

应用全息谱技术诊断热变形不均匀引起的振动故障

刘 石, 屈梁生

(西安交通大学 智能仪器与监测诊断研究所, 陕西 西安 710049)

摘 要: 采用传统 FFT 频谱分析, 很难将汽轮发电机组由热影响引起的剧烈振动问题和转子失衡故障有效地区分开。本文依据所建立的转子模型, 从理论上分析了这类故障和转子失衡振动特征的区别, 采用了全息差谱技术和初相点分析方法识别和区分了这两类故障, 工程实例验证了该方法的有效性。

关 键 词: 汽轮机组; 转子动力学; 振动; 故障诊断; 全息谱

中图分类号: TK268.1 文献标识码: A

1 引 言

汽轮发电机组由于部件热变形不均匀引起的振动故障, 常见的有两种: 一是转子的临时热弯曲, 主要是转子在运转时圆周上受热不均引起; 另一种是汽缸以及轴承座的膨胀不良, 使转子中心变动或轴承座标高变化, 导致各轴承承载负荷的重新分配和轴承动力特性的改变, 从而引起振动状态的显著改变。这类部件热变形不均匀引起的振动故障和不平衡故障按激振力划分同属普通强迫振动, 传统 FFT 频谱分析均表现为 1X 幅值大。统计资料表明, 现场发生的振动 80% 以上均属于这类普通强迫振动, 如果这种部件热变形不均匀引起的振动故障诱发的激振力和转子不平衡力不能得到有效的区分, 会造成现场绝大多数振动故障不能获得明确的诊断^[1]。

本文以转子动力学理论为基础, 对转子临时热弯曲、汽缸及轴承座膨胀不良所引起的振动响应进行了分析, 并将基于信息融合的全息谱技术引入汽轮发电机组部件热变形不均匀引起的振动故障的诊断中, 有效地将部件热变形不均匀引起的振动响应和不平衡响应区分开来, 避免了现场动平衡的盲目

性^[2]。

2 弹性支承—转子系统振动模型的分析

汽轮发电机组是一个包含多个转子及叶轮、支承及润滑等各子系统的多自由度复杂系统, 为了分析不平衡以及部件热变形不均匀引起的振动故障的振动响应, 将其简化为弹性支承多圆盘转子系统模型进行分析。

2.1 不平衡响应

在不计转子陀螺力矩时, 考虑到转子轴承系统刚性和阻尼等的各向异性, 用复变量 $r = x + iy$ 表示系统的振动响应。根据转子动力学理论, 不平衡引起转子振动的微分方程^[3]为:

$$[M] \{\ddot{r}\} + [C] \{\dot{r}\} + [K] \{r\} = \omega^2 \{Q\} e^{i\omega t} \quad (1)$$

第 j 个圆盘中心振动的稳态解为:

$$r_j = \sum_{n=1}^N D_n \frac{\epsilon_n \phi_j^{(n)}}{M} e^{i(\omega t - \theta_n)} \quad (2)$$

式中: D_n —放大系数, $D_n = \lambda_n^2 / \sqrt{(1 - \lambda_n^2)^2 + 4\xi_n^2 \lambda_n^2}$; λ_n —转子转动角速度与第 n 阶固有频率的比值; ϵ_n —广义偏心距; $\phi_j^{(n)}$ —第 n 阶模态振型 $\{\phi^{(n)}\}$ 的第 j 个元素; ξ_n —第 n 阶模态阻尼系数; θ_n —第 n 阶模态振型的相位滞后角, $i = \sqrt{-1}$ 。

式(2)说明, 转子不平衡响应可以看作其各阶模态不平衡响应的线性叠加, 在自转角速度 ω 确定时, 其转频轨迹为一椭圆(转子各向异性造成)。不平衡响应式(2)可最终简化为:

$$r_j = x_j + iy_j = A_j \sin(\omega t + \alpha_j) + iB_j \sin(\omega t + \beta_j) \quad (3)$$

收稿日期: 2003-09-28; 修订日期: 2003-12-22

基金项目: 陕西省科委重点科技攻关项目(2000K09-G12)

作者简介: 刘 石(1974-), 男, 湖北黄石人, 西安交通大学博士生。

2.2 弯曲响应

应用模态分析理论, 将 Jeffcott 转子的不平衡弯曲响应推广到多圆盘弹性支承系统^[4], 此时第 j 个转盘中心工频响应可表示为:

$$r(j, \omega) = r_u(j, \omega) + r_b(j, \omega) = \sum_{n=1}^N (u_n \omega^2 + \epsilon_n \omega_n^2) N_n(\omega) \phi_j^{(n)} e^{i\omega t} \quad (4)$$

式中: $N_n(\omega) = [(\omega_n^2 - \omega^2) + 2i\xi_n \omega_n \omega]^{-1}$; u_n —第 n 阶模态的不平衡量; ϵ_n —第 n 阶模态弯曲量。

当转子仅存在临时热弯曲故障时, 此时转子的工频响应 $r(j, \omega)$ 为:

$$r(j, \omega) = r_b(j, \omega) = \sum_{n=1}^N \epsilon_n \omega_n^2 N_n(\omega) \phi_j^{(n)} e^{i\omega t} \quad (5)$$

假定转子继续发生热弯曲, 热弯曲的相位保持不变, 当达到弯曲量增大 δ 倍时, 由式(5)推导出第 j 个圆盘处相同转速下转子的工频振动量 $r'(j, \omega)$ 为:

$$r'(j, \omega) = r'_b(j, \omega) = \sum_{n=1}^N \delta \epsilon_n \omega_n^2 N_n(\omega) \phi_j^{(n)} e^{i\omega t} = \delta \hat{\phi}(j, \omega) \quad (6)$$

式(6)是在假定转子发生临时热弯曲的相位保持不变, 热弯曲大小是发生变化的前提下得到的。在此假设下, 转子热弯曲产生的工频响应大小发生变化, 相位保持稳定。在工程实际中, 由于产生热弯曲的原因很多, 热弯曲的相位也可能变化, 如动静碰磨造成的热弯曲, 但从区分临时热弯曲和失衡故障的角度分析, 实验和工程诊断结果证明假定热弯曲的相位不变仍能较好地满足工程诊断的要求。

2.3 支承力变化的振动响应模型

当汽轮发电机组存在汽缸或轴承座的热膨胀不良故障时, 汽缸的变形以及轴承座标高的变化将改变转子所受支承力的大小和方位, 从而引起转子的剧烈振动, 这也是一种常见的由于热变形不均匀引起的振动故障。当转子同时存在不平衡和热变形引起的支承力变化时, 其振动微分方程可表示为:

$$[M] \ddot{r} + [C] \dot{r} + [K] r = \omega^2 \{Q\} e^{i\omega t} + \{F_{th}\} \quad (7)$$

式中: $\{F_{th}\}$ 表示支承力的变化。参照式(1)的解, 不难得出式(7)所对应的第 j 个圆盘中心振动的稳态解为:

$$r_j = \sum_{n=1}^N D_n \frac{\epsilon_n \phi_j^{(n)}}{M} e^{i(\omega t - \theta'_n)} + \sum_{n=1}^N D_n \frac{F_n \phi_j^{(n)}}{M \omega^2} \cos(\omega t - \theta'_n) \quad (8)$$

式(8)的第一项代表不平衡响应, 第二项代表

支承力变化的振动响应, 很显然第二项为实数项, 因而该响应应具有明显的恒定方位, 即支承力变化的方位。

3 部件热变形不均匀引起的振动故障在全息谱上的表征

为了准确地区分热变形不均匀引起的振动故障和不平衡故障, 引入全息谱诊断技术。全息谱技术实质是一种在数据层进行信息融合的方法。当机组转子的一个截面上互相垂直布置两个传感器, 两个传感器进行信息融合后的综合信息将比单传感器更加全面地反映该截面的振动状态。

3.1 初相点分析^[3]

首先将一个截面上互相垂直布置两个位移传感器信号经隔直、滤波处理; 分别应用包含内插技术的 AFFT 精确地确定谱线的频率、幅值和相位; 提取两方向工频分量后加以合成:

$$\begin{cases} x = A \sin(\omega t + \alpha) \\ y = B \sin(\omega t + \beta) \end{cases} \quad (9)$$

x, y 可视为该截面转子转频轴心轨迹的参数方程, 其形成的轨迹为一椭圆, 称之为转频椭圆, 即工频的二维全息谱。参照 2.1 节转子失衡响应的理论分析, 当转子只存在不平衡故障时, 式(9)的物理意义与理论分析所得结果式(3)在本质上是一致的, 均代表了用复向量形式表达的转子失衡响应, 这种表达形式兼顾了转子两个方向的振动信息, 考虑了转子—轴承系统各向刚度异性的因素, 刻画转子的振动特征更全面。

定义当转子上的键相槽正好对着键相传感器, 转子进动到初相点位置, 由式(9)或式(3)可定义初相点的矢量表达式为:

$$IPP = \sqrt{(A \sin \alpha)^2 + (B \sin \beta)^2} e^{i \arctan \frac{B \sin \beta}{A \sin \alpha}} \quad (10)$$

转频椭圆上的初相点, 也就是转子转频轴心轨迹上 $\omega t = 0$ 的点。初相点的物理意义在于: 当转子上失衡大小变化, 失衡的方位不变, 初相点在转频椭圆上的相对位置保持不变; 转子上失衡大小不变, 失衡的方位变化, 初相点在转频椭圆上的相对位置将随之改变。

由 2.2 节弯曲响应的理论分析结果式(6)可知: 当转子不平衡状态没有改变时, 在不同热弯曲量的情况下, 转子工频响应的大小虽然发生了变化, 但其相位是稳定不变的, 因此当转子继续发生热弯曲时, 此时初相点切线的斜率 k' 为:

$$k' = \frac{dy'}{dx'} \Big|_{t=0} = \frac{B\omega\cos\beta}{A\omega\cos\alpha}$$

$$= \frac{B\cos\beta}{A\cos\alpha} = k = \frac{dy}{dx} \Big|_{t=0} \quad (11)$$

由式(11)可知, 在恒定转速下, 当转子不平衡状态没有改变, 热弯曲量不断加大时, 代表转子工频响应的转频椭圆不断变大, 而转频椭圆上初相点处的切线仍然保持相互平行。

3.2 全息差谱分析

式(9) 转频椭圆的参数表达式可写成如下形式:

$$\begin{cases} x = s_x \cdot \sin(\omega t) + c_x \cdot \cos(\omega t) \\ y = s_y \cdot \sin(\omega t) + c_y \cdot \cos(\omega t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $s_x = A\cos\alpha$, $c_x = A\sin\alpha$ 分别代表信号 x 的正弦项和余弦项系数; $s_y = B\cos\beta$, $c_y = B\sin\beta$ 分别代表信号 y 的正弦项和余弦项系数。当转子回转的圆周频率 ω 已知, 任一测量面 i 的转频椭圆可用向量 $r_i = [s_{xi}, c_{xi}, s_{yi}, c_{yi}]$ 表示; 而三维全息谱集成了全部支承处的转频椭圆, 其参数矩阵表达式为: $R = [r_1, r_2, \dots, r_n]$, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为支承截面的数目。初相点表示为 $IPP_i = [c_{xi}, c_{yi}]$ 。当三维全息谱采用这种矩阵表达方式后, 通过矩阵的相减可以更容易获取转子振动响应的变化, 称之为全息差谱, 其表达式为:

$$\Delta R = R' - R \quad (13)$$

对于线性的转子模型, 全息差谱代表了转子振动响应的变化量, 反映转子所受激振力的大小和方位。

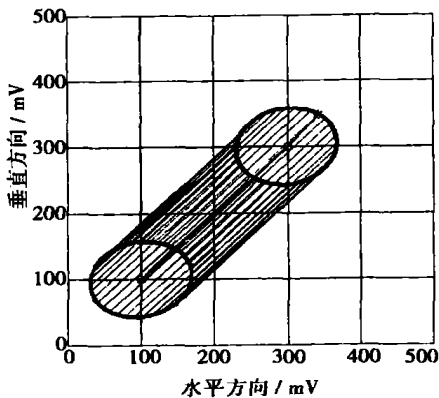


图 1 纯试重的三维全息差谱

在转子试验台上验证了全息差谱所表征的物理意义, 试验台转子上对称布置两个转盘, 转盘圆周上均匀布置有螺孔用于添加不平衡质量, 转速为 3 600 r/min。两个转盘均在相同的方位加相同试重, 测量

加重前后的一个测量截面上 X 、 Y 两个相互垂直方向的轴振(试验数据为电压信号, 单位 mV), 分别得到加重前后的三维全息谱, 将加重前后的三维全息谱相减获得全息差谱代表了纯试重的振动响应。图 1 所示为两转盘均在键槽顺转向 225° , 加试重 1.0 g 的纯试重的三维全息差谱, 显然两椭圆大小相等表明两转盘上所加试重大小相等, 差谱的初相点方位表征了试重的方位。将试重在转盘上每间隔 45° 顺转向移动一周, 按上述步骤得到 8 组纯试重的全息差谱, 将这些差谱在一个测量端面初相点画在一个坐标系中, 结果发现差谱的初相点也等间隔顺转向移动一周, 和所加试重的方位存在一一对应关系。上述试验证明了全息差谱能全面反映转子所受激振力大小和方位的变化。

4 诊断实例

4.1 临时热弯曲故障的诊断

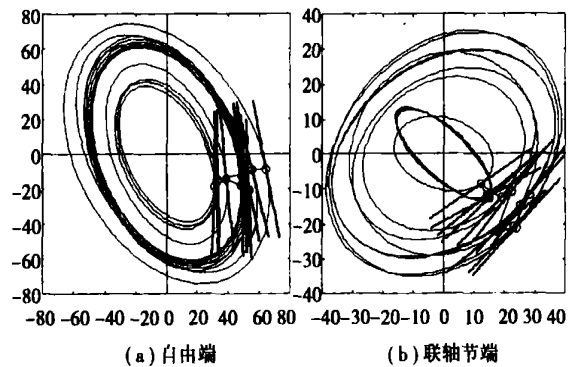


图 2 在工作转速下转子热弯曲的二维全息谱图

如前理论分析和初相点特征可知, 当转子发生热弯曲时, 如果转子原始不平衡状态没有改变, 即失衡大小方位没有改变, 仅仅因为临时热弯曲后工频振动加大, 这时在振动加大前后初相点在转频椭圆上的切线应保持平行。某机组在启动过程中振动正常, 带负荷过程中转子存在受热不均匀, 振动逐渐增大直至超过安全报警线。工厂一直认为振动原因是不平衡, 把转子送到汽轮机厂做高速动平衡, 平衡三次仍没有消除振动。该机组振动大实际上是启动过程中转子发生了临时热弯曲, 由于停机后转子冷却热弯曲故障消失致使工厂一直未能找出真正的故障原因。图 2 所示, 做转子工作转速下的不同时段下的转频椭圆及初相点处椭圆切线, 发现即使振动很大且椭圆长轴的方向都已改变时, 初相点切线仍然

基本保持平行;而转子发生不平衡故障时,其失衡方位通常是随机产生的,初相角也会随机发生变化,切线保持平行的概率很低,这样通过监测初相点的变化就把热弯曲问题和转子不平衡问题有效区分开,从而避免盲目采用动平衡消振造成的经济损失。

4.2 应用全息差谱诊断汽缸膨胀不良故障

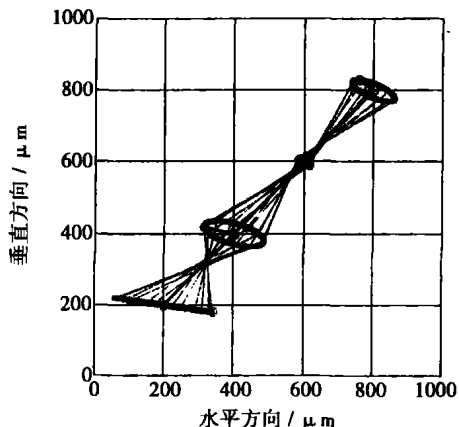


图 3 振动爬升前后的工频三维全息差谱

某国产 300 MW 机组,经过现场动平衡后,启动过程振动正常,并网带负荷至 180MW 后 1 号瓦振动值开始爬升,最后 1 号瓦 Y 方向的转轴振动达到 180 μm,被迫停机。在启动过临界过程中,振动量并不大,说明转子无永久性弯曲,从而也排除了机组有多种转频故障存在的可能性。将振动爬升前后数据作三维全息差谱(如图 3),它反映了转子振动响应的变化。从图中可以观察到 1 号瓦、2 号瓦的差谱呈倒锥形,且 1 号瓦的差谱长轴水平,椭圆十分“扁”,偏心率很大,根据全息差谱分析说明转子在 1 号瓦和 2 号瓦处受到一个附加的力偶作用。由于转子的转速离二阶临界转速尚远,此力偶分量不可能是二阶模态形成,不能用动平衡方法消除。力偶产生原因是 1 号、2 号瓦分别受到方向相反的水平力作用,通过监测高压缸左右热膨胀不一致(从机头看,左边为 27.4 mm,右边为 24.3 mm)也证实上述诊断。高压缸左右膨胀不一致导致前箱中的 1 号轴瓦水平方向发生倾斜,当转子的位置未发生变化时,1 号瓦右侧间隙加大,支承力发生改变,全息差谱初相点显示在 1 号轴瓦作用下转子受向右的水平力。现场观察高压缸轴封右侧漏气量大,也验证了由于汽缸的倾斜导致塔侧轴封间隙增大,与上述诊断结果相符。

5 结 论

(1) 全息谱技术对汽轮发电机组等大型回转机械,具有很强的故障识别能力,该方法能全面利用信息,直观地揭示转子的振动行为,许多在传统 FFT 谱下显示相同征兆的故障通过全息谱分析后可以作出明确的判断。

(2) 实践证明,通过监测转频椭圆初相点及其切线的变化可以有效区分汽轮发电机组转子的临时热弯曲和不平衡故障。

(3) 全息差谱能揭示转子振动响应的变化,通过全息差谱分析激振力变化的大小与方位,能有效识别汽缸膨胀不良引起的振动故障。

参考文献:

- [1] 施维新. 汽轮发电机组振动及事故 [M]. 北京: 水利电力出版社 1999.
- [2] QU LIANGSHENG, XU GUANGHUA. One decade of holospectral technique: review and prospect [A]. **Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conferences** [C], Las Vegas, Nevada 1999.
- [3] 钟一谔, 何衍宗, 王 正, 等. 转子动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1987.
- [4] FLACK R D, ROOKE J H. Comparison of the unbalance responses of jeffcott rotors with shaft bow and shaft runout [J], **Transaction of ASME, Journal of Mechanical Design**, 1982 104(2): 318- 328.

· 书 讯 ·

能源与动力装置基础 (普通高等教育“十五”规划教材)

本书系统地介绍了能源动力工程中主要机械(叶轮机械和容积式机械)、设备(换热器和锅炉)、装置(各种发电和制冷等装置)的组成、结构、工作原理和性能。

读者对象: 热能与动力工程专业师生, 化工、冶金、建筑、机械等行业工程技术人员

大 16 开, 480 千字, 340 页, 压膜装,

定价: 26.00 元。

复杂反应流自适应化学理论计算的研究现状 = **The Present Status of Research on an Adaptive Chemistry (AdapChem) Concept for Calculating Complex Reaction Flows** [刊, 汉] / QIAO Yu, XU Ming-hou (National Key Laboratory of Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), Pisi Lu (Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave., Cambridge, MA 02139), // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 331~335.

Professor Green of the Department of Chemical Engineering under the Massachusetts Institute of Technology has proposed an adaptive chemistry (AdapChem) concept, under which by the use of a consistent splitting method conservation equations can be divided into two organic parts, namely, a chemical equation and a flow equation. Depending on different reaction conditions, the above method makes it possible to perform in-domain numerical simulations of non-complex detailed and elementary reaction models by using a multitude of simplified chemical reaction models. As a result, an effective approach is provided for avoiding the loss of efficiency under the condition of retaining chemical precision. However, to further improve AdapChem, it is necessary to introduce a radiation model, which has not been taken into account previously. In this connection, the authors have employed a discrete coordinate method. The simulation results of a CH₄/air flame have shown that with the radiation model being incorporated the graphical expression of calculation results did not undergo significant changes and there was also a rational reduction in temperatures. **Key words:** adaptive chemistry, consistent splitting method, simplified model, discrete coordinate method.

循环流化床燃烧技术的研究展望 = **Prospective Research Progress of Combustion Technology for Circulating Fluidized Beds** [刊, 汉] / YU Long (Harbin Boiler Works Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150040), LU Jun-fu, YUE Guang-xi (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), WANG Zhi-wei (National Thermal Power Research Institute, Xi'an, China, Post Code: 710032) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 336~342.

Some major issues currently receiving focused attention are addressed, which are mainly concerned with the further development of circulating fluidized-bed combustion technology. They include: combustion efficiency achievable when burning various ranks of coal, water circulation during operations with supercritical parameters, the diffusion of particles and gases in gas-solid dual-phase flows under the condition of large bed sections, emissions of NO_x and SO₂ and their control, flow problems near side-wall zones, etc. **Key words:** circulating fluidized bed, boiler, prospective research progress.

应用全息谱技术诊断热变形不均匀引起的振动故障 = **Vibration Failures Due to the Non-uniform Thermal Deformation Diagnosed by the Use of Hologram Spectral Techniques** [刊, 汉] / LIU Shi, QU Liang-sheng (Intelligent Instrumentation and Monitoring-diagnosis Research Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 343~346.

When a traditional method based on FFT (Fast Fourier Transformation) frequency spectrum analysis is used, it is very difficult to effectively differentiate between the thermal effects-induced serious vibration problems and rotor loss-of-balance failures occurring in a turbogenerator. With the help of a rotor model built by the authors the difference between the above two types of problem and failure is analyzed from a theoretical viewpoint. Meanwhile, these failures were identified and differentiated by making use of hologram differential spectrum technology and an initial-phase point analysis method. Specific cases in engineering applications have verified the effectiveness of the above-mentioned method. **Key words:** vibration, failure diagnosis, hologram differential spectrum.

超临界汽轮机再热第一级叶片固粒冲蚀特性的数值分析 = **Numerical Analysis of the Erosion Characteristics of Solid Particles in the First Reheat Stage Blades of a Supercritical Steam Turbine** [刊, 汉] / DAI Liping, YU Mao-zheng, WANG Xian-gang, et al (National Key Laboratory of Multi-phase Flows in Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power*. — 2004, 19(4). — 347~350.

The three-dimensional motion characteristics of solid particles in the first reheat stage of a supercritical steam turbine were