

围护结构隔声理论

〔苏联〕В·И·扎鲍罗夫著 徐侗民译

中国工业出版社

66

26

围护结构隔声理论

〔苏联〕В·И·扎鲍罗夫著

徐倜民译 章启馥校

中国工业出版社

这本专著是关于围护结构对空气噪声和撞击噪声隔声理论的第一部文献。

书中一般地研究了声音通过单层密实障板和多孔障板的声传递问题，提出了围护结构的隔声计算方法。以本书中叙述的组合板的计算理论为依据，研究了具有横向和纵向弹性联系的分层围护结构（双层隔墙、浮筑式楼板及其它多层围护结构）的隔声。书中详细地研究了弹性垫层中的波动过程对分层围护结构隔声的影响。

书中还将理论研究的结果和实验结果作了比较，并对单层和多层围护结构隔声的计算和设计，提出了实用的结论和建议。

本书可供从事建筑结构和其它结构隔声设计的工程师、科学研究工作人员和大专学校师生参考。

В.И.ЗАБОРОВ
ТЕОРИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ
ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ГОССТРОЙИЗДАТ МОСКВА 1962

* * *
围护结构隔声理论
徐侗民译 章启霞校

*
建筑工程部图书编辑部编辑（北京西便门大街）

中国工业出版社出版（北京·鼓楼大街10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

*
开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $47\frac{1}{8}$ ·字数98,000

1964年8月北京第一版·1964年8月北京第一次印刷

印数0001—3,360·定价（科七）0.75元

*
统一书号：15165·3118（建工-375）

序

現在，摆在从事建筑声学方面工作的专家和工程师面前的各种任务中，围护结构的隔声問題，是声学中最重要的問題之一。

這個問題的意义，由下列几点决定：

第一，具有很繁忙的公共運輸和載貨運輸的城市和工业中心的发展，引起了城市噪声对人們的作用强度和延續時間的增长。測量表明，在近20年来，街道運輸噪声級的增长不小于10分貝，噪声作用的相对延續時間的增长不小于10~15倍，而且噪声級大大超过了允許值。由于这个原因，防止噪声对居民的干扰，已成为現代城市很重要的公共卫生問題之一。

第二，在住宅和公共建筑物的現代工业化施工方法的情况下，我們采用了輕质材料和輕型結構。因此，由围护結構重量所决定的这种材料或結構的隔声，对于有效地防止噪声，显然逐漸成为不足。有种种方法可以使結構的隔声量提高到标准值，如采用彼此間只有空气隔层或只有隔声材料层的分离双层板所組成的围护結構即为一例。保証围护結構在最小重量下有标准隔声量的新型組合围护結構的設計，是一个很重要的科学、技术和經濟問題。這個問題的正确解决，可使很多建筑物的造价大大降低。

在解决這個問題时，围护结构的隔声理論起着主导作用，这个理論是在对主要的物理因素作了足够严格的考虑后发展

起来的；这种物理因素决定声音通过围护结构本身及通过侧向途径的声传透过程。縝密建立的理論，不仅有可能預先計算所設計的围护结构的隔声量，而且开辟了寻求新型结构方案的途径；这种方案是以运用理論上所闡明的規律为根据的，同时，这种方案在純实验性研究已用于建筑实际中的结构时容易被忽略。

在专门性文献中，有着大量关于各种隔声理論問題的著作。在这些著作中，B·И·扎鮑罗夫的研究占有很重要的地位。最近几年来，他系統地并富有成效地从事解决有关围护结构隔声的复杂理論問題的研究。但是，到目前为止，在苏联和国外，对包括現代隔声理論全部問題，給予有条理的、足够完整的叙述的书籍，还没有出版过。

B·И·扎鮑罗夫的著作，成功地填补了这个早已觉察到的空白；这本著作概括了适合于各种类型的围护结构对空气噪声和撞击噪声隔声計算的主要問題。对所提出的問題，是从严格的理論分析着手研究的，自然，研究时还运用了合理而簡單的假設。因此，所获得的结果导出了比較簡單的計算公式，这些公式表明了应用范围，并評定了近似計算的允許誤差。同样，也应该指出，书的每一章的結尾，都提出了实用的結論，和指导設計者选择最好方案的建議。

在B·И·扎鮑罗夫的书，系統地概括了他自己独特研究的主要成果。而在研究已为其他研究工作者解决了的問題中，B·И·扎鮑罗夫或者指出了更为簡單的解題方法，或者在对沒有考虑的因素（特別是能量的損耗因素）的作用进行評价时，补充說明了已經熟知的成果，或者，将这些作者的复杂而繁瑣的解題方法，引导为工程計算运用中較為簡便的解題形式。

В·И·扎鮑罗夫的专题論文的价值，不仅在于可以利用它来制定新型围护结构方案，和預先計算所希望的隔声效果，而且，对于这样一种事实，也有同样重要意义，那就是：着手从事建筑声学工作的年輕学者，可以运用这本专著，获得作为独立工作所必要的、能满足这一学科的現代要求和科学水平的知識。

苏联建筑
科学院院士 В·富尔杜耶夫 (Фурдуев) 教授

主要符号

1. 拉丁字母符号

a 、 b —— 长方形板的边长；

c —— 在空气中的声速；

C_i —— 任意积分常数；

$$c_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho_c}} \text{ —— 纵波速度；}$$

$$c_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho_c}} \text{ —— 横波速度；}$$

$$c_n = \sqrt{\frac{E}{(1 - \sigma^2)\rho_c}} \text{ —— 在板中的纵波速度；}$$

$$c_{ni} = \sqrt{\frac{4}{m_i} \frac{D_i \omega^2}{m_i}} \text{ —— 在 } i \text{ 板中弯曲波相速度；}$$

$$D_i = \frac{2E_i \delta_i^3}{3(1 - \sigma_i^2)} \text{ —— } i \text{ 板的弯曲劲度（弯曲柱式劲度）；}$$

$$d = \frac{c_2}{c_1} \text{ —— 横波速度对纵波速度之比；}$$

E_i —— i 板的杨氏模量；

E_B —— 空气的弹性模量；

E_n —— 材料的动态杨氏模量；

E_{cr} —— 材料的静态杨氏模量；

f —— 振动频率（赫兹）；

$$f_{rpi} = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_i}{D_i}} \text{ —— } i \text{ 板的临界频率（赫兹）；}$$

f_{ti} —— 系统的固有振动频率（赫兹）；

f_1 —— 单自由度系统的固有振动频率（赫兹）；

F_i ——单位长度 i 板的横截面积;

$h = 2\delta$ ——弹性层厚度;

$h_0 = 2\delta_1$ ——組合板的中性平面间的距离;

h_i —— i 板的厚度;

$J_i = \frac{1}{12} h_i^3$ —— i 板的转动惯量;

$i = \sqrt{-1}$;

I ——力的冲量;

k ——压缩或拉伸时的弹性基础系数*, 整数;

$k_1 = \frac{\omega\delta}{c_1}$ ——无量纲参量;

$k_2 = \frac{\omega\delta}{c_2}$ ——无量纲参数;

$k_0 = \frac{\omega}{c}$ ——波数;

k_a 和 k_e ——弹性层在对称和反对称振动时的横向刚度系数;

L ——噪声级;

ΔL ——撞击噪声级降低值(撞击噪声隔声改善值);

M_{xi}, M_{yi}, M_{xyi} ——在組合板基本系统 i 板中外力 q_i 的挠矩和扭矩;

$M_{xpi}, M_{ypi}, M_{xypi}$ ——在組合板基本系统 i 板中力 p 的挠矩和扭矩;

M_x^i, M_y^i, M_{xy}^i ——在組合板基本系统 i 板中所有力的总力矩;

m ——整数, 质量;

m_i —— i 板的单位面积质量;

m_n ——薄板的单位面积质量;

P ——力;

$P_0 = \frac{1}{2} (p_1 + p_2 + p_3)$ ——荷载的对称部分;

* 指单位厚度的弹性模量——译者注。

$P_a = -\frac{1}{2}(p_1 + p_2 - p_3)$ ——荷载的反对称部分；

p ——在組合板弹性联系中的横向力；

p_i ——声波的壓力；

p_{mn} ——长方形板固有振动的圆频率；

p_{mnk} ——具有自由度为 $m, n, k=1, 2, 3, \dots$ 的系统固有振动圆频率；

Q_{xi}, Q_{yi} ——由外力 q_i 作用而产生在基本系统 i 板中的横向力；

Q_{xpi}, Q_{ypi} ——由力 p 作用而产生在基本系统 i 板中的横向力；

q_i ——作用于 i 板的外力；

R ——围护结构的隔声量（分贝）；

ΔR ——隔声改善值（分贝）；

r ——孔的直径；

$r = \frac{ph}{c_1^0}$ ——无量纲参量；

S ——围护结构的面积；

s ——切变时弹性基础系数，骨架和包含在骨架中空气間的相互作用力；

s_e 和 s_a ——弹性层在对称和反对称振动时的纵向劲度系数；

T ——撞击时间間隔；

T_x, T_y ——沿 x 和 y 方向的切向力；

t ——时间；

u, v, w ——位移；

V ——振动級；

v_{CK} ——骨架的振动速度；

v_B ——在孔中空气的振动速度；

X_x, Y_y, Z_z ——法向应力；

X_y, Z_y ——切向应力；

x, y, z ——坐标；

Z ——阻抗（声压对振动速度之比）；

z_0 ——空气的声阻抗率；

z_i —— i 板的中性轴到组合板分界面的距离。

2. 希腊字母符号

$\alpha = \frac{p_{mn}}{\omega_0}$ ——具有半波数为 m, n 的长方形板的固有振动频率对浮筑面层固有振动频率之比；

$\beta = \frac{D_1}{D_2}$ ——浮筑面层的弯曲劲度对承重板的弯曲劲度之比；

γ_{xyz} ——在组合板分界面上 i 板的相对切变；

Δ ——声波以 θ 角入射于围护结构时服从质量定律的围护结构的透射系数；

$2\delta = h$ ——弹性层厚度；

$2\delta_1 = h_0$ ——组合板中性平面间的距离；

ε ——结构因子，很小变化的量值；

$\varepsilon_{xt}, \varepsilon_{yt}$ ——组合板分界面上沿 x, y 轴方向的 i 板的相对伸长；

η_n ——板的损耗系数；

η_c ——弹性联系或弹性层的损耗系数；

$\theta_{mn}(p)$ —— $\theta_{mn}(t)$ 的初始函数表示式；

θ ——声波的入射角；

θ_{ct} —— i 板的吻合角；

λ ——拉梅系数；

λ_B ——在空气中声波波长；

λ_n ——横波波长；

λ_α ——在板中的弯曲波长；

$\lambda_1 = \frac{m_2}{m_1}$ ——承重板质量对浮筑面层质量之比；

$\lambda_2 = \frac{m}{\rho_c h}$ ——板的质量对弹性层质量之比；

μ ——拉梅系数，多孔材料的流阻；

ν ——空气的滞粘率；

$\nu_{mnk} = \frac{p_{mnk} h}{c_1}$ ——无量纲的量；

χ ——衰减系数；

ρ_0 ——空气密度（单位体积质量）；

ρ_B ——在围护结构孔中空气的密度（多孔材料单位体积的空气质量）；

ρ_c ——弹性层的密度；

Σ ——总和；

$\sigma_0(t)$ ——单位函数；

σ ——泊松系数，空隙率；

τ ——按声波入射角平均的障板透射系数，作用力的持续时间；

τ_x, τ_y ——发生于组合纵向联系中的切向力；

τ_θ ——声波以 θ 角入射于障板时的透射系数；

ψ_{mn} ——特征函数；

ω ——振动圆频率；

ω_0 ——单自由度系统的固有振动圆频率。

目 录

序

主要符号

緒論	1
第一章 通过单层障板的声传透	3
§ 1 初步的評述	3
§ 2 在声波作用下弹性层的运动	4
§ 3 薄板的隔声	13
§ 4 柔软材料围护结构的隔声	20
实用的結論和建議	24
第二章 多孔围护结构对空气噪声的隔声理論	26
§ 5 一般概况	26
§ 6 一面开孔另一面閉孔的多孔围护结构	29
§ 7 双面閉孔的多孔围护结构	38
实用的結論和建議	40
第三章 具有纵向和横向弹性联系的組合板理論	41
§ 8 組合板的联系方程	41
§ 9 組合板的运动方程	48
§ 10 某些特殊情况	51
第四章 分层围护结构对空气噪声的隔声理論	54
§ 11 具有纵向弹性联系的分层围护结构	54
§ 12 具有横向和纵向弹性联系的分层围护结构	65
实用的結論和建議	70
第五章 楼板对撞击噪声的隔声理論	72
§ 13 前提	72

§ 14 单层楼板	74
§ 15 具有纵向弹性联系的分层楼板	84
§ 16 具有横向和纵向弹性联系的分层楼板	90
实用的結論和建議	91
第六章 考虑了声波在弹性联系中传播的分层围护 结构隔声理論	93
§ 17 具有纵向弹性联系的分层围护结构对空气噪声的 隔声	93
§ 18 具有横向和纵向弹性联系的分层围护结构对空气 噪声的隔声	102
§ 19 分层楼板对撞击噪声的隔声	111
§ 20 弹性材料动态特性的共振测量方法的总结	124
实用的結論和建議	131
附录	134
参考文献	142

緒 論

近代技术的应用和发展，在很多情况下和强烈噪声的发生有关。这既关系到工业和交通运输业（主要指航空和造船业），又关系到住宅建筑和公共建筑。

近年来，在建筑中防止噪声的必要性已显著增大。一方面是由于建筑事业向利用新的轻质材料和轻型结构的工业化方向发展所致，另外，也由于收音机、电视机和一系列卫生技术设备的广泛采用，增强了房间内的噪声级的缘故。

近代实践中，对防止噪声采用了各种不同的方法，可以根据各种特殊情况，选择最合理的方法（例如，见文献⁽¹⁾、(23)、(25)、(29)、(45)、(52)、(54)）。

在本书中仅仅研究了防止噪声方法之一，即围护结构的隔声问题。

最近十至十五年来，由于很多国家进行了研究，在这方面已获得了巨大的成就。这里首先应该指出的，是L·克来末（Gremer）的著作，它对隔声理论的发展起了很大的作用。A·伦敦（London）和A·肖哈（Schoch）的著作，以及K·哥式雷（Gösele）的实验研究，也起了很重要的作用。

在苏联，С·П·阿雷克雪夫（Алексеев）、Н·М·古雪夫（Гусев）、И·Г·雷依泽尔（Лейзер）、В·Н·尼古尔斯基（Никольский）、Б·Д·塔尔达高乌斯基（Тартаковский）、А·К·基蒙菲夫（Тимофеев）、Ю·И·施奈达尔（Шнейдер）等人促进了隔声理论和隔声技术

的发展。

同时，到目前为止，围护结构隔声的研究，还仅仅是通过实验方法来进行，还没有隔声的实用计算方法。在隔声测量时出现的一系列的現象，直到目前还没有获得理論上的解释。围护结构的設計，是建立在經驗法則和方案的基础上的，对于控制声音通过障板传透过程的很多应有的物理規律性的知識还很缺乏。

本书闡明了作者若干年来所研究过的隔声理論問題。

在这一著作中，作者广泛运用了建筑力学和弹性动力理論的方法，特別认为这些方法可以而且应该成为研究围护结构隔声理論的主要工具。

作者曾力求采用連續簡化的方法，将已获得的复杂而繁瑣的隔声表示式，化成比較簡單的表示式，以便让工程师們在計算实践中能够运用。

第一章 通过单层障板的声傳遞

§ 1 初步的評述

我們将从研究简单的单层障板的各种計算方法开始，来叙述围护结构的隔声理論，并确定它們的应用范围。这样就有可能有更多的根据，来选择多层结构声傳遞的計算公式。

围护结构的最早模型是由瑞利（Rayleigh）提出的⁽⁴²⁾。瑞利将研究的墙，看作是有限厚度的无限大平面障板，并假设板上沒有切应力的存在。如果在墙中的纵波波长比墙的厚度大得多时，那么，在声波正入射的情况下，墙的所有部分振动是同相的。此时，障板可以看作是刚性活塞的形式。

在H·雷哀斯納尔（Reissner）所作的首次研究中⁽⁷⁹⁾，考虑到了声波斜入射时墙內发生的切应力。但是，在他获得的结果中，含有很复杂的公式，以致在实践中无法加以分析。

L·克来末深入地研究了隔声理論⁽⁶⁸⁾，他是从假设墙是无限大薄板并作弯曲振动出发的。这一理論是关于刚性材料（混凝土、鋼、砖、玻璃等）围护结构的近代隔声概念的基础。为了建立在任何頻率范围内、对任何材料都为正确的先决条件，L·克来末研究了在比較普遍情况下，声音通过各向同性平面弹性层围护结构的声傳遞現象。

在这里，对任何障板形式，首先发生了关于它們尺寸和边界固定作用的普遍性問題。因此，L·克来末和A·伦敦的近代隔声理論⁽⁷⁶⁾，都假定围护结构是无限大的。

考虑墙的边界条件和尺寸时，即使是最简单的墙（可以看作薄板），在数学上问题也是够复杂的⁽⁸⁰⁾，对于比较复杂的围护结构，那就更难解决了。所以，重要的是，要善于评定各种边界条件对隔声的影响。在这方面，M·黑克尔（Heckl）的工作是重要的⁽⁷²⁾，在他的工作中，提出了连接于侧墙的隔墙的隔声近似计算公式。分析所得到的结果表明：在低于被称为临界频率（见§3） f_{rp} 的范围，墙的固定条件，对它的隔声能力没有影响。然当 $f > f_{rp}$ 时，在一般情况下，隔声将会降低，此时应考虑到减去与 $10\lg l$ 成正比的附加项（ l 为墙的长度）。但是，在很多重要的特殊情况下，墙的尺寸是没有作用的。这里指的是这样的条件，即当隔墙和墙相连接时，实际上弯曲波能量并不从隔墙（节点的连接或侧墙的弯曲劲度，比隔墙的劲度差得很多）传出。而且还有这样的情况，当由于隔墙材料中内摩擦对隔墙振动所吸收的能量，大于传到侧墙上的能量时，墙的尺寸是没有作用的。

因此，在研究具有很大内摩擦的轻质结构（这种结构类型正是下面我们研究的基础）时，在一级近似情况下，可以忽略边界条件的影响，而将障板看作沿长度方向是无限大的。

§ 2 在声波作用下弹性层的运动

为了较清楚地获得关于弹性层声传透特性的物理概念，与H·雷哀斯纳尔⁽⁷⁹⁾、A·肖哈⁽⁸¹⁾不同，作者将作用在障板上的声压，合理地分解成对称和反对称部分，同时也考虑板层中的内摩擦。

假设平面“单色”波以 θ 角入射于厚度 $2d$ 的无限大各向