

汽轮发电机组轴系振动故障诊断技术

研讨主要内容

- 一、旋转机械振动理论
- 二、振动的测量和信号分析技术
- 三、旋转机械的故障诊断技术及处理方法
- 四、转子的现场平衡理论及轴系平衡技巧
- 五、机组及辅机振动故障诊断及处理实例
- 六、汽轮发电机组轴承/转轴振动评判标准
- 七、振动在线监测和故障诊断技术及其发展方向
- 八、机组轴系事故分析

旋转机械振动理论

1 转子振动基础

1.1 振动现象及其危害

振动是物体(质点)或某种状态随时间往复变化的现象，机械振动是指物体在平衡位置附近来回往复的运动。它是衡量旋转机械能否持续可靠运行的重要指标。振动状态是机组设计制造、安装检修和运行维护水平的综合反映。

当振动超过一定的限值（标准）时，可能会产生下列危害：

- 机组动静部分碰磨；
- 部件的疲劳损坏；
- 连接或紧固件的断裂与松脱；
- 损坏基础和周围的建筑物；
- 降低机组运行的经济性；
- 过大的振动及其引发的噪声影响运行人员健康。

1.2 简谐振动的基本概念和表示方法

在大多数情况下，汽轮发电机组振动的激振力来自于周期旋转的轴，因而多数是周期振动。它们一般可以被分解为若干个简谐振动。

对于位移、速度、加速度等运动量随时间按谐和函数变化的简谐振动，它的标准的数学表达式为：

$$x = A \sin(\omega t + \phi) = A \sin(2\pi f t + \phi) = A \sin(2\pi/T t + \phi)$$

$$v = dx/dt = A\omega \cos(\omega t + \phi) = V \cos(\omega t + \phi) = V \sin(\omega t + \phi + \pi/2)$$

$$a = dv/dt = -A\omega^2 \sin(\omega t + \phi) = -a \sin(\omega t + \phi) = a \sin(\omega t + \phi + \pi)$$

上式表明简谐振动的位移、速度、加速度都随时间以同样频率按谐和函数变化。三个量的最大幅值不相同，幅值之间依次之比均为 ω ，相位之间的关系固定，依次超前 $\pi/2$ ，即速度超前位移 $\pi/2$ ，加速度超前速度 $\pi/2$ 。

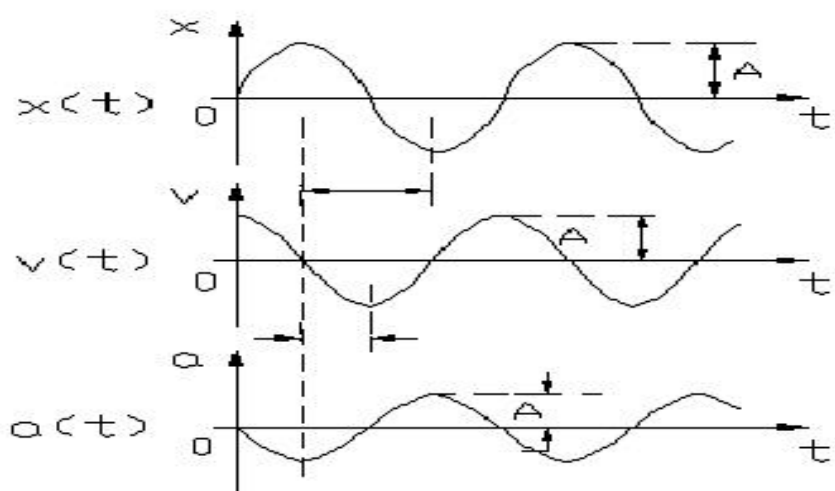


图 1.2

2 振动的名词和术语

- 振动幅值、频率和振动相位
- 通频振动、选频振动、基频振动
- 径向振动、轴向振动
- 相对轴振、绝对轴振、瓦振
- 强迫振动、自激振动
- 共振、临界转速、固有频率
- 涡动、正进动和反进动
- 刚性转子和挠性转子
- 同相振动和反相振动
- 振动高点和重点
- 机械滞后角
- 轴振型和节点
- 机械偏差、电气偏差、晃度

振动的测量和信号分析技术

1 振动测量用传感器

1.1 电涡流传感器

1.2 速度传感器

1.3 加速度传感器

1.4 复合传感器

常用的振动传感器及其性能和适应范围

传感器种类	频响特性	测量适用范围	优点	缺点
电涡流传感器	0~10kHz	转轴相对振动 轴的偏心 轴心轨迹 轴承油膜厚度 轴位移和胀差 转速和相位	非接触测量 测量范围宽 灵敏度高 抗干扰能力强 不受介质影响 结构简单	对被测材料敏感 安装较复杂
速度传感器	10~1kHz	轴承座的绝对振动	不需电源,简单方便 灵敏度高。输出信号大、输出阻抗低,电气性能稳定性好,不受外部噪声干扰	动态范围有限 尺寸和重量大 弹簧件易失效 受高温影响较大
加速度传感器	1~5kHz	轴承座的绝对振动	频响范围宽 体积小、重量轻 灵敏度高	不易在高温环境下使用, 装配困难、成品率低
复合传感器	0~10kHz	转轴绝对振动 转轴相对振动 轴承座的绝对振动 转轴在轴承间隙内的径向位移	非接触测量 无磨损 牢固可靠	对被测材料敏感 安装较复杂

2 振动测量用二次仪表

2.1 离线仪表

振动监测离线仪表通常包括电厂运行人员进行设备的日常振动巡检采用的简易监测仪表和专业人员为进行振动故障诊断所采用的精密检测仪表。简易监测仪表一般是单通道的，仅能指示振动的幅值。而精密检测仪表通常是双通道或多通道的，能测量振动的频谱和相位，此外，借助于计算机和专业软件，可以构成多通道数据采集和分析系统，该类系统能够在较长一段时间内对机组的振动进行连续数据采集，并做振动特征分析。

目前电厂常用的简易监测振动仪表有东南大学产 ZXP-62、ZXP-63 型便携式型振动表，日本 RION 公司产 VM-63A 型便携式振动表等

常用的精密检测仪表包括美国本特利公司，DVF-2、DVF3 型和 108 型数字矢量滤波器，208P 型数据采集和分析系统；丹麦申克公司产 VB-20、VB-30、VB-40 和 VB-41 型振动表；美国恩泰克公司 Data PAC1500 数采器；成都计量院产 DBA-2、DBA-3 型振动表等。

2.2 在线仪表

电厂机组振动常采用的振动在线监测仪表为汽轮机安全监测系统 (TSI)。TSI 是一种可靠的多通道监视系统,用于连续测量汽轮发电机组主轴和壳体的机械状态参数,它可指示机组状况,输出记录,越限报警,当发出危险信号时还能触发连锁机构,使机组停机,并为事故分析提供数据。

典型的 TSI 系统可以大轴振动、瓦振动、轴位移、转速、相位、机壳膨胀、差胀、偏心、阀位和零转速等参数。

TSI 系统信号器屏面可直观显示所有报警、危险及非 OK 等状态,其信息由表架上的监视仪提供。信号器屏面上还可显示电源监视电路的状况。屏面上有机组结构示意图,操作人员通过示意图上的报警、危险指示灯,很容易地找到机组的故障部位。

各种传感器所感受的机器状态信号输给监视仪,供仪表操作室的操作人员监视。状态信号还可以经监视仪变换后输给记录仪或数据处理系统,为分析人员提供信息。

由于 TSI 系统在机组安全运行中的极端重要性以及其闭环运行的特点,目前国内绝大多数机组采用的都是进口产品。早期的 TSI 系统为美国本特利公司生产的 7200 型、德国飞利浦公司生产的 RMS-700 型产品。目前国内常用的多为本特利公司 3300 型、3500 型产品和飞利浦公司 MMS-6000 系列(EPRO)产品、瑞士 Vibmeter 公司产品,日本新川公司的 TSI 系统以及德国申克公司的 VC4000 系统等。

2.3 汽轮发电机组振动在线监测和故障诊断系统 (TDM)

随着电厂日益增长的安全稳定运行、提高振动故障诊断效率、降低运行成本、状态检修以及数据集中管理的要求，借助于计算机和振动监测技术的发展，自 1990 年代国内成功研制汽轮机组振动监测和故障诊断系统（或瞬态振动数据管理系统，TDM），并陆续在国内各电厂大容量机组上安装。它是用于振动数据采集和分析的智能化系统。主要功能包括：

- 多通道振动数据（稳态和瞬态）采集和 FFT 分析
- 振动数据的特征分析
- 振动数据的存储、通讯和管理
- 事故追忆
- 一般振动故障的原则性自诊断

3 振动数据分析常用技术

3.1 时域分析

- 波形分析
- 轨迹分析
- 键相分析
- 直流分量及浮起量分析

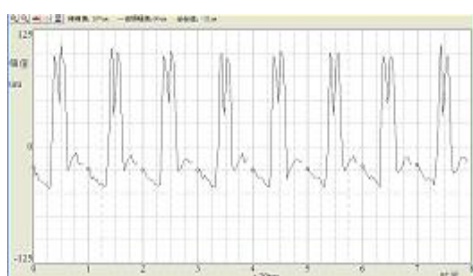
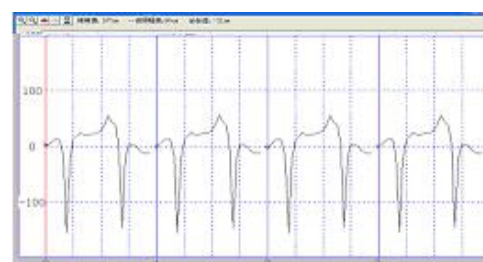
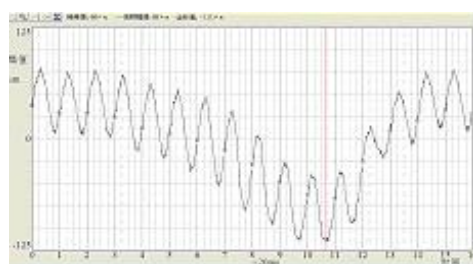
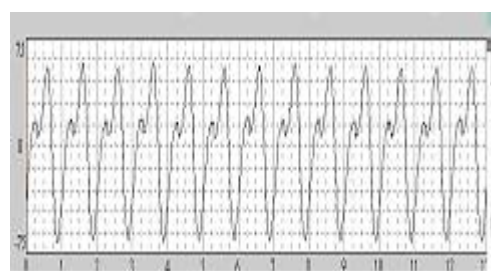
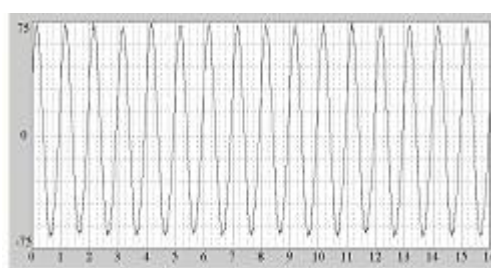
3.2 频域分析

- 滤波方法
- 离散傅里叶变换 (DFT)
- 快速傅里叶变换 (FFT)

4 振动数据特征分析

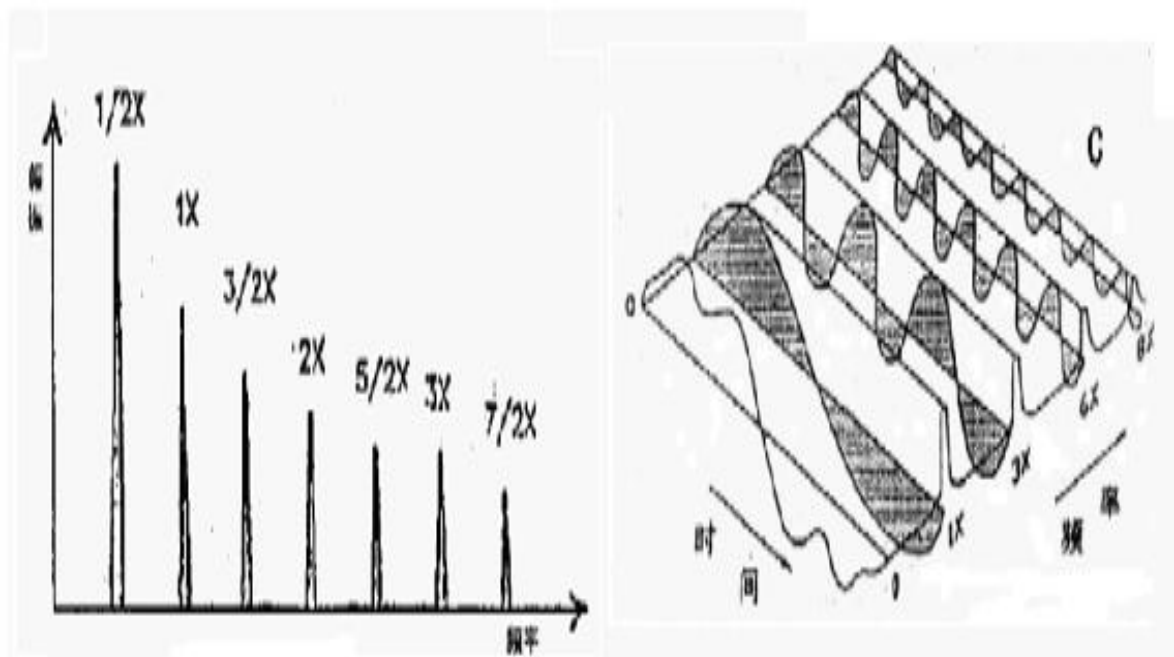
4.1 波形图(Waveform Plot)

波形图是转子响应随时间的变化曲线，其横坐标为时间，通常表示为周期数，纵坐标为振动实时值，通常它近似为正弦波，是最原始的信号，所以包含的信息量大，具有直观、易于理解等特点，但不太容易看出所包含信息与故障的联系。



4.2 频谱图(Frequency Spectrogram)

工程上所测得的信号一般为时域信号，然而由于故障的发生、发展往往引起信号频率结构的变化。为了通过所测信号了解、观测对象的动态行为，往往需要频域信号。将时域信号变换至频域加以分析的方法称为频谱分析。频谱分析的目的是把复杂的时间历程波形，经傅里叶变换分解为若干单一的谐波分量，以获得信号的频率结构以及各谐波幅值和相位信息。



4.3 轴心轨迹图 (Orbit Plot)

轴心轨迹是指轴心上一点相对于轴承座的运动轨迹，它是旋转机械故障诊断很重要的信息。这一轨迹是在与轴垂直的平面内，因此要求在该平面内设置两个相互垂直的传感器。整个测试装置如图 3.12 所示。

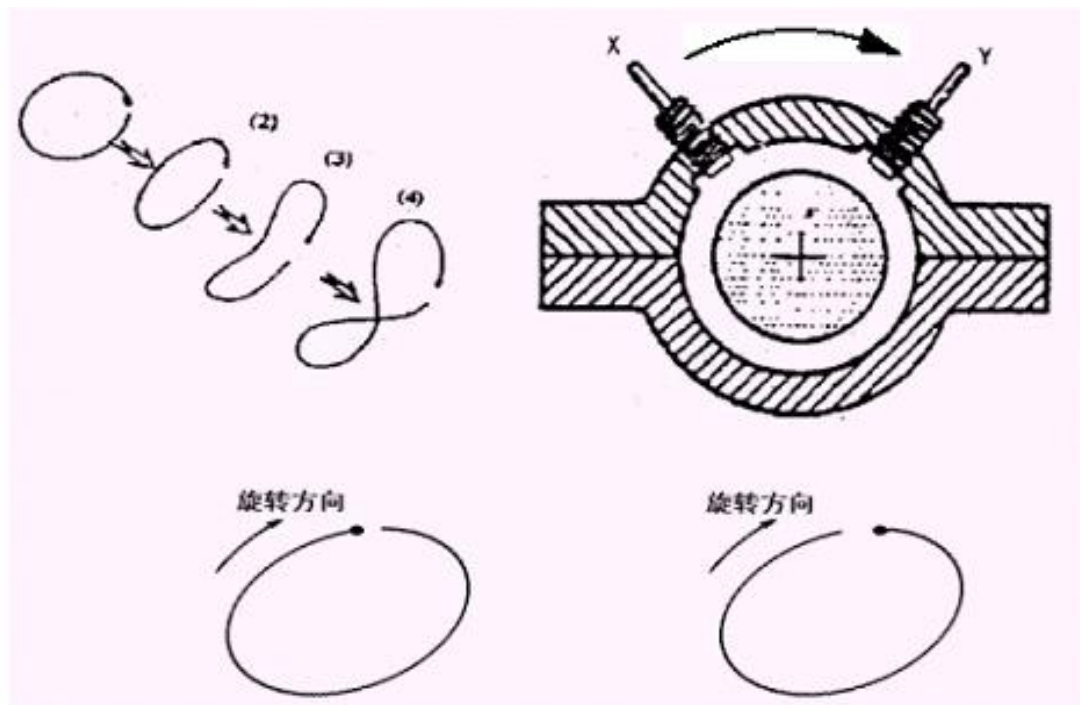


图 3.12

4.4 轴心位置图 (Shaft Center Position)

在稳态工作条件下，低速转动或甚至在停机的情况下，连续监测 X、Y 涡流探头直流间隙电压，经一段时间后会发现轴心的平均位置（不是轴心轨迹）会发生变化，这是由于转动机械内部受力条件改变所致，参见图 3.16。



图 3.16

4.5 波特图(Bode Plot)

波德图定义为与转速同步的振动及其相位和运行转速的关系曲线。波德图是最常使用的振动分析工具之一，其用来确定机器的临界转速及其过临界转速时的振幅和相位，从 2X 分量的波德图可以看出转子的副临界转速。波德图常用作设备的验收试验。一些标准规定转子的临界转速与工作转速必须有一定的避开范围。

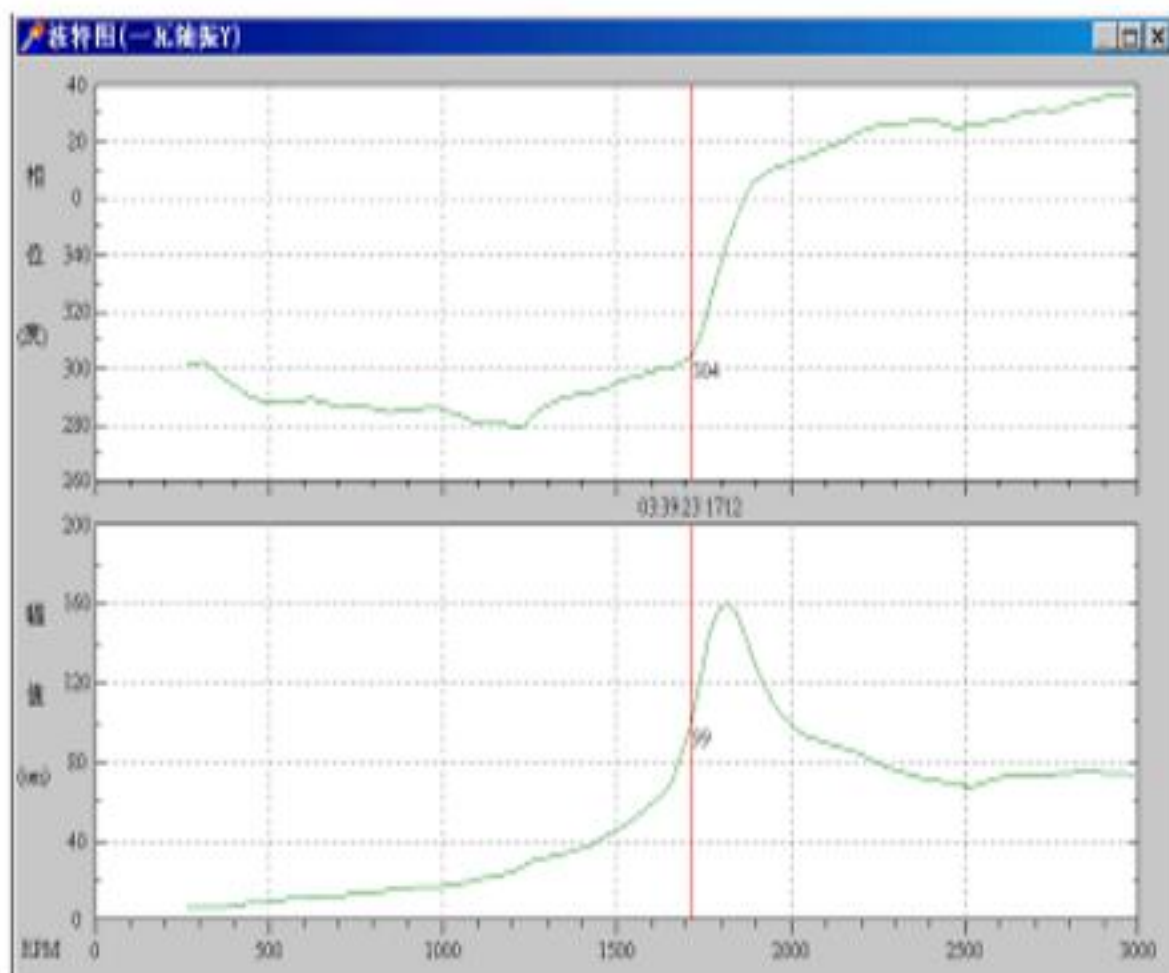


图 3.18

4.6 极坐标图(Polar Plot, Nyquist Plot)

极坐标图是将不同转速下的振幅和相位绘制在极坐标中的图形，它和波特图类似，不同的是波特图是绘制在直角坐标系中的图形。极坐标图也被称为振型圆图。

振幅—转速曲线在极坐标图中是呈环状出现的，从图中易于得到各阶模态参数。临界转速处在环状振幅最大处，且此时从弧段上标记的转速应该显示出变化率最大。用涡流传感器测试轴振时，在极坐标图中很容易得到原始晃矢量，即与低转速所对应的矢量。从带有原始晃度的图形得到扣除原始晃度后的振动曲线也很容易做到，为此，只需将坐标系坐标原点平移到与需要扣除的原始晃度矢量对应的转速点，原图的曲线形状保持不变。这样原曲线在新坐标系中的坐标即是扣除原始晃度后的振动响应。



图 3.20

4.7 级联图(Cascade Plot)

转子的转速在变化过程中，转子振动呈动态变化。以转子升速过程为例，当转子升速时，各转速下都有反映转子频域特性的频谱图，把各个转速下的频谱图绘在一张图上，称为“级联图”（图 3.21），它是三维频谱图的一种形式。

级联图显示的是机组在启停机过程中不同转速下各种频率成分的大小随转速变化趋势，X 向为各频率成分，Y 向为振幅，Z 向为转速。

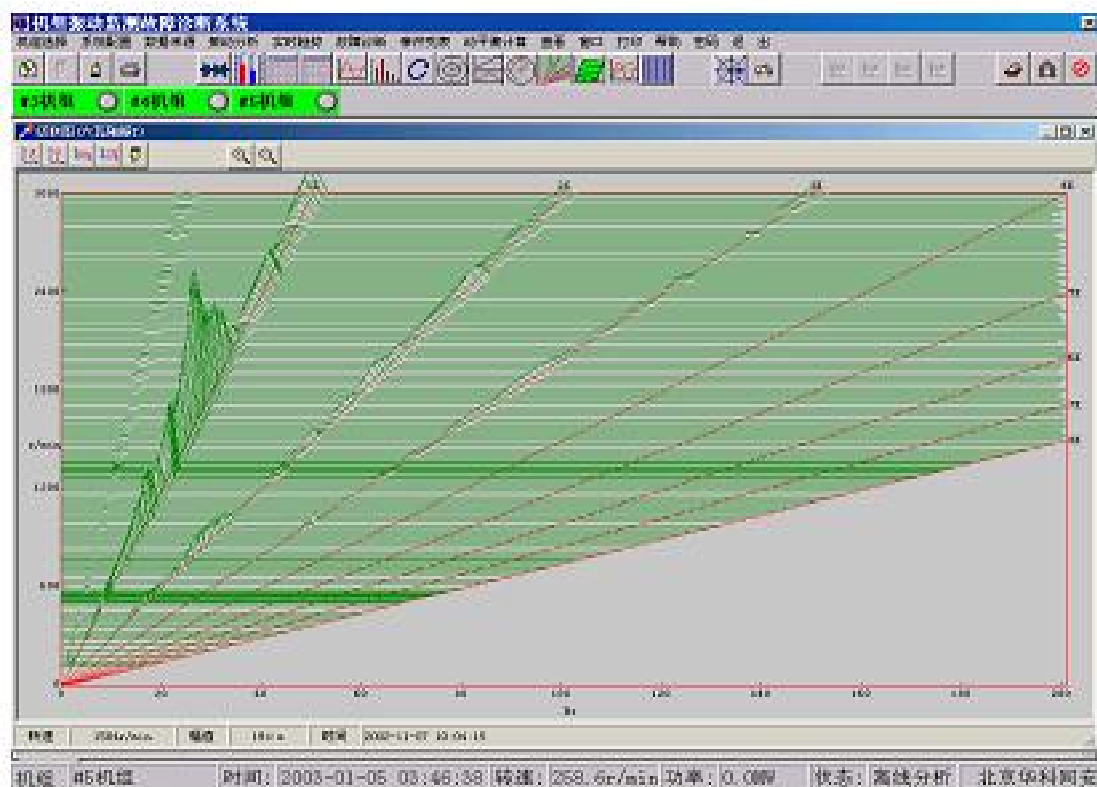


图 3.21

4.8 瀑布图(Waterfall Plot)

瀑布图显示机组在某一段时间内各种频率成分的大小随时间的变化趋势(图 3.26)。它是在不同一段时间内连续测得的一组频谱图顺序组成的三维谱图，X 向为各频率成分，Y 向为振幅，Z 向为时间。一般情况下用来分析额定转速下的机组振动变化情况。它与级联图一样，是三维频谱图的一种形式。

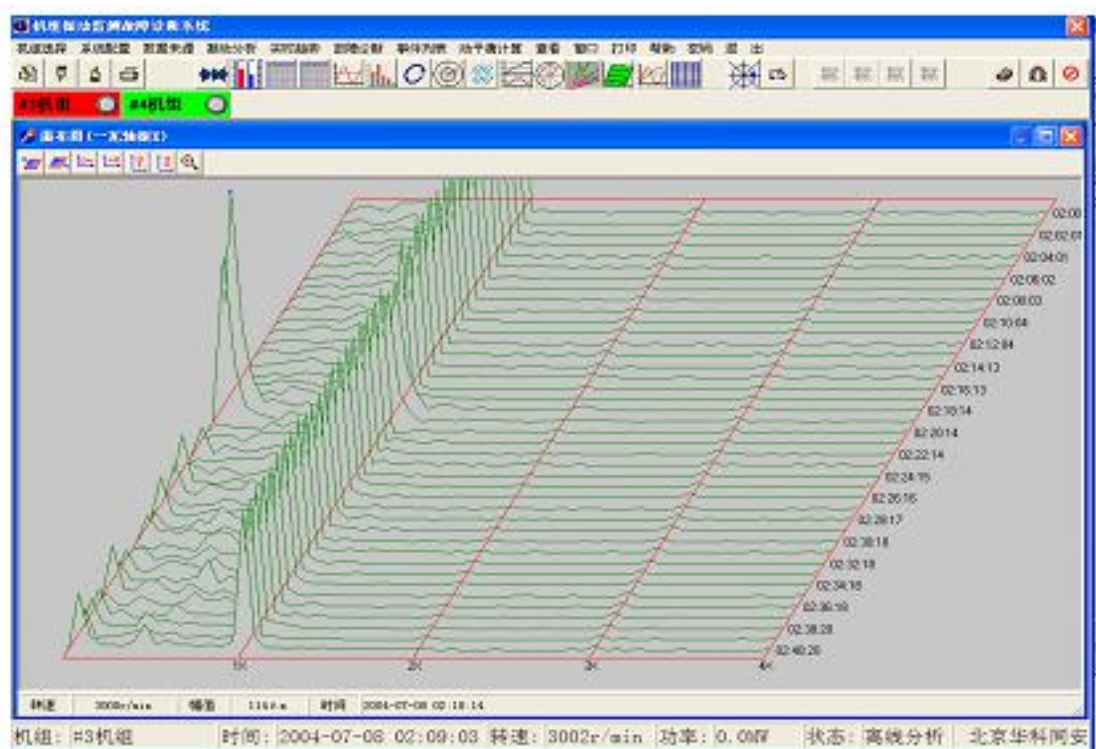


图 3.26

4.9 相关趋势图(Rative Vibration Trend Plot)

机组运行时，可以利用趋势图显示、记录振动或其它过程参数是如何随时间、转速、负荷和其它工况变化的。这种图形的横坐标和纵坐标参数可由用户自由选择。在分析机组振动随时间、转速、负荷的变化时，这种曲线非常直观，对运行人员监视机组状况很有用。图 3.27 给出的是轴振和胀差、位移随转速的变化曲线。

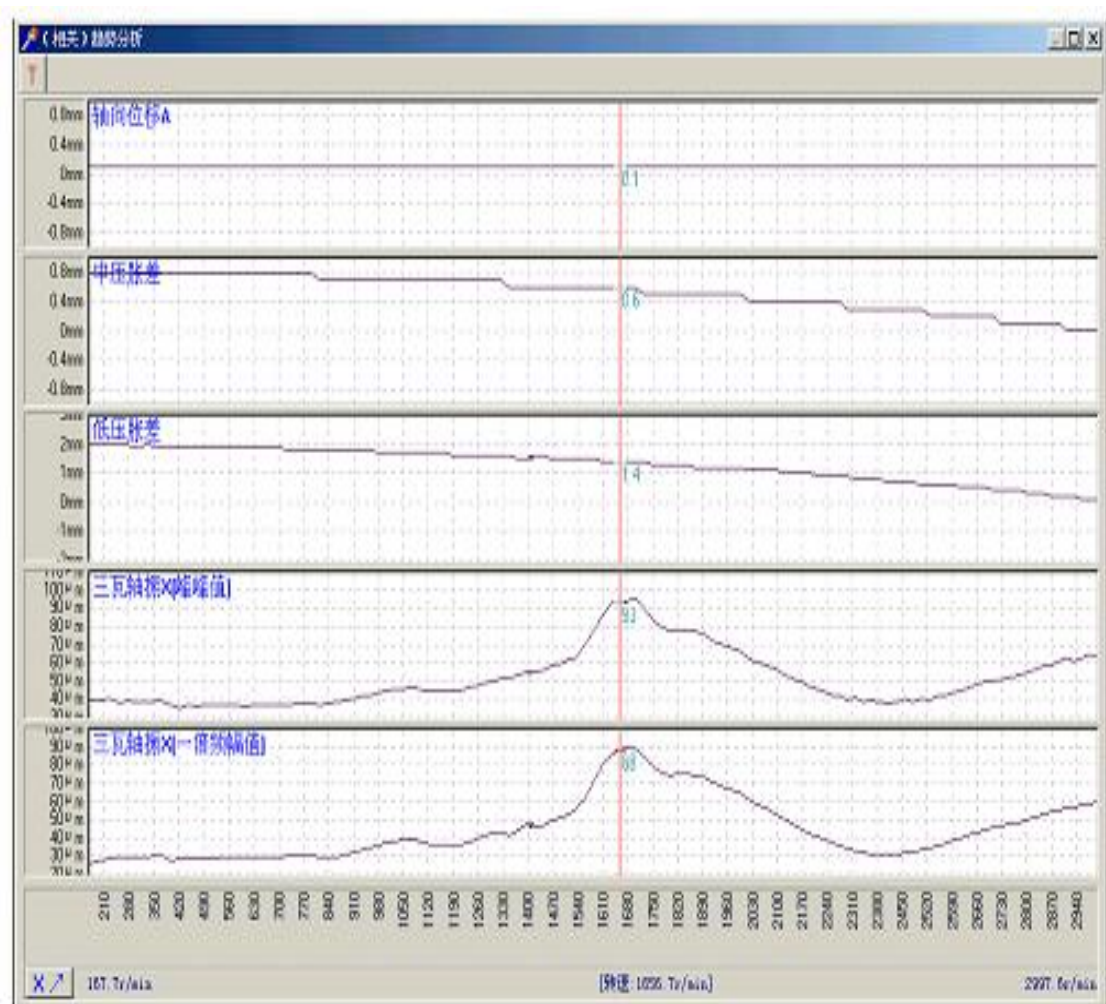


图 3.27

5 有关振动试验

5.1 升、降速振动试验

5.2 发电机励磁电流试验

5.3 负荷试验

5.4 发电机水温、氢温等试验

5.5 真空试验

5.6 轴承座外部振动特性试验

5.7 调门开启顺序试验

5.8 结构的固有频率测试

5.9 机组轴系动态标高测试

6 振动故障诊断的基础

为了能够掌握机组振动故障诊断技术，胜任现场振动诊断和处理工作，振动分析人员除应了解一般的振动和转子动力学理论外，还应将以下几条基本原则作为机组振动故障诊断的基础。

- 熟练掌握振动监测仪表
- 了解机器基本机械特性
- 了解使机组情况发生变化的历史事件
- 监测能表示出机器特征改变的关键参数
- 处理数据使其成为容易理解的格式