

# 噪声基础与发动机噪声

俞裕民 編

北京航空学院四〇一教研室

一九八三年二月

PDG

## 噪声基础与发动机噪声

第一章 噪声控制概论 .....	4
噪声问题的范围 .....	4
§ 1 引言 .....	5
§ 2 振动与声波 .....	6
§ 3 噪声 .....	8
§ 4 噪声控制的原则和措施 .....	9
§ 5 噪声控制的步骤 .....	11
第二章 声音的基本特性 .....	13
§ 1 声场与声压 .....	13
§ 2 声能、声强和声功率 .....	14
§ 3 声功率级、声强级和声压级 .....	15
§ 4 声压级的合成和相减 .....	18
§ 5 声波的反射和折射 .....	20
§ 6 声波的绕射和干涉 .....	26
§ 7 频带 .....	27
第三章 人耳的听觉特性和声音的主观评价 .....	29
§ 1 人耳的听觉特性 .....	29
§ 2 声音的响度 .....	31
§ 3 声音的吵闹度和感觉噪声级 .....	31
§ 4 计权声级 .....	32
§ 5 响度级和感觉噪声级的计算 .....	35
第四章 噪声的危害及其评价标准 .....	40
§ 1 噪声的危害 .....	40
§ 2 噪声评价标准的研究进展概况 .....	43
§ 3 国际标准化组织 (ISO) 推荐的噪声评价标准 .....	44
§ 4 其他的噪声评价标准 .....	53

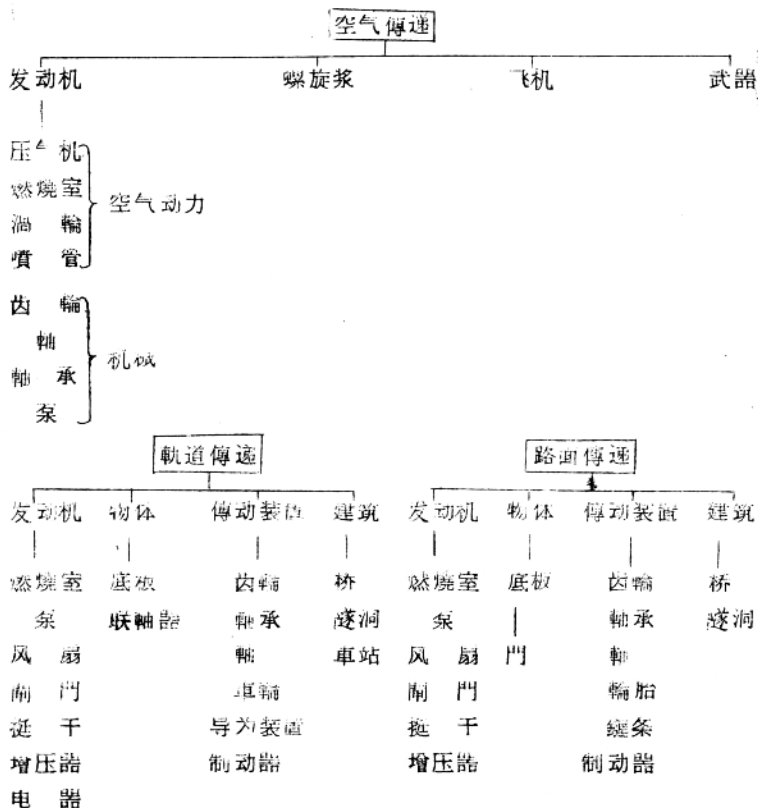
§ 5	我国工业企业噪声卫生标准(试行草案)	57
第五章	噪声在室内空间的传播	59
§ 1	声场声学计算的基本方程	59
§ 2	房间的声学性质	60
§ 3	室内声场的声学计算	61
§ 4	室内噪声级的降低	63
§ 5	混响时间	64
§ 6	声学计算示例	65
第六章	空中声传播	67
§ 1	噪声在开阔空间的传播	67
§ 2	点源	69
§ 3	点源列	71
§ 4	有限直綫声源	75
§ 5	綫声源和点声源列之例	77
§ 6	指向性图形、指向性因素、指向性指数	82
§ 7	空气动力性声源的类型	86
第七章	轴流压气机噪声	92
	航空声源的型式	92
§ 1	轴流压气机的噪声源	93
§ 2	典型的轴流压气机噪声频谱	99
§ 3	性能设计参数对噪声的影响	100
§ 4	用音速进口减小噪声	110
第八章	排气噪声	115
§ 1	排气噪声源	115
§ 2	排气噪声频谱	118
§ 3	单园喷口的气动力	125
§ 4	排气消音	131
§ 5	设计参数对排气噪声的影响	142
§ 6	单园喷口喷气掺混噪声预测	145

§ 7	同平面共轴排气的气动力 .....	147
§ 8	同平面共轴排气主要声源区的声功率 .....	156
第九章	燃气涡轮发动机壁面的声处理 .....	163
§ 1	发动机壁面声处理实例 .....	163
§ 2	吸声材料 .....	164
§ 3	声垫 .....	175
§ 4	影响声垫消音的因素 .....	176
§ 5	声垫的结构和性能 .....	180
	附：减小发动机噪声的概述 .....	185
	轴流压气机噪声控制方法 .....	185
	排气噪声的控制方法 .....	187

# 噪音基础与发动机噪音

## 第一章 噪音控制概论

### 噪声问题的范围



工 地
-----

风 钻  
敲击工具  
破碎机  
汽 锤  
汽 枪  
混凝土搅拌机  
推土机  
机动车  
起重机  
汽 笛

机 器
-----

纺 织  
编 织  
玻璃制造  
电 气  
木 工  
金 工  
家庭用设备  
加热与通风  
阀  
盥 洗 室

## § 1 引言

随着近代工业迅速发展，大型机械、动力设备和运输工具（汽车、火车、船舶和飞机等）的功率也增长很快，特别是自五十年代以来，航空和城市交通事业突飞猛进，宇航工业日新月异，引起了强烈的噪声问题。近代噪声已发展到严重地影响人们的生活、工作、休息、睡眠以及日常的社交活动，甚至危及人们的健康，引起人们强烈的反应，已成为普遍的社会问题。噪声已经成为同空气、水质污染相提并论的公害问题。在美国，约占总人口的40%的人经常因受到噪声干扰而苦恼；日本东京市约有52%的人，生活在大于环境标准的噪声环境中；我国上海市在1977年，人民群众对环境噪声污染来信来访的反应中，噪声仅次于工厂烟尘而占第二位。由此可见，噪声污染问题已越来越严重引起人们的深切关注。近二十几年来，世界上各工业先进的国家都在大力开展噪声控制的研究工作，取得很大进展。

自五十年代开始，噪声控制技术随着工业的发展而发展，逐渐发展成为一门自成体系的技术科学。人们自三十年代开始对建筑声学的一些问题开展研究工作以来，已逐渐积累起较丰富的经验和资料，为噪声控制这门技术科学打下了一定的技术基础（包括基本理论、术语、标准与规范等），特别是五十年代以来，电声学和无线电技术有了较大的发展，促使声学和振动的测试技术更加完善，对于人们从实践中

认识声源的性质以及从实践中总结控制噪声的有效方法提供了很好的工具，促进了噪声控制技术的进展。

研究噪声控制牵涉面很广，问题比较复杂。它不仅要研究噪声的物理性质，而且还要研究控制噪声的各种有效措施，以及人们对噪声的主观反应。首先要研究噪声产生的机理，从声源加以控制，这是最经济而又最有效的办法。当噪声从声源产生以后，所要研究的是声音在传播的途径中加以控制，使之消除或低到人们可以接受的程度。所谓接受程度就是噪声对人们心理和生理的影响到达可以容忍的程度。

## § 2 振动与声波

在我们的生活环境中，时时刻刻都能听到各种各样的声音，例如人的说话声，风的呼啸声，汽车的行驶声，机器的运转声，……，总之，不论在什么地方或者干什么事情，总有声音伴随着我们。声音与人们的关系如此密切，那么声音究竟是什么？它是怎样产生和传播的呢？具有什么特性？怎样度量？这些都是人们感兴趣的问题。

当我们用锤敲鼓，就会听到鼓声，这时用手去摸鼓面，就会感到鼓面在振动。如果用力压着鼓面使其停止振动，鼓声便没有了。由此可知，声音是由物体振动而产生的。

不仅固体振动产生声音，气体和液体振动也会发出声音。例如火车的汽笛声，就是蒸气通过汽笛时振动的结果，海水的波浪声，就是液体振动的结果。

声源振动发声，如果没有介质传播，我们也无法听到，就是说，声音只有在介质中才能传播。例如把钟放在装有抽气机的玻璃罩内，当罩内空气未抽走时，钟的滴答声清晰可闻。随着空气逐渐被抽走，滴答声逐渐减弱，当抽成真空时，那就什么也听不见了。这充分说明如果没有空气这个介质，声音就不能传播了。

声音不仅在空气中可以传播，在固体和液体中也可以传播。我们把耳朵贴近铁轨，就可以听到远处奔驰而来的火车声。

总之，振动的物体是声音的声源。振动在弹性介质（气体、固体和液体）中，以波的形式进行传播。这个弹性波叫做声波。一定频率范围内的声波作用于人耳就产生声音的感觉。

我们以图 1·1 为例来说明振动和波。

用手拨动一端固定的薄钢尺，它就会一来一往地摆动，这个有规则的摆动就叫振动。当钢尺往右边弯时，右边邻近处的空气因受到挤压而形成密部 I。这个密部 I 的空气又去挤压它右边邻近 II 处的空气，致使 II 处的空气又趋向于密部；当钢尺向左边弯时，右边就出现一个大空隙，I 处的空气就布满了这个大空隙，于是 I 处变得稀疏了，形成了疏部。这时，II 处的空气已经成为密部。II 处的空气继续向右挤压，使右边 III 处的空气趋向密部。当钢尺又向右边弯时，I 处空气又因受到挤压而成为密部，II 处的空气在挤压 III 处空气的过程中，自己便成为一个疏部，而把 III 处空气挤压成密部了。

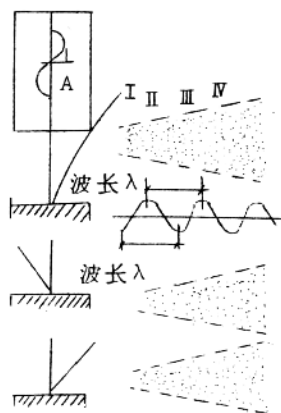


图 1-1 振动和波

由于空气的弹性和惯性，振动的薄钢尺使其周围的空气质点时而为密部，时而成为疏部，这种密疏的过程，在空气中以声波的形式，序地从钢尺附近的质点传到远处的质点，从扰动的地方以一定速度各个方向传播。因此，声波是介质中密度变化的波，即疏密波。

应当强调指出，在空气中传播的只是这种密疏的波动形式，空气身并不带走，它只是在原地振动。这正象把石子投入水中，形成水波，在水上的飘浮物只是来回振动，并不带走。这说明水并不流动，走的只是水波的波动形式。

我们知道，空气变密，压强就增高，空气变稀，压强就降低。因此，密部和疏部的传播过程，实际上也是压力传播的过程。这种变动压力传入人耳，使耳内鼓膜发生振动，传到听觉器官，就听到了声音。

如图 1-1 所示，钢尺每往返振动一次，空气就相应地产生一密疏的声波。每秒振动的次数叫做频率，用  $f$  表示，单位是赫兹，简称赫。为了可听见，振动必须具有一定的数值（听觉阈），其频率还



要在特定的範圍，它是隨听者的年齡而有所變化，典型可听见頻率的範圍，对年青人是 20 ~ 20,000 赫茲，对老年人则为 45 ~ 14,000 赫茲。高于 20,000 赫的声波叫超声，低于 20 赫的声波叫次声。超声和次声，人耳都听不见。

声波在介质中的傳播速度叫声速，通常用  $C$  表示，单位是米/秒，在常温 ( $20^{\circ}\text{C}$ ) 和标准大气压下，空气中的声速是 344 米/秒。同时，声速随温度的变化而变化。在  $0^{\circ}\text{C}$  时， $C = 331.5$  米/秒。在  $t^{\circ}\text{C}$  时，

$$C = 331.5 + 0.607t \text{ 米/秒} \quad (1.1)$$

即每增加  $1^{\circ}\text{C}$ ，声速增加 0.607 米/秒。

在不同的介质中，声速也是不同的。在空气中，声速是 344 米/秒；在水中是 1450 米/秒；在鋼鉄中是 5000 米/秒，因此，我們把耳朵贴在鋼軌上听火车的声音比在空气中听到的快得多。

在声波中，两个相邻的密部和两个相邻的疏部之間的距离叫波长，用  $\lambda$  表示，单位是米。

在声学中，波长  $\lambda$ ，频率  $f$  和声速  $C$  是三个很重要的量，它們之間的关系为：

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad (1.2)$$

在常温，当  $f = 20$  赫时， $\lambda = 17.2$  米，当  $f = 20,000$  赫时， $\lambda = 0.0172$  米。因此，在常温，人們听到声音的声波波长在 0.0172 ~ 17.2 米之間。显然，在不同介质中，同一频率波的波长也是不同的。

### § 3 噪声

振动可用频率、振幅、相位来表达其特性。噪声通常由不规则位相的多种频率组成，图 1.2 示出复杂波形的谐波分析，它可以很清楚看出，这不规则的图形是由許多不同频率和振幅的正弦波綜合而成。因此，从物理学观点来看，噪声是指声强和频率的变化都无规律、杂乱无章的声音。不过从广义来讲，凡是人們不需要的声音都属于噪声。如鋼琴声，是乐声，但对正在睡覺或看书的人就成了干扰的噪声。

按照起源的不同，噪声主要地可分为：空气动力性噪声，机械性噪声和电磁性噪声。空气动力性噪声是由于气体振动而产生的。当气体中有了涡流，或发生了压力突变等情况，就会引起气体的扰动，由于气体的非稳定过程，或者说由于气体的扰动而产生的噪声，就是空气动力性噪声。如通风机、鼓风机、空气压缩机、喷射器、喷气式飞机、火箭、汽笛以及向大气中排气放空所产生的噪声。机械性噪声是由于固体振动而产生的。在撞击、摩擦、交变的机械应力作用下，机械的金属板、轴承、齿轮、……

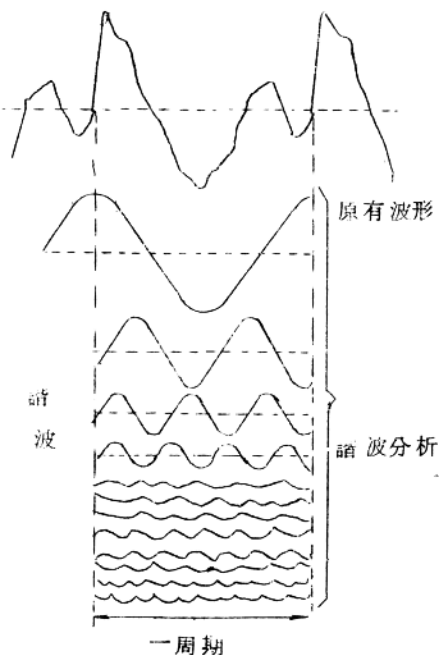


图 1-2 复杂波形的谐波分析

发生振动，就产生机械性噪声。如织布机、球磨机、车床等产生的噪声。电磁性噪声是由于磁场脉动、磁致伸缩引起电气部件振动而发出的声音。如发电机、变压器产生的噪声。

按频谱的性质，噪声又可分为有调噪声和无调噪声。有调噪声就是含有非常明显的基频和伴随着基频的谐波，这种噪声大部分是由旋转机械（如风机）产生的。无调噪声是没有明显的基频和谐波的噪声，如排气放空。

#### § 4 噪声控制的原则和措施

我们研究任何一个噪声控制问题，都必须把声源、噪声传播的途径以及接收者个人防护措施这三部综合起来合成一个整体来考虑。

下面对一些噪声控制的基本原则和有效措施作概括的介绍。

## 一、降低声源噪声：

噪声源从广义说是由于固体、液体和气体的振动所形成。固体的振动产生机械噪声；流体的喷注、湍流、紊流等则产生流体噪声。消除或降低振动源的振动强度是减弱噪声强度的根本措施。如果条件允许，在声源处即使局部地减弱了噪声，也可以使在中間傳播途徑中或接收处控制噪声的工作大大简化。要降低声源噪声需要弄清产生噪声的机理和规律，通过改进产品结构設計，采用先进的加工工艺，提高加工精度等措施来降低噪声的目的。

例如铆枪、气锤等发出的强烈打击声的噪声源，可以采用焊接代替铆接，用液压机代替气锤（锻造）的刀法降低噪声。用无轨电车代替有轨电车，用涡轮风扇发动机代替涡轮喷气发动机都是从声源上降低噪声的例子。用无声的或低噪声的設备和工艺代替高噪声的落后的設备和工艺是降低工厂企业生产噪声首先要积极创造条件予以实现的根本措施之一。

另外，机器运转时由于部件間的撞击和摩擦，或由于转动部件的动平衡性能的不完善而使机组产生振动因而造成輻射噪声。則改进机组的傳动系統設計，减少部件間的撞击和摩擦，搞好动平衡，适当提高机组壳体的刚度，机组底座增加减振措施，壳体外表面增加隔声层，这样就可以使机组振动降低，减少机组輻射的噪声，这也是从声源处降低噪声的办法。

## 二、控制噪声傳播的途徑

首先，在总体設計时对噪声源的位置要有合理的布局。例如，城市规划时要把工厂区和居民区分开；把产生噪声的車間布置在工厂区的下风向，机场安排在城市远郊区等等。其次改变噪声傳播的方向和途徑也是一种簡易可行的减噪措施，例如对于輻射中高频噪声的管道，把它的出口朝向上空，通过烟囱排入高空；或者通过地沟、地坑而后排入大气均可减低噪声。

通常机组的傳播途徑不外乎两种形式：一是空气傳声，另一个途徑是固体傳声。通常采用吸声、消声、隔声、隔振和阻尼等一些常用的噪声控制技术。

吸声是采用在房間內壁牆面增加吸声层，或在房間內懸掛空間吸

声体，目的是减少房間內混响声，从而降低房間內的噪声。

消声是在气流的进排气通道上增加消声器，使沿通道傳播的噪声降低而气流仍能自由流过，这是降低气流噪声的一项重要的技术措施。

隔声是用厚实的材料和构件隔绝噪声傳播的途径，使噪声不能傳播过去的办法，典型的隔声结构就是隔声罩、隔声墙、隔声屏等。

隔振是在机组底座下面增加隔振器或减振措施，使振动不能通过基础或地面傳遞出去。在工程上常用的减振措施有弹簧减震器、橡胶减震器、空气弹簧和液压减震器、以及软木和毡板等减震材料。

阻尼是采用阻尼材料粘塗在振动物体的表面上，使其振动减弱从而达到降低幅射噪声的目的。阻尼材料是一种內損耗、內摩擦大的材料如瀝青、软橡胶以及其他一些高分子涂料。

以上措施有各自的特点，相互間也有一定的联系，往往需要针对噪声傳播途径的具体情况，分清主次，互相配合，才能收到較好的效果。

### 三、接收者和个人防护措施

所謂接收者，通常指的是人們的听覺器官也有时指声学测试系統的傳声器或其他。

在某些情况下，噪声特別强烈，在采用上述措施后，噪声仍不能降低到容許标准以下；另外，有时工作人員必須进入强噪声的环境，这就需要采用个人防护的措施，防止强噪声对工作人員的听力损伤。例如采用在耳孔內塞防声棉、耳塞、风带耳罩或头盔等。这些防护工具主要起隔绝噪声的作用，使强烈的噪声不致进入耳而造成危害。

另外，在强烈噪声的車間內，分隔成若干个小隔声間，也是噪声隔绝的一种措施。对于某些特定場合，这种办法也是可行的。

## § 5 噪声控制的步驟

通常，我們遇到的实际工程的噪声控制問題，大致可以分为两类情况：一类是在工程設計和施工过程中沒有考虑到噪声問題，等到工程建成后在实际使用中才發現噪声强烈而影响生产和附近居民生活。对于这种情况，只能是在既成事实面前尽可能采取一些补救措施，有时，在有些場合下，可能导致无法处理的地步。还有一类是在工程設計阶段就考虑可能出現的噪声問題，这就要求根据工程的实际需要和可能，采用一些必要的噪声控制措施。由于在設計阶段就注意到噪声

問題，因而有可能得到比較合理的噪聲控制方案，從而得到較好的實際效果。

根據工程實際情況，一般應採取下列步驟來確定控制噪聲的方案：

一、弄清噪聲源的情況是解決噪聲控制問題的先決條件。重點了解聲源的噪聲頻譜特性及其傳播的主要途徑。有可能時，要進行噪聲現場測量，這對於分析噪聲產生的原因是很有幫助的。即使不能直接作噪聲現場測量，那就需要間接地以同類型設備或同類工程的噪聲資料做為設計必備的參考資料。

二、確定噪聲容許標準。根據不同地區和不同時間的噪聲容許標準，同聲源的噪聲資料進行對比，就可以確定要達到容許標準時所需要降低的噪聲值。

三、選擇控制措施。確定噪聲控制方案時，既要考慮聲學效果，也要注意施工要經濟合理和切實可行，對聲學效果和投資數額要心中有數，有時還有必要對噪聲控制方案進行必要的實踐。切不可主觀地認為：“採用措施總比沒有採取的要好一些”。盲目決定的方案不但可能造成投資的極大浪費，有時也可以使實際效果是無效的。可能的話，應多注意噪聲控制方案中帶全局性的問題，使設計做到經濟合理。

## 第二章 声音的基本特性

声音来自于物体的振动。振动在弹性介质中，以波的形式进行传播。声波在介质中传播，介质中质点的振动方向同声波的传播方向不一定相同，如果质点的振动方向和波的传播方向相平行，这种波称为“纵波”；如果两者相互垂直，则称为“横波”。空气中传播的声波就是纵波。

### § 1 声场与声压

声波传播所经过的空间，称为“声场”。

在无反射的自由空间中，点声源发出的声波向各方面作球面发散，这样的声场称为“球面声场”。在实际工作中，当距离比声源的辐射面尺寸大得多（5倍以上），则这种声源都可以近似地看做是“点声源”。

如果声波在无限长的管道中传播，或者声辐射面比波长大得多，在远离声源很远的某一有限的空间中，声波是以平面波的形式传播，这种声场称为“平面声场”。

在声音可以无反射地自由传播的空间，就称为“自由声场”。在普通房间内，有经由墙壁、顶棚和地面反射的反射声，在房间内的某一点处的声音是直达声同反射声相迭加的，这种房间内的声场就称为“混响声场”。

在声场中，声波引起空气质点振动，使大气压产生起伏，这起伏部分，即超过静压的量，称为“声压”，用 $p$ 表示。它的单位就是压力的单位。通常采用牛顿/米<sup>2</sup>（ $N/m^2$ ），也有用“微巴”做单位的，它们的换算关系是：

$$1 \text{ 牛顿/米}^2 = 10 \text{ 微巴}$$

七十年代以来，国际上把1牛顿/米<sup>2</sup>简称为1帕。做为声压的单位。

值得指出，声音在空气中传播时，空气时而变密时而变稀，声压实际上是随时间迅速起伏变化的。但由于每秒钟内这种变化的次数

很大，人耳辨別不出声压的起伏，听起来好象是一个稳定的声音。这就是說，实际效果只与迅速变化的声压（称为“瞬时声压”）的某种时间平均结果有关，称为“有效声压”。可以証明，有效声压是瞬时声压的均方根值，即把声压先平方，再随时间做平均，然后再开方。在实际应用中，除非特殊指明，一般說声压指的就是有效声压。

正常人耳刚刚能听到的声压（称听阈声压）是  $2 \times 10^{-5}$  牛顿/米<sup>2</sup>。通常房間的声压是 0.1 牛顿/米<sup>2</sup> 左右，大声喊叫的声压是 0.1 - 1 牛顿/米<sup>2</sup>，织布机的噪声声压是 3 牛顿/米<sup>2</sup>，很强的噪声，如凿岩机、风镐等的噪声声压可达 20 牛顿/米<sup>2</sup>，数值比听阈声压大一百多倍。这种声压使人耳产生疼痛的感觉。刚刚使人耳产生疼痛感觉的声压叫痛阈声压，其数值是 20 牛顿/米<sup>2</sup>。当声压达数百牛顿/米<sup>2</sup> 以上时，会引起耳朵出血，鼓膜损伤等。

声压是表示声音强弱的常用物理量，而且大多数声接收器（傳声器）也是响应于声压的。

## § 2 声能、声强和声功率

声波傳播时，介質中各质点要发生振动，因而具有动能，同时該处的介質也将产生形变，因而也具有弹性位能。所以声波傳播时，总共将能量由近及远地一层接一层地逐层傳播出去，这是波动的一个重要特性。

在垂直于傳播方向的单位面积上，在单位时间内通过的声能的多少，可以用来衡量声音的强弱，这个量称为“声强”，通常用  $I$  表示，单位是瓦/米<sup>2</sup>。

声源在单位时间内輻射出来的能量，称为“声功率”，通常用  $W$  表示，单位是瓦。

很明显，声源的声功率越大，声强也越大，声功率  $W$  和声强  $I$  的关系为

$$W = \oint_S I_n ds \quad (2.1)$$

式中  $S$ —包围声源的封閉面； $I_n$ —声强在元面积  $ds$  法綫方向的分量。

在自由声場，声波作球面輻射，此时

$$I_{球} = \frac{W}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

式中  $r$  — 距离, 米;  $I_{\text{球}}$  — 按球面平均的声强, 瓦/米<sup>2</sup>。

如声源在开敞空间的表面上, 声波只向半球面辐射, 此时,

$$I_{\text{半球}} = \frac{W}{2\pi r^2} \quad (2.3)$$

式中  $I_{\text{半球}}$  — 按半球平均的声强, 瓦/米<sup>2</sup>。

从式(2.2), (2.3)可以看出, 对声源来说, 声功率是恒量, 但声强在声场中的不同点却不同, 它与离开声源的距离  $r$  的平方成反比。

在自由声场中, 声强和声压的关系为

$$I = \frac{p^2}{\rho C} \quad (2.4)$$

式中  $\rho$  是介质密度;  $C$  是声速, 二者的乘积  $\rho C$  是传播声波的介质的特性阻抗, 单位是“瑞利”(MK<sup>2</sup>斯)。对于空气来说, 在标准大气压和 20°C 时,  $\rho C = 415$  瑞利。特性阻抗随温度和大气的变化而变化。

在自由声场中, 声功率和声压的关系为

$$W = \frac{4\pi r^2 p_{\text{球}}^2}{\rho C} \quad (2.5)$$

其中  $p_{\text{球}}$  是按球面平均的声压。

在半空间中, 声功率和声压的关系为

$$W = \frac{2\pi r^2 p_{\text{半球}}^2}{\rho C} \quad (2.6)$$

其中  $p_{\text{半球}}$  是按半球面平均的声压。

从听阈到痛阈, 声强的变化范围是  $10^{-12} - 1$  瓦/米<sup>2</sup>。

一些常见介质的密度  $\rho$  和声速  $C$  参看下表。

### § 3 声功率级、声强级和声压级

人耳的听觉范围非常宽广, 从听阈到痛阈, 声压的绝对值之比是  $10^6 : 1$ , 即相差一百万倍; 声强的绝对值之比  $10^{12} : 1$ , 即相差亿



表 2·1 常见介质的密度  $\rho$  和声速  $C$

介质名称	密度 $\rho$ (公斤/米 <sup>3</sup> )	声速 $C$ (米/秒)	特性阻抗 $\rho C$
空气 0°C	1293	331	428
空气 20°C	1205	343	413
水蒸气 (100°C)	0.596	405	241
水 (17°C)	$0.999 \times 10^3$	$143 \times 10^3$	$143 \times 10^6$
海水 (17°C)	$1.025 \times 10^3$	$151 \times 10^3$	$155 \times 10^6$
石油 (15°C)	$0.900 \times 10^3$	$133 \times 10^3$	$0.93 \times 10^6$
铜	$780 \times 10^2$	$610 \times 10^3$	$475 \times 10^6$
铝	$2.70 \times 10^3$	$640 \times 10^3$	$173 \times 10^6$
混凝土	$\sim 2.5 \times 10^3$	$\sim 50 \times 10^3$	$\sim 13 \times 10^6$
砖	$\sim 18 \times 10^2$	$\sim 35 \times 10^3$	$\sim 6.5 \times 10^6$

万倍。用声压的绝对值表示声音的强弱，或用声强的绝对值表示能量的大小很不方便。因此人们用一个成倍比关系的对数量——级来表示声音的大小，即声压级、声强级和声功率级。这正如用级来表示风的大小、地震的强弱一样。

级的普遍性的关系是

$$L = 10 \lg \frac{q}{q_0} \quad (2.7)$$

式中， $q$  是要测定其级数的物理量， $q_0$  是物理量的基准量，级的单位是“分贝”(dB)。

1. 声功率级 PWL: 当声源的声功率为  $W$  瓦时，相应的声功率级 PWL 为:

$$PWL = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (2.8)$$

式中， $W_0$ —基准声功率，取  $W_0 = 10^{-12}$  瓦。

在表 2·2 中给出了一些声源的典型数据。从表中可以看出大型宇宙火箭发射时的声功率高达  $4 \times 10^7$  瓦，而轻声耳语的声功率只有