

文章编号: 1001-3806(2012)02-0251-04

全光纤位移干涉测速系统中小波基的选取研究

刘彪¹, 吴云峰^{1*}, 赵新才^{1,2}

(1. 电子科技大学 光电信息学院 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所 绵阳 621900)

摘要: 为了使全光纤位移干涉测速系统能够准确稳定地测速, 采用小波基分析问题的方法, 对全光纤位移干涉测速仪信号进行了理论分析, 并选取6种小波基函数进行计算机模拟, 选定了适合全光纤位移干涉测速仪信号分析方法的最优小波基。与此同时, 分别利用自由落体运动实验和高速爆轰实验验证了系统的精确性和稳定性, 精确度达到99%, 稳定性极高。结果表明, 最优小波基的选取是合理的。

关键词: 激光技术; 最优小波基; 计算机模拟; 小波变换; 信号处理

中图分类号: TP301.6 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.027

Research on wavelet selection in all fiber displacement interference speed measurement system

LIU Biao¹, WU Yun-feng¹, ZHAO Xin-cai^{1,2}

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to make the all-fiber displacement interferometer system for any reflector (AFDISAR) operate accurately and stably, based on wavelet analysis, the AFDISAR signal was analyzed theoretically and then six types of wavelet base functions were selected for computer simulation, and finally the optimal wavelet base appropriate for AFDISAR signal analysis was decided. At the same time, the accuracy of 99% and high stability of the system were verified in the free-fall motion experiment and the high-speed detonation experiment respectively. The results indicate that the selection of optimal wavelet base function is reasonable.

Key words: laser technique; optimal wavelet base; computer simulation; wavelet transformation; signal processing

引言

全光纤位移干涉^[1-3]测速仪(all-fiber displacement interferometer system for any reflector, AFDISAR)是近几年发展起来的一种新型的用在冲击波和爆轰波物理实验中测量物体瞬时速度的激光干涉^[4-5]测量系统,是以光纤为框架、非接触测量任意反射面速度的干涉仪。数据处理作为AFDISAR测速实验的后续环节,是AFDISAR测速技术的重要组成部分。如何高精度获得采集信号的频率,是AFDISAR中的难题。在传统的信号分析中,时频分析一般选择傅里叶变换的方式,它可以把信号在频域进行描述,但只是一种全局的分析,无法获知某一个频率在何时出现,所以仅对平稳信号的分析比较适合;对于非平稳信号,一般是选择短时傅里叶变换的方式,它是傅里叶变换的改进,通过加窗口,将一个非平稳过程看

作是一系列短时平稳的集合,从而完成信号在时频两域的局部化分析,但是它的窗口宽度是固定不变的,对于任何信号其分辨率均相同,所以它存在一定的局限性,不适合分析变化剧烈的信号^[6]。

20世纪80年代发展起来的小波变换理论弥补了以上的不足。小波函数可以用不同的分辨率对某一时刻的信号进行分析,对信号有自适应的能力,非常适合于收集正常信号中携带的瞬态反常信号并提取其成分。它可以对不同的频率成分选择不同的步长,描述信号的任意细节,这就使得小波理论在信号处理领域得到了极广的应用^[7-8]。冲击波或者爆轰波物理中的高速位移干涉信号是急剧变化的非平稳信号,小波变换方法正是此类信号时频分析的得力工具^[6]。

和传统的傅里叶变换相比较,在小波变换中用到的小波基函数并不是唯一的,小波函数的选择具有多样性,那么在实际应用中,小波基的选取问题就显得十分重要。因为对于同一个信号,选取不同的小波基进行分析时结果都是不一样的,有时候可能差别还很大,所以最优小波基的选取是首先需要解决的问题。

作者简介: 刘彪(1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理与模式识别。

* 通讯联系人。E-mail: yfwu-72@163.com

收稿日期: 2011-06-13; 收到修改稿日期: 2011-07-29

1 小波理论及 AFDISAR 系统的工作原理

1.1 小波理论

小波即小区域的波,是一种特殊的长度有限而且平均值为 0 的波形。有两个特点:一是“小”,即在时域具有紧支集或者近似紧支集;二是正负交替的“波动性”,也即支流分量为 0^[9]。设 $\psi(t) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 为平方可积的实数空间 R 为实数),它的傅里叶变换为 $\psi(\omega)$ 。当 $\psi(\omega)$ 满足允许条件:

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

时称 $\psi(t)$ 为一个基 Ψ 本小波或母小波。对母小波 $\psi(t)$ 做平移和伸缩变换,就可获得一个小波序列。对于连续的情况,小波序列为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (a, b \in R, R \text{ 为实数, 且 } a \neq 0) \quad (2)$$

式中 a 表示尺度因子, b 表示平移因子, $\psi_{a,b}(t)$ 也称作尺度小波。

1.2 AFDISAR 系统的工作原理

全光纤位移干涉测速系统将带有多普勒频移的信号光与光源发出的参考光进行光学混频干涉,然后由探测器探测干涉信号并输入数据采集系统,最后对数据信号进行处理,就可以得出被测物体的速率曲线。本文中所采用的 AFDISAR 系统主要由光发射组件、光探测组件、光接收组件组成,其光路原理见图 1。由图 1 可以看出,光源发出的光经过第 1 个 1×2 分束器分成两束,一束经过环形器 1 端口,然后从环形器 2 端口出射,再由探头射向被测运动物体,从被测物体反射回来的光束(记为光束 I_r) 由同一探头收集,进入环形器 2 端口,然后从环形器 3 端口出射,到达 2×1 合束器中。而第 1 个分束器分出来的另一束光经过一个衰减器,从衰减器出射的光束又经过第 2 个 1×2 分束

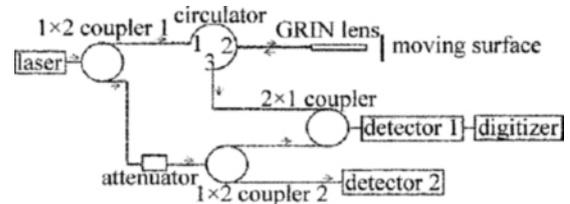


Fig. 1 Optical principle of AFDISAR

器,其中一半进入 2×1 合束器和光束 I_r 进行光学混频干涉,最后由探测器 1 获取混频信号,进而进入数据记录系统(即高速数字示波器),另一半进入探测器 2(光功率计,用来实时监测光源的光强变化)。

2 最优小波基的选取及优化

理想情况下,全光纤位移干涉仪信号是幅度恒定、频率随时间而变化的单频信号。但由于受光纤器件、光电探测器以及被测物体表面反射的影响,实际信号为幅度和频率^[9]均随时间变化而且带有噪声的单频信号,所以,系统采集到的信号是瞬时频率随时间变化的非平稳信号。AFDISAR 信号持续时间极短,对小波基函数的紧支撑能力要求较高,而 AFDISAR 信号变化快则要求小波基函数需具有对称性,同时不需要对信号进行重构,对小波基函数的正交性没有严格要求。结合 AFDISAR 系统采样信号的频谱范围跨度很大(1GHz~10GHz)、采样数据量较大(约 40 万个采样点)、持续时间短、信号变化快等特点,最大限度地使小波基函数的形状和 AFDISAR 信号有极强的相似性,选取 morlet 小波、db 小波、coif 小波、sym 小波、mexh 小波、meyr 小波作为初步选定的小波基。

借助 MATLAB 工具编写简短程序,采用上面的小波基分别对 AFDISAR 高速信号进行处理,计算的结果如图 2 所示。通过图 2 中的对比可以看出,在时频域内 morlet 复小波均有很好的紧支撑能力,在被分析信号频率的小范围波动内很适应,并且其对称性较好。因此,优先考虑

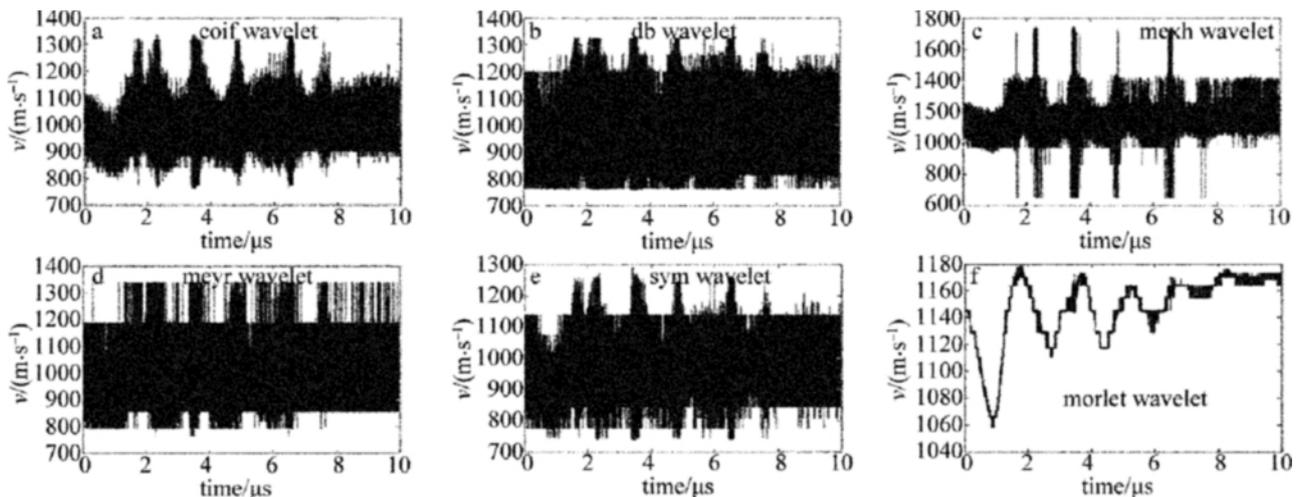


Fig. 2 Selection of the optimal wavelet

选择 morlet 复小波为小波基。由于没有对 morlet 小波进行优化,所以计算得到的速率曲线比较粗糙。

下面对 morlet 复小波进行分析。morlet 复小波是一种高斯调频小波,有限长度极短、对称性良好,在时频两域均有较好的局部性能,而且其波形和 AFDISAR 系统采集的信号波形极其相近,非常有利于信号特征的提取。图 3 是中心圆频率为 5rad 时的 morlet 小波频域图。

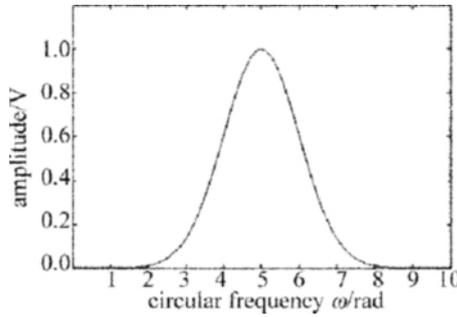


Fig. 3 Center angular frequency of morlet mother wavelet frequency domain is 5rad

将 morlet 小波的表达式描述为:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} (e^{-i\omega_0 t} - e^{-\omega_0^2/2}) e^{-t^2/2} \quad (3)$$

则其傅里叶变换可描述为:

$$\psi(\omega) = \sqrt{2}\pi^{-1/4} [e^{-(\omega-\omega_0)^2/2} - e^{-\omega_0^2/2} e^{-\omega^2/2}] \quad (4)$$

由(4)式可以看出,当 $\omega = 0$ 时,有 $\psi(0) = 0$, 满足允许条件,所以 morlet 小波为允许小波。在工程应用中,通常取 $\omega_0 \geq 5\text{rad}$,同时对 morlet 复小波进行简化可以得到:

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \exp\left[-i\omega_0 t - \frac{t^2}{2}\right] \quad (5)$$

$$\psi(\omega) = \sqrt{2}\pi^{-1/4} \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2}\right] \quad (6)$$

这时仍然可以近似满足允许条件,因为当 $\omega = 0$ 时:

$$\psi(0) = \sqrt{2}\pi^{-1/4} \exp(-\omega_0^2/2) \approx 0 \quad (7)$$

morlet 小波是一种复值小波,用其进行小波变换^[10]时,需要对它的实部与虚部分别计算,最后将结果合在一起。即使上面简化了 morlet 小波,然而运算还是相当复杂,在工程应用中极为不利。因此,继续对 morlet 小波作进一步改进。

分析简化后的 morlet 小波,其实部与虚部分别为:

$$\psi_{gr}(t) = \pi^{-1/4} \cos(\omega_0 t) \cdot \exp(-t^2/2) \quad (8)$$

$$\psi_{gi}(t) = \pi^{-1/4} \sin(\omega_0 t) \cdot \exp(-t^2/2) \quad (9)$$

从(8)式可以看出, morlet 小波的实部为一个偶函数,那么经过傅里叶变换以后还是偶函数,因此,如果将实部作为一个滤波器是一个无相滤波器。和实部相比,虚部进行了 90° 的相移,但是二者的幅频特性是一样的。采用复小波对信号进行分析的优点是可以刻画

其相位特征,但是对 AFDISAR 信号进行处理时,不需要检测其相位。因此,对于本系统,在进行小波变换时选择简化 morlet 小波的实部。

改进以后的小波函数保留了原 morlet 小波的优秀品质,虽然它会带来非常微弱的直流分量,进而影响信号的处理精度,但是在工程应用中通常选取 $\omega_0 \geq 5\text{rad}$,这时这个影响极小可以忽略。更重要的是,改进以后的 morlet 小波函数和 AFDISAR 系统采集得到的信号波形更加相似,这就进一步提高了对信号的处理精度。

对于小波变换,有:

$$f = F_c / (aT) \quad (10)$$

式中, F_c 表示母小波的中心频率, a 表示尺度因子, T 是数据记录系统的采样周期, f 为信号频率,这在实验之前就已经设置完毕,当作已知数。

在前期研究中,得出被测物体运动速率和信号频率的关系为:

$$f(t) = (2/\lambda_0) v(t), \text{ 简记为 } f = (2/\lambda_0) v \quad (11)$$

λ_0 为光源的波长,为 1550nm, v 为速率,故其可以写为:

$$v = f / (1.29 \times 10^6) \quad (12)$$

结合(10)式与(12)式可得:

$$v = F_c / (1.29 \times 10^6 a \cdot T) \quad (13)$$

由于选定了母小波以后,其中心频率 F_c 就已确定,所以令:

$$F_c / (1.29 \times 10^6 T) = \text{const} \quad (14)$$

则有:

$$v = \text{const}/a \quad (15)$$

从上式可以看出,通过短时傅里叶变换得出被测物体的速率范围 v_{\min} 和 v_{\max} ,据此,就可以确定小波函数的尺度范围 a_{\min} 与 a_{\max} 。

3 验证实验

为了检验本文中所选取的最优小波基在 AFDISAR 测速系统中的可行性和精确度,利用该系统来做自由落体运动测速试验和空气隙加载爆轰试验。

3.1 自由落体运动测速试验

由著名的自由落体定律得知,若已知物体的下落高度 h ,那么物体下落的末速率为 $v_t = \sqrt{2gh}$,其中 g 为重力加速度。所以,只要本系统测得的物体末速率和理论估算值一致,并通过速率曲线计算得到的加速度和当地重力加速度一致,就能充分说明本测速系统以及算法可行而且精确度很高。作者总共完成 6 组试验,其中有 3 组实验由于试验条件等原因均失败,成功的实验数据见表 1。

Table 1 Error analysis of free-fall velocity experiments

	lower limit	predictive value	the first free-fall velocity experiments		
			limit	actual measured value	error/%
acceleration of gravity $g/(m \cdot s^{-2})$	9.7500	9.7630	9.8000	9.7270	0.3687
height of the drop h/m	1.5950	1.6000	1.6050		
terminal velocity $v_t/(m \cdot s^{-1})$	5.5770	5.5894	5.6087	5.5820	0.1327
the second free-fall velocity experiments					
acceleration of gravity $g/(m \cdot s^{-2})$	9.7500	9.7630	9.8000	9.7630	0.0000
height of the drop h/m	0.1150	0.1200	0.1250		
terminal velocity $v_t/(m \cdot s^{-1})$	1.4975	1.5307	1.5652	1.5190	0.7660
the fifth free-fall velocity experiments					
acceleration of gravity $g/(m \cdot s^{-2})$	9.7500	9.7630	9.8000	9.6620	1.0345
height of the drop h/m	1.5020	1.5070	1.5120		
terminal velocity $v_t/(m \cdot s^{-1})$	5.4119	5.4245	5.4438	5.3633	1.1290

由表1易知,第1次、第2次和第5次实验数据中,被测物末速率与理论计算值十分接近,在预测值的上下限范围之内。通过线性拟合得到的实测加速度和预测值非常接近,并且加速度实测误差和最大速率实测误差均小于1%,由此说明本系统设计的算法可行而且精度非常高。

3.2 空气隙加载爆轰实验

本次实验是在双通道样机完成时进行的实验。爆轰装置如图4所示,采用一定长度的XX型炸药,雷管将其引爆后产生的爆轰波推动飞片飞行,并在飞片飞行的正前方放置激光探头以探测飞片的飞行情况。飞片尺寸为 $\varnothing 10\text{mm} \times 6\text{mm}$,药柱长度为10mm,空气隙长度为8mm。在此装置中,飞片位于相同空管的内侧端,可限制飞片的飞行方向为准1维方向。

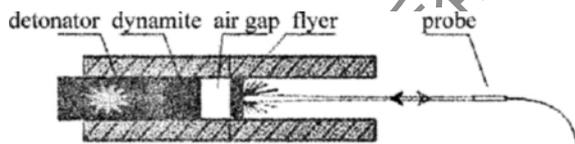


Fig. 4 Air gap load detonation of the experimental setup

作者抽取其中的两次实验进行研究(其中第2次实验中采用双通道系统采集数据),将计算得到的速率曲线放在同一坐标系下对比。第1次实验中的爆轰条件与第2次一致,两次实验的速率曲线对比如图5

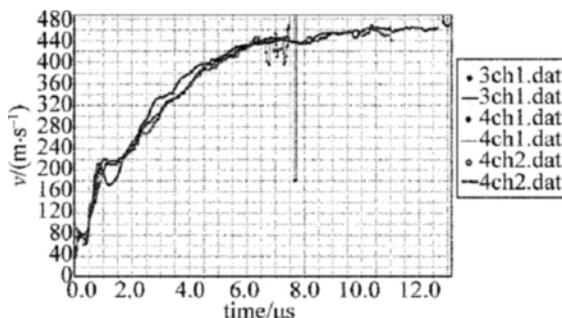


Fig. 5 Boats chip experiment for the first time and the speed curves of the second

所示。可见,两次实验的速率曲线吻合,说明系统的重复性很好。同时从速率曲线中看出,在飞片加速的几个阶段,细节刻画得十分逼真,说明算法的精确度很高。

4 结论

综上所述,在应用小波变换处理此类非平稳信号时,面对繁多的小波基到底选择哪一种是值得考虑的。具有很好的紧支撑能力、对称性较好、有限长度短的小波基应是首选,另外,还应该考虑所处理信号的特点和数据边界等要求。以上几个方面只是通常意义上的最优小波基^[11]的选择方法,所选择的小波基到底是否合适,其衡量准则只能看最后的处理结果。通常的做法是通过以上几个方面选择几个比较合适的小波基,通过处理相同的信号,比较最终的效果,从中选出效果相对最好的那个。本文中遵照以上原则,选择了6种小波基进行计算机模拟实验,并对AFDISAR信号进行处理,通过对比,确定复morlet作为处理此类信号中选取的小波基是最优的,处理结果是可取的。如何根据信号各自的特点快速准确地选择一个最优的小波基还期待着更进一步的研究。

参考文献

- [1] STRAND O T, BERZINS L V, GOOSMAN D R. Velocimetry using heterodyne techniques [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5580: 593-599.
- [2] HOLTKAMP D B. Survey of optical velocimetry experiments-applications of PDV, a heterodyne velocimeter [C] // IEEE International Conference on Magnetoacoustic Field Generation and Related Topics. Santa Fe, USA: IEEE, 2006: 119-128.
- [3] WENG J D, TAN H, WANG X. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with picosecond resolution [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(11): 111101/1-111101/3.
- [4] PU L, YE Y T, WU Y F, et al. Laser interferometer signal processing based on empirical mode decomposition [J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 299-301 (in Chinese).

2.3.1 FGL 强化机制 FGL 耐磨性能较 Ti600 基体得到明显改善,摩擦系数比 Ti600 基体明显降低,这是因为 FGL 中弥散分布着原位合成的 TiC 陶瓷增强相,这些硬度极高的耐磨相构成磨损的主体,是有效保护 FGL 基体的硬质骨架。且原位自反应生成的 TiC 增强相,尺寸细小,颗粒表面无污染,与基体存在较好浸润性,界面结合强度高,避免了金属相与陶瓷相的强烈界面反应,降低了陶瓷颗粒剥落的几率,使 FGL 耐磨性得到明显的强化^[9]。加之,FGL 组织均匀、细密,有利于降低其磨损。

2.3.2 摩擦磨损机制 图 5 分别为 Ti600 基体和 FGL 的磨损表面形貌 SEM 照片。可见,Ti600 基体表面发生了严重的塑性变形,不仅有较深的犁削现象,而且有严重的粘附磨损,这是因为摩擦过程中,表层的污染膜、氧化膜发生破裂,新鲜金属表面裸露出来,且摩擦产生的热量无法及时的散出,导致对磨面间粘着焊合,在剪切应力作用下发生“金属转移”现象^[10]。FGL 磨损表面分布着细小的划痕、已脱落和即将脱落的 TiC 增强相颗粒,表明发生了磨粒磨损和犁削磨损,这些摩擦过程中剥落的 TiC 磨粒对 FGL 基体微观切削。

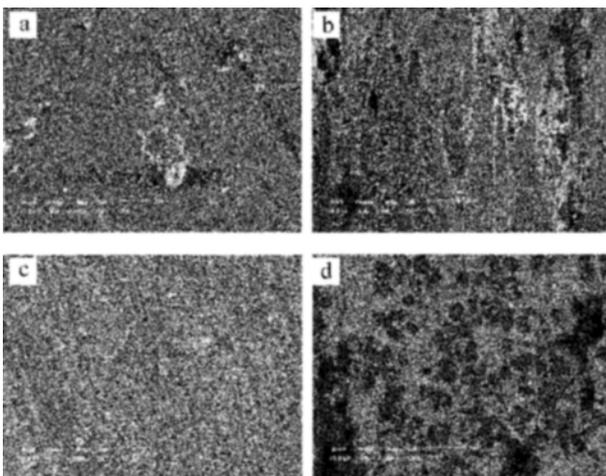


Fig. 5 SEM micrographs showing the worn surface morphologies after dry sliding wear test coupling with 45# alloyed steel for 100r/min wheel speed and 1800m slipping distance at a test load of 40N
a b—original titanium alloy Ti600 c d—FGL

3 结论

(1) 原位自反应合成了 TiC 增强相,以球状形态均匀弥散分布在 FGL 中,且结晶度较高,晶体完整性和界面结合均较好。

(2) FGL 微观组织主要呈 3 种不同形态:粗大的或不完整的树枝晶,相对较为细小的等轴或近似等轴晶和细小短纤维状。

(3) 由于原位合成 TiC 陶瓷相的弥散强化,FGL 和 N-FGL 表现出较优异的耐磨性能,摩擦系数和磨损率显著降低,平均是 Ti600 基体的 0.3 倍~0.5 倍。Ti600 基体磨损机制为粘着磨损和犁削磨损,FGL 主要为磨粒磨损。

参考文献

- [1] CUI A Y, HU F Y, HU J L. Microstructure and wear-resisting property of (Ti + Al/Ni) / (Cr₂O₃ + CeO₂) laser cladding on titanium alloy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3): 438-441 (in Chinese).
- [2] WANG Y, WANG H M. Wear resistance of laser clad Ti₂Ni₃Si reinforced intermetallic composite coatings on titanium alloy [J]. Applied Surface Science, 2004, 229(1/4): 81-86.
- [3] SUN R L. Microstructure and tribological properties of NiCrBSi-TiC laser-clad layer on titanium alloy substrate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(7): 659-662 (in Chinese).
- [4] QU H P, LI P, ZHANG S Q, et al. Microstructure and mechanical property of laser melting deposition (LMD) Ti/TiAl structural gradient material [J]. Materials and Design, 2010, 31(1): 574-582.
- [5] YANG M C, LIN X, XU X J, et al. Microstructure and phase evolution in Ti60-Ti₂AlNb gradient material prepared by laser solid forming [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(6): 729-736 (in Chinese).
- [6] PEI Y T, de HOSSON Th M. Functionally graded materials produced by laser cladding [J]. Acta Materialia, 2000, 48(10): 2617-2624.
- [7] KOIAUMI M. FGM activities in Japan [J]. Composites Part B: Engineering, 1997, B28(1/2): 1.
- [8] YANG S, ZHAO J L, YANG X. Research status of functionally graded coating produced by laser cladding [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 220-224 (in Chinese).
- [9] ZHANG S, ZHANG C H, WANG M C. Laser cladding layer in situ synthesized TiC on titanium alloy surface [J]. China Nonferrous Metal Transaction, 2001, 11(3): 1026 (in Chinese).
- [10] WANG H M, DUAN G. Wear and corrosion behavior of laser clad Gr₃Si reinforced intermetallic composite coatings [J]. Intermetallics, 2003, 11(8): 755-762.

(上接第 254 页)

- [5] YU Y G, GUO Ch Y, YE H Y, et al. Pre-processing for the optical feedback self-mixing interferometric signal [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 265-267 (in Chinese).
- [6] LEVIN L, SHAMIR J, TZACH D. Fiber optic velocity interferometer with very short coherence length light source [J]. Review of Scientific Instruments, 1996, 67(4): 1434-1437.
- [7] MALLAT S, HWANG W L. Singularity detection and processing with wavelets [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.
- [8] MALLAT S, ZHONG S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 326-351.
- [9] COHEN A, KOVACEVIC J. Wavelets: the mathematical background [J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(4): 514-522.
- [10] ZHOU X Y, YE Y Zh. Method of choosing a wavelet for fault detection [J]. Control Engineering of China, 2003, 10(4): 308-311 (in Chinese).
- [11] FANG W J, FAN Y R, DENG Sh G, et al. Selection of optimum wavelet base of multiscale analysis in well logging [J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 4(10): 71-73 (in Chinese).