

一个预报海水声吸收的公式

裘辛方

(中国科学院东海研究站)

本文根据国外及作者的测量数据和研究结果,提出了一个预报海水声吸收的计算公式。该公式包含硫酸镁、硼酸、碳酸镁、碳酸氢镁和硼酸镁化学弛豫吸收项及纯水吸收项。作者利用此公式编制了频率范围为100赫—1兆赫的海水声吸收表。

海水声吸收系数在水声设备的设计、声呐作用距离预报及水声物理研究中都是一项必不可少的基本参数。海水声吸收超过纯水吸收的部分(即逾量吸收)已被证明起因于海水中的一系列化学弛豫过程。除了最早发现的硫酸镁弛豫吸收(它与海水的盐度、温度、压力有关),近十余年来又陆续发现海水中还存在硼酸、碳酸镁、碳酸氢镁和硼酸镁弛豫吸收。其中硼酸、碳酸镁和硼酸镁吸收与海水的pH值有关(海水的pH值范围约7.5—

8.3)。随着海上及实验室测量数据的不断积累及以上这些弛豫吸收的发现,预报海水声吸收的公式也逐步得到改进。由于碳酸氢镁吸收发现较晚和硼酸镁吸收贡献较小,因此现有的海水声吸收公式最多只包含前面三种弛豫(即硫酸镁、硼酸和碳酸镁)吸收。我们在表1中列出现有的一些海水声吸收公式的适用范围和不适用(即误差较大)范围。表2是按Schulkin-Marsh公式^[1,3]和Francois-

表1 现有海水声吸收公式的适用范围和不适用范围

作者	所包含的吸收项	适用范围	不适用范围
Schulkin, Marsh (1962) ^[1]	MgSO ₄ , H ₂ O	频率高于10千赫	(1) 频率低于10千赫 (2) 高频低温下计算值偏大
Thorp (1967) ^[2]	B(OH) ₃ , MgSO ₄	pH = 8(例如北大西洋声道), 频率低于10千赫	(1) 频率高于10千赫; (2) pH不等于8(例如北太平洋声道pH≈7.7)
Schulkin, Marsh (1978 ^[3] , 1962 ^[1])	B(OH) ₃ , MgSO ₄ , H ₂ O,	一般情况	高频低温下计算值偏大
Fisher, Simmons (1977) ^[4]	B(OH) ₃ , MgSO ₄ , H ₂ O	pH = 8	(1) pH不等于8 (2) 4—40千赫计算值偏小
Mellen (1981) ^[5]	MgSO ₄ , B(OH) ₃ , MgCO ₃	频率低于约50千赫	频率高于约50千赫
Francois, Garrison (1982) ^[6,7]	MgSO ₄ , B(OH) ₃ , H ₂ O	一般情况	高频高温下计算值偏大
Browning, Mellen (1987) ^[8]	MgSO ₄ , B(OH) ₃ , MgCO ₃	频率低于约50千赫	频率高于约50千赫

表2 海水声吸收公式计算值与海上实测数据的比较示例(高频、低温)

T (°C)	S (‰)	D (m)	pH	F (kHz)	海水声吸收系数 (dB/km)			
					测量值	SM	FG	本文公式计算值
1.4	34.7	3250	7.73	75.8	13.2	22.9	13.0	14.0
7	34	200	8.13	145	32.7	49.9	37.7	36.6
2.5	34.6	2800	7.7	60	9.9	18.5	11.7	12.2
2.5	34.6	2800	7.7	145	25.3	39.2	23.5	25.1
9.3	30.4	149	8.14	272	62.1	73.8	60.1	59.1
-1.7	32.1	138		100	21.7	32.9	20.6	20.6
-1.7	32.1	138		275	55.6	75	57.9	57.1
-1.7	32.1	138		420	106	130	113	110
-1.62	31.9	358		50	12.0	17.5	12.3	12.0

Garrison 公式所得出的海水声吸收值(分别用 SM 和 FG 表示)在高频低温下与海上实测数据^[6] 的比较示例。表中 T 为温度, S 为盐度, D 为深度。pH 值按文献^[9] 估计。实际上高频下 pH 值对海水声吸收影响很小。由表 2 可以看出 SM 值显著地大于海上实测值, 这一点在文献^[4] 和^[6], ^[7] 中都曾指出过。应该注意的是 Francois 和 Garrison 在总结公式时高频段只有低温(低于 10°C)下的数据, 外推于高温区域有可能出现较大的偏差。表 3 列出了温度高于 20°C 时我们在实验室测得的天然海水声吸收系数(将测得的海水过量吸收* 加上按文献^[4] 计算的纯水吸收)与 Francois-Garrison 及 Schulkin-Marsh 公式计算值的比较。由表 3 可见, 在高温高频下 FG 值明显地稍偏大。此外, 我们通过海水声吸收与 pH 关系的实验测量已经指出过海水声吸收公式中若包含 $MgHCO_3^+$ 吸收项就可使计算值不但在高频仍能与实验值相符, 而且可使计算值在低频低 pH 下与实测值符合得更好些^[11]。由此可见, 为了使公式计算值与各个实验测量数据集之间的偏差都尽可能地小和能广泛地适用

于各种条件, 有必要根据现有的资料总结出一个新的海水声吸收公式。当然, 考虑到实测数据的误差, 所总结的公式在满足使用的要求下也不应过分复杂。

表3 海水声吸收公式计算值与实测值的比较示例

$$S = 32.94 \quad D = 0 \quad pH = 8.17$$

T (°C)	F (kHz)	海水声吸收系数 (dB/km)			
		测量值	SM	FG	本文公式计算值
22	80	22.2	23.4	25.7	22.4
22	100	30	32.7	35.7	31.1
23	80	22.5	22.8	25.3	22.1
23	100	30	32.1	35.5	30.7
23.4	80	21.4	22.6	25.1	21.9
23.4	100	29.3	31.9	35.3	30.6
24.4	80	20.8	22	24.7	21.5
24.4	100	28.9	31.3	35	30.2
27.4	80	18.9	20.4	23.1	20.3
27.4	100	29	29.4	33.5	28.9
28.4	80	20.1	19.8	22.6	19.9
28.4	100	29.6	28.7	32.9	28.4
29	80	20.7	19.5	22.3	19.6
29	100	27.3	28.3	32.5	28.1

本文在总结公式时所利用的海水声吸收实测数据集是:

- (A) Francois-Garrison 所收集和公布的数据^[6,7]。对条件相似的数据进行了平均, 个别数据作了舍弃;
- (B) 本文作者和合作者的实验室高频测量数据^[10]。原始数据列于表 4;
- (C) 本文作者和合作者的实验室 3—11 千赫测量数据^[11]。原始数据列于表 5。

应该指出, Browning 和 Mellen^[8] 只在 10 千赫以下频率比较了他们公式的计算值 (BM) 和海上实测数据(且大部分实测数据是在 2 千赫以下)。虽然他们所依据的低频下海上实测数据与文献^[7] 中数据基本上属于同一来源, 但 Browning-Mellen 公式和 Fran-

* 参看文献^[10]。原始数据见上文表 4

cois-Garrison公式计算值之间仍有一定偏差。例如对于四个不同海区(大西洋,北太平洋、地中海和红海),在0.1—2千赫频段内,

FG值相对于BM值的平均绝对偏差约为11%。

表4 本文作者和合作者的实验室天然海水声吸收高频测量数据(μ_s -逾量波长吸收, $S = 32.94, D = 0, pH = 8.17$)

$\mu_e \cdot 10^5$	F (kHz)					$\mu_e \cdot 10^5$	F (kHz)				
		40	50	80	100			40	50	80	100
T (°C)						T (°C)					
4		4.32	3.91	3.72	3.69	16.5			3.91	4.55	4.91
4.4			4.50	3.84	4.02	17.2		3.09	3.81	4.47	5.41
5.1			4.09	4.10	3.78	19.3		3.05	3.55	5.06	5.25
6.2		4.31	3.81	4.40	4.03	20			3.64	4.64	5.06
7		4.26	4.40	3.93	3.70	20.6		3.34	3.95	4.81	5.20
7.4		4.42	4.34	4.38	4.23	22		2.93	3.39	4.58	4.91
8		4.15	4.19	4.36	4.31	23			3.39	4.66	4.92
9		4.42	3.90	4.18	4.28	23.4		2.69	3.31	4.42	4.81
9.6			3.81	4.85	4.60	24.2		2.52	3.19	4.31	4.77
10.2			3.68	4.59	4.03	27.4			3.08	3.95	4.83
12			3.86	4.59	4.42	28.4			3.27	4.22	4.96
12.9			3.68	4.30	4.63	29			2.86	4.36	4.57
13.6			3.60	4.86	4.83						
14.6			4.05	4.56	4.54						
15.7		3.80	4.05	4.48	4.76						

表5 本文作者和合作者的实验室天然海水声吸收3—11千赫测量数据(α_s -逾量吸收, $S = 33.91, T = 12.6^\circ\text{C}, D = 0$)

α_e (dB/km)	F (kHz)			
		2.91	6.32	10.76
pH				
7.41		0.088	0.362	0.88
7.65		0.127	0.420	1.00
7.90		0.179	0.526	1.11
8.2		0.243	0.64	1.25

我们总结公式的具体步骤是:

- (1)使公式中包含所有已发现的五种化学弛豫吸收项及纯水吸收项;
- (2)纯水吸收项(包括压力修正因子)取自

- Fisher-Simmons公式^[4];
- (3)硫酸镁吸收项利用我们在文献[10]中所得出的公式,但压力修正因子取自Fisher-Simmons公式^[4];
- (4)硼酸镁吸收项利用Mellen所得到的结果(文献[12]表II),但补加pH修正因子;
- (5)声速与温度、盐度、深度的关系式利用文献[6]中所给出的近似式;
- (6)根据文献[8,11—13]的研究结果,调整硼酸、碳酸镁、碳酸氢镁等吸收项的参数,通过计算机计算,使公式计算值与上列各数据集之间的平均绝对偏差都接近最小。同时还兼顾了在低频段与Browning Mellen公式的计算值之间有较小的偏差(对于上列四个不同海区,在0.1—2千赫

频段内, 本文公式计算值相对于BM值的平均绝对偏差约为5.3%)。

由此我们得出下列海水声吸收公式:

$$\alpha = \alpha_1(\text{MgSO}_4) + \alpha_2(\text{B}(\text{OH})_3) + \alpha_3(\text{Mg}-\text{CO}_3) + \alpha_4(\text{MgHCO}_3^+) + \alpha_5(\text{MgB}(\text{OH})_4^-) + \alpha_6(\text{H}_2\text{O})$$

$$\alpha_1 = 8.686 \times 10^3 \times A_1 P_1 F_1 F^2 / (F_1^2 + F^2)$$

$$A_1 = (3.75 + 0.0708T)(S/32.94) \times 2 \times 10^{-2} / c$$

$$F_1 = 6.42 \times 10^{[8 - 1950/(273 + T)]}$$

$$P_1 = 1 - 10.3 \times 10^{-5} D + 3.7 \times 10^{-9} D^2$$

$$\alpha_2 = A_2 F_2 F^2 / (F_2^2 + F^2)$$

$$A_2 = 0.24 \times 10^{(0.95\text{pH} - 8)},$$

$$F_2 = 0.8 \times 10^{(T/70)}$$

$$\alpha_3 = A_3 F_3 F^2 / (F_3^2 + F^2)$$

$$A_3 = 0.027 \times 10^{(\text{pH} - 8)},$$

$$F_3 = 4.5 \times 10^{(T/30)}$$

$$\alpha_4 = 0.22 F^2 / (F_4^2 + F^2), F_4 = 11$$

$$\alpha_5 = A_5 F^2 / (F_5^2 + F^2)$$

$$A_5 = 0.2 \times 10^{(\text{pH} - 8)}, F_5 = 30$$

$$\alpha_6 = 8.686 \times 10^9 \times A_6 P_6 F^2$$

$$A_6 = (55.9 - 2.37T + 4.77 \times 10^{-2} T^2 - 3.48 \times 10^{-4} T^3) \times 10^{15}$$

$$P_6 = 1 - 3.84 \times 10^{-5} D + 7.57 \times 10^{-10} D^2$$

$$c = 1412 + 3.21T + 1.19S + 0.0167D$$

式中T为温度(°C), S为盐度(‰), D为深度(m), c为声速(m/s), F为频率(kHz), $F_1 \sim F_5$ 为各弛豫的弛豫频率(kHz), P_1 和 P_6 为压力修正因子, pH为酸度, 吸收系数 α 、 $\alpha_1 \sim \alpha_6$ 的单位为dB/km, 在表2和表3中也列出了按本文公式所得的计算值以作比较。本文公式计算值与各数据集之间的平均绝对偏差(%)列于表6, 并列出了按其他公式计算时的偏差值以作比较。本文所给出的公式能应用于一般的海洋条件, 但应注意当频率低于约200赫时, 在不少海区所测得的声衰减值大于本文公式计算值(仅考虑海水声吸收引起的衰减), 此时应补加一项与频率无关的散射衰减项^[14]。

作者利用本文给出的海水声吸收公式编制了海水声吸收表, 频率范围是从100赫到1兆赫。

表6 不同海水声吸收公式计算值与实测数据集的平均绝对偏差(%)

数据集	频率范围(kHz)	数据集个数	本文公式	FG	SM Mellen	BM
(A)	0.05—6	76	10.9	10.5	12.4	13.9
(A)	7—50	18	12.7	8.51	14.4	17.7
(A)	50—467	34	10.2	9.68	40.9	—
(B)	40—100	94	5.41	13.4	17.1	—
(C)	3—11	12	5.76	11.9	12.5	16.5

参考文献

- [1] Schulkin, M. and Marsh, H. W., J. Acoust. Soc. Am., 34(1962), 864
- [2] Thorp, W. H., J. Acoust. Soc. Am., 42(1967), 270.
- [3] Schulkin, M. and Marsh, H. W., J.
- [4] Fisher, F. H. and Simmons, V. P., J. Acoust. Soc. Am., 62(1977), 558.
- [5] Mellen, R. H. Underwater Acoustics and Signal Processing; Bjørnø, L. ed. (1981), 71.
- [6] Francois, R. E. and Garrison, G. R., J. Acoust. Soc. Am., 72(1982), 896.
- [7] Francois, R. E. and Garrison, G. R., J. Acoust. Soc. Am., 72(1982), 1879
- [8] Browning, D. G. and Mellen, R. H., Progress in Underwater Acoustics; Merklinger, H. M. ed. (1987), 403
- [9] Mellen, R. H. and Browning, D. G., J. Acoust. Soc. Am., 61(1977), 704
- [10] 裘辛方, 韩嗣康, 声学学报, 12—2(1987), 151
- [11] 裘辛方, 蒋济良, 万世敏, 声学学报, 14(1989), 即将发表。英文版已发表: Chinese J. of Acoustics, V. 7, No. 4(1988), 295. (下转第23页)

表中 $ka = 34.4^\circ$, $\varphi(s_1) = 0.3545(\text{rad})$,

由 $\overline{\Delta T} = -0.0044$ 查图6的 $\Delta T - k_1 l_1$ 曲线, 查得耦合层厚度 $k_1 l_1 = 12.5^\circ$, 再由图5的 $\gamma - k_1 l_1$ 曲线, 查得耦合层反射相移 $\gamma_R = -0.805^\circ$, 于是真实声时为

$$T = \frac{\gamma_R}{2\pi f_R} + \overline{T}_R^D = 10.0467(\mu\text{s})$$

声速 $C = 2L/T = 5944(\text{米/秒})$ 。由表3可知, 整个实验的声速测量绝对误差为 $\pm 2 \times 10^{-4}$ 。

六、结 论

1. 精密地测量媒质的超声波传播速度, 必须对由于声波衍射(即声束扩散)所引起的相位变化进行修正, 同时还必须对于耦合层所引起的反射相移进行修正。

2. 采用脉冲回波重合法的声速测量系统, 由于仪器的声波发射周期相隔很长, 即仪器的每一次发射, 都要等到上一次发射所产生的声波回波全部衰减完以后才发射下一次声脉冲, 两列声波之间不会产生相互干涉, 因此可以对测量结果进行精密的衍射修正和耦合层修正。修正后的测量结果, 可以认为是被测媒质的绝对声速。

3. 声波衍射所引起的声时差要比耦合层反射相移所引起的误差大一个数量级。因此, 在计算测量结果时, 衍射相移的影响不容忽视。在脉冲回波重合法声速测量系统中, 耦合层的影响往往可以忽略。

本工作得到魏墨鑫教授的热情指导, 在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] E. P. Papadakis, Rev. Sci. Instr., 47, (1976), 806
- [2] J. W. Williams and J. Lamd, J. A. S. A. 30, (1958), 308
- [3] H. J. Meskimen, J. A. S. A. 33, (1961), 12
- [4] J. E. May, IRE. Nat. Conv. Rec., (1958), 134
- [5] E. P. Papadakis, J. Appl. Phys. 35, (1964), 1474
- [6] 王寅观, 实验技术与管理, 3—2, (1986), 24
- [7] A. O. Williams, J. A. S. A. 23, (1951), 1
- [8] R. Bass, J. A. S. A. 30, (1958), 602

(上接第4页)

- [12] Mellen, R. H., Browning, D. G. and Simmons, V. P. J. Acoust. Soc. Am, 70(1981), 143.
- [13] 袁辛方, 蒋济良, 万世敏, 声学学报, 9—1(1984), 21.
- [14] Kibblewhite, A. C. and Hampton, L. D, J. Acoust. Soc. Am, 67(1980), 147.

(上接第12页)

- on fluid saturated porous structures: An experimental verification of Biot's slow wave in the quasistatic limit", J. Acoust. Soc. Am., 70(1), 116-121(1981)。
- [8] 乔文孝, 硕士研究生毕业论文 (1-988)