

工程圆管故障的振动诊断技术

刘瑞岩 刘永坚 钱 朴

(航天技术系)

摘 要 本文应用结构的敏感度分析法,以敏感区的频响函数作为观测特征量,建立了故障诊断的识别方程。利用 Kalman 滤波迭代算法对某工程圆管进行了刚度型故障诊断的仿真计算和试验分析。结果表明振动诊断技术可用于工程结构故障的微机实时监控,具有精度较高,抗干扰能力较强的特点。

关键词 故障诊断, 状态监控, 振动分析, 最优滤波, 工程圆管

分类号 TB534. 2

在工程结构中,由于结构的裂纹、缺陷、腐蚀或脱粘等因素常常会引起结构刚度、阻尼和(或)质量大小及其分布的变化,这种变化必然导致结构固有振动特征的变化,因此利用完好结构与故障结构振动特征的变更,通过振动信号的处理与分析,可诊断出结构故障的状态、位置和大小。

在结构故障诊断技术方面,有人曾利用频域法^[1~2]和时域法^[3]进行过探讨。但是要诊断结构的早期细小故障,在实践上是存在一些困难的,主要是特征提取和检测技术的问题。一般地说,结构故障可分为分别由结构弹性、惯性或阻尼变化而产生的刚度型、质量型或阻尼型故障以及弹性、惯性和阻尼同时变化而产生的综合型故障。

本文的目的在于寻求对结构故障更为敏感的观测量,以此建立识别方程,采用快速有效的估值方法来诊断结构的早期细小的故障。

1 结构振动特性对故障的敏感度

设结构的振动特性 y (如模态参数及频响函数等) 是其物理参数 (如质量、刚度、阻尼及结构数据等) $x_i (i=1, 2, \dots, m)$ 的函数, 现定义 y 对 x_i 的相对敏感度为

$$\eta(y/x_i) = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{\Delta y/y}{\Delta x_i/x_i} = \frac{x_i}{y} \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

(1)式所表达的敏感度为一阶归一的敏感度。当敏感度 η 是复函数时,其大小由其模决定。

显然,不同的振动特征量对相同的故障以及同一振动特征量对不同的故障其敏感度是不同的。为能有效地诊断故障的大小和位置,需了解各种振动特征量对故障的敏感规律,以便找出对故障有足够“察觉”能力的振动量作为故障诊断的观测特征量。根据理论和试验分析[4]可得出如下的一般规律。

(1)不同阶的固有频率对同一位置故障的敏感度不同。对裂纹、损伤等刚度型的故障来说,高阶固有频率较敏感,随着故障的增大,固有频率的降低由高阶向低阶发展,当基频发生变化时,故障已相当明显,且已临近整个结构出现故障。因此,当进行故障诊断时,应以足够高的频率来截取信号。

(2)固有振型对故障诊断有其重要意义,它对故障的敏感度与节线的位置直接相关,弹性应变能的大小直接反映了故障的情况。因此,为检验某一特定故障,测振传感器的位置和频率范围存在一个最佳的配置。

(3)在每个共振频率附近,频响函数存在一个对故障敏感度较大的敏感区。多自由度系统存在多个频响函数敏感区,利用敏感区内的频响函数可充分反映结构物理参数的变化。

2 故障诊断的识别方程

多自由度线性系统的振动微分方程为:

$$[M]\{\ddot{u}(t)\}+[C]\{\dot{u}(t)\}+[K]\{u(t)\}=\{f(t)\} \quad (2)$$

式中, $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 分别为结构的质量、阻尼和刚度矩阵, $\{u(t)\}$ 和 $\{f(t)\}$ 分别为位移和力向量。系统的位移阻抗矩阵为

$$[Z(\omega)]=[K]-\omega^2[M]+j\omega[C] \quad (3)$$

对于欠阻尼系统,复矩阵 $[Z(\omega)]$ 可逆,系统的频响函数矩阵为:

$$[H(\omega)]=[Z(\omega)]^{-1} \quad (4)$$

设结构参数为 $b_j(j=1,2,\dots,m)$,当结构出现损伤时,参数 b_j 必然发生变化,从而导致频响函数的变化。利用 Taylor 级数展开(4)式,则有

$$\Delta H_{rs}(\omega)=\sum_{j=1}^m \frac{\partial H_{rs}(\omega)}{\partial b_j} \Delta b_j+\frac{1}{2} \sum_{p,q=1}^m \frac{\partial^2 H_{rs}(\omega)}{\partial b_p \partial b_q} \Delta b_p \Delta b_q+\dots \quad (5)$$

式中, $H_{rs}(\omega)$ 为频响函数矩阵中第 r 行第 s 列元素。

$$\frac{\partial H_{rs}(\omega)}{\partial b_j}=-\{H_r\}^T \frac{\partial [Z(\omega)]}{\partial b_j} \{H_s\} \quad (6)$$

当认为故障仅引起系统刚度变化时,将(3)式代入(6)式,则有

$$\frac{\partial H_{rs}(\omega)}{\partial b_j}=-\{H_r\}^T \frac{\partial [K]}{\partial b_j} \{H_s\} \quad (7)$$

若在(5)式中只取一阶微量,则有

$$\Delta H_{rs}(\omega)=[\overline{H}_{rs}]\{\Delta B\} \quad (8)$$

$$\text{式中,} [\overline{H}_{rs}]=\left[\begin{array}{cccc} \frac{\partial H_{rs}(\omega)}{\partial b_1} & \frac{\partial H_{rs}(\omega)}{\partial b_2} & \dots & \frac{\partial H_{rs}(\omega)}{\partial b_m} \end{array}\right]$$

$$\{\Delta B\}=[\Delta b_1 \quad \Delta b_2 \quad \dots \quad \Delta b_m]^T$$

$$\begin{pmatrix} r, s = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, m \end{pmatrix}$$

在 N 个频率采样点上可获得 N 个 ΔH_{rs} 值, 利用方程(8)构成 N 个方程, 于是可获得频响函数的变化与故障大小之间的识别方程

$$\begin{aligned} \{\Delta H_{rs}\} &= [\overline{H}_{rs}] \{\Delta B\} \\ (N \times 1) & \quad (N \times m) \quad (m \times 1) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\{\Delta H_{rs}\} = [\Delta H_{rs}^{(1)} \quad H_{rs}^{(2)} \quad \dots \quad \Delta H_{rs}^{(N)}]^T$ 为故障前后频响函数某元素 H_{rs} 的差值所组成的观测向量; $[\overline{H}_{rs}]$ 为观测矩阵, 可根据(7)式计算; $\{\Delta B\}$ 为待识别的状态向量, 诸如断面抗弯刚度等的改变量。通常, 为抑制噪声应取 $N \gg m$ 。

假设待求的 $\{\Delta B\}$ 在方程(9)的估值过程中为一常量, 并考虑到测量噪声的实际存在, 则可将数学模型写成如下的状态向量动力学方程和线性系统观测方程:

$$\begin{cases} \{X\}_{k+1} = \{X\}_k \\ \{Z\}_k = [D]_k \{X\}_k + \{V\}_k \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\{X\}_k = \{\Delta B\}$, 为对应于离散频率 ω_k 的状态向量; $\{Z\}_k = \{\Delta H_{rs}\}_k$; $[D]_k = [\overline{H}_{rs}]_k$; $\{V\}_k$ 为在离散频率 ω_k 时的观测噪声, 设其均值 $E[\{V\}_k] = \{0\}$, 方差 $E[\{V\}_k \{V\}_k^T] = [R]_k$, $[R]_k$ 可根据观测设备精度鉴定统计分析确定。利用 Kalman 滤波递推公式求解方程(10), 其公式为^[5],

$$\begin{cases} \{\hat{X}\}_{k+1/k+1} = \{\hat{X}\}_{k+1/k} + [G]_{k+1} (\{Z\}_{k+1} - [D]_{k+1} \{\hat{X}\}_{k+1/k}) \\ \{\hat{X}\}_{k+1/k} = \{\hat{X}\}_{k/k} \\ [G]_{k+1} = [P]_{k+1/k} [D]_{k+1}^T ([D]_{k+1} [P]_{k+1/k} [D]_{k+1}^T + [R]_{k+1})^{-1} \\ [P]_{k+1/k} = [P]_{k/k} \\ [P]_{k+1/k+1} = ([I] - [G]_{k+1} [D]_{k+1}) [P]_{k+1/k} \end{cases} \quad (11)$$

初值选取 $\{\hat{X}\}_0 = \{0\}$; $[P]_0 = \alpha [I]$, α 为一非常大的正实数。

3 仿真试验

实验一 (弯曲振动)

物理模型为一等断面的悬臂钢管, 如图1所示。断面的抗变刚度为 EJ 。将钢管梁分为5个单元, 其质量矩阵 $[M]$ 和刚度矩阵 $[K]$ 用有限单元法建立, 阻尼矩阵 $[c] = d[I]$, 取 $d = 0.025 \text{Ns/m}$ 。

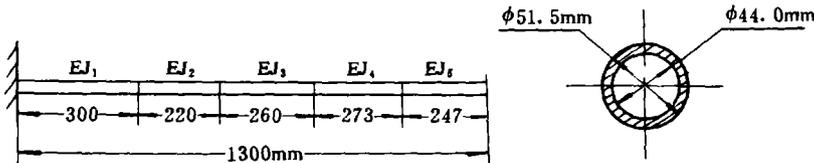


图 1

令第一梁段 EJ_1 的改变 $\Delta EJ_1 = -158.09 \text{Nm}^2$ (约改变 0.5%)。在每个敏感区内取 200 个采样点。表 1 列出了选取不同的 ΔH_{rs} 作为观测特征量时用 Kalman 滤波公式 (11) 诊断的结果及故障梁段的百分误差。

表 1

特征量	敏感区	ΔEJ_1					百分误差
		1	2	3	4	5	
ΔH_{11}		-155.78	-0.3417	-2.6055	-1.1308	-0.1039	1.46
ΔH_{22}		-155.74	-2.1854	-0.1355	-0.9187	-0.1227	1.49
ΔH_{33}		-152.81	-10.733	2.8457	-13.650	-1.0795	3.34
ΔH_{44}		-150.13	-22.019	0.3023	-8.4496	-3.8553	5.04
ΔH_{55}	第一阶	-148.90	-28.960	-0.3080	3.0418	-0.0491	5.81
ΔH_{12}	固有频	-156.21	-0.2269	-1.8099	-0.8439	-0.0868	1.19
ΔH_{13}	率附近	-155.48	-3.7612	1.8380	1.3015	0.0239	1.60
ΔH_{14}		-155.56	-2.2123	-1.1744	0.0242	0.0669	1.65
ΔH_{15}		-155.38	-2.2682	-1.9429	-0.8529	-0.0844	1.72
ΔH_{23}		-154.87	-4.6696	0.8236	-4.1815	-0.3387	2.04
ΔH_{24}		-152.84	-13.872	7.3451	2.4646	0.3940	3.32
ΔH_{25}		-152.70	-10.152	0.5761	-5.6293	-0.8833	3.41
ΔH_{11}	一、二阶	-156.13	-1.4272	0.5207	-1.1438	-0.2266	1.24

由表 1 的诊断结果可见：

- 1) 当利用原点频响应函数差作为观测特征量时，其距故障点越近，诊断的精度越高。
 - 2) 当利用跨点频响应函数差作为观测特征量时，取跨越故障处的频响应函数，其诊断精度较高。
 - 3) 当敏感区数目越多时，其诊断精度越高。
- 若在观测特征量 $\{H_{rs}\}$ 上加 50% 的高斯白噪声时，其诊断结果见表 2。

表 2

特征量	敏感区	EJ_1					百分误差
		1	2	3	4	5	
ΔH_{11}		-159.21	0.5269	2.6835	1.1769	0.0818	0.70
ΔH_{12}	第一阶	-161.74	-6.3945	16.535	3.8686	0.1988	2.31
ΔH_{22}		-161.86	-14.318	26.245	5.7926	0.2847	2.39

由表 2 可见，Kalman 滤波器具有较强的抗干扰能力，较最小二乘法要好。

实验二 (扭转振动)

将图 1 所示圆管等分为 4 个扭转单元，令第一段 $GJ_{\rho 1}$ 的改变 $\Delta EJ_{\rho 1} = -126.47 \text{N} \cdot \text{m}^2$ (约

改变0.5%)。在第一阶固有频率附近取200个点，并在 $\{\Delta H_{rs}\}$ 上加50%的高斯白噪声，用Kalman滤波法诊断的结果见表3。

表 3

特征量	GJ_{rs}				百分误差
	1	2	3	4	
ΔH_{11}	-127.78	-0.2977	0.5379	0.2188	1.03
ΔH_{13}	-127.04	-0.9735	-2.5641	-3.8913	0.45
ΔH_{14}	-127.09	1.0090	-2.8970	-4.6097	0.49

由表3可见，对于管形结构利用扭转振动模型有可能获得更好的诊断精度。

综上所述，利用方程(10)和(11)进行结构的故障诊断能同时检测出故障的大小和位置。在没有故障的地方， ΔEJ_r 和 ΔGJ_{rs} 的变化是极其微小的，且其变化的规律是不定的。

4 试件试验

针对前面图1的仿真模型，我们设计并进行了相应试件的实测分析，其试验框图见图2。

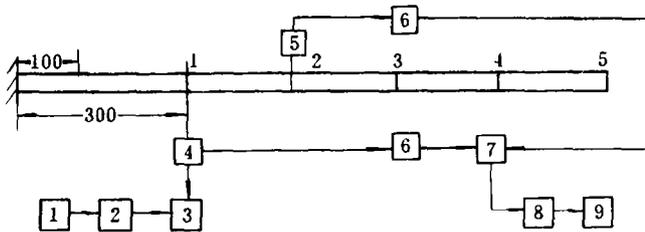


图 2

- 1 信号发生器 2 功率放大器 3 激振器
- 4 力传感器 5 加速度计 6 电荷放大器
- 7 FFT分析仪 8 微型计算机 9 打印机

试验采用单点宽带(2Hz-2KHz)白噪声激励，激振点距固定端300mm，裂纹距固定端100mm。在第一和第二阶共振频率附近各取90个采样点，其诊断结果见表4。

表 4

ΔEJ_1	ΔEJ_2	ΔEJ_3	ΔEJ_4	ΔEJ_5
-162.49	-21.976	-8.7351	2.3108	-1.3547

试验分析结果表明，具有裂纹的第一梁段的刚度明显下降，而其它各段波动不大。

5 结论

- 1) 选用敏感区的频响函数作为观测特征量，可诊断结构的早期细小故障，其敏感度高，信噪比好。
- 2) 结构故障位置附近区域与其它地方相比，频响函数含有较多的故障信息量，用

该处的频响函数来诊断故障精度较高。建议选用易发生故障的区域作为频响函数的观测点,并尽可能测得跨点频响函数。

3) 利用最佳线性滤波技术可确定故障的大小和位置,其算法简单、实时性好,具有较强的抗干扰能力。

4) 尚需对高阶敏感区和应变频响函数等进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] 王谓季. 结构故障的诊断与监测研究. 南航博士论文, 1985
- [2] Cowley p, Adams R D. The Location of Defects in Structures from Measurements of Natural Frequencies. *J. of Strain Analysis*, 1979, 14(2): 49—57
- [3] Cole H A. On—Line Failure Detection and Damping Measurement of Aerospace Structures by Random Decrement Signatures. NASA CR—2205, 1973
- [4] 刘永坚. 工程圆管裂纹故障的振动诊断技术. 国防科技大学硕士论文, 1989
- [5] 张金槐等. 飞行器试验统计学. 国防科技大学出版社, 1985

The Technique of Vibration Diagnosis for Engineering Tube Failures

Liu Ruiyan Liu Yongjian Qian Pu
(Department of Space Technology)

Abstract

This paper presents a new development of the technique of the identification equations of a failure diagnosis using frequency response function (FRF) of the sensitive areas as an observed characteristics quantity (QCQ). It is obtained from sensitivity analysis of the structure. The simulating calculation and experimental analysis of stiffness—type failure diagnosis for an engineering tube are made by Kalman filter iterative algorithm. The results show that the technique has greater accuracy and better antijam capability.

Key words Failure diagnosis, condition monitoring, vibration analysis, optimal filtering, engineering tube