



西安交通大学

研究生创新教育系列教材

噪声分析与控制

(第2版)

吴九汇 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS



西安交通大学 研究生创新教育

噪声分析与控制

(第2版)

吴九汇 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本书主要为工科研究生和专业人员提供噪声分析和控制的思路和方法。本书的创新独到之处是将噪声的基础理论和工程应用充分结合在一起,从而能够从基础理论中找寻解决实际工程问题的技巧和方法。书中很多内容是作者及作者所在研究所长期以来的研究成果,如旋转声源的辐射、薄壁球壳的声散射特性研究、Kirchhoff 公式在声振耦合分析中的应用、声学互易原理应用、适用于恶劣环境应用的噪声控制技术。此外,书中还引入和分析了声学照相机这一国内外噪声研究方面的最新技术。

本书特别注重为工科研究生和专业人员提供噪声分析的研究基础和思维方法,有利于开拓思路,力求提高相关专业人员分析问题和解决问题的能力。通过融入作者多年的教学实践经验,本书在第1版基础上添加了许多分析细节,从而增加了可读性。

本书是高等院校师生和从事工程噪声控制工作的专业技术人员不可多得的教材和有价值参考书。

图书在版编目(CIP)数据

噪声分析与控制/吴九汇著. —2版. 西安:
西安交通大学出版社, 2017.1
西安交通大学研究生创新教育系列教材
ISBN 978-7-5605-9394-4

I. ①噪… II. ①吴… III. ①噪声-分析-研究生-
教材②噪声控制-研究生-教材 IV. ①0422.8②TB535

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 024593 号

书 名	噪声分析与控制(第2版)
著 者	吴九汇
责任编辑	田 华

出版发行	西安交通大学出版社 (西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)
------	---------------------------------------

网 址	http://www.xjtpress.com
电 话	(029)82668357 82667874(发行中心) (029)82668315(总编办)

传 真	(029)82668280
印 刷	陕西时代支点印务有限公司

开 本	727mm×960mm 1/16	印 张	15.5	彩 页	3 页	字 数	276 千字
版次印次	2017 年 1 月第 2 版	2017 年 1 月第 1 次印刷					
书 号	ISBN 978-7-5605-9394-4						
定 价	38.00 元						

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665640 QQ:190293088

读者信箱:190293088@qq.com

版权所有 侵权必究

《研究生创新教育》总序

创新是一个民族的灵魂,也是高层次人才水平的集中体现。因此,创新能力的培养应贯穿于研究生培养的各个环节,包括课程学习、文献阅读、课题研究等。文献阅读与课题研究无疑是培养研究生创新能力的重要手段,同样,课程学习也是培养研究生创新能力的重要环节。通过课程学习,使研究生在教师指导下,获取知识的同时理解知识创新过程与创新方法,对培养研究生创新能力具有极其重要的意义。

西安交通大学研究生院围绕研究生创新意识与创新能力改革研究生课程体系的同时,开设了一批研究型课程,支持编写了一批研究型课程的教材,目的是为了推动在课程教学环节加强研究生创新意识与创新能力的培养,进一步提高研究生培养质量。

研究型课程是指以激发研究生批判性思维、创新意识为主要目标,由具有高学术水平的教授作为任课教师参与指导,以本学科领域最新研究和前沿知识为内容,以探索式的教学方式为主导,适合于师生互动,使学生有更大的思维空间的课程。研究型教材应使学生在过程中可以掌握最新的科学知识,了解最新的前沿动态,激发研究生科学研究的兴趣,掌握基本的科学方法;把教师为中心的教学模式转变为以学生为中心教师为主导的教学模式;把学生被动接受知识转变为在探索研究与自主学习中掌握知识和培养能力。

出版研究型课程系列教材,是一项探索性的工作,也是一项艰苦的工作。虽然已出版的教材凝聚了作者的大量心血,但毕竟是一项在实践中不断完善的工作。我们深信,通过研究型系列教材的出版与完善,必定能够促进研究生创新能力的培养。

西安交通大学研究生院

前 言

目前,噪声和振动这门学科正在迅速成为世界范围许多大学和理工学院的必修课程。随着工业生产技术水平的不断提高,对军用和民用产品的低噪声设计及工程方案的噪声预估等提出迫切要求。

本书根据西安交通大学机械工程学科研究生课程的教学要求,以培养研究生具有较高理论分析水平和解决复杂噪声工程问题的能力出发而撰写。引入国内外最新研究成果,将噪声的基础理论和工程应用充分结合在一起,从而引导读者能够从基础理论中找寻解决实际工程问题的技巧和方法,论述简明精练、深入浅出,具有较强的实用性。

《噪声分析与控制》经过多年的教学实践,获得了研究生的广泛好评。通过融入作者多年的教学实践经验,《噪声分析与控制》(第2版)在第1版基础上添加了许多分析细节,从而增加了可读性。

全书包括8个独立章节。第1章为绪论。从有趣的声音现象谈起,介绍了本教材中涉及到的噪声方面的基础知识。第2章主要介绍噪声基础知识。首先从人耳的构造谈起噪声对人的生理影响,接着详述声压的基本概念及声学度量指标,最后论述了声质量评价以及心理声学的基本概念等。第3章介绍声波方程及声场分布。先从弹性介质波动方程得到 Helmholtz 方程,并利用分离变量法求解出 Helmholtz 方程在不同坐标系下方程解的形式,进而求解出圆柱薄壳和圆球薄壳的散射声场,并分析其声场分布特性。第4章介绍气动噪声原理。从单极源、偶极源和四极源的特性出发阐述了气动噪声产生的物理过程,接着详细推导和分析了旋转声源的辐射特性。作为旋转声源的典型工程应用,最后给出了旋转叶片的辐射噪声计算公式及其特性。第5章介绍 Kirchhoff 公式在声振耦合分析中的应用。首先推导 Kirchhoff 公式,详细阐述其物理意义,并举例说明该公式在声振耦合分析中的应用。第6章介绍声学互易定理及其应用。从经典互易定理入手,分别详述了力声变换结构和电声换能器的参量之间的互易关系,接着详细推导了声学互易定理,并给出声学互易定理的不同形式,最后举例说明了声学互易定理在工程实际中的广泛应用,如应用互易定理校准传声器,计算力激励下的辐射噪声和球体碰撞噪声等。第7章从基本的信号分析方法入手,主要阐述噪声源识别中常用的和新近发展的几种技术。第8章首先阐述工程常规噪声控制技术,包括室内噪声和管道噪声的控制原理和方法;然后详述适用于恶劣环境应用的噪声控制技术,

包括气体泵动阻尼技术、豆包冲击阻尼技术、非阻塞微颗粒阻尼技术及金属橡胶阻尼技术等。

本书特别注重为工科研究生和专业人员提供噪声分析的研究基础和思维方法,有利于开拓思路,力求提高相关专业人员分析问题和解决问题的能力。

西安交通大学机械工程学院黄协清教授审阅了《噪声分析与控制》(第2版)的全部书稿,提出了许多宝贵意见和建议,给本书增色很多,在此特别深深感谢;这里还要非常感谢作者恩师陈花玲教授的大力帮助。此外,还要非常感谢在撰写本书过程中给予帮助的本研究所陈天宁教授、吴成军教授、贾书海教授、王小鹏副教授等所有同事和作者的研究生们。

在撰写本书过程中,除依据作者自己的科研成果外,还参考本单位的研究成果及国内外同行有关文献,在此特一起致谢。

最后,作者衷心感谢西安交通大学研究生创新教育系列教材建设。

由于作者水平所限,难免有错误和不妥之处,望读者批评指正,以便日后完善和修改。

吴九汇

2016.11.28

目 录

第 1 章 绪论

1.1 有趣的声音现象	(1)
1.1.1 我国古代的“相控阵列”和“窃听器”	(1)
1.1.2 天坛回音壁和莺莺塔的蛙鸣	(2)
1.1.3 人民大会堂的声学设计	(3)
1.1.4 声音的速度	(4)
1.1.5 水下通道和远距离声呐	(4)
1.2 声学既是跨层次也是跨学科的	(5)
1.3 关于本教材的引言	(6)
1.3.1 本教材涉及流体力学和振动力学	(6)
1.3.2 减振和降噪之间的关系	(7)
1.3.3 噪声的频谱范围	(8)
1.3.4 工程和科学的关系	(10)

第 2 章 噪声基本概念

2.1 噪声对人的生理影响	(11)
2.1.1 人耳的构造及听觉特性	(11)
2.1.2 噪声的危害	(17)
2.1.3 噪声标准	(22)
2.2 声压的基本概念	(24)
2.2.1 声能密度、声强、声功率	(25)
2.2.2 声学度量指标	(25)
2.3 噪声测量常用仪器	(34)
2.3.1 传声器	(34)
2.3.2 声级计	(37)
2.3.3 频率分析仪	(38)
2.4 声质量评价	(39)
2.4.1 心理声学的基本概念	(40)

2.4.2 产品的声质量评价	(45)
2.5 本章小结	(49)

第3章 声波方程及声场分布

3.1 引言:一维声学波动方程	(50)
3.2 弹性体中的波动方程	(52)
3.2.1 矢量分析的基本概念	(53)
3.2.2 弹性体中波动方程的推导	(55)
3.3 速度势和 Helmholtz 方程	(57)
3.3.1 理想流体中的速度势函数	(57)
3.3.2 弹性固体中的势函数和 Helmholtz 方程	(58)
3.4 Helmholtz 方程求解	(61)
3.4.1 直角坐标系下 Helmholtz 方程解的形式	(61)
3.4.2 圆柱坐标系下 Helmholtz 方程解的形式	(62)
3.4.3 球坐标系下 Helmholtz 方程解的形式	(65)
3.5 声场分布	(69)
3.5.1 声场的唯一性定理	(70)
3.5.2 边界的连续性条件	(71)
3.5.3 平板的声辐射特性	(74)
3.5.4 圆柱壳内的声场特性	(79)
3.5.5 薄壁球壳的声散射特性	(82)
3.6 COMSOL 软件在声场计算中的应用	(85)
3.6.1 ACOUSTICS MODULE 声学模块	(85)
3.6.2 应用实例	(85)
3.7 本章小结	(86)

第4章 气动噪声原理

4.1 声发生的物理过程	(87)
4.1.1 单极源	(87)
4.1.2 偶极源	(91)
4.1.3 四极源	(94)
4.1.4 速度对声功率的影响	(94)
4.1.5 有限板型结构的声发生过程	(95)
4.2 旋转声源的辐射特性	(97)

4.2.1	多普勒效应	(98)
4.2.2	旋转点声源的辐射严格解	(99)
4.2.3	旋转偶极源的辐射严格解	(105)
4.3	旋转叶片的噪声分析	(106)
4.3.1	风扇噪声	(106)
4.3.2	飞机螺旋桨旋转噪声分析及控制措施	(108)
4.4	本章小结	(110)

第5章 Kirchhoff 公式在声振耦合分析中的应用

5.1	Kirchhoff 公式及其物理意义	(111)
5.1.1	三维空间的 Kirchhoff 公式推导	(112)
5.1.2	向外部区域的表面声辐射	(117)
5.1.3	二维空间的 Kirchhoff 公式	(119)
5.2	Kirchhoff 公式应用在理想边界情况	(119)
5.2.1	简单形状表面的格林函数	(120)
5.2.2	Kirchhoff 公式计算平板声辐射	(122)
5.3	Kirchhoff 公式在声振耦合分析中的应用	(123)
5.3.1	Kirchhoff 公式在声振耦合分析中的不同形式	(123)
5.3.2	实例 1: 在电容器装置噪声水平预估中的应用	(124)
5.3.3	实例 2: 在变电站噪声预估中的应用	(129)
5.3.4	实例 3: 在高压输电线电晕噪声预估中的应用	(132)
5.4	本章小结	(134)

第6章 声学互易定理及其应用

6.1	引言: 简单的互易现象	(135)
6.2	经典互易定理	(137)
6.2.1	瑞利经典互易定理	(137)
6.2.2	力声变换结构的互易关系	(138)
6.2.3	电声换能器的互易关系	(139)
6.3	声学互易定理推导	(141)
6.3.1	弹性表面在声源和力作用下的声学互易定理	(141)
6.3.2	声学互易定理的不同形式	(143)
6.4	声学互易定理的工程应用	(146)
6.4.1	应用互易定理校准传声器	(146)

6.4.2	力激励下的辐射噪声计算	(153)
6.4.3	应用互易定理求解撞击噪声	(155)
6.4.4	通过互易性实验确定格林函数	(157)
6.4.5	通过互易性确定最小辐射声功率位置	(158)
6.5	本章小结	(158)

第7章 噪声源识别技术

7.1	基本的信号分析方法	(159)
7.2	物理声源分离识别技术	(160)
7.2.1	传统的分别运行法	(160)
7.2.2	频谱分析法	(160)
7.2.3	传递路径分析方法	(170)
7.3	声强测试技术	(172)
7.4	基于声学成像的噪声源识别技术	(178)
7.4.1	直线均匀点源阵列的波束形成原理	(180)
7.4.2	平面相控阵列技术	(184)
7.4.3	球型阵列技术	(191)
7.5	本章小结	(197)

第8章 工程噪声控制技术

8.1	工程常规噪声控制技术简述	(198)
8.1.1	室内噪声的控制	(199)
8.1.2	管道噪声的控制	(202)
8.2	适用于恶劣环境应用的噪声控制技术	(208)
8.2.1	气体泵动阻尼技术	(209)
8.2.2	豆包冲击阻尼技术	(215)
8.2.3	非阻塞微颗粒阻尼(NOPD)技术	(217)
8.2.4	金属橡胶阻尼技术	(227)
8.3	本章小结	(230)

附录 A	不同坐标系位移向量和应力张量之间的关系	(231)
------	---------------------------	-------

附录 B	分离变量法应用举例	(233)
------	-----------------	-------

附录 C	平稳相位法	(234)
------	-------------	-------

参考文献

第1章 绪 论

本章从有趣的声音现象谈起,介绍我国古代、现代的卓越声学成就及国内外声学发展情况,阐述声学跨层次和跨学科的特点,并从声固耦合、噪声的频谱范围、工程和科学的关系等方面对本教材做一引言。

1.1 有趣的声音现象

1.1.1 我国古代的“相控阵列”和“窃听器”

两千多年前,春秋战国时期鲁国人墨翟发明的“听瓮”装置可以说是世界上最古老的“相控阵列”。战国初期,华夏大地上群雄争霸,战事接连不断。各国通过筑起高耸的城墙和坚固的城防工事来守卫自己的疆土,而入侵敌方会通过悄悄挖掘地道,穿过城墙下直通到城里某个地方的方法,从背后打击守军。这种攻城方法十分隐蔽,常常给守军一个措手不及,使其伤亡惨重。在这种情况下,许多军事家都在研究应对策略。其中,墨翟应用共鸣原理发明的“听瓮”装置提供了一种及早发现敌方挖掘行动的好方法。陶瓮的安置方法有下面两种。

一种是类似于现代的“相控阵列”技术。沿着城墙根每隔五步(约6 m)周期性挖井数口,每口井内放置一口陶瓮,并在瓮口蒙上薄皮,这样就形成一个阵列陶瓮装置。挖井遇高地时挖约3 m深,遇低地则挖到地下水位以下约60 cm为止。当敌军在城外挖掘地道时,掘地的振动声就会沿着地面传到瓮中,引起瓮内空气的共鸣声,瓮内声响又引起瓮口薄皮振动,就会被听觉灵敏的“伏罽”人听到。利用相邻几个瓮中声音的响度差,还可判断出声音传来的方向。

另一种则类似于现代的“矢量阵列”技术。在城墙根周期排布的系列井中的垂直方向同时埋设两个不同深度的陶瓮,埋设的深度以瓮口与城基相平为准。瓮口放上木板,使人侧耳伏板细听。从上、下两口瓮中声音的响度差即可估计出声源偏向哪边,再根据相邻两口井中四瓮的响度情况,就能确定出声源所在方位。

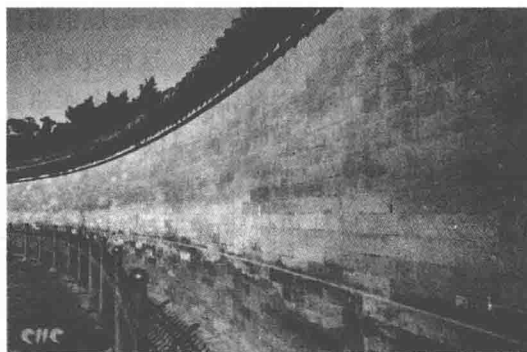
唐朝时我国又发明了古代的“窃听器”——“地听”器。它是用精瓷烧制形似空心葫芦的枕头,据说人侧头贴耳枕在上面能听到15 km外的马蹄声。北宋时还发

明了用牛皮做的“箭囊听枕”，士兵“枕矢而眠”，亦可听到数里外的人马声。

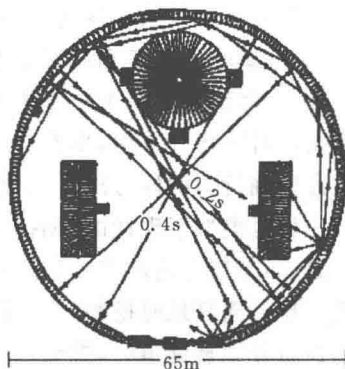
这些古代的声学技术都跟本书第8章要讲述的单腔共振吸声结构有关。

1.1.2 天坛回音壁和莺莺塔的蛙鸣

北京的天坛有一个著名的“回音壁”。如图1.1(a)所示，回音壁墙高3.72 m，厚0.90 m，直径65.20 m，周长204.73 m，占地面积3335.67 m²。墙壁是用磨砖对缝砌成的，墙面极其光滑整齐，围墙弧度十分规则，墙头覆着蓝色琉璃瓦。回音壁的奇妙之处在于，当有人在墙内面向墙壁小声说话时，声音就会沿着围墙传到一二百米的另一端，无论说话声音多小，对方都可以听得清清楚楚，而且声音悠长，堪称奇趣，给人造成一种“天人感应”的神秘气氛，所以称之为“回音壁”。谁都知道，两个人低声耳语，相隔几米远就听不到了。而在回音壁前，相距几十米远都能听得一清二楚，这就不能不让人感到神奇了。回音壁的奥妙在于，回音壁半径大，局部可看作平面，人贴墙说话的声波传播到光滑墙面上会产生全反射，这样声波就会沿着围墙壁连续反射前进，如图1.1(b)所示。虽经辗转多次反射，声音的强度衰减不大，因此在远处仍能听得清清楚楚。由此可见，回音壁是巧妙利用了声音的反射作用所创造的人间奇迹，体现了我国古代建筑声学的卓越成就。



(a) 天坛回音壁



(b) 回声原理示意图

图 1.1 天坛回音壁结构和回声原理示意图

在我国古代建筑中，除北京天坛的回音壁外，山西普救寺的莺莺塔、河南省三门峡市区的蛤蟆塔、四川省潼南县大佛寺的石琴亦都能产生声反射现象，它们并称为我国著名的四大回音建筑。

在山西省永济县城附近有座佛教古刹——普救寺，寺内有一闻名中外的古塔，由于《西厢记》中张生和崔莺莺的故事就发生在这里，因此人们叫它“莺莺塔”。塔

高 36 m 多,共有 13 层,塔身是四方形的,全塔与塔檐都由青石砌成。此塔的神奇之处在于,每当人们在塔前拍手或击石时,均可听到清晰、悦耳、宏亮的“咯哇、咯哇”的蛙叫声。有趣的是,在不同的地点发声,听到的青蛙回声来自不同的地方,如在离塔面 15 m 左右的地方拍手或击石,听到的蛙声好似从塔底传出;而当在离塔面 20 m 以外的地方敲击时,听到的蛙声则由上空传来,且能听到的蛙声空间较广,从离塔面 4 m 的塔基台阶到离塔面 100 多米的空间范围内都可以听到蛙叫声,且蛙声从地面一直延伸到空中。为什么该塔能有蛙声效应? 莺莺塔的蛙声效应是由于多层塔檐反射造成的,这种塔檐必须具备两个条件:第一是塔檐应是内凹的弧形,对声波没有汇聚作用;第二是每一层塔檐各处的曲率半径、角度和收缩情况各不相同而又要科学组合,从而使通过各层塔檐反射后的声波能在较广阔的空间范围内具有产生蛙音回声的特别效果。从史料记载来看,这种声学效应是人们事先计划的,这就更加显示出其学术价值。我国古代劳动人民的聪明智慧实在令后人折服。

1.1.3 人民大会堂的声学设计

人民大会堂的万人礼堂,体积有 9 万多立方米,表面积有 1 万多平方米。一般在礼堂中可以存在两种声音:自声源直接到达接收点的声音叫直达声;而声波经过壁面在各个方向来回反射又逐渐衰减后到达接收点的声音听起来好像是直达声的延续叫做混响声。室内存在混响是有界空间的一个重要声学特性。混响时间和建筑物的结构有关,混响时间过长会干扰有用的声音,而混响时间过短会使人觉得声音单调。

除了混响声外,室内还存在回声。如果到达听者的直达声与第一次反射声之间,或者相继到达的两个反射声之间在时间上相差 50 ms 以上,而反射声的强度又足够大,使听者能明显分辨出两个声音的存在,那么这种延迟的反射声叫做回声。回声与混响是不同的概念,一定的混响声是有益的,而回声的存在将严重破坏室内听音效果,一般应力求排除,即在设计厅堂时要使直达声和反射声的时间差不要超过 50 ms。

对人民大会堂的音响性能要求:有合适的混响时间;噪声小于 35 dB;开会发言时,每个座位都能听到 70 dB 的清晰声音;舞台演奏时,每个座位都要听到 80 dB 的丰满乐曲。这就要根据声波特性和人对声音的感觉,从建筑设计、建筑材料、建筑构造、扩音设备等方面进行综合设计。

万人会堂的扩音设备采用了分布放大系统,分别在座位上安装了 8000 只小喇叭,每只喇叭只有 0.1 W 的功率但能产生 75 dB 声级。由于这么多小喇叭分布在全场,电传输的速度又极快,主席台上讲话声音瞬间就传遍大会堂的各个角落,使听众感到是在直接聆听发言。此外,礼堂的舞台上配置了 14 个传声器并采用立体声放大系统,这样文艺演出时观众听到的乐曲更真切。大会堂满座时的混响时间是 1.6 s,全空时只有 3 s,很好控制了大会堂的混响时间。人民大会堂的巧妙声学

设计,是在我国著名声学家马大猷教授亲自领导下完成的,体现了我国 20 世纪 50 年代建筑声学的水平。

1.1.4 声音的速度

声波能在空气和固体中传播,但声音的速度是多少呢?

1738 年,法国几位科学家为了测定空气中的声速,做了如下实验:他们把两门大炮分别架在相距 27 km 的两个山头上,先在甲山放炮,乙山上的人测量看见炮火到听到炮声的时间;然后再由乙山放炮,甲山上的人测量时间。实验结果是,从甲到乙和从乙到甲的声速是相同的,都是 337 m/s。

后来的多次实验又证明了声波在空气中的速度和声音本身没有关系,炮声和雷声、高音和低音,声速都是相同的。但空气温度不同,声速就不同,温度越高声速越大。气温大约每升高 1°C ,声速就要增加 0.6 m/s。在 20°C 的空气中,声波的速度是 344 m/s,现在常说的声速就是指的这个速度。

早先,没有电子计时装置,在运动场举行百米赛时,发令员要把信号枪举到起跑处竖起的黑牌前并发出起跑枪声,这是为什么呢?其实道理很简单:起点处运动员是按信号枪的枪声起跑的,而终点处裁判员却不能按枪声启动秒表计时,因为枪声传播到终点需要一定时间(大约需 0.3 s)。为了保证计时准确,发令员在信号枪背后安一黑牌,这样信号枪在发出枪声同时发出的白色光在黑牌反衬下能被终点的裁判员清楚看到。由于白色光传播 100 m 所需时间可忽略不计(光速比声速快 90 多万倍),因此终点裁判员在看到白色光时启动计时,就不会有什么误差了。

1.1.5 水下通道和远距离声呐

几十年前美国拉蒙特地质实验室的科学家在南澳大利亚沿海做实验时,向海洋中投掷了一枚深水炸弹,结果发现爆炸产生的声波在三个多小时后传到了北美洲的百慕大群岛,行程达 19200 km。声波在海洋中能传播这么远的距离,就是水下声道的作用。

科学家早就探明,海洋中海水温度是从海平面向下随着深度增加而逐渐降低的,声波速度逐渐在减小,到达一定温度后才不再变化;然而随着深度的继续增加,压力越来越大,声波速度又逐渐增大。这样,在海洋中就存在一层海面,声波在那里的传播速度最小,这层海面称作声道轴面。

为了说明水下声道,现在设想一枚炸弹在海洋上部爆炸,那里上层水温高、声速大,越往下水温越低、声速越小。根据声波弯射原理,爆炸声的传播路线要向前下方弯曲。当声波越过声道轴面一旦进入海洋下部,由于越往下压力越大,声速也

就越大,这时声波的传播路线变成了向前上方弯曲。当声波越过声道轴面再进入上部海面,它又要向前下方弯曲。如此反反复复,声波就像扭秧歌一样,沿着声道轴面上下弯弯曲曲地前进。海洋深处这条传播声波的宽广大道就叫做水下声道。实验观测表明,声波在水下声道传播时,就像在管道中传播一样,能量损耗最小,因而传播距离最远。大洋中的水下声道大约在海面下几百米到一千米的深处。

声呐(SONAR)全称为声音导航与测距,是一种利用声波在水下的传播特性,通过电声转换和信息处理来完成水下探测和通信任务的电子设备,是水声学中应用最广泛、最重要的一种装置。水下通道的发现为研制远距离声呐的声发系统(用固定声道远距离测距的系统)提供了可能,即利用安放在深海声道区的不同方位测声站,准确确定水下发射导弹的位置或宇宙飞船溅落海面的位置。

1.2 声学既是跨层次也是跨学科的

声学既是跨层次也是跨学科的。我国著名声学家魏荣爵教授曾指出:“研究‘基本粒子’的人可以不懂声学,但是费米在讲授他自己的 β 衰变理论时却应用了

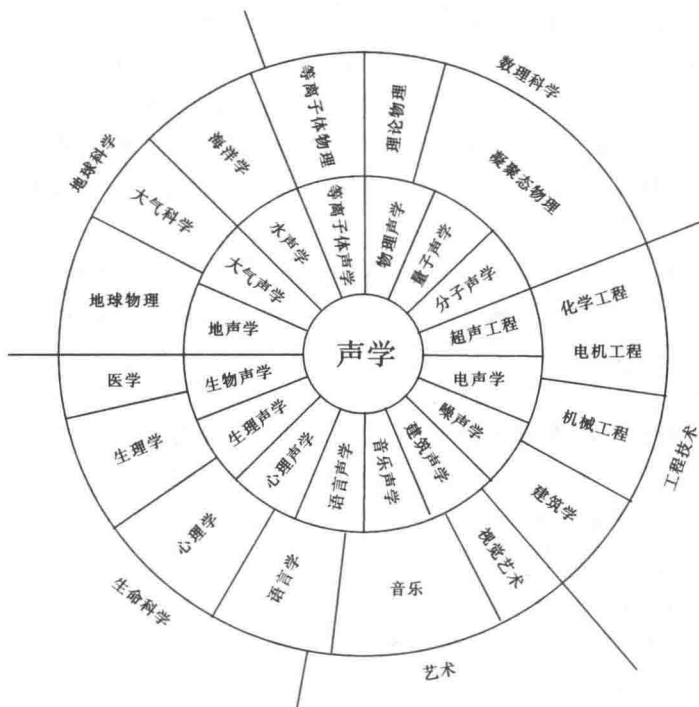


图 1.2 声学和各门学科相互交叉的跨学科结构图

当年瑞利对封闭空间声传播模式的概念;最近物理学家研究氦Ⅱ第三声却发现和‘夸克’有了联系;固体物理学家正在自觉或不自觉地从声学方面的问题。”

声学的确具备着现代科学的各门学科相互交叉并形成边缘学科的特点。图1.2很好显示了声学和各门学科之间相互交叉的跨学科及跨层次的结构关系。

1.3 关于本教材的引言

本教材的目的是为读者提供噪声分析和控制的思路和方法。在撰写过程中力求将噪声的基础理论和工程应用充分结合在一起,从而使读者能够从基础理论中找寻解决实际工程问题的技巧和方法。

下面将从以下几个方面对本教材做一阐述。

1.3.1 本教材涉及流体力学和振动力学

本教材虽然主要讲述噪声分析及控制的理论和方法,但由于工程中许多噪声现象都是由振动产生的,声波和固体结构机械振动之间的交互作用是工程噪声和振动控制中极其重要的部分,因而教材内容将涉及流体力学和振动力学。

声是在弹性介质中以一定特征速度传播的压力波。当介质具有惯性和弹性时,振动反映了结构元件中的声波波动,噪声则反映了流体中的声波波动。一般来说,声波产生有两种基本机理:①固体振动导致声能的产生和辐射,这类声波通常称为结构声;②由湍流和非定常流诱导的压力波动引起的流动诱导噪声,这类声波通常称为气动声。

图1.3给出了大音叉振动时在空气介质中产生的媒质疏密相间变化的声传播过程及其对应压力随传播距离余弦波动的示意图。当音叉向右振动时,受碰撞的空气媒质质点必定也向右运动,这样形成密集区Ⅰ;此时碰撞后的空气媒质质点已经取得了净速度,也就具有动量,它们又碰撞右边相邻Ⅱ处的质点,在碰撞中将向前的动量传递给那些原来静止的质点,于是右边Ⅲ处的空气又趋向于密集,波动就这样继续下去。当音叉向右达到最大位移时改变方向向左运动,音叉右边会出现一空隙,Ⅰ处空气就充满这个空隙而变成稀疏区,此时原先处于密集的Ⅲ处空气继续向左挤压,使Ⅱ处的空气又趋于密集……。这样,由于空气媒质的弹性和惯性,音叉振动使其周围的空气密度出现疏密相间的变化,这个疏密过程在空气中顺序地从振源向外传播,此即为声波的传播。这里存在两类运动:质点运动和声波运动。在质点运动中,每个质点在它的平衡位置附近来回运动,其方向与动量转移的方向一致;声波运动实际上是质点运动的表现形式,它是质点动量转移速度的量度,这种转移速度即称为声速。对音叉振动产生的声辐射和声传播,必须应用基本

的波动方程来分析和理解,这些内容将在第3章介绍。

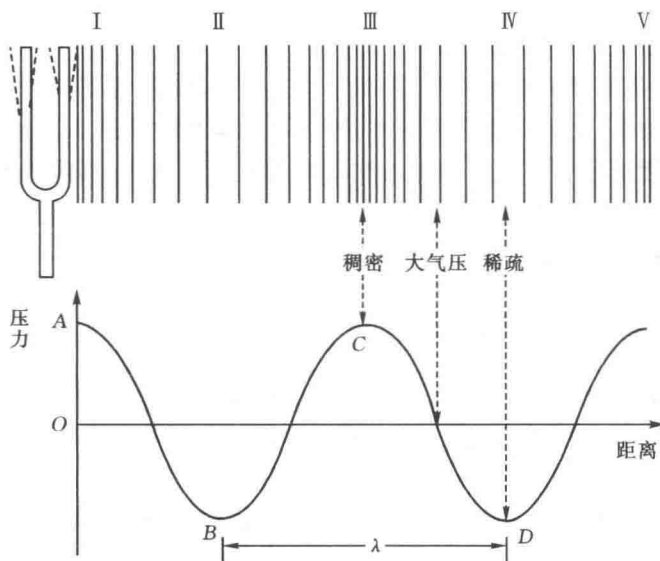


图 1.3 声波在大气介质中产生的稠密、稀疏及其余弦波动图

声波和固体结构机械振动之间的交互作用通常称为声固耦合或声振耦合,即紧邻结构表面的压力波动将在该表面上产生声辐射载荷,从而改变了作用在结构上的外力激励,在流体和结构之间建立起反馈耦合。由于固体能贮存剪切和压缩能量,因而能在结构内保持所有形式的波,即压缩(纵向)波、弯曲(横向)波、剪切波和扭转波。而由于流体只能贮存压缩能量,所以流体仅能维持压缩(纵向)波。弯曲波是在声辐射和传播中起直接作用的唯一结构波型,这是因为弯曲波微粒速度垂直于波传播方向而引起结构和流体之间有效的能量交换。这部分内容将在第4章介绍,而声振耦合分析的基本理论及其计算公式将在第5章介绍。

1.3.2 减振和降噪之间的关系

在噪声控制方面,抑制结构振动是非常重要的。但我们要认识到,在减振和降噪方面不存在一对一的关系。

对于结构振动引起的辐射噪声,有意义的区域通常是在离振动结构有一定距离的流体中,因此这个区域不包括任何声能的源,即产生声扰动的源在它之外,这样可利用齐次波动方程来分析由这类源发生的声波。在这种结构声中,有的结构振动模态可能比其它模态更有效发声,如外界激励频率与结构某阶固有频率重合