

风机噪声控制技术

智乃刚 萧滨诗 编著



机械工业出版社

本书从改进风机结构参数和控制传播途径两方面着手，采用大量的图、表、例题和应用实例，综述了风机噪声控制技术，介绍了风机噪声控制的基本知识，分别叙述了风机空气动力性噪声控制、吸声降噪、消声器、消声箱和隔振阻尼等控制措施原理与设计程序。

本书以实践经验为基础，同时吸取了国内外先进技术，反映了当前本学科的基本状况，可供从事风机制造和使用、劳动保护、环境保护等部门的有关专业人员参考，也可作为风机噪声控制短训班的教材。

风机噪声控制技术

智乃刚 萧滨诗 编著

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $10^{1/4}$ ·字数 267 千字

1985 年 9 月北京第一版·1985 年 9 月北京第一次印刷

印数 0,001—6,900·定价 3.00 元

*

统一书号: 15033·6116

序 言

风机是一种通用机器，产量大、用途广、噪声高。目前已成为污染城市环境的主要噪声源之一。因此，研究风机噪声的产生、传播和控制，已被国家列为主要的研究课题。

本书主要从改进产品结构和控制传播途径两方面着手，介绍风机噪声达到有关允许标准的途径和方法。在改进产品结构方面，着重从声源上考虑降低措施。本书总结分析了国内外近二十多年来降低风机噪声的研究成果，提供了低噪声风机的设计原理。在控制传播途径方面，着重介绍了吸声降噪、消声器、消声箱以及隔振阻尼等控制设备的原理和设计程序。同时，对风机噪声的基础知识、测量技术和计算方法等也作了简要介绍。

本书以实践经验为基础，同时吸取了国内外先进技术，反映了当前本学科的基本状况，可供从事风机制造和使用、劳动保护、环境保护等部门的有关专业人员参考，也可作为“风机噪声控制短训班”的教材。

本书在编写过程中，得到东北工学院聂能光教授的多方指导，在此致以谢意。

由于时间紧促，又缺乏经验，书中肯定有不当之处，希望读者批评指正。

作者

一九八三年十月

目 录

序言

第一章 风机噪声的基本概念	1
第一节 声波的产生	1
第二节 风机噪声的主要物理量	2
一、声音的频率、波长和声速	2
二、声压、声强、声功率	4
三、声压级、声强级和声功率级	4
四、风机噪声频谱特性	6
第三节 声压级的计算	7
一、噪声级与声功率级的相加	7
二、噪声级的相减	9
三、平均噪声级	11
四、 L_A 的近似算法	12
第四节 风机噪声源的部位和指向性	13
一、风机噪声源的部位	13
二、噪声源的指向性	14
第二章 风机噪声的评价、危害与标准	18
第一节 人耳的听觉特性	18
一、音调	18
二、听觉阈	18
三、最小可觉察变化	19
四、掩蔽	20
第二节 响度和响度级	20
第三节 A 声级和比 A 声级	27
一、A 声级	27
二、比 A 声级	29
第四节 声功率级和比声功率级	30
一、声功率级	30

二、比 A 声功率级	33
第五节 语言干扰级与噪声评价数	33
一、语言干扰级	33
二、噪声评价数	34
第六节 风机噪声的危害	36
一、对城市环境的污染	36
二、对生产效率的影响	37
三、对人体健康的影响	37
第七节 噪声标准	38
一、工矿企业噪声卫生标准	38
二、环境噪声标准	39
三、建筑设计噪声标准	39
第八节 噪声限值	42
一、通风机噪声限值	42
二、立柜式空气调节机组用离心通风机噪声限值	44
三、电动机的噪声限值	44
第三章 风机噪声测量技术	46
第一节 常用的测量仪器和测量方法	46
一、声级计	46
二、频率分析器	57
三、自动记录仪	60
四、录音机	60
第二节 风机进出口噪声测量方法	60
一、仪器的选用	60
二、准备工作及仪器校准	61
三、测量安排及数据读取	61
四、进出口噪声测量内容	63
五、测量结果的整理	63
六、风机进口测点位置	63
七、风机出口测点位置	63
第三节 机壳和电动机噪声测量方法	66
一、通风机机壳和电动机噪声的测量	66

V

二、罗茨鼓风机、透平鼓风机和透平压缩机的噪声测量	67
第四节 其他噪声测量方法	69
一、管道法	69
二、标准声源法	71
第五节 测量偏差的修正方法	72
一、声压级偏差的计算	72
二、A 声级偏差值 ΔL_A	74
三、测量偏差 ΔL_p 与各参量的关系	75
四、结论	78
第四章 风机噪声的特性及预算方法	79
第一节 通风机噪声特性	79
一、通风机基本型式的分类	79
二、通风机噪声特性的测量	81
第二节 鼓风机噪声特性	89
一、鼓风机结构型式的分类与应用	89
二、鼓风机噪声特性	89
第三节 通风机噪声特性的预算方法	92
一、A 声级的预算	92
二、倍频带声压级的预算	94
第四节 风机噪声频谱特性分类法	96
第五章 风机的空气动力噪声	
第一节 风机的空气动力噪声分类及机理	99
第二节 风机旋转噪声的确定	103
第三节 风机涡流噪声的确定	107
第四节 风机的空气动力噪声特性	111
一、离心式风机的空气动力噪声特性	111
二、轴流式风机的空气动力噪声特性	113
第六章 降低风机空气动力噪声的方法	115
第一节 降低风机噪声的根本途径	115
一、合理地选择风机型式	115
二、合理地设计管路	116
第二节 合理地选择通流部分几何参数降低轴流式风机涡流噪声	119

第三节	合理地选择风机动叶和静叶的叶片数降低轴流式风机 旋转噪声	124
第四节	合理地选择动叶和静叶的轴向间隙降低轴流式风机旋 转噪声	129
第五节	采用倾斜整流器叶片降低轴流式风机旋转噪声	130
第六节	采用不相等叶片间距降低风机旋转噪声	133
第七节	采用叶片穿孔方法降低风机涡流噪声	135
一、	穿孔排数的影响	137
二、	穿孔面积的影响	137
三、	穿孔系数的影响	138
四、	穿孔直径的影响	138
五、	穿孔偏转角的影响	139
六、	叶片相对长度的影响	141
第八节	采用整流网格降低风机涡流噪声	141
第九节	改变蜗舌半径和蜗舌与叶轮间距离降低离心式风机噪声 ...	146
第十节	采用倾斜蜗舌或倾斜工作轮叶片降低离心式风机噪声	151
第十一节	采用旋转扩压器降低离心式风机噪声	155
第十二节	采用消声蜗壳降低离心式风机噪声	157
第十三节	采用共鸣器降低离心式风机的噪声	160
第七章	吸声降噪	163
第一节	常用的吸声材料	163
一、	吸声材料的主要物理量	163
二、	吸声材料的分类与应用	166
第二节	常用的吸声结构	173
一、	多孔材料背后留空腔	173
二、	薄膜、薄板共振吸声结构	173
三、	穿孔板的吸声结构	175
四、	微穿孔板的吸声结构	177
五、	空间吸声体	178
六、	吸声尖劈	180
第三节	吸声降噪机理及应用	183
一、	吸声降噪机理	183

二、吸声降噪应用	184
第四节 降噪措施及其安装结构	186
第五节 吸声降噪值的计算	187
一、吸声降噪值的理论计算	187
二、吸声降噪值与房间各参数的关系	190
三、几点看法	192
第八章 消声器	193
第一节 消声器的种类与机理	193
一、一般分类与应用	193
二、阻性消声器的分类与原理	194
三、抗性消声器分类与机理	210
四、微穿孔板消声器的分类与机理	220
五、阻抗复合消声器	225
第二节 消声器的鉴定与评价	226
一、系列消声器的鉴定	226
二、消声器的评价	227
第三节 消声器的设计	233
一、阻性方形消声器的设计	233
二、抗性消声器的设计	239
三、微穿孔板消声器的设计与应用	251
四、阻抗复合消声器的设计与结构形式	252
第四节 风机配套阻性消声器系列的选配与安装	252
一、消声器的选配方法	254
二、典型风机配套消声器系列产品的选配	256
三、消声器的安装技术	260
四、消声器安装结构示意图	262
第九章 消声箱	264
第一节 消声箱的机理与结构形式	264
一、消声箱的机理	264
二、消声箱的结构形式	264
第二节 隔声机理与基础实验	266
一、隔声的基本概念与原理	267
二、不同材料结构的隔声性能试验与应用	274

第三节 围护结构	281
一、单层围护结构的隔声性能	281
二、双层围护结构的隔声性能	283
三、等透射原则	283
第四节 消声箱的设计程序	235
一、隔声罩的设计	285
二、消声箱的设计	286
三、轻型组装式消声箱的设计	287
第十章 隔振阻尼与降噪	290
第一节 隔振机理	290
一、隔振与减振的区别	290
二、隔振系统与弹性材料的主要物理参数	291
第二节 常用隔振和减振材料	293
一、常用隔振材料	293
二、常用减振阻尼材料	294
第三节 隔振器	301
一、橡胶隔振器	301
二、弹簧隔振器	301
三、各种隔振器特点的比较	303
第四节 隔振与减振设计	306
一、弹性垫的设计	306
二、弹簧隔振器的设计	307
三、减振的设计	310
第五节 隔振降噪设计及其应用	311
一、隔振材料和隔振器	311
二、隔振材料与隔振器的安装	314
三、隔振沟的设计	315
四、隔振阻尼与降噪的关系	317
参考文献	318

第一章 风机噪声的基本概念

第一节 声波的产生

声音是由物体（固体、液体、气体）振动而产生的。一个物体来回运动或者振动时，都会扰动邻近的空气，使它随之来回运动。这种运动从一个质点传到另一个质点，交替形成密层和疏层，这样空气中就激起声波，在一定的距离内，当这种声波传到人的耳朵时，就产生了声音的感觉。

在日常生活中，物体振动产生的声音例子是很多的。例如谈话声，广播声；在田野、街道、工厂、矿山各种机械的运转声等。考虑一下我们听到的声音，就可以发现，尽管它们的具体形式多种多样，但共同的特点，声音的振源都来自于物体的振动。讲话声的根源来自于喉管内声带的振动；广播喇叭发声来源于纸盒或音膜的振动；机械的声音来源于机械部件运转的振动。由此可见，声音总是由振动着的物体发出的。我们把能够发出声音的物体叫做声源。

当然，声源不一定非固体不可，液体、气体同样会因振动而发声。例如，刮大风时，江河湖海中的水前浪推后浪，形成浪涛声，就是液体发声；各类通风机、鼓风机、压缩机排气放空时产生刺耳的声音，就是气体发声。

声源发出的声音，必须通过中间的介质才能传播出去。例如：喇叭发声，当外加信号使喇叭纸盒来回振动时，邻近的空气层被带动一起振动，然后带动较远空气层一起振动。这样，一层层空气就由近到远地先后开始振动，结果使物体的振动以一定的速度传播到空间去。当这种振动传入人们的耳朵时，作用在鼓膜上，就会带动鼓膜一起振动。鼓膜的振动通过听觉机构的“翻译”，就发出信号刺激听觉神经，从而产生声音的感觉。

特别需要指出：声音在空气中传播到四面八方时，空气层并不跟随声音一起传播出去，它只是在平衡位置附近来回振动。可见，声音的传播指的是物体振动的传播。即传播出去的是物质的振动而不是物质的本身。这说明声音是物质的一种运动形式，这种形式叫做波动。

媒质质点的机械振动由近及远的传播称为声波。适当的频率和强弱的声波传到入耳产生声音的感觉。

声源发出的声音，按照传播介质的不同，也可以把它区分为空气声、水声、固体声等类型。在噪声测量和噪声控制中，所研究的主要是空气声。所谓声音或声波指的就是空气声。

第二节 风机噪声的主要物理量

一、声音的频率、波长和声速

声音听起来有的低沉、有的尖锐，我们说它们的音调不同。发出低沉声的音调低，发出尖锐声的音调高。音调是声音的主观感觉特性。而音调的高低主要由声源振动的频率来决定。

频率这个概念在电和机械振动中是相同的。振动频率 f 等于每秒钟往复振动的次数，而每秒钟循环的次数就称为赫芝，记作 Hz。例如，常用的交流电的频率是 50 Hz，就是交流电的电压与电流在 1 秒钟内周期性地变化 50 次。

人耳不是对所有频率的声音都能听到。能够听到的声音频率范围通常是 20~20000 Hz，叫作可闻声。频率低于 20 Hz 的叫作次声；频率高于 20000 Hz 的叫作超声，它们作用到听觉器官后，不能引起声音的感觉，所以听不到。在降低工业噪声的领域内，人们主要关注的频率范围约为 63~16000 Hz。这是因为人耳的灵敏度在低于 63 Hz 和大于 16000 Hz 时，与它的最高灵敏度相比已经大大地减弱了。

波长 λ 是两个相邻波对应点之间的距离。声波行经一个波长的距离所需要的时间，就是周期 T ，对周期波来讲 $T = \frac{1}{f}$ 。波

长、频率和传播速度之间的关系是：

$$\lambda = \frac{C}{f} = CT \quad (\text{m}) \quad (1-1)$$

或 $C = f\lambda$

声音不仅在空气中可以传播，在水或钢铁、混凝土等固体中也可以传播。声音在介质（包括气体、液体、固体）中以一定的速度传播，这种传播速度叫声速，不同介质有不同的声速。

在任何介质中，声速大小只取决于介质的弹性，而与声源无关。一般情况下，在钢铁中声速约为5000m/s，水中约为1500m/s，橡胶中为40~50m/s。空气是最主要的一种介质，其弹性与温度有关，声速为：

$$C = 20.05\sqrt{T} \quad (1-2)$$

$$T = 273 + t$$

式中 T ——绝对温度(K)；

t ——摄氏温度(°C)。

当 $t < 30^\circ\text{C}$ 时，

$$C = 331.5 + 0.61t (\text{m/s})$$

通常在室温下，空气中的声速约为344m/s。声速与温度的关系见表1-1。

表1-1 声速与温度的关系

$t (^\circ\text{C})$	$C (\text{m/s})$	$t (^\circ\text{C})$	$C (\text{m/s})$	$t (^\circ\text{C})$	$C (\text{m/s})$
0	331.5	90	382	190	431
		100	387	200	436
10	337.6	110	392	210	441
20	344	120	397	220	445
30	349	130	402	230	449
40	354	140	407	240	454
50	360	150	412	250	459
60	365	160	417	260	462
70	371	170	422	270	467
80	376	180	426	280	471

二、声压、声强、声功率

声波引起空气质点的振动，使大气压力产生压强的波动，这种压强的波动称为声压，即单位面积的压强变化。所以声压的单位就是压强的单位为 Pa。在声波中我们经常研究的是在瞬时时间内声压的有效值，也就是随时间变化的均方根值称为有效声压值。

对于正弦波，有效声压等于瞬时声压的最大值除以 $\sqrt{2}$ ，通常所说声压，如未加说明，即指有效声压。

声强是在声波传播方向上，与该方向垂直的单位面积、单位时间通过的能量。通常用 I 表示，单位是 W/m^2 。

声压与声强有密切关系。在自由场中，对于平面波和球面波某处的声强，均与该处声压的平方成正比：

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 C_0} \quad (1-3)$$

式中 p ——有效声压 (Pa)；

ρ_0 ——空气密度 (kg/m^3)；

C_0 ——空气中声速，常温时 $\rho_0 C_0$ 为 $410 (N \cdot s/m^3)$ 。

声功率是指声源在单位时间内向外辐射出的总声能。单位为 W。声源的声功率或全部可听频率范围所辐射的功率以及在某有限频率范围所辐射的功率，都称为频带声功率。

三、声压级、声强级和声功率级

从听阈 ($2 \times 10^{-5} Pa$) 到痛阈 ($20 Pa$)，声压级的绝对值相差 100 万倍。因此用声压的绝对值来表示声音的强弱是不方便的。再者人对声音响度感觉是与声强的强度的对数成比例的。所以为了方便起见，引用了声压或能量比的对数来表示声音的大小，这就是声压级如同地震级按级计算一样。

声压级的单位是分贝 (dB)。分贝是一个相对单位，声压与基准声压之比，取以 10 为底的对数，再乘以 20，就是声压级的分贝数。即

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (1-4)$$

式中 L_p ——声压级(dB);

p ——声压 (Pa);

p_0 ——基准声压 $p_0 = 2 \times 10^{-5} (\text{Pa})$ 。

用同样的方法把声强 L_I 定义为:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1-5)$$

式中 L_I ——声强级(dB);

I ——声强(W/m^2);

I_0 ——基准声强, $I_0 = 10^{-12} (\text{W}/\text{m}^2)$ 。

在自由传播的平面波或球面波中, $I = \frac{p^2}{\rho_0 c_0}$, 所以声强级和声功率级的数值相等, 声功率级为:

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (1-6)$$

式中 L_w ——声功率级(dB);

W_0 ——基准声功率(W), $W_0 = 10^{-12} \text{W}$;

W ——声功率(W)。

为了直观起见, 在图1-1中给出了声压与声压级、声强与声强级、声功率与声功率级的关系。

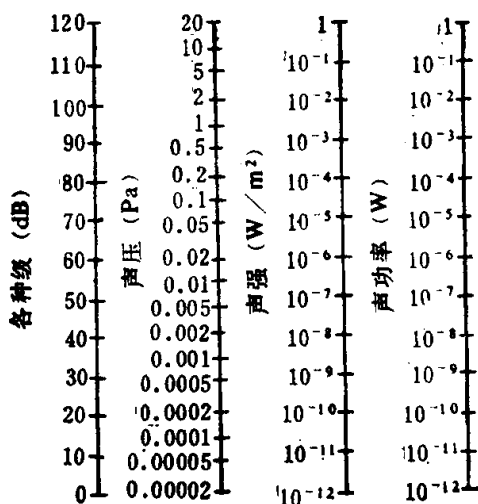


图1-1 级的换算图

四、风机噪声频谱特性

频谱、频率和声压合称风机噪声三要素。所谓频谱就是声压级或声功率级随着频率变化的图形。不同的风机参数，有着不同的频谱。其频率特性主要取决于风机的叶片数、转速和叶轮的直径。一般来说，当风机的圆周速度较小时，以旋转噪声为主，其相应的频谱有突出的峰值，其对应的频率称为基频。若基频声压级较高，还有二次谐波，三次谐波等。如一个离心通风机，若叶片数有十二个，转速为2900r/min，基频恰好落在以中心频率为500Hz的倍频带内。然而，当圆周速度较高时，则峰值不明显，其频谱呈宽频带，如轴流通风机等。

一般来说，按照习惯，风机噪声也可粗略分为三类：一是低频噪声，即频谱中的最高声压分布在350Hz以下；二是中频噪声，

表1-2 常遇到的一些声源噪声级 (A)

噪声源 (A) (dB)	$\frac{P}{P_0}$ (相对值)	P (Pa)	噪 声 源	主 观 感 觉
160	10^8	2×10^3	枪炮噪声射手附近航空发动机附近，电厂排气放空10米以内	震耳欲聋，需要戴耳罩和耳塞
140	10^7	2×10^2	大型鼓风机排气放空10米以内，柴油机试车，风动工具1米以内	难以忍受，需带耳塞和耳罩
120	10^6	2×10^1		
100	10^5	2×10^0	鼓风机房，罗茨鼓风机进口，织布车间	对面讲话听不清，需带耳塞
80	10^4	2×10^{-1}	各类风机房离机壳1米，地下车车箱内	特别吵闹，需大声讲话
60	10^3	2×10^{-2}	精密机床车间，公共汽车内	感到烦躁，讲话能听清
40	10^2	2×10^{-3}	微电机1米，小型电风扇，办公室内	较安静
20	10^1	2×10^{-4}	微语，郊外	安静
0	1	2×10^{-5}	播音室，消声室内	听阈，特别安静

注： $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{Pa}$

即频谱中最高声压级分布在350~1000Hz；三是高频噪声，即频谱中最高声压级分布在1000Hz以上。

然而，根据对几百个使用单位和五十余个风机制造厂的调查，以及噪声控制设备的设计需要，北京劳保所《风机噪声标准和控制》课题组，把风机噪声分成八类：特低频噪声、低频噪声、中频噪声、高频噪声、宽带噪声、低频宽带噪声、中频宽带噪声及高频宽带噪声。离心通风机以低频宽带和中频宽带噪声为主；离心鼓风机和压缩机以高频宽带为主；罗茨以低频宽带为主。频谱特性的详细定义以及国产不同类型风机的频谱特性，在第四章将详细予以叙述。

为了给大家一个直观的概念，并加以比较，将噪声级(A)所对应的声压相对值、声压绝对值，相应的噪声源及主观感觉列于表1-2。

第三节 声压级的计算

一、噪声级与声功率级的相加

噪声级是指各倍频带声压级经过A、B、C、D档计权后的总声压级，称为 L_A 、 L_B 、 L_C 、 L_D ，通常选用 L_A 作为评价噪声源的声压级。

在车间或机房中，往往安装数台机器设备，如果知道每一台机器的噪声级分别为 L_{A1} ， L_{A2} …… L_{An} ，可以利用下式求出 n 台机器产生的噪声级 L_{At} 是多少。

根据定义：

$$L_{Ai} = 10 \lg \left(\frac{p_i}{p_0} \right)^2 \quad (1-7)$$

那么可推导出：

$$\left(\frac{p_i}{p_0} \right)^2 = 10^{\frac{L_{Ai}}{10}} \quad (1-8)$$

因声波的能量可以相加，所以，总的A声级 L_{At} 可写为：

$$L_{At} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_{Ai}/10} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1-9)$$

同样, 可以导出 n 个 A 声功率级 L_{wi} 的相加表达式为:

$$L_{wt} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{L_{wi}/10} \right) \quad (\text{dB}) \quad (1-10)$$

〔例1-1〕 已知: 三台风机的 A 声压级分别为 $L_{A1} = 90\text{dB}$, $L_{A2} = 95\text{dB}$, $L_{A3} = 88\text{dB}$ 。

求: 总的 A 声级 L_{At} 是多少?

解: 按照公式 (1-9)

$$L_{At} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^3 10^{L_{Ai}/10} \right)$$

上式展开:

$$\begin{aligned} L_{At} &= 10 \lg (10^{90/10} + 10^{95/10} + 10^{88/10}) \\ &= 10 \lg (10^9 + 10^{9.5} + 10^{8.8}) \\ &= 10 \lg (4.88 \times 10^9) = 96.8(\text{dB}) \end{aligned}$$

〔例1-2〕 已知: 一台机器的三个倍频带声功率级 $L_{w1} = 100\text{dB}$, $L_{w2} = 103\text{dB}$, $L_{w3} = 106\text{dB}$ 。

求: 总的声功率级 L_{wt} 是多少?

解: 按照公式 (1-10)

$$\begin{aligned} L_{wt} &= 10 \lg \left(\sum_{i=1}^3 10^{L_{wi}/10} \right) \\ &= 10 \lg (10^{100/10} + 10^{103/10} + 10^{106/10}) \\ &= 10 \lg (10^{10} + 10^{10.3} + 10^{10.6}) \\ &= 108.4(\text{dB}) \end{aligned}$$

声压级和声功率级可以按照公式 (1-9) 和 (1-10) 进行运算, 也可以按照图 1-2 差值法进行演算, 求出二个或二个以上声源的总声压级 L_{At} 或总声功率级 L_{wt} 。

〔例1-3〕 已知: 有一个

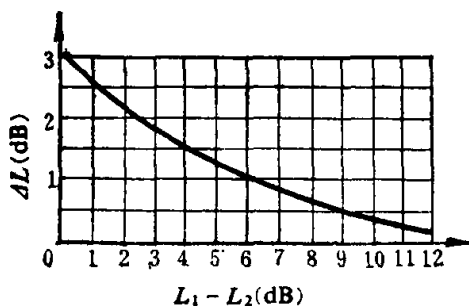


图1-2 分贝差的增值图