

第七章 通风机的噪音

风机和压气机的噪音是一个很重要的运行特征，在实际中，应千方百计地消除。

§1 基本概念

一. 声波

声波是在弹性介质中传播的一种机械波，它是一种纵波，声波在空气中传播可以认为按绝热过程变化：

$$\frac{p}{\rho^k} = \text{const} \quad (7-1)$$

$$\frac{dp}{d\rho} = k \frac{p}{\rho}$$

$$\frac{p}{\rho} = RT$$

声波的速度： $a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{kRT}$ (7-2)

式中， R 气体常数

k 绝热指数： $k = \frac{C_p}{C_v}$

声速和气压无关， 0°C 时空气中的声速 331.5m/s ，

$$a = 331.5 + 0.61t \text{ m/s} \quad (7-3)$$

f 为频率， T 为周期： $f = \frac{1}{T}$ (Hz) (7-4)

波长用 λ 表示： $\lambda = \frac{a}{f}$ (m) (7-5)

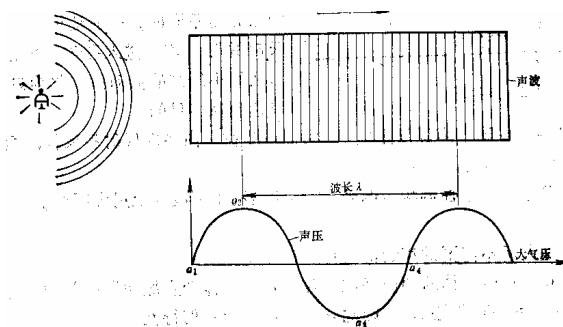


图 7-1 正弦声波

二. 声强：

根据连续方程：

$$\rho A a = (\rho + dp) A (a + u)$$

$$a = -\frac{\rho}{dp} u \quad (7-6)$$

在声波通过一个介质断面时，由于声波的作用使介质得到弹性位势和动能。介质弹性力所做的功为弹性位势 E_p （单位体积）

$$E_p = -p \frac{dv}{v} = p \frac{d\rho}{\rho} \quad p dv \quad (\text{比容, 单位质量气体})$$

$$\rho v = \text{const} \quad \frac{dv}{v} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

由 (7-2) $d\rho = \frac{dp}{a^2}$

$$E_p = \frac{p}{\rho a^2} dp = \frac{1}{2} \frac{(dp)^2}{\rho a^2} \quad (7-7)$$

动能（单位体积） E_k

$$E_k = \frac{1}{2} \int u^2 = \frac{a^2 (d\rho)^2}{2 \rho} = \frac{1}{2} \frac{(dp)^2}{\rho a^2} \quad (7-8)$$

所以当声波通过时，单位流体所获得的总能量：

$$E = E_p + E_k = \frac{(dp)^2}{\rho a^2} \quad (7-9)$$

所以由于声波的 a 传播，故单位时间内通过垂直于声传播方向的单位面积上声的能量为： I

$$I = E \cdot a = \frac{(dp)^2}{\rho a} \text{ W/m}^2 \quad (7-10)$$

式中 I — 声强 W/m^2 （单位时间通过单位面积的能量）

ρ — 介声密度 kg/m^3

dp — 声压 N/m^2

平常引起听觉得声强 10^{-12} W/m^2 （听域声强）

引起（缺）的声强 10 W/m^2 （痛域声强）

声音的强弱只有相对概念，故用声强级 IL （单位 dB ，分贝）表示：

$$IL = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (dB)$$

式中 $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ ，在 I_0 声强下的 IL ，就是 0 分贝。

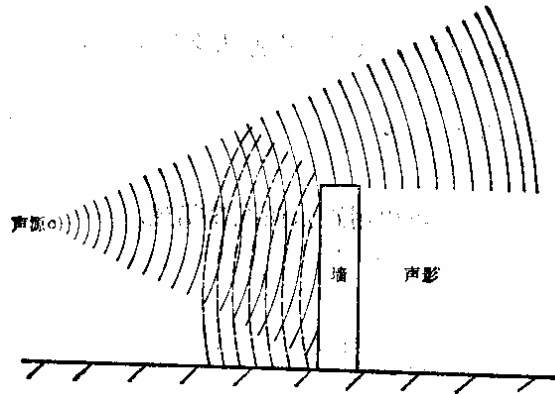


图 7-2 声波的反射

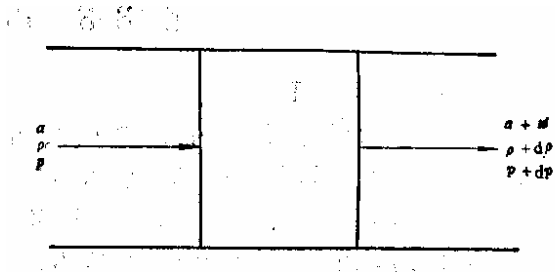


图 7-3 声波前后的流动

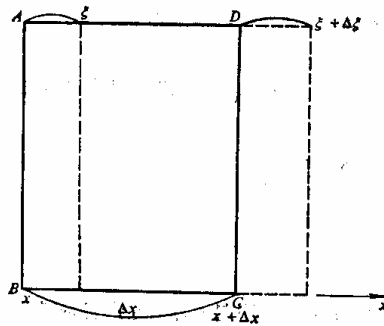


图 7-4 声波的传播过程

三. 声强压

声波穿过空气，使空气的压力（大气压）发生变化， dp ，气压的变化叫做声压：

$$\frac{p + dp}{p} = \left(\frac{\rho + d\rho}{\rho}\right)^k$$

$$S = \frac{d\rho}{\rho} \text{ 压（缺）率}$$

$$\frac{p + dp}{p} = (1 + S)^k \approx 1 + kS \quad (7-12)$$

声压 dp 与大气压 p 的关系：

$$dp \approx kSp \quad (7-13)$$

声压随时间的变化：对于绝热过程

$$pV^k = \text{const}$$

$$\frac{dp}{p} = -k \frac{dV}{V} \quad (7-14)$$

设 $dp = p'$, $dV = v'$

$$\therefore \frac{p'}{p} = -k \frac{v'}{V} \quad (7-15)$$

$$\therefore \frac{\partial p'}{\partial t} = -k \frac{p}{V} \frac{\partial v'}{\partial t} \quad (7-16)$$

体积变化量：

$$v' = \frac{\partial \xi}{\partial x} V \quad (7-17)$$

$$u = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (7-18)$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} = V \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7-19)$$

用 p' 表示声压随时间变化的关系：

$$\frac{\partial p'}{\partial t} = -kp \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7-20)$$

声压的有效值：

由于声音是波，声压 p' (dp) 是变化的，为此用有效值 p_e 表示，是指一周期的均方根平均值：

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p'^2 dt} \quad N/m^2 \quad (7-21)$$

(缺) 时，

$$p_e = \frac{p_m}{\sqrt{2}} \quad (7-22)$$

$\omega = 2\pi f$ ，角频率，合成声压为：

$$p_e = \sqrt{p_{1e}^2 + p_{2e}^2 + \dots} \quad (7-23)$$

声压级: SPL , 由于声强很难测量, 平时测出声压, 声强与声压的平方成正比:

$$SPL = 10 \lg \frac{p'^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p'}{p_0} \quad (dB) \quad (7-24)$$

p_0 , 为 1000 赫兹的听力声强, $p' = 2 \times 10^{-5} N/m^2$, SPL , 声压级 (IL 声强)

声压的合成: L_1 、 L_2 (声压级), $L_1 > L_2$

$$L = L_1 + a = L_1 + 10 \lg \left(1 + \frac{1}{10^{\frac{L_1 - L_2}{10}}} \right) \quad (dB)$$

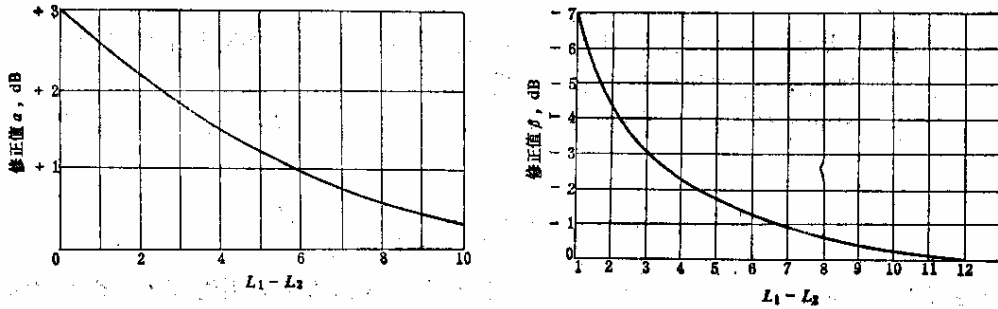


图 7-5 声压的合成和环境噪音的修正

四. 声功率和声功率级

声功率是声源在单位时间内辐射出来的声波总能量, 用 W 表示 (单位 W), 也可以用声功率级表示: PWL

$$PWL = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (dB) \quad (7-25)$$

$$W_0 = 10^{-12} \quad (W)$$

多级间可以换算

L (dB)	p' (N/m^2)	$E_a = I$ (W/m^2)	W (W)
0	0.00002	10^{-12}	10^{-12}
10	0.000063	10^{-11}	10^{-11}
20	0.0002	10^{-10}	10^{-10}
80	0.0063	10^{-7}	10^{-7}
100	2	10^{-2}	10^{-2}
120	20	1	

声功率的测量方法:

(1) 自动声场法

$$\text{自动球面: } PWL = SPL + 20\lg r + 11 \quad (dB)$$

$$\text{未自动球面: } PWL = SPL + 20\lg r + 8 \quad (dB)$$

$$SPL_2 = SPL_1 - 10\lg\left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2 \quad (dB)$$

距离增加 10 倍, 声压级仅衰减 20 dB

(2) 扩散声场法 (混响室法)

SPL : 平均声压级

$$PWL = SPL + 10\lg V - 10\lg T - 14 \quad (dB)$$

V — 室容积 (m^3)

T — 混响时间 (s)

(缺) 扩散的声场, 房间常数为 R

$$PWL = SPL + 10\lg R - 6 \quad (dB)$$

$$R = \frac{aS}{1-\alpha^2} \quad (m^2)$$

$\alpha = 0 \sim 1.0$ 吸声系数

S — 室内表面积

(3) 未扩散声法

(4) 置换法: (用标志声源比较)

$$PWL = PWL_0 + (SPL - SPL_0) \quad (dB)$$

五. 倍频程:

声频段, 倍频程是指相邻两个频率之比为 2:1 所确定的频程:

f_1 为频带的下限截止频率

f_2 为频带的上限截止频率

中心频率: ($f_2 = 2f_1$)

$$f = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \frac{f_2}{\sqrt{2}} = \sqrt{2}f_1$$

$\frac{1}{3}$ 频程就是把倍频程再分为三段。

六. 噪声

1. 噪声级:

声压级相同但是频率不同的声音作用于人的耳朵, 感觉是不同的。声音的大小 (响度) 由人们的听觉决定的。

响度用响度级表示，以 1000 Hz 的纯音做为基准声音，用其声压级做为该频率的响度级。单位为 (缺) (phon)。

Ribison 和 Dadson 对不同频率的纯音进行听感试验，得一组等响曲线。等响曲线中任一条曲线相当于频率和声压级不同但响度级相同的声音。最下面的一条曲线是听域线，最上面一条是痛域线。

在噪声测量仪—声级计中，根据等响曲线，一般设置计数网络 A、B、C 特性：

A 声级：相当于人耳对于 40fang 纯音的响度级。与人耳的感觉一样。对于低频 (500 Hz 以下) 不敏感，有较大衰减，而高频段比较敏感。在噪声测量中往往用 A 特性的总声级代表噪音的级，记做 $SL(A)$ 。

B 声级：相当于 70fang 纯音的响度级。当接受声音时，低频段有一定的衰减。

C 声级：相当于 100fang 纯音的响度级。它的特征平坦，大致与声压级一致。所以在噪音测量中，若测定声压级，往往用 C 特性。

如测定噪音声级时，一般采用 A 特性和 C 特性同时进行测定。即当 A 声级和 C 声级之差大时，噪音主要是 1000 Hz 以下的噪音。

D 声级：主要测量风机的敏感噪声级。

噪音值 (缺) 数 N ：

$$N = \frac{SPL - a}{b}$$

式中 SPL — 倍频带声压级 (dB)， a 、 b 常数。

$$SPL = a + bN$$

当给定了某一个频带的噪音允许值之后，就可以计算允许声压。

总声级 $SL(A)$ 与 N (噪音值 (缺) 数) 可按下式近似换算：

$$N = SL(A) - 5 \quad (dB)$$

$N > 85$ (dB) (缺) 就变换值和妨碍

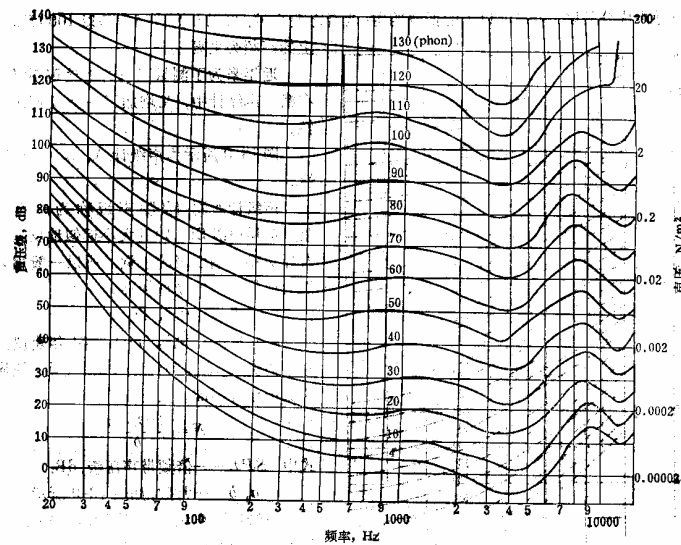


图 7-6 等响度曲线

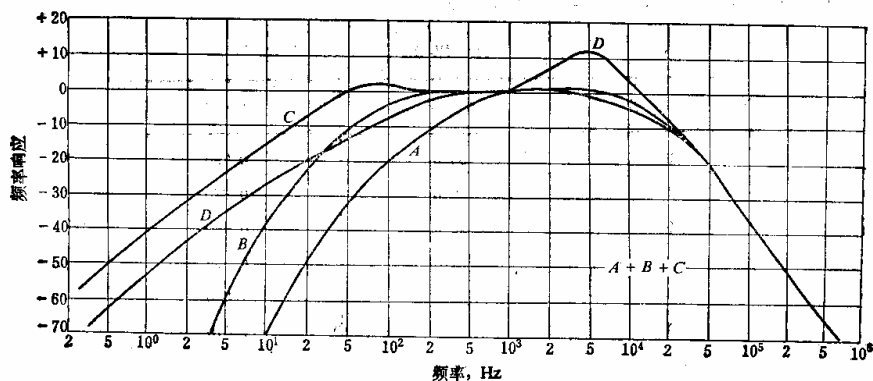


图 7-7A, B, C, D 声级计的计权网络特征

§ 2 通风机的噪音

一. 产生原因

1. 空气动力所产生的噪音:

(1) 冲击噪音: 其基本频率 f_c 为:

$$f_c = nZ \quad (\text{Hz}) \quad n(\text{rps}) \quad Z \text{ 叶片数}$$

压力越高, 叶轮圆周速度大, 噪声大。

(2) 湍流噪音:

由于气体边界层分层而产生的湍流噪音, 其频率为:

$$f = k \frac{v}{D} \quad (\text{Hz})$$

k — 常数, 0.15 ~ 0.22

v — 叶片相对于气体的速度 (m/s)

D — 叶片在气体进口方向的宽度

湍流噪音有宽广的频率范围。

2. 机械噪音

3. 两者相互作用而产生的噪音

通风机噪音的声源特征是 (缺) 噪声。

二. 通风机的声功率级

(一) 通风机的声功率级

声功率级与声压的平方成正比, 一般来说通风机的声功率级与通风机的压力平方成正比变化, 在压力一定的情况下, 声功率级与流量的增减而变, 当声压一定时, 声的能量与声的通流面积成正比例。

通风机的声功率级 PWL 的计算式:

$$PWL = 38 + 10 \lg Q + 20 \lg \Delta P \quad (\text{dB})$$

式中: Q — 流量 (m^3/s) ΔP — 全压 (N/m^2)

通风机的噪声功率级往往在测试时用下式计算:

$$PWL = SPL + 10 \lg S \quad (\text{dB})$$

式中: SPL —测点上的平均声压级 (dB)

S —风筒表面积 (m^2)

考虑到大气的温度 T_K ($^{\circ}C$) 和大气压 P_b (N/m^3)

$$PWL = SPL + 10\lg S + 10\lg\left(\frac{1.01325 \times 10^5}{P_b} \cdot \sqrt{\frac{T_K}{273}}\right) \quad (dB)$$

那么通风机声功率级线可以在 $\Delta P_{st} - Q$ 图上表示。

分析表明: 通风机的声源功率 W :

$$W \propto \rho \xi D_2^2 \frac{u^6}{a^3} = \rho \xi D_2^2 u^3 M^3$$

式中: ρ —气体密度

ξ —阻力系数

D_2 —叶轮直径

u —叶周速度

$$M = \frac{u}{a} \quad \text{马赫数}$$

(二) 通风机的比声功率级

比声功率级表示相似通风机的噪声特征。它是指同系列通风机在单位风量 $1 m^3/s$,

单位静压 $1 mm$ 水柱下运行的噪音, 用 PWL_s 表示:

$$PWL_s = PWL - 10\lg(QP_{st}^2) \quad (dB)$$

式中: P_{st} — mm 水柱 (静压)

Q —流量 (m^3/s)

三. 通风机的噪声与性能的关系:

已知: 通风机的

流量 \propto (尺寸比) $^3 \times$ (转速比)

静压 \propto (尺寸比) $^2 \times$ (转速比) 2

所需功率 \propto (尺寸比) $^5 \times$ (转速比) 3

噪音法如下:

$$SPL_2 = SPL_1 + 70\lg \frac{D_2}{D_1} + 50\lg \frac{n_2}{n_1}$$

$$* Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^3 \frac{n_2}{n_1}$$

$$* \Delta P_2 = \Delta P_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$* N_2 = N_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^5 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \frac{\rho_2}{\rho_1}$$

$$SPL_2 = SPL_1 + 20 \lg \frac{D_2}{D_1} + 25 \lg \frac{\Delta P_2}{\Delta P_1}$$

$$* Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2}$$

$$* n_2 = n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right) \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2}$$

$$* N_2 = N_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^2 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{3/2} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2}$$

$$SPL_2 = SPL_1 - 80 \lg \frac{D_2}{D_1} + 50 \lg \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$* n_2 = n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^3 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)$$

$$* \Delta P_2 = \Delta P_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)$$

$$* N_2 = N_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^3 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)$$

$$SPL_2 = SPL_1 - 13.31 \lg \frac{D_2}{D_1} + 16.61 \lg \frac{N_2}{N_1}$$

$$* Q_2 = Q_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^{4/3} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/3}$$

$$* \Delta P_2 = \Delta P_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{4/3} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{2/3} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/3}$$

$$* n_2 = n_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{5/3} \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^{1/3} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/3}$$

$$SPL_2 = SPL_1 + 10 \lg \frac{Q_2}{Q_1} + 20 \lg \frac{P_2}{P_1}$$

$$* D_2 = D_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^{1/3} \left(\frac{\Delta P_1}{\Delta P_2} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right)^{1/4}$$

$$* n_2 = n_1 \left(\frac{Q_1}{Q_2} \right)^{1/2} \left(\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} \right)^{3/4} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{3/4}$$

$$* N_2 = N_1 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right) \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$$

三. 通风机噪音频谱

通风机的噪音频谱是指通风机的声压级和声功率随频率（倍频带）的变化关系：

为了获得通风机的噪声级和频谱特性，应用现场测量的方法；也可以用下式求得通风机的声功率级 PWL ：

$$PWL = PWL_s + 10 \lg(QP_s^2) \quad (dB)$$

各频带的功率级 PWL_i 为： $PWL_i = PWL + \Delta PWL_i \quad (dB)$

ΔPWL_i 是各频带声功率级的修正值。

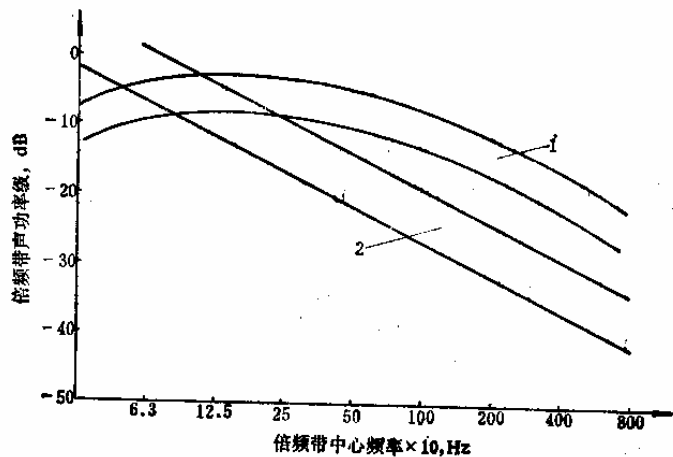


图 7-8 通风机 PWL 频谱

(1: 轴流通风机, 1: 离心通风机)

四. 通风机的噪音特性

(一) 后弯叶片离心通风机的噪音特性

后弯叶道流线长，气流均匀，不易产生湍流或湍流噪音比较少。

以流量系数 $\bar{\varphi}$ 为横轴，声压级 SPL 和比声功率级 PWL_s 为纵轴的变化曲线，称通风机的噪音特性。

后弯叶轮，在最高效率点噪音小，随风量加大，噪音大。同时也给出最高效率点的实测频率特性。

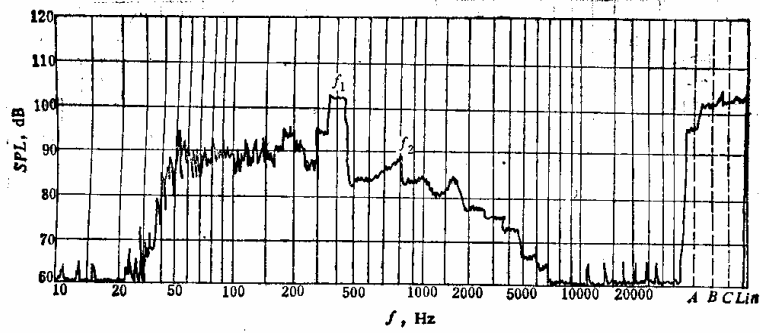
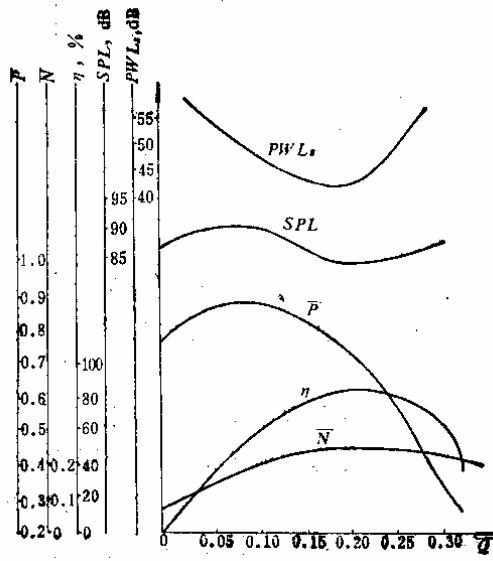
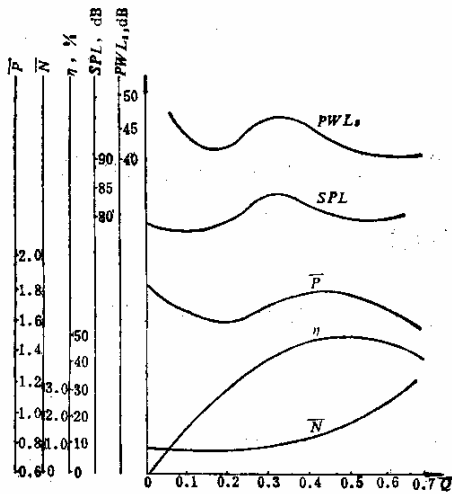


图 7-9 后弯叶片离心通风机的噪音特性

(二) 前多翼叶轮

SPL 在 $\bar{\varphi}$ 的各点最高, 在最高效率点 SPL 、 PWL_s 几何不变。

由于前弯叶片所以噪音较大。



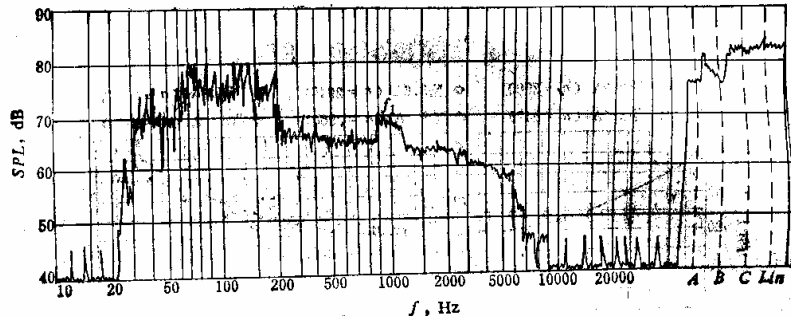


图 7-10 前多翼叶轮离心通风机的噪音特性

(三) 轴流通风机
噪音大

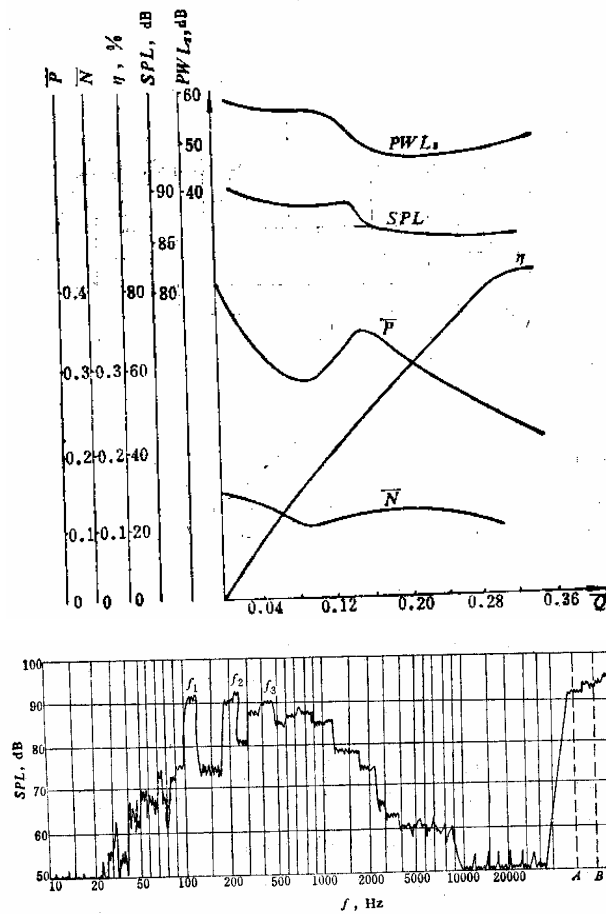


图 7-11 轴流通风机的噪音特性

§ 3 通风机噪音声控制

一. 通风机噪声减噪量的确定

(一) 通风机基本频率的确定

$$f_c = \frac{nZ}{60}$$

(二) 各处声功率级 PWL 的决定

1. 进(抽)气口的 PWL_1 值:

$$PWL_1 = SPL + 10 \lg 2\pi r^2 \quad (dB)$$

SPL — 实测的声压级 (dB)

r — 实测点至进气口中心的距离

2. 机壳处 PWL_c

$$PWL_c = SPL + 10 \lg S \quad (dB)$$

S — 机壳表面积

SPL — 在 1 米处测得的声压级

3. 管道 PWL_D

$$PWL_D = SPL + 0 \lg S \quad (dB)$$

S — 通风机机筒截面积

SPL — 离风筒表面 1 米处测得的声压级

4. 电机 PWL_M

$$PWL_M = SPL + 10 \lg S$$

S — 电机的总表面积

(三) 通风机的总功率级 PWL

$$PWL = 10 \lg (10^{PWL_1/10} + 10^{PWL_2/10} + \dots + 10^{PWL_n/10}) \quad (dB)$$

(四) 确定各声源至接收器的衰减量

$$SPL = PWL - 10 \lg 2\pi r^2$$

(五) 接收器总的声压级 $SPL_{\text{总}}$

$$SPL_{\text{总}} = 10 \lg (10^{SPL_1/10} + 10^{SPL_2/10} + \dots + 10^{SPL_n/10}) \quad (dB)$$

(六) 确定各声源的减噪量

$$\text{必须减噪量} = SPL_{\text{总}} - \text{允许值}$$

$$SPL_{\text{接}} - \text{必须减噪量} - \lg n = \text{各声源减噪量}$$

二. 通风机噪音的控制

1. 设计良好的通风机, 防止或减少噪声源的产生, 应尽量减少气流冲击, 附面层距离避免尖锐突出和急剧转弯。合理选择通风机的转速大小 (因为噪声为音速的 6 次方), 注意叶轮和 (缺) 的间隙。

通风机有较大的 (缺) 室可以减少噪音, 进口和软盘做成曲面状。

2. 吸音器

一般很少用膨胀式和共振式。

一般利用吸声式消声器（图 7-12）和吸声板（图 7-13）。

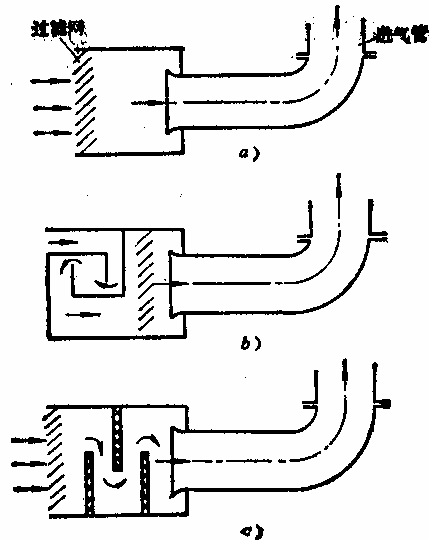


图 7-12 通风机进口装置的消音器

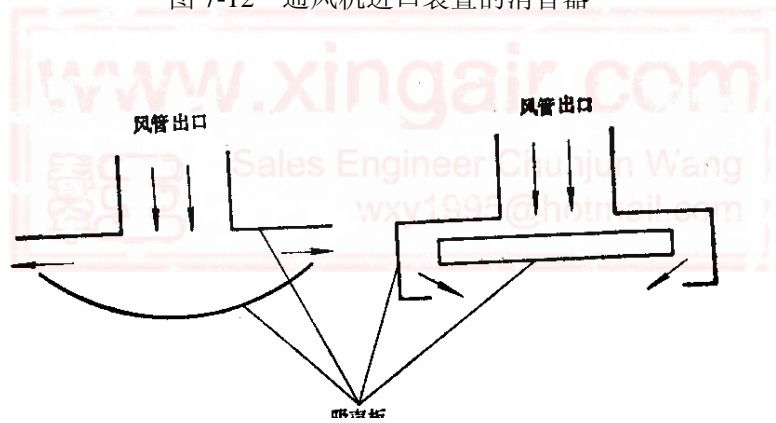


图 7-13 风管出口的吸音板