

不平衡-碰摩-松动耦合故障的转子动力学建模与盲分离研究

曲秀秀, 陈果, 乔保栋

(南京航空航天大学 民航学院, 南京 210016)

摘要: 建立了不平衡-碰摩-基础松动耦合故障的转子动力学模型。在模型中, 轴承简化为线性弹簧, 转子考虑为两端无约束的等截面自由欧拉梁, 同时, 建立了不平衡、碰摩和松动耦合转子动力学运动方程, 运用模态截断法, 利用数值积分方法获取转子系统的振动响应。显然, 系统响应是多个耦合故障信号的混合, 因此借助盲源分离方法进行转子系统耦合故障信号分离研究, 并运用 ZT-3 型多功能转子试验台进行实验验证, 仿真和实验结果表明了所建立故障动力学模型的正确性以及利用盲分离方法实施耦合故障分离的有效性。

关键词: 转子; 不平衡; 碰摩; 松动; 耦合故障; 盲源分离

中图分类号: TH 113.1 **文献标识码:** A

Signal separation technology for dynamic model of rotor with unbalance-rubbing-looseness coupled faults

QU Xiu-xiu, CHEN Guo, QIAO Bao-dong

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract A dynamic model of rotor with unbalance-rubbing-looseness coupled faults was established. In the model, bearings were reduced to linear springs and the rotor shaft was considered as free Euler beam with uniform cross section. The differential equations of the system were established using modal truncation method. Then the vibration response of the rotor system was obtained by a fast-numerical integral method. Clearly, the system response must be a mixture of multiple faults signals. Blind source separation was used to achieve the separation of rotor fault signals. ZT-3 multi-functions rotor test device was taken in use for experiments. Simulation and experiment results show the correctness of the dynamic model and the effectiveness of blind source separation approach in implementing the coupled faults isolation.

Key words rotor; unbalance; rubbing; looseness; faults coupling; blind source separation

碰摩故障作为典型的二次/孪生故障^[1], 具有明显的耦合故障特征, 因此, 进行碰摩耦合故障分析对于弄清碰摩故障的原因具有重要意义, 近年来, 研究者将目光逐渐转向对碰摩耦合故障的研究, Muszynska^[2]首先研究了带有松动和碰摩故障的转子系统的非线性动力学问题, 刘元峰、赵玫、朱厚军等^[3]对含碰摩与松动的转子系统的非线性动力学进行了研究, 罗跃纲等^[4]研究了基础松动与碰摩故障的耦合振动。陈果^[5]建立了含不平衡-松动-碰摩耦合故障的转子-滚动轴承-机匣耦合系统模型, 并进行了耦合故障动力学仿真。

然而, 在这些模型中, 对转子非线性运动行为的研究基本上是针对形如 Jeffcott 转子的简单模型, 其缺点

在于模型参数与实际转子系统相差较大, 难于模拟实际转子系统的振动效应和耦合故障振动特征。本文将转子考虑为两端无约束的等截面自由欧拉梁模型, 并考虑基础松动、碰摩和不平衡耦合故障, 运用模态截断法, 利用数值积分方法获取故障转子振动响应。显然, 转子系统响应中包含了不同故障信号源产生的多路信号。从混合信号中分离出单一的故障信号对于判断转子故障具有重要意义。因此, 本文采用盲分离技术, 研究含不平衡-松动-碰摩耦合故障的转子动力学仿真响应中分离出单一故障源, 并在 ZT-3 多功能转子实验台上进行了不平衡-碰摩-松动耦合故障实验, 对耦合故障进行了有效分离, 研究结果为有效实施转子系统的耦合故障诊断提供理论依据。

1 含不平衡-碰摩-基础松动耦合故障的转子系统建模

本文建立一个含有不平衡-碰摩-基础松动耦合

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50705042); 航空科学基金资助项目 (2007ZB52022)

收稿日期: 2010-03-25 修改稿收到日期: 2010-06-12

第一作者 曲秀秀 女, 硕士生, 1985年生

通讯作者 陈果 男, 博士, 教授, 1972年生

故障的转子动力学模型, 图 1 为该模型示意图, 在模型中, 转子考虑为两端无约束的等截面自由欧拉梁, 两端轴承简化为线性弹簧, 轴承对转轴的支承力以及转盘与转轴的作用力均以集中力的形式作用于转轴梁上, 并假定轴承左端支座发生松动。

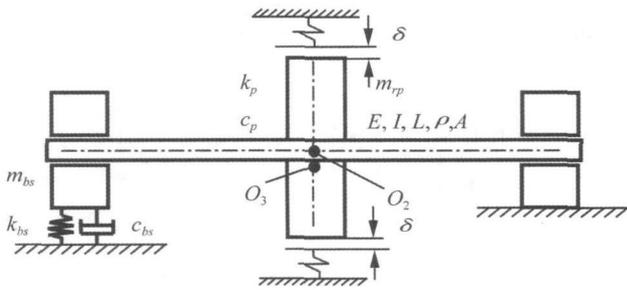


图 1 连续梁转子系统不平衡-碰摩-基础松动耦合故障动力学模型示意图

Fig 1 Dynamic model for rotor with unbalance-rubbing-looseness coupling faults based on beam model

图 1 中: O_1, O_2, O_3 为轴承几何中心、转子几何中心、转子质心; m_{rp} 为转子圆盘质量; m_{bs} 为松动端轴承支座质量; δ 为转子圆盘和静子的间隙; e 为质量偏心距; $E, I, L, \rho A$ 为转轴的弹性模量、截面惯性矩、转轴长度、转轴密度和转轴截面积; k_p, c_p 为转轴与圆盘之间的连接刚度和阻尼; k_{bs}, c_{bs} 为左端轴承支座与基础之间的松动等效刚度和阻尼。

本文采用参考文献 [6] 的连续梁转子动力学模型, 利用数值积分对转子振动响应进行求解, 该模型将转轴考虑为等截面自由欧拉梁模型, 转子与轴承通过轴承力进行耦合, 并采用模态截断法将偏微分方程转化为常微分方程, 利用新型快速显式积分法——翟方法 [7] 进行求解。关于建模以及求解的过程可以参考文献 [6], 在此从略。

1.1 不平衡故障模拟

考虑转盘的质量偏心所产生的不平衡力。设 m_{rp}, e, ω 分别为转盘质量、偏心距和转速, 由于偏心产生的 x 向和 y 向的离心力分别为: $m_{rp} e \omega^2 \cos(\omega t)$ 和 $m_{rp} e \omega^2 \sin(\omega t)$ 。

1.2 碰摩故障模拟

图 1 右图为碰摩力模型示意图。设: r 为转子圆盘径向相对位移, 表达式为: $r = \sqrt{x_{rp}^2 + y_{rp}^2}$ 当 $r < \delta$ 时, 不发生碰摩, 即: $P_x = P_y = 0$ 当 $r \geq \delta$ 时, 发生碰摩, 此时碰摩力为:

$$\begin{cases} P_x = k_r(1 - \delta/r)(-x_{rp} + \mu \cdot y_{rp}) \\ P_y = k_r(1 - \delta/r)(-y_{rp} - \mu \cdot x_{rp}) \end{cases}$$

其中: δ 为转子圆盘和静子的间隙; k_r 为定子径向刚度; μ 为摩擦系数。

1.3 松动建模

假定支座的一端发生松动, 轴承座与基础之间的松动最大间隙为 δ_s ; k_{bs}, c_{bs} 分别为轴承座与基础之间的

等效刚度和等效阻尼; 考虑支承间隙系统在位移条件下 k_{bs}, c_{bs} 为分段特性, 即:

$$c_{bs} = \begin{cases} c_{bs1} & (y_{bs} > \delta_s) \\ 0 & (0 \leq y_{bs} \leq \delta_s) \\ c_{bs2} & (y_{bs} < 0) \end{cases}$$

$$k_{bs} = \begin{cases} k_{bs1} & (y_{bs} > \delta_s) \\ 0 & (0 \leq y_{bs} \leq \delta_s) \\ k_{bs2} & (y_{bs} < 0) \end{cases}$$

公式中, y_{bs} 为轴承支座在竖直方向上的位移。由于松动的支座在水平方向的位移很小, 在此仅仅考虑其在垂直方向的位移。

最后, 将不平衡、碰摩、

松动故障耦合于所建立模型中, 运用数值积分方法进行系统响应的求解。

2 转子系统故障模拟试验台

采用 ZT-3 型多功能转子模拟试验台对所建立模型进行了试验验证 [8], 实物图如图 2 所示。文中所涉及的转子故障实验数据均来自于此实验台, 它能有效地模拟转子不平衡、松动以及碰摩等常见故障。该实验台由电动机带动, 通过转速传感器 (反射式光电传感器) 获知转速, 位移传感器采集模拟信号, 经过模数变换, 将数字信号送给计算机 (或数字信号处理器) 进行处理。

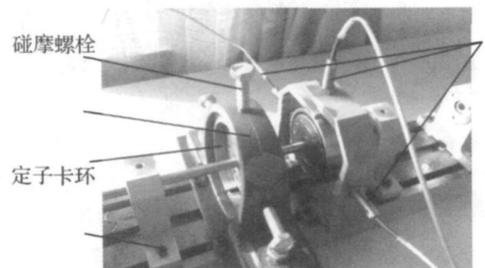


图 2 ZT-3 型多功能转子模拟试验台

Fig 2 ZT-3 type multi-function rotor test rig

现将试验台故障模拟方法介绍如下:

(a) 不平衡实验方法

在转子侧面凹槽内加入 3~5 个螺钉, 螺钉要集中以使转子发生不平衡, 加入后拧紧。

(b) 基座松动方法

将基座的链接螺钉拧松稍许, 但不要松动太大。

(c) 转静碰摩实验方法

为较好地模拟转静碰摩故障, 引入一套自行设计的转子碰摩装置, 如图 3 所示。该装置主要包括支座 (1)、定子卡环 (4)、转动件 (6)、碰摩螺栓 (7) 和紧固螺栓 (8) 等组成。它是靠支座 (1) 上的紧固螺栓 (8) 固定

在实验台上的,与实验台上其它部件共同操作完成实验。其中定子卡环是非整圆周的,而具有缝隙;转动件固定在转轴上位于定子卡环内侧,并与定子卡环存有间隙。通常状态下,三个碰摩螺栓都是松动的,转动件正常运转不受阻碍。当需要做碰摩实验时,拧动三个碰摩螺栓来调节定子卡环与转动件之间的间隙,从而能够很方便地实现单点、多点、局部及整周碰摩方式。同时因为定子卡环下边缘的缝隙使得定子卡环在受到螺栓的挤压时会有所闭拢,从而能够很好地贴近包裹转动件,达到碰摩的效果。

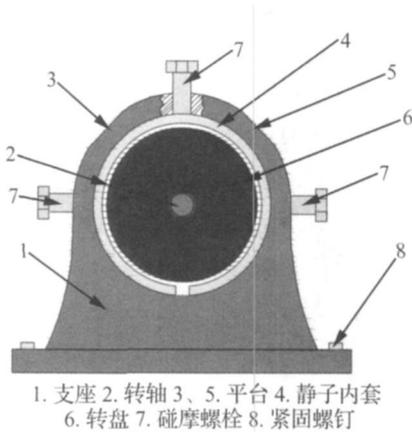


图3 转子碰摩实验装置

Fig 3 Experimental device of rotor rubbing

与现有技术相比,该装置具有的优点是:①专门设计了定子卡环-螺栓结构,既避免转轴受到损伤,又模拟了真实碰摩状态,定子卡环包裹转动件实现碰摩;②转动件和定子卡环容易更换,且可以根据不同的材料进行加工制作,已灵活地实现多种碰摩刚度的碰摩实验研究;③该碰摩装置能够与现有的所有通用转子实验台配合使用,可以在不影响现有的实验台结构和其它实验的基础上进行安装和实验。

3 盲源分离算法

盲分离问题的基本思想就是在独立源 S 和混合矩阵 A 未知的前提下,寻找一个分离矩阵 W ,使得 $y = Wx(t) = WAs(t)$ 是源信号的一个最佳估计。目前该领域对于分离矩阵 W 的求解方法多种多样。考虑到算法的自适应处理过程以及收敛速度,本文采用最经典的“快速ICA算法”——FastICA算法。

参考相关文献[9-15],将基于负熵判据的FastICA算法的实现步骤归纳如下:

(1) 对混合数据进行预处理:去均值、自相关、白化;

(2) 选择初始分离矩阵 W ;

(3) 迭代更新分离矩阵:

$$W(n+1) = E\{zG[W^T(n)z]\} - E\{g(W^T(n)z)\}W(n);$$

(4) 分离矩阵标准化:

$$W(n+1) = W(n+1)/\|W(n+1)\|;$$

(5) 如果相邻的 W 变化小于预定的值,则迭代停止;否则返回步骤(3)。

得到分离矩阵之后,很容易求出源信号的估计为:

$$s(t) = Wx(t) = WAs(t)$$

4 不平衡-碰摩-松动耦合故障仿真信号的盲分离

本文利用所建立的含不平衡-碰摩-基础松动耦合故障转子动力学模型,模拟转子不平衡、碰摩和松动三种故障。仿真模型均采用转子试验台的实际参数,如表1所示。

表1 ZT-3转子实验台主要计算参数

Tab 1 The main parameters of ZT-3 type rotor test rig

弹性模量 E/Pa	截面惯性矩 $I_y = I_z/\text{m}^4$	密度 $\rho /$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	转轴截面积 A/m^2	线密度 $\rho_l /$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	转盘质量 m_p/kg	转轴长度 $L /$ m
2.1×10^{11}	3.998×10^{-10}	7.8×10^3	7.088×10^{-5}	0.5543	0.6	0.26

同时,设转盘质量偏心距 $e = 0.15 \text{ mm}$, 转静间隙 $\delta = 0.05 \text{ mm}$; 碰摩刚度 $kr = 7.5 \times 10^7 \text{ N/m}$, 摩擦系数 $\mu = 0.1$; 轴承座质量 $m_{bs} = 1 \text{ kg}$, 松动间隙 $\delta_1 = 3 \text{ mm}$, 转轴与圆盘之间的连接刚度和阻尼分别取为 $k_p = 1 \times 10^9 \text{ N/m}$, $c_p = 1000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, 轴承支承刚度和支承阻尼分别取为 $k_b = 1 \times 10^9 \text{ N/m}$, $c_b = 1000 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ 。通过仿真计算获得耦合故障下的振动响应。此响应必然也是混合信号,在经过盲源分离之后可以得到单一故障下的信号时域、频域图。

图4为仿真系统在2000 r/min转速下转子圆盘处 X 、 Y 两个方向以及松动端转轴 Y 方向的振动位移响应。很明显,三路信号都比较复杂,频域中包含多种频率特征,可见三种故障信号是混叠在一起的,很难区分哪种故障存在。这种混合信号经过FastICA算法分离后得到的信号如图5所示。同样的方法来比较混合信号和分离信号的阶次谱图,可以看出:图4中,转子的旋转频率(基频)及其倍频 $2 \times$ 、 $3 \times$ 和分频 $0.5 \times$ 、 $1.5 \times$ 、 $2.5 \times$ 等多个频率特征在每一个阶次谱上都比较明显,可见两种故障信号是混叠在一起的。但是,从图5的阶次谱图可以看出,(a)图中仅仅在 $1.5 \times$ 谱峰值非常明显, $0.5 \times$ 、 $3 \times$ 也有较小峰值存在;表现为松动的分频特征;(b)图中恰恰仅在基频处的谱峰值非常明显,可以确定此信号为不平衡成分;(c)图中除了在 $3 \times$ 有较大峰值以外,中间频带处还有较小的连续谱峰存在,可以认为是表现出了碰摩特征。以上研究分析表明在不平衡-碰摩-基础松动三种故障耦合情况下,应用FastICA算法同样能得到比较好的分离效果。

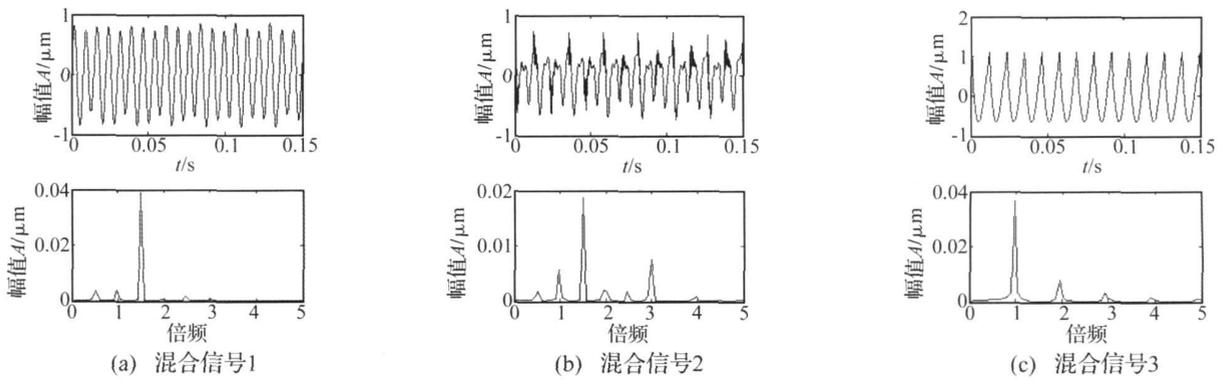


图 4 不平衡 - 碰摩 - 松动故障耦合信号时域、阶次谱图

Fig. 4 Time waveform and order-ratio amplitude spectrum of unbalance-rubbing-looseness coupled signals

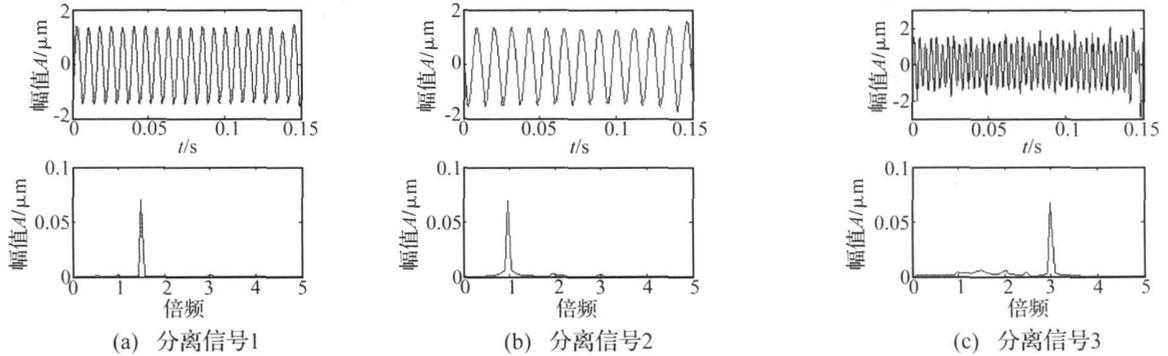


图 5 不平衡 - 碰摩 - 松动故障分离信号时域、阶次谱图

Fig. 5 Time waveform and order-ratio amplitude spectrum of unbalance-rubbing-looseness separated signals

5 不平衡 - 碰摩 - 松动耦合故障的实验信号盲分离

为了验证盲源分离算法在机械故障信号分离方面的应用性, 本文运用 FastICA 算法对真实的转子耦合故障振动信号进行了实验对比与分析。

在图 2 所示的转子试验台上, 在转轴跨中位置安装圆盘, 转子系统由电机驱动。对实验状态可以进行如下调整: ① 在转子圆盘上增加偏心质量块; ② 拧下

碰摩螺栓, 使其发生碰摩; ③ 减小左端轴承座的支撑刚度, 使其具有一定的晃动状态。传感器安装位置如图 2 所示, 电涡流位移传感器采集的数据经过东华测试分析系统分析与记录, 采样频率为 20 000 Hz 采样点数为 6 000。

在转速 4 590 r/m 下进行转盘 X 和 Y 方向以及松动端转轴 Y 方向振动位移信号的采集, 混合数据经过筛选预处理之后, 采用 FastICA 算法进行分离, 混合数据以及分离结果的阶次谱图如图 6 所示。

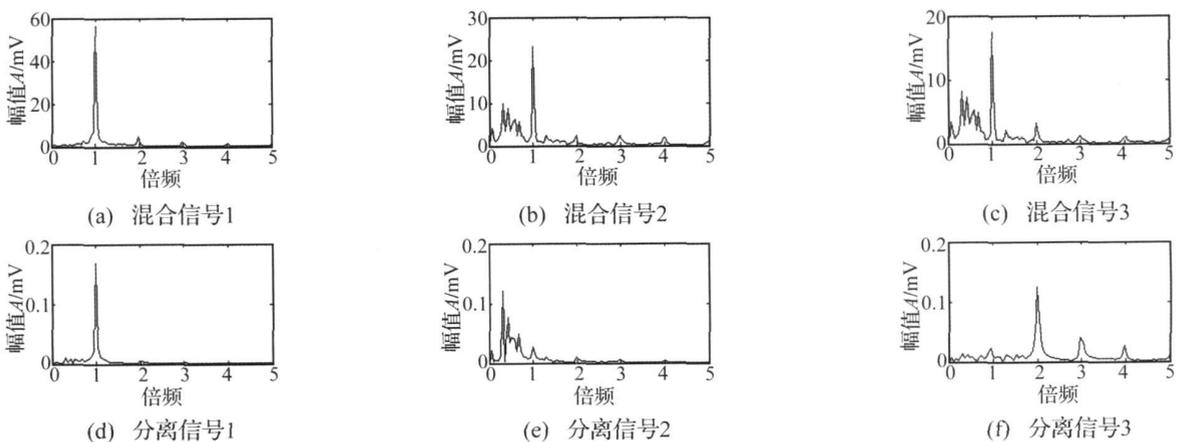


图 6 不平衡 - 碰摩 - 基础松动故障实测耦合信号、分离信号阶次谱图

Fig 6 Order-ratio amplitude spectrum of unbalance-rubbing-looseness coupled signals and separated signals

(下转第 96 页)

计算结果更加符合实际情况。

4 结论

(1) 对于球壳在爆炸载荷下的响应, 矢跨比必须小于一定数值, 才能发生反直观行为, 且有可能经过几次反弹到达载荷反向。

(2) 其他条件不变时, 增大球壳厚度, 其刚度增大, 也相对较难发生反直观行为。2 mm 厚球壳产生反常现象的爆心距相对 1 mm 厚球壳的要近。

(3) 球壳与板有所区别, 它发生反直观行为的爆心距区域宽窄没有一定规律, 有待于进一步研究。

(4) 应变率效应影响对计算结果影响很大, 因为本文研究的对象所受的是爆炸载荷, 并且反直观行为对材料性质较为敏感, 所以考虑应变率效应是必要的。

参考文献

[1] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.

- [2] Bassi A, Genna F, Symonds P S. Anomalous elastic-plastic response to short pulse loading of circular plates [J]. International Journal of Impact Engineering 2002, 28: 65-91
- [3] Galiev Sh U. Experimental observation and discussion of counterintuitive behavior of plates and shallow shells subjected to blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18: 783-802
- [4] 吴桂英, 秦冬祺, 杨桂通. 冲击载荷作用下弹塑性圆板的反常动力响应研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 420-424.
- [5] Qing M, Zhao L M, Yang G T. Experimental results on the counter-intuitive behavior of thin clamped beams subjected to projectile impact [J]. International Journal of Impact Engineering 1991, 11: 341-348
- [6] 吴桂英, 秦冬祺, 杨桂通. 在冲击载荷作用下弹塑性圆板的反直观动力行为数值分析 [J]. 固体力学学报, 2004, 25(4): 389-393
- [7] 徐加初, 杨增涛. 爆炸冲击下复合材料层合扁球壳的动力屈曲 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27(2): 116-120
- [8] 朱浩, 朱亮, 陈剑虹. 应力三轴度和应变率对铝合金力学性能的影响及材料表征 [J]. 材料科学与工程学报, 2007, 25(3): 358-362

(上接第 77 页)

实验结果分析

对比图 6 中的故障耦合信号与分离信号阶次谱, 进行分析可以看出:

(1) 采集的信号就是多个故障源的混合响应信号, 几个故障特征频率在每一个谱图上混叠, 难以确定哪些故障存在;

(2) 经过盲源分离以后谱图上基本上只显示出一种故障频率, 而其他特征频率都得到了很好的抑制: 在图 6 中, 不平衡-碰摩-基础松动三种故障耦合, 图 6(e) 中松动表现为分频特征; 图 6(f) 中碰摩表现为倍频特征, 都与理论特征相符合;

(3) 分离结果的排列顺序和幅值都有所变化, 这来源于盲源分离的两个不确定性, 即分离信号的不确定和分离信号的幅值不确定。

6 结论

本文建立了含耦合故障的连续梁转子动力学模型, 通过数值积分得到了系统响应, 并利用 FastICA 算法实现了转子系统耦合故障的有效分离。同时建立了转子实验台对仿真模型进行了临界转速验证, 针对转子实验台模拟不平衡、碰摩和基础松动耦合故障, 利用 FastICA 同样对耦合故障进行了有效分离。本文研究表明了建立含耦合故障的转子动力学模型的必要性, 同时也证明了利用盲源信号分离方法实施旋转机械的耦合故障诊断的有效性和可行性。

参考文献

[1] 闻邦椿, 武新华, 丁千, 等. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验 [M]. 北京: 科学出版社, 2004: 44-54

- [2] Muszynska A, Gokhan P. Chaotic response of unbalanced rotor bearing stator systems with looseness or rubs [J]. Chaos, Solitons and Fractals 1995, 5(9): 1683-1704
- [3] 刘元峰, 赵玫, 朱厚军. 转子有碰摩和支承松动故障时的混沌特性研究 [J]. 振动与冲击, 2002, 21(4): 36-38
- [4] 罗跃纲, 曾海泉, 李振平, 等. 基础松动-碰摩转子系统的混沌特性研究 [J]. 振动工程学报, 2003, 16(2): 184-188
- [5] 陈果. 带碰摩耦合故障的转子-滚动轴承-机匣耦合动力学模型 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(4): 361-368
- [6] 陈果. 含碰摩故障的新型转子-滚动轴承-机匣耦合动力学模型 [J]. 振动工程学报, 2009, 22(5): 538-545
- [7] Zhai W M. Two simple fast integration methods for large-scale dynamic problems in engineering [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering 1996, 39(24): 4199-4214
- [8] 王美令, 陈果. 转子系统临界转速计算方法 [J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(6): 59-63
- [9] 杨福生, 洪波. 独立分量分析的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [10] 刘婷婷, 任兴民, 康召辉. FastICA 算法在机械振动信号分离中的应用 [J]. 西安工业大学学报, 2008, 28(1): 27-31
- [11] Pierre Comon. Independent component analysis: A new concept [J]. Signal Processing 1994, 36: 287
- [12] 李舜酩. 转子振动故障信号的盲分离 [J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 751-756
- [13] 张金玉, 黄先祥, 谢伟达. 机械信号处理的 BSS 算法及其比较研究 [J]. 振动工程学报, 2008, 21(4): 409-416
- [14] Gelle G, Colas M. Blind source separation: A tool for rotating machine monitoring by vibrations analysis [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(5): 865-885
- [15] 胥永刚, 张发启, 何正嘉. 独立分量分析及其在故障诊断中的应用 [J]. 振动与冲击, 2004, 23(2): 104-107