

doi: 10.7690/bgzdh.2013.05.017

基于小波变换的风洞连续信号降噪分析

张鹏^{1,2}, 魏志², 王春², 孙宁², 谢艳²

(1. 四川大学电气信息学院, 成都 610065; 2. 中国空气动力研究与发展中心高速所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 针对传统的低滤波方法会丢失连续信号的有用部分、难以真实反映飞行器气动力非线性或突变区域的信号特征的问题, 提出一种基于小波变换的阈值降噪方法。从小波变换理论出发, 使用 Matlab 小波分析工具箱中自带函数对信号进行降噪处理。通过分析发现, 通过 db24 小波处理后的结果与原信号的相似度更高, 降噪效果更好, 并通过风洞连续变迎角试验数据进行验证。分析结果表明: 该方法在降低噪声影响的同时, 较好地保留了飞行器模型气动力非线性或突变区域信号的非局部平稳特性。

关键词: 风洞信号; 小波变换; 飞行器模型

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Analysis of Wind Tunnel Continuous Signal De-Noiseing Based on Wavelet Transformation

Zhang Peng^{1,2}, Wei Zhi², Wang Chun², Sun Ning², Xie Yan²

(1. College of Electric & Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

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

Abstract: Aiming at the problem that the traditional low-pass filtering method will lose the useful part of the continuous signal and it is difficult to truly reflect the aircraft aerodynamic nonlinear or mutation of the signal characteristics of the area, proposed a method based on wavelet shrinkage to de-noising wind tunnel signal. Starting from the theory of the wavelet transformation, by using function in the Matlab wavelet analysis toolbox, find that db24 wavelet has the higher similarity with the original signal and the better de-noising performance, it also has proved by the wind tunnel continuously varying angle of attack test data. The analysis result shows that the method has a good de-noising performance and it also has good effects on reserving none-linear aerodynamics of the aircraft model or the non-stable character of the mutation signal.

Key words: wind tunnel signal; wavelet transform; aircraft model

0 引言

风洞试验是获取各类航空航天飞行器气动力数据的最主要手段。长期以来, 我国高速风洞领域普遍采用“阶梯顿点平均”的方式获取飞行器缩比模型在固定迎角下的静态气动力。为更精确地反映飞行器在非线形变化或突变区域的气动力特性, 进一步提高飞行器气动力评估与预测水平, 目前我国在最大口径的高速风洞-2.4 m 跨声速风洞开展了“跨声速风洞连续采集与连续变迎角试验技术研究”, 即在连续变飞行器缩比模型迎角的同时, 风洞测量系统连续采集获取天平、压力传感器和迎角传感器的信号。当试验方式从“阶梯顿点平均”变为“连续采集”方式时, 被测信号将从“阶梯顿点平均”方式下的静态信号转化为“连续采集”方式下的动态信号, 对应的有效频谱是一个较宽的频带, 加之暂冲式高速风洞流场脉动和模型振动等因素也会对试

验数据产生较大影响; 因此, 传统的低滤波方法无法对信号的局部非平稳特性做出自适应的调节及处理, 会在消除大部分噪声的同时, 将信号的局部非平稳特性平滑处理掉, 丢失信号的有用部分, 存在保护信号局部特性和抑制噪声间的矛盾^[1-4], 特别是难以真实反映飞行器气动力非线性或突变区域的信号特征, 必须采用更为合适的数据降噪处理策略。

鉴于小波变换的低熵性、多分辨率、去相关性和适应性强等特点在信号降噪处理上的优异表现, 笔者从小波变换理论出发, 提出采用基于小波变换阈值降噪原理的风洞连续采集信号降噪处理策略。

1 小波变换阈值降噪原理

用如下模型代表一个含噪的一维信号:

$$f(t)=s(t)+n(t) \quad (1)$$

$s(t)$ 为原始信号, $n(t)$ 为噪声。对 $f(t)$ 作离散小波变换, 正交小波变换具有很强的数据相关性, 对

收稿日期: 2012-11-12; 修回日期: 2012-12-23

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, 在读硕士, 工程师, 从事信号处理研究。

确定信号有一种集中能力：如果一个信号的能量集中于小波变换域少数小波系数上，那么，它们的取值必然大于在小波变换域内能量分散的大量信号和噪声的小波系数。在对小波系数进行取舍前，按一定的规则(阈值)，将小波系数划分为 2 类：一类是重要的，规则的小波系数；另一类是非重要的或受噪声干扰的小波系数。这样就可以选择一个合适的阈值 μ ，如果小波分解后得到的系数大于这个 μ ，就认为此时的系数是有效信号引起的，从而保留此系数(硬阈值方法)或者按照某一固定量向零收缩(软阈值方法)这个系数。如果分解后得到的系数小于临界阈值 μ ，就认为此系数由噪声引起并直接舍弃。最后利用保留的小波系数进行小波重构得到降噪后的信号^[5-6]。

目前，阈值的处理主要有 2 种方法：

1) 硬阈值。

当小波系数的绝对值小于给定阈值时，令其为 0，而大于阈值时保持其不变，即

$$W_{\mu} = \begin{cases} w, & |w| \geq \mu \\ 0, & |w| < \mu \end{cases} \quad (2)$$

2) 软阈值。

$$W_{\mu} = \begin{cases} [\text{sign}(w)](|w| - \mu), & |w| \geq \mu \\ 0, & |w| < \mu \end{cases} \quad (3)$$

一般来说，硬阈值方法可以很好地保留信号边缘等局部特征，软阈值方法处理后数据相对平滑，但会造成边缘模糊等失真现象。笔者使用默认阈值降噪处理，即使用 Matlab 小波分析工具箱中自带函数生成默认阈值，利用其自带函数进行降噪处理。

基于小波变换的阈值降噪方法步骤简述如下：

1) 选择合适的小波，对所给的信号进行小波变换，得到小波变换系数 W 。

2) 计算小波阈值 μ ，选择合适的阈值方法，对小波系数进行取舍，得到新的小波系数 W_{μ} 。

3) 对得到的小波系数 W_{μ} 进行小波重构，得到降噪后的信号^[7-9]。

2 小波降噪仿真分析

首先通过对仿真信号进行小波变换阈值降噪来验证其理论可行性。为此，给定一个含高斯白噪声的矩形波信号，该参考信号及含噪信号如图 1 所示。

根据第 1 节的分析步骤对含噪信号进行处理。首先，选取 db24 小波对含噪信号进行 5 层分解，分解后的低频、高频系数如图 2、图 3。

从图 2、3 提取的高、低频系数可见，信号低频系数部分的主要能量集中在 1~4 层上，在更大的尺

度上，信号衰减较大。高频系数主要来源于白噪声，而矩形波信号可在图 2 的近似信号 a_5 中得到，这是因为在这层噪声对矩形波信号的影响已可忽略。

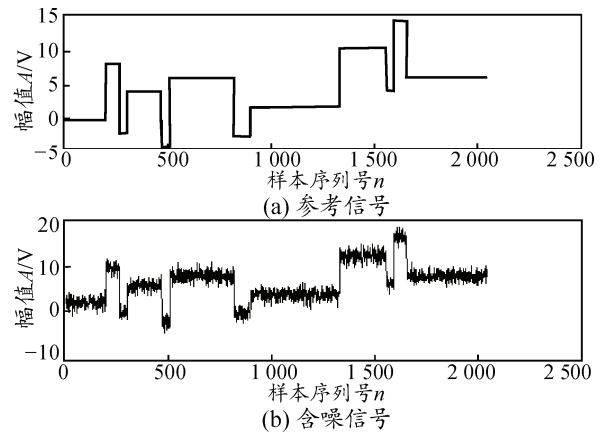


图 1 参考信号及含噪信号

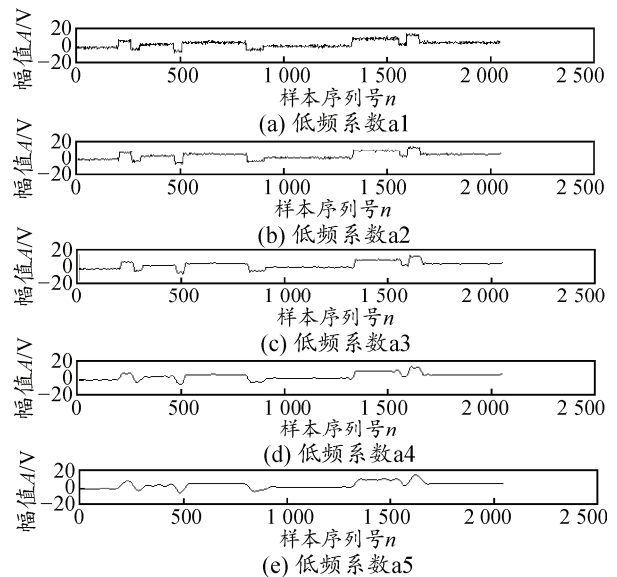


图 2 小波分解的低频系数效果

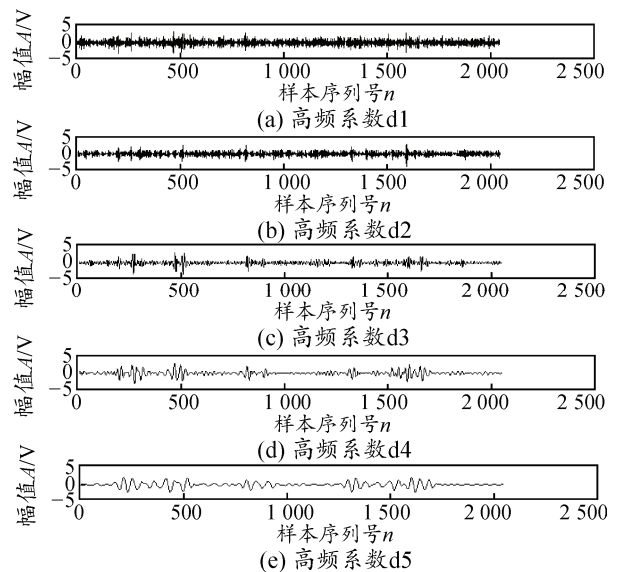


图 3 小波分解的高频系数效果

通过以上分析, 再分别采用 sym8 小波 5 层分解和 db24 小波 5 层分解得到降噪后的信号如图 4。

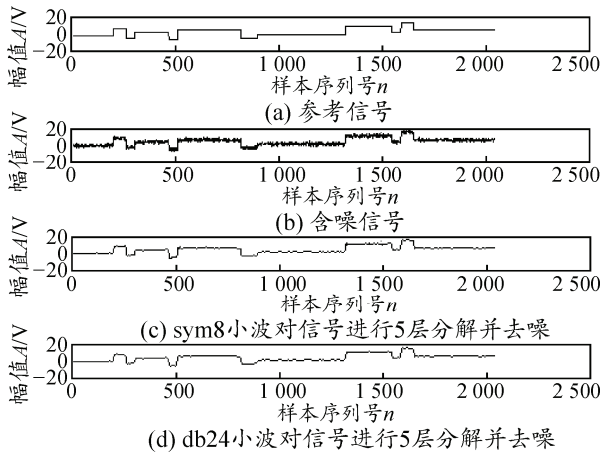


图 4 降噪后的信号

为衡量不同小波基的降噪效果, 采用如下指标。

1) 降噪信号与原信号的能量比值:

$$p = \frac{\sum_i x_{d_i}}{\sqrt{\sum_i S_i^2}} \quad (4)$$

2) 信号相似值:

$$e = \sqrt{\sum_i (x_{d_i} - s_i)^2} \quad (5)$$

其中: x_{d_i} 为降噪后信号序列; s_i 为原信号序列。 p 值反映了降噪后信号的能量多少, 值越大, 说明信号降噪以后, 保留能量越多。 e 值反应了降噪后信号与原信号相似度, e 越小, 降噪信号与原信号相似度越高。

采用 p 、 e 等指标分别对使用 db24、sym8 等小波降噪后的信号进行分析, 分析结果见表 1。

表 1 使用不同小波基的信号降噪指标计算结果

小波基	p	e
sym8	0.984 8	45.954 2
db24	0.985 5	46.813 1
db3	0.899 8	43.178 9
sym15	0.932 5	43.897 8

由计算结果可以看到, db24 小波对噪声信号处理后与原信号的相似度更高, 降噪效果更好, 这与图 4 的结果相吻合。这样便为下一步风洞连续信号的降噪处理提供了重要的理论依据及数据支持^[10]。

3 风洞连续信号小波变换阈值降噪处理

风洞连续变迎角试验, 因为数据采集时迎角连续变化, 而不像阶梯试验时迎角处于静止状态, 所以, 天平元的有效信号就是一个随迎角变化的信号, 对信号进行 Fourier 变换分析, 得知此信号在高频段也是有能量的, 且与风洞的噪声频率有重叠部分, 同时攻角机构的振动往往也会给信号带来噪声干

扰, 因此采用常规的低通滤波处理降噪, 会在消除噪声的同时, 将信号的局部非平稳特性平滑处理掉, 丢失信号的有效成分。

以某型号连续测力试验测得的 x 元(阻力元)为例, 对其进行频域分析, 作频率-振幅谱图, 如图 5, 信号的有效成分并不是单一的存在于低频段, 而是存在于整个 $0 \sim 10$ Hz 的频带内。如果直接采取常规试验的 2 Hz 低通滤波就必将将会将信号高于 2 Hz 的有效成分去掉, 大大地影响试验数据的精准度。

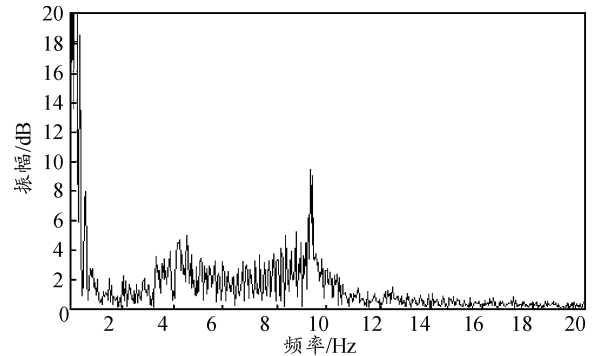


图 5 连续采集数据 x 元滤波频率-振幅谱

对天平信号分别采用小波变换阈值降噪和传统低通滤波处理, 效果如图 6 所示。可以看出, 传统的低通滤波处理将信号的局部非平稳特性平滑的处理掉, 因而处理后的曲线更加光滑, 但这样很容易丢失信号的有效成分和信号的局部非平稳特性。而小波变换阈值处理却能够在剔除噪声干扰的同时更加有效地保留信号的峰值特性等非局部平稳特性, 更好地刻画天平信号随迎角变化的真实特性。因而, 针对风洞连续采集信号的降噪处理, 小波变换阈值降噪方法具有明显的优越性。

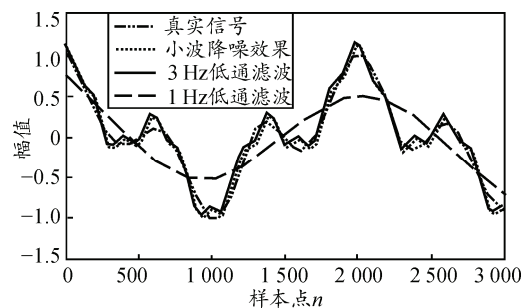


图 6 小波滤波与低通滤波效果比较

为此, 针对风洞连续测力试验数据, 借鉴第 2 节中仿真的方法和经验, 对连续变迎角测力试验纵向、横向试验数据采用 db24 小波 6 层分解。

以某型号连续测力试验(每秒 302 点)时测量得到的 x 元(天平阻力元)信号(如图 7)为例, 采用 db24 小波 6 层阈值降噪处理, 首先求得小波的高、低频系数, 如图 8、图 9 所示。

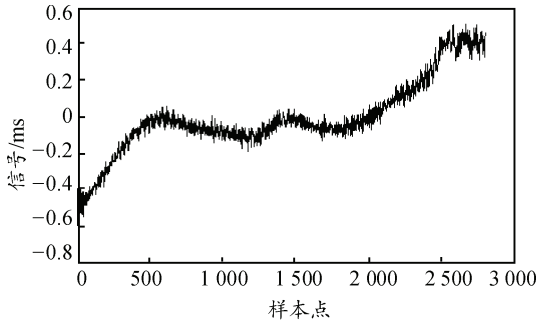


图 7 连续采集数据 x 元原始信号

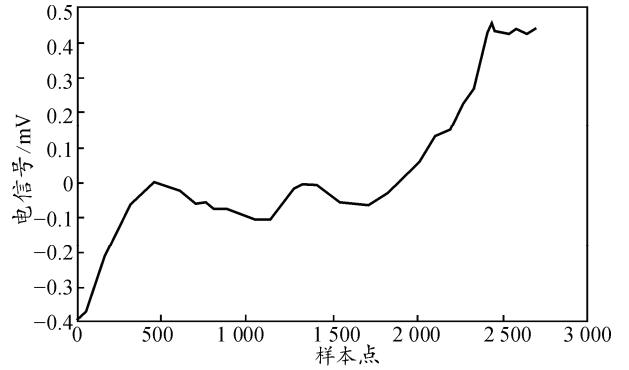


图 10 降噪后的 x 元信号效果图

从提取的高、低频系数可以看出，小波分解的高频细节信号是由风洞噪声分解得到，而 x 元信号可在图 8 的近似低频信号 a6 中得到，这是因为随着尺度的增加，时间分辨率降低，噪声影响变小，在第 6 层时噪声(高频系数 d6)对 x 元信号的影响已经可以忽略，所以针对 x 元信号采用 db24 小波 6 层分解是合理可行的。降噪后的信号如图 10 所示，与原始信号相比，经过处理后的信号曲线光滑性更好，在有效地剔除噪声对信号的震荡干扰的同时也保留了信号的突变点等非平稳特性，更好地刻画了信号随迎角变换的边缘特性。

同样的对天平 y 元(升力元)信号进行降噪处理，降噪前后如图 11 所示。

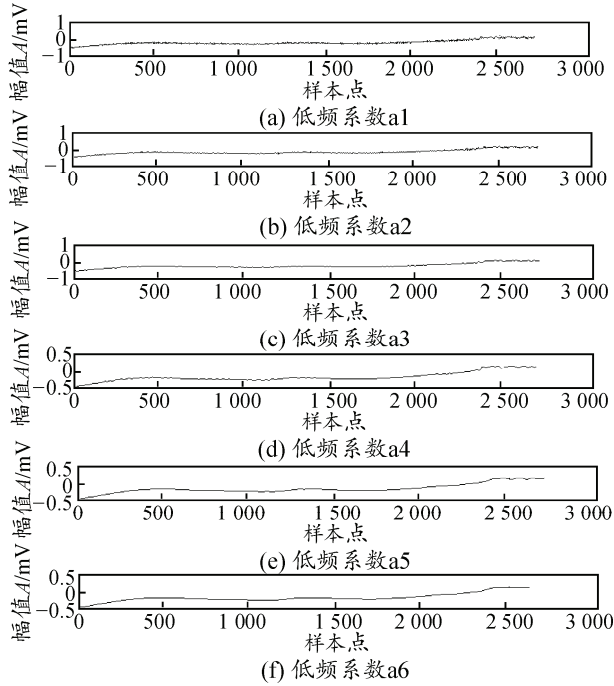


图 8 小波分解的低频系数效果

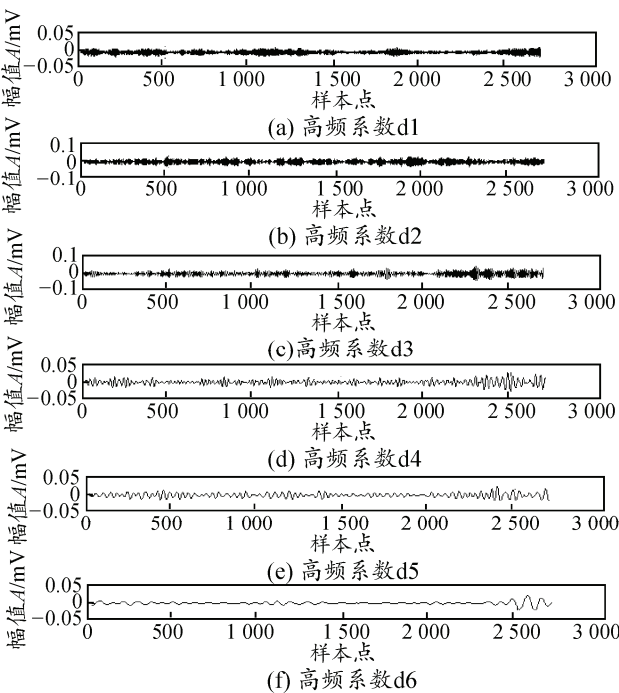
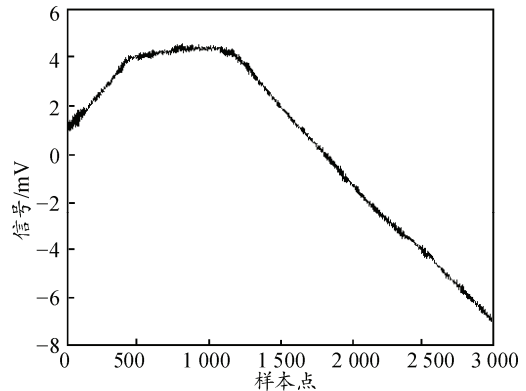
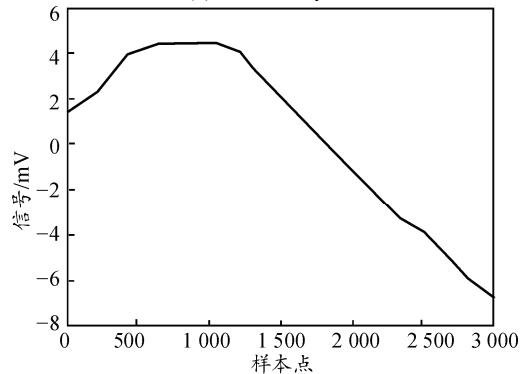


图 9 小波分解的高频系数效果



(a) 原始信号y元



(b) 降噪后的信号y元

图 11 y 元信号降噪前后的效果

4 结束语

笔者提出了一种基于小波变换的风洞连续信号噪声消除方法, 能在有效剔除风洞噪声的同时, 保留信号的有效成分, 更好地刻画信号的非平稳特性, 与传统的低通滤波方法相比具有明显的优越性。对实际风洞连续信号的处理结果也充分说明了该方法的可行性和有效性。下一步, 笔者将针对风洞连续测力试验数据, 选取更多小波基函数及阈值计算方法, 通过能量比、相似度及最终气动曲线数据的比较, 确定最优小波降噪策略, 从而更加有效地提高连续变攻角试验的数据精度。

参考文献:

[1] 乔保栋, 陈果, 曲秀秀. 基于小波变换和盲源分离的滚动轴承耦合故障诊断方法[J]. 机械科学与技术, 2012(1): 53-58.
 [2] 谢春, 宋国明, 姜书艳, 等. 自适应 GA 优化 WNN 的模

拟电路软故障诊断方法[J]. 计算机应用研究, 2012(1): 75-78.
 [3] 王长兴, 苏军伟, 曲新静. 剖分式滚动轴承保持架连接方式[J]. 轴承, 2012(1): 9-11.
 [4] 张蕾, 周洲. 基于小波和信息粒化的 BP 神经网络的轴承故障诊断[J]. 机械科学与技术, 2012(1): 49-52.
 [5] 万千, 薛明. 基于噪声分离和小波阈值自适应图像去噪算法[J]. 电子科技, 2011(5): 94-96.
 [6] 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(6): 89-91.
 [7] 李天云, 范夕庆, 汪剑波, 等. 基于小波滤波和跟踪微分器的介质损耗因数检测方法[J]. 电网技术, 2011(4): 223-226.
 [8] 夏开旺, 廖振修, 高旭光. 基于小波分析的 GPS 接收机随机噪声研究[J]. 山西建筑, 2012(1): 233-235.
 [9] 杨继鹏, 刘学诚. 基于小波变换的网络异常检测研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2012(1): 95-99.
 [10] 张德丰. Matlab 小波分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 50-51.

(上接第 62 页)

舵机以幅值为 10° 频率 2 Hz 的正弦位置指令运动, 要求负载模拟器跟踪幅值为 2 Nm 频率为 2 Hz 的正弦载荷谱。仿真结果如图 5。

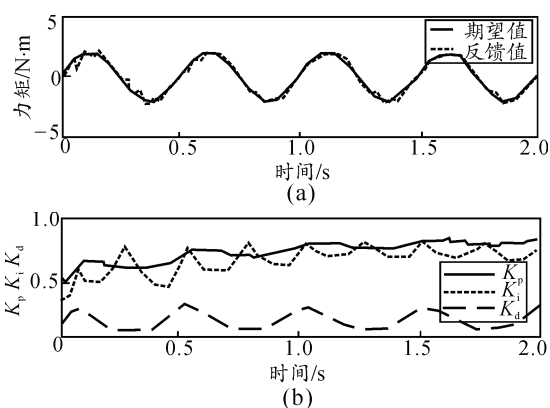


图 1 正弦载荷谱跟踪曲线

图 4(a)所示为舵机处于极限工作状态时, 电动负载模拟器跟踪幅值为 10 N·m 的常值力矩, 基于 BP 神经网络参数自学习 PID 控制算法具有良好的快速性和稳定性。图 4(b)所示为控制过程中实变的 PID 参数值, 达到稳态时, PID 参数保持不变。

图 5(a)中经计算, 使用基于 BP 神经网络参数自学习 PID 控制算法, 在舵机以幅值为 10° 频率为 2 Hz 的正弦位置指令运动时, 电动负载模拟器跟踪幅值为 2 N·m 频率为 2 Hz 的载荷谱, 相位误差为 8.38° , 幅值衰减亦小于 10%, 满足“双十指标”要

求^[10]。图 5(b)中显示控制过程中时变的 PID 参数值。

3 小结

仿真结果表明: 所设计的控制器能有效地解决电动负载模拟器的多余力矩问题, 且具有快速跟踪性, 使基于直流力矩电机的电动负载模拟器的参数自适应性和鲁棒性得到了较大的提高。

参考文献:

[1] 马志伟. 基于直驱电机的电动负载模拟系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
 [2] 张菊丽. 舵机动态加载系统控制仿真研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
 [3] 吴金波, 李绍安, 李维嘉, 等. 电动负载模拟器的建模与混合校正策略[J]. 现代制造工程, 2010(4): 6.
 [4] 范金华, 吕鸣, 刘剑斌. 舵机加载测试系统扰动补偿方法研究[J]. 兵工自动化, 2007, 26(6): 61-63.
 [5] 王瑞. 电动负载模拟器力矩畸变及性能改善方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
 [6] 刘玉凤. 融合控制在电动负载模拟器中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
 [7] 姜长生, 王从庆, 魏海坤, 等. 智能控制与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 375-377.
 [8] 刘金琨. 先进 PID 控制 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 3.
 [9] 舒怀林. PID 神经网络及其控制系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 55.
 [10] 焦冬夏, 华清, 王晓东, 等. 负载模拟器的评价指标体系[J]. 机械工程学报, 2002, 38(11): 27.