

弹性支承器振动应力监测与 高速转子系统故障诊断

余晶晶, 王 平

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;
2. 航空发动机振动技术航发科技重点实验室, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 对中小型航空发动机弹性支承器振动应力测试方法进行研究, 介绍了一种在转子弹性支承器弹条上粘贴应变计来获取转子工作时的振动应力的方法. 该方法通过对弹性支承器振动应力信号进行监测分析, 成功诊断出多种典型转子系统故障, 说明应用弹性支承器振动应力可以进行中小型航空发动机高速转子系统的故障诊断.

关键词: 弹性支承器; 振动应力监测; 航空发动机转子; 故障诊断

中图分类号: V231.92

文献标识码: A

文章编号: 1672-5298(2018)02-0039-04

Vibration Stress Measurement of Elastic Support and Failure Diagnosis of High-speed Rotor System

YU Jingjing, WANG Ping

(1. AECC Hunan Aviation Power Plant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;
2. Aviation Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: In this paper, we research the measurement methods of vibration stress for elastic support of small and medium-sized aero engine, and introduce a test method to obtain rotor vibration stress as applying strain gauges on the elastic support. Several examples show that failures of high-speed rotor system of small and medium-sized aero engine can be diagnosed by applying vibration stress of elastic support.

Key words: elastic support; vibration stress measurement; aero engine rotor; failure diagnosis

0 引言

航空发动机振动监测和信号分析技术主要用于识别发动机结构系统, 特别是转子系统的机械状态和故障. 一般航空发动机振动监测主要是测量压气机、涡轮、附件传动机匣外部结构上的振动位移、速度、加速度总量或其分量; 在轴承的适当位置测量轴承载荷及转子振动加速度或速度、位移值以及频率、相位、外传力等参数^[1].

弹性支承器振动应力信号是通过粘贴在转子弹性支承器弹条上的应变计获取的转子工作时的振动应力, 其信号信噪比较高, 相对于发动机机匣上的振动响应信号, 更能反映转子系统工作运转的振动特征. 因此, 利用弹性支承器振动应力信号对中小型航空发动机转子系统进行状态监测和故障诊断, 相对于机匣振动响应测试分析来说, 具有一定的优越性.

1 弹性支承器振动应力测试方法

中小型航空发动机由于工作转速高, 在转子系统上需要采用弹性支承器调节转子系统的临界转速, 以保证发动机工作转速与临界转速之间有足够的裕度. 中小型航空发动机转子系统大多采用带挤压油膜阻尼器的鼠笼式弹性支承器(以下简称弹支). 对鼠笼式弹支而言, 在弹支的垂直与水平方向的肋条上靠近安装边根部处的振动应力最大. 在最大振动应力处粘贴满足尺寸、温度等要求的应变计(图 1), 通过机匣

支板引出应变计感受的振动应力信号, 可实现弹支振动应力信号的测试^[2]. 由于转子轴颈处的振动位移与弹支肋条上的振动应变存在一一对应的关系^[1], 从而可以监测转子运行过程中的振动情况. 且在每个弹支的垂直方向和水平方向分别粘贴应变计, 两应变计的时域信号相位相差 90° , 因此还可以通过两应变计信号合成的轴心轨迹监测转子运行状态.

弹支测试系统由应变计、应变测试仪、动态信号分析仪等组成(图 2). 转子正常运行状态下的时域信号、频域信号、轴心轨迹如图 3 所示.

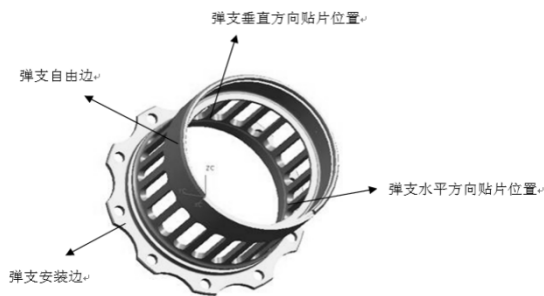


图 1 鼠笼式弹支贴片示意图

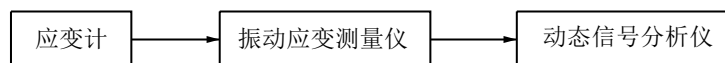


图 2 弹支应力测量系统组成

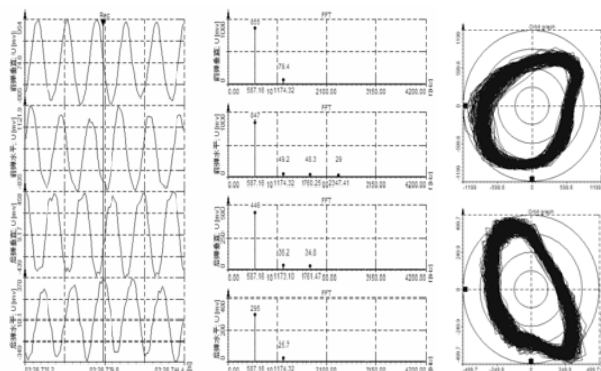


图 3 转子正常运行状态下的时域信号、频域信号、轴心轨迹

2 高速转子系统故障诊断实例

2.1 基于弹支振动应力监测的套齿轴故障诊断

某型发动机压气机试验件台架试车过程中, 最高转速推至 $n=0.9$ 附近时, 后弹垂直测点的应力超过报警值 A . 从弹支应力随转速变化曲线(图 4)看, 后弹支应力在 $n=0.7$ 以后幅值开始急剧上升. 从频谱分析结果(图 6(a))来看, 后弹支应力急剧增加主要表现为低频段成份(约为基频的 $0.05\sim 0.07$ 分频及其 3、5 倍频)幅值的增加, 0.07 分频幅值在 $n=0.9$ 附近达到最大, 为 $0.9A$, 约为转子基频幅值的 4 倍; 前弹支应力在 $n=0.8$ 左右以后急剧上升, 其频谱成分主要是基频, 也存在低频段分频成分, 在最高转速时 0.07 分频幅值约为基频幅值的 16.5% , 但远不如后弹支应力幅值大. 图 5 中的横坐标表示频率, 纵坐标表示试验经过时间, 颜色深浅代表幅值大小, 图 5 显示出此低频成分随转速变化的, 并非一固定频率成分.

压气机试验件试车过程中, 前弹支靠近台架进气端, 后弹支靠近台架增速箱. 增速箱通过浮动轴和套齿轴与压气机相连. 通过对整个试车系统进行分析, 推测这种高幅值的低频成分可能是套齿轴中的花键与浮动轴配合精度未达到设计要求所致.

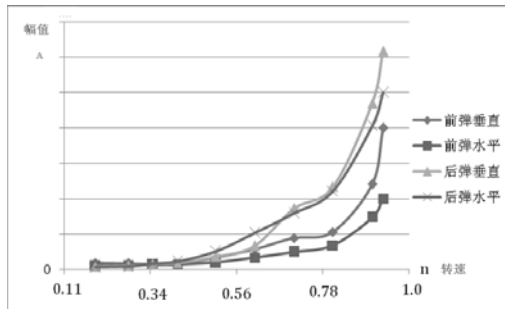


图4 弹支应力随转速变化曲线

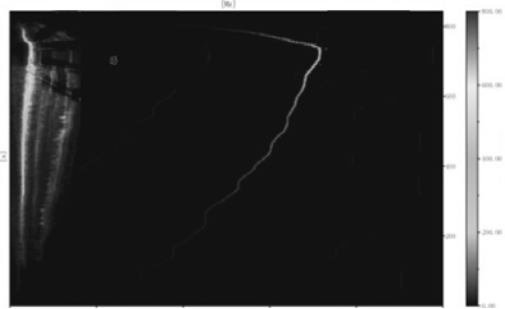
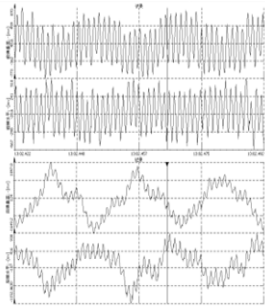
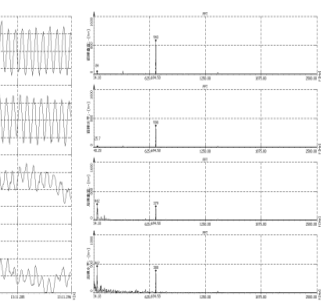
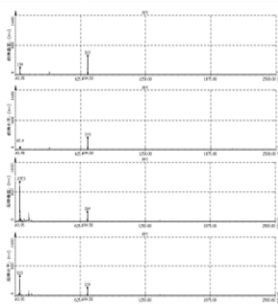


图5 后弹垂直测点振动应力图



(a) 第一次开车



(b) 第二次开车

图6 转速 $n=0.9$ 频谱图

基于故障分析结果进行验证, 将浮动轴顺时针旋转 90° 再试车, 其后弹支垂直、水平两个测点的低频成分均有明显下降, 如图 6(b) 所示. 垂直测点从原来的 $0.9A$ 降为 $0.4A$. 分解检查后发现试验所用浮动轴的套齿确实存在加工超差, 证明了之前的分析是正确的.

以往在弹支应力监测过程中对于振动应力信号的分析主要关注的是试验件转子本身, 而该实例说明除了试验件转子以外, 对于与转子相连接的部分, 如套齿轴的故障, 弹支应力监测也能发挥良好的诊断作用.

2.2 基于弹支应力监测的转静子碰摩故障诊断

某型组合压气机试验件在试车过程中, 当转子转速在 $n=0.8$ 附近上升 200rpm 左右时, 弹支振动应力幅值急剧增大, 由 $0.6A$ 急剧增加达到 $1.1A$, 超过了报警值 A .

对试车过程的弹支应力信号进行频谱分析, 发现从转速 $n=0.7$ 开始在频谱中出现了基频的 0.33 倍频和 0.45 倍频, 以及以基频的二倍频为中心的对称边频, 且出现基频的二、三、四、五、六、七等高倍频, 如图 7(a) 所示. 当转子转速到达 $n=0.8$ 时, 基频及其二倍频的边频幅值明显增加, 且波形变得比较杂乱, 如图 7(b) 所示.

当转子振动信号中出现转子转速基频的低次谐波或高次谐波(不限于整数倍、分数倍), 以及出现以基频的谐频为中心的对称边频时, 通常认为发生了转静子碰摩, 碰摩时振动响应幅值会急剧增加^[3, 4]. 故推测此次试车过程中发生了碰摩. 根据故障诊断结果, 对试验件进行分解检查, 发现试验件套齿轴与封严环之间确实发生了碰摩.

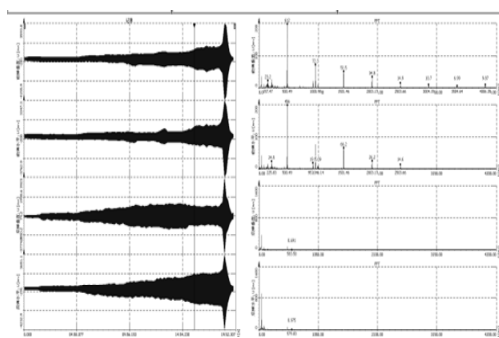
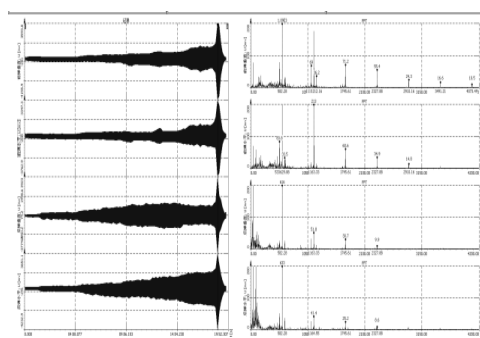
(a) $n=0.7$ 转速(b) $n=0.8$ 转速

图7 不同转速频谱分析

2.3 基于弹支应力监测的转子不平衡故障诊断

某型组合压气机试验件开车转速推至 $n = 0.9$ 附近时, 前弹支垂直方向的振动应力达到报警值 A. 在转速 $n = 0.8$ 左右前弹支的振动应力值比较小. 此后, 随着转子转速的增加, 弹支振动应力快速增加. 从频谱图分析, 前弹支振动应力信号主要表现在转速基频分量的数值增加, 如图 8(a)所示.

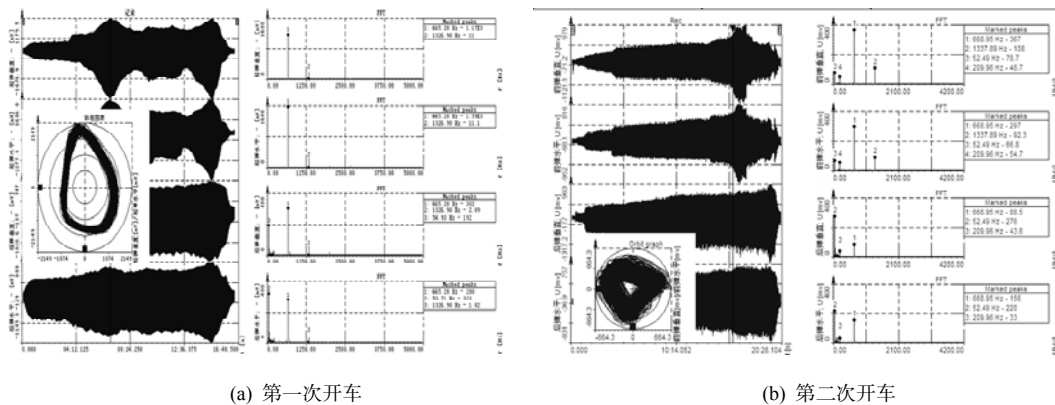


图 8 转速 $n = 0.9$ 频谱及轴心轨迹分析

试验件下台分解, 对压气机试验件转子进行振动模态试验分析, 测得转子的第一阶弯曲模态频率在 $n = 0.9$ 转速附近. 试车过程中, 试验件机匣振动值未超限, 且机匣振动频谱以转子转速基频为主. 综合考虑机匣振动监测情况, 推测此次试车弹支振动应力值超限是由于转子的不平衡量过大导致临界转速处振动过大.

为了验证分析结果, 对试验件分解后进行了复装动平衡, 复装动平衡后的剩余不平衡量比第一次动平衡结果降低了 64.8%. 第二次试车最高转速达到 $n = 1.0$, 在转速 $n = 0.9$ 左右前弹支垂直方向振动应力幅值由 1.0A 下降到 0.3A. 随着转速上升, 应力幅值减少. 在整个试车过程, 弹支振动应力信号的频谱以基频为主, 有一定数量的二倍频, 如图 8(b)所示. 在 $n = 0.9$ 时弹支应力幅值达到最大, 验证了转子不平衡量过大是造成转子振动超限的原因.

3 结论

本文通过对弹支振动应力进行监测, 从获取的弹支振动应力信号中提取故障信息, 对转子系统的典型故障(转子不平衡、转静子碰摩)等进行了诊断分析. 通过对高速转子试验件的分解检查及相关验证试验证明了利用弹支振动应力信号对中小型航空发动机高速转子系统多种故障诊断的有效性, 诊断案例对航空发动机整机或部件试验的振动故障排故具有一定参考价值.

参考文献

- [1] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册(第 19 分册)[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000
- [2] 雷沫枝. 航空发动机转子弹性支承动应力测试技术[J]. 测控技术, 2013, 32(8): 45~49
- [3] 弹性支点和弹性支点加油膜环减振特性实验[R]. 北京航空学院科研报告, BH-B289, 1983
- [4] 牛明忠. 设备故障的振动识别方法与实例[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995
- [5] 晏砺堂. 航空燃气轮机振动和减振[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991
- [6] 杨积东. 转子系统故障的若干非线性动力学问题研究[D]. 沈阳: 东北大学博士学位论文, 2001