

三维全息谱在诊断负荷诱发的转子 热弯曲与标高故障中的运用

王琇峰, 屈梁生, 廖与禾

(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:大型回转机械设备运行过程中由于负荷变化引起轴系振动变化现象极为常见, 异常振动往往由负荷变化引起的轴承-转子系统传递扭矩、热状态等工况的变化激发。将负荷激振机理与三维全息谱技术相结合, 充分运用三维全息谱表述的轴系振动信息, 识别不同故障的三维全息谱特征, 为识别负荷激发的振动故障提供了新方法。对热弯曲故障与标高故障进行了机理和三维全息谱特征分析, 现场数据验证结果表明, 通过机理分析得出的三维全息谱特征对负荷引起的振动故障具有良好的识别能力。

关 键 词:全息谱; 振动; 热弯曲; 标高; 负荷

中图分类号: TK263.6 文献标识码: A

引 言

大型回转机械(如汽轮发电机组)在负荷加载过程中振动增大达到报警界限甚至导致跳闸的事故在工业现场屡见不鲜, 负荷状态下机组振动过大不仅影响机组的效率, 且危及到机组的长期稳定运行, 因此, 研究负荷激振的机理和诊断方法并提出有效地解决方案具有重要的工程意义。

负荷引起轴系振动变化的原因较为复杂, 如高参数运行的大型汽轮机组的高压缸易发生汽流激振, 热弯曲变形则容易发生在轴系跨度大的大功率汽轮发电机组。本研究拟通过对故障机理和特征提取手段的分析, 寻找一种现场行之有效的负荷激振故障识别和解决方法。

热弯曲变形和热态不对中是与负荷变化密切相关的故障形式, 国内外学者针对以上故障进行了大量的机理和特征提取方法的研究, 夏松波等人回顾了不对中故障的研究成果并总结了不对中故障的特征^[1]。总体而言, 现有的研究方法主要围绕单个支

撑的振动、轴承运行参数进行故障特征提取。三维全息谱在二维全息谱的基础上发展而成^[2], 反映轴系的振动信息, 可全面描述负荷激振的振动特征。将负荷激振机理与三维全息谱技术相结合, 为识别故障提供了新的思路。负荷诱发的振动不一而足, 选取常见的热弯曲和标高变化引起的热态不对中故障进行三维全息谱分析, 分析结果验证了该技术的有效性。

1 三维全息谱技术基础

1.1 二维全息谱

全息谱是对大型回转机械(如透平压缩机、汽轮发电机组)所采集的原始数据进行融合的一种技术, 在数据层将转子各轴承横断面的振动信息加以集成; 它最主要的特点是充分利用各频率分量下的幅值, 频率和相位信息。

获取某轴承横断面轴振的全息谱信息要求在该测振面上分布有两个相互垂直的涡流传感器, 为了获取相位信息, 轴系需要安装键相传感器。图 1 为典型的测振截面传感器布置。

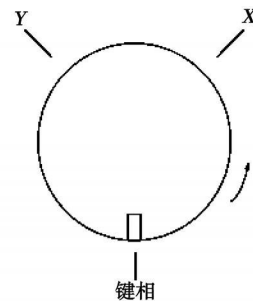


图 1 传感器布置位置

收稿日期: 2007-09-14; 修订日期: 2008-02-14

基金项目: 国家 863 计划(2006AA042429)和国家自然科学基金资助项目(50475084)

作者简介: 王琇峰(1980-), 男, 福建龙岩人, 西安交通大学博士研究生。

经过键相截取后获取的 x 和 y 的工频运动方程为:

$$\begin{cases} x = A \sin(\omega t + \alpha); y = B \sin(\omega t + \beta) & (1) \\ x = s_x \sin \omega t + c_x \cos \omega t \\ y = s_y \sin \omega t + c_y \cos \omega t \end{cases}$$

式中: A, B —幅值; α, β —相位; ω —旋转角速度; s_x, c_x — x 信号的正弦项和余弦项系数; s_y, c_y — y 信号的正弦项和余弦项系数。在平面直角坐标系中,将 x 和 y 的信号加以合成得到振动截面的转频椭圆。初相点是转子上的键相槽对准键相传感器时转子中心在转频椭圆上的位置。转频椭圆的初相位可以表达为:

$$Ho = \sqrt{(A \sin(\alpha))^2 + (B \sin(\beta))^2} < \arctan \frac{B \sin(\beta)}{A \sin(\alpha)} \quad (2)$$

$$\text{或: } \begin{cases} x = c_x \\ y = c_y \end{cases}$$

将其它频率(如高倍频或分倍频)的运动方程加以合成,便可以得到其它倍频的二维全息谱图。

1.2 三维全息谱和全息差谱

大型回转机械一般由多个轴承支撑,在支撑上布置用于测取轴振的涡流传感器,不同测振面的振动存在内在的关联,为了从轴系的角度描述转子振动特征,把每个支承载面上的二维全息谱中的同频椭圆按空间位置串联起来,便形成三维全息谱,三维全息谱反映了整个轴系在所有支承载面上的全部振动信息。

由 n 个测量截面合成的三维全息谱,可以用系数矩阵表示:

$$\begin{vmatrix} s_{xi} & c_{xi} & s_{yi} & c_{yi} \end{vmatrix} \quad i = 1 \dots n \quad (3)$$

初相点的坐标为:

$$(c_{xi}, c_{yi}) \quad i = 1 \dots n$$

全息差谱则是将不同工况的三维全息谱相减得到。全息差谱可用于量化工况的影响,如将某平衡配重面添加试重后的三维全息谱与原始振动的三维全息谱相减,则可以得到纯试重响应的三维全息谱。

2 热弯曲故障识别

2.1 热弯曲故障机理

热弯曲故障是汽轮发电机组的常见故障之一,Ruelle G 指出发电机转子产生热弯曲的原因可以概括为^[3]: (1)转子锻件的各向异性; (2)冷却系统不对称; (3)内部摩擦效应。对于汽轮机组轴系而言,转子锻件的各向异性和动静部件的内部摩擦是引起热弯曲的主要原因。以下将通过分析某大型汽轮发电

机组的热弯曲振动来说明三维全息谱对热弯曲故障的识别能力。

2.2 案例分析

随着电力设备设计和制造技术的不断发展,火电机组的单机容量不断提高,超临界、超超临界机组逐渐成为主流,以某型号的超临界机组为例,该类型机组的转子—轴承结构如图2所示。

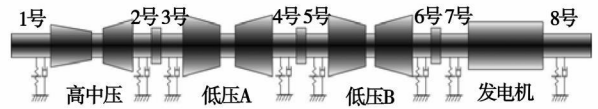


图2 汽轮发电机组结构

该型号某发电机组在运行过程中,由于在额定负荷下振动过大而停机进行平衡处理,总结试重过程中的振动特征发现如下规律:

(1)在工作转速下机组无负荷时机组振动合格,某次添加试重后启动至工作转速的三维全息谱如图3所示,在逐步添加负荷的过程中振动逐渐增大,在负荷加至约50%时振动不再增大,满负荷时的振动如图4所示;

(2)将同一次启车满负荷下的振动减去无负荷时的振动,得到满负荷影响的三维全息差谱如图5所示。用小于50%负荷的振动减去无负荷时的振动,得到该负荷影响的三维全息差谱,发现随着负荷的增大差谱图中同一测振面的二维全息谱椭圆形状和初相位稳定,椭圆的面积不断增大,负荷大于50%后影响的差谱趋向稳定;

(3)分析添加不同试重启车过程中的全息差谱发现,负荷对振动的影响具有可重复性,且差谱同一截面测振面的二维全息谱大小、形状和初相位不受试重的影响,即添加负荷后振动的增大与不平衡配重不存在关联;

(4)在不同的停车过程中采用不同的停车策略,振动特征如下:当采用滑停的方式逐步减小机组的负荷时,负荷对振动的影响逐步减小,采用甩负荷方式减至无负荷时,负荷所带来的振动响应并没有同步去除,而是在一定时间后缓慢衰减,因此负荷所产生的振动响应与负荷不同步,而是存在时间滞后。

结合该机组的结构和运行参数特征,负荷引起的振动响应可能由以下原因引起:汽流激振力和转子热弯曲。骆名文等人总结汽流激振具有如下特征^[4]: (1)汽流激振属于自激振动; (2)汽流激振易发生在汽轮机高压转子上,尤其在高参数大型汽轮机

组的高压转子上；(3)汽流激振具有良好的再现性。汽流激振有一个门槛值，当负荷超过该值时，振动将急速加剧；如果此时降低负荷，可以明显地降低振动。该机组负荷对轴系的影响在低压缸转子较为明显，同时振动变化与负荷变化存在时滞，且在负荷超过一定程度后振动不再增大，因此可以排除汽流激振引起的振动。

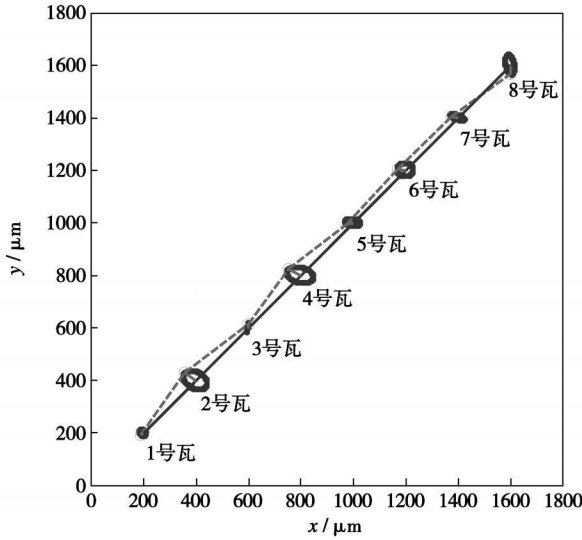


图 3 无负荷振动三维全息谱

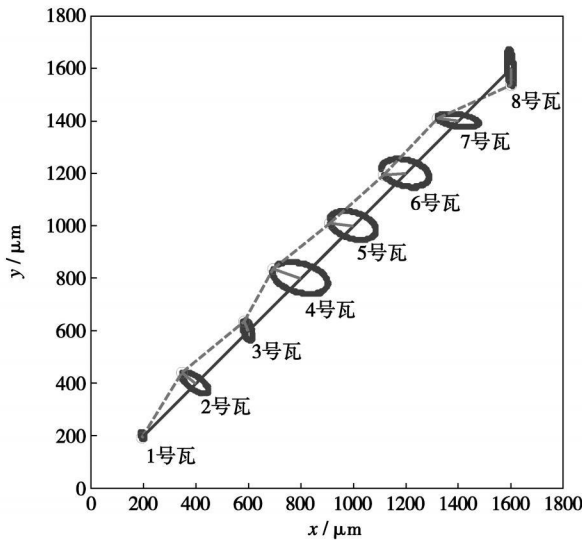


图 4 满负荷振动三维全息谱

观察图 5 的三维全息差谱可以发现，由负荷引起的振动在轴系表现为弓型回旋，且高压转子输入端到发电机转子输入端的测振面的相位基本一致，而电机转子两端的相位表现为反相量，结合机组的结构和运行参数，基本可以判定负荷引起机组振动变化的原因是低压转子的热弯曲变形，故障机理如下：

(1) 由于转子锻件的各向异性，同时低压转子的跨度较大，大型汽轮发电机组低压转子质量和叶片直径增大使转子的转动惯量增大。锻件的各向异性将引起转子各向挠度差异，由于大型汽轮发电机组采用中压缸启动或者高中压缸联合启动，因此在并网前低压转子中蒸汽压力和温度较低，在负荷增加的过程中，由于汽流压力和温度的增大，沿低压转子挠度较弱方向发生热弯曲变形，由于不同缸体的转子采用刚性联轴节连接，因此低压转子的热弯曲变形通过联轴节传递到高中压转子，形成图 5 所示的弓形回旋。热弯曲变形是一个渐变的过程，因此并不会与负荷的变化同步，表现为滑停和甩负荷停机时的振动变化规律不同。

(2) 本次平衡过程启车过程为热态启动，参考该汽轮发电机组的启动曲线，可以发现机组的负荷上升到 50% 附近后再热蒸汽的温度稳定在 566 °C，这就是在负荷增大到一定程度后热弯曲变形不再发生变化的原因。

(3) 低压转子的各向异性属于转子材料的固有特性，不平衡质量产生的转动惯量相对于转子的转动惯量可以忽略，因此负荷变化引起的热弯曲变形不受不平衡试重的影响。

从机组维护的角度而言，停机时的充分盘车是避免临时性热弯曲演变为永久性弯曲的必要措施。不平衡质量对热弯曲变形不产生影响，但是可以在保证无负荷状态振动允许范围内通过不平衡质量的振动响应来补偿热弯曲变形，文献 [5] 中基于全息动平衡技术的多目标约束优化算法可用于处理此类振动问题。

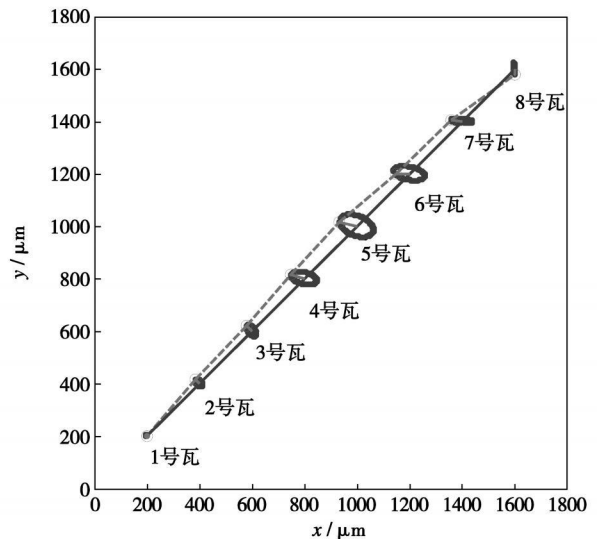


图 5 三维全息差谱

3 识别标高变化引起的振动故障

3.1 标高激振故障机理

大型回转机械在运行过程中由于负荷的影响引起轴系标高变化而引发的振动较为常见。标高的变化可能由以下因素引起: (1) 支撑系统受热不均; (2) 地基下沉不均。标高引发的轴系振动机理可以通过系统动刚度加以阐述。系统动刚度将振动及其响应描述为^[6]:

$$\text{振动(响应)} = \frac{\text{外力}}{\text{动刚度(约束)}} \quad (4)$$

标高变化对轴承—转子系统最直接的影响表现为支撑预载荷的变化, 但是预载荷的变化并不会产生直接的动态激振力。在外力不变的情况下, 振动响应的变化由动刚度的变化引起。为了便于说明标高变化引起系统动刚度变化的机理, 以单自由度转子为例, 其运动方程可以描述为:

$$Ma + D(1 - \lambda)v + kd = -me\omega^2 \sin \omega t \quad (5)$$

对于同步强迫振动响应有: $a = \omega^2 d$, $v = \omega d$, 代入式(5)得:

$$(M\omega^2 + D(1 - \lambda)\omega + k)d = -me\omega^2 \sin \omega t \quad (6)$$

式中: M —转子质量; m —不平衡质量; e —不平衡质量半径; ω —旋转角速度; D —粘性阻尼; λ —液体周围平均速度比。

根据式(6), 将转子动刚度定义为:

$$K_{DS} = K - M\omega^2 + jD(1 - \lambda)\omega \quad (7)$$

式中: $K - M\omega^2$ —动刚度直接项; $jD(1 - \lambda)\omega$ —正交项。滑动轴承工作原理如图 6 所示。如上所述标高的变化将引起轴承预载荷的变化, 为适应新的负载, 转轴在滑动轴承中的位置必然发生调整, 偏心率和最小油膜厚度发生变化导致支撑油膜特性(如油膜支撑刚度、油温、液体周围平均速度比和粘性阻尼)也发生变化, 因此标高变化后垂直方向的振动会发生较大的变化, 可以预见工频全息谱将表现为较扁椭圆。

3.2 案例分析

某烟气轮机能量回收机组结构如图 7 所示, 烟气轮机的主要参数如表 1 所示, 烟气轮机与轴流风机采用膜片联轴节联接。

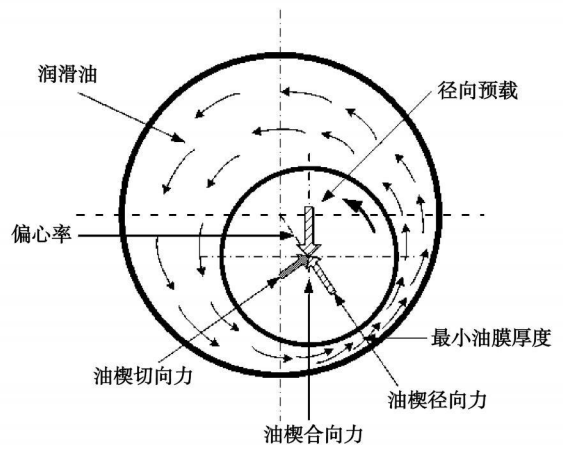


图 6 滑动轴承工作原理

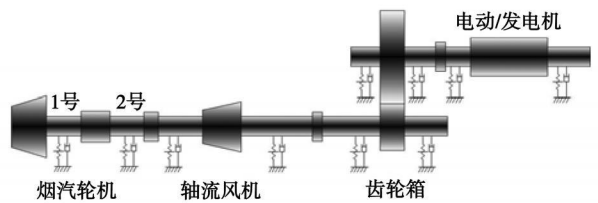


图 7 烟气轮机能量回收机组示意图

表 1 烟气轮机主要参数

	数值
额定功率/kW	11 500
进汽温度/°C	670
进汽压力/MPa	0.3
转子质量/kg	1 941.8
转动惯量/kg·m ²	463.707
支撑轴瓦	可倾瓦
一阶临界转速/r·min ⁻¹	8 015
工作转速/r·min ⁻¹	5 800

该烟气轮机的启动过程中振动表现为如下特征: (1) 在到达工作转速前振动很小, 频谱图显示工频为主要成分; (2) 在 5 200 r/min 稳定一段时间后调整进气蝶阀开度使烟机在数分钟内冲转至工作转速, 刚到达工作转速时振动相对于 5 200 r/min 转速的振动变化不大, 但在工作转速稳定数分钟后振动大幅度爬升, 随烟气轮机负荷的增大振动继续爬升, 主要成分为工频。

用三维全息谱对以上振动工况进行分析, 图 8 为加载 10% 负荷后的振动与刚到工作转速振动的工频三维全息差谱, 图 9 为加载 30% 负荷后的振动与刚到工作转速振动的工频三维全息差谱。通过图

8 和图 9 可以发现以下两点规律：(1) 负荷对轴瓦振动影响的三维全息谱表现为椭圆较扁，而且长轴接近垂直方向，这与机理研究中提及垂直方向动刚度的变化引起垂直方向振动变化的结论相吻合；(2) 随着负荷的增大，全息差谱中对应测振面椭圆形状与初相位基本不变，但是面积增大，可以理解为标高的进一步变化导致动刚度矢量方向不变，幅值减小，因此在相同的不平衡激振力作用下振动响应增大。

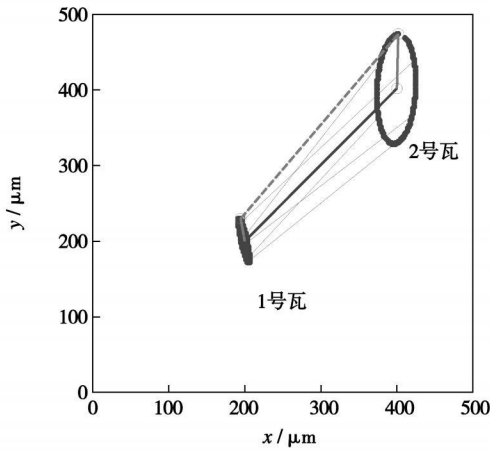


图 8 10% 负荷的三维全息谱响应

维全息差谱，得到试重的三维全息谱振动响应，如图 10 和图 11 所示，将试重响应标准化后(图中所示为 $10g \angle 0^\circ$)的三维全息谱称为迁移矩阵，则将图 10 和图 11 的迁移矩阵相减可以得到纯负荷影响的试重迁移矩阵如图 12 所示。结合图 12 和图 9 可以发现不平衡质量是引起转子带负荷后振动变化的激振力，再次添加试重后的结果表明所得到的迁移矩阵有良好的重复性也验证了上述推理。

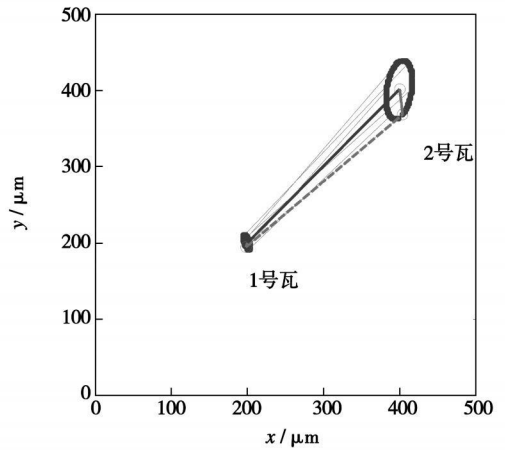


图 10 无负荷迁移矩阵

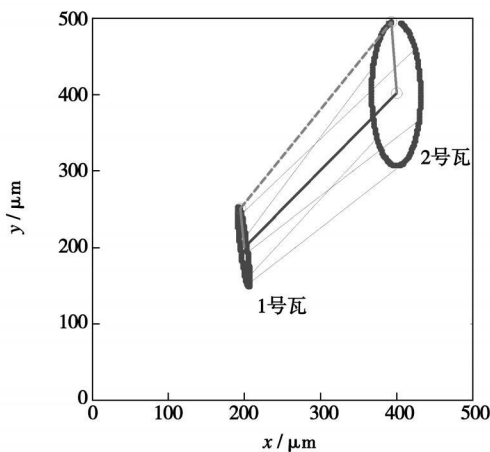


图 9 30% 负荷的三维全息谱响应

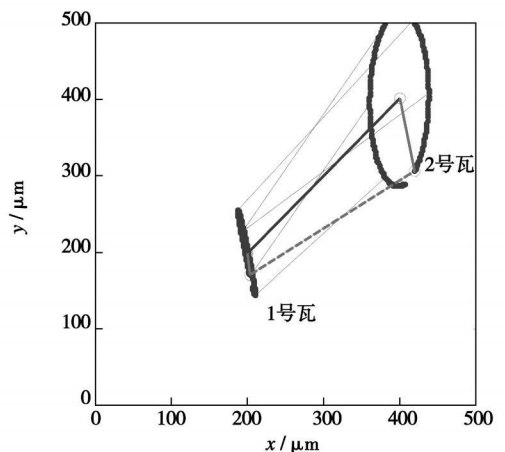


图 11 带负荷迁移矩阵

由图 8 和图 9 总结出的规律可以作为轴系标高变化激发振动的一种合理解释，但是仍然不能排除在负荷增加过程中膜片联轴节传递扭矩产生的交变激振力引起振动变化的可能性，因此进一步从激振力的角度进行故障排查，在烟机端的膜片联轴节上添加不平衡试重，将试重启车工作转速下的无负荷和带负荷振动分别与原始启车对应工况的振动作三

至此引起带负荷后振动爬升的机理可以总结为：烟气轮机的悬臂转子结构导致带负荷后支撑系统受热不均并引起轴承标高的变化，标高的变化使支撑重新分配负载，从而引起转子—轴承系统动刚度的变化，在不平衡激振力的作用下振动爬升。

从振动响应的角度考虑，可以采用以下措施降低转子的振动：(1) 在冷态下调整标高时预留热态不

对中量; (2)通过动平衡降低不平衡激振力。考虑到现场没有测取动态标高的设备且调整标高比较费时,采用全息动平衡方法将机组带负荷的振动降低到允许范围内。

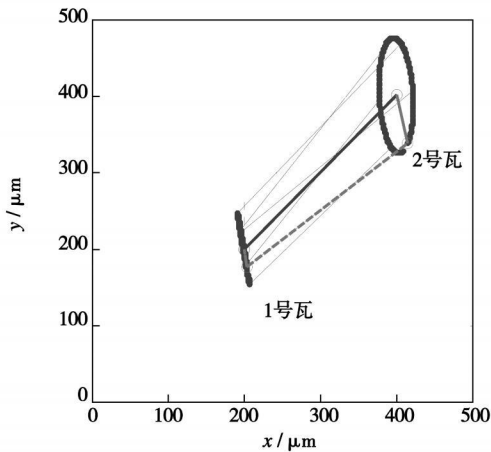


图12 纯负荷迁移矩阵

4 结 论

不同的故障对应不同的特征,特征参数的获取是故障诊断能否成功的关键。现有的大型回转机械负荷变化激发振动故障的诊断方法大多针对独立支

撑的参数进行研究,而三维全息谱则从轴系的角度全面描述机组的振动信息,可以表达更为丰富的故障特征。根据不同故障的振动机理,在三维全息谱特征与故障之间建立映射模型,为诊断负荷引起的异常振动提供了新的思路。将上述理论对转子热弯曲和热态不对中故障进行了验证分析,结果表明三维全息谱对以上故障具有很好的识别能力。进一步可以开展三维全息谱技术与轴系其它故障结合的识别技术研究。

参考文献:

- [1] 夏松波,张新江,刘占生,等. 旋转机械不对中故障综述[J]. 振动、测试与诊断. 1998, 3(18): 157-161.
- [2] LIANSHENG QU, XIONG LIU, YAODONG CHEN. Discovering the hobspectrum [J]. J. Noise and Vibration Worldwide. February, 1989, 2: 58-62.
- [3] RUELE G. Mechanical problems of turbogenerators [J]. Electra. 1983 (86): 5-21
- [4] 骆名文,丁学俊. 大型汽轮机汽流激振研究现状及展望[J]. 热能动力工程 2006, 21(6): 551-555.
- [5] WANG XIUFENG. SQP algorithms in balancing rotating machinery [J]. Mechanical Systems and Signal processing, 2007, 21: 1469-1478.
- [6] STEVE SABIN. Understanding and using dynamic stiffness - A Tutorial [J]. Orbit. Second Quarter, 2000(2): 44-54.

(编辑 刘伟)

船舶燃气轮机

美国海军两栖攻击舰成功装用 LM2500+ 燃气轮机

据《Gas Turbine World》2008年3-4月号报道, Wasp级两栖攻击舰 USS Makin Island 于今年2月成为第一艘装备 LM2500+ 燃气轮机的美国海军战舰,成功地完成了前机舱主发动机的点火试验。

GE LM2500+ 在 ISO 条件下的额定连续功率为 29 768 kW, 耗油率为 0.218 kg/(kW·h)。

Makin Island 是为美国海军建造的 8 艘登陆船坞直升舰 (LHD) 的最新一艘,也是第一艘装用燃气轮机作为主发动机的该型战舰,它的前、后主机舱各装用 1 台 LM2500+ 燃气轮机。

除了燃气轮机动力源以外, Makin Island 是初次登场的用于混合式电力传动推进系统的平台, 1 个 4 160 V 配电电路和 1 个光纤连接的机械控制系统。机械控制系统为船舶推进系统、电力装置、故障控制和辅助机械提供主要的控制和监测。

计划于 2008 年 11 月移交给海军,在这以后 Makin Island 将转移到圣地亚哥,准备于 2009 年 5 月交付使用。

(吉桂明 供稿)

lytical results can provide some guidance for evaluating the operation of the unit. **Key words:** elevation, rotor, transfer matrix, turbo-generator unit

三维全息谱在诊断负荷诱发的转子热弯曲与标高故障中的运用 = **Application of Three-dimensional Holographic Spectrums in the Diagnosis of a Load-induced Rotor Thermal Bending and Elevation Fault** [刊, 汉] / WANG Xiu-feng, QU Liang-sheng, LIAO Yu-he (Intelligent Instrument and Monitoring/Diagnosis Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(5). - 462 ~ 467

It is extremely common for a large-sized rotary machine to undergo a vibration change of its shafting resulting from a load variation during its operation. An abnormal vibration is often triggered by a change of such operating conditions as the transfer torque and thermal state, etc. of a bearing-rotor system experiencing load variations. The authors have combined the load-induced vibration mechanism with three-dimensional holographic spectrum technology and fully utilized the shafting vibration information indicated by a three-dimensional holographic spectrum to identify the three-dimensional holographic spectrum characteristics of different faults, thus providing a new approach for discriminating load-induced vibration faults. The mechanism and three-dimensional holographic spectrum characteristics of a thermal bending and elevation fault have been analyzed. The verification results obtained from on-site data show that the spectrum characteristics in question resulting from a mechanism analysis enjoy a good ability to identify load-induced vibration faults. **Key words:** holographic spectrum, vibration, thermal bending, elevation, load

冲角对高负荷正弯叶栅壁面静压影响的实验研究 = **Experimental Study of the Effect of an Incidence on the Wall-surface Static Pressure of a High-load Positively-bent Cascade** [刊, 汉] / CHEN Shao-wen, LIU Shun-long (College of Power and Energy Source Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), BIAN Zhao-xi (Harbin Ha-dian Electrical Co. Ltd., Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(5). - 468 ~ 472

An experimental study has been conducted of the effect of an incidence on the wall surface static pressure of a high-load annular positively-bent diffusion cascade. The results of the study show that when the incidence is positive, the suction surface of a straight-blade cascade exhibits an evident tendency of reverse "C" shaped pressure distribution, which will be intensified with an increase of the bending angle and result in a gradual accumulation of low-energy fluid in the middle of the blade span. Due to a relatively strong reverse pressure gradient streamwise on the suction surface, the air flow in the middle blade span is prone to be separated, thus causing a sharp increase of losses. In a high-load compressor cascade, when the incidence is negative and zero, the adoption of a positively-bent blade design will lead to a better effectiveness in reducing separation and losses than in the case when the incidence is positive. In addition, an excessively large bending angle should be avoided. **Key words:** experimental study, high-load cascade, positive bending, incidence, static pressure

跨音速轴流压气机间隙泄漏流流动特性研究 = **A Study of the Clearance Leakage Flow Characteristics of a Transonic Axial-flow Compressor** [刊, 汉] / ZHANG Yan-feng, CHU Wu-li, WU Yan-hui (College of Power and Energy Source, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2008, 23(5). - 473 ~ 477

Clearance leakage flow exercises a major influence on the formation of rotating stall of an axial flow compressor. The authors have conducted a single-passage and multi-passage non-steady numerical simulation by utilizing the transonic axial-flow compressor of NASA rotor 37. The single-passage non-steady calculation results reveal that at an operating condition approximating to compressor stalling speed, there exists a clearance leakage-flow self non-steady behavior at the blade tip. In addition, the non-steady simulation results under two different back-pressure conditions have been compared. When the back pressure at the outlet is comparatively high, the unsteady behavior of the clearance leakage flow is extremely unstable. When the back pressure at the outlet is relatively low, the above-mentioned unsteady behavior is stable. The multi-passage non-steady numerical simulation results indicate that at an operating condition approximating to the stalling speed, when the outlet back pressure is comparatively high, the clearance leakage flow will oscil-