

# 基于小波的主燃油控制通道动态奇异数据辨识

王文栋<sup>1</sup>, 陈策<sup>1</sup>, 张生良<sup>2</sup>, 谢寿生<sup>1</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空军第一研究所, 北京 100076)

**摘要:**应用小波异常检测理论和误差滤除理论,对奇异数据分解重构并得到奇异点的位置和大小,进而对其动态模型分段进行最小二乘辨识。结果表明,小波分析方法不需要过程误差的先验知识,能够同时完成奇异数据的检测及相应误差的滤除任务,完全适用于此类数据的分析过程。

**关键词:**电子综合调节器;小波分析;奇异点;最小二乘辨识

**中图分类号:**V23 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2003)06-0020-03

小波分析是最近十多年来迅速发展起来的一种时频信号分析理论和工具,它突破了傅立叶分析在时域上没有任何分辨力的缺陷,在时域和频域上同时具有良好的局部化性质,可以对指定频带和时段内的信号成分进行任意尺度的分析,已广泛应用于许多领域。

通过某型航空涡扇发动机电子综合调节器的半实物仿真平台,采集得到其主燃油控制通道的动态响应数据异常,即存在信号奇异点。如何处理该奇异数据,对于系统动态模型的分析辨识,以及控制器数字化的实现有重要意义<sup>[1-2]</sup>。本文应用异常检测基本理论,基于小波分析对于信号奇异点非常敏感这一特点,对使用阈值除噪后的数据进行检测,得到突变点的位置和大小,进而对数据分段进行线性辨识,结果令人满意。

## 1 小波异常检测与误差滤除

异常数据在数学上可以归结为信号奇异点问题,用 Lipschitz 指数来刻画,小波分析对于信号奇异点非常敏感。关于小波变换和奇异性之间的关系,本文只给出主要结论<sup>[3-5]</sup>:

1) 信号的小波变换特性:常用信号的 Lipschitz 指数是大于 0 的,因而其模极大值点的幅度随尺度的减小而减小,在较小的  $k$  个尺度上,模极大值点个数基本相等。

2) 误差的小波变换特性:假设  $e(t)$  为实的、广义平稳随机误差,  $e(t) \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $\sigma^2$  为  $e(t)$  的方差,  $W_\varepsilon(a, b)$  是  $e(t)$  的连续小波变换,那么  $E(|W_\varepsilon(a, b)|^2) \propto 1/a$ 。对于  $e(t) \sim N(0, \sigma^2)$  的“白”误差信号,则其几乎处处是奇异的,一致 Lipschitz 指数为  $(-1/2)^-$ ,  $\varepsilon > 0$ ,因而随  $a$  的减小,误差的局部模极大值逐渐增大,这和信号截然不同,所以根据这些小波变换特性,可实现信号和误差的滤波。

3) 异常数据的小波变换特性:异常数据往往可以分解为许多阶跃信号和脉冲信号的叠加,由于小波变换和信号奇异性之间非常敏感的关系,此时,在突变点 Lipschitz 指数  $\ll 1$ ,据此可以很好地检测到信号突变点的位置和大小,从而实现异常数据的检测。

信号和误差在小波变换下的变化规律不同,通过小波变换将信号分解为位于不同频带和时段内的成分,如果误差信号  $e(t)$  和真实信号  $f(t)$  位于不同的频带内,则只要将误差所对应的那一阶小波系数按阈值进行处理,然后按重构公式对信号进行重构就可以达到信号滤波的目的<sup>[6-7]</sup>。

设一维输入信号  $f(t)$  由于物理分辨率有限,可假定  $f(t) \in V_{\mathcal{H}}$ ,且  $f(t) = A_{\mathcal{H}}f(t) = \sum_{k \in \mathcal{Z}} C_{\mathcal{H},k} \varphi_{\mathcal{H},k}(t)$ 。其

收稿日期:2003-02-25

基金项目:2110 工程建设项目

作者简介:王文栋(1980-),男,山东泰安人,硕士,主要从事航空发动机控制与故障诊断等研究;  
谢寿生(1959-),男,广东郁南人,教授,博士生导师,主要从事飞机推进系统研究。

中,  $\{C_{j,k}\}_{k \in Z}$  具有有限长度  $N_{j1}$ , 利用 Mallat 算法<sup>[6-7]</sup> 将信号分解成不同通道的成分  $f(t) = A_{j2}f(t) = \sum_{j=J+1}^J D_j f(t)$ 。其中,  $A_{j2}f(t) = \sum_{k \in Z} C_{j2} \varphi_{j2,k}(t)$  是信号频率不超过  $2^j$  的分量, 而  $D_j f(t) = \sum_{k \in Z} D_{jk} \psi_{jk}(t)$  是信号  $f(t)$  的频率介于  $2^j$  和  $2^{j+1}$  的分量。前面的小波分解式实际上可以写成:  $C_{j+1} = HC_j; D_{j+1} = HC_j$ 。选取一个序列  $a = \{a_k\}_{k \in Z}$ , 则低通滤波器  $H$  和高通滤波器作用其的效果是:  $(Ha)_n = \sum_{k \in Z} h_{k-2n} a_k; (Ga)_n = \sum_{k \in Z} g_{k-2n} a_k$ 。其中,  $\{h_k\}_{k \in Z}$  与  $\{g_k\}_{k \in Z}$  是由给定的多分辨率分析确定的镜像滤波器。

由以上分析可知, 小波分析将信号  $f(t)$  分解成频率小于  $2^{-j}$  的成分  $A_{j2}f(t)$  和频率介于  $2^j$  和  $2^{j+1}$  的成分  $D_j f(t)$ 。按照 Mallat 算法将信号分解之后, 可根据小波变换特性有效区分信号与误差, 加以滤波形成新序列  $\bar{C}_j$  和  $\bar{D}_j$ , 再按 Mallat 重建算法:  $\bar{C}_j = H\bar{C}_{j+1} + G\bar{D}_{j+1}$ 。得到滤波后的信号为  $\bar{f}(t) = A_{j2}\bar{f}(t) + \sum_{k \in Z} \bar{C}_{j1,k} \varphi_{j1,k}(t)$ 。令  $L$  代表阈值的大小, 在滤波过程中如果  $f(t) = \begin{cases} f(t) & |f(t)| > L \\ 0 & |f(t)| \leq L \end{cases}$ , 则称  $L$  为硬阈值; 如果

$$f(t) = \begin{cases} \text{sign } f(t) (|f(t)| - L) & |f(t)| > L \\ 0 & |f(t)| \leq L, \end{cases} \text{ 则称 } L \text{ 为软阈值}^{[8]}。$$

## 2 实例分析

通过某型航空涡扇发动机电子综合调节器半实物仿真试验, 采集得到主燃油控制通道的动态响应参数数据<sup>[1]</sup>。加力状态  $T_4^* = \text{Const}$  调节规律下, 当涡轮后燃气温度信号  $T_4^*$  在 1% 阶跃量输入下, 采集得到的实际输出参数占空比信号  $s1(\%)$  的响应数据见图 1, 可见所采集数据因受到外界扰动及噪声的影响, 需要采用上述小波分析理论对其进行误差滤除和异常数据检测。

本文依据经验理论和所采集数据的特点, 采用紧支撑正交小波 Daubechies4, 取分解尺度  $J=5$ , 进行软阈值滤波。对于异常检测和误差滤波, 通常选取有限的几个分解尺度就足够了, 信号分解尺度越大, 信号的低频分量就越丰富。一维离散小波分析的结果见图 2, 图中表示占空比信号  $s1(\%)$  的各级分量, 每图中左边为近似分量, 右边为细节分量。

滤波前后的结果比较表明, 小波分析方法能同时对随机误差、异常数据进行很好的滤除, 值得指出的是, 占空比信号  $s1(\%)$  动态数据中含有的异常数据能在细节分量  $D1, D2, D3$  处得到明显的检测, 而且定位相当准确, 没有丝毫损失时域信息。检测得到占空比信号  $s1(\%)$  奇异点的位置及相应的 Lipschitz 指数  $a$  见表 1, 可见 Lipschitz 指数  $a$  可以作为函数光滑程度的一个度量指标,  $a$  越小, 奇异性越大, 据此可以实现主燃油控制通道动态过程异常数据的检测和滤波。

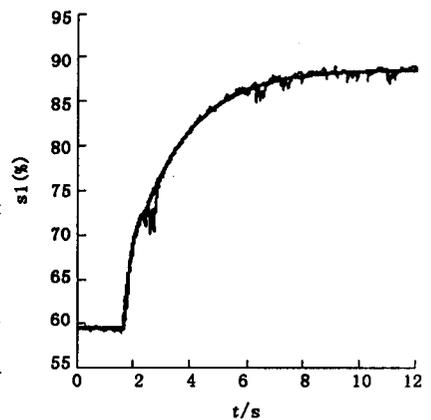


图 1 分段最小二乘辨识结果

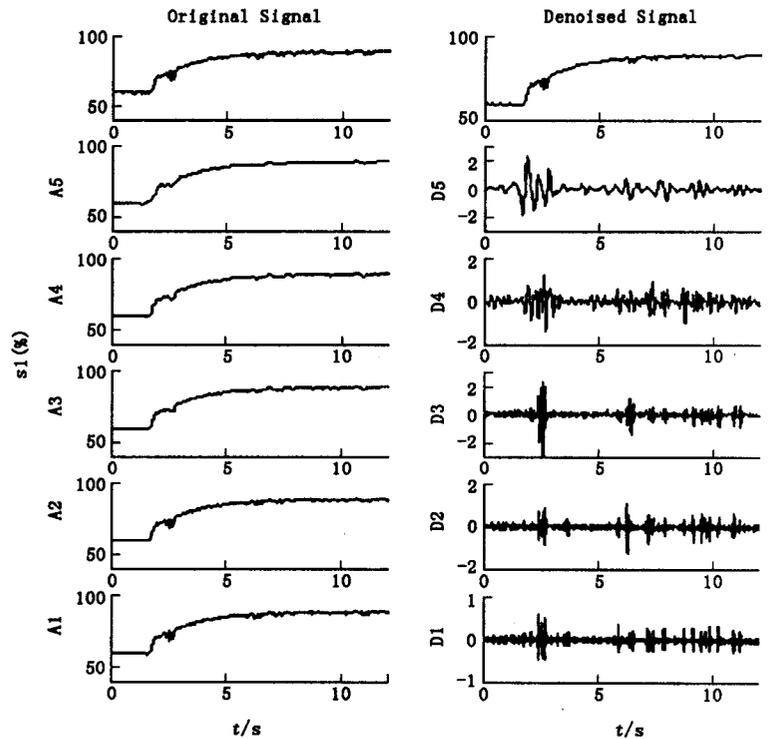


图 2 占空比信号  $s1$  的小波分解与除噪结果

表 1  $s1$  信号奇异点及 Lipschitz 指数  $a$

$t/s$	1.66	2.52
Lipschitz $a$	0.620 3	0.134 8

主燃油控制通道的电路分析表明该系统的数学模型是一个近似的分段线性模型,在响应过程的某一时刻从高阶模型切换到低阶模型,以同时满足系统的快速性与稳定性要求。在切换位置,因系统发生结构改变而产生了信号扰动问题。故可以对其动态响应数据,以发生突变的奇异点为间隔,分段进行最小二乘辨识<sup>[8-10]</sup>。辨识结果见图 2,分段模型参数,奇异点位置参数  $k_1, k_2$ , 及辨识的平均误差  $\varepsilon$  的大小见表 2。

表 2 辨识模型参数与平均误差

parameter	$\hat{\theta}_2 = [a_1, a_2, b_0, b_1, b_2]$	$\hat{\theta}_1 = [a_1, b_0, b_1]$	$k_1$	$k_2$	$\varepsilon$
value	-1.534 6, 0.550 1, 0.001 2, 0.050 2, 0.000 8	-0.994 6, 0.000 6, 0.042 9	1.66	2.52	0.601

### 3 结论

利用小波分析和最小二乘综合分析辨识该实际系统动态过程的方法有较高的精度,而且针对不同的输入作用,验证辨识模型是严格统一的,且模型一致满足系统的动态静态特性。

应用小波理论对某型航空涡扇发动机电子综合调节器主燃油控制通道动态奇异数据的分析与辨识过程,有下述特点:①不需要过程的先验知识,可有效的将非线性问题进行分析转化;②可以对动态数据的各种信息在不同频带上进行分析,是一种非常理想的时频工具;③在小波奇异性检测和滤波理论的指导下,能够准确地确定异常数据发生的位置和大小,并将误差滤除和异常数据检测有机地结合起来同步进行。

#### 参考文献:

- [1] 李 剑. 某型涡扇发动机综合调节器燃油控制通道数学模型研究[D]. 空军工程大学工程学院, 2002.
- [2] 张生良. 某型涡扇发动机综合调节器测试系统[J]. 推进技术, 2003, 24(2): 190 - 194.
- [3] Mallat S G, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617 - 643.
- [4] 杨宗凯. 小波去噪及其在信号检测中的应用[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(2): 1 - 4.
- [5] 陈章位, 路甬祥. 信号奇异性检测理论及其应用[J]. 振动工程学报, 1997, 10(2): 147 - 155.
- [6] Mallat S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(7): 674 - 693.
- [7] 刘贵忠, 邸双亮. 小波分析及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992.
- [8] Lennart Ljung. System Identification—Theory for the User (Second Edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.
- [9] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [10] 童中翔, 王晓东. 大气紊流仿真算法的改进[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 3(6): 10 - 12.

(编辑: 姚树峰)

## A Study of Dynamic Singularity Data of EEC Main Fuel Control Passage Based on Wavelet Transform

WANG Wen - dong<sup>1</sup>, CHEN Ce<sup>1</sup>, ZHANG Sheng - liang<sup>2</sup>, XIE Shou - sheng<sup>1</sup>

( 1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. The First Institute of the Air Force, Beijing 100076, China )

**Abstract:** The dynamic model of a kind of Turbofan EEC ( Engine Electronic Controller ) main fuel passage belongs to nonlinear time - varying system, it is difficult to identify the model because of the singularity caused by disturbance of the diverse - structure response. Based on the theory of exception - checking and error - filtering of wavelet transform, the response data is analyzed and reformed, the singularity is obtained, and the characteristic of the dynamic model is identified by segment. The result shows that wavelet is applicable to the singularity identification, exception - checking and error - filtering without experienced knowledge of the procedure error.

**Key words:** EEC; wavelet transform; singularity; linear least squares method