

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

深蓝海创新理论及技术应用丛书

Underwater Acoustics

Analysis, Design
and Performance of Sonar

水声学

——声呐分析、设计与性能

[美] Richard P. Hodges 著

于金花 常 哲 魏永星 周 莹 译
李 琦 贾廷政 高 超 赵淑坤

WILEY



海军出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

深远海创新理论及技术应用丛书

水 声 学

——声呐分析、设计与性能

[美] Richard P. Hodges 著

于金花 常 哲 魏永星 周 莹
李 琦 贾廷政 高 超 赵淑坤 译

海洋出版社

2018年·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

水声学: 声呐分析、设计与性能/ (美) 理查德·P. 霍奇思 (Richard P. Hodges) 著;
于金花等译. —北京: 海洋出版社, 2017. 11

书名原文: Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar
ISBN 978-7-5027-9980-9

I. ①水… II. ①理… ②于… III. ①水体声学 IV. ①O427

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 283370 号

图字: 01-2014-1235 号

Title: Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar by Richard P. Hodges, ISBN: 978-0-470-68875-5

Copyright © 2010 John Wiley & Sons, Ltd

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体版专有翻译出版权由 John Wiley & Sons, Inc. 公司授予海洋出版社。未经许可, 不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。本书封面贴有 Wiley 防伪标签, 无标签者不得销售。

策划编辑: 郑跟娣

责任编辑: 王 溪

责任印制: 赵麟苏

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编: 100081

北京朝阳印刷厂有限责任公司印刷 新华书店北京发行所经销

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

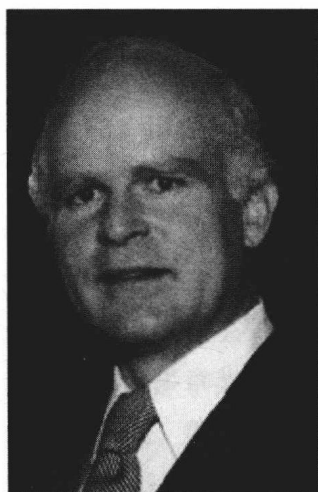
开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 19

字数: 432 千字 定价: 120.00 元

发行部: 62132549 邮购部: 68038093 总编室: 62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

作者简介



理查德·P. 霍奇斯 (Richard P. Hodges) 是美国麻省理工学院物理学专业理学学士，波士顿大学物理学专业理学硕士，在声呐、运行分析、建模和军事系统仿真等方面拥有 40 余年的研究经验。他目前任职于 Sonalysts 公司，担任首席分析师，并且是声呐优化工作组 (SOWG) 的核心成员，该工作组被美国海军推荐用于辅助战术决策的模型。他还是美国声学学会会员。

霍奇斯先生在美国海军水下作战中心 (NUWC) 和其他学校、机构教授海军声呐分析、声学、TMA、战术、武器、损坏和杀伤机理、C4I、非声传感器、平台式动力学武器和 NUWC 的 SIM II 海军作战仿真使用等。他是 SIM II 的设计师、工程师、分析师和使用者。他负责专家系统战术方法的开发，负责传感器、武器、环境、火力控制系统和平台特性的物理算法建模。他不但完成了现有战术应用调查研究，提出了利用 SIM II 的海基军事系统，还开发了 ASW、ASUW、地面打击、AAW 和武器模型等。

中译本序言

理查德·P. 霍奇斯所著的《水声学——声呐分析、设计与性能》一书于2010年由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司出版, 是一本重要的水声学参考书, 现在我们将该书翻译成中文, 介绍给我国的水声界读者。

理查德·P. 霍奇斯从事水声科研工作40余年, 在声呐、运行分析、建模和军事系统仿真等方面拥有丰富的研究经验。他目前担任 Sonalysts 公司的首席分析师, 是声呐优化工作组 (SOWG) 的核心成员, 还是美国声学学会会员。

本书的特点是以声呐分析、设计与性能贯穿全书的主线, 围绕这一主线, 理论与实验相结合, 详细介绍了影响声呐设计和性能发挥的主要因素以及如何进行声呐信号的检测分析等。书中给出了大量实验数据和图表, 许多章节内容充分体现了作者丰富的工作经验。

本书由国家海洋技术中心于金花、常哲、魏永星、周莹、李琦、贾廷政、高超、赵淑坤等合作翻译, 其中第3章、第4章、第15章、第16章、第17章、第18章、第19章和附录由于金花翻译; 第6章由常哲翻译; 第7章、第8章、第11章由魏永星翻译; 第12章和第13章由周莹翻译; 第1章和第10章由李琦翻译; 第2章和第9章由贾廷政翻译; 第14章由高超翻译; 第5章由赵淑坤翻译。全书由常哲审定, 由于金花统稿。

译者深感水平有限, 经验不足, 书中难免有不当和错误之处, 恳请使用本书的广大读者批评、指正。

译者

2016年5月

前 言

我是从 2004 年开始写这本书的，当时我意识到用于教授声呐分析师的所有的书都已经绝版了，在那之后有几本才得以从其他出版商那里买到。

在写这本书的时候，我试图在纯理论的数学教科书和通俗的非数学教科书之间寻找一个平衡点。本书不仅包含了图形结果，还包含了相应的可用于模型开发的方程。书中给出了我认为有用且重要的结果，既有理论方面的，也有实验方面的，其中大部分还有详细的参考资料。多年以来，为了能节省其他人的时间，我在总结历史图表和进行曲线拟合上花费了大量的时间。

这本书可以作为声呐分析师和其他对海军作战有兴趣的人的资料来源。

理查德·P. 霍奇斯

(Richard P. Hodges)

单位使用说明

缩写	单位	单位换算
A	电流单位：安 [培]	
atm	压强单位：标准大气压	1 atm = 101.325 kPa
bar	压强单位：巴	1 bar = 100 kPa
cal	能量单位：卡 [路里]	1 cal = 4.186 8 J
dB	声压级单位：分贝	
dyn	力学单位：达因	1 dyn = 10^{-5} N
ft	长度单位：英尺	1 ft = 0.304 8 m
g	重量单位：克	
Hz	频率单位：赫 [兹]	
h	时间单位：小时	
in	长度单位：英寸	1 in = 2.54 cm
kHz	频率单位：千赫	1 kHz = 1 000 Hz
kn	速度单位：节	1 kn = 1.852 km/h
lb	重量单位：磅	1 lb = 0.453 59 kg
μ Pa	压强单位：微帕	1 μ Pa = 10^{-6} Pa
μ s	时间单位：微秒	1 μ s = 10^{-6} s
mi	长度单位：英里	1 mi = 1 609.344 m
ms	时间单位：毫秒	1 ms = 10^{-3} s
N	重量单位：牛 [顿]	
n mile	长度单位：海里	
P	粘度单位：泊	1 P = 1 Pa · s

续表

缩写	单位	单位换算
Pa	压强单位：帕斯卡	
psi	压强单位：磅/英寸 ²	1 psi = 6. 895 kPa
rad	角度单位：弧度	
s	时间单位：秒	
S	电导单位：西 [门子]	
torr	压强单位：托	1 torr = 133. 322 Pa
V	电压单位：伏 [特]	
W	功率单位：瓦 [特]	
yd	长度单位：码	1 yd = 0. 914 4 m
°F	温度单位：华氏度	1 °F = 0. 555 6 K
°C	温度单位：摄氏度	

目 录

第 1 章 声呐导论	(1)
1.1 声波	(2)
1.2 传播速度	(3)
1.3 声波参数	(5)
1.4 多普勒频移	(7)
1.5 强度、声压级和分贝	(8)
1.6 合成声波	(9)
1.7 声在水和空气中的对比参数	(12)
第 2 章 声呐方程	(14)
2.1 信噪比	(14)
2.2 主动声呐方程	(15)
2.3 信号余量	(16)
2.4 品质因数	(17)
第 3 章 换能器、指向性和阵列	(18)
3.1 换能器响应	(18)
3.2 波束响应	(19)
3.3 线阵	(21)
3.4 矩形平面阵	(27)
3.5 幅度束控	(29)
3.7 体积阵	(34)
3.8 乘积定理	(34)
3.9 宽带波束图	(35)
3.10 指向性和阵增益	(35)
3.11 水听器间的噪声互相关	(39)
3.12 线列阵的指向性	(40)
3.13 面阵的指向性	(40)
3.14 体积阵的指向性	(41)
3.15 差分阵	(43)

3.16	乘积阵	(45)
3.17	稀疏阵	(48)
3.18	自适应波束形成	(49)
第4章	主动声呐	(51)
4.1	声源级	(51)
4.2	空化现象	(52)
4.3	近场交互作用	(54)
4.4	爆炸声源	(55)
4.5	水下冲击波的物理特性	(55)
4.6	气泡脉冲	(58)
4.7	爆炸声源的优缺点	(59)
4.8	参量声源	(60)
第5章	传播损失	(62)
5.1	海洋中的声速剖面	(63)
5.2	斯涅尔定律和界面传播	(65)
5.3	反射和传播系数	(66)
5.4	声透过平板的传播	(69)
5.5	声线轨迹	(70)
5.6	扩展损失	(76)
5.7	海洋中的声吸收	(77)
第6章	传播损失:边界效应	(81)
6.1	海况、风速和波高	(81)
6.2	充分发展风浪的 Pierson-Moskowitz 模型	(83)
6.3	海面交互作用	(85)
6.4	海底损失	(93)
6.5	波导泄露,低频截止	(100)
6.6	传播损失模型描述	(101)
第7章	环境噪声	(108)
7.1	环境噪声模型	(108)
7.2	地震噪声	(109)
7.3	海洋湍流	(109)
7.4	航运噪声	(110)
7.5	波浪噪声	(113)
7.6	热噪声	(115)
7.7	降雨噪声	(115)

7.8 环境噪声的时间变化	(118)
7.9 噪声的深度效应	(118)
7.10 噪声指向性	(118)
7.11 冰下噪声	(120)
7.12 环境噪声的空间相干性	(120)
第8章 混响	(123)
8.1 散射、反向散射强度和目标强度	(123)
8.2 混响频率扩展与多普勒增益	(136)
8.3 关于混响的重要研究结果	(140)
第9章 主动目标强度	(142)
9.1 目标强度的定义	(142)
9.2 大球体的主动目标强度	(144)
9.3 微小球体的主动目标强度	(144)
9.4 简单几何体的目标强度	(147)
9.5 潜艇的目标强度	(148)
9.6 TAP 模型	(148)
9.7 水面舰艇的目标强度	(151)
9.8 水雷和鱼雷的目标强度	(151)
9.9 鱼的目标强度	(153)
第10章 辐射噪声	(155)
10.1 船舶辐射噪声的通性	(155)
10.2 螺旋桨的辐射噪声	(157)
10.3 机械噪声	(158)
10.4 共振噪声	(159)
10.5 水动力噪声	(159)
10.6 平台消声	(160)
10.7 总辐射噪声	(160)
第11章 自噪声	(163)
11.1 流噪声	(164)
11.2 湍流噪声相干性	(167)
11.3 乱弹噪声	(168)
第12章 统计检测理论	(169)
12.1 引言	(169)
12.2 情况 1: 已知信号	(173)
12.3 情况 2: 信号是高斯白噪声	(176)

第 13 章 分辨差计算方法	(180)
13.1 连续宽带信号 (PBB)	(180)
13.2 连续窄带信号 (PNB)	(190)
13.3 主动声呐	(202)
13.4 听力检测	(218)
13.5 显示术语	(220)
第 14 章 虚警、假接触和假目标	(223)
14.1 海洋故事	(223)
14.2 检测失败	(223)
14.3 检测理论	(224)
14.4 虚警概率计算	(226)
14.5 虚假接触/无威胁接触	(228)
14.6 假目标	(228)
14.7 总结和结论	(229)
第 15 章 可变性和不确定性	(230)
15.1 声呐随机变化率	(232)
15.2 变化率来源	(233)
第 16 章 建模检测和战术决策辅助	(237)
16.1 品质因数范围或 R50%	(237)
16.2 战术辅助决策系统	(240)
第 17 章 检测累积概率	(243)
17.1 CPD 为什么重要	(243)
17.2 离散观察和连续观察	(243)
17.3 $\lambda - \sigma$ 跳跃模型	(244)
17.4 非跳跃处理	(244)
17.5 什么是合适的随机参数	(245)
17.6 计算检测累积概率 (CPD) 的近似法	(247)
第 18 章 跟踪、目标移动分析和定位	(249)
18.1 方位跟踪器	(249)
18.2 跟踪和方位测量的基本原则	(250)
18.3 面阵的其他方位误差源	(252)
18.4 线列阵的其他误差源	(253)
18.5 海底反射	(255)
18.6 人工跟踪和自动跟踪	(255)
18.7 定位和目标移动分析	(256)

18.8	测向定位法	(265)
18.9	四方 TMA	(265)
18.10	埃克隆德 (Ekelund) 测距	(267)
18.11	距离和方位 TMA	(268)
18.12	其他测向定位 TMA 法	(269)
18.13	其他 TMA 和定位方案	(269)
第 19 章	声呐设计与评估	(271)
19.1	频率和尺寸选择	(271)
19.2	计算要求	(273)
19.3	波束形成后的信号处理	(274)
19.4	主动脉冲选择	(274)
19.5	收发合置、收发分置和多基主动声呐	(276)
19.6	模糊函数	(278)
19.7	水雷搜索和海底调查声呐	(278)
19.8	回声探测捕鱼声呐	(279)
19.9	导航	(280)
19.10	船舶定位和海上救援	(280)
19.11	截听接收机	(280)
19.12	通信	(280)
19.13	海洋哺乳动物和主动声呐	(280)
附录 A		(282)
附录 B		(285)

第 1 章 声呐导论

声呐 (Sonar) 系统与雷达和电光系统有很多类似之处, 声呐运行是基于声波在目标和接收器之间的传播。被动声呐和主动声呐是最常见的两类声呐系统。被动声呐系统是目标产生的能量传送到接收器, 类似于被动红外探测。主动声呐系统是声波从发射器传送到目标再返回到接收器, 类似于脉冲反射雷达。除了上述两种类型, 还有日光或环境声呐, 其声源就是环境, 声波被目标反射或阻隔, 而接收器观测到这些效应。后面这种声呐类似于人的视觉。

声呐与雷达和电光系统不同, 这是因为声呐观测到的能量是通过液体、固体、气体或等离子体的机械振动来传播的, 而不是电磁波。近年来, 声呐不但指检测和发射声波的系统, 也泛指声技术科学。

在军事应用方面, 声呐系统不仅用于通讯、导航和识别障碍物或危险物 (如极地冰), 还用于检测、分类、定位、跟踪潜艇和水雷或表面接触等。在商业应用方面, 声呐可用在鱼类探测器、医学成像、材料检验和地震探测等。

图 1.1~图 1.3 举例说明基本的被动、主动和日光/环境声呐系统。

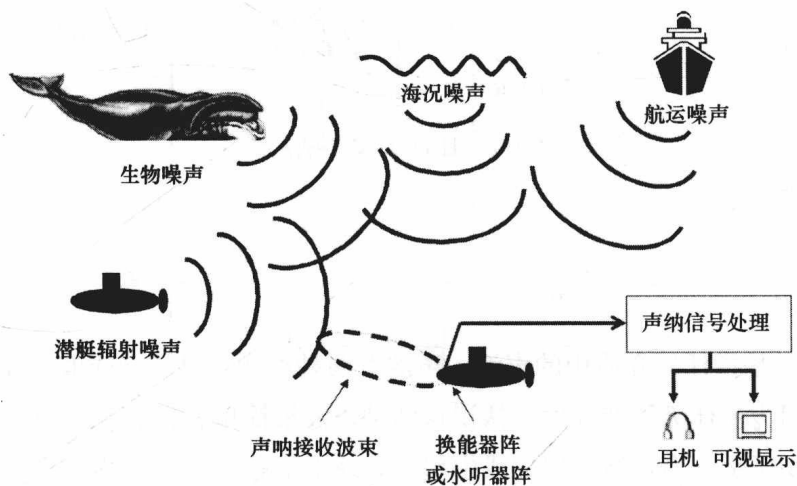


图 1.1 被动声呐系统

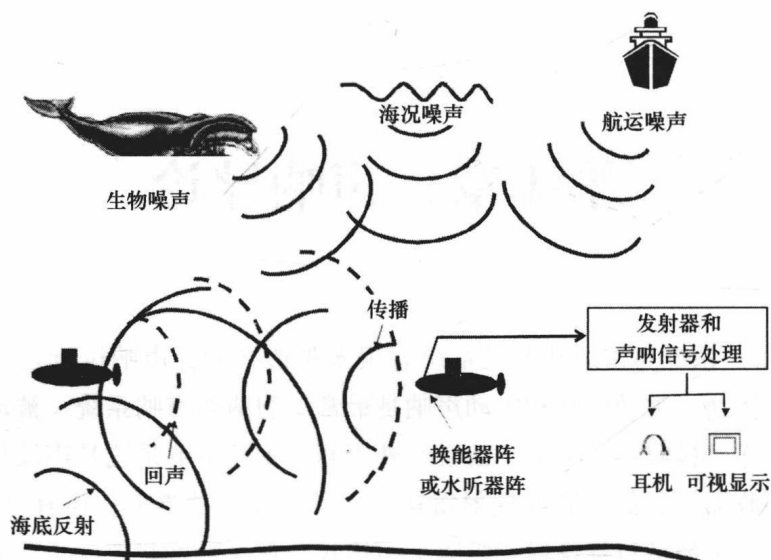


图 1.2 主动声呐系统

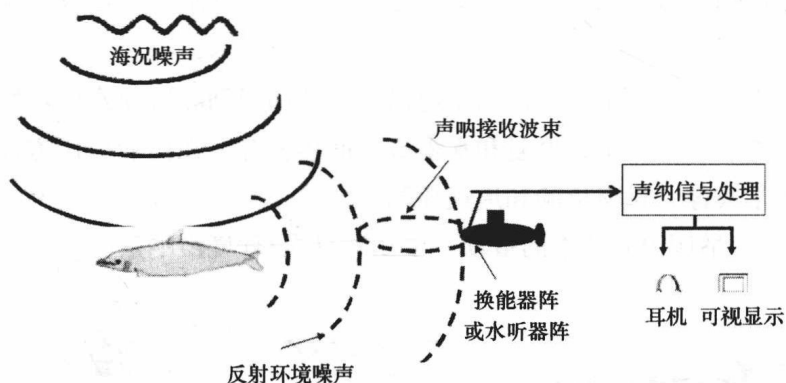


图 1.3 日光/环境声呐系统

1.1 声波

术语“声”是指任何介质中的声波。声波有两种类型：纵波和横波。在流体中，只存在纵波，这是因为流体无切变强度。认识这两种声波最简单、最直观的方法就是通过弹簧演示，如图 1.4 所示。当弹簧的尾部或中部左右或上下移动时，伴随着产生横波。这种方法使弹簧材料在垂直于前进方向上产生位移，当材料远离中轴时，弹簧弹力产生的恢复力将其拉回到中轴。当弹簧的几个线圈被压缩或拉伸，释放时将沿弹簧方向产生纵波。这种方法使弹簧材料沿着运动方向产生位移，然后，恢复力再次将材料推回原位。本书中只会偶尔涉及横波，除非有特殊说明，否则均假设为纵波。

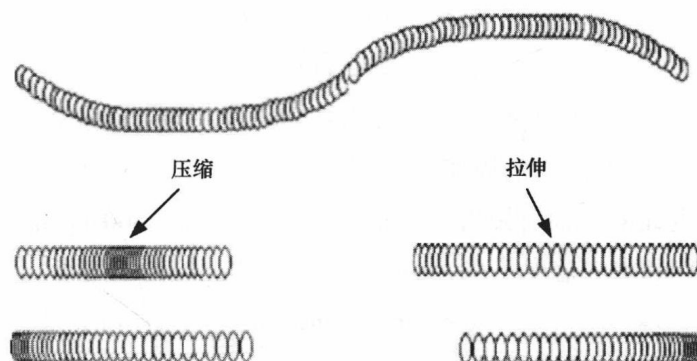


图 1.4 弹簧上的横波（上）和纵波（下）

1.1.1 压缩和拉伸

纵波是由压缩和拉伸组成的，压缩时，介质（弹簧线圈）比正常状态更紧密，拉伸时，介质比正常状态更分散。

声波的基本参数是压力。当水分子或空气分子被推挤或拉开时，会产生恢复力来阻碍其运动。这个力就是局部压力或单位面积的力。声波的振幅就是在一个周期内能达到的峰值。传播介质的扰动意味着分子间距发生变化。图 1.5 给出了压力波基本原理的示意。

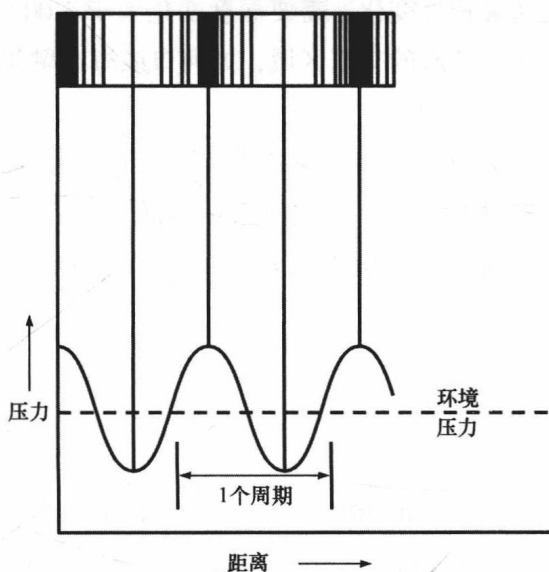


图 1.5 压力波

1.2 传播速度

在非分散介质中，不同波长以相同的相位速度传播（如水），假设波长和频率之间的

关系与电磁波相同:

$$c = \lambda f \quad (1.1)$$

式中, λ ——波长, 波上相应点的间距 (波峰到波峰或波谷到波谷);

f ——频率, 单位时间内的周期数。

声波的传播速度比电磁辐射慢得多, 水中声速大约为 1 500 m/s。传播速度是环境温度 (T), 压力 (p) 和水中盐度 (S) 的函数^[1]。因此, 传播速度为

$$c = F(T, p, S) \quad (1.2)$$

鉴于该函数的复杂性, 应用下列经验法则:

温度+1℃	=0.0℃时, 速度+4.6 m/s
	21.1℃时, 速度+2.5 m/s
深度+100 m	=速度+1.7 m/s
盐度+1	=速度+1.4 m/s
温度+1°F	=32°F时, 速度+8.4 ft/s
	70°F时, 速度+4.6 ft/s
深度+100 ft	=速度+1.7 ft/s
盐度+1	=速度+4 ft/s

由上述经验法则可看出, 温度变化时速度变化最大。潜艇活动区域可能有高达 30℃ 的温度波动。要产生同样的传播速度变化, 需要深度变化大于 5 000 m 或 16 000 ft [注意盐度的大尺度变化仅限于淡水和盐水的交汇区域, 如河口或海冰融化区, 但这些区域通常都超出了反潜战 (ASW) 的活动区域]。

Mackenzie^[2]给出了海水声速的简单经验公式 (适用于全球海洋):

$$c(T, S, D) = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + A_4 T^3 + A_5 (S - 35) + A_6 D + A_7 D^2 + A_8 T(S - 35) + A_9 T D^3 \quad (1.3)$$

式中, T ——温度, °C;

S ——盐度;

D ——深度, m。

所用常数如下:

$$\begin{array}{lll} A_1 = 1448.96 & A_4 = 2.374 \times 10^{-4} & A_7 = 1.675 \times 10^{-7} \\ A_2 = 4.591 & A_5 = 1.340 & A_8 = -1.025 \times 10^{-2} \\ A_3 = -5.304 \times 10^{-2} & A_6 = 1.630 \times 10^{-2} & A_9 = -7.139 \times 10^{-13} \end{array}$$

当 $T = 25^\circ\text{C}$, $S = 35$, $D = 1\,000\text{ m}$ 时, 该方程的解为 1 550.74 m/s。25 和 40 之间的盐度标准差为 0.070 m/s。另外, 情况越复杂、条件范围越宽, 海水中的声速方程越准确 (如 Del Grosso^[3]、Chen 和 Millero^[4])。

表 1.1 给出了 1 个大气压、25℃ 条件下 (除非另有说明) 特定液体中的声速。