

移相轨迹及其在全息动平衡中的应用

廖与禾, 张鹏, 郎根峰

(西安交通大学智能仪器与监测诊断研究所, 710049, 西安)

摘要: 移相轨迹将转子进动空间划分为恶化及改善转子平衡状态的2个不同的响应区域,在配重方案的搜索过程中具有指导作用.考虑到非对称刚度条件下的椭圆形进动轨迹会造成转子进动角与自转角之间关系的非线性,因此研究了通过相位补偿技术建立转子响应与配重质量之间的方位对应关系,将试重响应初相矢偏移量准确地转化为试重量偏移量,从而实现了移相轨迹的指导作用.通过对300 MW汽轮发电机组在现场动平衡中的应用,证明了该方法的有效性和准确性.

关键词: 全息动平衡;转子;初相矢;移相轨迹

中图分类号: TH113 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0803-04

Phase Shift Orbit with Application to Holobalancing Technique

LIAO Yuhe, ZHANG Peng, LANG Genfeng

(Research Institute of Cybernetics & Diagnostics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Phase shift orbit divides the response space into two different regions one of which can improve or and the other deteriorate the rotor balance. It plays a guiding role in the searching procedure for the balancing correction scheme. Considering the situation that the elliptical shaped orbit of an anisotropic rotor system may lead to a nonlinear phase increment relation between the initial phase vector and unbalance weight, the phase compensation formula then is established to implement the guiding function of the phase shift orbit. The effectiveness and correctness of the phase shift orbit is confirmed in a field balancing of a 300 MW turbine generator set.

Keywords: holobalancing; rotor; initial phase vector; phase shift orbit

对转子实施动平衡的实质在于如何通过振动信号找到平衡校正所需配重的质量和方位.传统的平衡方法(模态法^[1]和影响系数法^[2])建立在系统特性各向同性的假设基础上,由于各向异性刚度在转子系统中普遍存在,转子工频进动轨迹一般表现为一个椭圆,尤其当转频轨迹偏心率较大时,这种各向同性假设不尽合理,因此以此为基础进行的平衡计算就会不可避免地产生误差,从而影响了平衡方案的精度.

与传统平衡方法不同,全息动平衡法采用工频分量进动轨迹的初相矢作为平衡目标^[3],舍弃了转子各向刚度同性的假设,在平衡过程中考虑了转子的椭圆进动轨迹对平衡过程可能造成的影响,与采

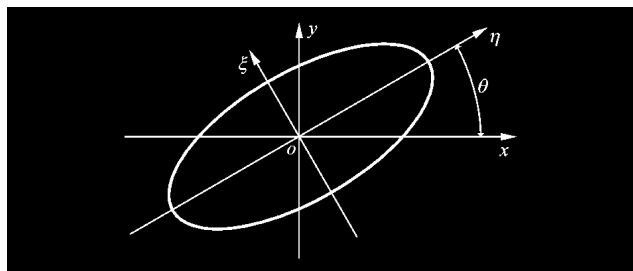
用单方向振动信号的传统平衡方法相比,对轴向对称的单跨双支承转子所进行的全息力、力偶分解平衡法具有更高的平衡精度和平衡效率^[4-5].本文在对初相矢和转子进动轨迹的特性进行分析的基础上,针对使用初相矢进行配重方案计算过程中出现的新问题及其解决方法进行了讨论.现场应用案例表明,移相轨迹在平衡过程中对配重方案的确定起到了重要的指导作用.

1 初相矢的定义及其特性分析

在转子某测振截面上,两相互垂直的方向上所拾取的振动信号中的工频分量为

$$\left. \begin{aligned} x &= A\cos(\Omega t + \varphi) \\ y &= B\cos(\Omega t + \psi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: Ω 为转子转速; A 和 B 分别为 2 个测振方向上的工频分量的幅值; φ 和 ψ 分别为对应方向上工频分量的初相位. 通过式(1)可以在直角坐标系中描绘出转子的工频轴心轨迹, 一般来说, 此轨迹为一个椭圆, 如图 1 所示.



η : 长轴方向的坐标; ξ : 短轴方向的坐标; θ : 长轴倾角

图 1 转子的工频进动轨迹

由于 φ 和 ψ 之间的差值往往并非 90° , 因此根据传感器安装方位建立的坐标系 xoy 与椭圆长短轴方向的坐标系 $\eta o \xi$ 并不重合, 在 ox 与 $o\eta$ 方向之间存在一个 θ , 而 θ 的大小取决于转子实际弱刚度方向与测振传感器方向之间的偏离程度. 因此, A 和 B 一般都不是转子进动的最大值.

在全息谱技术中, 将工频轨迹上对应于标准采样起始时刻($t=0$)的点称为初相点. 它代表了在进动过程中转子的上键相槽对准键相传感器时刻时, 转子轴心在工频轨迹上的位置. 从轨迹中心到初相点的矢量定义为初相矢. 其中初相点的表达式为

$$(x_0, y_0): \begin{cases} x_0 = A\cos\varphi \\ y_0 = B\cos\psi \end{cases} \quad (2)$$

对应的初相矢可以表示为

$$\mathbf{r}_0 = x_0 + jy_0 = r_0 e^{j\alpha_0} \quad (3)$$

式中: r_0 表示初相矢的幅值; α_0 表示初相矢的方位角, 可展开为

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= (x_0^2 + y_0^2)^{1/2} \\ \alpha_0 &= \arctan(y_0/x_0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

作为转子失衡重点的振动响应, 初相点在工频轨迹上的位置变化反映了转子上失衡重点的方位变化; 初相矢的幅度变化则描述了转子上失衡量大小的变化. 对于一个真实的转子轴承振动系统, 其输入输出是确定性的, 当失衡点位置在转子上移动一周时, 转子进动的初相点也在工频分量椭圆轨迹上移动一周^[6], 但二者之间的变化关系并不是线性的, 而是随着椭圆轨迹曲率的变化而变化, 这一点在轨迹偏心率较大时尤为明显. 为了更清晰地描述初相矢

在进动轨迹上与失衡重点在转子上的方位之间的关系, 下面假设转子上失衡重点的大小和方位已知, 且转子中除了不平衡以外没有其他故障的干扰, 则式(2)可以改写为

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \varepsilon \lambda_x \cos(\alpha_w + \varphi') \\ y_0 &= \varepsilon \lambda_y \cos(\alpha_w + \psi') \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: ε 为失衡质量; α_w 为失衡量在转子上的方位角; λ_x 和 λ_y 为对应测振方向上的幅值放大系数, 在系统各向刚度异性的情况下, $\lambda_x \neq \lambda_y$; φ' 和 ψ' 分别为对应测振方向上的机械滞后角. 其中, λ_x 和 λ_y 、 φ' 和 ψ' 均决定于系统特性与运行参数, 例如支承刚度和转速等. 当系统条件不变时, 这些参数在转子运行过程中为常量, 不随转子失衡状态的变化而变化. 将式(5)代入式(4)可得

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= \varepsilon \left[\frac{\lambda_x^2 + \lambda_y^2 + \lambda_x^2 \cos 2(\alpha_w + \varphi') + \lambda_y^2 \cos 2(\alpha_w + \psi')}{2} \right]^{1/2} \\ \alpha_0 &= \arctan \left(\frac{\lambda_y \cos(\alpha_w + \psi')}{\lambda_x \cos(\alpha_w + \varphi')} \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

从式(6)中可以明显地看出, 当 $\lambda_x = \lambda_y$ 且 φ' 与 ψ' 相位差为 90° (传统平衡方法中所做的各向同性假设) 时, 有 $\Delta\alpha_0 = \Delta\alpha_w$. 对于普遍存在的椭圆进动轨迹这种假设并不成立, α_w 与 α_0 之间的关系表现为如式(6)所示的复杂形式. 此外, r_0 也不仅仅取决于 ε , 受到椭圆轨迹的影响, r_0 还会随着 α_w 的变化而变化. 因此, 在全息动平衡技术中, 作为平衡目标的初相矢并不直接进行转子平衡状态的估计和判断. 全息动平衡是在确诊失衡作为转子惟一或主导故障的条件下, 将目标截面初相矢削减至零作为理论上的追求目标. 在转子系统刚度正常的情况下, 由纯失衡故障导致的转子进动轨迹应为一个小偏心率椭圆轨迹, 这样当目标截面的初相矢幅度有效减小时, 可以保证各方向的振动同时得到削减.

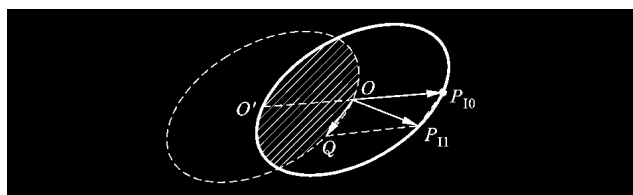
初相矢与转子失衡量之间相对复杂的关系是由转子系统特性非对称所造成的, 因此只有找到初相矢与转子失衡重点之间的变化关系规律, 才能根据转子失衡状态下的原始振动和试重响应得到配重的大小和方位.

2 移相轨迹与相位补偿

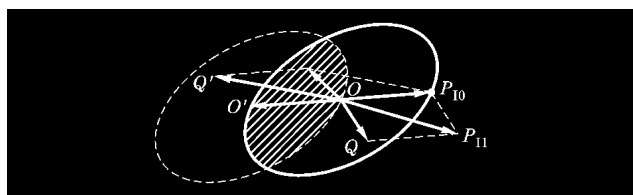
如图 2 所示, 在添加试重前后, 设工频椭圆上的初相点从 P_0 变为 P_{II} , Q 表示系统纯试重响应轨迹的初相点 (见图 2a). 若添加的试重仅使初相点在原

始轨迹上移位但没有改变原始轨迹的形状与大小,则表明转子的平衡状态没有因加重而发生变化.将这样一类纯试重响应的初相点连接起来,就形成了一个与原始轨迹的形状相同,但中心则移位至原初相点关于 O 点的镜像点 O' 的轨迹,称为移相轨迹.

当试重椭圆的初相点 Q 在移相轨迹范围以外时,所添加的试重将加大振动.当 Q 点落在移相轨迹以内(图2b中的 Q' 点)时,转子的振动将减小.当 Q 点落在图中阴影区时,具有最好的平衡效率,此时在取得相同平衡效果的情况下所需的配重质量最小.当 Q 在 O' 点时,该截面的振动从理论上讲可以减小为0.



(a)移相轨迹



(b)加重方位与移相轨迹的关系

O :原始进动轨迹中心; O' :移相轨迹中心; Q 、 Q' :纯试重响应初相点; P_{10} 、 P_{11} :原始及试重响应轨迹初相点

图2 移相轨迹及其与加重方位的关系

可见,移相轨迹是界定所加试重对平衡影响性质的边界^[4],也就是说,即使是添加平衡试重也应尽量使加重后的纯试重响应落在移相轨迹范围内,最好能落在工频椭圆与移相轨迹相交的阴影区以内.对于每一个平衡操作, O' 都是平衡所期望的最理想位置.因此,如果已经通过试重取得了试重响应,就可以根据纯试重响应的初相矢与目标矢量之间大小和方位的关系,对试重的大小和方位进行调整以获取平衡所需的配重.由于此时转子上试重的方位自转角 $\Delta\alpha_w$ 与初相矢的方位进动角 $\Delta\alpha_0$ 之间并非简单的线性对应关系,因此 $\Delta\alpha_w$ 必须根据转子进动的实际轨迹进行角度补偿来求取.

根据开普勒第二定律,转子在椭圆形轨迹上的进动过程中相同的时间内将扫过相同的面积,即转子的进动将不是匀速的.尽管转子进动一周与转子自转一周的时间相等,但在轨迹曲率较大的部分(靠

近轨迹长轴)进动速度较低,曲率较小的地方(靠近轨迹短轴)进动速度则较高.转子的自转与进动之间并不是固定的对应关系,因此平衡配重方位的计算,就是在考虑转子进动轨迹的条件下,根据移相轨迹确定的 $\Delta\alpha_0$ 来求取相应的 $\Delta\alpha_w$.

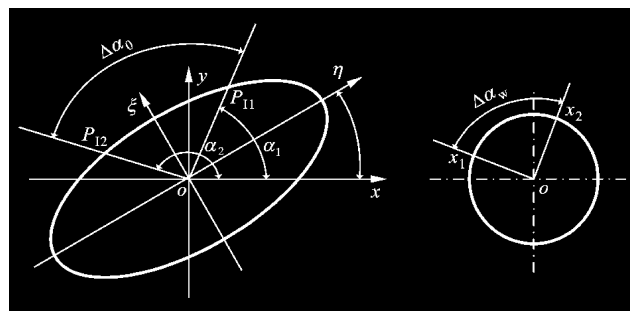
如图3所示,记 θ 为进动轨迹的主轴倾角,设试重轨迹初相点位于 P_{11} 处且根据平衡要求需要将此初相点移至 P_{12} 位置,记 α_1 和 α_2 分别为 P_{11} 和 P_{12} 处对应的初相角,则将初相点从 P_{11} 移动至 P_{12} 时需要在进动轨迹上扫过的角度为

$$\Delta\alpha_0 = (\alpha_2 - \theta) - (\alpha_1 - \theta) \quad (7)$$

将转子上与 P_{11} 相对应的重点位置记为 x_1 ,则为使 P_{11} 发生如式(7)所示的偏转,转子上的重点位置应偏移至 x_2 ,其对应的偏转角度为

$$\Delta\alpha_w = \arctan((a/b)\tan(\alpha_2 - \theta)) - \arctan((a/b)\tan(\alpha_1 - \theta)) \quad (8)$$

式中: a 、 b 分别为椭圆轨迹的长半轴与短半轴.



(a) $\Delta\alpha_0$ 的运动轨迹

(b) $\Delta\alpha_w$ 的运动轨迹

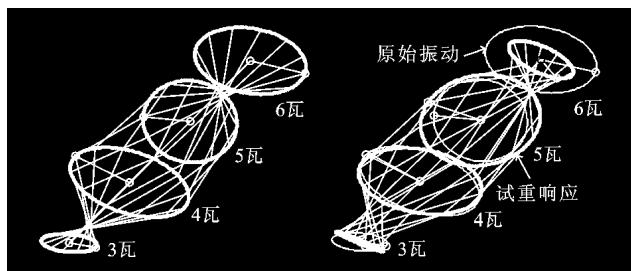
图3 $\Delta\alpha_0$ 与 $\Delta\alpha_w$ 之间的关系

由式(7)和式(8)建立了转子进动角与自转角之间的对应关系,可以根据实际情况将试重移动到需要的位置,因此通过移相轨迹来确定纯试重响应的 OQ 与 OO' 之间的 $\Delta\alpha_0$,并根据式(8)来调整试重方位,从理论上将该截面的振动降至最小.

3 案例分析

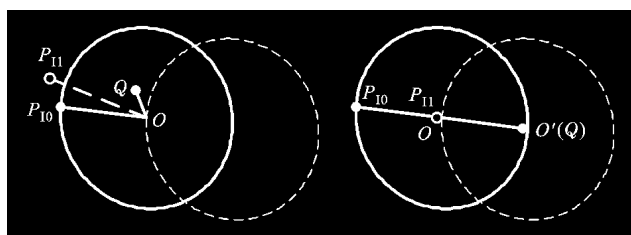
图4为一台300 MW汽轮发电机组失衡转子(3瓦~6瓦)原始轴振的三维全息图谱,这是该机组经过2个多月的大修(主要是更换断裂的叶片)后的第1次起车,4瓦~6瓦轴振严重超标并导致机组连锁停机,个别测点的振动峰峰值最大已超过200 μm .对机组振动情况的分析确诊,得出转子失衡为机组的主导故障,现场第1次有效试重位置在靠近6瓦的加重面上.图4b为添加试重后机组的振动与原始振动情况的比较.可以看到,除6瓦本身振动有所减小以外,其余截面的振动都有不同程度的增大.

对振动增大的5瓦的分析表明,该截面处纯试重响应的OQ位于移相轨迹之外(见图5a)。



(a)机组原始振动 (b)试重响应与原始振动

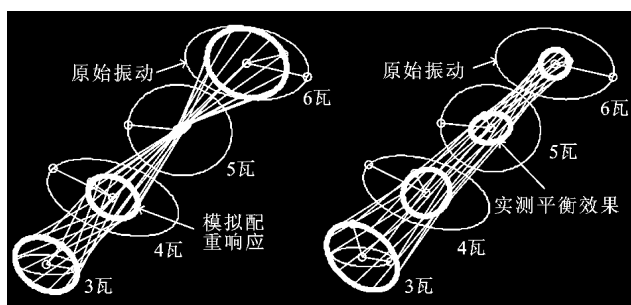
图4 机组原始振动与试重响应的比较



(a)第1次有效试重的响应(5瓦) (b)移相轨迹指导下的模拟配重效果(5瓦)

图5 移相轨迹的配重方位指导

以图4中的5瓦为目标,根据移相轨迹对试重进行调整后的模拟加重效果如图5b所示.模拟的纯配重响应初相点Q几乎完全与移相轨迹中心O'重合,加重后的轨迹初相点 P_{11} 十分接近原始振动轨迹中心O点,表明该截面的振动得到了显著减小.如图6所示,模拟配重效果显示5瓦的振动几乎被完全削减了,通过移相轨迹得到了准确的初相矢方位与配重方位的关系.



(a)模拟配重效果与原始振动比较 (b)实测平衡效果与原始振动比较

图6 配重方案的模拟及实测效果与原始振动的比较

由于机组整体振动情况比较复杂,各截面振动的移相轨迹不存在公共区域,此配重方案在完全消除5瓦振动的同时,在一定程度上增大了6瓦的振动.为了使各截面振动更为均衡,实际加重前在此方

案基础上对配重的大小和方位进行了计算机微调.图6b是采取了折中的配重方案后,机组的实测振动情况与原始振动情况的比较,可以看出4瓦~6瓦的振动均得到了有效的削减,平衡效果良好.

4 结 论

为了将试重响应初相矢偏移量准确地转化为相应的试重偏移量,本文通过转子自转角与进动角之间的相位补偿,解决了全息动平衡法中关于确定配重方位的关键问题,其过程与传统平衡方法相比虽然较为复杂,但却更加符合转子响应的实际情况.本文采用移相轨迹进行配重方案的指导,不仅简化了配重优化方案的搜索过程,缩短了配重优化时间,而且可以获得更为准确的配重方案.通过对一台300 MW汽轮发电机组的现场动平衡应用,表明了移相轨迹在配重方案确定过程中的有效性和准确性.

参考文献:

- [1] BISHOP R E D, GLADWELL G M L. The vibration and balancing of an unbalanced flexible bearings [J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1959, 1 (3): 66-77.
- [2] GOODMAN T P. A least-squares method for computing balance corrections [J]. Transactions of the ASME: Journal of Engineering for Industry, 1964, 86 (3): 273-279.
- [3] 屈梁生. 机械故障的全息诊断原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 114-125.
- [4] 邱海, 屈梁生. 全息谱力、力偶分解法在全息动平衡中的应用 [J]. 中国机械工程, 1998, 9(3): 44-46.
- QIU Hai, QU Liangsheng. Holospectrum decomposition in field balancing [J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9(3): 44-46.
- [5] LIU Shi, QU Liangsheng. A modified low-speed balancing method for flexible rotors based on holospectrum [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2007, 21(3): 348-364.
- [6] 屈梁生, 邱海, 徐光华. 全息动平衡技术: 原理与实践 [J]. 中国机械工程, 1998, 9(1): 60-63.
- QU Liangsheng, QIU Hai, XU Guanghua. Rotor balancing based on holospectrum analysis: principle and practice [J]. China Mechanical Engineering, 1998, 9 (1): 60-63.

(编辑 管咏梅)