

回转机械故障诊断中的三维全息谱技术

刘 石, 屈梁生

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 介绍了基于多传感器信息融合理论的三维全息谱的构成原理及其矩阵表示,对三维全息谱及其差谱的物理含义做了清晰的解释,提出了一种基于三维全息差谱的故障诊断方法. 试验研究表明,三维全息差谱的初相点相位和配重方位,以及初相点矢径大小和配重大小均呈线性关系. 因此,三维全息差谱可以在几个支承面同时反映转子所受激振力大小和方位的变化. 诊断实例表明,以三维全息差谱、三维全息谱分解为基础的三维全息谱诊断技术能全面利用转子各测量面的振动信息,在不增加额外诊断设备的情况下,确诊回转机械常见的振动故障,且在现场动平衡领域有着广阔的应用前景.

关键词: 全息谱;故障诊断;信息融合;动平衡

中图分类号: TH113 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)09 - 0900 - 04

Three2Dimensional Hologpectrum in Rotating Machinery Diagnosis

Liu Shi, Qu Liangsheng

(School of Mechanical Engineering, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: Based on the elemental principles and matrix expressions of three2dimensional hologpectrum and multi2sensor information fusion, a new method named the differential 3D2hologpectrum, is presented for fault diagnosis of large rotating machinery. The physical explanation of 3D2hologpectrum and differential 3D2hologpectrum are also put forward in detail. The experimental investigation reveals that the phase and the radius vector of initial phase point in the differential 3D2hologpectrum are proportional respectively to the direction and the magnitude of the trial weight, thus the differential 3D2hologpectrum can reflect the changes of exciting forces in both the magnitude and the phase simultaneously. Practical cases show that the three2dimensional hologpectrum, including the differential 3D2hologpectrum and decomposed 3D2hologpectrum, fully utilizes vibration information of rotor system in all measuring sections. Thus, the three2dimensional hologpectrum is a promising technology in both the fault diagnosis and balancing practice in situ of rotating machinery.

Key words: hologpectrum; fault diagnosis; information fusion; dynamic balancing

三维全息谱技术是在二维全息谱技术^[1]的基础上发展起来的. 根据信息融合的观点,将一个测量面的信息加以融合后考察,与孤立地分析各个测点信息相比,能更加充分地利用现有信息,这就是二维全息谱的理论基础. 在分析转子的振动行为时,我们更希望将所有测量面的信息作为一个整体来加以考察,因此在二维全息谱基础上将整个转子的各测量

面工频椭圆按时间和空间位置加以集成,即可获得三维全息谱,它能更加深刻地反映整个转子的振动全貌.

本文详细介绍了三维全息谱的构成原理,以及在此基础上发展起来的三维全息差谱、三维全息谱分解技术,并将该技术成功地应用到回转机械的故障诊断中,试验和现场实例证明,三维全息谱能充分

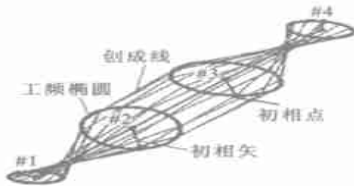
收稿日期: 2004 - 03 - 03. 作者简介: 刘 石(1974 ~),男,博士生; 屈梁生(联系人),男,教授,博士生导师,中国工程院院士. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50335030).

利用机组所有的振动信息,在回转机械故障诊断及转子动平衡领域有着广阔的应用前景.

1 三维全息谱基本原理

1.1 三维全息谱的构成

目前,大型回转机械都配备有电涡流传感器用以监测转子的振动,通常在每个轴承截面都安装有相互垂直的2个传感器.三维全息谱的信息融合方法首先是将位移传感器信号经过隔直、滤波处理,通过带内插校正算法的快速傅里叶变换提取工频分量后合成工频椭圆.然后,将各截面工频椭圆根据空间相对位置排列,并按时间顺序连接工频椭圆上相应的点,即生成三维全息谱.图1是由转子系统4个测量面的数据合成得到的三维全息谱.三维全息谱的4个构成要素在回转机械的故障诊断中分别起到不同的作用,例如在动平衡中,通过观察创成线可以判明失衡的类型.椭圆的形状和长轴方位反映了轴承的刚性和润滑情况,初相点代表了失衡的方位,初相矢反映了失衡的大小.图1实际上是在转子系统的#2和#3轴承之间的刚性联轴节上加配重后的结果,刚性联轴器致使其两侧的#2和#3轴承上工频椭圆上的初相点方向相同,创成线基本平行,而#1和#2轴承之间以及#3和#4之间的初相点相反,创成线交叉,三维全息谱呈倒锥状,这说明受力偶的不平衡作用.



#1~#4:轴承
图1 三维全息谱

1.2 三维全息谱的矩阵表达式

在一个测量截面上,其工频椭圆的参数方程为

$$\begin{cases} x = A \sin(\omega t + \phi) \\ y = B \sin(\omega t + \psi) \end{cases} \quad (1)$$

也可以将式(1)写为如下形式

$$\begin{cases} x = s_x \sin(\omega t) + c_x \cos(\omega t) \\ y = s_y \sin(\omega t) + c_y \cos(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ω 为转子回转的圆周频率; s_x, c_x 分别代表信号 x 的正弦项和余弦项系数; s_y, c_y 分别代表信号 y 的正弦项和余弦项系数.

当转子上的键相槽正好对着键相传感器时,转子进动到初相点位置.由式(1)可定义初相矢的矢量表达式为

$$V = [(A \sin \phi)^2 + (B \sin \psi)^2]^{1/2} e^{i \arctan(B \sin \psi / A \sin \phi)} \quad (3)$$

式中: $i = (-1)^{1/2}$. 初相点的坐标为 $t = 0$ 时的转子位置,其表达式为 $x_0 = A \sin \phi, y_0 = B \sin \psi$.

当已知,任一测量面 i 的工频椭圆可用向量 $r_i = [s_{xi}, c_{xi}, s_{yi}, c_{yi}]$ 表示,而三维全息谱集成了全部支承处的工频椭圆,故其参数矩阵表达式为

$$R = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: n 为支承截面的数目. 初相点的矩阵表达式为

$$P = \begin{bmatrix} c_{x1} & c_{y1} \\ c_{x2} & c_{y2} \\ \dots & \dots \\ c_{xn} & c_{yn} \end{bmatrix}$$

2 三维全息谱诊断技术

2.1 三维全息差谱及其意义

当三维全息谱采用式(4)的表达方式后,根据转子轴承系统的线性假设,通过矩阵的相减可以更容易获取转子振动响应的变化,称之为三维全息差谱,其表示为

$$R = R - R \quad (5)$$

对于线性转子模型,全息差谱代表了转子振动响应的变化量,反映了转子所受激振力变化的大小和方位.在转子试验台上验证全息差谱所表征的物理意义,试验台如图2所示.以下试验可证明全息差谱能在几个支承面同时反映转子所受激振力的大小和方位的变化,其试验步骤如下.

(1) 2个转盘均在相同的方位(以键槽逆转向计算加重方位)加相同配重110g,测量加重前后的 X, Y 方向的轴振,分别得到加重前后的三维全息谱.按公式(5)获得的加重全息差谱代表了纯配重的振动,



图2 转子试验台

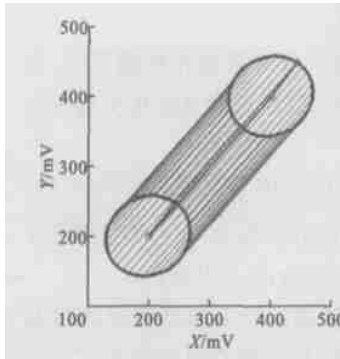


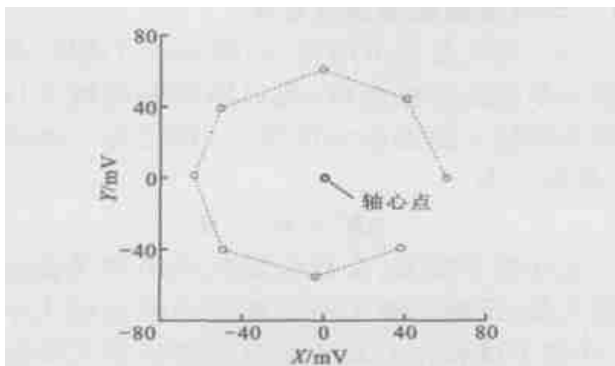
图3 纯配重的三维全息差谱

响应即纯配重响应的大小由差谱的椭圆大小表示,方位由差谱椭圆上初相点的方位表示.图3所示为两转盘均在键槽逆转向 135° 加配重 110 g 的纯配重的三维全息差谱.图中两椭圆大小相等表明两转盘上所加配重的大小相等,差谱的初相点方位表征了配重的方位,图中坐标 X 、 Y 分别代表水平、垂直方向的振动位移响应.

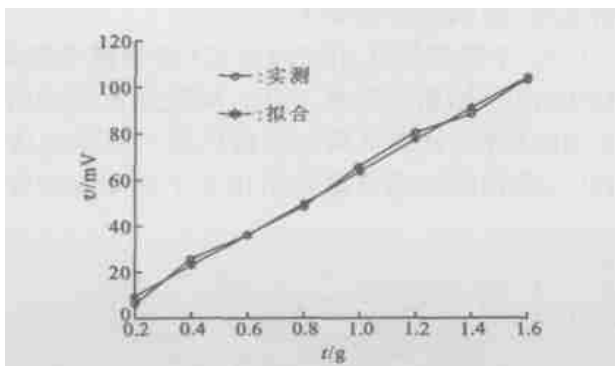
图中坐标 X 、 Y 分别代表水平、垂直方向的振动位移响应.

(2) 将配重在转盘上每间隔 45° 顺转向移动一周,重复步骤(1)得到8个纯配重的全息差谱,将这些差谱的联轴节端初相点画在一个坐标系中,如图4a所示.图4a中差谱的初相点角度随所加配重方位的变化呈线性关系.

(3) 在键槽逆转向 135° 的位置分别加配重 0.12 g , 0.14 g ,... 1.16 g ,重复步骤(1),考察全息差谱的初相点矢径(v)的大小与配重(t)大小的变化关系(见图4b).



(a) 与配重角度的关系



(b) 与配重大小的关系

图4 差谱初相点与配重的关系

2.2 三维全息谱分解技术

当柔性转子工作转速介于第1、2阶临界转速之间时,转子主要受工作转速左右2个相邻不平衡振型的影响,转子的三维全息谱可以被分解为力和力偶两部分.关于三维全息谱分解的详细论述见参考文献[2].

3 三维全息谱在故障诊断中的应用

3.1 三维全息差谱诊断由轴承座热态标高变化引起的振动

目前,国内绝大部分汽轮发电机组转子在找中心时,都是在冷态下进行的^[3],机组在启动、带负荷过程中各轴承座标高相对于冷态状况下将发生改变.轴承座标高的变化会导致各轴承负荷重新分配和轴承载力特性的改变,严重时还会引起轴系振动的明显增加.为了测量汽轮发电机组轴承座标高的变化,通常采用连通管原理^[4],通过涡流传感器测量水银面或液面上的金属浮漂,来测量两轴承座相对标高的变化,或者利用激光干涉原理来测量轴承座的绝对标高^[5].

应用三维全息差谱技术可以在不增加额外轴承座标高监测设备的情况下,识别和诊断轴承座热态标高变化的振动故障.例如,某国产 300 MW 机组经过现场动平衡后,启动过临界至 $3\ 000\text{ r/min}$ 时,各瓦振动均正常,并网带负荷后, #3、#4瓦处的轴振值开始爬升,当达到 $160\sim 170\ \mu\text{m}$ 时,振动以一倍频分量为主,且含有少量高倍频分量.依靠现场监测数据作工频椭圆观察, #3瓦处的工频椭圆形态稳定,各个椭圆的初相点位置基本不变,初相点处的切线大致平行,说明转子的原始平衡状态并没有变化,因此不能依靠重新平衡来解决机组的振动问题.当转子启动时,在低速下振动量不大,说明转子无永久性弯曲,也没有过大的机械跳动和电气跳动.当#3瓦与#4瓦振动爬升后,将轴振数据作出三维全息谱,再与爬升前的数据作出的三维全息谱相减,得到的差谱呈倒锥形(见图5),说明转子在#3瓦和#4瓦处受到一个附加的力偶,此力偶在刚启动时不存在,但时间越长它越大.由于转子的转速离二阶临界转速尚远,因此力偶分量不可能由二阶模态所形成.与此同时,由于作全息差谱的2组数据是在负荷相同、各运行参数一致条件下采集的,所以排除其他工况因素的干扰后,差谱反映的只能是转子在带负荷运行一段时间后,由热影响导致轴承座标高变化而引起的振动响应.为了验证上述推断,监测各轴瓦运行

中的温度,其中#3轴承的瓦温是50~55,为最低,说明#3瓦承载最小,标高最低.同时,当机组振动大时,#4轴承座和台板的间隙在0110~0115 mm,远远大于0104~0108 mm的设计值,说明#4轴承座标高在热态下提高了,从而进一步验证了上述的诊断结果.

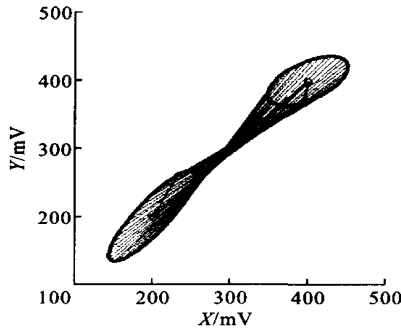


图5 振动爬升前后的三维全息差谱

3.2 三维全息差谱及分解技术在柔性转子低速动平衡中的应用

传统意义上的低速平衡仅能使转子在刚性振型下获得平衡,当工作转速超过一阶临界转速后,转子在柔性振型下的新的不平衡需要通过高速动平衡来加以平衡^[3].将三维全息谱分解技术应用到柔性转子低速动平衡中,力求在低速下减少平衡转子在工作转速出现的柔性振型不平衡,或者至少降低柔性振型的不平衡,以减少柔性振型平衡的工作量.该方法简称为低速全息动平衡方法,具体步骤如下:

(1)记录机组停机过程的数据,作Bode图以选取平衡转速(低于转子一阶临界转速),利用全息谱技术处理高于转子一阶临界转速的工作转速,以及低于转子一阶临界转速的平衡转速下的振动数据,获取柔性转子在其一阶临界转速前后的变化规律,即力不平衡响应和力偶不平衡响应在临界转速前后初相点的相位翻转与向径缩放;

(2)根据所选的平衡面,结合机组原始振动数据来确定添加试重的大小和方位,采集加试重后平衡转速下的振动数据,利用三维全息差谱获得纯试重的三维全息谱;

(3)用平衡转速下的数据拟合出工作转速下纯试重的三维全息谱,作为工作转速下单位试重的振动响应;

(4)根据工作转速下各测量面的原始不平衡响应,即根据平衡配重椭圆初相点成镜面的对称关

系^[2],利用全息动平衡方法^[2],通过角度补偿与向径缩放,来求取各配重的合理大小和相位,添加配重后,启动至工作转速,并验证平衡效果.

图6表示采用低速全息动平衡方法的平衡效果.从图中可看出采用全息低速平衡方法后,能够有效地平衡转子在工作转速下出现的柔性振型不平衡.

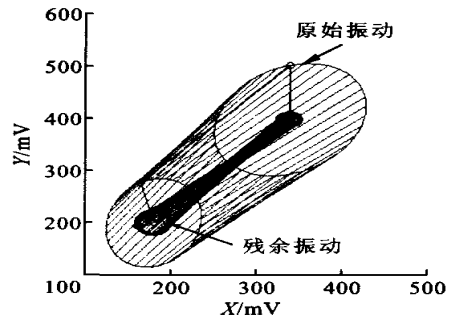


图6 低速全息动平衡结果

4 结论

(1)全息差谱的初相点角度和初相矢大小分别与所加配重的方位和配重大小呈线性关系,因此通过观察全息差谱的变化,可以全面了解转子所受激振力大小和方位的变化.

(2)现场诊断实例证明,三维全息差谱技术可以在不增加额外轴承座标高监测设备的情况下,识别和诊断由轴承座热态标高变化引起的振动故障.

(3)应用三维全息谱技术的低速全息动平衡方法,能够实现柔性转子在高于二阶临界的工作转速下二阶模态的平衡.

参考文献:

- [1] 屈梁生,史东锋.全息谱十年:回顾与展望[J].振动、测试与诊断,1998,18(24):235-242.
- [2] 屈梁生,邱海,徐光华.全息动平衡:原理与实践[J].中国机械工程,1998,19(1):60-63.
- [3] 施维新.汽轮发电机组振动及事故[M].北京:水利电力出版社,1999.126-154.
- [4] 田新启,邹丛林,杨建刚.320 MW汽轮发电机组轴系标高变化和振动故障处理[J].汽轮机技术,2000,42(5):299-302.
- [5] 王秀华,丰春芳,孙庆.激光标高测试系统在汽轮发电机组轴系中的应用[J].发电设备,2001(5):30-32.

(编辑 管咏梅)