

BÀI GIẢNG ÂM HỌC KIẾN TRÚC

Mục đích:

+ Cung cấp cho sinh viên những kiến thức cơ bản về âm thanh, sự hình thành trường âm trong phòng khán giả, tính chất hút âm và phản xạ âm của các bề mặt vật liệu & kết cấu, những quy luật lan truyền của âm thanh trong công trình & trong đường phố.

+ Trang bị cho sinh viên những kiến thức cơ bản để thiết kế nội thất âm học Phòng khán giả để đảm bảo chất lượng âm thanh trong phòng.

+ Trang bị cho sinh viên những hiểu biết về tiếng ồn, quan hệ giữa tiếng ồn và sức khỏe con người để giải quyết các bài toán về cách âm và chống ồn.

Chương I: NHỮNG KHÁI NIỆM CƠ BẢN VỀ ÂM THANH - MỘT SỐ TÍNH TOÁN CƠ BẢN

I. Bản chất vật lý của Âm Thanh.

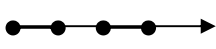
1. Sóng âm:

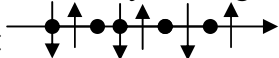
Về mặt vật lý âm thanh chính là dao động của sóng âm trong môi trường đàn hồi sinh ra khi có các vật thể dao động được gọi là nguồn âm. Bản chất của nguồn âm là kích thích sự dao động của các phần tử kế cận nó nên âm thanh chỉ lan truyền trong môi trường đàn hồi. Môi trường đàn hồi có thể coi là những môi trường liên tục gồm những phần tử liên kết chặt chẽ với nhau, lúc bình thường mỗi phần tử có 1 vị trí cân bằng bền (môi trường chất khí, chất lỏng, chất rắn là những môi trường đàn hồi).

Trong quá trình truyền âm thì dao động giảm dần & tắt hẳn.

a. Phân loại phương dao động:

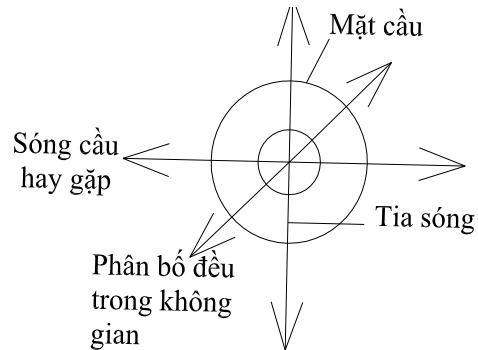
Tùy theo tính chất của môi trường đàn hồi mà có thể xuất hiện sóng dọc hay sóng ngang.

- Sóng dọc:  phương truyền. Xảy ra khi các phần tử dao động song song với phương truyền âm. Xảy ra trong môi trường chất lỏng, khí.

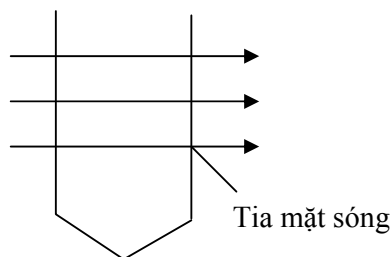
- Sóng ngang:  phương truyền: Xảy ra khi các phần tử dao động vuông góc với phương truyền âm. Xảy ra trong môi trường rắn.

* Dạng mặt sóng: Mặt sóng là mặt chứa những điểm (phần tử) có cùng trạng thái dao động tại một thời điểm nào đó

- Sóng cầu: Khi nguồn sáng là 1 điểm



- Sóng phẳng: Mặt sóng là những mặt phẳng // với nhau và vuông góc tia sóng. Khi cách xa nguồn sóng một khoảng cách cố định thì các lớp mặt sóng xem như phẳng song song.

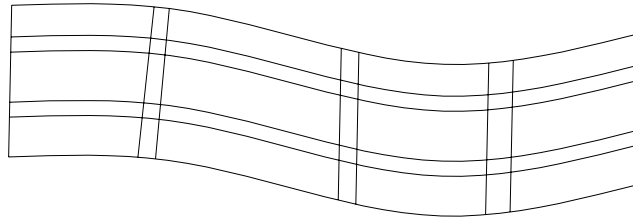


- Sóng trụ khi nguồn là một đường, mặt sóng là mặt trụ

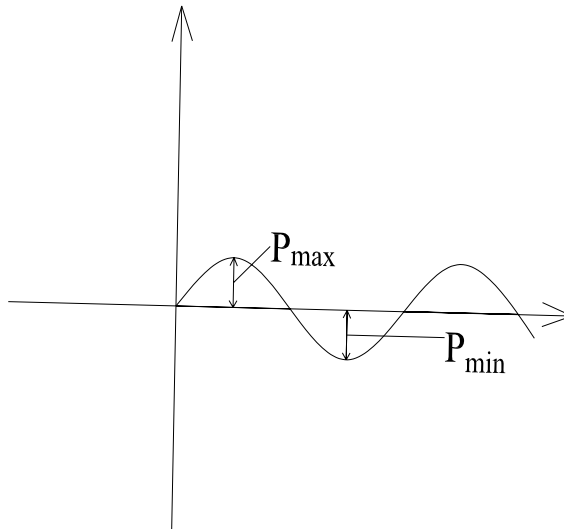
Mặt sóng là mặt trụ



- Sóng uốn: Lan truyền trong các bản mỏng như kết cấu tường



- Sóng âm được biểu diễn dưới dạng



$$P_{tb} = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}}$$

b. Các đại lượng đặc trưng của sóng âm là:

+ Tần số: f (hz)

Số dao động của các phân tử thực hiện trong một 1giây

$$\text{Ký hiệu: } f \text{ (hz)} = \frac{c}{\lambda}$$

Tại nguồn cảm thụ được những âm thanh có tần số từ 16 đến 20.000 hz. Những âm thanh có $f < 16\text{hz}$ gọi là hạ âm. Tại người không cảm thụ được. Những âm thanh có $f > 20.000 \text{ hz}$ gọi là siêu âm. Tại người không cảm thụ được âm thanh này

+ Chu kỳ: T(s)

Là số thời gian tính bằng giây để hoàn thành 1 dao động

$$T = \frac{1}{f} \text{ (s)}$$

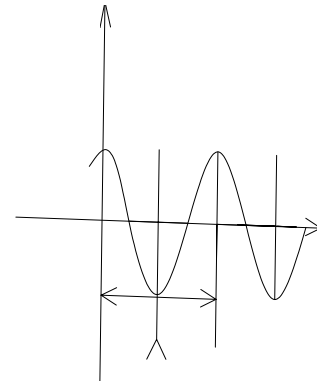
+ Bước sóng λ (cm, m)

Là khoảng cách ngắn nhất giữa 2 điểm có cùng pha dao động.

Tại người cảm thụ được những âm thanh có bước sóng

$$\lambda = 1,7\text{cm} \div 20\text{m}$$

$$\lambda = \frac{C}{f} = C.T$$



Vận tốc truyền sóng âm: C(m/s). Là đặc trưng

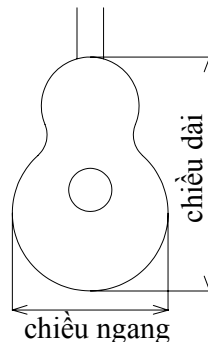
quan trọng của quá trình truyền âm. Khi môi trường khác nhau thì tốc độ truyền âm cũng khác nhau.

Vận tốc truyền sóng âm phụ thuộc vào môi trường & dạng của sóng âm lan truyền trong đó.

Ví dụ: ở $t = 0^{\circ}\text{C} \Rightarrow$ Vận tốc truyền âm trong không khí là 330m/s. Trong nước $C = 1440 \text{ m/s}$. Khi $t = 20^{\circ}\text{C}$. $C_{\text{không khí}} = 343\text{m/s}$

- Vận tốc truyền âm còn phụ thuộc cấu trúc của vật liệu

Ví dụ: Cây đàn



$$\frac{\text{Chiều dài}}{\text{Chiều ngang}} \Rightarrow \text{đạt cộng hưởng tốt nhất}$$

2. Các đơn vị cơ bản đo âm thanh theo hệ thập phân.

a. Công suất của nguồn âm P(W):

Công suất của nguồn âm là tổng số năng lượng do nguồn bức xạ vào không gian trong 1 đơn vị thời gian

b. Áp suất âm: $p[\text{W/m}^2]$

Khi sóng âm tới 1 mặt nào đó, do các phân tử của môi trường dao động tác dụng lên đó một lực gây ra áp suất âm. Áp suất ở đây là áp suất dư do sóng âm gây ra ngoài áp suất khí quyển. Áp suất âm được xác định theo công thức

$$P = \rho.C.v \text{ (đối với sóng phẳng)}$$

Trong đó: ρ [kg/m^3]: Mật độ của môi trường

C [m/s]: Vận tốc truyền âm

v [m/s]: Vận tốc dao động của các phân tử

Áp suất âm là 1 đại lượng biến thiên theo thời gian tại 1 điểm bất kỳ nào đó trong trường âm. Tùy vào thời điểm : (bị nén $\Rightarrow P_{\max}$, bị kéo $\Rightarrow P_{\min}$). Trong tính toán ta tính giá trị trung bình:

$$P_{\text{tb}} = \frac{P_{\max}}{\sqrt{2}}$$

Trong phạm vi âm nghe được, áp suất âm trong khoảng $2.10^{-4} \div 2.10^2 \mu\text{bar}$ chênh lệch 10^6 lần. Đó là phạm vi rất rộng

$$(1 \text{ bar} = 10^5 \text{N/m}^2 = 10^6 \mu\text{bar})$$

c. Âm trở của trường âm: $\rho.C$ [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

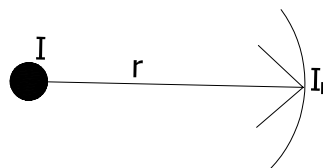
ρ [kg/m^3]: Mật độ môi trường

C [m/s]: Vận tốc truyền âm

d. Cường độ âm: $I[\text{J/m}^2, \text{W/m}^2]$: Là số năng lượng âm trong bình đi qua 1 đơn vị diện tích đặt vuông góc với phương truyền trong đơn vị thời gian.

$$I = p.v = \frac{p^2}{\rho.c}$$

Trong không gian hở (sóng âm chạy) còn gọi là không gian tự do \Rightarrow cường độ âm giảm tỷ lệ nghịch với bình phương khoảng cách



$$I_r = \frac{I}{4\pi r^2}$$

Trong đó: I_r là cường độ âm cách nguồn bằng 1 khoảng cách r .

e. Mật độ năng lượng âm: $E[\text{J}/\text{m}^3]$.

Là số năng lượng âm chứa trong 1 đơn vị thể tích của môi trường. Trong sóng âm chạy (chỉ truyền đi không có phản xạ trở lại) thì

$$E = \frac{I}{C} = \frac{P^2}{SC^2}$$

Mật độ năng lượng âm là một đại lượng vô hướng và là 1 đặc trưng rất quan trọng trong trường âm khi hướng của sóng âm đã không biết.

3. Các đơn vị đo âm thanh theo thang lôgarít:

Trong phạm vi âm thanh mà tai người nghe được thì các đơn vị trong hệ thập phân thay đổi trong phạm vi rất lớn từ $10^6 \cdot 10^{12}$ lần. Vì vậy mà tai người và các dụng cụ âm học rất khó phân biệt, đánh giá âm thanh. Mặt khác sự thay đổi một vài đơn vị đo trong hệ thập phân thì tai người không cảm nhận được. Vì vậy trong âm học ứng dụng người ta thường dùng thang lôgarít để đo âm thanh.

a. Mức cường độ âm: L_I (dB)

Cảm giác nghe to của tai người đối với 1 âm không tỷ lệ thuận với cường độ của âm đó. Khi cường độ âm từ $I_0 \Rightarrow I$ thì cảm giác nghe to tăng tỷ lệ với $\lg \frac{I}{I_0}$. Nếu gọi I là cường độ âm đang xét & I_0 là cường độ âm của ngưỡng nghe của âm tiêu chuẩn thì:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{ (dB)}$$

Với âm tiêu chuẩn : $I_0 = 10^{-12} \text{ W}/\text{cm}^2$ và $I_d = 10^{-4} \text{ W}/\text{cm}^2$

b. Mức áp suất âm: L_p (dB). Từ $I = \frac{P^2}{SC}$

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0} \text{ (dB)}$$

Với âm tiêu chuẩn $P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ N}/\text{m}^2$, $P_d = 2 \cdot 10 \text{ N}/\text{m}^2$

c. Mức mật độ năng lượng âm: L_E (dB)

$$L_E = 10 \lg \frac{E}{E_0} \text{ (dB)}$$

- Với âm tiêu chuẩn: $E_0 = 3 \cdot 10^{-5} \text{ J}/\text{m}^3$, $E_d = 3 \cdot 10^3 \text{ J}/\text{m}^3$

Mức âm $\left\{ \begin{array}{l} \text{- Ngưỡng nghe: } L_I = 0 \text{ dB, } L_p = 0 \\ \text{- Ngưỡng đau tai } L_I = 130 \text{ dB, } L_p = 140 \text{ dB} \end{array} \right.$

- Mức âm của 1 số nguồn thường gặp:
- Vườn yên tĩnh : 20 ÷ 30dB
- Tiếng nói thầm xì xào (cách 1m) : 35dB
- Nói to : (60 ÷ 70)dB
- Phòng hòa nhạc disco : 100dB

4. Phổ âm:

- Âm thanh chỉ có 1 tần số gọi là âm đơn. Trên thực tế chỉ có dụng cụ duy nhất là thanh la.

- Phần lớn các nguồn âm trong thực tế là âm hỗn hợp của nhiều âm với nhiều tần số khác nhau gọi là phổ âm. Vì vậy khi giải bài toán về âm thanh cần biết được đặc tính tần số của âm, nó cho biết sự phân bố của mức áp suất âm theo tần số.

Để thuận tiện trong âm học người ta chia phạm vi tần số âm nghe được thành các dải tần số

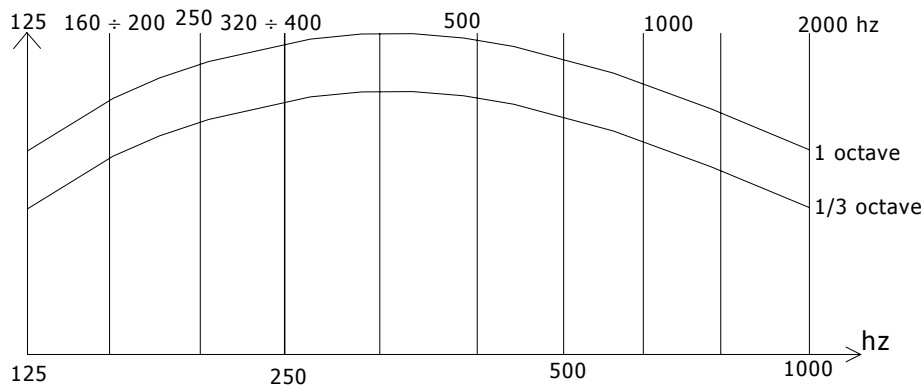
Mỗi dải tần số được đặc trưng bằng các tần số giới hạn (f_1 là giới hạn dưới, f_2 là giới hạn trên). Bề rộng dải: $\Delta f = f_2 - f_1$ và $f_{tb} = \sqrt{f_1 f_2}$

Dải 1 octave (ôc ta): $\frac{f_2}{f_1} = 2$ (hay là 1 bát độ trong âm nhạc)

125 250 500 1000 2000 hz và 4000 hz

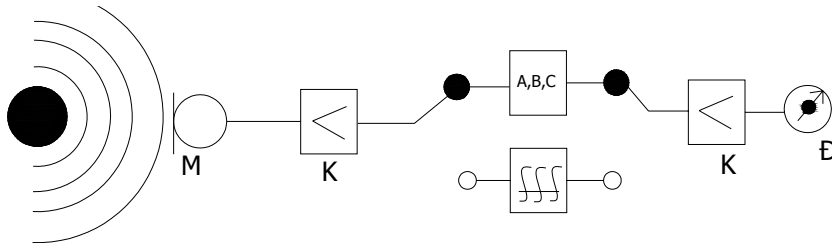
Thường được sử dụng khi nghiên cứu âm học phòng khán giả và trong chống ồn.

Dải 1/3 octave $\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2}$, Dải nửa ôcta là $\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{2} = 1,4$



5. Đo âm thanh

a. Đo bằng vật lý sau đó chuyển về đo cảm giác fôn của tai người ta dùng mạch chuyển đổi A, B, C, D



A: Mức thấp: $0 \div 40\text{dB}$

B: Mức trung bình: $41 \div 70\text{dB}$

C: Mức cao: $71 \div 120\text{ dB}$

D: Mức rất cao: $> 120\text{ dB}$

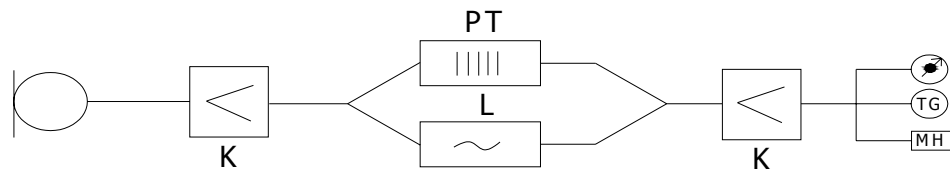
M: Micro phon

K: Bộ khuếch đại (tăng âm)

L : Bộ lọc tần số

TG: Máy tự ghi

MH : màn hình



Máy phân tích âm thanh theo tần số có thể ghi lại trên băng từ hoặc ghi lại trên màn hình.

- Các âm thanh phát ra có âm thanh ổn định và không ổn định. Âm thanh ổn định mức âm biến thiên không quá 5 dB

Ví dụ: 125 hz (1 octave) => 63dB

250 hz => 61 dB

500 hz => 59 dB

II. Các đặc trưng sinh lý của âm thanh

1. Phạm vi âm nghe thấy

- Về tần số: $f = 16\text{hz} \div 20.000\text{ hz}$

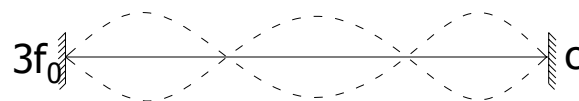
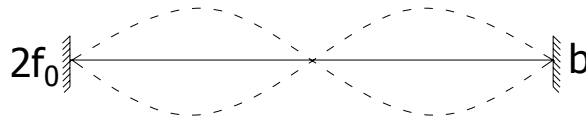
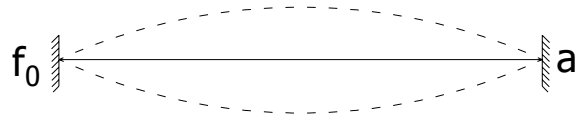
- Về mức áp suất âm: $L_p = 0 \div 120\text{ dB}$

- Ngưỡng nghe: Giới hạn đầu tiên mà tai người cảm thụ được âm thanh.

- Ngưỡng chói tai:

- Mức âm tối thiểu để tai cảm thụ $20 \div 30\text{dB}$

2. Độ cao của âm thanh: Phụ thuộc vào f: Xét dao động của 1 dây đàn



+ Khi dao trên toàn chiều dài, tần số dao động thấp nhất, âm trầm nhất gọi là âm cơ bản. Tần số f_0 gọi là tần số cơ bản, quyết định độ cao của âm thanh. Tần số f_0 gọi là tần số cơ bản, quyết định độ cao của âm thanh. Tần số dao động $2f_0, 3f_0 \dots$ đều gọi là bội số của tần số cơ bản, âm của chúng gọi là họa âm. Họa âm càng nhiều, âm nghe càng du dương. Như vậy ta có:

+ f thấp : $16 \div 355 \text{hz}$

+ f trung bình : $(356 \div 1400) \text{hz}$

+ f cao : $(1401 \div 20.000) \text{hz}$

3. Âm sắc:

Âm sắc chỉ sắc thái của âm du dương hay thô kệch, thanh hay rè, trong hay đục. Âm sắc phụ thuộc vào cấu tạo của sóng âm điều hòa. Cấu tạo của sóng âm điều hòa phụ thuộc số lượng các loại tần số, cường độ & sự phân bố chung quanh âm cơ bản

- Cường độ & mật độ họa âm cho ta khái niệm về âm sắc khác nhau.

+ Âm điệu chỉ âm cao hay thấp, trầm hay bổng. Âm điệu chủ yếu phụ thuộc vào tần số của âm: f cao \Rightarrow âm cao, f thấp \Rightarrow âm càng trầm.

4. Mức to, độ to:

Mức to, độ to của 1 âm là sức mạnh cảm giác do âm thanh gây nên trong tai người, nó phụ thuộc vào p & tần số của âm. Tai người nhạy cảm với âm có $f = 4000 \text{hz}$ & giảm dần đều 20 hz

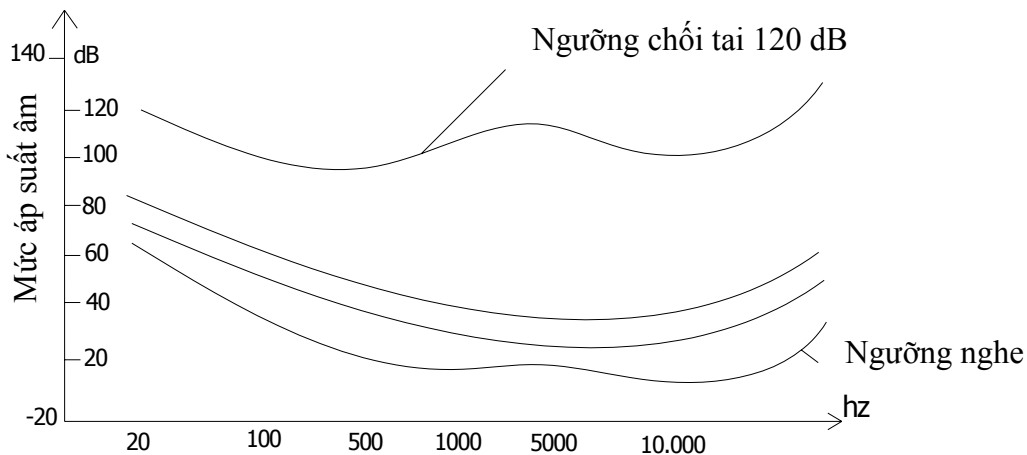
a. Mức to: F Đơn vị đo: Fôn

Cảm giác to nhỏ khi nghe âm thanh của tai người được đánh giá mức to & xác định theo phương pháp so sánh giữa âm cần đo với âm tiêu chuẩn.

Đối với âm tiêu chuẩn, mức to có trị số bằng mức áp suất âm (đo dB). Muốn biết mức to của 1 âm bất kỳ phải so sánh với âm tiêu chuẩn

- Với âm tiêu chuẩn : Mức to ở ngưỡng nghe là 0 Fôn ngưỡng chói tai là 120 Fôn.
- Cùng 1 giá trị áp suất âm, âm tần số càng cao => mức to càng lớn.

Bằng phương pháp thực nghiệm người ta vẽ được bản đồ đồng mức to



b. Độ to: S: Đơn vị Sôn

Khi so sánh âm này to hơn âm kia bao nhiêu lần ta dùng khái niệm "độ to"

Độ to là 1 thuộc tính của thính giác, cho phép phán đoán tính chất mạnh yếu của âm thanh.

Mối liên hệ giữa Sôn & Fôn như sau:

$$S = 2^{0,1(F-40)}$$

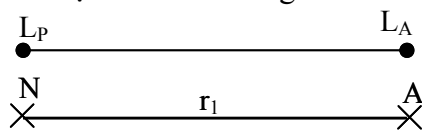
Như vậy nếu mức to của 1 âm = 40F => độ to của âm đó S = 1 Sôn

Khi mức to tăng 10F thì độ to tăng gấp 2

III. Một số tính toán âm thanh

Bài Toán 1:

Tính mức âm tại 1 điểm cách nguồn âm 1 khoảng r (m)



$$L_A = L_P + 10\lg F - 10\lg \Omega - 20\lg r - \frac{\beta r}{1000}$$

Trong đó: F: Hệ số định hướng của nguồn âm

Ω : góc khối bức xạ của nguồn lấy như sau:

Khi nguồn bức xạ cả không gian thì $\Omega = 4\pi$ -Bức xạ trên 1 mặt phẳng thì $\Omega = 2\pi$. Bức xạ nằm gần góc nhị diện thì $\Omega = \pi$, tam diện $\Omega = \pi/2$

F: Hệ số có hướng. Trong thực tế nguồn âm bức xạ không đều theo các hướng. Tính có hướng được đặc trưng bằng hệ số có hướng $F = \frac{P_h^2}{P_{tb}^2 h}$

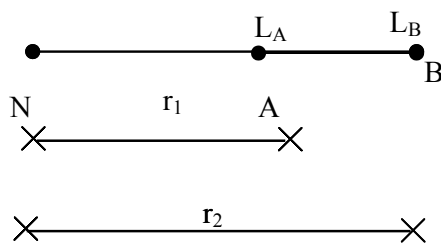
β : hệ số hút âm của không khí tra bảng

f	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\frac{\beta}{\text{Km}}$	0	0,7	1,5	3	6	12	24	48

r (m): khoảng cách từ nguồn đến điểm A

L_P : Công suất nguồn âm

Bài Toán 2:

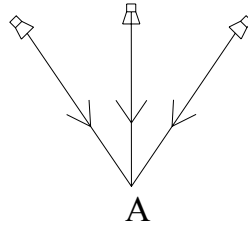


- Sóng cầu (nguồn điểm): $L_B = L_A - 20\lg \frac{r_2}{r_1}$ (dB)

- Sóng trụ (nguồn âm đường): $L_B = L_A - 10\lg \frac{r_2}{r_1}$ (dB)

Bài Toán 3:

$$\Sigma L = L_1 + \Delta L$$



Trong đó : + L_1 : Mức âm của nguồn âm lớn nhất

+ ΔL : Số gia của nguồn âm ,phụ thuộc vào hiệu số L_1 và L_2 ; tra bảng

$L_2 - L_1$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	20
ΔL	3	2,5	2	1,6	1,5	1,2	1	0,8	0,6	0

Ví dụ 1. Nguồn 1 có $L_1 = 70\text{dB}$ Nguồn 2 có $L_2 = 71\text{dB}$ Nguồn 3 có $L_3 = 69\text{dB}$

Nguồn 4 có $L_4 = 69\text{dB}$

$$L_A^{2-1} = 71 + 2,5 = 73,5 \text{ dB}$$

$$L_A^{2-1-3} = 73,5 + 1,5 = 75 \text{ dB}$$

$$L_A^{2-1-3-4} = 75 + 1 = 76 \text{ dB}$$

$$L_A^{1-n} = L_A^1 + 10 \lg n \text{ dB}$$

Ví dụ 2:

$$L_1 = 90 \text{ dB}$$

$$L_2 = 85\text{dB}$$

$$L_3 = 88 \text{ dB}$$

Tính ΣL

$$\Sigma L_{132} = 92 + 0,8$$

CHƯƠNG 2: VẬT LIỆU & KHOẢNG CÁCH HÚT ÂM

I. Hệ số hút âm

$$E_t = E_{fx} + E_{h\grave{a}}$$

Nếu đặt $\beta = \frac{E_{fx}}{E_t} \Rightarrow$ gọi là hệ số phản xạ âm thanh

$$\alpha = \frac{E_{h\grave{a}}}{E_t} \Rightarrow \text{gọi là hệ số hút âm}$$

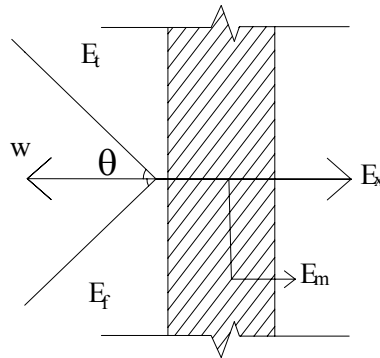
Theo định luật bảo toàn năng lượng thì

$$\alpha + \beta = 1. \text{ Nếu } \beta = 0 \Rightarrow \alpha = 1 \Rightarrow \text{vật liệu hút âm hoàn toàn. Nếu } \alpha = 0 \Rightarrow \beta = 1$$

\Rightarrow VL phản xạ âm hoàn toàn.

Với P_h : Áp suất đo ở khoảng cách nhất định theo hướng nhất định

P_{te}^h : Áp suất âm trung bình theo mọi hướng ở khoảng cách đó



Hệ số hút âm đặc trưng cho khả năng của vật liệu và khoảng cách hút 1 phần âm thanh tới. Đây chính là đặc trưng trọng nhất của vật liệu & khoảng cách, nó quyết định sự hình thành trường âm

+ Hệ số α phụ thuộc vào góc tới θ : Khi $\theta = 0 \Rightarrow \alpha$ lớn nhất, khi $\theta = 90^\circ \Rightarrow$ nhỏ nhất.

+ Hệ số hút âm phụ thuộc vào tần số của âm tới (f_t)

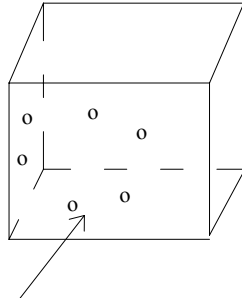
+ Hệ số α phụ thuộc vào tính chất cơ lý của vật liệu (trọng lượng riêng, độ rỗng, cấu trúc)

+ Hệ số α phụ thuộc vào thông số hóa học.

II. Một số vật liệu & khoảng cách hút âm

1. Vật liệu xốp hút âm

a. Cấu tạo: Gồm vật liệu xốp rỗng, các lỗ rỗng thông nhau & thông ra mặt ngoài nơi sóng âm đập vào. Các khe rỗng đan vào nhau trong vật liệu, vách của các khe rỗng bằng cốt liệu cứng hoặc đàn hồi



b. Nguyên tắc làm việc: Khi sóng âm với năng lượng E_t đập vào, không khí trong các khe rỗng dao động, năng lượng âm mất đi để chống lại tác dụng của ma sát và tính nhớt của không khí dao động giữa các lỗ rỗng. Một phần năng lượng âm xuyên qua vật liệu khả năng hút âm của vật liệu xốp phụ thuộc vào độ xốp, chiều dày và sức cản của không khí

* Độ xốp của vật liệu là đại lượng không thứ nguyên

$$\text{Độ xốp} = \frac{V \text{ các lỗ khí (không kể lỗ khí)}}{V \text{ của mẫu vật liệu}}$$

* Sức cản thổi khí (sức cản khi thổi 1 dòng khí qua mẫu VL)

$$r = \frac{\Delta P}{v\delta} \text{ N.S/cm}^4$$

Trong đó: ΔP : Hiệu số áp suất trên 2 bề mặt của mẫu VL (N/cm^2)

v : Vận tốc dòng khí thổi qua khe rỗng (cm/s)

δ : Chiều dày của vật liệu (cm)

Nếu r càng lớn, khả năng hút âm của vật liệu càng nhỏ.

* Chiều dày của lớp vật liệu xốp: δ

Để tránh chi phí thừa khi bố trí cấu tạo lớp vật liệu xốp hút âm ta phải xác định chiều dày δ

kinh tế. Khi $r < 10 \text{ Ns/cm}^4$ thì $\delta = \frac{260}{r}$

Khi $r \geq 10 \text{ NS/cm}^4 \Rightarrow \delta = \frac{90}{\sqrt{r}}$

Nếu vật liệu xốp đặt trực tiếp lên bề mặt phản xạ cứng thì: $80 < \delta r < 160 \text{ NS/cm}^4$ để hệ số hút âm lớn nhất.

Nếu phía sau lớp vật liệu xốp có lớp không khí thì:

$$40 < \delta r < 80 \text{ NS/cm}^4$$

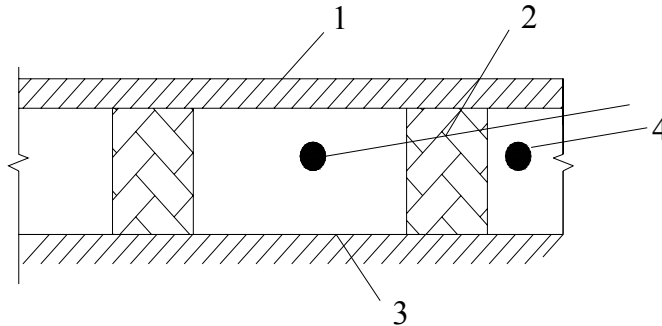
Trong thực tế chiều dày δ cần thiết, người ta đã xác định cho sẵn ở các bảng.

Chú ý: Đại đa số vật liệu xốp hút tốt các âm thanh có tần số cao.

2. Các tấm dao động (cộng hưởng) hút âm:

+ Cấu tạo: gồm 1 tấm mỏng có thể bằng gỗ dán bìa, cát tông đặt cố định trên hệ sườn gỗ.

Phía sau tấm mỏng là khe không khí.



1. Tấm mỏng
2. Sườn gỗ
3. Mặt cứng
4. Khe không khí

+ Nguyên tắc làm việc:

Khi sóng âm đập vào bề mặt của kết cấu. Dưới tác dụng biến thiên của áp suất âm, tấm mỏng bị dao động cưỡng bức, do đó gây ra tổn thất ma sát trong nội bộ bản, năng lượng âm biến thành cơ năng và nhiệt năng để thắng nội ma sát khi tấm mỏng dao động.

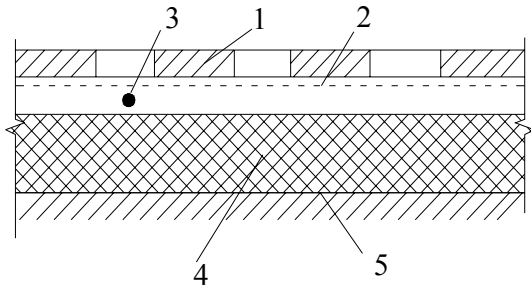
Khi f sóng âm tối $\equiv f$ dao động của tấm \Rightarrow xảy ra hiện tượng cộng hưởng và lúc đó khả năng hút âm của vật liệu lớn nhất.

Ưu điểm: Cấu tạo đơn giản, gọn nhẹ bền lâu, hợp vệ sinh. Chống ẩm và chống các tác động cơ học tốt. Hỏng hóc dễ sửa chữa.

Nhược điểm: Chỉ hút âm ở tần số thấp.

3. Kết cấu hút âm bằng vật liệu xốp đặt sau tấm đục lỗ.

Cấu tạo: Phức tạp hơn tấm dao động hút âm gồm 1 tấm mỏng, trên có xẻ rãnh hay đục lỗ. Sau tấm đục lỗ có dán 1 lớp vật liệu ma sát để làm tăng sự mất mát năng lượng âm (lớp ma sát có thể là lớp vải mỏng, vải thủy tinh). Giữa tấm mỏng và lớp vật liệu xốp là lớp không khí.



1. Tấm mỏng đục lỗ
2. Lớp vải mỏng
3. Khe không khí
4. Lớp vật liệu xốp
5. Mặt tường cứng

Kết cấu này có khả năng làm việc như tấm dao động hút âm và dễ điều chỉnh đặc tính tần số hút âm. Khả năng hút âm của kết cấu phụ thuộc vào số lỗ và đặc tính của lỗ đục ở trên tấm.

* Nếu diện tích lỗ đục lớn và số lỗ đục trên tấm nhiều => kết cấu làm việc như tấm vật liệu xốp hút âm (T.e: Tấm đục lỗ không có ảnh hưởng đến khả năng hút âm của kết cấu).

* Nếu diện tích lỗ đục nhỏ và số lỗ đục ít => kết cấu làm việc như tấm dao động hút âm. Nếu thay đổi diện tích lỗ đục, chiều dày vật liệu, khe hở không khí thì khả năng hút âm của kết cấu sẽ thay đổi. Như vậy muốn kết cấu hút âm ở tần số cao thì diện tích lỗ đục chiếm < 15% thì kết cấu hút âm ở tần số thấp.

Ưu điểm: Dễ điều chỉnh khả năng hút âm.

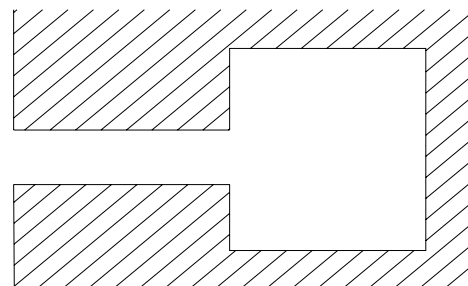
Nhược điểm: Cấu tạo phức tạp

4. Lỗ cộng hưởng hút âm

Cấu tạo: Nó là thể tích không khí kín bởi các mặt tường cứng và thông với bên ngoài qua 1 cái cổ dài. Cấu tạo có 2 phần

+ Lỗ: Đóng vai trò như đệm không khí để cho phần không khí chỗ cổ dao động dễ dàng có thể hình tròn, vuông, đa giác.

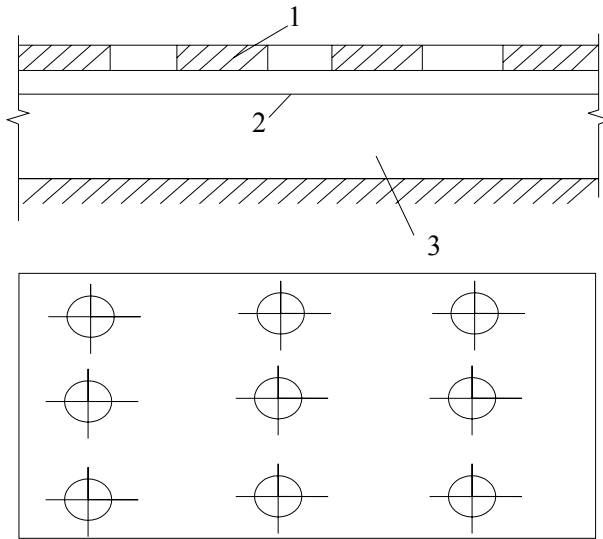
+ Cổ lỗ: Có chiều dài nhất định, không khí trong bụng lỗ thông với không khí trong phòng qua miệng lỗ.



Khi λ của sóng âm tới lớn hơn 3 kích thước của lỗ thì không khí trong lỗ có tác dụng như 1 lò xo đàn hồi. Cột không khí trong cổ như 1 pít tông khối lượng m. Dưới tác

dụng của sóng âm tới, cột không khí trong cổ dao động lui tới như 1 pít tông, không khí trong lỗ vì không thoát ra được và thể tích lỗ lớn hơn cổ nhiều nên nó có tác dụng như một đệm đàn hồi làm cho năng lượng âm mất đi để biến thành cơ năng và nhiệt năng thắng nội ma sát khi không khí trong cổ dao động. Khi tần số âm tới $\equiv f$ dao động riêng của lỗ thì hiện tượng cộng hưởng xảy ra \Rightarrow khả năng hút âm của lỗ lớn nhất. Các lỗ cộng hưởng thế này được dùng từ lâu trong kiến trúc để tăng cường âm vang trong các nhà thờ cổ.

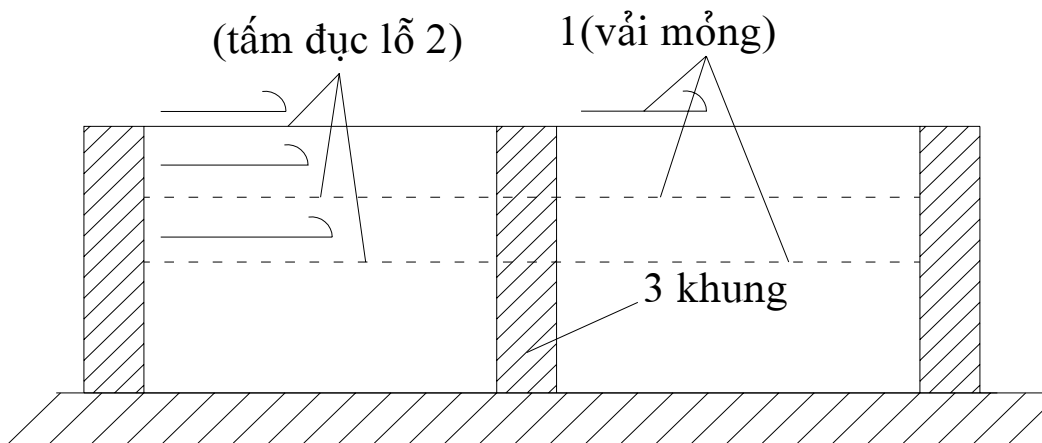
Áp dụng nguyên tắc hút âm này người ta chế tạo các nanen cộng hưởng. Mỗi một lỗ và thể tích không khí phía sau được coi như 1 lỗ cộng hưởng. Kết cấu này hút âm mạnh nhất ở những tần số nhất định.



1. Tấm đục lỗ
2. Lớp vải
3. Khe không khí

Ưu điểm: Kết cấu này có hệ số hút âm cao rẻ tiền dễ chế tạo.

Nhược điểm: Đặc tính tần số hút âm không đều

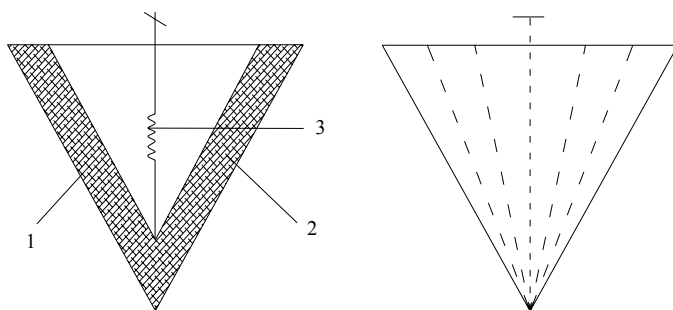


Để nhận được hệ số hút âm cao và đều trong dải rộng tần số người ta làm kết cấu cộng hưởng bằng nhiều lớp đục lỗ đặt song song với nhau (kết cấu hút âm kiểu này được thi công ở cung văn hóa và khoa học Vacsava (Ba Lan)

5. Kết cấu hút âm đơn:

Là những kết cấu được chế tạo đặc biệt dưới dạng tấm rời, có dạng hình cầu Hiệu quả hút âm của kết cấu này được tăng lên khi kích thước của chúng < hoặc gần bằng bước sóng λ của sóng âm tới nên gọi là kết cấu hút âm nhiều xạ. Khi nghiên cứu cấu tạo của chòm hút âm ta thấy: Vỏ làm bằng tấm kim loại, trong đặt vật liệu xốp với $\delta = 12,5 \div 25$ mm và thường được treo ở những độ cao khác nhau trên những nguồn ồn.

1. Bản đục lỗ



1. Bản đục lỗ
2. Lớp vật liệu xốp
3. Lò xo để treo

Chú ý: Người và các đồ gỗ trong phòng, các dụng cụ trong nhà đều là những kết cấu hút âm đơn.

Chương 3: ÂM HỌC PHÒNG KHÁN GIẢ

I. Yêu cầu chất lượng âm học đối với phòng khán giả.

1. Định nghĩa:

Phòng khán giả là một phòng kín, có thể tích tương đối lớn, bị giới hạn bởi các bề mặt tường có tính chất đã biết. Có thể dùng làm hội trường, giảng đường, biểu diễn ca nhạc, kịch nói và có thể hoà nhạc ... Với hai chức năng nghe và xem. Về mặt vật lý có thể coi phòng khán giả là hệ thống không những chịu sự kích thích của nguồn âm mà còn thực hiện nhưng giao động riêng ngay cả sau khi nguồn âm đã tắt.

2. Phân loại:

a. Theo đặc điểm của âm thanh:

- + Phòng nghe trực tiếp
- + Phòng nghe qua hệ thống điện thanh (HTĐT)
- + Phòng nghe trực tiếp + HTĐT

b. Theo đặc điểm của nguồn âm:

- + Nghe tiếng nói: Rõ hay không rõ
- + Nghe âm nhạc: Hay hoặc không hay
- + Nghe tiếng nói + âm nhạc: Rõ + hay.

3. Đánh giá chất lượng âm học của phòng khán giả

a. Đánh giá chất lượng âm học theo chủ quan:

Rất phức tạp nên chia phòng khán giả theo chức năng của phòng theo 2 loại:

* Loại nghe tiếng nói: Là chủ yếu hội trường, giảng đường ở đây chất lượng âm học của phòng được đánh giá qua độ rõ. Phòng được coi là độ rõ tốt khi tiếng nói hiểu được dễ dàng: Người nói không bị giãn sức, người nghe không bị căng thẳng. Độ rõ phụ thuộc vào nhiều yếu tố:

- + Đặc điểm của phòng.
- + Đặc điểm của âm phát ra
- + Sự chú ý của người nghe.

Để xác định độ rõ người ta dùng phương pháp thực nghiệm: chọn 100 âm tiết vô nghĩa, rời rạc, đọc lên ở sân khấu, người nghe ngồi ở tất cả các vị trí trong phòng, ghi lại các âm mình nghe được (gọi là độ rõ âm tiết)

$$\text{Độ rõ âm tiết } A = \frac{\text{Số âm tiết nghe được}}{\text{Số âm tiết đọc}} \times 100\%$$

$A \geq 85\%$: Phòng có độ rõ rất tốt \rightarrow Độ rõ câu 97%

$A = (75 \div 84) \%$: Phòng có độ rõ Tốt \rightarrow Độ rõ câu 95%

$A = 65 \div 74 \%$: Đạt \rightarrow Độ rõ câu 90%

$A < 65 \%$ \rightarrow Không đạt.

* Loại phòng nghe âm nhạc: Nghe hay và tạo được cảm xúc. Việc đánh giá rất khó khăn vì nó phụ thuộc vào nhiều yếu tố chủ quan của người nghe vào nội dung và trình độ biểu diễn của dàn nhạc. Vì vậy muốn đánh giá chất lượng âm học người ta dựa vào 3 chỉ tiêu:

- + Tính phong phú của âm thanh trong phòng
- + Âm thanh phát ra rõ ràng và âm sắc không đổi
- + Sự cân bằng âm vang của các nhóm nhạc cụ tại mọi chỗ ngồi trong phòng.

Việc đánh giá chủ quan cho phép kết luận được chất lượng âm học của phòng nhưng không tìm ra phương pháp thiết kế 1 phòng có chất lượng âm học tốt.

a.Đánh giá chất lượng âm học của phòng khán giả theo khách quan:

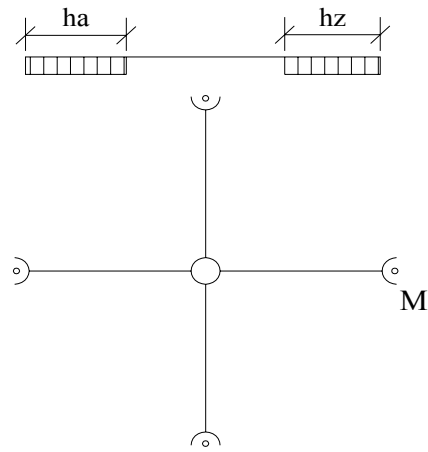
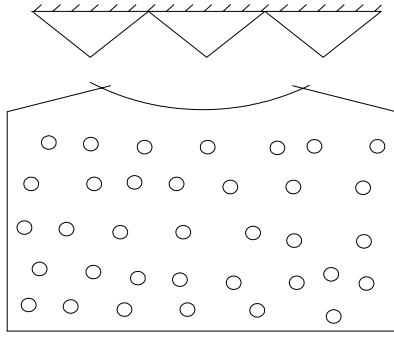
Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng âm học của phòng khán giả như kích thước, hình dáng của phòng, các giải pháp kết cấu, cách gia công các bề mặt trong phòng v.v... Một phòng có chất lượng âm học tốt nếu thỏa mãn các yêu cầu sau:

- + Có đủ năng lượng âm trên mọi chỗ ngồi của khán giả (mọi chỗ ngồi có độ rõ tốt)
- + Âm vang của phòng phải phù hợp với mọi kích thước của phòng và chức năng của phòng .
- + Tạo được trường âm thanh hoàn toàn khuyết tán, tránh được các hoạt động sáu (tiếng dội, hồi tụ âm...)
- + Có một cấu trúc thích hợp về thời gian cũng như mức âm giữa âm trực tiếp và âm phản xạ.

Tóm lại: Chất lượng âm học của phòng khán giả được đánh giá:

a.Độ rõ

b.Độ khoách tán của trường âm: phụ thuộc vào khả năng phản xạ khuyết tán âm thanh các bề mặt trong phòng.



Một phòng được coi là có độ khuếch tán lý tưởng khi tại các điểm trong phòng đo âm thanh đến từ mọi hướng với tần suất và cường độ như nhau.

Thời gian âm vang thích hợp.

$$T(s) \begin{cases} - \text{Thể tích phòng} \\ - \text{Chức năng phòng} \end{cases}$$

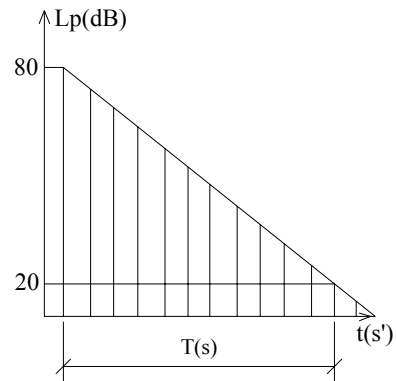
Có 3 cơ sở lý thuyết để nghiên cứu trường âm

- Lý thuyết sóng: Cho phép giải thích chính xác bản chất vật lý của các quá trình âm thanh xảy ra trong phòng. Tuy nhiên quá trình này phức tạp và kông kênh.

- Lý thuyết thống kê: Cho phép lý tưởng

hoá các quá trình vật lý xảy ra trong phòng và coi năng lượng âm ở 1 điểm trong phòng bằng tổng năng lượng của các âm phản xạ tới các điểm đó và bỏ qua tính chất sóng của âm thanh.

- Lý thuyết âm hình học: Theo lý thuyết này trường âm được xét dưới dạng tổng công của các tia âm (sóng âm thay bằng các tia âm). Các tia âm dựng theo quy luật quang hình học cho phép xác định điểm tới của âm trên các bề mặt của phòng.



II. Thiết kế âm học theo nguyên lý âm hình học.

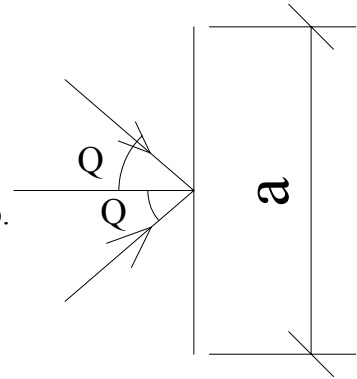
1. Nguyên lý âm hình học:

Khi âm thanh tới một bề mặt có kích thước là $a \rightarrow$ xảy ra các hiện tượng sau đây:

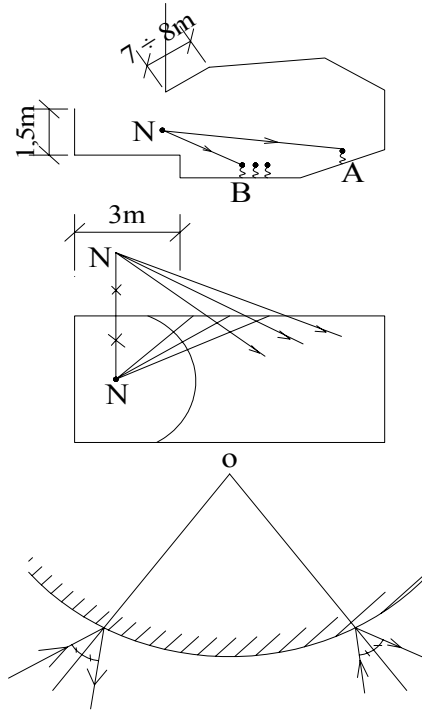
- + Khi $a \gg \lambda$ ($1,5 \div 2$) lần thì xảy ra hiện tượng phản xạ định hướng. Đây là hiện tượng tốt trong trường âm. Người ta lợi dụng hiện tượng này để thiết kế các phản xạ âm bổ sung cho các điểm xa nguồn âm.

+ Khi $a \approx \lambda \rightarrow$ Xảy ra hiện tượng phản xạ khuếch tán. Đây cũng là hiện tượng tốt trong trường âm.

+ Khi $a \ll \lambda \rightarrow$ Xảy ra hiện tượng nhiễu xạ âm thanh. Đây là hiện tượng xấu trong trường âm \rightarrow loại bỏ.
Nguyên lý âm hình học chỉ được áp dụng khi $a \gg \lambda$.



a. Thiết kế bề mặt phản xạ âm.



$$L_B^{tt} < 70 \text{ dB}$$

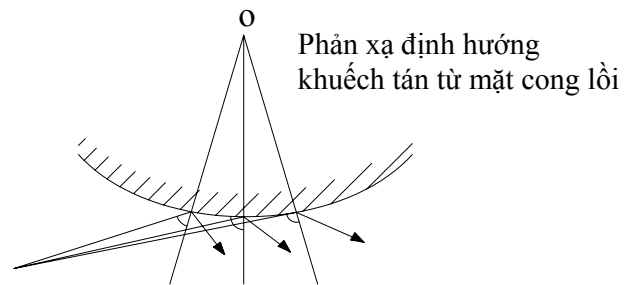
$$L_A^{tt} \geq 70 \text{ dB}$$

* Điều kiện để thiết kế âm hình học khi kích thước các bề mặt $a \gg \lambda$

$$\lambda_{\max} = 17\text{m}$$

$$f = 20 \div 20.000\text{hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$



Ví dụ: Có 2 âm tới mặt phẳng .Bề mặt

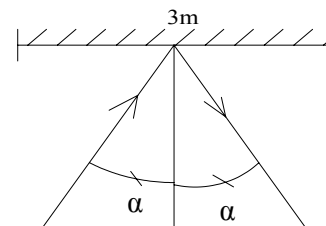
có kích thước 3m; $f_1 = 100 \text{ hz}$;

$f_2 = 1000 \text{ hz}$. Tính xem âm nào có thể phản xạ được

Đối với âm $f_1 = 100 \text{ hz}$;

Tính bước sóng $\lambda_1 = 3,4\text{m}$

$$\lambda_1 = \frac{340}{100} = 3,4\text{m}$$



\rightarrow Không có phản xạ vì bước sóng của âm tới $>$ bề mặt (3m)

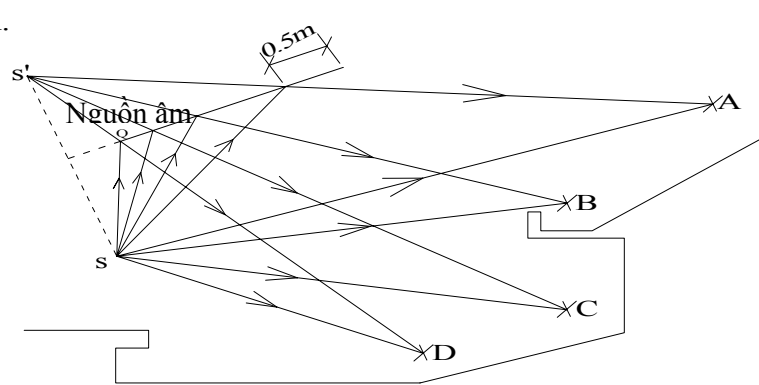
$$\lambda_2 = \frac{340}{1000} = 0,34m$$

Âm $f_2 = 1000 \text{ Hz}$ mới có phản xạ

* Tại những vị trí xa nguồn âm, độ rõ thường bị giảm do các nguyên nhân sau:

+ Sự hút âm của bề mặt.

+ Số phần tử môi trường ngày càng tăng lên năng lượng âm chia nhỏ trong quá trình lan truyền. Để khắc phục hiện tượng này cần thiết kế những bề mặt phản xạ âm ở tường bên, ở trần. đặc biệt là phần trần, tường bên gần bề mặt phản xạ sân khấu, kích thước $5 \div 6m$.



Xa sân khấu có thể nhỏ hơn $2 \div 3m$. Bề mặt phản xạ nên lồi dư ra $0,5m$ về mỗi phía.

b. Áp dụng nguyên lý âm hình học để thiết kế hình dạng phòng.

+ Hình dạng phòng:

+ Hình dạng phòng tốt nếu phòng tạo được sự phân bố đều đặn năng lượng âm có đủ năng lượng phản xạ để nghe rõ.

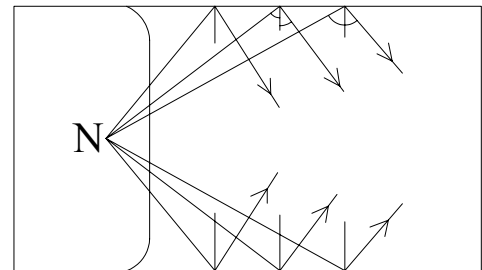
+ Đối mặt bằng hình chữ nhật: Âm thanh phân bố tương đối đều đặn. Tỷ lệ mặt bằng Rộng / Dài = $3 \div 5$

* Khu vực trống không phản xạ ở phía trước nhỏ nhất.

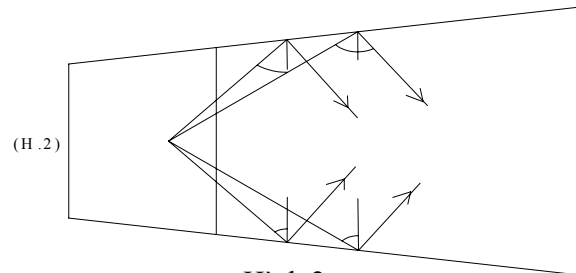
* Khi chiều rộng phòng lớn cấu trúc âm trực tiếp và âm phản xạ ở chỗ ngồi phía trước không tốt, dễ tạo thành tiếng dội.

+ Mặt bằng hình thang:

* Khu vực ngồi nằm ngoài góc nhìn ở phía sân khấu tương đối nhiều, ở đây tần số âm cao yếu, phòng khán giả lớn khu vực này càng rộng.



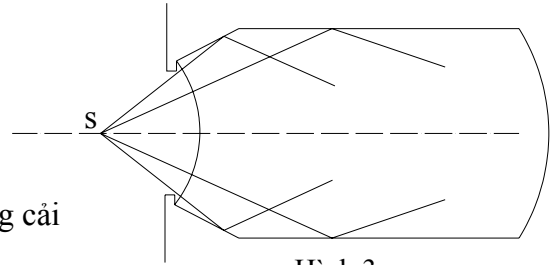
Mặt bằng hình chữ nhật hình -1



Hình 2

* Kết cấu và thi công hình chữ nhật đơn giản. Nên mặt bằng hình chữ nhật áp dụng cho quy mô phòng vừa và nhỏ.

Để khắc phục góc nhìn ngoài góc 45^0 trước sân khấu, rút ngắn cự ly phản xạ ,thư ờng cải tiến mặt bằng hình chữ nhật thành mặt bằng hình quả chuông

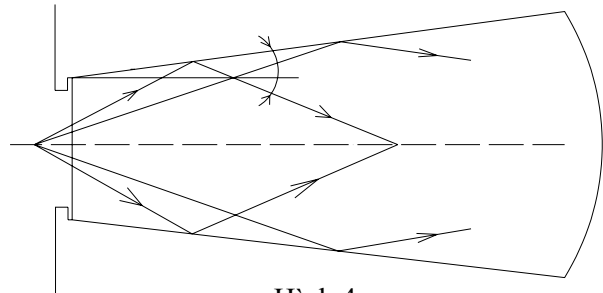


Hình 3

+ Mặt bằng hình quạt:

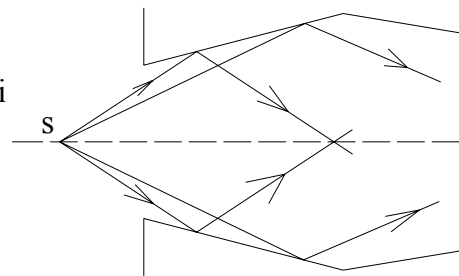
Hiệu quả âm thanh của loại mặt bằng này phụ thuộc vào góc φ tạo thành giữa tường bên với trục dọc của phòng.

Góc φ càng lớn vùng trắng không có phản xạ phía trước càng lớn góc $\varphi \leq 22^0$ tốt nhất $\varphi = 10^0$.



Hình 4

* Loại mặt bằng này tương đương đối rộng. Để tránh đơn điệu, kiến trúc thường xử lý cong, khi đó chú ý đặt tâm cong nằm xa sau sân khấu để tránh tiêu điểm âm hoặc tiếng dội rơi trên sân khấu , có thể xử lý khuếch tán âm trên mặt tường này.



Hình 5

* Đặc điểm nổi bật của loại mặt bằng này là đảm bảo góc nhìn nằm ngang tốt. Loại mặt bằng này chứa nhiều khán giả những chỗ ngồi lệch tương đối nhiều.

- Do đó góc lệch φ nên thi công phức tạp.

- Từ ưu điểm về nhìn và nghe, mặt bằng này thường áp dụng cho nhà hát lớn và vừa. Góc φ càng lớn càng chứa nhiều khán giả nhưng chất lượng về âm kém. Để khắc phục thiếu sót này thường xử lý khuếch tán trên 2 mặt tường trên. (H.3)

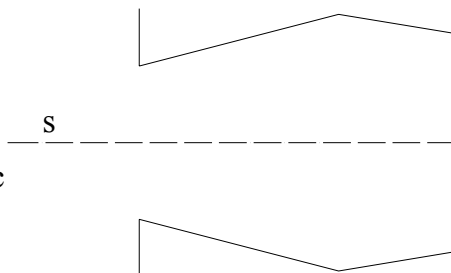
+ Mặt bằng hình lục giác:(H.5)

Là mặt bằng cải tiến từ mặt bằng hình quạt cắt bỏ góc lệch sau.

Trường âm tương đối đều, tăng cường được mức âm cho khu vực ngồi giữa.

(H.5) Nửa tường bên phía sau ngắn.

(H.6) Nửa tường bên phía sau dài



Hình 6

* So với mặt bằng hình quạt cùng thể tích, mặt bằng này bỏ được nhiều chỗ ngồi lệch, kết cấu thi công phức tạp.

* Là loại mặt bằng có trường âm tương đối đều. Thích hợp với phòng hoà nhạc. Đối với nhà hát thích hợp cho loại vừa và nhỏ.

+ Mặt bằng hình bầu dục: (H.7)

* Do tường cong nên âm phản xạ men theo tường, tạo thành tiêu điểm âm, âm không đều.

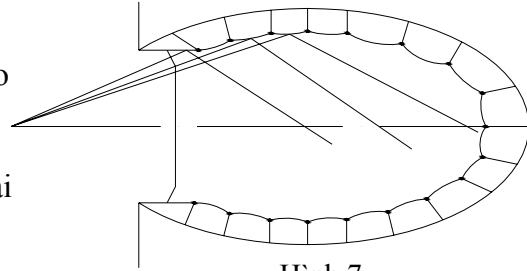
* Loại hình này phổ biến cho nhà hát ngoài nhà (nhất là nhà hát cổ điển). Để khắc phục thiếu sót này người ta tạo thành những lỗ

xung quanh tường, tường ngăn và lan can của các lỗ thiết kế những phù điêu lớn hoặc xử lý thành những mặt cong lồi khuếch tán âm.

* So với mặt bằng hình quạt loại này có ưu điểm lớn về nhìn, không có chỗ lệch và xa. Toàn bộ chỗ ngồi đều có góc nhìn tốt.

* Do ưu điểm về nhìn và phong cách kiến trúc độc đáo nên nhiều người thích dùng.

* Có thể xử lý nữa trước tường bên thẳng và thiết kế cột đường kính lớn (50cm) tạo thành lối đi dọc tường sau để tăng độ khuếch tán âm.



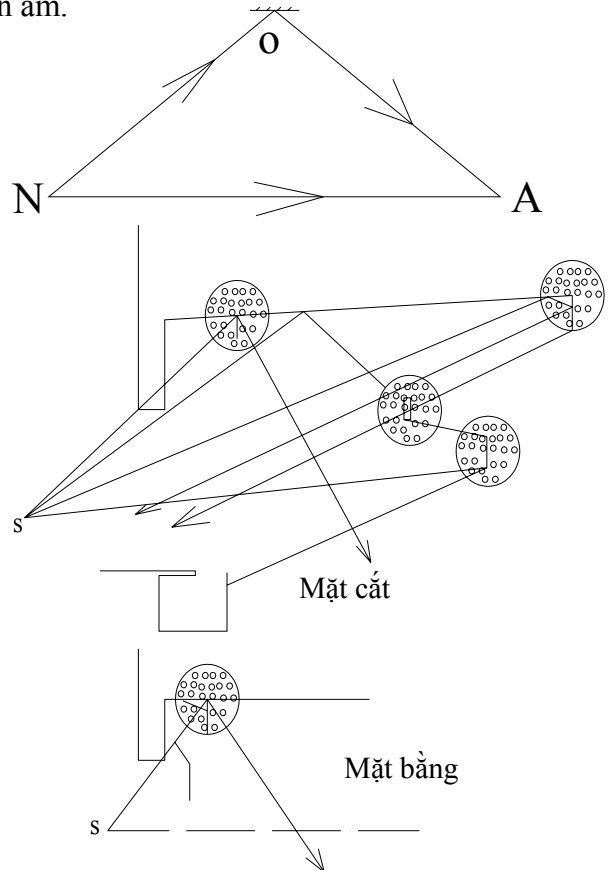
Hình 7

2. Tránh các hiện tượng xấu về âm học:

a. Hiện tượng tiếng dội: Âm trực tiếp và âm phản xạ đến tai người có những khoảng chênh lệch về thời gian nhất định.

Nếu khoảng chênh lệch về thời gian này nhỏ hơn không giới hạn thì tiếng nói được tăng cường thêm và độ rõ tăng thêm. Nếu khoảng chênh lệch đó lớn hơn không giới hạn thì sẽ tạo thành những tiếng dội dẫn đến chất lượng âm học của phòng xấu đi. Khoảng giới hạn phụ thuộc vào mục đích sử dụng phòng và dạng của sóng âm. Ví dụ: Đối với tiếng nói là 50ms, Đối với âm nhạc là 100 ÷ 200ms.

* Có thể nhận biết những yếu tố gây ra hiện tượng tiếng dội:



+ Những vùng đánh dấu trên mặt cắt và mặt bằng có thể sinh ra hiện tượng tiếng dội.

+Tiếng dội do hai mặt tường song song có khả năng phản xạ cao,sóng âm sẽ phản xạ trùng lặp. Vì thế nên thiết kế 2 mặt tường bên lệch nhau một ít (chỉ cần góc nghiêng là 5^0 nên xử lý âm khuếch tán trên hai mặt tường này.

+ Tường sau dễ gây tiếng dội.

+ Mặt tường sau thẳng lớn → để khỏi đơn điệu ta xử lý cong để tạo tiêu điểm âm.

Để tránh tiêu điểm âm, tâm cong phải ở sau sân khấu và nên xử lý khuếch tán.

(Hình 9)

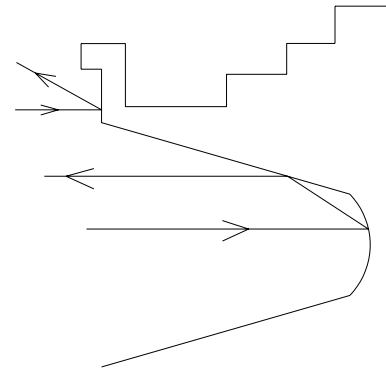
Để tránh hiện tượng tiếng dội phải thiết kế phản xạ âm thanh thỏa mãn điều kiện:

- $NA + 17 \geq NO + OA$
- Đặt vật liệu hút âm
- Hạ trần
- Chia nhỏ bề mặt

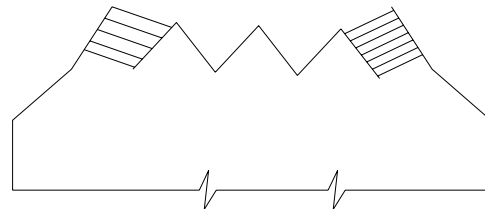
b. Hiện tượng hội tụ âm thanh:

Hiện tượng âm thanh sau khi thực hiện quá trình phản xạ trên những bề mặt cong lõm có bán kính lớn hướng về phía nguồn âm. Tại tiêu điểm âm có cường độ rất lớn làm cho trường âm phân bố không đều, âm nghe gián đoạn, mơ hồ. Mặt cong lõm trên trần nguy hiểm nhất khi bán kính cong bằng chiều cao của phòng, lúc đó tiêu điểm âm rơi đúng vào vùng chỗ ngồi của khán giả. Nếu $r > 2h$ thì tiêu điểm âm ít nguy hiểm.

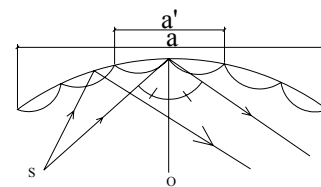
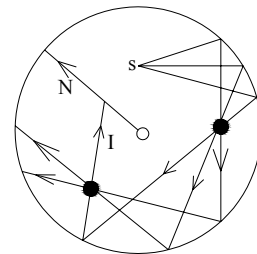
Để tránh tiêu điểm âm ta chú ý:

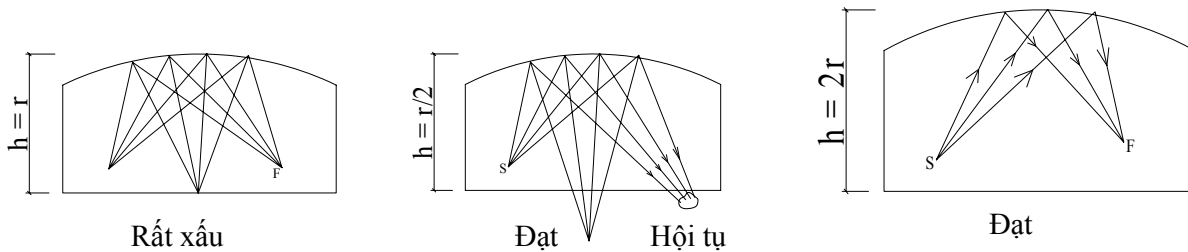


Hình 8



Hình 9

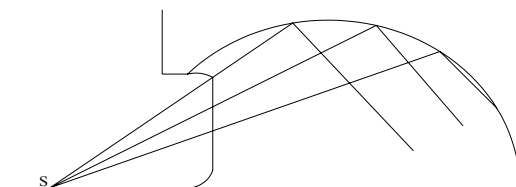




- Không thiết kế bề mặt cong lõm có r lớn hướng về phía nguồn âm.
- Chia nhỏ bề mặt cong lõm thành bờ cong lồi.
- Tăng bán kính cong $r > 2h$ hoặc $r < \frac{h}{2}$

c. Âm đi men phòng:

Do tường cong lõm nên âm phản xạ thường đi men tường, làm tường âm không đều.



III. Thiết kế tạo trường âm khuếch tán:

1. Ảnh hưởng của trường âm khuếch tán đến

chất lượng âm thanh. Trường âm khuếch tán có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng âm thanh trong phòng. Độ khuếch tán càng cao thì âm thanh nghe càng sinh động và hấp dẫn. Trường âm khuếch tán có ý nghĩa:

- Tạo ra độ đồng đều lớn về mức âm ở các chỗ ngồi.
- Trường âm khuếch tán tạo sự tăng giảm mức âm tại các chỗ ngồi tương đối đều đặn, không có tăng và giảm mạnh.
- Làm cho âm thanh trong phòng trở thành du dương, ấm cúng.

2. Yêu cầu về trường âm khuếch tán:

Phòng được coi là có độ khuếch tán cao, nếu tại mọi vị trí của phòng áp suất âm gần như nhau: $L_A = L_B = L_C \rightarrow$ đồng đều mức âm.

* Tại 1 vị trí âm phản xạ đến từ nhiều hướng với xác suất như nhau và âm nọ tiếp nhanh sau âm kia.

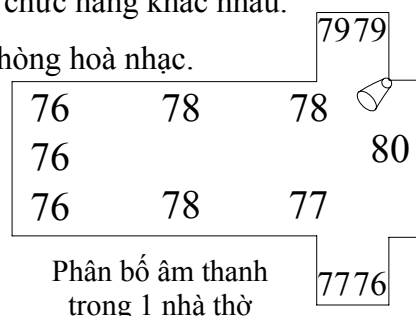
* Yêu cầu khác nhau đối với phòng khán giả có chức năng khác nhau.

* Yêu cầu cao nhất về khả năng khuếch tán là phòng hoà nhạc.

* Ở phòng nghe tiếng nói yêu cầu thấp hơn.

* Để xác định tính khuếch tán của nguồn

âm \rightarrow Đo mức âm ở các vị trí khác nhau



Phân bố âm thanh trong 1 nhà thờ

3. Các biện pháp tạo trường âm khuếch tán:

a. Phân chia các bề mặt theo cấu tạo chu kỳ.

Các yếu tố hình trụ, lăng trụ khuếch tán âm tần số trung và cao có hiệu quả tốt.

+ Các yếu tố góc vuông khuếch tán âm tần số thấp tốt. Khuếch tán âm trong dải tần số rộng sẽ có hiệu quả tốt khi các yếu tố này trên các bề mặt tường và trần > 2m và sâu hơn một vài cm.

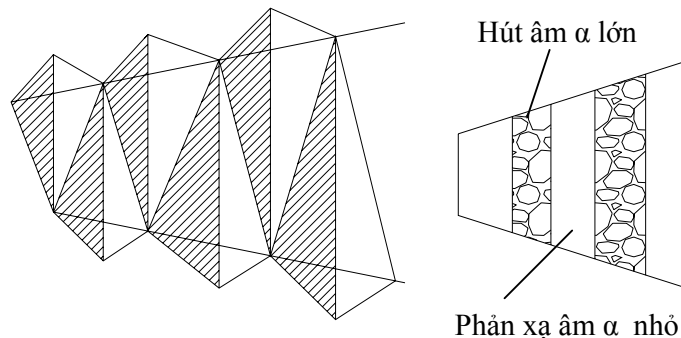
+ Tạo ra những bề mặt trong phòng có kích thước xấp xỉ bước sóng của sóng âm $a \approx \lambda$.

Đối với âm học phòng $f = 100 \div 400 \text{ Hz} \rightarrow \lambda = 1,36 \div 3,4$

+ Khi chọn kích thước của bề mặt phân chia nếu lấy nhỏ quá (dưới vài chục cm) thì không có ý nghĩa trong việc tạo trường âm khuếch tán.

+ Kích thước a, B, d lấy theo biểu đồ.

+ Kích thước bề mặt thay đổi theo 2 chiều không gian, 3 chiều không gian.



b. Bố trí vật liệu hút âm: Bố trí vật liệu có hệ số âm khác nhau trên các bề mặt luân phiên. Thông thường là các tường bên hoặc các mảng phân tán trong phòng.

Trong một phòng thì việc bố trí vật liệu hút âm rải rác khuếch tán âm thanh tốt hơn việc bố trí vật liệu hút âm tập trung.

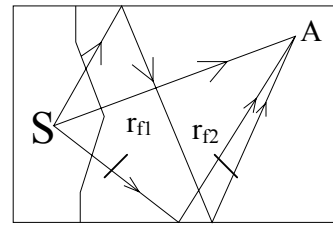
I. Thiết kế phòng khán giả theo thời gian âm vang:

1. **Âm vang:** Hiện tượng âm thanh còn ngân dài khi nguồn âm ngừng tác dụng gọi là âm vang.

Theo quan điểm sóng (âm vật lý) thì âm vang là quá trình tắt dần của những dao động còn dư của các phần tử không khí trong phòng khi nguồn âm ngừng tác dụng. Quá trình này là tổng hợp vô số những dao động tự do của các phần tử không khí trong phòng.

2. Thời gian âm vang: T(s).

Xét việc bổ sung năng lượng âm ở ở điểm A trong phòng. Khi nguồn âm S phát ra ở A nhận được âm trực tiếp SA và năng lượng âm



ở A bắt đầu tăng lên theo thời gian khi nó nhận các phản xạ âm $r_{f1} < r_{f2} < r_{f3} \dots$

Đến một lúc nào đó nguồn âm vẫn phát

ra âm thanh nhưng năng lượng âm

ở A không tăng nữa \rightarrow đạt được sự

cân bằng: $E_A = \text{const}$. Nếu tắt nguồn

âm lúc này thì âm trực tiếp tắt trước,

sau đến các âm phản xạ \rightarrow năng lượng

âm ở A giảm. Quá trình thu nhận âm thanh

trong phòng chia làm 3 giai đoạn:

+Giai đoạn 1: Giai đoạn tăng năng lượng âm do năng lượng âm được bổ sung liên tiếp từ các phản xạ xảy ra nhanh.

+Giai đoạn 2: Giai đoạn năng lượng âm trong phòng đạt trạng thái ổn định.

+Giai đoạn 3: Giai đoạn năng lượng âm bị giảm đi (xảy ra chậm hơn lúc tăng).

Định nghĩa: Thời gian âm vang là thời gian cần thiết để mật độ năng lượng âm giảm đi 10^6 lần hay mức năng lượng âm giảm đi 60dB so với trị số ổn định trong quá trình tắt dần tự do của nó khi nguồn âm ngừng tác dụng.

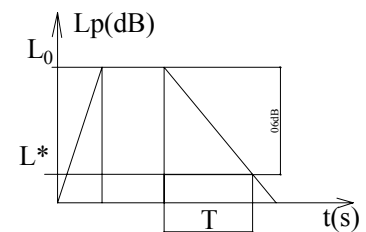
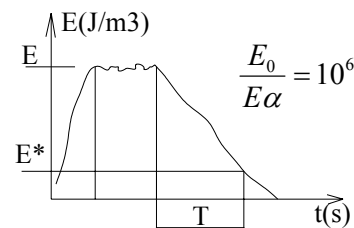
Ý nghĩa:

+ Về mặt vật lý: T cho biết tốc độ tắt của âm thanh trong phòng.

+ Về mặt cảm giác nghe âm: T ngắn \rightarrow nghe rõ những âm thanh khô khan, không tốt cho phòng nghe âm nhạc. Nếu T dài thì mức độ che lấp lớn âm thanh nghe không rõ, nhưng âm nghe ấm và du dương. Rất tốt cho phòng nghe âm nhạc nhưng không tốt cho phòng tiếng nói. Đây là 1 yếu tố quan trọng để đánh giá chất lượng âm thanh trong phòng.

2. Các yếu tố ảnh hưởng đến T: Có nhiều yếu tố ảnh hưởng đến thời gian âm vang:

- Hình dáng, thể tích của phòng $V(m^3)$.
- Đặc điểm hút âm của phòng:



- Sự bố trí vật liệu hút âm
 - Lượng hút âm của phòng A(m³)
- c. Tần số của âm thanh.
- d. Chức ăng của phòng.

3. Công thức xác định thời gian âm vang:

a. Công thức của Sabine:

Tác giả dựa vào hai giả thiết để thành lập phát triển âm vang.

- + Ở trong phòng, âm thanh phát ra cho đến lúc đạt được trạng thái ổn định, năng lượng âm thanh ở mọi điểm trong phòng đều như nhau (trường âm khuếch tán)
- + Sau khi nguồn âm ngừng phát năng lượng âm tắt dần đều đặn (trường âm hoàn toàn khuếch tán)

$$T = \frac{0,16V}{A} (s) = \frac{0,161V}{S \cdot \alpha} (s).$$

$$\text{với } \alpha_{tb} = \frac{A}{S_{\text{tổng}}^3} \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Khi } V \text{ tăng} \rightarrow T \text{ tăng} \\ \text{Khi } A \text{ giảm} \rightarrow T \text{ tăng} \end{array} \right.$$

Với V (m³): Thể tích của phòng
 A (m³): Lượng hút âm của phòng

b. Công thức của Eyring: $\alpha_{tb} > 0,2$

$$T = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - \alpha_{tb})} (s)$$

Trong đó:

- a. S : Tổng diện tích các mặt bằng trong phòng khi phòng có $V > 2000\text{m}^3$ và tần số cao thì phải kể thêm lượng hút âm của k^2

$$\text{khi đó: } T = \frac{0,16}{A + 4mv} \quad (1)$$

$$\text{và } T = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - 2tb) + 4mv} \quad (2)$$

Trong đó:

* m là hệ số hút âm của k^2 .

$A = A$ cố định + A thay đổi + A phụ

* A : Tổng lượng hút âm

* A_{CD} : Lượng hút âm cố định (trần, tường...)

$$A_{CD} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot S_i \quad [m^2]$$

* A_{TD} : Lượng hút âm thay đổi trong phòng

$$A_{TD} = a_n \cdot N_u + a_g \cdot N_g$$

b. a_n : Lượng hút âm của một người ngồi

c. N_u : số người có mặt trong phòng

d. a_g : Lượng hút âm của một ghế.

e. N_g : Số ghế không có người ngồi.

f. $A_{phụ}$: Lượng hút âm phụ do có khe hở ở các lỗ đèn và do sự dao động của kết cấu.

* Khi sử dụng phương trình âm vang ta cần chú ý về không gian ngẫu hợp. Đó là những không gian thông suốt nhau nhưng độ lớn khác nhau và chức năng âm học cũng khác nhau và nối với nhau bằng một cửa lớn.



- Trong không gian ngẫu hợp do thể tích, vật liệu của các không gian không giống nhau → nên phải tính riêng.

+ Đối với phòng khán giả và sân khấu khi tính thời gian âm vang cho phòng khán giả lấy hệ số hút âm của miệng sân khấu thay thế cho sự tồn tại của sân khấu.

+ Đối với không gian chính của phòng khán giả với không gian dưới ban công thì Nếu $b > 2h$ ta phải phân thành hai không gian riêng biệt và lấy hệ số hút âm của miệng ban công thay cho sự tồn tại của ban công. Nếu $b \leq 2h$ thì coi như một không gian để tính

5. Thời gian âm vang tối ưu: T_{tm} (1)

a. Thời gian âm vang (T) có ý nghĩa:

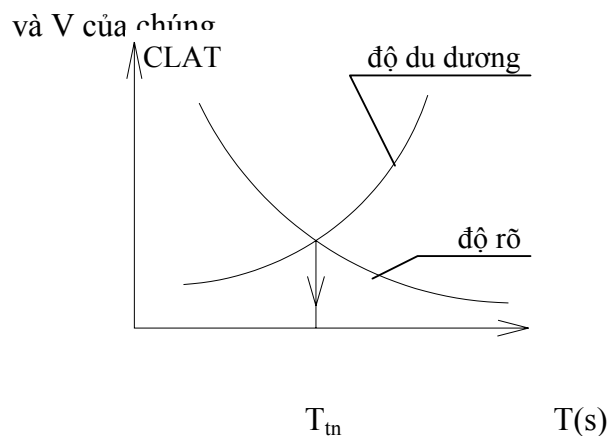
- Cho biết tốc độ tắt của âm thanh trong phòng.
- Là đại lượng vật lý có thể tính toán được, có mối liên hệ với các thông số V, A của phòng

- Giúp cho việc camr nhận, đánh giá chất lượng âm thanh phòng. \

Nếu T ngắn quá → âm thanh nhỏ

Nếu T dài quá → âm kém rõ

Như vậy sẽ tồn tại một chữ số T sao cho độ rõ không bị giảm mà âm nghe vẫn du dương. mặt khác trị số đó cũng không giống nhau đối với từng loại phòng



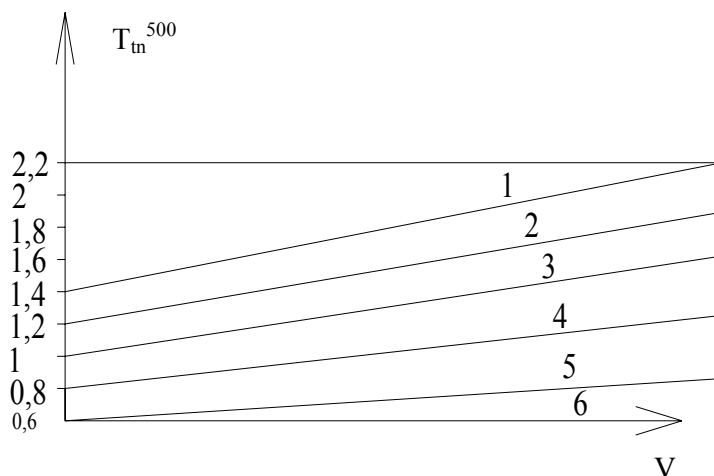
T_m phụ thuộc vào nhiều yếu tố:

- +Phụ thuộc vào V (m^3) của phòng.
- +Phụ thuộc vào chức năng của phòng.
- +Phụ thuộc vào tần số của âm thanh.

b. Theo công thức kinh nghiệm của Clavil.

$$T_{tn}^{500} = K.lg.V$$

trong đó: k là hệ số phụ thuộc vào chức năng của phòng.



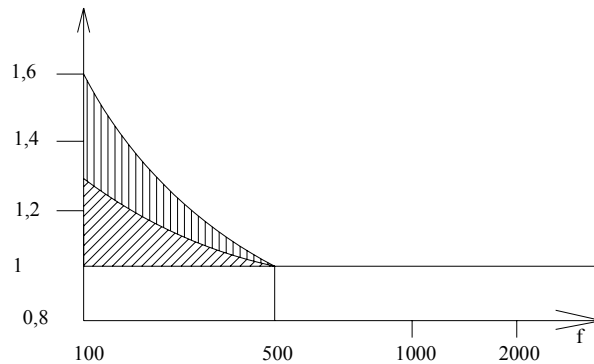
1. Nhạc giá đường
2. Hoà nhạc
3. Kịch
4. Âm nhạc
5. Chiếu phim
6. Giảng đường

- Phòng ca nhạc $k = 0,41$
 - Phòng kịch nói $k = 0,36$
 - Phòng chiếu phim, gđ $k = 0,29$
- hay tra T_{tn}^{500} bằng biểu đồ.

* Tính $T_{tn}^f = R \cdot T_{tn}^{500}$

Chú ý:

Khi $V > 2000 \text{ m}^3$ tốc độ tắt phụ thuộc vào V không đăng kê. Theo kinh nghiệm ta lấy trị số $T_{tn} = 1,48s$ (nhạc hiện đại); $T_{tn} = 1,54s$ (nhạc cổ điển); $T_{tn} = 2,07s$ (lãng mạn trữ tình); $T_{tn} = 1,7$ (chung cho tất cả các loại âm nhạc); $V < 300 \text{ m}^3 \rightarrow T_{tn} = 1s$



Với R hiệu chỉnh theo biểu đồ

Nếu $f \geq 500\text{hz} \rightarrow R = 1$

Đối với phòng V nhỏ lấy vùng gạch chéo dưới. Nếu phòng V lớn thì lấy vùng gạch chéo trên hay xác định R theo bảng

f (hz)	125	500	1000	2000
R	1,4	1,1	1	1

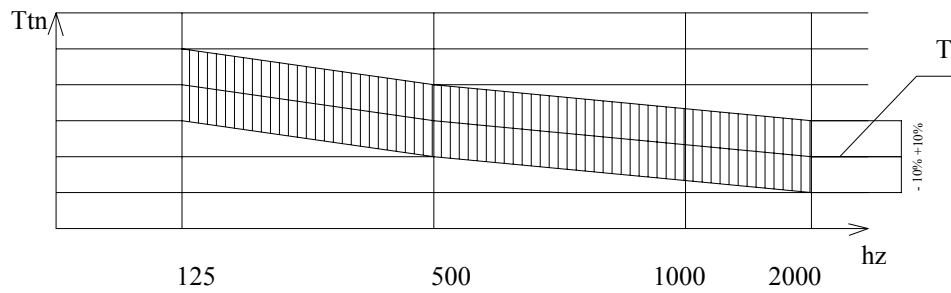
6. Thiết kế phòng đảm bảo âm vang.

a. Yêu cầu cần thiết kế: $T_p^f = T_{tn}^f \pm 10\%$

+ Đối với phòng khán giả yêu cầu chất lượng cao thì tính cho 6 giải tần số: 125, 250, 500, 1000,... 4000

+ Đối với phòng khán giả yêu cầu chất lượng trung bình thì tính cho 3 giải tần số T_{tn}^{125} , T_{tn}^{500} , T_{tn}^{2000} .

+ Đối với phòng nghe tiếng nói $\rightarrow T_{tn} \leq 500\text{hz}$



Khi lượng khán giả trong phòng thay đổi thì lượng hút âm thanh trong phòng cũng thay đổi theo từ đó làm thay đổi thời gian âm vang của phòng → người ta phải tính các mức chứa thông dụng nhất (100% và 75%).

+ Đối với các phòng yêu cầu chất lượng cao, người ta cố gắng giảm thay đổi lượng hút âm bằng cách sử dụng các ghế có hệ số hút âm gần bằng của người
c. Các bước thiết kế.

Bước 1:

- + Xác định thời gian T_{tn}^{500} căn cứ vào khối tích và chức năng của phòng
- + Xác định thời gian: $= R.T_{tn}^{500}$
- + Lập biểu đồ: $T_{tn}^f \pm 10\%$

Bước 2:

- + Xác định hệ số hút âm trung bình (α_{tb}) theo các tần số khác nhau

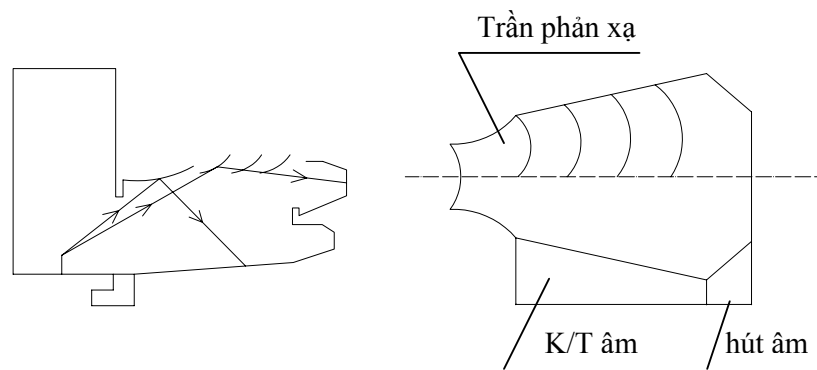
$$\ln(1 - \alpha_{tb}) = \frac{0,16V}{T_{tn}^f \cdot S} \rightarrow \alpha_{tb}$$

Bước 3: + Tính lượng hút âm của phòng

$$\text{Xác định: } A_{cd}^f = A^f - A_{td} = A_{yc}^f = a_n N_n + Q_y \cdot N_g$$

Bước 4: Bố trí trang âm cho phòng khán giả

Phải lựa chọn và bố trí vật liệu hút âm sao cho lượng hút âm gần bằng lượng hút âm yêu cầu.



+Trần các mảng tường, trần gần nguồn âm lượng bố trí vật liệu có độ cứng cao và được thiết kế theo nguyên lý âm hình học. Nên cấu tạo cá hình lồi ở trong phòng.

+ Ở các phần trần cuối phòng cần bố trí các vật liệu hút âm

+ Tường hậu có thể gây ra các hiện tượng xấu nên phải bố trí các vật liệu hút âm mạnh và đồng đều.

+ Lượng hút âm cố định yêu cầu được bố trí 2 tường bên theo nguyên tắc tạo các dải hút âm và phản âm xen kẽ nhau nhằm đạt đến độ khuếch tán âm ổn định

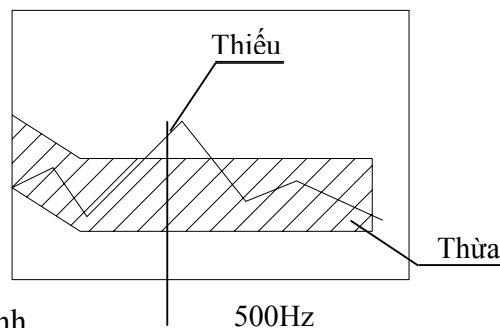
Bước 5: Kiểm tra.

+ Xác định lượng hút âm tính toán của phòng thiết kế: A_{tk}^f

$$A_{tk}^f = A_{cd}^f + A_{td}^f$$

+ Xác định thời gian âm vang thiết kế T_{tk}^f và so sánh nó với $T_m^f \pm 10\%$

Nếu không đảm bảo thì chúng ta phải thay đổi vật liệu hút âm và thay đổi diện tích hút âm.



Bước 6: Hiệu chỉnh công trình.

+ Đo đạc, kiểm tra.

+ Hiệu chỉnh, bố trí vật liệu hút âm

Ví dụ: Tính tổng lượng hút âm, lựa chọn và bố trí vật liệu hút âm cho giảng đường 500 chỗ ngồi. cho biết $V = 3240m^3$.

Kích thước cao x rộng x dài = 9.15.24 (m) Tổng diện tích tất cả các bề mặt trong phòng $S = 1389 (m^2)$. Phòng không có các khe trống phức tạp, bỏ qua lượng hút âm bổ sung.

GIẢI:

1. Tính $T_m^{500} = K.lgV 0,29.lg3240 = 1,02s$. giảng đường yêu cầu độ rõ là chủ yếu tức $R = 1$. thời gian âm vang tốt nhất của các tần số đều bằng nhau $T_m^{500} = T_m^{125} = T_m^{2000}$.

2. Tính hệ số hút âm trung bình của các tần số.

+ Đối với các tần số 125 và 500 hz dùng công thức:

$$T = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - \alpha_{tb})} = \frac{0,16.3240}{1389 \ln(1 - \alpha_{tb})}$$

Thay $T_{\text{tn}}^{500} = T_{\text{tn}}^{125} = 1,02$ vào ta có

$$1,02 = \frac{0,16 \cdot 3240}{-1389 \ln(1 - \alpha_{\text{tb}})} \rightarrow \alpha_{\text{tb}}^{500} = \alpha_{\text{tb}}^{125} = 0,31$$

+ Đối với $f = 2000\text{hz}$ ta dùng công thức:

$$T = \frac{0,16V}{-S \ln(1 - \alpha_{\text{tb}}) + 4mV}$$

Trong đó m là hệ số hút âm của không khí ở 20°C và độ ẩm $\varphi = 80\%$

Thay số vào ta có

$$1,02 = \frac{0,16 \cdot 2340}{-1389 \cdot \ln(1 - \alpha_{\text{tb}}) + 4 \cdot 0,0025 \cdot 3240} \Rightarrow \alpha_{\text{tb}} = 0,28$$

2. Tính lượng hút ẩm của phòng.

+ Đối với $f = 125 \& 500 \text{ hz}$ ta có:

$$A_{125} = S \cdot \alpha_{\text{tb}}^{125} \cdot 1389 \cdot 0,28 \cdot 0,31 = 435 \text{ m}^2$$

$$A_{500} = S \cdot \alpha_{\text{tb}}^{500} \cdot 1389 \cdot 0,28 \cdot 0,31 = 435 \text{ m}^2.$$

Đối với tần số 2000hz ta có:

$$A_{2000} = S \cdot \alpha_{\text{tb}}^{2000} = 1389 \cdot 0,28 = 392 \text{ m}^2$$

3. Tính lượng hút ẩm thay đổi.

Ghế ngồi trong giảng đường là ghế dựa bằng gỗ dán

Đối tượng hút âm	Hệ số hút âm		
	125Hz	500Hz	2000Hz
Ghế bằng gỗ dán	0,07	0,081	0,082
Học sinh ngồi trên ghế	0,2	0,31	0,41

- Đối với tần số 500hz . xác định A_{td} với 4 trường hợp có mặt của học sinh 0% , 50% , 70% và 100% tương ứng với 0 , 340 , 480 , và 650 người.
- Đối với $f = 125$ và 2000hz xác định A_{td} khi 70% học sinh có mặt.

A_{td} của tần số 500hz .

Đối tượng hút âm N	α	$A_{\text{td}}^{500} = N \cdot \alpha_{\text{td}}$			
		0%	50%	70%	100%
Ghế dựa gỗ dán	0,081	48,6	24,2	14,5	0
Học sinh ngồi trên ghế	0,31	0	92,6	130	186
A_{td} của n ười và ghế		48,6	116,8	144,5	186

A_{td} của $f = 125,500$ v à 2000 khi 70% học sinh có mặt

Đối tượng hút âm		125		500		2000	
		α	$N\alpha$	α	$N\alpha$	α	$N\alpha$
Ghế dựa gỗ dán	180	0,07	12,6	0,081	14,5	0,082	14,8
Học sinh ngồi trên ghế	420	0,2	84	0,31	130	0,41	172
A_{td} của người và ghế		96,6		144,5		186,8	

4. Tính lượng hút âm cố định A_{cd} khi 70% học sinh có mặt (bỏ qua lượng hút âm bổ sung)

+ Đối với tần số 125hz.

$$A_{cd}^{125} = A^{125} - A_{td}^{125} = 435 - 89,6 = 338,4m^2$$

+ Đối với $f = 500hz$

$$A_{cd}^{500} = A^{500} - A_{td}^{500} = 435 - 144,5 = 290,5m^2$$

+ Đối với $f = 2000hz$

$$A_{cd}^{2000} = A^{2000} - A_{td}^{2000} = 392 - 186,8 = 205,2m^2$$

5. chọn vật liệu và bố trí trang âm

BẢNG CHỌN VẬT LIỆU VÀ BỐ TRÍ TRANG ÂM

STT	Bề mặt	Vật liệu và khoảng cách hút âm	Diện tích m^2	125hz		500hz		2000hz	
				α	$S\alpha$	α	$S\alpha$	α	$S\alpha$
1	Trần phía trước	Vữa vôi trên lưới	200	0,04	8	0,06	12	0,04	8
2	Trần sau	Gỗ ván 1cm, đáy dưới sàn gỗ 5cm	240	0,3	72	0,2	48	0,1	24
3	Tường phía trước	Gỗ ván 1cm, đáy trên sàn gỗ 4cm	118	0,18	21,24	0,19	22,4	0,12	14,16
4	Tường bảo vệ	Trát vữa quét sơn phản xạ âm đến trần	66	0,01	0,66	0,02	1,32	0,02	1,32
5	Tường 2 bên trên	Tấm nhôm 1cm, cách tường cm, xử lý khuyết tán âm, phần trên tường bảo vệ	226	0,3	67,8	0,1	22,6	0,04	9

6	Tường sau bằng đen	Gỗ dán 1cm đóng trên sườn gỗ cách tường 5cm	93,1	0,3	27,93	0,2	18,8	0,1	9,31
7	Tường hậu	Tấm rôm ép trên sườn gỗ	58,9	0,37	21,8	0,307	38,6	0,108	6,25
8	Sàn lối đi	Trải thảm cao su dày 5mm	120	0,04	4,8	0,08	9,6	0,03	3,6
9	Bục giảng	Trải thảm cao su dày 5mm	45,8	0,04	1,83	0,08	3,6	0,03	1,37
10	Cửa sổ	Mở hoàn toàn	140	0,9	12,5	0,9	12,5	0,9	125
11	Cửa đi	Cửa kính đóng kín	30,3	0,35	11,21	0,18	5,45	0,07	2,12
12	Cửa thông gió	lỗ trống có song sắt	11,4	0,5	5,7	0,5	5,7	0,5	5,7
13	Lỗ đèn	Lỗ trống	1	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		A_{cd} tổng hợp			368,21		313,29		210,07

7. Kiểm tra sai số:

$$A_{cd}^{125} = \frac{368,21 - 345,5}{345,5} \cdot 100\% = 8\% < 10\%$$

$$A_{cd}^{500} = \frac{313,29 - 290,5}{290,5} \cdot 100\% = 8\% < 10\%$$

Kết luận: sai số nằm trong giới hạn cho phép vật liệu và khoảng cách hút âm bố trí như vậy là đạt yêu cầu.

V. Ảnh hưởng của cấu trúc âm phản xạ đầu tiên đến độ rõ.

1. Độ rõ và các yếu tố ảnh hưởng:

- Độ rõ phụ thuộc vào mức ồn trong phòng

→ K_N : hệ số giảm độ rõ do mức ồn trong phòng gây ra. Thường mức ồn không quá (35÷40)dB

- Thời gian âm vang T → hệ số K_T

- Hình dạng kích thước của phòng: K_S

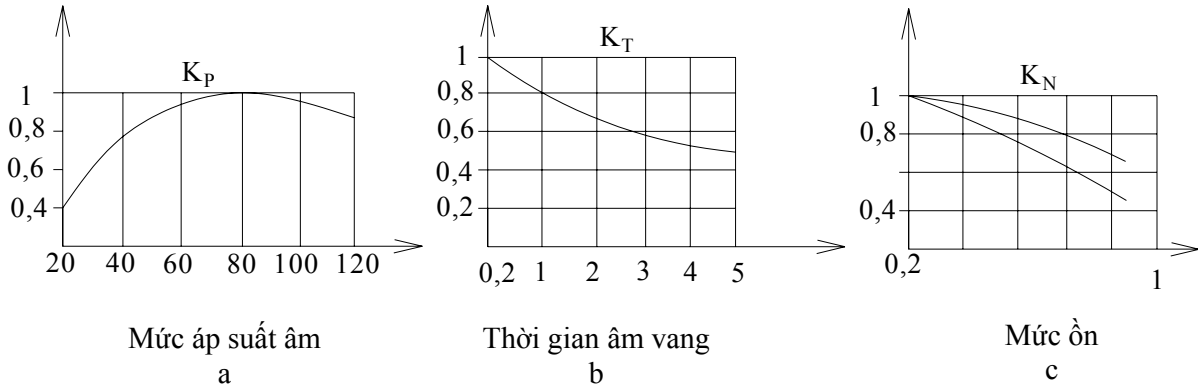
- Công suất âm của nguồn âm: K_P

$$\text{Độ rõ} = 96 \cdot K_N \cdot K_T \cdot K_S \cdot K_P \cdot \%$$

Trong thiết kế lựa chọn các giải pháp kiến trúc hợp lý nên $K_S = 1$ và tham khảo bảng sau:

- Mặt bằng phòng hình quạt, hình chữ nhật $K_S = 1$
- Phòng lớn, có tường + trần lõm $K_S = 0,9$
- Phòng bé, trường âm bằng khoảng cách phản xạ âm: $K_S = 1,06$.

K_p : Hệ số giảm rõ đo mức âm trong phòng gây ra lấy theo biểu đồ:



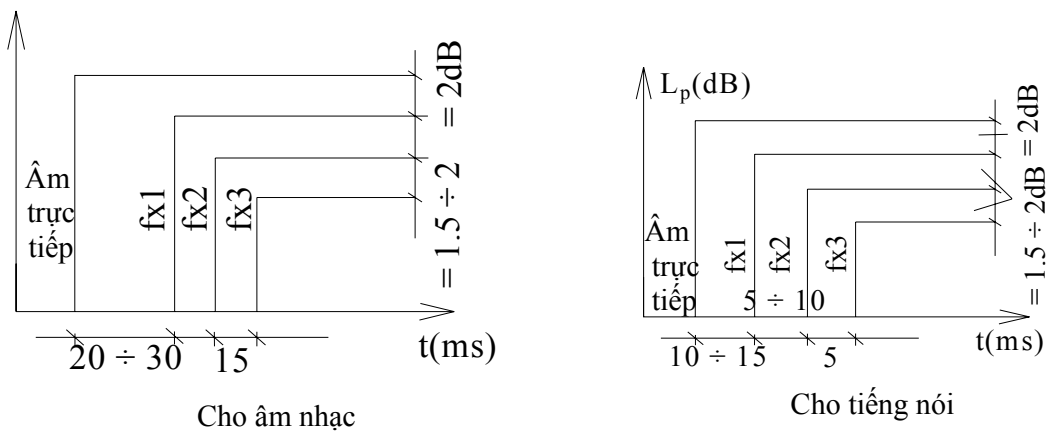
K_T : Hệ số giảm độ rõ do thời gian âm vang trong phòng (b)

K_N : Hệ số giảm độ rõ do mức ồn trong phòng (c)

- Cấu trúc âm phản xạ đầu tiên ảnh hưởng đến độ rõ chia làm 2 giai đoạn:

+ Giai đoạn 1: bao gồm tất cả các phản xạ đến sau 50ms tạo cảm giác âm vang nhưng giảm độ rõ \rightarrow năng lượng âm này có ích.

Đối với phần năng lượng âm có ích không chỉ tăng năng lượng của chúng có ảnh hưởng đến độ cấu trúc về thời gian và mức độ cũng ảnh hưởng đến chất lượng âm của phòng.



Cấu trúc tốt nhất khi nghe tiếng nói của âm phản xạ đầu tiên (Q)

Cấu trúc phản xạ đầu tiên khi nghe âm nhạc.

2. Các biện pháp tăng cường độ rõ:

- Tăng cường năng lượng âm trực tiếp tạo điều kiện để âm trực tiếp truyền tốt nhất đến tai người nghe
 - + Tăng độ dốc của sàn.
 - + Chọn hình dáng phòng hợp lý.
 - + Chú ý tính định hướng của nguồn âm.
- Nếu T dài → làm giảm T bằng cách đặt vật liệu hút âm để điều chỉnh thời gian âm vang.
- Có những biện pháp chống ồn trong phòng.
- Tạo những bề mặt phản xạ gần sân khấu để đưa phản xạ âm ra chỗ ngồi cuối phòng.

CHƯƠNG IV: CHỐNG TIẾNG ỒN TRONG THÀNH PHỐ

I. Các nguồn ồn & phương pháp đánh giá

Giữa tiếng ồn & âm thanh cần nghe không có gì khác nhau về bản chất vật lý nhưng về khía cạnh tâm lý & sinh lý có khác nhau. Tiếng ồn gây ra những ảnh hưởng bất lợi về tâm sinh lý

1. Phân loại tiếng ồn:

a. Theo đường lan truyền:

- Tiếng ồn không khí: là những tiếng ồn lan truyền trong không khí
- Tiếng ồn do va chạm: Là do những vật thể va chạm vào kết cấu gây ra & được lan truyền theo kết cấu

- Tiếng ồn kết cấu: Là những tiếng ồn theo kết cấu nhà cửa. Về nguồn gốc có thể là do không khí hay do va chạm

b. Theo thời gian tác dụng:

- Tiếng ồn ổn định: Là tiếng ồn có mức thay đổi không quá 5dB. Tiếng ồn các *////*
- Tiếng ồn không ổn định: Là tiếng ồn có mức thay đổi vượt quá 5 dB (tiếng ồn giao thông)
- Xung: Tiếng ồn phát ra trong thời gian không quá 1s. Thường có cường độ rất cao (tiếng nổ khi động cơ ban đầu làm việc)

c. Theo tần số: Tiếng ồn f thấp ≤ 300 hz

f cao: $f = 300 \div 800$ hz - f cao : $f > 800$ hz

d. Theo vị trí tương đối của nguồn.

- Tiếng ồn ngoài là những tiếng ồn từ phía ngoài tác dụng vào trong
- Tiếng ồn trong: Là tiếng ồn do chính con người & thiết bị tạo ra bên trong công trình

2. Phương pháp đánh giá

a. Tiếng ồn ổn định: Sinh ra từ các trạm biến thế, các máy móc TB

- Tổng mức ồn: ΣL , dBA
- Đánh giá theo tần số L^f (dB): 63 ÷ 8000hz (đo theo dải 1/3 octa & 1 octa)

b. Tiếng ồn không ổn định (tiếng ồn giao thông vận tải)

- Mức ồn tương đương L_{td}

$$L_{td} = 10 \lg \left(\frac{1}{100} \sum f_i \cdot 10^{0,1L_i} \right) \text{ dB(A)}$$

Trong đó: thời gian khảo sát tính bằng giây. Thường đo trong 1800s (30 phút)

f_i : Thời gian tác dụng của mức ồn dải thứ i : tính bằng số % của tổng thời gian tác dụng.

L_i : Mức âm trung bình của dải thứ i

Mức ồn tương đương là 1 mức ồn định dùng để thay thế cho tác động không ổn định của nguồn ồn hay có thể dùng công thức TN

$$L_{A7} = L_{A7} + \Sigma D \text{ với } \Sigma D = D_1 + D_2 + D_3 + D_4$$

Với D_1, D_2, D_3, D_4 tra bảng: $D_1 = 1$ dB khi xe tải & khách $\neq 60\%$, $D_1 = \pm 1$ dB.

Tốc độ $\neq 40$ km/h.

L'_{A7} : Mức âm tương đương của dòng xe cách trục đường 7,5m của đoạn đường thẳng và phẳng của dòng xe có 60% xe tải và xe khách, tốc độ 40km/h lấy theo bảng.

Cường độ dòng xe	40%	60%	100%	
Mức âm tính toán	68	69	70	A

Và khi đó dùng công thức: $L_{A7} = 46 + 11,8 \lg N + \Sigma D$

$D_3 = +1$ dB khi độ dốc không bằng phẳng;

$D_4 = +3$ dB khi có mặt của tàu điện

N là mật độ dòng xe (xe/h).

Về mặt sinh học người ta coi nó tác động tương đương bên con người như tác động không ổn định.

Đánh giá tiếng ồn: Đo mức âm thanh theo dạng tần số tối đa theo dB. Phạm vi từ 63 ÷ 8000hz hoặc đánh giá mức âm theo dB (A).

II. Ảnh hưởng của tiếng ồn. Tính chất tiếng ồn cho phép.

1. Ảnh hưởng của tiếng ồn:

a. Ảnh hưởng đến cơ quan thính giác:

- Giảm độ nhạy cảm
- Làm cho ngưỡng nghe tăng
- Bị nặng tai, bị điếc.

b. Ảnh hưởng đến hệ thần kinh:

- Gây ra sự ức chế.
- Giảm sự tập trung suy nghĩ gây ra những sao lãng khó chịu.
- Bực bội, đau đầu chóng mặt.
- Ảnh hưởng đến giấc ngủ.

Ví dụ: Khi $L_A = 35\text{dB}$ sau 15' → ngủ say khi tiếng ồn tăng lên 50dB sau 1h mới ngủ.

- Tiếng ồn làm giảm chất lượng cuộc sống.

c. Ảnh hưởng hệ tiêu hoá:

Chính tiếng ồn là nguyên nhân gây ra bệnh viêm loét dạ dày.

Cần coi tiếng ồn là loại hình gây ra ô nhiễm môi trường và để bảo vệ con người khỏi tác động có hại cần có tính chất mức ồn cho phép.

2. Tiêu chuẩn tiếng ồn:

Để đảm bảo điều kiện vệ sinh, điều kiện làm việc của con người thì người ta đưa ra mức ồn cho phép. Mức ồn cho phép không phải là mức ồn tiện nghi. Theo điều kiện vệ sinh:

* Mức ồn cho phép là mức ồn dưới tác dụng kéo dài của nó không gây ra những biến đổi phức tạp trong các hệ thống và bộ máy của cơ thể con người. Nếu mức ồn thực tế nhỏ hơn mức ồn cho phép thì không gây nên những biến đổi xấu về mặt sinh lý và vấn đề đảm bảo được điều kiện làm việc và nghỉ ngơi.

Đối với mỗi nước tùy theo điều kiện kinh tế kỹ thuật, chức năng của công trình mà người ta đưa ra mức ồn cho phép khác nhau:

Ở Việt Nam:

+ Đối với nhà ở:

- | | | | |
|----------------|-------------|----------|-------------|
| - Trong phòng: | - Đêm: 35dB | - Ngoài: | - Đêm: 40dB |
| | - Ngày 50dB | | - Ngày 55dB |

+ Đối với giảng đường: 40dB

+ Trong các văn phòng: 50dB.

III. Chống tiếng ồn thành phố

3.1 Phân loại tiếng ồn:

1. **Tiếng ồn giao thông vận tải:** Tiếng ồn trong thành phố chủ yếu là do tiếng ồn do giao thông vận tải gây ra chiếm từ (60 ÷ 80)%

a. Đặc điểm tiếng ồn của giao thông vận tải

* Mức ồn của giao thông vận tải được coi là mức ồn chung của dòng xe chạy trên đường gây ra (mức ồn tổng cộng của nhiều xe). Mức ồn này phụ thuộc:

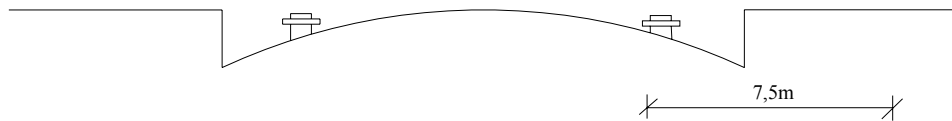
- + Cường độ xe: Số xe/h
- + Thành phần các loại xe (xe tải, xe con, xe máy...)
- + Vận tốc xe (Km/h)
- + Đặc điểm của đường
- + Đặc điểm của công trình hai bên đường

* Mức ồn này thay đổi vì tiếng ồn GTVT không phải là tiếng ồn ổn định

b. Đánh giá mức ồn GTVT thông qua một mức ồn khác tương đương L_{td}

Mức ồn tương đương của một nguồn không ồn định thực chất là một mức ồn ổn định cùng gây ảnh hưởng tới con người như nguồn gây tiếng ồn chúng ta đang khảo sát

Chỉ số tính toán mức ồn tương đương của một dòng xe thường được khảo sát bằng phương pháp thống kê trên cơ sở đo mức ồn tại một điểm cụ thể thời gian khảo sát 30 phút trong thời điểm cao điểm



2. Tiếng ồn trong công nghiệp.

- Tiếng ồn cơ khí
- Tiếng ồn va chạm
- Tiếng ồn khí động

3. Biện pháp phòng chống tiếng ồn.

1) Biện pháp quy hoạch kiến trúc

Để chống tiếng ồn đường phố và tiếng ồn công nghiệp có hiệu quả thì phải sử dụng tổng hợp các biện pháp quy hoạch và kiến trúc

a). Quy hoạch vùng

- Khu ồn: 80dB
- Khu ở: 60dB
- Khu yên tĩnh: 50dB

Giữa các vùng này phải có vùng đệm và bố trí hợp lý và chia thành phố ra làm 4 khu vực theo độ ồn:

Vùng 1: Vùng công nghiệp(ồn nhất thành phố 80 đến 90dB)

Vùng 2: Trung tâm công cộng 70 đến 80dB. Bố trí chợ búa, cửa hàng, nhà ga, bến xe.

Vùng 3: Vùng nhà ở khu dân cư; nơi tương đối yên tĩnh của thành phố

Vùng 4: Đây là vùng yên tĩnh nhất của hành phố: 50dB (bố trí bệnh viện, viện nghiên cứu, Phòng thu âm)

$$\Delta L = L_A - L_B = k_r 20 \lg \frac{r_z}{r_u} \quad (\text{dB})$$

$$\rightarrow \lg z_2 = \frac{L_A - L_B + k_r \lg}{k_u 20} \quad \text{với } k_u = 1,5$$

* Đối với nguồn đường: độ giảm tiếng ồn ΔL :

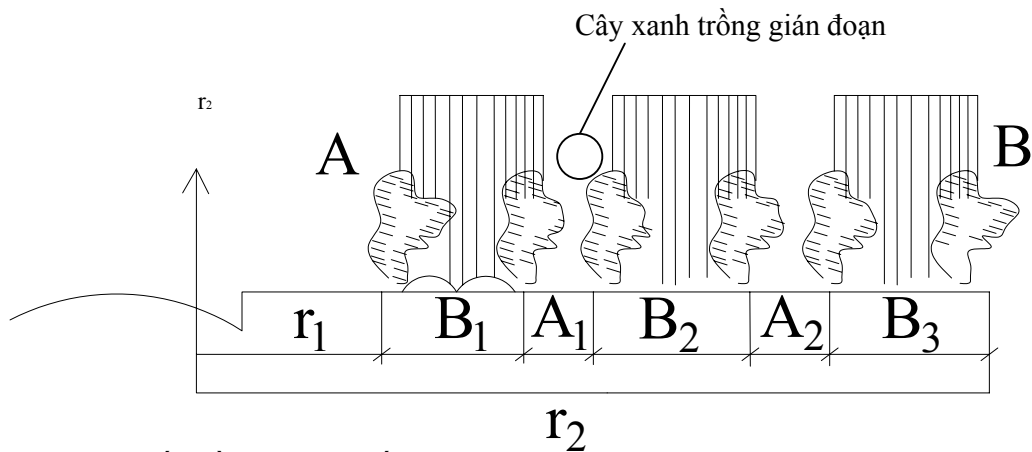
$$\Delta L = L_A - L_B = k_n \cdot 10 \lg \frac{r_2}{r_u} \quad (\text{dB})$$

$$\rightarrow \lg r_2 = \frac{L_A - L_B + k_n 10 \lg r_u}{k_n 10} \quad k_n = 0,75$$

k: Hệ số kê đến sự hút âm của mặt đường:

- Đối với m mặt trần: $k_n = 1$
- Mặt đất phủ nhựa đường: $k_n = 0,9$
- Mặt đất trồng cỏ: $k_n = 1,1$.

b. Sử các biện pháp cây xanh để chống ồn:



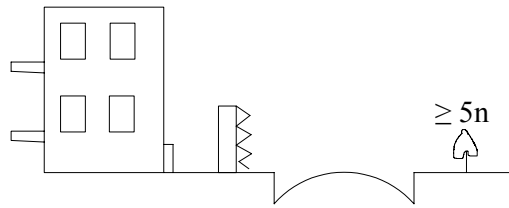
* Cây xanh lấp đầy khoảng trống

Nguồn điểm: $\Delta L = L_A - L_B = K_z 20 \lg \frac{r_2}{r_u}$

Nguồn đường: $\Delta L = L_A - L_B = K_z 10 \lg \frac{r_2}{r_u}$

Với $K_z = 1,5$ với lớp cây xanh trồng xen kẽ, vòm lá rộng, có cây thấp trồng xung quanh
 $K_z = 1,2 \Rightarrow$ lớp cây xanh mang tính chất công viên rừng vòm lá trung bình, có cây thấp xung quanh

*Dãi cây tán lá rộng dưới gốc cây có cây bụi thấp dưới tán lá



- Tác dụng: - Hạ thấp tiếng ồn
- Có sự phản xạ âm ở mỗi dãy cây
- Do sự hút âm và phản xạ âm của tán lá.

Nguồn điểm: $\Delta L = L_A - L_B = k_u 20 \lg \frac{r_2}{r_u} + 1,5n + \beta \sum_{i=1}^n B_i$

Nguồn đường: $\Delta L = L_A - L_B = k_n 10 \lg \frac{r_2}{r_u} + 1,5n + \beta \sum_{i=1}^n B_i$

Trong đó:

n: Số lượng các dãy cây

1,5: Do phản xạ mỗi dãy cây giảm

B_i (m) bề rộng của dãy cây thứ i

β : Hệ số hạ thấp mức âm (dB/m) tra bảng 6-3.

Ví dụ: Rừng lá rậm: $\beta = 0,12 \div 0,17$

Rừng cây dày đặc, vòm lá rậm: $\beta = 0,25 \div 0,35$.

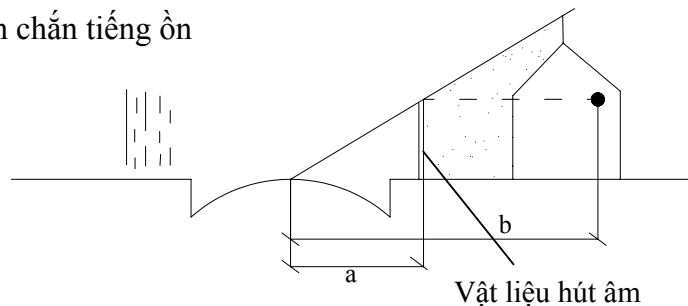
Nguồn dẫy:

Khi $r_2 < S/2$: $\Delta L = L_A + L_B = K_n \frac{(24 \lg S - 30,2)(24 \lg r_2 - 20,3)}{24 \lg S - 27,5} + 1,5n + \beta \sum B_i$

S: khoảng cách giữa các xe: $S = 1000 \frac{V}{N}$ (m)

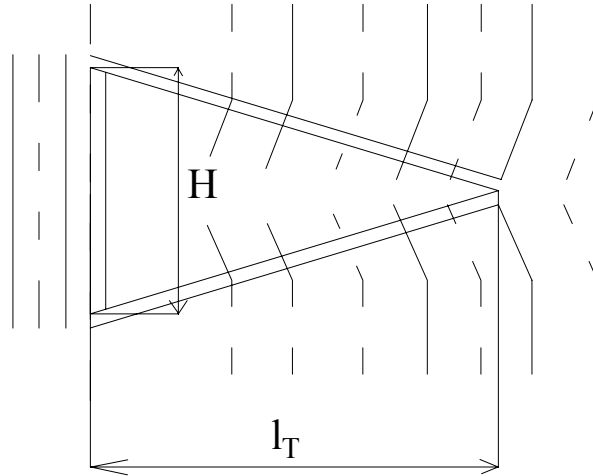
Khi $r_2 > S/2$: $\Delta L = L_A - L_B = K_n(15 \lg S_{r_2} - 33,3) + 1,5n + \beta \sum_1^n B_i$

c. Sử dụng màn chắn tiếng ồn



Giảm từ 5 ÷ 20dB

Khi lan truyền sóng âm sẽ hình thành sau tường chắn một vùng bóng âm. Trong vùng bóng âm, sóng âm không bị loại trừ hoàn toàn do tác dụng nhiễu xạ của sóng âm ở các biên của tường chắn



Lượng sóng âm nhiễu xạ sau tường chắn phụ thuộc vào kích thước của tường chắn (H) và chiều dài bước sóng λ của sóng âm tới. Cùng một tường chắn λ càng lớn

→ vùng bóng âm càng hẹp. Chiều dài vùng bóng âm bằng: $l_T = \frac{H^2}{4\lambda} (m)$

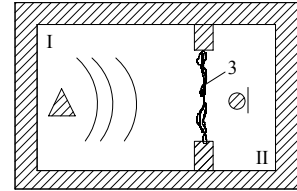
Chương V: Cách âm cho các kết cấu

I. Đánh giá khả năng cách âm của kết cấu

1. Cách âm không khí

Có 2 phòng. Phòng I có mức ồn lớn hơn phòng II. Sóng âm từ nguồn bức xạ vào không khí và tới trên khoảng cách ngăn cách kích thước kết cấu dao động theo tần số của sóng âm. Như vậy kết cấu ngăn cách trở thành nguồn âm mới bức xạ sóng âm vào phòng II.

Khi sóng âm tới trên bề mặt kết cấu thì sẽ cường bức khoảng cách này dao động đồng thời có 1 bộ phận sẽ phản xạ vào không khí & 1 bộ phận khác sẽ xuyên qua kết



cấu. Hệ số xuyên âm $T_0 = \frac{E_x}{E_t}$

Nếu gọi R_0 là khả năng cách âm thì:

$$R_0 = 10 \lg \frac{1}{T_0} \text{ (dB)} = 10 \lg \frac{E_t}{E_x}$$

T: Xác định bằng TN

Thực tế lượng cách âm của kết cấu được xác định bằng công thức:

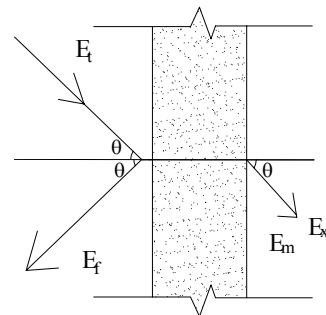
$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S'}{A} \text{ (dB)}$$

Trong đó: * L_1 : Mức áp suất âm của phòng có mức âm cao

* L_2 : Mức áp suất của phòng có mức âm thấp

$A = \sum \alpha_i S_i$: Lượng hút âm của phòng cách ly (II)

S' (m²): Diện tích của bề mặt ngăn cách (3)

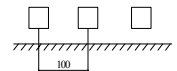
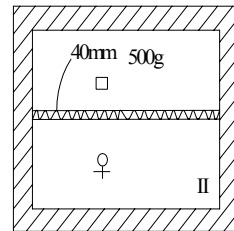


2. Cách âm va chạm:

Dùng máy đo mức âm trong phòng dưới sàn khi nguồn âm va chạm tiêu chuẩn tác dụng trên sàn. Máy va chạm tiêu chuẩn, có 5 búa, mỗi búa nặng 500g cho rơi tự do trên mặt sàn với tốc độ 10 búa trên 1s. Từ đó ta tính được mức áp suất âm va chạm quy đổi dưới sau:

$$L_v = L_{II} - 10 \lg \frac{A_0}{A} \text{ (dB)}$$

L_{II} : Mức âm trong bình đo ở phòng dưới sàn ở các tần số giá trị L_{II} càng nhỏ thì sàn cách âm càng tốt.



Lượng $10\lg \frac{A_0}{A}$ là lượng cách âm tăng thêm do tác dụng hút âm của phòng.

A_0 : Lượng hút âm tiêu chuẩn $A_0 = 10m^2$

A: Lượng hút âm của phòng dưới sàn

3. Qua thực nghiệm ta thấy rằng, sàn toàn khối & sàn rỗng nếu chỉ có lớp chịu lực với lớp mặt làm sạch thì không đủ ngăn cách tiếng ồn va chạm. Do đó để ngăn cách tiếng ồn và va chạm thường xử lý 1 lớp đệm đàn hồi trên mặt sàn. Nhờ lớp đệm này, lượng cách âm của sàn sẽ được tăng thêm.

II. Tiêu chuẩn cách âm

Phạm vi tần số $f = 100 \div 3200$ hz theo dải tần số 1/3 ôc ta. Chỉ số cách âm không khí được gọi là CK

1. Kết cấu ngăn cách trong phòng cách âm không có truyền âm gián tiếp.

2. Kết cấu cách âm thực tế có truyền âm gián tiếp

Đường tiêu chuẩn cách âm không khí theo

ISO. Khi R^{\wedge} kết cấu cách âm tốt chỉ số cách âm va chạm là CV. Chỉ số cách âm không khí là CK.

Đó là chỉ số đánh giá cách âm không khí & cách

âm va chạm trong kết cấu nhà cửa tại $f = 500$ hz. Để xác định CK, CV của 1 kết cấu nào đó ta vẽ đường L thực của nó. L^{\wedge} thì kết cấu cách âm càng tối. Sau khi vẽ được đường thực tế ta xác định sai số dựa trên đường tiêu chuẩn cách âm theo 2 điều kiện sau:

+ Theo dải tần số: Sai số xấu lớn nhất giữa 2 đường (đường thực tế & đường tiêu chuẩn)

$$\delta_{\max} \leq 8\text{dB}$$

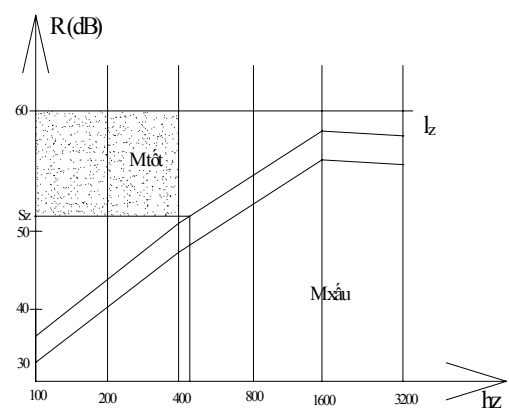
+ Tổng sai số xấu giữa 2 đường $\Sigma\delta_i \leq 32$ dB

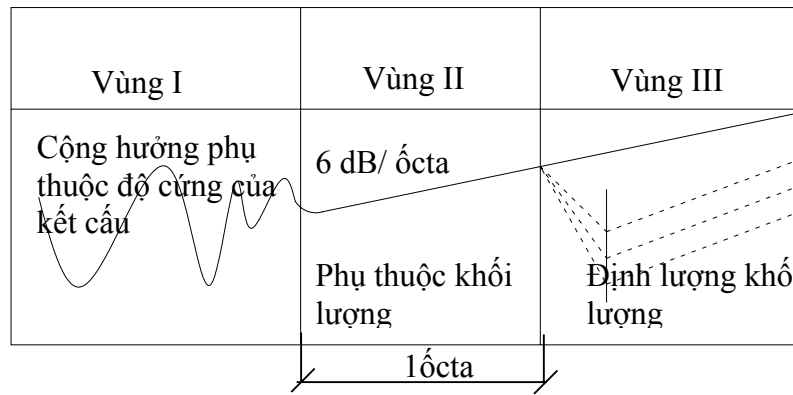
III. Cách âm không khí:

1. **Kết cấu đồng nhất:** Là kết cấu 1 lớp hoặc nhiều lớp khác nhau nhưng gắn chặt vào nhau, khi dao động toàn kết cấu dao động cùng trạng thái

a. **Đặc tính tần số cách âm của kết cấu đồng nhất:**

Có thể phân thành 3 vùng khác nhau





+ Vùng I: Phạm vi tần số rất thấp: Có thể xảy ra hiện tượng cộng hưởng làm giảm đáng kể khả năng cách âm của không khí. Khả năng cách âm của kết cấu phụ thuộc vào độ cứng.

+ Vùng II: Phạm vi tần số trung bình (& thấp). Khả năng cách âm không khí của kết cấu (R) phụ thuộc vào khối lượng của kết cấu:

$$R = 20 \lg p \cdot f - 47,5 \text{ dB}$$

Trong đó: $p = f \cdot h$ [kg/m²]: Khối lượng bề mặt của kết cấu.

+ ρ [kh/m³]: Khối lượng riêng của kết cấu.

+ h (m): Chiều dài của kết cấu (m)

+ f (hz): Tần số

Theo định luật khối lượng thì khi khối lượng tăng gấp đôi thì khả năng cách âm tăng $4 \div 6 \text{ dB}$

$$\frac{p_1}{p_2} = 2 \Rightarrow R \uparrow 6 \text{ dB}$$

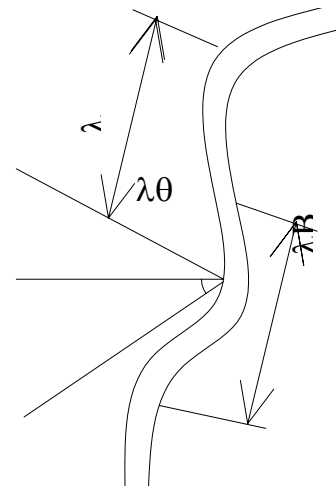
Khi f tăng gấp đôi \Rightarrow thì khả năng cách âm tăng 6 dB

$$\frac{f_2}{f_1} = 2 \Rightarrow R \uparrow 6 \text{ dB (1 ôc ta tăng 6 dB)}$$

+ Vùng III: Phạm vi tần số trung bình và cao. Ở đây có thể xảy ra hiện tượng đặc biệt gọi là hiện tượng trùng sóng và khả năng cách âm của kết cấu giảm đi vì kết cấu bị dao động rất mạnh nên trở thành nguồn âm cung cấp bức xạ

sóng âm. Tần số xảy ra sự trùng sóng gọi là tần sóng tới hạn f_{gh} . Sóng âm tới kết cấu với góc θ và bước sóng λ , tần số f và tốc độ trùng sóng c thì nó gây ra sự dao động cưỡng

bức kết cấu uốn cong của bản λ_B , thì : $\lambda_B = \frac{\lambda}{\sin \theta}$



Bản có mức sóng uốn riêng. Nếu $\lambda_u = \lambda_B$ thì xảy ra trùng sóng hay $\lambda_u = \frac{\lambda}{\sin\theta}$ góc $\theta = 0 \div$

$$90^\circ \Rightarrow \sin\theta = 0 \div 1$$

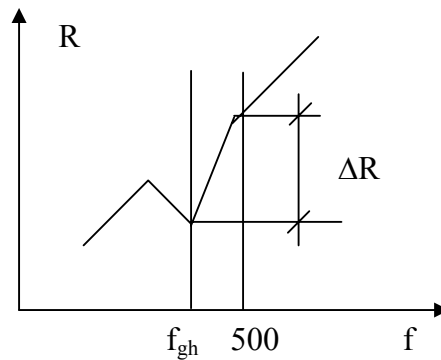
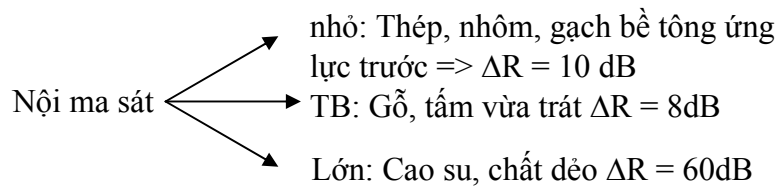
Ta có công thức tính $f_{gh} = \frac{C^2}{1,8C_1 h}$

Với $C = 340$ m/s

C_1 : Vận tốc truyền sóng trong vật liệu làm bản mỏng

$h(m)$: Chiều dày của kết cấu.

Độ giảm khả năng cách âm trong phạm vi f_{gh} của 1 kết cấu phụ thuộc vào nội ma sát của vật thể.



Bảng tần số giới hạn, số liệu để xác định các điểm B, C

Vật liệu của K/C	Khối lượng riêng	Tần số giới hạn khích chiều dài 1cm	R_B & R_C (dB)	f_B (hz)	f_C (hz)
Nhôm	2700	1300	29	6700/p	73700/p
Bê tông	2300	1800	38	1900/p	850000/p
Gạch đặc (tùy loại)	2000 ÷ 2500	2000 ÷ 2500	37	17000/p	77000/p
Thép	7800	1000	40	21000/p	260000/p
Gỗ dán (tùy loại)	6000	18000	27	5300/p	5300/p
Tấm trát	1000	4000			
Bê tông xi			29	6700/p	43000/p
Kính	2500	1200			
Cao su	1000	85000			

Trong phạm vi 1 ồc ta của tần số giới hạn, khả năng cách âm của kết cấu giảm đáng kể vì thế phải thuê kết cấu ngăn cách có f_{gh} nằm ngoài phạm vi tần số tiêu chuẩn yêu cầu ngăn cách $f_{gh} < 100$ hz hoặc $f_{gh} > 3200$ hz bằng cách cấu tạo thêm sườn cứng để tăng thêm độ cứng hoặc xẻ rãnh làm mềm kết cấu

b. Lượng hút âm trung bình của kết cấu đồng nhất:

$$R_{tb} = \frac{R_1 + R_2 + \dots R_n}{n}$$

$R_1, R_2 \dots R_n$ là khả năng cách âm của kết cấu đồng nhất ở những quãng độ cao khác nhau.

n: Số lượng quãng độ cao tính toán

* Đối với kết cấu đồng nhất, khối lượng $P \leq 200$ kg/m²

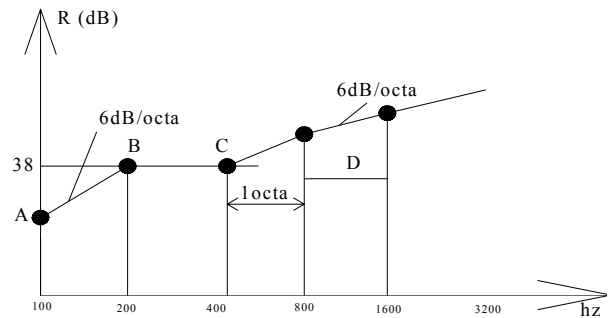
$$R_{tb} = 13 \lg P + 13 \text{ dB}$$

* Đối với kết cấu đồng nhất, khối lượng $P \geq 200$ kg/m²

$$R_{tb} = 23 \lg P - 9 \text{ dB}$$

c. Phương pháp gần đúng để lập đường đặc tính tần số khả năng cách âm không khí của kết cấu đồng nhất

- Dụng tọa độ
- Xác định khối lượng bề mặt $P = \rho h$
- Đường đồng tính, cách âm ABCDE
- Theo bảng xác định tọa độ B & C
- Từ B nghiêng bên trái về 6 dB/octa
- Từ C về bên phải 10 dB/octa



2. Kết cấu nhiều lớp:

a. Đối với kết cấu nhiều lớp có lớp không khí trung gian

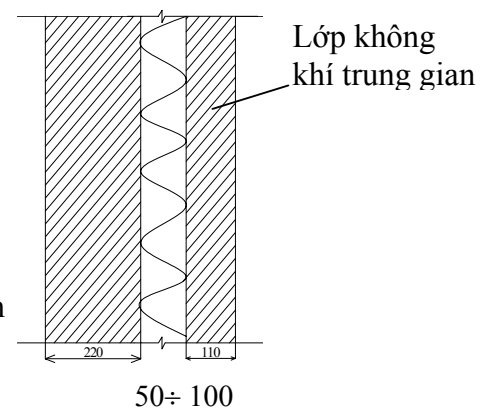
$$R_{tb} = 23 \lg P - 9 + 4R'. \text{ Với } P = P_1 + P_2 \geq 200 \text{ kg/m}^2$$

Đối với kết cấu nhiều lớp : $R_{tb} = 13 \lg P + 13 + \Delta R \text{ dB}$

Với $P = P_1 + P_2 < 200 \text{ kg/m}^2$ & ΔR lượng cách âm tăng thêm

Để làm tăng khả năng cách âm R của kết cấu mà không làm tăng khối lượng bề mặt thì người ta có thể cấu tạo kết cấu nhiều lớp: Có thể 2 lớp, 3 lớp.

Khi sử dụng kết cấu nhiều lớp, người ta phải chú ý tránh hiện tượng cộng hưởng của toàn bộ kết cấu và có thể tránh sự hình thành sóng đứng trong các lớp kết cấu. Để tránh



hiện tượng cộng hưởng người ta phải tạo ra sự chênh lệch về độ cứng trong các lớp kết cấu.

- Nhồi đầy vật liệu + A vào khoảng cách giữa các lớp.

3. Ảnh hưởng của khe hở, lỗ hở đến khả năng cách âm không khí R.

Khe, lỗ hở làm ↓ đáng kể khả năng cách âm của không khí. Do vậy khi cấu tạo các kết cấu cách âm, người ta phải xử lý kín các khe hở.

4. Khả năng cách âm của kết cấu hỗn hợp (cửa, tường)

$$R_{th} = R_t - 10 \lg \left[1 + \frac{S_c}{S_t} (10^{0,1(R_t - R_c)} - 1) \right]$$

$$S_0 = S_{tường} + S_{cửa}$$

R_t, R_c : lượng cách âm của tường và lượng cách âm của cửa

5. Ảnh hưởng kích thước các khe hở:

Khi kích thước các khe hở càng lớn thì năng lượng âm truyền qua càng nhiều. Do vậy khi bắt buộc phải cấu tạo các khe hở thì với cùng 1 diện tích ta nên tổ chức nhiều lỗ nhỏ hơn là một lỗ lớn.

* Xác định tổng mức âm vào phòng

$$\Sigma L = 10 \lg \sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{0,1(L_i - R_i)} - 10 \lg A$$

Trong đó: S_i (m^2): Diện tích bề mặt thứ 2

L_i (dB). Mức âm của phòng ở phía sau bề mặt thứ 2

R_i Khả năng cách âm không khí của kết cấu thứ i

A: Lượng hút âm của phòng

Do vậy, về mặt nguyên tắc khi bố trí các kết cấu ngăn che của phòng thì nguyên tắc thì nguyên tắc phải thiết kế sau cho khả năng cách âm không khí của kết cấu phù hợp với mức âm phía sau của kết cấu đó

IV. Cách âm va chạm

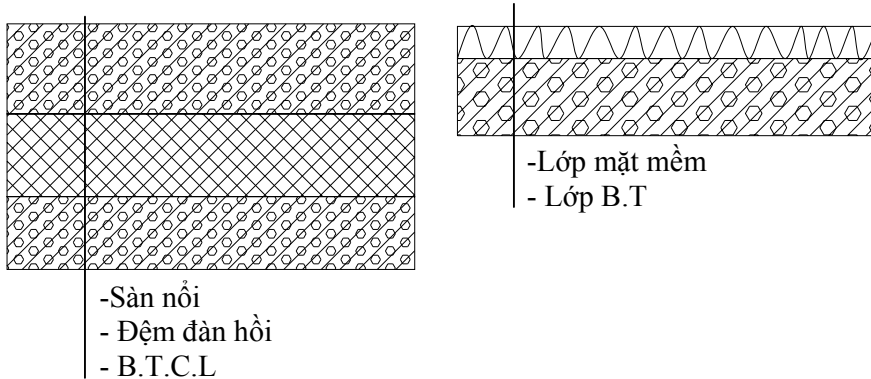
1. Đặc điểm của truyền âm va chạm

Khác với cách âm không khí, cách âm va chạm truyền vào bên trong kết cấu, có khả năng truyền âm nhiều hơn so với không khí. Do vậy quá trình tắt dần của âm va chạm rất chậm, nên khả năng lan truyền của nó rất xa.

2. Nguyên tắc tổ chức cách âm:

Khi âm va chạm truyền theo kết cấu => do vậy việc tăng chiều dày của kết cấu thì không làm tăng đáng kể khả năng cách âm va chạm. Dựa vào 2 nguyên tắc để tổ chức cách âm.

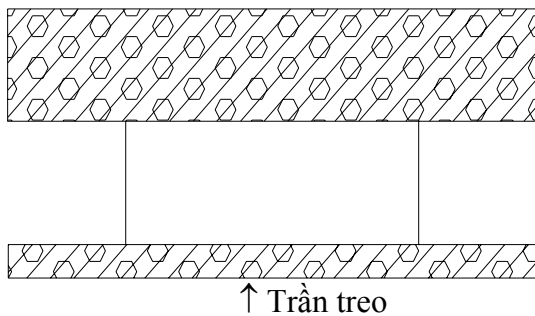
- Làm giảm cách đường truyền âm hoặc làm ↓ năng lượng âm trên đường truyền
- Làm giảm hoặc triệt tiêu âm va chạm ngay trên mặt sàn (sàn bê tông đặc hoặc rỗng trên có phủ lớp mặt mềm hoặc làm sàn nổi)



3. Các giải pháp cách âm va chạm:

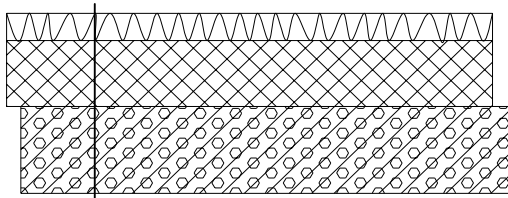
a. Sử dụng trần treo

Trần treo có thể làm bằng thạch cao, gỗ, ván sợi ép, bông thủy tinh

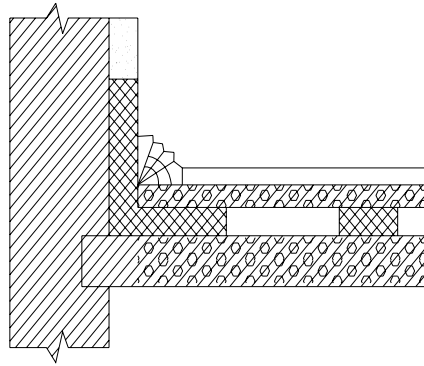


b. Sàn nổi

Đối với phòng có yêu cầu cách âm cao, thông thường người ta sử dụng đồng thời các biện pháp nêu trên. Để tránh sự truyền âm gián tiếp phải tách lớp mặt sàn nổi khỏi tường bằng các đệm đàn hồi. Khi đó gỗ chấn tường chỉ liên kết với lớp mặt sàn nổi



- Lớp bề mặt (thảm)
- Lớp đàn hồi
- Lớp chịu lực



TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Giáo trình âm học kiến trúc.

Tác giả: KTS Việt Hà - Nguyễn Ngọc Giã

NXB : Trường ĐHKT - Tp HCM - 1993

2. Cơ sở âm học kiến trúc

Tác giả: Nguyễn Việt Hà - Trường ĐHKT Hà Nội

NXB : Nhà xuất bản Xây dựng - 1979

3. Âm học kiến trúc.

Tác giả: Kari - Hanus - Người dịch: Phạm Đức Nguyên

NXB : Khoa học & Kỹ Thuật - HN 1977.

4. Vật lý Xây dựng tập II

NXB: Xây dựng-Hà nội 1972