

# 测听常用刺激声的频谱分析

梁之安 陈光地 林 曦

(中国科学院上海生理研究所)

听觉功能的测定需用多种类型的刺激声,它们各有不同的特点,其中最重要的是频谱。在听觉研究的文献中,很少有对各种刺激声的频谱描述,偶尔有对个别刺激声的分析,精度也不高,一般只提供1/3倍频带的功率谱而已。对刺激声的准确频谱缺乏了解,常使听觉实验的结果分析难以深入,有时甚至导致错误的结论。

本文对实验用刺激声作了精确的频谱分析,获得的典型谱图对合理运用测听技术和准确评价测听结果都有重要意义。

从多种类型的声刺激器或信号发生器通过扬声器或耳机产生实验所需的各种声音,在实验现场参照实际耦合条件用4165型电容传声器接收声音。信号经放大后输入BK2033型高分辨率信号分析仪,选择合适的参数采样并进行FFT分析。采样时用汉宁计权。有时为了免除扬声器或耳机频响特性的影响,对某些瞬态变化较小的声音,也把电信号直接输入分析仪进行分析。将已记录和分析的声信号波形及频谱从分析仪输至BK2308型X-Y记录仪上描记。

测试在隔声室或安静环境中进行。为减

小噪声的干扰测试时声音取较大的强度。通常为100-110dB SPL。2033分析仪有对频谱叠加平均的功能,可使信噪比提高,本文提供的结果多为32或64次采样的平均频谱。

## 一、短 声

### 1. 单个短声

单个短声通常由窄矩形波冲击耳机(或扬声器)产生,其频谱较宽,一般在数百至数千赫范围内相对声级都较高,其能量分布主要取决于耳机的频响特性。图1上组B-E依次为用50 $\mu$ s宽的矩形波冲击TDH49型耳机、4219型仿真口、普通扬声器及普通耳机所产生的短声及其频谱。TDH耳机及仿真口的频响特性较好,其有效频谱也较宽。

短声起始相位的正或负(通常称疏短声或密短声,取决于矩形波的极性)不影响其频谱(A、B)。在一定范围以内(一般为200 $\mu$ s)改变矩形波的波宽只改变短声的强度(波宽短声强),对短声的波形及频谱并无多大影响,(E-G)。对多数种类的耳机或扬声器,波宽从200 $\mu$ s再增长时短声的强度不再增大,但由于矩形波的后沿激发的膜片振动(与前

子束的医疗应用,电离层分析;杜安-亨脱X射线发射理论;以及工业上使用的电信工程设备,工业金刚石和原子钟;大面积偏光器,轻质电唱头等也都是Jefferson实验室的教授和学生做出的贡献。

Jefferson实验室开始的成绩并不突出,但持之以恒,建立了基础,这个基础就是人才,有了高水平的科学家,出人才,出成果

就非常显著了。现在Jefferson实验室出身的高级科学家,还有900人在各方面活跃,其中有四位诺贝尔奖金获得者。可见,有了高水平的方针,再加上持续地努力,效果是辉煌的。

(本文系马大猷教授于1985年5月在同济大学讲学的报告之一。彭杰同志记录整理,并经作者审阅)

沿激发者方向相反)开始起作用,所以短声后一部分的波形将发生变化。波宽更大时(1ms以上)矩形波前后沿分别激发的短声将完全分开。在短声的波形变化时,其频谱也相应地有一些变化,但能量分布集中的区域大体上是不变的(比较G、H)

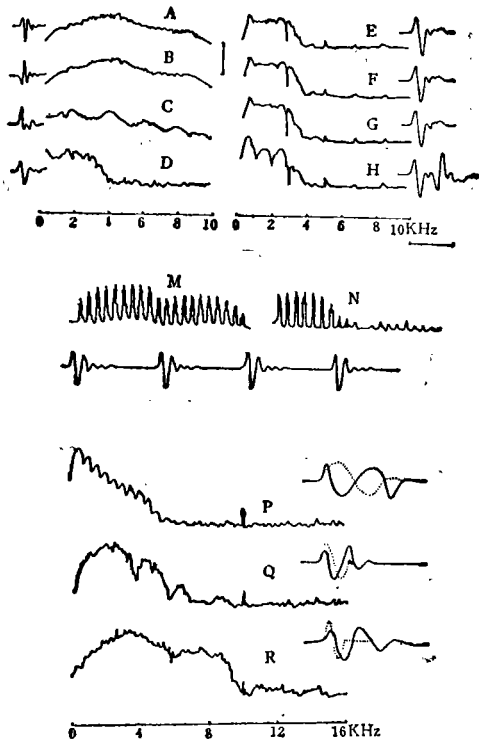


图1 单个短声、重复短声及单周正弦波短声

上组B—E: 用  $50\mu\text{s}$  宽矩形波冲击 TDH49 型耳机、4219 型仿真口、普通扬声器、普通耳机所产生短声的频谱: A: 同 B, 但相位相反; F—H: 同 E, 但矩形波依次增至 100、200、1000  $\mu\text{s}$ , 短声的波形示于两旁, 其中 E—H 的放大比依次为 2.4; 1.4; 1; 1。声级标度 40dB。时间标度 2ms。中组: 重复短声(500 次/秒)及其频谱: M: TDH49 型耳机, N: 普通耳机; 声级标度同上; 下组: 单周正弦波短声,  $f$  自上至下依次为 0.5、2、8kHz; 左频谱, 右电信号(虚线)及声学波形。声级标度同上。详细说明见正文。

有一些专用测听仪能输出波宽分档很细的矩形波, 原意是要提供有效作用时程长短不同的短声, 这当中存在着一定的误解。上面的分析表明, 短声时程的长短不取决于激励脉冲的宽窄, 更不能用后者的数值来表达。在需要用时程很短的短声作刺激时, 最好选

用阻尼好的耳机。至于矩形波的宽度则是以 100—200  $\mu\text{s}$  最为合适。

## 2. 重复短声

由重复矩形波冲击耳机或扬声器产生的声音称重复短声。当重复频率达每秒 100 次左右以上时, 其听觉效果是具有清晰音调的持续声, 与单个短声的音色大不相同。重复短声具有多谐频谱(图 1 中 M、N), 其第一峰的中心位置与重复频率  $f$  吻合, 其后各峰依次为  $2f$ 、 $3f$ 、 $\dots$ 、 $nf$  ( $n$  为正整数)。在  $f$  处能量分布不一定最大; 各谐波峰的高低也取决于耳机或扬声器的频响特性, 频响特性好时频谱各峰的高低便较均匀, 谐波峰的包络大致与单个短声的频谱包络吻合(比较 M 与 A 及 N 与 B)。

## 3. 单周正弦波短声

正如用矩形波激发的短声其声学波形并非矩形波一样, 单周正弦波(电信号)激发的短声也不具有单周正弦波的声学波形。当正弦波的周期较长(相当于频率  $f$  为 500Hz 以下)时, 单周正弦波短声的典型波型如图 1 下组 P 所示。它的主要特征是在正弦电信号开始时先有一前冲, 当正弦电信号结束后, 声波有一后冲, 当中为稍有畸变的正弦波形, 短声的总时程比正弦电信号的一个周期多出一个后冲的时间, 与正弦周期的时间比约为 1.2。当正弦波的周期较短( $f$  在 2000Hz 左右以上)时, 单周正弦波短声的声学波形在后冲之后还随有类似阻尼振荡的小波, 短声时程(不算后面的小波)与正弦周期的时间比逐渐增大, 2000Hz 时为 1.5, 8000Hz 时为 3.0(Q、R), 对 4000—8000Hz 的单周正弦波, 其短声的波形与矩形波短声已很相似。

单周正弦波短声的频谱很宽,  $f$  较低时, 包络呈幅度依次递减的波浪形(P)。各波顶都相对地较宽, 第一波顶的中心位置高于  $f$ , 大致相当于声学波形当中畸变正弦波部分的周期的倒数。如  $f$  为 500Hz 时, 第一波顶中心位置约相当于 650Hz(P)。其后各波顶的中心位

置大致为 $(0.5+n)f$ ( $n$ 依次为2、3、4……), 而 $nf$ 处则正好是各谷点。

单周正弦波短声频谱的重要特点是有较丰富的低频成份,  $f$ 较高时此点更为突出(Q、R)。  $f$ 为8KHz时, 能量最大区域不在 $f$ 及其附近,  $f/8$ 处谱线的高度和 $f$ 处竟相差无几。此频谱和矩形波短声的频谱已较接近。

近年来一些新设计的仪器提供了单周正弦波短声, 原意是取其有频率特异性。但频谱分析表明其频率特异性很差, 特别对高频, 它更接近宽频噪声而和纯音相去甚远。在电反应测听中应用此类声音时, 对此应注意。

#### 4. 滤过短声

图2A示滤过短声的典型波形, 它是一串6或7个振幅先递增后递减的准正弦波, 是由 $-100\mu\text{s}$ 矩形波通过 $1/3$ 倍频程通带的滤波器(1616型)后形成的。滤波器的中心频率决定该串正弦波的频率, 但不管中心频率高低, 滤过短声的周波数不变。滤过短声的典型频谱为一窄带, 其形状、顶宽、中心频率 $f$ 、衰减率等都和滤波通带的特性曲线相似。从最高点降30dB处的频带宽度约为 $0.5f$ 。

## 二、短音及短纯音

### 1. 短音(tone pip)

短音的声学波形与滤过短声的甚为相似(图2上组B)。其频谱的主要特点是在以 $f$ 为中心处有一声级较高的圆顶主谱带, 其带宽在从峰顶降30dB处大致也是 $0.5f$ 。主频带两旁各有一系列幅度依次递减的旁带, 呈波浪状, 各波顶的谱线位置依次为 $(1 \pm n/6)f$ ,  $n$ 依次为2、3、4……。对不同 $f$ 的短音, 只要按比例变换频率坐标, 频谱的外形基本相仿。若削平旁带的波浪状起伏, 则短音频谱的包络与 $f$ 相同滤过短声的大体上是吻合的。

### 2. 短纯音(tone burst)

短纯音的常用时程从数十到数百毫秒不

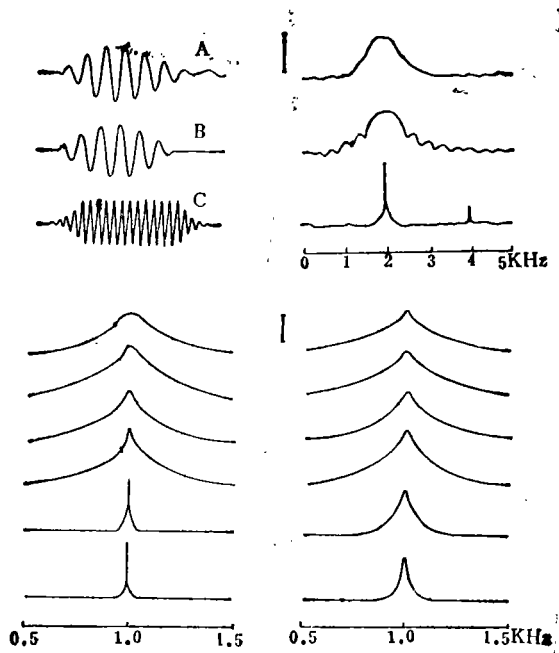


图2 滤过短声、短音及短纯音

上组 A、B: 滤过短声及短音, 左为声学波形, 右为频谱, B 的频率及 A 的通带中心频率均为 2kHz。C: 短纯音, 左为波形示意,  $f$  为 500Hz; 右为频谱,  $f$  为 2KHz, 上升下降时间为 10ms, 时程 200ms。下组: 短纯音的频谱, 左: 自上而下信号时程依次为 20、50、100、200、400ms 及持续纯音, 上升下降时间均为 10ms; 右: 自上而下上升下降时间依次为 0.2、5、10、20、50ms, 信号时程均为 100ms。声级标度均为 40dB。详细说明见正文。

等, 有一定的上升下降时间。典型短纯音的波形及频谱见图2c。和持续纯音相比, 短纯音含有较多的不纯成分, 主要是在 $f$ 谱线两旁也有一定的能量分布, 共同形成一窄带, 其有效宽度和短纯音的时程及上升下降时间有密切关系。时程或上升下降时间愈短, 有效宽度愈大, 最高谱线与最低谱线的声级差则愈小。为了较清楚地显示这一关系, 图2下组对有效频带用 Zoom 扩展, 分别比较时程和上升下降时间的影响。图中 $f$ 均为1KHz, 频程为1000Hz, 每根谱线宽度为2.5Hz。在分析仪上直接读得的从峰顶下降30dB处的有效频宽及最大谱级差列于表1。

对多数类型的声刺激器, 由于使短纯音按一定包络成形的线路中通常有非线性元

表1 短纯音的有效频宽及最大谱级差

| 时程 (ms)       | 1kHz |     |     |     |    |    |     |     |     |     |     |      |
|---------------|------|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|               | 100  |     |     |     |    |    | 20  | 50  | 100 | 200 | 400 | 持续   |
| 上升下降时间 (ms)   | 0    | 2   | 5   | 10  | 20 | 50 | 10  |     |     |     |     |      |
| -30dB 处频宽(Hz) | 300  | 240 | 200 | 140 | 95 | 50 | 280 | 180 | 140 | 70  | 7.5 | <7.5 |
| 顶底声级差 (dB)    | 44   | 53  | 57  | 63  | 66 | 70 | 40  | 55  | 63  | 80  | 85  | 90   |

件,所产生的短纯音多少会引进谐波失真(图2C 4KHz处的小峰)。在仪器技术指标中1%左右的谐波失真有时不算很差,但在使用短纯音作测听刺激时,对此等谐波成分应当予以注意。

在作纯音听力测定时,要求所用声音有很好的频率特异性。以上的分析表明,持续纯音或时程及上升下降时间长的短纯音是较佳的刺激声,时程及上升下降时间短的短纯音、短音、滤过短声都不很理想,单周正弦波短声则甚差。用电反应作指标测听时,有时要求刺激声很短,这是难以调和的矛盾,它在很大程度上限制了用电生理指标测定纯音听力的实际应用。

### 三、调幅纯音和调频纯音

#### 1. 调幅纯音

当高频正弦载波 $f_c$ 被连续低频正弦波 $f_{am}$ 调幅时,频谱的主峰位置与 $f_c$ 相符。主峰两侧各有若干强度递减的旁带,其中心位置为 $f_c \pm nf_{am}$ ,  $n$ 依次为1、2、3……,频谱中相应于 $f_{am}$ 及 $2f_{am}$ 处各有一小峰,但比 $f_c$ 主峰低得多( $f_c$ 与 $f_{am}$ 不成整数比时)。在图3A的典型示例中, $f_c$ 为8KHz,  $f_{am}$ 为273Hz,调幅深度(峰:谷)为3:1。此例 $f_c$ 与 $f_c \pm f_{am}$ 处的幅值相差约12dB,但与 $f_{am}$ 处则相差50dB左右。调幅深度变小时, $f_c \pm nf_{am}$ 及 $f_{am}$ 处谱峰的强度逐渐降低,最后趋向于 $f_c$ 单峰谱。 $f_{am}$ 很低时( $<10$ Hz),频谱能量基本上集中于 $f_c$ ,接近于纯音的频谱。

#### 1. 调频纯音

图3B为调频纯音的频谱示例。图中 $f_c$

为8KHz,调频频率 $f_{fm}$ 为273Hz,调频深度为0.05 $f_c$ 。频谱的主要部分为由一系列窄谱带组成的谱带区,中心谱带的峰位置为 $f_c$ ,两旁依次为 $f_c \pm nf_{fm}$ 。最高的谱线有时不是 $f_c$ ,而是 $f_c \pm f_{fm}$ 或 $f_c \pm 2f_{fm}$ ……,再两旁的谱带依次递减,谱带区的宽窄主要与 $f_c$ 及调频深度有关, $f_c$

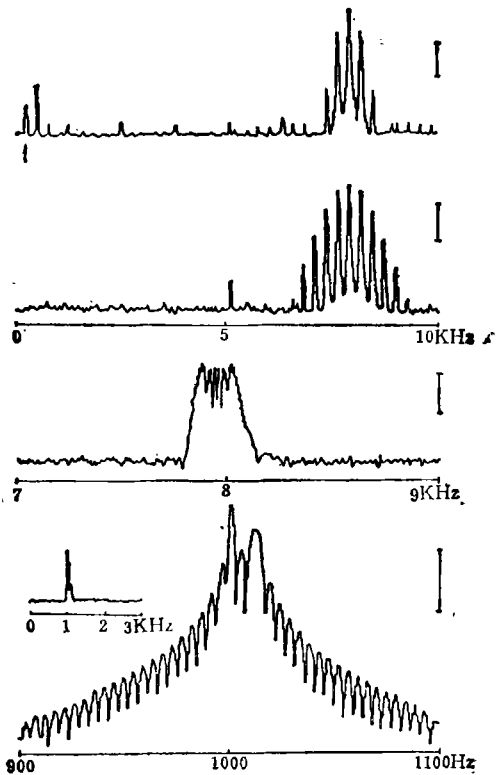


图3 调幅纯音与调频纯音的频谱

A: 调幅纯音,  $f_c$  8KHz,  $f_{am}$  273Hz, 调幅深度为-66.7%。箭头示 $f_{am}$ 位置。B: 调频纯音,  $f_c$  8KHz,  $f_{fm}$  273Hz, 调频深度为5%。C: 调频纯音,  $f_c$  8KHz,  $f_{fm}$  10Hz, 调频深度1%, 经Zoom扩展。D: 矩形波调频纯音,  $f_c$  1KHz, 调频深度10Hz, 经Zoom扩展; 左侧小图为未经Zoom扩展的频谱包络, 峰位置为1KHz。声级标度均为20dB。

# 压电振子参数与其电纳值关系的研究

王矜奉

(山东大学物理系)

本文从理论上分析了由于 $R_0$ 的存在及圆心随频率的位移所引起的压电振子参数导纳圆图法的测量误差,导出了仅由振子最大最小电纳值及其对应频率来测定其参数的有关公式。并用该方法测定了石英振子和压电陶瓷振子的等效电路参数以及钽酸锂( $\text{LiTaO}_3$ )晶体的有关弹性常数、压电常数及机电耦合系数。

## 一 引 言

对于压电振子参数和材料参数的测量方法的研究,已有不少报导。通用方法有:传输线路法<sup>[1]</sup>, $Q$ 表法<sup>[2]</sup>,导纳圆图法<sup>[3]</sup>等。传输线路法方法简单,但由于其测量是基于取最大传输频率 $f_{mT}$ 来代替串联谐振频率 $f_s$ (或谐振频率 $f_r$ ),取最小传输频率 $f_{nT}$ 来代替并联谐振频率(或反谐振频率 $f_a$ ),所以其测量精度不高。

导纳圆图测量精度较高,但当压电材料有一定介质损耗时,由于此时的导纳圆不再与电纳轴相切,最大电导的倒数与振子等效串联电阻 $R$ ,将有一定偏差。同时,由半功率点确定的压电振子频带宽度也将比实际频带要大。这就限制了导纳圆图方法测量精度的

提高。另外,导纳圆图只是压电振子的导纳在电导电纳平面上的轨迹,电导或电纳与频率的对应关系并不明晰。为了克服以上导纳圆图测量方法的缺点,本文提出了由单纯电纳—频率曲线来测定压电振子参数的电纳测量方法。

$f_r$ 、 $f_a$ 在电纳—频率曲线上极易求得,因此可将电纳法直接用于材料参数的测量上。因为压电材料的弹性常数、压电常数及机电耦合系数表达式无不与 $f_r$ 、 $f_a$ 有关,所以 $f_r$ 、 $f_a$ 的测定,有利于材料参数的精确测定。本文用电纳法具体测定了山东大学晶体研究所研制的大直径钽酸锂( $\text{LiTaO}_3$ )压电晶体的有关电弹常数<sup>[4]</sup>,并与国外用传输线路法,即用 $f_{mT}$ 代替 $f_s$ , $f_{nT}$ 代替 $f_a$ 测得的值<sup>[5]</sup>进行了比较。

高及/或调频深度大时变化的赫数多,谱带区相应地便大。谱带区的左侧低谱段能量分布很小,相应于 $f_{im}$ 处无突出的谱线,此处幅值一般低于 $f_c$ 处70dB左右。

当 $f_{im}$ 降至很低时,谱带区缩至很小,各谱带逐渐合并,成为以 $f_c$ 为中心的一窄带。 $f_c$ 为8KHz, $f_{im}$ 为10Hz,调频深度为0.01 $f_c$ 时,谱带顶的宽度约为0.02 $f_c$ (160Hz),降30dB处约为0.03 $f_c$ (240Hz)。对不同的 $f_c$ ,这一关系大致不变。(C,经Zoom扩展)。

用前后缘经过积分,上升下降时间为10

ms的准矩形波对载波进行调频时( $+\Delta f_c$ ),较典型的频谱是在 $f_c$ 及 $f_c+\Delta f_c$ 处各有一能量集中的窄带,两侧有若干幅度依次递减的旁带。降30dB处的有效带宽约为 $2\Delta f_c$ ,远处能量分布甚少,无明显的谐波成份(D)。

调幅纯音和调频纯音对测定听觉的辨别功能有很大的用处,精细的分析表明,在调幅和调频纯音的频谱中相当于调制频率( $f_{am}$ 或 $f_{im}$ )的成份微不足道,但听觉效果却是与之相应的调制波音调甚为清晰,并且常占主导地位,这对听觉机理的研究是十分有意义的。