

家庭听音室低频响应评估 实用驻波分析

● 陆全根

如果对国内音响发烧作一简略的回顾，不难看出先后大致经历了两个阶段。第一阶段以“功放”发烧为其代表。各种功放电路程式沸沸扬扬竞相出台。接下来的第二阶段可以说是“音箱”发烧，大大小小各类音箱轮番上阵，令人目不暇接。目前乘“家庭影院”之风劲吹，其势头盖过了“功放”。由于人们对事物的认识过程总是逐步深入的，因此国外音响发烧也大致如此，可谓“英雄所见略同”。

那么，今后音响发烧该轮到什么呢？我想，对于真正的发烧友来说，该轮到“房间”发烧了。其实早该轮到房间发烧了，因为有了好的音响设备之后，房间便成了制约音质进一步提高的“瓶颈”。

不少发烧友对音响器材的性能特点了如指掌，对器材之间的搭配也是“轻车熟路”，至于音箱的种种摆位说起来更是头头是道，如数家珍。然而对于与自己朝夕相处的房间的声学特性，却知之不多。还有不少人在声学特性不明、甚至有明显缺陷的房间中，对音响器材作听音评价，其评价的正确性和可靠性，当然是值得怀疑的。我们曾经遇到过这种情况。一位发烧友对自己的一对小型书架箱的低音十分满意（？），逢人便加推荐。可别人拿去一听，因房间不同，完全判若两人，结果弄得这位发烧友自己也莫名其妙。房间特性对于音质评价的重要性，由此可见一斑。

从根本上来说，房间的声学特性如得不到良好的控制，无论你的音响设备多么Hi-End，也很难达到高保真重放的目的。影响房间声学特性的因素很多。其中驻波

是对家庭听音室低频响应影响最大的因素之一。

本文在前文（见本刊2003年2月，P.62）的基础上，进一步讨论驻波对房间低频特性的影响。

驻波类型

我们已经知道，理想的矩形房间中存在着三种（X，Y，Z）轴向驻波。它们是由声波在一对平行平面之间垂直反射形成的，如图1a。除此之外，其它方向的声波在方向合适时也会形成驻波。例如图1b所示的所谓的切向驻波，就是声波在房间中不同的4个平面之间传播的反射而形成的。由于形成这种驻波的声波行进路线总是限于垂直于某一轴的平面上，故有YZ、XZ、XY切向驻波之分。还有一种称为斜向驻波如图1c，它是由声波在6个不同的平面间传播和反射形成的。上述每一种驻波除基频外，还有其各次谐波。因此矩形房间中共有三大类共7个系列的驻波，共振频率之多不计其

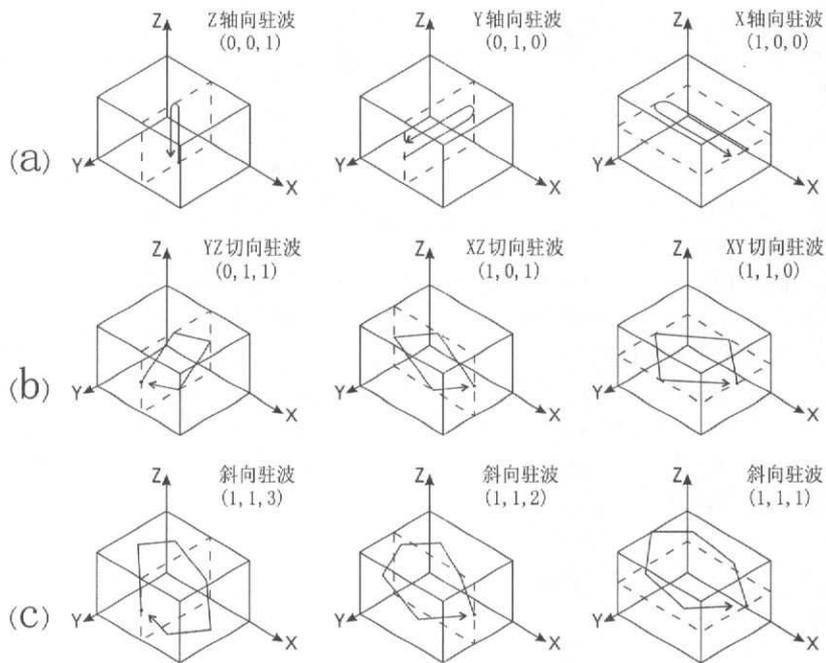


图1：驻波类型示意图

数。但是不管是哪种类型、什么系列的驻波，也不管它们的共振频率有多少，只要不怕麻烦，总可以用下列公式把它们——全部计算出来。

$$f_n = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2} \quad (\text{Hz}) \quad (1)$$

式中，C为空气中声速，常温下可取344米/秒。
 l_x 、 l_y 和 l_z 为矩形房间的长、宽和高（米）。 n_x 、 n_y 和 n_z 可以为0~∞中任何正整数，但三者不应同时为0。对于给定尺寸的房间，对应于每一种组合（ n_x ， n_y ， n_z ）就有一个共振频率或称简正频率。因此（ n_x ， n_y ， n_z ）叫做振动方式或振动模式。

根据振动模式（ n_x ， n_y ， n_z ）中三个模数的取值情况，很容易判断共振频率的类型和阶次。如其中有两个模数为0，则为轴向驻波，而那个不为0的模数的下标则决定了它的所属轴向驻波的种类；共振频率的阶次由该模数的数值决定：1为基频，>2则为基频的相应次谐频。例如（0，2，0）为Y轴向驻波二次谐频。如果三个模数中只有一个为0，那就是切向驻波。如果三个模数均不为0，则属于斜向驻波。除轴向驻波比较形象直观外，其它类型的驻波，尤其是掺杂高次谐频时，一般很难想象出它的模样。作为一般发烧友对此不必过于认真。我们只需知道房间中存在着三大类7种驻波，其中三种轴向驻波是主要的。还要能用式（1）计算房间共振频率并区别它们属于哪一大类，对于轴向共振频率还要能区别其属于哪一种就完全足够了。

驻波计算器程序

分析房间的低频响应，一般至少要计算20个左右的共振频率，直接用式（1）手工计算比较烦琐。当需要比较两个房间的反应时则计算量还得加倍。编个程序用电脑计算当然最好。如果没有电脑而有可编程序的函数器，计算起来也相当方便，下面对此略作介绍。

与一般函数计算器相比，可编程计算器一般多了LRN、[X]和COMP三个按键。LRN为学习键，供启动和结束输入计算程序之用。[X]为变数键，供编程时设定要反复计算的变数之用。COMP为计算键，供程序计算时输入变数值和给出计算结果之用。

表1为式（1）的计算器程序。按此表完成序号1~6的按键操作，即完成了式（1）的计算程序输入记忆。此后只需要每重复一次序号7的操作即可计算出一个房间共振频率。在这一步操作中，先分别按三次COMP，

| 记忆公式 | $f_n = 172 \sqrt{\left(\frac{n_x}{l_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{l_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{l_z}\right)^2}$ | |
|------|---|-------------|
| 序号 | 按键次序 | 显示 |
| 1 | 2ndF LRN | LRN 0 |
| 2 | [X] | [1] |
| | 9 | 9 |
| | ÷ 5 = X ² | 3.24 |
| | X→M | 3.24 |
| 3 | [X] | [2] |
| | 9 | 9 |
| | ÷ 4 = X ² | 5.0625 |
| | M+ | 5.0625 |
| 4 | [X] | [3] |
| | 9 | 9 |
| | ÷ 3 = X ² | 9 |
| | M+ | 9 |
| 5 | RM | 17.3025 |
| | √ | 4.159627387 |
| | × 1 7 2 = | 715.4559106 |
| 6 | 2ndF LRN | 0 |
| 7 | COMP | [1] |
| | 1 | 1 |
| | COMP | [2] |
| | 0 | 0 |
| | COMP | [3] |
| | 0 | 0 |
| | COMP | 34.44297364 |

表1: 矩形房间驻波频率计算器程序

室内声学

每次输入一个模数，表中三次按键系输入(1, 0, 0)模式。第4次按COMP就得出按该模式的计算结果。

由表1不难看出，除序号1和6用来启动和结束程序输入操作外，序号2~5只不过与普通计算器一样按公式计算而已。唯一的区别是遇到变数(本公式变数为 n_x 、 n_y 和 n_z)时，要按变数键[X]，紧接着按1~9中任一数字键即可。遇到第二个变数则同理处理。遇到 1_x 、 1_y 和 1_z 则直接输入

房间的长、宽、高尺寸。表中输入的房间尺寸是5米×4米×3米(长、宽、高)，因为下面将用它作为计算例子进行说明。

最后要指出，不同型号的可编程计算器内存步数(指表1序号2~6的按键总数)有多有少。笔者所用Sharp EL-513内存仅33步，用来计算表1的28步，似乎有余。但要注意，表1中房间三个尺寸均为一位整数，因此总共占了3步。然而实际房间的三个尺寸通常至少带一位小数，如房间最大尺寸不超过10(米)且各带一位小数，则总共要比表1多出6步。换言之，按表1编程通常要34(28+6)步，恰好超出EL-513内存而无法存贮。另外，利用表1程序计算其它尺寸的房间共振频率时，需要重新输入计算程序以适应尺寸改变了的房间，这也不太方便。实际上，EL-513还有4个独立存贮器，把房间的3个尺寸和公式中常数172预先存贮到这4个独立存贮器中后，再对表1程序作相应修改，就较好地克服了上述两个不足。想必读者对此不难理解，所以具体就不再多说。

传输响应

房间本身并不发声，它只起传输声音的作用，并影响声音的特性。我们之所以比较详细地介绍驻波共振频率的计算，是因为房间影响声音的最重要因素之一——传输声音的频率响应(也叫传输响应)是与驻波产生的一个一个共振频率密切有关的。实际上，受驻波影响的主要是100~300Hz以下的低频段，因此把我们所关心的低频段的共振频率——计算出来，有助于对房间的传输响应有一个基本的判断。

那么，理论计算与实际情况之间有些什么差异呢？为此我们先来熟悉一下房间中典型的传输响应曲

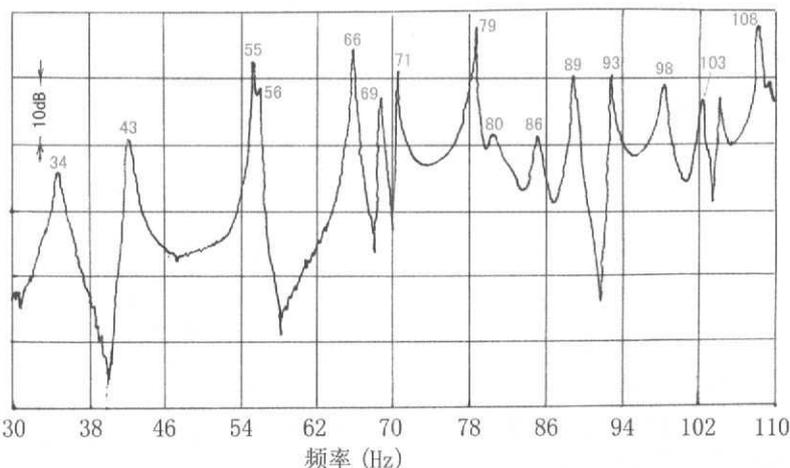


图2:5m×4m×3m房间实测传输响应

线。图2是一间用作声学处理的5米×4米×3米的矩形房间的实测传输响应曲线。十分明显，它根本不能与放大器的频率响应相比，甚至也根本不能与最差的音箱的频率响应相比。峰谷频繁起伏，峰谷之间幅度相关高达30~40dB，显然这是造成低频失真(音染)的主要根源。

图中的高峰就是房间共振引起的，实际上峰点频率就是房间的一系列共振频率。由于每一共振总包含一定的带宽，因此对于各共振频率之间的信号，房间并不是完全不能传输，只是幅度比共振点小得多而形成谷点。尽管各峰高低不一，但还是看得出来，较低频段共振峰数量要比高频段的共振峰数量少，即共振峰低端稀高端密。实际上，在更高的频率(>100~300Hz)上，共振频率更为密集，以致它们的平均响应趋于一致，对声音的音染基本上可以忽略。这些就是房间共振的一般特点。

图2中我们根据频率轴刻度给各共振峰注明了频率(近似值)。图2的提供者并没有给出各共振频率相应的模式，但给出了房间尺寸5米×4米×3米。据此已可计算出它的所有共振频率。表2就是用表1编程计算的结果。计算时，模数限定为0, 1和2三个值所组成的所有模式，这样计算量较小，而结果也能基本满足分析需要。

按模式次序计算得到的频率看起来杂乱无章，现在把它们按频率高低排列起来，为了与图2对照，也只取≤110Hz的共振频率进行排列，另外，通常轴向驻波的强度较大，切向和斜向驻波的强度较低(因声波反射路径长而有衰减)，分别比轴向强度低3dB和6dB。于是各共振频率可用相应的等高线表示，再考虑到共振频率的带宽把它们包裹线连起来，就得到图3所示的图2房间的理论传输响应。

室内声学

| 项目 | 振动模式 | 共振频率 (Hz) | | |
|---------|---------|-----------|--------|-------|
| | | ≤110Hz | >110Hz | |
| 轴向驻波 | 1, 0, 0 | 34.4 | 114.6 | |
| | 0, 1, 0 | 43.0 | | |
| | 0, 0, 1 | 57.3 | | |
| | 2, 0, 0 | 68.8 | | |
| | 0, 2, 0 | 86.0 | | |
| | 0, 0, 2 | | | |
| 切向驻波 | 1, 1, 0 | 55.1 | | 119.7 |
| | 1, 0, 1 | 66.8 | | |
| | 0, 1, 1 | 71.7 | | |
| | 1, 2, 0 | 92.6 | | |
| | 2, 1, 0 | 81.1 | | |
| | 1, 0, 2 | | | |
| | 2, 0, 1 | 89.4 | 122.5 | |
| | 0, 1, 2 | | | |
| | 0, 2, 1 | 103.3 | | |
| | 2, 2, 0 | | | |
| 斜向驻波 | 2, 0, 2 | | 110.2 | |
| | 0, 2, 2 | | 113.7 | |
| | 0, 2, 2 | | 143.3 | |
| | 1, 1, 1 | 79.5 | 127.2 | |
| | 1, 1, 2 | | | |
| | 1, 2, 1 | 108.9 | | |
| | 2, 1, 1 | 99.3 | | |
| | 2, 2, 1 | | | 124.1 |
| 2, 1, 2 | | 140.5 | | |
| 1, 2, 2 | | 147.4 | | |
| 2, 2, 2 | | 158.9 | | |

表 2: 5m × 4m × 3m 房间共振频率计算值

比较图 2 和图 3 不难看出, 二者的共振频率极为接近, 理论计算十分精确, 误差不超过 1Hz。共振频率的数量也几乎相同, 只有图 2 中 103Hz 和 108Hz 之间的那个峰点未计算出来, 数量上的误差不到 4%, 影响不大。

理论计算的误差主要表现在振幅上, 与实测数据相比出入很大。

那么是不是理论出了什么问题呢? 这倒也未必尽然。要知道, 房间响应与声源位置和测量传声器位置关系很大, 图 2 只是反映了特定测量位置上的响应, 在某种位置上而有图 3 的响应并非不可能。因此图 3 的振幅响应不能反映实际情况也没有什么关系, 重要的是它能告诉我们房间中一定频率范围内共振频率的数量以及它们的分布, 这对于判断房间响应的“好坏”已经提供了必要的信息。

不言而喻, 一定频率范围内, 房间的共振频率越多而且分布越均匀, 那么共振频率的包络线即传输响应也可能越均匀平坦。换言之, 相邻共振频率间隔过大, 就容易产生较宽较深的谷, 而间隔过小也不好, 这会产生较高的峰。就对音质的影响而言, 峰的影响比谷大。研究表明, 相邻轴向频率共振频率间隔至少不应大于 20Hz, 但也不应小于 2Hz。否则前者将产生很宽的深

谷, 后者将产生很高的峰, 在听觉上能明显地感到对音质有影响。这里应指出, 不应以放大器那种平坦的响应标准来要求房间响应, 因为这不大可能做得到。

若以上述要求来看图 2 或图 3 的房间响应, 应该说

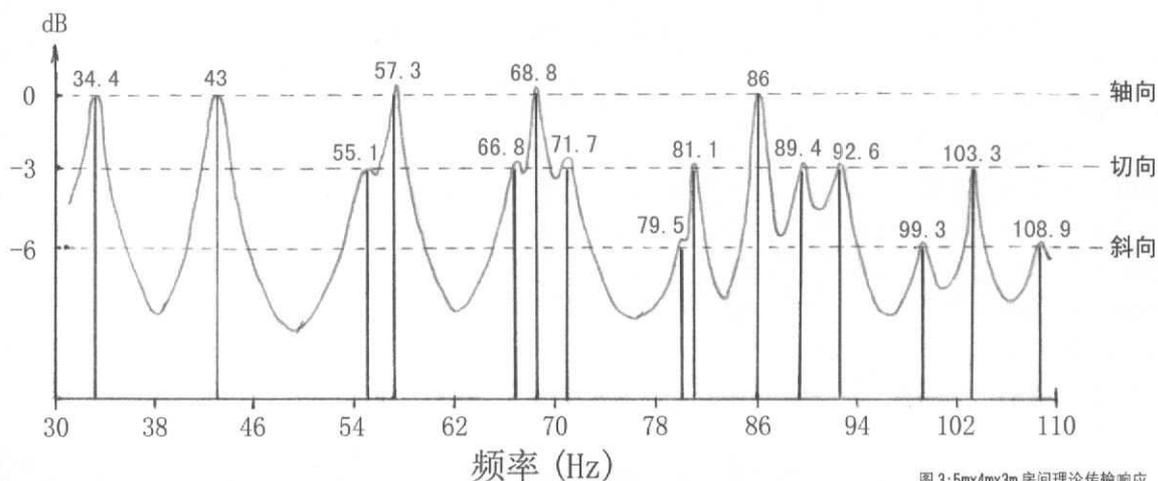


图 3: 5m x 4m x 3m 房间理论传输响应

室内声学

是很不错的。5个轴向共振频率(34、43、57、69、86Hz)相互之间间隔均未超过20Hz。55.1Hz和57.3Hz虽接近相差2Hz,但其中之一是强度较小的切向波,也不一定出现问题。至于共振频率的数量与房间大小有关,留在下面一起说明。

小房间和大房间

一看到房间,人们第一印象就是它的大小,可见房间大小对于家庭生活的影响实在是至关重要,而听音室的大小又何尝不是这样呢!

一张摇篮的空间,对于襁褓中的婴儿来说基本够了,但要成人在其中生存就难以活动手脚。可见房间大小并不一定是以其绝对尺寸大小来衡量的,而往往以在其间活动的对象的大小来衡量的。在房间中活动的人有大小之分。同样,在房间中传播的声音也有“大小”之分。衡量的尺度是声音的波长。因波长=声速/频率,故频率高的声音波长短,因而较“小”。反之,频率低的声音波长长,因而较“大”。大致上可以用在房间中传播的最低频率波长来划分房间的大小。凡长边尺寸小于最低频率波长的房间算小房间,反之算大房间。这样区分当然不大严格,但它比较形象,便于理解。例如,音乐中最低频率为20Hz,波长约17米。因而凡是长边尺寸小于,尤其是甚小于17米的房间就算小房间。现代音乐厅的长边通常超过20~30米,宽度也在10~20米以上,而高度往往不低于10米,因而当属大房间之列。与音乐厅相比,家庭听音室望尘莫及,都只能属于小房间。现在可以形象地说,大房间基本上可以允许最低频率有一个波长的活动的空间,而小房间则不能满足这一最低要求。

那么,从声学特性上看,小房间与大房间有什么不同呢?从式(1)很容易看出:

1. 房间越大,通常长边尺寸也越大,因而房间中最低共振频率也越低。例如17米长房间的最低共振频率仅10Hz,而5米长的房间的最低共振频率仅34Hz。从理论上说,前者能传输10Hz的声音,后者要传输频率这样低的声音,有相当大的难度。

2. 不论房间是大是小,它们

的共振频率都不计其数。但是在相同的频率范围内,房间越大,共振频率的数量越多。图4为大小房间中100Hz以下X轴向驻波的数量和分布情况。17米房间中100Hz以下有10个共振频率,而5米房间中还不到3个共振频率如图4b中实线所示。

总之,房间越大,越容易获得低而均匀的房间传输响应,从而有利于降低音染,提高音质。小房间则正好相反,要取得良好的低频重放效果并不容易,甚至可以说相当困难。

房间尺寸比例

与大房间相比,小房间还有一个不利因素,就是对房间长、宽、高尺寸之比的要求比较严格,否则传输响应更不易均匀。仍拿5米×4米×3米的房间来说,它的 $l_x=5$ 米,即X轴向共振频率在100Hz以下不到3个,如图4b中实线所示。加上Y和Z轴向共振频43Hz,57Hz和86Hz(如图4b中虚线)尽管总共5~6个,但其频率分布低端密些,高端稀疏一些,相当均匀十分合理。但是如果这个房间的宽度和高度取得和长度一样,均为5米。那么,Y和Z轴向共振频将变得和X轴向共振频率完全一样。即3个共振频率集中在34Hz上。3个共振频率集中在68Hz(余类推)。声学上把这种模式不同而共振频率相同的现象称为共振频率的“简并”。两个频率重合在一起称“二重简并”,多个频率重合在一起称“多重简并”。简并的结果,实际上是减少了共振

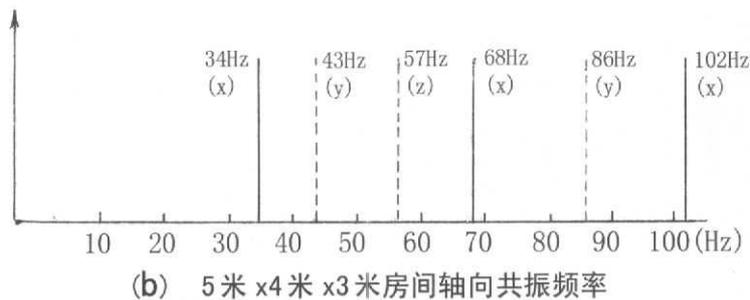
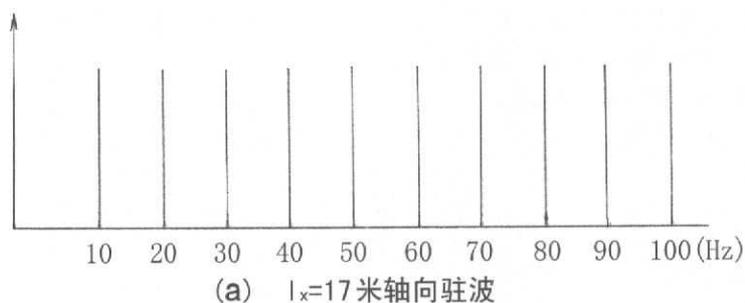


图4:大房间和小房间轴向驻波分析

频率的数量,又加大了共振频率之间的间隔,从而使共振峰更高,谷也更宽更深。而且简并对小房间的传输响应更为不利。为此不妨与图4a的大房间出现三重简并时的情况对照一下。一个17米立方体房间出现三重简并,这当然不是我们希望的,但它的频率分布仍如图4a一样,间隔不超过10Hz,听音上是完全可以允许的。而图4b的小房间出现三重简并时,相邻频率的间隔宽达34Hz,对听音的影响是十分明显的。

那么,怎样的房间尺寸比例能使共振频率分布均匀合理,较少出现简并现象呢?声学家Bolton在1946年为我们提供了一张图(图5),处于围线中的房间尺寸比例能使共振频率取得最合理的分布。此图虽是根据理论用数学方法推导出来的,但与实际情况符合得很好,因此人们也把图中曲线称为波尔围线。这里顺便提一下,此图中 $l_x=2.0$ 这一比例不宜采用,因为这将产生完全可以避免的简并现象。我们上面提到的5米×4米×3米房间,其尺寸比例是1.66:1.33:1,它处在波尔围线下部,它有较好的传输响应也就不足为奇了。

家庭听音室,包括专业研究单位的试听室,录音单位的演播室等,从声学的角度看几乎都是小房间,而小房间尤其要关注房间尺寸比例。因此一些世界性组织和许多国家对听音室的尺寸比例都提出了推荐值。要评价各种方案的优劣之分是困难的,这里从中选出三个方案列在表3中供读者参考。向读者推荐这三个方案的主要原因有两点。一是这三种房间尺寸比例分别位于波尔围线的上、中、下三个区域,供相互印证。二是这三个方案还提出了房间容积的推荐值,大致与我国住房的24m³、18m³和14m³相当,有很大适用范围。当然,这三个单位中的国际电工委员会(IEC)和欧洲广播电视联合组织(EBU)都是知名国际组织。加拿大方案实际上是向国际无线电咨询委员会提交的提案。它们的方案无疑是科学研究和反复论证的结果,对于建造或改建家庭听音室的房型具有很好的参考价值。

最后,再提请读者注意几点:

1. 以上所有讨论有一个前提,就是矩形房间是封闭空无一物的,所有墙面为刚性全反射的。这样的房间在现实世界中是找不到的,但由此建立起来的式(1)大有用处。

| 提出单位 | 房间比例 | 房间容积 | 在图5中位置 |
|------|-------------|---|--------|
| IEC | 2.39:1.5:1 | 80m ³ (允许60~110m ³) | A |
| EBU | 1.9:1.4:1 | 120m ³ (允许90~150m ³) | B |
| 加拿大 | 1.59:1.26:1 | 40m ³ (一般家庭起居室) | C |

表3

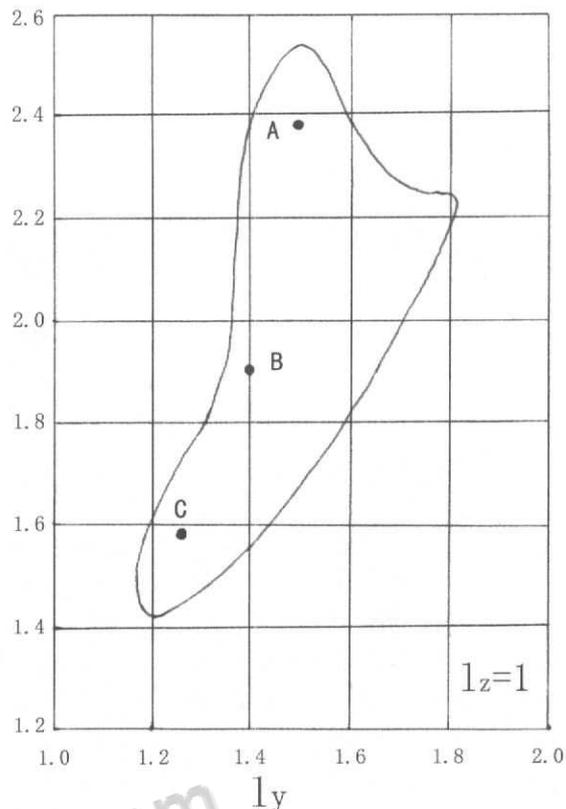


图5:波尔围线

2. 与房间长边相应的轴向驻波基频是房间中的最低共振频率,可以看作房间传输响应的低频端截止频率,但是不应把它看作房间中能够传输(或能够听到)的最低频率。实际上应该把这个频率看作为房间中是否产生驻波的频率分界点,高于这个频率,房间中将产生一系列驻波,低于这个频率,房间不产生驻波。驻波并不是声音传播唯一形式。不存在驻波当然并不意味着声波不能传播,只不过是声波得不到房间所提供的共振“增益”而已。

3. 表3也是十分有用的,其中所列的模式为我们计算房间传输响应头几十个共振频率提供了依据,否则将无从着手进行这种计算。表中最高模数取到2,如取到3而要计算全部共振频率,计算量将成倍增加。

表中所列三种驻波都用横线分为上下两部分。编程计算实际上只需计算横线上面部分的模式,下面部分的模式实际上是上面开头几个模式的倍频而已,如(2, 0, 2)是(1, 0, 1)的倍频。对房间作实际分析时,较大房间至少要计算到200Hz,较小房间要计算到300Hz,为减轻计算量,在表1模式基础上,再加上三种轴向共振频率的高次谐频即可。

有机会我们还将向读者介绍房间中的其它声学现象。■

word版下载: <http://www.ixueshu.com>

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>

阅读此文的还阅读了:

- [1. 家庭听音室低频响应评估驻波空间特性](#)
- [2. 家庭听音室的声学设计\(三\)--分散吸声型简易听音室\(下\)](#)
- [3. 家庭影院和听音室的声学环境](#)
- [4. 改善听音室低频放声质量众说纷纭的听音室尺寸比例](#)
- [5. 家庭听音室的声学设计\(三\)——分散听声型简易听音室\(上\)](#)
- [6. DIY优质家庭听音室](#)
- [7. 一维弹性驻波分析](#)
- [8. 家庭听音室的声学设计\(四\)——一次发射吸声型简易听音室](#)
- [9. 听音室内的低频驻波与中高频声学特性](#)
- [10. 家庭听音室声学设计实例\(二\)——家庭影院B](#)
- [11. 快速响应喷头评估](#)
- [12. 漫谈家庭听音室的装修](#)
- [13. 家庭听音室的声学设计\(五\)——一次反射扩散\(反射\)型简易听音室\(下\)](#)
- [14. 实用低频功率放大器的设计](#)
- [15. 家庭听音室声学设计实例\(三\)——家庭影院C](#)
- [16. 家庭实用车](#)
- [17. 实用低频功率放大器](#)
- [18. 家庭实用除污法](#)
- [19. 家庭听音室声学设计\(一\)--概述](#)
- [20. 家庭听音室的隔声处理](#)
- [21. 家庭实用妙招](#)
- [22. 家庭实用解酒方](#)
- [23. 家庭听音室声学设计实例\(一\)](#)
- [24. 家庭听音室的声学设计\(四\)--一次反射吸声型简易听音室](#)
- [25. 家庭听音室的声学设计\(三\)——分散吸声型简易听音室\(下\)](#)

- [26. 家庭烹调实用小诀窍](#)
- [27. 家庭“听音室”的装饰要点](#)
- [28. 谈谈家庭影院\(听音室\)的装饰和布置](#)
- [29. 家庭听音室低频响应评估实用驻波分析](#)
- [30. 家庭听音室中的反射声——混响及其调控\(下\)](#)
- [31. 听音室高度对低频的影响](#)
- [32. 实用音响学入门No.10——听音室要求](#)
- [33. 家庭听音室中的反射声——空间感及其调控](#)
- [34. 如何装饰家庭“听音室”](#)
- [35. 家庭听音室声学设计\(五\)--一次反射扩散\(反射\)型简易听音室\(下\)](#)
- [36. 我的听音室](#)
- [37. 家庭听音室的隔音处理](#)
- [38. 家庭实用的“温灸罐”](#)
- [39. 家庭听音室声学设计\(五\)——一次反射扩散\(反射\)型简易听音室\(上\)](#)
- [40. 家庭听音室声学设计\(二\)--集中吸声型简易听音室](#)
- [41. 实用家庭小秘方](#)
- [42. 我的听音室](#)
- [43. 家庭听音室的声学设计\(三\)--分散吸声型简易听音室\(上\)](#)
- [44. 实用家庭车](#)
- [45. 家庭实用治病保健方](#)
- [46. 家庭实用效方](#)
- [47. 家庭听音室的声学设计\(五\)--一次反射扩散\(反射\)型简易听音室\(上\)](#)
- [48. 实用的家庭车](#)
- [49. 家庭听音室装修心得](#)
- [50. 家庭听音室的装饰和布置](#)