

面向故障诊断的广义频率响应函数的在线估计方法

吴立勋¹, 管桦², 魏瑞轩¹

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038; 2. 空军工程大学科研部, 陕西西安 710051)

摘要: 基于非线性谱分析的故障诊断是一种新的故障诊断理论。针对该方法中广义频率响应函数的在线估计问题, 研究了利用 Volterra 时域核在线得到被测系统的广义频率响应函数的新方法。基于 Volterra 系统的鲁棒总体均方最小自适应辨识算法, 提出了一种新的广义频率响应函数的在线估计方法。该方法能够有效减少广义频率响应函数的在线计算量, 而且实现简便, 鲁棒性强。仿真实验证明了该方法的有效性。

关键词: 非线性系统; 广义频率响应函数; 在线估计

中图分类号: TP271 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)05-0078-03

基于非线性谱分析的故障诊断是一种新的非线性系统故障诊断技术^[1-2]。这一技术的基础和核心是利用对系统输入、输出信号的采样数据, 实现对被测系统的广义频率响应函数(GFRFs)的准确辨识。在实际应用中, 通常希望能够实现 GFRFs 的在线估计, 也希望估计算法能够有效克服叠加在输入、输出观测数据中的噪声干扰。传统的 GFRFs 直接频域辨识方法需要巨大的计算量和实验数据, 不太适合于在线应用。为此, 本文基于 Volterra 系统的鲁棒总体均方最小自适应辨识算法, 提出了一种新的广义频率响应函数的在线估计方法。该方法有效减少了在线计算量, 而且实现简便, 鲁棒性强。仿真实验说明了该方法的有效性。

1 基于非线性谱分析的故障诊断

对于单输入单输出因果定常非线性系统, 其输入输出关系在时域可以唯一地用 Volterra 泛函级数表示^[3], 见式(1), $y_n(t)$ 见式(2)。

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_n(t) \quad (1) \quad y_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(t - \tau_1, \dots, t - \tau_n) \prod_{i=1}^n u(\tau_i) d\tau_i \quad (2)$$

在分析实际系统时, 通常可用离散截断形式的 Volterra 级数模型对系统做近似描述, 即

$$y(k) = \sum_{n=1}^N y_n(k) = \sum_{n=1}^N \sum_{m_1=0}^{M-1} \dots \sum_{m_n=0}^{M-1} h_n(m_1, m_2, \dots, m_n) \prod_{i=1}^n u(k - m_i) \quad (3)$$

式中: N 为模型阶次; M 为记忆长度。对式(3)进行 Fourier 变换得到离散的频域 Volterra 级数模型为

$$Y(\omega) = H_1(\omega)U(\omega) + \sum_{\substack{\omega_1, \omega_2 \\ \omega_1 + \omega_2 = \omega}} H_2(\omega_1, \omega_2)U(\omega_1)U(\omega_2) + \dots + \sum_{\substack{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N \\ \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_N = \omega}} H_N(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N)U(\omega_1)U(\omega_2) \dots U(\omega_N) \quad (4)$$

式中: $H_n(\omega_1, \dots, \omega_n)$ 称为第 n 阶 Volterra 频域核, 或称为第 n 阶广义频率响应函数(GFRFs), 它能够描述系统非线性传递特性的频谱特征, 具有物理意义明确、直观的特点。假定系统非线性行为的变化对故障是敏感

收稿日期: 2004-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60304004)

作者简介: 吴立勋(1967-), 男, 山西临汾人, 讲师, 主要从事飞行控制研究。

的,由于系统故障前后传递特性的非线性变化能够通过 GFRF's 被准确地反映,因此,通过分析系统工作过程中 GFRF's 成分的变化,即可判断系统是否处于故障状态。其中 GFRF's 估计是该方法的基础,即利用被测系统的输入输出观测数据估计得到系统在各种状态下的标准 GFRF's 和当前工作状态下的 GFRF's;而后,进行广义频率响应函数的谱特征提取,得到被测系统在当前状态下的 GFRF's 谱特征信息。最后,利用模式识别技术进行故障的判别。

传统的 GFRF 估计方法是对广义频率响应函数进行直接频域辨识。一种简化的频域辨识方法是使用人工设计的基频为 ω_0 的正弦组合信号作为被测系统的输入,对系统的输入信号 $\{U(k\omega_0)\}$ 、输出信号 $\{Y(k\omega_0)\}$ 进行同步采样,依据文献[4]中给出的方程,即可构成一个能够直接计算出广义频率响应函数的超定线性方程组。然而,构造这样一个方程组,需要许多次的实验和大量的数据,求解的计算开销也非常大。另外,还要进行输入信号设计,这就大大限制了这一技术的在线工程应用。

2 GFRF's 的在线估计

对于 Volterra 核的估计,一种有效的可在线实现的方法是鲁棒总体均方最小自适应辨识算法^[5]。基于该算法,可首先在线估计出非线性系统的 Volterra 时域核,进而利用多维 Fourier 变换得到广义频率响应函数的估计。从而可方便地实现 GFRF's 的在线估计。

设非线性系统用记忆长度为 M 的 N 阶 Volterra 模型表征。考虑 Volterra 级数的对称性,定义系统在 k 时刻的输入观测向量为 $X_V(k) = [X_1^T(k) X_2^T(k) \cdots X_N^T(k)]^T$,其中, $X_i(k)$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 是 Volterra 系统在 k 时刻的第 i 阶输入向量,它由所有的产生第 i 阶输出 $y_i(k)$ 的输入乘积项按顺序构成。相应地,定义系统的 Volterra 核向量为: $H_V = [h_1^T, h_2^T \cdots h_N^T]^T$,其中 h_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 是第 i 阶 Volterra 核向量,如: $h_2 = [h_2(0, 0) \cdots h_2(0, M-1) h_2(1, 1) \cdots h_2(M-1, M-1)]^T$ 。定义 $W = [H_V^T, -1]^T$ 为增广 Volterra 核向量, $Z(k) = [X_V^T(k), \tilde{d}(k)]^T$ 为增广观测向量。 $\tilde{d}(k)$ 为系统的实际输出, $y(k)$ 为 Volterra 模型的输出,令 $\varepsilon(k) = \tilde{d}(k) - y(k)$ 为残差,且 $\varepsilon(k) = Z^T(k)W(k)$ 。

文献[5]建立了一种 Volterra 系统的鲁棒总体均方最小自适应辨识算法,核参数的修正公式为

$$W(k+1) = W(k) - \mu \varepsilon(k) \frac{Z(k)W^T(k)W(k) - \varepsilon(k-1)W(k)}{\|W^T(k)W(k)\|^2}$$

设系统在平稳随机信号的激励下,利用测量的输入、输出观测数据,构造输入、输出观测向量 $X_i(k)$ 和 $y(k)$,由时域的辨识方法获得非线性系统的时域 Volterra 核 h_i ,然后对时域核进行多维 Fourier 变换,即可得到频域核: $H_n(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) = F(h_n(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)) = \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \prod_{i=1}^n e^{-j\omega_i \tau_i} d\tau_i$ 。

由于 Volterra 时域核可实现在线估计,通过上述方法,就可方便地实现 Volterra 频域核的在线估计。

3 仿真研究

考虑如下非线性系统 $y(n) = 0.62u(n) - 0.25u(n-1) + 0.64u(n-2) + 0.82u^2(n) - 1.48u(n-1)u(n-2)$ 。其 1 阶、2 阶 GFRF 的解析计算公式为 $H_1(f) = 0.62 - 0.25e^{-j2\pi f} + 0.64e^{-j4\pi f}$; $H_2(f_1, f_2) = 0.82 - 0.74(e^{-j2\pi(f_1+2f_2)} + e^{-j2\pi(2f_1+f_2)})$ 。利用此式可以计算得到系统真实的 1 阶、2 阶广义频率响应函数。仿真实验利用本文提出的 GFRF's 的在线估计方法估计给定系统的广义频率响应函数,并与解析计算得到的真实的广义频率响应函数进行比较,以考察本文方法的有效性。

系统输入信号为均匀分布的白噪声信号,在输入、输出信号中叠加相互独立的高斯白噪声,设输入信噪比与输出信噪比相同。图 1 至图 3 则分别给出了系统真实的 1 阶、2 阶 GFRF's 和由本文方法估计的 GFRF's。从仿真结果可看出,利用本文提出的新方法估计得到的 GFRF's 与系统真实的 GFRF's 是基本一致的。这说明本文提出的广义频率响应函数的在线估计方法能够实现噪声环境下广义频率响应函数的较高精度的估计,能够满足故障诊断的需要。

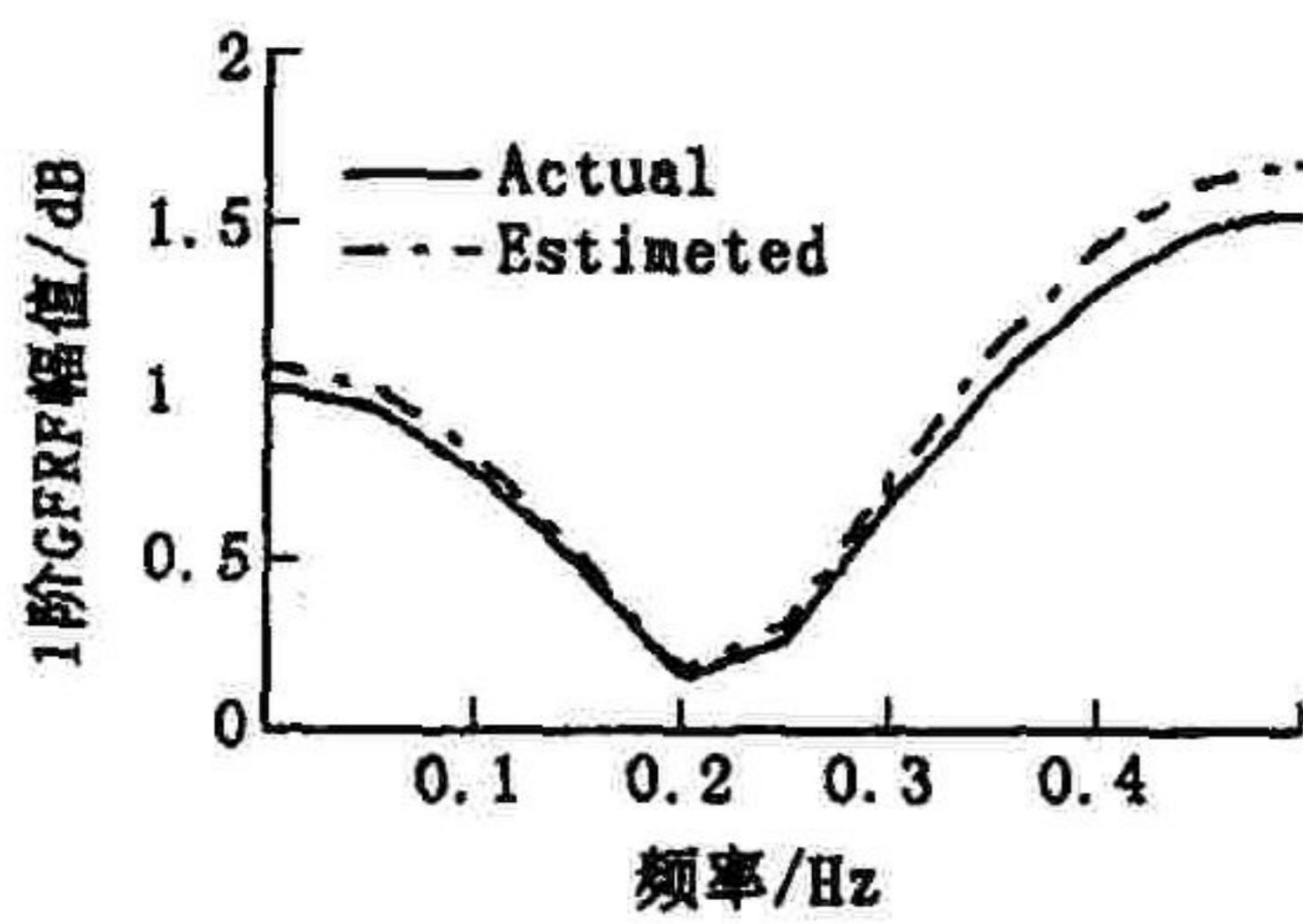


图1 1阶GFRF's幅频

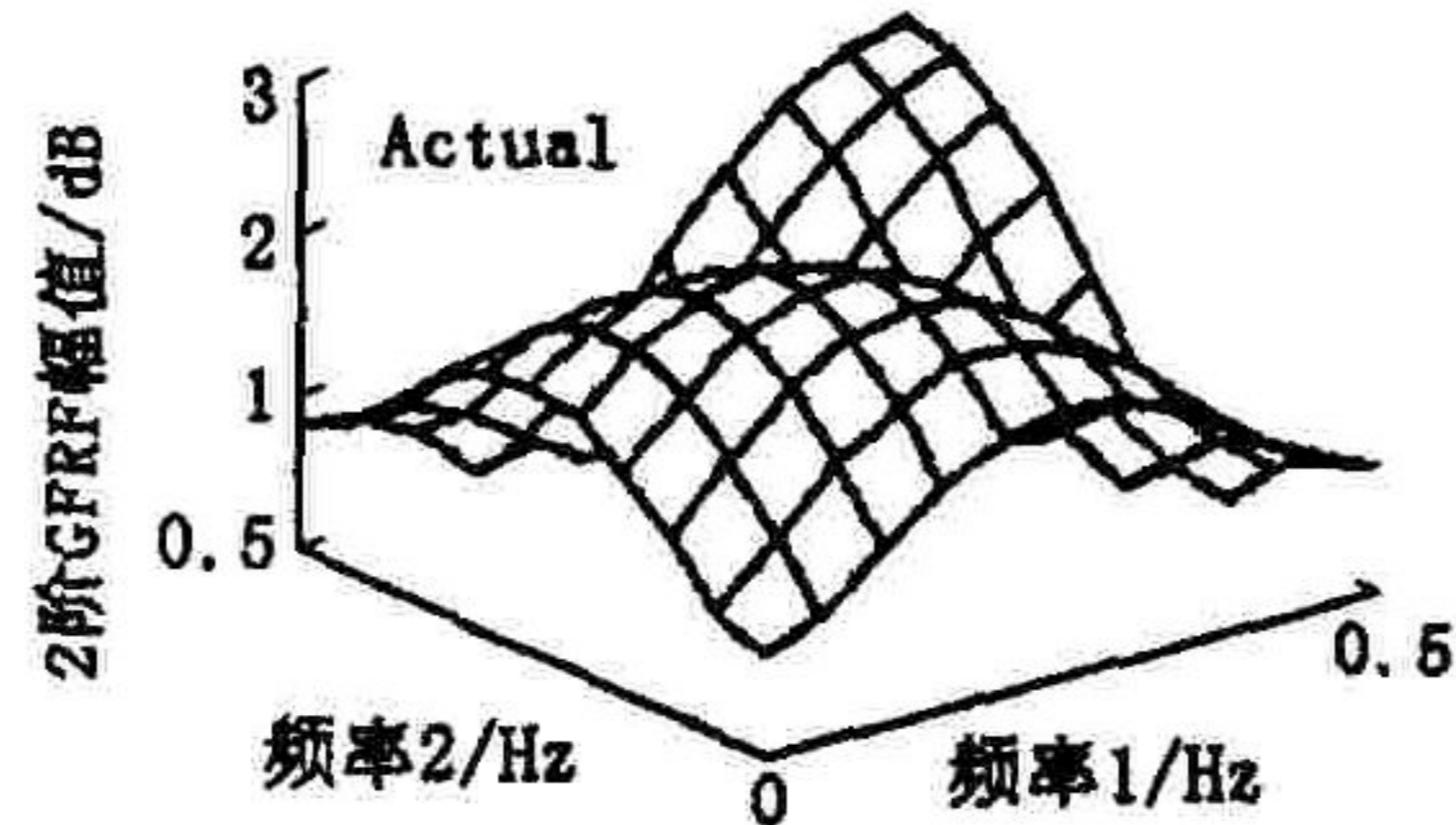


图2 2阶GFRF's真实的幅频

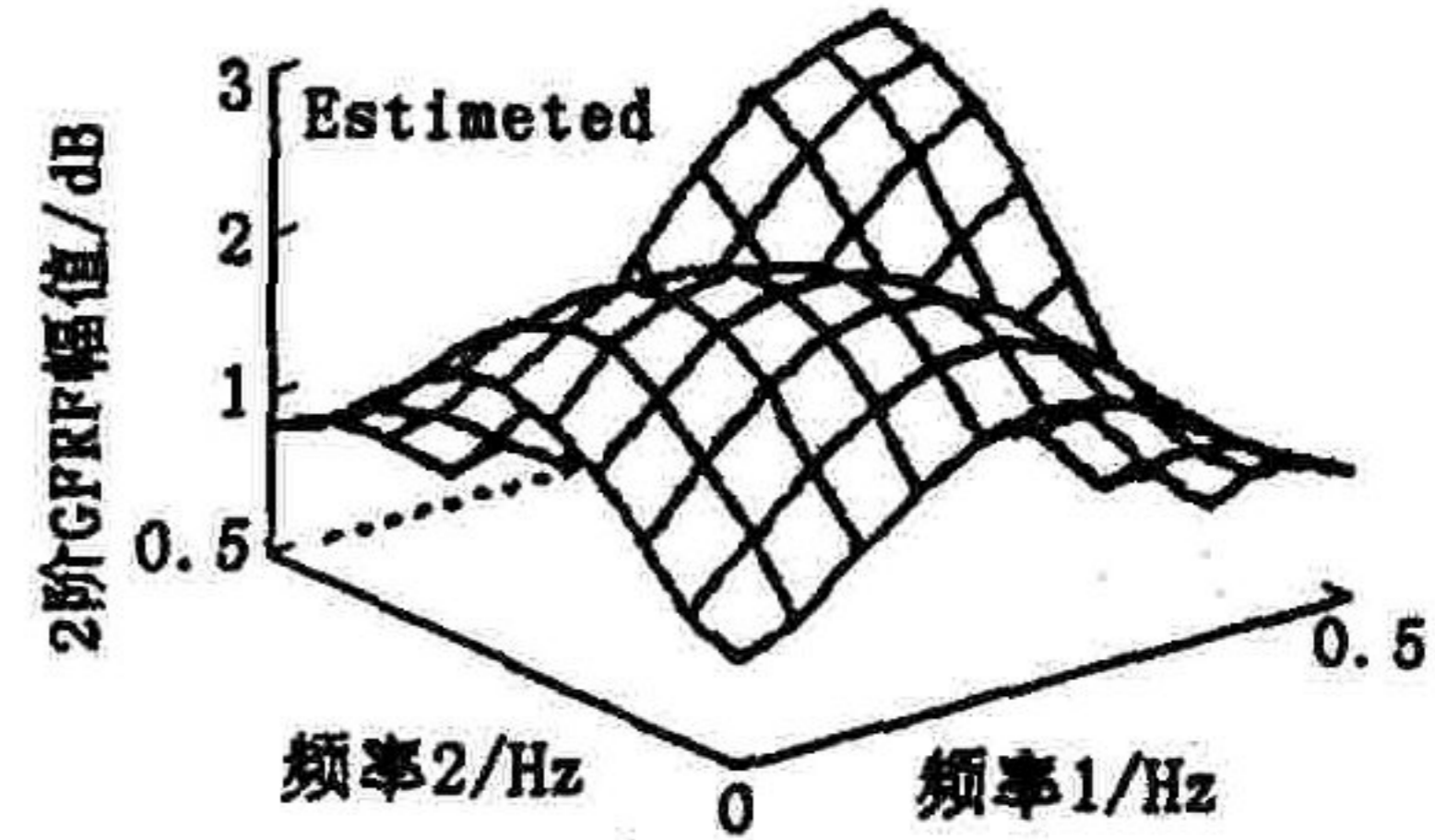


图3 本文估计的2阶GFRF's幅频

4 结论

广义频率响应函数的在线估计是基于非线性谱分析的故障诊断技术的关键环节之一,传统的方法需要大量的计算和数据,不适合于在线应用。本文针对这一问题,基于 Volterra 系统的鲁棒总体均方最小自适应辨识算法,提出了广义频率响应函数在线估计的一种新方法。该方法能够有效减少广义频率响应函数的在线计算量,而且实现简便,对基于非线性谱分析的故障诊断技术的工程应用有一定的意义。

参考文献:

- [1] 焦李成. 非线性系统故障诊断的伏尔泰拉泛函理论[J]. 西安交通大学学报,1988,22(3): 79 - 85.
- [2] 唐晓泉,非线性系统频谱分析理论及其在故障诊断中的应用研究[D]. 西安:西安交通大学,1999.
- [3] Schetzen M. *The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems*[M]. Wiley, 1980.
- [4] Han Chongzhao, Wang Liqi, Tang Xiaoquan, et al. Identification of Nonparametric GFRF Model for a Class of Nonlinear Dynamic Systems[J]. 控制理论与应用,1999,16(6):816 - 825.
- [5] 魏瑞轩,韩崇昭. 基于 Volterra 级数模型的非线性系统的鲁棒自适应辨识[J]. 西安交通大学学报,2001,35:1024 - 1028.
- [6] Widrow B, Walach E. 自适应逆控制[M]. 韩崇昭,刘树棠. 西安:西安交通大学出版社,2000.
- [7] Haykin S. *Adaptive Filter Theory*[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1991.

(编辑:姚树峰)

An Online Estimation Method of Generalization Frequency

Response Function for Fault Diagnosis

WU Li - xun¹, GUAN Hua², WEI Rui - xuan¹

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. Science Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051)

Abstract: The fault diagnosis based on nonlinear spectral analysis is a new fault diagnosis theory. In allusion to the online estimation problem of generalized frequency response functions in this fault diagnosis method, a new method is studied for obtaining generalized frequency response functions of the detected system by using Volterra kernels in time domain. Based on the robust Volterra total least mean square adaptive identification algorithm, a new online estimation method for generalized frequency response functions is presented in this paper. The presented method can be used to efficiently reduce the online computation requirements of generalized frequency response functions, and it can be easily realized. The simulation results indicate that the presented method is efficient.

Key words : nonlinear system; general frequency response functions; online estimation