

# 环境声学的发展

## — 噪声控制部分 —

马大猷

(中国科学院声学研究所)

环境声学研究对人适宜的声学环境,其中主要的是噪声控制。本文只讨论这一方面的问题。

噪声是不需要的声音。近代工业发展以来,使人们的生活越来越丰富多采,但同时也产生了噪声。我们工业化程度还比较低,但噪声已达到严重的程度。以北京为例,交通噪声最高值平均达到 86 分贝,喇叭声达 90 分贝。在工业噪声方面,轻工业工厂基本都在 90 分贝以下,其余几乎都超过 90 分贝。纺织厂各部分的噪声分别达到 90—110 分贝。有齿锯钢材、大型球磨机、加压制砖机等都达到 120 分贝。风铲、风钎、大型鼓风机、锅炉排气放空等更达到 130 分贝或更高,接近喷气飞机喷口旁的噪声。90 分贝以上是工人难以忍受的,并且作用时间一长,听力就要受到损害,还会引起其它生理病变。就是低于 90 分贝的噪声在许多情况下也是有害的。噪声影响到每一个城市居民,是影响最广的一种公害。现在世界上各工业国家都把噪声控制和其它环境保护措施一起列入重要议事日程,组织科学技术力量和社会力量进行大量工作。

响结合起来,同对自然环境状况的研究,同开发利用自然资源,保护自然环境密切结合起来,由此将更广泛,更深刻地揭示环境科学的发生发展和规律,阐述环境问题的本质。

我国环境科学的成长与发展还很年轻,

噪声影响范围很广,噪声控制动用的力量范围也广。噪声的本质问题是物理学问题。噪声控制的材料既是物理问题也是化学问题。噪声的规律是数学问题、力学问题(空气动力声学最早是数学家研究的)。噪声测试技术和噪声控制的技术措施是医药卫生、机械工程、电机和电子工程、土木建筑工程、动力工程、航空和宇航工程、化学工程等方面的工作。噪声控制离不开行政措施,因而也是法律学和政治经济学、企业管理等方面的工作。从事噪声控制工作既需要大量的专业人员,也需要大量非专业人员。在五十年代,研究噪声问题的,主要还只是少数物理学家、电机和电子工程师、耳科医师等。现在这个学科已大大发展了,成为多方面的综合性学科。这个趋势还将继续发展。

### 一、噪声测量和评价

测量噪声的目的,一是对它进行衡量以决定是否需要控制并评定控制效果;二是对噪声源、噪声传播、防护等进行研究以决定如何采取措施。基本测量仪器是声级计,用传声器把噪声转换为电压,经放大、滤波、衰减,

希望从实际出发,在吸收国内外学科发展的一切有益经验中,结合国家实现四个现代化中环境保护和科学技术发展的需要,发挥社会主义制度的优越性,加快环境科学的发展,为我国人民创造一个清洁、舒适和美好的工作和生活环境而努力奋斗。

再放大和显示。近年发展了数字显示技术，每0.1秒或更长更新一次，但用表针指示的方法仍旧使用。很久以来，人们就希望用电表读出的值能反映人对噪声的感觉，也提出过几十种评价方法，但都不太实用。到七十年代国际上才决定采用A声级方法，用滤波器控制声级计的频率特性，使它和人耳在40分贝(相当于1000赫下2000微帕的声压，接近人在微语中的声强)时的频率特性相同。这样测出的值虽然不完全理想(代表人耳感觉)，但和任何其它用更复杂的方法测出的值相比也不相上下，甚至更好些。本文所提的分贝数都指的是A声级(dBA)。噪声的另一方面就是频率特性，表示噪声各频率成分的相对重要性可以用1/1倍频带(频带的上限频率和下限频率的比是2)，比较细的可用1/3倍频带(每个倍频带分作三个等程频带)，在振动中有时有离散频率成分，就要用窄带分析，例如1%倍频带或3赫固定带宽。

近来各种测试手段发展如下：

**1. 声级计** 国际电工委员会已制定新的声级计统一标准，基本要求和过去一样，分A、B、C档(频率特性不同)，快、慢等。不同处在于公差要求，声级计还可有脉冲响应(时间常数35毫秒)和峰值响应(升起时间50微秒)。声级计的一个趋向，特别是比较精密的声级计，是使用较小的传声器(如半吋或12毫米型)，使其频率特性不影响测量结果。

**2. 积分声级计** 指示声级的时间积分，目的是表示噪声照射剂量，可显示出积分值(噪声暴露指数)或平均值(等效声级)。现有的是用精密声级计或普通声级计作基础。积分的方法有两种，一种是欧州标准，声级每增加3分贝，积分宗量加倍(按能量积分)；一种是美国标准，声级每增加5分贝，积分宗量加倍。统一标准尚在研究，问题在于选精密声级计还是普通声级计，3分贝加倍还是5分贝加倍，作用佩带式应如何考虑，声场干扰的影响等等。趋势可能是普通声级计、3分贝、

小型化。

**3. 实时分析** 作频谱分析可以用声级计加带通滤波器，但比较慢，如噪声不稳定就很难作。近年来发展实时分析，一秒钟可显示几次或几十次频谱。所用原理有三种：用平行滤波器加数字采样电路；用时间压缩和模拟滤波；用数字采样和滤波的快速傅氏分析(FFT)。在国外由于大规模集成电路规模越来越大，价格越来越低，发展趋向是第三种。因为速度快，还可以加多种附件，完成多种计算要求。在我国最近也已开始生产。

**4. 双路实时分析** 如果同时作两路实时分析所得结果就不只是频谱，而使测量工作达到新的境界。各路可分别得功率谱，相关函数；交乘可得交乘功率谱，互相关函数。相关函数不只反映数量关系也反映相位关系。利用以上各值相除(或按分贝数相减)，就可以直接测得传播或延迟时间，相位关系和指向性，能量转移关系，判断声源(例如，利用相干函数)等。此外还可以测定声导纳，而计算声辐射。测量隔声特性在过去也许要用一两天，现在可在几分钟内测得整个频率范围内的隔声特性，并自动打字，给出结果，画出曲线。很多过去几乎不可能的工作，利用双路FFT系统都很快测得了。

**5. 计算机控制** 利用小型计算机不仅可作FFT运算，还可以用来控制测量仪器，完成比较复杂的测量和运算任务。用小型计算机或台式计算器就可以控制声源和接收设备，采集数据，测量衰变过程或声场分布并算出混响时间、平均值、起伏等。用大型计算机可同时进行多种实验并进行计算，利用过去已有数据或程序。复杂的模拟实验也可以在计算机上进行。有些复杂计算在过去几乎无法进行的，如统计能量分析，有限元法等都可以利用计算机中的现成程序进行计算。由于计算技术的发展，复杂系统的理论分析已变为可能，影响不仅限于实验测量方面。

## 二、噪声标准

在不同条件下,允许噪声如何决定是多方面的问题,要根据经济上、技术上和要求上来考虑,所以不容易确定一个标准。根据保护环境的要求则可提出一个范围,在实际情况中再参照其它条件决定具体采用的标准。

噪声对人的影响主要表现在三个方面,即对健康的影响,对脑力劳动的影响和对休息的影响。

**1. 健康保护和听力保护** 强噪声损伤人耳的听力,这在过去几十年的研究工作中已充分证明并得到确切的关系。但噪声产生的其它生理作用(肌肉反应、惊恐、紧张、呼吸反应、心脏和循环反应、心率、微血管收缩、眼球和瞳孔等近期作用,以及由于激素分泌入血液而引起身体各个系统的长期病变等),虽然报导很多,但还不能肯定。原因是不容易把噪声影响和其它因素分开。噪声对工作效率的影响也难以确定。一般的概念是A声级在95分贝以下,除耳聋外不产生任何生理作用,对更强的噪声还待进一步研究。噪声性耳聋则肯定是比较严重的问题。健康和听力保护要求最高声级选择在75—90分贝范围内为宜。75分贝完全不致引起耳聋,90分贝则已到危险的边缘。现在大多数工业国选择90分贝为最高限制,并以国家法律明确规定。有些国家则选用85分贝。85和90的差别主要是从经济上考虑。今后趋势要逐渐采用85分贝,随着科学技术的发展还将采取更低值。每天工作八小时,可允许90分贝。如果每日只工作四小时可允许较高。用短时间交换高声级是根据噪声性耳聋的研究得来的,按能量考虑应是3分贝减半,从暂时性耳聋的产生考虑则5分贝减半更适宜,这个问题还待进一步研究。如果劳动时间内声级有变化,则用等效连续声级 $L_{eq}$ (单位仍是dBA),但仍有3分贝减半和5分贝减半的分歧。脉冲声对人的影响还在继续研究,早期美国提出的

为了保护人耳不受损伤,脉冲声峰值以140分贝为限的标准在一些国家仍在采用,更复杂的标准已提出不少,但仍待研究,今后在这方面的发展是可以期待的。

**2. 工作和休息** 噪声干扰谈话,因而影响脑力劳动,从理论上和实验上都得到证实。一般交谈,声级大约是65分贝,因此噪声级达到60分贝就开始感觉干扰了。如果只有45分贝就毫不感觉干扰。所以室内声级标准以45—60分贝为宜,户外可以高10分贝,55—70分贝,在交通干道旁可为65—80分贝。晚间睡眠、休息则应低10分贝,为35—50分贝(户外45—60分贝)。这些标准不必定为国家标准,但可作为地方当局限制噪声的参考。另外也对建筑设计师在选址、围护结构和内部设计以及现有建筑的处理等方面提供依据。

## 三、噪声分析

一个噪声系统可看作由声源、传播途径和接收者(人或仪器设备)三部分组成,所以应对这三部分分别研究和处理。除一般工程手段外,理论分析近年来有不少发展。

**1. 简正振动理论** 把一个系统中的振动(波动)了解为大量简正振动方式的和,因而求得其规律的方法在弦、棒、膜、板等方面已有上百年的历史,在声场方面从三十年代也有极大发展和成功。但过去由于计算复杂,只能限于简单形状的振动体,如单弦、圆膜、矩形房间等。现在由于计算技术的发展,比较复杂的情况也逐渐可以掌握了,这方面还将继续发展。

**2. 统计能量分析** 这可以看作简正振动理论的发展,它用的方法是统计的,所处理的量是平均能量,它是一种分析方法而不是具体公式或技术。远在三十年代,研究矩形房间内声场的衰变时,就曾把房间中的简正方式区分为几类,用统计方法计算其能量衰变的关系,而获得重要结果,并得到实验证明。在五十年代把这个概念用到隔声理论(把声

源室、隔壁、接收室都看作多维系统而求其能量平衡),获得远比以往简单理论更为准确的结果,双层壁上也很成功。这方面已有大量工作,还正在发展。

**3. 有限元法** 这是简正振动理论在另一方面的发展,是把一个连续分布系统简化为多质点耦合系统的近似法。把振动系统分成几个“元”,元间有若干个点,称为“节点”。每个节点有几个“自由度”(位移、速度、压力等)。在每一个节点上令一个自由度为 1,其它自由度为 0,写一个合适的包括若干参数的函数。根据这些函数就可以写出任何一个元上的振动,譬如说位移  $W$ 。此后就可按解振动问题的方法把  $W$  写成

$$W(x, t) = \sum_{r=1}^n f_r(x) q_r(t)$$

$f_r(x)$  是满足边界条件的可能分布函数(简正函数,  $x$  代表空间坐标,可能是线上、面上或空间的一点的坐标),各  $f_r$  是线性独立的,  $q_r(t)$  则是广义坐标。拉格朗日方程就是

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_r} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_r} + \frac{\partial U}{\partial q_r} = Q_r$$

式中  $T$  是整个系统的动能,  $U$  是位能,  $D$  代表能量损失,  $Q_r$  是广义力。这些就是运动方程,可求解。这样得到的解是近似解,  $n$  值愈大愈接近严格解。这样就把任何一个复杂形状的问题化为若干简单形状的综合(若干个质点的系统),从汽车内声场的空间分布到飞机部件各点的振动都是可解的了。可以说,对任何复杂形状要求准确到任何程度的解都是可能的。

**4. 数学方法** 许多数学方法都在计算振动系统中得到应用并导致测试技术的发展。主要的有随机过程理论、相关性、相干函数、自功率谱、交乘功率谱等。在一些严格计算中,格林函数的应用有重大意义,这也是近年的发展。所有这些可能都和计算技术的发展有关。用计算技术进行模拟实验或测试计

算,应用也日广,这些方面仍在发展中。

## 四、噪声降低技术

降低噪声也是根据声源、途径、防护三方面进行。传统的隔振、阻尼、机罩、吸收、隔声、屏障、护耳器等工程措施现在仍在发挥越来越大的威力,成为基本手段。近年在声源研究等方面有了不少发展,因而有助于控制工作。

气流噪声是一个例子。小到管道系统漏气、内燃机排气,大到飞机、火箭的喷气都产生强烈噪声。气流噪声是最常遇到的噪声的一种。气流噪声的机理和控制从五十年代起已进行大量工作。在飞行器上要用气流产生推力,噪声抑制的效果还不大。一般工业上多是在噪声产生后用具有吸声材料的消声器消耗它的能量。近年来由于理论研究的成就,抗性消声器的效率大大提高,并且有了严格的设计方法。损耗性消声器设计简单,使用渐广。小孔消声器和扩散消声器是运用气流噪声发声机理以降低噪声的一个较好的例子。经过喷口喷出的气流噪声,其主要频率和喷口直径成反比,因此用大量小喷口(小孔)代替大喷口可使噪声主要能量移向超声频段而不影响人(根据测量,超声或次声在 150 分贝以上才开始对人有显著影响),并提出这种效果可用模拟人耳的 A 声级来计算和测量。理论和实验结果一致,也符合主观感觉。这就是小孔和扩散消声器的原理,用于几个大气压力到几十大气压力的设计都可降低噪声 20—40 分贝。这种概念还可应用到阀门噪声。

撞击噪声受到较多注意。例如在冲床操作中,主要发声机理有:(a)冲模接近时挤出的气流;(b)垂直于冲击轴线的表面突然的加速度;(c)冲屑、冲头、冲模和砧子突然的横向加速度和(d)冲击引起的结构振动等四种。在具体处理时应找出主要声源,才能最经济地解决问题,而没有通用方法。降低机床

噪声除在设计方面外,使用阻尼结构获得不少成果。床面不用铸造,改用钢板制成,中填混凝土,可大大减小振动和噪声。床面下加敷长恢复时间的塑料也很成功。隔声罩的使用有了很大发展,大型冲床、球磨机、气轮发电机、振捣器等都有较好效果。在其它措施困难的时候,用隔声罩可能是从声源降低机器噪声的经济有效办法。

隔振的原理已用到高层建筑,不仅可减少地面和地下交通系统对建筑内的干扰,用来避免地震引起的损失也获得重要成果。

在吸声材料方面继续有发展。在我国发

展的微穿孔板吸声结构继续受到注意,特别是在消声器和特殊条件下使用更多。在国外发展的具有共振腔的多孔水泥砖也很成功。但大量使用的还是多孔吸收材料(玻璃棉和矿棉)。

具有缓慢恢复特性的塑料(大量使用增塑剂的聚氯乙烯类塑料)除了用作振动阻尼材料外,用于耳塞也很成功。护耳器的作用受密封、材料、振动和传导的限制,充分考虑了这些因素后,不同护耳器所能提供的听力保护(分贝数)可达到下列各值:(见下表)

这可作为制造和选择使用的参考。护耳器是

分贝数 种类	频率						
	125	250	500	1000	2000	4000	8000
耳塞	25±3	24±4	26±4	28±4	36±3	36±5	39±7
耳罩	12±2	21±2	29±3	40±4	40±4	41±5	38±5
耳塞加耳罩	33±4	42±5	46±7	41±5	52±5	56±5	45±5

在采用其它措施以前,或在机器大而人少的情况下对噪声环境进行保护的经济有效的措施,受到越来越多的注意。

## 五、噪声环境工作的组织

噪声环境问题首先是一个社会问题。所有有关科学技术工作如果没有国家社会的要求和支持是很难推广的。在许多国家都有一个或几个国家机关和地方组织负责推动这方面的工作,并动员社会力量予以支持。所作的工作有以下各方面:

**1. 立法和规章制度方面** 必须研究由国家制定的法律,向立法机关提出,作为防止噪声公害的基本工具,例如职业安全和劳动保护法、噪声控制法、航空噪声控制法等。此外,还要研究、建立一些有关噪声控制的规章制度,例如噪声源的发射控制规定、应采取的主要噪声源、城市环境噪声标准、建筑噪

声控制规范、工业产品噪声标准和标志办法、车辆、飞机、船只等的噪声标准、工人听力检查制度等。

**2. 贯彻执行有关噪声的法规** 主要由地方机关负责,作噪声检查、评定、判断违反法规的情况,代表国家提出惩罚处理办法,传播经验等。法院应受理有关噪声的诉讼案件。

**3. 对噪声控制工作给予支持** 包括技术指导,知识传播,训练人员和对具体项目或城市的经济支持。

**4. 组织研究项目** 提出噪声控制工作中普遍存在的问题和特殊重要的问题,组织研究工作,给予经济支持和条件安排。

通过以上各种工作,不但大大促进了噪声控制的科学技术工作,也大大加强了管理人员的作用,并组织了社会力量(包括学校教师、学生)为建设安静健康的环境贡献力量。