

文章编号: 1000-8055(2006) 03-0595-06

中值滤波方法在燃气涡轮传感器 数据校正中的应用研究

唐雅娟, 程谋森

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 分析了发动机测量信号滤波需求, 设计了针对传感器数据校正的中值滤波器和快速算法, 给出了模拟发动机故障和变工况试验情况下的传感器输出, 给出了滤波比较研究结果。数值实验和实际应用于涡轮试验测量数据滤波的结果表明, 中值滤波器对于脉冲噪声可以完全剔除, 对随机噪声也具有较好的抑制效果, 并能够较好保持信号中的陡峭边沿等趋势成份。

关键词: 航空、航天推进系统; 中值滤波; 传感器数据校正; 燃气涡轮发动机; 脉冲噪声

中图分类号: V 231

文献标识码: A

Application of Median Filter in Gas Turbine Sensor Data Validation

TANG Ya-juan, CHENG Mou-sen

(Institute of Aerospace and Material Engineering,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The filtering requirements of engine measurement signals are analyzed. A center weighted median filter and fast algorithm for sensor data validation are presented, and the filtering function and algorithmic efficiency are evaluated with numerical experiments. The simulated test signals are composed of steep edges and slopes that representing abrupt faults, linear deterioration and/ or regime transitional response, superimposed with simulated random noise and high-amplitude impulsive noise. Results show that median filter is good at removing impulsive noise and outliers. In addition, random noise is suppressed to great extents while preserving the final details. Practical application to gas turbine experimental sensor data validation confirms the above conclusions.

Key words: aerospace propulsion system; median filter; sensor data validation;
gas turbine engine; impulse noise

为全面了解发动机或者其部件的性能, 地面试验中通常需要连续不断地调整工况, 正常的气路传感器信号也表现出陡峭边沿、升-降斜坡、峰

-谷交错等特征; 相反, 若飞行中发动机某个或者几个测量参数的偏差出现突发性阶跃变化, 则通常是发生故障的前兆, 及早发现和识别这种信号

收稿日期: 2005-06-08; 修订日期: 2005-09-28

基金项目: 湖南省优秀博士论文基金资助(2003011);

作者简介: 唐雅娟(1972-), 女, 湖南长沙人, 国防科技大学航天与材料工程学院讲师, 在职博士生, 主要从事航空宇航推进系统自动化测试与先进试验技术的研究。

特征,是实现故障预警和控制的前提。但不论地面试验还是飞行中,传感器信号无一例外地包含噪声。特别是信号中零星出现的脉冲型噪声,极易给监视人员的视觉系统造成发生“异常”的错觉。因此,传感器信号滤波器必须能够在滤除脉冲型噪声的同时保持信号中锐利的突变成分,为后续的工作判分或者故障检测和分离提供准确的信息。

经典的滑动或者指数滤波器等线性滤波器,只对高斯噪声具有较好的去噪效果,并且同时使信号中锐利波形的边界模糊,它们不适合作为突变特征检测器。而研究和应用较多的现代方法,包括最小平方二乘滤波、卡尔曼滤波、神经网络、模糊逻辑和贝叶斯方法等,当信号的信噪比减小时,这些方法都存在性能下降的问题;应用于面向控制与诊断的信号滤波时,通常也只对高斯型噪声具有最优效果,当信号中混入非高斯型野值时,性能同样下降。

针对剔除脉冲型噪声的同时又保持波形锐利边界的滤波要求,在图像处理领域已经出现了卓有成效的研究工作,其中,非线性的中值滤波器倍受重视并得到广泛应用^[1,2]。在发动机健康监视领域,Ganguli^[3,4]研究了10点滞后和2点滞后的中值混合滤波器的应用;Manders等^[5]研究了5点长度的中值滤波器在汽车发动机冷却系统状态监视中的应用,结果表明中值滤波器适应信号中同时包含性能下降和尖锐趋势转换的情况。此外,中值滤波器还具有无需事先知道过程噪声模型和设计滤波算法阈值的优点,而小波基信号去噪方法和神经网络基信号滤波方法都对数据的噪声水平很敏感^[6,7]。

本文在分析中心加权中值滤波器特性基础上,设计了针对传感器数据确认需求的中值滤波器和快速算法,设计了由陡峭边沿、斜坡等组合的模拟发动机故障和变工况的理想测试信号,建立了随机噪声和脉冲噪声的发生模型,采用数值实验方法测试了中值滤波器的性能,并将其应用于实际涡轮试验数据的预处理。

1 气路信号的中值滤波方法

为便于比较,本文一并给出滑动平均和指数平均滤波器、中值滤波器的表示。

滑动平均滤波器是有限冲击响应(FIR)滤波器,具有如下形式:

$$y(k) = \sum_{i=1}^N b(i)x(k-i+1) \quad (1)$$

其中: N 为滤波器长度, $x(k)$ 表示传感器测量信号第 k 时刻的值, $y(k)$ 表示第 k 时刻的滤波值, $\{b(i), i=1, 2, \dots, N\}$ 表示决定滤波器特性的加权系数序列,其总和为1。

指数平均滤波器形式如下:

$$y(k) = ax(k) + (1-a)y(k-1) \quad (2)$$

其中: a 为可调整的光滑参数,取值在0和1之间。指数平均滤波器具有记忆效应,是无限冲击响应(IIR)滤波器。

窗口宽度为 $2N+1$ 的标准中值(Standard Median, SM)滤波器表示为^[1]:

$$y(k) =$$

$$\text{median}[x(k-N), x(k-N+1), \dots,$$

$$x(k), \dots, x(k+N-1), x(k+N)] \quad (3)$$

式中, $\text{median}[\cdot]$ 表示取中值操作的算子。加权中值(Weighted Median, WM)滤波器是SM滤波器的推广。它在滤波器窗口内每个位置上指定一个非负整数权值,使对应位置上的单个信号采样展宽为长度等于权值的采样序列,以这种方式影响中值的选择。若除滤波窗口中心位置之外,其他位置的权值都为1,而中心权值取为 $w_0=2L+1$,且 $L=N-1$,得到的特殊滤波器称为“中心加权等幂中值(Center Weighted Idempotent Median, CWIM)滤波器”。CWIM滤波器的紧致形式表示为:

$$y = \text{median}[x_{-N}, x_{-N+1}, \dots, (2N-1)x_0, \dots, x_{N-1}, x_N] \quad (4)$$

CWIM滤波器的特性在于只对信号进行一次滤波即得到根函数,再进行滤波时输出不发生任何变化。根据中值滤波器的性质^[1],CWIM滤波器产生的常数邻值片段的最小长度为2,并且边沿信号是任何中心加权滤波器的根函数。

下面设计针对燃气涡轮发动机测量信号处理的中值滤波器。CWIM滤波器的设计只需要确定两个参数:中心权值 $2L+1$ 和窗口宽度 $2N+1$ 。这两个参数需要根据气路传感器信号的噪声特征来确定。根据经验,可以认为任何不属于某一趋势段或者常数邻值片段的孤立点数据是由脉冲噪声产生的虚假信号;相反,任何两点或者更多信号构成的具有一定趋势的数据段则反映一种真实的变化趋势。尽管这个假设很保守,但它确保所有在时间轴上维持两点以上宽度的数据趋势所反映的细节能够被保留下来。另外,根据故障预警时间的限制,期望尽可能减小滤波时间滞后。上述要求与

CWIM 滤波器的特性相结合, 可以确定最小中心权值为 $L = 1$, 相应的窗口长度参数 $N = 2$, 即得到一个 5 点滤波器, 具有 2 点时间滞后, 且滤波器产生的常数邻值片段的最小长度为 $N - L + 1 = 2 - 1 + 2 = 2$, 满足滤除脉冲噪声的要求。另外, CWIM 滤波器具有保持锐利边沿的特性^[5]; 只需要对数据序列进行一次滤波操作就得到根函数, 不需要考虑滤波的非物理效应问题。如此就得到满足燃气涡轮发动机测量信号处理要求的中值滤波器。

2 中值滤波算法及其时间复杂度分析

标准中值滤波的实施一般采用快速排序算法。实际上对中值滤波而言, 只要能快速找到滤波窗口内元素的升序或者降序序列中间位置的元素即可, 并不要求对所有元素进行排序。在这一思想引导下, 提出改进的算法。根据前文, 设计的气路信号中值滤波器的中心权值为 $L = 1$, 相应的窗口长度参数 $N = 2$, 滤波操作中实际使用 5 点数据, 但是中心位置数据加权扩展后占有 3 个连续的位置, 因此实际滤波窗口宽度为 7。根据中值滤波器的输出特性, 这种 5 点滤波器可以采用如下改进的特殊加速算法: 首先将中心位置的数据与其它 4 个数据进行比较, 判断它是否为最大或者最小值, 然后按照判断结果分 3 种情况:

- (1) 若为最小值, 则找出其它 4 个数据的最小值即为滤波器输出值;
- (2) 若为最大值, 则找出其它 4 个数据的最大值即为滤波器输出值;
- (3) 既非最大值亦非最小值, 中心位置的数据本身即为滤波器输出。

细致分析算法可以知道, 标准中值滤波的操作最多执行 36 次判断和交换, 而改进的算法平均执行 7~8 次判断和赋值操作, 故改进算法的时间复杂度大约为标准中值滤波的四分之一。

3 中值滤波效果的数值实验

以发动机气路中的排气温度测量信号滤波问题为例。传感器测量信号相对于发动机基准参数的偏差信号中包含了发动机故障响应、传感器故障、过程噪声和模型近似等不确定性因素的影响。首先设计连续的反映故障特征的理想信号, 再迭加随机噪声和脉冲噪声, 组合成包含噪声的模拟测试信号。

3.1 理想信号

使用阶跃间断、斜坡和平台片段交错连接形成的序列, 模拟发动机突发性故障和传感器线性漂移故障状态下的未受噪声污染的理想气路信号, 总长度为 300 点, 如式(5) 所示。

$$y(k) = \begin{cases} 3.5 + 0.1k & , \quad k \in [1, 45] \\ 13.8 + 0.12(k - 46) & , \quad k \in [46, 61] \\ 6.65 + 0.1(k - 62) & , \quad k \in [62, 132] \\ 2.15 & , \quad k \in [133, 167] \\ 10.1 - 0.09(k - 168) & , \quad k \in [168, 201] \\ 14.8 & , \quad k \in [202, 250] \\ 5.5 & , \quad k \in [251, 300] \end{cases} \quad (5)$$

其中包含的边沿位置和间断幅值如下:

$$\Delta y(k) = \begin{cases} + 5.8 & , \quad k = 45 \\ - 8.95 & , \quad k = 61 \\ - 11.5 & , \quad k = 132 \\ + 7.95 & , \quad k = 167 \\ + 7.67 & , \quad k = 201 \\ - 9.3 & , \quad k = 250 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 随机噪声的产生

假设随机噪声服从高斯分布, 随机噪声的标准偏差按照实际样本统计特征确定。根据文献[4], 选择一种情况下的温度传感器随机噪声的标准偏差为 $\sigma = 2.25^{\circ}\text{C}$ 。采用上述标准偏差的正态随机信号发生器产生长度为 300 点的噪声序列, 迭加在理想信号上。

3.3 脉冲噪声的产生

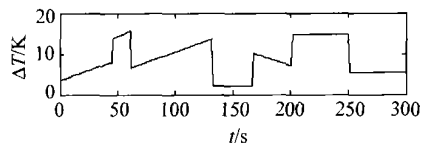
采用强度为 λ 的平稳泊松过程来模拟脉冲噪声的发生。在信号长度的时间窗内, 出现脉冲噪声的数目 N_p 和随机时刻由泊松流确定。每个随机时刻的脉冲噪声的幅值则是若干水平的随机抽取值。选择脉冲噪声的幅值分别为某个标准偏差 σ_p 的几个水平:

$$\{ \pm \sigma_p, \pm 1.5\sigma_p, \pm 1.75\sigma_p, \pm 2\sigma_p, \}$$

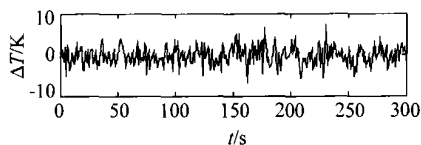
设噪声依次出现的时刻为 $\{t_1, t_2, \cdots, t_n, \cdots\}$, 是一个强度为 λ 的泊松流, 两个噪声之间的时间间隔 $\{T_i \triangleq t_i - t_{i-1}\}$ 相互独立并且服从同一指数分布, 概率密度函数为:

$$f_{\tau_i}(t)=\begin{cases}\lambda e^{-\lambda} & t>0 \\ 0 & t\leq 0\end{cases}\quad (7)$$

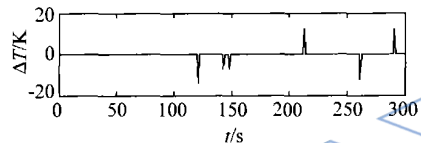
在测试信号产生过程中,假设300点采样间隔内出现脉冲噪声的期望值为 $\lambda\cdot300=4$,两个噪声之间的间隔的期望值为 $1/\lambda=300/4$,时间间隔序列 $\{T_i\}$ 用指数分布的随机数发生器产生,其位置则用时间间隔的累积确定,必须位于1~300内;每个位置上的脉冲噪声的幅值,用1~8内的随机整数发生器产生,取 $\sigma_p=7.0$ 。



(a) 理想信号



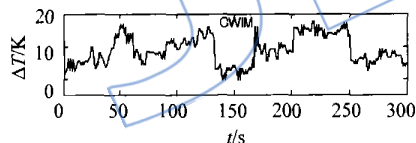
(b) 高斯噪声



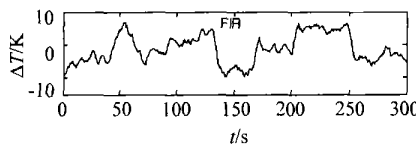
(c) 泊松噪声

图1 理想信号和噪声

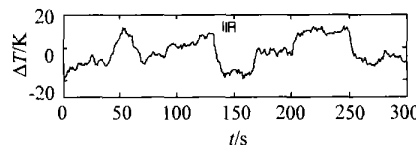
Fig. 1 Ideal signal and noise



(a) OWIM



(b) FIR



(c) IIR

图2 不同滤波器的输出结果

Fig. 2 Output data of different filters

为比较中值滤波器和滑动平均滤波器的效果,采用以欧氏距离为基础的均方根差作为评估

滤波质量的测度。滤波窗口内的已经知道准确数值的理想信号与滤波值的差的均方根测度表示为:

$$\Theta=\frac{1}{M}\sum_{i=1}^M(\hat{y}_i-y_i)^2\quad (8)$$

上式中 $\hat{y}_i$ 表示信号滤波值。

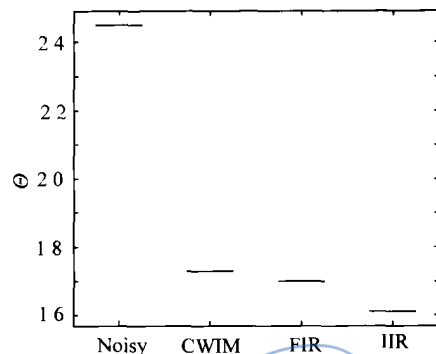


图3 不同滤波器效果对比

Fig. 3 Effect Comparison of different filters

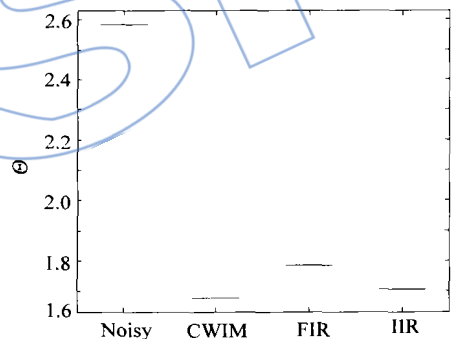


图4 1 000 次随机实验平均滤波效果对比

Fig. 4 Average of different filters in 1 000 stochastic tests

理想信号、噪声模拟信号和3种滤波器输出的某次随机实验结果如图1~图3所示。其中,有限冲击响应(FIR)滤波器采用5点宽度窗口的滑动平均,无限冲击响应(IIR)滤波器的参数取为 $a=0.25$ 。根据数值试验,利用本文研究的中值滤波方法剔除脉冲噪声,要求脉冲噪声的幅值大于数据随机起伏偏差的3倍,也大于正常数据在两次采样之间的跳变。如在数值试验中,取脉冲噪声的幅值分别为某个标准偏差的几个水平, $\sigma_p=7.0$,而随机噪声的标准偏差为 $3\sigma_n=6.75$ 。图4是1 000次连续随机实验的平均滤波效果对比。可见,对于同时包含高斯噪声和泊松型脉冲噪声的信号,中

值滤波器不仅能够有效保留信号的锐利边沿, 而且能够有效滤除脉冲噪声, 从而使脉冲噪声为主要误差源的信号得到高质量地恢复。对某次随机实验中的滤波操作重复执行5 000次的CPU 时间对比如表 1 所示, 结果与滤波算法的时间复杂度理论估计一致。

表1 两种算法CPU 时间(单位:s) 对比

Table 1 CPU time Compare of two algorithms			
序号	1	2	3
SM 算法	19. 469	19. 141	19. 297
改进算法	4. 250	4. 234	4. 281

4 涡轮试验信号滤波

为实际检验中心加权等幂中值滤波器应用于发动机试验数据预处理的效果, 给出某型涡轮试验数据及采用中心加权等幂中值滤波器处理的结果对比, 如图5~图7 所示。其中, 图5 表示气源主喷嘴孔板后温度信号, 特点是其中包含多处脉冲噪声, 滤波器完全将脉冲噪声剔除; 图6 和图7 表示冷气喷嘴1 孔板前压强信号及滤波结果。原始信号的特点是包含阶跃间断、上升(下降) 斜坡、峰- 谷交错的片段, 并且也包含脉冲噪声, 中值滤波器能够完全将脉冲噪声剔除, 同时保持了信号中的陡峭边沿。

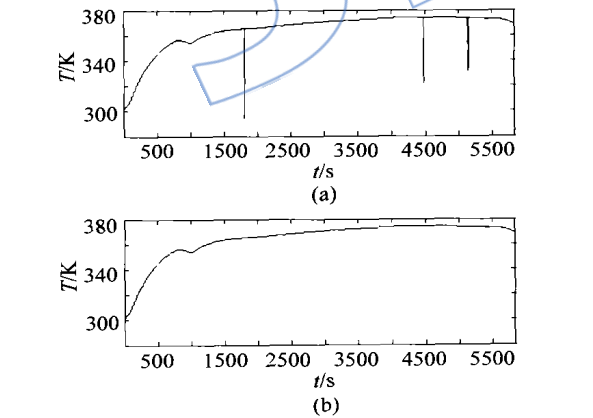


图5 气源主喷嘴孔板后温度原始数据(a) 与滤波数据(b)

Fig. 5 Raw (a) and filtered data (b) of bulk gas throttle nozzle outlet temperature

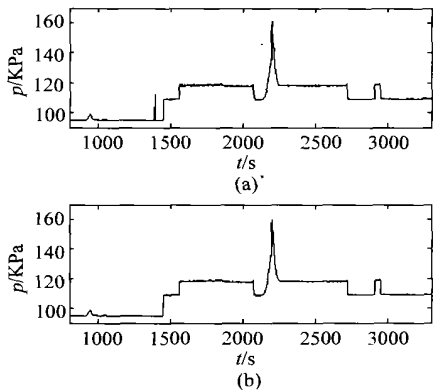


图6 冷气喷嘴孔板前压强原始数据(a) 与滤波数据(b)

Fig. 6 Raw (a) and filtered data (b) of cool gas throttle nozzle outlet pressure

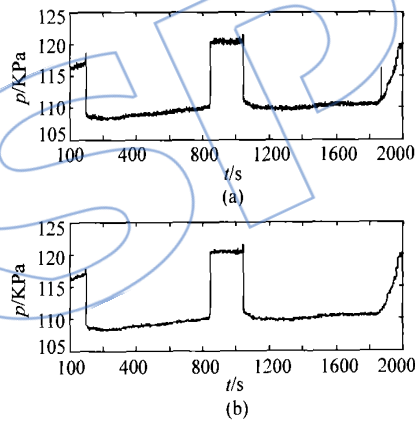


图7 冷气喷嘴孔板前压强原始数据(a) 与滤波数据(b) 局部放大

Fig. 7 Zoom view of raw (a) and filtered data (b) of cool gas throttle nozzle outlet pressure

5 结 论

中值滤波器对于涡轮试验测量信号中的脉冲噪声可以完全剔除, 对随机噪声也具有较好的抑制效果, 并能够较好保持信号中的陡峭边沿等趋势成份。此外, 本文研究的中心加权等幂中值对噪声水平不敏感, 特别是与脉冲噪声的幅值无关, 即具有无需事先知道过程噪声模型和设计滤波算法阈值的优点。5 点窗口宽度的中心加权等幂中值滤波器可以应用快速算法实现, 具有时间滞后效应小的特点。理论分析、数值实验和实际数据处理效果都证实了中值滤波器在燃气涡轮试验数据校正中的有效性。

参考文献:

[1] Sun T, Gabbouj M, Neunou Y. Center Weighted Median Filters: Some Properties and Their Applications in Image Processing[J]. *Signal Processing*, 1994, 35(3): 213~229.

[2] 张丽, 陈志强, 高文焕, 等. 均值加速的快速中值滤波算法[J]. 清华大学学报, 2004(9): 1157~1159.
Zhang Li, Chen Zhiqiang, Gao Wenhuan, et al. Mean-Based Fast Median Filter[J]. *Tsinghua Univ. (Sci & Tech)*, 2004, 44(9): 1157~1159.

[3] Ganguli R. Jet Engine Gas-Path Measurement Filtering Using Center Weighted Idempotent Median Filters[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(5): 930~937.

[4] Ganguli R. Data Rectification and Detection of Trend Shifts in Jet Engine Gas Path Measurements Using Median Filters and Fuzzy Logic[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, 124(4): 809~816.

[5] Manders E J, Biswa G, Mosterman P J, et al. Signal Interpretation for Monitoring and Diagnosis, A Cooling System Testbed[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, 49(3): 503~508.

[6] Lu P J, Hsu T C. Application of Auto-Associative Neural Network on Gaspath Sensor Data Validation[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2002, 18(4): 879~888.

[7] 叶志锋, 孙健国. 用自联想神经网络处理发动机测量参数[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(2): 218~221.
Ye Zhifeng, Sun Jianguo. Process of Measurable Engines Parameters Using Auto-Associative Neural Networks[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2003, 18(2): 218~221.

