

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.06.020

基于 HB-AFT 方法的水轮发电机组转子-轴承系统振动特性分析

汪广明¹, 何滔¹, 熊玺¹, 李峰²

(1. 国能大渡河沙坪发电有限公司, 四川 乐山 614304;

2. 西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要:水轮发电机组在运行过程中会发生水轮机水力振动状况,形成突出特征的轴系振动故障。为了进一步分析发电机组转子-轴承系统振动特性,设计一种基于 HB-AFT 方法的振动信号分析方法。研究结果表明:周期运动结果跟 R-K 方法计算结果达到了良好吻合度,大幅缩短运算时间,实现了更高的控制精度并达到省时的效果,表明 HB-AFT 方法可以满足发电机组转子-轴承系统的精确周期分析。选择 HB-AFT 方法进行解析的结果形成了与 R-K 方法相近的轨迹。处于某些轴颈间隙下时,系统表现为不稳定的变化特征,从而实现分岔结果。该研究可以拓宽到其它传动设备的振动信号分析领域,具有很宽的应用价值。

关键词:水轮发电机组;转子-轴承系统;振动特性;HB-AFT 方法

中图分类号:TH133.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)06-0103-04

Vibration Characteristics Analysis of Rotor-bearing System of Hydrogenerator Set Based on HB-AFT Method

WANG Guangming¹, HE Tao¹, XIONG Xi¹, LI Feng²

(1. State Energy Dadu River Shaping Power Generation Co., Ltd., Leshan 614304, China;

2. School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract:In the operation of hydro-generator set, the hydraulic vibration of turbine may occur, leading to the shaft vibration fault with prominent characteristics. In order to further analyze the vibration characteristics of rotor-bearing system of generator set, a vibration signal analysis method based on HB-AFT method is designed. The research results show that the results of periodic motion are in good agreement with those calculated by R-K method, the calculation time is significantly shortened, the higher control accuracy is achieved and time is saved. The results show that HB-AFT method can satisfy the accurate period analysis of rotor-bearing system of generator set. The result of HB-AFT method is similar to that of R-K method. Under certain journal clearance, the system manifests unstable change characteristics, thus achieving bifurcation results. This research, with a wide range of application value, can be extended to the vibration signal analysis field of other transmission equipment.

Keywords:hydrogenerator set; rotor-bearing system; vibration characteristics; HB-AFT method

0 引言

水轮发电机组在运行过程中除了会发生波动的水轮机水力振动状况以外,其余轴系部件产生的振动特征都与大型结构旋转系统存在相似的情况,系统轴系部件振动状态也属于转子动力学研究内容。对高转速透平旋转设备进行故障分析属于转子领域的一项重点研究课题。对于转速较小的 YDS 低速电机或者水轮发电机组,有关振动变化参数方面的研究较少,并未引起研究人员的关注^[1-4]。

ZHANG 等^[5]根据迷宫密封结构形成的流场特征,采用摄动法建立流体模型,同时加入了不同

密封腔下的流体应力,再以 Muszynska 模型计算非线性流体力,同时根据几何不对称特点,通过 Timoshenko 梁有限元完成旋转轴的仿真分析。XU 等^[6]设计了一种包含减振系统的转子模型,通过 Muszynska 流体力模型确定非线性密封力,最后通过数值计算的方法完成方程求解过程。依次获得包含减振器与未设置减振器条件下的转子/密封系统响应结果,根据以上条件确定了流体不稳定性被彻底消除与部分消除的转速区间,建立增强系统稳定性的新方法。随着工业领域对 CFD 软件的应用推广,目前已在转子密封系统中获得了大量应用。ZHANG 等^[7]针对静偏心与明显扰动扰动的状态,通过 CFD 瞬态系统模拟测试环

第一作者简介:汪广明(1993—),男,四川南充人,工程师,本科,研究方向为水电生产技术,wanpinlue3801@163.com。

型密封结构。GRIEBEL^[8]设定不同的转速、入口压力以及预旋速度条件后,再通过旋转测试系统收集转子测试参数并分析流体力学(CFD)模拟结果。结果显示叶片密封结构发生了泄漏率的显著提高,在建模过程中以解析叶模型与多孔介质作为测试对象。经测试发现,上述 CFD 模型与各入口参数测试结果吻合度良好。

水轮发电机组在运行过程中会发生水轮机水力振动导致轴系振动故障。为了进一步分析发电机组转子-轴承系统振动特性,设计了一种基于 HB-AFT 方法的振动信号分析方法,并开展了数值分析。

1 转子-轴承系统

从图 1 中可以看到采用 $O-xyz$ 坐标系构建的转子-轴承模型。 O 表示定子内圆中心; S 表示轴颈初始中心; G 表示转子质心。当模型保持静止的状态时, $e_0 = SG$ 为转子质量偏心; $e = OS$ 为大轴旋转偏心。

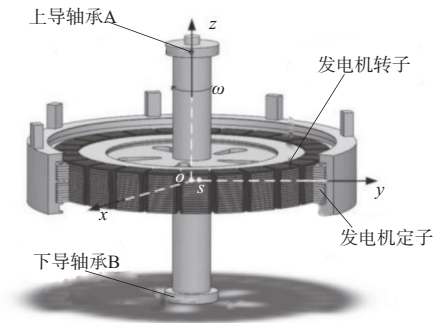


图 1 转子-轴承系统回旋振动示意图

转子系统可使用多参数常微分方程组表达:

$$M\ddot{q} + f(q, t, \lambda) = P(t, \lambda), (t, q) \in (R \times R^m) \quad (1)$$

式中: t 为时间; M 为系统的质量; $q(t)$ 为未知量, $f(q, t, \lambda)$ 为包括转轴刚度、油膜力、密封力的内力矢量; $P(t, \lambda)$ 为系统的外激励矢量。

建立以下的偏心旋转气隙表达式:

$$\delta(\alpha, t) \approx \delta_0 - e \cos(\alpha - \gamma) \quad (2)$$

式中 δ_0 表示定转子气隙长度均值。

2 HB-AFT 方法理论

处理非线性系统时,HB-AFT 表达式为

$$\ddot{x}(t) = f(\ddot{x}, \dot{x}, x, t) \quad (3)$$

为了对上述表达式进行周期解分析,设定 $x(t) = x(t+T)$, T 为 $x(T)$ 周期。从而可以将 $x(T)$ 与式 $f(\cdot)$ 表示成正交基一致的 Fourier。 $x(T)$ 调

和系数和 $f(\cdot)$ 具有隐式非线性的关系。通过离散傅里叶变换与逆离散傅里叶转换方式获得隐式代数。

非线性系统周期为 2π 时,存在 $\dot{x} = f(x, t)$, 此时满足条件 $x(T) = x(t+2\pi)$ 。将非线性项表示为正交基的形式,假定以下关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ f \end{bmatrix} = \sum_{k=0}^K \begin{bmatrix} a_k \\ c_k \end{bmatrix} \cos(k\tau) - \begin{bmatrix} b_k \\ d_k \end{bmatrix} \sin(k\tau) \quad (4)$$

式中: a_k, b_k, c_k, d_k, τ 为 Fourier 级数参数; k 为谐波项数。

以周期解与非线性谐波项系数建立向量 P, Q , 得到

$$g(P, Q) = 0 \quad (5)$$

再以 Newton-Raphson 进行迭代计算:

$$J^{(i)}(P^{(i+1)} - P^{(i)}) + g^{(i)} = 0 \quad (6)$$

式中 J 表示 Jacobian 矩阵,存在以下关系:

$$J = dg(P, Q)/dP = \partial g(P, Q)/\partial P + \partial g(P, Q)/\partial Q \cdot dQ/dP \quad (7)$$

在上述式子中,只有 dQ/dP 属于未知参数,若想计算此变量,应对其进行 AFT 转换。

可以将 AFT 转换理解成反离散傅里叶变换(IDFT)与离散傅里叶变换(DFT)的综合效果,先对 $x(t), f(x, t)$ 进行 IDFT 处理,确定以下结果:

$$x(n) = R_e \sum_{k=0}^K \tilde{P}_k e^{i(2\pi kn/N)} \quad (8)$$

$$f(n) = f(x(n), n) \quad (9)$$

式中: $x(n)$ 表示 $x(t)$ 到达第 n 个时间点时的参数; N 表示离散时间点个数。通过 DFT 构建 Q 函数:

$$\tilde{Q}_k = \frac{\varphi}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{i(2\pi kn/N)} \quad (10)$$

式中: $k=0$ 时, $\varphi=1$; $k \neq 0$ 时, $\varphi=2$ 。

进行 Newton-Raphson 迭代,由式(8)一式(10)可知, $\tilde{Q}_k$ 可由 $\tilde{P}_k$ 表达,除向量 P 属于未知参数以外,其余各项参数都属于已知状态,之后利用 Matlab 编程的方法确定最终结果。

3 数值分析结果

3.1 模型建立

图 2 是水电机组转子-轴承的结构图。对转子进行简化处理将其看成一个圆盘,质量为 m_1 , 再将转子两端设置滑动轴承作为支撑结构,同时保持上、下端轴承质量都是 m_2 ; 上、下导轴承沿转子两侧呈对称结构,建立刚度与阻尼的线性关

系;不考虑扭转振动程度与陀螺力矩影响,只对转子横向振动状态进行分析。

本文采用时频域转换的方法实现非线性项数值的 Fourier 展开,再通过 Newton-Raphson 迭代过程完成数据仿真计算。

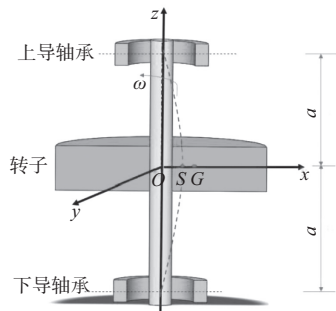


图2 水轮发电机组转子-轴承模型图

3.2 结果分析

设定以下模型参数:轴承质量 $m_2 = 25 \text{ kg}$;转子质量 $m_1 = 60 \text{ kg}$;转子阻尼 $c_1 = 4\,000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$;轴承阻尼 $c_2 = 1\,200 \text{ N} \cdot \text{s/m}$;转子长度 $L_r = 0.15 \text{ m}$;转子半径 $R_r = 0.06 \text{ m}$;气隙尺寸 $\delta_0 = 4.5 \text{ mm}$;轴承长度 $L_b = 0.3 \text{ m}$;轴承半径 $R_b = 0.5 \text{ m}$;励磁电流 I_f 为 4 A ;偏心量 $e_0 = 0.6 \text{ mm}$;气隙基波系数为 5.2 ;空气磁导系数为 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$;绝对润滑油黏度 $\mu = 18 \text{ Pa} \cdot \text{s}$;碰摩摩擦因数 $f = 0.01$ 。

1) 周期运动分析

设置初始迭代参数 P ,经少数迭代获得 HB-AFT 结果,具体如图 3(a)所示。可以看到该结果跟 R-K 方法计算结果达到了良好吻合度,充分体现了 HB-AFT 计算结果的精度。图 3(b)给出了以 HB-AFT 法与 R-K 法进行计算获得的转子 x 方向时域曲线,通过对比发现上述方法在系统稳态解方面存在显著区别。R-K 法总共经过 260 个周期以及 17.4 s 时间的瞬态计算之后才达到稳态;而采用 HB-AFT 方法则不需要通过瞬态解作为判断依据便能够直接计算得到系统的稳态参数,实际耗时只有 7.72 s。因此在确定系统稳态周期方面,采用 HB-AFT 方法不但可以获得准确结果,同时大幅缩短运算时间,从而实现更高的控制精度并达到省时的效果。

图 4 给出了采用 c_z (轴颈间隙)作为控制指标时对应的转子系统分岔图。结果显示:当 c_z 增大后,系统响应形式表现为周期与拟周期的交替状态,并包含了其他多种复杂的运动形式。对于 $c_z \leq 0.2 \text{ mm}$ 的情况下,采用 HB-AFT 方法对系统

周期特征进行分析,由此获得跟 R-K 方法相符的运动轨迹。系统 1 倍频属于主要成分,其余频段的比例则处于较微弱的状态。以上结果表明,HB-AFT 方法可以满足发电机组转子-轴承系统的精确周期分析。

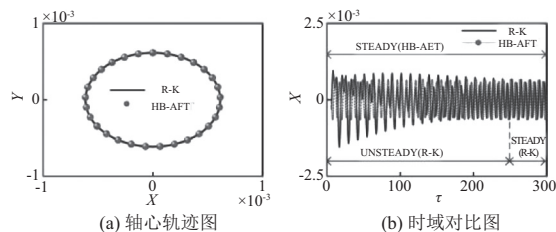


图3 $c_z = 0.2 \text{ mm}$ 时系统响应图

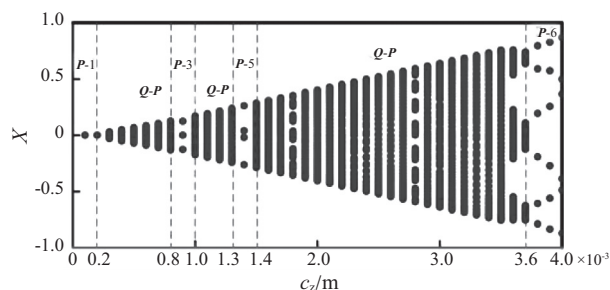


图4 以 c_z 为控制参数的系统分岔图

2) 稳定性分析

图 5 给出了 $c_z = 1.4 \text{ mm}$ 条件下的转子响应性能。随着 c_z 上升到 1.4 mm 之后,形成了 $1/4$ 基础频率与整数倍信号共同构成的形式。对图 5(c) 进行分析可知,频谱图内 $0.256\,35$ 倍频率处于主导地位,其次为 $1.007\,08$ 倍频率,其余频率因自身数值较低并未得到充分体现。图 5(a) 轨迹并未形成具有周期特征的封闭环状,形成了具有多圆环缠绕的结构。根据图 5(b) 庞加莱映射结果可以发现此时形成了四周期运动特征,此时选择 HB-AFT 方法进行解析的结果形成了与 R-K 方法相近的轨迹。

表 1 给出了系统与 c_z 相关的 Floquet 乘子计算结果。可以看到,处于某些轴颈间隙下时,系统表现为不稳定的变化特征,从而实现分岔结果,通常满足以下关系。

a) 对于 $c_z \leq 0.2 \text{ mm}$ 的情况, Floquet 特征乘子处在单位圆范围内,同时系统周期 1 解也保持稳定状态,轨迹图与 Poincaré 映射图依次呈现圆环和固定点的结构,结果如图 6(a) 所示。在以上区域中,以 HB-AFT 方法只能确定其中一个周期解。

b) c_z 在其他取值条件下时,系统形成了不同的周期运动特征, Floquet 特征乘子处于单位圆外

部范围,产生拟周期的运动形态,结果如图 6(b)所示,因此引起系统分岔的结果。系统最大特征乘子通过复数形式穿出复平面单位圆,存在分岔现象时可以推断此区域中形成了不稳定解。

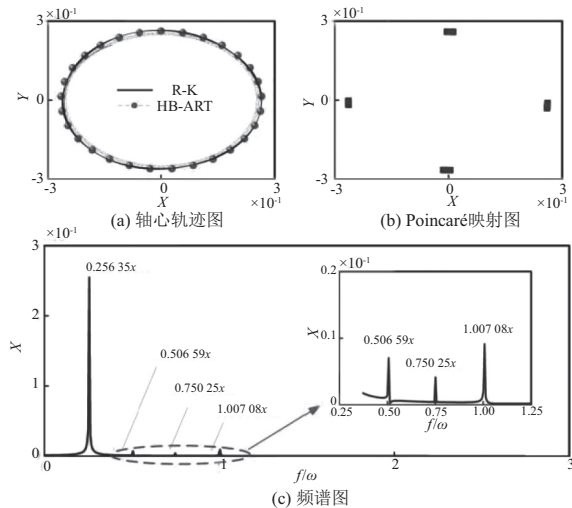


图 5 $c_z = 1.4$ mm 时系统响应图

表 1 以 c_z 为控制参数的 Floquet 乘子表

轴颈间隙 c_z/mm	主特征 乘子	最大 Floquet 乘子	结论
0.1	0.999 9+0.018 2i	1.000 1	周期解稳定 (周期 1)
0.2	1.000 7+0.171 0i	1.000 9	
0.3	1.001 5+0.015 9i	1.001 6	分岔 (周期 1)
0.4	0.999 9+0.016 0i	1.000 1	
0.5	0.998 5+0.168 0i	1.012 5	周期解稳定 (周期 3)
0.6	0.996 5+0.172 0i	1.011 2	
0.7	0.996 1+0.017 1i	0.996 3	分岔 (周期 3)
0.8	0.996 2+0.160 3i	1.009 0	
0.9	0.923 8+0.386 6i	1.001 4	周期解稳定 (周期 4)
1.0	0.922 7+0.387 1i	1.000 6	

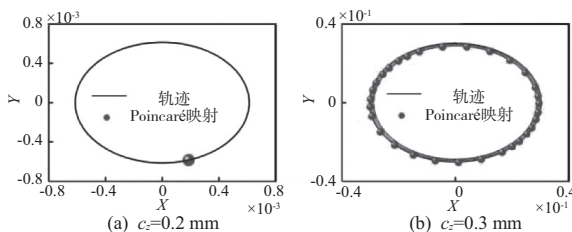


图 6 不同轴颈间隙下轨迹和 Poincaré 映射图

4 结语

1) 周期运动结果跟 R-K 方法计算结果达到了良好吻合度,充分体现了 HB-AFT 计算结果的精度,大幅缩短运算时间,实现更高的控制精度并达到省时的效果。表明 HB-AFT 方法可以满足发电机组转子-轴承系统的精确周期分析。

2) 随着 c_z 上升到 1.4 mm 之后,形成了 1/4 基础频率与整数倍信号共同构成的形式。选择 HB-AFT 方法进行解析的结果形成了与 R-K 方法相近的轨迹。处于某些轴颈间隙下时,系统表现为不稳定的变化特征,从而实现分岔结果。

参考文献:

- [1] 张雷克,范宇宏,张金剑,等. 水轮发电机组横/轴有限元振动分析[J]. 振动与冲击, 2022, 41(14): 64-69, 98.
- [2] 陈思言,吴高强,朱朝领,等. 发电机励磁限制与发电机保护的配合关系研究[J]. 人民长江, 2022, 53(增刊1): 153-155, 159.
- [3] 付林,彭珍,郭文斌. 考虑系统频率响应特征的配电网综合优化规划[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(3): 117-119.
- [4] 王嘉良. 双馈异步风力机 BP 神经网络空载并网控制[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(2): 213-216, 221.
- [5] ZHANG E J, JIAO Y H, CHEN Z B. Dynamic behavior analysis of a rotor system based on a nonlinear labyrinth-seal forces model[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2018, 13(10): 101002.
- [6] XU Q, LUO Y Q, YAO H L, et al. Eliminating the fluid-induced vibration and improving the stability of the rotor/seal system using the inerter-based dynamic vibration absorber[J]. Shock and Vibration, 2019: 1746563.
- [7] ZHANG K, JIANG X K, LI S Y, et al. Transient CFD simulation on dynamic characteristics of annular seal under large eccentricities and disturbances[J]. Energies, 2020, 13(16): 4056.
- [8] GRIEBEL C. Analysis of leaf seal leakage performance under the influence of manufacturing variations using experiment and computational fluid dynamics[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2020, 142(12): 121009.
- [9] 陈文华,李芳同,胡小刚. 润滑油温度对碰摩转子-轴承系统稳定性的影响[J]. 水电能源科学, 2022, 40(7): 206-209.
- [10] 冯海生,肖永强,吴保国,等. 齿轮-转子-轴承系统复合故障振动特性研究[J]. 机械传动, 2022, 46(7): 7-16.

收稿日期: 2022-08-29