

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.020

超声波在悬浮液中的衰减

苏杭丽

(南京财经大学信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘要:通过研究悬浮液对超声波振幅的衰减问题,指出 Lamb 衰减理论在工程应用中存在 2 个问题:(a)在粗粒区,Lamb 理论的衰减系数与试验数据有较大差异;(b)Lamb 理论认为声密度与颗粒体积分数呈线性关系,与试验结果不符。针对 Lamb 理论存在的问题,对 Lamb 理论中的散射衰减项、声密度与颗粒体积分数的关系进行了修正。结果表明,修正后的理论能更好地拟合试验曲线。
关键词:超声波;悬浮液;超声波振幅衰减系数;声密度;有效粒子数
中图分类号:TB52⁺9 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2012)06-0710-05

Ultrasonic attenuation in suspension

SU Hangli

(School of Information Engineering, Nanjing University of Finance and Economics,
Nanjing 210003, China)

Abstract: Ultrasonic amplitude attenuation in suspension was studied. Two problems of the Lamb theory in engineering application were pointed out: one was that the Lamb attenuation coefficient was inconsistent with experimental data in the area of large-size particles, and the other was that the relationship between sound density and particulate density was linear, which was also different from experimental results. To solve these problems, the relationships between the scattering attenuation item, sound density, and particulate density in the Lamb theory were corrected. The results show that the corrected Lamb theory could better fit with the experimental curve.
Key words: ultrasonic; suspension; ultrasonic amplitude attenuation coefficient; sound density; effective particles

当一束平行超声波通过厚度为 x 的悬浮液时,由指数衰减定律得

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \tag{1}$$

式中: I_0, I ——入射、出射超声波的强度; α ——超声波振幅衰减系数。

有关衰减系数的研究很多^[1-7],1948 年 Lamb 等^[7]提出了一个比较实用的公式:

$$2\alpha = kc_v \left[\frac{1}{b} k^3 r^3 + s \left(\frac{c_1}{c_0} - 1 \right)^2 \frac{1}{s^2 + \left(\frac{c_1}{c_0} + \tau \right)^2} \right] \tag{2}$$

其中

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad b = \sqrt{\frac{\pi f}{\mu}}$$
$$s = \frac{9}{4br} \left(1 + \frac{1}{br} \right) \quad \tau = \frac{1}{2} + \frac{1}{4br}$$

式中: k ——波数; c_v ——颗粒的体积分数; r ——悬浮液中颗粒的半径; c_1 ——悬浮液中颗粒的密度; c_0 ——媒质密度; λ ——超声波波长; f ——超声波频率; μ ——黏滞系数。

由式(2)可以看出, α 是颗粒粒径($d=2r$)的复杂函数。式(2)中括号中的第 1 项是由散射造成的衰减,类似光学中的瑞利散射,为 d 的单调递增函数;中括号中的第 2 项为黏滞衰减项,是 d 的单调递减函数。但是,

收稿日期:2011-11-13

作者简介:苏杭丽(1973—),女,山东荣成人,副教授,博士,主要从事计算机应用研究。E-mail:su_hl@163.com

1963 年 Flammer^[8] 给出 c_v 为 0.1% 时不同频率超声波束所对应的 α 与 d 的关系曲线(图 1)。从图 1 可以看出,不同频率超声波束的 α 与 d 关系曲线近乎平行。因此,式(2)不能很好地对图 1 中的曲线进行模拟。

将式(1)和式(2)进行整理得

$$\begin{cases} I = I_0 e^{-kc_v F(d)x} \\ \ln \frac{I_0}{I} = kc_v F(d)x \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$F(d) = \frac{\alpha}{kc_v}$$

由式(3)可得:超声波强度 I 随 c_v 呈指数衰减;定义

$Y = \ln \frac{I_0}{I}$ 为声密度,则 Y 与 c_v 为线性正相关。而文献[9]给出的 Y 与 c_v 关系曲线不完全符合式(3)所描述的 Y 与 c_v 成正比的关系(图 2)。

为解决理论公式(2)(3)不能很好地模拟试验曲线的问题,笔者对 Lamb 公式中的散射衰减项及 Y 与 c_v 的线性关系进行修正,使 2 个理论公式能够较好地对图 1、图 2 中的试验曲线进行模拟。

1 散射衰减项的修正

式(2)中括号中的第 1 项可以用来说明图 1 曲线上的(b)段。式(2)中括号中的第 2 项可以用来说明图 1 中的(a)段曲线。因此,式(2)只说明 α 存在一个极小值,但是图 1 显示 α 除了存在一个极小值外,还存在一个极大值以及(c)段曲线。文献[10]指出式(2)不适用(c)段曲线,因此,可以认为 Lamb 公式中黏滞衰减项不需要修正。因为瑞利散射只适用于微细粒子而无法模拟粗粒子的散射,因此式(2)中的瑞利散射项需要修正。修正的前提是:粗粒子对超声波的散射类似于对光波的散射,即对于超声波的散射,颗粒只是相移元件;超声波经过颗粒会产生相位角为 c 的相移,产生相移的超声波与那些没有相移的超声波束发生干涉形成散射,其散射系数 K 可用 Hulst 模型^[11] 求出:

$$K = 2 \left[1 - \frac{\text{sinc}}{c} + \frac{\sin^2\left(\frac{c}{2}\right)}{\left(\frac{c}{2}\right)^2} \right] \quad (4)$$

其中

$$c = (m - 1)kd$$

式中: c ——相移因子; m ——折射率。

如果超声波不是单频率,而有一个频带分布,其中心频率为 f_0 ,则 K 的脉动被平滑^[12] 后为

$$K = 2 \left[1 - l \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d}{p}\right)}{\left(\frac{\pi d}{p}\right)^2} + (l - 1) \frac{\sin^2\left(\frac{\pi d}{w}\right)}{\left(\frac{\pi d}{w}\right)^2} \right] \quad (5)$$

式中 l, w, p 是由试验确定的系数。

根据超声波散射衰减系数的定义得

$$2\alpha = mGK = c_v k \frac{3}{4} \frac{K}{k} = c_v k \frac{3}{2} \frac{K}{kd} = c_v \frac{3K}{2d} \quad (6)$$

式中: N ——单位体积的颗粒数; G ——单个颗粒的截面积。

将式(6)代入式(2)的瑞利散射项得

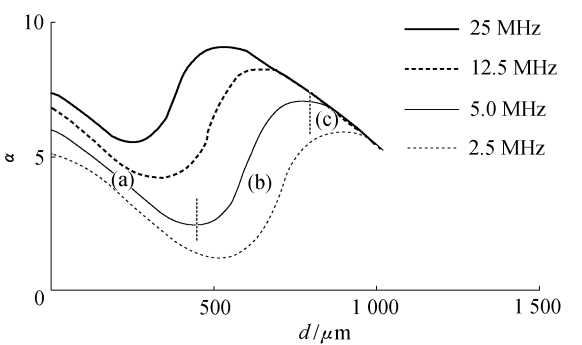


图 1 Flammer 曲线
Fig. 1 Flammer curves

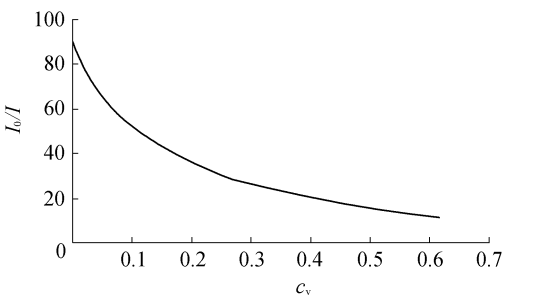


图 2 $\frac{I_0}{I}$ 与 c_v 关系曲线
Fig. 2 Sound intensity attenuation with concentration

$$2\alpha = kc_v \frac{s \left(\frac{c_1}{c_0} - 1 \right)^2}{s^2 + \left(\frac{c_1}{c_0} + \tau \right)^2} + c_v \frac{3}{d} \left[1 - l \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi d}{p} \right)}{\left(\frac{\pi d}{p} \right)^2} + (l-1) \frac{\sin^2 \left(\frac{\pi d}{w} \right)}{\left(\frac{\pi d}{w} \right)^2} \right]$$

(7)

其中

$$s = \frac{9}{2b} \frac{1}{d} \left(1 + \frac{2}{bd} \right) \quad \tau = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{1}{bd} \quad b = \sqrt{\frac{\pi f_0}{\mu}}$$

式(7)等号右边的第1项为黏滞衰减项,即为图1中曲线的(a)段;等号右边第2项为修正的Hulst散射项。根据文献[13],Hulst散射曲线随 d 增大而增大, K 首先以瑞利模型方式增加并达到极大值,然后逐渐随 d 增加而减小,形成1个单峰。当 d 很大时,式(7)等号右边的第2项约为 $c_v \frac{3}{d}$ 。因此,式(7)能全面解释图1中曲线的(a)段、(b)段和(c)段。

2 Y与c_v线性关系的修正

式(3)说明 Y 和 c_v 成正比关系。图3是由图2改绘而成的 $Y \sim c_v$ 曲线。由图3可知, Y 与 c_v 的关系线不是一条简单的直线,而是一条中间扭曲的S形曲线。

2.1 线性消声模型

平行超声波束照射悬浮液,经水层颗粒吸收散射以后,超声波束被衰减,如图4(a)所示^[14]。设悬浮液的厚度为 L ,分为 n 层,每层厚度为 h , S 为水槽面积。则单位截面积上每层颗粒数为 Nh ; h 距离内,单位截面的消声系数为

$$q = NGh = NG \frac{L}{n} = \frac{3}{16} c_v$$

(8)

线性消声模型中每个水层的消声作用相互独立,因此,每层的消声系数 q 相等。

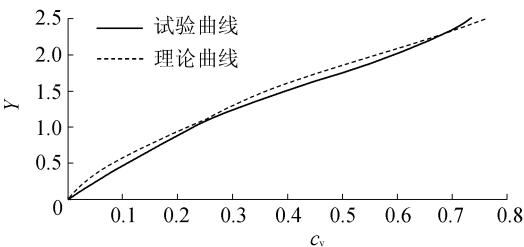


图3 Y与c_v关系曲线

Fig. 3 Relationship between sound density (Y) and concentration (c_v)

$$\ln \frac{I_0}{I_1} = -n \ln(1 - q)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} I_n = I_0 e^{-\frac{3c_v L}{16h}}$$

(9)

式(9)即为指数衰减定律式(1),其只适用于 q 比较低的情况。即只有当颗粒体积分数很低时,每一水层颗粒的消声作用才相互独立。

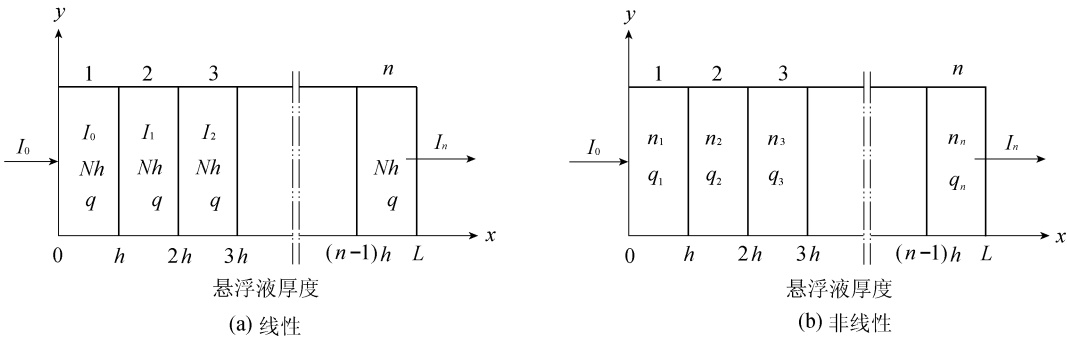


图4 消声模型

Fig. 4 Acoustical model

2.2 非线性消声模型

随着颗粒体积分数增加,前各层的颗粒对后层颗粒的消声作用有遮蔽作用,使后面各层颗粒接受声波束作用的机会少于前面各层^[13],所以各层的有效消声颗粒数不同。如果只考虑2次重叠作用, n_i 为第 i 层的有效粒子数, q_i 为第 i 层的消声系数(图4(b)),则 Y 的表达式为

$$Y = - \sum_{i=1}^n \ln(1 - q_i) = - \sum_{i=1}^n \ln(1 - qQ^{i-1}) = - \ln(1 - q) + qQ^{n-1} + q \frac{1 - Q^{n-2}}{1 - Q}$$

(10)

其中

$$Q = 1 - q^2$$

式(10)简化得

$$Y = - \ln(1 - \beta_1 c_v) + \beta_2 c_v (1 - \beta_3 c_v^2 + \beta_4 c_v^4)$$

(11)

式中 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 为待定系数。

由式(11)知, Y 与 c_v 成多项幂指数关系。根据图 2 中的试验曲线,确定 $\beta_1=0.92, \beta_2=3.8, \beta_3=1.65, \beta_4=1.7$ 。将 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ 的值代入式(11)中,计算不同 c_v 值对应的 Y 值,并以此作为理论值,根据图 2 中的试验曲线列出 c_v 对应的 Y 值作为试验值(表 1、图 3)。

表 1 不同 c_v 值对应的 Y 理论值与试验值

Table 1 Theoretical values and experiment values of Y corresponding to different values of c_v								
c_v	Y		c_v	Y		c_v	Y	
	试验值	理论值		试验值	理论值		试验值	理论值
0.025	0.18	0.11	0.275	1.17	1.21	0.525	1.82	1.92
0.050	0.24	0.23	0.300	1.25	1.3	0.550	1.88	1.98
0.075	0.47	0.35	0.325	1.31	1.39	0.575	1.94	2.03
0.100	0.58	0.47	0.350	1.38	1.47	0.600	2.01	2.08
0.125	0.68	0.58	0.375	1.45	1.55	0.625	2.07	2.13
0.150	0.76	0.69	0.400	1.51	1.62	0.650	2.15	2.18
0.175	0.85	0.80	0.425	1.57	1.69	0.675	2.23	2.24
0.200	0.93	0.91	0.450	1.63	1.75	0.700	2.32	2.30
0.225	1.00	1.01	0.475	1.69	1.81	0.725	2.44	2.37
0.250	1.09	1.11	0.500	1.75	1.87			

从图 3 可以看出, Y 的理论值曲线与试验曲线的变化趋势基本一致,即一次导数、二次导数和极限值都基本一致,表明修正后 Y 的理论公式能较好地模拟试验曲线。

3 结 语

对 Lamb 公式中的散射衰减项进行修正,修正后的 lamb 公式能更好地模拟试验曲线。粒子对声波的散射类似于对光波的散射。提出了有效粒子数的概念,通过对 Y 与 c_v 关系式进行修正,得出 Y 是 c_v 的多项指数函数,且此函数能较好地拟合试验曲线的结论。

参考文献:

[1] 张叔英, 钱炳兴. 高浓度悬浮泥沙的声学观测[J]. 海洋学报, 2003, 25(6):54-60. (ZHANG Shuying, QIAN Binxing. Acoustic observation of thick suspended-sediments[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(6):54-60. (in Chinese))

[2] 薛明华, 苏明旭, 蔡小舒. 超声衰减谱法测量泥沙粒度分布[J]. 泥沙研究, 2007(6):15-18. (XUE Minghua, SU Mingxu, CAI Xiaoshu. Sediment size distribution measurement with ultrasonic spectrum method[J]. Journal of Sediment Research, 2007(6):15-18. (in Chinese))

[3] 方彦军, 唐愁官. 超声衰减法含沙量测试研究[J]. 泥沙研究, 1990(2):1-12. (FANG Yanjun, TANG Maoguan. Ultrasonic attenuation method for measuring sediment concentration [J]. Journal of Sediment Research, 1990(2):1-12. (in Chinese))

[4] 文洪涛, 杨燕明, 刘贞文, 等. 混浊水的声衰减研究进展及应用前景[J]. 海洋通报, 2008, 27(6):88-94. (WEN Hongtao, YANG Yanming, LIU Zhenwen, et al. Recent advance and application prospects of sound attenuation in turbid water[J]. Marine Science Bulletin, 2008, 27(6):88-94. (in Chinese))

[5] 黄建通, 李黎, 李长征. 浑水中超声波传播特性研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(8):43-44. (HUANG Jiantong, LI Li, Li Changzheng. Research on ultrasonic propagation property in Muddy water[J]. Yellow River, 2010, 32(8):43-44. (in Chinese))

[6] 马恒仁, 王宝升, 林俊轩. 模拟黄河水的声衰减测量[J]. 青岛海洋大学学报, 1988, 18(1):30-34. (MA Hengren, WANG Baosheng, LIN Junxuan. Sound attenuation measurement of the simulated water of the yellow river[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1988, 18(1):30-34. (in Chinese))

[7] LAMB J, ANDREAE J H, BIRD R. Absorption and Dispersion of Ultrasonic Waves in Acetic Acid[J]. Nature, 1948,162: 993-994.

[8] FLAMMER G H. The use of ultrasoncs in the measurement of suspended sediment size destribution and concutraturun[D]. Minnesota;Univ Microfilms Inc. , 1963.

[9] 中国科学院山西煤炭化学研究所,山西省水文总站. 超声测沙仪研制报告[R]. 山西:中国科学院山西煤炭化学研究所, 1972.

[10] TERNCE A. Particle size measurement[M]. London;Chapman and Hall, 1981.

[11] van de HULST H C. Light scattering by small particles[M]. New York;Dover Publications, Inc,1981.

[12] 卢永生, 江箴秀, 孙臻. 河流泥沙消光颗分自动分析系统[C]. 第二次河流泥沙国际学术讨论会组织委员会. 第二次河流泥沙国际学术讨论会论文集. 北京:水利电力出版社,1983.

[13] 唐懋官, 舒乃秋. 一种新的超声测沙方法[J]. 武汉水利电力学院学报, 1982(3):115-122. (TANG Maoguan, SHU Naiqiu. A new ultrasonic method of measuring the amount of sand contained in fluid[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1982(3):115-122. (in Chinese))

[14] 郑婴三,卢永生,江箴秀. 多子分散系统的前向消光特性[J]. 水资源保护, 1989(1):5-12. (ZHENG Yingsan, LU Yongsheng, JIANG Zhenxiu. Prior to the extinction characteristics of distributed systems[J]. Water Resources Protection, 1989(1):5-12. (in Chinese))

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63,CN32-1117/TV,ISSN1000-1980,双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,绝大部分为国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得中国高校精品科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版,国内外公开发行,2013 年每期定价 15 元,全年 6 期共计 90 元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。

编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号 《河海大学学报(自然科学版)》编辑部
电话/传真:025-83786343;E-mail:xb@ hhu. edu. cn
http://kkb.hhu.edu.cn/web/indexxb.asp?d_id=53