

## \* 研究简讯 \*

东中国海声速剖面的经验正交函数  
表示与匹配场反演\*何利<sup>1,2</sup> 李整林<sup>1</sup> 张仁和<sup>1</sup> 李风华<sup>1</sup>

1. 中国科学院声学研究所声场声信息国家重点实验室, 北京 100080;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100080

**摘要** 利用一次浅海声学实验多次测量的声速剖面 and 声传播信号研究了海水声速剖面的经验正交函数(EOF)表示及其由匹配场处理方法反演的可行性和宽容性. 反演中使用了垂直阵和水平阵两种阵形接收的宽带声信号. 研究表明: 声速剖面可用少数的几阶经验正交函数表示, 利用垂直阵信号和水平阵信号都可较好地反演出海水声速剖面, 而且对海底声速不敏感, 具有较好的宽容性, 反演出的海水声速剖面可用于低频信号的匹配场定位.

**关键词** 声速剖面 经验正交函数 匹配场反演

在浅海中海水声速剖面及海底声学参数对水下声传播具有着重要的影响, 它们决定了水下声传播特性. 如何准确地获取海水声速剖面及海底声学参数一直备受关注. 海底声学参数除了直接海底采样测量外(有些海底声学参数, 如海底吸收系数, 无法准确测量), 水声学家更倾向于用声学方法来反演. 因为, 声学反演方法可快速估计出人们所关心海区的等效海底参数<sup>[1]</sup>. 相比之下, 海水声速剖面的直接或间接测量技术(如声速仪、温度计、CTD或XBT等)比较成熟. 但是, 大洋测温或海洋层析<sup>[2-6]</sup>等技术也试图通过声学这种积分探头来反演海水声速特性, 并在深海中取得一定的进展. 在浅海中, 由于其声学环境的复杂性, 浅海声层析的研究进展缓慢. 事实上, 对于一个声纳系统, 更需要的是其自身周围小范围内的海水声速的平均声速剖面. 当海水声速剖面不便于实时测量时, 采用当时接收的声信号结合历史水文资料来反演海水声速剖

面不失为一个可行方法.

海洋声学层析最初是由 Munk 和 Wunsch 提出的, 在射线理论的基础上, 通过已知声信号的传播时间数据来反演海水声速分布<sup>[7]</sup>. 水听器阵作为接收器的应用使得匹配场技术应用于声源定位以及一些环境参数的估计成为现实<sup>[6]</sup>, Tolstoy 提出用匹配场方法反演声速剖面<sup>[2]</sup>. 对于介质水平变化的海域, Taroudakis 提出了模式相位与匹配场处理相结合的方法<sup>[6]</sup>. Tolstoy 指出, 当海水声速剖面存在水平变化时, 可以把海水当作水平不变的, 直接反演海水的“等效平均声速剖面”, 这样就避开了海水水平变化的复杂性<sup>[3]</sup>. 用匹配场方法反演海水声速剖面时, 待反演参数应尽可能的少, 以便减少运算量. LeBlanc 等证明, 经验正交函数(EOF)是描述声速剖面最有效的基函数<sup>[8]</sup>. 沈远海等也论证了浅海声速剖面用经验正交函数表示的可行性<sup>[9-11]</sup>, 彭临慧等也尝试了在深海中用经验正交函数表示声

2005-05-06 收稿, 2005-08-22 收修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 10234050)

E-mail: heyulin@farad.ioa.ac.cn

速剖面并反演海水声速<sup>[12]</sup>. 所以, 使用 EOF 来表示海水声速剖面可压缩待反演参量, 只需要反演各阶经验正交函数的系数即可. 此外, 在反演时, 需要对输入参数在某些区间内搜索. 所以, 选择一种快速有效的搜索算法也十分重要. 诸多研究表明匹配场处理和遗传算法结合起来反演多参数问题是比较有效的途径之一.

本文利用东中国海 2001 年中美联合浅海声学实验数据, 研究了该海域声速剖面用经验正交函数表示的可行性. 在此基础上, 通过匹配场处理结合经验正交函数来反演海水声速剖面, 同时对海底声学参数的宽容性也进行了研究.

## 1 海水声速剖面的经验正交函数表示

如果直接对海水声速剖面进行反演, 则待反演的变量太多, 运算量将十分巨大. 与文献[6]相同, 采用经验正交函数来表示海水声速剖面. 对声速剖面在  $N$  个时间点采样  $S_n = S(t_n)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , 每个声速剖面在深度上具有  $K$  个值, 如果水深是  $H$ , 那么插值间隔是  $h = H/(K-1)$ .  $N$  个测量的声速剖面使用矩阵表示如下:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{K1} & S_{K2} & \cdots & S_{KN} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

把声速剖面按时间求平均即对  $\mathbf{S}$  按列求平均可得不同深度的平均声速  $\bar{S} = [\bar{S}_1 \bar{S}_2 \cdots \bar{S}_K]^T$ . 把(1)式中不同时间的声速剖面减去平均声速得不同时间的声速起伏矩阵

$$\mathbf{C} = \mathbf{S} - \bar{\mathbf{S}}. \quad (2)$$

求  $\mathbf{C}$  的协方差矩阵  $\mathbf{R} = \mathbf{C}\mathbf{C}^T$ , 并对  $\mathbf{R}$  做特征值分解得

$$\mathbf{R}\mathbf{F} = \mathbf{F}\mathbf{D}, \quad (3)$$

其中  $\mathbf{D}$  为特征值向量,  $\mathbf{F}$  是特征函数矩阵, 有

$$\mathbf{F} = [f_1(z) \quad f_2(z) \quad \cdots \quad f_K(z)]^T. \quad (4)$$

公式(4)中  $f_n(z)$  即为要提取的第  $n$  阶经验正交函数. 对第  $t_i$  时刻测量的声速剖面用前  $m$  阶经验正交函数可表示为

$$\begin{bmatrix} S_{1i} \\ \vdots \\ S_{Ki} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_1 \\ \vdots \\ \bar{S}_K \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_{11} & \cdots & f_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{K1} & \cdots & f_{Km} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0(i) \\ \vdots \\ \alpha_m(i) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

由(5)式可见, 如果想要反演某时刻的声速剖面, 只需反演出各阶经验正交函数的系数  $\alpha_m$  即可, 这样, 可减少待反演参数.

首先, 利用 2001 年 6 月中美联合考察实验<sup>[13]</sup> 在东中国海测量的声速剖面数据进行 EOF 的表示法验证. 在实验中, 4 天内共进行了 54 次 CTD 测量. 图 1 是 54 次测得的 CTD 声速剖面图, 其中粗线为平均声速剖面. 由图 1 可见在 0—70 m 深度上声速剖面随时间的起伏较大. 图 2 给出了由(1)—(5)式提取的前三阶经验正交函数(为了简略起见这

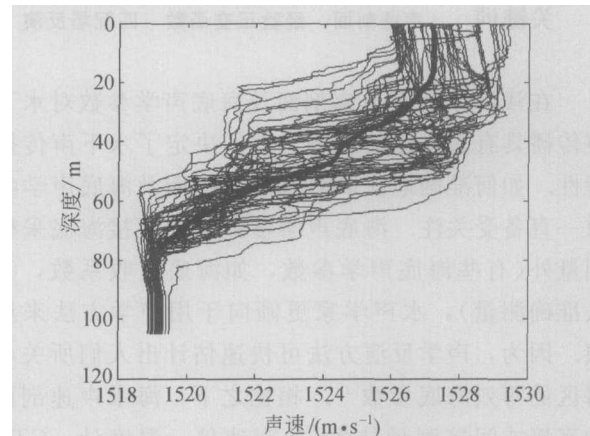


图 1 实验期间用 CTD 测量的不同时刻的声速剖面

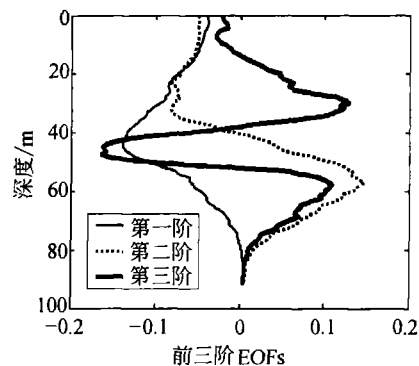


图 2 提取的前三阶经验正交函数 (EOFs)

里只给出了前三阶的 EOFs)。用不同阶数的 EOFs 对每个声速剖面样本进行拟合, 结果表明使用前六阶经验正交函数可以较好地拟合出声速剖面。图 3 中给出了由前六阶 EOFs 拟合的某一时刻的声速剖面(虚线)。作为比较, 我们把实际测量的声速剖面用实线一同给出。由图 3 可见, 用 EOFs 拟合的声速剖面与实际测量结果非常接近, 说明用经验正交函数表示这一海区的声速剖面是可行的。

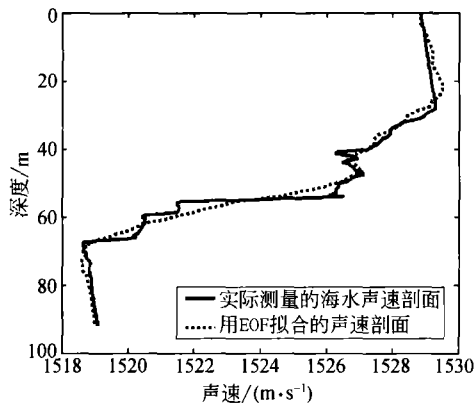


图 3 某一时刻测量的声速剖面(实线)与用 EOFs 拟合的声速剖面(虚线)比较

## 2 声速剖面的匹配场处理反演基本原理

声速剖面反演的整体流程如图 4 所示, 遗传算法(GA)被用来在参数域中快速寻找一组 EOF 系数  $\alpha_0$  使得代价函数<sup>[14-15]</sup>

$$Costf(\alpha) = 1 - \left| \sum_{p=1}^N \sum_{q=p+1}^N \sum_{j=1}^{M_f} D_{pq}(f_j) M_{pq}^*(\alpha, f_j) \right| (K)^{-1} \quad (6)$$

达到最小。公式(6)中:  $D_{pq}(f) = D_p(f) D_q^*(f) / |D_p(f) D_q(f)|$  为两个阵元实际接收声信号归一化后的互功率谱,  $D_p(f)$  为第  $p$  个水听器接收的复声压;  $M_{pq}^*(f) = M_p^*(\alpha, f) M_q(\alpha, f) / |M_p(\alpha, f) M_q(\alpha, f)|$  为根据海洋环境参数数值计算得到的两个阵元间归一化后的互功率谱,  $M_q(\alpha, f)$  是第  $q$  个水听器处的复声压理论值;  $\alpha$  表示待反演的参数组  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$ ,  $N$  为水听器阵的阵元个数,  $M_f$  为频率点数, 上标“\*”表示复数共轭。  $K$  是归一化系数, 并满足

$$K = \left( \sum_{p=1}^N \sum_{q=p+1}^N \sum_{j=1}^{M_f} |D_{pq}(f_j)|^2 \right)^{1/2} \cdot \left( \sum_{p=1}^N \sum_{q=p+1}^N \sum_{j=1}^{M_f} |M_{pq}(f_j)|^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

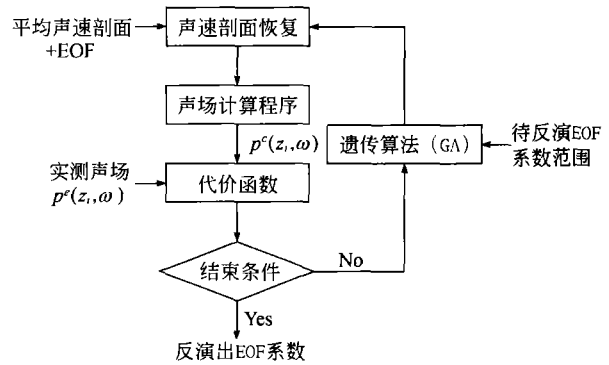


图 4 反演流程图

在柱坐标系下, 对水平不变的海洋环境, 位于  $(0, z_s)$  处简谐点声源激发的空间任意一点  $(r, z_i)$  处的复声压由简正波理论可表示为(略去时间因子  $e^{-i\omega t}$ )<sup>[16]</sup>,

$$p^c(r, z_i) = \frac{i}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-ikr/4} \sum_m \Psi_m(z_i) \Psi_m(z_s) \frac{e^{ik_{zm}r}}{\sqrt{k_{zm}}} \quad (8)$$

其中  $\Psi_m(\cdot)$  为简正波本征函数,  $k_{zm}$  为本征值。

## 3 利用垂直阵接收信号的反演方法

由(6)式和图 4 的流程通过数值仿真来进行海水声速剖面反演, 以验证利用垂直阵信号反演海水声速剖面的有效性。在数值仿真中, (6)式中的测量场信号也由(8)式数值计算得到。计算中, 海水声速剖面同图 3 中的实线。海深 105 m, 32 阵元垂直阵所处深度从 4.6—90.5 m。声源深度 50 m, 声源距离垂直阵的水平距离 10 km。反演时所用频率范围 100—200 Hz。该海区的海底声学参数由声场反演得到<sup>[17]</sup>, 其中密度、声速和衰减系数分别为: 1.86 g/cm<sup>3</sup>, 1610 m/s 和 0.15 dB/λ。遗传算法搜索参数时的总人口数为 100, 共遗传 40 代, 且通过平行计算多次以确保收敛于相同的最小值。计算拷贝场时所用海底参数与计算测量场所用参数相同(即海底无失配)时, 反演得到的声速剖面如图 5 中的细线所示, 作为比较把

数值仿真用的实测声速剖面(图3中的实线)在这里也用粗线一同给出. 可见, 两者基本符合. 为了探讨反演的实用性, 有必要考查该反演方法对海底参数的敏感性与宽容性. 考虑到匹配场处理反演方法对海底声速较为敏感, 而对海底密度和衰减系数相对不敏感<sup>[17]</sup>, 这里主要考查海底声速对匹配场反演海水声速的影响. 模拟反演中, 在计算拷贝场  $M_q(\alpha, f)$  时, 给海底声速引入  $\pm 15 \text{ m/s}$  的误差, 即拷贝场计算中的海底声速分别取 1595 和 1625  $\text{m/s}$ , 来反演海水声速剖面. 反演结果用虚线和点线在图5中一同给出. 由图5可见, 在用垂直阵接收信号反演海水声速剖面时, 受海底参数的影响较小, 即使海底声速有  $\pm 15 \text{ m/s}$  的误差, 仍然可以较好地反演出海水声速剖面.

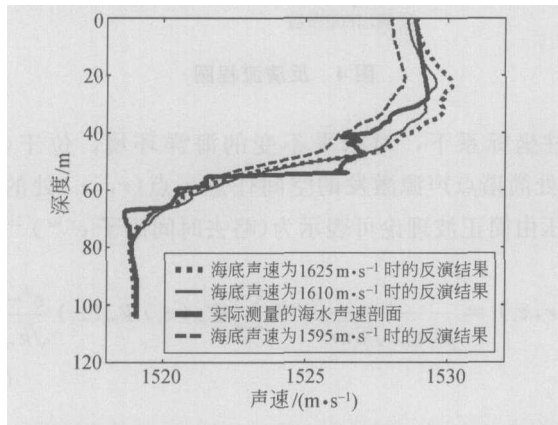


图5 实测海水声速剖面与垂直阵接收信号模拟反演的海水声速剖面比较

经数值仿真验证了垂直阵反演海水声速剖面的可行性和宽容性后, 使用实验中记录的宽带爆炸声传播信号来反演海水声速剖面. 由于声传播实验开始前进行了海水声速剖面测量, 而声传播实验期间没有进行海水声速剖面测量. 所以, 选取离声速剖面测量时间较近的爆炸声信号来进行海水声速剖面反演以便进行验证和对比. 利用距垂直阵距离分别为 6.80, 6.83, 8.65, 8.70, 10.5, 10.6, 12.3 和 12.4 km 的 8 个爆炸声信号进行反演. 反演时所用的频带范围 100—200 Hz, 声源深度取爆炸声信号的标称深度 50 m. 结果表明, 利用 8 个不同距离的信号反演, 反演出的声速剖面都与实际的声速剖面基本吻合. 图6给出其中一个信号的反演结果与实测声速剖面的比较, 其中实线是实际测量的声速剖面, 虚线是用声信号反演的声速剖面. 从图6可见, 反演出的海水声速剖面与实际

测量的海水声速剖面基本上一致. 为了进一步检验反演出的海水声速剖面的有效性, 将上述反演出的声速剖面用于匹配场声源定位. 图7给出距离为 12.4 km 处爆炸声信号的匹配场定位的距离深度模糊度表面图, 其中: 匹配场定位时的频率范围为 100—200 Hz, 距离搜索步长为 50 m, 深度搜索步长为 2 m. 从图7可见, 匹配场定位的距离为 12.35 km, 这与 GPS 实际测量的距离基本一致, 定位深度 54 m 也接近爆炸声信号的标称深度 50 m. 这说明反演出的海水声速剖面可用于低频匹配场声源定位.

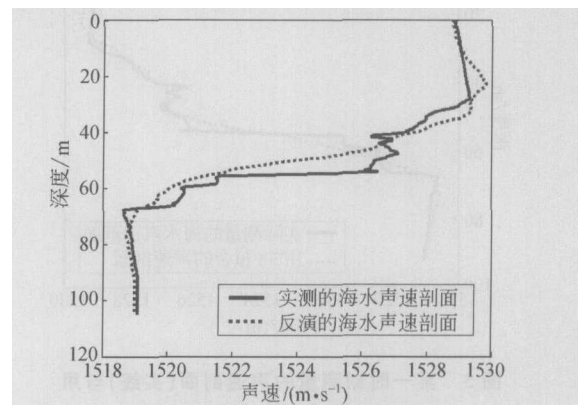


图6 实测的声速剖面与垂直阵实验信号反演的声速剖面比较

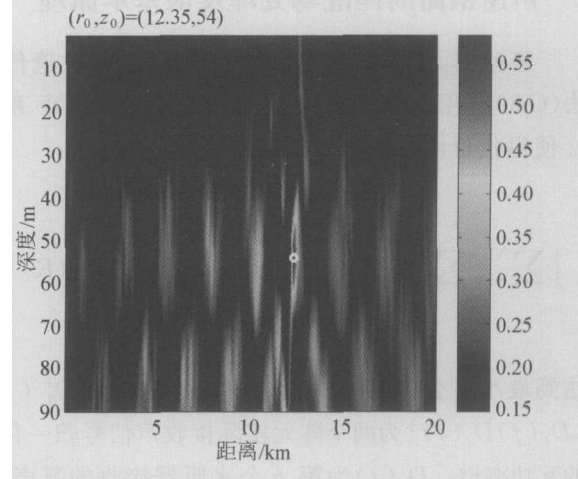


图7 用反演出的海水声速剖面定位结果

#### 4 利用水平阵接收信号反演的的方法

岸基声纳系统常用的是水平阵, 因此有必要对用水平阵接收信号反演海水声速剖面的方法进行探索性研究. 利用水平阵接收信号的反演方法和流程同(6)式和图4, 由于缺少水平阵实验数据, 这里仅进行数

数值仿真研究. 数值仿真反演时, 水平阵为16个阵元, 总长度为300 m, 水平阵的第一个阵元与声源之间的距离为10 km, 水平阵各阵元沿声传播方向等间距布设. 模拟测量场用的声速剖面仍然同图3中的实线. 与前一节中利用垂直阵数值仿真反演声速剖面一样, 为了考察利用水平阵信号进行匹配场处理反演海水声速剖面对海底参数的依赖性, 固定测量场的海底声速为1610 m/s, 而拷贝场计算中海底声速分别取: 1610, 1595 和 1625 m/s 三组不同值来进行反演. 反演结果分别如图8中的细线、虚线和点线所示, 而实际测量的声速剖面用粗线给出. 从图8可以看出: 利用水平阵信号可较好地反演出海水声速剖面, 并反演方法对海底声速竟有较好地宽容性.

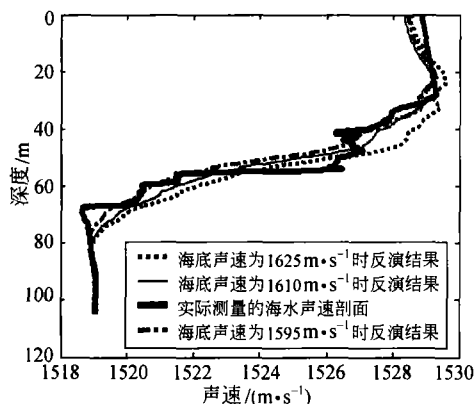


图8 实测海水声速剖面与水平阵信号模拟反演的海水声速剖面比较

## 5 结果与讨论

利用2001年6月中美联合考察实验多次测量的声速剖面 and 声传播信号研究了海水声速剖面的经验正交函数(EOF)表示及其由匹配场处理方法反演海水声速剖面的可行性和宽容性. 研究表明:

(1) 对此次实验的海区, 用前六阶经验正交函数可以较好的表示声速剖面.

(2) 数值及仿真结果显示, 利用垂直阵信号可较好地反演出海水声速剖面, 且对海底声速不敏感, 具有较好的宽容性. 同时, 反演出的海水声速剖面可以应用于低频信号的匹配场定位.

(3) 该反演方法对水平阵信号同样适用.

**致谢** 对参加2001年度中美联合考察的全体

实验人员表示感谢, 是他们的辛勤劳动为本文提供了宝贵的实验数据.

## 参考文献

- 李整林, 鄢锦, 李风华等. 由简正波群延时及幅度反演海底参数. 声学学报, 2002, 27(6): 487—491
- Tolstoy A, Diachok O, Frazer L N. Acoustic tomography via matched field processing. J Acoust Soc Am, 1991, 89(3): 1119—1127
- Tolstoy A. Linearization of the matched-field processing approach to acoustic tomography. J Acoust Soc Am, 1992, 91(2): 781—787
- Shang E C. Ocean acoustic tomography based on adiabatic mode theory. J Acoust Soc Am, 1989, 85(4): 1531—1537
- Skarsoulis E K, Athanassoulis G A, Send U. Ocean acoustic tomography based on peak arrivals. J Acoust Soc Am, 1996, 100(2): 797—813
- Taroudakis M I, Markaki M G. On the use of matched-field processing and hybrid algorithms for vertical slice tomography. J Acoust Soc Am, 1997, 102(2): 885—895
- Munk W, Worcester P, Wunsch C. Ocean Acoustic Tomography. New York: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1995, 6—58
- LeBlanc L R, Middleton F H. An underwater acoustic sound velocity data model. J Acoust Soc Am, 1980, 67(6): 2055—2062
- 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等. 浅水声速剖面用经验正交函数(EOF)表示的可行性研究. 应用声学, 1999, 18(20): 21—25
- 沈远海, 马远良, 屠庆平. 声速剖面的分层正交经验函数表示. 西北工业大学学报, 2000, 18(1): 90—93
- 沈远海, 马远良, 屠庆平, 等. 浅水声速剖面的反演方法与实验验证. 西北工业大学学报, 2000, 18(2): 212—215
- Peng L, Wang L, Qiu X F, et al. Modal wave number tomography for South China Sea front. China Ocean Engineering, 2003, 17(2): 289—294
- 李整林, 张仁和, 鄢锦, 等. 大陆斜坡海域宽带声源的匹配场定位. 声学学报, 2003, 28(5): 425—428
- Westwood E K. Broadband matched-field source localization. J Acoust Soc Am, 1992, 91(5): 2777—2789
- Knobles D P, Koch R A, Thompson L A, et al. Broadband sound propagation in shallow water and geoacoustic inversion. J Acoust Soc Am, 2003, 113(1): 205—222
- Jenson F B, Kuperman W A, Porter M B, et al. Computational Ocean Acoustics. New York: AIP Press, 1994, 271—337
- Li Z, Zhang R, Yan J, et al. Geoacoustic inversion by matched-field processing combined with the vertical reflection coefficients and vertical correlation. IEEE J Oceanic Eng, 2004, 29(4): 973—979