

现代物理基础丛书

13

# 大气声学

(第二版)

杨训仁 陈 宇 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

作为全球范围内迄今唯一的大气声学专著,本书系统全面而又简明扼要地阐述了该领域内最基本的概念、现象、理论和方法。从基本方程的推导开始,分别以波动声学 and 几何声学的观点讨论了大气中各种“经典”声现象(反射、折射、散射、衍射、吸收等),以及重力和地球自转对包括声波在内的各种大气波行为的影响;介绍了几种数值计算方法在大气声学领域内的最新发展;“大气声遥感”一章则从“逆问题”的角度出发论述了大气声学的应用方面;在此第二版中新增加了“非线性大气声学”和“大气中的声源”两章,并重新改写了“计算大气声学”的前半部分,反映了这些方面研究的最新进展。

本书可供声学(特别是大气声学、次声学、水声学、物理声学)和大气物理、气象学等方面的高年级本科生、研究生以及相关方向的教师、科研人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

大气声学/杨训仁,陈宇著. —2 版. —北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-018975-2

I. 大… II. ①杨…②陈… III. 大气声学 IV. P427.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 069186 号

责任编辑:郝德平 张 静/责任校对:陈玉凤

责任印制:赵德静/封面设计:王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

1997 年 5 月第一版

2007 年 6 月第 二 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 6 月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1—3 000 字数:375 000

定价:52.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈明辉〉)

天高地迥，觉宇宙之无穷；  
风起波兴，识穹苍之多变。

## 第二版马序

杨著大气声学于1997年出版,但不久就脱销,足见其受读者欢迎的程度,早就有再版的必要。近年来自然和人为灾害越来越多,并且越来越严重。研究自然声源,采取安全措施,对大气声学的理论和经验的要求更为殷切。再版就无可避免了。以2004年12月26日在苏门答腊一带大地震(9级)和海啸和以后2005年4月10日的两次地震(6.7级和6.5级)为例,在印尼附近死伤几十万,影响到印度和泰国。如能及时通知,绝大部分人员可以安全撤退。根据夏威夷为禁止核试验条约设立的次声站的记录,大地震和海啸到来的信息前后有三种可分得很清楚的信号:(1)从地震原来的地震波先是压缩波(正常的P波,最快),切变波(次要的S波,较慢)和最慢的表面波;(2)第三波,在海洋声道中传播又耦合到地的波;(3)次声波,与地震源附近海啸机构共生的,或地面振动产生的。地震波和第三波的记录是由于次声站的声压传声器对地面振动的灵敏度,而次声波的记录是在大气声道中传播的声波。强地震产生的信号都是如此,但是在孟加拉湾也发现次声波,可能是海啸与海岸上温差互相作用所致。海洋下地震可以产生次声,经由海面震动或震中附近的固体地球振动。用次声站记录可及时采取安全措施,避免或减轻损失和伤害。飓风(如2005年的卡特里娜飓风和其后的丽塔飓风)也导致重大损失。台风每年都有重大破坏。次声站都有助于安全措施,声源研究也很重要。所以大气声学技术的应用和研究正方兴未艾。

马大猷

## 第二版作者序

本书第一版于1997年出版后不久即销售一空,一方面是由于印数太少,另一方面也说明了社会的需求。不少读者曾直接或间接向作者反映情况,要求加印。经作者与出版社协商,考虑到第一版出版后本学科的长足发展,最后决定与其加印,不如重新申请基金出版第二版。感谢参与评审诸公的支持,第二版终于得以问世。值得一提的是,本书第一版的英译“样章”(sample chapters,包括“前言”、第1章、第7章和第8章)已先后通过国际知名的 Academic Press 和 Springer 出版社所组织的专家评审,英文版问世的条件已完全具备。

第二版首先全面改正了第一版中数量相当可观的技术性错误;其次在各章节中都做了不同程度的修改、补充,反映了自第一版出版以来各方面的相应发展;这在第7章“计算大气声学”(其前半部分是整个重新改写的)和第8章“大气声遥感”中表现得尤为明显;另外增加了全新的两章:第9章“非线性大气声学”和第10章“大气中的声源”,这使得本书在系统上更完善、在内容上更充实。

自第一版出版以来的整整十年中,大气声学在国外得到迅猛发展,文献数量激增、研究成果倍出;这种情况反映出这一过去多少受到冷遇的领域已开始得到应有的重视。作者谨希望此第二版的出版在国内学术界也能激起相应的反响。

在此第二版中,第8章的8I.4节和8II.4.1节以及第9章和第10章的大部分主要由清华大学陈宇完成,其间朱松平、周燕、陈谦和方伟在文献调研、外文资料翻译和图形处理等方面做了不少工作;中国科学院图书馆前馆长阎立中在资料收集上曾提供很大帮助,作者在此一并致谢。

杨训仁

2006年9月24日于北京

## 第一版魏序

大气声学无疑是声学、大气物理以至地球物理中的重要内容之一。究其范畴，却缙绅难言。盖近年来不仅学科间的相互渗透与日俱增，而不时又出现新的生长点，这确实给注意分类学的人带来困难。鄙见问题还不在此，即在上述几个大类学科书籍中，很少有“大气声学”专论，即如 20 世纪 90 年代美国出版的《应用物理百科全书》有“大气声学”一章（即本书参考文献[181]——作者注），计 34 页，若干重要问题皆未讨论，是否因篇幅有限？

杨训仁教授治学严谨、学识渊博、理论物理基础雄厚，如曩曾译布列霍夫斯基霍赫《分层介质中的波》而著称。1987 年我国《大百科全书·物理卷》问世，其中“大气声学”词条即杨训仁教授所撰。《大气声学》一书包罗更广泛的内容，由第 1 章“绪论”及第 2 章“基本概念和处理方法”即可窥全书一斑。尝问大气物理学家，从地面或海平面量起几许高度属大气物理研究范围，并无确切答复，故也可包括电离层中传播（这只是列举大气中气象万千，本书得其精华，已足称著矣），阿尔文一类问题，关于当前注意力在表面波器件，却忽略了瑞利波的原始来源，如书中还提起 Rossby 波，许多在一般有关专论皆未必提到，此例不胜枚举。

本书在“计算大气声学”及“大气声遥感”均有足够叙述，在理论方面，论述堪称完善。如大气污染是全球性公案，估计另有书籍，并非本书范畴，建议稍加引征。

本人只从事过与水雾中声吸收方面工作，同时也注意到至今并无有效人工消雾方法，如上述也属于大气声学范围，则有待解决的问题何止万千。训仁先生一书问世，定能引起学术界以至工业界的重视，是可以断言的。

魏荣爵

1996 年 7 月 8 日（于南京）

## 第一版作者序

在从事大气声学方面研究工作的三十多年中,作者无时不感到该领域内应当有一本专著的迫切性,但同时也深知这项“前无古人”开创性任务的艰巨性,在这两种矛盾心情的交互影响下而犹豫不决。20世纪80年代中期以来,作者有幸多次应邀出国讲学和进行学术交流,有机会直接接触本专业当今的国际水平,特别是1990—1991和1994—1995年间两度访美,历时共16个月,更为收集资料、讨论问题以及具体写作提供了较好条件,为本书得以比较顺利地打下基础。但终究限于作者的水平和时间,本书远非一本全面高水准的专著,充其量只能充当“引玉之砖”,希望能以此唤起海内外有关学者的关注,以期能有更高水准的专著问世,这正是作者写作本书的主要动机。

能使本书问世最根本的条件是中国科学院科学出版基金的资助,因此作者首先应对该基金委员会和参与本书选题评审的诸位专家表示衷心感谢。作者还应感谢三位老师:中科院资深院士汪德昭、马大猷和魏荣爵的鼓励和支持。最后要感谢的是提供过宝贵资料 and 进行过有益讨论的国内外有关专家,其中特别应提到的是: H. E. Bass、T. M. Georges、F. F. Hall, Jr.、A. J. Bedard, Jr.、尚尔昌、B. И. Татарский、A. D. Pierce、T. Embleton 和井清武弘(T. Isei)等。

本书难免会有不少疏漏甚至谬误之处,尚希读者批评指正。

杨训仁

1996年4月20日于北京

## 前 言

声学是物理学中颇具特色的一个分支。首先,它是最先得到发展的分支之一,早在古代(无论是东方的中国还是西方的希腊)人们就对声音的本质有了基本正确的认识而没有走什么弯路(这一点相对于其“姊妹学科”光学来说就幸运得多了),而作为一门系统的分支学科,其基本理论在经典物理的“黄金时代”——19 世纪中叶就已达到相当完善的地步;其次,它又是当前最活跃的分支之一,由于它与许多其他领域(不仅涉及包括生命科学在内的几乎所有主要基础自然学科,还在相当程度上涉及若干人文学科)犬牙交错的联系而形成相应的边缘学科,使其“亚分支”的数目已达到 20 个以上,并且还有新亚分支不断生长出来的趋势。这种态势不仅在物理学其他分支中,即使在整个自然科学中亦属罕见。

在声学各亚分支中,大气声学又属于最古老和最重要者之一:早在 18 世纪初就已初步形成学科,一些重要的基本现象和相应的理论在 19 世纪已被陆续研究得相当成熟,后来这方面的研究一直未曾中断,近年来更有长足发展;作为人类赖以生存的物质空间和声波赖以传播的三大广袤介质之一的大气层(余者为海洋和地壳),彻底研究并了解其中精彩纷呈的波动现象理应属于人类认识自然的一项基本任务。另一方面,由于这些现象与其他许多自然现象(特别是气象现象和其他一些地球物理现象)和人类活动紧密相关,使人类在认识它们之后有可能用来为其自身服务,这就决定了大气声学不但是一门重要的基础学科,同时也是一门重要的应用学科。

但令人感到困惑的是,对如此重要而富于特色的一门基础学科,长期以来竟然没有一本专著,1997 年出版的本书第一版至今仍然是全世界范围内唯一的一本。在此之前,只有两本性质相近的书,即本书所引参考文献[32]和[208];不要说专著,就是在一般的声学著作中也少有涉及大气声学方面的章节甚至内容。A. D. Pierce 的书<sup>[60]</sup>几乎是唯一例外。再就是一两篇综述性论文和散见于几种百科全书中的条文(特别应提到 E. H. Brown, F. F. Hall, Jr. 的杰出综述<sup>[2]</sup>和 H. E. Bass 的条文<sup>[181]</sup>)。以上这些资料对本书的写作都大有裨益,在若干章节中均有直接利用。

本书第一版出版以来本学科又有了长足发展,因此亟需对第一版做出补充、修订,使其能够充分反映当前水平,本书第二版正是在这一前提下问世的。本书宗旨在于为读者提供一幅系统而严谨的“图像”,尽可能充分地反映出该领域当今的最高学术水准。理论性与实用性兼顾但侧重于前者,尤其注重对基本概念和处理方

法的论述,数学推导则“适可而止”,关键是指出来龙去脉而不拘泥于严格性。

首先对大气作为声传播介质的结构特性和声学行为做出扼要描述;然后以流体动力学基本方程为基础,结合大气介质的实际来讨论声波的反射、折射、散射、衍射和吸收等一系列过程,其间按不同场合兼用了波动声学方法和几何声学方法;以对重力场和地球自转影响的论述为契机,从“经典大气声学”过渡到“现代大气声学”,表述了由于这两种效应而衍生出的、性质上有别于寻常声波的一系列大气波。为了体现叙述的连贯和完整,对一些基本的声学关系也做出必要的推导,通过这一过程的描述来建立对大气声学的系统理解。在“计算大气声学”一章中,通过对几种传统计算方法在大气声学领域中的推广,补充了对大气声学基本课题的进一步处理方法。在“大气声遥感”一章中,以“逆问题”的角度论述了大气声学的应用方面。非线性现象在大气声学中是一种不可避免的重要内容,第二版中新增加的“非线性大气声学”一章较为全面地讨论了这方面的问题。大气中的声源问题也是多年来受到广泛关注的课题,新增加的第 10 章反映了这方面的研究进展。

本书采用一种简明的数学符号(详见 14 页脚注)。对参考文献的列出方式是:凡与正文叙述直接有关、或被直接利用、或与为进一步探讨书中因篇幅所限而被略去的细节有关的参考文献,以引用的先后为序编号列于书末;对于只涉及较次要问题(如关系到某一较不重要方程的数学推导等)的参考文献,则以加脚注的方式说明出处。

本书有不少材料(包括内容、公式、图表、脚注等)均系直接采自公开发表的书刊文献,所有被采用的文献都在相关章节中总体明确标出(个别未经发表的也注明来源);而为了避免过于繁琐,在具体引用(如图表等)时就不再一一标明出处,特此声明。

# 目 录

第二版马序

第二版作者序

第一版魏序

第一版作者序

前言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论                    | 1  |
| 1.1 学科范围和历史评述               | 1  |
| 1.2 大气结构及其声学特性              | 4  |
| 1.2.1 大气的分层结构               | 4  |
| 1.2.2 大气的湍流结构               | 6  |
| 1.2.3 大气的声学特性               | 7  |
| 1.3 大气中的热力学关系               | 10 |
| 1.3.1 状态方程和绝热方程             | 10 |
| 1.3.2 气压计方程和标高、等温大气和等温度梯度大气 | 11 |
| 1.3.3 位温和 Väisälä-Brunt 频率  | 12 |
| 1.4 大气动力学基本关系               | 14 |
| 1.4.1 运动方程                  | 14 |
| 1.4.2 连续性方程、状态方程、张量形式       | 15 |
| 1.4.3 守恒定律                  | 16 |
| 1.4.4 位势高度和 Coriolis 力      | 17 |
| 1.5 大气波的类型                  | 18 |
| 第 2 章 基本概念和处理方法             | 23 |
| 2.1 均匀大气中的波动方程              | 23 |
| 2.1.1 波动方程的推导               | 23 |
| 2.1.2 速度势(声势)、计及二阶微量的波动方程   | 24 |
| 2.1.3 Helmholtz 方程          | 25 |
| 2.2 声波中的能量关系                | 26 |
| 2.2.1 声波能量、声能流密度            | 26 |
| 2.2.2 声波动量、声压的时间平均值         | 27 |
| 2.2.3 声波中的 Lagrange 密度      | 29 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 2.3 不均匀大气中的波动方程           | 31 |
| 2.3.1 波动方程和定解条件           | 31 |
| 2.3.2 存在解的概述              | 32 |
| 2.4 WKB 近似                | 34 |
| 2.4.1 一般表述                | 34 |
| 2.4.2 Airy 函数             | 35 |
| 2.4.3 存在返转点时的场            | 37 |
| 2.5 简正波解                  | 39 |
| 2.5.1 虚源图像                | 39 |
| 2.5.2 场的积分表示              | 40 |
| 2.5.3 简正波                 | 41 |
| 2.5.4 界面为任意的情形            | 43 |
| 2.6 几何(射线)声学基本概念          | 44 |
| 2.6.1 波前、射线、程函            | 44 |
| 2.6.2 射线寻迹方程              | 45 |
| 2.6.3 Fermat 原理           | 46 |
| <b>第3章 大气中的声传播——折射和反射</b> | 49 |
| 3.1 静止均匀介质中的声传播           | 49 |
| 3.1.1 波前的参量描述             | 49 |
| 3.1.2 主曲率半径沿射线的变化         | 50 |
| 3.1.3 焦散面                 | 51 |
| 3.2 分层不均匀介质中的声折射          | 52 |
| 3.2.1 声速梯度造成的折射           | 52 |
| 3.2.2 风速梯度造成的折射           | 54 |
| 3.3 大气中的声线                | 55 |
| 3.3.1 射线积分                | 56 |
| 3.3.2 波导中的射线              | 56 |
| 3.3.3 “反常”传播              | 57 |
| 3.4 静止介质中的振幅变化            | 60 |
| 3.4.1 静止均匀介质中的波振幅         | 60 |
| 3.4.2 沿射线的能量守恒:推广到缓变介质    | 62 |
| 3.5 运动介质中的振幅变化            | 63 |
| 3.5.1 运动介质中的声波方程          | 63 |
| 3.5.2 波作用量守恒              | 64 |
| 3.5.3 Блохинцев 不变量       | 66 |

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| 3.6 声波在两种介质分界面上的反射      | 66        |
| 3.6.1 平面波从刚性界面的反射       | 67        |
| 3.6.2 平面波从比声阻抗有限的平面上的反射 | 68        |
| 3.6.3 局部反应表面            | 69        |
| 3.6.4 反射表面上空的声场         | 70        |
| 3.7 地面的影响               | 71        |
| 3.7.1 多孔半空间上空的声场表式      | 71        |
| 3.7.2 地波和表面波            | 72        |
| 3.7.3 计算地面阻抗的四参量半经验公式   | 74        |
| 3.7.4 地面引起的超额衰减         | 75        |
| 3.7.5 地貌的影响             | 75        |
| <b>第4章 声波在大气中的散射和衍射</b> | <b>79</b> |
| 4.1 散射的基本概念             | 79        |
| 4.1.1 固定刚性体的散射          | 80        |
| 4.1.2 散射截面              | 81        |
| 4.2 从不均匀性上的散射           | 82        |
| 4.2.1 散射的微分方程           | 82        |
| 4.2.2 散射的积分方程           | 83        |
| 4.2.3 散射波的渐近表近          | 83        |
| 4.2.4 Born 近似           | 84        |
| 4.3 大气湍流与声波的相互作用        | 85        |
| 4.3.1 声波与湍流的分离          | 85        |
| 4.3.2 湍流大气中的声波方程        | 86        |
| 4.3.3 湍流与声波的相互作用机制      | 89        |
| 4.4 湍流大气中的声散射           | 93        |
| 4.4.1 散射截面              | 93        |
| 4.4.2 功率比               | 94        |
| 4.4.3 功率谱               | 95        |
| 4.5 声波在静止大气中的衍射         | 96        |
| 4.5.1 局部反应表面上空的点声源      | 97        |
| 4.5.2 影区内的声场表式          | 99        |
| 4.5.3 衍射公式的级数表式         | 101       |
| 4.5.4 蠕波                | 102       |
| 4.5.5 蠕波的几何声学诠释         | 104       |
| 4.6 声波在运动大气中的衍射         | 105       |

|            |                             |            |
|------------|-----------------------------|------------|
| 4.6.1      | 基本方程和形式解                    | 106        |
| 4.6.2      | 简正波展开                       | 107        |
| 4.6.3      | 本征值的渐近表式                    | 108        |
| 4.6.4      | 本征函数的渐近表式                   | 110        |
| 4.6.5      | 衍场的近似表式                     | 113        |
| 4.6.6      | 分析和结论                       | 115        |
| <b>第5章</b> | <b>大气中的声吸收</b>              | <b>119</b> |
| 5.1        | 经典吸收                        | 120        |
| 5.1.1      | 黏性流体的运动方程——Navier-Stokes 方程 | 120        |
| 5.1.2      | 导热方程                        | 121        |
| 5.1.3      | 黏性-导热流体中声波的能量关系             | 122        |
| 5.1.4      | 黏性-导热流体中的吸声系数               | 123        |
| 5.1.5      | 实用的经典吸声系数                   | 125        |
| 5.1.6      | 黏性-导热介质中的波模式                | 126        |
| 5.2        | 分子转动弛豫吸声                    | 129        |
| 5.2.1      | 内自由度模式的吸收机制                 | 129        |
| 5.2.2      | 转动弛豫的贡献                     | 129        |
| 5.2.3      | 碰撞反应速率                      | 130        |
| 5.2.4      | 转动弛豫吸声系数                    | 131        |
| 5.3        | 分子振动弛豫吸声                    | 132        |
| 5.3.1      | 振动受激分子的摩尔数变化率               | 132        |
| 5.3.2      | 动态绝热压缩系数                    | 134        |
| 5.3.3      | 振动弛豫吸声系数                    | 135        |
| 5.3.4      | 氧和氮的振动弛豫频率                  | 136        |
| 5.3.5      | 水汽的摩尔分数(分子浓度)               | 137        |
| 5.4        | 总吸声系数和附加吸收                  | 139        |
| 5.4.1      | 总吸声系数                       | 139        |
| 5.4.2      | 附加吸声                        | 140        |
| 5.5        | 雾滴和悬浮微粒的声吸收                 | 141        |
| 5.5.1      | 历史评述                        | 142        |
| 5.5.2      | 基本分析:质量转移过程                 | 143        |
| 5.5.3      | 进一步的分析                      | 144        |
| <b>第6章</b> | <b>重力场和地球自转的影响</b>          | <b>148</b> |
| 6.1        | 静止大气中的波系                    | 149        |
| 6.1.1      | 基本方程组和频散关系                  | 149        |

|       |                                     |     |
|-------|-------------------------------------|-----|
| 6.1.2 | 内波                                  | 150 |
| 6.1.3 | 相速度和群速度                             | 153 |
| 6.2   | 运动不均匀大气中的波                          | 155 |
| 6.2.1 | 基本方程组及其处理步骤                         | 155 |
| 6.2.2 | 向等温大气的过渡缓变大气                        | 157 |
| 6.2.3 | 速度散度方程                              | 158 |
| 6.2.4 | 能量密度和 Lagrange 密度                   | 159 |
| 6.3   | 偏振关系                                | 161 |
| 6.3.1 | 各微扰量之间的相位关系                         | 161 |
| 6.3.2 | 粒子运动轨迹                              | 162 |
| 6.3.3 | 复偏振项                                | 164 |
| 6.4   | Rossby 波                            | 164 |
| 6.4.1 | 地转风                                 | 164 |
| 6.4.2 | Rossby 波的形成                         | 165 |
| 6.4.3 | Rossby 波的性质                         | 167 |
| 6.5   | 外波                                  | 168 |
| 6.5.1 | 特性表面波                               | 168 |
| 6.5.2 | 与内波的比较                              | 170 |
| 6.5.3 | 边界波                                 | 172 |
| 6.6   | 大气潮                                 | 174 |
| 6.6.1 | 概述                                  | 174 |
| 6.6.2 | 理论                                  | 176 |
| 第 7 章 | 计算大气声学                              | 181 |
| 7.1   | 快速场程序(FFP)                          | 182 |
| 7.1.1 | Helmholtz 方程、轴对称近似                  | 183 |
| 7.1.2 | Helmholtz 方程的解                      | 186 |
| 7.1.3 | 接收器处的场                              | 187 |
| 7.1.4 | 数值计算精度的增进                           | 189 |
| 7.1.5 | 二维均匀大气的 FFP 解                       | 190 |
| 7.2   | 抛物方程法 I;Crank-Nicholson 抛物方程法(CNPE) | 191 |
| 7.2.1 | 窄角 PE 和广角 PE 的导出                    | 192 |
| 7.2.2 | 窄角 PE 和广角 PE 的有限差分解                 | 194 |
| 7.2.3 | 密度剖面的影响                             | 196 |
| 7.2.4 | 有限元解                                | 197 |
| 7.3   | 抛物方程法 II:Green 函数抛物方程法(GFPE)        | 198 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 7.3.1 无界、无折射大气 .....              | 198 |
| 7.3.2 折射大气 .....                  | 201 |
| 7.3.3 三维 GFPE 法 .....             | 203 |
| 7.4 射线寻迹 .....                    | 205 |
| 7.4.1 射线方程 .....                  | 205 |
| 7.4.2 数值积分的具体例子——台风次声射线寻迹 .....   | 209 |
| 7.5 Gauss 射线束法(GB) .....          | 210 |
| <b>第 8 章 大气声遥感</b> .....          | 214 |
| <b>第 I 部分 低层大气遥感</b> .....        | 214 |
| 8I.1 探测系统 .....                   | 214 |
| 8I.1.1 收发合置系统 .....               | 215 |
| 8I.1.2 收发分置系统、Doppler 回声探测器 ..... | 217 |
| 8I.2 声探测的物理基础 .....               | 219 |
| 8I.2.1 以脉冲探测大气不均匀性的原理 .....       | 219 |
| 8I.2.2 用电声换能器为散射区定界 .....         | 220 |
| 8I.2.3 声雷达方程 .....                | 223 |
| 8I.2.4 不相干散射、收发分置声探测方程 .....      | 223 |
| 8I.2.5 回声探测器方程 .....              | 224 |
| 8I.3 声探测器的输出 .....                | 226 |
| 8I.3.1 热卷流检测 .....                | 226 |
| 8I.3.2 逆温层监测 .....                | 226 |
| 8I.3.3 稳定条件和波 .....               | 227 |
| 8I.3.4 定量比较 .....                 | 228 |
| 8I.4 用声雷达获取风速剖面的系统算法 .....        | 230 |
| 8I.4.1 从声雷达获取的 Doppler 频谱 .....   | 230 |
| 8I.4.2 Doppler 频谱的空间分辨率 .....     | 231 |
| 8I.4.3 风速剖面的建模 .....              | 232 |
| 8I.4.4 加权函数和协方差 .....             | 233 |
| 8I.4.5 应用例子 .....                 | 234 |
| 8I.5 被动遥感 .....                   | 236 |
| <b>第 II 部分 高层大气遥感</b> .....       | 236 |
| 8II.1 高层大气声遥感的物理基础 .....          | 237 |
| 8II.1.1 折射 .....                  | 237 |
| 8II.1.2 吸收 .....                  | 238 |
| 8II.1.3 从声测量推断高层大气性质 .....        | 238 |

|         |                            |     |
|---------|----------------------------|-----|
| 8II.2   | 遥感检测系统 .....               | 238 |
| 8II.3   | 大气中波动的识别 .....             | 241 |
| 8II.4   | 大气中具体存在着的次声波的被动遥感 .....    | 243 |
| 8II.4.1 | 全球次声监测网络 .....             | 243 |
| 8II.4.2 | 若干展望 .....                 | 245 |
| 第9章     | 非线性大气声学 .....              | 247 |
| 9.1     | 声传播中的非线性效应 .....           | 247 |
| 9.1.1   | 均匀介质中的平面波 .....            | 247 |
| 9.1.2   | 激波简介 .....                 | 249 |
| 9.1.3   | 谐波的生成 .....                | 251 |
| 9.1.4   | 非线性耗散波、Burgers 方程 .....    | 252 |
| 9.1.5   | 在非均匀介质中传播的非线性波 .....       | 255 |
| 9.2     | 声爆 .....                   | 256 |
| 9.2.1   | 声爆基础理论 .....               | 256 |
| 9.2.2   | 声爆的聚焦 .....                | 259 |
| 9.2.3   | 激波的厚度 .....                | 260 |
| 9.2.4   | 声爆模拟程序 .....               | 260 |
| 9.3     | 对大气湍流中声波的晚近研究 .....        | 261 |
| 9.3.1   | 间歇性的影响 .....               | 262 |
| 9.3.2   | 小规模湍流各向异性的影响 .....         | 262 |
| 9.3.3   | 准周期相干结构对回波信号低频功率谱的影响 ..... | 263 |
| 9.3.4   | 相干结构对脉冲在 ABL 中传播的影响 .....  | 264 |
| 9.3.5   | 中层大气中各向异性结构所引起的声散射 .....   | 265 |
| 9.3.6   | 湍流对非线性波的影响 .....           | 265 |
| 9.4     | 大气孤波 .....                 | 267 |
| 9.4.1   | 大气孤波的基本方程 .....            | 267 |
| 9.4.2   | 对大气孤波的探测 .....             | 271 |
| 第10章    | 大气中的声源 .....               | 273 |
| 10.1    | 基本声源 .....                 | 273 |
| 10.1.1  | 单极子源 .....                 | 273 |
| 10.1.2  | 偶极子源 .....                 | 274 |
| 10.1.3  | 四极子源 .....                 | 275 |
| 10.1.4  | 活塞源 .....                  | 275 |
| 10.1.5  | 流体源 .....                  | 276 |
| 10.2    | 自然声源 .....                 | 277 |

---

|                   |                 |     |
|-------------------|-----------------|-----|
| 10.2.1            | 海浪 .....        | 277 |
| 10.2.2            | 重物落水 .....      | 282 |
| 10.2.3            | 大火 .....        | 283 |
| 10.2.4            | 大风 .....        | 285 |
| 10.2.5            | 地震 .....        | 287 |
| 10.2.6            | 火山喷发和陨石坠落 ..... | 288 |
| 10.2.7            | 极光 .....        | 288 |
| 10.2.8            | 其他 .....        | 289 |
| 10.3              | 人工声源 .....      | 290 |
| 10.3.1            | 飞机 .....        | 290 |
| 10.3.2            | 火箭 .....        | 290 |
| 10.3.3            | 高空爆炸 .....      | 290 |
| 10.3.4            | 大气核试验 .....     | 291 |
| 10.3.5            | 航天飞机的爆炸 .....   | 291 |
| <b>参考文献</b> ..... |                 | 293 |