

文章编号: 1001- 2486(2009) 05- 0097- 04

## 调制气流声源振动系统参数分析\*

许伟<sup>1</sup>, 龚昌超<sup>2</sup>, 曾新吾<sup>2</sup>

(1. 国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073; 2. 国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 通过实验数据与理论计算结果的对比, 分析了气流对振动系统的阻尼作用; 并以实验声源为基础, 以等效电路方法分析了调制气流声源振动系统的弹性系数、磁感应强度、音圈质量、电阻、电感以及绕线方式等参数对音圈振幅的影响; 根据调制气流声源的用途差异, 提出了用于语音广播和产生大功率低频声波时振动系统各参数的选择方法。

**关键词:** 调制气流声源; 强声; 振动系统; 音圈; 等效电路

中图分类号: TB532 文献标识码: A

## Analysis of the Vibration System Parameters in the Air-modulated Speaker

XU Wei<sup>1</sup>, GONG Chang-chao<sup>2</sup>, ZENG Xin-wu<sup>2</sup>

(1. College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Opto-electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Through the comparison of the experiment data with the theory results, the damp influence of the airflow on the vibration system is analyzed. Furthermore, based on the experiment sound source, how the parameters of the vibration system may influence the voice coil amplitude, such as coefficient of elasticity, magnetic flux density, the mass, resistance, inductance and winding strands of the voice coil, is studied using equivalent circuit method. Finally, methods to choose these parameters are presented for the purpose of speech broadcasting or generating low frequency sound waves.

**Key words:** air-modulated speaker; high intensity sound; vibration system; voice coil; equivalent circuit

调制气流声源是一种通过调制气流发声的大功率声波发生装置。作为可以产生语音信号和低频声波的大功率强声源, 该类声源的声功率可达万瓦量级, 具有声压级高、频响范围宽和信号易控制等众多优点, 广泛应用于远距离广播、强噪声环境试验或大功率低频声波发生器等工业领域。调制气流声源由气源系统、激励系统和振动系统三部分组成, 其中气源系统提供发声所需的能源, 激励系统提供原始调制信号, 而振动系统则是声波发生和放大的关键装置, 它由音圈、弹性元件、磁隙等组成<sup>[1]</sup> (如图 1)。音圈由弹性元件定位, 上沿位于声源喷口中, 下部绕有线圈, 置于环形磁隙中。加载交流电信号时, 音圈受到磁场力的作用, 沿磁隙上下往复运动, 对喷口气流进行调制, 在下游形成高强度的周期脉动声源, 并对外辐射声波。

1969 年, Meyer 对调制气流声源的发声原理进行了理论分析<sup>[2]</sup>。1974 年, 马大猷在假定工作压力超过临界压力条件下提出了调制气流声源的理论模型<sup>[3]</sup>。同年, 沈山利用等效电路方法分析了该类声源振动系统设计原理, 这是目前可查的唯一直接针对调制气流扬声器振动系统的理论研究<sup>[4]</sup>。但上述研究受当时条件的限制, 理论分析时未考虑气流对振动系

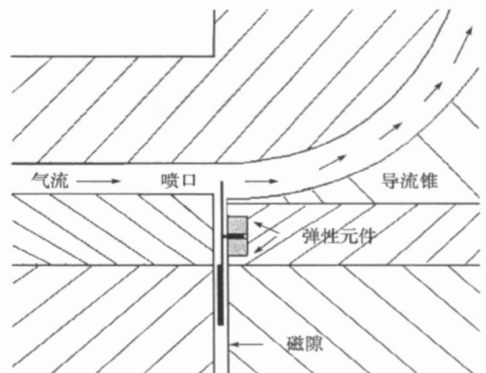


图 1 声源振动系统结构示意图

Fig. 1 The vibration system structure scheme

\* 收稿日期: 2009- 03- 24

作者简介: 许伟(1981-), 男, 博士生。

统的作用,而且做了很多简化,特别是忽略了阻尼的影响。Glendinning 对某型用于主动噪声控制的调制气流声源进行了实验研究,重点研究了其发声性能<sup>[5]</sup>。与调制气流声源振动系统结构相似的电动振动台,近年来得到了较大发展<sup>[6]</sup>,但由于不涉及气流作用,其分析方法并不能直接应用于调制气流声源系统。

## 1 振动系统理论分析

根据电-力-声类比理论<sup>[4,8]</sup>,可以得到本文研究的问题的等效电路,如图2所示。注意到,声源的主要工作机理在于调制气流发声,其振动系统本身的声辐射功率相较于电功率来说很小,因此在分析中忽略了声辐射部分。此外,在一般的等效电路分析中, $r_m$ 所表示的运动阻尼是很小的,但在本文情况下,由于气流和气压的存在,在一定的条件下,它可能起较大的作用。对此在后面将作较细致的分析。调制气流声源振动系统的参数如下: $E$ 为音圈两端电压, $R$ 为音圈的直流电阻, $L$ 为音圈的电感, $m$ 为等效振动质量, $k$ 为弹性元件的弹性系数, $C_m$ 为弹性元件的力顺, $B$ 为磁隙的磁感应强度, $l$ 为音圈绕线置于磁隙的有效长度, $Bl$ 称为变量因子, $x$ 为音圈振动位移, $r_m$ 为运动力阻,主要由气流和弹性元件的性能等决定。

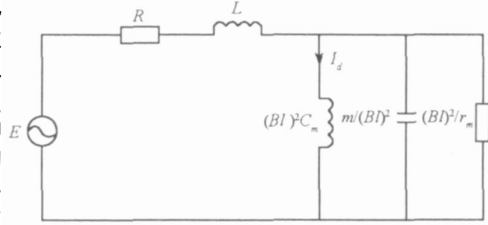


图2 振动系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of the vibration system

根据等效电路,基于基尔霍夫定律可得振动系统的阻抗为

$$Z = R + j\omega L + \frac{(Bl)^2}{r_m + j\left[\omega m - \frac{1}{\omega C_m}\right]} = \left[ R + \frac{(Bl)^2 r_m}{Z_m^2} \right] + j \left[ \omega L - \frac{(Bl)^2}{Z_m^2} \left( \omega m - \frac{1}{\omega C_m} \right) \right] \quad (1)$$

式中, $Z_m^2 = r_m^2 + \left( \omega m - \frac{1}{\omega C_m} \right)^2$ 。已知, $F = BlI_d$ , $F = kx = \frac{1}{C_m}x$ , $I_d = \frac{1}{BlC_m}x$ ,可以解得音圈位移

$$x = \frac{BlC_mE}{Z} \cdot \frac{1}{j\omega C_m \left[ r_m + j\left( \omega m - \frac{1}{\omega C_m} \right) \right]} \quad (2)$$

共振频率

$$\omega_0 = \sqrt{k/m} \quad (3)$$

## 2 恒压源激励下影响参数分析

基于实验中使用的调制气流声源,取以下基本参数: $R = 5.7\Omega$ , $m = 0.05\text{kg}$ , $B = 1.0\text{T}$ , $l = 22.6\text{m}$ , $L = 2.5 \times 10^{-3}\text{H}$ 。采用恒压源激励, $E = 30\text{V}$ 。

### 2.1 气流压力对振动系统的影响

进行气流工作压力分别为 $10^5\text{Pa}$ (未加气)、 $2 \times 10^5\text{Pa}$ 、 $3 \times 10^5\text{Pa}$ 、 $4 \times 10^5\text{Pa}$ 条件下的振动系统实验。通过实验测得的电压、电流关系可得振动系统阻抗曲线(如图3)。从图3中可知,气流对音圈阻抗的影响主要体现在共振频率处。气流压力越大,阻抗峰值越小。压力为 $3 \times 10^5\text{Pa}$ 和 $4 \times 10^5\text{Pa}$ 时阻抗峰值基本相等,说明当压力大于 $3 \times 10^5\text{Pa}$ 时,气流对音圈的作用已经趋于饱和。加气后阻抗峰值位置,即共振频率与未加气时相比未发生明显偏移,始终为 $400\text{Hz}$ 左右,说明加载气流未明显改变弹性元件的弹性系数。利用式(3)可得振动系统的弹性系数 $k = 3.16 \times 10^5\text{N/m}$ 。

对等效电路分析可知,若忽略气流温度的影响,只有阻尼会因气流而改变。图4为以等效电路方法计算得到的阻抗曲线。理论计算时作了线性处理,即认为各参数均为常数。实验曲线与阻尼分别为 $5.5\text{N}\cdot\text{s/m}$ 、 $9.5\text{N}\cdot\text{s/m}$ 和 $21\text{N}\cdot\text{s/m}$ 的理论计算曲线基本吻合。当频率增大时,理论曲线与实验值出现一定的误差,主要是由于实验测量时受各种因素影响,如指针式电流表读数存在误差、集肤效应和温度变化使音圈参数发生改变等。在恒压源激励作用下,气流压力对振动系统的影响可通过音圈运动的阻尼 $r_m$ 来体现。对于所用声源,气流压力增大时,振动系统所受阻尼也逐渐增大,当压力达到 $3 \times 10^5\text{Pa}$ 后,

阻尼趋于稳定,  $r_m = 21\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ 。

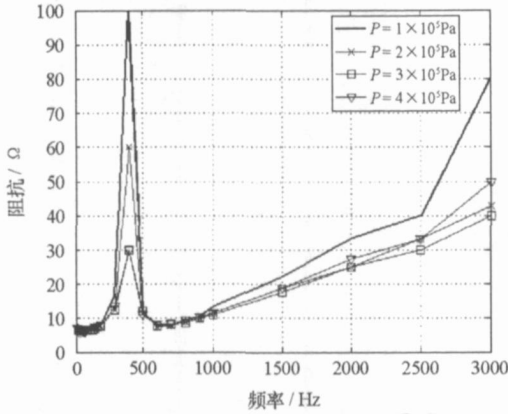


图 3 不同压力气流作用下的阻抗曲线  
Fig. 3 Impedance curves with different airflow pressure

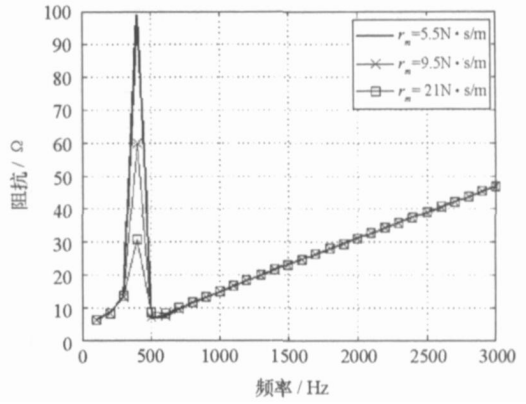


图 4 不同阻尼作用下的理论阻抗曲线  
Fig. 4 Theoretical impedance curves with different damp coefficients

### 2.2 弹性系数与磁感应强度对音圈振幅的影响

假设系统工作时气流压力为  $3 \times 10^5 \text{Pa}$ , 可认为阻尼  $r_m = 21\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ , 针对各参数进行了多组数值计算, 计算时只改变其中一种参数。下面选取与现实工程应用相近的数值说明各参数对振幅影响的一般规律。保持振动系统的其它参数不变, 利用式(2)对弹性系数  $k$  分别为  $3.16 \times 10^4 \text{N}/\text{m}$ ,  $3.16 \times 10^5 \text{N}/\text{m}$  和  $3.16 \times 10^6 \text{N}/\text{m}$  时振动系统的音圈振幅进行了计算, 得到的结果如图 5 所示, 可以看到, 弹性系数增大后, 振动系统的共振频率明显后移, 共振频率之前的平坦区域范围较宽, 即有效的调制频率范围宽, 但振幅要小很多, 即对气流的调制幅度较小。对语音广播而言, 若要达到较高的语言清晰度, 要求有效调制频率范围越宽越好, 但是若要达到对气流的有效调制, 则需要大振幅调制, 因此弹性系数较大的振动系统需要较高的输入功率。若要实现对低频的有效调制, 可根据振幅频率曲线选择弹性系数较小的弹性元件。

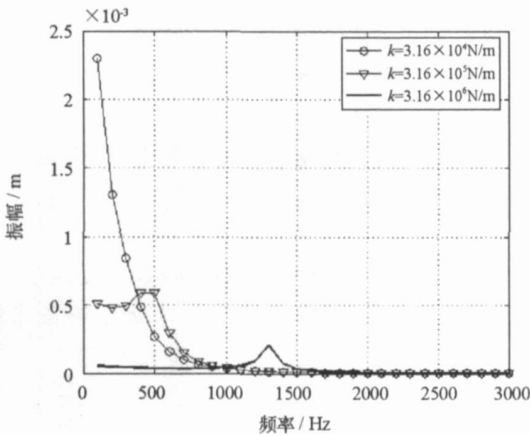


图 5 不同弹性系数  $k$  对应的振幅频率曲线  
Fig. 5 Amplitude-frequency curves with different coefficients of elasticity

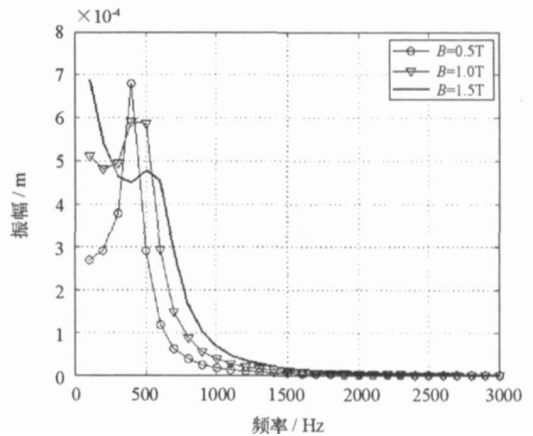


图 6 不同磁感应强度  $B$  对应的振幅频率曲线  
Fig. 6 Amplitude-frequency curves with different magnetic flux density

为研究磁隙磁感应强度  $B$  对音圈振幅的影响, 将  $B$  值分别取为  $0.5\text{T}$ 、 $1.0\text{T}$ 、 $1.5\text{T}$ , 利用式(2)得到的振幅频率曲线如图 6 所示。可以看出, 在低频时,  $B$  值越小, 振幅越小;  $B$  值越大, 则相应的振幅也就越大。随着频率的增大, 较小的  $B$  值会对应一个较大的振幅极大值, 之后迅速下降。相比之下, 较大  $B$  值的有效调制频率范围宽, 在低频和高频时调制幅度大, 因此提高磁隙的磁感应强度对于语音广播或者产生低频声波都是十分有利的。

### 2.3 音圈参数对振幅的影响

涉及音圈的参数有质量  $m$ 、直流电阻  $R$ 、电感  $L$  以及绕线方式等。假设系统气流压力为  $3 \times 10^5 \text{Pa}$ , 即阻尼  $r_m = 21\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$ , 弹性系数  $k = 3.16 \times 10^5 \text{N}/\text{m}$ , 音圈质量为振动的有效质量。保持振动系统的其它

参数不变,图7为利用式(2)得到的质量分别为0.03kg、0.05kg和0.1kg三种情况下的振幅频率曲线。质量小,则共振频率高,调制频率范围较宽;质量大,则共振频率低,在共振频率附近可以达到较高的振幅。在振动系统设计时可根据使用目的进行适当的选择。

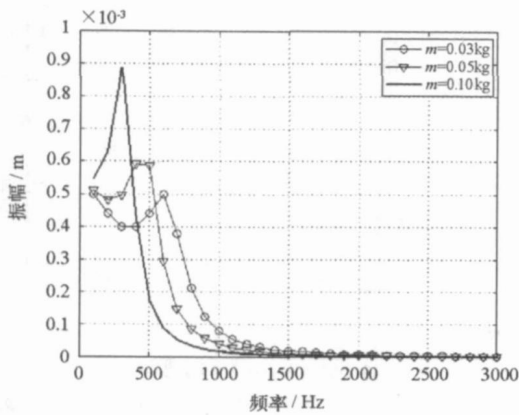


图7 不同质量  $m$  对应的振幅频率曲线

Fig. 7 Amplitude-frequency curves with different masses of voice coils

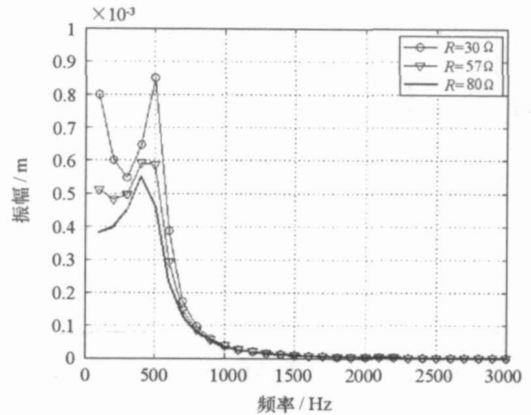


图8 不同电阻  $R$  对应的振幅频率曲线

Fig. 8 Amplitude-frequency curves with different resistances

保持其它参数不变,图8为利用式(2)得到的直流电阻分别为3 $\Omega$ 、5.7 $\Omega$ 和8 $\Omega$ 时计算得到的振幅频率曲线。电感分别为 $5.0 \times 10^{-4}$ H、 $2.5 \times 10^{-3}$ H和 $5.0 \times 10^{-3}$ H时的振幅频率响应与图8类似。可以看到,直流电阻  $R$  和电感  $L$  越小,振幅越大,有效调制频率范围越宽,对提高振动系统性能越有利。

注意到在实际应用中,音圈线材及绕线的总匝数确定时,改变绕线股数会影响振动系统的性能。若以  $n$  股绕线,相当于以  $n$  倍截面积的线材绕线,则电阻变为原来的 $1/n^2$ ,导线的有效长度变为原来的 $1/n$ ,即变量因子  $Bl$  变为原来的  $1/n$ ,其它参数不变。利用式(2)计算得到  $n=1, 2, 3$  时的振幅频率响应。结果表明,以单股绕线时,有效调制频率范围略宽,适于语音广播。而以多股绕线时,在共振频率附近有较大的调制幅度,适于产生特定频率的声波。

### 3 结论

(1) 气流对振动系统的作用以改变系统阻尼为主;

(2) 对于语音广播而言,要得到较清晰的语言清晰度,需要较宽的有效调制频率范围,可采用弹性系数较大的弹性元件,较大磁感应强度的磁路,所设计的音圈应具有较小的质量,较小的直流电阻和电感;绕线方式采用单股绕线等;

(3) 用于产生大功率低频声波时,特定频率要求有较大的气流调制幅度,可根据喷口高度大小,利用较小的弹性系数和高磁感应强度在低频段的大振幅特性,或利用位移共振频率处的大振幅特性来选择合适的弹性元件、磁路以及音圈参数。

### 参考文献:

- [1] 席葆树. 阻挡射流式扬声器[P]. 中国: CN 1064384A, 1992.
- [2] Meyer W A. Theoretical Analysis of the Performance of an Air-modulated Speaker[J]. J. Acoust. Soc. Am., 1969, 45(4): 957-965.
- [3] 马大猷. 调制气流声源的原理[J]. 物理学报, 1974, 23(1): 17-26.
- [4] 沈喆豪. 强噪声学[M]. 北京: 科学出版社, 1996, 64-72.
- [5] Glendinning A G, Nelson P A. Experiments on a Compressed Air Loudspeaker[J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 138(3): 479-491.
- [6] Peng M T, Flack T J. Numerical Analysis of the Coupled Circuit and Cooling Holes for an Electromagnetic shaker[J]. IEEE Trans. Magn, 2005, 41(1): 47-54.
- [7] Uchiyama Y, Fujita M. Robust Acceleration and Displacement Control of Electrodynamical Shaker[C]//Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on control Applications, Munich, Germany, 2006: 746-751.
- [8] 杜功焕, 朱哲民, 等. 声学基础[M]. 南京: 南京大学出版社, 2001: 117-158.