

文章编号: 1001-0920(2006)07-0726-04

飞机颤振模态参数辨识的频域广义整体最小二乘算法

唐 炜, 史忠科, 李洪超

(西北工业大学 自动化学院, 西安 710072)

摘 要: 采用一种适用于噪声环境的广义整体最小二乘算法, 准确地辨识飞机的颤振模态参数。该算法结合有理传递函数模型, 将带噪系统的辨识问题转化为广义整体最小二乘问题。利用线性的广义奇异值分解求解模型系数, 避免了非线性优化的复杂计算。通过迭代法更新加权项, 获得了接近于极大似然估计的辨识效果。最后利用试飞试验数据辨识飞机的模态参数, 验证了该方法的有效性。

关键词: 参数辨识; 广义整体最小二乘; 试飞试验

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Generalized Total Least Squares in Frequency Domain for Aircraft Flutter Modal Parameter Identification

TANG Wei, SHI Zhong-ke, LI Hong-chao

(Department of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China. Correspondent: TANG Wei, Email: attracker@163.com)

Abstract: A generalized total least square algorithm in frequency domain is adopted for aircraft flutter modal parameter identification under noisy environment. Combining with a rational transfer function model, the identification of black box system with noisy data is transformed into of a generalized total least square problem, and the solution is solved by generalized singular value decomposition to avoid the complex nonlinear optimization. A nearly maximum likelihood properties can be achieved by updating weighted iterative generalized total least squares. The simulation with real flight test data shows the efficiency of the algorithm.

Key words: Parameter identification; Generalized total least squares; Flight test

1 引 言

颤振是飞机飞行过程中一种不稳定的气动弹性现象。为避免颤振引起的灾难性后果, 通常利用颤振试飞的试验数据辨识飞机结构的模态参数(频率和阻尼系数), 并以此为依据进行飞机的颤振飞行边界预测, 提供飞机的适航条件。由于飞行试验中不可避免地会受到大气紊流激励的影响, 作为一种不可测激励, 它所产生的随机响应将作为过程噪声包含在测量的响应信号中。传统的辨识方法在处理噪声较大的试飞数据时, 很难准确辨识模态参数, 尤其是阻尼系数这类对噪声较为敏感的参数^[1]。

为解决上述问题, 一方面可借助于滤波和去噪方法, 减少噪声对辨识结果的影响^[2,3]; 另一方面则希望采用更为有效的辨识算法, 以提高辨识精度。文献[4]采用频域极大似然估计法(ML)辨识模态参数, 并取得了成功。但是极大似然估计的非线性损失函数, 需要借助于优化迭代算法求取极小值点, 在噪声较大的情况下, 很难选取合适的初始值, 使算法每次都收敛到全局最优值。

本文采用广义整体最小二乘算法^[5,6]解决系统辨识问题, 利用线性的广义整体最小二乘方法估计模型系数, 避免了复杂的非线性优化计算和对初始

收稿日期: 2005-06-06; 修回日期: 2005-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(69925306); 航空科技基金项目(01D53010)。

作者简介: 唐炜(1977—), 男, 湖北襄樊人, 博士生, 从事系统辨识、信号处理的研究; 史忠科(1956—), 男, 陕西岐山人, 教授, 博士生导师, 从事控制理论与工程、系统工程等研究。

值的依赖; 同时将噪声的协方差矩阵引入损失函数, 通过迭代更新加权项获得了接近于极大似然估计的辨识效果

2 问题描述

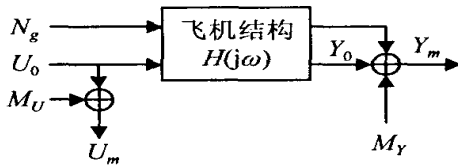


图 1 颤振试飞试验的随机模型

颤振试飞试验的随机模型如图 1 所示 其中 U_m 和 Y_m 是包含各类噪声的输入和输出测量信号; U_0 表示对飞机结构施加的人工激励; N_g 为大气紊流激励, 由于紊流激励无法测量, 在此将其产生的激励响应作为输出端的过程噪声; Y_0 为输出的振动加速度信号; M_U 和 M_Y 是传感器产生的测量噪声 频域内有如下关系成立:

$$\begin{aligned} U_m(j\omega) &= U_0(j\omega) + N_U(j\omega) = \\ &U_0(j\omega) + M_U(j\omega), \\ Y_m(j\omega) &= Y_0(j\omega) + N_Y(j\omega) = \\ &Y_0(j\omega) + M_Y(j\omega) + H_0(j\omega)N_g(j\omega). \end{aligned}$$

将上式中的频域噪声表示为复数随机向量的形式, 有

$$\Delta Z = [N_U(j\omega) \quad N_Y(j\omega)]^T, \quad (1)$$

于是有

$$Z_m(j\omega) = Z_0(j\omega) + \Delta Z(j\omega). \quad (2)$$

其中

$$\begin{aligned} Z_0 &= [U_0(j\omega) \quad Y_0(j\omega)]^T, \\ Z_m &= [U_m(j\omega) \quad Y_m(j\omega)]^T. \end{aligned}$$

为简化问题, 对噪声 $\Delta Z(j\omega)$ 作如下假设^[7]:

假设 1 $\Delta Z(j\omega)$ 是均值为零且服从复数正态分布的随机向量, 其协方差矩阵为

$$E(\Delta Z(j\omega)\Delta Z^H(j\omega)) = C_Z(j\omega) = \begin{bmatrix} \sigma_U^2(j\omega) & \sigma_{UV}^2(j\omega) \\ \sigma_{UV}^2(j\omega) & \sigma_Y^2(j\omega) \end{bmatrix}.$$

对于任意的 k 和 l , 有

$$E(\Delta Z(j\omega)\Delta Z^T(j\omega)) = 0$$

其中: 上标 H 表示矩阵的共扼转置, T 表示转置

假设 2 频域内每个离散频率点的 ΔZ 独立同分布, 当 $k \neq l$ 时, 有

$$E(\Delta Z(j\omega)\Delta Z^H(j\omega)) = 0$$

3 频域广义整体最小二乘辨识算法

3.1 参数模型

采用有理传递函数模型描述飞机的结构, 有

$$\begin{aligned} H_0(j\omega, p) &= \frac{N(j\omega, \beta)}{D(j\omega, \alpha)} = \\ &\frac{\beta_n(j\omega)^n + \dots + \beta_1(j\omega) + \beta_0}{\alpha_d(j\omega)^d + \dots + \alpha_1(j\omega) + \alpha_0} \end{aligned} \quad (3)$$

其中: α 和 β 表示多项式的系数, n 和 d 表示多项式的阶数, $p = [\alpha_0, \dots, \alpha_d, \beta_0, \dots, \beta_n]$

定义 p_r ($r = 1, 2, \dots, d$) 为式 (3) 中传递函数的极点, 则模态频率和阻尼系数可表示为

$$f_r = \text{Im}(p_r)/2\pi, \zeta_r = -\text{Re}(p_r)/|p_r| \quad (4)$$

显然, 准确的传递函数估计是模态参数辨识的前提 本文将如何准确辨识传函模型的参数作为研究的重点

3.2 频域广义整体最小二乘

系统的真实输入输出满足如下关系:

$$Y_0(j\omega) = H_0(j\omega)U_0(j\omega).$$

由式 (3) 知

$$Y_0(j\omega)D(j\omega, \alpha) - U_0(j\omega)N(j\omega, \beta) = 0 \quad (5)$$

将其写成矩阵形式, 有

$$A_0 p = 0 \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} A_0 &= [a_{01}^H \quad a_{02}^H \quad \dots \quad a_{0F}^H]^H, \\ a_{0k} &= Z_0^T(j\omega)S(j\omega), \\ S(j\omega) &= \text{block diag}(-[1 \quad \dots \quad (j\omega)^n], \\ &[1 \quad \dots \quad (j\omega)^d]). \end{aligned}$$

实际采用观测的噪声数据估计参数, 将式 (6) 改写为

$$A p = (A_0 + \Delta A) p = 0 \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta A &= [\Delta a_1^H \quad \Delta a_2^H \quad \dots \quad \Delta a_F^H]^H, \\ \Delta a_k &= \Delta Z^T(j\omega)S(j\omega). \end{aligned}$$

系数矩阵中含有误差的线性方程, 可采用整体最小二乘类方法求解 由于普通整体最小二乘无法获得参数的一致估计, 这里将广义整体最小二乘 (GTL S) 方法^[8]引入频域内, 其定义如下:

$$\arg \min_{A, x} (A - \hat{A})C^{-1} \frac{2}{F}, Ax = 0, x^T x = 1 \quad (8)$$

其中: C 为 A 的协方差矩阵的平方根, 即 $C^H C = E\{\Delta A^H \Delta A\}$; \hat{A} 为 A_0 的估计值

采用 Lagrange 乘法, 可将式 (8) 等效地表述为如下形式:

$$\arg \min_x \frac{x^T A^H A x}{x^T C^H C x}, x^T x = 1 \quad (9)$$

假设 $\min \frac{x^T A^H A x}{x^T C^H C x} = \lambda$, 则式 (9) 中的 x 可通过如下线性方程组求得:

$$A^T A x = \lambda C^T C x, x^T x = 1 \quad (10)$$

为了求解式(10),可对矩阵对\$(A, C)\$进行广义奇异值分解(GSVD)^[9],其最小的广义奇异值所对应的右特征向量即为待求的解.与极大似然估计相比,线性方法求取极小值点避免了非线性优化的复杂迭代计算和对初始值的依赖.

为将式(9)表述为更直观的形式,定义

$$\begin{aligned} \epsilon(j\omega) &= a_k x = \\ Y(j\omega)D(j\omega, p) - U(j\omega)N(j\omega, p), \\ \Delta W_{ML}^2(j\omega) &= E\{\Delta\epsilon(j\omega)\Delta\epsilon(j\omega)^H\} = \\ \sigma_v^2 |D(j\omega, p)|^2 + \sigma_w^2 |N(j\omega, p)|^2 - \\ 2\text{Re}(\sigma_w^2 N(j\omega, p)D(j\omega, p)^H). \end{aligned}$$

则式(9)中的损失函数可改写为

$$K_{\text{GTLs}}(p, Z_m) = \frac{\sum_{k=1}^F |\epsilon(j\omega)|^2}{\sum_{k=1}^F |W_{ML}(j\omega)|^2} = \frac{\sum_{k=1}^F |Y(j\omega)D(j\omega, p) - U(j\omega)N(j\omega, p)|^2}{\sum_{k=1}^F \left\{ \sigma_v^2 |D(j\omega, p)|^2 + \sigma_w^2 |N(j\omega, p)|^2 - 2\text{Re}(\sigma_w^2 N(j\omega, p)D(j\omega, p)^H) \right\}}. \quad (11)$$

其中\$F\$为离散频率点的个数.

3.3 噪声方差估计

利用式(11)计算模型系数之前,应先由观测的频域数据估计输入和输出端的噪声方差及协方差.由于受到飞行试验数据样本个数的限制,在此假设随机噪声满足频域内的均方遍历性,对单一样本分段后利用谱分析估计噪声方差.飞行试验的输入为已知的人工激励信号,为简化问题,只考虑输出端存在噪声(测量噪声和紊流激励产生的过程噪声).即假设\$\sigma_w^2 = 0, \sigma_v^2 = 0\$.

为估计输出端噪声方差,由第2节的假设可知

$$\begin{aligned} \sigma_v^2(\omega) &= E\{N_Y(\omega)N_Y^H(\omega)\} = \\ E\{N_Y(\omega)[Y^H(\omega) - Y_0^H(\omega)]\} &= \\ E\{N_Y(\omega)Y^H(\omega)\} &= E\{YY^H - Y_0Y_0^H\} = \\ E(YY^H) - H_0(j\omega)E(XY^H). \end{aligned} \quad (12)$$

当输出端存在噪声时,可采用\$H_1\$谱方法估计\$H_0\$.将估计值\$\hat{H}_0(j\omega)\$代入式(12),可得输出信号的噪声方差的估计值

$$\hat{\sigma}_v^2(\omega) = \left(\sum_{i=1}^M Y(j\omega)Y^H(j\omega) - \hat{H}_0(j\omega) \sum_{i=1}^M X(j\omega)Y^H(j\omega) \right) / M = S_{YY}(j\omega) - \hat{H}_0(j\omega)S_{XY}(j\omega).$$

3.4 加权项的选取

可将式(11)视为一个以分母为加权项的加权

最小二乘的损失函数.显然,每个频率点上都有相同的权值,使得损失函数过分强调高频段误差,导致低频段的估计并不理想.因此,选择适当的加权项是提高估计结果的关键^[10].极大似然估计的权值常被作为最优权值引入式(11),有

$$K_{\text{WGTLs}}(p, Z_m) = \frac{\sum_{k=1}^F W_{ML}^{-2}(j\omega) |\epsilon(j\omega)|^2}{\sum_{k=1}^F W_{ML}^{-2}(j\omega)W_{ML}(j\omega)^2}. \quad (13)$$

由于\$W_{ML}^{-1}(j\omega)\$的值依赖于待估计值的系数向量\$p\$,这里采用类似于线性加权最小二乘的迭代法,将前一步的参数估计值用于计算当前步的加权项,其迭代损失函数为

$$K_{\text{WGTLs}}(p^i, Z_m) = \frac{\sum_{k=1}^F W_{ML}^{-2}(j\omega, p^{i-1}) |\epsilon(j\omega, p^i)|^2}{\sum_{k=1}^F W_{ML}^{-2}(j\omega, p^{i-1})W_{ML}(j\omega, p^i)^2}. \quad (14)$$

其中:\$K_{\text{WGTLs}}(p^i, Z_m)\$表示第\$i\$步迭代的损失函数,\$p^{(i-1)}\$表示前一步的参数估计值.

考虑算法的收敛性,当\$i \rightarrow \infty\$时,\$p^{(i-1)} = p^{(i)}\$.代入式(14),有\$K_{\text{WGTLs}}^{(i)} = K_{ML}/F\$.其中\$K_{ML}\$为极大似然估计的损失函数.

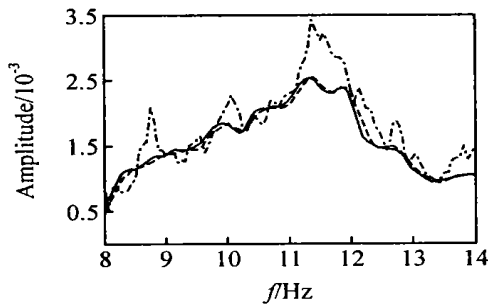
显然,当迭代次数趋于无穷时,迭代加权广义整体最小二乘与极大似然估计的损失函数是等效的.在满足渐近收敛的条件下,迭代次数越多,越接近极大似然估计的辨识结果.鉴于迭代加权广义整体最小二乘良好的收敛特性,可将其用于极大似然估计的初始值选取.

4 实例分析

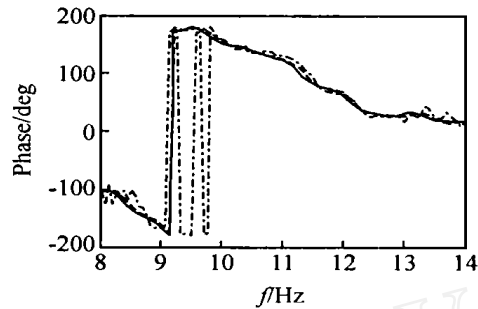
现以某型飞机的颤振试飞试验数据为例,验证本文提出算法的有效性.输入为人工激励信号,输出是从测点采集的加速度信号.采样频率为256 Hz,数据长度为4 096.待辨识的传递函数的频段范围限制在8 Hz~14 Hz,飞机的不稳定模态主要分布在该频带内.

采用频域广义整体最小二乘算法(FGTLs),对飞机结构的传递函数进行频域辨识(\$n = d = 28\$).选择极大似然估计的加权项为权值,经过8次迭代得到的辨识结果如图2实线所示.图中点线是原始试飞数据估计的频率响应函数(FRF).为了便于比较,通过飞机结构的气动仿真模型,给出了飞机结构传递函数的理论曲线(虚线).FGTLs的参数辨识结果与理论值的比较如表1所示.

由图2可见,由于受噪声的影响,原始飞行数据估计的频率响应效果较差;而本文采用频域辨识算



(a) 幅值曲线



(b) 相位曲线

图 2 频响函数、FGILS 辨识的传函与理论传函的比较

表 1 参数辨识结果与理论值的比较

| 模态参数 | f_1/Hz | ξ_1 | f_2/Hz | ξ_2 | f_3/Hz | ξ_3 |
|-------|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| FGTLS | 9.82 | 0.0657 | 11.27 | 0.0304 | 11.93 | 0.0218 |
| 理论值 | 9.71 | 0.0524 | 11.18 | 0.0451 | 12.10 | 0.0181 |

法,在噪声环境下获得了与理论值相吻合的传递函数估计结果。表 1 利用 FGTL S 算法得到了接近于理论值的参数辨识结果,进一步验证了本文算法的有效性。

5 结 论

本文采用频域广义整体最小二乘辨识算法,准确地辨识飞机模态参数。同极大似然估计相比,该算法采用线性方法求解传递函数模型的系数,计算量小且不依赖于初始值,适合于在线辨识。由于它能获得接近于极大似然法的辨识效果,可用于极大似然法的初始值选取。

参考文献(References)

[1] Ghiringhell L G, Lanz M, Mantegazza P. A

Comparison of Methods Used for the Identification of Flutter from Experimental Data [J]. *J of Sound and Vibration*, 1987, 119(1): 39-51.

[2] Tang W, Shi Z K. Wavelet Denoising of Flight Flutter Testing Data for Improvement of Parameter Identification [J]. *Chinese J of Aeronautics*, 2005, 18(1): 72-77.

[3] Fero E, Brenner M, Paduano J, et al. Time-frequency Analysis Transfer Function Estimation and Application to Flutter Clearance [J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1998, 21(3): 375-382.

[4] Schoukens J, Pintelon R, Renneboog J. A ML Estimator for Linear and Non-linear Systems — A Practical Application of Estimation Techniques in Measurement Problems [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 1988, 37(3): 10-17.

[5] Balogh L, Kollar I. Generalization of a Total Least Squares Problem in Frequency-domain System Identification [J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(6): 1353-1357.

[6] Pintelon R. Analyzes, Development and Applications of TLS Algorithms in Frequency Domain System Identification [J]. *SIAM J on Matrix Analysis and Applications*, 1998, 19(4): 983-1004.

[7] Vandersteen G, Van Hamme H, Pintelon R. General Framework for Asymptotic Properties of Generalized Weighted Nonlinear Least Squares Estimators with Deterministic and Stochastic Weighting [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(10): 1501-1507.

[8] Huffel V S, Vandewalle J. The Total Least Squares Problem: Computational Aspects and Analysis [A]. *Frontiers in Applied Mathematics* [M]. Philadelphia: SIAM, 1991.

[9] Gene H G, Van Loan C. *Matrix Computations* [M]. Third Edition. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 1996.

[10] Pintelon R, Guillaume P, Rolain Y, et al. Parametric Identification of Transfer Functions in the Frequency Domain — A Survey [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(11): 2245-2260.

(上接第 725 页)

[33] 张嘉祥,王洁霞,程淑芬,等.电弧放电烧蚀发汗效果试验研究[J]. *系统工程与电子技术*, 1996, 18(4): 78-81. (Zhang J X, Wang J X, Cheng S F, et al. Experimental Research of Transpiration Effects in Arc Discharge Ablation [J]. *System Engineering and Electronics*, 1996, 18(4): 78-81.)

[34] 杨学实.气悬浮列车研究的新进展[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2003, 3(3): 66-70. (Yang X S. New Development in Research of Air Suspension Trains [J]. *J of Transportation System Engineering and Information Technology*, 2003, 3(3): 66-70.)