

# 广播用气流扬声器的实验研究

张扩基 李 芑  
(中国科学院声学研究所)

气流扬声器的声功率频率响应由位移振幅的频率特性决定。文中计算了不同共振频率时的位移特性，共振频率愈高，将愈有利于扩展频响。气流扬声器若被用于重播语言，则其共振频率至少应设在 1200~1500 赫。文中介绍用磁流体代替压缩空气的冷却作用，以便测量电功率满负载时的位移振幅。结果表明，声功率的频响和位移特性几乎一样，中、高频时，小电功率的位移特性比大电功率的要好。对 2 千声瓦气流扬声器进行了主观评价，在 5.8 公里处逐字逐句记录得到的可懂度是 50%。

## 一、引言

大功率扬声器有多种用途，远程广播就是其中之一。

远程广播系统具有其它通讯系统所不能代替的许多优点，如有较大的收听面积，收听人是自由的，不需要接收设备，不受时间限制，不易被干扰等。但要使声音传得远，则声源功率必须足够大。通常应用的大功率声源有旋笛，但它只能发出单频或连续谱；电动扬声器的效率太低，国内目前最大的电动扬声器输入电功率为 3600 瓦，重量为 1400 公斤，膜片的直径是 160 厘米，但其中、高频的响应很差，几乎无法重播音乐和语言，故只能限于地震实验用。气流扬声器的声功率大，频谱可控，如本文研制的 2 千声瓦气流扬声器重量是 19 公斤，直径仅有 17 厘米。有些气流扬声器由于频带窄，无法重播语言，或要求较低时也可重播音乐。我们研制成功的 2 千声瓦气流扬声器具有较宽的频带，能重播语言。本文着重介绍此种扬声器的实验研究和分析。

## 二、广播用气流扬声器的重要参数选取

### 1. 气流扬声器简介(见图1)

气室与压缩机联接，使调制气流的动、定环能在稳定气压下工作。动、定环是调制气流产生声音的机构，它们都是圆环状，其上铣有狭缝，动环与音圈作刚性联结。当外加电讯号时，动环将上、下运动，而定环则固定不动。此外，还有磁回路和喇叭筒等。

当外加交变的电讯号送入音圈时，动环的运动使动、定环对应的缝交变地闭合或开启，调制面积发生变化，从而调制压缩空气

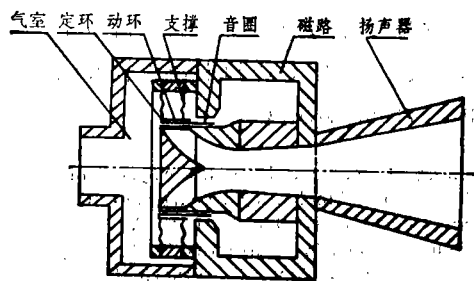


图1 气流扬声器剖面图

气,引起气流速度发生变化,通过喇叭筒向外辐射出声音来<sup>[11]</sup>。

## 2. 振动系统的计算

气流扬声器的频率响应由位移振幅决定,下面讨论一些参量对扬声器频响的影响。

气流扬声器的导纳型等效电路见图2。

图中  $m$  是振动系统的质量,  $c$  是振动系统的力顺,  $R_e$ 、 $L_e$  和  $l$  分别是音圈的直流电阻、电感和导线的长度,  $B$  是磁感应强度,  $E$  是电源开路电压。

由等效电路得恒压时的位移振幅  $x$  为<sup>[12][13]</sup>。

$$X(\omega) =$$

$$\frac{BlE}{$$

$$\omega_{01}^2 m \sqrt{[Re(1 - \omega^2/\omega_{01}^2) - \omega^2 rm Le/\omega_{01}^2 m]^2 + \omega^2 [(Le + B^2 l^2/\omega_{01}^2 m)(1 - \omega^2/\omega_{02}^2) + Rrm/\omega_{01}^2 m]^2} \quad (1)$$

$$\omega_{01}^2 = \frac{1}{mc}$$

$$\omega_{02}^2 = \omega_{01}^2 \left( 1 + \frac{B^2 l^2 C}{Le} \right)$$

用计算机算出 2 千声瓦气流扬声器不同的共振频率时的位移振幅  $x$  于图3。

其中  $B = 1.27$  韦伯/米<sup>2</sup>;  $L_e = 5 \times 10^{-4}$  亨;

$l = 13$  米;  $m = 24$  克;

$rm = 50$  力欧;  $R_e = 4$  欧姆;

$E = 40$  伏。

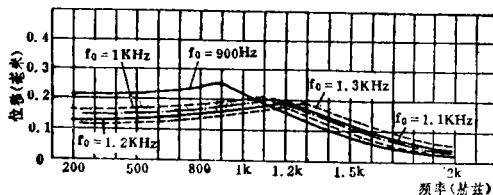


图3 不同的共振频率位移频率特性曲线

由图可见,若要获得较好的频响,共振频率  $f_{01}$  应尽可能高些。

## 3. 语言可懂度与扬声器频响的关系

清晰度指数是评价语言可懂度的重要参数,该指数可表示如下<sup>[14]</sup>。

$$A = \sum_{n=1}^{20} \frac{SPL - C_n}{30} \times 0.05 \quad (2)$$

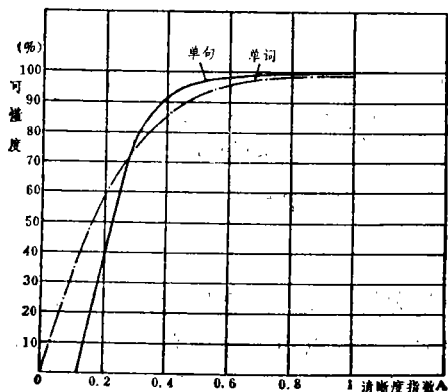


图4 清晰度指数和单词、单句可懂度的关系

式中  $A$  是清晰度指数,  $n$  是清晰度指数为 0.05 的 20 个频带数目,  $SPL$  是语言的峰值声压级,  $C_n$  是环境噪声谱级。

在频率为 900~1500 赫范围内,每个  $n$  的频带宽度是 120 赫左右;在 200~900 赫范围内,频带宽度是 150~180 赫;而在其它频段,则频带的宽度大于 200 赫,最大频带宽度可达到 1300 赫<sup>[5]</sup>。可见 900~1500 赫的频率范围内,  $n$  的个数多,只要语言峰值声压级  $SPL$  高,便可获得较高的清晰度指数。单词,单句可懂度和清晰度指数的关系

见图 4。

从图 4 可见，清晰度指数上升到 0.5 后，单词和单句的可懂度增加得很缓慢，为了得到合格的懂度，应使气流扬声器的频响平直到 1200 赫左右，在这频段  $n$  的个数多，只要声噪比高，清晰度指数便增加得较快。

#### 4. 广播用气流扬声器共振频率的选取

从图 3 可见，气流扬声器主要工作在第一共振频率以下，共振以后，响应曲线将按每倍频程 12 分贝的斜率下降，为此应对清晰度贡献较大的频段 900~1500 赫包括在频响平直部分，所以共振频率应设计在 1200~1500 赫范围内，以便得到合格的懂度。

根据我们所进行的主观评价实验，当共振频率为 500 赫时，2 千声瓦气流扬声器在几百米处，语言听起来含糊不清；共振频率为 800 赫时，听不清楚；共振频率为 1000 赫时，能听清楚；当共振频率是 1500 赫兹时，听起来就和一般电动喇叭式扬声器的效果相差不多。

共振频率愈高，语言可懂度愈高，但提高共振频率，将受到振动系统的质量  $m$  和力顺  $c$  的限制；因为随着声功率的提高，振动系统的质量随之增加，为了保证较高的共振频率，则应减少力顺  $c$ ，但力顺系由支撑的长短、厚度和材料的扬氏模量所决定。2 千声瓦广播气流扬声器共振频率设计在 1200~1500 赫，可以满足一般要求。

### 三、位移振幅和电功率、声功率的关系

通常测量位移振幅的装置大多采用激光、读数显微镜、加速度计等，对气流扬声器来说，由于有压缩空气的流动，测量其在实际工作条件下的位移振幅是比较困难的；如果不加压缩空气，则由于音圈在电功率满负载下工作，会立即烧断，因此需要利用压缩空气的冷却作用，以使电功率提高 1 倍多。通常测量气流扬声器的位移振幅只能在不加压缩空气，而用小功率进行测量，然后线性推算到电功率满负载的情况。在中、高频时，这种推算和扬声器的实际位移有较大的偏差，为此我们采用磁流体代替压缩空气冷却音圈，使电功率容量提高 1~2 倍。我们用磁流体加到 2 千声瓦气流扬声器的磁间隙，驱动电功率由小到大，测得的位移振幅的频率特性见图 5。

从图 5 可见，驱动电功率大的位移振幅，其高频特性要比小电功率的差，因为支撑的顺性不是常数，决定支撑顺性的杨氏模量和损耗因数在超过线性范围后，会随振幅的增加而变化。当振幅增大时，杨氏模量减小，损耗因数增大，在我们工作频率范围内，损耗因数随频

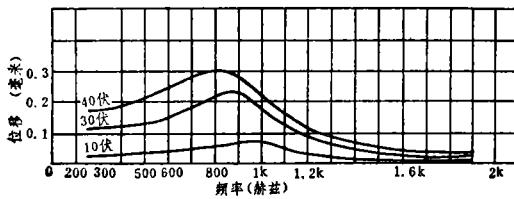


图 5 不同电压下位移的频率特性

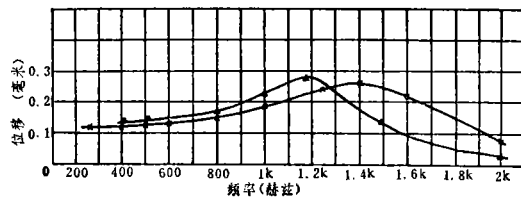


图 6 位移的频率特性

率的上升而增加。

图 6 表示位移的计算值和实验值在中高频时有效大的偏差，这是因为计算值的参量是小功率时测得的。如谐振频率  $f_0$  是在电压 0.5 伏时测量，然后以电功率满负载 40 伏电压代入式(1)而算得。所以图 6 上的计算值实际上是小功率的情况，而实验值是电功率满负载 40 伏电压时测得的，即相应于图 5 中 40 伏电压的曲线。因此位移的计算值在中高频时比电功

率满负载时测得平直。

在直径为 18 厘米的行波管中测量 2 千声瓦气流扬声器的声功率，驱动电压 40 伏，测量结果表示在图 7，图中并给出电压 40 伏时测得的位移振幅。

从图 7 可见，气流扬声器在满负载工作电压下测得的位移频率特性和声功率的频率

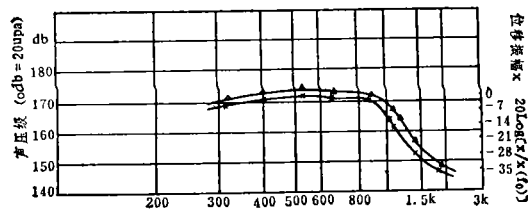


图 7 位移、声压级和频率的关系

响应几乎相同。因此要估计扬声器的频响，只需在相应电压下，测量支撑的位移频率特性即可。

对位移振幅的畸变进行了测量。引起畸变的主要原因有：(1)功率放大器馈给扬声器的电流发生畸变，但测量的结果表明该畸变很小；(2)磁路空气隙的磁场强度不均匀，为此，我们把音圈做得比空气隙的高度短些，以防止畸变；(3)支撑非线性引起的畸变，其测量装置见图 8。把两个线圈绕在同一骨架上，线圈“I”处于磁路中心位置，当线圈运动时，它不会移出磁间隙，因此对它来说，磁感应强度  $B$  恒定。当线圈“I”通入交变电讯号，即产生一力  $F_1 = Bl_1 i_1$  ( $l_1$  和  $i_1$ ，分别是线圈“I”的导线长度和加入的电流)。线圈 II

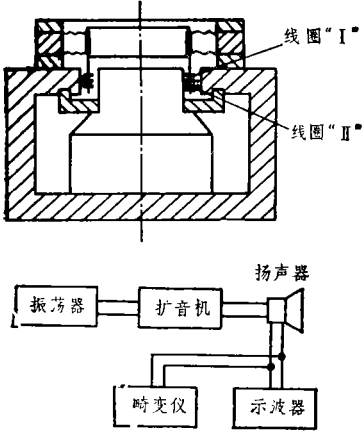


图 8 畸变测量装置

处于同一环形磁极的磁场中，它检拾和振动系统的速度  $v$  成正比的电压  $u_2$ ， $v$  由恒定力  $F_1$  产生运动，因支撑的非线性畸变， $v$  有畸变，而  $u_2 = Bl_2 v$ ，式中  $l_2$  是线圈“II”的导线长度，所以  $u_2$  产生畸变。用仪器测量  $u_2$  的畸变，即为支撑的畸变。不同频率和不同电压时支撑的畸变表示于图 9。

从图 9 可见，低频时，波形发生畸变，随着电功率增加，畸变增大，高频时，畸变减小。不同频率的失真度见表。

为了减小由于支撑所引起的气流扬声器的波形失真，应当选择弹性好的材料制作支撑，在工作的应力范围内，材料的弹性应尽可能服从虎克定律。

#### 四、新的工艺

气流扬声器音圈承受的电功率比普通电动扬声器大 1 倍多，由于导线采用铝线，其引出线和铝线的焊接经常脱焊、虚焊。现在我们用铜包铝线代替铝线，比重由原来的 2.7 克/厘米<sup>3</sup>变为 3 克/厘米<sup>3</sup>，焊接十分牢固，电功率亦略可增加。

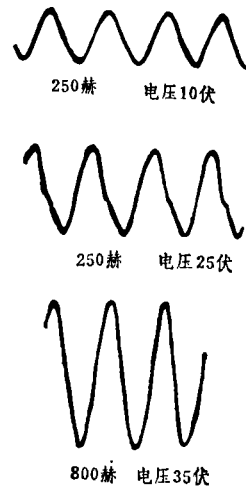


图 9 支撑的畸变

频率(赫)	250	320	400	500	630	800
电压(伏)	25	10	25	30	30	35
失真度%	18	5	5	4	3	2

在定环的外表面喷涂一层厚 0.2 毫米的尼龙，以减少摩擦和漏气。

## 五、可懂度的测量

1. 用 2 千声瓦气流扬声器广播，在 2 公里处，测听者的主观评价认为和电动式喇叭扬声器在近距离处的效果几乎一样。

2. 在离扬声器 5.8 公里处，由 12 个具有初、高中文化程度的人员进行测听，他们对测听未经过训练而播送的句子是从报纸杂志上选择的；其中也有部分是从可懂度试验句表中摘取的。测听队员事先不知道测听内容，随听随记录，这样得到逐字逐句的可懂度是 50%。

3. 用 4 个 2 千声瓦扬声器组合，在 8.7 公里处，用上述相同的方法进行测量，得到短文全懂和基本听懂的占 81%。

## 六、结 论

1. 只要共振频率设计合适，可利用气流扬声器重播语言或要求不高的音乐。

2. 在气流扬声器满负载电功率情况下，测得的位移频率特性和气流扬声器在相应电功率时的声功率频响几乎一样。

3. 根据对振动系统的位移特性测量表明，位移振幅随电功率的增高而增加，高频响应变差。

4. 将磁流体应用到气流扬声器上，可以测量在电功率满负载情况下的位移振幅，为研究和改进气流扬声器提供了有利条件。

本文测量支撑畸变的方法是陈通教授提出的，孙洪生、李健山和声学所 700 组的同志参加了部分工作，谨致谢意。

## 参 考 文 献

- [1] 马大猷：“调制气流声源的原理”，物理学报，23，No.1 (1974)，17-25.
- [2] 沈耀：“气流扬声器振动系统的设计原理”，物理学报，23，No.1 (1974)，27-37.
- [3] 张扩基、孙洪生、李健山：“两千和一万声瓦电动调制气流声源”，声学学报，7，No.2 (1982) 122-124.
- [4] L. 白瑞纳克：《声学》，高等教育出版社(1959)454—455，464
- [5] 张家录、马大猷：“导出清晰度指数的新方法”声学学报，2，N.2 (1965) 80-84.