

一种改进阈值法陀螺信号消噪的研究

韩 东

(西安航空职业技术学院招生就业处, 西安 710089)

[摘要] 在光纤陀螺输出信号时,使用小波包消噪法可以在各尺度上更加细致地对噪声进行抑制。这里分步估计陀螺信号中白噪声和分形噪声的强度,根据各尺度噪声强度对各层阈值进行自适应调节,并提出一种连续的阈值量化函数,克服以往软、硬阈值函数存在的不足。仿真结果证明,与通用阈值消噪法相比,新阈值法能更好地去除随机噪声,对于不同信噪比信号均表现出较好的性能。

关键词: 光纤陀螺;小波消噪;小波包;连续阈值函数

Research on Improved Threshold De-Noising Method of Gyro Signal

HAN Dong

(Admission and Employment Office, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

[ABSTRACT] Wavelet packet de-noising method can restrain the noise more meticulously at every scale when processing the fiber optic gyro. There are two key points –choosing threshold and quantitating threshold of wavelet packet coefficients– in de-noising process. The intensity of fractal noise and white noise are estimated step by step. The threshold values of the wavelet coefficients are automatically adjusted in accordance with the intensity of noise at different scales. And a continuous threshold function is proposed, it can overcome shortcomings of the traditional wavelet de-noising methods of soft-threshold and hard-threshold strategy. According to process the FOG's drift signal and dynamic signal which is simulated, experiment results show that the proposed method can effectively eliminate the random noise and have a good performance with different signal noise rate.

Keywords: Fiber optic gyro(FOG); Wavelet de-noising; Wavelet packet; Continuous threshold function

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.14.088

光纤陀螺(FOG)是一种全固态惯性器件,已经在捷联式惯性导航系统中得到广泛的应用,它具有寿命长、耐冲击、动态范围宽等优点^[1]。但同时也具有一些缺点,例如:在受到外界环境影响,温度变化,以及冲击和振动等引起的噪声混叠,就会严重影响陀螺输出的精度。对这些噪声的干扰要进行补偿设计,要在得到他们准确的统计特性基础上,建立一个环境变量的多维模型,而通过辨识噪声参数、在线实时拟合等方法来得到这个模型在实现上存在一定的困难。而对光纤陀螺输出进行补偿时不用其漂移模型,直接滤波,通过对信号的消噪到达抑制干扰噪声是可行的^[2]。

利用小波分析的时频局部化特性、多分辨分析的优点,可以根据信号和噪声在小波域具有不同的特征将有效的信号和噪声分离开来。因此,在光纤陀螺信号的消噪方面采用小波分析方法被认为是一种非常有效的方法^[3]。在小波分析的基础上提出来了小波包理论,它能够为信号提供一种更紧密细致的分析方法,从而获得更

细致的时频局部化信息。

在光纤陀螺输出信号中主要存在广义高斯白噪声和 $1/f^\gamma$ 分形噪声^[4]。本文结合陀螺噪声的特点,分类估计噪声强度,使用小波包消噪方法对陀螺输出进行处理时,根据分解尺度自适应地确定阈值,并提出一种连续的阈值函数,规避了传统的硬阈值函数和软阈值函数存在的缺陷。与传统阈值消噪相比,新算法能有效去除噪声,更好地保留真实信号,在静态和动态情况下均具有较好效果。

1 小波包分解与重构原理

小波变换实质上是把信号分解为不同尺度和频率的小波子空间。小波变换只对信号的低频部分做进一步分解,而对高频部分不予考虑,小波包针对信号频带进行多层次的划分,对高频段进一步进行分解,能够根据被分析信号的特征,自适应地选择相应频带^[5-6]。

定义子空间 U_n^j 是函数 $\phi_n(t)$ 的闭包空间,令 $\phi_n(t)$ 满

足下面的双尺度方程。

$$\begin{cases} \phi_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum h_k \cdot \phi_n(2t - k) \\ \phi_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{k \in \mathbb{Z}} g_k \cdot \phi_n(2t - k) \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $g_k = (-1)^k h_{1-k}$, 即两系数具有正交关系。设 $f_j^n(t) \in U_j^n$, 则 $f_j^n(t)$ 可表示为:

$$f_j^n(t) = \sum_{k \in \mathbb{Z}} w_{j,k}^n \cdot \phi_n(2^j t - k), \quad (2)$$

式中, $w_{j,k}^n$ 是 $f_j^n(t)$ 在 U_j^n 中投影的系数。

小波包分解算法:

$$\begin{cases} w_{j,k}^{2n} = \sum_{l \in \mathbb{Z}} h_{l-2k} \cdot w_{j+1,l}^n \\ w_{j,k}^{2n+1} = \sum_{l \in \mathbb{Z}} g_{l-2k} \cdot w_{j+1,l}^n \end{cases}. \quad (3)$$

小波包分解的实质是通过 h 、 g 这一对低、高通组合正交镜像滤波器进行组合采样, 把信号逐层分解到不同频段上。小波包分解的频段宽度 Δf 与分解层数 j 及采样频率 f_s 满足关系式:

$$\Delta f = f_s / 2^{j+1}, \quad (4)$$

由上式可得, 选择适当的分解层数可得到频段宽度及各频段起止频率, 就可以分离陀螺信号中的特征信号和干扰噪声。

小波包的重构算法:

$$w_{j+1,k}^n = \sum_{l \in \mathbb{Z}} [h_{k-2l} \cdot w_{j,l}^{2n} + g_{k-2l} \cdot w_{j,l}^{2n+1}]. \quad (5)$$

2 光纤陀螺噪声的估计

光纤陀螺误差按照噪声项的来源可分为 5 种: 偏置不稳定性噪声、角度随机游走噪声、速率斜坡噪声速率、随机游走噪声和量化噪声。它们是功率谱密度和频率的 γ 成反比的 $1/f^\gamma$ 分形噪声。光纤陀螺的输出可表示为:

$$f(t) = s(t) + \mu(t) + \omega(t), \quad (6)$$

式中, $\mu(t)$ 表示分形噪声, $\omega(t)$ 表示高斯白噪声。假设 $\mu(t)$ 与 $\omega(t)$ 相互独立不相关, $s(t)$ 表示陀螺输出的有效信号。对光纤陀螺静态输出数据进行去常值漂移和线性趋势项的预处理, 有效信号非常弱, 已经淹没在噪声中, 近似有 $s(t) \approx 0$ 。则式(6)可改写为:

$$f(t) = \mu(t) + \omega(t), \quad (7)$$

$f(t)$ 即为零漂信号。

2.1 高斯白噪声方差估计

对于式(7)所示的陀螺信号计算其自相关函数。

$$R_f(\tau) = E[f(t) \cdot f(t + \tau)] = R_\mu(\tau) + R_\omega(\tau), \quad (8)$$

式中, $R_\omega(\tau) = \begin{cases} \sigma_\omega^2, & \tau = 0 \\ 0, & \tau \neq 0 \end{cases}$, σ_ω^2 为高斯白噪声方差。

由式(8)知, 陀螺信号的自相关函数在 $\tau=0$ 处为白噪声方差 σ_ω^2 与分形噪声自相关函数之和。因此, 通过陀螺信号自相关函数在非零点的值拟合 $R_f(\tau) - \tau$ 曲线,

估计出零点值, 则可由信号源自相关函数零点值与拟合估计的零点值相减得到 σ_ω^2 的估计值。然而完全不相关的白噪声是不存在的, 实测的陀螺信号自相关函数与单纯的 $1/f^\gamma$ 分形噪声自相关函数在非零处上是不可能完全重合的, 因此, 引入总延迟时间 T 来提高拟合精度, 更加准确的白噪声强度进行估计。具体确定 T 的方法参见文献[7], 文中不再复述。

2.2 分形噪声方差估计

$1/f^\gamma$ 分形噪声在时域是非平稳的, 对其进行小波变换后, 用 w_k^j 表示尺度为 j 时, k 时刻的小波系数。若变换所用的小波基具有 R 阶消失矩, 对于 $0 < \gamma < 2R$, 分形噪声在尺度 j 时的小波系数 $\{w_k^j\}$ 是零均值, 方差为 $\sigma_\mu^2 2^{-\gamma j}$ 的弱相关平稳随机序列, σ_μ^2 表示分形噪声时域的方差。在相同尺度下, 序列 $\{w_k^j\}$ 的相关性随 R 的增加而呈指数下降, 当 R 较大时, 序列几乎不相关。采用具有高阶消失矩的小波函数对式(7)所示信号进行小波变换, 可得各尺度下小波系数的方差关系式:

$$\text{Var}(w_k^j) = \sigma_\mu^2 2^{-\gamma j} + \sigma_\omega^2 = \sigma_j^2. \quad (9)$$

由于白噪声的噪声水平不随小波分解尺度的变化而改变, 因此式(9)中的 σ_ω^2 即为 2.1 节中估计出的白噪声方差值。对式(9)移项后两边取对数得:

$$\log_2(\sigma_j^2 - \sigma_\omega^2) = -\gamma j + \log_2 \sigma_\mu^2. \quad (10)$$

式中, σ_j^2 可由直接计算各尺度小波系数方差得到。将分解尺度 j 作为自变量, $\log_2(\sigma_j^2 - \sigma_\omega^2)$ 作为因变量, 通过最小二乘拟合的方法得到分形噪声方差 σ_μ^2 和参数 γ [8]。

3 小波包阈值消噪

在小波包框架中, 其信号消噪的算法思想与一般小波消噪基本一致, 都是通过对小波域系数进行阈值处理以达到去除噪声的目的, 最大限度保留有效信号小波系数, 实现降噪。小波包分析是对上一层的低频部分和高频部分进行细分, 因此具有更为精确的局部分析能力。因此对信号进行第 J 层小波包分解时有 2^J 组分解系数, 而引入小波包变换是为了让能量集中, 也就是在小波系数中寻找有序性 [9], 因此, 把所有部分都进行分解对解决问题是没有帮助的。这就需要有一定的衡量标准, 一般采用最小熵原则。熵是用来度量信息规律性的概念, 熵越小信息的规律性就越强, 据此准则可以得到一个信号分解的树状结构, 称为小波树。那么寻求最优小波树就是力图使分解有最大的规律性, 把信号内在规律挑出来。

3.1 阈值选取和改进

阈值的确定以及函数的选取是小波阈值消噪算法的两个关键的问题, 它们将直接影响到消噪的效果。要

根据信号中所含噪声特征选择合适的阈值。若阈值太小,去噪后的信号仍然存有噪声;阈值过大,则可能将信号的主要特征也一并滤除掉,引起偏差。目前,常用的阈值准则为:

$$\lambda = \sigma\sqrt{2\log_2 N} \quad (11)$$

式中, N 为给定细节子带的小波系数长度, σ 为信号噪声的标准差,它可由第一层分解下由小波系数的绝对值中值 M 来估计。

$$\sigma \approx \frac{M}{0.6745} \quad (12)$$

上述阈值是系数间相互独立的,且噪声为白噪声的假设推导出的,在不同的尺度上阈值变化规律相同。然而,光纤陀螺信号中除了含有白噪声外还有分形噪声,信号为非平稳序列,由此通过 M 估计噪声水平,不能很好地反映噪声变化的规律,进而计算阈值就会存在偏差。而且依该准则计算的阈值受信号长度影响,系数长度 N 过大时, λ 趋向于将所有小波系数置零,易产生“过扼杀”系数的情况,增大重构误差。

针对上述问题,并考虑到阈值随分解尺度增大而逐渐减小的特点,本文采用 Normal Shrink 准则计算阈值。

$$\lambda = \frac{\sigma^2}{\sigma_j} \cdot \sqrt{\log_2(N/j)} \quad (13)$$

对不同的子带,所选取的阈值大小跟分解的尺度、子带系数长度密切相关。由于陀螺信号中主要包括白噪声和分形噪声,所以 σ^2 按下式估计:

$$\sigma^2 = \sigma_\mu^2 + \sigma_\omega^2 \quad (14)$$

式中,白噪声方差 σ_ω^2 和分形噪声方差 σ_μ^2 分别由 2.1 节和 2.2 节的方法得到。

3.2 一种新的连续阈值函数

目前,软阈值方法和硬阈值方法在实际中得到广泛应用。

硬阈值函数为:

$$\hat{\omega}_{jk} = \begin{cases} \omega_{jk} & |\omega_{jk}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{jk}| < \lambda \end{cases} \quad (15)$$

软阈值函数为:

$$\hat{\omega}_{jk} = \begin{cases} \text{sign}(\omega_{jk}) \cdot (|\omega_{jk}| - \lambda) & |\omega_{jk}| \geq \lambda \\ 0 & |\omega_{jk}| < \lambda \end{cases} \quad (16)$$

式中, sign 表示取符号运算。硬阈值法去噪效果较好,但该函数在 $\pm\lambda$ 处不连续,易引起重构信号的振荡,在不连续点处消噪后会出现伪吉布斯现象;软阈值方法计算出来的 $\hat{\omega}_{jk}$ 虽然整体连续性好,降噪效果相对平滑,但在 $|\hat{\omega}_{jk}| \geq \lambda$ 时, $\hat{\omega}_{jk}$ 与 ω_{jk} 间总存在恒定的偏差,使得重构信号对真实信号的逼近程度得到严重影响。并且它们的导数不连续,在实际应用中需要对一阶导数甚至高阶导数进行处理时,这两种阈值函数存在一定局限性。为

了这些缺点,国内外的科学家研究了很多阈值函数改进方法,但其中大都表达式复杂,并且分段取值。本文提出一种连续的阈值函数,它具有连续的高阶导数,在 $|\hat{\omega}_{jk}| \geq \lambda$ 时可以较快逼近硬阈值函数。

$$\hat{\omega}_{jk} = \omega_{jk} \cdot 2^{-\alpha(\lambda/|\omega_{jk}|)^\beta} \quad (17)$$

新的阈值函数选择以 2 为底的指数函数做收缩系数,便于在计算机上实现。该阈值函数主要针对含有少量真实信息的小波系数处理上,将这些系数做收缩处理,最大程度的保留真实信号,消减绝对值接近或低于阈值的小波系数,使它们远远小于其他系数。式(17)中 α, β 为正整数,随着 α 的增大, $\hat{\omega}_{jk}$ 由趋于零收缩变为趋于 ω_{jk} 的转折段越来越远离原点,当 $\alpha=4$ 时该转折段在阈值附近; β 越大,新方法计算的 $\hat{\omega}_{jk}$ 越逼近于硬阈值,不过随着 β 增大计算量也相应增大。在阈值附近,新阈值函数具有软阈值函数的作用,它可使得阈值消噪以较为平滑的方式实现,使在阈值附近的小波系数收缩后更加接近原信号的小波系数,从而能有效抑制由于直接截断可能引起的虚假振荡。

4 仿真试验

首先,选用光纤陀螺静态漂移数据对消噪方法进行检验,将某干涉型光纤陀螺固定在水平转台上,其输入敏感轴指向正东方向,对准误差控制在角秒范围,转台保持静止,采样频率 20Hz。分别采用通用阈值的小波包消噪法和改进阈值函数的小波包消噪法处理陀螺输出。用 db4 小波基分解至 5 层,以 Shannon 熵作为熵标准确定最优小波树,通用阈值消噪时采用硬阈值函数,改进阈值消噪时参数 α, β 仍取 4 和 5。

陀螺原始输出数据如图 1 (a) 所示,其中含有大量非平稳随机噪声。通过小波包通用阈值法消噪后,信号波形变为图 1 (b),噪声得到较好抑制,信号标准差由消噪前的 0.39979°/h 降至 0.10744°/h,但由于阈值函数截断消噪后信号存在振荡,波形不够平滑。图 1 (c)

表1 光纤陀螺静态输出小波包消噪前后各噪声系数

噪声项系数	原始信号	通用阈值消噪	改进阈值消噪
角度随机游走系数 $N/(\circ \cdot \text{h}^{1/2})$	0.01159	0.00532	0.00537
偏置不稳定性系数 $B/(\circ \cdot \text{h}^{-1})$	0.24898	0.18483	0.04381
速率随机游走系数 $K/(\circ \cdot \text{h}^{3/2})$	2.39441	1.73304	1.03424
速率斜坡系数 $R/(\circ \cdot \text{h}^{-2})$	8.48722	6.82335	6.40209
量化噪声系数 $Q/\mu\text{rad}$	3.74404	2.45095	1.24010

是采用改进阈值消噪后的信号波形,标准差为 $0.10046^\circ/h$, 消噪效果优于通用阈值法,而且有效避免了振荡^[10]。

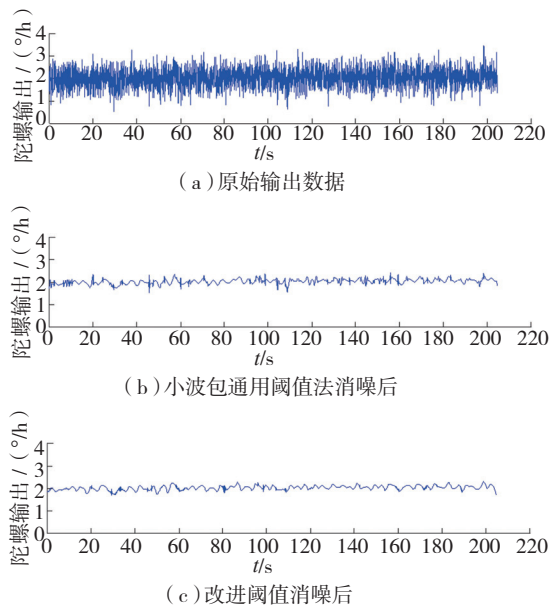


图1 光纤陀螺原始输出信号及小波包消噪后信号

Fig.1 Original output signal of fiber optic gyro and wavelet packet de-noising signal

对消噪前后的陀螺静态漂移信号进行 Allan 方差分析,以确定存在于信号中的各项噪声水平。

从消噪前后拟合得到的各项随机误差系数可以看出,在经过了小波包消噪后各项误差都得到一定程度的减小,并且文中所提方法对噪声的抑制效果要更好些。

为验证对光纤陀螺动态输出信号的滤波效果,利用 Matlab 中的 bumps 信号作为陀螺输出的有效信号,通过数字信号处理的方法模拟各噪声项:用广义白噪声模拟角度随机游走噪声;用高斯白噪声的一次积分模拟速率随机游走噪声;用均值为零,方差为 $LSB^2/2$ 的高斯白噪声模拟量化噪声, LSB 表示角度量化的最低有效位;用随机速率斜坡函数模拟速率斜坡噪声;用正交小波变换的方法模拟偏置不稳定性噪声^[11];用一阶 Markov 过程来模拟指数相关噪声。按不同的信噪比将信号与噪声叠加在一起,模拟含噪的光纤陀螺动态输出信号,进行小波包消噪处理。

滤波前模拟含噪信号的信噪比(SNR)为 25dB,信号波形如图 2(a)所示。图 2(b)是经通用阈值法消噪后的信号,信噪比提高到 34.95dB,而改进阈值法消噪后结果为图 2(c),信噪比为 35.63dB。

对于模拟的光纤陀螺动态输出设定不同的信噪比,经过两种阈值方法消噪后,信噪比改善情况(消噪前后信噪比之差)如图 3 所示。从图中可看出,在各种信噪比输入下,本文提出的改进阈值消噪法对信噪比的改善效果均要优于通用阈值法。

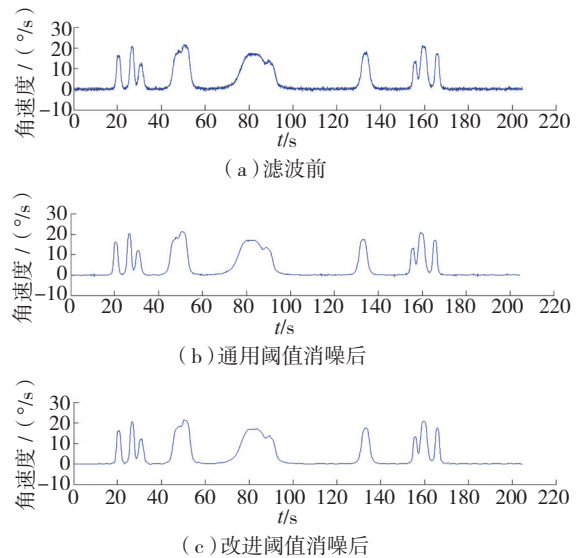


图2 模拟光纤陀螺动态输出信号的小波包消噪

Fig.2 Wavelet packet de-noising for simulating the dynamic output signal of fiber optic gyro

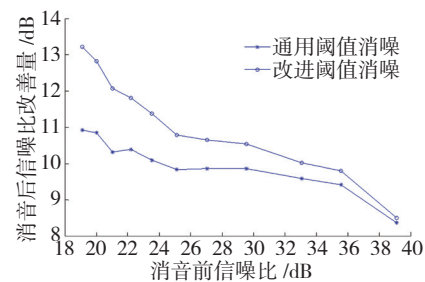


图3 信噪比改善曲线

Fig.3 Signal to noise ratio improvement curve

5 结论

采用小波包消噪法处理光纤陀螺输出信号,可以在各尺度上更加细致地对噪声进行抑制。文中对以往小波包阈值消噪法的阈值和阈值函数进行改进,提出一种连续的阈值函数用于小波系数处理。通过对陀螺静态输出的消噪验证和动态信号的仿真处理,证明改进的阈值方法可以更好地保存原信号中的尖峰和突变特征,同时有效抑制噪声。这是因为在新算法中,各层小波系数的阈值是根据所在层噪声的幅度自适应调节的,并且估计噪声方差时针对光纤陀螺噪声项特点进行辨识计算,比单纯选用第一层小波分解系数中值做估计要精确,且新的连续阈值函数使小波系数阈值处理以较为平滑的方式实现,在阈值附近具有类似于软阈值函数的作用,在阈值之上时又具有硬阈值函数的作用,使滤波后小波系数取值更加接近原信号小波系数取值。改进的阈值方法在计算量上比通用阈值法有所增加,适用于对消噪处理实时性要求不高,但消噪精度要求较高的场合。

参考文献

[1] 周泓. 光纤陀螺的应用与发展[J]. 国防技术基础, 2010(3):41-42.
 ZHOU Hong. Application and development of fiber optic gyro[J]. Technology Foundation of National Defence, 2010(3):41-42.

[2] ZHU Yunzhao, WANG Shuting, MIAO Lingjuan. Open loop FOG signal testing and wavelet eliminating noise [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2005, 22(2):103-106.

[3] 付强文, 张英敏. 光纤陀螺信号处理的实用方法 [J]. 传感技术学报, 2005, 18(1): 101-104.
 FU Qiangwen, ZHANG Yingmin. A Practical method of fiber optic gyro signal processing[J]. Journal of Sensing Technology, 2005, 18(1):101-104.

[4] SKALLOUD J, BRUTON A M, SCHWARZ K P. Detection and filtering of short-term($1/f^2$) noise in inertial sensors [J]. Navigation, 1999, 46(2):97-107.

[5] 陈婧, 宋凝芳, 李敏. 小波分析在光纤陀螺分形噪声模拟中的应用 [J]. 光电与控制, 2010, 17(5):50-53.
 CHEN Jing, SONG Ningfang, LI Ming. Application of wavelet analysis in simulation of fractal noise of fiber optic gyroscope[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(5):50-53.

[6] 钱华明, 马吉臣, 李仲玉. 基于小波包阈值处理的光纤陀螺信号降噪 [J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15(5):602-605.
 QIAN Huaming, MA Jichen, LI Zhongyu. Fiber optic gyro signal denoising based on wavelet packet threshold processing [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(5):602-605.

[7] 何凯, 王树勋, 戴逸松. 估计 分类分形信号信噪比的新方法 [J]. 吉林大学学报, 2004, 34(1):36-38.
 HE Kai, WANG Shuxun, DAI Yisong. New SNR estimation method to $1/f$ fractal signal [J]. Journal of Jilin University of Technology(Natural Science Edition), 2004, 34(1):36-38.

[8] 武华伍, 任章. 光纤陀螺中分形噪声的参数估计和去除. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(6):630-633.
 WU Huawu, REN Zhang. Parameter estimation and elimination to fractal noise of fiber optic gyro[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(6):630-633.

[9] 徐东星. 基于小波变换的数字信号去噪方法 [D]. 武汉: 湖北大学, 2008.
 XU Dongxing. Digital signal denoising method based on wavelet transform [D]. Wuhan:Hubei University, 2008.

[10] ALLAN D.W. Statistics of atomic frequency standards [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 54(2):221-230.

[11] 葛升民, 边志强, 韩良军, 等. 光纤陀螺随机误差特性仿真与辨识 [J]. 测试技术学报, 2008, 22(4):328-332.
 GE Shengmin, BIAN Zhiqiang, HAN Liangjun, et al. Research on simulation and identification of random error properties for FOG[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2008, 22(4):328-332. (责编 冬月)

(上接第79页)

[18] 赵衍华, 刘景铎, 张丽娜, 等. 2014 铝合金搅拌摩擦焊缝的拉锻式摩擦塞补焊 [J]. 航空材料学报, 2010, 30(1):41-46.
 ZHAO Yanhua, LIU Jingduo, ZHANG Lina, et al. Study on friction plug welding of 2014 aluminum alloy FSW joint [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(1):41-46.

[19] METZ D F, WEISHAAPT E R, BARKEY M E, et al. A microstructure and microhardness characterization of a friction plug weld in friction stir welded 2195 Al-Li [J]. Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the ASME, 2012, 134(2):1-7.

[20] METZ D F, BARKEY M E. Fatigue behavior of friction plug welds in 2195 Al-Li alloy [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 43:178-187.

[21] 黄永宪, 韩冰, 吕世雄, 等. 基于固态连接原理的填充式搅拌摩擦焊匙孔修复技术 [J]. 焊接学报, 2012, 33(3):5-8.
 HUANG Yongxian, HAN Bing, LÜ Shixiong, et al. Filling friction stir welding for repairing keyhole based on principle of solid state joining[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(3):5-8.

[22] HUANG Yongxian, HAN Bing, LÜ Shixiong, et al. Interface behaviours and mechanical properties of filling friction stir weld joining AA 2219[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(3):225-230.

[23] HUANG Yongxian, HAN Bing, TIAN Ying, et al. New technique of filling friction stir welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(6):497-501. (责编 冬月)

(上接第83页)

Aeronautics & Astronautics, 2013.

[2] JOSHI S. 三维模型加工特征的图像启发式识别方法 [J]. 计算机辅助设计, 1988, 20(2):58-66.
 JOSHI S. Graph-based heuristics for recognition of machined features from 3D solid model[J]. Computer Aided Design, 1988, 20(2):58-66.

[3] SUNIL V B. 使用混合技术从边界表达的棱柱形加工模型上识别交叉特征的一种方法 [J]. 工业计算机, 2010, 61:686-701.
 SUNIL V B. An approach to recognize interacting features from B-rep CAD models of prismatic machined parts using a hybrid (graph and based) technique[J]. Computer in Industry, 2010, 61:686-701.

[4] 陶品. 三维模型特征识别中的神经网络方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(11):912-918.
 TAO Pin. Neural network method in 3D model feature recognition[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(11):912-918.

(责编 冬月)

(上接第87页)

ZHANG Yue. Machining method and key technology research on auto-programming of aircraft blade seven axis NC abrasive belt grinding[D]. Chongqing:Chongqing University, 2012.

[6] 刘树生, 杨建中. 叶片六轴联动数控砂带磨床与数控砂带磨削单元化 [J]. 航空制造技术, 2010(4):32-37.
 LIU Shusheng, YANG Jianzhong. 6-Axis Hybrid NC belt-grinding machine for blade and unitization of NC belt-grinding [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(4):32-37.

[7] 陶永强, 矫桂琼, 王波, 等. 2D 编织陶瓷基复合材料应力-应变行为的试验研究和模拟 [J]. 固体力学学报, 2010(3):258-268.
 TAO Yongqiang, JIAO Guiqiong, WANG Bo, et al. Experimental investigation and numerical simulation of the stress-strain behavior of 2D weave ceramic matrix composites [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010(3):258-268.

[8] CABARAVDIC M, KUHLENKOETTER B. Bandschleifprozesse optimieren[J]. Mo Metalloberfläche, 2005(59):44-47.

(责编 冬月)