

文章编号:1000-8055(2013)12-2797-06

# 基于模型的双转子-支撑系统快速故障识别方法

陈景明, 蒋东翔, 徐洪志

(清华大学 热能工程系 电力系统和发电设备控制及仿真国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 建立了双转子-支撑系统的有限元模型,模拟了质量不平衡故障和局部轴弯曲故障下的振动信号.根据有限元模型,提出了基于模型的双转子-支撑系统故障识别方法,依次通过单一故障遍历、双故障遍历和三故障遍历方法,实现了故障快速准确识别.仿真结果表明:该方法能够准确识别单一故障和多故障,同时确定故障发生的位置、严重程度和相位情况,优化了故障识别过程,理想情况下减少了 98.9% 的计算量,加快了故障识别的速度.此外,比较了添加了不同信噪比噪音信号的诊断结果,诊断结果相对误差控制在 1% 左右,表明该方法具有良好的抗噪声干扰的能力.

**关键词:** 双转子-支撑系统; 故障识别; 基于模型; 质量不平衡; 转轴弯曲  
**中图分类号:** V231.96      **文献标志码:** A

## Efficient fault identification method for dual rotor-supporting system using model-based method

CHEN Jing-ming, JIANG Dong-xiang, XU Hong-zhi

(State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The finite element model of dual rotor-supporting system was constructed. Based on the finite element model, vibration signal under the faults of mass unbalance and local shaft bow was simulated. A model-based method was developed to identify the fault in the dual rotor-supporting system. 1-fault search method, 2-fault search method and 3-fault search method were utilized to identify the fault efficiently and accurately. The validation results show that the method could identify single fault and multi-concurrent faults accurately and confirm the fault location, severity and phase simultaneously. This method optimizes fault search process, which is used to decrease 98.9% calculation amount in the ideal situation, and accelerates fault identification. Besides, if comparing with the identification results by adding different adding noises, the relative error is around 1% which validates good robustness to noise.

**Key words:** dual rotor-supporting system; fault identification; model-based; mass unbalance; shaft bow

航空发动机的维修是影响飞机可靠性的首要因素.美国国防部每年用于维护航空发动机的费

用约为采购发动机的费用的 3 倍<sup>[1]</sup>.快速准确地判别故障类型及故障发生位置,是保证飞行安全

收稿日期:2012-11-07

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20131111.1602.022.html>

基金项目:国家自然科学基金(60979014)

作者简介:陈景明(1987-),男,福建惠安人,博士生,主要从事转子动力学及动力机械故障诊断方法研究.

的关键. 航空发动机故障总体上分为性能故障、结构强度故障以及附件系统故障. 结构强度故障的类型多, 范围广, 占发动机总故障的 60%~70%, 对发动机安全构成主要威胁<sup>[2]</sup>. 结构强度故障的监测与诊断是基于发动机的振动信号, 通过分析振动参数的变化情况, 识别发动机工作转速下的危险振动状态, 判别潜在故障类型.

基于模型的方法是故障诊断的主要方法之一, 它是基于深知识的诊断方法, 可以实现故障的精确定位<sup>[3]</sup>. Isermann 等<sup>[4]</sup>回顾了基于模型的故障诊断技术的发展. Bach 等<sup>[5]</sup>采用基于模型的方法, 通过计算一组等效载荷, 实现某单轴系统上轴裂纹故障的准确定位. Markert 等<sup>[6]</sup>对故障单转子系统的振动信号, 在时间域上采用最小二乘法拟合得到了全自由度的等效载荷, 有效识别了不平衡故障和动静碰磨. Jain 等<sup>[7]</sup>基于等效载荷方法, 在时间域上进行诊断和识别单转子的不平衡故障和横向裂纹故障. Bachschmid 等<sup>[8-10]</sup>基于汽轮发电机组轴系模型, 针对多种振动故障, 采用最优化残差的方法, 实现在频域上对多种故障的识别. Yang 等<sup>[11-13]</sup>采用穷举法, 遍历了所有故障的类型及发生位置, 实现了快速有效的在线故障诊断.

双转子-支撑系统是航空发动机常用的轴系结构, 发生在发动机轴系结构的常见故障有质量不平衡、转轴弯曲、局部动静碰磨等. 针对航空发动机双转子-支撑系统的故障, 目前基于模型诊断方法的研究仍然较少. 单颖春等人<sup>[14]</sup>研究了动静碰磨的故障模型, 利用时域、频域和小波变换, 研究了双转子-支撑系统动静碰磨的故障特征. 韩军等人<sup>[15]</sup>构造了不平衡故障的非线性优化识别模型, 研究了一种基于模型的双转子不平衡故障诊断方法.

本文通过模拟双转子-支撑系统的质量不平衡和转轴弯曲故障, 获取了双转子-支撑系统故障发生前后的振动信号, 采用基于模型的方法, 优化故障识别的过程, 实现快速诊断, 确定故障类型, 故障发生位置及故障严重程度. 此外考虑到噪声对振动信号的影响, 本文比较了不同程度的环境噪声对诊断结果的影响, 验证了诊断方法的抗噪声能力.

## 1 基于模型的故障识别方法

对于某一个相对正常的双转子-支撑系统, 振动位移向量满足如下运动方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{D}\dot{\mathbf{x}}_0 + \mathbf{K}\mathbf{x}_0 = \mathbf{F}_0 \quad (1)$$

其中  $\mathbf{x}_0$  为相对正常状态下的振动位移向量;  $\mathbf{F}_0$  为相对正常状态下的初始激振力;  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{K}$  分别

为双转子模型的质量矩阵、转动矩阵和刚度矩阵.

当未知故障发生后,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{K}$  以及激振力因故障发生了变化, 相应的运动方程也发生了变化

$$\begin{aligned} (\mathbf{M} + d\mathbf{M})\ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{D} + d\mathbf{D})\dot{\mathbf{x}} + \\ (\mathbf{K} + d\mathbf{K})\mathbf{x} = \mathbf{F}_0 + \mathbf{F}_{\text{ext}} \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)减去式(1)得到

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}_{\text{eqv}} \quad (3)$$

其中  $\mathbf{u} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$  是故障产生的振动位移差;  $\mathbf{F}_{\text{ext}}$  为故障发生后产生的外部激振力;  $\mathbf{F}_{\text{eqv}} = \mathbf{F}_{\text{ext}} - d\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} - d\mathbf{D}\dot{\mathbf{x}} - d\mathbf{K}\mathbf{x}$ , 称为等效载荷.

$\mathbf{F}_{\text{eqv}}$  包含了故障类型、故障位置以及故障严重程度等信息. 当双转子-支撑系统的模型一旦确定, 通过监测前后振动位移的变化, 即可求得振动位移差和等效载荷.

仅考虑质量不平衡故障和转轴局部弯曲故障. 由于质量不平衡故障和转轴局部弯曲故障的故障特征均表现为基频振动, 式(3)在基频频域下写作

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{U} = \mathbf{F}_1 \cdot \mathbf{A} \quad (4)$$

其中  $\mathbf{E} = -\Omega^2 \mathbf{M} + j\Omega \cdot \mathbf{D} + \mathbf{K}$ , 其中  $\Omega$  为故障轴转速;  $\mathbf{F}_1$  为方位复数矩阵, 包含故障类型和故障方位信息;  $\mathbf{A}$  为严重度复数矩阵, 包含故障严重程度及相位信息.  $\mathbf{F}_1$  和  $\mathbf{A}$  根据故障数目的不同, 矩阵的规模也发生变化.  $\mathbf{F}_1$  的列数、 $\mathbf{A}$  的行数等于故障的数目.

由于双转子-支撑系统的内外转子工作在不同的转速, 具有两个基频成分, 即

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}(\omega_1) \quad \mathbf{U}(\omega_2)] \quad (5)$$

内外转子的转频可测, 对振动位移差  $\mathbf{u}$  进行傅里叶变换, 对应  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的成分即为  $\mathbf{U}$ .

对于不同的故障, 式(4)右边有不同的表达式. 针对质量不平衡故障, 若不平衡发生在双转子-支撑系统模型的第  $i$  个节点, 该节点所在转子的转速为  $\Omega_i$ , 则

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1^i = [0 : \underbrace{1 \quad -j \quad 0 \quad 0}_{\text{第 } i \text{ 个节点}} : 0]^T \\ \mathbf{A}_i^i = (mr)_u \Omega_i^2 e^{j\varphi_u} \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $(mr)_u$  为不平衡量,  $\varphi_u$  为不平衡量相位.

针对转轴弯曲故障, 由此产生的弯矩与转速无关, 当转轴弯曲故障发生在双转子-支撑系统模型的第  $i$  个节点时

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_1^i = [0 : \underbrace{0 \quad 0 \quad 1 \quad -j}_{\text{第 } i \text{ 个节点}} : 0]^T \\ \mathbf{A}_i^i = M_b e^{j\varphi_b} \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $M_b$  为故障产生的弯矩,  $\varphi_b$  为弯曲相位.

根据式(4),采用如图 1 的故障识别过程,实现双转子-支撑系统的单一或多故障的快速诊断,具体步骤如下:

1) 根据双转子-支撑系统的实际结构和动力学特性建立双转子系统的梁单元有限元模型,得到  $M, D, K$ , 进而得到  $E$ .

2) 根据轴位移监测结果,得到故障前后的振动位移信号,对振动位移差  $u$  进行傅里叶变换得到基频振动分量  $U$ , 记  $U^* = U$ .

3) 为了减少计算量,假设故障相互独立,优先采取单一故障遍历方法,  $N_f = 1$ , 若某一节点发生,取相应的方位矩阵  $F_1$  的列数为 1, 则可求解以下最小二乘问题

$$E^{-1} F_1 \cdot A \cong U^* \tag{8}$$

得到故障严重度矩阵  $A$ , 进而得到残差

$$\|U^* - E^{-1} F_1 \cdot A\|_2 \tag{9}$$

4) 根据式(8)和式(9)遍历所有故障节点和故障类别的组合,即遍历  $F_1$  所有的可能形式,得到相应的残差,取残差最小的组合作为这一轮遍历故障识别结果,记

$$U_k = E^{-1} F_{1k} \cdot A_k \tag{10}$$

$$\delta = \frac{\|U^* - U_k\|_2}{\|U\|_2} \tag{11}$$

5) 当相对残差  $\delta$  小于残差容限  $\epsilon$  时,故障识别成功,诊断终止,反之进入下一轮故障遍历,赋

$$U^* = U^* - U_k \tag{12}$$

6) 相对于正常工作状态,同时发生的故障数目认为不会超过 3 个,  $k_0 = 3$ , 因此步骤 4)~步骤 5)进行三轮过后,若相对残差依旧大于残差容限,认为系统所发生的故障相互耦合,单一故障遍历方法不适用,因此进入双故障遍历方法,  $N_f = 2$ , 即假设同时有 2 个节点发生了耦合故障,方位矩阵  $F_1$  的列数为 2.

7) 采用双故障遍历方法,根据式(8)和式(9),重复步骤 4)~步骤 5)的过程两轮,至相对残差小于残差容限  $\epsilon$ , 若相对残差仍无法满足要求,进入三故障遍历方法,  $N_f = 3$ .

8) 采用三故障遍历方法,假设同时有 3 个节点发生了耦合故障,利用式(8)和式(9)进行一轮故障遍历,若相对残差满足要求,认为故障识别成功,反之,认为识别失败.

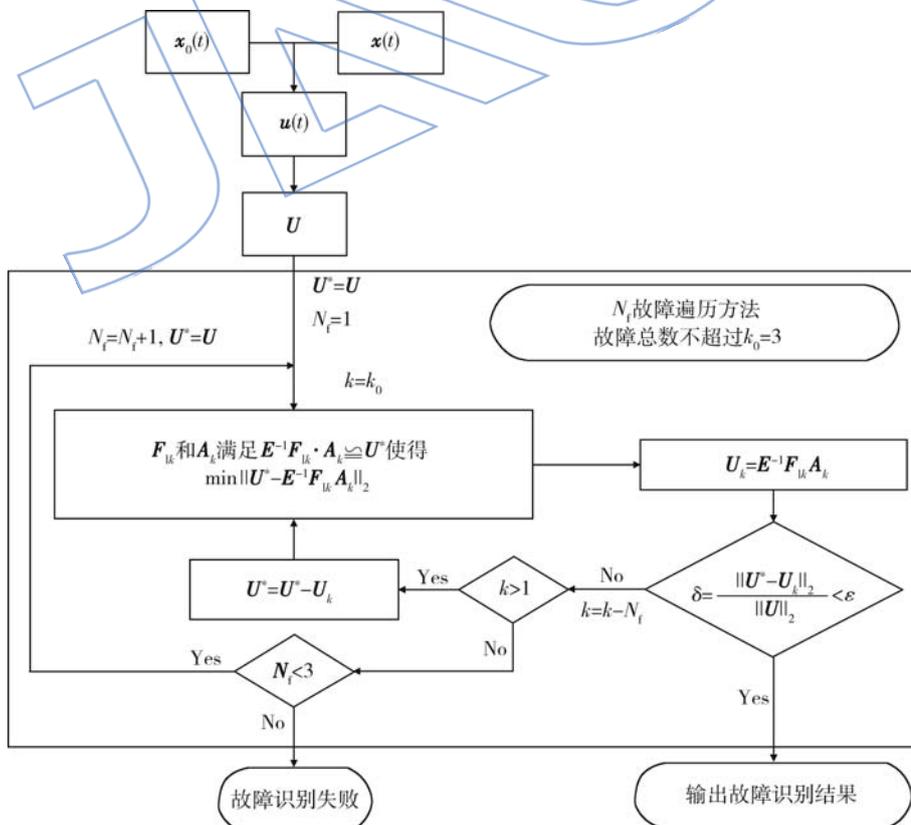


图 1 故障识别过程

Fig. 1 Process of fault identification

## 2 振动信号数值仿真

本文振动信号仿真所用的双转子-支撑结构同文献[15]. 根据该结构的尺寸, 建立双转子-支撑系统有限元模型, 如图 2 所示. 该模型共有 19 个梁单元, 21 个节点. 其中内转子为 1~13 节点, 外转子为 14~21 节点. 共有 4 个支撑结构, 未考虑模型的阻尼.

由于位移传感器的数目有限, 认为能够监测的振动位移信号数目是有限的. 假设仅能监测到图 2 中节点 2, 节点 13, 和节点 15 的振动位移信号, 编号分别为①, ②, ③.

根据式(6)、式(7), 本文仿真了不同的故障案例, 得到单一故障和多故障下的测点振动位移信号. 故障案例如表 1 所示.

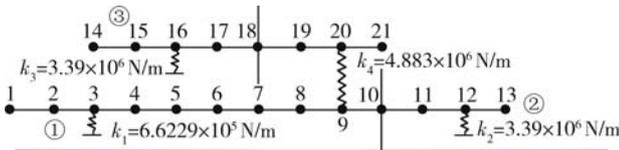


图 2 双转子-支撑系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual rotor-supporting system

表 1 故障信息列表

Table 1 List of fault information

案例	信噪比	故障信息			
		不平衡量/ $10^{-4}$ (kg·m)	轴弯曲等效弯矩/(N·m)	节点号	相位角/(°)
1	10	5		10	30
2	10		1.2	3	60
3	100	5		10	30
4	20	5		10	30
5	5	5		10	30
6	2	5		10	30
7	10	5		10	30
			1.2	3	60
8	10	5		10	30
		10		18	120
9	10		1.2	3	60
			2.2	12	180
10	10	5		10	30
		10		18	120
			2.2	12	180

由于被测的位移信号在实际测试中不可避免的会受到噪声的干扰. 为了验证本文的故障识别方法对测量噪声的抗干扰能力, 不同信噪比(signal to noise ratio, SNR)的高斯白噪声添加入了仿真得到的振动位移信号. 图 3 所示为故障案例 10 故障发生前后监测点的振动位移信号.

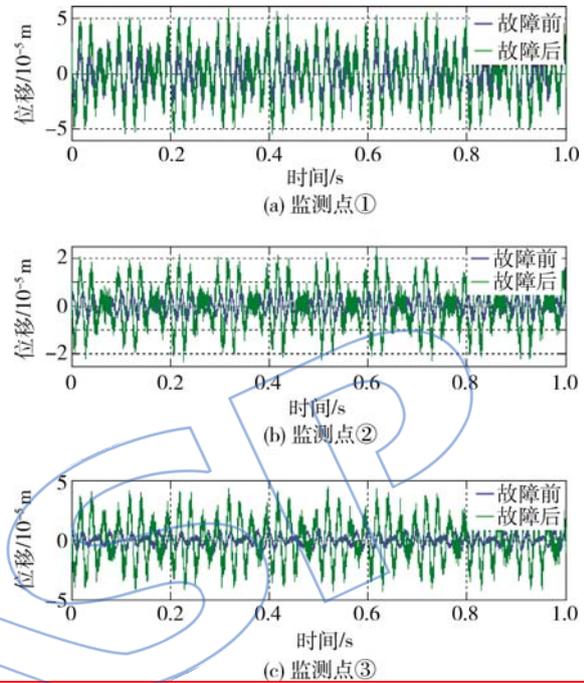


图 3 案例 10 的故障发生前后监测点的振动位移信号

Fig. 3 Vibration signals before and after faults happen in case 10 at monitoring point

## 3 故障识别结果及分析

根据本文的快速故障识别方法, 采用如图 1 所示的故障识别过程, 针对表 1 所示的故障案例仿真得到的振动位移信号, 进行故障的识别, 识别结果如表 2 所示.

案例 1 和案例 2 为单一故障的识别. 识别结果误差很小, 证明本文基于模型的双转子-支撑系统快速故障识别方法对于单一质量不平衡故障和单一轴弯曲故障能够有效识别. 此外, 仅使用了单一故障遍历方法 ( $N_f = 1$ ) 就识别出了故障, 实现快速诊断.

案例 1 和案例 3~案例 6 对比了不同程度 SNR 对故障识别的结果. 结果显示, 尽管随着噪声的强度不断增大, 识别结果的相对误差不断增大, 但仍能保证正确的故障类别, 正确的故障定位, 相对误差也较小. 验证了本文基于模型的双转

表 2 故障识别结果列表

Table 2 List of fault identification results

案例	故障识别结果					
	$N_f$	不平衡量/ $10^{-4}$ (kg·m)	轴弯曲等效弯矩/(N·m)	节点号	相位角/(°)	相对误差/%
1	1	4.99		10	30.05	0.26
2	1		1.2006	3	60.25	0.05
3	1	5.00		10	30.015	0.07
4	1	4.99		10	29.99	0.22
5	1	5.00		10	29.71	0.81
6	1	5.00		10	30.09	1.02
7	2	4.98		10	29.88	0.38
			1.202	3	59.91	0.17
8	1	5.02		10	30.38	0.34
		9.97		18	119.98	0.60
9	2		1.207	3	60.01	0.60
			2.195	12	180.03	0.22
10	1	6.12		11	29.95	22.33
		10.0		18	120.06	0.10
			1.977	12	227.36	10.14

子-支撑系统快速故障识别方法具有良好的抗噪声干扰能力。

案例 7~案例 9 为双故障的识别。其中案例 8 仅采用单一故障遍历方法 ( $N_f=1$ ) 就识别出了故障,原因是节点 10 和节点 18 的质量不平衡故障分别发生在内转子和外转子,受到支撑结构的隔离,故障相对独立。案例 7 和案例 9 受故障耦合的原因,单一故障遍历方法未能使振动残差满足残差容限,因而启用了双故障遍历方法 ( $N_f=2$ ),实现故障的准确识别,但计算用时远大于案例 8 的故障识别用时。

案例 10 为三故障的识别。三故障的识别误差较单一故障和双故障的识别误差大大增加,而且节点 10 上的质量不平衡故障被识别发生在节点 11 上。尽管识别误差增大,但识别结果仍可接受,仍可作为参考依据用于航空发动机的维护。

针对多故障同时发生的情况,采用本文的故障识别过程,可以尽可能减少识别过程的计算量,加快了故障识别的速度。以表 1 中案例 10 为例,共有 42 组故障组合,若直接采用三故障遍历方法

( $N_f=3$ ),循环计算总次数为

$$C_{42}^3 = 11480 \text{ 次}$$

采用本文的故障识别过程,循环计算总次数为

$$42 + 41 + 40 = 123 \text{ 次}$$

由此可见,采用本文的故障识别方法,理想情况下减少了 98.9% 的计算量,能够实现对故障的快速识别。

## 4 结 论

本文提出了基于模型的双转子-支撑系统快速故障识别方法。该方法根据双转子-支撑系统的有限元模型,求解使位移残差最小的最优化问题,实现故障的快速准确识别。针对双转子-支撑系统发生的故障并非都是相互耦合的特点,本文的故障识别方法,以残差容限作为识别成功与否的标准,依次采用单一故障遍历方法,双故障遍历方法和三故障遍历方法直至故障识别成功,尽量用最少的时间实现对故障的识别。基于该方法,本文对仿真得到的故障振动信号进行故障识别,能够获得满意的识别结果,同时也验证了该方法良好的抗噪声干扰的能力。

## 参考文献:

[1] 王施,王荣桥,陈志英,等.航空发动机健康管理综述[J].燃气涡轮试验与研究,2009,22(1):51-58.  
WANG Shi, WANG Rongqiao, CHEN Zhiying, et al. Survey on aircraft engine health management[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(1): 51-58. (in Chinese)

[2] 宋兆泓,陈光,张景武,等.航空发动机典型故障分析[M].北京:北京航空航天大学出版社,1993.

[3] 王英,沙云东.航空发动机故障诊断技术综述[J].沈阳航空工业学院学报,2007,24(2):11-14.  
WANG Ying, SHA Yundong. Summarization of aero-engine fault diagnosis technique[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2007, 24(2): 11-14. (in Chinese)

[4] Isermann R, Balle P. Trends in the application of model-based fault detection and diagnosis of technical processes [J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(5): 709-719.

[5] Bach H, Markert R. Determination of the fault position in rotors for the example of a transverse crack, structural health monitoring [M]. Lancaster, USA: Technomic Publishing Incorporation Company, 1997.

[6] Markert R, Platz R, Seidler M. Model based fault identification in rotor systems by least squares fitting [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2001, 7(5): 311-321.

[7] Jain J R, Kundra T K. Model based online diagnosis of unbalance and transverse fatigue crack in rotor systems [J]. Mechan-

- ics Research Communications, 2004, 31(5): 557-568.
- [ 8 ] Bachschmid N, Pennacchi P, Vania A. Identification of multiple faults in rotor systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 254(2): 327-366.
- [ 9 ] Bachschmid N, Pennacchi P, Tanzi E, et al. Accuracy of modelling and identification of malfunctions in rotor systems; experimental results[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, 2000, 22(3): 423-442.
- [10] Bachschmid N, Pennacchi P, Vania A. Crack position and depth identification in rotating shafts; Part 1 theoretical model[C]//Proceedings of the ASME International Design Engineering Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Long Beach, CA, United States: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 1201-1209.
- [11] Yang T, Koai K, Lin C, et al. Model-based unbalance estimation for steam turbine-generators[C]//Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Seattle, WA, United States: American Society of Mechanical Engineers, 2008: 81-89.
- [12] Yang T, Hsu M. An efficient diagnosis technique for variations of shaft-bow and unbalance[C]//Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference. San Diego, CA, United States: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 57-66.
- [13] Yang T, Hsu M. A quick search strategy for multiple fault diagnosis of turbomachinery [C] // Proceedings of the ASME Turbo Expo. Orlando, FL, United States: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 523-529.
- [14] 单颖春, 刘献栋, 何田, 等. 双转子系统碰摩有限元接触分析模型及故障诊断[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 789-794.
- SHAN Yingchun, LIU Xiandong, HE Tian, et al. Research on the finite element impact-contact analytical model of dual-rotor system and its diagnosis method[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 789-794. (in Chinese)
- [15] 韩军, 高德平, 胡绚. 一种基于模型的双转子不平衡故障诊断方法[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 932-938.
- HAN Jun, GAO Deping, HU Xuan. A model-based diagnosis method of unbalance faults for dual-spool system[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 932-938. (in Chinese)