

噪声源声功率测定中的声场条件和有关的误差讨论

孙 广 荣

(南京大学声学研究所)

一、引 言

对机器设备的噪声评价,越来越趋向于采用“声功率”这个物理量。国际、国内已经或正在制订一系列机器声功率测定的标准。这些标准除了按测量的不确定度分为精密级、工程级、简易级外,还根据不同的实验(室)条件(如混响室、消声室或半消声室、一般的大房间、室外等)分别制订了相应的测试方法。

从原理上说,声场条件主要分为自由声场(包括半自由声场)和混响声场两大类;不同精密级别的测量,首先是在声场条件上,与理想的自由声场或扩散声场(理想的无规声场,在此范围内各点声能密度均匀,到达某点的能流来自各方向的贡献机会均等,彼此在位相上无规)相比,分别允许有不同大小的声场误差,然后同时给定相应精度的测试仪器以及相应的测试方法。因此,正确把握声场条件,是达到有关声功率测试标准所规定的不确定度的首要问题。

二、室内稳态声场

首先我们以一般的房间(假定是封闭的)为例,观察室内声场分布的特点。设室内声源稳定地辐射声波,声功率级为 L_w ,则在室内离声源(中心) r 处的声压级 L_p 为^[1]:

$$L_p = L_w + 10 \lg \left(\frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{R} \right) \quad (1)$$

式中 Q_θ 是声源辐射在 θ 方向(包括水平方位和垂直方位)上的指向性因数, R 是房间常数, $R = S \bar{\alpha} / (1 - \bar{\alpha})$, S 是室内表面积, $\bar{\alpha}$ 是诸表面的平均吸声系数。

(1)式表明,室内某点的声压级,除与声源的声功率级有关外,还与测点与声源的距离以及方位有关。这一性质既说明了如用测量某点或某几点的声压级的方法,不能恰当地衡量声源所辐射的噪声水平;又说明了若不注意声场条件,随意地测量某些点的声压级来计算声功率级,也将得不到正确的结果。

(1)式第二项对数函数中的包含两部

油掺水乳化工艺及乳化油的性质”1983.3

[4] 查济璇、郎董琪;

“交叉触发脉冲回波重迭法及其液体声速仪”——
《应用声学》(1984) No.3

份：一部份与距离和方位有关，实际上是直达声能的贡献；一部份与位置无关，主要与室内总的吸声大小有关，是混响声能的贡献。

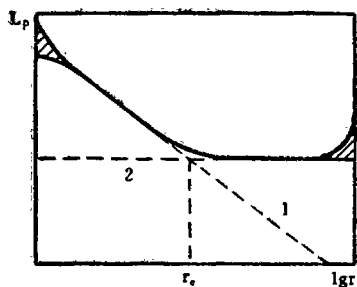


图 1

直达声的传播规律，就是声源在自由场中辐射声波的传播规律。在任一方向上（即 Q^0 一定），大约在传播距离 r 比声源尺寸大的范围（称远场区），声强与距离平方成反比，即传播距离增加一倍，声强级（或声压级）降低6dB。图1中虚线1就表示直达声随距离的衰减规律。（在距离小于声源尺寸的范围，声压与质点振动速度的位相不同，称近场区，声场变化比较复杂，不符合上述远场区声压级随距离的衰减规律。）

在理想条件下，室内混响声能密度处处相等（即符合扩散声场的假定），图1中虚线2是一水平线，表示混响声大小与距离无关。实际的混响声场，由于室内各种驻波模式的叠加，室内各点的混响声压级具有随机起伏的特点，起伏大小与声源讯号的频率高低和频带宽度有关。宽频带噪声的起伏不大，低频窄带噪声起伏较大。此外，在靠近界面处，如果界面吸声系数较小，则界面处入射波与反射波的同位相干涉，使声压级比室中间的平均值要高，形成离界面 $1/4$ 波长区域内声压级增

大的界面干涉区。

直达声随距离增大而减少，到一定距离 r_c 处，直达声与混响声的大小相等， r_c 称临界距离。当距离继续增大时，混响声占主要成份，声压级不再随距离变化。图1中实线是总声压级随距离的变化，在临界距离 r_c 之内，直达声占优势，在此范围内可近似为自由声场区；在临界距离之外，混响声占优势，称混响声场区。图2是室内稳态声场的定性表示。室内噪声测量，特别是机器声功率测定，必须把握这基本的声场条件，即要么使测点都在自由声场区，要么都在混响声场区。

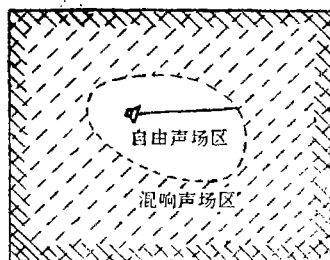


图 2

令(1)式第二项指数函数内的两项相等，就可求出临界距离 r_c ：

$$r_c = 0.14\sqrt{Q^0 R} \quad (2)$$

从(2)式可以知道，在某一方向上临界距离的大小决定于房间常数，即主要与室内总吸声量 $S\bar{\alpha}$ 有关。要扩大室内的自由声场区，就应增加室内的吸收，如在室内各界面铺吸声材料。如果使各界面的吸声系数都接近于100%，这就是消声室的最主要的条件，室内各处基本上都满足自由声场的要求；反之，如果室内各界面吸声系数都很小，如小于0.06，则除了靠近声源处外，室内绝大部份空间都是以混响声为主，这就是混响室。

三、关于“半混响声场”

在某些外国标准，包括国际标准中，有“半混响声场”这个名词。这是一个不确切甚至是不科学的概念。对于自由声场，我们有半自由声场的条件。自由声场是无限大、均匀、各向同性媒质中的声场；在一个无限大反射平面前方的自由声场称半自由声场。这两个定义都很明确，概念清楚，相应地有消声室与半消声室。混响声是指一次和多次反射声的叠加；室内混响声比直达声占优势的区域称混响声场。对此没有什么半混响声场的问题。不应该把一个具有中等平均吸声系数的房间中的声场称作半混响声场。因为在那样的房间里，仍然有一个临界距离 r_c 来区分近似的自由声场区与混响声场区，而当我们按某个标准来实现一定的测量方法时，总是将测点位置安排在要么是自由声场区，要么是混响声场区。如果不作这个区分，笼统地提出一个“半混响声场”的模糊概念，必然导致测点位置不能正确设置而引起所得结果的不正确。

四、关于环境修正值 K_2

在噪声源声功率级测定的国际标准ISO3744——适用于反射面上自由声场条件的工程级方法和ISO3746——简测法中，当测试环境不具有半自由声场条件时，给出了半自由声场条件的范围以及修正混响声影响的修正值 K_2 。

将(1)式改写成如下的形式：

$$L_w = L_p - 10 \lg \frac{Q_0}{4\pi r^2} - 10 \lg \left(1 + \frac{16\pi r^2}{Q_0 R} \right) \quad (3)$$

对于全自由空间，如果测试点分布在以半径为 r 的球面上，则测试面的面积 $S' = 4\pi r^2$ ，然后求出测试球面上声压平方的平均值，或者是声强的平均值，这是 $Q_0 = 1$ 。对于半自由空间，测试面是半径为 r 的半球面，面积 $S' = 2\pi r^2$ ，而求半球面辐射的声强平均值时， $Q_0 = 2$ 。此外，当测试房间内的平均吸声系数较小时（一般 $\bar{\alpha} < 0.1$ ，不超过0.2时）房间常数 $R \approx S\bar{\alpha} = A$ 。因此(3)式又可写成如下形式：

$$L_w = L_p - 10 \lg \frac{1}{S'} - 10 \lg \left(1 + \frac{4S'}{A} \right) \\ = L_p + 10 \lg S' - K_2 \quad (4)$$

式中 L_w 是被测机器的声功率级， L_p 是在半径为 r 的测试球面或半球面上按声压平方(声强)平均求得平均声压级， S' 是球面或半球面的测试面积， $K_2 = 10 \lg (1 + 4S'/A)$ 是考虑混响声影响的环境修正值。

在工程级方法中，规定测试条件是 $A/S' \geq 6$ 。当 $A/S' > 10$ 时，可忽略修正项。 $10 \geq A/S' \geq 6$ 时，可按公式计算或查图表给出修正值。当不满足 $A/S' \geq 6$ 的条件时，只能降为简测法的精度；或者设法增加测试室内的吸声量 A 或减小测试面积 S' ，使能满足 $A/S' \geq 6$ 的工程级条件。这个条件实质上是保证测试面在房间的自由声场区范围内，使修正值 $K_2 \leq 2.2 \text{ dB}$ ，保证了工程级测量的准确度。

在简测法中，允许 $A/S' \geq 1$ 。当 $A/S' = 1$ 时，修正值 $K_2 = 7 \text{ dB}$ 。本来在 $A/S' = 4$ 时， $K_2 = 3 \text{ dB}$ ，相当于混响声与直达声大小相等的测试位置。如果 $A/S' < 4$ ，那就进入了以混响声为主的区域，声压级大小随位置变化有随机起伏。(3)式或(4)式本来是以直达声为主，再给以

混响声的修正，现在到了混响声大于直达声的区域，显然这个修正值的误差是很大的，因此简测法只能给出具有5dB 不确定度的大致结果。

实际上，当测量表面积 S' 不很大，却有 $A/S' < 4$ 的情况时，这就说明室内绝大部份区域是以混响声为主的混响声场区，这时不必再化力气去适应(3)式或(4)式以自由声场测试为基础的工程级方法，而应采用ISO3743——专用混响室的工程级方法。

五、关于近场误差

在现有的声功率测试标准中，测点位置都应布置在声源辐射的远场区。因为在近场区，声压与质点振动速度的位相不同，声压与距离的关系非常复杂，因而声功率或声强随距离关系也非常复杂。所以当 A/S' 值小到不能满足测试条件时，采用缩小 S' 的办法是有限度的，即 S' 不能小到使测点落到声源辐射的近场区。

要严格确定机器声辐射的近场区是很困难的。因为近场区的范围与辐射面的大小形状、辐射体的安装条件以及频率有关。举个最简单的例子来说，嵌在无限大平面障板上的圆形活塞的振动辐射，它的远场条件大致为〔2〕：

$$\left. \begin{aligned} r > 2a \\ r > \frac{a^2}{\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 r 是离声源中心的距离， a 是圆形活塞的半径， λ 是所辐射声波频率的波长。从(5)式中第二个条件来看，对高频而言， r 较大时，才从近场区过渡到远场区。不过对于大多数机器而言，辐射噪声的主要频率成份是在低频和中频，所以我们往往把(5)式中的第一个条件作为判别远场

条件的主要依据。实际机器的形状很复杂，我们也很难从理论上确定远场区的界线，一般就要求测点与机器的距离应大于机器的长边尺寸为好。

在拟定了测试方法之后（在制订测试标准或对某种机器作第一次声功率测定时），为了估计测量表面（距离）不够远而引起的近场误差，设法找到高一精度级的测试环境，如较为理想的半自由场，如果测量仪器和测试方法相同，则以与在更大的测试表面（测试距离）上得到的 $W = IS'$ 是否相同，来判断近场误差的大小。

六、不同形状测量表面以及有限点的误差

在自由声场或半自由声场中，在声源辐射的远场区，声功率 W 与声强 I 才有比较简单的关系：

$$\begin{aligned} W &= \iint_{S'} \vec{I} \cdot d\vec{s}' \\ &= \sum_i I_i \Delta S_i' \cos \theta_i \end{aligned} \quad (6)$$

式中 W 是被测声源所辐射的声功率，参看图3；它等于在包围声源的封闭曲面

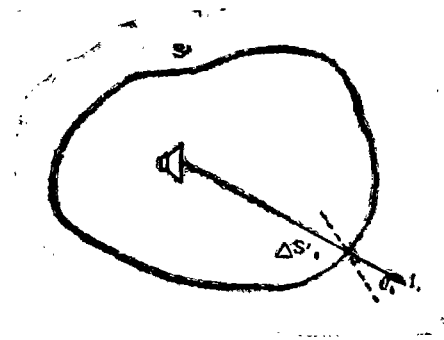


图 3

S' 上声强与圆面积的标量积的积分。在实际测量中，把封闭曲面分作若干小面积

$\Delta S_i'$, $\Delta S_i'$ 上的声强 I_i 被认为比较均匀, I_i 与 $\Delta S_i'$ 方向的夹角为 θ_i 。

在半自由声场的工程方法中, 如果测量表面是半径为 r 的半球面, 则当 r 较大时, 各方向的声强方向基本上与测量表面垂直, θ_i 均可作 0° 。只要在测量表面上等立体角地均匀分布足够多的测点, 即使声源辐射具有较大的指向性, 当各测点声压级的极大极小值之差, 数值上小于测点数时, 就可保证工程法所要求的不确定度。

如果测试表面是与机器表面平行的矩形六面体, 那就会引起两个方面的误差: 其一是同一面积上各点的声强因距离不同而不同; 其二是声强方向与测量表面不一定垂直但又没有计算 $\cos\theta_i$ 因子。

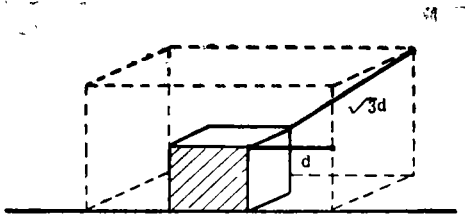


图 4

五个或四个测点。这时实际上对面积的计算有了正的系统误差。举图5特例来说明, 如果矩形测试表面的五个测点(五个面积的中心)正好落在半球面上, 则以不同测量表面来计算声功率时, 平均声压级相同, 而这个矩形面与半球面的面积之比约为1.6倍, 引起约为2dB的系统误差。

所以我们在对某些机器制订具体的声功率测试标准时, 尽可能选用半球测试表面。而对某些特长形机器, 不便采用半球测试面时, 才不得不采用矩形或其它包络形测试表面。这时所测得的声功率级, 若要与别的机器设备相比较, 就要注意测试表面的差别。

图4表示一边长为 d 的立方形机器, 测试表面是与机器表面垂直距离为 d 的矩形六面体, 我们考察一侧面上的声强因距离不同的变化。如果测试距离从机器表面算起, 则到侧面积中间的垂直距离为 d , 而机器顶角到测试面顶角的距离为 $\sqrt{3}d$, 由距离差别引起的这两点间的声压级差有 4.8dB。如果测试距离从机器几何中心算起, 则差别要小一些。虽然工程法中测量布点位置把矩形测试表面的各面积中心与顶角都包括在内, 但与半球面测试表面相比, 总是增加了误差因素。因此, 我们在选择测量表面时, 应尽可能选择半球形测试表面。

在简测法中, 对矩形测试表面可以取

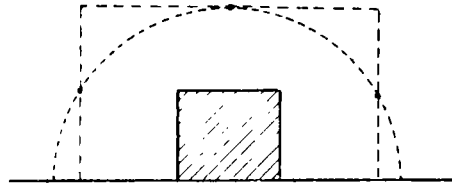


图 5

七、关于不同声场条件下结果的比较

对于在不同声场条件下测得的声功率级的比较, 必须注意两个问题:

1. 不同声场条件下机器声辐射阻抗的变化。最明显的是把声源悬在空中与声源贴近地面安放, 由于声辐射阻抗的不同, 声源本身的输出功率有变化。例如将一只输入信号不变的扬声器, 从室中央逐渐移向壁面, 在靠近壁面时可明显感到输出大小的变化。机器振动的声辐射, 受这种辐射阻抗变化的影响要比扬声器小些, 但也是很明显, 特别在低频段, 而且与机器辐射

的特定方式有关,无法作出统一的修正。因此悬在空中的测量结果与放在地面上的测量结果很难直接比较。例如一般标准噪声源的标定值是在半自由声场中测定的,在全自由声场中测试时,就不能直接应用。

在混响声场中,声源在空间不同位置时,因驻波声场的影响,使低频段的辐射阻抗也因不同位置而不同。所以在必要时需将声源移动几个位置测试,来求平均的辐射声功率级。

2. 在半自由声场中,因机器很难完全作为紧贴地面的点声源,使半自由空间中直达声与反射声有干涉,在不同测点位置的影响不同。特别对于较大的机器,这种“声中心”不靠近地面的情况,实际上偏离了半自由声场的测试条件。但从实用的观点看,一般机器都是安放在地面上使用的,所以这样测试也是符合实际情况的。但要注意,我们不能任意把半自由声场的测量结果与全自由声场去比较。

一般说,半自由声场的结果,可以与在混响声场中同样安装条件下的结果相比较;自由声场中的结果可以与声源悬在混响声场中的结果相比较。而混响声场中的结果,应是声源在若干个不同位置时所得结果的平均值。

八、关于测试用传声器的选择

当传声器放在声场中测试时,由于传声器本身的散射作用,使该点的声场与传声器放入前该点的声场有变化。变化多少与传声器的尺寸、形状以及声波的频率有关。自由声场与混响声场(确切地说应指扩散声场)的声场条件不同,散射作用所起的效果也不同。

我们希望测试用传声器的声压灵敏度(声压与电压的转换率)的频率特性是平直的,但由于散射效应,自由声场灵敏度特性(反映出传声器不存在时该点原来的声压值)与扩散声场灵敏度特性(反映声波无规入射时的声压灵敏度)不同。图6是B/K4133测试传声器的声压灵敏度频率特性曲线,上面一条是自由声场条件下声波 0° 入射时的灵敏度频率特性。下面一条是声波无规入射时的灵敏度频率特性。由于散射效应,频率在2KHz以上,两条曲线开始有差别,在4KHz时相差约1dB。如果被测噪声的主要频率成份在4KHz以下,则用这类直径小于13mm的传声器,对于工程级测试,可忽略使用传声器的声场条件。但若使用直径较大的测试传声器,例如直径在24mm左右时,频率在1KHz以上,就需要考虑声场条件来选用不同类型的传声器了。

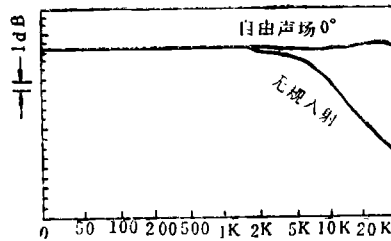


图 6

不同类型传声器的灵敏度频率特性曲线,生产厂在出厂时就已给出。如果在自由声场中测试,就选用自由声场 0° 入射时频率响应平直的传声器,称为声场型传声器。如果在混响声场中测试,声波基本上是无规入射的,就选用无规入射时灵敏度频率特性平直的传声器,无规入射灵敏度特性与压强灵敏度(传声器膜片上接受(下转封三))

《声学技术》编辑部举行编委座谈会

1984年12月22日,《声学技术》编辑部假东海研究站举行了编委座谈会,讨论与总结84年度的工作,并对85年的编辑任务提出了希望和要求。

在讨论中,大家畅谈了当前的经济改革形势,自84年10月党的十二届三中全会以来,在工业、教育、科研等系统已出现了新的气象,改革的洪流方兴未艾。大家满怀信心迎接85年改革高潮的到来,寄望《声学技术》在未来的一年中对四化建设、对促进工农业生产、提高国民经济的效益作出贡献。

与会编委认为,本刊应当以一定的篇幅普及声学技术,提供科技信息,推广声

学标准,报导文献专利索引。与会者还建议,改进本刊的出版发行,争取公开发行是个关键问题。在内容方面,要求论文和报告的稿件以五千字为适度,其它文章亦以精炼为宜,版面力求生动活泼。

座谈会还讨论了参照中央文化部有关提高稿酬的文件精神,从85年元月起本刊提高稿酬标准的问题。

在座谈会上,《噪声与振动控制》杂志副主编梁其和同志介绍了办刊的情况与经验,与会编委对他的出席与发言表示感谢。

(编辑部)

(上接第34页)

到的声压转换成多少电压)特性很接近,所以这类传声器称压强型传声器。此外,自由声场 90° 入射时的灵敏度频率特性与无规入射时的特性很接近,所以当要在自由声场测试而缺少声场型传声器时,也可用压强型传声器,而让声波保持 90° 入射

的条件下使用。

参 考 文 献

- [1] 杜功焕等:《声学基础》下册, P. 181, 上海科技出版社, 1981
- [2] D. B. Keele, Jr. J. A. E. S. 22 154, 1974 (3)