改进的小波阈值消噪法应用于超声信号处理

陈 益 李 书

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 超声检测中回波信号信噪比低、易于被噪声淹没,小波变换是一种有效的提取缺陷回波的方法. 建立了超声缺陷回波信号的数学模型,对基于小波变换的软、硬阈值消噪法作了改进,提出一种折中方法用于超声缺陷回波信号的去噪,同时以信噪比为目标函数对参数的选取也作了优化. 仿真实验结果表明,改进方法非常适合用于超声信号的分析,能够很好地抑制噪声,它最大程度的发挥了小波软、硬阈值消噪法的优点,避免它们的缺点,使用该方法处理的信号相对于小波软、硬阈值消噪法在一定程度上改善了去噪的效果,提高了回波信号的信噪比.

关 键 词: 小波变换; 超声探测; 信噪比; 信号处理

中图分类号: TG 115.28

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)04-0466-05

Application of improved threshold denoising based on wavelet transform to ultrasonic signal processing

Chen Yi Li Shu

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The signal to noise ratio of ultrasonic echoes signal was low, the echoes signal was submerged easily in ultrasonic testing, and wavelet transforms was an effective method by which the flaw echoes can be extracted. The mathematics model of ultrasonic echoes signal was established, including the flaw echoes and the noise, the traditional soft and hard threshold denoising methods based on wavelet transform was ameliorated, and a middle course method was put forward for signal denoising in ultrasonic testing. At the same time the parameters selection was also optimized with the signal to noise ratio of ultrasonic flaw echoes signal as object function. The simulation experimental results showed that this method was fit for analyzing ultrasonic signal, and it can depress noises well. This method utilized the advantage of the soft and hard threshold denoising methods and avoided their disadvantage in the farthest. Compare to the traditional soft and hard threshold denoising methods, the denoising effect was improved in a certain extent, and the signal to noise ratio of ultrasonic flaw echoes signal was improved by using this method.

Key words: wavelet transforms; ultrasonic testing; signal to noise ratio; signal processing

在超声缺陷探测中,常常伴随着各式各样的干扰波(包括材料结构内部各种干涉杂波),微小缺陷的回波信号很微弱,易于被噪声淹没,所以要对检测到的信号进行消噪处理,以使得超声检测目标信号在各种干扰条件下保持整齐、清晰且不畸变的波形. 但超声缺陷回波信号是一种非稳态时变脉冲信号,传统的以傅里叶变换为基础的信号处理技术对于这种信号处理效果较差. 小波变换是近十年来发展起来的一种新的信号处理工具,其特有的多分辨分析技术使得小波分析在时域和频域中都具有良好的分析能力[1],可以有效地提取超声检测缺陷的特征信号,滤除噪声,提高信噪比. 小波去噪的普遍方法就是采用阈值方法,本文对于目前应用最为广泛的小波软阈值消噪法

收稿日期: 2005-04-13

基金项目: 凡舟科研基金资助项目

作者简介: 陈 益(1980 -),男,陕西西安人,硕士生, rorbertchen @sina.com.

和硬阈值消噪法进行了改进,并结合超声缺陷回波信号的特征进行了仿真实验,获得了更好的消噪效果和更高的信噪比增益.

1　小波变换原理

设 $\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ($L^2(\mathbf{R})$ 表示平方可积的实数空间,即能量有限的信号空间),其傅里叶变换为 $\Psi(\omega)$. 当 $\Psi(\omega)$ 满足相容性条件:

$$C_\psi = \int_{\mathbf{R}} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} \mathrm{d}\omega < \infty \tag{1}$$

时,称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或母小波. 将母函数 $\psi(t)$ 经过伸缩和平移后,就可以得到一个小波序列. 对于连续的情况,小波序列为

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$
$$a, b \in \mathbf{R} \qquad a \neq 0 \tag{2}$$

其中　a 为伸缩因子;b 为平移因子.

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$,它的连续小波变换为

$$W_f(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbf{R}} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a}\right) \mathrm{d}t \tag{3}$$

其逆变换为

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{\mathbf{R}^+} \int_{\mathbf{R}} \frac{1}{a^2} W_f(a,b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \mathrm{d}a\mathrm{d}b \tag{4}$$

对于离散的情况,为方便起见,在离散化中总限制 a 只取正值,这样相容性条件就变为

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|} \mathrm{d}\omega < \infty \tag{5}$$

令 $a = a_0^j$, $b = k a_0^j b_0$,这里 $j \in \mathbf{Z}$,扩展步长 $a_0 \neq 1$ 是固定值,为方便起见,总是假定 $a_0 > 1$. 所以对应的离散小波函数序列 $\psi_{j,k}(t)$ 即可写作:

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi\left(\frac{t - k a_0^j b_0}{a_0^j}\right) =$$
$$a_0^{-j/2} \psi(a_0^{-j} t - k b_0) \qquad j, k \in \mathbf{Z} \tag{6}$$

令 $a_0 = 2$, $b_0 = 1$,即为二进小波变换.

对于任意的函数 $f(t) \in L^2(\mathbf{R})$,它的离散小波变换为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) \mathrm{d}t = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \tag{7}$$

Mallat 提出了多分辨分析的思想,并给出了小波分解与重构的快速算法,即 Mallat 算法[2]. 根据这一算法,若 f_k 为信号 $f(t)$ 的离散采样数据,则 $f_k = c_{0,k}$,则 $f(t)$ 的正交小波变换分解公式为

$$\left.\begin{aligned} c_{j,k} &= \sum_n c_{j-1,n} h_{n-2k} \\ d_{j,k} &= \sum_n d_{j-1,n} g_{n-2k} \end{aligned}\right\} \quad K = 0, \cdots, N-1 \tag{8}$$

小波重构公式为

$$c_{j-1,n} = \sum_k c_{j,n} h_{k-2n} + \sum_k d_{j,n} g_{k-2k} \tag{9}$$

2　超声信号数学建模

在宽带超声检测中,超声回波信号通常是一个被探头中心频率调制的宽带信号,超声缺陷回波的数学模型[3]可建立如下:

$$f(t) = h(t) \cos(2\pi f_0 t + \phi) \tag{10}$$

其中　f_0 为探头的中心频率. B_0 为 $f(t)$ 的带宽,超声脉冲信号的功率谱通常被建模为 Gaussian 函数[4],考虑包络 $h(t)$ 为 Gaussian 函数时,式(10)变为

$$f(t) = \frac{\exp[-t^2/(4B_0)]}{\sqrt{4\pi B_0}} \cos(2\pi f_0 t + \phi) \tag{11}$$

则系统接受到的信号频域表达式为[4]

$$Y(f) = 2\alpha H(f) \left| \frac{At}{T} \frac{\sin(\pi f t)}{\pi f t} \right| \cdot$$
$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta\left(f - f_0 - n\frac{1}{T}\right) + \mu(f) \exp(\mathrm{i}\theta(f)) \tag{12}$$

其中　$\mu(f) \exp(\mathrm{i}\theta(f))$ 为噪声 $n(t)$ 的频域建模 $N(f)$.

3　小波阈值去噪方法及改进

3.1　小波去噪原理及算法

设 $f(t_i)$ 为原始信号,$n(t_i)$ 为期望为 0、方差为 σ^2 的独立同分布的高斯白噪声,则采集到的信号可建模如下:

$$y(t_i) = f(t_i) + n(t_i) \qquad i = 1, \cdots, N \tag{13}$$

由小波变换的线性性质可知,分解得到的小波系数 $w_{j,k}$ 由两部分组成,一部分是信号 $f(t)$ 所对应的小波系数 $u_{j,k}$,另一部分是噪声 $n(t)$ 所对应的小波系数 $v_{j,k}$.

白噪声的二进小波变换 $W_{2^j} n(t)$ 的方差为[5]

$$\left.\begin{aligned} E[|W_{2^j} n(t)|^2] &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E[n(u) n(v)] \\ \psi_{2^j}(t-u) \psi_{2^j}(t-v) \mathrm{d}u\mathrm{d}v &= \\ \int_{-\infty}^{\infty} \sigma^2 \psi_{2^j}(t-u) \mathrm{d}u &= \frac{\|\psi\|^2}{2^j} \sigma^2 \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

由式(14)可知,随着尺度 j 的增加,$|W_{2^j} n(t)|^2$ 的均值减小,即白噪声具有负奇异性,而对于原始信号,它的小波变换的模极大值却随着尺度的增加而增加,正是通过在多尺度空间中模极大值不同的变化趋势来区分信号和噪声[5,6].

阈值消噪法是目前为止应用最为广泛、最为

有效的方法,其步骤如下:①先对含噪信号 $y(t)$ 做小波变换,得到一组小波系数 $w_{j,k}$;②选取合适的阈值 λ;③通过对 $w_{j,k}$ 进行阈值处理,得出估计小波系数 $\hat{w}_{j,k}$,使得 $\| \hat{w}_{j,k} - u_{j,k} \|$ 尽可能小;④利用估计小波系数 $\hat{w}_{j,k}$ 进行小波逆变换,得到估计信号 $\tilde{f}(t)$,即为消噪后的信号.

目前的阈值选取方式有 4 种:①基于 Stein 的无偏似然估计原理进行自适应阈值选择的 rigrsure 规则;②采用固定的阈值形式的 sqtwolog 规则,产生的阈值大小是 $\lambda = \sigma \sqrt{2\log n}$[7];③采取后发式阈值选择方式的 heursure 规则是最优预测变量阈值选择;④基于极大极小原理的 minimaxi 规则,它产生一个最小均方误差的极值.

阈值处理方法有 2 种[7,8](见图 1、图 2):

1) 硬阈值处理

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} w_{j,k} & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \tag{15}$$

2) 软阈值处理

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \operatorname{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \lambda) & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases} \tag{16}$$

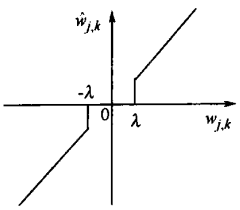

图 1 硬阈值方法

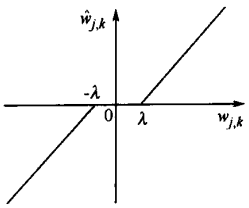

图 2 软阈值方法

3.2 改进的阈值消噪法

软、硬阈值消噪法虽然在实际中得到了广泛应用,也取得了较好的效果,但这 2 种方法本身都有一些潜在的缺点. 在硬阈值方法中,$\hat{w}_{j,k}$ 在 λ 处是不连续的,利用 $\hat{w}_{j,k}$ 重构所得信号会产生一些振荡. 在软阈值方法中,估计出来的 $\hat{w}_{j,k}$ 虽然整体连续性好,但是当 $|w_{j,k}| > \lambda$ 时,$\hat{w}_{j,k}$ 与 $w_{j,k}$ 总存在恒定的偏差,直接影响着重构信号与真实信号的逼近程度.

在实际应用中,利用软阈值消噪信号比较光滑,但有着较大的信号失真,而利用硬阈值消噪效果并不理想,对于时变信号消噪效果是有限的.

本文综合了软、硬阈值消噪法的不同特点,引进 α 因子,提出了软硬阈值折中法,其具体估计公式如下:

$$\hat{w}_{j,k} = \begin{cases} \operatorname{sign}(w_{j,k})(|w_{j,k}| - \alpha\lambda) & |w_{j,k}| \geq \lambda \\ 0 & |w_{j,k}| < \lambda \end{cases}$$
$$0 \leq \alpha \leq 1 \tag{17}$$

可看出,当 α 分别取 0 和 1 时,式(17)即成为硬阈值和软阈值估计方法,这种方法思路简单,实现方便,但能有效地改进软、硬阈值消噪法的缺点,获得更好的消噪效果,进一步提高信噪比(图 3).

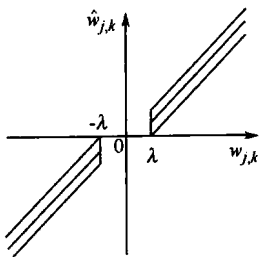

图 3 软硬阈值折中法

3.3 α 因子及分解尺度的选取

α 因子的大小决定了消噪后信号的信噪比,α 越大,信号失真越多,振荡越小;α 越小,信号失真越少,振荡越厉害. 分解尺度的大小也对消噪后信号的信噪比有着很大的影响,分解尺度过小,不能将噪声同信号完全分离,分解尺度过大,则会造成较大的信号失真. 过大、过小的 α 因子和分解尺度都会导致信噪比的降低,必须选取合适的 α 因子及分解尺度. 本文以信噪比为目标函数对 α 因子及分解尺度的选取做了优化,得到最优 α 值,最优分解尺度,最好的消噪效果及最高的信噪比增益. 其中信噪比 R_{SNR} 定义如下:

$$R_{\mathrm{SNR}} = 10\log_{10}\left| \frac{\sum_n f^2(t)}{\sum_n [\tilde{f}(t) - f(t)]} \right| \tag{18}$$

其中 $f(t)$ 为原始信号;$\tilde{f}(t)$ 为消噪后信号.

4 仿真实验结果分析

仿真实验采样频率为 50 MHz,采样点数 4 096 个,本次实验仿真了 4 个具有不同中心频率和幅值的超声缺陷回波信号(其中心频率从左到右分别为 1.2 MHz,1.3 MHz,1.0 MHz 和 1.1 MHz,带宽分别为 0.5,0.6,0.5 和 0.4),在其中加入随机高斯白噪声,利用小波软、硬阈值消噪法以及本文所提出的改进方法对加噪信号进行了去噪处理. 实验中小波函数采用 sym8 小波,实验得到的最佳分解尺度为 10,最佳 α 因子值为 0.84,最高的信噪比增益为 13.621 1.

图4a为仿真的缺陷回波信号,图4b是图4a

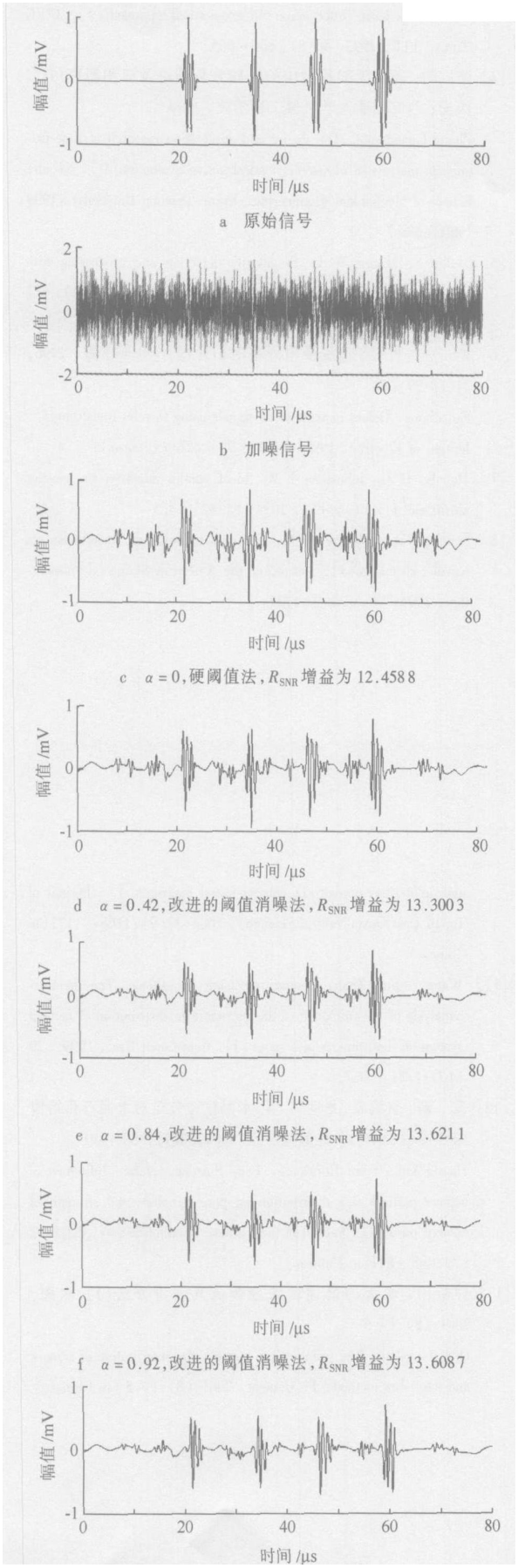

图 4　应用 3 种不同方法的超声信号去噪结果

加入高斯白噪声后的波形,由图可以看出,信号完全被噪声所淹没而无法分辨,图 4c～图 4g 是分别采用硬、软阈值消噪法和不同 α 因子下的改进阈值消噪法对图 4b 进行了消噪处理后的波形,由图 4 可以看出,这 3 种方法都获得了很好的去噪效果,信号的信噪比都大幅度提高.

观察图 4c～图 4g 可以发现,硬阈值方法处理后的缺陷信号失真最小,但是信号振荡比较剧烈,这在一定程度上降低了信噪比,也不利于对缺陷信号作出判断;软阈值方法处理后的信号比较光滑,振荡很小,但缺陷失真较大,这也影响了信噪比的提高,对于利用缺陷信号来判断材料缺陷的尺寸、位置、类型等信息也十分不利. 而利用本文所提出的改进阈值消噪法对含噪信号进行消噪处理,有效的改进了软、硬阈值消噪法的缺点,获得了更好的消噪结果和更高的信噪比增益. 由图可以看出,α 因子越小,信号失真越少,振荡越厉害,α 因子越大,信号失真越多,振荡越弱,而当 α 因子取为 0.84(图 4e)时,获得了最高的信噪比增益和最好的消噪效果.

图 5 给出了不同分解尺度下这 3 种方法的信噪比增益,由图可以看出,基本上在每个分解尺度下,比之软、硬阈值消噪法,改进的阈值消噪法所得到的信噪比增益有了非常明显的提高. 仿真实验证明对于平稳信号,其分解尺度一般以 3～6 之间为宜,而对于非平稳时变信号,其分解尺度一般应该在 6～12 之间才会取得比较理想的去噪效果. 在本次仿真实验中,当分解尺度为 10 时,获得了最佳的消噪效果和最高的信噪比增益.

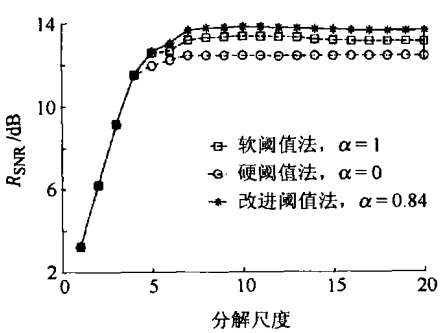

图 5　软、硬及改进的阈值消噪法在不同分解尺度上的 R_{SNR} 增益

5　结　论

小波变换是一种时频分析方法,对于超声信号这种时变非平稳脉冲信号,它比传统的基于傅里叶变换的信号处理方法更为适合. 但是,目前应

用最为广泛的小波软、硬阈值消噪法也都有着各自固有的缺点,本文结合这 2 种方法的优缺点,提出了一种软、硬阈值折中法的改进模型. 仿真实验结果表明,这种方法非常适合用于超声信号的分析和消噪,运用这种方法获得了比软、硬阈值消噪法更好的消噪效果和更高的信噪比增益,而且这种方法原理简单,易于实现,在工程上有着很高的应用价值.

参考文献(References)

[1] 崔锦泰. 小波分析导论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995
Cui Jintai. Conspectus of wavelet analysis[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1995(in Chinese)

[2] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. IEEE Trans Pattern Anal and Machine Intell, 1989, 11(7): 647～693

[3] Gustafsson M G, Stepinski T. Split spectrum algorithms rely on instantaneous phase information —a geometrical approach[J]. IEEE Trans UFFC, 1993, 40(6): 659～665

[4] 张广明. 超声无损检测中的时频分析理论及应用研究[D]. 西安: 西安交通大学机械工程学院, 1999
Zhang Guangming. The theory and application research of time-frequency analysis in ultrasonic nondestructive evaluation[D]. Xi'an: School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, 1999 (in Chinese)

[5] Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617～643

[6] 范 中. 利用子波变换检测瞬时信号[J]. 电子学报, 1996, 24(1):79～82
Fan Zhong. Detect instantaneous signals using wavelet transform[J]. Journal of Electron, 1996, 24(1): 79～82(in Chinese)

[7] Donoho D L, Johnstone I M. Ideal spatial adaption by wavelet shrinkage[J]. Biometrika, 1994, 81:425～455

[8] Donoho D L, Johnstone I M. Adapting to unknown smoothness via wavelet shrinkage[J]. Journal of the American Statistical Association, 1995, 90: 1200～ 1224

(上接第 465 页)

[6] Standard test method for water requirement of normal consistency, Setting Time and Soundness of the Portland Cement[S]. GB/T1346, 2001

[7] 朱宝林,黄 新,马保国,等. 大流动度水泥净浆流变参数的测试方法[J]. 建筑材料学报,2005,8(6):562～564
Zhu Baolin, Huang Xin, Ma Baoguo, *et al*. A method to evaluate rheological behavior of cement paste with high fluidity[J]. Journal of Building Materials 2005,8(6):562～564(in Chinese)

[8] Stovall T, Delarrard F, Buil M. Linear packing density model of grain mixtures[J]. Powder Technology, 1986,(48):1～12

[9] Larrard F D, Sedran T. Optimization of ultira high performance concrete by the use of a packing model[J]. Cem Concr Res,1994,24(6):997～1009

[10] 冯 奇,刘光明,巴恒静. 颗粒级配对水泥基材料有害孔隙率的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(9):1168～1172
Feng Qi, Liu Guangming, Ba Hengjing. Relation of grain grading and deleterious porosity of cement-based materials[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2004,32(9):1168～1172(in Chinese)

[11] Wang Aiqin, Zhang Chengzhi, Zhang Ningsheng. The theoreticanalysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement [J]. Cem Concr Res, 1999, 29(10):1721～1726

[12] 黄 新, 袁润章,龙世宗,等. 水泥粒径分布对水泥石孔结构与强度的影响[J]. 硅酸盐学报,2004,32(7):888～891
Huang Xin, Yuan Runzhang, Long Shizong, *et al*. Influence of cement particle size distribution on pore structure and strength of cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2004,32(7):888～891(in Chinese)

[13] 乔龄山. 水泥的最佳颗粒分布及其评价方法[J]. 水泥, 2001,(8):1～5
Qiao Lingshan. The prime of the particle size distribution of cement and assessing methods[J]. Cement, 2001,(8):1～5 (in Chinese)