

自适应消噪与轴承故障诊断

西北工业大学 李智炜 傅毅

【摘要】 本文采用自适应消噪技术来提高轴承振动信号的信噪比,在常用的LM S (widrow)算法的基础上,讨论收敛快而计算量增加又较少的VS (Variable Step)算法,分析表明VS算法较LM S算法更适于自适应消噪在机械故障诊断中的应用。对故障轴承的振动信号进行同态自适应消噪处理和异态自适应消噪处理,都有助于发现轴承的故障,而异态自适应消噪处理对故障诊断的效果更明显。

一、前言

轴承是机械中常用的和最易损坏的零件之一,其故障监测和诊断也是机械设备故障诊断的重要内容之一。目前,基于振动信号的测取分析进行轴承故障监测和诊断,以常规谱分析方法和时序分析方法为主,辅以模糊诊断、判别参数等的应用,取得了良好的效果。但是对于复杂的机器,如航空发动机,所能测取到的轴承振动信号存在很大的背景噪声,故障信号往往完全淹没在噪声中。这时用常规的信号处理技术如谱分析或时序建模分析,往往得不到好的效果,难以发现故障。因此必须对所测得的振动信号进行信息的提取精化,提高其信噪比。这是正确判别轴承故障的前提,也是轴承故障诊断的重要课题。

提高信噪比的方法有多种,常用的如同期时域平均(相干检波)、滤波等,通常需要事先知道信号和噪声的统计特性,而且固定的滤波器无法处理时变信号,相干检波只能去除非周期分量或随机干扰,故在工程应用中往往效果不理想,这时应用自适应消噪技术具有独特的优越性,可有效的提高信噪比。

随着计算机技术的发展,自适应信号处理理论和实现的逐渐成熟,自适应消噪技术已日益广泛的应用于各个领域。由于数字自适应滤波方法及应用的多样化,推出了多种自适应算法,如Widrow的最小均方误差算法(LM S法)^[1],变换时域LM S算法^[2],最小二乘格形算法^[3],以及近期提出的变步长算法(VS法)^[4]等,它们各有特点,都得到成功的应用。自适应消噪技术用于机械故障监测和诊断,典型的文献有[5~8],均取得了一定的效果。

二、自适应消噪的基本原理

最小平方滤波器(Winner滤波器)加上反馈的相关回路,构成自适应消噪器(图1)。传感器1拾取信号源 S 传来的信号 $S_1(n)$ 和噪声源 N 传来的噪声 $N_1(n)$, $S_1(n) + N_1(n)$ 作为消噪器主输入 $D(n)$,传感器2拾取由噪声源传来的噪声 $N_2(n)$ 作为消噪器参考输入 $X(n)$, $X(n)$ 经过

自适应滤波器,产生一个与 $N_1(n)$ 相近的输出 $Y(n)$,从主输入信号 $D(n)$ 中减去 $Y(n)$,得消噪器输出 $Z(n) = S_1(n) + N_1(n) - Y(n)$,自适应滤波器自动调整参数,使 $Y(n)$ 总与 $N_1(n)$ 接近相等,这时系统输出 $Z(n)$ 趋近于 $S_1(n)$ 。

为简化分析,设 $S_1(n)$ 、 $N_1(n)$ 、 $N_2(n)$ 及 $Y(n)$ 都为平稳零均值随机过程,信号 $S_1(n)$ 与噪声 $N_1(n)$ 、 $N_2(n)$ 不相关,而 $N_1(n)$ 与 $N_2(n)$ 相关。由

$Z(n) = S_1(n) + N_1(n) - Y(n)$, 推得 $E(Z^2(n)) = E(S_1^2(n)) + E((N_1(n) - Y(n))^2)$, 式中 $E(\quad)$ 表示系统平均。自适应滤波器使 $E(Z^2(n))$ 最小时,有 $\min(E(Z^2(n))) = E(S_1^2(n)) + \min(E((N_1(n) - Y(n))^2))$, 这时 $Y(n)$ 是主输入中 $N_1(n)$ 的最佳最小二乘方估计, $Z(n)$ 则是信号 $S_1(n)$ 的最佳最小二乘方估计^[10]。实质上,使系统输出功率最小,即使输出噪声功率最小,而输出信号稳定,故自适应消噪系统能始终保证输出信噪比为最大。

自适应消噪的关键是,自适应滤波器根据系统输出 $Z(n)$ 的变化自动地调整滤波器参数跟踪主输入中噪声 $N_1(n)$ 的变化。采用时域综合加权的滤波器(横向滤波器),根据 $Z(n)$ 自学习地调整其的权向量。自适应横向滤波器的框图见图 2,数学模型为 $Y(n) = W_n^T X_n$, 式中, n 代表时刻, $W_n = [W_1, W_2, \dots, W_K]^T$ 为滤波器的权向量, $X_n = [X(n), X(n-1), \dots, X(n-k+1)]$ 为滤波器输入向量, $Y(n)$ 为滤波器在 n 时刻的输出, $D(n)$ 为自适应消噪系统的主输入, $Z(n)$ 为消噪系统输出。显然,自适应滤波的过程就是对权向量 W_n 的不断辨识,不断修正的过程。

图 2 的自适应横向滤波器的最佳状态是具有维纳向量滤波器的性能^[1],此时滤波器的权向量应为 $W_{opt} = R_x^{-1} P_{dx}$, 式中 W_{opt} 为最佳权向量, $R_x = E(X_n X_n^T)$, $P_{dx} = E(D(n) X_n)$, 调整权向量 W_n 使之逼近 W_{opt} , 要求输出 $Y(n)$ 是 $D(n)$ 的最小均方误差估计,即使

$$\begin{aligned} E(Z^2(n)) &= E((D(n) - Y(n))^2) \\ &= E((D(n) - W_n^T X_n)^2) \end{aligned}$$

达到最小。均方误差 $E(Z^2(n))$ 是权系数 $W_1, W_2, \dots, W_K$ 的二次函数^[9], 当权的数目为 K 时, 均方误差曲面是 $K+1$ 维的超椭圆抛物面, 调整

权向量 W_n 使均方误差收敛到误差抛物面的“碗底”, 即为工程上广泛应用的 LMS 算法^[1], 其权向量的递推公式为 $W_{n+1} = W_n + 2U Z(n) X_n$, 式中 W_{n+1} 是第 $n+1$ 时刻的滤波器权向量, U 为一个大于零的常数, 称为收敛因子。

对上式略作修改, 采用如下权向量递推公式 $W_{n+1} = W_n + 2Q_n Z(n) X_n$, 式中 Q_n 是一对角矩阵 $Q_n = \text{diag}(U_{n1}, U_{n2}, \dots, U_{nk})$, 其中每一对角元可在 U_{min} 和 U_{max} 之间调整, $[U_{min}, U_{max}]$ 是基于算法稳定性、收敛性及误差考虑的收敛因子 U 的取值区间。上式表示的算法称之为 VS 算法, 图 3 是其算法流程图

由仿真计算结果可得:

1 VS 算法的收敛速度比定 U 的 LMS 算法要快, 而且最终结果更接近最小均方误差。经

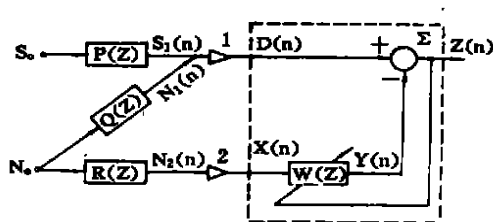


图 1 原理框图

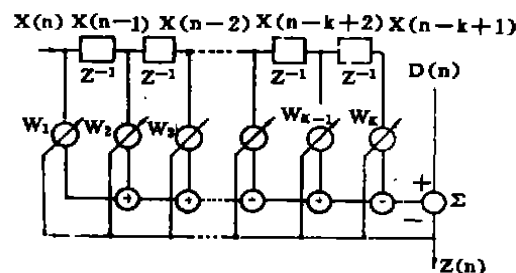


图 2 横向滤波器

过计算,主输入通道信噪比越低,VS 算法收敛快的优越性越明显。 $SNR_{pri}=0.01$ 时,其收敛速度是 LMS 算法的 100 倍, $SNR_{pri}=0.1$ 时,亦在 50 倍以上。

2 经计算,VS 算法仅较 LMS 算法增加计算量 50% 左右。VS 算法对处理非平稳过程、跟踪时变参数的能力强,是适用于故障诊断、监控和跟踪的较好的算法。

在轴承故障诊断中可用自适应消噪器来使拾取的振动信息精化,具体做法应使用二个传感器,一个为主传感器,另一个为参考传感器,安装时应使主传感器和参考传感器收入相关的干扰信号较多,参考传感器应尽量避免拾取信号成份,主传感器和参考传感器输入的信噪比差异应较大。由于自适应消噪无法去除非相关噪声^[9],所以当非相关噪声较大时,应考虑采取预滤波措施滤去非相关噪声,以改善自适应消噪系统的性能。

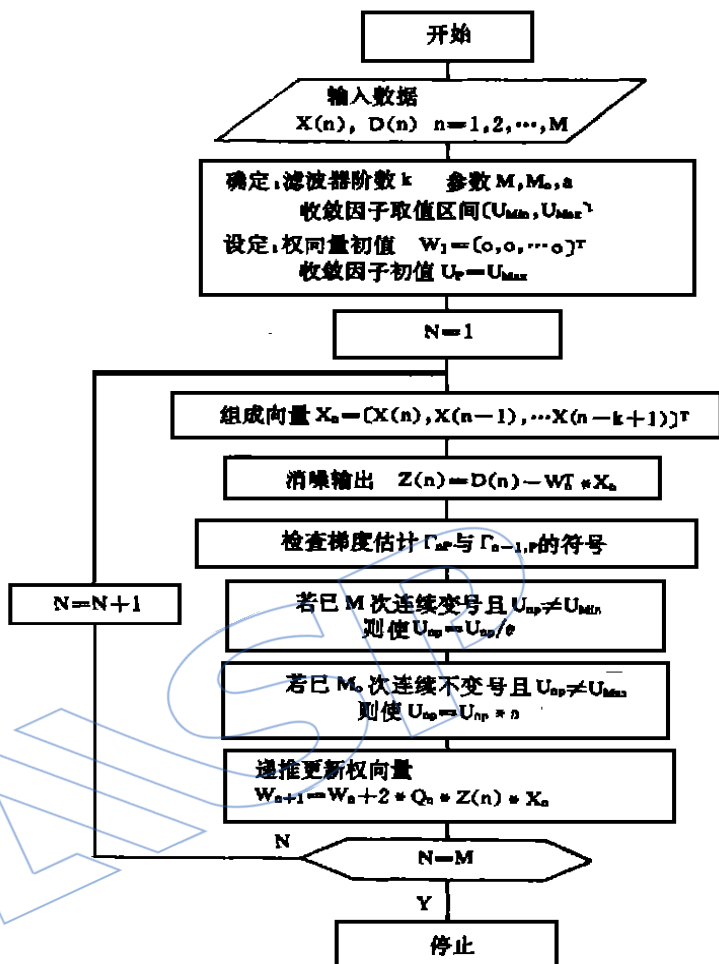


图 3 算法流程图

三、故障轴承的振动诊断

1 利用同态自适应消噪技术 对 1609 型轴承在轴承试验器上进行振动故障诊断,主传感器置于轴承座上,参考传感器置于离轴承较远处。二个传感器拾取的信号通过抗混淆滤波器,经 A/D 转换成数字信号。数据采样频率为 5120Hz,采样长度 1024 点。

直接对主传感器拾取的信号进行分析,其结果可见图 4。其中 A 图为其时域信号, B 图为其功率谱图,图上除了转子激振频率处有明显峰值 (75Hz) 外,还有其它一些干扰成份的谱峰淹没了故障信号,无法判别故障,可见直接分析主输入效果不好。后以 VS 算法进行自适应消噪处理,图 C 为消噪处理后的时域波形,图 D 为其功率谱图。图 B 与图 D 比较,干扰被消除,在图 D 上可清楚识别出 370Hz 处的谱峰,此谱峰恰好对应于外环磨损的故障信号。由此可见利用同态自适应消噪处理,有助于发现轴承的故障。

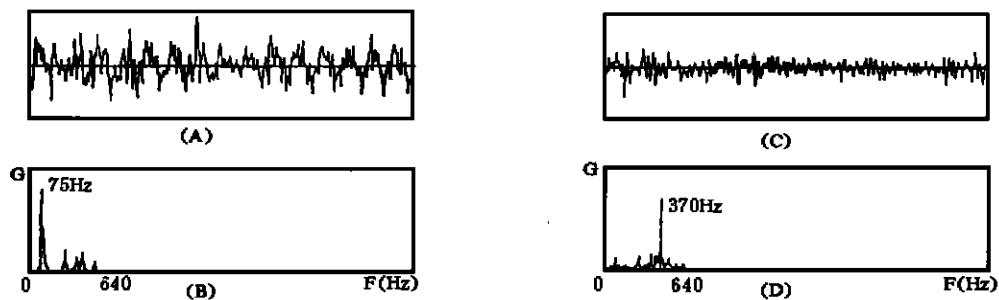


图 4 信号分析

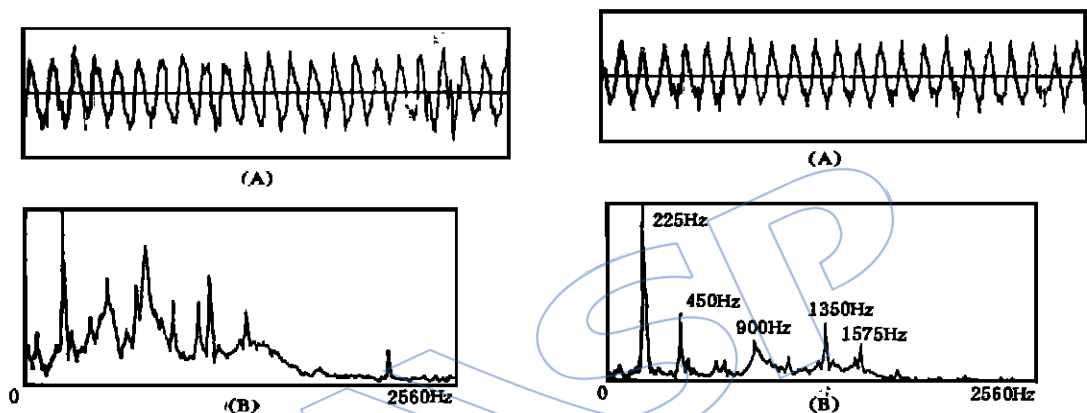


图 5 无故障轴承信号的时域波形图和频谱图

图 6 有故障轴承信号的时域波形图和频谱图

2 利用非同态自适应消噪技术 考虑有故障轴承信号为消噪器主输入, 无故障轴承信号为参考输入的自适应消噪处理。因自适应消噪器不能除去非相关噪声, 故最好在消噪前做平均化处理以压低随机噪声。此外, 虽然主输入信号和参考信号不是同时采集的, 但在转速波动不大时, 若使两个样本第一个样点的相位相同, 其后各对应采样点间的相差变化是缓慢的, 而自适应消噪系统有一定处理时变参数的能力, 特别是采用收敛迅速的 V_S 算法, 能完全跟踪此变化, 取得调整参数保证噪声抵消的效果。因此, 可不作阶比化处

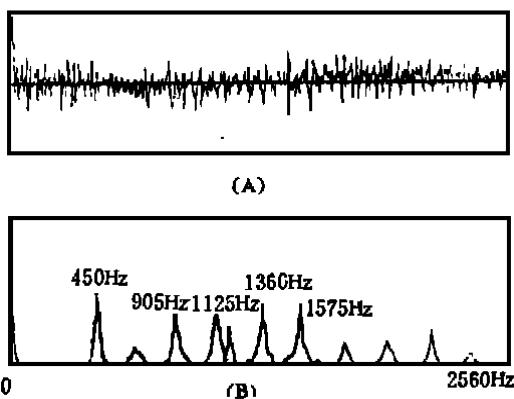


图 7 时域波形图 (A) 和功率谱图 (B)

理, 直接进行自适应消噪。据此, 曾对某航空发动机的前支点轴承, 安装在轴承试验器上进行故障诊断的研究。图 5 是无故障轴承信号的时域波形图和频谱图。图 6 是有故障轴承信号的时域波形图和频谱图。图 7A 是以图 6A 的信号为主输入, 图 5A 的信号为参考输入 (按起始点同相位的原则截取), 自适应消噪处理后输出的时域波形图, 图 7B 是其功率谱图。在谱图上可以看到, 在转子不平衡激振频率 225Hz 的第 2、4、5、6、7 等倍频附近 (450、905、1125、1360、1575Hz、...) 都有突出峰值出现, 其它地方则很少谱峰。这

一现象说明, 尽管在轴承无故障时亦存在这些转子不平衡激起的低阶倍频振动(图 3b 中在这些频率处有较小的谱峰出现), 使消噪器输出信号也有这些分量的抵消, 但由于偏磨故障严重, 这些频率成份的能量在故障状态时远大于正常状态时, 因而消噪后信号谱图在这些频率上峰值更加突出; 同时随机干扰也基本去除(由于平均化处理)。试验结果表明, 非同态自适应消噪能提取出内滚道不圆的故障信息, 可用来精化所测量得到的故障轴承振动信号。

四 结 论

- 1 自适应消噪技术可用来精化所测得的故障轴承信息。
- 2 在自适应滤波中采用 V S 算法较 L M S 算法收敛速度快, 计算量增加不多, 是应用于故障诊断、监控和跟踪的较好的算法。
- 3 采用了同态自适应消噪技术使轴承故障较易发现。使用非同态自适应消噪, 更有助于故障的辨识。
- 4 在利用自适应消噪技术时必须用两个传感器, 主传感器和参考传感器的位置应仔细选择, 使两个传感器感受的干扰信号相关成份较多, 参考传感器应尽量避免拾取信号成份, 两个传感器输入的信噪比差异应较大。
- 5 在进行轴承故障诊断时, 由于非相关噪声较大, 应考虑预滤波措施滤去非相关噪声, 以改善自适应消噪系统的性能, 使轴承的故障信息更为突出。

参 考 文 献

- [1] Widrow, B., "Adaptive Noise Cancelling: Principles and Application", IEEE, Vol. 63, No. 12, December 1975
- [2] Narayan, S. S., "Transform Domain LMS Algorithm", IEEE Trans on Acoustic, Signal Processing, Vol. ASSP-31, No. 3, June 1983
- [3] Griffiths, L. J., "An Adaptive Lattice Structure for Noise-Cancelling Applications", IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing, April 1978
- [4] Harris, R. W., "A Variable Step (VS) Adaptive Filter Algorithm", IEEE Trans on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. ASSP-34, No. 2, April 1986
- [5] Chaturvedi, G. K., "Bearing Fault Detection Using Adaptive Noise Cancelling", Trans. of ASME, Vol. 104, April 1982
- [6] Chaturvedi, G. K., "Adaptive Noise Cancelling and Condition Monitoring", Journal of Sound & Vibration, 1981, 76 (3).
- [7] 顾众, "齿轮箱噪声分析的新方法", 西安交大硕士论文, 1987 年。
- [8] 陆长明等, "自适应消噪技术在故障诊断中的应用", 机械动力学会第三届学术年会, 1987 年 11 月。
- [9] 郑兆宁、向大威, "水声信号被动检测与参数估计理论", 科学出版社, 1983 年 3 月。

Special Column: EXPERIMENTATION TECHNOLOGY

SIMILARITY RULES FOR TRANSFORMATION BETWEEN HIGH- AND LOW-SPEED MODELS OF HIGH PRESSURE AXIAL COMPRESSOR BLADINGS

Zhu Nianguo, Xu Liping, Chen Maozhang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

ABSTRACT

The similarity rules are based on general aerodynamic similarity theory and derived for the transformation between transonic and subsonic flows, transonic and incompressible flows, and subsonic and incompressible flows respectively, as well as in the cases of full disturbance, according to the linear small perturbation theory, the transonic small perturbation theory and the full potential equation. The validity of the similarity transformations under the inviscid assumption is verified by two-dimensional and quasi-three-dimensional numerical simulations. The reasonableness of the basic concepts and assumptions used in the present work, such as local linearization concept, are testified by the numerical experiments as well. This work provides an essential basis for the similarity transformation between the high and low-speed models of high pressure axial compressors, and offers an approach to the profile design of a similarity low-speed model and to application of experimental data of the similarity low-speed model to the high-speed high-pressure axial compressor bladings.

ADAPTIVE NOISE CANCELLING TECHNIQUE AND BEARING FAULT DIAGNOSIS

Li Zhiwei and Fu Yi

(Northwestern Polytechnical University)

ABSTRACT

In this paper, the adaptive noise cancelling technique is used to improve the signal-to-noise ratio of vibrational data induced from a bearing. Besides the LMS (Widrow) algorithm, the VS (Variable Step) algorithm with more rapid convergent speed and with only a modest increase of computational amount is discussed in comparison with the LMS algorithm. The analysis shows that, when the adaptive noise cancelling technique is adopted to monitor and diagnose a mechanical fault, the VS algorithm is quite feasible. The adaptive noise cancelling techniques at the same state and non-same state are also conducive to identify the bearing fault, but the technique at the non-same state is more applicable than that at the same state.

SIGNAL ANALYSIS TECHNIQUE FOR SURGE-DETONATION OF A TURBOJET ENGINE

Zheng Keyang (Beijing University of Aeronautics and Astronautics)

Ge Guohuang (Le Yang Aeroengine Research Institute)

ABSTRACT

A diagnosis and signal analysis method with FFT signal processor is provided for on surge-detonation of a twin-spool turbojet engine. The experimental investigation surge-detonation under a turbulent dynamic inlet distortion conditions has been completed by this method and the measurement system and test equipment are described. From the FFT analysis are drawn the conclusions: Most of surges in the turbojet compressor