

弹用涡喷发动机振动故障 诊断技术探讨*

孙 扬

(航天工业总公司 31 所, 北京, 100074)

摘 要: 简要地论述了弹道涡喷发动机振动故障诊断的理论基础, 介绍了弹用涡喷发动机振动故障的一些特点, 设计一套弹用涡喷发动机振动故障诊断系统, 探讨了弹用涡喷发动机振动故障诊断的方法。

主题词: 涡轮喷气发动机, 故障诊断, 振动分析

分类号: V231.92

A INVESTIGATION ON THE TECHNIQUE OF FLUTTER FAILURE DIAGNOSIS OF THE TURBOJET ENGINE FOR MISSILE

Sun Yang

(The 31st Research Inst., Beijing, 100074)

Abstract: The fundamental theory of flutter diagnosis is described. Several vibration fault examples of the turbojet engine for missile are introduced. This paper designs a system for vibration fault diagnosis of the turbojet engine for missile. Finally, this paper discusses the method for vibration fault diagnosis of the turbojet engine for missile.

Subject terms: Turbojet engine, Fault diagnosis, Vibration analysis

1 引 言

弹用涡喷发动机的振动故障是结构可靠性的主要威胁之一, 轻者损坏零部件, 重者使整机失效。某型弹用发动机在研制过程中曾出现这类故障, 造成整机失效, 困扰研制人员较长时间。本文从振动故障诊断的理论并结合工程实际, 介绍了某型弹用涡喷发动机一些振动故障的特点, 探讨了弹用涡喷发动机振动故障诊断系统和振动故障诊断的方法。

2 振动故障诊断的理论基础概述^[1]

发动机相对于其动平衡位置作微幅振动时, 其主导方程为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Af(t) \quad (1)$$

其中 m 、 c 、 k 分别为质量阻尼刚度矩阵; $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ 、 x 分别为振动位移速度加速度列阵。 $f(t)$ 是待诊断确定的激励力列阵, A 是 0、1 元素构成的转换矩阵。

* 收稿日期: 19970107, 修回日期: 19970304

$$\text{令 } \mathbf{X} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix}, \text{ 则(1) 表示为} \quad \mathbf{M}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F}(t) \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & m \\ m & c \end{bmatrix}, \mathbf{K} = \begin{bmatrix} -m & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix}, \mathbf{F}(t) = \begin{Bmatrix} 0 \\ Af(t) \end{Bmatrix}$$

$$\text{测量方程为} \quad \mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{H}$ 是由 0、1 元素构成的转换矩阵。

如果测量及激励满足能观性与能控性条件, 则发动机的振动故障诊断是可能的。对于线性系统而言, 其频响函数与传递函数等价。由 (1) 式可得到频响函数:

$$\mathbf{H}(j\omega) = (+\omega^2\mathbf{m} + j\omega\mathbf{c} + \mathbf{k})^{-1} \quad (4)$$

$$\text{如果设激励力为 } Af(t) = \sum f_i e^{j\omega_i t}, \text{ 则响应力为: } x = \sum \frac{f_i e^{j\omega_i t}}{(-\omega^2\mathbf{m} + j\omega\mathbf{c} + \mathbf{k})},$$

$$\text{测得的响应为} \quad \mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} = \mathbf{H} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} \quad (5)$$

通常情况下, 如果响应中含有那些频率成分, 则就有相应的激励源; 频率分量响应幅值变化, 通常表现相应激励力的幅值变化, 对这些变化的分析可以诊断出故障。应用谱分析开展故障诊断必备的条件为: 传感器的位置和个数满足能观性的要求; 要预先计算出发动机的重要特征频率; 对发动机发生的特殊振动现象有所了解。

3 弹用涡喷发动机振动故障诊断技术的探讨

3.1 某型弹用涡喷发动机两次振动故障的特点

图 1 和图 2 是某台发动机在地面台架试车测得的振动信号线性频谱, 频率分析范围为 0kHz~1kHz, 发动机转速分别为 21975r/min 和 28462r/min。

从图 1 可以看出信号在基频处(与发动机转速对应的频率)振动幅值为 3.00g, 二倍频处(与发动机两倍转速对应的频率)振动幅值为 0.72g, 此时发动机振动状况正常。图 2 所示发动机在 28462r/min 转速下二倍频幅值不断增大, 瞬时为 1.94g, 超过基频幅值。二倍频幅值偏大甚至超过基频幅值, 表明发动机转子系统发生故障。故障原因: 一种可能是转子系统不对中, 另一种可能是转子轴系出现裂纹^[2]。发动机分解

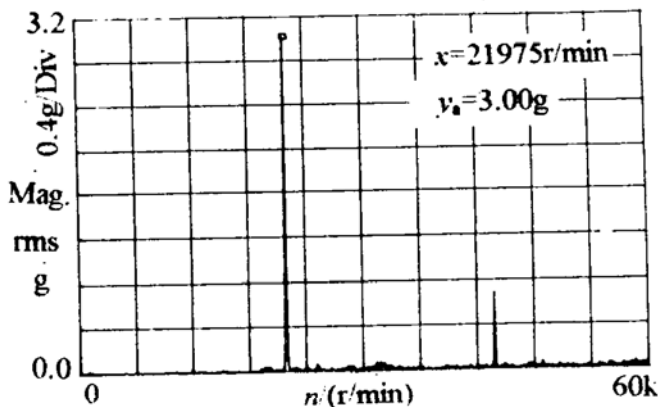


Fig. 1 Vibration signal spectrum of the turbojet engine

检查后发现, 发动机转子系统后支承轴承内环磨损严重, 这就造成转子系统支承不对中。可以看出分解检查结果与频谱分析结果是一致的。

图 3~7 是另一台发动机在地面台架试车结果。图 3 是发动机在慢车状态转速为 22200r/min 时的线性频谱, 基频幅值为 1.98g, 二倍频很小, 没有大的异常频率成分, 发动机振动状况正常。图 4 是发动机在转速为 27000r/min 时的线性频谱。基频幅值由 2.0g 瞬间变化为 6.55g, 随后又变化到图 5 所示的 2.03g。10s 左右, 基频幅值又不断上升, 4.0g, 8.0g, 10.0g,

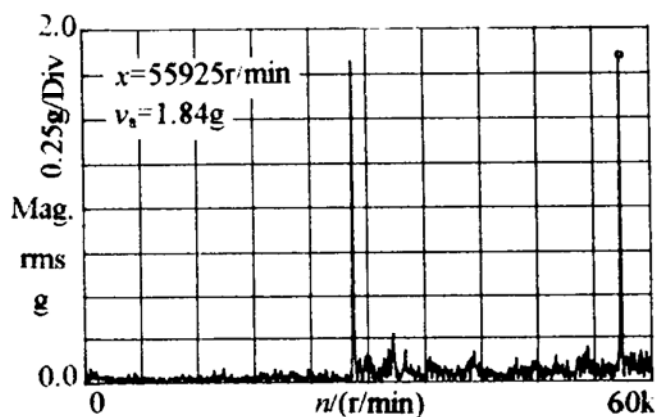


Fig. 2 Vibration signal spectrum of the turbojet engine

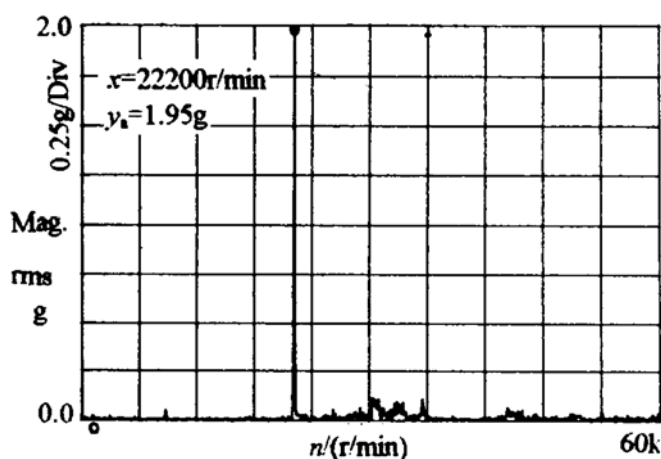


Fig. 3 Vibration signal spectrum of the turbojet engine

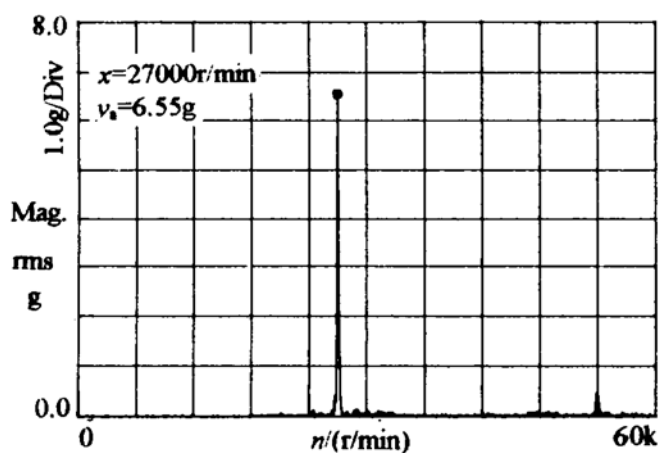


Fig. 4 Vibration signal spectrum of the turbojet engine

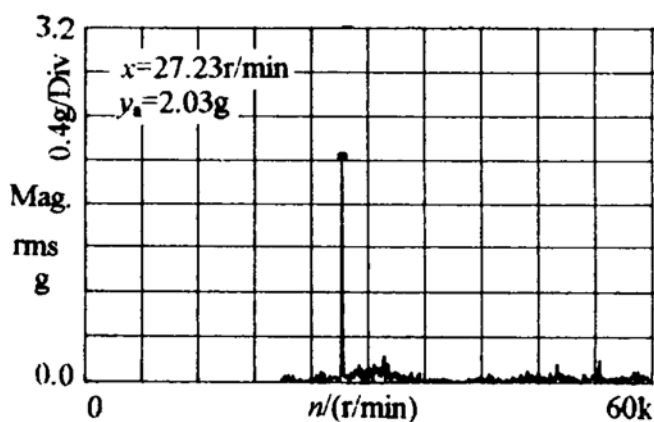


Fig. 5 Vibration signal spectrum of the turbojet engine

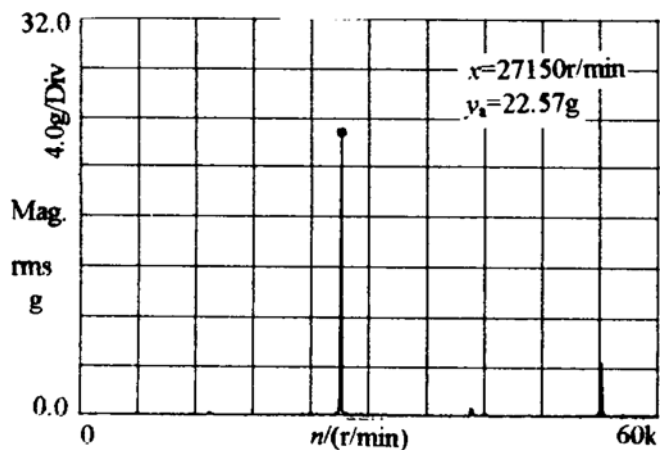


Fig. 6 Vibration signal spectrum of the turbojet engine

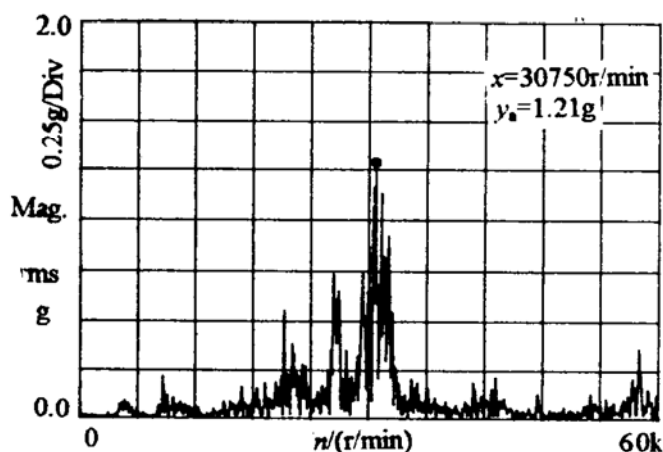


Fig. 7 Vibration signal spectrum of the turbojet engine

……, 如图 6 所示, 最后瞬间最大达 22.68g 。由

图 6 和图 7 可知发动机转子系统发生了严重故障。图 6 明显表现发动机转子系统失衡, 图 7 中大范围连续的异常频率分量, 表明有强烈的摩擦出现。事后分解发动机发现, 发动机转子系统涡轮轴断裂, 涡轮已脱离转子系统。将发动机分解结果与频谱分析对照, 可以得到以下

推断:在转速为 27000r/min 时,基频振幅瞬间由 2.0g 变成 6.55g,表明发动机转子系统已出现故障,随时间推移,故障越来越严重,最终出现涡轮轴断裂,造成转子系统失衡,涡轮轴断裂后,涡轮与发动机静止部件发生摩擦。

3.2 弹用涡喷发动机振动故障诊断系统设计

根据弹用涡喷发动机的特点和近年来振动测试工作的经验,设计了一套振动测试和故障诊断分析系统。三向振动加速度传感器可同时测量水平、垂直、轴向三个方向的振动参数。传感器被分别安装在进气机匣和中介机匣上。两个振动传感器拾取的六路振动信号和一路转速信号经过前置放大器和预处理,分别送到有效值电压表、磁带机以及经过 A/D 转换进入微机。微机中配备实用振动监测软件和故障诊断分析软件及相关的发动机振动特性参数。用于振动监测信号的频率范围为 0kHz~1kHz,用于故障分析信号的频率范围为 1kHz~100kHz,转速测量范围为 0r/min~30000r/min。

3.3 弹用涡喷发动机振动故障诊断方法探讨

为了做好弹用涡喷发动机故障诊断工作,准确及时地分析故障原因,做到以下几点是必要的:

首先,熟悉发动机的结构特点,掌握发动机的振动特性,包括发动机整体和转子系统两部分。对转子系统,需研究其临界转速、不平衡响应及稳定性,计算和测试压气机和涡轮转子叶片、前后支承轴承的故障特征频率。

其次,对于发动机关键部件或易发生故障部位故障机理进行研究,掌握故障特点,建立弹用发动机振动故障模式。由于发动机测点少且只能布置在机壳外部,在建立故障模式和建立故障诊断系统时必须着重考虑这一特点。

从弹用涡喷发动机故障诊断系统方面看,系统尽可能设置多一些测点和多路信号。本系统中采用两个三向振动加速度传感器。对三个方向振动信号的比较可以区别出转轴裂纹和转子系统不对中^[5]。软件除具有常规振动监测功能外,还应具有时域波形分析、改进的 FFT 频谱分析、全息谱图分析(包括二维、三维全息谱图分析)、合成轴心轨迹分析、提纯轴心轨迹分析、时频分析等功能^[6]。需要说明的一点是,采用三轴向加速度计还应在工程实际中检验。

另外,注意振动测试分析的经验积累,特别是注意发生故障的发动机的信号特点。

参 考 文 献

- 1 顾家柳. 旋转机械振动诊断技术展望. 航空学报, 1989(1)
- 2 刘雄, 屈梁生. 转子监测和诊断系统. 西安: 西安交通大学出版社, 1991
- 3 屈梁生, 陈岳东. 计算机辅助监测与诊断技术. 西安: 西安交通大学出版社, 1989
- 4 刘学文. 某发动机振动测试系统. 航天工业总公司 31 所, 1992
- 5 孙扬. 发动机振动分析与诊断测试分析系统工作调研总结. 航天工业总公司 31 所, 1996. 8
- 6 回转机械诊断系统软件包(windows 版)简介. 西安交通大学机械诊断与控制学研究所, 1996
- 7 黄文虎, 夏松波. 设备故障诊断原理、技术及应用. 北京: 科学出版社, 1996