

第1章 海洋声学基础

教师：朱江 博士

时间：2018年07月11日

邮箱：jiangzhu16@zju.edu.cn

地点：智海楼412

1.1引言

- 声学历史
 - a. 单弦琴（毕达哥拉斯）
 - b. 声速（麦森, Mersenne, 声速230英尺/秒, 速度? 错误的推断（声音在空气和水中的速度比较））
 - c. 声学一开始就是用波动理论表述（光学呢?）, 描述声学的方法?
 - d. 波动方程（达朗贝尔）, 分离变量法
 - e. 声波是海洋中远距离传递信号的唯一切实可行的方式（Colladen曰）
- 海洋声学的实验研究（船、海上平台、发射器、接收阵、传感器）
- 海洋环境（重要参数：声折射率、海面 and 海底（边界条件））

1.2海洋声学环境

- 海洋环境（波导，海面 and 海底限制）
- 影响声速的因素：
 - a. 密度（静压力（深度）、盐度、温度）
 - b. 可压缩性
- a的公式（温度：摄氏度，盐度：千分数表示，深度单位：米）

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z$$

1.2 海洋声学环境

- 海洋环境典型声速剖面图
 - a. 混合层（风力搅拌）等温
 - b. 温跃层（温度随深度降低）
 - c. 深海等温层（等温）
- 深海声道轴（deep sound channel axis）
- 极地海域特征
- 中尺度现象（声速时变）
 - a. 时间尺度（几个月）
 - b. 空间尺度（几百公里）

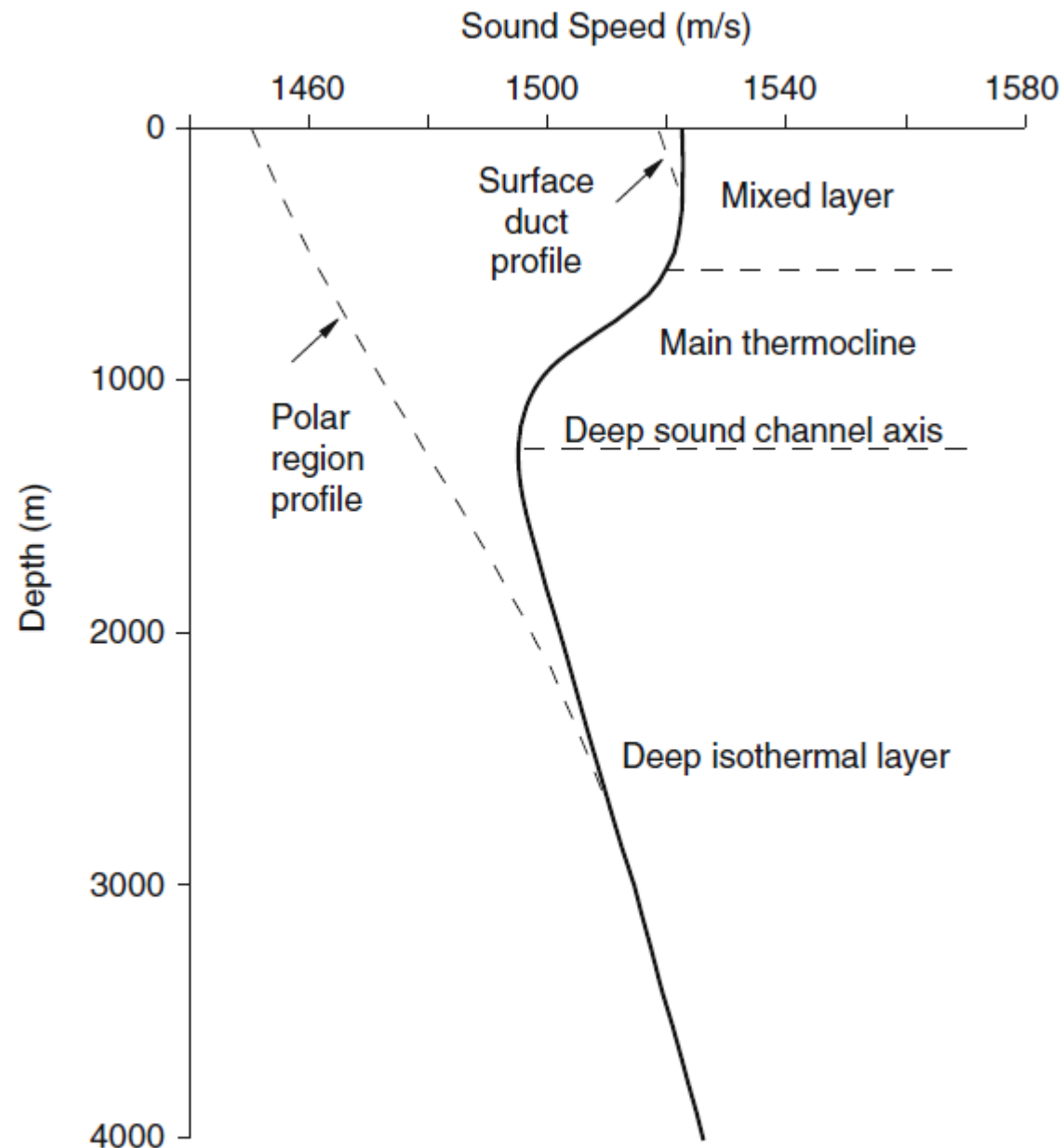


Fig. 1.1 Generic sound-speed profiles

1.3 一些声学预备知识

1.3.1 声源与接收器

- 声源与接收器（为什么要有声源与接收器）



- 换能器
 - 概念
 - 压电换能器和磁致伸缩换能器概念（声能（机械能）转换成电能）
 - 电动方式（声压 $\longrightarrow$ 线圈切割磁场 $\longrightarrow$ 电能）
- 参量声源和参量接收器

1.3.2 声强与分贝

- 分贝的定义（式中 I 表示声强，即单位面积上的声功率）：

$$10\log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

- 内涵

- a. 声强计算公式： $I = p^2 / (\rho c)$ ，其中 p 表示均方根声压， ρ 和 c 表示介质密度和声速
- b. 相对的概念，必须要有参考声强
- c. 参考的均方根声压为1微帕（ $1\mu\text{Pa}$ ），注意声压计算分贝前面的系数？

1.3.2谱级

- 谱级的引入（宽带信号，需描述某一频率范围的强度）
 - a. 参考带宽1Hz，参考声压 $1\mu\text{Pa}$ ，表示为 $\text{dB} // \mu\text{Pa}^2 / \text{Hz}$
 - b. 引入参考距离，则为 $\text{dB} // \mu\text{Pa}^2 / \text{Hz} @ 1\text{m}$
 - c. 谱幅度级的单位为 $\text{dB} // \mu\text{Pa} / \sqrt{\text{Hz}}$

1.3.3 传播损失 (Transmission loss, TL)

- 定义：声场中某一点的声强 $I(r, z)$ 与距声源1m处的声强 I_0 之比：

$$TL = -10 \log \frac{I(r, z)}{I_0} = -20 \log \frac{|p(r, z)|}{|p_0|} \quad \text{dB re 1m}$$

- 传播损失 = 几何扩展损失 + 衰减损失

a. 几何扩展损失

a. 球面扩展损失

b. 柱面扩展损失

c. 思考：有上下边界的波导，点源在近场是（ ）扩展，较远

d. 例子：点源传播100km，最初1km球面扩展，后期柱面扩展

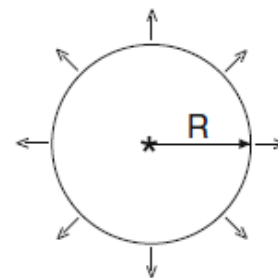
b. 衰减损失

a. 体积衰减

b. 海底反射损失

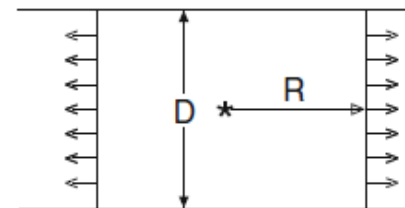
c. 海面、海底和体积散射损失

a Spherical spreading



$$I \propto \frac{1}{4\pi R^2}$$

b Cylindrical spreading



$$I \propto \frac{1}{2\pi R D}$$

1.4海洋中的声传播

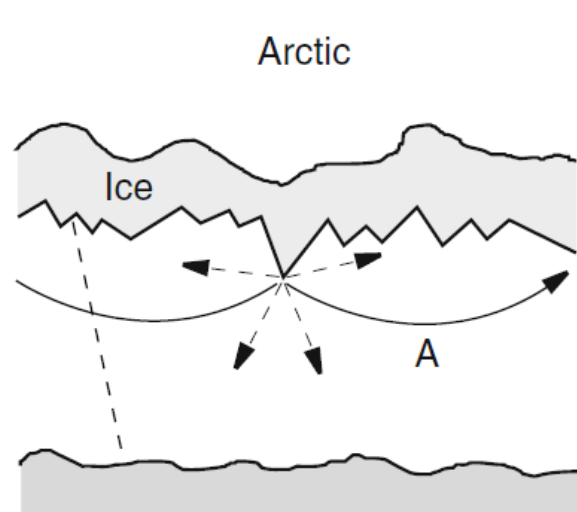
1.4.1特征传播路径

- 声传播的路径可由斯涅耳定律描述（ θ 是相对于水平线的射线角）

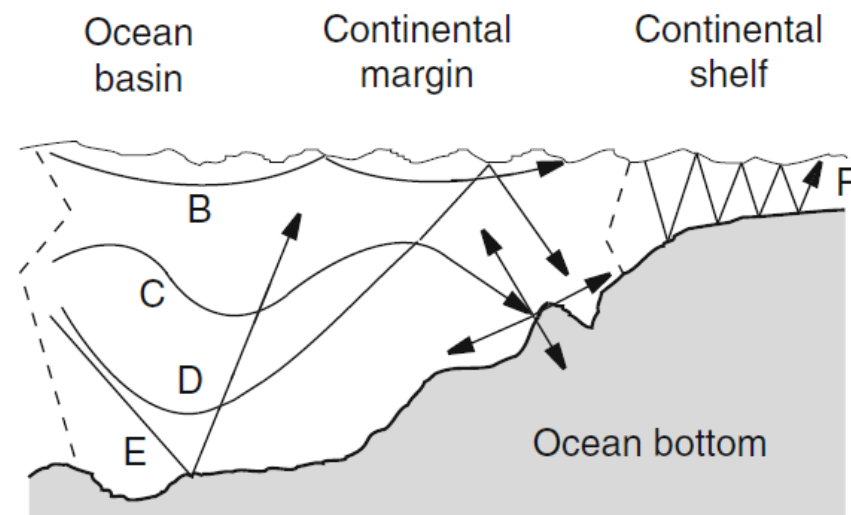
$$\frac{\cos \theta}{c} = \text{const} \quad (\text{声波像低声速区弯曲})$$

- 各种声传播路径示意图

a) C路径，折射-折射
路径，DSC，损耗最小



- A. Arctic
- B. Surface duct
- C. Deep sound channel



- D. Convergence zone
- E. Bottom bounce
- F. Shallow water

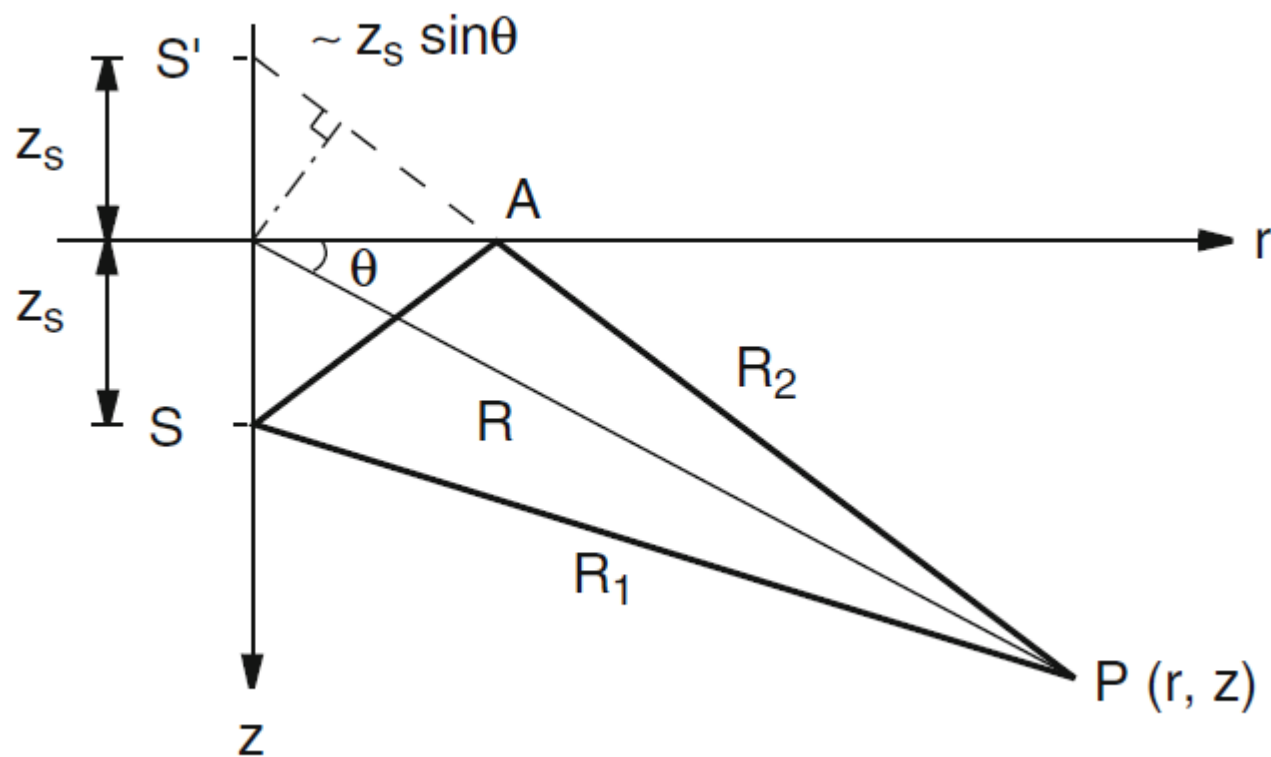
1.4.2深海

- 深海传播的主要特征：存在使声线向上折射的声速剖面（不要与海底作用），减少海底反射损失，即折射-折射和折射-海面反射路径（深度超过2000米都是典型的深海环境）
- 近场洛埃镜图案（Lyod –Mirror Pattern）

1.4.2 深海

- 近场洛埃镜图案 (Lyod – Mirror Pattern)

$$p(r, z) = -\frac{2i}{R} \sin(kz_z \sin \theta) e^{ikR}$$



1.4.2 深海

- 近场洛埃镜图案 (Lyod –Mirror Pattern)

$$p(r, z) = -\frac{2i}{R} \sin(kz_z \sin \theta) e^{ikR}$$

$$|p|_{\max} = \frac{2}{R} \quad \text{for} \quad \sin \theta = (2m - 1) \frac{\pi}{2kz_s}, \quad m = 1, 2, \dots$$

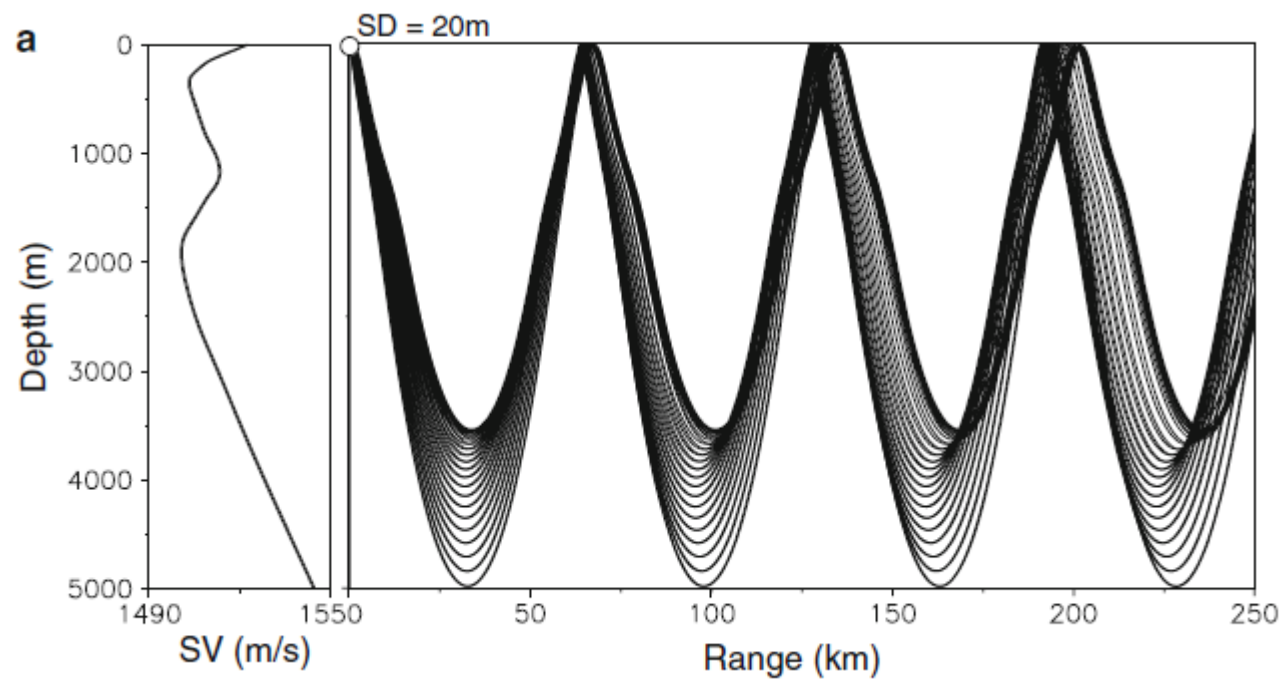
$$|p|_{\min} = 0 \quad \text{for} \quad \sin \theta = (m - 1) \frac{\pi}{kz_s}, \quad m = 1, 2, \dots$$

$$(2M - 1) \frac{\pi}{2kz_s} \leq 1$$

$$M = \text{int} \left\{ \frac{2z_s}{\lambda} + 0.5 \right\}$$

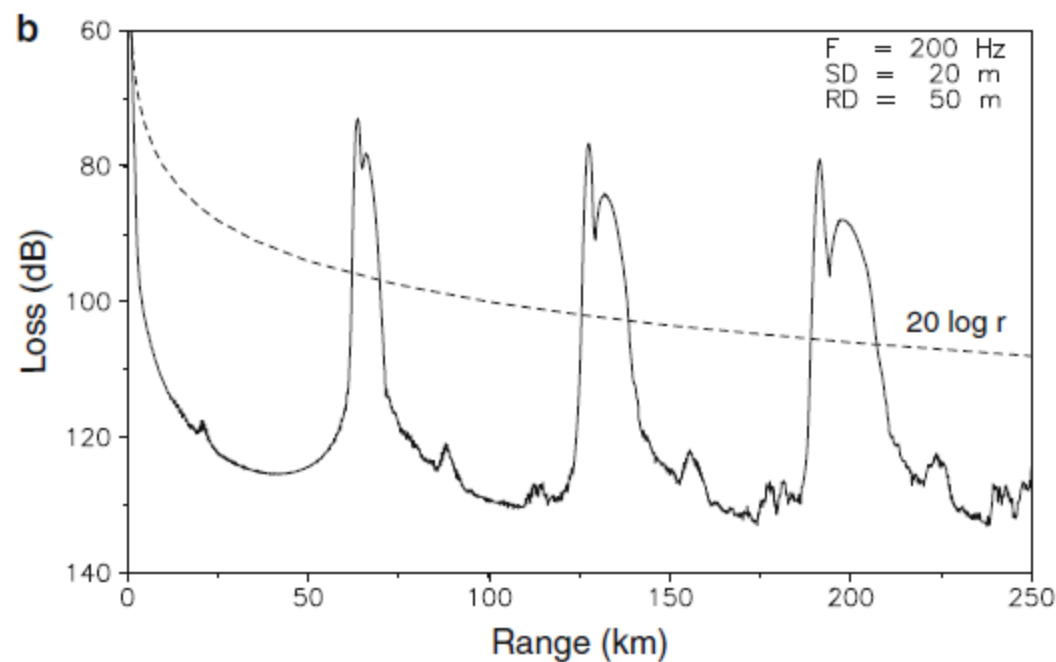
1.4.2 会聚区传播

- 会聚区距离



1.4.2 会聚区传播

- 会聚区距离可以解析计算得到（声呐使用的重要参数）
- 会聚区存在的条件
 - a. 声源靠近海面，产生平行声束
 - b. 声源的位置保证声速随深度增加而减小
 - c. 海底声速大于源位置的声速



1.4.2其他传播类型

- 深海声道传播
- 海面波导传播（水深，海面波导深度100米量级）
- 北冰洋声传播

1.4.3 浅海（水深小于200m）

- 海底必须反射才能远程传播，包括
 - a. 折射-海底反射
 - b. 海面反射-海底反射

1.5体积衰减

- 1.5.1平面波衰减
- 1.5.2海水中的衰减

1.5.1 平面波衰减

- 自由空间中平面波的衰减系数：

$$\exp(ikx - \alpha x) \equiv \exp [ikx(1 + i\delta)],$$

- 传输损耗 (α' 的单位为 dB/m)：

$$\text{Loss} \equiv -20 \log \frac{A}{A_0} \simeq 8.686 \alpha x \implies \alpha' \simeq 8.686 \alpha,$$

1.5.2海水中的衰减

- 海水衰减系数随频率的变化：

$$\alpha' \simeq 3.3 \times 10^{-3} + \frac{0.11f^2}{1 + f^2} + \frac{44f^2}{4100 + f^2} + 3.0 \times 10^{-4} f^2 \quad (\text{dB/km})$$

- 上式表明低频衰减小
- 尽管衰减随频率升高而增大，但仍然比电磁波衰减小很多

1.6海底损失

- 海底的结构
 - a. 常常建模为液体，从而声波必须为压缩波
 - b. 海洋基底，或基底上没有沉积物覆盖，海底介质模拟成弹性体，有损传播
- 地声模型
 - a. 需要已知的数据很多
 - b. 即使声传播主要受海底损耗控制，预报仍可能是相当准确的

1.6海底损失

- 反射系数
 - a. 均匀液体半空间
 - b. 固体半空间
 - c. 分层的液体半空间

1.6.1 液体-液体界面

- 声压形式：

$$p_i = \exp[ik_1(x \cos \theta_1 + z \sin \theta_1)], \quad k_1 \equiv \omega/c_1,$$

$$p_r = \mathcal{R} \exp[ik_1(x \cos \theta_1 - z \sin \theta_1)],$$

$$p_t = \mathcal{T} \exp[ik_2(x \cos \theta_2 + z \sin \theta_2)], \quad k_2 \equiv \omega/c_2.$$

- 边界条件（分界面上）：

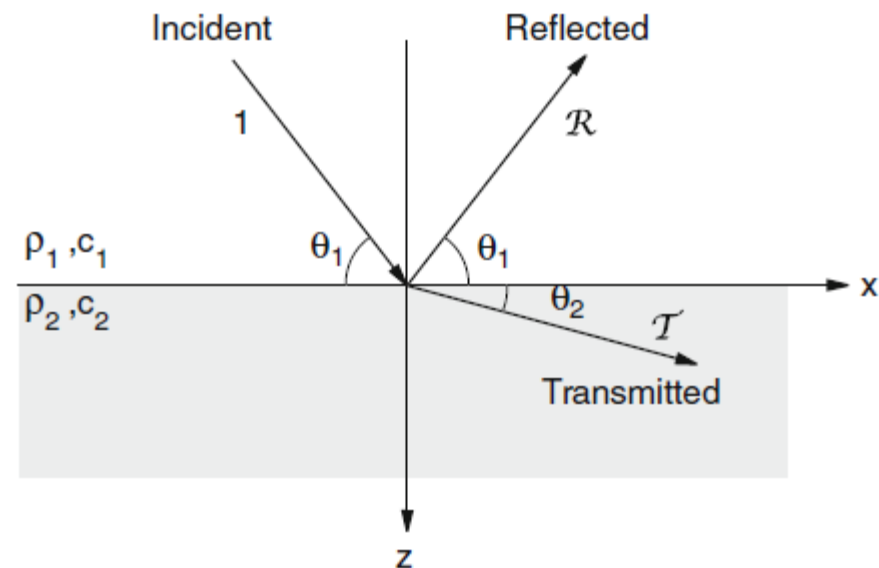
- a. 声压连续（净外力为零）

- b. 垂直方向上的质点速度连续（流体保持接触）

$$p_1 = p_i + p_r$$

$$p_2 = p_t,$$

$$p_1 = p_2, \quad \frac{1}{i\omega\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial z} = \frac{1}{i\omega\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial z}$$



1.6.1 液体-液体界面

- 结论：

$$k_1 \cos \theta_1 = k_2 \cos \theta_2$$

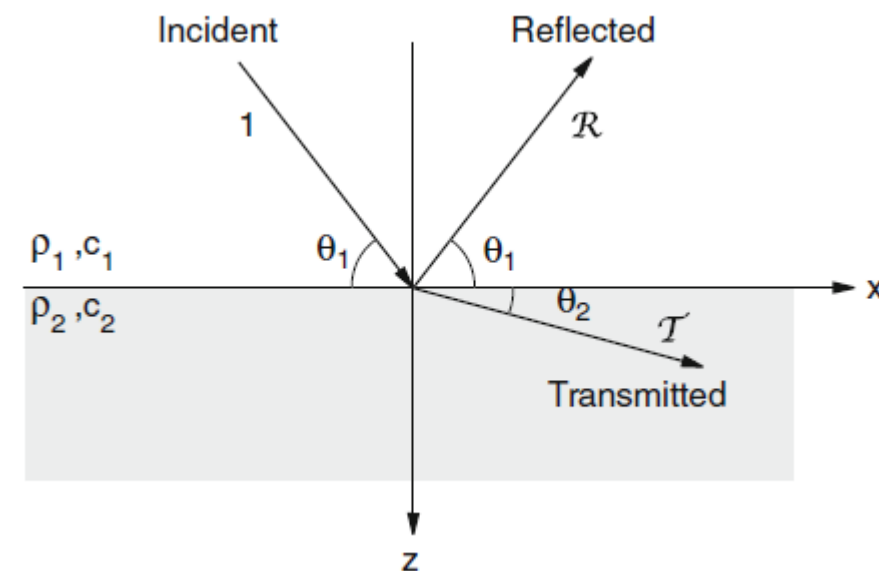
$$\mathcal{R} = \frac{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 - \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin \theta_1},$$

$$\mathcal{T} = \frac{2 \rho_2 c_2 / \sin \theta_2}{\rho_2 c_2 / \sin \theta_2 + \rho_1 c_1 / \sin \theta_1}.$$

$$p_1 = p_i + p_r$$

$$p_2 = p_t,$$

$$p_1 = p_2, \quad \frac{1}{i\omega\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial z} = \frac{1}{i\omega\rho_2} \frac{\partial p_2}{\partial z}$$



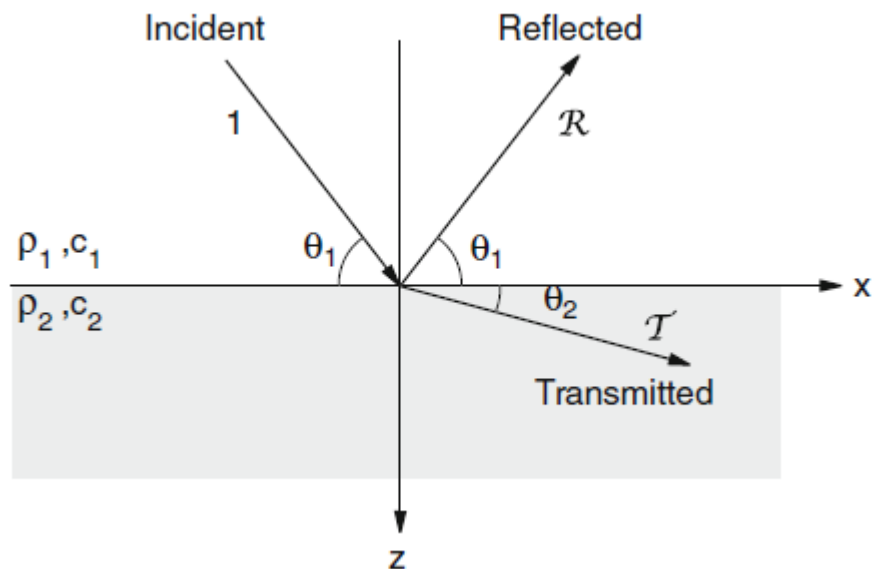
1.6.1 液体-液体界面

- 结论（阻抗形式, $Z_i = \rho_i c_i / \sin \theta_i$, 可以看作是声压与垂直质点速度之比）：

$$\mathcal{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \mathcal{T} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

- 全反射（perfect reflection）
- 临界角（critical grazing angle）

- 全透射（ $|R|=0$ ） $\theta_c = \arccos\left(\frac{c_1}{c_2}\right)$



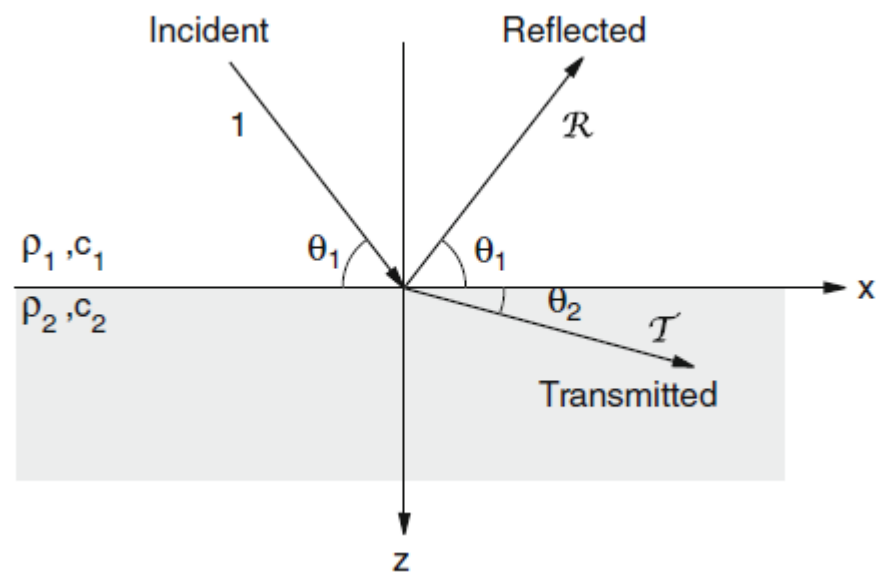
$Z_i = \rho_i c_i / \sin \theta_i$ 可以看作是声压与垂直质点速度之比^[1]

- 证明：由欧拉运动方程得

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \quad \longrightarrow \quad u = \frac{1}{i\omega\rho} \frac{\partial p}{\partial z}$$

- 去掉 $e^{i\omega t}$ 项, $p = \exp[ik(x \cos \theta + z \sin \theta)]$
- 化简得到

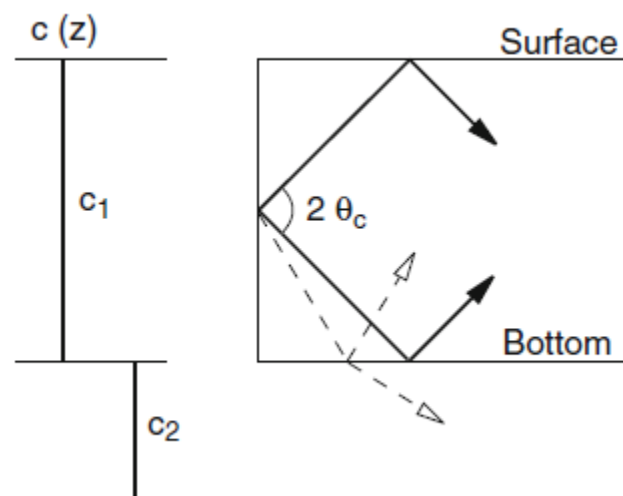
$$\frac{p}{u} = \frac{c\rho}{\sin \theta} \triangleq Z_{\text{eq}}$$



1.6.1 液体-液体界面

- 浅海声传播的特性：

$$\mathcal{R} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad \mathcal{T} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}$$



$|\theta| \leq \theta_c$: Discrete spectrum 简正波场 (normal mode)

$|\theta| > \theta_c$: Continuous spectrum 近场 (nearfield)

1.6.2 液体-固体界面（复杂，但表达式存在）

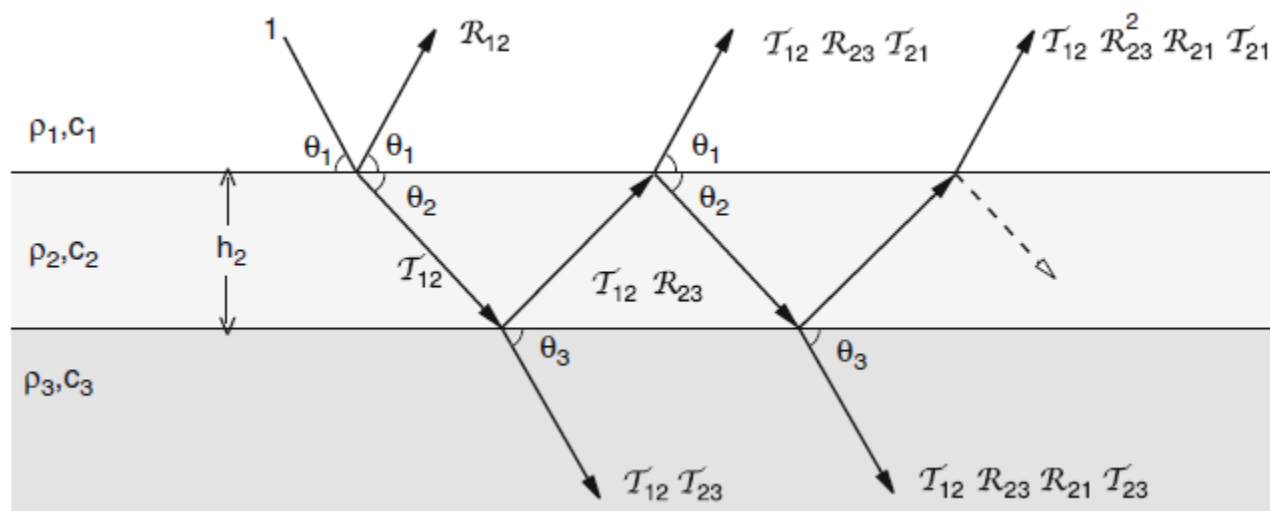
- 边界条件

1.6.3分层的液体半空间（三层，中间层薄）

- 路径引起的相移：

$$\phi_2 = k_2 h_2 / \sin \theta_2$$

- 总反射系数：



$$\begin{aligned} \mathcal{R} &= \mathcal{R}_{12} + T_{12} \mathcal{R}_{23} T_{21} \exp(2i\phi_2) + T_{12} \mathcal{R}_{23}^2 \mathcal{R}_{21} T_{21} \exp(4i\phi_2) + \cdots \\ &= \mathcal{R}_{12} + T_{12} \mathcal{R}_{23} T_{21} \exp(2i\phi_2) \sum_{n=1}^{\infty} [\mathcal{R}_{23} \mathcal{R}_{21} \exp(2i\phi_2)]^n. \end{aligned}$$



$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{R}_{12} + \mathcal{R}_{23} \exp(2i\phi_2)}{1 + \mathcal{R}_{12} \mathcal{R}_{23} \exp(2i\phi_2)}$$

1.6.3 一些特点

- $\frac{1}{4}$ (3/4, 5/4) 波长厚度 : $\mathcal{R} = \frac{Z_2^2 - Z_1 Z_3}{Z_2^2 + Z_1 Z_3}$

令 $Z_2 = \sqrt{Z_1 Z_3}$, 则不存在反射。滤波器、隔离器和抗反射敷层

- 半波长厚度 (或厚度远小于波长, 介质1和介质3可以看做是彼此接触的) :

$$\mathcal{R} = \frac{Z_3 - Z_1}{Z_3 + Z_1}$$

1.6.4任意分层

- 从底部往上递推计算得到

$$\mathcal{R}_{(m-2)m} = \frac{\mathcal{R}_{(m-2)(m-1)} + \mathcal{R}_{(m-1)m} \exp(2i\phi_{m-1})}{1 + \mathcal{R}_{(m-2)(m-1)} \mathcal{R}_{(m-1)m} \exp(2i\phi_{m-1})}$$

$$\mathcal{R}_{(m-3)m} = \frac{\mathcal{R}_{(m-3)(m-2)} + \mathcal{R}_{(m-2)m} \exp(2i\phi_{m-2})}{1 + \mathcal{R}_{(m-3)(m-2)} \mathcal{R}_{(m-2)m} \exp(2i\phi_{m-2})}$$

$$\mathcal{R}_{1m} = \frac{\mathcal{R}_{12} + \mathcal{R}_{2m} \exp(2i\phi_2)}{1 + \mathcal{R}_{12} \mathcal{R}_{2m} \exp(2i\phi_2)}$$

- 问题？ ϕ_{m-2} 怎么计算？

1.7海面、海底和体积散射

- 散射产生的非相干场称为混响。混响与接收到的相干波合到一起时，视为相干场的干扰

1.8环境噪声

- 低信噪比，根据信号和噪声物理特性从而抑制噪声
 - a. 全向噪声，窄波束的指向接收器
 - b. 有向噪声，避开噪声方向
 - c. 更一般的情况，噪声分布（相干性）
- 噪声类型：人为噪声（中频）和自然噪声（低频 $<10\text{Hz}$ 和高频 $>300\text{Hz}$ ）

1.9声传播模型

- 声传播：波动方程
- 海洋环境：波动方程的参数和边界条件

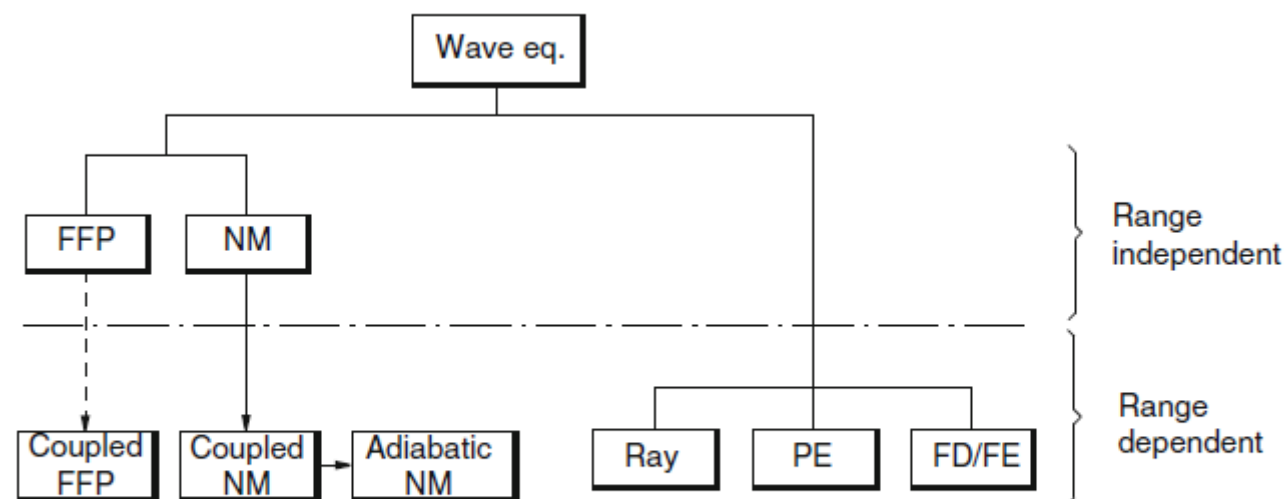


Fig. 1.31 Hierarchy of underwater acoustic models

作业

- 1.1,1.2,1.3,1.4,1.5,1.6,1.7
- Matlab Experiment: 1.1, 1.6, Reproduce Fig. 1.9 and plot the range-depth TL results.