

封闭空间噪声控制工程声学计算

梁凤锁

(深圳中雅机电实业有限公司 2005年)

Noise Control Calculate in Enclosed Space

Liang Fengsuo

(ShenZhen zyme Ltd.)

摘要：本文以统计声学理论为基础，推导出稳态混响声场内围护结构表面入射声强与混响声强的关系。为封闭空间内噪声控制工程的吸声和隔声计算提供一条方便的途径，并以此思路进行典型隔声计算过程分析。最后，以工程实例形式，对作者提出的计算方法进行了演示计算及实测验证。

关键词：稳态声场 噪声 声学计算 入射声强

Abstract : In this paper, the relation between the reverberation sound and incidence sound at wall surface in steady-state sound field will be analyzed using statistical method. The conclusion simplifies the acoustics calculation in noise control project. For instance, the author gives the analytic process for a typical calculation of noise isolation. In the end, the method is employed in a factual case.

Keywords : Steady-state sound field; noise; acoustic calculate; incidence sound intensity levels

在噪声治理工程中，经常遇到在较为复杂的声学条件下进行定量声学计算。如：多噪声源厂房中，需要对一些重点噪声源采取加装隔声罩的专项治理；电视转播室等背景要求很低的房间，需要同时较为合理解决空调系统噪声、房间串声等系列问题；剧场建筑观众厅中，需要对围护结构隔声、设备及空调消声、混响时间等综合设计。本文统一称之为封闭空间噪声控制工程。此类工程，就对敏感点噪声贡献而言，有多途径、多因素的影响；从声场分布上，应区别直达声和混响声。涉及的声学计算较为复杂。

本文结合统计声学 and 几何声学的分析方法，对稳态混响声场中，混响声、围护结构表面入射声、混响室吸声系数之间的关系进行了定量推导。期望通过强化“围护结构表面入射声”的概念，为噪声控制工程定量化计算提供方便的途径。同时，通过对规范建议的构件隔声量测试计算公式分析，提出实际工程中封闭空间之间隔声计算过程中容易发生的计算模型不准确问题，并给出解决方法。最后，结合工程实例，对作者观点进行验证。

1. 稳态混响声场围护结构表面入射声功率

统计声学稳态混响声场吸声材料的能量吸收与混响声功率的能量平衡关系如下：

$$\frac{cS}{4V} \alpha_{avg} \frac{I}{c} V = W(1 - \alpha_{avg}) \quad (1-1)$$

式中： S 为围闭空间内表面积； I 为混响声强； W 为声源声功率； α_{avg} 为平均吸声系数；

$\frac{cS}{4V}$ 为声能粒子单位时间与壁面的碰撞次数； $\frac{I}{c}$ 为声能密度； $W(1 - \alpha_{avg})$ 为混响声功率。

把公式.1-1 的简化：

$$\frac{I}{4} \alpha_{avg} S = W(1 - \alpha_{avg}) \quad (1-2)$$

从几何声学的角度分析，材料的吸声系数随声波入射角度的不同而不同，用混响室方法测得的吸声系数即为---单位面积元在半空间角内声波均匀入射的情况下的材料平均吸声系数。工程中经常遇到这样的问题：在分析室内声场的材料吸声或构件隔声时，到底有多少声能量入射到构件表面？换句话说，混响声场内，平均吸声系数对应的入射声强到底取多大？

从公式（1-2）可以看出：稳态混响声场中入射围护结构表面的声强与混响声强的关系如下：

$$I_{\lambda} = I/4 \quad (1-3)$$

这样，在工程计算中，可以直接使用此结果进行分析计算，可大大简化计算过程。

2. 典型隔声计算过程——构件隔声量测试过程分析

如图 1 为混响室测试构件隔声量示意图：

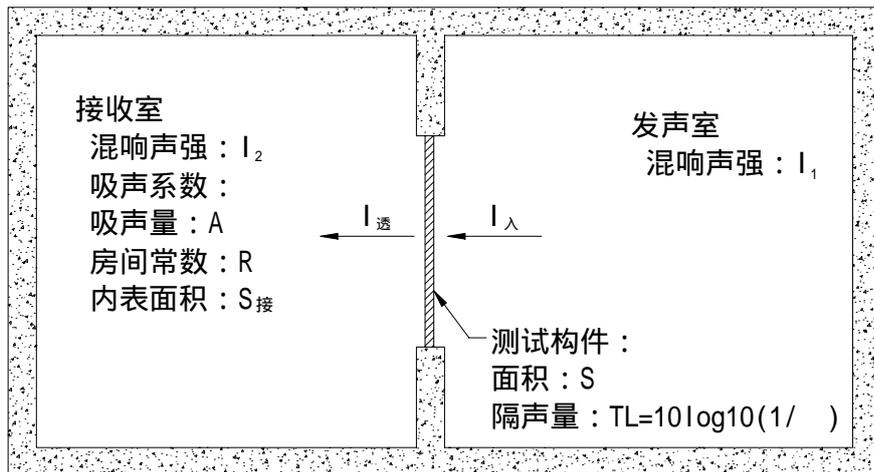


图 1 混响室构件隔声量测试示意图

$$\text{发声室：} I_{\lambda} = I_1/4 \quad (2-1)$$

$$\text{构件隔声后，透射声功率：} W_{\text{透}} = I_{\text{透}} S = I_{\lambda} \tau S = \frac{I_1}{4} \tau S \quad (2-2)$$

$$\text{接收室: } \frac{I_{混}}{4} \alpha S_{接} = \frac{I_{混}}{4} A = W_{混} \quad (2-3)$$

就考虑通过构件透射的直达声的方式，可以把构件隔声量的计算公式分为两种形式：

2.1. 直接计算通过构件透射的直达声

$$\text{透射声功率经一次反射后即为混响声功率: } W_{混} = W_{透}(1 - \alpha) \quad (2.1-1)$$

此时，接收室测量得声强为混响声强加直达声强平均值：

$$I_2 = I_{直, 平均} + I_{混} = I_{直, 平均} + I_1 \tau \frac{S}{R} \quad (2.1-2)$$

$$\text{整理公式 2.1-2 得构件隔声量为: } TL_{理论} = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} + \frac{I_{直, 平均}}{4I_{透}} - \frac{S}{S_{接}} \right) \quad (2.1-3)$$

2.2. 直达声近似计算

透射声功率不经一次反射，直接作为接受室混响声功率，不单独计算透射直达声。实际上直达声对测试值的影响近似用一定量的混响声代替：

$$W_{混} = W_{透} \quad (2.2-1)$$

$$I_2 = I_{混} = \frac{4W_{混}}{A} = I_1 \tau \frac{S}{A} \quad (2.2-2)$$

$$\text{整理公式 2.2-2 得构件隔声量为: } TL_{规范} = L_1 - L_2 + 10 \log \frac{S}{A} \quad (2.2-3)$$

此为规范推荐计算公式。

2.3. 分析及工程意义

对比公式 2.1-5 与公式 2.2-3：

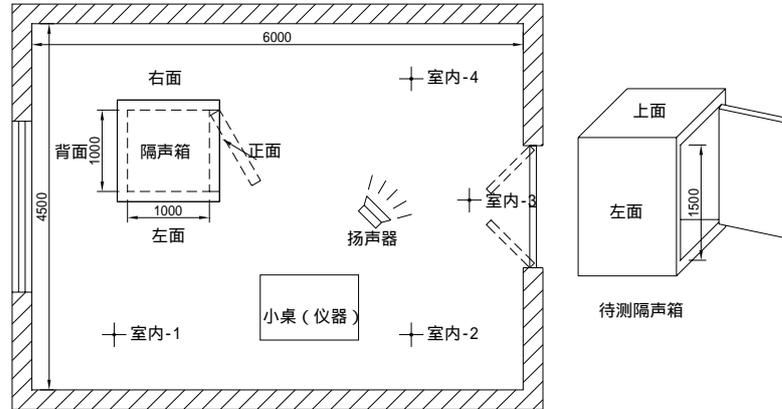
$$\Delta_{TL} = TL_{理论} - TL_{规范} = 10 \log \left(1 + \frac{I_{直, 平均}}{I_{透}} \cdot \frac{A}{4S} - \alpha \right) \quad (2.3-1)$$

式中比值 $I_{直, 平均} / I_{透}$ 为小于 1 的数值；符合规范要求的接受室：吸声量 A 一般为：3~10m²；一般为 0.05~0.1；测试构件面积：10 m²；则：TL 取值范围为 0~1dB 之间，误差范围可以接受。

需要指出的是：工程中对两室之间构件隔声设计时，不能对任何情况都简单套用式 2.2-3 计算两室之间声压级差。如：接受室内敏感点不在直达声辐射范围之内——有遮挡，同时房间内吸声量较大，则使用式 2.2-3 则会引起较大计算误差。应对直达声和混响声分别计算处理。直达声对敏感点的影响可以用辐射面对敏感点进行二重积分的方式获得。

3. 某消音箱声学计算及测试验证

如图为某工厂用于测试电子类产品机械噪声的消音箱，本文通过精确计算和测试方式，分别获得其在测试环境下箱内外声压级差，进行设计验证。



测试现场平面图

3.1. 箱体声学参数

箱体由隔声板组装而成。顶板及侧板构造为：1.2mm 镀锌钢板+12mm 石膏板(双层)+48K 玻璃棉+0.8mm 穿孔板；底板构造为：3mm 镀锌钢板+12mm 石膏板(双层)+48K 玻璃棉+0.8mm 穿孔板。箱内为吸声面；内表面几何尺寸：1m × 1m × 1.5m 板厚均为 125mm。

箱体隔声板隔声量及吸声系数如下：

	隔声量									吸声系数							
	125	250	500	1K	2K	4K	8K	STC		125	250	500	1K	2K	4K	8K	NRC
侧顶板	21	27	38	48	58	67	66	40		0.89	1.2	1.16	1.1	1	1	0.9	0.95
底板	30	32	41	50	59	67	71	45		0.94	1.19	1.11	1.1	1	1	1	0.95

3.2. 测试

实验测试内外声压级如下：

位置编号	125	250	500	1K	2K	4K	8K	A 声级
箱体外侧声压级平均	102	100	95	91	85	87	81	98
箱体内侧声压级平均	82	71	63	59	50	48	39	69

3.3. 计算

- 1) 箱外声场，设为扩散声场，混响声强为 $I_{外}$ ；入射在隔音箱各表面的入射声强为： $I_{入} = I_{外}/4$ ；
- 2) 隔声板隔声量为 TL_i ；透射系数为 τ_i ；各表面透射声强为 $I_{透} = I_{入} \tau_i$ ；
- 3) 透射声为箱内声源，箱内直达声为面扩散声。在一次碰撞前，根据扩散声场声直达声能密度的概念，各表面透射声与箱内直达声的关系为： $I_{透}/S = I_{直}/V$ ；其中 I 为平均自由程 $4V/S$ ；可得： $I_{直} = 4I_{透}$ 。箱内混响声 $I_{混} = 4I_{透}(1 - \alpha)$ ；

4) 由于箱体各面隔声量不同，上述计算过程，得分别按各面进行“积分”计算。
计算得箱内声压级：

	125	250	500	1K	2K	4K	8K	A 声级
$L_{直达}=10*\log(I_{透i}/S_i/(I_0V))$	80	72	56	43	27	20	15	67
$L_{混响}=10*\log(4*(1/R)*S_i*(I_{透}/I_0))$	70	0	0	0	0	0	5	54
$I_{内}=I_{直达}+I_{混响}$	80	72	56	43	27	20	15	67

3.4. 分析

对比测试及计算结果如下：

	125	250	500	1K	2K	4K	8K	A 声级
$L_{箱外测试}-L_{箱内测试}$	21	29	31	32	34	38	42	29
$L_{箱外测试}-L_{箱内计算}$	22	28	39	48	58	67	66	30

对比结果表明中低频吻合程度较好，高频计算误差较大。A 声级表观隔声量接近。实际噪声控制工程中测试结果表明，隔声降噪量要低于理想化的计算结果，主要原因如下：隔声构件工程安装的边界嵌固条件较混响室测试时差，实际隔声量有所降低；安装缝隙漏声对高频声影响较大；设计隔声等级较高时，固体传声对敏感点噪声贡献应有效阻止。

4. 小结

本文目的有二：强调稳态声场中壁面入射声与混响声的能量关系 $I_{入}=I_{混}/4$ ；以期简化工程中遇到的隔声和吸声计算过程；定量讨论封闭空间内透过局部构件的辐射声对声内声场的直达声和混响声贡献，说明不同声学条件下计算模型简化的方法，提高计算准确性。

参考文献：

- 《工程噪声和振动控制基础》[澳] M.P.诺顿 航空工业出版社 1993 年 9 月
《声学基础》 杜功焕 等著 南京大学出版社 2001 年 3 月

作者简介：

姓名：梁凤锁

出生：1969 年 6 月

性别：男

籍贯：山西·离石

学历：本科 太原工业大学 工民建专业 硕士研究生；

专业：建筑物理；研究方向：建筑声学

职务：深圳中雅机电实业有限公司 技术部经理

职称：工程师

职业：声学工程的设计、施工

email：lfs@zyme.cn