

2.6 调谐放大器的级联

一、多级单调谐放大器

二、参差调谐放大器

三、松耦合双调谐回路放大器

一、多级单调谐放大器

若多级调谐放大器中的每一级都调谐在同一频率上，则称为多级单调谐放大器。

1. 电压放大倍数

是各级电压放大倍数的乘积

$$K_{\text{总}} = K_1 K_2 \dots \text{ 或: } K_{\text{总}}(dB) = K_1(dB) + K_2(dB) \dots$$

包括: 1) $K_{0\text{总}} = K_{01} K_{02} \dots$

$$K_{0\text{总}}(dB) = K_{01}(dB) + K_{02}(dB) \dots$$

2) $\frac{K_{\text{总}}}{K_{0\text{总}}} = \frac{K_1}{K_{01}} \frac{K_2}{K_{02}} \dots$

$$\frac{K_{\text{总}}}{K_{0\text{总}}}(dB) = \frac{K_1}{K_{01}}(dB) + \frac{K_2}{K_{02}}(dB) \dots$$

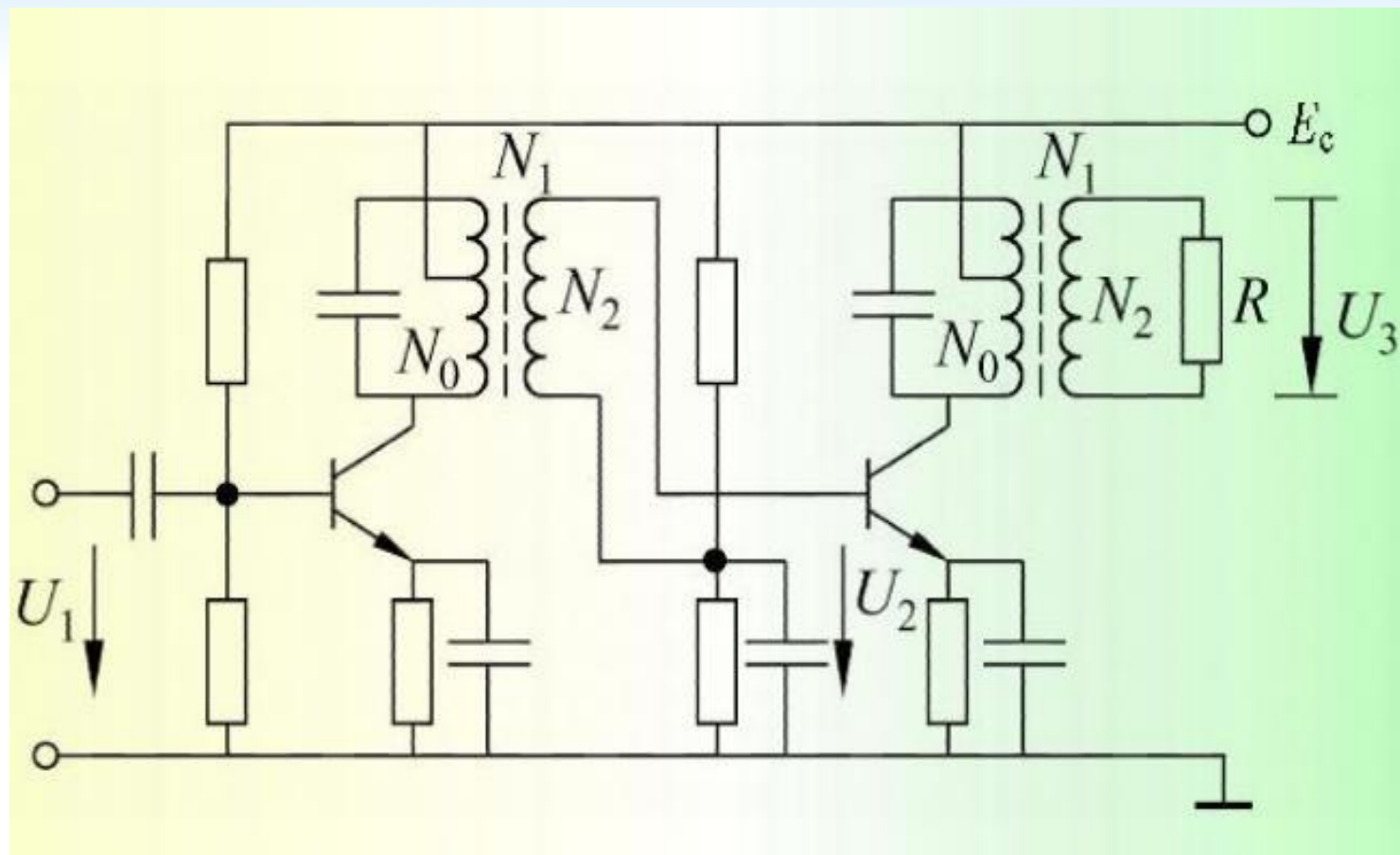


图2-32 两级调谐放大器

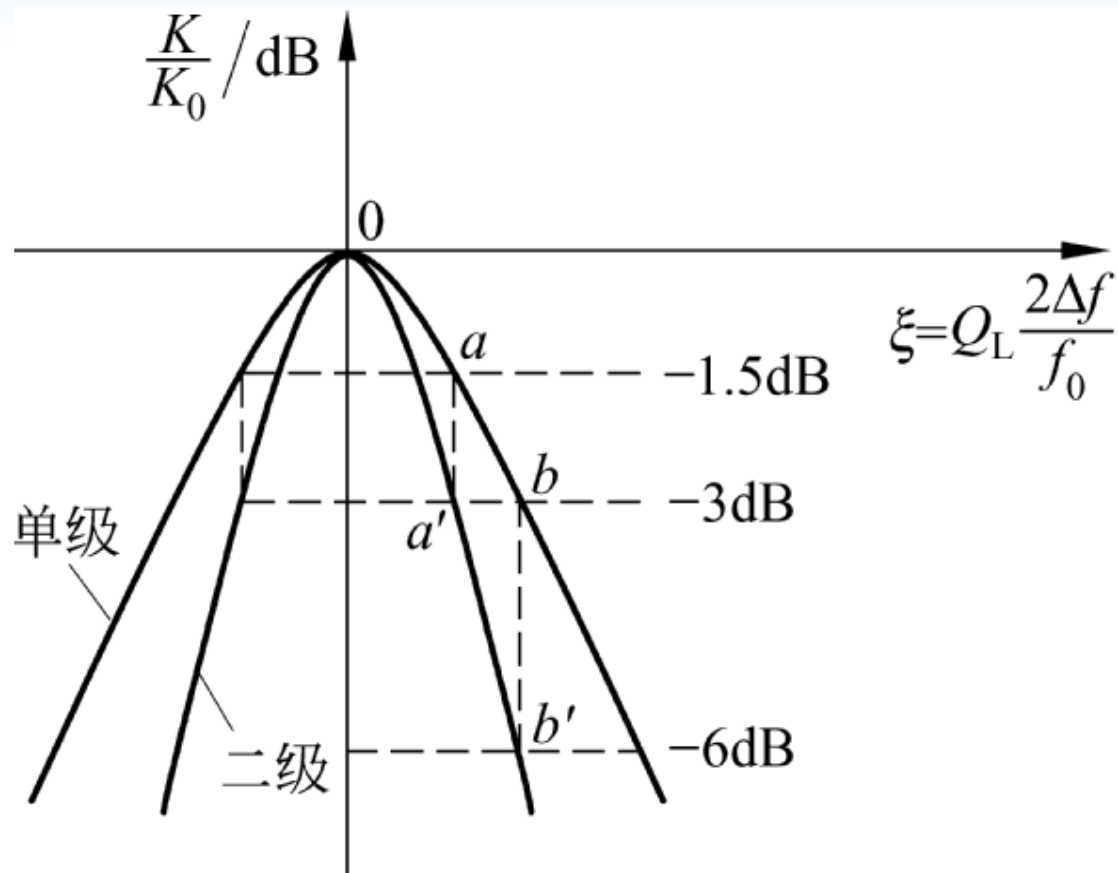


图2-33 单级和两级调谐回路的频率特性

2. 通频带

多级单调谐放大器总的通频带比单级放大器的通频带要小，级数越多，总通频带越小。

经推算： n 级 Q 相同的调谐回路，总的通频带为

$$2\Delta f_{0.7(\text{总})} = \frac{f_0}{Q_L} \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1} = 2\Delta f_{0.7(\text{单})} \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}$$

缩小系数

$$\sqrt{\sqrt[n]{2} - 1} < 1$$

结论：

多级调谐放大器的选择性提高，但总的通频带变窄。

2. 通频带

多级单调谐放大器总的通频带比单级放大器的通频带要小，级数越多，总通频带越小。经推算： n 级 Q 相同的调谐回路，总的通频带为

$$2\Delta f_{0.7(\text{总})} = \frac{f_0}{Q_L} \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1} = 2\Delta f_{0.7(\text{单})} \sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}$$

缩小系数 $\sqrt{\sqrt[n]{2} - 1}$

结论：

多级调谐放大器的选择性提高，但总的通频带变窄。

例2-2 题同例2-1

求：（1）四级总电压放大倍数

（2）四级总通频带解：

解：（1）四级总电压放大倍数

$$K_4 = (K_{V0})^4 = (9.6)^4 \approx 8500 \text{倍}$$

$$K_4(\text{dB}) = 4 \times 19.6 = 78.4 \text{dB}$$

（2）四级总通频带 B_4

由式（2-104）知，当 $n=4$ ，有

$$B_4 = \frac{f_0}{Q_L} \sqrt{2^{1/4} - 1} = 0.66 \times 0.43 = 0.28 \text{MHz}$$

二、参差调谐放大器

参差调谐放大电路在形式上和多级单调谐放大电路没有什么不同，但在调谐回路的调谐频率上有区别。多级单调谐放大电路的调谐回路是调谐于同一频率，而在参差调谐放大电路中各级回路的谐振频率是参差错开的。

1. 双参差调谐放大器

两级单调谐回路放大器的谐振频率，分别调整到略高于和略低于信号的中心频率。

第一级：调谐于 $f_0 + \Delta f_d$

第二级：调谐于 $f_0 - \Delta f_d$

注意：对于单个谐振电路而言，它是工作于失谐状态。

失谐量分别为： $\pm \frac{\Delta f_d}{f_0}$ -----参差失谐量。

对应的 $\pm \xi_0 = \pm Q_L \frac{2\Delta f_d}{f_0}$ -----广义参差失谐量。

ξ_0 小，曲线尖锐

ξ_0 大，曲线平坦

大到一定程度



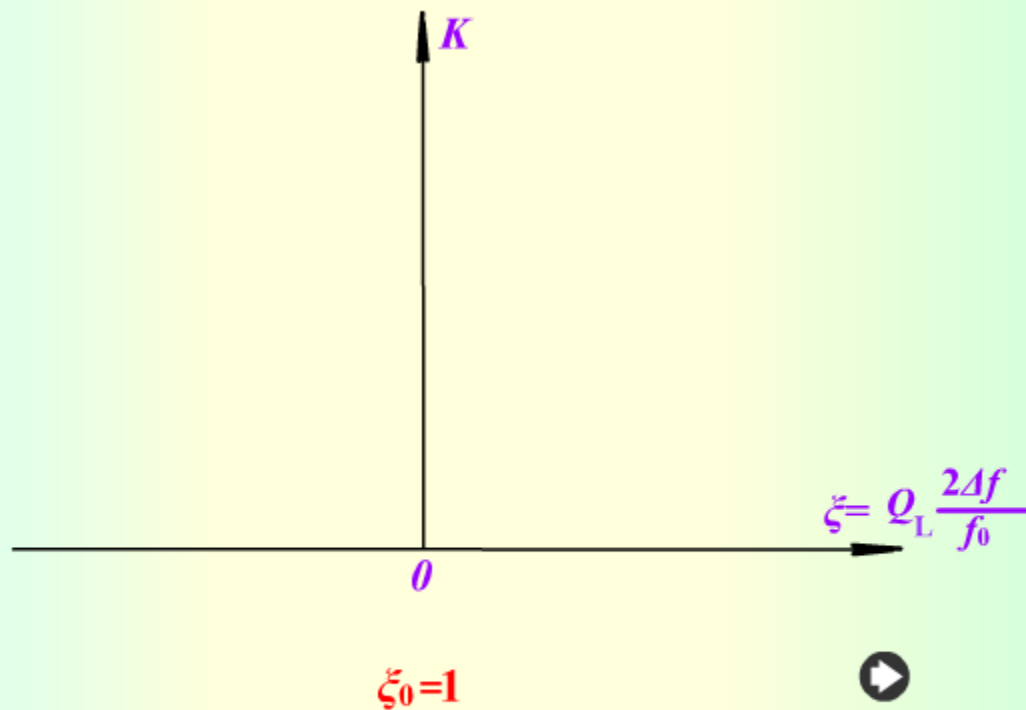
出现马鞍形双峰

$\xi_0 < 1$ ，为单峰，

$\xi_0 > 1$ ，为双峰，

$\xi_0 = 1$ ，为两者的分界线，为单峰中最平坦的情况。

ξ_0 愈大，双峰距离愈远，下凹愈严重。



参差调谐放大器的频率特性

YHZ/XJK

图2-34 参差调谐放大器的频率特性

2. 三参差调谐放大器

两级工作于参差调谐的双峰状态，第三级调谐于信号的频率 f_0 ，它们合成的谐振曲线比较平坦，加宽了通频带。

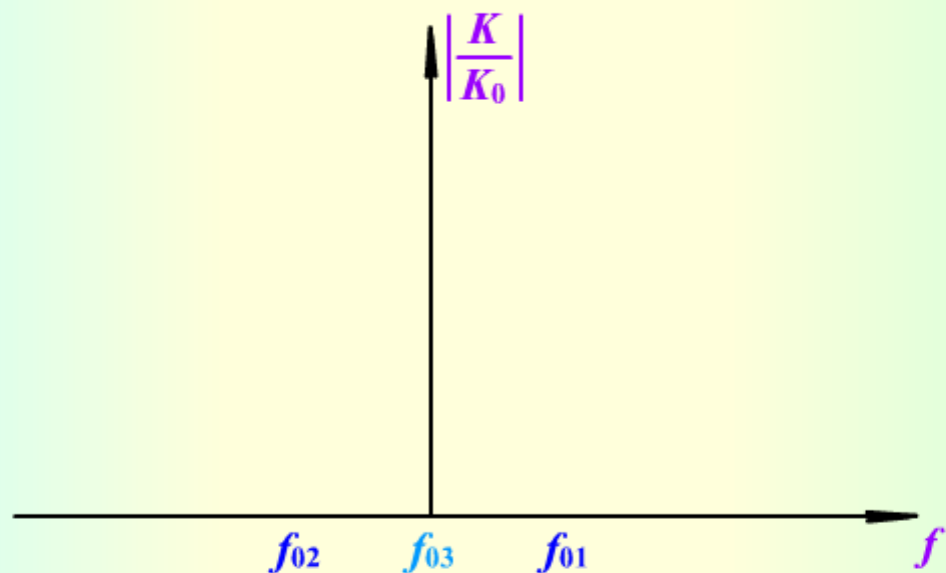
由合成谐振曲线可见：利用三参差调谐电路，并适当地选择每个回路的有载品质因数 Q_L 和 ξ_0 ，就可以获得双参差调谐所不能得到的通频带。

注意：

由于双参差调谐在 f_0 处失谐，故其在 f_0 点的放大倍数要比调谐于同一频率的两级单调谐放大倍数小。

即：

$$\frac{K_{0\text{总(参差失谐}\xi_0\text{)}}}{K_{0\text{总(调谐于同一}f_0\text{)}}} = \frac{1}{1 + \xi_0^2}$$



三参差调谐放大器的谐振曲线

YHZ/XJK

图2-35 三参差调谐放大器的谐振曲线

三、松耦合双调谐回路放大器

松耦合双调谐电路——指两个单调回路之间有耦合，两个线圈离得很远，靠互感耦合。

1. 耦合系数 k

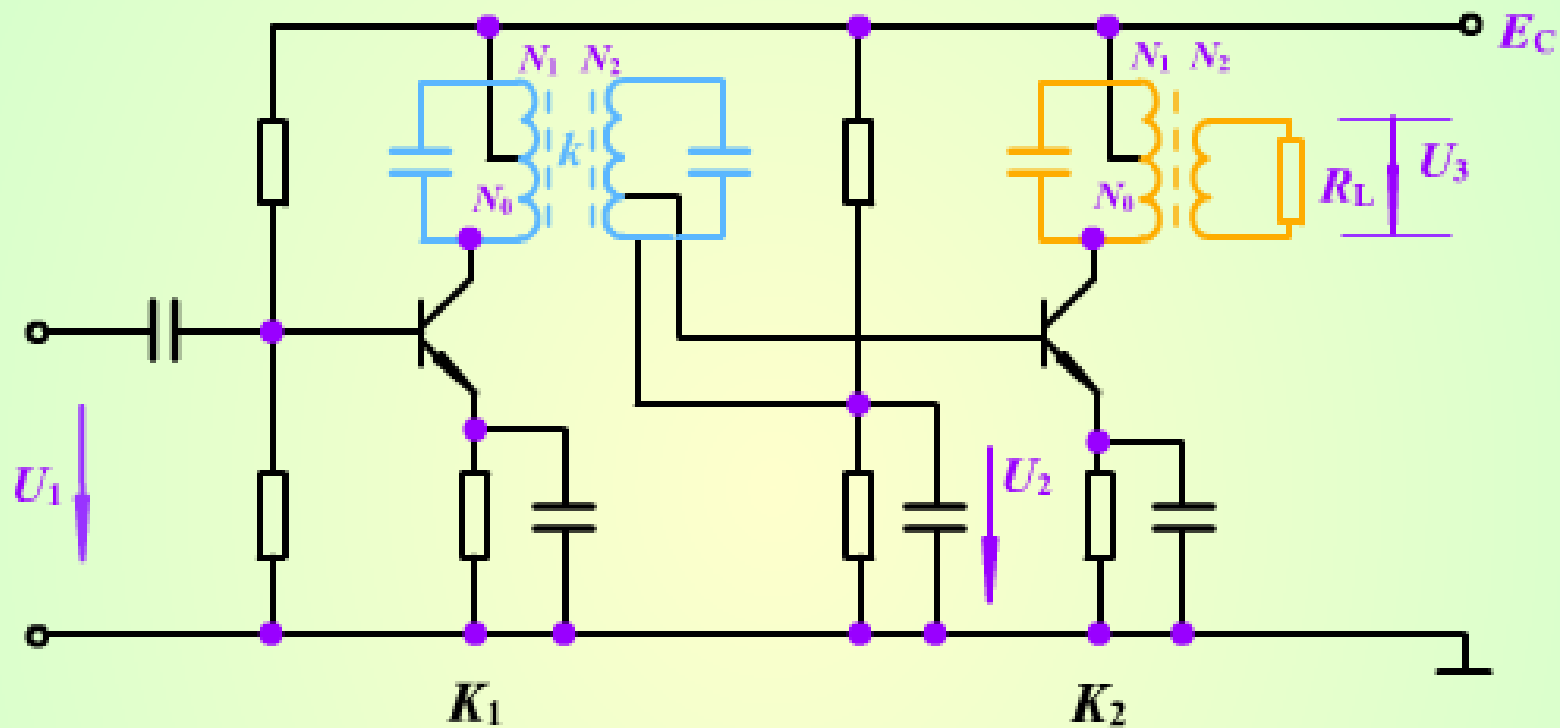
$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L} \quad (\text{取 } L=L_1=L_2)$$

2. 广义耦合系数 $\eta = kQ_L$ 或称耦合因数

$$\eta = kQ_L < 1 \quad \text{为弱耦合}$$

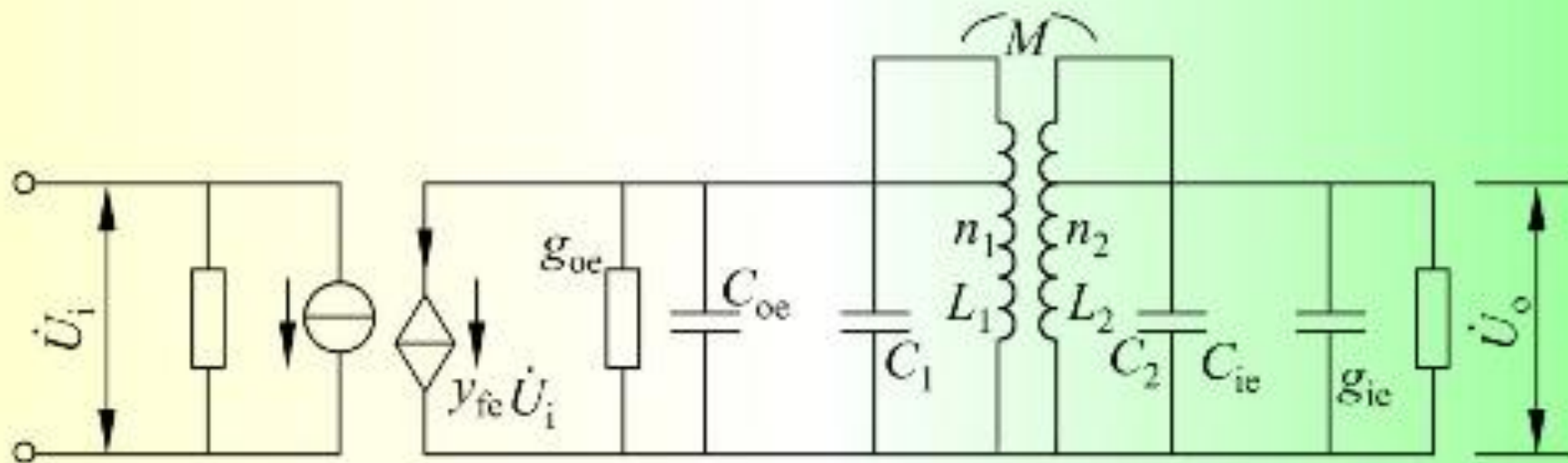
$$\eta = kQ_L > 1 \quad \text{为过耦合}$$

$$\eta = kQ_L = 1 \quad \text{为临界耦合}$$

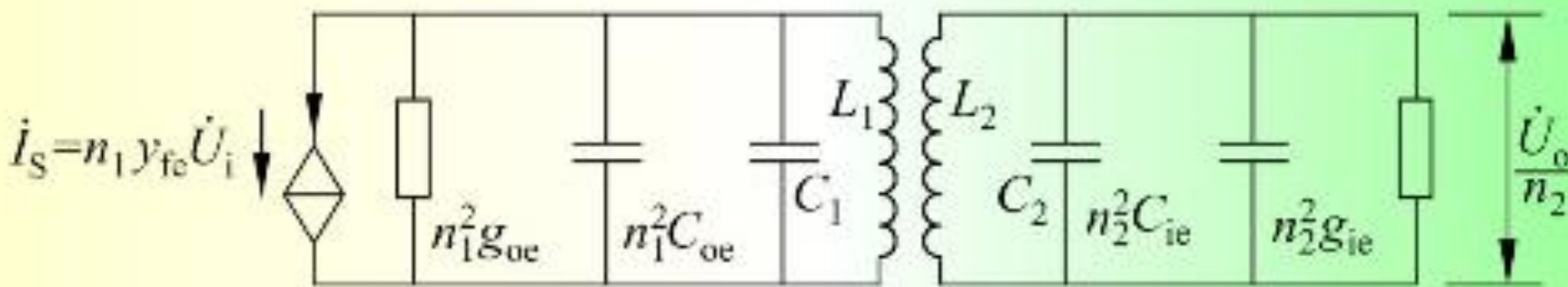


采用松耦合双调谐回路的放大器

图2-36 双调谐回路放大器



(a)



(b)

图2-37 双调谐放大器的高频等效电路

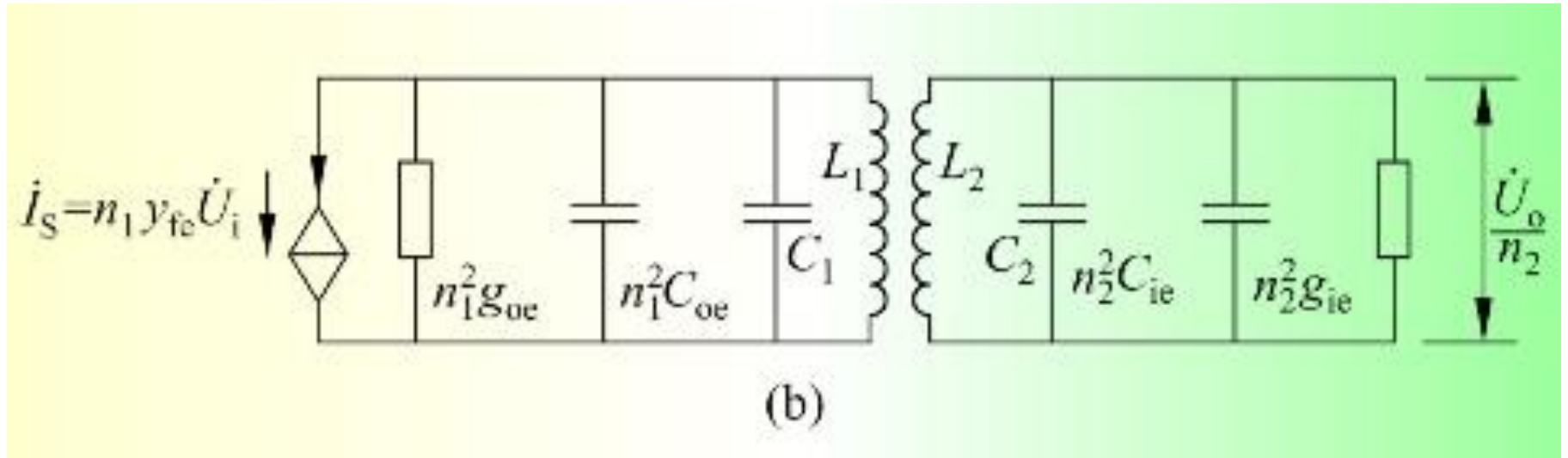


图2-37 双调谐放大器的高频等效电路

- 根据耦合回路的特性和电压放大倍数的定义，
可以推得

$$|K_V| = \left| \frac{U_o}{U_i} \right| = \frac{\eta}{\sqrt{(1+\eta^2)^2 + 2(1-\eta^2)\xi^2 + \xi^4}} \cdot \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g}$$

式中： $\xi = Q_L \frac{2\Delta f}{f_0}$ 为广义失谐量

当初、次级回路都调到谐振时, $\xi=0$, 这时,
放大倍数为

$$|K_{V0}| = \frac{\eta}{1+\eta^2} \cdot \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g}$$

在临界耦合时, $\eta = 1$, 放大器达到匹配状态。
放大倍数为最大:

$$|K_{V0}|_{\max} = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{2g}$$

双调谐放大器的谐振曲线表达式为

$$\begin{aligned} \frac{|K_V|}{|K_{V0}|_{\max}} &= \frac{2\eta}{\sqrt{(1+\eta^2)^2 + 2(1-\eta^2)\xi^2 + \xi^4}} \\ &= \frac{2\eta}{\sqrt{(1+\eta^2 - \xi^2)^2 + 4\xi^2}} \end{aligned}$$

在临界耦合时, $\eta = 1$

$$\frac{|K_V|}{|K_{V0}|_{\max}} = \frac{2}{\sqrt{4 + \xi^4}}$$

$$B = 2\Delta f_{0.7} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q_L}$$

在回路有载品质因素相同的情况下，临界双调谐放大器的通频带是单调谐放大器的 $\sqrt{2}$ 倍。

按照矩形系数的定义，可以求得：

$$K_{0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{B} = \sqrt[4]{100-1} = 3.16$$

可见双调谐放大器在临界状态时，其矩形系数较小，谐振曲线更接近于矩形，这是双调谐放大器的主要优点。

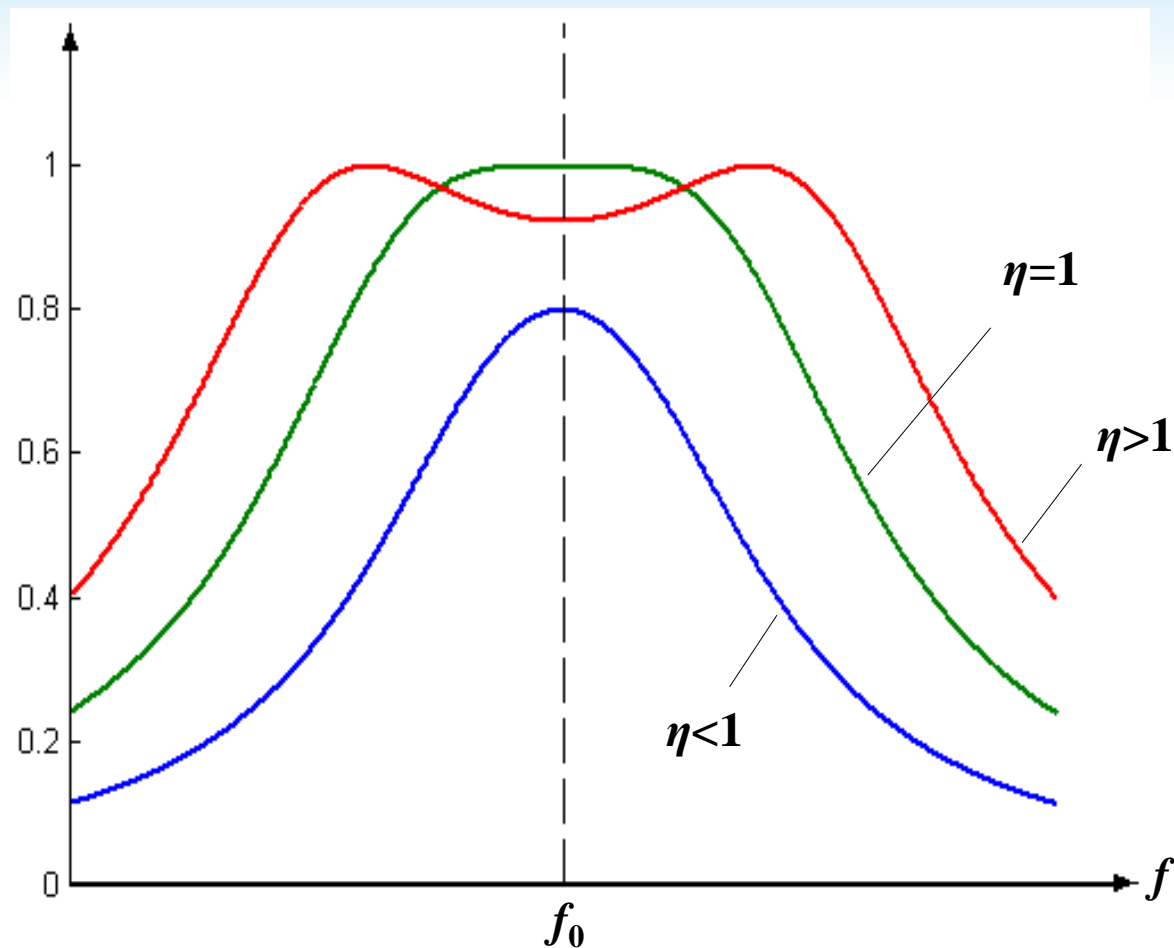


图2-38 双调谐放大器不同耦合程度时的谐振曲线



2.7 高频调谐放大器的稳定性

- 晶体管内部存在着反向输入导纳，考虑 y_{re} 后，放大器输入导纳和输出导纳的数值会对放大器的调试及对放大器的工作稳定性有很大的影响。

一、晶体管内部反馈的有害影响

1. 放大器调试困难

放大器的输入导纳
$$Y_i = \frac{I_b}{U_b} = y_{ie} - \frac{y_{fe} y_{re}}{y_{oe} + Y_L} \quad (2-111)$$

放大器的输出导纳
$$Y_o = y_{oe} - \frac{y_{fe} y_{re}}{y_{ie} + Y_s} \quad (2-112)$$

由于 y_{re} 的存在，放大器的输入和输出导纳，分别与负载及信号源有关。

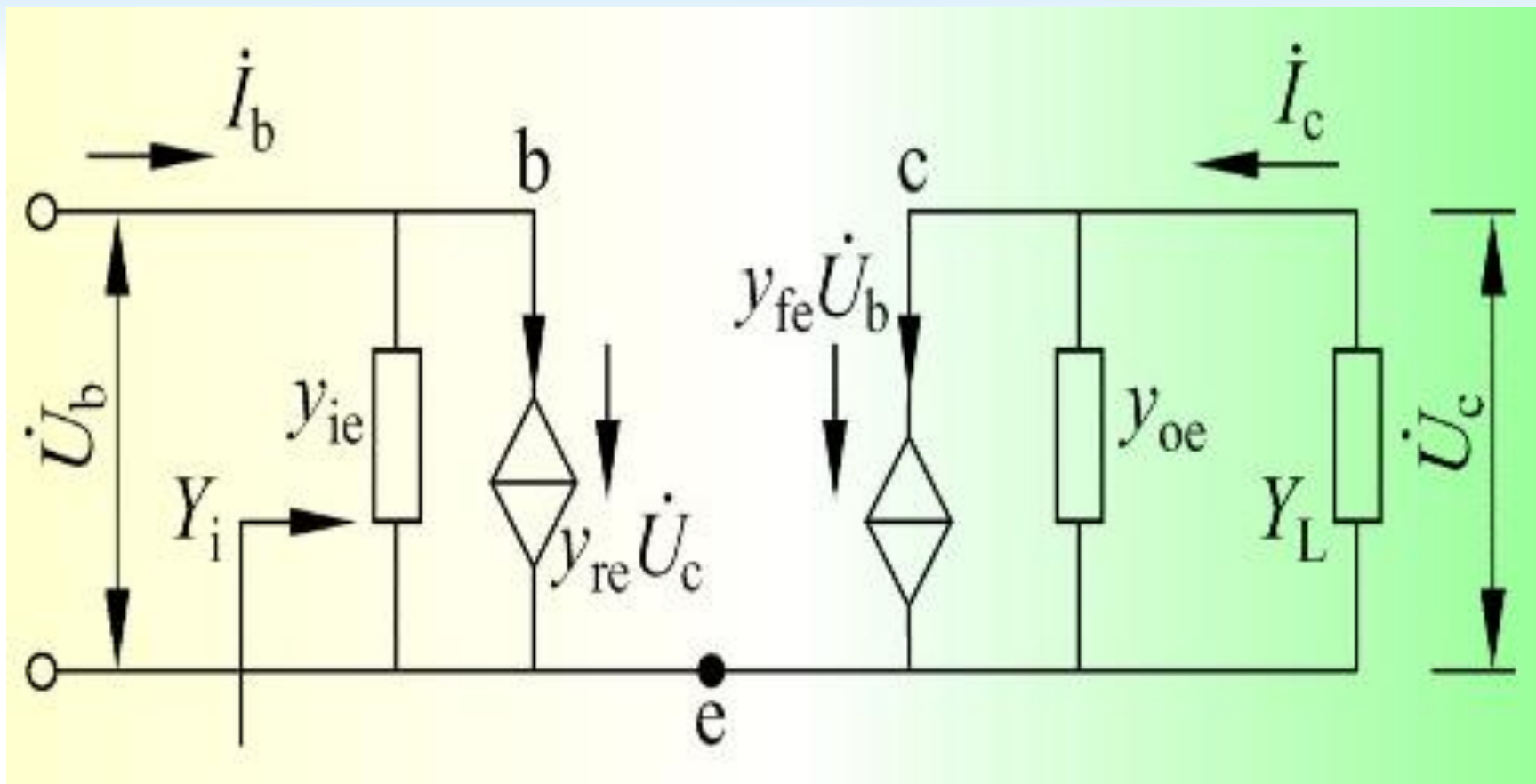


图2-39 计算放大器输入导纳的等效电路

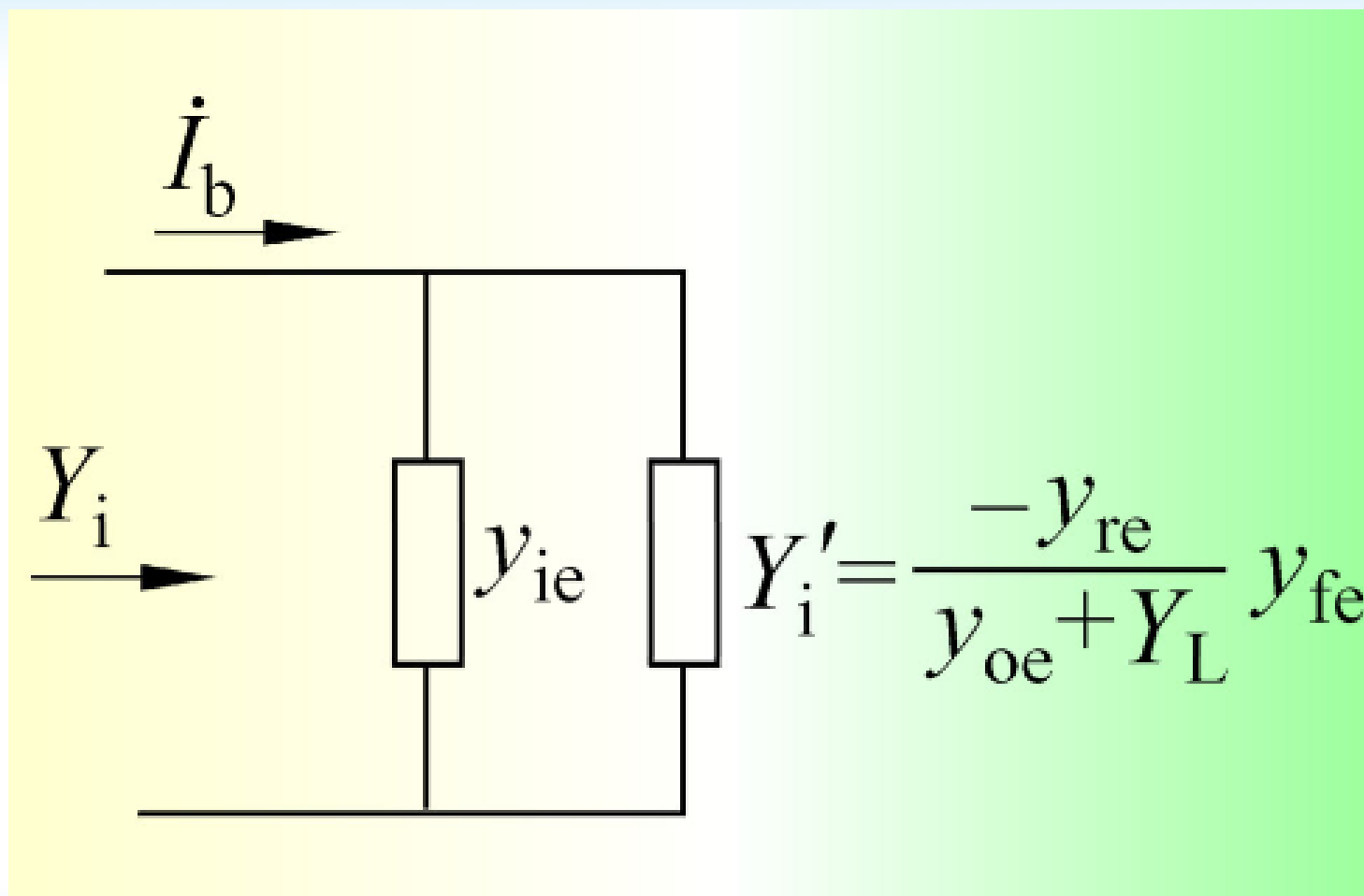
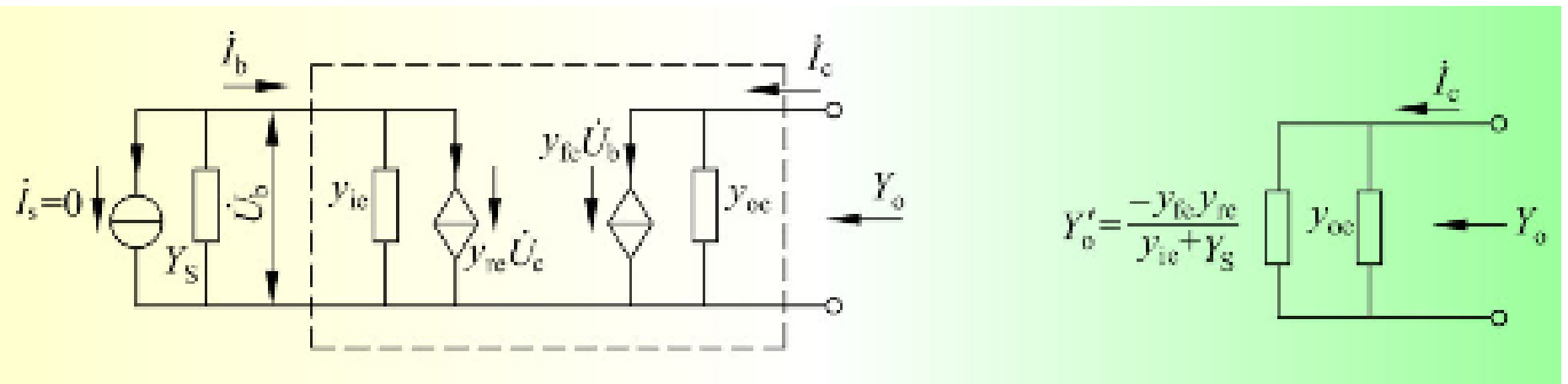
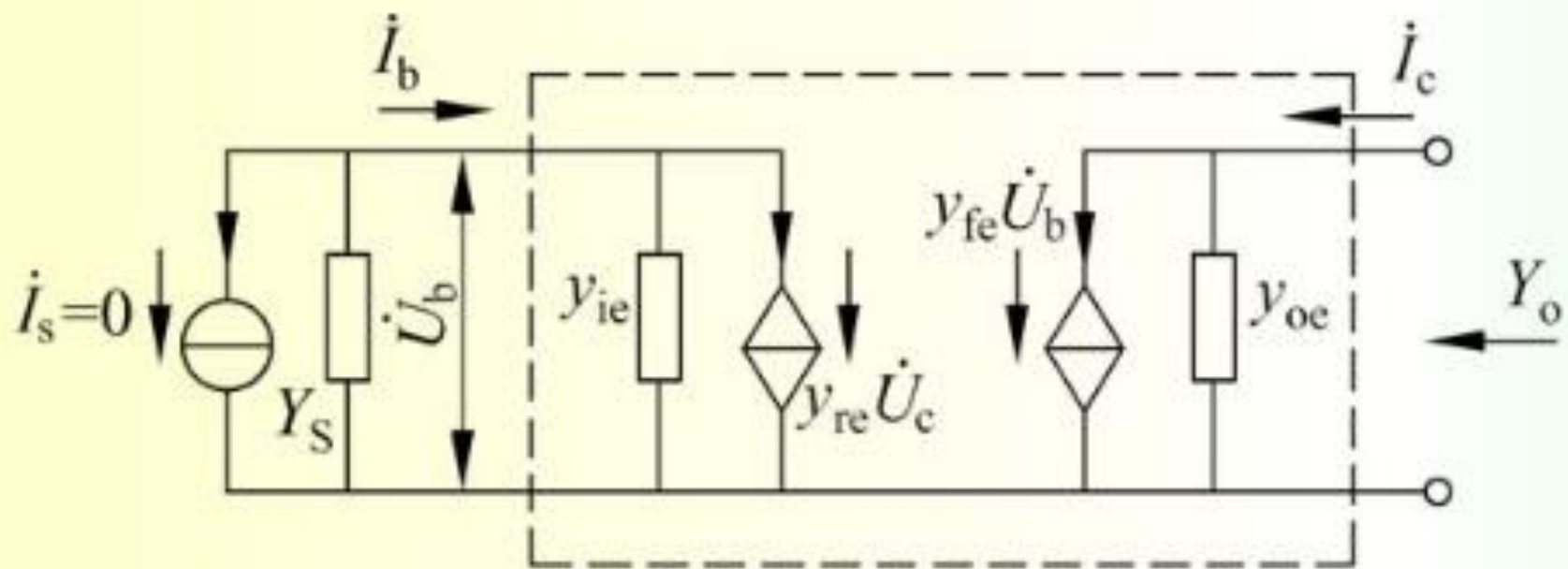


图2-40 放大器的输入等效电路



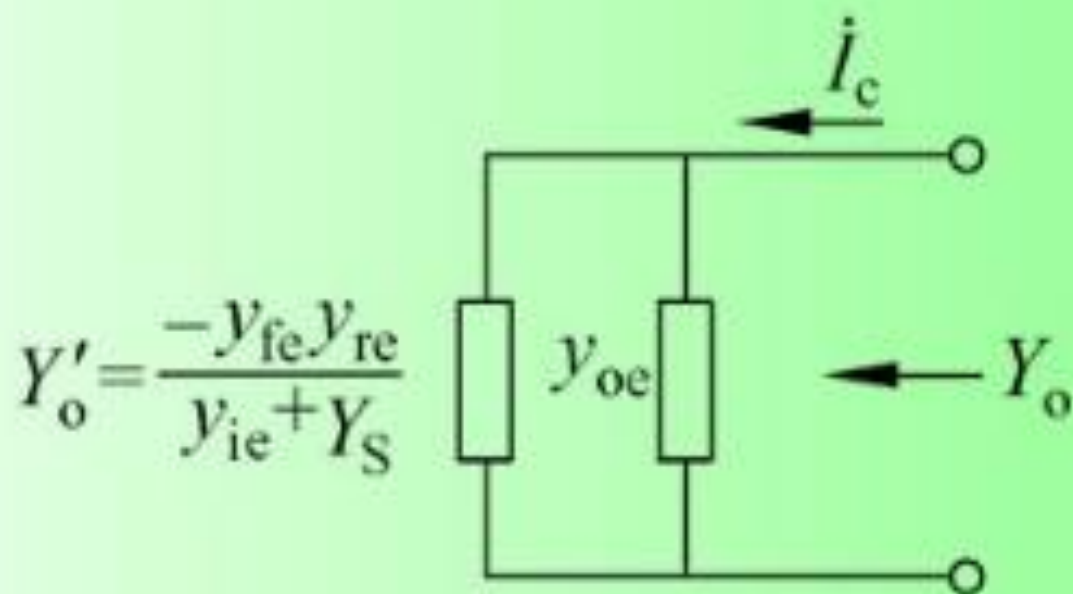
(a) 计算放大器输出导纳的等效电路 (b) 放大器的输出等效电路

图2-41放大器的输出电路



(a) 计算放大器输出导纳的等效电路

图2-41



(b) 放大器的输出等效电路

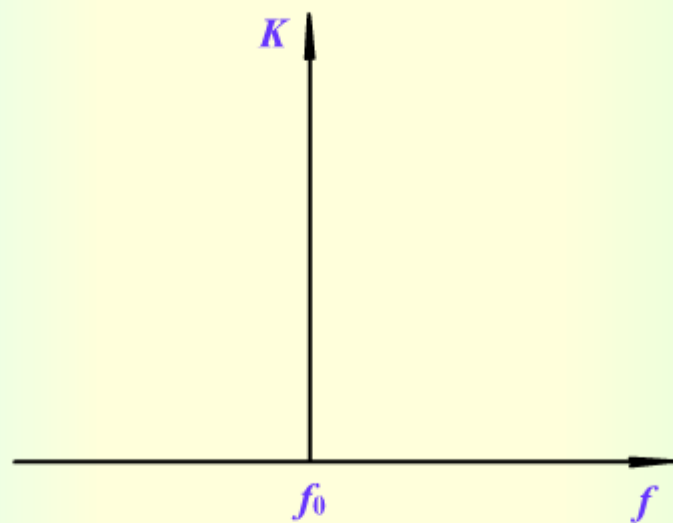
图2-41

2. 放大器工作不稳定

因为放大后的输出电压 U_o 通过反向传输导纳 y_{re} ，把一部分信号反馈到输入端，由晶体管加以放大，再通过 y_{re} 反馈到输入端，如此循环不止。在条件合适时，放大器甚至不需要外加信号，也能够产生正弦或其它波形的振荡，使放大器工作不稳定。

内部反馈对放大器频率特性的影响

由于内部反馈随频率而不同，它对于某些频率可能是正反馈，而对另一些频率则是负反馈，反馈的强弱也不完全相等，这样，某一频率的信号将得到加强，输出增大，而某些频率的信号分量可能受到削弱，输出减小，其结果是使放大器的频率特性受到影响，通频带和选择性有所改变，如图2-42所示，这是我们不都希望的。



晶体管内部负反馈对频率特性的影响

YHZ/XJK

图2-42 晶体管内部反馈对放大器频率特性的影响

二、解决晶体管内部反馈的方法

1. 中和法

在放大器的线路中插入一个外加的反馈电路来抵消内部反馈的影响，称为中和。
这相当减小了晶体管的 y_{re} ，放大器可以稳定地工作。

中和法对增益没有影响，该方法的主要优点是增益高，因为它不是靠牺牲增益来获取稳定性的。但中和法的缺点也是突出的，它不能在一个频段满足实际需要，实际电路中只能在一个频率点起到中和作用。此外，由于晶体管集电极至基极的内部反馈电路并不是一个纯电容，而是具有一定的电阻分量，所以中和电路也应是电阻和电容构成的网络，这使设计和调整都比较麻烦。目前，仅在收音机中采用这种方法，而一些要求较高的通信设备大多不再用中和电路。

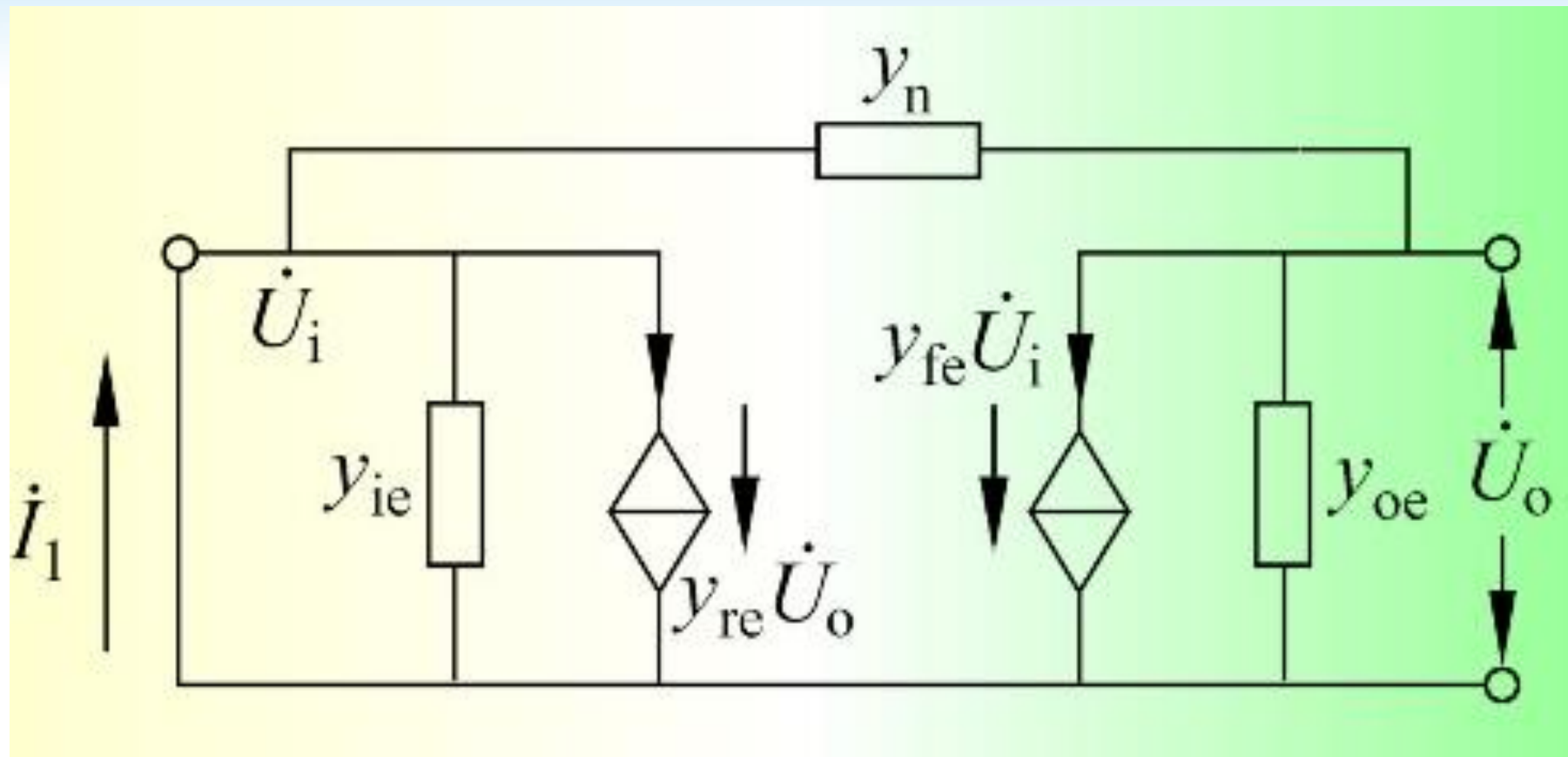


图2-43 中和原理

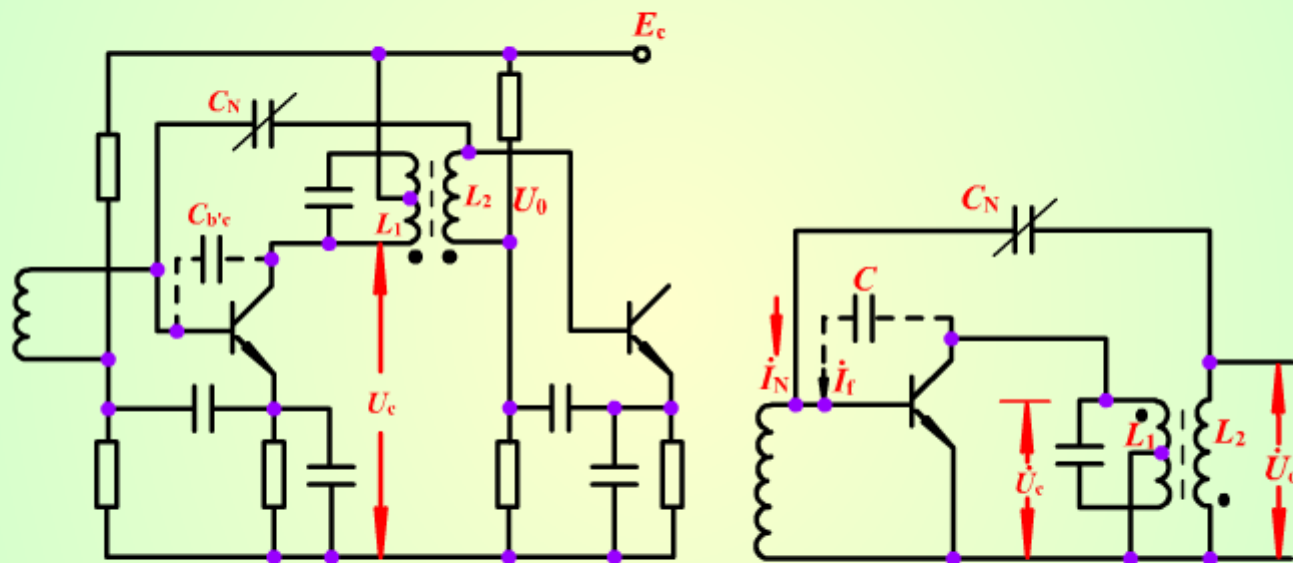


图2-44 放大器的中和

YHZ/WJH

图2-44 放大器的中和

2. 失配法

- 失配是指信号源内阻不与晶体管输入阻抗匹配；晶体管输出端的负载阻抗不与本级晶体管的输出阻抗匹配。
- 失配法从物理概念上讲，当负载导纳 Y_L 很大时，输出电路严重失配，输出电压相应减小，反馈到输入端的信号就大大减弱，对输入电路的影响也随之减小。失真越严重，输出电路对输入电路的反作用就越小，放大器基本上可以看作单向化。所以失配法对增益有影响。

- 用失配法实现晶体管单向化常用的办法是采用**共射—共基级联电路组成的调谐放大器**，其稳定性较高，实现起来比较简单，得到了广泛的应用。**用两只晶体管按共发射极—共基极的方式级联，把它们做成一个复合管。**我们知道，在级联放大器中，**后一级放大器的输入导纳是前一级放大器的负载，而前一级放大器则是后一级的信号源，它的输出导纳就是信号源的内导纳。晶体管按共基极方式联接时，输入导纳较大，这就等于第一级晶体管的负载导纳 Y_L 很大，**

- 因此，复合管的输入导纳 $Y_i \approx y_{ie}$ ，这使共射管 V_1 工作在失配状态。同理，按共发射联接的第一级晶体管 V_1 的输出导纳 y_{oe} 较小，对于 V_2 来说， V_1 的输出导纳就是它的信号源内电导 Y_S ， Y_S 小， V_2 这一级的输出导纳 Y_o 就只和共基极晶体管 V_2 本身参量有关，而不受它的输入电路的影响。

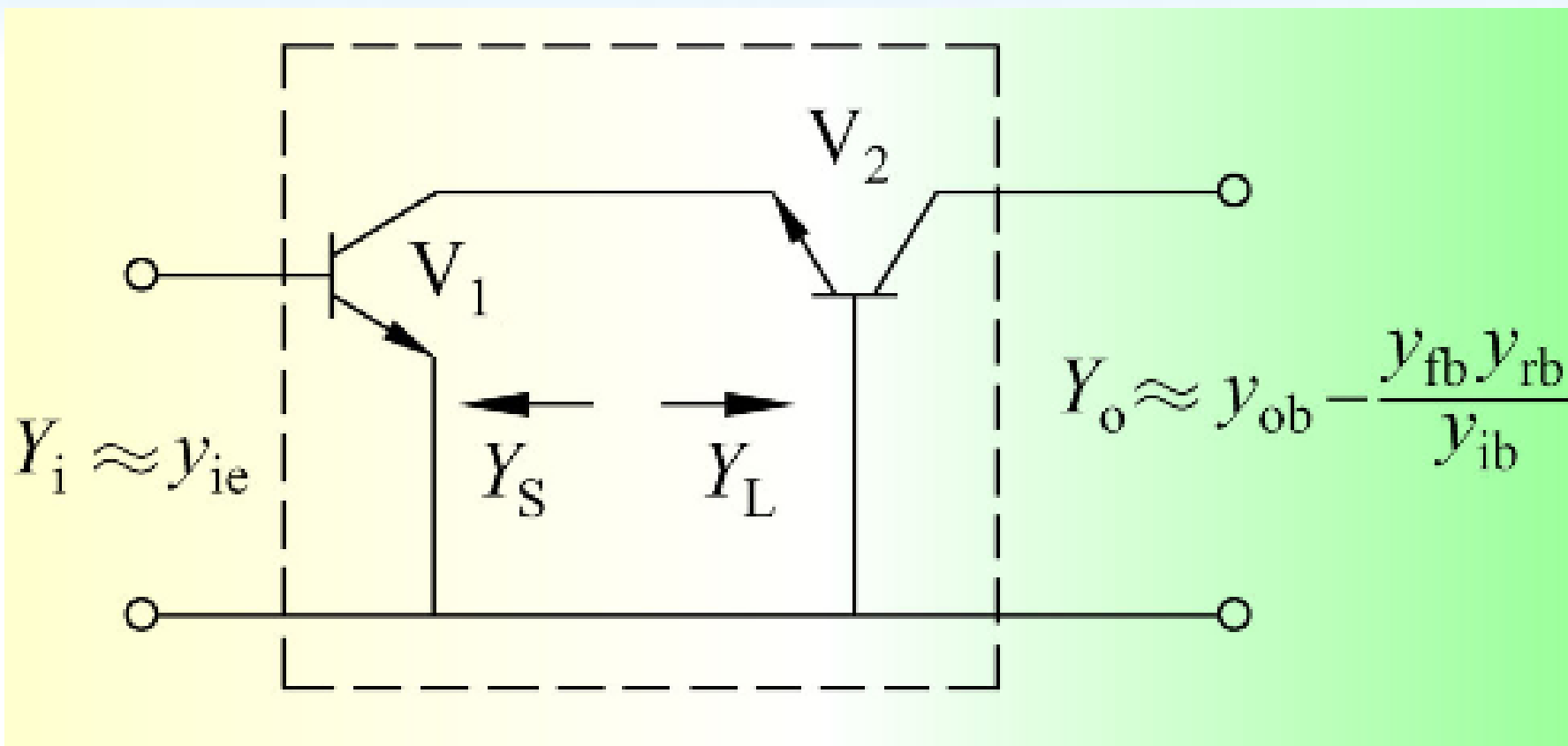


图2-45 共发射极—共基极级联的复合管

2.8 集中选频小信号调谐放大器

随着电子技术的发展，窄带信号的放大越来越多地采用集中滤波与集中放大相结合的高频放大器。在集中选频放大器中，放大作用是由宽带高增益放大器来完成，多采用高频线性集成放大电路，而选频作用则由专门的选频滤波器来完成。

其主要优点为：

- (1) 电路简单，调整方便。
- (2) 性能稳定。
- (3) 易于大规模生产、成本低。



通频带，选择性

高增益，频带宽

图2-46 集中选频放大器的组成框图

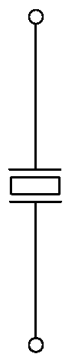
- 图中，**集中滤波器**放在宽带集成放大器的前面，且增加一个前置放大器。这种方案的特点是：当所需放大信号的频带以外有强的干扰信号时，不会直接进入集中放大器，避免此干扰信号因放大器的非线性而产生新的干扰。
- 集中宽带放大器一般由多级差动集成放大器构成**集中选频器的任务是选频，要求在满足通频带指标的同时，矩形系数要好。**其主要类型有集中***LC*滤波器、石英晶体滤波器、陶瓷滤波器和声表面波滤波器**等。

2.8.1 石英晶体滤波器（压电效应）

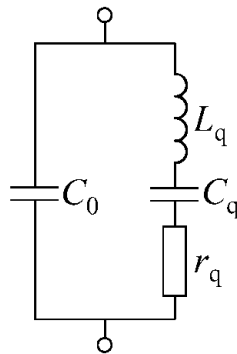
1. 物理特性

石英晶体具有把机械振荡转换成交变电压，或把交变电压转换为机械振荡的作用。广泛用于振荡器或窄带滤波器。

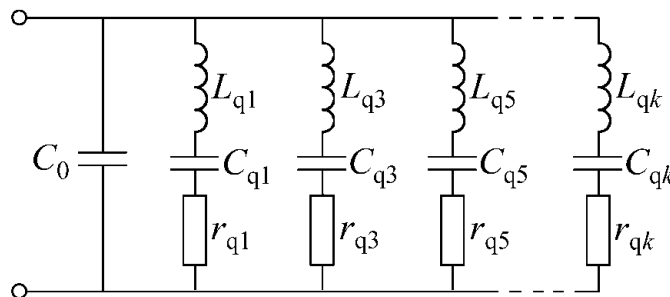
2. 等效电路



(a) 符号



(b) 基频等效电路



(c) 包括泛音在内的等效电路

3. 特点

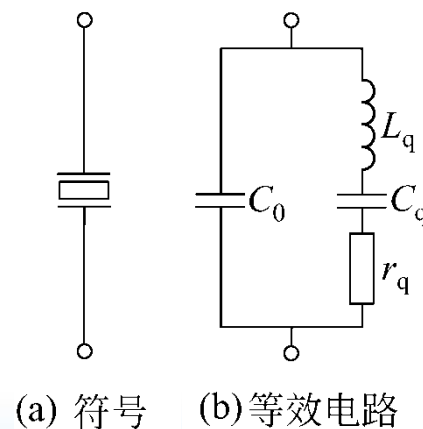
中心频率稳定，但带宽很窄

2.8.2 陶瓷滤波器（压电效应）

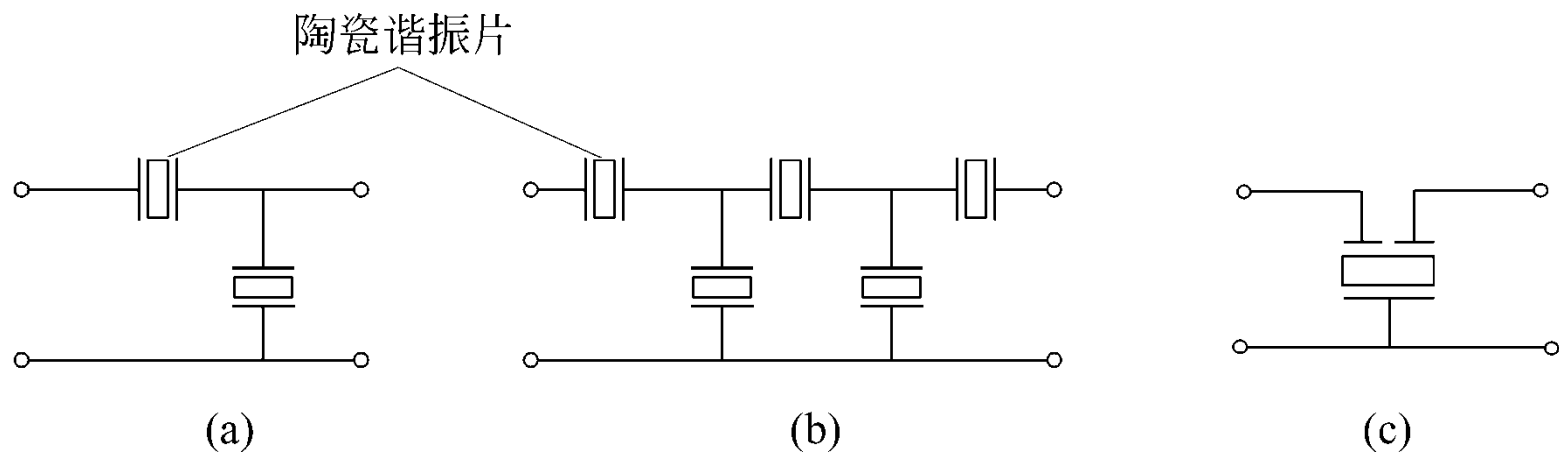
陶瓷滤波器是由锆钛酸铅陶瓷材料制成的。把这种陶瓷材料制成片状，两面覆盖银层作为电极，经过直流高压极化后具有与晶体类似的压电效应，产生机械形变和极间电场之间的相互转换。

C_0 为压电陶瓷片的固定电容， L_q 、 C_q 、 r_q 分别模拟机械振动时的等效质量，等效弹性系数和等效阻尼。

压电陶瓷片的厚度、半径等尺寸参数不同，等效电路参数也就不同。



将不同谐振特性的压电陶瓷片进行适当的组合连接，就可获得接近理想矩形的幅频特性。



- **优点：** 工作频率动态范围大，几百kHz到几十MHz
- **缺点：** 通频带不够宽

- 声表面波滤波器

目前应用最广泛的集中选频器是声表面波滤波器。（Surface Acoustic Wave Filter——SAWF）它是一种对频率具有选择作用的无源器件。它是利用某些晶体的压电效应和表面波传播的物理特性制成的新型电—声换能器件。

声表面波，就是沿固体介质表面传播且振幅随深入介质距离的增加而迅速减弱的弹性波。

声表面波滤波器自20世纪60年代中期问世以来发展非常迅速，它具有体积小、重量轻、不需要调整、中心频率可做得很高、相对带宽较宽和矩形系数较理想等特点。

SAWF是以压电材料（如铌酸锂和石英）做基片(衬底)，由输入、输出叉指换能器、传输介质和吸声材料四个部分组成。

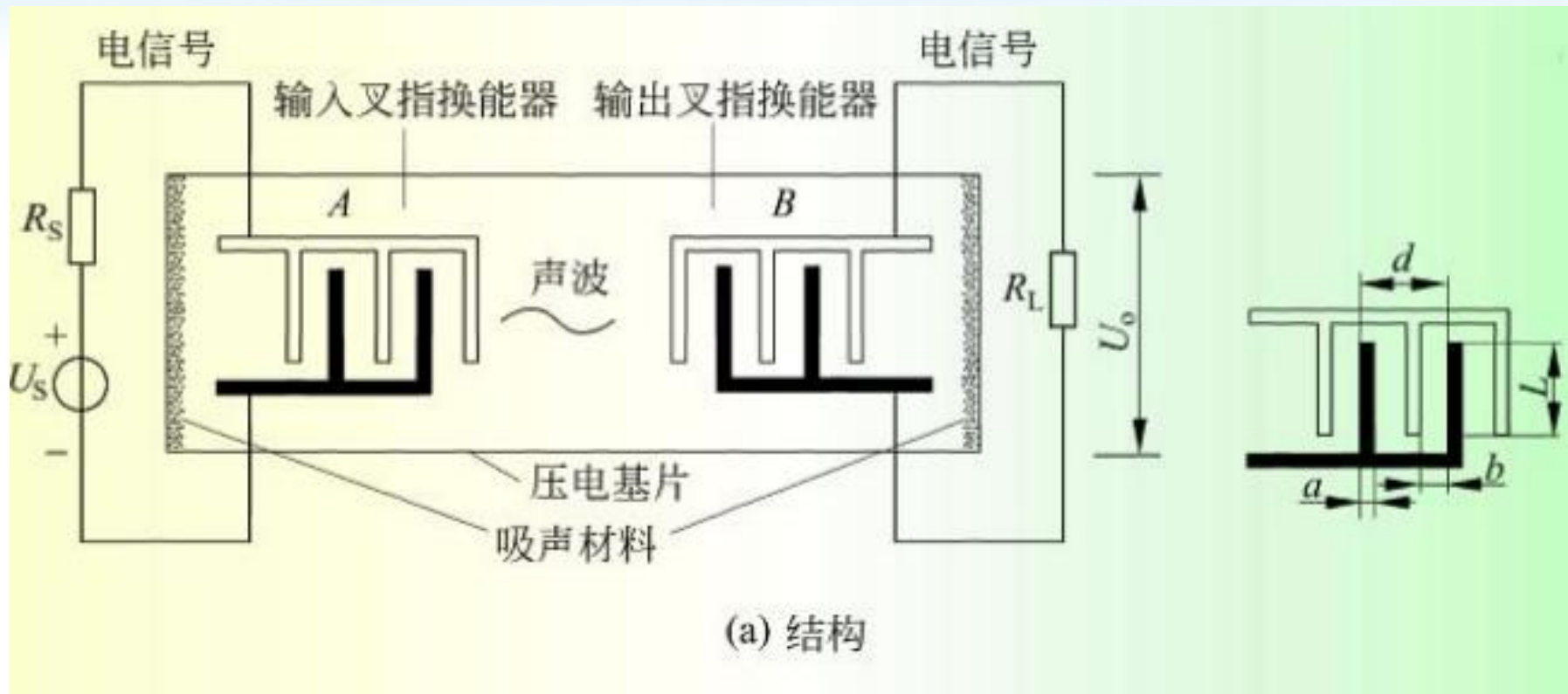


图2-49 (a) 声表面波滤波器的结构示意图

图2-49 (a) 为SAWF的基本结构示意图。在经过表面抛光的压电材料衬底上，蒸发一层金属（如铝）导电膜，然后利用一般的光刻工艺则可以制作两个叉指换能器，其中一个用作发射，另一个用作接收。

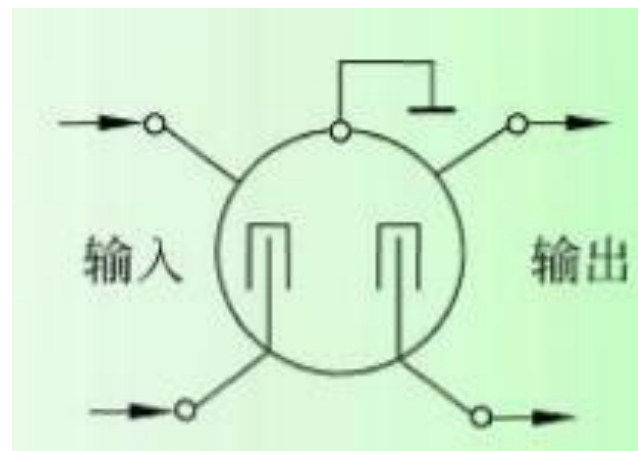
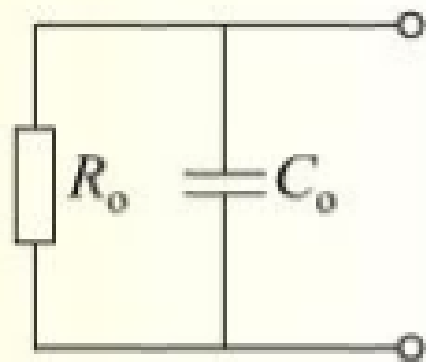
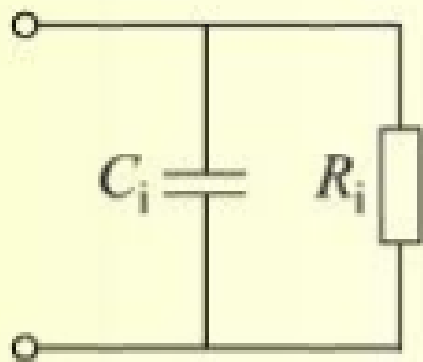
叉指换能器电极具有换能作用，输入（发射）换能器将电信号转换成声波，而输出（接收）换能器在是将声波转换成电信号。换能器边缘的吸声材料，主要是为了吸收反射信号。

高频电信号加至输入叉指换能器电极，压电基板材料表面就会产生振动并同时激发出声表面波。声表面波沿基片表面即垂直于换能器电极轴向的两个方向传播，向左传播的声表面波被涂于基片左端的吸收材料所吸收，向右传播的声表面波被接收叉指换能器检测，通过压电效应的作用转换成电信号，并传给负载。

当加入输入叉指换能器的电信号与其对应的声表面波的频率相同或相近时，由输入叉指换能器

激起较大幅度的声表面波，同样，当传播到输出叉指换能器声表面波的频率与输出叉指的固有频率相同或相近时，则在输出叉指上激起幅度较大的电振荡，由此可以实现选频的作用。

在谐振时，叉指换能器的等效电路可用电容 C 和电阻 R 并联组成的等效电路来表示。如图2-49（b）所示。电阻 R 为辐射电阻，其中的功率消耗相当于转换为声能的功率。



(b) 等效电路

(c) 电路符号

图2-49 声表面波滤波器的等效电路及电路符号

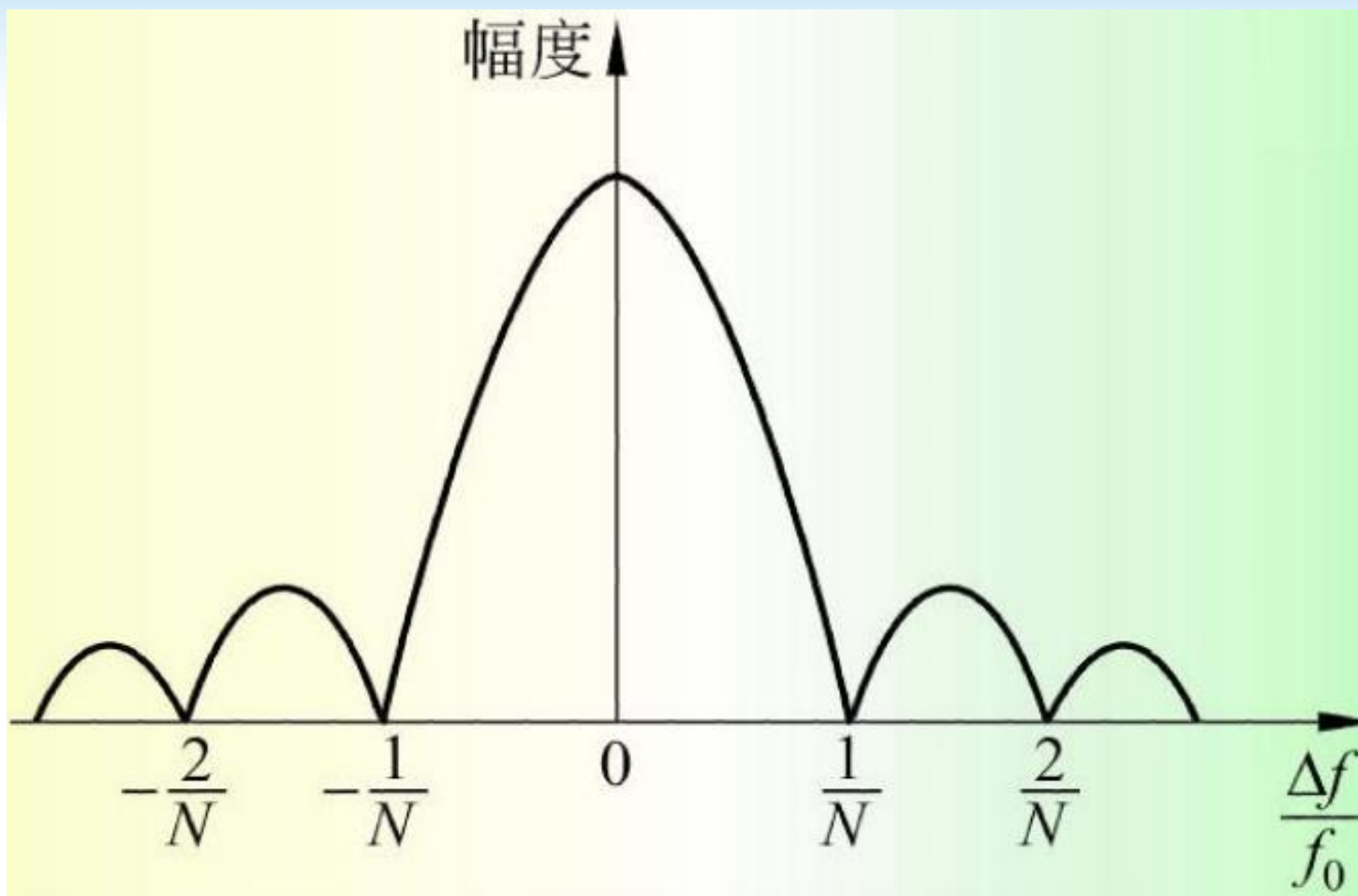


图2-50 叉指换能器频率特性

概括起来，叉指换能器有以下主要特性：

- (1) 频率特性遵循规律变化，主峰宽度为 $2/N$ ，3dB相对带宽约为 $1/N$ 。
- (2) 叉指换能器激励强度与叉指（周期段）数（ N ）的平方成正比；
- (3) 叉指换能器的指条宽度决定工作频率。指条愈窄，频率愈高；
- (4) 叉指换能器的特性与叉指条的结构与尺寸密切相关。因此，设计自由度大，灵活性与适应性强；

(5) 叉指换能器在小信号下是线性器件，其发射与接收特性是相同的，满足互易定理。

基于以上特点，声表面波滤波器在通信、电视、卫星和宇航领域得到广泛的应用。电视接收机的图像中频滤波器，便应用了声表面波滤波器。图2-51(a)给出了用于电视机中放电路的声表面波滤波器实用电路，图2-51(b)是该电路的中频放大器的幅频特性，它是由SAWF来实现的。

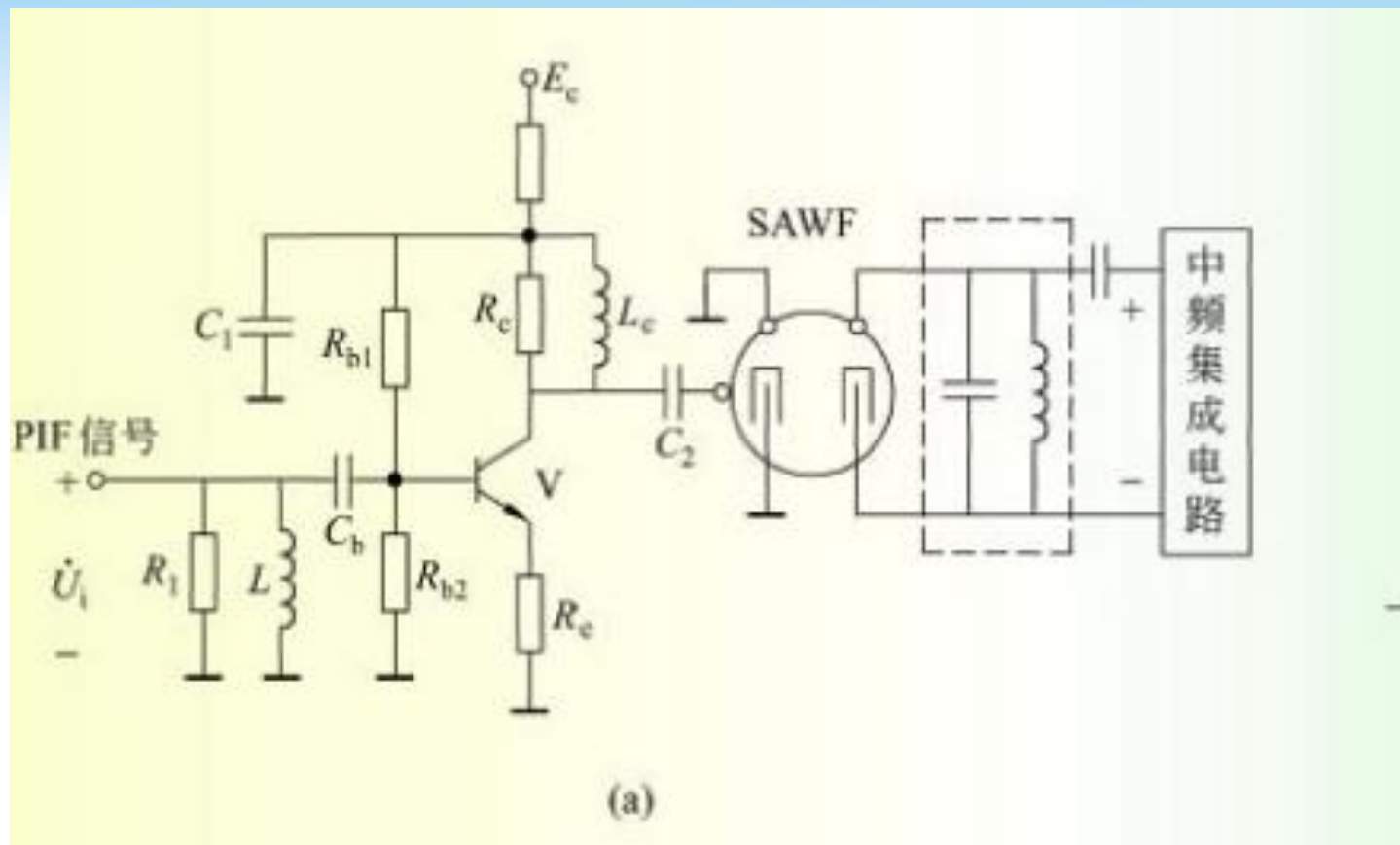


图2-51 (a) 实用电路

晶体管 V 是中频前置放大器，以补偿声表面波中频滤波器的插入损耗。经过SAWF中频滤波以后的图像中频（PIF）信号输入到集成中放电路中，经过三级具有AGC特性的中频放大级放大后，送到视频同步检波器。

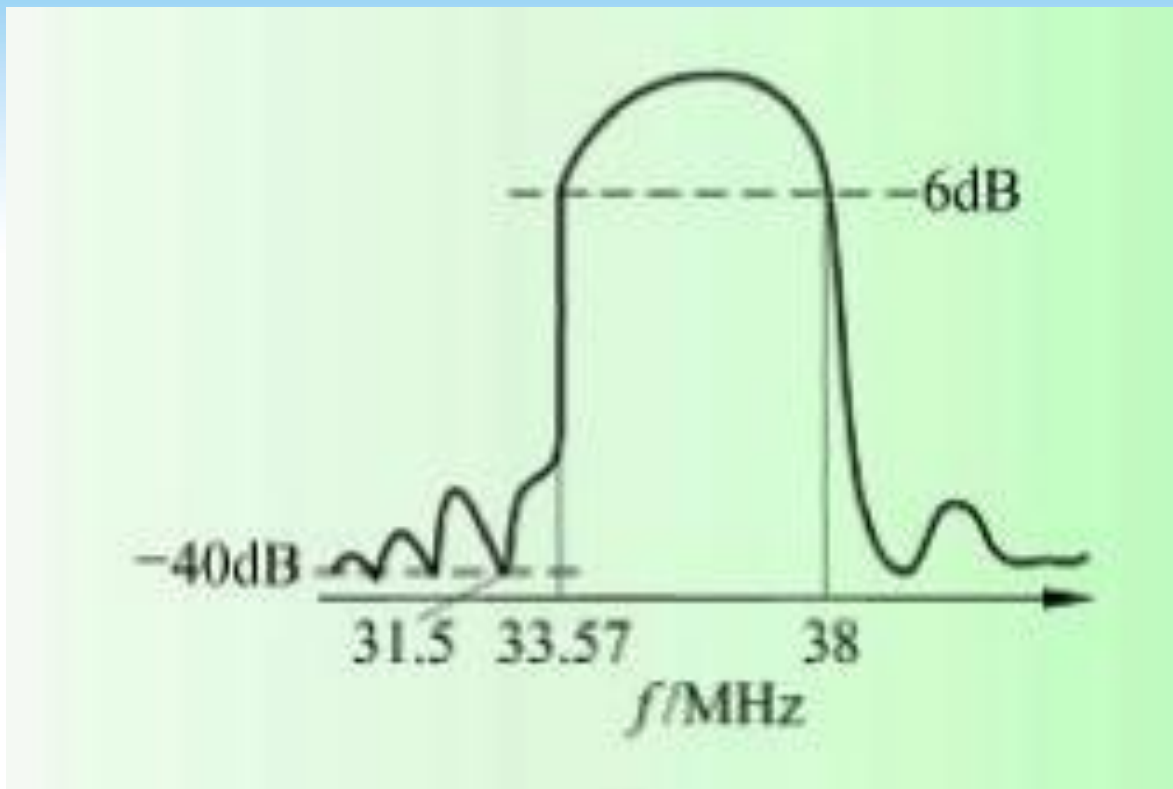


图2-51 (b) 中放电路的幅频特性

从图可看到，采用声表面波滤波器后，中放电路能够获得比 LC 中频滤波器更优良的幅频特性，矩形系数接近理想情况。

