

振动诊断的理论基础

西北工业大学 顾家柳

摘 要

本文是“整机振动规范及信号分析技术研究”、“发动机台架振动监视预研”两个课题的总结。本文着重分析振动诊断的理论基础,从理论上总结研究中的经验。

一、前 言

长期以来,我国生产的航空发动机,大多沿用苏联50年代的测振规范。1975年,美国军用涡喷、涡扇发动机通用规范MIL-5007D规定了要测5~10kHz范围内的振动速度谱和加速度谱,并要求规定相应的限制值。对于振动规范的这种发展该如何理解?怎样贯彻?

对于此课题,我们结合某发动机的排振研究,和黎阳公司协作做了下述几项工作:

1. 对25台发动机作了详细的振动谱分析,对另外46台发动机的振动值作了统计分析。
 2. 对发动机作了正弦扫描激振、噪声激振试验。
 3. 对低压涡轮转子的非协调进动现象,进行了模型试验及理论分析研究。
 4. 做了高压转子动平衡、本机平衡的试验研究。
 5. 在查明了发动机台架试车中振动大的原因以后,提出并实现了一系列排振措施。
- 有关论著见文献(1~6),本文将从理论上对研究工作经验,就诊断技术进行总结。

二、振动诊断的理论基础

对于一台航空发动机,总可以看成为一个一般的欠阻尼系统,它的振动方程为

$$m\ddot{X} + c\dot{X} + RX = B'f(t) \quad (1)$$

设系统的自由度为 n ,则 m 、 c 、 R 分别为 $n \times n$ 的质量、阻尼、刚度阵; X 、 $\dot{X}$ 、 $\ddot{X}$ 为 $n \times 1$ 的振动位移、速度、加速度列阵; $f(t)$ 为不平衡、不对中、初弯曲、齿轮、叶片、轴承、附件、螺桨等因素及噪声所构成的未知激励; B' 为0与1元素构成的转换矩阵。

发动机测振,只是借传感器在少数几个平面的给定位置上,测量该点在水平、垂直或轴向的振动。故下列测量方程(2)中 H' 也是一个由0与1元素构成的转换矩阵。

$$y = H'X \quad (2)$$

所谓振动诊断,就是想借振动信号分析技术,从测得的响应 y 中诊断出机器的故障。

振动诊断技术,目前主要有三大类:常规谱分析方法,参数识别法,及时序分析法。至

于模糊诊断、专家系统等方法,则可以和这三种中的任一种方法相结合。

不管是哪种振动诊断方法,首先总假定机器或结构是一个线性系统。如果发现明显有非线性振动的特征,再作相应的研究与处理。

对于一个线性系统,频响函数 $H(j\omega)$ 和传递函数等价。由(1)式可得

$$H(j\omega) = Z(j\omega)^{-1} = (-\omega^2 m + j\omega c + R)^{-1} \quad (3)$$

其中 $Z(j\omega)$ 为阻抗阵(动刚度阵)。

上述三种振动诊断技术就是:1.从测得的响应,假定已知系统特性($H(j\omega)$),以求得未知的激励——故障;2.从系统特性或模态参数的变化来诊断故障;3.从响应的时序分析来识别系统特性的变化,从而发现故障。并且它们都必须符合能观性、能控性的条件。

三、线性振动系统的能观性与能控性

能观性的定义: 参见(1)式,如果存在某个正整数 N ,使得可由 N 次测量得的 $y_k, y_{k+1}, \dots, y_{k+N-1}$ 及已知的(应理解为客观上已定的)输入序列 $f_k, f_{k+1}, \dots, f_{k+N-1}$ 来唯一确定 K 时刻的状态 Z_k (Z 为广义坐标),那末,我们称系统在 K 时刻是完全能观测的。如果对任一 K 上述关系皆成立,则称系统是一个完全能观测的系统。

为了能较简地从数学上,物理上阐明能观性的含义,先假定阻尼矩阵可借无阻尼系统的实模态振型矩阵 φ 对角化,则如果令 $X = \varphi q$,其中 q 为广义坐标,从(1)式可得:

$$m\ddot{q}_i + C_i \dot{q}_i + k_i q_i = \varphi_i^T B' f(t), \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

q_i 可以从(4)式方便地解得。

测得的响应

$$y = H' X = H' \varphi q = \varphi' q = H' \varepsilon \psi_i q_i \quad (5)$$

由此可见,从测得的响应能完全观测这一振动的第一个必要条件,是观测到的振型矩阵 φ' 为 $m \times n$,即传感器的数目及位置必须能观测到所有各阶振型。不应在各阶振型的节点上。

一般欠阻尼线性振动系统的系统完全能观测充要条件是能观性矩阵 Q_0 的秩为 $2n$ 。^[8]

$$Q_0 = C[1 : A^T : \dots : (A^{N-1})^T]^T \quad (5)$$

其中 $C = H\Phi$, $A = \text{diag}[e^{\lambda_1 \tau}, \dots, e^{\lambda_r \tau}]$, 式中 H 为0、1元素构成的转换矩阵, λ_r 为 r 阶复特征值,

$$\Phi = [\Lambda \tilde{\psi}^T : \tilde{\psi}^T]^T$$

其中 $\tilde{\psi}$ 为复振型矩阵, $\Lambda = \text{diag}[\lambda_r]$ 。

这就要求除了观测到的振型矩阵必须是 $m \times 2n$ (复模态)外,采样点数 N 必须足够大。

$$mN \geq 2n \quad (6)$$

振动诊断就是要从测得的响应 y 来识别系统的状态,从而进行诊断。因此,测振点的数目、位置、样本长度必须满足上述两个完全能观性的条件。

在旋转机械的振动诊断中,激励是客观存在的。如果是对结构作激振试验,借系统特性、模态参数的改变来诊断,则激振器的位置、数目,还必须符合完全能控性的条件。

假设阻尼阵可以借实模态对角化,则由(4)式可得(折积公式)

$$q_i = \dots \int_0^t \dots \varphi_i^T B' f(\tau) d\tau \quad (7)$$

由(7)式可见,对 i 阶模态能控的条件是

$$\varphi_1^T B' \neq 0 \quad (8)$$

其物理意义为：系统完全能控的必要条件是激振力不能加在任一阶固有振型的节点之上。即矩阵 $\varphi_1^T B'$ 必须是 $n \times l$ 的， l 为激振点的数目。

四、借常规谱分析方法诊断

如果系统是线性的，并假定激振力为 $B'f(t) = \sum \psi_i(Z)e^{i\omega_i t}$ ，则由 (1) (2) 式可得

$$y = H' \sum \varphi_i(z) e^{i\omega_i t} / (-\omega_i^2 m + j\omega_i c + k) \quad (9)$$

即响应中的频率成份必有相应的激振源，如响应某分量过大，就意味产生某种故障。可见振动诊断前须预计该机的各个特征频率，并确定其分量过大的标准，即测振规范^[1,2]。由 (9) 式可见，测振的频率范围取决于测振的目的及机器特点。此外 (9) 式中分母小也能使响应分量较大即弱激振源激起共振现象。共振现象较易区别，因其分量的频率值不随转速改变。借‘瀑布’图（动态三维谱分析）很容易确诊。

如果系统具有不可忽略的非线性因素，则可能产生种种分数频率共振现象，尤其是 1/2、1/3 阶次谐共振。其机理可参见文献^[7]第五章，实例见文献^[3]。

转子-支承系统还可能产生失稳现象^[7]，通常发生在转速近似达 2 倍临界转速以上的情况下，并都可找到相应的失稳因素。还可能产生各类机械所特有的一些振动现象，例如航空发动机中因喘振、旋转失速、振荡燃烧等引起的振动。

由此可见，单纯凭常规谱分析结果就能完成振动诊断的看法是不全面的，须对具体机械的特性非线性振动、转子动力学等有所了解，而且往往还必须作激振试验及专门研究。

五、借系统特性 $H(j\omega)$ 、模态参数变化来诊断

由 (3) 式可知，如结构产生裂纹，则将引起 k 、 m 、 c 变化，必将使 $H(j\omega)$ 、模态参数变化，就可反推故障的部位、数量及严重程度，即进行诊断。设阻尼阵可借实模态对角化，并设共有 m 处裂纹，其长为 Δd_j ($j = 1, 2, \dots, m$)；还设裂纹只引起有关刚度元素改变。则

$$\Delta_k = \sum_{j=1}^m \frac{\partial k}{\partial d_j} \Delta d_j, \quad \frac{\partial k}{\partial d_j} = \sum_{p,q} \frac{\partial k}{\partial k_{pq}} \cdot \frac{\partial k_{pq}}{\partial d_j} = \sum_{p,q} e_{pq} \frac{\partial k_{pq}}{\partial d_j} \quad (10)$$

其中 e_{pq} 为 $n \times n$ 方阵， pq 元素为 1，其余为零， Σ 的范围只限于 Δd_j 裂纹的影响区。如果预知这 m 个可能裂纹的部位，则借力学模型分析或试验，可求得各 $\partial k_{pq} / \partial d_j$ 。

在三种模态参数中，模态阻尼的估计精度很低，显然不宜作诊断依据。模态频率的估计精度最高，但这是“全局性”参数，据瑞利原理，它必然对裂纹等微小故障不敏感。

振型对故障稍敏感些，但其估计精度也比频率的识别精度差些。利用共振可以提高振型识别灵敏度，但是可能有危险，并会使裂纹有所扩展，故不宜采用。

此外，这种诊断方法还有其理论上的局限性。这些故障造成的振型变化为^[9]

$$\Delta \psi_i = \sum_{s=1}^n a_{is} \psi_s \quad (a_{i1} = 0) \quad (11)$$

$$a_{ir} = (\omega_i^2 - \omega_r^2)^{-1} \psi_r^T \Delta_k \psi_i \quad (r \neq i) \quad (12)$$

由此可见，因故障而造成的模态参数变化的性质，在很大程度上取决于 $G = \psi^T \Delta_k \psi$ 的性质。

这就带来一个大问题, G 的阶次可能远大于模态识别出的阶次。由于传感器、仪器、计算机、识别方法等条件的限制, 高阶模态和密集模态的识别精度往往很差, 识别出的可用阶次是极有限的, 因此可能严重影响诊断的准确度。另一方面, 力学模型本身有一定误差, 频响函数、模态参数的估计也有一定误差, 而裂纹造成的模态参数改变只是一个小量, 因此诊断的准确度值得怀疑。此外, 如果对可能发生故障的部位及其后果一无所知, 传感器、激振器的配置还可能不附合能观性、能控性的条件。

由于上述种种理论上的局限性, 这种诊断方法还停留在对简单模型的研究阶段。

六、借时序分析方法诊断故障

时序分析方法诊断是借振动信号时序模型 (AR 或 ARMA) 参数的改变来作故障诊断。

有人认为, 时序模型参数或由它构成的判别函数, 对信息有凝聚作用。而构成判别函数只是一种统计分析方法, 它适用于任何一种诊断方法。时序分析法的最大优点是能够直接从响应信号识别系统, 无需做专门激振试验, 故更适用于旋转机械。但也带来新问题。

一台运行中的发动机内, 各种激振源始终存在。其性质通常为随机谱及若干特征频率成分^[1,2]。这激振信号可看成白噪声经过“成形滤波器”后的输出, 用 ARMA 模型可表示为

$$f(t) = [\theta_1(B)/\varphi_1(B)]a_t \quad (B \text{ 为后移算子}) \quad (15)$$

则测得的响应

$$\begin{aligned} y_t &= H'X_t = H'[\theta(B)/\varphi(B)][\theta_1(B)/\varphi_1(B)]a_t = H'[\theta'(B)/\varphi'(B)]a_t \\ &= H'\psi^{-1}(B)a_t \end{aligned} \quad (16)$$

也就是说, AR 模型识别所得到的为 $\psi(B)$, 它近似地等价于 $\theta'(B)/\varphi'(B)$ 而并非 $\theta(B)/\psi(B)$ 。

假定 $\theta(B)$ 与 $\varphi_1(B)$, $\theta_1(B)$ 与 $\varphi(B)$ 之间无公共因素, 则从 y_t 识别的时序模型参数中将包含该发动机的极点与零点, 因此仍然可获得固有频率及阻尼。但是不能从 $\theta'(B)/\psi'(B)$ 确定振型。

以上分析可知, 借时序分析法对发动机作振动诊断, 如着眼于 $\theta(B)/\varphi(B)$, 即系统模态参数的变化, 则几乎无效。然而借时序分析法可识别“成形滤波器”特性的变化, 从而进行诊断。此时它等效于最大熵谱分析, 但从时域参数来识别, 因此还是有意义的。如果先经过一个带通滤波器再进行时序分析, 则也将起 ZOOM 的作用。

从本文的讨论可见, 常规谱分析、时序分析各有特点, 应相互补充。借模态参数改变来诊断故障, 则离实用的距离还很远。

参 考 文 献

- [1] 顾家柳, “航空发动机的整机振动”, <航空科技>HK80007, 1980。
- [2] 顾家柳, “从涡喷七发动机整机振动研究论发动机的常规测振”, 中国航空科技文献, HJB 820044, 1982。
- [3] 顾家柳, 任平珍, “航空燃气涡轮转子的非协调进动”, 航空学报第 4 卷, 第 1 期, 1983。
- [4] 顾家柳, “传递矩阵-直接积分法及其应用”, 航空学报, 第 4 卷, 第 4 期, 1983。
- [5] Gu, Jialiu, “An Improved Transfer Matrix-Direct Integration Method for Rotor Dynamics”, J. of Vibration, Acoustics, stress and Reliability in Design Vol.108, Apr. 1986。
- [6] 顾家柳, 王能谦, “有裂纹悬臂转子的振动特性”, 航空动力学报, Vol.1, No.2, 1980。
- [7] 顾家柳等编著, “转子动力学”, 国防工业出版社, 1985。
- [8] 顾家柳, 姜节胜, “试验模态分析概论”, 西北工业大学, 1988。
- [9] 顾松年等, “结构故障的一种振动诊断”, 第三届全国振动理论及应用学术会议论文集, 1987。
- [10] 相叔子等, “时序模型与系统辨识”, 机械工程增刊, 1984.9。

determination of allowable crack length or estimation of safety allowable life according to production and application conditions is defined.

4. The mechanism of mistuning blades to attenuate vibration and suppress flutter is elaborated. The influence of dislocation of blade gravity, torsion and aerodynamic centers on flutter is clarified.

5. A theory and technique are provided to identify modal parameters of a vibration system by means of force hammer excitation, response measurement with strain gauges and nonlinear optimization.

6. The irrationalities in USSR aeroengine vibration standards are found in the light of spectrum analysis theory. The relevant technology and test procedure are improved in cooperation with manufacturers.

7. A systematic theory and practical approaches for rotor balance in field are worked out, which serve as technical preparation for balance of new engines.

8. The damping mechanism of squeeze film damper is investigated. As a result, a design method is suggested for engineering application.

The above-mentioned achievements are a far cry from enough. They have yet to be studied further and to be perfected through the coming application.

HPPSARP Office

Editorial Department of JAP

THEORETICAL BASIS OF VIBRATION DIAGNOSIS

Gu Jialiu

(northwestern Polytechnical University)

Abstract

Three vibration diagnosis methods are discussed, which are normal spectrum analysis method, modal parameter recognition method and time series analysis method. It is demonstrated that the modal parameter recognition method is far from a practical one due to its theoretical shortcomings. The time series analysis method is promising to diagnose the machine defaults while used as a tool to recognize the "input form filter". Therefore, this method is comparable with the maximum entropy spectrum analysis but performed in the time domain. A perfect diagnosis software should contain both the normal spectrum and time series analysis methods.