

# 基于振动可视化分析的机械故障诊断方法<sup>\*</sup>

别锋锋, 周国强, 付强

(东北石油大学中石油健康安全环境(HSE)重点实验室 大庆, 163318)

**摘要** 提出了一种基于振动可视化技术的机械系统故障诊断方法。通过振动可视化技术补充和完善常规监测手段所得到的振动信息,同步反映设备关键测点在时间和频率上的变化,以此作为系统故障诊断的依据。首先,以功能简单的运动部件为对象研究可视化技术应用的可行性;其次,以多通道振动信号分析结果作为输入量,将其应用于机械系统故障诊断。应用结果表明,基于振动可视化技术的机械系统级故障诊断方法能够有效地简化复杂机械系统故障源的确定过程,同时完成故障模式的准确匹配。

**关键词** 工作变形分析; 振动可视化; 故障诊断; 模式匹配

**中图分类号** TH113.1; TP391

## 引言

利用振动进行工况分析在动设备故障诊断中最为常用<sup>[1]</sup>。振动信号的准确获取和故障特征的全面分析是实现精确故障诊断的基础和前提。当机械系统出现故障时,故障源会以一定的传递路径向各处传递故障信息<sup>[2-3]</sup>,若干个元部件出现故障将导致动设备系统的运转出现异常,同时设备故障源往往是多点的,其失效程度一般参差不齐。另一方面,当机械设备某种模式故障发生时,通常诱发其他故障模式,不同故障产生不同的振动信息,使测量信号包含多个振源信号的投影分量,导致故障源和故障模式难以确定<sup>[4]</sup>。为完整而准确地获取机械设备的振动信息,需对机械系统振动监测点进行全面监测,限于实际工况或现有监测手段,绝大部分基于振动信息的有效数据来源只是有限个振动监测源,这在一定程度上限制了故障诊断的准确性和实用性。因此,丰富振动数据的获取手段,同时完善振动信号多方位分析手段显得尤为必要。振动可视化技术是借助于机械系统结构分析和多源振动响应技术来实现识别系统故障源与故障模式,其意义在于以有限的振动监测数据为输入量,应用振动可视化技术对动设备进行监测和故障分析,通过建立系统的振动模型,显示被测设备整体或其关键部件的实际工作形态,为最终的故障诊断提供手段和依据。目前,振动

可视化技术的研究和应用仅局限于结构或几类经典的动设备系统,对于一般动设备系统的可视化研究与应用尚处于试探研究阶段<sup>[5-6]</sup>。

笔者通过简单部件和旋转机械故障模拟式试验台的工作变形分析(operation deflection shape,简称ODS)进行研究,以模拟振动信号分析结果作为系统故障诊断的依据,实现动设备系统故障源与故障模式的准确定位。

## 1 振动可视化分析

振动可视化分析的核心是对机械系统的振动工况进行ODS动态处理<sup>[7-8]</sup>,利用有限个点受迫振动作为输入量,通过模拟系统振动分析确定研究对象的空间形状,分析机械设备结构的空间形状改变由一个点或多个点相对于所有其他点振动形式。其优点是在无法确定输入量的时候对系统做定性或定量振动分析,而其输出量为结构或动设备系统运转时的工作振型,包括一台机器或结构如何进行振动、过度的振动量级发生在什么部位等。与模态分析不同的是,ODS只反映在激励未知的特定工况下系统对于某些特定频率的响应情况,或者是各测量点的振动形式。通过可视化振动分析可以定位故障源,并对振动信息的传播途径进行判断,为振动激励下的各子系统之间的关联性研究提供数据基础。

应用ODS动态处理求解频响函数(FRF)矩阵

<sup>\*</sup> 中石油科技开发资助项目(编号:2011-B438);黑龙江省教育厅资助项目(编号:12511007)

收稿日期:2011-08-17;修改稿收到日期:2012-02-20

的公式<sup>[9-10]</sup>为

$$H(j\omega) = \sum_{k=1}^n H_k(j\omega) \quad (1)$$

其中： $H_k(j\omega)$ 为系统频响函数的第 $k$ 阶频域矩阵。

$$H_k(j\omega) = \frac{1}{2j} \left( \frac{R_k}{j\omega - p_k} - \frac{R_k^*}{j\omega - p_k^*} \right) \quad (2)$$

其中：分子为第 $k$ 阶模态的响应规律； $R_k$ 为第 $k$ 阶模态的残余矩阵；分母为第 $k$ 阶模态动态参数； $R_k^*$ 为第 $k$ 阶模态的极值点； $p_k, p_k^*$ 代表振动系统频响函数的每一个模态的存在形式，它反映振动系统的频率响应特性。

ODS 动态处理以振动系统中某一点的响应代替激振向量，其传递函数为振动系统中的某个点的响应与参考点响应之比： $\{T_{ij}(j\omega)\} = \frac{\{x_i\}}{x_j}$ ，其中： $T_{ij}(j\omega)$ 为相对 ODS 值； $x_i$ 为某个测量点的响应（ODS 绝对值）； $x_j$ 为参考点的响应（ODS 参考值）。

与试验模态分析相比，ODS 分析的基础为外界不确定的激励。ODS 分析结果随着激励的变化而变化，不仅与设备系统本身性质相关，还取决于外部激励，这就决定 ODS 动态处理能获得各种不同工况条件下的测点频率，且与外界激励呈一一对应关系。

## 2 模拟分析

以规则运动部件轴承端盖为对象来进行初步研究。设置 2 个振动测试点和 2 个模拟分析点，由式(1)和式(2)获得部件 FRF 矩阵，分析模拟点振动特征获取振型数据如表 1 所示。由表 1 可知，端盖在未知激励的作用下发生工作变形，垂直径向动态变形较水平径向较强。ODS 分析结果表明，2 个方向的测试信号与模拟分析结果吻合度较高。

表 1 轴承端盖测点 ODS 动态处理分析数据 mm/s

测点编号	测点类型	测点布置	振型 1 幅值	振型 2 幅值	振型 3 幅值
1	实测	1x	0.384	0.994	0.22
2	ODS	1y	2.03	2.143	1.9
3	ODS	2x	0.452	0.739	0.104
4	实测	2y	2.12	2.03	2.19

测点布置方向  $x$  为水平径向， $y$  为垂直径向

图 2 为轴承端盖静态与动态（引入均布激励）形状。由图 2 可知，简单部件的 ODS 动态处理分析有助于解决动设备系统中关键部件的振动分析。通过有限个测点信息可以确定所需要的多个关键部位的振动信息，解决复杂系统故障诊断的信息量不足和分析不准确的问题。

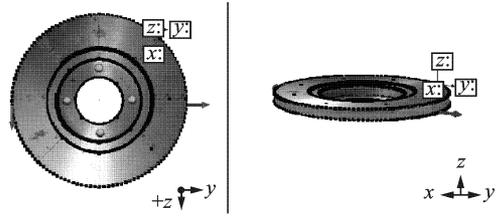


图 1 轴承端盖多向测试界面

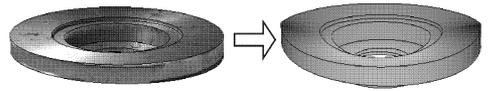


图 2 轴承端盖工作变形

## 3 试验方案设计

采用 Iotech640U 振动测试仪对 QPZZ-II 型故障模拟试验台进行振动实测和模拟研究，利用该试验台模拟各类旋转机械典型故障，包括轴承、轴系和齿轮等。将基于振动可视化的系统故障诊断方法应用于其中，利用有限个监测点获取的振动信息进行设备振动可视化分析，如图 3 所示。

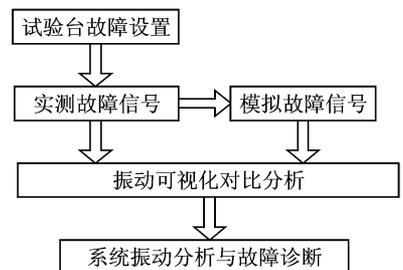


图 3 振动可视化分析流程图

### 3.1 试验步骤

1) 对试验台进行典型故障设置，以轴系不平衡和滚动轴承内圈故障为例进行研究。

2) 建立测试方案测试振动信号，并以此为分析源模拟多通道故障信号，分析其有效性。

3) 以实测振动信号和模拟振动信号为基础对系统进行振动可视化对比分析，获取整个系统的工作变形形态。

4) 系统振动分析，故障诊断与预设故障对比分析。

### 3.2 振动监测点

振动监测点如图 4 所示。设置 3 个振动实测点，分别为 3 个监测点的单个方向：轴向、水平径向和垂直径向，而 ODS 模拟分析点为 3 个监测点的其他两个方向，包括 6 个测点。测点位置及属性如表 2 所示

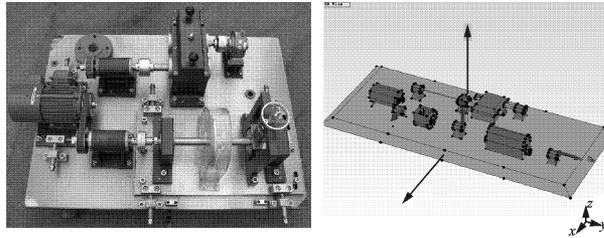


图4 振动监测点的设置

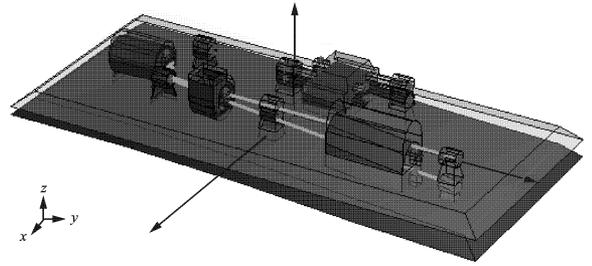


图6 ODS实时分析

表2 轴系测点实测与ODS动态处理分析数据 mm/s

测点编号	测点位置	测点类型	振动方向	振型1幅值	振型2幅值	振型3幅值	振型4幅值
1	自由端支承座	ODS	1x	1.838	1.693	2.22	1.023
2	自由端支承座	ODS	1y	6.03	5.143	3.9	4.88
3	自由端支承座	实测	1z	2.5	2.739	2.104	3.63
4	中间支承座	ODS	2x	0.743	1.03	1.52	2.08
5	中间支承座	实测	2y	3.4	3.239	6.99	2.08
6	中间支承座	ODS	2z	4.17	2.18	1.72	3.76
7	近电机端支撑座	实测	3x	0.90	0.738	0.347	0.767
8	近电机端支承座	ODS	3y	4.53	3.28	2.35	1.75
9	近电机端支承座	ODS	3z	2.31	2.25	2.17	2.24

测点布置方向x为水平径向,y为垂直径向,z为轴向

### 3.3 试验结果与信号分析

图5为模拟与实测振动信号实时对比图,由实测信号作为基础模拟的100个节点振动信号。左侧为试验台振动可视化显示,右侧为各实测与模拟测点(通道)信号对比分析。由图5可知,故障部件和振动监测点的距离在故障特征(特征频率段能量分布)和振动强度中充分体现,振幅数据见表2。

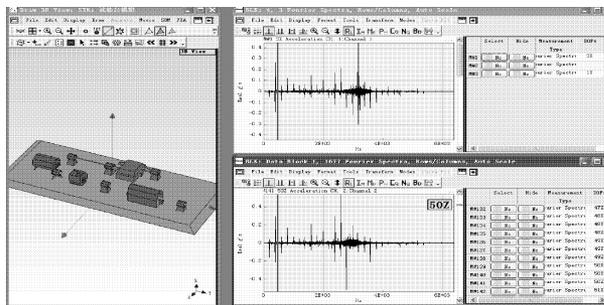
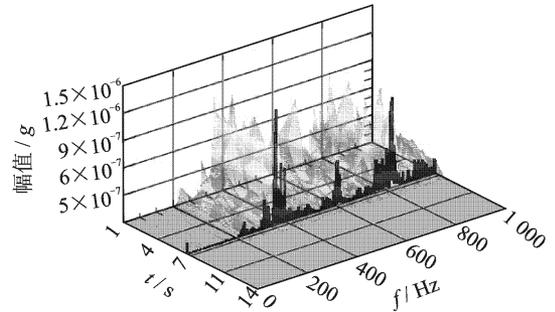


图5 模拟与实测信号对比

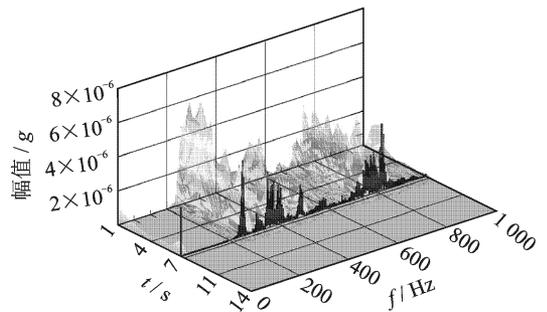
图6为试验台系统实时ODS分析图,可以发现系统的振动主要方向与振动烈度强点。设9个测点模拟与实测信号结果如表2所示。

输入3个振动信号,利用可视化技术进行模拟分析获得9组模拟振动信号。这里以其中1个原始振动信号和1个模拟振动信号为例进行研究说明。

由图7和图8可以看出,在远离故障部件端(近电机端支承座)实测信号与模拟信号差异不明显,振动幅值与信号成分都极为类似,冲击特征不突出。在故障源部位(自由端轴承)无论是实测信号还是ODS分析模拟信号,其冲击特征明显且二者吻合度较高。

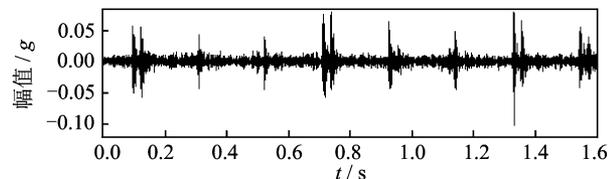


(a) 实测信号

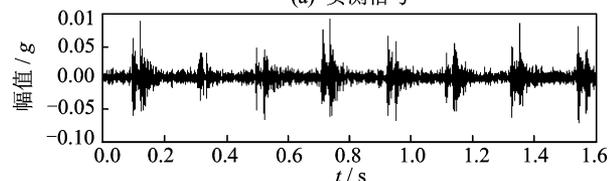


(b) 模拟信号

图7 故障信号时频瀑布图



(a) 实测信号



(b) 模拟信号

图8 故障信号时域信号图对比

分析9通道振动信号可知轴承内环特征频率及其倍频成分突出(轴承典型故障特征频率计算公式见式(3)),且振动烈度均超过标准规定值<sup>[11]</sup>,由此可以直接确定故障源与故障模式。

$$\text{BPFO} = (1/2)n|N_0 - N_i|[1 + (d/D)\cos\phi] \quad (3)$$

其中: $d$ 为滚动体直径; $D$ 为滚动轴承平均直径(滚动体中心处直径); $\phi$ 为径向方向接触角; $n$ 为滚动体数目; $N_0$ 为轴承外环角速度; $N_i$ 为轴承内环角速度(轴转速)。

带入轴承相关参数,可得

$$\text{BPFO} = (1/2) * 12 * |0 - 900/60|[1 + (2/14)] = 103 \text{ Hz}$$

分析轴承内环特征频率 52 Hz (1/2 倍频), 103 Hz, 205 Hz, 310 Hz 处振动幅值, 如图9所示。可以看出, 各实测信号与 ODS 模拟分析信号轴承内环特征频率倍频成分明显, 且水平径向振动冲击明显, 而 3x (近电机端支座测点) 振幅要小于其他两个测点, 表征故障特征随着结构系统的衰减特性, 充分说明了测试与诊断方法的有效性。

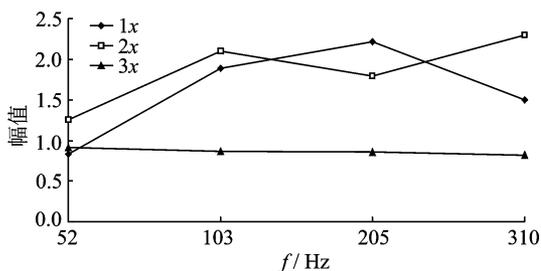


图9 水平径向振动特征频率幅值对比

## 4 结束语

振动信息的准确获取是实现机械振动测试与故障诊断的关键和基础。将振动可视化技术用于动设备系统故障诊断, 解决复杂系统故障源的测试和故障模式的确定难题。利用可视化振动测试技术, 以有限个振动监测点信息为输入量, 获得多通道模拟采集振动信号分析结果, 并以此为依据应用于机械系统故障诊断, 完成系统故障源的智能识别。试验台典型故障模式试验研究证明了方法的有效性和可行性。

### 参 考 文 献

- [1] 何正嘉, 訾艳阳, 孟庆丰, 等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 1-2.
- [2] 徐敏, 黄邵毅. 设备故障诊断手册——机械设备状态检测和故障诊断[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 2-4.

- [3] 张义民. 振动系统随机传递路径响应分析[J]. 工程力学, 2008, 25(1): 133-136.  
Zhang Yimin. Response of vibration systems with uncertain transfer paths [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(1): 133-136. (in Chinese)
- [4] 徐章遂. 故障信息诊断原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 15-16.
- [5] Dionysius M S, Yozo F. System identification of suspension bridge from ambient vibration response [J]. Engineering Structures, 2008, 30(2): 462-477.
- [6] 张庆良, 李科. 汽车总成振动的试验模态分析与 ODS 法的比较[J]. 今日科苑, 2008(16): 88-89.  
Zhang Qingliang, Li Ke. Comparison of the experimental modal analysis and the ODS method on vehicle assembly vibration [J]. Modern Science, 2008(16): 88-89. (in Chinese)
- [7] 张雨. 汽车悬架振动试验台垂向主振动的有效性分析[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(4): 455-457.  
Zhang Yu. Analysis of effectiveness of main vertical vibration of automobile suspension vibration test rig [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(4): 455-457. (in Chinese)
- [8] Ramesh B T, Sekhar A S. Detection of two cracks in a rotor-bearing system using amplitude deviation curve [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 314(3-5): 457-464.
- [9] 徐浩, 陈怀海, 游伟倩. 多输入多输出冲击振动试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2): 143-148.  
Xu Hao, Chen Huaihai, You Weiqian. Input signal identification in multiple-input and multiple-output shock vibration test [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 143-148. (in Chinese)
- [10] Leclere Q. Multi-channel spectral analysis of multi-pass acquisition measurements [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(5): 1415-1422.
- [11] 朱泓, 马孝江, 张冰焰. 滚动轴承故障诊断与预知维修数据库系统研制[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(4): 461-464.  
Zhu Hong, Ma Xiaojiang, Zhang Binyan. Research on fault diagnosis and predictive maintenance of roller bearings [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(4): 461-464. (in Chinese)



第一作者简介: 别锋锋, 男, 1979年12月生, 博士、副教授。主要研究方向为机械故障诊断、状态监测和振动控制。曾发表《往复式压缩机的故障信息模糊二元树诊断方法研究》(《大连理工大学学报》2008年第48卷第3期)等论文。  
E-mail: fengf721@sina.com