

低频噪声干扰的评价标准和控制技术

吕如榆 高彦良

(中国科学院声学研究所)

1987年10月16日收到

摘要 本文对16—31.5Hz范围的低频噪声对居民的干扰作了调查,对噪声源进行了测试和分析。在控制前,对措施作了分析;在施工过程中,逐项进行了检验。在竣工后作了全面测试。结果表明,在按影响严重性区分的居民区I、II和III中,25Hz峰值声压级分别从原有的95dB降至74dB, 91dB降至66dB, 83dB降至65dB,达到满意的效果。

我们结合措施设计,对低频隔声作了理论估算并与实验作了比较,证明在劲度控制区利用有效劲度,理论和实验符合很好。还从对居民的调查中,提出一个低频声干扰的初步建议。

INFLUENCE OF LOW FREQUENCY NOISE AND ITS CONTROL

LÜ RUYU GAO YANLIANG

(Institute of Acoustics, Academia Sinica)

Received October 16, 1987

Abstract The influence of low frequency noise within 16 to 31.5 Hz has been surveyed and measured. The properties of the noise source are analysed before the control and in the course of the control. Final test shows that the SPL in the resident area I, II and III classified according to the seriousness of the interference may be reduced from 95 dB to 74 dB, 91 dB to 66 dB, and 83 dB to 65 dB respectively.

We calculated the low frequency sound transmission loss of wall and compared them with the experiments. If the effective stiffness we proposed is used the experiments are well in accordance with the calculation. In addition, we propose some criteria for low frequency noise interference according to our survey results.

一、引 言

近十几年来,低频噪声对人的干扰和影响,已引起广泛重视^[1]。随着功率加大、家用电气设备增多,问题还会趋于严重化。对低频声影响的评价,国外已作了一些工作并提出了初步建议^[1],但对低频噪声的控制,只发表过个别实例^[2],未见有对低频声控制的系统实验和研究。

我们结合北京某厂的低频风机噪声(16Hz—31.5Hz),就低频声对居民区的影响和降低低频声的技术,作了系统的调查、测试和分析。对于噪声干扰最严重的两个居民区(图1中所示的居民区I和II),在采取降噪措施后,25Hz峰值声压级已分别由95dB减至74dB,91dB减至66dB,达到了满意效果。在采取降噪措施前后,我们也对低频声的控制原理作了一些实验

和理论分析。

二、噪声调查和检测

噪声主要由空调系统的风机产生。它对厂区附近的居民引起严重干扰，居民曾联名向有关领导和环保单位提出控告信达五十余封(共计 800 人次)。从受噪声影响的居民分布看，涉及最远干扰距离达 300m，如图 1 所示。在图 1 中，按反应强烈程度把居民区划分成 I、II、III 三类，其中 I、II 类居民的反应很强烈。

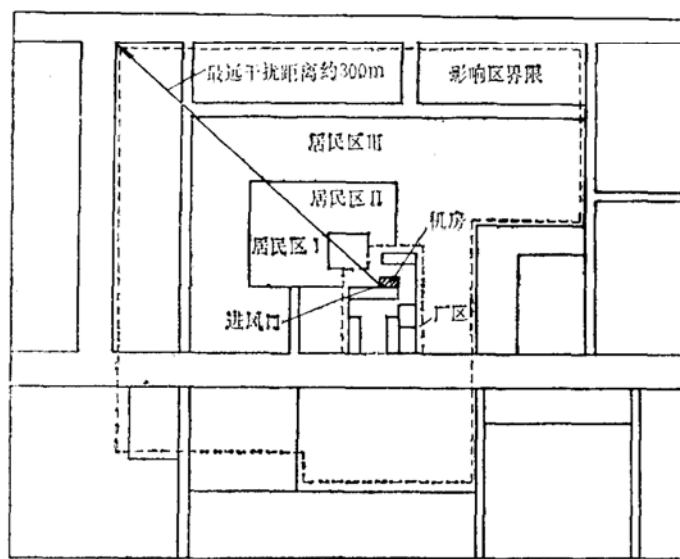


图 1 低频噪声对居民区影响的示意图

---噪声影响区域；I-靠近进风口居民区；II-受严重影响居民区；III-受影响居民区

有关环保单位曾进行过检测，测出 A 声级在 I 区和 II 区分别是 54dB 和 45dB，认为符合一般居民区的噪声标准。因此，由环保单位出面曾通过居委会向居民作了解释。但居民抗议的强烈程度有增无减，甚至发展到个别居民对工厂采取敌对行动。

经过我们对附近居民区 500 人次的调查，证实居民 100% 对风机噪声有“反感”，其中“强烈反感”或“无法忍受”者达 76%（如图 5 所示）。测量的结果表明， A 声级虽然不高，但线性声压级很高，按居民区 I、II、III 的顺序，线性声压级分别是 95dB，92dB，84dB。这证明噪声谱中包含着很强的低频成份。调查中发现，居民区 I、II 内住家的门、壁，窗框和桌面均有振动，窗框上的玻璃和窗纸也“咯咯”作响。

噪声谱的分析证明，16—40Hz 有很强的噪声，峰值在 25Hz。图 2 示出了在风机房、进风口附近、居民区 I、II 和 III 的 $1/3$ oct 噪声谱。从图 2 可以看出，居民区的噪声谱和机房或进风口的噪声谱形状基本是相似的，只是由于居民区高频受到较大衰减，所以低频的峰就显得更突出了。

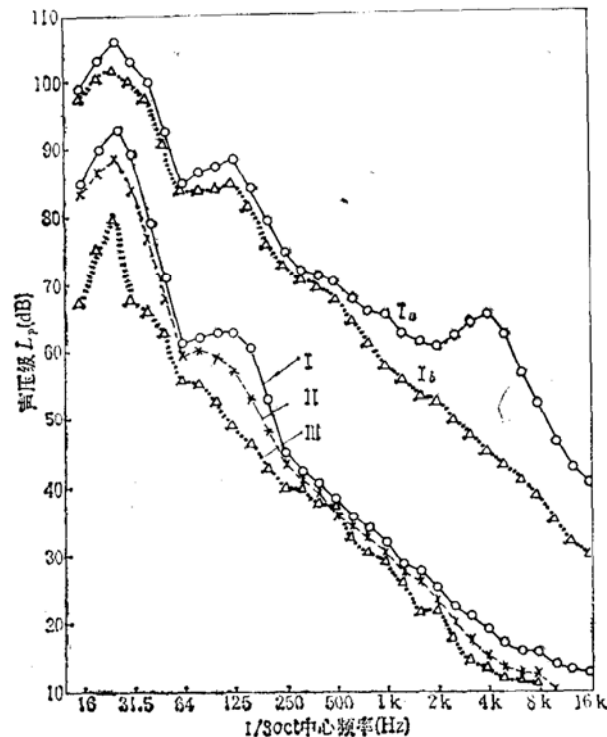


图2 机房进风口附近和居民区 I, II 和 III 的噪声谱

曲线	位 置	A 级 (dB)	线性级
I _a	机房	91	109
I _b	进风口	88	104
I	居民区 I	54	95
II	居民区 II	45	91
III	居民区 III	42	83

三、低频噪声产生原因的分析

既然噪声谱中都具有很强的低频成分,那么,低频声怎样传到居民区造成干扰呢?存在着几种可能性:(1)风管中某处出现共振现象;(2)低频声激发出振动并通过地面或固体结构传递,再由居民区的壁面辐射噪声;(3)低频声通过空气声形式传播过去。

我们沿着送风管道各段进行了测量,证明并不存在声共振的现象,如表1所示。从表1可以看出,沿着通风管道的低频声是逐渐下降的。

表1 机房和各段通风管内测出的线性声级和 25Hz 1/3oct 声级 (dB)

各段通风管	机 房	一 楼	二 楼	三 楼
线性声级 (dB)	109	101	94	84
25Hz 低频声级 (dB)	106	98	90	82

其次,需要鉴别低频声是否以固体声的形式传播。我们经过调查,发现厂方已在得知居民

的反映后,根据有关单位的意见在机房四周离墙 0.3m 处挖了宽 0.5m,深 2m 的隔振沟,但隔振沟对降低低频声毫无效果。我们还在居民区 I 和 II 的住房内壁,测量了振动加速度(已折合成以 g 为单位),结果列于表 2。测量表明,壁面的振动并不大,特别在低频部分并不出现 25Hz 的峰,峰值在 500Hz 左右。这证明不是振动传递到壁面并由壁面辐射噪声,相反,振动是由于强烈的低频空气声激发起壁面的固有振动。

表 2 居民区壁面振动的测量值(以 g 为单位)

频率(Hz)	16	25	31.5	64	125	250	500	2K	4K
居民区 I	0.015	0.029	0.035	0.061	0.080	0.093	0.150	0.090	0.081
居民区 II	0.012	0.021	0.030	0.059	0.071	0.080	0.100	0.072	0.069

为了肯定不是振动辐射噪声,还在居民区 II 的一户住房中做了这样的实验:把写字桌的四个桌腿垫上或不垫 10cm 泡沫塑料,测量桌面的振动级。结果表明,桌腿直接着地的桌面振动要比用弹性垫时低约 2—4dB,这进一步证明低频噪声是以空气声的形式直接传播产生的。

四、降噪措施的考虑和降噪效果

风机的低频噪声主要是从进风口传出的。因为原设计的进风口壁面是 2mm 的薄铁皮,只加了几片泡沫塑料作为消声器,直接开向居民区。进风口附近的线性声级达 104dB,与机房只差 5dB。排风口不是主要噪声源,因为从机房进风后还经过送风室的过滤、净化,再通过大楼内弯曲送风管道,已有很大衰减(见表 1 上数据)。因此,控制的关键是降低楼外进风口辐射出来的低频噪声。

降低低频声的措施,目前还没有现成的资料。曾有人利用旁支共振器降低低频噪声^[3],但共振器尺寸需要相当于三层楼的楼房,显见不现实;曾对隔声罩低频隔声效果,做过一些研究是可以借鉴的^[4,5],但隔声罩用的是薄壁结构,对目前条件还不能完全适用。因此在查阅前人工作的基础上,对低频噪声降低作了一些理论分析,提出了如下的控制方案。

首先,我们对进风口和进风管道重新作了声学设计,利用一砖半的砖墙结构加厚管壁的隔声。因为低频隔声将受劲度控制,而劲度一般比例于杨氏弹性模量的一次方和厚度的三次方[如(4)式所示],因此,增加厚度,可望低频隔声提高到 30dB 左右。

其次,把进风管的有效长度延长至 25m,并引伸到屋顶向上开口。管道中加了盒式消音箱和喇叭状引风口,根据我们估算,每个消声段约可达消声量 6—10dB(见下节)。这样,再加上高流阻吸声材料(低频时 α 可达 10% 左右)作为保险系数,可望进风口处低频噪声能衰减 25—30dB。

我们根据上述考虑,初步拟了降噪方案。由中国科学院设计院具体施工设计。施工过程中,我们还作了几次测量和检验,证明我们的设想是正确的。工程竣工后,进行了全面测量,达到预计效果。以前受低频声干扰的居民已 100% 感到满意(见图 5)。

图 3 是治理前后分别在居民区 I、II、III 测出的 1/3oct 声压级。图中曲线是在午夜环境

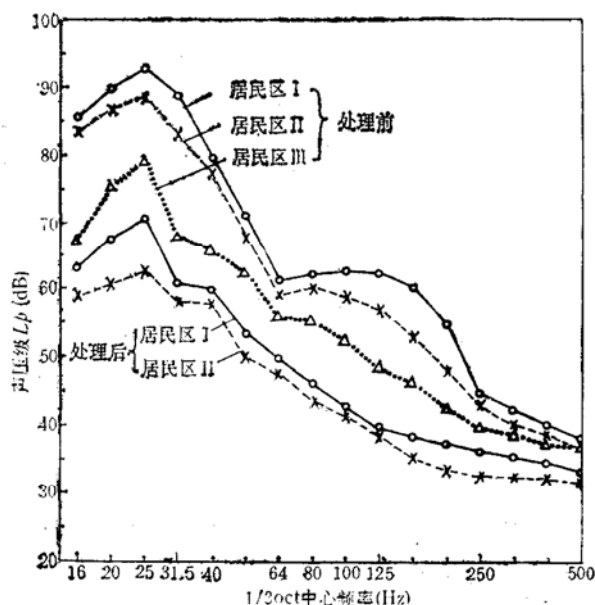


图3 治理前后分别在居民区 I、II、III、测量的噪声谱。

噪声最低时测出的。从图3可以看出, 16Hz到31.5Hz已有明显下降, 25Hz的峰值声压级下降达23—25dB, 即在午夜, 居民区 I、II 的噪声级已在低频听阈以下(见图6A)。当然居民区 III 的噪声级就更低了。

五、降噪措施的理论考虑与实验比较

降噪措施中主要是进风道的隔声。我们选用一砖半 38cm 砖墙作为进风道的管壁, 它在低频的隔声可作如下估算:

设隔墙无限大, 边界条件和侧向传声可不予考虑; 声波以法向入射到无限大墙上。如果隔墙单位面积质量是 $m(\text{kg}/\text{m}^2)$, 单位面积劲度是 $S(\text{N}/\text{m}^3)$, 单位面积力阻是 $R_m(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 则透射系数 τ 为

$$\tau = \left(\frac{2\rho c}{Z_m + 2\rho c} \right)^2 \quad (1)$$

式中 ρc 是空气特性阻抗, Z_m 是墙的声阻抗率, 当入射声波的角频率为 ω 时, $Z_m = R_m + j(\omega m - S/\omega)$, 由此可导出墙的隔声量 R 为*

$$R = 10 \lg 1/\tau = 10 \lg \left[\left(1 + \frac{R_m}{2\rho c} \right)^2 + \left(\frac{\omega m - S/\omega}{2\rho c} \right)^2 \right] \quad (2)$$

墙的共振频率 ν_0 是 $(1/2\pi)\sqrt{S/\omega}$ 。当 $\nu \ll \nu_0$ 时,

$$R = 20 \lg (S/\omega) - 58(\text{dB}) \quad (3)$$

低频区属于劲度控制区, 劲度增加一倍或频率降低 1/2, 可望隔声量增加 6dB。

在墙的共振频率以下, 单位面积劲度 S 近似可写为

* 此式与文献[4]有别, 因所设条件不同。

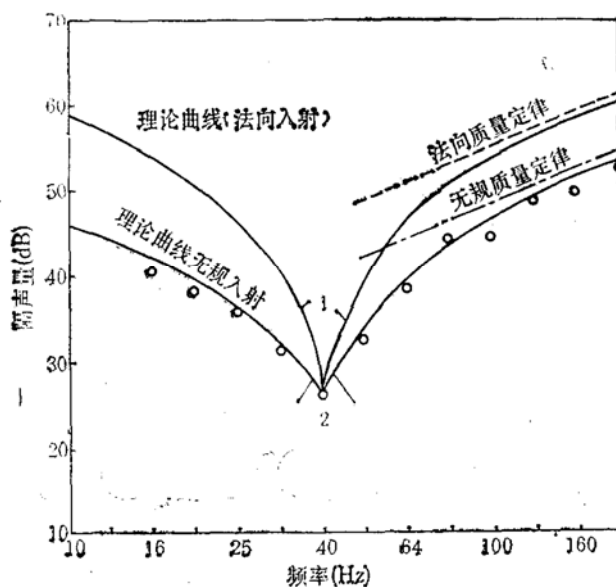


图4 低频区砖墙的理论 and 实验隔声量

$$S = DEt^3 / (1 - \sigma^2) \quad (4)$$

式中 E 是墙的杨氏弹性模量 (N/m^2); t 是墙的厚度 (m); σ 是泊松比. D 是实验常数, 取决于边界尺寸和边缘接合条件, 因此 S 的数值只能由实验来确定.

由上式可见, 劲度 S 除了与材料的弹性模量 E 成正比外, 还正比于墙厚度的三次方, 因此增加墙的厚度 t , 有可能提高低频的隔声量.

图4的曲线1是根据实测的共振频率(40Hz)由墙的面密度按(2)式算出的理论曲线.(2)式是在法向入射下导出的, 但实际条件是无规入射, 所以测量值与理论曲线偏离较大. 如果我们把面密度折合成无规入射的有效面密度^[2], 即取 $m_e = m/2$, 并且相应地定义无规入射的有效劲度 S_e 为

$$S_e = S_0 (\omega / \omega_0)^{1/2} \quad (5)$$

式中 S_0 是共振时的有效劲度, 那么, 无规入射理论隔声量对频率的关系就如图4中曲线2所示. 曲线2所用的各参量如下: $m_e = 3.60 \times 10^3 \text{ kg/m}^2$; $S_0 = 2.27 \times 10^7 \text{ N/m}^3$; $R_m = 1.71 \times 10^4 \text{ N.s/m}^3$. 图上的“。”是实验点. 可以看出, 根据 m_e 和 K_e 绘出的理论曲线与实测数据符合得很好. 在25Hz的低频, 隔声量可达36dB.

其次, 现在我们把进风管的有效长度增加到25m, 其中有两类消声设施: 一类是盒式消声箱; 一类是喇叭形变截面消声器.

对盒式斜向开口的消声箱, Wells^[6] 曾做过系统的实验, 并导出了半经验公式. 但 Wells 的工作主要是对125Hz以上的频率, 不过从他的实验数据看, 在低频部分逐渐趋向于与频率无关, 而且他得出的经验公式也与频率无关:

$$\text{T.L.} = -10 \lg \left[S \left(\frac{\cos \phi}{2\pi q^2} + \frac{1 - \bar{\alpha}}{\alpha} \right) \right] \quad (6)$$

式中, S 是开口截面积 (m^2); q 是两开口的斜向距离; ϕ 是匣高与斜向的夹角; $\bar{\alpha}$ 为平均吸声系数而 α 等于盒内总吸声量 (m^2). 为了适应低频情况, 我们把与吸声有关的项作为保险项略

去,并加上由实验确定的常数修正项,则可得

$$T.L = 10 \lg \left[\frac{1}{S} \left(\frac{2\pi q^2}{\cos \phi} \right) \right] - 10 \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

利用实际参数: $S = 0.8\text{m}^2$; $q^2 = 3.6\text{m}^2$; $\cos \phi = 0.8$ 代入,得 $TL = 11\text{dB}$. 表 3 上列出了三段消声箱插入损失的值,考虑到传输损失和插入损失的差别以及吸收的影响,(7)式基本适用于低频消声箱消声量的估算.

表 3 匣式斜向开口消声箱是插入损失 (dB)

频率 (Hz)	16	20	25	31.5	40	50	64	80
第一段	9.0	9.5	9.0	9.5	10.0	10.5	11.0	12.0
第二段	8.5	9.0	9.5	10.0	9.5	9.0	10.0	11.0
第三段	9.0	8.5	8.5	9.5	9.0	10.0	10.0	12.0

对喇叭式变截面的消声效果,我们作了如下估算:设圆锥形喇叭喉部等效直径是 a ,出口部等效直径是 b ,长为 l ,则在喇叭截止频率以下时传输损失 $T.L$ 是^[7]

$$T.L = 10 \lg \left[1 + \left(\frac{(b-a)\lambda}{2\pi dl} \right)^2 \right] \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

把实际开口尺寸 $a = 0.6\text{m}$, $b = 3\text{m}$ $l = 1\text{m}$ 代入(8)式,算出的理论值列于表 4 上,表 4 最后一行是相应频率的实测数据.考虑到测量值是插入损失并略去了吸收项这两点,可以认为(8)式的估算对工程设计是合适的.

经过上述消声装置,进风口低频的线性声级已降到 72dB.

表 4 喇叭式变截面引风口在截止频率以下的消声量 (dB)

消 声 量 (dB)	频 率 (Hz)					
	16	20	25	31.5	40	50
理论值 (dB)	9.2	7.5	6.0	4.6	3.5	2.4
实验值 (dB)	11.0	9.0	8.0	6.0	4.5	3.0

六、居民对噪声治理前后的反应和低频干扰的评价问题

我们对曾反应有噪声干扰的居民区中作了 500 人次的调查.调查时只询问三种情况,即指明对某厂通风机噪声:①无干涉;②有干扰;③噪声大得无法忍受.对调查居民中有干扰或无法忍受的两种统计百分数绘在图 5 上.图 5 是以居民区 II 的线性声级与干扰百分率绘出的.从图上可以看出,处理前在调查的居民中 100% 认为“有干扰”,其中有 76% 表示“无法忍受”.处理后,已达到 100% 反应“无干扰”.在控制过程的中间阶段,作过三次调查,这样,图 5 的曲线大致可以反应出居民对低频声干扰的情况.

D. J. Johnsou 曾提出过一个低频声干扰的评价标准^[1],示于图 6.图 6 列上了处理前居民区 I、II、III 低频部分的声谱.可见在处理前居民区 I、II 均超过了 Johnsou 建议的干扰限;居民区 III 也处在低频声的听阈区域以内.为清楚起见,在图 7 上把图 6 上频率范围在 16—50Hz 内的曲线加以放大,并列上了处理后居民区 I 和 II 的频谱.

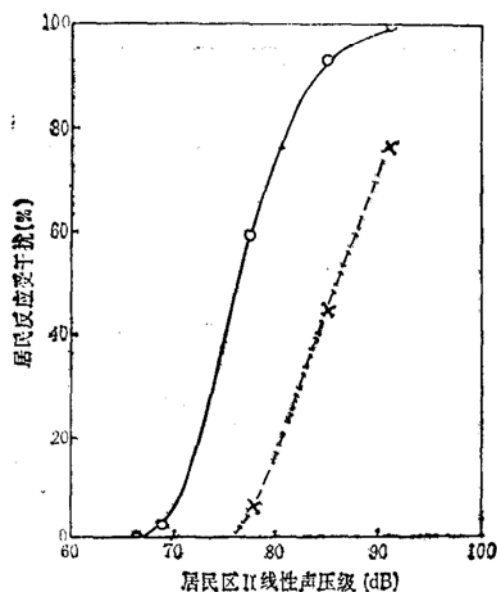


图5 居民对低频声主观反应的统计百分率对居民区 II 的线性声压级曲线。

○—○—○ 受噪声干扰百分率；×---×---× 对噪声无法忍受百分率

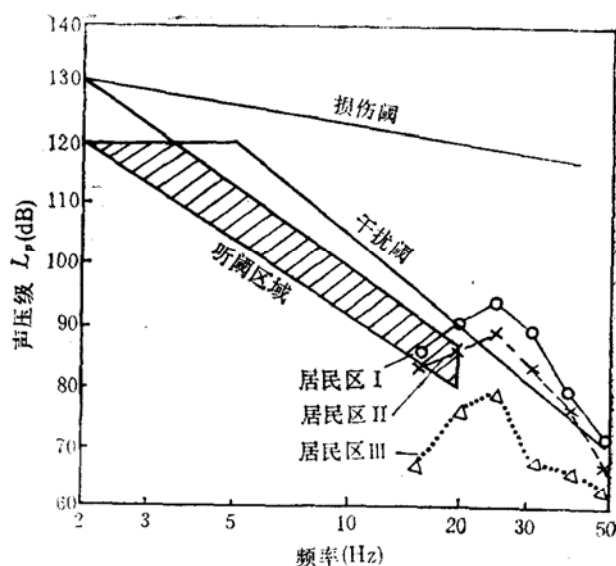


图6 Johnson 建议的低频声评价标准，并列出了处理前居民区 I、II、III 中的 1/3oct 声谱（如图中曲线 I_b 、 II_b 和 III_b 所示）

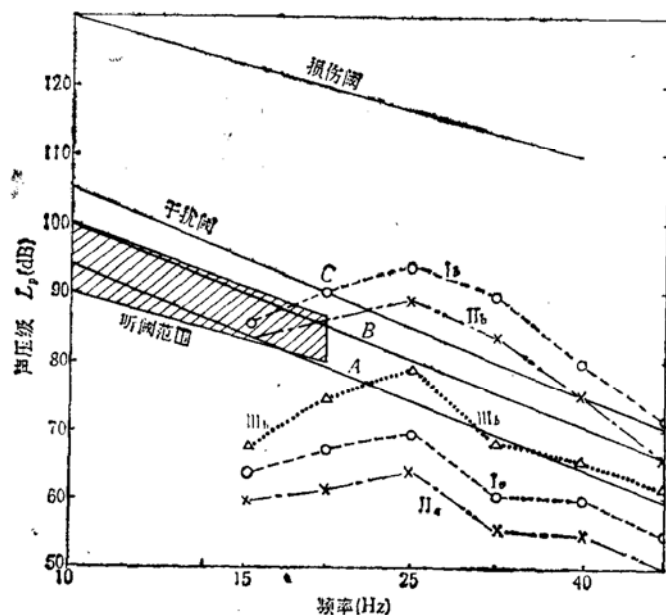


图7 图6中频率范围在10—50Hz的放大图 这图上也列出了处理后的相应噪声谱（如上图 I_a 和 II_a 所示）并用直线 A、B、C 表示我们建议的低频声评价标准。

从图7上示出的频谱，结合图5上调查的结果，根据我国情况可对 Johnson 提出的评价标准作一些修正。把 Johnson 的评价定为 C，把接近低频听阈限作为标准 A，中间作为标准 B，如图7直线所示。根据我们调查，可以提出表5所示的评价标准所适用的区域。

表 5 对不同居民区低频声干扰的建议标准

级 别 \ 时 间	白 天	夜 间
A	疗养区、高级宾馆	城市居民区
B	城市居民区	工业区中的居民区
C	工业区	

这项工作,是在马大猷教授直接鼓励和指导下进行的,其中对固体声的鉴别和低频声的评价是由马教授提出的,我们特表感谢。工程的建筑设计由中国科学院建筑设计院曹一民总工程师等负责;调查和测试过程中穆秀敏和杨金华等同志协助进行,我们一并表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Broner, N. J., "The Effect of Low Frequency Noise on People—a Review", *J. Sound and Vib.*, 9(1978), 483—500.
- [2] Beranek, L. L., *et al.*, "Noise and Vibration Control", (McGraw-Hill, New York, 1971).
- [3] Beranek, L. L., Labate, S. and Ingard, K. U., "Noise Control for NACA Supersonic Wind Tunnel", *J. Acoust. Soc. Am.*, 27(1955), 85—98.
- [4] Jackson, R. S., "The Performance of Acoustic Hoods at Low Frequency", *Acustica*, 12(1962), 139—152; "Some Aspects of the Performance of Acoustic Hoods", *J. Sound and Vib.*, 3(1966), 82—94.
- [5] 吕如榆, "谈谈隔声罩低频隔声性能的改进", *振动和噪声控制*, 5(1985), 43—47.
- [6] Wells, R. J., "Acoustical Plenum Chambers", *Noise Control*, 4(1958), 9—15.
- [7] Morse, P. M., "振动与声"(南京大学编译组译,科学出版社,1974).