

文章编号: 1000-8055(2000) 02-0187-04

具有转静件碰摩故障双转子系统的动力学模型及其小波变换特征

刘献栋¹ 李其汉² 王德友³

¹(石家庄铁道学院 机械工程系, 河北 石家庄 050043)

²(北京航空航天大学 405 教研室, 北京 100083)

³(沈阳航空发动机研究所, 辽宁 沈阳 110015)

摘要: 本文利用拉格朗日方程建立了具有碰摩故障的某型双转子航空发动机转子系统的动力学方程, 通过数值计算对该故障进行了仿真, 并对仿真结果进行了频谱分析和小波变换, 得出本文建立的双转子系统的动力学模型是正确的、利用小波变换对转静件碰摩故障进行诊断是非常有效的。

关键词: 转子; 摩擦; 故障诊断

中图分类号: V 231.96

文献标识码: A

1 引言

目前, 人们对转静件之间碰摩问题的研究多局限于单转子系统, 对双转子系统碰摩问题研究很少, 人们对双转子系统碰摩问题的认识多是通过单转子系统碰摩问题的研究得到的。然而, 对于双转子航空发动机来说, 双转子系统碰摩的振动特性及故障诊断又十分重要, 所以本文进行了这方面的工作。文献[1]对双转子系统进行一系列简化, 最终用若干个质点组成的质点系的振动特性来描述双转子系统碰摩的振动特性。本文针对某航空发动机的双转子系统, 建立了简化的力学模型—刚体系统模型, 利用拉格朗日方程建立数学模型并进行了数值分析, 研究了机匣振动特性, 还进一步讨论了其频谱特征和小波变换的特征, 这些将为双转子航空发动机转子系统碰摩故障的认识和诊断打下基础。

2 双转子系统动力学方程的建立

在建立动力学方程之前, 作如下假设^[2]: (1) 假定在工作转速范围内机匣不出现任何振型(这在机匣的局部振动响应测试中已得到证明), 即可

认为机匣只具有作为整体进行水平、垂直两个方向平移的两个自由度。(2) 高、低压转子在工作转速范围内的弯曲、扭转振型很小。转子的弯曲振型在最高工作转速的 120% 以上才较明显, 出现扭转振型较明显的转速更高, 所以可认为转子是刚性的。(3) 高、低压转子分别以 ω 和 ω 的转速恒速转动, 且无轴向运动。另外, 在建立动力学方程的过程中还注意到: 转子系统刚度很大, 相对其重量较小, 故忽略重力的影响; 碰摩发生在高压涡轮与后机匣之间的情况较多, 仅考虑此处的碰摩。

在以上讨论的基础上, 可得到如图 1 所示的简化的航空发动机双转子系统力学模型。系统的固定坐标系为 oxy 。假定低压转子 B 和 E 截面的位移分别为 y^1, z^1, y^2 和 z^2 , 高压转子 I 和 J 截面的位移分别为 y^3, z^3, y^4 和 z^4 , 前后机匣的位移为 y^5, z^5, y^6 和 z^6 。低压转子的转速为 ω , 高压转子的转速为 ω 。将双转子系统划分为 4 个子结构—低压转子、高压转子及前、后机匣, 分别利用拉格朗日方程建立它们的动力学方程, 然后将它们组装起来即可得到如下整个系统的动力学方程:

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Gq + Kq = F \quad (1)$$

上式中矩阵 M, C, G, K, F, q 分别为广义质量矩

组合频率分量的大小有增加的趋势, 从图 3 与图 4 可以看出这种情况。

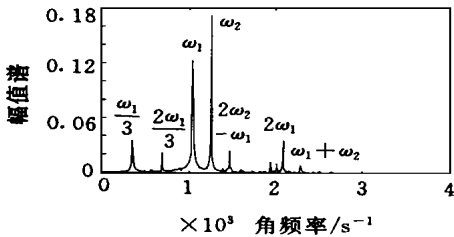


图 3 机匣铅垂方向振动幅值谱

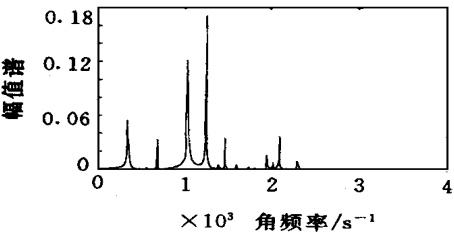


图 4 接触刚度增加后机匣振动幅值谱

文献 [1, 2] 给出了与本文同一型号双转子航空发动机两次测试结果的瀑布图, 可以看出本文的计算分析结果与它们是一致的。

3.2 小波变换特征

分别对高压涡轮与机匣不碰摩、较轻局部碰摩(碰摩面积很小)、较重局部碰摩(碰摩面积较大)、整圈碰摩 4 种情况机匣铅垂方向的振动信号利用 Gauss 小波进行小波变换, 变换过程见文献 [3, 4]。根据高压涡轮相对机匣的运动轨迹与间隙圆的相对位置可准确确定这 4 种碰摩情况。

图 5(a) 是高压涡轮与后机匣不碰摩时对机匣的振动信号利用 Gauss 小波进行小波变换得到的等高线图, 图 5(b) 是其幅值谱。图 6~8 分别与较轻碰摩、较重碰摩、整圈碰摩对应。图 3 是碰摩较重时的幅值谱图, 与图 7 对应。

分析以上各图, 可以得出:

(1) 系统发生局部碰摩时, 即使是很轻的碰摩, 小波变换等高线图上也能较明显地显示出来。不碰摩时, 等高线布满了整个时—频平面, 且无什么规律可言, 这是因为其小波变换值随尺度的增加或减小没有增加或减小的变化规律, 而是几乎都位于一个数量级上; 发生局部碰摩时, 等高线是以碰摩时刻为中心的曲线族, 这些点的远处无等高线分布, 显然, 增加等高线数量, 其分布范围增大。本文的等高线图均取 15 组等高线。

(2) 在诊断双转子系统转静件早期碰摩的问题中, 小波变换方法比频谱方法具有明显的优越性。只有当高压涡轮与机匣发生局部碰摩且碰摩

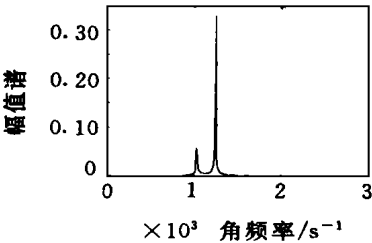
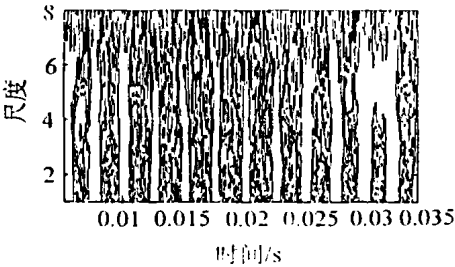


图 5 不碰摩时机匣振动小波变换等高线图 and 幅值谱

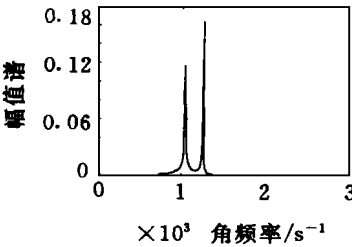
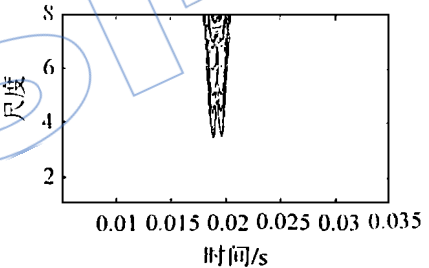


图 6 较轻碰摩时机匣振动的小波变换等高线图和幅值谱

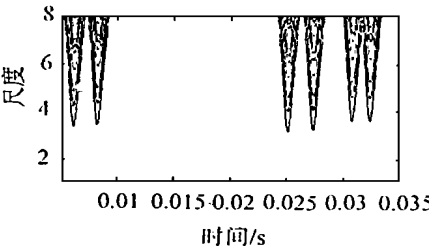


图 7 碰摩较重时机匣振动的小波变换等高线图

发展到一定程度时, 幅值谱图上才有低、高压转子

的转速频率的组合成分或它们的分频、倍频这些故障特征存在,并且利用幅值谱图无法诊断碰摩发生的时刻和位置。对于早期很轻的碰摩,幅值谱图上没有故障特征存在。而小波变换方法与轻、重局部碰摩均可进行有效的诊断。

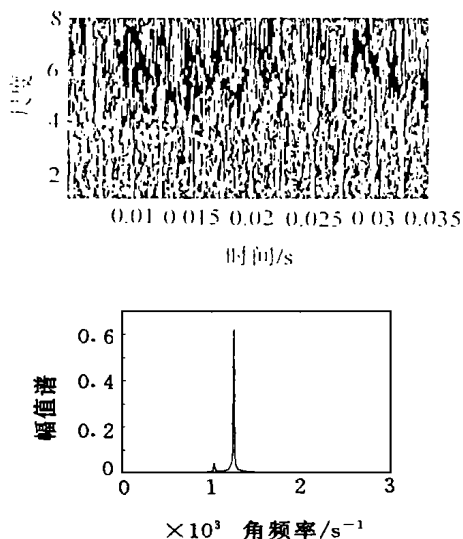


图 8 整圈碰摩时机匣振动的小波变换等高线图和幅值谱

(3) 系统不发生碰摩(图 5)与发生整圈碰摩(图 8)时的小波变换等高线图很相似,这是因为在这两种情况下机匣运动平稳,其运动中没有叠加突变的局部信号。因此,利用小波变换很难区分整圈碰摩与不碰摩。

4 结 论

本文利用拉格朗日方程建立了双转子系统碰

摩的动力学微分方程,对该微分方程进行了数值计算,并且对各种碰摩情况的数值结果进行了频谱分析、小波变换,得出:(1)传统使用的幅值谱图在一定程度上可以诊断碰摩是否发生,即碰摩发展到一定程度时幅值谱图中出现了组合频率、分频、倍频等,于是可断定发生了碰摩,但当碰摩很轻时,这些频率成分不存在,所以使用幅值谱图无法诊断接触面积很小的较轻碰摩。(2)使用小波变换可以诊断局部碰摩,不管是接触面积很小的较轻碰摩,还是接触面积较大的较重碰摩,只要还没有发展成整圈碰摩,使用小波变换都可以准确诊断,并且还可以准确诊断出碰摩时刻,这是由小波变换特有的可以准确判断平稳信号中叠加的突变信号位置这种特点决定的。(3)小波变换可以将局部碰摩与不碰摩、整圈碰摩准确区别开,但它无法区别不碰摩与整圈碰摩。由于故障的复杂性,往往使用一种诊断方法很难进行准确的诊断,所以根据这两种诊断方法的特点,将它们结合起来进行诊断,必将会增加诊断的可靠性。

参 考 文 献

- 1 晏砺堂,王德友. 航空双转子发动机动静件碰摩振动特征研究[J]. 航空动力学报, 1998, 13(2): 173-176
- 2 王德友. 发动机转静件碰摩振动特征的提取与理论研究: [博士论文][D]. 北京航空航天大学, 1995
- 3 梅宏斌著. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
- 4 Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans. on Information Theory. 1992, 38(2): 617-643

(责任编辑 王震华)

Dynamic Model of Dual-Rotor System with Rub-Impact Fault Between Rotor and Stator and its Feature of Wavelet Transform

Liu Xiandong¹, Li Qihan², Wang Deyou³

¹(Mech. Eng. Dept., Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

²(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

³(13th Division, Shenyang Aeroengine Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Using Lagrange's equation, the dynamic equation of dual-rotor system with rub-impact fault of some type of aeroengine is established, and emulations of this fault is completed through numerical calculation. The spectral analysis and wavelet transform are also made, and the conclusions are drawn that the dynamic model of dual-rotor system with rub-impact fault is valid and the wavelet transform is a very effective tool to diagnose this fault.

Key words: rotors; rub; fault diagnosis