声在大气中的远距离传播及声吸收*

H. E.贝斯 (Bass)
(美国　密西西比大学)

对于室外远距离传播问题，我们在美国密西西比大学已经研究了十年。今天，我将介绍这一领域中的某些最新概况。

首先，限定所讨论的声传播距离是超过几公里，而又小于上层大气的波导作用产生明显影响的非常长距离。讨论的频段为 1Hz 到100KHz。

在这些限定条件下，声传播将受到下列因素的影响：声扩散的影响，当声传播的距离超过几个波长时，绝大多数的声波似为球面波，即使是设计很好的指向性号筒，其发出的声波传播几百来米后也呈球面扩散。因此，一般认为声波振幅是以$1/r$扩散降低，取对数表示即是每增加一倍距离降低 6dB。在近距离传播时，扩散的影响十分重要。但是，对于远距离传播，这种影响就不重要了。

大气中微粒子对声波的散射影响，仅仅减弱声的指向性。在远距离传播时，所有声波都呈球面扩散，受散射的影响极小。

大气折射的影响。通常，大气的温度随高度的增加而降低。而声速是与温度的平方根成正比。所以必定存在某种程度的折射。声波向上弯曲就减小地面附近的声振幅；向下弯曲就增加地面附近的声振幅。处理声折射的方程与光折射方程相同。需要指出，折射对于在几公里到几百公里距离内传播的声波振幅的测量有着相当重要的影响。

影响声传播的另外两个因素是地面的衰减和反射。在我们限定的传播距离和频段内，这两个因素是起主导作用的。最后，非线性因素将使声在传播过程中发生变化。

今天，我先讨论声衰减的机理。第一种机理是粘滞拖曳、热传导和质量的热扩散。这些现象可以用气体功能理论来加以讨论。这就是通常所说的经典吸收。在低于分子振动频率的频段内，这种衰减随频率的平方而增加。对此，Rayleigh在19世纪就准确地做了描述。这里，我们从稍稍不同的角度来讨论这种吸收。请设想，分子在受到冲击之前，其分布间隔是可移动的。在碰撞时，信息在两相碰分子间传递。如果声波的波长大于分子的碰撞距离，有关声波的所有信息将同相位地传至后一层分子。但当频率增高波长减小时，越来越多的分子在受到碰击后可移动半波长的距离，并受到后一次碰击的影响。结果会传递错误的信息，导致声波的抵消。在低频段，分子在受碰击前移动半波长的概率较小，因此吸收也小。

然而，在接近可听声频段内，经典的衰减将不如分子弛豫引起的衰减重要。我们知道，分子内部的能态也携带有局部声温的信息，这种信息也会传递到下一层分子。但是，与平移自由度不同，内自由度归还信息的速度相当缓慢。因此，存在更大的概率，引起信息相位的改变，导致信息屏蔽和声波衰减。

每一种内能模式对于信息传递都有一个特征时间，称为弛豫时间。如果声的周期大于驰豫时间，只有少量的信息损失。反之，大部分以内能模式贮存的声能将会损失（或更确切地说，被以随机的相位传递）。

* 该文为贝斯教授在1986年11月于同济大学所做的学术报告。

在空气中有两种重要的内能模式。其一是旋转能，这种模式在可听声波的时间尺度内能够非常迅速地传递。以至它能象平移那样处理，同样以 f^2 的依赖关系对经典吸收产生贡献。

其二是振动能，它的传递更加复杂，又可分为两种传递类型：从振动能向平移能的传递和从一种模态的振动能向另一种模态的振动能的传递。为了确定所有这些能量传递的影响，必须知道能量传递的时间函数和振动弛豫时间。这里不介绍具体的处理过程，仅仅给出某些结果。

还需指出，由于水能催化振动能的传递。因此，湿度也是影响弛豫时间的重要因素。

通常，经典的和弛豫的损失对远距离声传播是重要的。不过，还存在另外三种机理，在某些条件下，它们也可能是重要的。

当声波通过充满微粒物质的空气时，微粒对声波施加粘性迟滞产生某些声吸收。吸收量依赖于微粒的尺寸和它们的密度。此外，当声波通过水滴重雾时，随声波产生的局部温度变化引起雾滴的蒸发和再凝聚。其周期也有一特征弛豫时间，从而导致声能损失。

最后一种吸收机理是很少了解的，即声波通过某种放射性气体时的情况。对于这种机理目前还无理想的解。显然，当局部温度增加时，某些振动能得到增加的分子会发射红外光子。这些红外光子在重新被吸收之前，有的会传递相当长的距离引起信息的相位失真。但是，这种概率的大小还不清楚，尚需进一步的研究。

下面讨论地面反射的问题。当声波从刚性表面反射时会有180度的相位差。如果传播的距离与源和传声器的高度相比是足够长的话。直达波和反射波有相同的声径长度。两者相互抵消，形成声学影区。不过，即使对于非常硬的表面，由于湍流的存在引起声波相位起伏，总使一些声波透入影区。

在实际生活中，理想刚性边界不存在。甚至，从物理专家的观点来看，一个完全反射的表面也有许多小孔。实际的边界不可能反射所有的入射声能，也不会产生恰恰180度的相位偏移。反射面要用复面阻抗来描述。对球面扩散源，复表面使波的解包括四部分：直达波、反射波、地波和表面波。

声地波相当于电磁理论中的地波。例如，一个AM无线电信号沿地球表面弯曲传播，这个信号称为地波。声地波也有相同的特性，它是柱状扩散的波。它的强度随传播距离线性下降。

表面波就更常见了，其幅度在表面处随距离的平方而降低。在表面的上下方随距离指数消失。表面波的速度与地面的 Rayleigh 波相同。

如果表面的复阻抗已知，经过繁琐的数学运算就能严格地求得边界邻域内的声波幅度。因此，问题就归结为确定表面的复阻抗了。

物理上可把地球表面看成一种弹性媒质，存在许多不同深度和直径的小孔。对草地，这些孔是草根，深入地下数厘米。

对高频，这些孔对声波透明，波在孔内被运动吸收。对低频，孔的影响较小，其阻抗弹性系数决定。对非常低的频率，表面可认为是硬的，接近于全反射情况。

对于那些不被反射在地球内呈现为地震信号的波的研究是值得注意的。研究由空中传播的声波产生地震信号的过程，能更好地了解孔和弹性系数对复阻抗的作用。从应用的观点来看，我们已经知道，频率低到20—30Hz 的地面声阻抗是与表面的流阻密切相关的。

使声波产生变化的最后一种机理是非线性。声波表示压强随时间的变化。这种压强变化产生伴随的温度变化。而声速是随温度的平方增加的。因此，波形中压强最大的点比压强低的点传播更迅速。这导致波的持续

(下转第41页)

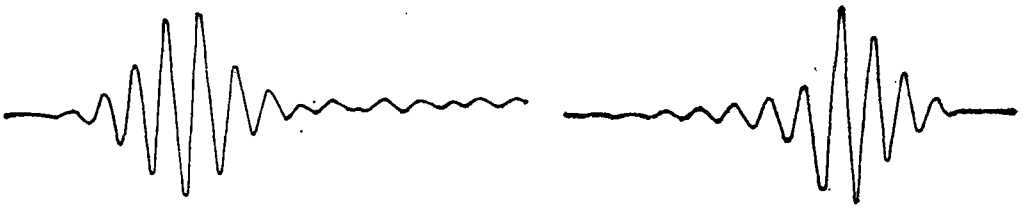


图5 向PVDF换能器的输入电信号(a)及由换能器的输出电信号(b)

由于PVDF超声换能器具有宽带特性，它们非常适合于超声测量中的脉冲重叠技术。我们知道，用脉冲重叠技术精确测量媒质中的声速时，希望通过媒质后的脉冲信号形状尽可能保持不变。PVDF超声换能器具备了这种性能。图5(a)为PVDF换能器的输入电信号波形，而图5(b)为PVDF换能器的输出电信号波形。两者几乎完全一致。换能器的这种性能在超声频谱测量技术中也是十分重要的。

五、结　语

用PVDF压电薄膜制成的发射、接收超声换能器具有宽频带、高灵敏度的特点。该换能器的频率响应与其后衬的声阻抗、PVDF膜的厚度和层数密切有关。例如，在我们试制的条件下，用铜片作后衬，由三层PVDF膜组成发射换能器，由二层PVDF膜组成接收换能器共同使用时，频率响应和灵敏度最佳。

兵器部53所为本实验提供了性能良好的PVDF压电薄膜，我所冯若副教授对本工作给予关心和帮助，在此，向他们致以衷心感谢。

参 考 文 献

[1] Platte, M., Acustica 54(1983)23
[2] Swartz, R. G., Plummer, J. D., IEEE Trans. ED-26(1979)192
[3] Sessler G. M., J. Acoust. soc. Am. 70(1981) 1596
[4] 陈兆华，王耀俊，全国生物声学会议报告集（1983.4,西安）。
[5] Chabachi, N., Sannomiya, T., 1977 IEEE Ultrasonics symposium proceedings, 119.
[6] 王耀俊，陈兆华，王志强，第二届应用声学学术会议论文集(1984.重庆)，212。
[7] 冯　若，陈兆华，朱正亚，戴焕平，声学学报 10 (1985)No.5.285。

(上接第43页)

时间增加和波前陡直。陡的波前可以认为是高频畸变成分的产生。由于吸收随频率增加，非线性波中能量衰减更快。

压强脉冲的时间延长对高能量的脉冲有着十分引人注目的影响。例如，雷鸣闪电在经过1公里的大气传播后，基本频率从1.5 KHz移到100Hz。

至此，已经讨论了影响声波在大气中传播的各种因素。理论结果与相应的实验测量数据相比较，两者相当一致。

声在大气中的传播涉及到许多物理问题。在过去几年中，大部分物理问题已经得到很好的解决。不过，还有一些问题，其中包括非常低频段的声波的传播，在这个频段中波的幅射损失和重力影响是重要的，需要进一步的研究。

（王佐民整理未经报告人阅稿）