

浅海声信道建模及其应用研究

董阳泽^{1,2}, 许肖梅¹, 刘平香², 姚蓝²

(1. 厦门大学水声通信与海洋信息技术教育部重点实验室, 厦门 361005; 2. 中国船舶重工集团公司第七二六研究所, 上海 201108)



摘要: 浅海是水声对抗发生的重要区域, 因此对其声信道的研究具有重要意义。采用射线声学理论, 建立了一个多途浅海声信道仿真模型。在水声对抗仿真系统中, 选用基于 ADSP21160 的 Hammerhead PCI 予以实现, 取得了预期的实时效果; 海试验证结果表明, 该模型同样适用于实际情况下浅海海域的声传播损失等参数的折算, 可作为水声对抗器材性能预报及战术使用的参考。

关键词: 浅海声信道; 实用模型; 水声对抗仿真; 对抗器材性能预报

中图分类号: TP391.9; U666.7 **文献标识码:** B **文章编号:** 1004-731X (2010) 01-0047-04

Study on Modeling of Shallow Water Acoustic Channel and Its Applications

DONG Yang-ze^{1,2}, XU Xiao-mei¹, LIU Ping-xiang², YAO Lan²

(1. Key Laboratory of Underwater Acoustic Communication and Oceanic Information Technology, Ministry of Education (Xiamen University), Xiamen 361005, China; 2. Shanghai Marine Electronic Equipment Research Institute, Shanghai 201108, China)

Abstract: Underwater acoustic warfare will happen mainly in shallow water region. So study on its acoustic channel is an important task. Based on the Ray Acoustics theory, a simulation model of multi-path shallow water acoustic channel was established. Used in underwater acoustic warfare simulation system with ADSP21160-based Hammerhead PCI, the prospected real-time results were achieved. When it was used in shallow sea trial for parameters calculation such as transmission loss, reasonable results were gotten. The facts imply that the proposed model can be used in performance prediction and tactical reference of acoustic countermeasures.

Key words: shallow water acoustic channel; practical model; underwater acoustic warfare simulation; performance prediction of countermeasures

引言

和深海相比, 浅海的水声环境更为复杂。从水声信号传输和获取的角度看, 浅海并不是一个理想的环境。然而, 考虑到实际的情况, 未来的水声对抗最可能发生的区域应该是近海, 就是浅海。因此, 必须对浅海的相关知识进行深入的研究。其中, 浅海声信道就是其中一个重要的方面。

囿于实际海上试验的高昂的费用及众多的不确定因素, 首先在实验室对欲研究的实际问题进行建模和仿真, 是当今海洋科学研究中的一条重要途径。

仿真海洋中声传播的最早尝试是在第二次世界大战期间, 为解决声纳性能预报中的实际问题, 支持反潜战而促成的。这些早期的模型, 使用了由波动方程导出的声线轨迹技术, 用于描绘声线, 确定传输环境所提供的主要传播路径, 然后利用这些传播路径预报相应的声纳检测区。这一方法构成了现在称为射线声学理论的技术先导^[1]。

本文即在射线声学理论的基础上, 建立了一个浅海水声信道的仿真模型。该模型在水声对抗仿真系统和实际海试中都发挥了应有的作用。

收稿日期: 2007-12-18

修回日期: 2008-05-16

作者简介: 董阳泽(1973-), 男, 山西长治人, 博士后, 高工, 研究方向为水声对抗系统及系统仿真等; 许肖梅(1960-), 女, 福建莆田人, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水声通信与水声信号处理等; 刘平香(1965-), 男, 江苏南通人, 研究员, 研究方向为水声对抗系统等; 姚蓝(1937-), 男, 上海人, 教授, 研究方向为水声对抗系统等。

1 浅海声信道理论及模型

1.1 浅海声信道的特点及理论模型

从通信论的观点, 海洋可以看作是一个时变、空变的随机信道。它对声信号在其中传播的影响主要表现在两个方面: 一是海洋中声传播的方式和能量的平均传播损失; 二是对信号所进行的变换, 确定性的变换导致接收波形的畸变, 随机性的变换导致信息损失^[2]。

为研究声波在海洋中传播的相关问题, 人们建立了许多理论模型和算法, 其中包括射线声学(Ray Trace Theory)方法、简正波算法(Normal Mode)及抛物方程(Parabolic Equation)近似方法等^[3]。射线声学是声波传播问题中发展最早的方法, 它具有数学形式简单、物理意义清晰的特点; 简正波方法是分析分层海水中声传播规律的一种常用方法, 其特点是计算精确, 物理图象也比较清晰; 抛物近似是 1970 年代初由 Tappert 等人引入, 近年来在声场计算中占据了很重要的位置, 广泛用于复杂环境下的声传播求解。

1.2 射线声学的相关研究

射线声学方法是借鉴射线光学的研究成果进行的类比研究。与声的波动方法相比较, 具有直观和简便的优点。射线声学的基本假定是: 声能沿着一定的方向线传递, 声能传递的方向线就叫做声线, 声线与等相位面(即波阵面)相互垂直^[2]。

早在 1960-70 年代, 国外就对射线声学进行了深入的研

究。比如, Hilliard Robert C.对声信道中的射线路径进行了分析^[4]; Blum 和 Cohen 就对包括射线声学在内的水声信道中的声传播进行了研究^[5]。

近年来, 国内在此方面也有了较多的研究和应用。哈尔滨工程大学^[6]、西北工业大学^[7]和厦门大学^[8]等都在此领域做出了一定的成绩。

1.3 射线声学模型

在射线声学中, 假设声波的能量根据介质性质的空间变化沿一定的路径传播, 在声场中各点的声压 $p(\vec{r}, t)$ 可写成:

$$p(\vec{r}, t) = A(\vec{r}) \cdot e^{j[\omega t - k_0 L(\vec{r})]} \quad (1)$$

式中, A — 声压的幅值, ω — 声波的频率, k_0 — 某标准点处的波数, L — 声波的声程。式中的 $A(\vec{r})$ 、 $L(\vec{r})$ 都是实数。波数 $k_0 = \omega/c_0$, 其中, c_0 为某标准点处的声速。

考虑声波的波动方程: $\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = 0$ (2)

将式(1)代入式(2), 分离实部和虚部, 整理可依次得到:

$$\frac{\nabla^2 A}{A} - k_0^2 \nabla L \cdot \nabla L + k^2 = 0 \quad (3)$$

$$\nabla^2 L + \frac{2}{A} \nabla A \cdot \nabla L = 0 \quad (4)$$

当 $\frac{\nabla^2 A}{A} \ll k^2$ 时, 式(3)可化成: $(\nabla L)^2 = \left(\frac{c_0}{c}\right)^2 = n^2$ (5)

式(4)是射线声学的第一基本方程—声程方程, 它决定声线的走向(声线轨迹); 式(5)是射线声学的第二基本方程—强度方程, 它确定了声线的强弱。声程方程决定了声线的传播轨迹; 强度方程决定了沿声线束管能量的传输情况。

射线声学对声场进行分析, 主要有两方面的工作: 一是寻找对声场有贡献的声线(本征声线); 二是确定每条声线对声场贡献的大小并进行声场的叠加合成。

2 基于射线声学的浅海声信道模型

基于射线声学理论, 下面具体描述浅海声信道模型的建立过程。

2.1 浅海声信道的简化假设

图1给出了浅海声信道的简化物理模型。

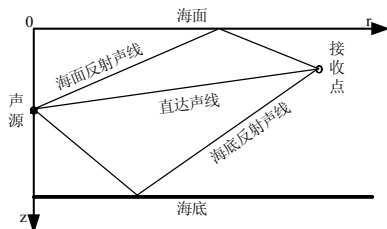


图1 浅海多途声信道简化模型

它表示从声源到接收点, 存在着不止一条路径。此即浅海中对声波传播有着最重要影响的多途现象。图中给出了比较典型的三条声线: 直达声线、海面反射声线和海底反射声

线。声波从声源发出后, 沿不同的路径到达接收点, 在接收点处的信号就是这些信号的叠加。

本征声线是指从声源发出、通过接收点的对声场有重要贡献的声线的集合。多途信道中的声场强度及接收波形由本征声线的特征参数决定。本征声线的特征参数决定了多途信道的系统函数。

本文中, 浅海声信道仿真数学模型的简化条件如下:

- 声速不随水平方向变化, 仅是海水深度的函数
- 海面、海底界面假设为平整的界面
- 声源和接收点的位置静止不变
- 整个海洋信道看作是一个网络系统
- 声场由本征声线决定

2.2 浅海声信道仿真模型的结构和特点

根据上述简化条件, 即可建立多途信道的数学模型。图2给出了仿真模型网络结构图。

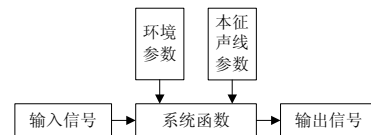


图2 多途信道网络模型结构图

该模型将整个浅海声信道看成是一个网络, 环境参数和本征声线的参数决定信道的系统函数。输入的声信号经过信道系统函数的变换成为输出信号。

2.3 声场参数的计算

2.3.1 声线传播轨迹和时间

在分层介质条件下, 对于给定声速度分布函数 $c(z)$, 若点声源位于 (r_0, z_0) 处, 声速度为 c_0 , 以初始掠射角为 θ_0 自声源发出的声线上的任意点 (r, z) 的声线传播轨迹和传播时间分别为:

$$r = r_0 + \int_{z_0}^z \frac{\cos \theta_0}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \theta_0}} dz \quad (6)$$

$$t = \frac{1}{c_0} \cdot \int_{z_0}^z \frac{n^2(z)}{\sqrt{n^2(z) - \cos^2 \theta_0}} dz \quad (7)$$

其中, $n(z) = c_0/c(z)$ 为折射率。

2.3.2 声强和声压

声源和接收点之间的几何传播损失可由声源处相邻的两条声线间的声波束管的截面积计算, 如图3所示。

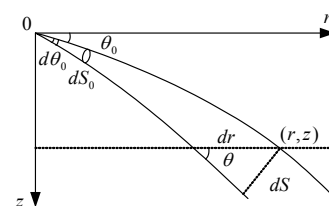


图3 声能沿射线管束的传播

接收点处的声强 I 和声压 A 为:

$$I = \frac{I_0 \cdot dS_0}{dS} = \frac{I_0 \cdot \cos\theta \cdot d\theta_0}{r \cdot \sin\theta \cdot dr}, \quad A = \sqrt{I} \quad (8)$$

若考虑由海面、海底引入的损失、声波的几何传播损失和海水介质吸收引入的损失, 接收点处的声强为:

$$I = \frac{I_0 \cdot \cos\theta \cdot d\theta_0}{r \cdot \sin\theta \cdot dr} \cdot \left| \prod_{i=1}^{N_s} V_{si}(\theta_{si}) \right|^2 \cdot \left| \prod_{i=1}^{N_b} V_{bi}(\theta_{bi}) \right|^2 \cdot e^{-2\alpha S \cdot 10^{-3}/8.86} \quad (9)$$

式中, N_s — 海面反射次数; V_{si} — 海面第 i 次的反射系数; N_b — 海面第 i 次反射时声线在海面处的掠射角; N_b — 海底的反射次数; V_{bi} — 第 i 次海底的反射系数; θ_{bi} — 第 i 次海底反射时声线在海面处的掠射角; α — 海水吸收系数; S — 声线到达接收点传播的声程。

在低频段, 海水介质的吸收系数 α 可用经验公式^[9](其中, f 单位为 kHz)。

$$\alpha(\text{dB/km}) = \frac{0.102f^2}{1+f^2} + \frac{40.7f^2}{4100+f^2} + 3.06 \times 10^{-4} f^2 \quad (10)$$

2.3.3 声波的传播损失

若离声源 1 米处的发射信号为 $z(t)$ 、接收信号为 $s(t)$, 则声波的传播损失为:

$$TL = 10 \lg \frac{\frac{1}{T} \int_0^T z^2(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt} = 10 \lg \frac{\frac{1}{T} \int_0^T z^2(t) dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{i=1}^N A_i z(t - \tau_i) \right]^2 dt} \quad (11)$$

式中, T 是发射信号的时间宽度。

2.3.4 信道冲激响应函数

通过计算从声源到接收点处的本征声线的特征声线参数, 即可确定多途信道的冲激响应函数:

$$h(t) = \sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_i) \quad (12)$$

式中, $A_i = (-1)^{N_s} \cdot \frac{\sqrt{I_i}}{\sqrt{I_{\max}}}$, $\tau_i = t_i - t_{\min}$ 。其中, N — 对声场有贡献的声线的总数; A_i — 声波沿第 i 条传播途径到达接收点的本征声线的声压归一化幅度; I_i — 声波沿第 i 条传播途径到达接收点的本征声线的声压幅度; I_{\max} — 本征声线中的声压幅度的最大值; τ_i — 声波沿第 τ_i 条传播途径到达接收点的本征声线的相对时延; t_i — 声波沿第 i 条传播途径到达接收点的本征声线的时延; t_{\min} — 本征声线中时延的最小值。

若发射信号为 $s(t)$, 则接收信号 $z(t)$ 为:

$$z(t) = s(t) * h(t) = s(t) * \left[\sum_{i=1}^N A_i \delta(t - \tau_i) \right] = \sum_{i=1}^N A_i s(t - \tau_i) \quad (13)$$

3 浅海声信道模型的应用

3.1 在水声对抗仿真系统中的实现

3.1.1 水声对抗仿真系统简介^[10]

水声对抗仿真系统采用 HLA 结构体系, 是一个分布交

互仿真。包含以下基本要素的模拟:

- **攻击方:** 潜艇、鱼雷;
- **防御方:** 水面舰、鱼雷报警声纳、水声对抗器材;
- **公共方:** 导演台、海洋声信道、标准信号发生器、仿真数据库、视景仿真

仿真的水声对抗过程以浅海为交战环境, 各实体在其中通过声信息的交互进行对抗。

图 4 给出了其简要的框图。

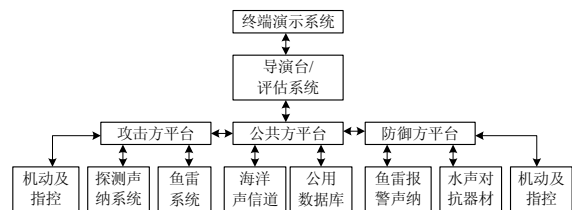


图 4 水声对抗仿真系统简图

3.1.2 水声对抗仿真系统中的声信道仿真平台

水声对抗仿真系统中, 声信道仿真模块包括主程序、网络通信、信道解算、信号处理和信息显示等 5 个子模块, 结构如图 5 所示。

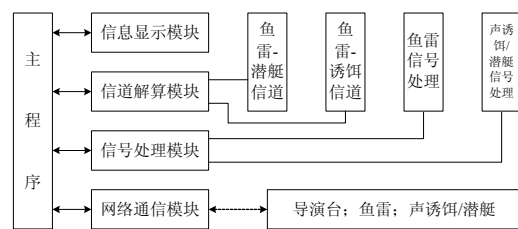


图 5 仿真系统中声信道仿真平台

除了自身所必需的信息显示、信道解算、信号处理模块外, 还通过网络通信模块与仿真系统中其他模块如导演台、鱼雷、声诱饵等仿真平台进行数据交互。

图 6 给出了仿真系统中声信道仿真模块的运行流程。

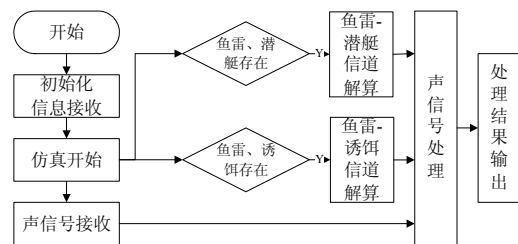


图 6 浅海声信道模块仿真流程

3.1.3 信道仿真中 DSP 的应用

水声对抗仿真中, 声信道解算的运算量很大, 并且仿真系统要求其在在一个仿真节拍(200ms)内完成信道冲激响应的求解以及输入信号的卷积运算。因此, 为达到信号处理的实时运算, 仿真系统引入了基于 ADSP 21160 的 Hammerhead PCI 数字信号处理板进行声信息的处理^[11]。

根据需求分析的结果, 写出算法的 C 程序并在 PC 机平台上调试通过。然后将程序移植到 DSP 程序编译环境, 经过和 DSP 的联调正常后生成 DSP 可执行文件(*.dxe)。

在此过程中, 一个需要特别注意的问题是 DSP 中地址分配必须清晰、合理。

表 1 列出了声信道仿真模块 DSP 程序中有关声诱饵回波声信息变量地址分配。其他信息类此。

表 1 DSP 空间分配例

变量名	分配地址	长度 (Bytes)	说明
DataLength	0x800027	1	诱饵回波信号数据长度
SourceLevel	0x800028	1	诱饵回波信号声源级
SamplingRate	0x892cd1	1	诱饵回波信号采样率
Waveform [240000]	0x892cd2 -0x8b0191	240000	诱饵回波信号波形数据

3.1.4 声信道仿真模块运行实例

通过上述处理, 鱼雷和声诱饵/潜艇需要交互的信息可以通过声信道的实时解算。

图 7 给出了水声对抗仿真系统运行某时刻的声速梯度以及鱼雷-声诱饵信道的冲激响应。

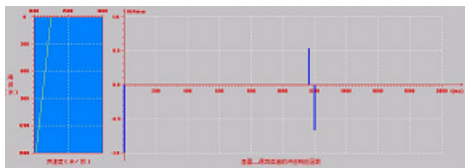


图 7 声信道仿真模块运行实例

有了冲激响应函数, 即可由此和输入的声信号进行卷积, 给出所需要的声信息, 从而最终完成仿真过程中的信号解算。

3.2 在实际中的应用

声信道仿真模型除了应用在水声对抗仿真系统中外, 还可以在实际上海上试验过程中进行声传播损失的折算, 以检查受试设备的设计指标和使用方法等。

为讨论浅海声信道对水声对抗器材作用的影响, 我们实际采集了我国南海某浅海海域的一组水文数据。海底为细沙底。图 8 为某时刻的声速垂直分布。

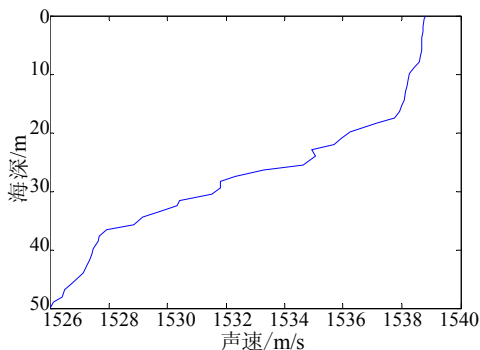


图 8 南海某浅海海域某时刻声速分布

结合某低频干扰器(布放深度 20m, 宽带干扰频带为 1~10kHz)与 30m 深度上的潜艇声纳进行对抗的过程来探讨以下本文提出的浅海声信道传播模型。

图 9 给出了三种传播损失曲线。

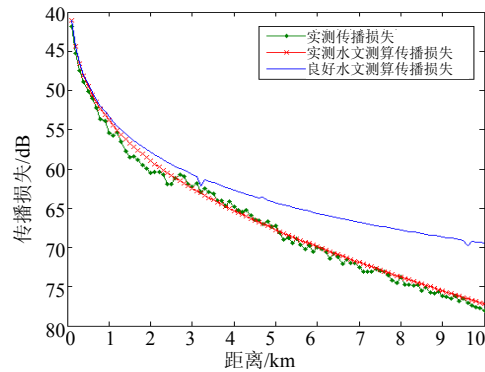


图 9 仿真与实测浅海声信道传播损失比较

其中, 包括利用本文模型对良好水文条件下(等声速分布, 取 $c = 1530m/s$)和实测声速梯度的传播损失进行了测算; 实测的信道传播衰减同时给出。

从中可以看出:

第一, 利用本文模型对传播衰减的测算与实测基本吻合, 证明该模型适合此海区应用;

第二, 由图可以看出, 在不同水文条件下, 传播衰减随距离的增加相差也越来越大。比如, 当低频干扰器(142dB@2kHz)与敌潜艇声纳相距 10km 时, 由于实际传播损失比良好的水文条件增加 7.8dB 左右, 这将大大降低低频干扰器对敌潜艇声纳的干扰效果。

从此例可以看出, 由于海洋声信道的多变性, 在设计和使用时, 必须考虑浅海声信道的各种影响。在设计时, 为了考虑声信道的传播损失, 应适当加大干扰器的声源级。在使用时, 为了更好地发挥干扰器的作用, 应考虑干扰器的布放深度等, 以尽量减少声信道的传播衰减影响。

4 结论

本文研究了浅海声信道仿真模型的建立及其应用。

利用 Hammerhead PCI 高速 DSP 信号处理板, 实现了水声对抗仿真系统中声信道仿真模块解算的实时性。通过参与海上试验, 证明该仿真模型也可成功应用于海试中声传播损失的折算。

参考文献:

- [1] 许肖梅. 浅海水声数据传输技术研究[D]. 厦门: 厦门大学博士学位论文, 2002.
- [2] 惠俊英. 水下声信道[M]. 北京: 国防工业出版社, 1992.
- [3] 范敏毅. 水下声信道仿真与应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学博士学位论文, 2000.
- [4] Hilliard Robert C. An Analytical Study of Sound Channel Ray Paths (ADA0637240) [R]. Washington, USA: Defence Technical Information Center, 1962.

(下转第 55 页)

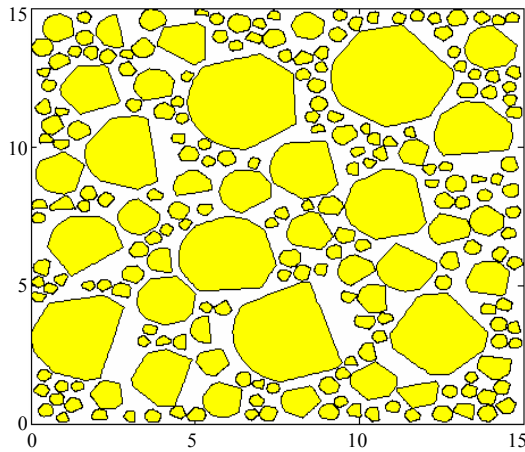


图 5 碎石骨料

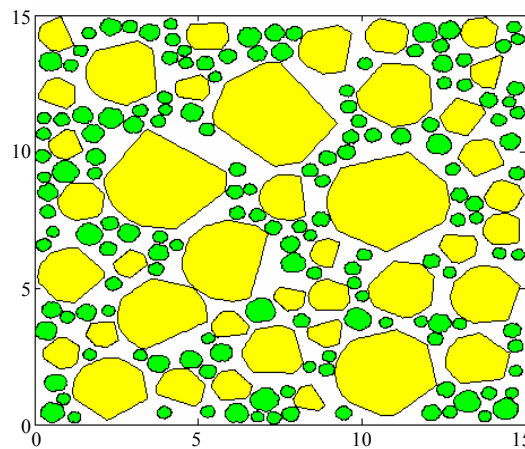


图 6 碎石、卵石混合骨料

4 结论

以上的仿真算法, 是对以往文献所提出的算法作了改进, 抓住了颗粒的参数方程描述是后继问题研究的关键, 为进一步作细观力学研究, 打下了基础。与以往成果比较, 总体看来有如下优点: (1) 每一增强颗粒都有确定的形式较统一的参数方程, 每一颗粒形如(4)或(6)式方程的各个系数以及(覆盖)中心的坐标, 一旦随机生成之后, 就是唯一确定的, 可以记录下来, 重复实现; (2) 可以生成比(椭圆、凸)

多边形(规则形状)更加贴近真实的(不规则)颗粒形状, 但又有与(椭圆)参数方程等价的参数方程, 只不过形式复杂一点。因此, 从理论上来说, 该方法模拟的不规则颗粒/孔洞随机分布区域与椭圆颗粒/孔洞随机分布区域是等价的, 可以仿照[1]、[9]等文献的办法进行有限元网格剖分、增加界面层等, 进而进行细观力学的分析; (3) 若使用带优化的算法, 可以很精确的控制生成试件的级配、配合比、总含量等等, 但生成速度很慢; (4) 该算法可以推广到三维。

当然, 基于(椭圆)收缩而生成的不规则颗粒/孔洞随机分布区域, 它的总含量不会大于椭圆颗粒/孔洞随机分布区域的总含量, 也就是说, 周围规定影响区域为圆, 有时过大, 所以, 生成总含量 70%以上粗颗粒时, 既是可行, 也很耗时, 特别是带优化的算法, 这是需要改进的。

参考文献:

- [1] 李友云, 崔俊芝. 具有大量椭圆颗粒/孔洞随机分布区域的计算机模拟及其改进三角形自动网格生成算法[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 540-545.
- [2] Wang Z M, Kwan A K H, Chan H C. Mesoscopic Study of Concrete I: Generation of Random Aggregate Structure and Finite Element Mesh [J]. Computers and Structures, International, Pergamon (S0045-7949), 1999, 70(05): 533-54.
- [3] 高政国, 刘光廷. 二维混凝土随机骨料模型研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(5): 710-714.
- [4] 刘光廷, 高政国. 三维凸型混凝土骨料随机投放算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(8): 1120-1123.
- [5] 李运成, 马怀发, 陈厚群, 胡晓. 混凝土随机骨料模型可视化方法 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(4): 258-264.
- [6] 马怀发, 聿书贞, 陈厚群. 一种混凝土随机凸多边形骨料模型生成方法[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(3): 196-201.
- [7] 李运成, 马怀发, 陈厚群, 胡晓. 混凝土随机凸多面体骨料模型生成及细观有限元剖分[J]. 水科学, 2006, (5): 588-592.
- [8] 孙立国, 杜成斌, 戴春霞. 大体积混凝土随机骨料数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 291-295.
- [9] 王宗敏, 邱志章. 混凝土细观随机骨料结构与有限元网格剖分[J]. 计算力学学报, 2005, 22(6): 728-732.
- [10] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(2): 124-130.

(上接第 50 页)

- [5] Blum, Cohen. Acoustic Wave Propagation in an Underwater Sound Channel: Qualitative Theory [J]. IMA Journal of Applied Mathematics (S0272-4960), 1971, 8(2): 186-198.
- [6] 范敏毅, 郭玉红, 惠俊英. 界面参数估计及传播损失的射线声学预报[J]. 声学学报, 2000, 26(6): 528-531.
- [7] 周延. 水声通信信道射线模型的研究[D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2003.

- [8] 魏莉, 许芳, 孙海信. 水声信道的研究与仿真[J]. 声学技术, 2008, 27(1): 25-29.
- [9] Robert J Urlick. Principles of Underwater Sound (3rd edition) [M]. Los Altos, USA: Peninsula Publishing House, 1983.
- [10] 董阳泽. 水声对抗和水声网络仿真研究[D]. 上海: 上海交通大学博士后工作研究报告, 2005.
- [11] 董阳泽, 陈琨, 刘平香. 基于 ADSP21160 的 Hammerhead PCI 在声诱饵仿真系统中的应用[J]. 电子产品世界, 2002(5B): 47-49/55.