

磁性录音频率补偿网络的研究

杨 朝

上海录音器材厂

一九七九年十月

中国电子学会 录音技术交流会文件

(二)



前 言

本书是作者多年来从事磁性录音机频率补偿网络研究的一份总结，是1975年发表的“磁性录音机频率补偿网络的设计”一文的继续和发展。

这次发表较之“磁性录音机频率补偿网络的设计”一文有下列更动：

1. 为了适应盒式磁带录音机大发展的新形势，增设第五章“其它两种常见的高频提升电路”。内中对盒式录音机中常用的两种补偿电路的设计与调整方法进行了较为详细的叙述。
2. 为了不使篇幅太长，对原有的基础部分作了一些删节。
3. 为了方便阅读，文中采用国际文献通用符号以求一致。

本文写作过程中，承蒙罗明坚、王弥同、蔡建国、顾建发等同志大力协助。他们帮助作者做了大量的实验，并且在百忙中参与制图，抄写等事务工作。对他们的真诚支持，谨表示深深地感谢。

杨 朝

1979. 6.

目 录

1. 基础知识	1
1.1 录放音过程中的高频损耗	1
1.2 通用曲线	1
2. 频率补偿的基本概念	19
2.1 频率补偿的必要性	19
2.2 频率补偿在录放音放大器中的分配	19
2.3 频率补偿网络设计与调整程序	23
3. 二级负反馈式频率补偿网络的设计与调整	25
3.1 通用电路及其分析	25
3.2 第一种低频提升电路	28
3.3 第二种低频提升电路	32
3.4 第一种高频提升电路	38
3.5 第二种高频提升电路	43
4. 阻容分压式频率补偿网络设计	51
4.1 低频提升网络	51
4.2 高频提升网络	55
5. 其他两种常见的高频提升电路	60
5.1 录音放大器输出级的高频提升电路	60
5.2 放音放大器前置级的高频提升电路	65

磁性录音频率补偿网络的研究

上海录音器材厂 杨朝

磁性录音电路的一个特殊部份是频率补偿网络。国内外文献中对此多所提及，但系统的理论，详细的分析未曾见过。本文对录、放过程高频损耗及微分效应对频响的内在联系进行了理论分析。在上述基础上对常见的补偿网络用网络分析方法导出了设计公式，给出补偿网络的设计与调整方法。

1. 基础知识

1.1 录放音过程中的高频损耗

录、放音过程中都具有一系列高频损耗。这些损耗的大小取决于：①磁头质量，②磁带质量，③磁头与磁带的相对位置。

1.1.1 录音过程中的高频损耗

录音过程中的高频损耗有下列五项：

- (1) 偏磁消音损耗
- (2) 录音间隔损耗
- (3) 自去磁损耗
- (4) 厚度损耗
- (5) 录音头铁耗

1.1.2 放音过程中的高频损耗

放音过程中的高频损耗有四项：

- (1) 放音间隔损耗
- (2) 缝隙损耗
- (3) 方位角损耗
- (4) 放音头铁耗

1.2 通用曲线

许多电路具有相同的频响。概括这些共性的曲线称为通用曲线。通用曲线分A曲线和B曲线两种。

1.2.1 A 曲线

A 曲线又分 A_1, A_1', A_2, A_2' 四种。分述如下:

(1) A_1 曲线——高频衰减

① 举例

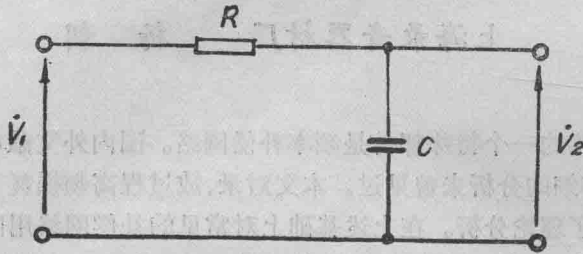


图 1.1 阻容耦合放大级的高频衰减电路

在图 1.1 中, 电压比为

$$\dot{K} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j2\pi fRC}$$

或

$$\dot{K} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_0}}$$

其中

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

② 表达式

A_1 曲线传输函数的一般表达式为

$$\dot{K} = \frac{K_0}{1 + j\frac{f}{f_0}} \quad (1.1)$$

其中 K_0 为 $f=0$ 时的传输函数。 \dot{K} 的模为

$$K = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}} \quad (1.2)$$

相对增益为

$$K(\text{dB}) = 20 \lg \frac{K}{K_0}$$

或

$$K(\text{dB}) = -10 \lg \left(1 + \frac{f^2}{f_0^2}\right) \quad (1.3)$$

③ 曲线

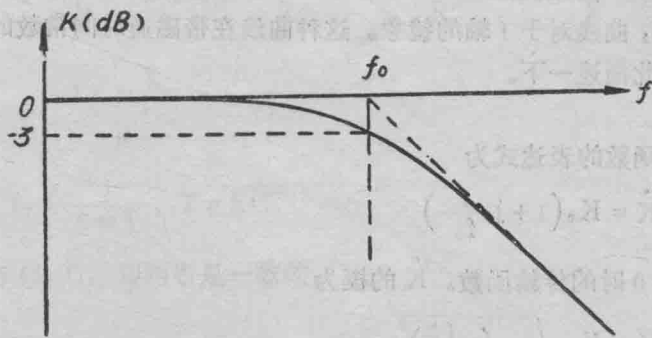


图 1.2 A_1 曲线

(1.3) 式的曲线如图 1.2 所示。由式中可以看出

1) 当 f 很小时, 即 $f \ll f_0$ 时

$K(\text{dB}) = 0$, 这说明当 f 很小时, 曲线的渐近线是一条水平直线。

2) 当 f 很大时, 即 $f \gg f_0$ 时

$$K(\text{dB}) = -10 \lg \frac{f^2}{f_0^2} = -20 \lg \frac{f}{f_0} \quad (1.4)$$

参看 (1.4) 式, 可看出当 f 很大时, 曲线的渐近线是一条随频率增大按 $6\text{dB}/\text{oct}$ 下降的直线。

3) 当 $f = f_0$ 时

$$K(\text{dB}) = -10 \lg 2 = -10 \times 0.301 \approx -3\text{dB}$$

④ 叙述方法

频响与时间常数为 T 的 $R-C$ 并联阻抗一致。

$$Z = \frac{R \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R}{1 + j\omega RC} = \frac{R}{1 + j\omega T} = \frac{R}{1 + j2\pi fT}$$

或
$$Z = \frac{R}{1 + j \frac{f}{f_0}} \quad (1.5)$$

其中 $f_0 = \frac{1}{2\pi T}$, $T = RC$

比较 (1.1) 式与 (1.5) 式, 知两者是一致的。

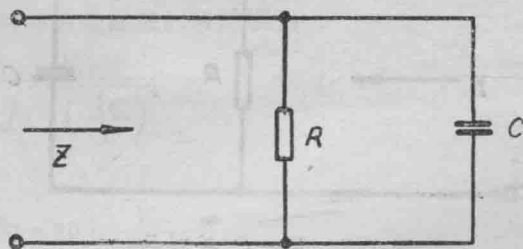


图 1.3 $R-C$ 并联阻抗

(2) A_1' 曲线——高频提升

A_1' 曲线是 A_1 曲线对于 f 轴的镜象。这种曲线在带磁通时间常数的叙述及 B 曲线的介绍中要用到，故在此简述一下。

①表达式

A_1' 曲线传输函数的表达式为

$$\dot{K} = K_0 \left(1 + j \frac{f}{f_0} \right) \quad (1.6)$$

其中 K_0 为 $f=0$ 时的传输函数。 \dot{K} 的模为

$$K = K_0 \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_0} \right)^2} \quad (1.7)$$

相对增益为

$$K(\text{dB}) = 20 \lg \frac{K}{K_0} \quad (1.8)$$

或
$$K(\text{dB}) = 10 \lg \left(1 + \frac{f^2}{f_0^2} \right) \quad (1.8)$$

②曲线

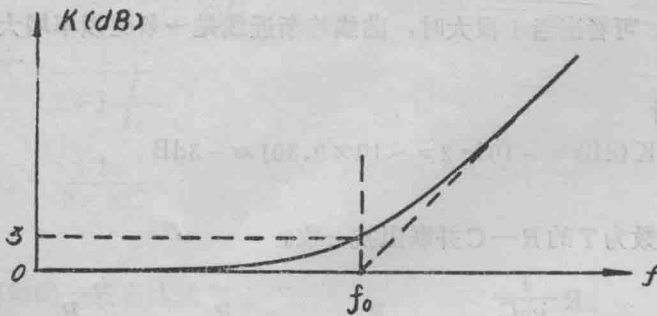


图 1.4 A_1' 曲线

(1.8) 式的曲线如图 1.4 所示。它是图 1.2 的镜象，故不再详述。

③叙述方法

频响与时间常数为 T 的 $R-C$ 并联导纳一致。

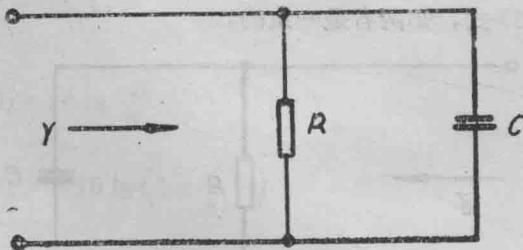


图 1.5 $R-C$ 并联导纳

$$Y = \frac{1}{R} + j\omega C = \frac{1 + j\omega RC}{R} = \frac{1 + j\omega T}{R} = \frac{1 + j2\pi fT}{R}$$

或
$$Y = \frac{1 + j\frac{f}{f_0}}{R} \quad (1.9)$$

其中
$$f_0 = \frac{1}{2\pi T}, T = RC$$

比较 (1.6) 与 (1.9), 知两者是一致的。

(3) A_2 曲线

① 举例

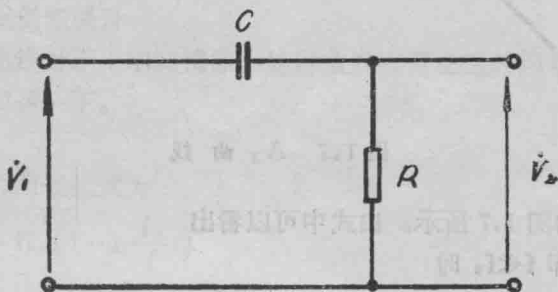


图 1.6 阻容耦合放大器的低频衰减电路

在图 1.6 中, 电压比为

$$\dot{K} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 - j\frac{1}{\omega RC}} = \frac{1}{1 - j\frac{1}{2\pi fRC}}$$

或
$$\dot{K} = \frac{1}{1 - j\frac{f_0}{f}}$$

其中
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

② 表达式

A_2 曲线传输函数的一般表达式为

$$\dot{K} = \frac{K_\infty}{1 - j\frac{f_0}{f}} \quad (1.10)$$

其中 K_∞ 为 $f \rightarrow \infty$ 时的传输函数。 \dot{K} 的模为

$$K = \frac{K_\infty}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}} \quad (1.11)$$

相对增益为

$$K(\text{dB}) = 20 \lg \frac{K}{K_\infty}$$

或
$$K(\text{dB}) = -10 \lg \left(1 + \frac{f_0^2}{f^2} \right) \quad (1.12)$$

③曲线

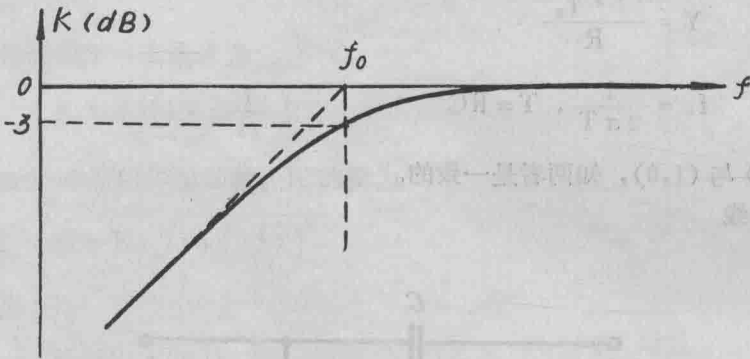


图 1.7 A_2 曲线

(1.12) 式的曲线如图 1.7 所示。由式中可以看出

1) 当 f 很小时, 即 $f \ll f_0$ 时

$$K(\text{dB}) = -10 \lg \frac{f_0^2}{f^2} = -20 \lg \frac{f_0}{f}$$

或
$$K(\text{dB}) = 20 \lg \frac{f}{f_0} \quad (1.13)$$

参看 (1.13) 式, 说明当 f 很小时, 曲线的渐近线是一条随频率增大按 6dB/oct 上升的直线。

2) 当 f 很大时, 即 $f \gg f_0$ 时

$$K(\text{dB}) = 0$$

这说明当 f 很大时, 曲线的渐近线是一条水平直线。

3) 当 $f = f_0$ 时

$$K(\text{dB}) = -10 \lg 2 = -10 \times 0.301 \approx -3\text{dB}$$

④叙述方法

频响与时间常数为 T 的 R-C 串联导纳一致。

$$Y = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega RC}} = \frac{1}{R} \frac{1}{1 - j \frac{1}{2\pi f RC}} = \frac{1}{R} \frac{1}{1 - j \frac{1}{2\pi f T}}$$

或
$$Y = \frac{1}{R} \frac{1}{1 - j \frac{f_0}{f}} \quad (1.14)$$

其中
$$f_0 = \frac{1}{2\pi T}, T = RC$$

比较 (1.10) 与 (1.14), 知两者是一致的。

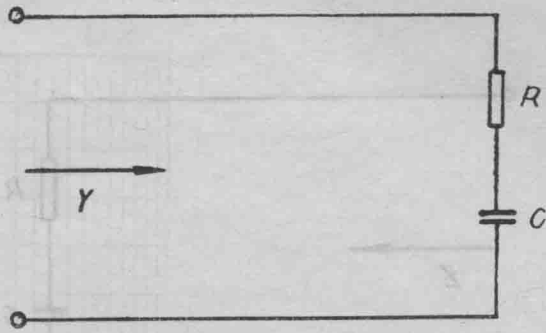


图 1.8 R—C 串联导纳

(4) A_2' 曲线——低频提升

A_2' 曲线是 A_2 曲线对于 f 轴的镜像。这种曲线在带磁通时间常数的叙述及 B 曲线的介绍中要用到，故在此简述一下。

①表达式

A_2' 曲线传输函数的表达式为

$$\dot{K} = K_{\infty} \left(1 - j \frac{f_0}{f} \right) \quad (1.15)$$

其中 K_{∞} 为 $f \rightarrow \infty$ 时的传输函数。 \dot{K} 的模为

$$K = K_{\infty} \sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f} \right)^2} \quad (1.16)$$

相对增益为

$$K(\text{dB}) = 20 \lg \frac{K}{K_{\infty}} \quad (1.17)$$

或

$$K(\text{dB}) = 10 \lg \left(1 + \frac{f_0^2}{f^2} \right) \quad (1.17)$$

②曲线

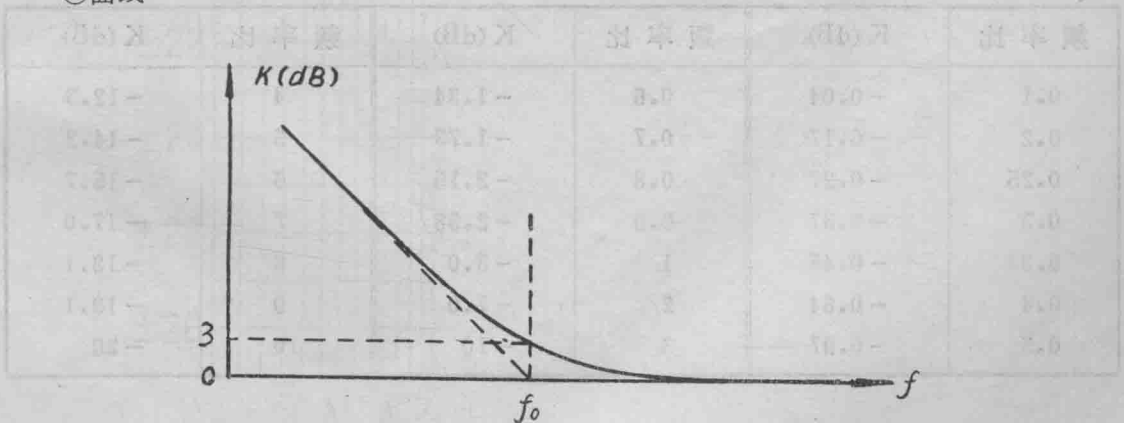


图 1.9 A_2' 曲线

(1.17) 式的曲线如图 1.9 所示。

③叙述方法

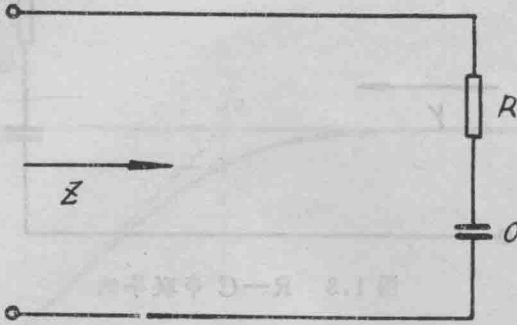


图 1.10 R—C 串联阻抗

频响与时间常数为 T 的 R—C 串联阻抗一致。

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} = R \left(1 - j \frac{1}{\omega RC} \right) = R \left(1 - j \frac{1}{\omega T} \right) = R \left(1 - j \frac{1}{2\pi fT} \right)$$

或 $Z = R \left(1 - j \frac{f_0}{f} \right)$ (1.18)

其中 $f_0 = \frac{1}{2\pi T}$, $T = RC$

比较 (1.15) 式及 (1.18) 式, 知两者是一致的。

(4) 通用 A 曲线

如前所述 A 曲线可分 A_1 、 A_1' 、 A_2 、 A_2' 四种曲线。它们各具特性故已分别进行讨论。但它们又各具共性, 可画出精确曲线以备查考。

①通用 A 曲线数据表

表 1.1 通用 A 曲线的 数据表

频率比	K (dB)	频率比	K (dB)	频率比	K (dB)
0.1	-0.04	0.6	-1.34	4	-12.3
0.2	-0.17	0.7	-1.73	5	-14.2
0.25	-0.27	0.8	-2.15	6	-15.7
0.3	-0.37	0.9	-2.58	7	-17.0
0.33	-0.45	1	-3.0	8	-18.1
0.4	-0.64	2	-7.0	9	-19.1
0.5	-0.97	3	-10	10	-20

1.2.2 B曲线

B曲线又分 B_1 , B_2 两种。分述如下:

(1) B_1 曲线——低频提升, 高频衰减

① 举例

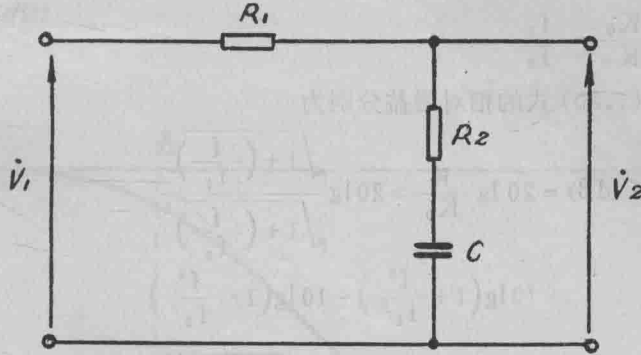


图 1.12 B_1 曲线电路举例

$$\dot{K} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C}}{(R_1 + R_2) + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1 - j \frac{1}{\omega R_2 C}}{1 - j \frac{1}{\omega (R_1 + R_2) C}}$$

$$\dot{K} = K_\infty \frac{1 - j \frac{f_1}{f}}{1 - j \frac{f_2}{f}}$$

\dot{K} 也可改写作

$$\dot{K} = \frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C}}{(R_1 + R_2) + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1 + j\omega R_2 C}{1 + j\omega (R_1 + R_2) C}$$

或

$$\dot{K} = K_0 \frac{1 + j \frac{f}{f_1}}{1 + j \frac{f}{f_2}}$$

其中 $K_0 = 1$, $K_\infty = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ 分别为 $f = 0$ 及 $f = \infty$ 时的电压比。

$$f_1 = \frac{1}{2\pi R_2 C}, \quad f_2 = \frac{1}{2\pi (R_1 + R_2) C}$$

② 表达式

由上例可知, B_1 曲线的表达式有两种:

$$\dot{K} = K_0 \frac{1 + j \frac{f}{f_1}}{1 + j \frac{f}{f_2}} \quad (1.19)$$

或
$$\dot{K} = K_{\infty} \frac{1 - j \frac{f_1}{f}}{1 - j \frac{f_2}{f}} \quad (1.20)$$

其中 K_0 及 K_{∞} 分别为 $f=0$ 及 $f \rightarrow \infty$ 时的传输函数。

且
$$\frac{K_0}{K_{\infty}} = \frac{f_1}{f_2}$$

对应 (1.19), (1.20) 式的相对增益分别为

$$\begin{aligned} K(\text{dB}) &= 20 \lg \frac{K}{K_0} = 20 \lg \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_1}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2}} \\ &= 10 \lg \left(1 + \frac{f^2}{f_1^2}\right) - 10 \lg \left(1 + \frac{f^2}{f_2^2}\right) \end{aligned} \quad (1.21)$$

及
$$\begin{aligned} K(\text{dB}) &= 20 \lg \frac{K}{K_{\infty}} = 20 \lg \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_1}{f}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_2}{f}\right)^2}} \\ &= 10 \lg \left(1 + \frac{f_1^2}{f^2}\right) - 10 \lg \left(1 + \frac{f_2^2}{f^2}\right) \end{aligned} \quad (1.22)$$

③ 曲线

(1.21) 式可以看作由 A_1 曲线 $K_1(\text{dB}) = -10 \lg \left(1 + \frac{f^2}{f_2^2}\right)$ 及 A_1' 曲线 $K_2(\text{dB}) = 10 \lg \left(1 + \frac{f^2}{f_1^2}\right)$ 迭加而成, 如图 1.13 所示。

(1.22) 式可以看作由 A_2 曲线 $K_3(\text{dB}) = -10 \lg \left(1 + \frac{f_2^2}{f^2}\right)$ 及 A_2' 曲线 $K_4(\text{dB}) = 10 \lg \left(1 + \frac{f_1^2}{f^2}\right)$ 迭加而成, 如图 1.14 所示。

从图 (1.13) 及 (1.14) 看出的 $K(\text{dB})$ 曲线形状一样, 所不同的仅在于前者以 $f=0$ 为基点, 后者以 $f \rightarrow \infty$ 为基点。

现在进一步讨论一下:

1) 当 f 很小 ($f \rightarrow 0$) 或 f 很大 ($f \rightarrow \infty$) 时, 曲线都是水平的。因为由 (1.21) 或 $\lim_{f \rightarrow 0} K(\text{dB}) = 0$, 由 (1.22) 式 $\lim_{f \rightarrow \infty} K(\text{dB}) = 0$ 。

2) 最大提升量(或最大衰减量)为 $20 \lg \frac{f_1}{f_2}$ 。由 (1.21) 式: $K(\text{dB})|_{f \rightarrow 0} = 0$

$$\begin{aligned} K(\text{dB})|_{f \rightarrow \infty} &= 10 \lim_{f \rightarrow \infty} \lg \frac{\frac{f^2 + f_1^2}{f_1^2}}{\frac{f^2 + f_2^2}{f_2^2}} = 10 \lim_{f \rightarrow \infty} \lg \frac{\frac{f_2^2}{f_1^2} \left(1 + \frac{f_1^2}{f^2}\right)}{1 + \frac{f_2^2}{f^2}} \\ &= 20 \lg \frac{f_2}{f_1} = -20 \lg \frac{f_1}{f_2} \end{aligned}$$

同样结果也可由 (1.22) 式证得。

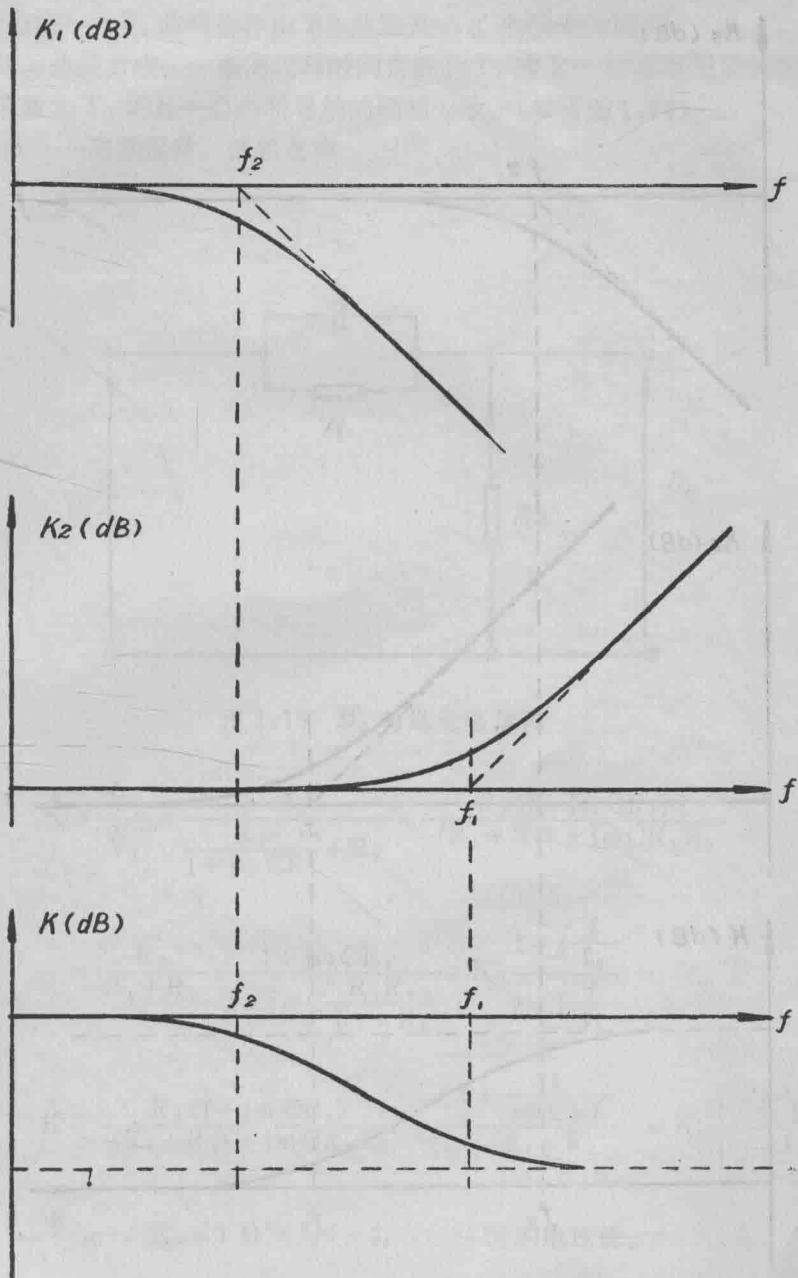


图 1.13 B_1 曲线看作 A_1 及 A_1' 曲线的迭加

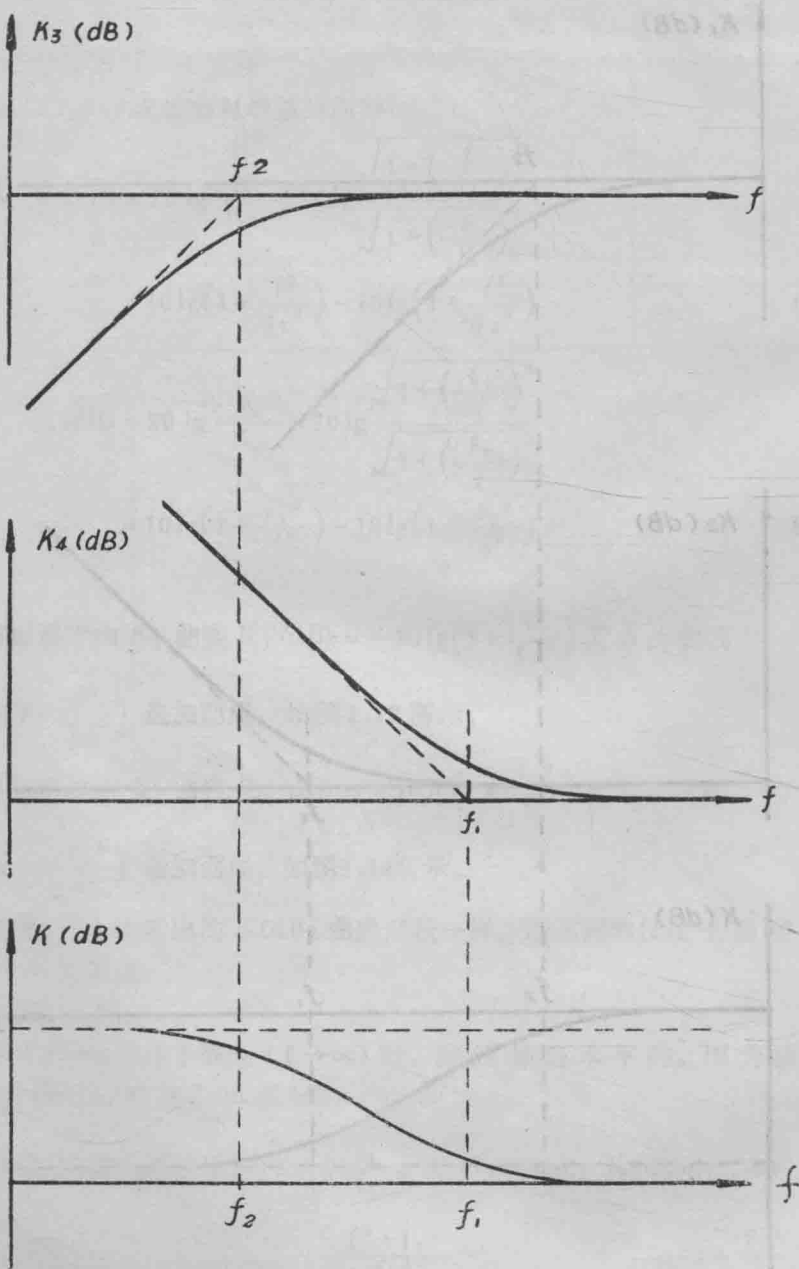


图 1.14 B_1 曲线看作 A_2 及 A_2' 曲线的迭加

④叙述方法

1) 第一种方法—— B_1 曲线看作由 A_1 曲线和 A_1' 曲线迭加。

频响由下列两曲线合成：一条曲线与时间常数为 T_1 的 $R-C$ 并联导纳的频响一致；一条曲线与时间常数为 T_2 的 $R-C$ 并联阻抗的频响一致。（参看图 1.13）

2) 第二种方法—— B_1 曲线看作由 A_2 曲线及 A_2' 曲线迭加而成。

频响由下列两曲线合成：一条曲线与时间常数为 T_1 的 $R-C$ 串联阻抗的频响一致；一条曲线与时间常数为 T_2 的 $R-C$ 串联导纳的频响一致。（参看图 1.14）

(2) B_2 曲线——高频提升，低频衰减

①举例

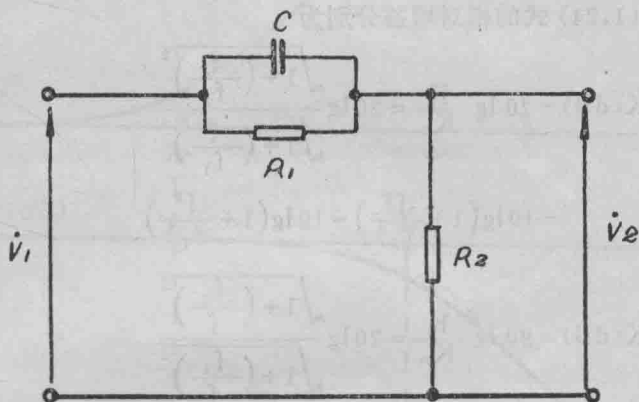


图 1.15 B_2 曲线电路举例

$$\dot{K} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{R_2}{\frac{R_1}{1 + j\omega CR_1} + R_2} = \frac{R_2(1 + j\omega CR_1)}{(R_1 + R_2) + j\omega CR_1 R_2}$$

$$= \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{1 + j\omega CR_1}{1 + j\omega C \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = K_0 \frac{1 + j \frac{f}{f_2}}{1 + j \frac{f}{f_1}}$$

或

$$\dot{K} = \frac{R_2(1 + j\omega CR_1)}{(R_1 + R_2) + j\omega CR_1 R_2} = \frac{1 + \frac{1}{j\omega CR_1}}{1 + \frac{R_1 + R_2}{j\omega CR_1 R_2}} = K_\infty \frac{1 - j \frac{f_2}{f}}{1 - j \frac{f_1}{f}}$$

其中 $K_0 = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$, $K_\infty = 1$ 分别为 $f = 0$, $f = \infty$ 时的电压比。

$$f_1 = \frac{R_1 + R_2}{2\pi CR_1 R_2}, \quad f_2 = \frac{1}{2\pi CR_1}$$

②表达式

B_2 曲线的表达式有两种：