

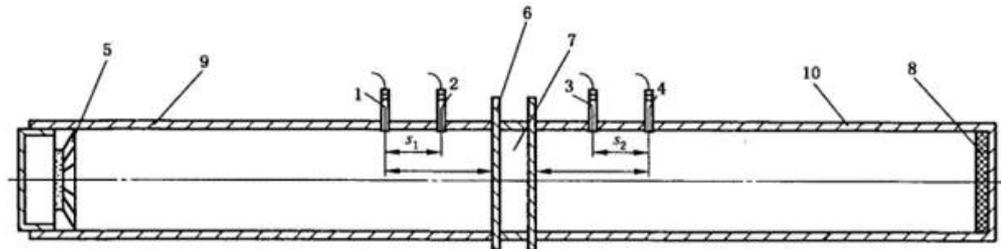
## 阻抗管测试隔声量的分析

作者：陈红伟

结构的隔声性能是噪声控制中最为关注的一个参数，构件的隔声量的测试有两种方法，一种是在隔声实验室中进行，被测构件的大小一般大于  $1 \text{ m}^2$ 。然而在实验室进行隔声测试较为复杂，需要专门的混响-混响或者混响-消声室进行测试。在设计中工程师希望应用更简单，成本更低的阻抗管法进行隔声测试。

### 1. 阻抗管法测试隔声的原理

在阻抗管中用四传感器法测试声学材料的隔声量，通过将测试样件安装在管中，激励源产生平面波，在前管中靠近样品的两个位置测试声压，求得两个传声器信号的声压传递函数；同样在后管中靠近样品的两个位置上测量声压求得两个传声器信号的声压传递函数。由传递矩阵法计算试件的法向入射投射系数、传声损失等声学量<sup>[1]</sup>。



说明：

- 1——传声器 A；
- 2——传声器 B；
- 3——传声器 C；
- 4——传声器 D；
- 5——扬声器；
- 6——试件安置管；
- 7——试件；
- 8——吸声材料；
- 9——前管；
- 10——后管。

图 1 阻抗管测试隔声装置示意图

## 2. 试件平面波状态下的隔声性能

一个试件在入射声场的作用下可以等效成图 2 的一个弹性系统。弹性系统受到阻尼和刚度的影响。

其中入射声场可以表示为：

$$p_i(x, t) = \tilde{A} \exp [j(\omega t - k_1 x)]$$

反射声场为：

$$p_r(x, t) = \tilde{B} \exp [j(\omega t + k_1 x)]$$

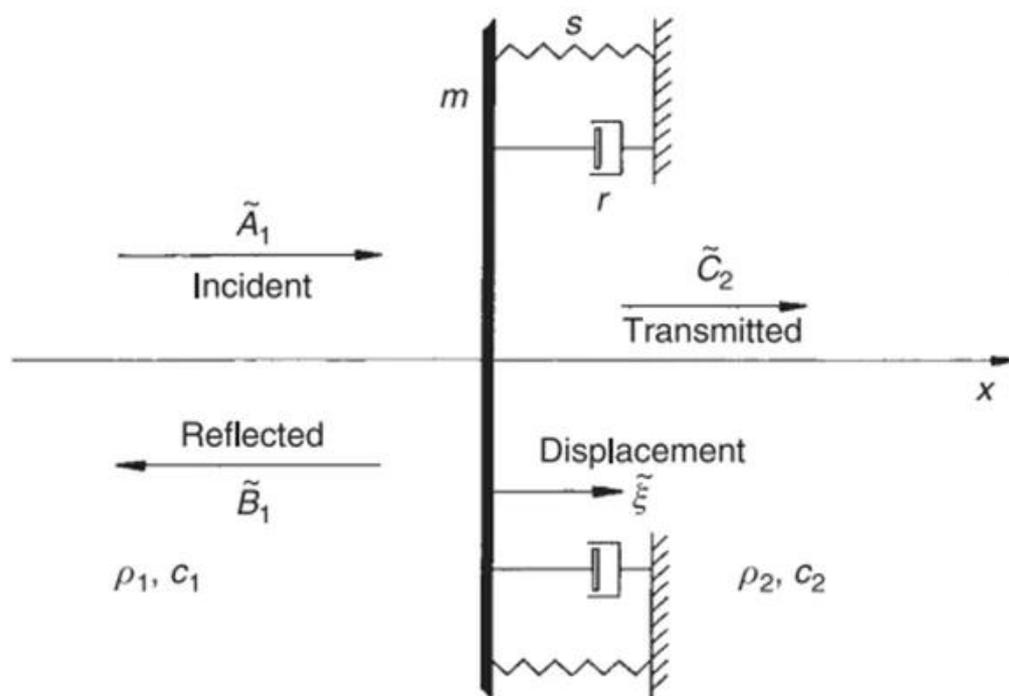
在试件的表面有：

$$\tilde{A} - \tilde{B} = j\omega\rho_1 c_1 \tilde{\xi}$$

透射声场：

$$p_t(x, t) = \tilde{C} \exp [j(\omega t - k_2 x)]$$

图 2 垂直入射结构数学模型



其中传递系数：

$$\tau = \frac{|\tilde{C}|^2 / 2\rho_2 c_2}{|\tilde{A}|^2 / 2\rho_1 c_1} = \frac{4n}{[(\omega m - s/\omega) / \rho_2 c_2]^2 + (\frac{\omega_0 m \eta}{\rho_2 c_2} + n + 1)^2}$$

其中,  $\eta$  代表结构阻尼系数。s 为刚度, m 为面质量,  $\omega$  为角频率,  $\omega_0$  为共振频率。

$$TL = 10\lg(1/\tau)$$

隔声量

假设结构两侧的介质相同即

$$\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$$

那么:

①在角速度  $\omega \ll \omega_0$  时,

$$\tau \approx (2\rho c\omega/s)^2$$

可以看到在共振频率以下, 结构的隔声量受到刚度 s 的影响, 可以认为是刚度控制区。

②在角速度  $\omega \gg \omega_0$  时,

$$\tau \approx (2\rho c/m\omega)^2$$

即当频率大于结构的共振频率时, 结构的隔声量受到质量 m 的影响, 叫做质量控制区。

③当角频率  $\omega = \omega_0$  时,

$$\tau \approx (2\rho c/\eta m\omega_0)^2$$

由于  $\eta$  很小, 因此隔声量主要受到阻尼的影响, 此时隔声量很小。

### 3. 阻抗管法隔声与实际结构的差别

采用阻抗管法进行隔声测试非常简单, 但是由于实验条件的影响, 测出的结果与结构的实际隔声情况具有一定的差别。

首先, 结构的隔声受到入射声波角度的影响, 而阻抗管法进行隔声测试一般是平面波, 因此实验室测试和阻抗管测试会有较大的差异。

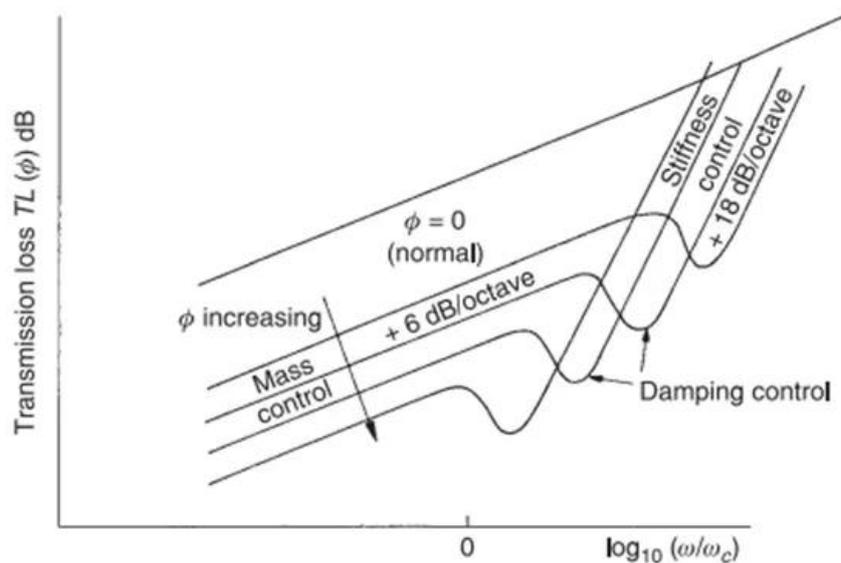


图 3 不同入射角度隔声量的不同

从图 3 中可以看到，由于阻抗管中的平面波可以等效成声波的垂直入射，因此其曲线在共振频率以上一般表现为一条直线。而具有入射角度的声波通常会在结构的表面产生追迹波，当追迹波的波长与结构波长相等时，该工况的频率称为“吻合频率”，很明显平面波入射并不具备这种特征。但是在吻合频率以下，无论是平面波还是有角度入射的声波，其特征均受到质量的控制。两者具有如图 4 所示的关系，一般混响声源下的隔声量要比垂直入射低 5dB<sup>[2]</sup>。

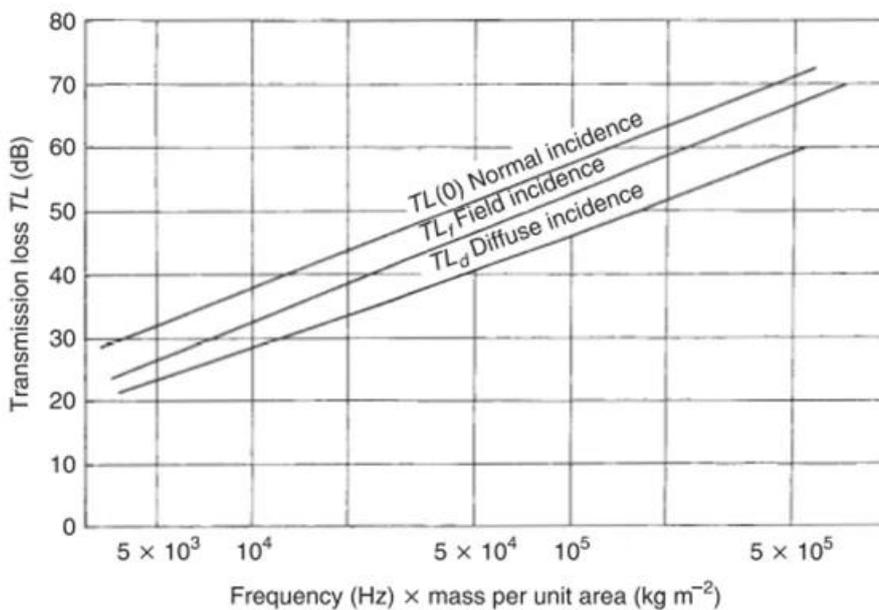


图 4 入射角度与质量控制隔声曲线的关系

其次，阻抗管测试隔声曲线时，样件需要切割成 3cm 或者 10cm 直径的形状，而结构的共振频率  $\omega_0$  在低频很容易受到边界条件的影响，一般样件越小  $\omega_0$  越高。一般 3cm 直径的钢板的一阶共振频率可能达到几千 Hz，这时候阻抗管测试的结果在共振频率以下都是刚度控制区的结果，往往同样的样件形状越小其隔声量越高，这显然不是我们想要的大尺寸隔声结果。

因此，如果样件是较为柔软具有非常低共振频率的结构，我们可以采用阻抗管的方法来测试垂直入射的隔声效果，而在混响-混响或者混响-消声实验室中测试可以得到刚度较大且入射为混响情况的实际隔声量。

## 4. 实验验证

### 4.1 测试件大小的影响

为了验证以上结论，我们对一个橡胶样件进行验证，分别在大阻抗管（直径 10cm）和小阻抗管（直径 3cm）中进行测试。



图 5 测试样件及测试阻抗管

两次测试结果如图 6。可以看到大管是一条非常吻合的质量控制区曲线，而小管的曲线则由于边界条件的影响具有高低起伏的几个峰值和波谷（频带内只有少数模态）。在 2000Hz 以上，小管模态数增多，呈现标准的隔声曲线走势。这说明样件越小，低频率单个模态的作用越明显。

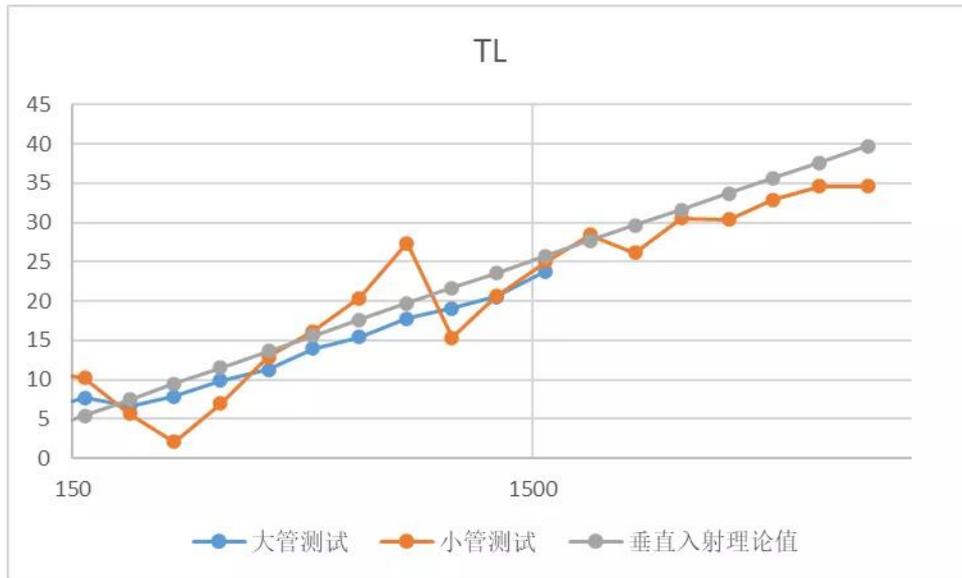


图 6 阻抗管测试隔声曲线

在低频采用大管的测试结果，高频采用小管测试结果，整个测试频段的隔声与理论分析结果进行对比。理论值和测试值的基本走势一致，误差在 3dB 以内。

#### 4.2 测试件刚度的影响

分别在 3cm 和 10cm 直径的阻抗管中测试硬质水泥涂层的隔声量，其结果如图 7 所示。

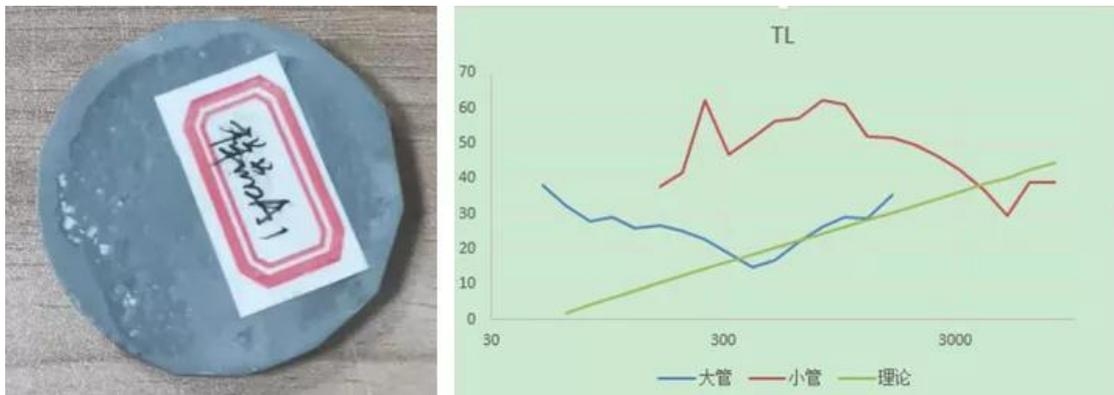


图 7 硬质水泥涂层及其阻抗管隔声测试和理论值对比

可以看到大管在 400Hz 以下均为刚度控制区，在 400Hz 以上才与理论的隔声曲线相吻合。对于小管来说，由于其尺寸小，模态频率高，直到 5000Hz 依然不能确定是否进入吻合。

## 5. 结论

对于一个柔性材料，使用阻抗管测试的方法可以得到垂直入射的隔声特性，在质量控制区样件的隔声测试结果与实际理论计算值相吻合。

详见：寻找阻抗管中的隔声标准样件之路

大尺寸的样件共振频率低，能够更快的到达质量控制区，小样件的共振频率高，达到质量控制区的频率更高。

刚度大的样件在阻抗管中很难进行隔声性能评估，大管受到平面波理论的限制只能测试至 2000Hz，而此时由于结构模态高，可能仍未到达质量控制区或者质量控制区域频率较小；小管样件的模态频率太高，很难测试得到质量控制区域的性能。

[1] GB\_Z27764-2011 声学 阻抗管中的传声损失的测量

[2] Frank Fahy, Paolo Gardonio. Sound and structural vibration

### 北京声望声电技术有限公司

经过二十几年的努力，声望技术已发展成为国内声学测量的主要品牌，客户遍及航空、航天、汽车、电子、家电，高校研究所和环保等领域。在国际市场上，声望生产的传声器已得到全球广泛的认同，主要的声级计厂家都会使用声望传声器。在占领 OEM 市场的同时，声望技术也在积极地推广自主品牌，在全球发展了 28 家经销商，在世界各地都可以买到声望技术的产品。