

空气动力性噪声 与 消声器

方丹群 编著

科学出版社

空气动力性噪声与消声器

方丹群 编著

航空工业出版社

内 容 简 介

随着现代工业的飞速发展,噪声已成为国际公害之一。如何与噪声作斗争,是环境保护的重要课题。本书着重分析空气动力性噪声的产生机制,介绍典型空气动力设备的噪声特性,研究各种类型消声器的基本原理和计算、设计方法,并列举消声器的实际应用。

本书以实践经验为基础,同时吸收国内外先进技术,反映了当前本学科的基本状况。

本书可供声学 and 空气动力学工作者,机械、冶金、建筑、石油化工、国防工业等有关科研、设计、厂矿技术人员和工人,环境保护、劳动保护、工业卫生工作人员参考。

空气动力性噪声与消声器

方丹群 编著

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

石家庄地区印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年8月第一版 开本:787×1092 1/32

1978年8月第一次印刷 印张:30

印数:0001—20,150 字数:178,000

统一书号:13031·781

本社书号:1123·13—3

定价: 0.85 元

前 言

随着现代工业的发展,机器的功率越来越大、转速越来越高.它们所引起的噪声也就越来越强了.噪声使人烦躁难受,影响人们的正常工作和休息.人们常说:“十铆九聋”,这说明,长期在强噪声下工作的人听觉器官所受的影响.噪声还能影响整个人体的健康,如引起高血压、心脏病等等.噪声会分散人们的注意力,所以它又往往是造成各种意外事故的根源.此外,在强烈噪声影响下,灵敏的测试仪表会失灵,使得导弹和飞船的发射失败等等.因此,近年来噪声已被列为国际公害之一,如何与噪声作斗争是环境保护的一项重要课题.

本书主要讨论空气动力性噪声和消声器.空气动力性噪声是三大噪声源之一,也是噪声中影响面较大和危害较甚的一种.从影响城市安静的汽车、拖拉机排气噪声到严重危害人们身体健康的超声速飞行噪声,从现代建筑的通风空调噪声,到各厂矿到处遇到的通风机、鼓风机、空压机、汽轮机、内燃机噪声,都属于空气动力性噪声.本书第一章介绍声波和噪声的基本知识;第二章分析空气动力性噪声的产生机制,并介绍典型空气动力设备的噪声特性;第三章研究控制空气动力性噪声的主要技术途径——各种类型消声器的基本原理和计算方法;第四章介绍消声器的实际应用.

在本书写作过程中,中国科学院物理研究所马大猷同志多方予以指导,北京市劳动保护科学研究所孙家其同志给予了有益的帮助,并编写了部分章节,北京市劳动保护科学研究所的领导和有关同志也给予支持.特此致谢.

目 录

第一章 声波与噪声的基本知识	1
§ 1.1 振动与声波、噪声	1
1.1.1 振动与声波	1
1.1.2 噪声	4
§ 1.2 噪声的物理参数	5
1.2.1 声压,声强,声功率	5
1.2.2 级和分贝	7
1.2.3 频带	12
§ 1.3 声波的传播	14
1.3.1 声波的反射、折射、衍射和干涉	14
1.3.2 声波的衰减	17
§ 1.4 噪声对人体的影响和噪声的主观评价	19
1.4.1 噪声对人体的影响	19
1.4.2 噪声的主观评价	21
§ 1.5 噪声测量	27
1.5.1 噪声测量仪器	27
1.5.2 噪声测量的方法和计算	34
§ 1.6 噪声容许标准	46
1.6.1 用噪声评价数 NR 表示的噪声标准	46
1.6.2 用 A 声级表示的噪声标准	54
第二章 空气动力性噪声	59
§ 2.1 空气动力性噪声的形成及声源的类型	59
§ 2.2 风扇噪声	62
§ 2.3 喷气噪声	72
§ 2.4 周期性排气噪声	81
2.4.1 内燃发动机排气噪声	83

2.4.2	容积式压缩机和鼓风机的噪声	91
2.4.3	凿岩机排气和汽笛噪声	94
§ 2.5	其他空气动力性噪声	94
2.5.1	飞行噪声	94
2.5.2	燃烧噪声	101
2.5.3	枪炮噪声	101
2.5.4	风声	103
第三章	消声器的基本原理和计算	106
§ 3.1	概述	106
§ 3.2	吸声材料和吸声结构	110
3.2.1	吸声材料	110
3.2.2	吸声结构	121
§ 3.3	阻性消声器	134
§ 3.4	抗性消声器	140
3.4.1	单室扩张室式消声器	143
3.4.2	外接管双室扩张室式消声器	147
3.4.3	内接管双室扩张室式消声器	151
3.4.4	扩张室式消声器消声频率特性的改善	153
3.4.5	共振消声器	155
3.4.6	干涉消声器	162
3.4.7	穿孔屏、弯头、截面积突变引起的噪声降低	163
3.4.8	喷雾消声	166
§ 3.5	阻抗复合消声器与微穿孔板消声器	169
§ 3.6	气流速度与消声器消声性能的关系	173
第四章	消声器的应用	189
§ 4.1	排气放空消声器	189
§ 4.2	通风、空调消声器	202
§ 4.3	内燃机排气消声器	214
§ 4.4	空压机和鼓风机消声器	214
§ 4.5	喷气式飞机和火箭的消声	228
4.5.1	飞行中的喷气式飞机喷气的消声	228
4.5.2	喷气式飞机起飞或地面运转的消声	232

4.5.3 火箭噪声的降低	234
附录 1 常见管路的阻力损失(压力降)	235
附录 2 一些吸声材料的热学性能参数	241
附录 3 穿孔率与孔径、孔心距之间的关系	242
附录 4 穿孔板吸声结构的共振频率计算图表	243
参考文献	244

第一章 声波与噪声的基本知识

§1.1 振动与声波、噪声

1.1.1 振动与声波

在我们的生活环境中，每时每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，就是蒸汽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，钟的滴嗒声清晰可闻，随着空气逐渐被抽走，滴嗒声逐渐减弱，当抽成真空时，那就什么也听不见了。这充分说明，若没有空气这个介质，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。

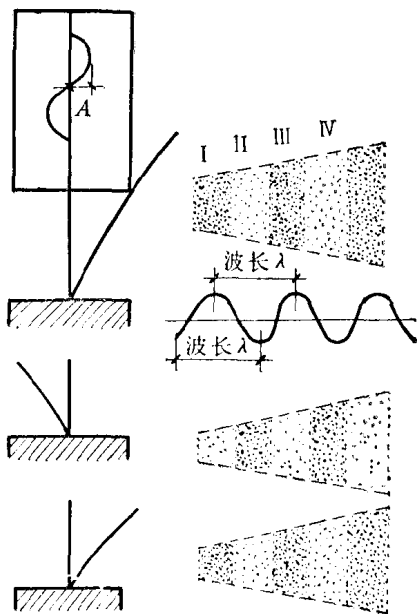


图 1.1 振动和波

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,使右方 III 处的空气趋向密部。当钢尺又向右边弯时, I 处的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 处的空气挤压成密部了。

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成为密部,时而成为疏部,这种密疏的过程,在空气中以声波的形式,顺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向各个方向传播。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,空气本身并不传走,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,并不传走。这说明水并不流动,传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。这种变动的压力传入人耳,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一疏的声波。每秒振动的次数叫做频率,用 f 表示,单位是赫兹,简称赫。对人来说,只有 20—20000 赫的振动才产生声音的感觉。高于 20000 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。

声波在介质中的传播速度叫声速,通常用 c 表示,单位是米/秒,在常温(20℃)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℃时, $c=331.5$ 米/秒。在 θ ℃时,

$$c = 331.5 + 0.607 \theta \text{ (米/秒)}. \quad (1.1)$$

即每增加 1℃,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；在钢铁中是 5000 米/秒。因此，我们把耳朵贴在钢轨上听火车的声音比在空气中听到的快得多。

在声波中，两个相邻的密部或两个相邻的疏部之间的距离叫波长，用 λ 表示，单位是米。

在声学中，波长 λ ，频率 f 和声速 c 是三个很重要的量，它们之间的关系为

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

在常温，当 $f = 20$ 赫时， $\lambda = 17.2$ 米，当 $f = 20000$ 赫时， $\lambda = 0.0172$ 米。因此，在常温，人们听到声音的声波波长在 0.0172—17.2 米之间。图 1.2 为常温下空气中声波波长与频率的关系。

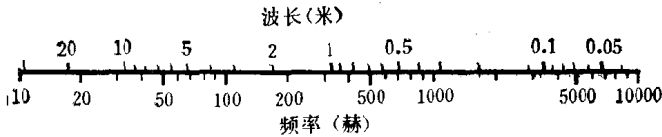


图 1.2 在常温下，空气中声波波长与频率的关系

显然，在不同介质中，同一频率声波的波长也是不同的。

1.1.2 噪 声

什么是噪声？噪声是声波的一种，具有声波的一切特性。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，凡是人们不需要的声音都属于噪声。如钢琴声，是乐音，但对正在睡觉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、……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。

§1.2 噪声的物理参数

通常,人们用声压(声压级),声强(声强级),声功率(声功率级)以及频率(频带)等物理量作为噪声的物理参数。

1.2.1 声压,声强,声功率

声波引起空气质点振动,使大气压产生起伏,这个起伏部分,即超过静压的量,称为声压,用 p 表示,单位是牛顿/米²。一般使用时,声压是指有效声压(即方均根值)。

正常人耳刚刚能听到的声压(称听阈声压)是 2×10^{-5} 牛顿/米²,普通房间的声压是0.1牛顿/米²左右,大声喊叫的声压

是 0.5—1 牛顿/米², 织布机的噪声声压是 3 牛顿/米², 很强的噪声, 如凿岩机、风铲等的噪声声压可达 20 牛顿/米², 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²。当声压达数百牛顿/米²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(传声器)也是响应于声压的。

声波作为一种波动形式, 当然具有一定的能量, 因此我们也常用能量大小来表征声辐射的强弱。这就引出了声强和声功率两个物理量。

声强是在垂直于声波传播方向上, 单位时间内通过单位面积的声能, 通常用 I 表示, 单位是瓦/米²。

声功率是声源在单位时间内辐射的总声能量, 通常用 W 表示, 单位是瓦。

声功率 W 和声强 I 的关系为

$$W = \oint_S I_n dS, \quad (1.3)$$

式中 S ——包围声源的封闭面; I_n ——声强在元面积 dS 法线方向的分量。

在自由声场(即声波无反射地自由传播的地方), 声波作球面辐射, 此时

$$I_{\text{球}} = \frac{W}{4\pi r^2}, \quad (1.4)$$

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

如声源在开阔空间的地面上, 声波只向半球面辐射, 此时,

$$I_{\text{半球}} = \frac{W}{2\pi r^2}, \quad (1.5)$$

式中 $I_{\text{半球}}$ ——按半球面平均的声强, 瓦/米²。

从式(1.4), (1.5)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

$$I = \frac{p^2}{\rho c}, \quad (1.6)$$

式中 ρ 是介质密度； c 是声速；二者的乘积 ρc 是传播声波的介质的特性阻抗。对于空气来说，在标准大气压和 20°C 时， $\rho c = 413$ 瑞利。特性阻抗随着温度和大气压的变化而变化。

在自由声场中，声功率和声压的关系为

$$W = \frac{4\pi r^2 p_{\text{球}}^2}{\rho c}, \quad (1.7)$$

式中 $p_{\text{球}}$ 是按球面平均的声压。

在半空间中，声功率和声压的关系为

$$W = \frac{2\pi r^2 p_{\text{半球}}^2}{\rho c}, \quad (1.8)$$

式中 $p_{\text{半球}}$ 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²。

1.2.2 级和分贝

从听阈到痛阈，声压的绝对值之比是 $10^6:1$ ，即相差 1 百万倍；声强的绝对值之比是 $10^{12}:1$ ，即相差亿万倍。用声压的绝对值表示声音的强弱，或用声强的绝对值表示声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。

它们的数学表达式为

声压级

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \text{ (分贝)}, \quad (1.9)$$

其中 $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ 牛顿/米², 为基准声压;
声强级

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ (分贝)}, \quad (1.10)$$

其中 $I_0 = 10^{-12}$ 瓦/米², 为基准声强;
声功率级

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ (分贝)}, \quad (1.11)$$

其中 $W_0 = 10^{-12}$ 瓦, 为基准声功率。

p_0, I_0 分别是 1000 赫的听阈声压及与其相应的声强。用声压 p 与 p_0 相比, 取常用对数乘以 20, 就得到该声压的声压级; 用声强 I 与 I_0 相比, 取常用对数乘以 10, 就得到该声强的声强级。

声压级, 声强级和声功率级的单位是分贝。分贝是级的单位, 没有量纲, 来源于电讯工程。在电讯工程中, 常用两个功率比值的常用对数表示放大器的增益、信噪比等。这样得出的单位叫贝尔。分贝是贝尔的十分之一。因此分贝就是 10 乘以两个功率比值的常用对数的单位。如一个四端网络的输入功率为 W_1 , 输出功率为 W_2 , 该四端网络的增益用贝尔表示为 $\log \frac{W_2}{W_1}$, 用分贝表示则为 $10 \log \frac{W_2}{W_1}$ 。当 $W_1 = 0.1$ 毫瓦, $W_2 = 1$ 毫瓦时, 功率增益为

$$10 \log \frac{1}{0.1} = 10 \text{ 分贝}.$$

当 $W_1 = 1$ 瓦, $W_2 = 10$ 瓦时, 功率增益仍为 10 分贝:

$$10 \log \frac{10}{1} = 10 \text{ 分贝}.$$

从这里看出,以分贝表示的增益并不代表四端网络放大的实际功率,也不代表输入功率与输出功率的实际数值,而只是表示输出功率对输入功率的比值.另一方面,10分贝的增益意味按10比1的增加,20分贝的增益意味按100比1的增加,30分贝的增益意味按1000比1的增加,…….

在电学中,当阻抗是常数时,功率比值等于电压比值的平方,即

$$\frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2,$$

式中 V_2 和 V_1 分别是输出和输入电压. 于是

$$10 \log \frac{W_2}{W_1} = 10 \log \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 = 20 \log \frac{V_2}{V_1}.$$

在声学中,声功率与电功率相对应,声压与电压相对应,于是

$$L_w = 10 \log \frac{W_2}{W_1} \text{ (分贝)}, \quad (1.12)$$

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2 = 20 \log \frac{p_2}{p_1} \text{ (分贝)}. \quad (1.13)$$

用参考级 W_0 代替 W_1 、所测声功率 W 代替 W_2 ,代入式(1.12),就得到式(1.11);用参考级 p_0 代替 p_1 、所测声压 p 代替 p_2 ,代入式(1.13),就得到式(1.9).

从听阈到痛阈,声压的变化为 2×10^{-5} —20 牛顿/米²,声强的变化为 10^{-12} —1 瓦/米²,将它们分别代入式(1.9),(1.10),可以得出声压级、声强级的变化范围皆为0—120分贝.

图 1.3 给出了声压级与声压、声强级与声强、声功率级与声功率的换算列线图.

可以看出,引入了级的概念后,可以把声压的数百万倍的变化范围、声强和声功率的数亿万倍的变化范围,改变为0—

120分贝的变化范围(即使声压大大超过痛阈达数百牛顿/米², 声功率上万瓦的喷气式飞机的强烈噪声, 声压级也不过 140—150 分贝, 声功率级也不过 160 分贝). 这样, 既方便又符合生理感觉. 因此, 这种表示方法已为人们所公认.

分贝既然是对数单位, 那么分贝的计算就不能按一般的自然数运算, 它应当依照对数法则, 即按照能量叠加规律进行

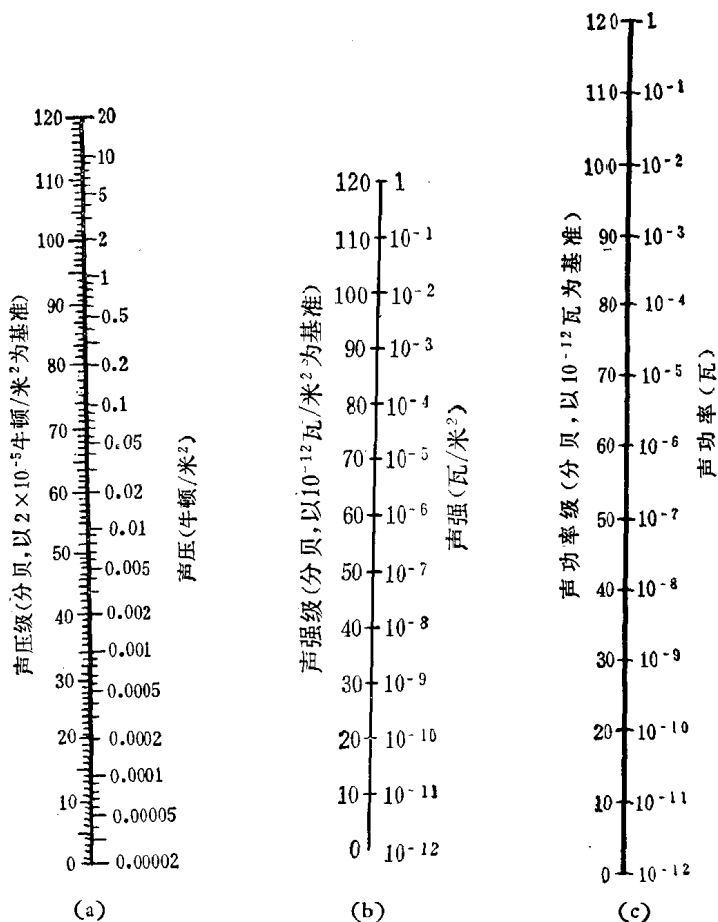


图 1.3 级的换算列线图