

转子系统振动的条件监测

施敏芳

(精密机械工程系)

摘要 本文论述了在条件监测下, BNC 转子系统振动测试的几方面问题。介绍不平衡质量的同步扰动和油-涡动异步扰动这两种方法。应用于转子系统的振动测试。比较了应用SI-1220频谱分析仪对该转子系统振动信号进行分析和数据处理的三种频谱: 级联频谱、功率谱和用汉宁窗函数分析复合频谱。

关键词 条件监测, 振动, 油-涡动, 不平衡质量, 扰动, 级联频谱

0 前言

目前旋转机械振动的条件监测和分析技术正在日益发展和更新, 一个成功的振动条件监测系统通常取决于振动的测试方法和信号分析技术的应用。由于旋转机械的运行状况能用其振动测量结果来确定, 因此现行的监测系统通常是定期地对机器进行在线振动检测。利用所测得的振动信号频谱图进行分析和比较, 从而确定机器的特性, 进行故障的预测和诊断。

旋转机械的核心部件是转子。旋转机械的大多数振动问题或故障都与转子直接有关, 其中最重要的振动现象就与转子的横向振动相关。故能利用转子系统的振动监测去研究旋转机械的振动。本课题以BNC (Bently Nevada Corporaion) 转子装置为对象进行转子振动的条件监测。

1 监测系统

转子振动的条件监测系统方框图如图1所示。它由BNC转子装置、Schlumberger SI1220频谱分析仪和Gould6320彩色多笔绘图仪组成。

BNC转子装置如图2所示。在转子主轴上垂直于轴线安装着两个质量圆盘, 在圆盘侧面的径向按等分角分布着24个螺纹孔, 其孔心与圆盘圆心的距离均为 r 。转子的主轴支承为滑动轴承。该装置包括有四个检测器和相应的四个前置器, 此外还有一个马达速度控制器, 用以控制转子的转速及速率。四个检测器分别用于测量转子 x 、 y 方向的横向振动及转子转速和相位。检测器将所检测的物理量转换成电量, 然后分别送到相应的前置器将其电量转换成一

定规范的电平信号,送入SI1220频谱分析仪。

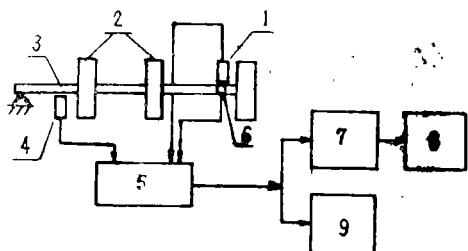


图1 转子振动的条件监测系统方框图

1——Y检测器; 2——质量圆盘; 3——转轴; 4——相位检测器; 5——前置放大器; 6——X检测器; 7——SI1220频谱仪; 8——6320绘图仪; 9——示波器

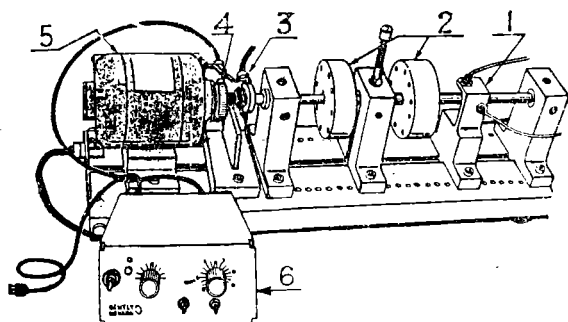


图2 转子装置

1——X-Y检测器; 2——转子质量圆盘; 3——相位检测器; 4——马达速度控制检测器; 5——马达; 6——马达速度控制器

SI1220频谱分析仪装备微处理机控制,在硬件和软件设计方面均使用现代最新技术,可以根据键盘输入的要求,计算并显示被测信号的各种参量。它具有四个通道可以进行多种格式的FFT分析(如实时ZOOM,倍频程分析...),能计算并显示信号的相关函数、传递函数、功率谱、复合频谱、相干函数等14种功能函数。能测量并显示多种规格的级联频谱(Waterfall spectrum)。同时具有一个GBIB总线接口和一个RS423总线接口,可以和绘图仪或其它设备连接。当它与6320彩色多笔自动绘图仪连接,可利用绘图仪绘制显示在频谱仪屏幕上的各种频谱图、波形、轨迹及数据。

2 转子系统的振动监测

在转子系统的振动测试中采用扰动激振法,其实质是通过扰动产生一个圆旋转力施加到转子系统,激起转子振动。这种振动状况较符合旋转机械在实际运行中所出现的振动现象,容易控制扰动力的方向、幅值、相位和频率。下面介绍采用质量不平衡的同步扰动和“油-涡动”的异步扰动这两种方法。

2.1 不平衡质量的同步扰动

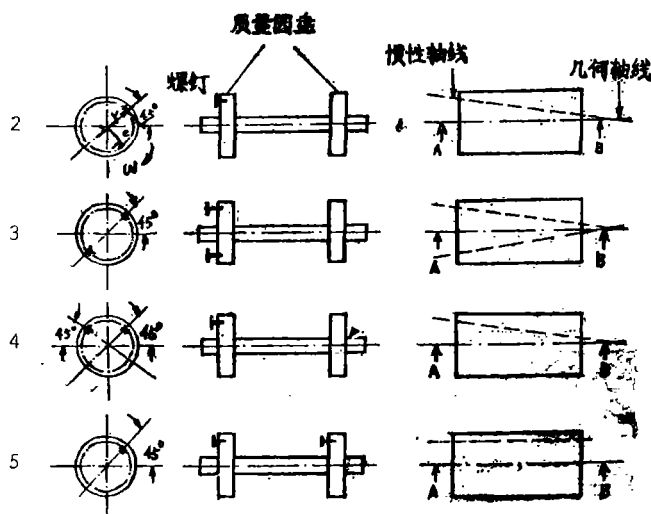
转子系统的不平衡质量扰动,是通过在转轴的质量圆盘上施加可控制的不平衡质量(在质量圆盘侧面的螺孔中拧入螺钉)。当主轴旋转时,该不平衡质量将产生一个圆旋转激振力 $\vec{F} = m\vec{r}\omega^2$, 其中 m 为不平衡质量, ω 为转子旋转速度, r 为不平衡质量在圆盘侧面的径向半径。 \vec{F} 的大小和方向,取决于附加在圆盘上不平衡质量的大小及其所在的径向位置,以及转子的转速 ω 。通过调整拧入质量圆盘侧面上的不同螺钉位置和所附加的不同螺钉数目,以及改变转子的转速,就可以改变其激振力 \vec{F} 。由激振力 \vec{F} 激起的转子振动是属于强迫振动,其振动频率总是等于转子的转速。因此转子系统的质量不平衡扰动是一种同步扰动。

为建立对转子系统的各种不同的不平衡质量扰动条件,经试验分析后选定五种典型的不平衡质量模型,如图 3 所示。其中模型 1 为没加不平衡质量到转子质量转盘上,这是一种初始状态。假定转子系统在初始状态,其转子惯性轴线和几何轴线重叠,并忽略转子系统的初始不平衡。当不平衡质量附加到圆盘时,引起转子的旋转惯性轴偏离几何轴线。从图 3 可以看到,由于不平衡质量在质量圆盘上分布的位置不同,引起转子惯性轴偏移几何轴线的状况也不同。模型 2, 4 属于力偶不平衡,而模型 5 属于动力不平衡,它由于不平衡质量分布在两个平面上,因而引起旋转惯性轴平衡或交叉地偏离轴的几何轴线。

由于转子振动最重要的现象是呈现在轴的 X 、 Y 方向的横向振动,因此利用 X 、 Y 检测器和相位检测器就能较准确地检测转子的振动信号,在上述五种不同模型的每一种模式中,通过转子马达速度控制器改变转子转速,以及在转子处于升速/降速过程中,监测其振动信号,并经 SI1220 频谱仪进行所需的数据处理和分析,记录下分析数据及绘制其频谱图。其中在模型 1 条件下,所测得的记录及频谱图作为转子系统初始状态的历史样本,用以和各种不平衡质量扰动条件下所测得的频谱图进行对照和比较。而转子在不平衡质量扰动条件下测得的振动频谱图,可用于分析旋转机械因某些故障或轴的弯曲等产生的振动现象。

2.2 油-涡动扰动测试

“油-涡动”扰动测试对于识别油膜轴承是一种有效的方法。油-涡动实验装置如图 4 所示。其转动部分由主轴和辅助扰动轴组成,两个轴通过一个轴承灵活(柔性)连接;转子



图注: 2—5 即表示模型 2, 3, 4, 5。

图 3 不平衡质量安放位置模型

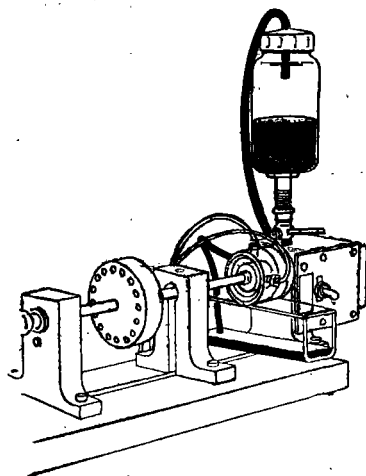


图 4 油-涡动装置

主轴的一端装在油膜轴承支承中,另一端装在滑动轴承中。主轴和辅助轴的转速分别由两个马达分开控制。当主轴转动速度为 ω_R 时,其辅助轴则以 ω 速度转动, $\omega \neq \omega_R$ 。因此转子系统的油-涡动扰动是属于异步扰动。

当辅助扰动轴以 ω 速度转动时,带着油从油筒到油膜轴承循环流动(其流量大小由压力阀调节),同时产生一个扰动力施加在转子系统上,其扰动力大小随扰动轴转速 ω 及油量大

小而变化, 它将激起转子系统产生自激振动。当调节扰动轴以某一转速 ω 转动时, 控制主轴转速变化或在其升速/降速过程条件下, 测量其振动信号并送至SI1220频谱仪分析, 绘制各种不同转速下的油-涡动扰动的各种频谱图。由于油-涡动产生的扰动力更符合于旋转机械的油膜轴承运转情况, 因此这些频谱图对于识别旋转机械油膜轴承的特性有着重要的参考价值, 我们把油-涡动异步扰动称为模型6。

3 测试结果分析

转子系统在上述各种扰动条件下, 其振动信号的测量数据包括在线测量稳态数据和在机器升速/降速过程中取的瞬态数据。对于这些数据的处理和分析, SI1220 频谱分析仪提供了多种功能的分析函数和多种频域和时域的光谱显示。经分析测试结果, 选出其中三种函数的频谱加以比较和讨论。

3.1 级联频谱

级联频谱通常是由在各种不同转速下所测得的一系列振动光谱组成。利用级联频谱可以更加清楚地看出各种频率成分的幅值随转速变化的情况, 它是一种3维显示光谱。SI1220频谱分析仪能以 ≥ 5 数据/s的速度更新谱线数据。因此它能快速地实时测量转子在不同扰动条件下, 在升速/降速期间的一系列级联频谱。同时SI1220光谱分析仪还能存贮前次记录的级联频谱, 可以根据需要抽样出某一转速的频响光谱图, 准确地读出其特定频响幅值。对于关键频段能将其放大, 以便找出故障疑点。

图5是转子在模型4扰动条件下, 最大转速为5200r/min升速/降速过程所测的转子振动信号的级联频谱。它展示了转子频响特性随旋转速度变化的状况。其中与转速相等的基频振动成分的幅值最大, 这是由不平衡质量激起的振动。用 $1 \times R$ (斜线) 表示基频振动分量, 此外在级联频

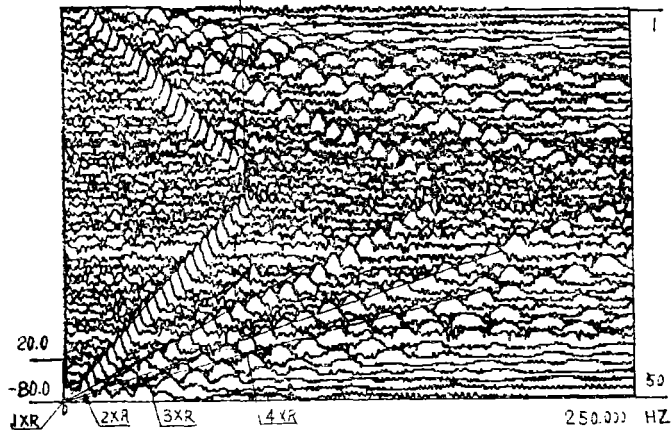


图5 转振动子信号的级联频谱

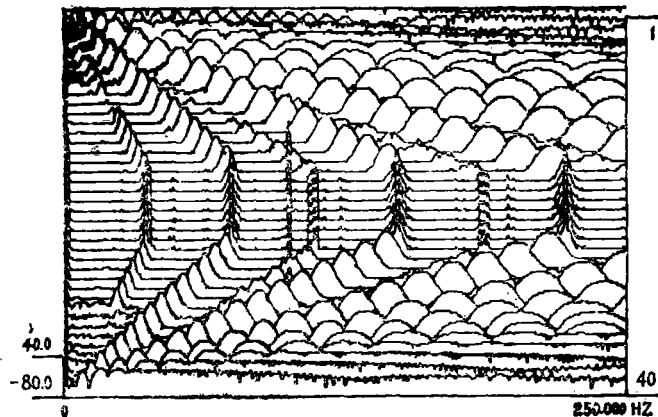


图6 转子在“油-涡动”条件下的级联频谱

谱图中还存在着 $2 \times R$, $3 \times R$ 等振动分量, 它们分别代表倍频和 3 倍频等振动响应, 其幅值较小。

转子系统在油-涡动扰动条件下, 在其升速/降速过程中所测得的级联频谱如图 6 所示。图中展现了转子的基频振动成分 $1 \times R$, 其幅值较大。同时出现半倍频 $0.5 \times R$ 振动成分, 是油膜轴承的“半速涡动”, 幅值较小。进一步证实了油-涡动可以被认为是一种异步扰动 施 加到转子系统。当转子转速超过了 3600r/min 时, 出现油膜振荡, 幅值增大, 但频率始终保持在对应于 3600r/min 转速的基频处。

实际上, 由于旋转机器的振动特性取决于它的动力和缺陷的性质, 而这些特性随着机器速度的改变而变化, 所以识别其缺陷的性质可以从观察振动随着速度的变化中获得。为此, 转子系统在不同的扰动条件下, 在升速/降速过程中进行连续频谱测量并绘制其全过程的级联频谱, 将为旋转机器振动特性的识别提供较好的依据。

3.2 功率谱分析

应用于转子振动测量数据处理的第二种方法是功率谱分析。图 7(a) 是转子系统在模型 5 扰动条件下, 转速为 5200r/min 时所测的功率频谱图(带宽为 100Hz); 从功率谱图上能准确读出基频幅值(主瓣)及其侧瓣(side band)的幅值。测量并绘制上述五种质量不平衡扰动条件下的功率谱图, 进行比较可以看到在同一转

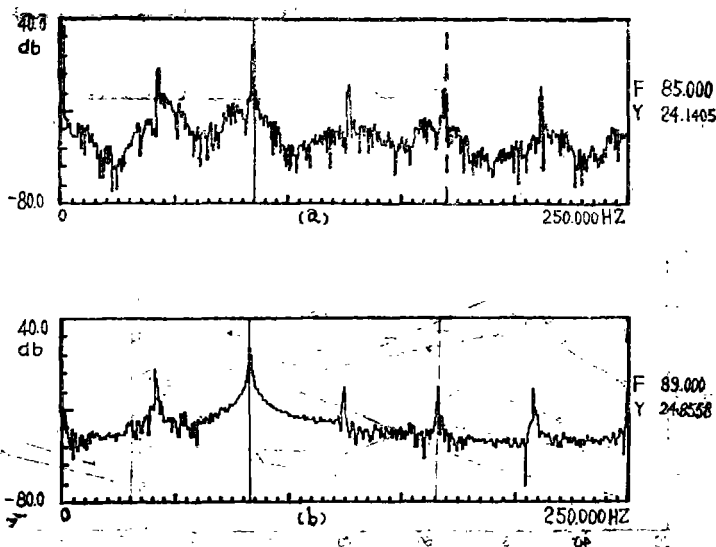


图 7 转子振动信号的频谱图

(a) 转子振动信号的功率频谱;

(b) 转子振动信号的幅值频谱

速下, 其侧瓣的幅值及其间隔对应于不平衡质量的大小及所在位置的不同。例如转子在 2500r/min 转速下对应于不平衡质量扰动的模型 2、模型 4、模型 5, 其侧瓣之间的间隔分别为 5.8, 9.5 和 21 (格), 其幅值分别为 3, 4.8 和 6 (格)。此外, 在油-涡动扰动条件下所测得的功率谱图可以精确地读出其半速涡动的频率为 $0.45 \times R$ 。

总之功率谱分析能更灵敏地识别转子在不同扰动条件下的振动特性, 为旋转机械的故障检测提供较准确的数据。

3.3 复合频谱分析

一个信号的完全频域显示是频谱的幅值和相位组成的。对转子振动信号进行复合频谱分析, 其幅度频谱指示某一频率分量的信号电平, 相位频谱可以看出其特定频率成分之间的相位关系。而相位频谱对于转子振动测量尤其重要。运用汉宁窗分析振动信号的复合频谱, 主要是它具有最好的选择性, 有相对窄带的主瓣和侧瓣。它给出最低泄漏的可能性。

图7(b)所示为转子在模型5扰动条件下,转速为5200r/min的振动信号幅值频谱。与同条件下所测的功率谱图比较,在幅值频谱中其主瓣及侧瓣的频率分量得到改善,但其幅值精确性下降约10%。

相位频谱分析的最重要应用是它能分析不平衡质量所在位置,为转子的平衡及旋转机械寻找故障的位置提供数据。从图8的相位频谱可见,对应于转子基频振动分量的相位移动为 180° ,而对应于其它谐波分量的相位移动小于 180° 。我们测量了转子系统在5种不同扰动条件下,在5种不同转速时的相位频谱。比较这些频谱

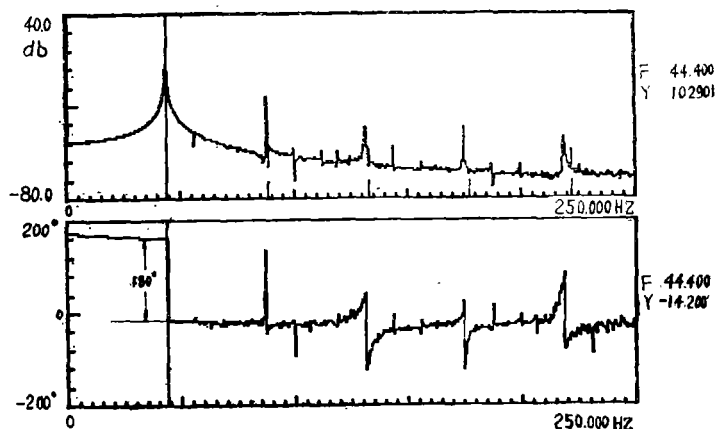


图8 转子振动信号的复合频谱

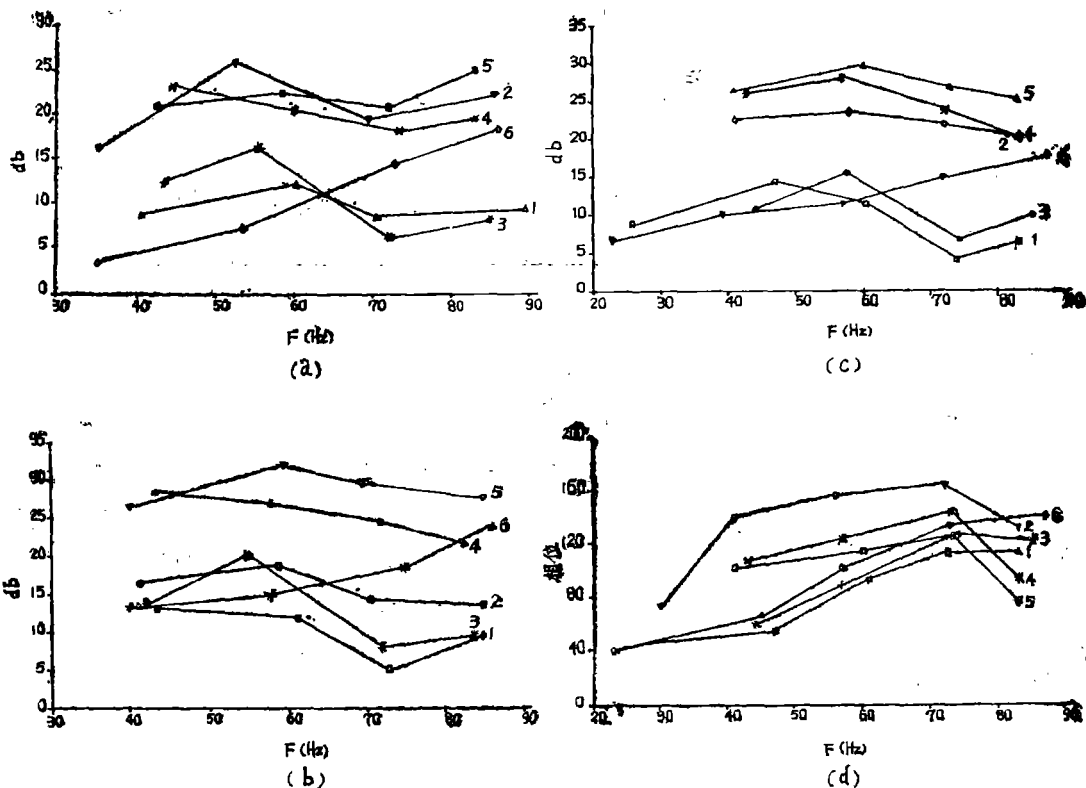


图9 转子振动响应随其转速变化的趋向

(a) 转子振动响应的“级联频谱”抽样幅值; (b) 转子振动响应的功率谱幅值; (c) 转子振动响应的复合光谱幅值; (d) 转子振动响应的相位移动值

可以清楚看出, 其相位移动随扰动条件不同及不同转速变化的趋向, 并能给出具体数据。

3. 4 三种频谱分析结果的比较

在上述五种质量不平衡扰动模型和油-涡动条件下, 以及四种不同转速及升速/降速过程中, 对转子系统进行一个半月的监测, 测得的有关级联频谱、功率谱和复合频谱近120幅。经分析归纳画出图 9 所示的四种曲线图。其中, (a) 为转子振动响应的级联频谱抽样幅值。(b) 为转子振动响应的功率谱幅值, (c) 为转子振动响应的复合光谱幅值。(d) 为转子振动响应的相位移动值。每一分图中的曲线1, 2, 3, 4, 5, 分别代表转子在质量不平衡模型1, 2, 3, 4, 5的扰动条件下, 而曲线6则表示转子在“油-涡动”扰动条件下。这些曲线图表示了转子在不同扰动条件下和不同转速下其振动响应幅值及相位的变化状况。

4 结论

利用扰动测试法对转子系统的振动进行条件监测是一种有效的方法, 其扰动条件创立简单、方便、灵活, 并符合旋转机械实际运行的振动状况, 转子系统振动的条件监测所得的数据、频谱图对于旋转机械的振动监测与故障预测、诊断有实际参考价值。

本课题是作者在英国访问期间、在STRTHCLYDE大学所进行的一项工作。曾得到导师 Dr. R. Barron的大力支持, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] Gorter, J. Klijn, A. J., *Vibration Measurements Provide Condition Monitoring of Rotating Equipment*, Technology, 1 (1986).
- [2] 钟一钊等, 转子动力学, 清华大学出版社, (1987).
- [3] Baines, N., *Modern Vibration Analysis in Condition Monitoring*, Noise & Vibration Control Worldwide, 5 (1987).

Vibration Test of a Rotor System under Monitored Condition

Shi Minfang

(Department of Precision Mechanical Engineering)

Abstract several aspects of vibration test of a rotor system under monitored condition are described in this paper, with emphasis on the application of two methods, namely, synchronous perturbation of unbalanced masses and “oil-whirl” asynchronous perturbation. By analysing and processing the vibration signals of the rotor with S11220 spectrum analyser, three spectra are obtained. They are waterfall spectrum, power spectrum, and Complex spectrum analysed by Hanning function. They are compared with each other.

Key words condition monitoring, vibration, ‘oil-whirl’, unbalance mass, perturbation, waterfall spectrum