

## 基于 AR 模型的声发射信号到达时间自动识别

王晓伟, 刘占生, 窦唯

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 声发射信号到达时间的信息, 对于声发射事件的定位、识别以及声发射源机理分析都是非常重要的。实际应用中, 常用人工读取或通过设定幅值阈值来获取信号的到达时间。针对以上常用方法的缺点, 结合噪声信号的 AR 模型和声发射信号的 AR 模型, 应用 Akaike 信息准则, 实现了对声发射信号到达时间的自动识别。对实验数据的识别结果显示, 该方法对信号的幅频特性变化比较敏感。在相同信噪比的情况下, 该方法识别的偏差要小于阈值法。当信噪比较低时, 阈值法可能会给出错误的结果, 而该方法仍然能够给出较准确的结果。

**关键词:** AR 模型; 声发射; 到达时间

**中图分类号:** TG156

**文献标识码:** A

近年来, 声发射 (Acoustic Emission) 检测技术被广泛用于结构的健康监测, 用来检测、定位和估计结构的冲击损伤<sup>[1]</sup>, 并取得很好的效果。

在大多数声发射应用中, 信号的到达时间是通过设定固定阈值电压确定的, 但是对于幅值很小的信号, 或者噪声很大的信号, 这种方法将会导致定位误差<sup>[2-3]</sup>。为了改善定位误差, 互相关技术被用来确定特殊模式和频率的到达时间<sup>[4]</sup>, 该方法使用声发射信号与 Gaussian 脉冲调制的单频余弦波的互相关函数来确定特定模式和频率的到达时间, 但是该方法在验证时其仅考虑了声发射信号主要成分是幅值比较大的弯曲模式 (反对称) 成分, 而且没有考虑声发射源作为板内情况<sup>[5,6]</sup>。此外, 结合板波理论, 小波变换的方法也被用于确定声发射波的到达时间<sup>[5-7]</sup>, 能够准确分析出不同模式波到达传感器的时间, 但是需要人工读取声发射波的到达时间。

在结构实时在线监测过程中, 大量的声发射数据被记录下来, 人工读取声发射信号到达时间将十分困难, Jochen 结合小波变换和 AIC 准则, 实现了对混凝土中声发射波到达时间的识别<sup>[8]</sup>。声发射检测和地震监测过程是类似的, 都是通过检测声发射源或地震源引起的物体表面的振动来对物体的结构进行评估并对振源进行相应的识别。在地震领域中, 通常采用长短时平均比方法<sup>[9,10]</sup>、AIC 准则法<sup>[12-14]</sup>、高阶统计量法<sup>[15]</sup>以及结合小波及小波包分解的 AR 模型方法<sup>[16,17]</sup>等自动检测 P 波或 S 波的到达时间。

进行一些修改以后, 地震中的一些识别算法能够被用于声发射和超声信号到达时间的自动提取。例

如, T. Lokajicek 等将高阶统计量的方法用于岩石中声发射信号到达时间的提取<sup>[18]</sup>。本文结合噪声信号的 AR 模型和声发射信号的 AR 模型, 应用 AIC 准则, 实现了对声发射信号到达时间的自动识别。

## 1 基于 AR 模型的 AIC 算法

Akaike 于 1973 年从信息论的角度出发提出了 AIC 准则, 他把这个准则应用于自回归 (AR) 模型的定阶和选择之中, 获得了理想的效果<sup>[19,20]</sup>。在他的文章中说明: 一个时间序列能够被分成局部稳定的时段, 每一个时段都可以用自回归模型来拟合。本文中, 我们使用该思想, 将实验得到的声发射数据分为两个局部稳定的时间序列, 每一段都用自回归过程来模拟, 寻找将波形数据分为两个稳定时间序列的最佳分割点, 该分割点就是声发射波的到达时间, 如图 1 所示。

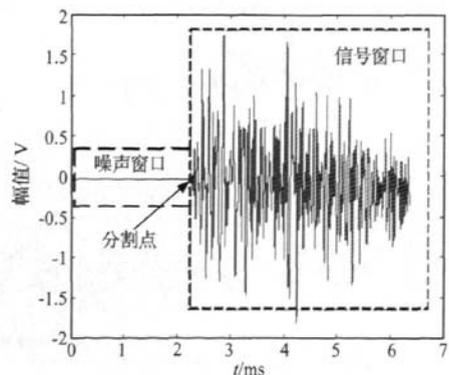


图 1 声发射信号波形

假设实验数据的时间序列  $x_n = \{x_1, \dots, x_N\}$  包含声发射事件的开始时间, 则声发射波开始的时刻将序列分为两个时段: 到达时前的时段和到达时的时段。对每一个时段  $i (i=1, 2)$  的数据  $x_i$  分别用自回归模型

基金项目: 国家自然科学基金 (50875056)

收稿日期: 2008-10-23 修改稿收到日期: 2009-02-18

第一作者 王晓伟 男, 博士生, 1977 年生

来模拟:

$$x_t = \sum_{m=1}^{M_1} a_m^i x_{t-m} + e_t^i \quad (1)$$

式中,  $a_m^i (m=1, \dots, M_1)$  为自回归模型的系数,  $M_i (i=1, 2)$  分别为噪声模型的阶数和信号模型的阶数。该模型将时间序列在模型窗内分为确定的  $\sum_{m=1}^{M_1} a_m^i x_{t-m}$  和预测误差  $e_t^i$ , 若误差为高斯分布, 则其均值  $E\{e_n^i\} = 0$ , 方差  $E\{(e_n^i)^2\} = \sigma_i^2$  且与时间序列确定的部分不相关  $E\{e_n^i x_{t-m}^i\} = 0$ 。

若把  $K$  作为分割点, 使用自回归模型的系数  $a_m^i$  来提取时间序列  $[M_1 + 1, K]$  和  $[K + 1, N - M_2]$  中的预测误差部分。假设误差为高斯分布, 则这两个时段误差的似然函数  $L$  可用下式表示<sup>[11]</sup>:

$$L(x; K, M, \Theta_i) = \prod_{i=1}^2 \left( \frac{1}{\sigma_i^2 2\pi} \right)^{\frac{n_i}{2}} \times \exp\left( -\frac{1}{2\sigma_i^2} \sum_{j=p_i}^{q_i} \left( x_j - \sum_{m=1}^{M_i} a_m^i x_{j-m} \right)^2 \right) \quad (2)$$

式中  $\Theta_i = \Theta(a_1^i, \dots, a_{M_i}^i, \sigma_i^2)$  分别表示时段 1 和时段 2 的模型参数 ( $\sigma_i^2$  依赖于  $K$ ), 而且:

$$p_1 = M_1 + 1, \quad p_2 = K + 1, \quad q_1 = K,$$

$$q_2 = N - M_2, \quad n_1 = K - M_1, \quad n_2 = N - M_2 - K$$

对方程(2)取对数并求偏导数, 寻找模型参数的最大似然估计, 如下式所示:

$$\frac{\partial \log(L(x; K, M_i, \Theta_i))}{\partial \Theta_i} = 0 \quad (3)$$

求解式(3), 可求得模型参数如下式所示:

$$\sigma_{i,\max}^2 = \frac{1}{n_i} \sum_{j=p_i}^{q_i} \left( x_j - \sum_{m=1}^{M_i} a_m^i x_{j-m} \right)^2 \quad (4)$$

则对数似然函数的最大值作为  $K$  的函数, 如下式所示:

$$\begin{aligned} \log(L(x; K, M_1, M_2, \Theta_1, \Theta_2)) = & -\frac{1}{2}(K - M_1) \log(\sigma_{1,\max}^2) - \\ & \frac{1}{2}(N - M_2 - K) \log(\sigma_{2,\max}^2) + \\ & \frac{N - M_1 - M_2}{2} (\log 2\pi + 1) \end{aligned} \quad (5)$$

则有,

$$\begin{aligned} -2 \log(L(x; K, M_1, M_2, \Theta_1, \Theta_2)) = & (K - M_1) \log(\sigma_{1,\max}^2) + \\ & (N - M_2 - K) \log(\sigma_{2,\max}^2) + \\ & (M_1 + M_2) (\log 2\pi + 1) - \\ & N (\log 2\pi + 1) \end{aligned}$$

定义:

$$AIC(K) = -2 \log(L(x; K, M_1, M_2, \Theta_1, \Theta_2))$$

在本文中, 噪声 AR 模型的阶数  $M_1$  和信号 AR 模型的阶数  $M_2$  为定值, 因此  $AIC(K)$  可用下式表示:

$$AIC(K) = (K - M_1) \log(\sigma_{1,\max}^2) + (N - M_2 - K) \log(\sigma_{2,\max}^2) + C \quad (6)$$

式中  $C = (M_1 + M_2 - N) (\log 2\pi + 1)$  为常数。

当  $K$  为噪声窗口和信号窗口的分割点时, 时间序列  $[M_1 + 1, K]$  全部为噪声数据,  $[K + 1, N - M_2]$  全为声发射信号数据, 此时噪声 AR 模型和信号 AR 模型能分别对其进行最佳模拟使得预测误差的方差均取得最小值, 从而使得  $AIC(K)$  值最小。因此  $AIC$  取得最小值的点是噪声窗口和信号窗口的最佳分割点, 是在最小二乘意义下两个模型的最佳匹配, 该分割点即声发射波的到达时刻, 如图 2 所示, 图中椭圆圈内箭头所示为  $AIC$  最小值点, 图中竖虚线为与之对应的分割线。

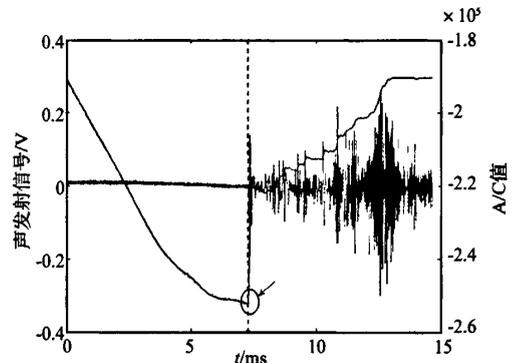


图 2 AR-AIC 法识别结果

应当指出的是, AR-AIC 方法将  $AIC$  值的全局最小值定义为声发射波的到达时刻, 因此应用  $AIC$  方法检测声发射波到达时间的时候, 应该在声发射波到达时刻附近提供合适的时间窗口。同时, 该方法还需要对噪声窗口和信号窗口分别进行 AR 模型建模。本文应用 Hilbert 变换对信号进行包络分析, 通过设置合适的阈值选择合适的时间窗口和 AR 模型建模所需要的数据。

## 2 Hilbert 变换及其对信号包络的提取

对于实信号  $x(t) \in L^2(R)$ , 其 Hilbert 变换  $\hat{x}(t)$  定义如下:

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (7)$$

式中  $t$  表示时间, 其逆变换为:

$$x(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\hat{x}(t - \tau)}{\tau} d\tau \quad (8)$$

式(7)和式(8)称为 Hilbert 变换对。于是  $x(t)$  的解析

信号函数  $z(t)$  为：

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) = A(t)e^{j\varphi(t)} \quad (9)$$

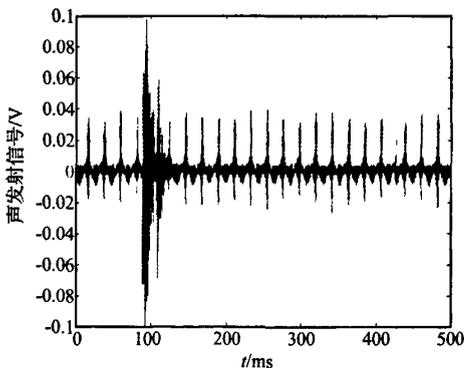
其中幅值  $A(t)$  为：

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (10)$$

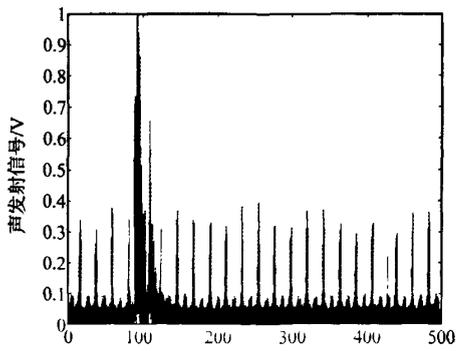
相位  $\varphi(t)$  为：

$$\varphi(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right) \quad (11)$$

$A(t)$  即为信号  $x(t)$  的包络。Hilbert 变换是一种将时域实信号变为时域解析信号的方法。变换所得的解析信号的实部是实信号本身，虚部是实信号的 Hilbert 变换，而解析信号的幅值便是信号的包络。图 3(a) 是铝板中脉冲激励产生的声发射信号，图 3(b) 是该信号的 Hilbert 包络信号。通过设置一个阈值就能选择含有到达时间的信号时段，由于对包络信号进行了归一化，对于同一类信号可以使用相同的阈值，本文中选择阈值为 0.4，并从阈值点向前和向后各选择 15 000 个数据点作为待分析数据。



(a) 声发射信号波形



(b) Hilbert 包络信号波形

图 3 声发射信号及其 Hilbert 包络信号

(1) 对采集到的声发射数据进行 Hilbert 变换，求得信号的包络信号，并对包络信号进行归一化。

(2) 设置时间窗口阈值，选择合适的时间信号窗口，本文中时间窗口阈值设置为 0.2，并从该阈值点向前和向后各选择 15 000 个数据点作为待分析数据。

(3) 从待分析数据中选择合适的数据。本文中分别选择向前和向后数据中选择中间 5000 个数据作为噪声数据和信号数据分别计算噪声 AR 模型、信号 AR 模型的阶数及其系数。通过试错法求出 AR 模型的阶数，AR 模型的系数通过应用 Yule - Walker 方程确定<sup>[20]</sup>。

(4) 根据式(6)计算 AIC(K) 值，AIC 取最小值时的 K 值即为噪声窗口和信号窗口的分割点，也就是声发射信号的到达时刻。

使用 AR-AIC 方法对铝板中碰撞声发射源定位实验的多组数据进行了到达时间识别，并与手动识别结果及阈值法识别结果进行了对比。到达时间识别的结果如表 1、图 5 ~ 图 7 所示。实验中使用的数据采集设备为 NI - PCI 6132 高速数据采集卡，单通道采样率为 2 MHz，可以实现多通道同步采样。声发射传感器采用 PAC 公司的 WD 系列宽频传感器，频响范围为 100 KHz ~ 1 MHz，同时数据采集时采用 10 kHz ~ 1.2 MHz 的带通滤波器，以去除信号中的低频和低频成分。铝板厚度为 6 mm，如图 4 所示。

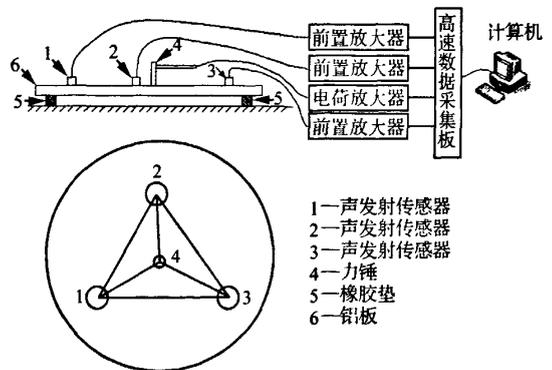


图 4 声发射实验图

表 1 到达时间识别结果

手动识别时间 /ms	信噪比 /dB	AR-AIC 法		阈值法		
		时间 /ms	偏差/ms	时间 /ms	偏差/ms	
1	6.324	16.52	6.903 0.579	9.15%	0.0596 -6.264	99.05%
2	7.166	22.6	7.261 0.095	1.32%	7.275 0.109	1.52%
3	2.201	27.2	2.213 0.012	0.54%	2.267 0.066	2.99%
4	7.19	32.1	7.205 0.015	0.20%	7.254 0.064	0.89%

### 3 AR-AIC 方法的应用

AR-AIC 算法检测声发射波到达时间的计算步骤如下：

万方数据

从表1中数据可以看出,AR-AIC法对信号的幅频特性变化比较敏感,阈值法只对信号的幅值敏感;信噪比对AR-AIC法和阈值法的识别结果都有影响。相对于人工分析的结果,在相同信噪比的情况下,AR-AIC法识别到达时间的偏差要小于阈值法。随着信噪比的提高,AR-AIC法和阈值法识别到达时间的偏差都有所减小。如图5所示,图中所示细实曲线为信噪比27.2dB时的声发射信号波形,粗实曲线为AIC值变化曲线,竖实线为AIC最小值点对应的分割线,竖点划线为阈值法0.02时对应的分割线,两条水平点划线是幅值0.02的阈值线,从放大图中可以看出,若取更小的阈值可以减小识别的偏差。

但是当信噪比较高的时候,如图6所示,图中所示细实曲线为信噪比16.8dB时的声发射信号波形,粗实曲线为AIC值变化曲线,竖实线为AIC最小值点对应的分割线,竖点划线为阈值法0.02时对应的分割线,两条水平点划线是幅值0.02的阈值线。从图中可以看出,由于噪声的幅值较大,采用0.02的阈值时已经不能正确识别出声发射信号的到达时间;AR-AIC法识别的偏差也增大为0.197ms。

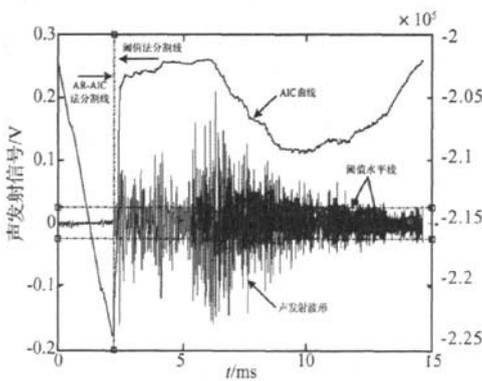


图5 信噪比27.2 dB时识别结果及局部放大图

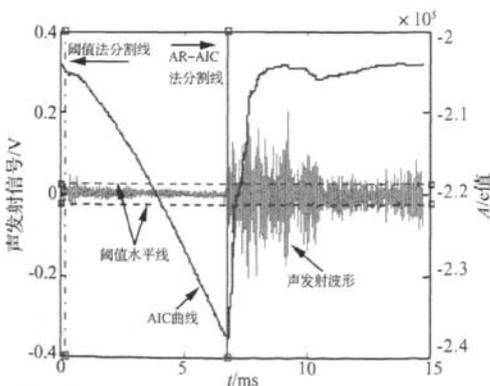


图6 信噪比16.8 dB时识别结果及局部放大图

## 4 结论

本文结合 Hilbert 变换对信号进行时间窗口的初次选择,应用 AR-AIC 方法对声发射波形到达时间进行了自动识别,并与人工分析结果和阈值法进行了对比,得出如下结论:(1) AR-AIC 法对信号的幅频特性变化比较敏感,阈值法只对信号的幅值敏感。(2) 信噪比影响识别精度,信噪比越高识别的偏差越小,反之则越大。(3) 相对于人工分析的结果,在相同信噪比的情况下,AR-AIC 法的识别偏差要小于阈值法,而且 AR-AIC 法和阈值法识别的结果都有所滞后。(4) 在高信噪比情况下,AR-AIC 法具有很高的识别精度;在低信噪比情况下,阈值法会给出错误的结果,此时 AR-AIC 法识别的精度也有所降低。因此,在实际应用过程中选择合适的带通滤波器,提高信噪比,能够减小声发射信号到达时间自动识别的偏差。

### 参考文献

- [1] Carpinteri A, Lacidogna G, Pugno N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74(1): 273-289.
- [2] Gorman M R. Plate Wave Acoustic Emission[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 90(1): 358-364.
- [3] Hamstad M A, Downs K S. On Characterization and Location of Acoustic Emission Sources in Real Size Composite Structures: A Waveform Study[J]. Journal of Acoustic Emission, 1995, 13(12): 31-41.
- [4] Steven M, Ziola S M, Gorman M R. Source location in thin plates using cross-correlation[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(5): 2551-2556.
- [5] Hamstad M A, Gallagher A O, Gary J. Examination of the Application of a Wavelet Transform to Acoustic Emission Signals: Part 1 Source Identification[J]. Journal of Acoustic Emission, 2002, 20: 39-61.
- [6] Hamstad M A, Gallagher A O, Gary J. Examination of the Application of a Wavelet Transform Applied to Acoustic Emission Signals: Part 2 Source Location[J]. Journal of Acoustic Emission, 2002, 20: 62-82.
- [7] 李光海,刘时风. 基于小波分析的声发射源定位技术[J]. 机械工程学报, 2004, 40(7): 136-140.
- [8] Jochen H. Kurz, Christian U. Grosse, Hans-Wolf Reinhardt. Strategies for reliable automatic onset time picking of acoustic emissions and of ultrasound signals in concrete[J]. Ultrasonics, 2005, 43(7): 538-546.
- [9] Baer M, Kradolfer U. An automatic phase picker for local and teleseismic events[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1987, 77(4): 1437-1445.
- [10] Earle P, Shearer P. Characterization of global seismograms using an automatic picking algorithm[J]. Bulletin of the Seis-

mological Society of America, 1994, 84(2):366-376.

[11] Sleeman R, Van Eck T. Robust automatic P-phase picking: an on-line implementation in the analysis of broadband seismogram recordings [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1999, 113(1):265-275.

[12] Leonard M, Kennett B L N. Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1999, 113(1):247-263.

[13] Leonard M. Comparison of manual and automatic onset time picking[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(6):1384-1390.

[14] Maeda N. A method for reading and checking phase times in auto-processing system of seismic wave data[J]. *J. Seismol. Soc. Jpn*, 1985(38):365-379.

[15] Sarajiotis C H D, Hadjileontiadis L J, Panas S M. PAI-S/K: a robust automatic seismic P-phase arrival identification scheme[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(6):1395-1404.

[16] 刘代志,王仁明,李夕海,等. 基于小波包分解及 AR 模型的单通道地震波信号初至点检测[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5):1098-1102.

[17] Zhang H J, Thurber C, Rowe C. Automatic P-wave arrival detection and picking with multiscale wavelet analysis for single-component recordings [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2003, 93(5):1904-1912.

[18] Lokajicek T, Klima K. A first arrival identification system of acoustic emission (AE) signals by means of a high-order statistics approach[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(9):2461-466.

[19] Akaike H. Markovian representation of stochastic processes and its application to the analysis of autoregressive moving average process[J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1974, 26(1):363-387.

[20] Kitagawa G, Akaike H. A procedure for the modeling of non-stationary time series[J]. *Annals of the Institute of Statistical Mathematics*, 1978, 30(1):351-363.



(上接第 72 页)

(3) 由水锤冲击波引起的管壁动态周向应力均围绕平衡位置——缓慢加载静压力而产生的静周向应力 2.1 MPa 附近振荡,并随着水锤压力迅速衰减而衰减。该结论与 Adachi<sup>[2]</sup>的 Laplace 数值解法和 Leishear<sup>[4]</sup>的仿真结果接近。

3 结 论

针对传统方法中把管道流体的水锤冲击简化为阶跃或冲击载荷,而且忽略结构与流体相互作用的不足,本文采用流固耦合方法建立了一个完整地描述关阀水锤下简单三维管壁的动态响应有限元模型。首先对关阀水锤进行了模拟,然后对由于水锤波造成的管壁动态应力进行了量化分析:① 确定了管壁一点的最大应力是在水锤波过后相当一段时间后产生的;② 周向应力是管壁动态应力地主要影响因素,特别是在管道一端无约束情况下。

经分析对比,本文结果与传统仿真结果和结论一致或相近,并且更加详细和全面,这证明了基于 ALE 流固耦合技术模拟和分析水力瞬变过程,以及管壁三维动态应力的方法是可行和有效的。

参 考 文 献

[1] Wiley E B, Streeter V L. *Fluid Transients* [M]. Prentice-

Hall, Upper Saddle River, NJ, 1993.

[2] Adachi T, Ujihashi S, Matsumoto H. Impulsive Responses of a Circular Cylindrical Shell Subjected to Water Hammer Waves [J]. *ASME J. Pressure Vessel Technol.*, 1991, 113:517-523.

[3] Robert A. Leishear. Dynamic Pipe Stresses During Water Hammer: A Finite Element Approach[J]. *ASME J. Pressure Vessel Technol*, 2007, 129(5):226-233.

[4] Leishear R A, Morehouse J H. Dynamic Pipe Stresses During Water Hammer, IV, A Vibration Analysis[C]. *Second Annual Water Hammer Conference*, 2003, ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference.

[5] Leishear R A. Dynamic Pipe Stresses During Water Hammer-III. Complex Stresses relationships[J]. *Proc. of Design and Analysis of Piping, Vessels, and Components*, ASME, New York, 2002, 440:143-152.

[6] Mohamed S. Ghidaoui, Ming Zhao, Duncan A. McInnis et al. A Review of Water Hammer Theory and Practice[J]. *Applied Mechanics Reviews*, 2005, 58(1):49-76.

[7] 张 雄,陆明万,王建军. 任意拉格朗日-欧拉描述法研究进展[J]. *计算力学学报*, 1997, 14(1):91-102.

[8] Kolsky H. *Stress Waves in Solids* [M]. Dover, New York, 1963.