

doi: 10.7690/bgzdh.2016.04.014

一种基于新阈值函数的小波降噪方法在高速风洞中的应用

张 鹏, 谢 艳, 魏 志

(中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为了解决传统阈值函数中抑制干扰与保留信号有效突变区域和信号高频细节之间的矛盾, 提出一种基于新阈值函数的小波降噪方法。介绍了传统小波阈值函数降噪方法, 根据小波阈值降噪方法的特点构建一种新阈值函数, 并进行风洞试验验证, 用硬、软阈值以及新阈值方法对 X 元信号进行处理, 将经过不同降噪方法处理后得出的 CL-a 曲线进行对比。试验结果表明: 该方法与传统函数方法相比具有明显的优越性, 一方面其处理后的试验数据结果与阶梯试验数据吻合度更高; 另一方面该方法在抑制干扰影响的同时, 能够有效捕获到飞行器模型在突变区域的有效高频信号。

关键词: 风洞连续信号; 新阈值函数; 小波变换; 飞行器模型

中图分类号: TP306 **文献标志码:** A

Application of Wavelet De-noising Method Based on New Threshold Function in High Speed Wind Tunnel

Zhang Peng, Xie Yan, Wei Zhi

(High Speed Institute, China Aerodynamics Research & Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: This paper puts forward a de-noising method based on new threshold function for continuous acquisition signal of wind tunnel to solve the traditional method's conflict between noise pollution control and high frequency signal details retaining. Traditional wavelet threshold function noise de-noising method is introduced, according to the characteristics of the wavelet threshold de-noising method, a new threshold function has been constructed. Different methods have been used to de-noising the signal X, the CL-a curves were compared. Test results shows that the new threshold function has many advantages over traditional function, it has the higher similarity with the original signal. At the same time, by using different methods to deal with the calibration model, it is showed that the new threshold function method fits the step test better, it has a good de-noising performance and also can get the none-linear aerodynamics of the aircraft model or the non-stable character of the mutation signal.

Keywords: wind tunnel continuous signal; new threshold function; wavelet transform; aircraft model

0 引言

风洞测力试验是飞行器模型最基本的试验项目, 其试验目的是测量飞行器定常气动力特性、操纵面效率以及飞行器各个部件对气动力的贡献^[1]。目前, 我国生产型高速风洞由于受暂冲式运行方式和中压气源容积等因素制约, 采用阶梯变迎角顿点采集的方式进行测力试验, 主要存在以下不足:

- 1) 模型迎角阶梯间隔大, 试验信息量较少, 难以准确反映飞行器非线性和突变区域内气动特性;
- 2) 关键气动导系数通过少量试验数据点拟合求导或插值得到, 误差较大, 影响飞行器精细化设计;
- 3) 顿点采集方式试验时间过长、能耗大、效率不高, 且存在模型振动影响数据采集精度等问题;

4) 制约了与国外连续风洞试验结果的相关性分析。

因此, 为有效提升风洞测力试验水平和能力, 在 2.4 m 跨声速风洞中开展了跨声速风洞连续采集与连续变迎角试验技术研究, 该技术就是在试验模型迎角连续匀速运行的同时, 连续采集作用在模型上的气动力、力矩及相应的流场参数的试验方式。

测力试验时, 天平是测量作用在飞行器模型上的气动力和力矩的设备, 其信号是一种弱小信号, 在试验过程中不可避免地要受到各种干扰的影响, 包括风洞噪声以及流场脉动和模型振动等。为提高试验数据的精准度, 必须对噪声和干扰进行抑制; 然而在进行连续变迎角测力试验时, 信号不同于阶梯变迎角顿点采集方式其对应的有效频谱是一个较

收稿日期: 2015-12-11; 修回日期: 2016-01-08

基金项目: 解放军总装备部“气动预研基金”(51313040205)

作者简介: 张 鹏(1985—), 男, 四川人, 硕士, 工程师, 从事风洞信号采集与处理研究。

宽的频带,其有效成分存在于整个 0~10 Hz 的频带内且与风洞的噪声频率有重叠部分,传统低通滤波降噪方法的不足在于使信号变化后的熵增高,无法刻画信号的非平稳特性且无法得到信号的相关性,同时若还是采用常规 1 Hz 低通滤波的方法来消除干扰就会衰减掉信号的有效能量,从而产生信号失真,影响试验数据的精准度^[2]。

为达到既有效消除噪声干扰又保留信号高频特性及非线性变化特征的目的,利用小波变换较强的时频局部分析能力和自适应调节能力、多分辨率特性,笔者提出一种基于新阈值函数的小波降噪方法。

1 传统小波阈值函数降噪方法

传统小波阈值函数降噪方法^[3]:首先,选择合适的小波和层数通过小波分解对含噪信号进行处理,得到小波分解系数。由于正交小波变换较强的数据相关性和信号集中能力,此时只需确定一个合适的阈值并根据该阈值对小波分解系数进行取舍就能达到降噪的效果:当小波分解系数小于这个临界阈值时,认为这些系数由干扰信号引起,予以舍弃;当系数大于这个临界阈值时,认为这时的小波系数主要由信号有效成分引起,保留该部分系数(硬阈值方法)或者按某一个固定量向零收缩(软阈值方法),然后用新的小波系数进行小波重构得到降噪后的信号;因此,阈值函数的选择对降噪效果起着决定性的作用。

小波阈值函数降噪方法简述^[4-6]如下:

1) 信号的小波分解,选择小波并确定分解层次,对带噪信号 $f(k)$ 作小波变换,得到一组小波系数 $W_{j,k}$;

2) 通过对 $W_{j,k}$ 采用软或硬阈值函数进行阈值处理,得出估计小波系数 $\hat{W}_{j,k}$ 。

硬阈值如下式:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} W_{j,k}, & |W_{j,k}| \geq \mu \\ 0, & |W_{j,k}| < \mu \end{cases} \quad (1)$$

软阈值如下式:

$$\hat{W}_{j,k} = \begin{cases} [\text{sign}(W_{j,k})](|W_{j,k}| - \mu), & |W_{j,k}| \geq \mu \\ 0, & |W_{j,k}| < \mu \end{cases} \quad (2)$$

3) 利用 $\hat{W}_{j,k}$ 进行小波重构,得到估计信号 $f(k)$,即为去噪后的信号。

2 新阈值函数

硬阈值函数自身不连续,降噪后的数据不平滑,极有可能存在震荡干扰。软阈值函数方法中估计小波系数与分解小波系数之间存在恒定偏差,重构后精度不高,容易造成信号衰减、边缘模糊等失真现象。为在有效降噪的同时较好地捕获信号的非平稳特性,如边缘、尖峰、断点等,根据小波阈值降噪方法的特点构建一种新阈值函数,为信号的小波阈值函数自适应降噪方法提供有利条件^[7]。

新阈值函数 $f(x)$ (将 $W_{j,k}$ 看作自变量 x) 应符合以下数学条件:

1) $f(x)$ 为连续函数;

2) $y = x$ 为其渐近线,即 $W_{j,k} = W$ 为新阈值函数的渐近线,随着 W 的增大 $W_{j,k}$ 逐渐逼近 W ,解决了估计小波系数与分解小波系数之间存在恒定偏差的问题;

3) 函数满足:

当 $N \rightarrow \infty$ 时,新函数为软阈值;当 $N \rightarrow 0$ 时,新函数为硬阈值,能够通过灵活变化 N 取得不同的阈值函数。新阈值函数如式 (3):

$$W_{j,k} = \begin{cases} \text{sgn}(W_{j,k})[|W_{j,k}| - \mu(1 - e^{-|N|})], & |W_{j,k}| \geq \mu \\ 0, & |W_{j,k}| < \mu \end{cases} \quad (3)$$

令

$$f(x) = \text{sgn}(x)[|x| - \mu(1 - e^{-|N|})] \quad (4)$$

一方面:

$$x > 0, \quad \frac{f(x)}{x} = \frac{[x - \mu(1 - e^{-|N|})]}{x} = 1 - \frac{\mu(1 - e^{-|N|})}{x} \rightarrow 1(x \rightarrow \infty);$$

$$x < 0, \quad \frac{f(x)}{x} \rightarrow 1(x \rightarrow -\infty) \quad (5)$$

所以 $y = x$ 为渐近线。

另一方面:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \text{sgn}(W_{j,k})[|W_{j,k}| - \mu(1 - e^{-|N|})] = \text{sgn}(W_{j,k})[|W_{j,k}| - \mu]; \quad (6)$$

$$\lim_{N \rightarrow 0} \text{sgn}(W_{j,k})[|W_{j,k}| - \mu(1 - e^{-|N|})] = \text{sgn}(W_{j,k})|W_{j,k}| = W_{j,k} \quad (7)$$

证明了新函数在 $N \rightarrow \infty$ 时,为软阈值;在 $N \rightarrow 0$ 时,为硬阈值。可见新函数具备传统阈值函数不可比拟的灵活性,为信号的小波阈值自适应降噪提供了有利条件。

3 风洞试验验证

某次风洞试验连续采集(302 点/s)得到 X 元信

号(阻力)如图 1 所示。为验证小波阈值降噪方法效果,先选取 db24 小波将含噪的 X 元信号进行多尺度小波分解,分解后的低频、高频系数如图 2、图 3。

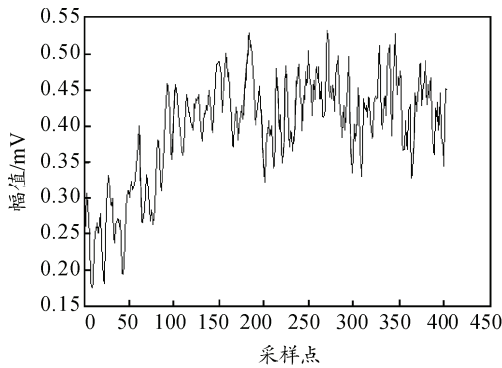


图 1 某次车连续采集 X(阻力)元信号

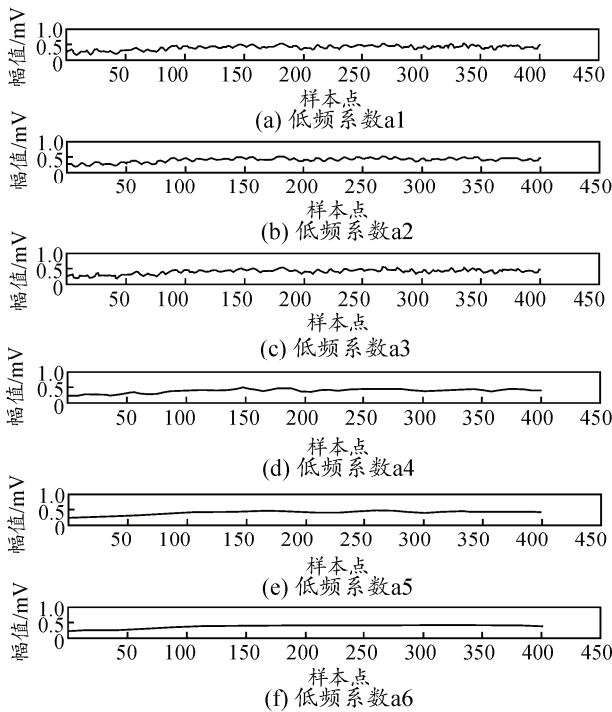


图 2 X 元信号分解后的低频系数

通过分解后得到的小波低频系数可知:信号能量的主要部分集中分布在第 1~5 层上,随着层数的增加,能量分布逐渐较少,在较高层次上信号甚至表现出了明显的衰减特性;另一方面,由小波的高频系数可看出噪声和干扰主要集中在低尺度和中间尺度上,具体来讲主要分布在 1~5 层上,因为尺度的增加会造成时间分辨率的降低,噪声对有效信号的影响基本可以忽略^[8]。综上所述,采用 db24 小波 5 层分解对风洞内连续采集得到的天平信号进行处理是合适和有效的。

为验证新阈值函数的优越性,使用硬、软阈值以及新阈值方法对 X 元信号进行处理,降噪后的信

号如图 4~图 6。通过数据处理结果比较发现,硬阈值函数方法降噪后的信号可以很好地保留信号边缘等局部特征,但信号自身光滑性相对较差,从图 5 可以看出,降噪后的信号在局部位置存在震荡干扰,这是由于硬阈值函数自身存在断点造成的,这种现象在噪声水平较高的地方更加明显。而软阈值函数处理后的信号曲线相对平滑,但会损失信号的局部非平稳特性,造成边缘模糊、尖峰丢失等失真现象。

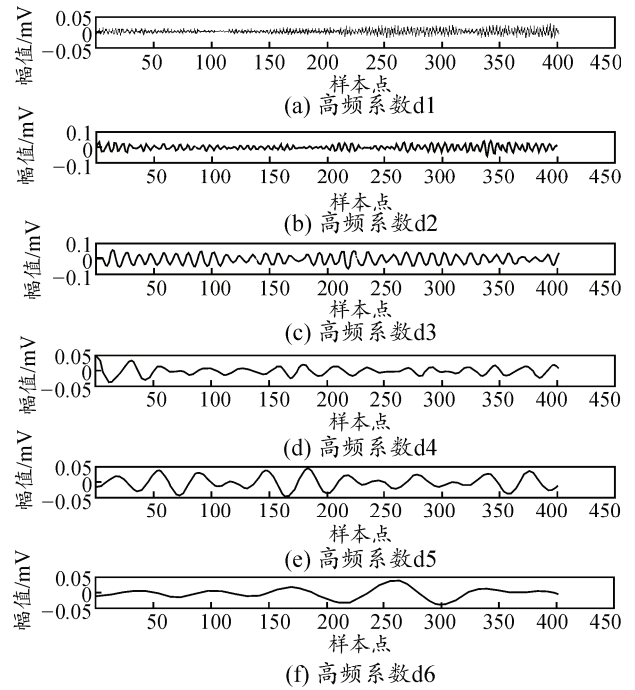


图 3 X 元信号分解后的高频系数

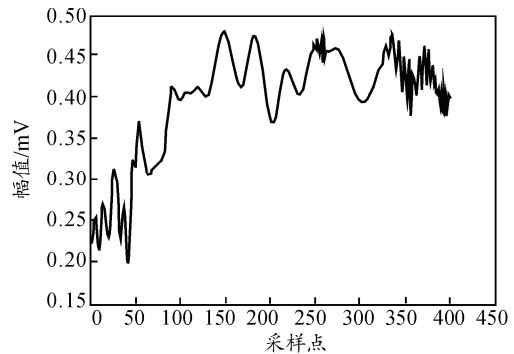


图 4 硬阈值处理结果

而采用新阈值函数对连续变迎角试验的天平信号进行降噪处理后,一方面可以有效地降低噪声、电磁干扰、机械振动等对有效信号的干扰;另一方面,能够更好地捕获到连续变迎角试验中天平信号随角度变化的跟随特性及局部的非平稳特征。

因此,在连续变迎角试验中采用新阈值函数降噪方法对天平信号进行降噪处理具有明显的优越性。

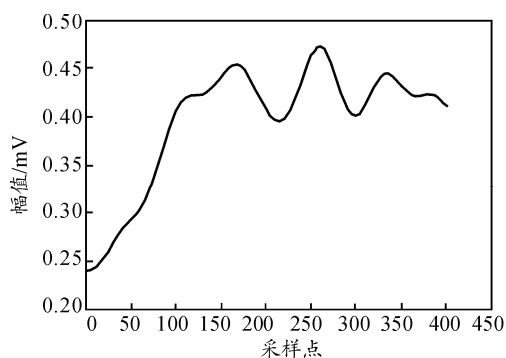


图5 软阈值处理结果

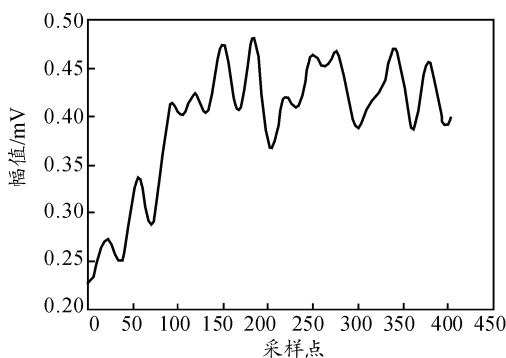
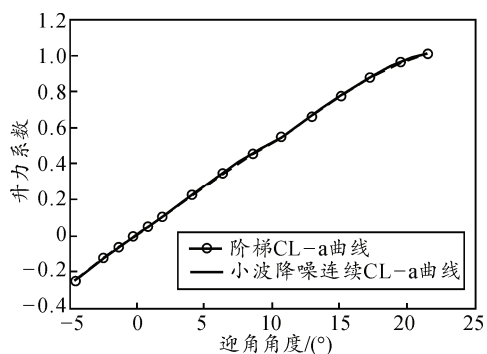
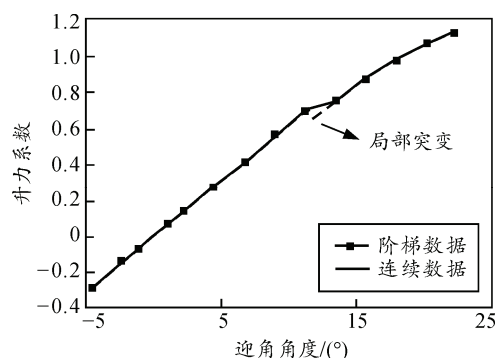


图6 新阈值处理结果

图7 某标模 $M=0.8$ 时连续变迎角数据小波降噪后与阶梯数据的 CL-a 曲线对比

一方面，为说明新小波阈值函数降噪方法相对于常规低通滤波降噪方法的优点，笔者采用新阈值函数方法对某标准模型飞行器在 $M=0.8$ 时的数据进行降噪处理，结果如图7中的 CL-a 曲线。通过比较可以发现：经过新小波阈值函数降噪方法处理后的代表飞行器特性的 CL-a 曲线与阶梯数据的 CL-a 吻合度较高，说明该方法是可行、可信及有效的。另一方面，图8中新小波阈值函数降噪处理后的曲线能够清晰地捕获到代表信号局部突变特性的信号拐点，而低通滤波方法由于对信号有平滑和衰减作用无法捕获突变特性；因此，新小波阈值函数方法具有明显的优越性。

图8 某标模 $M=0.95$ 时不同降噪方法 CL-a 曲线对比

4 结束语

笔者在传统软、硬阈值函数方法的基础上提出了一种基于新阈值函数的降噪方法。通过风洞试验验证了新阈值函数方法能够有效地解决抑制噪声干扰和保留高频有效信号的矛盾，同时该方法还能敏锐地捕获天平信号随迎角变化的跟随特性，从而有效地反映飞行器气动力在局部的非平稳特征，为飞行器的设计提供了重要的研究数据。

同时，对比不同方法处理某标模试验数据后的气动特性曲线可以发现：新阈值函数方法处理后的数据与阶梯试验数据吻合度较好，且能够较好地反映飞行器在局部的非平稳特性，能够真实地反映飞行器气动力非线性或突变区域的信号特征，有效地提高连续变迎角试验的数据精准度。

参考文献：

- [1] 王发祥. 高速风洞试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 146.
- [2] 杨海滨, 张伟, 夏洪亚. 某高超声速风洞五自由度机构控制系统研制[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(1): 102-105.
- [3] 张鹏, 魏志, 王春. 基于小波变换的风洞连续信号降噪分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(5): 63-67.
- [4] 万千, 薛明. 基于噪声分离和小波阈值自适应图像降噪算法[J]. 电子科技, 2011, 12(5): 94-96.
- [5] 黄勇, 汪伟. 基于软阈值小波降噪的天津 CORS 站点数据分析[J]. 城市勘测, 2011, 11(06): 89-91.
- [6] 张维强, 宋果乡. 基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(2): 296-299.
- [7] 张德丰. MATLAB 小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 50-51.
- [8] 欧芬兰, 郭金泉, 钟剑锋, 等. 基于平稳小波变换的悬臂梁微小缺陷检测方法研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 762-767.