振动频率;而非线性动力学方法得到的结果表明此时转子存在着较为明显的低频分量,这对于转子的运行是十分危险的,因此采用非线性动力学方法进行实际转子的动力学分析是十分必要的。通过以上的分析同时表明:采用非线性动力学方法对局部非线性的实际高维转子轴承系统进行动力学分析是可行的。

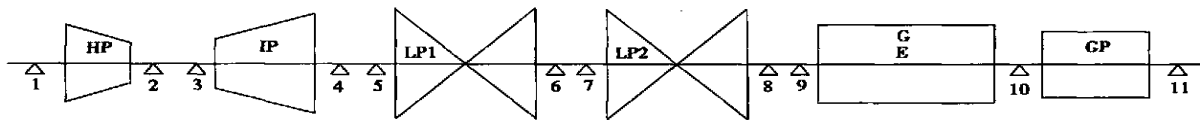


图5 600 MW 汽轮发电机组轴系简图

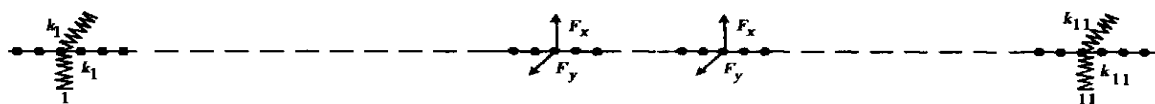


图6 600 MW 汽轮发电机组轴系有限元模型

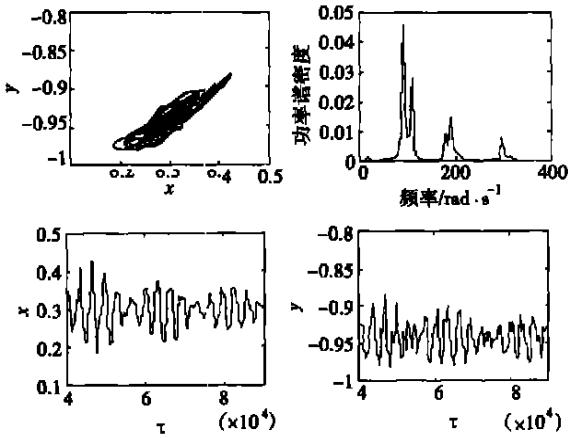


图 7 600 MW 汽轮机轴系低压转子 LP2 的动力学响应

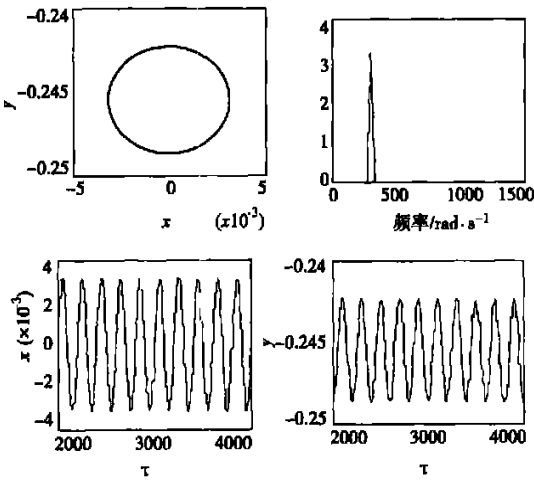


图 8 线性动力学方法得到的 600 MW 汽轮机低压转子 LP2 的动力学响应 ($\omega = 300 \text{ rad/s}$)

3 结 论

本文采用等参梁有限元方法结合大型有限元

软件 ADINA 程序对单盘柔性转子—轴承系统及 600 MW 汽轮发电机组轴系的非线性动力学响应进行了计算与分析, 通过计算和分析得出以下结论:

(1) 在 ADINA 程序的基础上, 通过其提供的用户接口, 将滑动轴承的非线性油膜力直接加以考虑可以获得满意的计算结果。在对单盘柔性转子系统及 600 MW 汽轮发电机组轴系的非线性动力学分析中得到了验证。

(2) 在对 600 MW 汽轮发电机组轴系的非线性动力学分析中, 采用线性动力学和非线性动力学方法所得的计算结果差别很大, 采用线性动力学方法计算结果表明: 转子系统的振动只有一个稳定的工频振动频率。而采用非线性动力学方法计算结果表明: 此时转子系统存在着较为明显的低频分量, 这对于转子的运行是十分危险的, 因此采用非线性动力学方法对实际转子系统进行非线性动力学分析是十分必要的。为解决高维的局部非线性转子—轴承系统的非线性动力学分析提供了一种切实可行的新途径。

参考文献:

- [1] EHRICH F F. Some observations of chaotic vibration phenomena in high-speed rotordynamics[J]. *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 1991, 113: 50—57.
- [2] 黄文虎, 武新华, 焦映厚, 等. 非线性转子动力学研究综述[J]. *振动工程学报*, 2000, 13(4): 497—509.
- [3] 闻邦椿, 顾家柳, 夏松波, 等. 高等转子动力学——理论、技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [4] SUNDARARAJAN P, NOAH S T. An algorithm for response and stability of large order nonlinear systems-application to rotor systems[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1998, 214(4): 695—723.
- [5] 胡超, 王岩, 王立国, 等. 机械化数学在转子动力学中的应用[J]. *应用数学与力学*, 2001, 23(9): 1045—1052.
- [6] ADILETTA G, GUIDO A R. Chaotic motions of a rigid rotor in short journal bearings[J]. *Journal of Nonlinear Dynamics*, 1996, 10: 251—269.

(何静芳 编辑)

600 MW 汽轮发电机组轴系非线性动力学响应分析 = **An Analysis of the Nonlinear Dynamic Response of a 600MW Turbogenerator Shafting** [刊, 汉] / JIAO Ying-hou, CHEN Zhao-bo, QU Xiu-quan (College of Mechanical & Electrical Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), JING Jian-ping (National Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise under the Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 178 ~ 181

By employing a finite element method with equal-parameter elements a nonlinear dynamics model was set up for the shafting of a Chinese-made 600MW Turbogenerator. With the use of a finite element analysis program ADINA an analysis and a calculation were conducted of the nonlinear dynamics response of the 600MW turbogenerator shafting. During the calculation, by way of the user interface provided by the program ADINA the nonlinear oil-film force of the journal bearing has been taken into account and compared with the nonlinear dynamics analysis and calculation results. The results of the calculation indicate that the use of the program ADINA in conjunction with a nonlinear dynamics theory is essential and feasible for the nonlinear dynamics analysis and calculation of the shafting of large-sized turbogenerators, thus providing a solid basis for the nonlinear dynamics stability analysis and optimal design of the shafting of specific large-sized units.

Key words: nonlinearity, rotor, bearing, ADINA

高温状态下锅水 pH 值的变化特征研究 = **A Study of the Variation Features of the pH value of Boiler Water under a High-temperature State** [刊, 汉] / ZHU Zhi-ping, HUANG Ke-long (Chemical Engineering Institute under the Zhongnan University, Changsha, China, Post Code: 410083), ZHANG Ling, WANG Hong-mei (Department of Chemical & Environmental Engineering, Changsha, China, Post Code: 410077) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 182 ~ 185

It is worth while paying due attention to the variation of boiler water pH value under a high-temperature state. On the basis of the dissociation equilibrium constant of related materials at a high temperature the independently existing pH value at a temperature of 25 °C ~ 300 °C was calculated for water, Na_3PO_4 , NH_3 and NaOH . Also calculated was the boiler water pH value at the typical condition of equilibrium phosphate treatment (EPT). In addition, the calculation results are shown graphically. Meanwhile, the impact of the presence of acidic foreign matter, such as H_2CO_3 and CH_3COOH on the pH value of boiler water was calculated and analyzed. In conclusion, the above calculation results were briefly analyzed and discussed. **Key words:** boiler, boiler water, equilibrium constant, pH value, equilibrium phosphate treatment

燃用磷酸的锅炉膜式水冷壁破坏分析 = **An Analysis Concerning the Destruction of the Membrane Wall of a Phosphoric Acid-fired Boiler** [刊, 汉] / XIAO Li-chuan, WANG Zheng-wei (Department of Mechanical Engineering, Jiangsu Polytechnical Institute, Changzhou, China, Post Code: 213016), XUE Guo-xin (Department of Computer Science, Jiangsu Polytechnical Institute, Changzhou, China, Post Code: 213016) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(2). — 186 ~ 188

The waste heat utilization of phosphoric acid in a heat recovery boiler can bring about tremendous economic and social benefits. The key problem involved in this utilization consists in the distribution of temperature in the fins of a membrane water-wall. The authors have carried out analyses and calculations of the irregular temperature distribution in the water-wall membrane of a phosphoric acid-fired boiler. The results of the calculation are in agreement with the actual destruction situation. The key issues and method for the design of a phosphoric acid-fired boiler are presented. **Key words:** waste heat utilization, phosphoric acid-fired boiler, water wall, destruction analysis