

耳机声旁路系统对声频响的控制

傅慧忠 徐根棠

(上海飞乐电声总厂)

由耳机中电声换能器所激发的重放声场特性,一方面取决于电声换能器的性能,另一方面则受到声重放空间边界条件的控制。本文对耳机声旁路系统建立各种边界条件的低频声频响的控制进行分析,并给出具体设计方法。

它的模可用下式表示:

一、耳机的声频响特性

耳机声旁路系统可建立各种声重放空间的边界条件,边界条件的变化就引起耳机辐射阻抗的变化,从而导致重放声场特性也变化。图(1)是耳机重放空间的声结构图,图(2)是其声等效线路。

图中 $S=j\omega$, $P_i(S)$ 是外激励器的等效恒声压源, $P_o(S)$ 是声重放空间中的声压。

$$\text{设: } Z_1 = R_S + SM_S + \frac{1}{SC_S}$$

$$Z_3 = R_L$$

$$Z_4 = 1/SC_B$$

图(2),耳机的声频响 $G(S)$ 即为:

$$G(S) = \frac{P_o(S)}{P_i(S)} = \frac{Z_1 Z_2 Z_3}{Z_1 Z_2 Z_3 + Z_1 Z_2 Z_4 + Z_1 Z_3 Z_4 + Z_2 Z_3 Z_4} \quad (1)$$

有四种典型情形:

$$1. \quad Z_2 = R_P + SM_P + \frac{1}{SC_P}$$

这里, R_P 、 M_P 、 C_P 分别为声旁路系统的声阻、声质量和声顺,这种声旁路系统的特点在于其本身是一个谐振系统。由(1)式可得其声频响

$$G(S) = \frac{D_1 S^3 + D_2 S^2 + D_3 S}{C_1 S^5 + C_2 S^4 + C_3 S^3 + C_4 S^2 + C_5 S + C_6}$$

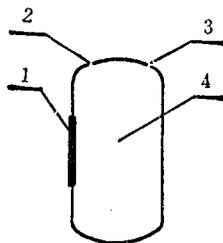


图1 耳机重放空间的声结构

- 1—耳机中的电声换能器 2—声旁路系统
3—耳机与耳翼耦合处的声泄漏口 4—声重放空腔

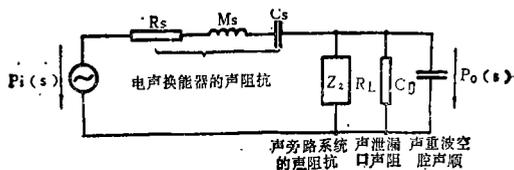


图2 耳机重放的声学等效线路

$$|G(S)| = \left(\frac{B_1 \omega^6 + B_2 \omega^4 + B_3 \omega^2}{A_1 \omega^{10} + A_2 \omega^8 + A_3 \omega^6 + A_4 \omega^4 + A_5 \omega^2 + A_6} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中:

$$A_1 = C_1^2$$

$$A_2 = C_2^2 - 2C_1 C_3$$

$$A_3 = C_3^2 + 2C_1 C_5 - 2C_2 C_4$$

$$A_4 = C_4^2 + 2C_2 C_6 - 2C_3 C_5$$

$$A_5 = C_5^2 - 2C_4 C_6$$

$$A_6 = C_6^2$$

$$B_1 = M_P^2 R_L^2 / C_B^2$$

$$B_2 = (R_P^2 - 2M_P / C_P) / C_B^2$$

$$B_3 = R_L^2 / C_B^2 C_P^2$$

$$C_1 = M_P M_S R_L$$

$$C_2 = \frac{M_S M_P}{C_B} + R_L R_P M_S + R_L R_S M_P$$

$$C_3 = \frac{R_L M_P + R_P M_S + R_S M_P + R_L M_S}{C_B} +$$

$$\frac{R_L M_S}{C_P} + \frac{R_L M_P}{C_S} + R_L R_P R_S$$

$$C_4 = \frac{R_L R_P + R_P R_S + R_L R_S}{C_B} +$$

$$\frac{R_L R_S}{C_P} + \frac{R_L R_P}{C_S} + \frac{M_P}{C_B C_S} + \frac{M_S}{C_B C_P}$$

$$C_5 = \frac{R_L + R_S}{C_B C_P} + \frac{R_L + R_P}{C_B C_S} + \frac{R_L}{C_P C_S}$$

$$C_6 = \frac{1}{C_B C_P C_S}$$

$$2. Z_2 = R_P + C M_P$$

这种阻抗的声旁路实际上是第一种声旁路的特例，在(2)式中只要令 $C_P \rightarrow \infty$ ，即可得到对应的声频响为：

$$|G(S)| = \left(\frac{E_1 \omega^4 + E_2 \omega^2}{E_3 \omega^8 + E_4 \omega^6 + E_5 \omega^4 + E_6 \omega^2 + E_7} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中 $E_1 \sim E_7$ 均为常数。

$$3. Z_2 = R_P$$

这种声旁路的阻抗是一个纯阻，它是第一种声旁路的另一种特例，在(2)式中若令 $C_P \rightarrow \infty$ 和 $M_P \rightarrow 0$ ，即可得到这种例子对应的声频响 $|G(S)|$ ：

$$|G(S)| = \left(\frac{F_1 \omega^2}{F_2 \omega^6 + F_3 \omega^4 + F_4 \omega^2 + F_5} \right)^{1/2} \quad (4)$$

式中 $F_1 \sim F_5$ 均为常数。

$$4. |Z_2| \rightarrow \infty$$

这种声旁路仍然是第一种声旁路的又一特例而已，在(2)式中如果令 $R_P \rightarrow \infty$ ，就得到了其对应的声频响见下式：

$$|G(S)| = \left(\frac{H_1 \omega^2}{H_2 \omega^6 + H_3 \omega^4 + H_4 \omega^2 + H_5} \right)^{1/2}$$

(5)

式中 $H_1 \sim H_5$ 均是常数。

不难看出，上述四种形式的声旁路系统所对应的声频响特性都为带通滤波器，第1种形式阶数最高，为五阶，第2种次之，为四阶，第3、4种最低，是三阶。显然，第一种形式的声旁路系统对声频响的控制能力最强，由于其它种声旁路均为第一种的不同特例，故仅详细分析第1种的控制情况就可以了。

二、 $Z_Z = R_P + S M_P + 1/S C_P$ 时的控制情况

设 W_P 、 W_S 、 Q_P 、 Q_S 分别为声旁路系统和耳机中电声换能器的谐振圆频率及品质因数：

$$\omega_{P(S)} = \left(\frac{1}{M_{P(S)} C_{P(S)}} \right)^{1/2}$$

$$Q_{P(S)} = \omega_{P(S)} M_{P(S)} / R_{P(S)}$$

重放声场的相对声压级为：

$$P(\omega) = 20 \lg |G(S)|^2$$

对(2)式进行计算可得频响的变化曲线，如图(3)~(6)，图中的参数除注明外，取： $C_B = 7.12 \times 10^{-10}$ 米⁵/牛顿，

$M_S = 100$ 千克/米⁴， $M_P = 0.05$ 千克/米⁴， $F_S = 100$ Hz， $F_P = 200$ Hz， $Q_S = 1$ ， $Q_P = 1$ ， $R_T = 10^6$ 牛顿/米⁵。

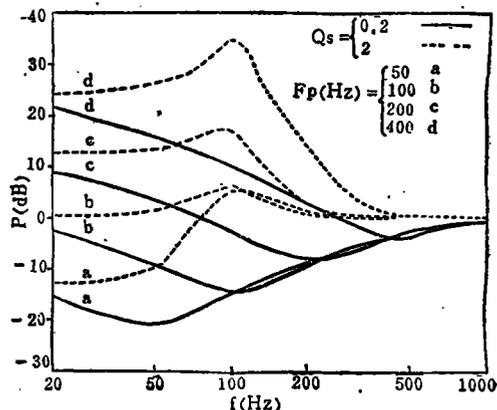


图3 频响曲线

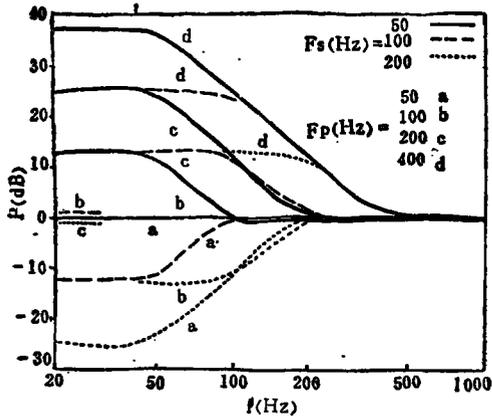


图4 频响曲线

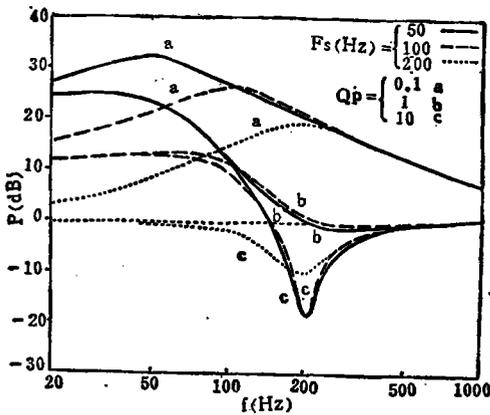


图5 频响曲线

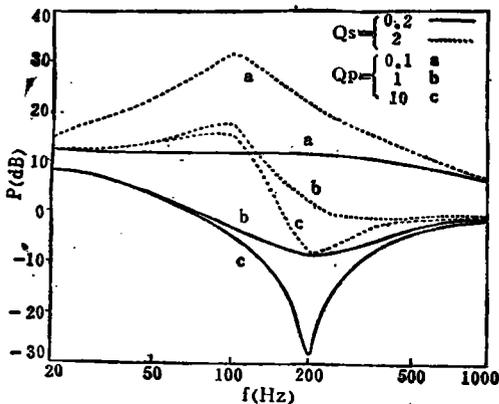


图6 频响曲线

根据(2)式和图(3)~(6),第1种形式的声旁路对声频响的控制曲线中:

1. 当 $F_P > F_S$ 时

此时若 $Q_P = Q_S = 1$, 见图(7a), 频响曲线可分为三段: $f \leq F_S$ 段, 频响基本平直, 且抬高 $\Delta_1 = 20 \lg \left(\frac{F_P}{F_S} \right)^2$ dB; $F_S < f < F_P$ 段, 曲线以 12dB/oct 的趋势下降; $f > F_P$ 段, 频响又呈平直。

若 $Q_P = Q_S > 1$, 见图(7c), 频响曲线在 F_S 处出现峰值, 在 F_P 处出现谷点, 在 $f < F_S$ 段, 曲线随着频率的减小趋于抬高 Δ_1 dB; $F_S < f < F_P$ 段, 频响以 > 12 dB/oct 下降; $f > F_P$ 段, 则趋于平直。

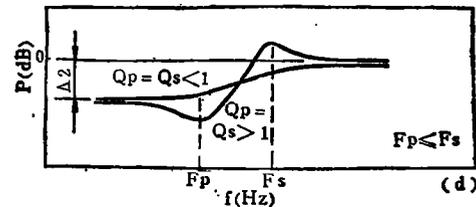
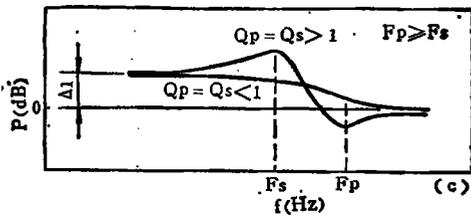
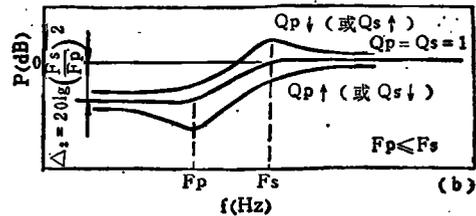
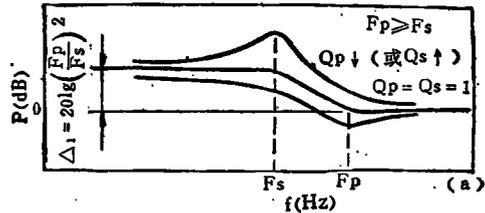


图7 频响曲线

若 $Q_P = Q_S < 1$, 仍在图(7c)中, 能见到频响曲线以 < 12 dB/oct 单调下降。

2. 当 $F_P < F_S$ 时

此时若 $Q_P=Q_S=1$, 见图(7b), 频响曲线亦分为三段: $f \leq F_P$ 段, 曲线基本平直, 且下跌 $\Delta_2 = 20 \lg\left(\frac{F_S}{F_P}\right)^2$ dB; $F_P < f < F_S$ 段, 曲线以 12dB/oct 上升; $f \geq F_S$ 段, 频响是平直的。

若 $Q_P=Q_S > 1$, 见图(7d), 频响分别在 $F_P \cdot F_S$ 处出现谷点和峰值。在 $f < F_P$ 段, 曲线随着频率的减小趋于下跌 Δ_2 dB; 而 $F_P < f < F_S$ 段, 频响则以 > 12 dB/oct 上升; 再看 $f > F_S$ 段曲线是趋于平直的。

若 $Q_P=Q_S < 1$, 还在(7d)中, 频响曲线是以 < 12 dB/oct 的斜率单调上升的。

3. 当 $F_P = F_S$ 时

此时若 $R_L \rightarrow \infty$, $Q_P = Q_S$, 则可获得平直的频响曲线。由(2)式计算可知, R_L 对频响的平直度有直接的影响, 表现为能随着 R_L 的减小而增大。在 R_L 相同时, R_L 对频响的影响是随着 $F_P (= F_S)$ 的减小和 $Q_P (= Q_S)$ 的增大而减小的。

4. 当 $Q_P \neq Q_S$ 时

此时相对于以上各种 $Q_P = Q_S$ 情况下的频响曲线表现为: Q_P 的增大或减小(亦即 Q_S 的减小或增大), 将引起频响曲线的下跌或上升, 而受影响最甚者为 $F_P (= F_S)$ 处。

5. 当 Q_P 和 F_P 固定时, M_P 的变化主要使频响曲线上下平移。

三、设计实例

1. 频响要求:

频响曲线在 $f < 100$ Hz 段抬高 6dB, 从 $f = 150$ Hz 始基本平直。

2. 声旁路阻抗选择:

阻抗选 $Z_2 = R_P + SM_P + \frac{1}{SC_P}$ 形式, 这种

声旁路阻抗的实现可有多种方式, 这里采用从动振膜, 即在声旁路位置处利用无源振膜来实现。

3. 参数确定:

方案一:

取 $F_S = 100$ Hz

$Q_S = 1$

这样 $Q_P = 1$

由 $20 \lg(F_P/F_S)^2 = 6$ dB 得 $F_P = 141$ Hz, 计算所对应的频响见图(8)中的曲线(a)

方案二:

取 $F_S = 115$ Hz

$F_P = 200$ Hz

此时若使 $Q_P = Q_S = 1$, 则 $f < 110$ Hz 段会将曲线抬高 9.6 dB [$20 \lg(F_P/F_S)^2$], 约在 200 Hz 始起平直, 见图(8)中的曲线(b), 未达到要求。为此可通过调节阻尼, 逐渐减小 Q_S , 增大 Q_P (调节时应考虑中、高频特性)使频响基本达到要求。

第二种方案频响曲线在 150 Hz 后的平直度较第一种方案略差, 对声泄漏也略敏感, 但其优点是实现容易, 且也能达到要求。

根据第二种方案所设计的耳机, 实样测得声频响曲线如图 9 所示, 达到原定要求。

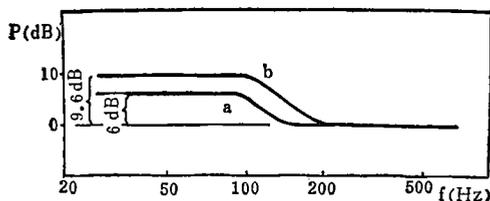


图 8 频响曲线

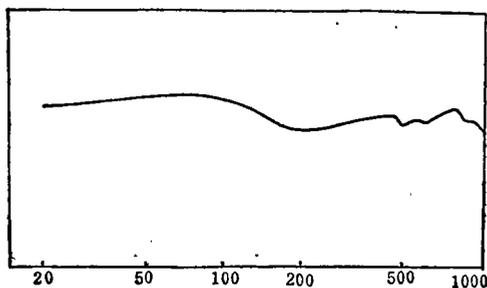


图 9 频响曲线

(下转第31页)

度允许的情况下距管内壁越薄越好。在收发换能器固定面侧壁开有一道深而窄的槽。由于空气与管壁材料声阻抗相差很大，因此接收换能器接收到的沿管壁传播的超声波大大减小，从而提高了接收的信噪比。

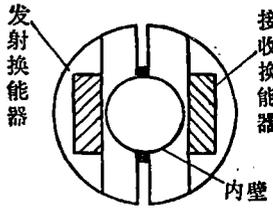


图2 换能器固定处断面结构

三、主要技术指标

工作频率：450 ± 20KHz

工作方式：连续

管中流速：≥0.4米/秒

灵敏度：气泡 φ ≥ 0.4mm

功耗：直流 6V ≤ 2W

重量：5kg

体积：210 × 300 × 150mm

四、整机试验结果

在整机装配好后，进行了检测流动水中小气泡的试验。采用医用玻璃微电极产生小气泡，用读数显微镜测量气泡直径。试验结果表明，该机灵敏度已达到或超过设计指标，且可靠性很高，对单个气泡计数准确，极少漏过。目前，该仪器已交付有关厂家试用，将在生产中发挥其作用。

（上接第39页）

四、结 论

1. 耳机声旁路系统对声频响有很大的控制能力，最明显处在 $f < 1\text{KHz}$ 段，且声旁路阻抗本身是谐振系统时，控制能力最强，此时所对应的声频响具有(2)式所示的五阶带通滤波器的特性。

2. 当声旁路阻抗是谐振系统时，耳机获得平直的声频响。条件是：

$$Q_P = Q_S$$

$$F_P = F_S$$

$$R_L \rightarrow \infty$$

当 $R_L \geq 10^6$ 时，频响的不均匀度小于 0.1dB。考虑到耳机实际工作状态总有一定的声泄漏，为了减少声泄漏对频响的影响，在耳机实际工作状态时也能得到较平直的频响，可

从两方面采取措施：一方面 F_S 不宜太大， Q_S 不宜太小；另一方面可把频响曲线在 $R_L \rightarrow \infty$ 条件下设计成“抬高”形状，即大约在 $f < F_S$ 频段内使频响抬高几个分贝，其值视具体使用情况而定。

3. 当声旁路阻抗是谐振系统时，可方便地使频响曲线在小于某一频率的频段内抬高或下跌。

朱国春、潘正源同志对本文中的工作提出了一些重要的意见和建议，在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] H. F. 奥尔森. 《声学工程》，(科学出版社, 1964)
- [2] C. A. Poldy, "Electrical Analogs for membranes with Application to Earphones", J. Audio Eng. Soc., Vol. 31, No. 11, 1983 November
- [3] 松本隆志, 山内健治, "薄型、轻量ヘッドホニ EA H-T ツリズ", National Technical Report Vol, 26. No. 2, Apr. 1980.