

依据扬声器的力学性质拓展其低频响应的电路原理初探

崔基建 王民英

赵亚宏

(河南大学 开封 475001)

(郑州大学 郑州 451191)

1994 年 12 月 13 日收到

摘要 本文阐述了在低频段闭箱上扬声器轴向远场声压频响平坦时,分别作用于扬声器阻尼、质量和弹性三元件上的力,以及这三个力与频率的关系以及这三个力间的相位关系.根据这些关系,提出了一种处理声频信号电压的电路原理.该电路将声频信号电压处理为分别与上述作用于三元件上的力相对应的三个信号电压,这三个信号电压相加后,再馈于扬声器,可拓展其低频响应.

关键词 扬声器系统,质量元件,加法器

A preliminary effort to extend speaker's low-frequency response with an electrical circuit based on the mechanical properties

Cui Jijian, Wang Mingying

Zhao Yahong

(Henan University, Kaifeng 475001)

(Zhengzhou University, Zhengzhou 451191)

Abstract When the low frequency response of sound pressure on speaker attached to closed box is uniform far at axis, the forces which act on three components of speaker, damping, mass and elasticity are discussed in this paper. The frequencies and phases with relation to three forces are also analysed. According to these relations, the circuit which can process voice signal voltage is presented. The circuit turns voice signal voltage into three signal voltages which correspond respectively to the forces on three components. After these three signal voltages are added and sent to speaker, the low frequency response can be extended.

Key words Loudspeaker system, Mass component, Electroic adder

1 引言

闭箱上的直接辐射式电动扬声器为一力学谐振系统(以下称为扬声器系统).扬声器系统的低频响应特性,基本上由系统的力学性质所决定.拓展扬声器系统的频响下限是很有意思

的.

本文首先阐述了在低频段扬声器系统轴向远场声压频响平坦时,分别作用于扬声器系统的阻尼、质量和弹性三元件上的力,这三个力与频率的关系以及这三个力之间的相位关系.根据这些关系,提出了一种对声频信号电压中

的低频信号进行补偿处理的电路原理. 把该电路补偿处理后的声频信号电压馈于扬声器系统, 可拓展扬声器系统辐射声压的频响下限. 以下所述扬声器系统的声压频响均为对于输入所提出电路的声频信号电压而言.

2 作用力与电路

在无限大障板上作简谐振动的活塞, 其轴向远场声压幅值的表达式为

$$P_m = \frac{\rho_0 c k d^2}{2r} V_m \quad (1)$$

式中: ρ_0 —— 空气的密度; c —— 空气中的声速; k —— 波数, $k = \omega/c$, ω 为活塞振动角频率; d —— 活塞半径; V_m —— 活塞振速幅值; r —— 测量点到活塞面几何中心的距离; P_m —— 距活塞面几何中心 r 处的声压幅值. 将 $k = \omega/c$ 代入式(1)则有

$$P_m = \frac{\rho_0 d^2 \omega}{2r} V_m \quad (2)$$

设活塞振动角频率在 ω_1 ($\omega_1 = 2\pi/s$) 时, 活塞振速幅值为 V_1 , 并设活塞振速幅值 V_m 与振动角频率 ω 成反比关系, 则

$$V_m = V_1 \omega_1 \frac{1}{\omega} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)即有

$$P_m = \frac{\rho_0 d^2 V_1 \omega_1}{2r} \quad (4)$$

由式(4)可知, 当活塞振速幅值与振动角频率成反比时, 活塞半径和测量点确定后, 活塞轴向远场声压幅值 P_m 为一恒量.

在扬声器系统的辐射条件为半空间自由场时, 设简谐策动力 $F = F_m \sin \omega t$ (F_m 为策动力幅值, ω 为策动力角频率, t 为时间.) 馈于扬声器系统, 扬声器系统的运动方程为

$$M_0 \frac{d^2 x}{dt^2} + R_0 \frac{dx}{dt} + K_0 x = F \quad (5)$$

式中: M_0 —— 扬声器系统质量元件的等效振动质量, 包括辐射质量; R_0 —— 扬声器系统阻尼元件的力阻, 包括辐射阻; K_0 —— 扬声器系统弹性元件的弹性系数; x —— 扬声器振膜的位移. 这里扬声器系统的等效振动质量 M_0 、力应用声学

阻 R_0 和弹性系数 K_0 均为扬声器系统在半空间自由场条件下测得的. 这里扬声器系统视为半空间自由场辐射条件下的单面活塞.

经过测量和计算可知, 一般低音扬声器系统的辐射质量约为等效振动质量的 10%, 在 $kd \leq 1$ 时, 不是常量的辐射质量所导致等效振动质量的误差小于 $\pm 3\%$. 对一般低音扬声器系统, 在 kd 由零变化到 $\sqrt{2}$ 时, 扬声器系统的辐射力阻则由零非线性地变化到, 相当于扬声器系统机械力阻的 1.5~3.5 倍, 而当 $kd \ll \sqrt{2}$ 时, 例如 $kd \leq \sqrt{2}/8$ 时, 辐射力阻至多为扬声器系统力阻的 10%, 因此在 $kd \leq \sqrt{2}/8$ 时, 扬声器系统力阻的误差小于 $\pm 5\%$. 关于扬声器系统放置位置的改变, 即辐射条件的改变, 所引起系统辐射质量和辐射力阻的改变, 本文暂不作讨论. 本文仅讨论扬声器系统在半空间自由场条件下辐射低频段声时的情况. 认为在 $kd \ll \sqrt{2}$ 时, 扬声器系统的等效振动质量 M_0 、力阻 R_0 和弹性系数 K_0 均接近常量.

解式(5), 知扬声器振膜振动的角频率为策动力的角频率, 其振动的位移 x 、振速 v 和振动加速度 a 为

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= \frac{F_m}{|Z|\omega} \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}) \\ v(t) &= \frac{F_m}{|Z|} \sin(\omega t - \varphi) \\ a(t) &= \frac{F_m \omega}{|Z|} \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} Z &= R_0 + j(M_0 \omega - K_0/\omega) \\ |Z| &= \sqrt{R_0^2 + (M_0 \omega - K_0/\omega)^2} \\ Z &= |Z| e^{j\varphi} \\ \varphi &= \text{tg}^{-1} \left(\frac{M_0 \omega - K_0/\omega}{R_0} \right) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Z —— 复数量, 扬声器系统的力阻抗; φ —— 振速与策动力之间的相位差; $F_m/|Z|\omega$ —— 振动位移的幅值; $F_m/|Z|$ —— 振动速度的幅值; $F_m \omega/|Z|$ —— 振动加速度的幅值.

式(6)用复数表示为

$$\left. \begin{aligned} a(t) &= V_m \omega e^{j(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})} \\ v(t) &= V_m e^{j(\omega t - \varphi)} \\ x(t) &= \frac{V_m}{\omega} e^{j(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $V_m = F_m / |Z|$.

由式(8)得,使扬声器振膜产生振动加速度的力 f_a 、速度的力 f_v 和位移的力 f_x 为

$$\left. \begin{aligned} f_a(t) &= M_0 V_m \omega e^{j(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{2})} \\ f_v(t) &= R_0 V_m e^{j(\omega t - \varphi)} \\ f_x(t) &= \frac{K_0 V_m}{\omega} e^{j(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2})} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

为了讨论方便,我们选用一新的复数平面,在此平面中,设 f_v 的初相位为零,而 φ 的意义则为 f_v 与策动力 F 之间的相位差,因此式(9)可写为

$$\left. \begin{aligned} f_a &= jM_0 V_m \omega \\ f_v &= R_0 V_m \\ f_x &= -jK_0 V_m / \omega \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

因此作用于扬声器系统的总力,即馈于扬声器系统的策动力 F 的复值为

$$F = f_a + f_v + f_x = R_0 V_m + j(M_0 V_m \omega - K_0 V_m / \omega) \quad (11)$$

设扬声器振膜振速幅值 V_m 与策动力角频率 ω 存在式(3)描述的反比关系,则有

$$F = R_0 V_1 \omega_1 \frac{1}{\omega} + j(M_0 V_1 \omega_1 - K_0 V_1 \omega_1 / \omega^2) \quad (12)$$

我们将 $R_0 V_1 \omega_1 / \omega$ 、 $jM_0 V_1 \omega_1$ 和 $jK_0 V_1 \omega_1 / \omega^2$ 所表示的作用力,分别称为作用于扬声器系统阻尼元件、质量元件和弹性元件上的力。将 $j(M_0 V_1 \omega_1 - K_0 V_1 \omega_1 / \omega^2)$ 所表示的作用力,称为作用于扬声器系统质量与弹性元件上的力。

由上述可知,若要扬声器系统轴向远场声压幅值为一恒量,则须使扬声器振膜振速(幅度值)与策动力的角频率成反比,此时扬声器系统所需的策动力如式(12)所描述。反之亦然,而式(12)表明,此时扬声器系统的策动力在系统中可分解为,分别作用于系统阻尼元件、质量元件和弹性元件上的三个力。这三个力与策动力角频率的关系,以及这三个力之间的相位

关系如下:作用于阻尼元件上的力(幅度值)与策动力的角频率成反比;作用于质量元件上的力(幅度值)为一恒量,比作用于阻尼元件的力超前 $\pi/2$ 弧度;作用于弹性元件上的力(幅度值)与策动力的角频率平方成反比,比作用于阻尼元件上的力滞后 $\pi/2$ 弧度。

在扬声器的电——力转换器线性范围内,即设扬声器空隙磁通密度 B 和音圈导线有效长度 l 均为常量。我们设计了图1所示的电路,其中声频信号电压 U_r 、 U_m 和 U_k 分别对应式(12)所描述的作用于扬声器系统阻尼元件、质量元件和弹性元件上的三个力,即以 U_r 、 U_m 和 U_k 类比这三个力。

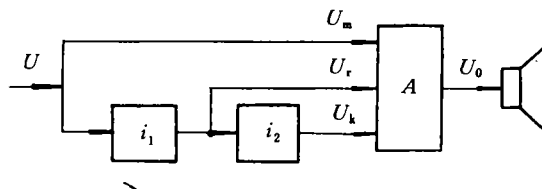


图1 依据闭箱上扬声器的力学性质处理声频信号的电路

i_1 ——积分器1; i_2 ——积分器2; A ——加法器;

U ——输入该电路声频信号电压的复值; U_m ——等于 U ;

U_r ——积分器1所输出声频信号电压的复值;

U_k ——积分器2所输出声频信号电压的复值;

U_0 ——加法器所输出声频信号电压的复值;

据积分器的性质,设输入电路的声频信号电压 U 为简谐信号,其幅值为 U_a (U_a 为一恒量),则有

$$\left. \begin{aligned} U_m &= jU_a \\ U_r &= U_a R \frac{1}{\omega} \\ U_k &= -jU_a K \frac{1}{\omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 R 和 K 分别为积分器1和积分器2所决定的常数。

设加法器的电压放大倍数为 G ,且加法器为正相加法器,则加法器所输出的声频信号电压

$$U_0 = G \left[U_a R \frac{1}{\omega} + j \left(U_a - U_a K \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \quad (14)$$

在式(14)中,使 U_a 与式(12)中的 $M_0V_1\omega_1$ 相对应,适当选取积分器1和积分器2的电路参数,可使 U_aR/ω 与式(12)中的 $R_0V_1\omega_1/\omega$ 相对应;使 U_aK/ω^2 与式(12)中的 $K_0V_1\omega_1/\omega^2$ 相对应;仅有上述对应关系还不够,因为加法器输出的与作用于扬声器系统阻尼元件上的力相对应的声频信号电压,须与振膜的振速同步.这样,加法器输出的与作用于系统阻尼元件上的力相对应的声频信号电压,经扬声器电——力转换器转换为作用于系统阻尼元件上的力时,不仅受到扬声器音圈直流电阻 R_E 的阻尼,还受到音圈振动所产生动生阻 B^2l^2/R_0 的阻尼.而加法器输出的与作用于扬声器系统质量与弹性元件上的力相对应的声频信号电压,经电——力转换器转换为作用于系统质量与弹性元件上的力时,仅受到音圈直流电阻 R_E 的阻尼,所以必须使

$$\left. \begin{aligned} U_m &= jU_a \\ U_r &= U_a \left(1 + \frac{B^2l^2}{R_0R_E} \right) R \frac{1}{\omega} \\ U_k &= -jU_aK \frac{1}{\omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

下面将会看出,只有当加法器所输出的声频信号电压 U_0 为

$$U_0 = G \left[U_a \left(1 + \frac{B^2l^2}{R_0R_E} \right) R \frac{1}{\omega} + j \left(U_a - U_aK \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \quad (16)$$

时, U_0 经电——力转换器转换出的策动力,才能满足式(12).

我们将 $U_a(1+B^2l^2/R_0R_E)R/\omega$ 、 jU_a 和 $-jU_aK/\omega^2$ 所表示的声频信号电压,分别称为作用于扬声器系统阻尼元件、质量元件和弹性元件上的声频信号电压.将 $j(U_a+U_aK/\omega^2)$ 所表示的声频信号电压,称为作用于扬声器系统质量与弹性元件上的声频信号电压.

需指出的是,这里取用正相加法器仅是为了讨论方便,加法器最好为反相加法器.这样,加法器所输出的分别作用于扬声器系统三个元件上的声频信号电压与输入的分别作用于这三个元件上的声频信号电压反相,但加法器应用声学

输入与输出的各自三个信号电压之间的相位关系不变.还需指出的是,加法运算可由功率放大器进行,非功率放大器的加法器可续接一功率放大器来驱动扬声器系统.

如果将加法器所输出的满足式(16)的声频信号电压 U_0 ,代入扬声器系统低频时的等效力学电路,经运算会知道扬声器振膜振速幅值 V_m 与振动角频率 ω 成反比,从而可知扬声器系统轴向远场声压幅值 P_m 为一恒量.这些运算请参阅文后附录A.

下面尝试用另一种方法来阐述加法器输出满足式(16)的声频信号电压 U_0 馈于扬声器系统后, P_m 为一恒量.

将满足式(16)的信号电压 U_0 馈于扬声器系统,不考虑加法器的输出内阻及音圈的感抗,则通过音圈的声频信号电流 I_0 的复值为

$$I_0 = G \left[\frac{U_a(1+B^2l^2/R_0R_E)R}{R_E+B^2l^2/R_0} \cdot \frac{1}{\omega} + j \left(\frac{U_a}{R_E} - \frac{U_aK}{R_E} \cdot \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \quad (17)$$

加法器输出的作用于扬声器系统阻尼(包括动生阻)元件上的声频信号电压,经电——力转换器转换为作用于系统阻尼元件上的力时,要受到音圈直流电阻 R_E 与动生阻 B^2l^2/R_0 之和 $R_E+B^2l^2/R_0$ 的阻尼.加法器输出的作用于扬声器系统质量与弹性元件上的声频信号电压,经电——力转换器转换为作用于系统质量与弹性元件上的力时,仅受到音圈直流电阻 R_E 的阻尼.因此式(17)中的实数部分为

$$\frac{GU_a(1+B^2l^2/R_0R_E)R/\omega}{R_E+B^2l^2/R_0}$$

$$\text{即} \quad \frac{GU_a(1+B^2l^2/R_0R_E)R}{R_E+B^2l^2/R_0} \cdot \frac{1}{\omega}$$

虚数部分为

$$+ j \frac{G(U_a - U_aK/\omega^2)}{R_E}$$

$$\text{即} \quad + jG \left(\frac{U_a}{R_E} - \frac{U_aK}{R_E} \cdot \frac{1}{\omega^2} \right)$$

因为

$$R_E+B^2l^2/R_0=R_E(1+B^2l^2/R_0R_E) \quad (18)$$

所以

$$I_0 = \frac{G}{R_E} \left[U_a R \frac{1}{\omega} + j \left(U_a - U_a K \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \quad (19)$$

那么馈于扬声器系统的策动力复值为

$$F = BI I_0 \\ = \frac{GBI}{R_E} \left[U_a R \frac{1}{\omega} + j \left(U_a - U_a K \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \quad (20)$$

据 U_a 对应 $M_0 V_1 \omega_1$; $U_a R / \omega$ 对应 $R_0 V_1 \omega_1 / \omega$; $U_a K / \omega^2$ 对应 $K_0 V_1 \omega_1 / \omega^2$, 设

$$\left. \begin{aligned} U_a &= n M_0 V_1 \omega_1 \\ U_a R \frac{1}{\omega} &= n R_0 V_1 \omega_1 \frac{1}{\omega} \\ U_a K \frac{1}{\omega^2} &= n K_0 V_1 \omega_1 \frac{1}{\omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中 n 为比例常数. 将式(21)代入式(20)则

$$F = \frac{nGBI}{R_E} \left[R_0 V_1 \omega_1 \frac{1}{\omega} + j \left(M_0 V_1 \omega_1 - K_0 V_1 \omega_1 \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \quad (22)$$

由式(22)可知, 当加法器所输出的信号电压 U_0 满足式(16)时, 该电压馈于扬声器系统, 经电——力转换器转换出的策动力, 可分解为分别作用于系统阻尼元件、质量与弹性元件上的力, 如式(12).

F 的绝对值为

$$|F| = \frac{nGBI V_1 \omega_1}{R_E} \cdot \frac{1}{\omega} \sqrt{R_0^2 + (M_0 \omega - \frac{K_0}{\omega})^2} \quad (23)$$

在式(7)中, 扬声器系统的力阻抗的绝对值为

$$|Z| = \sqrt{R_0^2 + (M_0 \omega - \frac{K_0}{\omega})^2} \quad (24)$$

扬声器振膜的振速幅值 V_m 为

$$V_m = \frac{|F|}{|Z|} \quad (25)$$

将式(23)与式(24)代入式(25)得

$$V_m = \frac{nGBI V_1 \omega_1}{R_E} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (26)$$

综上所述, 加法器所输出的满足式(16)的声频信号电压 U_0 馈于扬声器系统, 经电——力转换器转换出的策动力 F , 分解为分别作用于系统阻尼元件、质量与弹性元件上的力满足式(12). 式(26)表明, 策动力 F 可使扬声器振

膜的振速幅值 V_m 与振动角频率 ω 成反比. 因此据式(4)可知, 扬声器系统轴向远场声压幅值 P_m 为一恒量.

3 结束语

以上是在加法器(或功率放大器)最大输出电压无限制, 以及扬声器振膜的线性位移量无限制情况下讨论的. 由此可知, 扬声器系统声压频响可向低端平坦延申. 但是在应用这一电路拓展中, 小型闭箱上扬声器的低频响应时, 其频响下限要受到加法器(或功率放大器)的最大输出电压、扬声器振膜的线性位移量这两者的限制. 因此在应用这一电路时, 要采取一些措施(例如, 滤除一些甚低频信号), 使扬声器系统辐射声的非线性失真不超过允许值. 此外还可采用动态反馈技术来降低扬声器系统辐射声的非线性失真. 如何运用动态反馈技术, 有待进一步研究.

本文仅初步讨论了所提出电路的原理, 其实验验证, 有待改善实验条件, 进一步研究.

致谢 撰写本文, 承蒙管善群先生及其他诸位先生的教诲、帮助和支持, 笔者在此谨向他们致以深深的感谢.

参 考 文 献

- [1] 管善群, 电声技术基础, 第一版. 北京: 人民邮电出版社, 1982, 142 — 236, 264 — 272;
- [2] 何祚镛, 赵玉芳, 声学理论基础, 第一版. 北京: 国防工业出版社, 1981, 5 — 18;
- [3] 余家望, 电声技术, 1989(4): 5 — 9;
- [4] 管善群, 改善扬声器低频重放特性的电声学方法, 中国声学学会年会论文集, 1986;
- [5] 沈壕, 电声技术, 1992(5): 2 — 5.

附录 A

低频时, 不考虑加法器的输出内阻及扬声器音圈的感抗, 扬声器系统的等效力学电路如图 A1 所示. 图中 F_0 为力源.

将加法器所输出的满足式(16)的声频信号电压 U_0 代入下式

$$F_0 = \frac{BI U_0}{R_E} \quad (27)$$

F_0 的绝对值为

$$|F_0| = \frac{nGBIV_1\omega_1}{R_E} \cdot \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(R_0 + \frac{B^2l^2}{R_E}\right)^2 + \left(M_0\omega - \frac{K_0}{\omega}\right)^2} \quad (31)$$

在图 2 中, 扬声器系统的等效力学阻抗 Z_0 为

$$Z_0 = \frac{B^2l^2}{R_E} + R_0 + jM_0\omega - j\frac{K_0}{\omega} \quad (32)$$

Z_0 的绝对值为

$$|Z_0| = \sqrt{\left(R_0 + \frac{B^2l^2}{R_E}\right)^2 + \left(M_0\omega - \frac{K_0}{\omega}\right)^2} \quad (33)$$

扬声器振膜的振速幅值为

$$V_m = \frac{|F_0|}{|Z_0|} \quad (34)$$

将式(31)与式(33)代入式(34)则

$$V_m = \frac{nGBIV_1\omega_1}{R_E} \cdot \frac{1}{\omega} \quad (35)$$

上式说明, 当加法器所输出的满足式(16)的声频信号电压 U_0 馈于扬声器系统, 可使扬声器振膜的振速幅值 V_m 与振动角频率 ω 成反比. 因此根据式(4)可知, 扬声器系统轴向远场声压幅值 P_m 为一恒量.

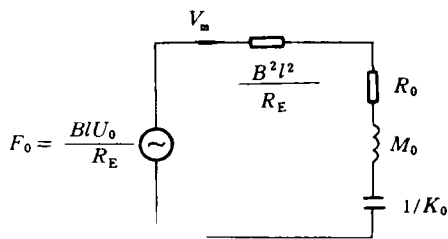


图 A1 低频时扬声器系统的等效力学电路

得到

$$F_0 = \frac{GBI}{R_E} \left[U_a \left(1 + \frac{B^2l^2}{R_0R_E} \right) R \frac{1}{\omega} + j \left(U_a - U_a K \frac{1}{\omega^2} \right) \right] \quad (28)$$

据 U_a 对应 $M_0V_1\omega_1$; U_aR/ω 对应 $R_0V_1\omega_1/\omega$; U_aK/ω^2 对应 $K_0V_1\omega_1/\omega^2$, 设

$$\left. \begin{aligned} U_a &= nM_0V_1\omega_1 \\ U_aR \frac{1}{\omega} &= nR_0V_1\omega_1 \frac{1}{\omega} \\ U_aK \frac{1}{\omega^2} &= nK_0V_1\omega_1 \frac{1}{\omega^2} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中 n 为比例常数. 将式(29)代入式(28)则

$$F_0 = \frac{nGBIV_1\omega_1}{R_E} \cdot \frac{1}{\omega} \left[\left(R_0 + \frac{B^2l^2}{R_E} \right) + j \left(M_0\omega - \frac{K_0}{\omega} \right) \right] \quad (30)$$

(上接第 39 页)

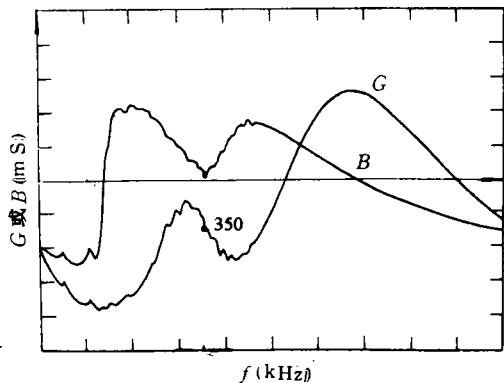


图 3 阻抗匹配后的换能器导纳曲线

联上 $15.2 \mu\text{H}$ 的电感后, $Z'_0 = Z_0 + j\omega L = 65.93 - 32.47j(\Omega)$, 代入(5)式可求得变压器输出阻抗 $Z_R = 99.70 - 0.31j(\Omega)$, 实测 $Z_R = 99.58$

应用声学

+ $0.26j(\Omega)$. 可见换能器同发射机同样达到了调谐和阻抗匹配, 其导纳曲线类同图 3.

5 结论

在工程设计中, 只要将(5)、(6)、(10)、(12)、(14)和(16)编成程序, 将换能器工作频率 f_0 , 导纳 $G_0 + jB_0$ 及激励源内阻 R 输入计算机, 就可以迅速计算出变压器各参数. 测出根据各参数设计出的变压器 Z_1 , Z_2 和 Z_{R0} , 输入计算机, 就可以迅速计算出各换能器匹配所需的补偿电容或电感及相应的输出阻抗. 理论计算和实测值相吻合. 按此方法设计出的变压器输出阻抗一致性很好, 达到了预期的要求和匹配效果.

因此, 这种设计是换能器阻抗匹配行之有效的. 设计方法.