



注册环保工程师专业考试  
应试指导丛书

# 物理污染控制工程 技术与实践

孙颖 许云峰 等编

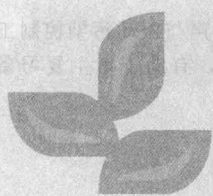


- 紧扣考试大纲
- 复习应考必备
- 权威专家精心编写

X12



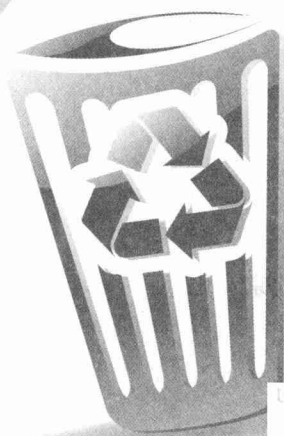
化学工业出版社



注册环保工程师专业考试  
应试指导丛书

# 物理污染控制工程 技术与实践

孙颖 许云峰 等编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书按照注册环保工程师执业资格考试专业考试大纲要求编写,包括噪声与振动污染控制工程基础、噪声与振动污染控制工程实践和电磁污染控制工程基础三章内容,有助于考生复习备考,提高应试和解决实际问题的能力。

#### 图书在版编目(CIP)数据

物理污染控制工程技术与实践/孙颖,许云峰等编. —北京:化学工业出版社,2009. 2

(注册环保工程师专业考试应试指导丛书)

ISBN 978-7-122-04566-9

I. 物… II. ①孙…②许… III. 环境物理学-工程技术人员-资格考试-自学参考资料 IV. X12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 010077 号

---

责任编辑:徐娟

装帧设计:王晓宇

责任校对:王素芹

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张9¼ 字数241千字 2009年4月北京第1版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:30.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

---

国家对从事环境工程领域技术业务的技术人员实行执业资格制度，相应实行了全国统一大纲、统一命题的注册环保工程师执业资格考试制度。整个考试由基础考试和专业考试两部分组成。专业考试共分为水污染防治、大气污染控制、固体废物处理与处置、物理污染控制四个方向。

物理污染控制工程与实践是专业考试的一部分，主要包括两部分知识，分别是噪声与振动污染控制部分和电磁污染控制部分。与其他专业方向相比较，物理污染部分具有较多的基础概念和较强的理论性。为帮助考生系统地做好考前准备工作，我们组织了有丰富经验的教师编写了《物理污染控制工程技术与实践》一书。本书按照注册环保工程师执业资格考试大纲要求编写，全书分为三章，分别为噪声与振动污染控制工程基础、噪声与振动污染控制工程实践、电磁污染控制工程基础。主要介绍了声学基础知识，噪声污染控制技术方法，振动污染控制技术方法，噪声与振动的测量方法，主要的吸声、隔声、消声降噪工程，隔振工程，以及电磁污染防治的基础知识、基本方法和标准。全书内容力求全面概括大纲要求，语言简练，内容翔实，利于指导考生考试复习。本书具有较强的实用性，也可以为环保工程技术人员及环保专业相关师生提供帮助。

在编写过程中，同济大学的柴晓利，上海大学的潘赞、邓涛、张佳、任重、杨晓燕、陈淳等同志对编写工作提供了很多帮助，在此表示感谢。本书编写过程中参考的主要的书籍、资料已在参考文献中列出，在此向文献作者表示感谢。

由于编写人员水平与经验有限，加之编写时间紧迫，书中难免有不妥之处，敬请各位专家和读者提出宝贵意见。

孙 颖

2009年2月



# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 第1章 噪声与振动污染控制工程基础 .....           | 1  |
| 1.1 噪声与振动评价 .....                 | 1  |
| 1.1.1 噪声与振动的主要物理量 .....           | 1  |
| 1.1.2 噪声与振动控制工程中的常用评价量 .....      | 6  |
| 1.2 声源及其特性 .....                  | 12 |
| 1.2.1 声源及其分类 .....                | 12 |
| 1.2.2 点声源、线声源和面声源的基本特性 .....      | 15 |
| 1.3 声波传播和衰减 .....                 | 15 |
| 1.3.1 声波在空气中传播的基本规律及衰减特性 .....    | 15 |
| 1.3.2 声波的吸收、反射、透射及衍射规律 .....      | 21 |
| 1.4 噪声和振动的测量分析 .....              | 23 |
| 1.4.1 声级计、频带滤波器和环境振级计 .....       | 23 |
| 1.4.2 噪声和振动的测量方法 .....            | 27 |
| 1.5 噪声污染防治技术 .....                | 31 |
| 1.5.1 吸声、隔声和消声降噪的基本方法 .....       | 31 |
| 1.5.2 吸声、隔声和消声降噪性能评价 .....        | 34 |
| 1.6 振动污染防治技术 .....                | 41 |
| 1.6.1 振动隔离的基本方法和提高隔振效率的基本原则 ..... | 41 |
| 1.6.2 阻尼减振的基本方法 .....             | 44 |
| 第2章 噪声与振动污染控制工程实践 .....           | 47 |
| 2.1 吸声降噪工程 .....                  | 47 |
| 2.1.1 多孔吸声材料 .....                | 47 |
| 2.1.2 共振吸声结构 .....                | 49 |
| 2.1.3 空间吸声体 .....                 | 52 |
| 2.1.4 室内声场分析和吸声降噪量的计算 .....       | 53 |
| 2.1.5 吸声降噪的适用条件 .....             | 56 |
| 2.1.6 吸声降噪的工程设计 .....             | 56 |
| 2.1.7 典型室内声场与专用声学实验室 .....        | 56 |
| 2.2 隔声降噪工程 .....                  | 57 |
| 2.2.1 单层均质墙的隔声 .....              | 57 |
| 2.2.2 双层结构的隔声 .....               | 59 |
| 2.2.3 多层复合隔声结构 .....              | 60 |
| 2.2.4 隔声罩的设计及应用 .....             | 61 |
| 2.2.5 隔声间的设计及应用 .....             | 62 |
| 2.2.6 隔声门和隔声窗的设计及应用 .....         | 63 |
| 2.2.7 隔声屏的设计及应用 .....             | 65 |
| 2.2.8 隔声降噪工程的设计和计算 .....          | 66 |
| 2.3 消声降噪工程 .....                  | 68 |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| 2.3.1 阻性消声器                                           | 68         |
| 2.3.2 抗性消声器                                           | 70         |
| 2.3.3 阻抗复合式消声器                                        | 75         |
| 2.3.4 微穿孔板消声器                                         | 75         |
| 2.3.5 干涉式消声器                                          | 76         |
| 2.3.6 排气放空消声器                                         | 78         |
| 2.3.7 其他类型消声器                                         | 79         |
| 2.4 隔振工程                                              | 80         |
| 2.4.1 常用隔振器材及其应用                                      | 80         |
| 2.4.2 隔振设计                                            | 84         |
| 2.4.3 阻尼材料的性能及应用技术                                    | 86         |
| 2.5 噪声和振动污染的综合治理                                      | 88         |
| 2.5.1 综合治理工程的声源特性和治理目标                                | 89         |
| 2.5.2 噪声控制的基本方法                                       | 90         |
| 2.5.3 振动污染的控制技术                                       | 92         |
| <b>第3章 电磁污染控制工程基础</b>                                 | <b>96</b>  |
| 3.1 主要电磁污染源及其特性                                       | 96         |
| 3.1.1 电磁场机理                                           | 96         |
| 3.1.2 电磁耦合途径                                          | 102        |
| 3.1.3 电力系统、电气化铁道、电磁发射系统的电磁污染                          | 103        |
| 3.1.4 电磁污染的主要危害                                       | 105        |
| 3.2 电磁污染防治基本方法                                        | 106        |
| 3.2.1 场强测量和计算方法                                       | 106        |
| 3.2.2 电磁环境管理标准和法规                                     | 110        |
| 3.2.3 电磁环境评价标准                                        | 111        |
| 3.2.4 电磁污染防治的基本方法                                     | 118        |
| <b>附录</b>                                             | <b>125</b> |
| 附录1 电磁辐射防护规定 (GB 8702—88)                             | 125        |
| 附录2 交流电气化铁道电力机车运行产生的无线电辐射干扰的测量方法<br>(GB/T 15708—1995) | 129        |
| 附录3 交流电气化铁道接触网无线电辐射干扰测量方法<br>(GB/T 15709—1995)        | 132        |
| 附录4 环境电磁波卫生标准 (GB 9175—88)                            | 134        |
| 附录5 高压架空输电线、变电站无线电干扰测量方法 (GB/T 7349—2002)             | 137        |
| <b>参考文献</b>                                           | <b>141</b> |

# 第1章 噪声与振动污染控制工程基础

## 1.1 噪声与振动评价

噪声是声音的一种,具有声波的一切特性。从物理学观点来看,噪声是指频率和声强的变化都无规律、杂乱无章的声音;从心理学观点来说,凡是对人体有害的或人们不需要的声音都属于噪声。振动则是声音的来源。

噪声污染、水污染以及空气污染一起被公认为是当今世界上的三大公害。在我国,随着社会的发展,噪声污染问题日益突出,污染面非常广泛,污染程度日益严重。如何采取措施来控制噪声,是当前人们深切关心的问题。噪声的危害是多方面的,噪声不仅对人们正常生活和工作造成极大干扰,影响人的睡眠,使人心情烦躁、反应迟钝,工作效率降低,噪声甚至可使人的听力和健康受到损害。噪声的强度愈大、频率愈高、作用时间愈长,危害就愈严重。

与水污染和空气污染相比较,噪声污染有一些特点。噪声污染是一种物理污染,而其他两种污染是化学污染。当水和空气受到污染后,将对环境产生长期的影响。而噪声是由发声物体的振动向外界辐射的一种声能,若声源停止振动发声,噪声污染随之终止,同时噪声扩散影响的范围具有局限性,这些特点有利于噪声的治理。但是噪声危害是慢性的和间接的,不会像水和空气污染那样对生命产生直接影响,因此往往缺乏对噪声治理的足够重视;同时噪声污染源分布非常分散,噪声污染的形成涉及多方面的因素,使得噪声治理工作量大,难以集中管理和解决。

噪声种类很多,因其产生的条件不同而不同,主要包括自然界的噪声和人为活动产生的噪声。自然界的噪声主要是由于下雨和刮风等自然现象所产生的水声、雷声和风声等。通常人们研究的噪声主要是指人为活动所产生的噪声。

### 1.1.1 噪声与振动的主要物理量

声音的产生和传播都离不开气体、液体、固体介质中的质点振动。要抑制噪声的发生和传播,就必须了解噪声产生的原因和传播的规律,也就必须掌握噪声和振动的基本知识。

#### 1.1.1.1 声音的物理表征量

(1) 声源。声音是由物体振动产生的。声源可以是固体、液体或气体。锣鼓的敲击声、海水的波浪声、汽车火车的汽笛声,分别是由固体振动、液体振动和气体振动发出的声音。凡是能发出声音的振动体,都可以称为声源。

(2) 声波。声波产生的条件是声源和弹性媒质。物体在弹性介质中的振动可引起介质密度的改变,这种介质密度变化由近及远的传播过程即为声波。

声音只有在媒介中才能传播。如果没有媒质传播,我们无法听到振动发声。声音可以在空气中传播,真空中是什么也听不到的。声音也可以在液体、固体等一切弹性媒质中传播,例如我们可以听到通过铁轨传过来远处火车运行的声音。根据传播声音的媒质的不同,声音可分为空气声、液体声、固体声等类型。

声波按质点振动的方向可分为两种:质点振动方向平行于声波传播方向的波,称为纵波;质点振动方向垂直于声波传播方向的波,称为横波。在气体及液体中传播的声波一般为纵波,在固体中则既有纵波又有横波。声音的传播是物体振动状态的传播过程,即传播的是

状态和能量,不是媒质本身。质点的振动是靠质点之间的相互作用影响到相邻的质点,振动就以恒定的速度向四周传播。

(3) 声场。媒质中有声波存在的空间称为声场。分为自由声场、混响声场、扩散声场、近场和远场等。

① 自由声场。自由声场表示在均匀、各向同性的媒质中,声场不受边界的影响,或者边界在无穷远处的声场,或者做了强吸声的消声室内的声场,是无反射声存在的声场。

② 混响声场。在比较大的建筑结构内,由于壁面存在多次强反射而形成的、以反射声为主的声场称为混响声场。

③ 扩散声场。空间内各点的声能密度分布均匀,声波反射的传播方向为无规律分布的声场,称为扩散声场。混响声越强烈的声场越接近扩散声场。

④ 近场。在近场区,声压随位置变化很大,变化规律复杂,媒质瞬时质点速度与声压的相位不相同。

⑤ 远场。近场之外的区域称为远场。远场内的媒质瞬时质点速度与声压的相位一致。

(4) 频率( $f$ )。媒质质点每秒钟振动的次数为声波的频率,单位为赫兹(Hz,简称赫)。一般来说,人耳只能听到频率为20~20000Hz的声音,通常把这一频率范围的声音叫音频声。低于20Hz的声波叫次声波,高于20000Hz的声波叫超声波。人耳不能听到次声和超声,但有一些动物却能听到,例如老鼠能听到次声,而蜗牛能听到超声。频率是描述声音物理性能的一个重要参数,不同频率的声音有不同的研究和应用,在可听声频率范围内,主要研究语言声学、音乐声学、噪声学、振动声学等。次声频率范围内主要可研究次声学,研究台风、地震、核爆炸等。在超声频率范围内,当频率在 $10^4 \sim 10^{10}$ Hz范围内主要用于研究检测、诊疗、超声器件等。当频率大于 $10^{10}$ Hz时主要用于研究物质结构。

质点振动每往复一次所需的时间称为周期( $T$ ),单位s。 $T=1/f$ 。

(5) 波长( $\lambda$ )。声扰动使传播声音的媒质形成周期性的疏密变化,在波的传播方向上,相邻两波峰(或相邻两波谷)之间的距离称为波长,单位是米(m)。波长也是质点的振动经过一个周期声波传播的距离。实际上,同一时刻两个相邻的密度最大点或者密度最小点或任何两个状态完全相同的相邻质点间的距离都等于波长。波长与频率成反比,频率越高,波长越短;频率越低,波长越长。

(6) 声速( $c$ )。声音在媒质中传播的速度为声速,单位是米/秒(m/s)。在任何一种媒质中的声速取决于该媒质的弹性和密度。声速等于声波波长与频率的乘积。

当某质点受到激发后会产生振动,同时引起与它相邻以至更远的质点的振动,但是时间上依次滞后。声速是媒质质点在声源激发下产生的振动状态在媒质中自由传播的速度,它反映了媒质受声扰动时的压缩特性。如果某种媒质可压缩性较大(例如气体),即压强的改变引起媒质的密度变化较大,则声速较小;反之,如果某种媒质的可压缩性较小(例如液体或固体),声速值就较大。极限情况是在理想的刚体内,媒质不可压缩,这时声速趋于无穷大。因此,声音在液体和固体中的传播速度一般要比在空气中快很多,例如在水中声速为1450m/s,在钢中则为5000m/s,而在空气中声速约为344m/s。而声音在不同气体中传播的速度略有不同,在不同大气压时,声速也不同。

对理想气体中的小振幅声波,声速 $c$ (m/s)可采用下式计算:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}} \quad (1-1)$$

式中, $\gamma$ 为媒质定压比热容和定密比热容之比; $P_0$ 为标准大气压,Pa; $\rho_0$ 为媒质密度,kg/m<sup>3</sup>

在空气中,在0℃时, $P_0 = 1.031 \times 10^5$ Pa, $\gamma = 1.402$ , $\rho_0 = 1.293$ kg/m<sup>3</sup>,则声速为



331.4m/s。

另外研究发现，在气体、液体或固体媒质中，温度也是影响声音传播速度的一个重要参数。声速实质上就是媒质分子在无规则热运动的基础上，有规则地向邻近分子做动量传递的快慢程度。因此在空气中，声速  $c$  (m/s) 与温度  $t$  (°C) 的关系可以表述如下：

$$c=331.4+0.61t \tag{1-2}$$

因此，声音在空气中的传播速度随空气温度的升高而增加。温度每升高 1°C，声速增加约 0.6m/s。表 1-1 给出了常温 (20°C) 下几种常见材料中的声速。

表 1-1 常温下几种常见材料中的声速

| 媒质  | 声速/(m/s)  | 密度/(kg/m³) | 特性阻抗 $\rho_c/[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})]$ |
|-----|-----------|------------|-------------------------------------------------------|
| 空气  | 344       | 1.2        | 413                                                   |
| 水   | 1450      | 1000       | $145 \times 10^4$                                     |
| 海水  | 1510      | 1025       | $1.55 \times 10^5$                                    |
| 钢   | 5000      | 7800       | $390 \times 10^5$                                     |
| 玻璃  | 4900~5800 | 2500~5900  | $(130 \sim 340) \times 10^5$                          |
| 铝   | 5100      | 2700       | $130 \times 10^5$                                     |
| 混凝土 | 6000      | 2600       | $13 \times 10^6$                                      |
| 砖   | 3600      | 1800       | $6.5 \times 10^6$                                     |

(7) 声压。物体振动使周围的空气形成周期性的疏密相间层状态，局部空气产生压缩或膨胀，在压缩的地方压强增加，在膨胀的地方压力减小，这样就在原来的大气压上又叠加了一个压力的变化。空气压强就在大气压强  $P_0$  附近起伏变化，将声扰动产生的逾量压强称为声压。声压的单位是帕斯卡 (Pa)，简称帕。声压的大小与物体的振动状况有关，物体振动的振幅愈大，压力的变化就愈大，声压也愈大。

声压一般是时间和空间的函数，分为瞬时声压和有效声压。声场中某空间点的声压  $P$  随时间  $t$  的变化叫做瞬时声压。在一定时间间隔中将瞬时声压对时间求方均根值即得有效声压。习惯上指的声压也往往是指有效声压。

人耳对频率为 1000Hz 声音的可听阈约为  $2 \times 10^{-5}$  Pa；刚刚使人耳产生疼痛感觉的声压 (痛阈声压) 约为 20Pa。表 1-2 列举了日常生活中遇到的各种声音声压值。

表 1-2 日常生活中遇到的各种声音声压值

| 项目          | 声压值/Pa             | 项目        | 声压值/Pa |
|-------------|--------------------|-----------|--------|
| 正常人能听到的最弱声音 | $2 \times 10^{-5}$ | 织布车间      | 2      |
| 普通谈话(1m 远处) | $2 \times 10^{-2}$ | 柴油发动机、球磨机 | 20     |
| 公共汽车内       | 0.2                | 喷气式飞机起飞   | 200    |

(8) 相位。在单列声波传播过程中，各媒质质点的频率都相同，但在运动时间上依次滞后，并不相同。相位指任一时刻的质点振动状态，包括运动方向、压强变化、振动位移等，是描述质点运动状态及波的传播状态的一个重要物理量。

(9) 频带。可听声范围为 20~20000Hz，低于 20Hz 的声音称为次声，高于 20000Hz 的称为超声。通常把宽广的声音频率变化范围划分为若干较小的段落，叫做频带或频段。

两个不同频率的声音做相对比较时，有决定意义的是两个频率的比值，而不是它们的差值。因此在划分频段时，使每一个频率段的下限频率与上限频率的比值为确定的常数。

$$\frac{f_{\text{上}}}{f_{\text{下}}} = 2^n \quad \text{或} \quad n = \log_2 \frac{f_{\text{上}}}{f_{\text{下}}} \tag{1-3}$$

式中， $f_{\text{上}}$ 、 $f_{\text{下}}$  为任一频段的上、下限频率，Hz； $n$  为正实数。当  $n=1$  时，称为倍频段； $n=1/3$  时，称为 1/3 倍频段。一般采用的是倍频段和 1/3 倍频段，各倍频段的中心频率  $f_{\text{中}}$  是指上、下限频率的几何平均值，即：

$$f_{\text{中}} = \sqrt{f_{\text{上}} f_{\text{下}}} \quad (1-4)$$

与上式联立求解，得：

$$f_{\text{上}} = \sqrt{2^n} f_{\text{中}} = 2^{n/2} f_{\text{中}} \quad (1-5)$$

$$f_{\text{下}} = \frac{f_{\text{中}}}{\sqrt{2^n}} = 2^{-n/2} f_{\text{中}} \quad (1-6)$$

倍频程和 1/3 倍频程的上、下限频率和中心频率见表 1-3。

表 1-3 倍频程和 1/3 倍频程的上、下限频率和中心频率

单位：Hz

| 倍 频 程 |       |       | 1/3 倍频程 |       |       |
|-------|-------|-------|---------|-------|-------|
| 下限频率  | 中心频率  | 上限频率  | 下限频率    | 中心频率  | 上限频率  |
| 11    | 16    | 22    | 14.1    | 16    | 17.8  |
|       |       |       | 17.8    | 20    | 22.4  |
|       |       |       | 22.4    | 25    | 28.2  |
| 22    | 31.5  | 44    | 28.2    | 31.5  | 35.5  |
|       |       |       | 35.5    | 40    | 44.7  |
|       |       |       | 44.7    | 50    | 56.2  |
| 44    | 63    | 88    | 56.2    | 63    | 70.8  |
|       |       |       | 70.8    | 80    | 89.1  |
|       |       |       | 89.1    | 100   | 112   |
| 88    | 125   | 177   | 112     | 125   | 141   |
|       |       |       | 141     | 160   | 178   |
|       |       |       | 178     | 200   | 224   |
| 177   | 250   | 355   | 224     | 250   | 282   |
|       |       |       | 282     | 315   | 355   |
|       |       |       | 355     | 400   | 447   |
| 355   | 500   | 710   | 447     | 500   | 562   |
|       |       |       | 562     | 630   | 708   |
|       |       |       | 708     | 800   | 891   |
| 710   | 1000  | 1420  | 891     | 1000  | 1122  |
|       |       |       | 1122    | 1250  | 1413  |
|       |       |       | 1413    | 1600  | 1778  |
| 1420  | 2000  | 2840  | 1778    | 2000  | 2239  |
|       |       |       | 2239    | 2500  | 2818  |
|       |       |       | 2818    | 3150  | 3548  |
| 2840  | 4000  | 5680  | 3548    | 4000  | 4467  |
|       |       |       | 4467    | 5000  | 5623  |
|       |       |       | 5623    | 6300  | 7079  |
| 5680  | 8000  | 11360 | 7079    | 8000  | 8913  |
|       |       |       | 8913    | 10000 | 11220 |
|       |       |       | 11220   | 12600 | 14130 |
| 11360 | 16000 | 22720 | 14130   | 16000 | 17780 |
|       |       |       | 17780   | 20000 | 22390 |

(10) 频谱图。通常噪声都是由多种频率组成，以频率为横坐标，以声压级为纵坐标，绘出声音强弱的频率分布图，叫做频谱图。由于可听声有宽广的频率范围，而且各种声音具有复杂的波形，因此，频谱的形状很多，大致可分为三种：线状谱、连续谱、复合谱，见图 1-1。

(11) 声功率 (W)。声功率是描述声源性质的。声功率是不受距离、方向、声源周围的声场条件等因素影响的一个基本物理量，它表示单位时间内声源向外辐射的总能量，通常用

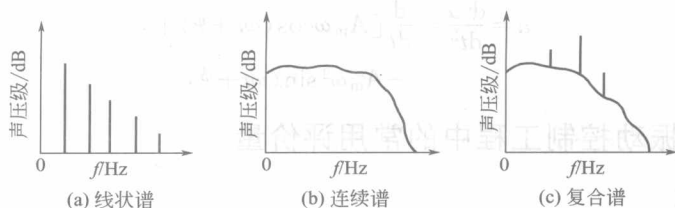


图 1-1 声音的三种频谱

$W$  表示, 单位是瓦 (W)。根据力学中关于功率的定义, 在声场中,  $u$  为媒质质点速度, 声压  $p$  作用在媒质中的一小块截面积为  $S$  体积元上, 引起的作用力  $F = pS$ 。

由  $F = pS$ , 则瞬时声功率为  $W(t) = Spu$ , 平均声功率为:

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T Spu dt = \frac{S}{T} \int_0^T pu dt \quad (1-7)$$

式中,  $T$  为声波的周期。

(12) 声强 ( $I$ )。声强通常用  $I$  表示, 单位为  $W/m^2$ 。

在垂直于声波传播的方向上, 单位时间内通过单位面积的声能量叫声强, 声强是矢量, 它的指向就是声传播的方向。在自由声场中, 某点的声强与该点的声压平方成正比。

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (1-8)$$

式中,  $\rho$  为空气密度,  $kg/m^3$ ;  $c$  为空气中声速,  $m/s$ 。

在自由声场中声功率与声强的关系为:

$$W = 4\pi r^2 I \quad (1-9)$$

式中,  $W$  为声源辐射的声功率,  $W$ ;  $r$  为离开声源距离,  $m$ ;  $I$  为离开声源  $r$  ( $m$ ) 距离声强,  $W/m^2$ 。

在声学测量技术中, 可以直接测量声强和声功率的仪器比较复杂, 可以在某种条件下利用对声压测量的数据进行计算而得到。

#### 1.1.1.2 振动的物理表征量

描述振动常用的物理量是频率、位移、速度和加速度。噪声与振动紧密相连, 声音源于物体的振动。

物体振动的形式多种多样。通过傅立叶变换可以将复杂的振动分解成若干个简谐振动的和的形式。简谐振动是最简单、最基本的振动形式, 可以用位移  $x$  对时间  $t$  按正弦或余弦函数变化来表示:

$$x = A_m \cos(\omega t + \phi) \quad (1-10)$$

$$\text{或} \quad x = A_m \sin(\omega t + \phi) \quad (1-11)$$

式中,  $A_m$  为振幅, 表示位移最大值的量;  $\omega$  为角速度;  $\phi$  为初相位角;  $t$  为时间。

(1) 频率  $f$ 。是单位时间 (1s) 内振动重复的次数, 单位是  $Hz$ 。

(2) 周期  $T$ 。位移处于同样位置的重复时间就是  $T$ 。  $T = 2\pi/\omega$ , 单位为  $s$ 。频率  $f$  是周期  $T$  的倒数,  $f = 1/T = \omega/(2\pi)$ 。

(3) 振动速度  $v$ 。它表示单位时间内的位移量, 符号是  $v$ , 单位是  $m/s$ 。

由式 (1-11) 得:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt} [A_m \sin(\omega t + \phi)] = A_m \omega \cos(\omega t + \phi) \quad (1-12)$$

(4) 振动加速度  $A$ 。表示单位时间内速度的变化率, 单位是  $m/s^2$ 。有时用重力加速度  $g$  作为标准,  $g = 9.8m/s^2$ , 对速度式求微分得到加速度:

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{d}{dt} [A_m \omega \cos(\omega t + \phi)]$$

$$= -A_m \omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (1-13)$$

## 1.1.2 噪声与振动控制工程中的常用评价量

### 1.1.2.1 级和分贝

(1) 级。在声学中，级的定义是某个量和基准量（或参考量）之比的对数。用声压的绝对值来衡量声音的强弱是不方便的，例如人耳对 1000Hz 声音的听阈声压约为  $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ ，使人耳产生痛觉的声压约为 20Pa，相差 100 万倍的声音变化。为了把上述宽广的变化压缩为实用中容易处理的范围，同时，人耳的听觉系统对声音强弱的响应接近于对数关系，于是人们用级来表示声音的强弱。级的单位是奈培时，其对数取自然对数，符号是  $N_p$ ；级的单位是贝尔时，其对数取以 10 为底的对数，符号是  $B$ 。

(2) 分贝。分贝是一个相对单位，没有量纲，声学中将正比于声功率的两个同类声学量之比，取以 10 为底的对数，再乘以 10，单位称为分贝，记为 dB。分贝是声学中最常用的单位。

### 1.1.2.2 声压级

人耳对声音大小的感受不是线性的，而是同声压的对数近似成正比。这种用对数标度来表示的声压称为声压级 ( $L_p$ )，用分贝来表示。国际上统一规定，把正常人耳刚刚能听到的声压作为基准声压  $P_0$ ，某一声音的声压级等于该声音的声压  $p$  与一基准声压 ( $p_0$ ) 的比值取以 10 为底的对数再乘 20，即：

$$L_p = 10 \lg \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \lg \frac{p}{p_0} \quad (1-14)$$

式中， $L_p$  为声压级，dB； $p$  为压强，Pa； $p_0$  为基准声压， $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ 。

### 1.1.2.3 声强级

与声压相类似，声强也以用声强级来表示，即：

$$L_i = 10 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1-15)$$

式中， $L_i$  为声强级，dB； $I$  为声强， $\text{W/m}^2$ ； $I_0$  为基准声强， $10^{-12} \text{ W/m}^2$ 。

### 1.1.2.4 声功率级

声源的声功率  $W$  与基准声功率  $W_0$  之比的常用对数再乘以 10，单位也是 dB。

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0} \quad (1-16)$$

式中， $W_0$  为基准声功率， $W$ ，空气中取值为  $10^{-12} \text{ W}$ 。

各种环境的声压和声压级见表 1-4。

表 1-4 各种环境的声压和声压级

| 声压/Pa | 声压级/dB | 环 境     |
|-------|--------|---------|
| 2000  | 160    | 导弹发射场   |
| 630   | 150    | 喷气飞机喷口处 |
| 63    | 130    | 锻锤操作位置  |
| 2.0   | 100    | 纺织车间    |
| 0.2   | 80     | 公共汽车内   |
| 0.02  | 60     | 大声讲话    |
| 0.002 | 40     | 安静房间    |

### 1.1.2.5 振动加速度级

振动加速度平方与基准值平方的比值取以 10 为底的对数乘以 10，就得到振动加速度级。常用  $L_a$  来表示：

$$L_a = 10 \lg \frac{a_e^2}{a_0^2} = 20 \lg \frac{a_e}{a_0} \quad (1-17)$$

式中， $a_e$  为振动加速度的有效值，对于简谐振动，加速度的有效值为加速度幅值的  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ； $a_0$  为振动加速度的基准值， $\text{m/s}^2$ ，取  $10^{-6} \text{m/s}^2$ 。

### 1.1.2.6 振动级

振动计权加速度级  $vL$  (dB)，简称振动级。振动级指修正的加速度级，用  $L_a$  表示，即：

$$L_a = 10 \lg \frac{a_e'^2}{a_0^2} = 20 \lg \frac{a_e'}{a_0} \quad (1-18)$$

式中， $a_e'$  为修正的加速度有效值，通过下式计算得到。

$$a_e' = \sqrt{\sum a_{fe}^2 \times 10 \times \frac{c_f}{a_{fe}}} \quad (1-19)$$

式中， $a_{fe}$  为频率为  $f$  的振动加速度有效值； $c_f$  为垂直振动与水平振动的修正值，见表 1-5。

表 1-5 垂直振动与水平振动的修正值

| 中心频率/Hz    | 1  | 2  | 4  | 8  | 16  | 31.5 | 63  |
|------------|----|----|----|----|-----|------|-----|
| 垂直方向修正值/dB | -6 | -3 | 0  | 0  | -6  | -12  | -18 |
| 水平方向修正值/dB | 3  | 3  | -3 | -9 | -15 | -21  | -27 |

### 1.1.2.7 声压级的叠加、修正与平均

在噪声控制中，需要经常对声压级等进行和、差与平均的计算。声压级的计算不能按算术法则进行，而应按照能量的叠加法则进行。声强级和声功率级的计算也是采用能量叠加的原则。

(1) 声级的叠加。对于  $n$  个噪声源，声压分别为  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $\dots$ 、 $p_n$ ，有：

$$p_T^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2 \quad (1-20)$$

其中各个声压均为有效值。根据声压级的定义， $p = p_0^2 \times 10^{0.1L_p}$ ，代入上式得：

$$10^{0.1L_{pT}} = 10^{0.1L_{p1}} + 10^{0.1L_{p2}} + \dots + 10^{0.1L_{pn}} = \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{pi}} \quad (1-21)$$

得到总声压级为：

$$L_{pT} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1L_{pi}} \quad (1-22)$$

当  $n$  个相同的声压级  $L_p$  相加时，总声压级为：

$$L_{pT} = L_p + 10 \lg n \quad (1-23)$$

当 2 个声压级相加时，总声压级为：

$$L_{pT} = 10 \lg (10^{0.1L_{p1}} + 10^{0.1L_{p2}}) \quad (1-24)$$

因此，当两个分贝数相同的声压级叠加时，总声压级等于一个声压级再加上 3dB。相当于声能量增加 1 倍。

采用查表法也可以求声压级的叠加值，具体采用声压级的差值与增值的关系（表 1-6）来求声压级叠加后的值。



表 1-6 声压级的差值与增值的关系

| $\Delta I$ | 0   | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0          | 3.0 | 3.0 | 2.9 | 2.9 | 2.8 | 2.8 | 2.7 | 2.7 | 2.6 | 2.6 |
| 1          | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.4 | 2.4 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.2 | 2.2 |
| 2          | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 1.8 | 1.8 |
| 3          | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.6 | 1.6 | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| 4          | 1.5 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 |
| 5          | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 |
| 6          | 1.0 | 1.0 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| 7          | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 | 0.7 |
| 8          | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.5 | 0.5 |
| 9          | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 10         | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.3 |
| 11         | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 |
| 12         | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.2 |
| 13         | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 14         | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.1 |
| 15         | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

声级相加除了用于求不同声源在测点的总声压级、声强级和声功率级外，同一个声源发出的不同频率和不同的声波之间的叠加也遵循能量相加的原则，因此也可以利用各频带的声压级或声功率级，求出总的声级或总的声功率级。

【例 1-1】某机器发出噪声中各频带的声压级见表 1-7，测量时采用包络面测量方法，面积为  $S=50\text{m}^2$ ，求声源的总声功率。

表 1-7 各频带的声压级

| 频带中心频率/Hz | 63   | 125  | 250  | 500  | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 测量声压级/dB  | 83.2 | 88.6 | 85.5 | 85.0 | 81.9 | 78.0 | 73.0 | 72.4 |

解：对各频率成分的声压级进行叠加，求得声压级为：

$$\begin{aligned}
 L_{pT} &= 10\lg\left(\sum_{i=1}^8 10^{0.1L_{pi}}\right) \\
 &= 10\lg(10^{0.1 \times 83.2} + 10^{0.1 \times 88.6} + 10^{0.1 \times 85.5} + 10^{0.1 \times 85.0} + \\
 &\quad 10^{0.1 \times 81.9} + 10^{0.1 \times 78.0} + 10^{0.1 \times 73.0} + 10^{0.1 \times 72.4}) \\
 &= 92.7\text{dB}
 \end{aligned}$$

声源的总声功率级为：

$$L_w = L_{pT} + 10\lg S = 92.7 + 10\lg 50 = 109.7\text{dB}$$

(2) 声级的相减。如果已知两个声源产生的总声压级和其中一个声源的声压级，求另一个声源的声压级，这就是声级“相减”的问题。

由式(1-24)得：

$$L_{p2} = 10\lg(10^{0.1L_{pT}} - 10^{0.1L_{p1}}) \quad (1-25)$$

【例 1-2】在某房间测得一声源的声压级为 90dB，又测得房间的背景噪声声压级为 80dB，求被测声源的实际声压级。

解：已知  $L_{pT}=90\text{dB}$ ，背景声压级  $L_{p1}=80\text{dB}$ ，求声源声压级  $L_{p2}$ 。

$$\begin{aligned}
 L_{p2} &= 10\lg(10^{0.1L_{pT}} - 10^{0.1L_{p1}}) \\
 &= 10\lg(10^{0.1 \times 90} - 10^{0.1 \times 80}) = 89.5\text{dB}
 \end{aligned}$$

(3) 声级的平均值。某一地点存在非稳态的环境噪声，或者存在多个噪声源的空间，需要求声源声压级多次测量的平均值，或者求各点测量值的平均值或平均频带声压级等，则需要计算声压级的平均值。

设  $n$  个声压级分别为  $L_{p1}, L_{p2}, L_{p3}, \dots$ , 按照声能叠加的原理, 平均声压级可由下式求得:

$$\bar{L}_p = 10 \lg \frac{\bar{p}^2}{p_0^2} = 10 \lg \left( \frac{p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2}{n p_0^2} \right) = 10 \lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p_i^2}{p_0^2} = 10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{pi}} \right) \quad (1-26)$$

如果实际平均的各声级中最大差值小于或等于 5dB ( $L_{\max} - L_{\min} \leq 5\text{dB}$ ), 声级的平均值可以近似采用算术平均值求得:

$$\bar{L}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{pi} \quad (1-27)$$

#### 1.1.2.8 A 声级

(1) 响度级。相同强度的纯音, 如果频率不同, 则人们主观感觉到的响度是不同的。在不同声强度的水平上, 不同频率的响度也不相同。响度级是表示声音响度的量, 响度级的单位是“方”。选取 1000Hz 纯音作基准音, 响度级等于其声压级数值。以其他频率的纯音与基准音相比较, 调整前者的声压级, 凡是听起来和基准音一样响的声音, 不论其声压级和频率是多少, 则该纯音的响度级在数值上等于那个等响的 1000Hz 纯音的声压级 (分贝值)。响度级既考虑声音的物理效应, 又考虑声音对人耳听觉的生理效应, 是人们对噪声的主观评价量之一。

(2) 等响曲线。把多数听者主观上感觉到的不同频率、不同声压级、但具有相同响度级的声音绘制成一簇曲线, 即为等响曲线。等响曲线如图 1-2 所示。图中的每一个曲线上表示的声音, 即使它们的声压级和频率不同, 但听起来响度是一样的。最下面的曲线是听阈曲

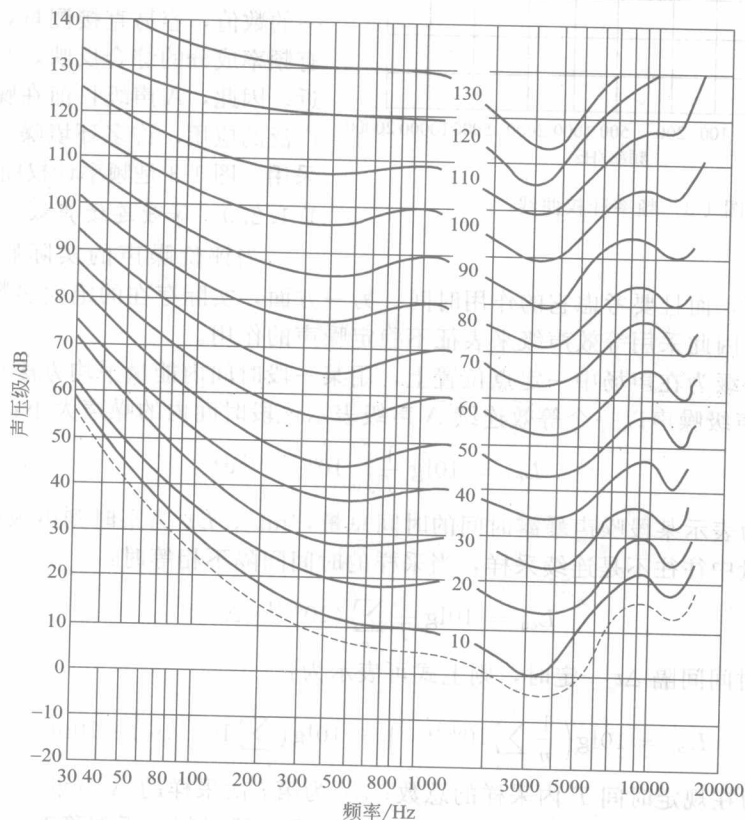


图 1-2 等响曲线

线，最上面的曲线是痛阈曲线。

从等响曲线上可以看出：在声压级较低时，频率越低，声压级与响度级的差别越大。人耳对频率为 3~4kHz 的高频声特别敏感，而对低频声及 8kHz 以上的特高频声不敏感。在声压级较高时，曲线较为平直，说明声音强度达到一定程度后，声压级相同的各频率声音响度几乎是一样的。

(3) A B C 计权声级。声压级没有反映出频率的影响，即只有平直的频率响应。为了使仪器反映的读数与人的主观响度感觉一致，需要对不同频率的客观声压级给以适当增减，这种对不同频率给以适当增减的方法称为频率计权。经频率计权后测量得到的分贝数称为计权声级。

在不同声强水平上的等响曲线不同，难以使仪器适应所有不同强度的响度修正值。一般情况下，参考等响曲线，声级计上设三套修正电路，即 A、B、C 三种计权网络，对人耳敏感的区域加以强调，对人耳不敏感的区域加以衰减，从声级计上可以直接读出反映人耳对噪声感觉的数值。常用的是 A 计权和 C 计权。

A 计权网络是效仿倍频程等响曲线中的 40 方曲线设计的，它较好地模仿了人耳对低频

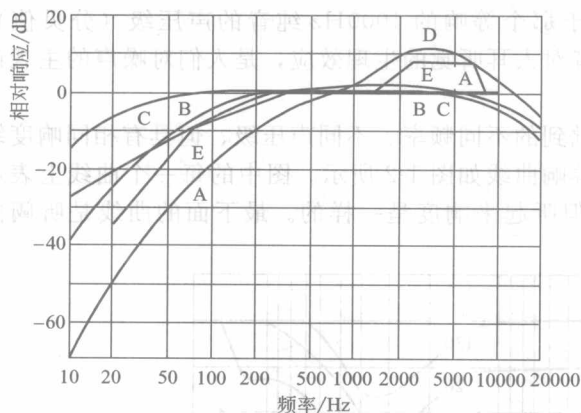


图 1-3 频率计权曲线

段不敏感、而对 1~5kHz 频段敏感的特点。用 A 计权测量出的分贝读数来代表噪声的大小，称 A 计权声级，记作 dBA；同样，B 计权曲线相应于近似 70 方等响曲线的倒置，C 计权曲线相应于近似 100 方等响曲线的倒置，测得的分贝读数分别为 B 计权声级和 C 计权声级。由于 A 声级是单一的数值，容易直接测量，并且噪声的所有频率成分的综合反映，与人主观反应接近。因此，A 声级目前在噪声测量中得到广泛的应用，许多环境噪声的评价标准都采用。图 1-3 是频率计权曲线。

#### 1.1.2.9 等效连续声级

当评价噪声的实际影响时，不但要考虑噪声的强度，而且要考虑它的作用时间。另一方面，实际存在的绝大多数噪声其强度是随时间变化的，因此采用等效声级来表征不稳定噪声的作用。

等效连续声级为在声场中一定点位置上，用某一段时间内能量平均方法，将间歇暴露的几个不同的 A 声级噪声以一个等效连续 A 声级表示该段时间内的噪声大小：

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1 L_A(t)} dt \quad (1-28)$$

式中， $T$  为表示某段噪声暴露时间的的时间总量，min； $L_A$  为某时刻声级的瞬时值，dB。在实际测量中往往不是连续采样，当采样的时间间隔不相等时：

$$L_{eq} = 10 \lg \frac{1}{T} \sum_i (10^{0.1 L_{Ai}} \Delta t_i) \quad (1-29)$$

当采样的时间间隔  $\Delta t$  一定时，则上式可表示为：

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{Ai}} \right) = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{Ai}} \right) - 10 \lg n \quad (1-30)$$

式中， $n$  为在规定时间  $T$  内采样的总数； $L_{Ai}$  为第  $i$  次采样的 A 声级。

在实际工作中，不同时间间隔噪声变化很大，而一段时间内近似稳态，通常以每天工作 8h 为基准，低于 80dB 的不予考虑，则每天的等效连续声级可按式计算：

$$L_{eq} = 80 + 10 \lg \frac{\sum 10^{\frac{n-1}{2}} T_n}{480} \quad (1-31)$$

式中， $T_n$  为第  $n$  段声级  $L_n$  一个工作日的总暴露时间，min； $n$  为声级的分段序号。

具体计算方法是将声级从小到大分成段排列，每段相差 5dB，以其算术中心声级表示，把一个工作日各段声级的总暴露时间统计出来，填入表 1-8，然后根据式 (1-31) 即可计算出一天的等效连续 A 声级。

表 1-8 各段中心声级和暴露时间

| 段落 $n$          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 中心声级 $L_n$ /dBA | 80    | 85    | 90    | 95    | 100   | 105   | 110   | 115   |
| 暴露时间 $T_n$ /min | $T_1$ | $T_2$ | $T_3$ | $T_4$ | $T_5$ | $T_6$ | $T_7$ | $T_8$ |

**【例 1-3】** 某车间工人在一天 8h 工作时间内，3h 接触 100dB 的噪声，3h 接触 90dB 的噪声，2h 接触 80dB 的噪声，问一天的等效连续 A 声级是多少？

**解：**由表 1-8 可查出，对应于 100dB、90dB、80dB 的  $n$  值分别为 5、3、1， $T_n$  值分别为  $T_1=2h$ ， $T_3=3h$ ， $T_5=3h$ 。

$$L_{eq} = 80 + 10 \lg \frac{10^{\frac{5-1}{2}} \times 180 + 10^{\frac{3-1}{2}} \times 180 + 10^{\frac{1-1}{2}} \times 120}{480}$$

$$= 80 + 10 \lg 41.5 = 96.2 \text{ dB}$$

#### 1.1.2.10 频带声压级

在某一频带中声音的频带声压级是该频带内所有声能的有效声压级。使用频带声压级时，除了指明基准声压外，还必须指明频带宽度及其中心频率。

#### 1.1.2.11 累计百分声级

对于随机起伏的噪声，可以用概率统计的方法来处理，即在一段时间  $T$  内进行随机采样，将测量值从小到大或从大到小顺序排列，统计并计算各档级的出现百分数以及累计出现百分数。实际中，当数据量较大并较好地符合正态分布时，可将测量的数据从大到小排列，在测量时间内所有超过  $L_n$  声级所占的  $n\%$  的时间，作为累计百分声级。例如  $L_{10}=80\text{dB}$ ，表示在整个测量时间内，10% 的测量时间噪声超过 80dB； $L_{50}=70\text{dB}$ ，表示 50% 的测量时间，噪声超过 70dB； $L_{90}=60\text{dB}$ ，表示 90% 的测量时间内噪声超过 60dB。交通噪声常采用统计声级  $L_n$  作为评价量，有的国家以  $L_{10}$  作为道路交通噪声的评价量对于起伏较大的噪声具有较好的相关性，也有采用  $L_{50}$  和  $L_{95}$  作为评价量的。

#### 1.1.2.12 噪声评价曲线 NR

A 声级、等效声级、统计声级等评价量，都是建立在 A 计权的基础上，并不考虑具体频率成分的单值评价量。但在实际噪声评价和控制设计中，需要考虑对不同频率成分采取不同的控制水平。

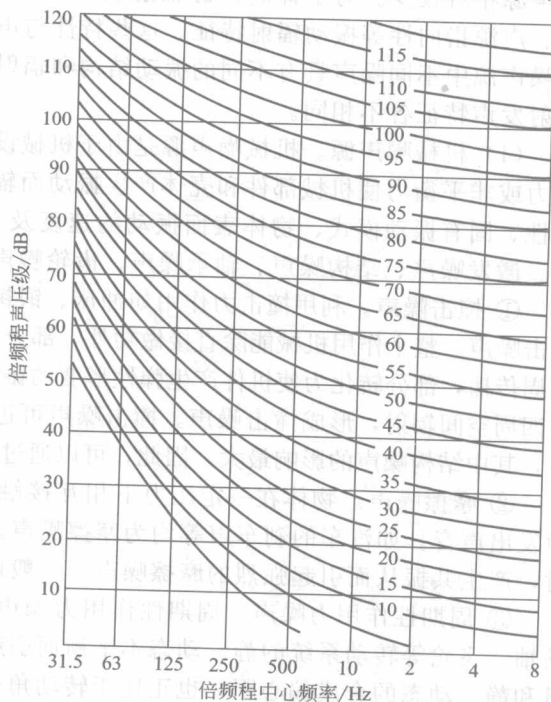


图 1-4 噪声评价曲线