

文章编号: 1000-8055(2008)05-0932-07

一种基于模型的双转子不平衡故障 诊断方法

韩 军, 高德平, 胡 绚

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 建立了双转子系统内外转子同时具有不平衡故障时振动响应分析模型, 给出了双转子不平衡故障的微差速测试方法, 构造了不平衡故障的非线性优化识别模型. 分析了双转子可测点不平衡响应对转速与不平衡量之间的灵敏度关系, 讨论了双转子不平衡故障的可诊断性问题, 并利用数值仿真和试验对该方法进行了检验. 研究表明, 当测试数据含有一定的噪声时, 利用少量的测点和转子的转速信息, 可较准确地识别转子不平衡量故障.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 双转子; 不平衡故障; 识别; 子结构传递矩阵法; 微差速原理; 可诊断性

中图分类号: V235

文献标识码: A

A model based diagnosis method of unbalance faults for dual-spool system

HAN Jun, GAO De ping, HU Xuan

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A model for analyzing unbalance faults in dual-spool system was discussed. The dual-spool model was built using substructure transfer matrix method. Linear superposition theory was used to calculate the response on the support points when the inner and outer rotors have the unbalance faults at the same time. The method of little rotating speed difference for measuring unbalance vibration response was presented. The nonlinear optimization model for identifying the dual-spool unbalance faults was constructed, and the sequence quadratic programming (SQP) was employed to solve them. The sensibility relationship between the unbalance response from the accessible points and dual rotors speeds, or between the unbalance response and unbalance quantity, were given. The possibility of diagnosis for dual rotors unbalance faults was also discussed. The proposed methods are demonstrated using the numerical simulations and experiments. The results show that the method can successfully identify the magnitude and phase of unbalance for dual-spool using the information of speed and a few points' response data with noise.

Key words: aerospace propulsion system; dual-spool; unbalance faults; identification; substructure transfer matrix; small rotating speed difference theory; diagnostics possibility

收稿日期: 2007-05-18; 修订日期: 2007-10-15

基金项目: 中国博士后基金(2005037728); 江苏省博士后基金

作者简介: 韩军(1966-), 男, 陕西商南人, 副研究员, 博士后, 主要从事车辆工程、振动测试与诊断方面的研究.

航空发动机一般都具有复杂的转子-支承系统,它可能由两个或三个转速不同的内外同心套装的转子相互耦合组成. 由于安装误差、单转子的平衡质量不高、工作时热不稳定性引起的变形、摩擦使质量减少或永久的变形等原因,使转子引起不平衡故障. 对于双转子系统不平衡故障的研究,文献较少. 双转子系统是一个由两个不同频率的简谐振动分量构成的拍振,在对双转子不平衡振动信号提取方面, Zeng^[1] 提出基于相关分析理论,对振动信号进行解拍,贺世正^[2] 提出根据双转子系统在一个拍周期中振幅最大的位置也是内外转子不平衡量一致时所在的位置这一特点,不进行解拍求得内外转子的不平衡量方法. 这两种方法对双转子的不平衡量的大小提供了一种估算的方法,而不适合定量分析.

在诊断推理方面,主要有两类^[3]:一类是基于规则的故障诊断;一类是基于模型的故障诊断. 基于规则的诊断方法具有诊断过程简便、快速等优点,但其对设备和专家经验具有很强的依赖性,对于复杂系统,且存在多种故障情况下,其反演推理往往是不唯一的,且只能进行定性分析. 基于模型的诊断方法是使用一个设备的内部结构与行为的知识来诊断该设备,而且是面向征兆的,该方法容易实现在线诊断,可以提供准确可靠的信息,可以量化故障,如: Jain^[4] 用基于模型的方法对单转子,诊断出转子刚度不平衡故障的位置、大小和方位; Loparo^[5] 采用基于模型的方法对旋转机械中的转子不平衡量、支承刚度、阻尼等参数进行监测和诊断. 基于模型的诊断方法是复杂系统的有效诊断手段^[6].

本文主要思路是:利用测量转子系统支承附近处的响应和双转子系统的数学模型对转子不平衡故障程度进行识别. 首先,用子结构传递矩阵法建立双转子试验台的数学模型,采用广义逆的方法解决传递矩阵容易出现数值失稳问题,利用线性叠加原理,计算双转子系统中内外转子同时具有不平衡量时的振动响应,利用内外转子的微转速差的拍振原理,确定转子的不平衡量的测试方法,并得到相位信息. 其次,建立双转子不平衡量的优化识别模型,并对其求解. 分析不平衡响应对转子转速与不平衡量之间的灵敏度关系,讨论双转子不平衡故障的可诊断问题,最后,利用数值仿真和试验讨论对其进行验证.

1 双转子数学模型

1.1 不平衡响应计算

假设支承刚度为各向同性,转子为轴对称,且不考虑阻尼的影响. 取任一截面的状态向量有如下形式:

[V]_i = [X θ M Q]⁽¹⁾

其中 X 为位移, θ 为弯曲角度, M 为弯矩, Q 为剪切力.

对于每一个分割开的简单链式转子-支承系统结构,可划分轴段与质量站,相应地建立各综合轴段的传递矩阵^[7]. 于是任意一站(第 i 站)截面上的状态参数与该子结构中的起始截面(第 k 站)的状态参数之间的关系可表示为

[X θ M Q]_i = T_{i-1} · T_{i-2} · ... · T_{k+1} · T_k [X θ M Q]_k = ∏_{j=k}ⁱ⁻¹ T_j [X θ M Q]_k⁽²⁾

令起始截面 k 上的状态参数依次使其中一个参数为 1, 其余为 0, 称为 k 截面上状态参数为 1 的该单位状态参数列阵. 在该单位参数列阵作用下引起的 i 截面的状态参数列阵表示为

q^{rk}_i = ∏_{j=k}ⁱ⁻¹ T_j q^{rk}_k⁽³⁾

式中上角标 rk 代表第 k 站截面上的任一状态参数 r (即等于 1 的 X_k, θ_k, M_k 或 Q_k); q^{rk}_k 为第 k 截面上的参数 rk = 1 而其余状态参数均为 0 时的状态参数列阵,称为单位状态参数列阵; q^{rk}_i 为在起始截面上单位状态列阵 q^{rk}_k 作用下引起的第 i 站截面上的诸状态参数列阵.

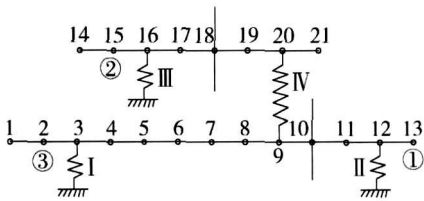


图 1 双转子系统的结构模型

Fig. 1 Model of dual spool system

图 1 为一个双转子系统的模型,分为内转子(低压转子)和外转子(高压转子),内、外转子分别分为 13 和 8 个站点,内、外转子的支承点 I, II 和 III 分别与地面相连接,外转子的另外一个支承点通过中介轴承 IV 与内转子联接. 设在内转子第 10 站和外转子第 17 盘上分别有不平衡量为 q₁₀ 和

q_{17} , 设内、外转子的自转转速分别为 ω_1 和 ω_2 , 则由不平衡量 q_{10} 和 q_{17} 引起的不平衡力分别为 $p_{u10} = \omega_1^2 q_{10}$, $p_{u17} = \omega_2^2 q_{17}$. 利用转子-支承系统的自由边界条件和各个分割面上的连接条件, 由式 (3) 可以写出相应的稳态不平衡响应方程式为

$$\begin{aligned} X_9^X X_1 + X_9^0 \theta_1 - X_{19}^{X14} X_{14} - X_{19}^{014} \theta_{14} + \\ R_9/k_{919} - X_{19}^{p17} u_{17} = 0 \\ M_{13}^X X_1 + M_{13}^0 \theta_1 + M_{13}^R R_9 + M_{13}^{p10} p_{u10} = 0 \\ Q_{13}^X X_1 + Q_{13}^0 \theta_1 + Q_{13}^R R_9 + Q_{13}^{p10} p_{u10} = 0 \\ M_{21}^X X_{14} + M_{21}^0 \theta_{14} - M_{21}^R R_9 + M_{21}^{p17} p_{u17} = 0 \\ Q_{21}^X X_{14} + Q_{21}^0 \theta_{14} - Q_{21}^R R_9 + Q_{21}^{p17} p_{u17} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中 X_1 , θ_1 , X_{14} , θ_{14} 和 R_9 为未知变量.

式 (4) 写成矩阵的形式为

$$A\mathbf{x} = \mathbf{U} \quad (5)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} X_9^X & X_9^0 & -X_{19}^{X14} & -X_{19}^{014} & 1/k_{919} \\ M_{13}^X & M_{13}^0 & 0 & 0 & M_{13}^R \\ Q_{13}^X & Q_{13}^0 & 0 & 0 & Q_{13}^R \\ 0 & 0 & M_{21}^X & M_{21}^{014} & -M_{21}^R \\ 0 & 0 & Q_{21}^X & Q_{21}^{014} & -Q_{21}^R \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = [X_1, \theta_1, X_{14}, \theta_{14}, R_9]^T$$

$$\mathbf{U} = [X_{19}^{p17} u_{17}, -M_{13}^{p10} p_{u10}, -Q_{13}^{p10} p_{u10}, -M_{21}^{p17} p_{u17}, -Q_{21}^{p17} p_{u17}]^T$$

在求解式 (5) 时, 对于实际的转子-支承系统, 一般是较复杂的系统, 要划分成为几十个段站, 甚至更多, 若段站过多, 在应用子结构传递矩阵法的过程中, 各段传递数值运算误差的积累, 可能导致相当大的最后误差, 甚至导致矩阵病态与奇异, 使数值失稳^[8], 为此, 采用广义逆方法求解不平衡响应, 即

$$\mathbf{x} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{U} \quad (6)$$

1.2 双转子不平衡振动响应分析

内、外转子的不平衡响应分别是内、外转子不平衡量同相位激起的最大振幅, 转子中某个站点的响应是内、外转子振动响应在平面内的量和, 其大小与各转子的转速、不平衡量的初始相位有关.

本文采用的方法是^[17,9]: 先设高压转子具有不平衡量, 计算系统在高压转子不平衡力激励下的响应, 此时高压转子作正协调进动, 而低压转子作非正协调进动; 然后, 再设低压转子具有不平衡量, 则高压转子作非正协调进动, 而低压转子作正协调进动, 计算这种情况下的不平衡响应. 最后将

这两种情况下计算的响应进行线性相加, 可得到内、外转子同时具有不平衡量时的不平衡响应.

2 双转子不平衡量的测试

设内外转子的振动响应分量分别为

$$X_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \quad (7)$$

$$X_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \quad (8)$$

式中 A_1 和 A_2 分别为内外转子的振幅, ω_1 和 ω_2 为角速度, ϕ_1 和 ϕ_2 为相位.

根据 1.2 分析可知, 物理模型的稳态不平衡响应是只包含了内外转子的振幅 A_1 和 A_2 的信息, 并不包含相位信息, 而物理模型与试验数据对应起来的唯一结合点是: 在某一时刻使双转子的振动响应数据

$$X = X_1 + X_2 = A_1 + A_2$$

$$\text{或} \quad X = X_1 - X_2 = A_1 - A_2 \quad (9)$$

为此, 在某一时刻 t , 令 $\cos(\omega_1 t + \phi_1) = 1$ 与 $\cos(\omega_2 t + \phi_2) = 1$ 同时成立, 有

$$\omega_1 t + \phi_1 = 2n_1\pi$$

$$(n_1 \text{ 为正整数, } \phi_1 \in [0, 2\pi]) \quad (10)$$

$$\omega_2 t + \phi_2 = 2n_2\pi$$

$$(n_2 \text{ 为正整数, } \phi_2 \in [0, 2\pi]) \quad (11)$$

用式 (10) 减去 (11), 得到

$$(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2) = 2k\pi$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, n)$$

同理, 可得到合成矢量的最小幅值时的相位关系为

$$(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2) = (2k - 1)\pi$$

$$(k = 0, 1, 2, \dots, n)$$

利用内外转子微差速的拍振原理^[10]: 在一个拍振周期中, 当拍振中的两个振动分量相位相同时, 拍振的振幅达到最大值, 当拍振中的两个拍振分量相位相反时, 拍振的振幅达到最小值, 据此可简单分离出内、外转子各自的不平衡振动幅值和相位, 即

$$A_1 + A_2 \cong |X|_{\max} \quad (12)$$

$$A_1 - A_2 \cong |X|_{\min} \quad (13)$$

相位测试原理为^[2,10]: 通过在内、外转子上贴上基准, 测试并计算基准与拍振最大值之间的角度得到组成拍振两个分量的相位.

3 优化识别模型与灵敏度分析

3.1 优化模型

设双转子系统都存在 m 个不平衡量故障, 即

$u=[u_1,u_2,\cdots,u_m]$, 对实际的试验对象, 若有 n 个测点, 不平衡响应数据为 $y=[y_1,y_2,\cdots,y_n]$, 由理论模型计算得到的响应数据为 $p=[p_1,p_2,\cdots,p_n]$, 可建立优化识别模型为

$$\min \sum_{i=1}^n (y_i - p_i)^2 \tag{14}$$

s. t. $Ax = U, \quad p = f(x),$

$U = g(u), \quad 0 \leq u_i \leq c_i \quad (i = 1, \cdots, m)$

式中 f 表示响应 p 与 x 之间的传递关系, 函数 g 为 U 与 u 之间的关系, c_i 为不平衡量的上限值.

采用序列二次规划法对优化模型 (14) 求解^[11].

3.2 不平衡响应灵敏度分析

在航空发动中, 内、外转子的转速由燃气涡轮的动力学特性所决定, 没有严格的定量关系, 且内外转子之间存在明显的动力学耦合特性. 在内外转子的支承处附近, 测量的振动响应数据中是否包含所有转子的不平衡故障信息? 为此, 分析转子不平衡响应分别对双转子转速、不平衡量的灵敏度关系, 由此讨论双转子不平衡故障的可诊断性问题, 并为确定试验方案提供理论依据.

由式 (6) 和式 (14) 中的约束条件, 并已知系数矩阵 A 是双转子转速 $\omega_i (i = 1, 2)$ 的函数, 令 $A^T (A)^{-1} A^T = h(\omega_1, \omega_2)$, 设双转子系统有不平衡变量为 $[u_1, u_2]$, 有

$$x = h(\omega_1, \omega_2) \cdot g(u_1, u_2, \omega_1, \omega_2) \tag{15}$$

由式 (14) 可得

$$p = f(x) = f[h(\omega_1, \omega_2) \cdot g(u_1, u_2, \omega_1, \omega_2)] \tag{16}$$

可得不平衡响应 p 对转子转速 $\omega_i (i = 1, 2)$ 的灵敏度关系为

$$\frac{\partial p}{\partial \omega_1} = \frac{\partial p}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial \omega_1} \cdot g(u_1, u_2, \omega_1, \omega_2) + \frac{\partial p}{\partial g} \cdot \frac{\partial g}{\partial \omega_1} \cdot h(\omega_1, \omega_2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \omega_2} = \frac{\partial p}{\partial h} \cdot \frac{\partial h}{\partial \omega_2} \cdot g(u_1, u_2, \omega_1, \omega_2) + \frac{\partial p}{\partial g} \cdot \frac{\partial g}{\partial \omega_2} \cdot h(\omega_1, \omega_2) \tag{17}$$

根据式 (16), 又可以得到, 不平衡响应对不平衡量的灵敏度为

$$\frac{\partial p}{\partial u_1} = h(\omega_1, \omega_2) \cdot \frac{\partial p}{\partial g} \cdot \frac{\partial g}{\partial u_1}$$
$$\frac{\partial p}{\partial u_2} = h(\omega_1, \omega_2) \cdot \frac{\partial p}{\partial g} \cdot \frac{\partial g}{\partial u_2} \tag{18}$$

利用差分法对式 (17) 和式 (18) 求解.

4 数值仿真分析与验证

4.1 数值仿真分析

为了便于比较, 本文仿真所用模型与试验模型相同, 模型如图 1 所示, 该系统为对转双转子系统. 已知: 节点 1~ 21 上的质量分别为 0. 106 5, 0. 213 0, 0. 515 3, 0. 262 6, 0. 262 6, 0. 262 6, 0. 262 6, 0. 262 56, 1. 041 1, 5. 718 6, 0. 221 6, 0. 432 1, 0. 043 8, 0. 153 4, 0. 306 8, 1. 01 12, 0. 406 6, 6. 934 5, 0. 626 6, 1. 555 6, 0. 166 3 kg; 单元的划分采用节点 1 与节点 2 为 1 单元, 依次类推, 单元 1~ 19 的长度分别为: 0. 087 5, 0. 087 5, 0. 107 83, 0. 107 83, 0. 107 83, 0. 107 83, 0. 107 83, 0. 164, 0. 091, 0. 091, 0. 036, 0. 063, 0. 063, 0. 083 5, 0. 083 5, 0. 039 5, 0. 076 5, 0. 019 m; 内、外转子的截面惯性矩分别为 $0. 785\ 398\ 2 \times 10^{-8}$, $12\ 762\ 7 \times 10^{-8}\ m^4$; 弹性模量 $E = 2. 06 \times 10^{11}\ MPa$; 内、外转子的极转动惯量分别为 $0. 024\ 255$, $0. 032\ 951\ kg \cdot m^2$; 内、外转子与中介支承的刚度分别为 $k_1 = 6. 622\ 9 \times 10^5$, $k_2 = 3. 39 \times 10^6$, $k_3 = k_2$ 和 $k_4 = 4. 883 \times 10^6\ N/m$.

在图 1 中, 分别在 13, 15 和 2 站点上布置测点①, ②和③. 首先, 分析在不同测点得到的响应数据下的识别情况, 仅取两组试验数据, 取内转子转速为 500, 700 rad/s, 外转子为 1. 021 倍于内转子转速, 分别利用测点①, ②, ③点响应数据, 组合方式如表 1 所示. 从表 1 看, 第一组数据仅测内转子的上响应, 该方法对内转子上的 u_{10} 识别很准确, 而对外转子上的 u_{18} 识别精度低, 平均误差达 319. 47%, 同时利用内外转子上的响应识别的后三组数据, 均具有较高的识别精度, 平均误差不大于 0. 02%, 说明了仅利用一个转子上的响应数据对另一转子的不平衡量具有不可诊断性.

表 1 不同测点下的识别结果

Table 1 Identified results from different measured points					
不平 衡量	理论值/ 10 ⁻⁶	识别值/10 ⁻⁶			
		①, ③	①, ②	②, ③	①, ②, ③
u_{10}	83. 745	83. 740	83. 739	83. 739	83. 739
u_{18}	135. 323	100 000. 0	135. 28	135. 31	135. 30
平均误差/%		319. 47	0. 019 6	0. 009	0. 014

其次, 以测试①和②点为例讨论测试数据中含有一定的测量噪声下的识别结果. 内、外转子的

转速同上,识别结果如表 2 所示.从表 2 中看,当含有一定噪声时,该识别方法仍具有较高的识别精度,如当试验数据含有 10% 的随机测量噪声时,其识别的平均误差为 4.81%.

表 2 含不同测量噪声下的识别结果
Table 2 Identified results from measured data with noise

不平衡量	理论值/ 10 ⁻⁶	识别值/10 ⁻⁶			
		0	5%	10%	15%
u_{10}	83.745	83.739	82.525	76.086	90.960
u_{18}	135.323	135.28	130.98	134.67	121.52
平均误差/%		0.019 6	2.33	4.81	9.41

再次,分析不同测点上的不平衡响应对双转子不同转速的灵敏度关系问题.由式(17)可以得到图 2 和图 3(纵坐标均为对数坐标).图 2 分别为测点①、②和③的响应对 ω_1 的灵敏度,此时 $\omega_2=200\text{ rad/s}$,从图中看,测点①和③对 ω_1 较为敏感,特别是在固有频率(112.0, 547.6, 709.5 rad/s)附近处,具有明显的峰值.测点②的灵敏度系数均远小于测点①和③,说明测点②对 ω_1 的变化不敏感.图 3 为测点①、②和③的响应对 ω_2 的灵敏度,此时 $\omega_1=200\text{ rad/s}$,同理,从图 3 看,测点①和③对 ω_2 不敏感,而测点②对 ω_2 的变化较敏感,并随外转子转速的增加而升高.

最后,分析不同测点上的不平衡响应对内、外转子盘上的不平衡量的灵敏度关系问题.根据式(22),可得到图 4 和图 5.从图 4 可以看出,测点①和③对内转子盘的不平衡量较敏感,灵敏度系数分别为 8.8552, 66.4715, 而②测点灵敏度系

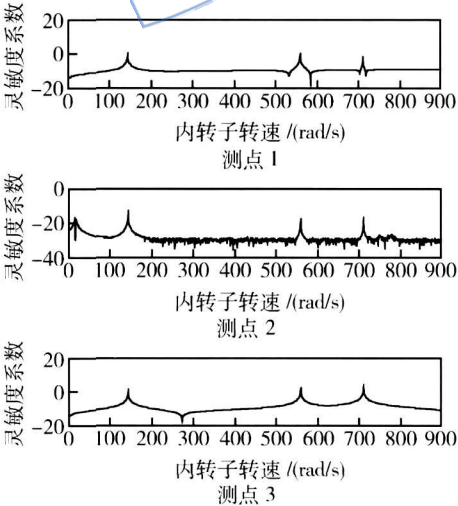


图 2 不同测点对内转子转速灵敏度
Fig. 2 Sensitivity of different measured points to inner rotor speed

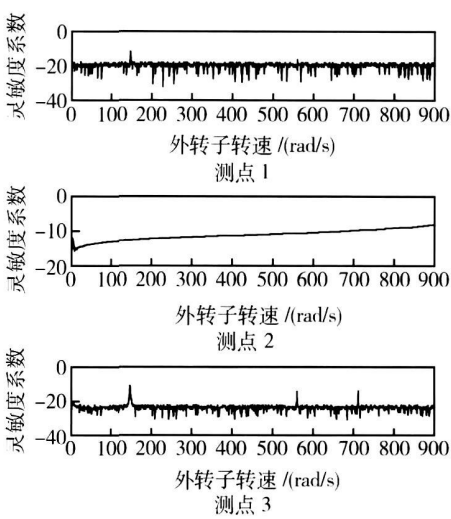


图 3 不同测点对外转子转速灵敏度
Fig. 3 Sensitivity of different measured points to

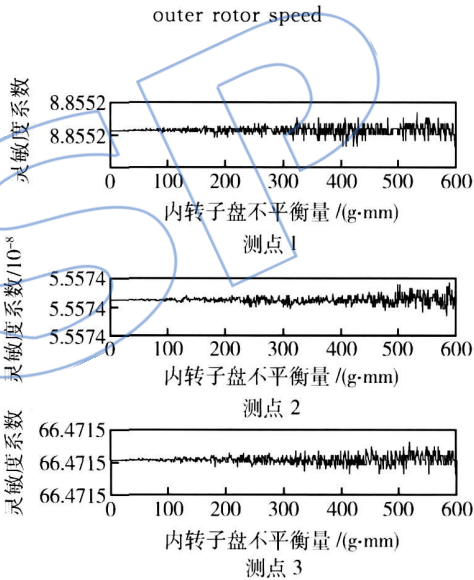


图 4 不同测点响应对内转子盘不平衡量的灵敏度
Fig. 4 Sensitivity of inner rotor unbalance to different measured points

数均小于 5.5574×10^{-4} .图 5 为不同测点对外转子盘不平衡量的灵敏度关系,从图中可以看出,测点②对外转子盘的不平衡量较敏感,其灵敏度系数的最大值达 37.739 3,而其它两个测点的灵敏度系数均较小.可见,同一轴上测到的响应对该轴上盘的不平衡量较为敏感.

从以上分析可知,对于双转子系统,同时利用内外转子上的振动响应数据,可以对其不平衡量进行识别,而仅利用单个转子上的响应数据,对另外一个转子的不平衡量进行识别,具有不可诊断性.因此,在试验中,需要同时测试内外转子上的振动响应数据.

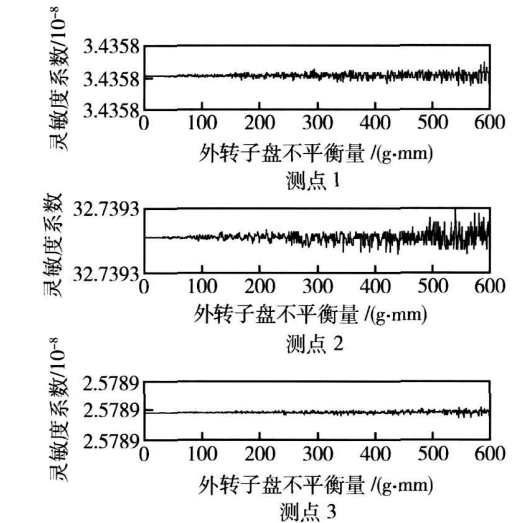


图 5 不同测点响应对外转子盘不平衡量的灵敏度
Fig.5 Sensitivity of outer rotor unbalance to different measured points

4.2 试验验证

图 6 为试验模型的测点布置图, 测点①、②和③同图 1, 采用电涡流位移传感器; 测点④和⑤为测量内外转子的脉冲, 采用光电传感器; 测点⑥和⑦分别测量外、内转子的转速, 采用转速传感器。各传感器的信号均经信号预处理设备后, 进入数据采集与分析系统。

测试程采用微差速测试原理, 首先, 对双转子系统的盘不施加不平衡量, 只识别其剩余不平衡

量, 将内外转子的转速控制在微小差速的范围内, 利用内转子的脉冲信号, 触发数据采集系统, 进行数据采集, 从采集信号中, 找出拍振信号的最大幅值, 该值即为计算模型得到的内外转子的响应值, 利用该值对内外转子的不平衡量进行识别, 此时, 根据测试信号中最大幅值出现的时刻、触发信号以及外转子的脉冲信号的位置, 确定内、外转子得不平衡量的相位信息。其次, 对内、外转子依次施加不平衡量, 利用不平衡响应和理论模型, 对不平衡量故障进行识别。

只测试①和②点的响应数据, 分别测试转子系统的剩余不平衡和施加二组不平衡量, 施加不平衡数据如表 3 所示, 其中不平衡质量的相位以转子的旋转方向为准。不平衡量的理论值和识别值如表 4 所示, 其中理论值是根据剩余不平衡量的大小、相位, 二次施加的不平衡量的大小和方向, 再用优化的方法得到的不平衡量。识别值是根据内外转子的转速、响应和本文提出的优化模型

表 3 施加不平衡量数据
Table 3 Unbalance data applied to rotor

	内转子			外转子		
	m_1/g	半径/mm	相位/ $^{\circ}$	m_2/g	半径/mm	相位/ $^{\circ}$
第 1 组	9.2	60	0	9.4	60	180
第 2 组	8.7	80	60	9.4	80	240

表 4 施加 2 组不平衡识别值结果
Table 4 Identified results of unbalance rotor

不平衡量		剩余不平衡量		第 1 组		第 2 组	
		理论值	识别值	理论值	识别值	理论值	识别值
内转子	大小/ $(g \cdot mm)$	210.5	222.9	417.4	347.9	881.8	662.5
	相位/ $^{\circ}$	221.2	221.2	340.6	341.8	317.9	318.1
外转子	大小/ $(g \cdot mm)$	1 861.8	2 243.4	1 454.7	1 929.8	2 014.4	2 213.4
	相位/ $^{\circ}$	313.7	313.7	291.0	297.1	274.2	280.7
误差/ $(\%)$	大小		13.20		24.66		17.37
	相位		0		1.23		1.22

注: 以剩余不平衡量的相位为基准, 因此, 其相位误差为零。

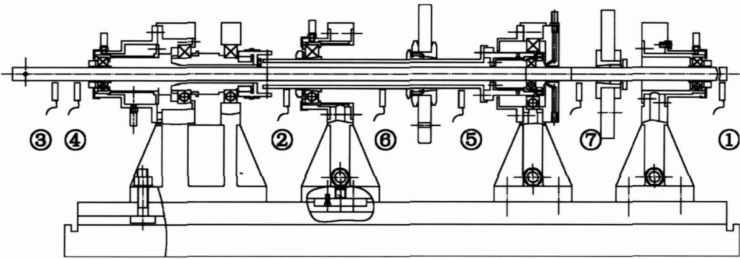


图 6 双转子系统试验模型
Fig. 6 Experimental model of dual spool system

识别得到的值.从表4可以看出,相位的识别精度识别很高,最大误差为1.23%,第1组不平衡量的识别误差为24.66%,第2组为17.37%.产生误差的主要原因有理论模型与实际物理模型的差异、测量噪声的影响以及在拍振原理的最大幅值为近似值等.

5 结 论

提出了一种基于模型的双转子不平衡故障的识别方法,讨论了双转子系统不平衡故障的可诊断性问题.数值仿真和试验研究表明,利于少量的测试数据,在测试数据含有一定噪声情况下,该方法可以同时识别内外转子不平衡故障的大小和相位,具有较高的识别精度.诊断双转子系统的不平衡故障,需要测试两个转子上的振动响应数据,若仅测试一个转子上的振动响应,对另外一个转子的不平衡量的诊断,具有不可诊断性.

参考文献:

- [1] Zeng S, Wang X X. Unbalance identification and field balancing of dual rotors system with slightly different rotating speeds[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 220(2): 343-351.
- [2] 贺世正,周保堂,严利华.微速差双转子整机动平衡仪的开发与研究[J].仪器仪表学报,1999,20(6):633-636.
HE Shizhen, ZHOU Baotang, YAN Lihua. Development and study for whole machine balancing of double shaft rotating with small speed difference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(6): 633-636.
- [3] 欧阳丹彤,欧阳继红,刘大有.基于模型诊断的研究与新进展[J].吉林大学自然科学学报,2001(2):38-45.
- OUYANG Dantong, OU YANG Jihong, LIU Dayou. The research and new development on model-based diagnosis [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2001(2): 38-45.
- [4] Jain J R, Kundra T K. Model based online diagnosis of unbalance and transverse fatigue crack in rotor systems [J]. Mechanics Research Communications, 2004, 31: 557-568.
- [5] Loparo K A, Adams M L, Lin Wei, et al. Fault detection and diagnosis of rotating machinery [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000: 1005-1014.
- [6] Isermann. Model-based fault detection and diagnosis: status and applications [C]//In Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, St. Petersburg, Russia: [s. n.]: 2004.
- [7] 晏励堂.航空燃气轮机振动和减振[M].北京:国防工业出版社,1991.
- [8] 《航空发动机设计手册》总编委会编.转子动力学及整机振动[M]//航空发动机设计手册:第19册.北京:航空工业出版社,2000.
- [9] 魏海涛,范晓明.机动飞行中双转子系统的振动响应分析[C]//中国航空学会第十届航空发动机结构强度与振动会议论文集.安徽,歙县:中国航空学会,2000:315-320.
- [10] 杨健,周保堂.微速差双转子系统振动信号分离法研究[J].中国机械工程,2002(8):710-713.
- YANG Jian, ZHOU Baotang. Research on the separating method of vibration signals for the dual rotor system with little speed difference in the rotating machinery [J]. China Mechanical Engineering, 2002(8): 710-713.
- [11] 袁亚湘,孙文瑜.最优化理论与方法[M].北京:科学出版社,2001.