

法国声学家协会代表团
访华学术报告译文集

中国科学院声学研究所情报室

· 北京 ·

1984年10月

目 录

- (1) 法国航空动力噪声研究最新情况…龚特—白卢 (1)
- (2) 利用缩尺模型预报公路交通噪声……………诺塞 (8)
- (3) 用计算机实现超声场的重建……………卢斯等 (15)
- (4) 听觉功能的客观检查方法……………布热 (22)
- (5) 法国的音乐声学研究……………易塞 (27)
- (6) 唇运动与言语发音的关系……………波埃等 (30)
- (7) 法国的声学标准 (提纲) ……………莱曼 (39)

法国航空动力噪声研究最新情况

龚特-白卢教授 (G. Comte-Bellot)

(里昂中心校埃居利流体力学实验室)

我在里昂中心校工作，这是一所工科大学。我感兴趣的是湍流和声学问题。

我想先向大家介绍一下，涉及到湍流和声学现象同时出现的，都有哪些主要的课题。首先一点是，湍流会产生噪声，我们称之为湍流产生的空气动力噪声。其次，湍流对于研究声波通过湍流的传播问题也是很重要的。因此，我们进行了喷注噪声的研究。而我们目前所拥有的设施使我们能进行亚音速喷注的研究，其中包括单个喷注和同轴喷注的研究，这些喷注问题对于飞机工业都是很重要的。所研究的喷注可以是没有扰动的，也可以是有扰动的，例如被飞机的燃烧不稳定性所扰动。此外，我们也对机翼噪声和风扇噪声感兴趣。我们研究湍流或流的不均匀性所产生的影响，并发现噪声级增加了。我们还研究声波通过随机媒质，特别是运动湍流的传播问题。我想，从某种意义上来说，这最后一个课题与我今天早上在这个研究所（中国科学院声学研究所）看到的一个研究课题有关，这就是在海洋中当出现温度跃层，即出现内波时，声波的传播问题。

今天我打算从我们的研究课题中挑两个题目，向大家介绍一下我们的工作。先向大家介绍我们对单个喷注进行的部分实验情况，其中利用了二点测量法，即声强测量法。还要介绍我们在声波通过湍流的传播研究中所获得的一些结果，这一工作用了单点测量法和二点测量法。

先从亚音速喷注噪声谈起。我们所测试的喷注，其速度是135m/s，喷口直径是2cm。喷注噪声级和噪声谱当然是大家熟知的。但是我们还知道，喷注噪声是一种间歇现象，因此我们用三个传声器来测量声能流，从而对声强矢量作二维测量。喷注噪声谱的最大值在5kHz左右，传声器间的距离是按这一频率来选取的。你们中间有些人可能对声强这一概念不太熟悉，我在这儿提一下它的定义。讨论声场从三个方程出发：质量守恒、动量守恒和熵守恒。对于线性声学、无粘滞和无热传导的流体以及没有流动的情况，这些方程决定了喷注外的声场，可以由此研究噪声辐射的情况。由这些方程还可以得知，声能的瞬时变化等于声能通量。单位面积的声能通量等于声压和流体（质点）速度的乘积，后者称作声强。下面向大家解释一下我们如何测得这个声压 p 和速度 u 的乘积。还是回到刚才提到的三个传声器装置。声波入射到传声器上。声强垂直于平面波，具有两个分量，分别沿 x 轴和 y 轴。三个传声器沿这两个轴放置：1—2沿 x 轴，1—3沿 y 轴。对声强的两个分量分别应用声强定义，并利用 $u \propto \frac{dp}{\rho r}$ 的关系式。如果传声器1和2之间的距离，与声波波长相比，较小的话，那么可以得

到下列近似式：

$$p \approx \frac{1}{2} (p_1 + p_2); \quad u \approx -\frac{1}{j\omega\rho} \cdot \frac{p_1 - p_2}{\Delta r}$$

$$I_{12} \approx -\frac{(p_1 + p_2)}{j\omega\rho \cdot 2r} \int (p_1 - p_2) dt$$

两个传声器中点处的声压可以用这两个传声器声压之和的一半，即两点声压的平均值来近似；声压梯度可以用两声压差除以两传声器间距来近似。因此，如果我们取两声压之和 $p_1 + p_2$ ，及声压差的时间积分除以距离，就得到声强矢量 I 在这个轴(1—2)上的分量。当然，对于沿1—3轴的分量，也有同样的表达式。当声场是稳定的时候，还可以作一些简化。这里的稳定是在平均的意义上说的，声场可以有变化，但平均而言是稳定的。简化有以下三项：

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} p_1^2 &= 0, & \frac{d}{dt} p_2^2 &= 0, \\ \frac{d}{dt} p_1 p_2 &= 0 & \text{或} & \quad p_1 \frac{d}{dt} p_2 + p_2 \frac{d}{dt} p_1 = 0 \end{aligned}$$

因此，实际上我们只需测量声压 p_1 和 p_2 。当我们考虑傅里叶空间时， p_1 和 p_2 就与信号的互功率谱相联系起来：

$$I_{12}(\omega) = \text{Im} [G_{12}] / 2\rho\omega \cdot \Delta r$$

其中， Im —取虚部； G_{12} —传声器1和2信号间的互功率谱。由于 I 这个量必须是实的，我们必须取互功率谱的虚部。今天早上我参观声学所水池时，看到有一台双通道傅里叶变换分析器，正在求幅度和相位。而我们这里，感兴趣的是虚部。因此，当我们作测量时，我们由传声器1测到声压信号 p_1 ，由传声器2测到声压信号 p_2 ，再把它们送入双通道傅里叶变换分析器，求其互谱的虚部。这是对于传声器1和2的情况，对于传声器1和3当然也有类似的表达式和测量。

以上谈的是理论，在实际中会有一些误差。下面简单地谈一下修正误差的问题。第一项需要修正的是声压梯度近似。例如，当声波入射到传声器1—2上时，如果两传声器相距较远，则其声压差和间距之比对于声压梯度的近似并不好。当然，如果1和2靠在一起，近似是好的，但是由于我们需测出声压差，必须把它们分开放置。最佳的情况是把两个传声器放得相距不太远。可以推导出平面波时的修正公式。在修正公式中有一个因子 $\cos\alpha$ ，其中 α 是声强矢量 I 与轴线1—2间的夹角。当 I 沿1—2轴方向时，误差较大；当 I 垂直于1—2轴时，没有误差。因此，当我们由1和2的信号取梯度时， I 相对于这两个传声器的方向是很重要的。在实验中，我们是根据感兴趣的频率来选取传声器间距的。当这一距离是波长的 $1/12$ 时，这项误差不大于5%。第二项需要修正的是传声器之间的失配问题。我们用的是日本制造的驻极体传声器。这种传声器非常小，因此不会影响声场，不会造成声波的衍射，同时它们随时间的变化很小。但是很难得到两个完全一样的传声器。有人在1981年研究了这个问题，并给出了修正公式。第三项修正是确定间距 Δr 。这个量并不就是两个传声器中心间的几何距离，因为对于驻极体传声器，其灵敏度最高的部分不完全对称。我们的做法是，在一个管子的出口处得到平面波，使传声器1和2或1和3垂直于平面波，然后转90°，测量两传声器间的时间延迟，把所有信号送到数字系统中，并用一个小型数字计算机作处理。下面给大家介绍一下，在应用了这些修正后，我们所得到的结果。我们对4kHz和8kHz的频率作了测量。如果把传声器

组围绕喷注移动,可以得到声能通量图,它是通过喷注的平面上的声强(图)。我们很喜欢用这种图,因为可以由此直观地看出噪声从哪里辐射出来。如果把测得的 I 矢量箭头反向延长交到喷注轴上,那么就可以看到,喷注最活跃的部分在离喷口4倍直径到10-12倍直径间。因此,噪声大部分来自处于喷口下游位置的喷注具势核。为了进行比较,我们还对扰动喷注进行了实验。同样把 I 矢量箭头延长,可以看出,噪声来源比前一种情况更靠近喷口。对于这两种情况,我们还测量了声强的时间过程,因为声强图只是平均值。对于两种方向(1—2和1—3)都作了测量。我们看到一些有意思的现象。一是时间过程曲线出现很大的峰值,这表明喷注噪声是间歇式的。二是沿1—3方向的峰值看上去比沿1—2方向的小。三是扰动喷注噪声峰值比无扰动喷注噪声的大。最有趣的一点是,对于扰动喷注,两个方向上峰值出现的时间大致相同。我们还没有分析完所有的测量曲线,但是我们认为,喷注噪声可能来源于旋涡的强烈撞击。有些人正在谈论大尺度旋涡的碰撞问题。两个旋涡碰在一起后形成一个旋涡,这时就产生噪声辐射,并且更趋于无指向性。从噪声的观点来看,原始喷注的研究比较困难,因为旋涡结合在一起的地点是随机的。而对于扰动喷注,存在着有序性,大尺度旋涡或多或少在经选择的地点结合在一起。这就是为什么我们在实验室要研究扰动喷注的原因,我们试图在湍流中加入有序性,使声场的研究变得更容易些。我们目前当然仍在继续进行这类实验研究工作。同时,据我所知,在欧洲的许多地方以及在美国,人们也在研究扰动喷注所发射的噪声问题。

下面,再向大家谈谈其它类型的实验研究。一是关于声波通过湍流的传播问题。我要解释一下,我们进行这一研究的动机或目的。这方面的实验室研究工作不多。对散射作的研究比传播多。当然,在大气和海洋中,作了不少传播实验研究。但是,在大气和海洋中,实验的条件不能很好地控制。因此,我们在实验室里设计了一些实验。这方面研究的一个应用是湍流将影响波的传播,从而干扰用声基阵或声望远镜所作的测量。举一个简单例子。假设平面声波从外面入射到换能器阵上。当没有湍流时,我们很容易从换能器之间的时延来推算出传播方向。而当有湍流时,就有幅度的变化,而且更糟的是,有相位的变化,它意味着方向有变化。

现在讲一下我们在实验室所作的实验。我们仍用一个喷注,但不是象刚才提到的小喷注,而是一个很长的平面喷注。平面声波在喷注最大开口处通过,在湍流内部通过的传播距离为1m。声波的频率为20—100kHz。声波频率、喷注速度、传播距离等参量都要适当选择,以便使实验结果可以应用于大气中的传播。对喷注的宽度也作了选择。要使声波波长与湍流积分长度标度之比很小,即与湍流尺度相比声波波长很短。同时,传播距离与湍流相比非常长。在实验过程中,我们可以改变喷注的速度,改变的因子是2倍。我们改变的是喷注的平均速度,但与此同时,也相应地改变了速度的起伏分量。因为我们知道,喷注内部的湍流强度是喷注的20%,而这个比例是个常数。因此,当我们增大平均速度到2倍时,湍流强度也增到2倍。这样,在实验中,我们可以改变频率,还可以通过改变喷注的平均速度来改变湍流强度,而通过湍流的传播距离不变。在今后的实验中,我们想要改变这个传播距离,并且还想要在喷注中加入温度起伏,而不仅仅是速度起伏。可以将喷注加热,以便获得温度起伏。总之,输入一个频率为 ω_0 的声波,在输出端得到信号的相位调制和幅度调制。在输出端,我们作了各种测量。如测量了相干部分的衰减,这是频率为 ω_0 的部分的衰减。还测量了二阶矩,即声强,以及传输波的频谱。所有这些测量当然都是一点测量。也可以把两个传声器放在平

行或垂直于传播的方向上。只举一个相干衰减的例子。衰减很大，可大到40dB。从实验中发现，假如我们只发射一个单个频率的声波，如果湍流太大，那么这个频率将会消失。所观察到的一个很有意思的现象是频谱扩展。如果发射一个频率（例如62.5kHz），然后对两种喷注速度重复实验，将得到两条很不相同的谱曲线。如果完全没有湍流，也就是说，关闭喷注，应得到一个单个尖峰。加喷注后，在第一个喷注速度下，峰变宽；当喷注速度加倍时，峰就消失了。这里，喷注速度加倍，也就是湍流强度加倍了。很粗糙地看，重要的是沿传播方向的湍流分量，其影响是改变了声速。因此，我们看到，谱扩展可以很大，而原来信号的发射几乎消失了。由于时间关系，不能把公式都写出来了。这方面的主要工作是由 Tartarsky 和 Ishimaru 作的。我们经常用 Ishimaru 写的书，因为所有的公式都在书中给出了。还可以写出具有随机系数的传播方程。可以用-10dB处的频率间隔来定义谱扩展。我们试图用我们的测量结果来验证文献给出的一些公式。具体做法是，由实验曲线求出频率间隔 Δf ，这是测得的谱扩展，然后与根据 Tartarsky 公式计算出来的值作比较。从理论公式看出， Δf 正比于平均速度、湍流强度的6/5次方，传播距离的3/5次方，还有一个入射声波的波数。 Δf 与湍流的积分长度标度的幂次成正比，其幂次关系比较复杂。粗略地看，如果湍流强度增加，传播距离增加，那么谱扩展将会很大。关于这一课题，我们发表了一些文章，并且有一个博士生作了这一课题的研究。在空气中，谱扩展效应较大，因为这时湍流 u' 相对声速 c 而言是不可忽略的。假设喷注平均速度为10m/s，湍流是其20%，即 u' 为2m/s，则 $u'/c \sim 2/330$ ，这是较大的。在水中，情况有所不同。因为水中声速 $c \sim 1500$ m/s，因而湍流速度相对而言不是很大。当然，在海洋中有温度起伏和盐度起伏，它们可能会变得重要起来。

我还要向大家介绍另一类实验结果，这就是空间相关实验。使用两个传声器，由此得到输出信号。对这两个信号求相关，其中两传声器间距离为 r 。然后将此相关除以传声器间距为零时的相关，即对相关作归一。 r 可以垂直或平行于传播距离。当 r 为几个厘米，3或4cm时，相关变得很小。对于最大平均速度，即最大湍流起伏，传声器间距变小时相关变小。同样，在实验中，我们应用了文献中给出的理论公式。我们试图把实验得到的曲线与理论作比较。通过实验，我们得到了两种速度和不同频率的归一化相关曲线。我们现在仍在继续进行这类实验。我们认为，用实验结果来检验理论，对于大气中声源的检测是有用的。法国电力工业的技术人员对这一研究很感兴趣，因为他们需要用换能器阵来分析电站及其附近的噪声。电力工业的工程师们知道，在恶劣的大气条件下，他们无法得到有价值的测量结果。而我们通过研究工作，可以向他们指出其测量结果的可靠程度。

下面，再向大家介绍一下我们与其有协作关系的单位以及我们的声学设施：在法国，要发展研究工作，必须取得工业界的支持。我们与之有联系的单位主要有：制造军用飞机的马赛飞机制造公司、制造“空中公共汽车”和直升飞机的航空空间公司、制造飞机压缩机的斯涅克马公司等。此外，我们还和法国的几个重要的研究实验室，如全国航空研究局ONERA，有学术交流。我们与一些外国研究实验室也有联系。我希望将来能和此地从事空气动力噪声和海洋噪声研究的人员进行学术交流。此外，我们还举行学术交流会。不久，国际理论与应用力学协会将在法国里昂召开关于航空声学和水声学的特别会议。我希望中国科学院声学所汪德昭教授的同事们能来参加这个会议。

在声学设施方面，我们有一个消声室，它与地面相隔离，因此背景噪声很小。消声室大小为 $5\text{m} \times 5\text{m} \times 4-5\text{m}$ 。在消声室里有一个管道，气流可通过管道进入室内。喷口不太大，

大约为 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，最高喷注速度为 20m/s 。我们又建造了一个新的声学实验室，在其后部有一个较大的消声室，它带有一个风洞。这个消声室有一半在地下。风洞用的风扇直径为 15m 。在风洞出口处有声屏障，是用石棉等玻璃纤维制成的，高约 7m 。声屏障上面有一些条缝，可使空气由此排出去。放置风扇专有一间房间，里面也有声屏障，以防风扇噪声辐射到外面的邻近区域。我们需要有两个风扇，以便产生两个气流。其中，一个为高速气流，速度高到 150m/s ；在其两边各有一个次级气流。空气通过声屏障，直接排到外面。在消声室内使用风洞的主要困难是避免气流再循环。可以把声屏障放在距出口有一小段距离处，使中间存一空间，让主喷注直接排到外面。还可以在出口附近从主喷注分出第三个气流，然后沿不同路径排出。我们的注意力集中在主喷注和次级喷注上。主喷注基本上是一个二维喷注， $20\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，其速度可达 150m/s 。在其两边，有两个喷口。我们利用缩尺模型实验找出降低主喷注噪声所应有的次级喷注相对截面积。这个系统有点象双路式发动机。在消声室内有一中心工作区。声屏障构成房间的一个侧壁。它可以活动，拉到一边，使房间有一开口。当我们要把气流直接排到外面时，可以把声屏障拉到一边，露出开口；当房间用作普通消声室时，就把声屏障合拢。构成声屏障的玻璃纤维是一整块板，其结构是两种密度的两块玻璃纤维板。一种密度是 35kg/m^3 ，另一种密度加倍，是 70kg/m^3 。测量室在声学实验室的一楼。下面给大家解释一下，为什么我们要选择这样的装置，即中间是主喷注，两侧是次级喷注。假如我们要研究机翼噪声。如果用单个喷注，我们需要把机翼放在喷注中间，然后用放在外面的传声器接收噪声。但这时来自喷注的背景噪声很大。为降低这一噪声，我们采用了和双路式发动机一样的办法。我们在主喷注两边加上两个附加喷注，可以减小噪声。因为，当没有次级喷注时，主喷注和外面空气间的平均速度梯度很大，而加了次级喷注后，速度梯度减小了，因而噪声减小了。我们在缩尺模型上研究，为获得良好的降噪效果，次级喷注喷口大小应取何值。因为，我们知道，如果次级喷口很小，小得几乎没有，主喷注噪声会很大；而如果次级喷注喷口太大，它本身就会产生强噪声，所以在二者之间一定有一个最佳情况。这种装置的另一个优点是，当有次级喷注时，在下游产生的具势核变长（它是安静区），这样就可按需要放置较长的机翼。我们比较了有和没有次级气流时具势核长度的变化，并画出图线。图的横轴是到喷口的距离，纵轴是有和没有次级喷注时主喷注的速度。从图可以看出，喷注中心线的速度维持常数可到多远距离。对于单个气流，仅为4倍喷口孔径；而有次级气流时，可到（6—8）倍喷口孔径。使用这一装置的另一重要特征是，可减小具势核内的扰动。对于湍流喷注的情况，单个气流中速度中心的边界是移动的，这就会引起速度扰动。如果我们用一个次级喷注，那么中心的运动就要受到限制，因为外面还有一个流。单个喷注的起伏强度随着到喷口的距离的增加而迅速增加。如果用两个喷注，即主喷注外再附加一个次级喷注，那么起伏就较小，并且随距离增加的速率也较小。这一点是很重要的，因为当我们要研究来自障碍物或机翼的噪声时，需要能控制入射流，减小其扰动。可能你们会感到奇怪，为什么我们不用完全封闭的管道。这是因为它有混响效应。使用消声室时，对于喷注中有机翼的情况，我们可以把传声器放在喷注外的任何地方。有可能通过实验来研究机翼噪声的谱。我们获得的几组曲线表明，只有喷注的噪声谱比喷注内加入机翼后的噪声谱低。因此，利用这个装置，可以提取机翼噪声，它比喷注噪声大。

最后，简单介绍一下我们的装置和仪器设备。

装置方面有：喷注装置；带三个传声器的声强计；研究声波通过湍流传播的实验装置，

其中有一个换能器，四个传声器，离喷口的距离约1 m。仪器有HP傅里叶变换分析器。一个摩洛哥来的学生正在作双通道傅里叶分析研究，测量互谱的幅度、相位、实部和虚部。

目前在法国，人们正在用带两个传声器的一维声强计分析机器噪声。可以用这种仪器沿机器测声强。座落在巴黎附近的机械工业技术研究中心的研究人员进行了这方面的实验工作，并制作了一些幻灯片，让我带到中国来，因为我在法语区声学家协会（GALF）中负责航空动力测量专业组的工作。这些人员正在尝试用粘弹性材料覆盖振动表面，以降低噪声。

谢谢大家。

讨 论

问：你们有没有对整个发动机进行研究？

答：没有。对于一个大学的实验来说，实际的发动机太大了，不便于进行研究。当然，这种研究是很重要的，与我们有协作关系的一个工业单位曾作过这种研究。斯涅克马公司作过发动机噪声测试工作。他们进行了两种实验研究。一种是在地面对发动机进行测试，另外还作飞行测量。在地面测试中，发动机放在一个平台上，离地面7—8m；传声器放在发动机四周。在飞行实验中，传声器放在地面上，飞机在上面飞过。需要精确地测定飞机相对于传声器的位置，因此实验是和位于法国南部的飞行中心一起作的。他们用激光或无线电波来测定飞机的精确位置。进行了几种飞行实验。飞机可以以匀速水平地飞过传声器，也可以爬高，象起飞时的情况一样，这是更有意义的。我想，他们也测量了着陆的情况，因为在法国有关于飞机噪声的标准。我们有一些协和式飞机。在噪声级方面我们遇到很多困难。因为，在这种情况下，用的是单个喷注。对超音速飞机来说，不能用双路式发动机，那会变得太大了。对于“空中公共汽车”，我们作得要成功得多。目前，有一些人开始对飞机本身的噪声，机身的噪声感兴趣。对于很大的飞机，当它们降落时，要使用副翼，使得在机翼上产生附加的流量，以提高升力。这时，飞机形状从空气动力学的角度来看，不是很理想，而是具有一些障碍物。此外，当飞机降落时，速度仍很大，大约为200km/hr，因此，来自机身的噪声是很大的。有一些人已经在试图测量这种噪声，在机翼噪声实验中，用一个附加的喷注，就有可能得到较长的具势核。我们可以观察流的噪声，使它符合降落的条件，从而来研究由分离的管道喷出的流产生的噪声。事实上，我们甚至可以不用这种装置。飞机降落速度最高是75m/s，因此有可能使附加喷注的速度和这一速度相同。由于这个速度较小，所以由这个喷注产生的噪声不会很大，即使它是个大喷注也是如此。因此，我们可以不使用中心喷注，而只用一个大喷注来代替，并且使喷注中间和两边的速度一样。这样，我们就有一个大喷注，使我们能把机翼和其它东西放进去作研究。

问：在分辨飞机降落时的噪声源方面你们有没有做什么工作？

答：我没有做过这方面的测量工作。制造“空中公共汽车”的航空空间公司曾对放下和没放下起落架的实际飞机进行了实验。在实验中，让飞机爬高到譬如说100m高处，第一次飞时放下起落架，下一次飞时不放下起落架。他们试图获得来自气穴、支撑起落架的结构等的噪声。在大学实验室里，我们主要进行基础实验研究，从而使我们能了解机理，写出方程式。实际的测试工作是由工业单位作的。

问：你们所用的日本传声器的尺寸如何？

答：很小。直径是2mm，长度是6mm，内部带前放。我们发现B&K公司的传声器尺寸非

常大，而且很贵。日本传声器的价格很便宜，可能一个只要20法朗。它的频响也很好，可以到15kHz。在我们刚才谈到的一些实验中，第一部分的实验只要求频率到12kHz。但是，在第二部分的实验中，我们必须用B&K公司的1/4"或1/8"的传声器。

问：传声器的非线性效应如何？

答：我想它工作得很好。我们总是只涉及线性声学。有些人逐渐认为，在喷注内部产生噪声的区域中，非线性是很重要的。但是，几乎不可能在那里进行测量。诚然，在用声强计时，我们力图非常靠近喷注，但是并不是放到喷注内部去。

问：如何测量喷注谱、喷注内的湍流？

答：我们实验室开展关于湍流的研究工作已将近十年了。我们对各种流，特别是喷注，进行了许多实验。因此，我们对所使用的喷注湍流的所有特性都了解得很清楚。此外，当我们作声学测量时，还同时测量喷注内流的情况。Lighthill理论指出，存在着次级旋涡。至少从等效声源的观点来看，喷注的噪声源是与起伏速度在传声器方向上的二阶时间导数相联系的。因此，我们对这一速度进行了一些测量。假设我们有一个小喷注，它的边界是不规则的。传声器放在远场。有可能观察声压和喷注内部湍流的速度分量。在作实验时，在喷注内部放置热电阻线。这是一个很小的线段，可以被流所加热或冷却，从而获得电信号。我们用一个或两个热电阻线来获得指向传声器的速度分量。使用这种热线的一个主要困难是，热线的支撑物会产生噪声。因此，我们不能用标准的装置，而必须制造一些特殊的探头，它们彼此相距很远，几乎在喷注的两边。喷注在中间，支撑物在外面。我们用钨丝来支撑热线。用这个办法，我们可以测量指向传声器的速度分量。根据Lighthill理论，我们需要知道这些分量的二阶导数。因此，可以测量这些分量，从而得到其二阶时间导数，并与传声器读出的声压求相关。有意义的是把这个速度信号与声压求相关。但是，假如你在时刻 t 听到噪声，你要在时刻 $t-r/c_0$ ， r —距离，取二阶导数，因为如果是湍流产生的噪声，在热线和传声器之间，就有一个时间延迟。噪声将在一个较迟的时刻到达传声器。因此，如果你要把所需的量与湍流求相关，那么你必须作时延相关。据我所知，目前有一些人不用热线，而用激光来测量喷注中的速度。我们可以移动热线或激光束，围绕着喷注移动测量平面，这样就可以获得喷注中与噪声相对应的最活跃的部分，因而可以获得声强图。声强技术只有1—2年的历史，但由此可以得到直观图象。

（徐为方译）

利用缩尺模型预报公路交通噪声

诺塞总工程师 (R. Josse)

(格勒诺布尔建筑科学技术中心)

在法国,和在其它许多欧洲国家一样,公路交通噪声是一个受到特殊注意的研究课题:有关这种噪声的来源(机动车辆和公路)和暴露于该噪声的住宅建筑保护(建筑物正面的隔声)的规章制度的制订,日益迫切。同时,公众对这一问题变得非常敏感,每当他们得知对居住区的声背景有损害作用的建筑计划时,就毫不犹豫地组成协会以保护他们的利益。

鉴于这些原因,负责制定主要公路建设计划的公共工程部门当局(城市规划和住宅建设部和交通部)要认真调查新建或扩建的公路对声环境的影响。为此,有关的主要实验室发展了预报公路交通噪声的方法。

我们编写了一本预报公路噪声的指南,它是最大型的,里面有许多预报公路和高速公路噪声的直方图和公式。它是由环境部和交通部颁布的。我这次没有带来,因为太重了。在这本书中你会找到关于交通噪声级的许多图线。举一个例子。关于一条街中的噪声图,是以dB(A)表示的等效声级与每小时车流量的关系。你还有不同的公路宽度(公路是直的)作为参数。用这个图可以预报各种情况下的噪声。

在法国,还使用另一种方法,即采用计算机程序的完全数值计算方法。例如交通运输研究所开发的“噪声计算机程序”,这个系统已为大部分政府公共工程部门所使用。这种方法是:用声源和接收器,对从声源到接收器的所有声线进行研究。其中有直达声、地面反射声,以及衍射声线等。计算机可以用该系统预报噪声。大部分政府公共工程部门都有这个系统。

还有第三种预报方法。这是把缩尺模型的使用和计算机方法相结合的混合法。例如我们在建筑科技中心正在使用的方法。

下面是预报公路噪声的模型研究的一个例子。模型建筑物是用合成材料做成的。对于公路噪声预报,必须了解车流量和每类车辆的数目。一般来讲,只考虑两类车辆:轻型车和重型车,第二类车的定义在各个国家常常是不同的。对于这两种类型的每一类,必须得到有关公路中的车辆数和这些车辆的行驶条件,包括:速度、加速度、使用的排档等等数据。

在车辆自由行驶的情况下,了解每类车每小时的流量和两种车流各自的平均速度,看来对相当精确地预报平均噪声功率是足够的了。

举一个声源级作为车速的函数的例子。对于轻型车和重型车、不同的交通条件(例如上

坡和下坡)、平坦公路的数目等不同情况都有实验数据。所以当你知道了车速和这些交通条件时,就有可能了解辐射噪声级。在采用计算机的所有预报系统或模型中,必须知道这些数据。当你知道了数据后,还必须知道声源和接收点之间的衰减。利用计算机系统,你能够对由物理规律得到的衰减和用模型测得的衰减进行比较。利用缩尺模型作声传播的研究,可以追溯到许多年以前。甚至在130多年前,一些实验者就已采用波纹水槽方法,来显示声波对障碍物的反射和衍射。该二维法主要用于教学目的;在水表面声波的低速度,可以使声波的传播用肉眼跟踪。

1913年,Sabine 采用火花照像术来研究声波在二维剧场模型中的传播。

1934年, Spandock 引入三维模型来研究各种剧场和音乐厅。他和他的继承者使这种方法达到了一个很高的精度,因为他们能用这个方法给出音乐厅中音乐或语言是如何表现的。他们的模型缩尺标度是1/5和1/10。

Yamamoto 和 Wakuci 把 Spandock 的方法发展得更完善。他们在非常干燥的空气中进行了测量,所用模型缩尺为1/10,频带范围为500Hz到100kHz。为这一研究工作,他们编制了音乐厅和剧场模型材料的目录。

在许多其它类型的剧场研究中也使用了缩尺模型。但是利用模型来预报公路交通噪声是比较新的。

第一批应用这种方法的实验室是:

1967年, M.C.Pinfold 博士的实验室(英国利物浦)。

1968年, 建筑科技研究中心(CSTB)。

1971年, Lyon 教授的实验室(麻省理工学院)。

1972年, 英国国家物理实验室。

现在我们看一下缩尺模型研究所需的条件。

在几何学上,模型必须如实地再现建筑物的现场情况。原则上,在尺度方面的精度应比一个声波波长更好。当用比较大的缩尺模型(例如1/10)进行详细研究时,这一条件是现实的,但它对小缩尺模型是不实际的(例如1/100的模型需要大约1mm的精度)。当建立模型所要求的精度不能满足时,在某些临界情况下,这可能是现场实际情况与缩尺模型预报之间有显著偏差的原因。鉴于这一事实,研究的结果因有效性对于几何精度非常敏感而需要很慎重地对待。

如果你在有道路的地面附近产生噪声,那么几何系统的精度是非常重要的。下面介绍一下格勒诺布尔建筑科技中心的模型研究中心。实验室是一间面积为15m²,高6m的大屋子。屋子内的空气非常干燥,因为屋顶是用金属作的。实验室里有一张大桌子,它有10m²,你可以把模型放在上面。传声器可以用自动系统来移动;道路中的声源用空气产生。在房间后面是一个车间,装有产生干燥空气的系统。这个实验对于法国建造新公路和扩建现有公路的工程计划是十分有用的。它可以全天工作。在模型中声源附近有建筑物和高速公路;声源代表小汽车或卡车。

如果模型与实际情况的比例为1/n,那么波长为 λ 的声传播应该用波长为 λ/n 的声波进行研究。我们必须保持传播波长和障碍物的尺寸比例恒定。这个条件意味着,需要使用能产生 λ/n 波长的声源。

模型所用的材料的声学特性在考虑频段变化后,必须与现场的实际表面(地面、障碍

物、建筑物等等)的特性一样。一般来说,严格地遵循这个条件是办不到的。现场实际表面的特性并不是完全确定的。再者,即使它们是这样,在模型上再现它们肯定也是十分困难的。

地面的声学模拟会造成很严重的问题,因为对于近地面的声波,地面的影响是不容忽视的。用在模型上模拟地面的材料是通过反复实验来选择的。具体作法是:或者是在模型上试验得到与实际的平坦地面上相同的声衰减规律;或者是努力使在模型中得到的地面声吸收系数尽可能地接近实际地面的情况。

建筑物正面的反射亦是很大的(吸收系数为 $0.02 \sim 0.05$ 之间,取决于频率)。关着的窗户吸收更大些,尤其是在玻璃板谐振频率附近的低频时。开着的窗户吸收可以很大。一般情况下,研究的目的并不是在模型上准确地重现窗和实心墙的细节。因此你会看到在模型建筑物上并没有窗户。一般情况中,对于建筑物临街的正面,我们采用了平均吸收系数约为 0.1 的整块材料。该值的精度一般来讲并不重要,除非街道很窄,在这种情况下,噪声级是大量反射叠加的结果。

采用尺寸非常小的模型时,用于模型建筑的材料反射系数的测量不太容易做。事实上,用于确定垂直入射条件下的反射系数的Kundt管法,对于 20kHz 以上的频率是成问题的,而在 40kHz 以上则是不适用的。这是由于要求内管径小于 0.6λ ,即对 40kHz 为 4.8mm 。对于这样的管截面,管的线性衰减和传感器大小对测量的影响很大。

用于缩尺模型的混响室方法在超声频段也出现了问题。在该频段上,空气和墙壁的声吸收(热传导)使混响明显减小。在室内使用极其平滑的墙壁,和用非常干燥的空气填充房间,可使能量损失降到最低。通过非常小心地作实验,可在高到 80kHz 的频率范围内进行测量。

还可以用其它一些方法,例如反射波的直接测量法。我们在格勒诺布尔采用两种方法:混响室和直接法。

1967年Brebeck建立了一个材料声反射系数的表,频率高到 80kHz 。

模型研究要满足的另外一个条件是空气中的声线性吸收,对于相应的距离和频率,在模型和现场实际的情况中应是一致或接近一致的。该条件在研究的整个声传播频率范围内必须得到满足。

你们都知道,衰减系数是两项之和:经典衰减和分子衰减。前者与热传导现象以及空气粘滞性有关。后者是氮、氧分子弛豫过程的结果,该过程很大程度上取决于大气中水蒸汽的含量。

在正常的现场条件(20°C , 45% 的相对湿度)和在直到几千赫的频率上,分子吸收与经典吸收相比占主导地位,但它与频率的关系,在低频段也是随 f^2 变化。对于模型的声频率,为了保持 f^2 的对应关系,必须使经典吸收占主导地位,或者频率要大大低于氧分子的弛豫频率,使分子吸收仍随 f^2 变化。

在第一种情况下,必须在非常干燥的空气中工作,否则,吸收会太大。在第二种情况下,可以在通常的大气(正常湿度)中工作,这时弛豫频率较高,但所采用的缩尺比例应不低于 $1/20$ 。

在上述两种情况中,模拟条件不是完美的,但是可以接受的。

简言之,对于小的缩尺比例(例如 $1/100$ 到 $1/30$),必须在干燥的空气中工作,除非能

够对高湿度空气中得到的结果加以修正。对于较大的缩尺比例(1/30到1/10),标准大气条件是令人满意的。

举一个1/100缩尺研究的例子。我们能知道实际情况下每100m空气的衰减,还能知道两种相对湿度(40%和70%)情况下的现场吸收。温度为15°C。通过模型研究,得到模型中等效距离(1/100)的衰减。当模型中的空气非常干燥时,误差为1dB。如果采用更大湿度的空气,误差则会更大。在格勒诺布尔声学中心,我们在工作中采用约5%的湿度。建筑科技中心所采用的第一个模型,是一个1/20的非常经济的系统。我们用一些小铃铛作声源,用马达连着一根绳子来敲铃。按照铃的大小可以产生20~40kHz的频率。在新的实验室建立之前,我们用这一模型作了许多工作。例如,我们对声屏障的影响作了许多测量。

但是当要模拟的场所扩展到几百米的时候,1/20的模型就不适用了,因为1/20的比例限制了能模拟的实物的大小。鉴于这一原因,设计了一些小缩尺模型的新装置(例如,在格勒诺布尔建筑科技中心已有了这样的新装置)。

在用缩尺模型进行研究时,最基本的是要使声源和接收器有适当的特性。

对于较小的缩尺模型,似乎空气喷注声源更有希望。它们的优点是简单、便宜,尺寸小,较高的输出功率,而且很容易作成无指向性的。这种源最早的一个看来是Veneklasen作的源,它由压力为3巴的四个干燥氮喷注交错组成。该源的直径小于2cm,其功率是单个喷注的30倍。它的频谱在一直到150kHz的超声频内,是很丰富的。举一个例子,用氮喷注作声源,输出级很高,最大的值在60kHz附近,有120dB。在里昂中心校龚特-白卢女士的帮助下,建筑科技研究中心研制了一个与英国Delany作的源相同类型的源。它是一个圆柱体(直径为2cm),与(模型上)道路表面齐平。压缩空气(压力为3巴)通过小孔(直径为1.2mm)产生4个水平气流喷注。这种声源接近于无指向性,它可以用于通常的交通噪声研究。

在汽车的情况下,一些现场测量,包括瑞士人Rathe的测量表明,可以用一个无指向性声源放在地面上的半无限空间中,来模拟在公路上行驶的一个车辆,误差在2dB内。因此,我们可以在模型中使用无指向性声源。

在模型中并不需要完全重复典型汽车的噪声谱,但是,模型所用的声源应能在相应于公路交通噪声主要频带(125~1000Hz倍频程)的转换频段中产生足够的能量。频谱的形状可以在测量时用一个合适的滤波器来修正。声源的频谱尽可能作到不含有纯音分量,并且能量集中在有用频带内。

到目前为止,用于实验室作这类测量的声源有许多种。例如,CSTB所用的铃铛。又如莫斯科的Ossipov所用的声源有一个旋转的圆盘,它可以抛出钢球,撞击有金属蒙皮的墙面,从而产生声波。最近,日本的Kosaya使用了由波导构成的线性声源,它有许多钢球,用一根运动的棒来推动。今后,还会研究出更多种类的声源。

我们在实验室里有100个这样的源。未加权的总功率大约是130dB,A加权声级为100dB。

CSTB的100个这样的声源,是从300个源中选出来的。这些源的功率是相同的,误差为 ± 1.5 dB。

一般来讲,压缩空气源比较便宜,它可以由单个空气压缩机组成,可以用作活动装置(Delany),也可以用作稳定源(CSTB)。

例如,CSTB的模型中,在模拟的运输道路上每20到40cm摆开声源,对每个源一个接一个在接收点进行声级测量(每个源时间间隔1/3s)。因此,相应于每个通过公路的车辆

“特征”，被记录下来。测量时间很短，你能一个接一个地打开每一个声源。这样，你测得的声级情况就好像是车辆在公路上运动一样。然后，利用计算机，可以根据公路上各点的交通情况，对这些特征加以修正。由此，可以计算等效噪声 L_{eq} 或其它统计量如 L_{10} 、 L_{50} 等。还可以用其它声源。例如，火花放电发生器。它的优点是能产生极短的噪声，可观察几个回声。因此，用它来分析现象可以比连续声源更精确。例如，可以对空气的衰减作精确的修正。该源的另一个优点是它不要求使用消声室。该方法已被Lyon教授在麻省理工学院使用。火花所产生的瞬态信号谱是宽带谱，从6—125kHz。火花可以每3秒钟产生一次。这种方法的不利之处是：声源的电源很贵，对于单个模型不可能有许多这样的电源。考虑采用单个电源控制几个声源也是很困难的，因为电压约为5kV。多途传播引起信号畸变，也使分析变得更困难了，这就是为什么我们不在CSTB采用它的原因。

压电陶瓷或磁致伸缩发生器并不是适当的解决方法，因为这些声源设计时要求在它们的谐振频率下工作。此外，它们还有一个缺点就是出现明显的指向性。

每个从事交通噪声传播模型研究的实验室，都采用他们自己设计的声源，这可能是由于市场上缺少这些声源的缘故。与此相反，每个实验室采用商用换能器来进行声压级测量。在超声频段，如果要求传声器是无指向性的，那么它必须非常小。传声器尺寸上的减小，通常会引起灵敏度的损失。

所以声源的声功率、传声器的灵敏度和背景噪声决定着测量系统的性能。例如：在1/100模型中，如果采用一个商用的1/8"传声器，传声器的背景噪声和灵敏度使它的最小声级在修正前为60dB每1/3倍频程。如果所用的声源级是100dB每1/3倍频程，那么，在50kHz时可以进行测量的距离是自由空间为16m；如果再加上20dB的衰减，则距离约为4m。

考虑更为实际的情况，我们可以设想，将来的测量系统在设计时，要考虑两种附加的大气参量。它们对于远程声传播是十分重要的：接近地面的温度梯度和风。这种设备价钱将是很高的，并且还不能肯定所化的开支是否值得。

在CSTB，可以在有风和风速梯度的条件下进行研究，因为在整个设施中，有一个风洞。

事实上，当研究仅限于车辆在正常距离条件下运行时所产生的声场时，引入风和温度参量的作用是不明显的。从Jonasson（瑞典人）的现场研究看来，在没有风或温度梯度的模型上作的研究给出的结果，非常接近于有微风从公路吹到观测点时从现场得到的结果。当然，很强的逆风将会完全改变结果，但对这种情况没有什么兴趣。同样地，没有风的温度梯度趋于在地面阻碍传播，但在模型上测量这种影响，也没有多大实际意义。不过，这种类型的测量对学术研究会有价值的。

为了评定纯数值方法和采用缩尺模型研究的混合方法的预报精度，进行了实验室间的合作。它包括把这些方法应用于实际情况，对于这些情况，也进行了现场的测量。一些实验室在法国和德国的城市进行了现场测量，其他一些实验室利用模型和计算机进行了预报。通过这些工作来找出预报的精度。我们看到，当有许多反射时，所有的计算方法都是很困难的。举一个例子，在直的街道上有一座建筑物，除了最上面的窗外其它窗都是关着的，边上有一个庭院。用模型我们可以很好地预测这个系统，但用计算方法预测则不行，因为计算机系统所考虑的反射数是三个，有一条声线在建筑物之间反射多次，它并没被考虑到。在该系统中考虑更多的反射是非常复杂的。

研究表明,如果可研究的接收点不是太靠近地面,则对预测结果和现场测量结果进行比较时,这些方法的精度约为 $\pm 3\text{dB}$ 。准确了解现场情况下的声级是很困难的,因为你必须及时地进行测量,而在测量期间车流是变化的,同时,可能还有气象条件的影响。当然,上面所估计的精度只是对所采用的方法适用的情况而言的,而模型研究适用的范围比纯数值方法要宽。

总之,经验表明,采用缩尺模型进行公路交通噪声预报的实验室,不是一个完美无缺的工具,但对于预测这种噪声以及研究减低它的防护措施而言,它仍然是一个不可替代的工具。

事实上,这种工具既能用于数字计算方法亦适用的简单情况,也能用于单纯的计算方法不适用的复杂情况,而且在这两方面都有相当好的精度。

此外,模型还具有非常直观的优点:为某一噪声问题而担心的公众将满意地注意到,他们所关心的事情正在缩尺模型上进行研究。

在格勒诺布尔声学实验室的测量房间里,正在研究格勒诺布尔附近一条公路的噪声。附近的建筑物中,将有一些人居住。人们不喜欢这个新区域,因为这条路将与另一条路相接。这里本来很安静,人们不喜欢这里有噪声。为了对该区的人进行保护,将采用声屏障。我们正在研究声屏障。实验室的墙用很厚的塑料纤维覆盖,但它不是一个真正的消声室,因为室内有反射系统,但是对于这种测量这已经足够了。

讨 论

问:你们通常用的模型缩尺是多少?

答:我们一般用 $1/100$ 的模型。

问:你们用的频率是多少?

答:实际的频率是 $125\text{Hz}—1\text{kHz}$,把它乘以 100 ,因此模型研究的频率是 $12\text{kHz}—100\text{kHz}$ 。我们用空气喷注作噪声源,其频谱的最大值在 50kHz 处。

问:你用是否使用线列阵作声源?

答:没有。我们用许多单个的声源,不是线列阵。我们没有线列阵。

问:你用单个电源给许多个声源供电,你如何按需要来控制各个声源的开关,如何模拟车辆的运动?

答:我们有一个泵系统,每个声源有一个阀门,由计算机控制。我们打开阀门 $1/3$ 秒,来得到噪声。可以同时打开阀门,也可以一个接一个打开。如果公路上的交通流量是稳定的,要了解等效噪声级,并不需要作个别测量,只需同时打开所有声源就可以了。一般而言,车辆的运动并不是一种有用的信息。对于噪声研究,进行上述测量就足够了,因为在法国,公路附近建筑物前的噪声级必须低于 65dB 。这是从早上8点到晚上8点间的等效声级。

问:声源的频谱是否必须与实际情况很相似?

答:不,这并不必要,因为在接收部分,我们用了一个滤波器,可以进行修正。在接收部分,可以求出声源的实际频谱和所要求的谱之间的差,同时我们还对谱作A加权。

问:你们用哪种传声器?

答:用的是B&K传声器。

问:你们的实验室只是用来作噪声研究,还是可以用作其它研究?

答:这个实验室不能用作别的研究,它只是用作噪声预报研究。以后我们有了经费,

还要建造别的实验室。

问：制作模型的材料吸声系数是多少？

答：模型建筑物的吸声系数大约是0.1，公路的吸声系数还要低些。在实际中，它们的反射性都很强。窗子的反射性不是非常强，但我们把它看作是反射性强的。

问：实验室的墙是用什么材料？

答：墙是用40cm厚的玻璃纤维作的。

问：墙是不是平的？

答：对，墙是平的。

（赵克勇 绳鹏译）

用计算机实现超声场的重建

卢斯教授等 (B. Hosten, J. Roux)

(波尔多大学物理力学实验室)

引言

由于许多种类阵的发展 (机械扫描式的^[1,2], 压电式的^[3,4] 或者静电式的^[5] 换能器阵), 超声场能以越来越大的孔径和越来越小的采样间隔被采样。所以, 角度谱算法正在变得能完全适用于这种声场的数字重建。

在第一节里, 我们将简述基于格林定理的理论基础, 并且详细说明理论的有效性。我们将证明, 方形波导的应用如何降低了有限孔径的效应和如何降低了由于谱采样而产生的场的人为周期性。

在第二节里, 我们描述了用 256×256 静电换能器阵实现实时数据采集的过程。

最后, 我们提供了在换能器平面或物体平面内的采集场和重建场的一些图像。

一、理论

1. 角度谱算法

角度谱算法能直接由格林定理平行平面推导出来。

让我们用 $\varphi(M)$ 表示速度势, 它是 Helmholtz 齐次方程 $(\Delta + k^2)\varphi = 0$, $k = \omega/c$ 在正则定义域 Ω 内无源时的正则解。 π 和 π_0 是具有一个共同垂线 z 的两个平面。 $\Sigma = \hat{\pi} \cup \hat{S}$ 是 Ω 的界, 其中 $\hat{\pi}$ 是 z 为常数的平面的一部份, 在这个平面上正则的曲面 $\hat{S} \rightarrow \infty$ 。