



第 7 章 角度调制与解调

- 7.1 调频信号分析
- 7.2 调频器与调频方法
- 7.3 调频电路
- 7.4 鉴频器与鉴频方法
- 7.5 鉴频电路



7.3 调频电路

一、直接调频电路

1. 变容二极管直接调频电路

2) 变容二极管直接调频性能分析

b. C_j 作为回路部分电容

在振荡回路中，除了变容管之外，还有其他电容接入，称为变容管部分接入。

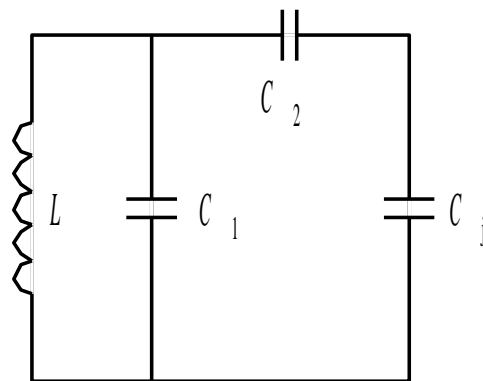
回路总电容：
$$C = C_1 + \frac{C_2 C_j}{C_2 + C_j} = C_1 + \frac{C_2 C_Q}{C_2 (1 + m \cos \Omega t)^\gamma + C_Q}$$

振荡频率：
$$\omega(t) = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \left\{ L \left[C_1 + \frac{C_2 C_Q}{C_2 (1 + m \cos \Omega t)^\gamma + C_Q} \right] \right\}^{-1/2}$$

展开后有：

$$\omega(t) = \omega_c (1 + A_1 m \cos \Omega t + A_2 m^2 \cos^2 \Omega t + \dots)$$

$$= \omega_c + \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c + A_1 m \omega_c \cos \Omega t + \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c \cos 2\Omega t + \dots$$



部分接入的振荡回路



7.3 调频电路

一、直接调频电路

1. 变容二极管直接调频电路 $\omega(t) = \omega_c (1 + A_1 m \cos \Omega t + A_2 m^2 \cos^2 \Omega t + \text{?})$

2) 变容二极管直接调频性能分析 $= \omega_c + \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c + A_1 m \omega_c \cos \Omega t$

b. C_j 作为回路部分电容

$$+ \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c \cos 2\Omega t + \text{?}$$

其中：

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{L(C_1 + \frac{C_2 C_Q}{C_2 + C_Q})}} \quad ; \quad A_1 = \frac{\gamma}{2p}$$

$$A_2 = \frac{3}{8} \cdot \frac{\gamma^2}{p^2} + \frac{1}{4} \cdot \frac{\gamma(\gamma-1)}{p} - \frac{\gamma^2}{2p} \cdot \frac{1}{1+p_1}$$

$$p = (1+p_1)(1+p_1 p_2 + p_2) \quad ; p_1 = C_Q / C_2 \quad ; p_2 = C_1 / C_Q$$



7.3 调频电路

一、直接调频电路

1. 变容二极管直接调频电路 $\omega(t) = \omega_c (1 + A_1 m \cos \Omega t + A_2 m^2 \cos^2 \Omega t + \text{?}) \text{?}$

2) 变容二极管直接调频性能分析 $= \omega_c + \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c + A_1 m \omega_c \cos \Omega t$

b. C_j 作为回路部分电容

$$+ \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c \cos 2\Omega t + \text{?} \text{?} \text{?}$$

最大频偏: $\Delta f_m = A_1 m f_c = \frac{\gamma}{2p} m f_c$

相对全接入方式, Δf_m 降低了 p 倍, 灵敏度也下降为全接入时的 $1/p$

$$p = (1 + p_1)(1 + p_1 p_2 + p_2) \quad ; p_1 = C_Q / C_2 \quad ; p_2 = C_1 / C_Q$$

$$\begin{matrix} C_2 & \square \square & p_1 & \square \square \\ C_1 & \square \square & p_2 & \square \square \end{matrix}$$

? p $\square \square$ C_j 对频率的变化影响 \square



7.3 调频电路

一、直接调频电路

1. 变容二极管直接调频电路 $\omega(t) = \omega_c (1 + A_1 m \cos \Omega t + A_2 m^2 \cos^2 \Omega t + \text{?})$

2) 变容二极管直接调频性能分析 $= \omega_c + \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c + A_1 m \omega_c \cos \Omega t$

b. C_j 作为回路部分电容

$$+ \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c \cos 2\Omega t + \text{?}$$

中心频率漂移: $\Delta\omega_c = \frac{A_2}{2} m^2 \omega_c$

因为 C_j 的影响减小, 使 ω_c 随温度及电源电压等外界因素的影响也减小, 即中心频率的稳定度提高了 p 倍。

部分接入方式可以减小加在变容管上的高频电压, 因此可以减弱寄生调制, 进一步提高在频稳定度。

$\omega(t)$ 中的第四项及以后各项是非线性失真项。为了减小载波的频率偏移和非线性失真, 需要减小 m 值, 但 m 值减小, 会使最大频偏减小, 因此 m 不能过小。

部分接入方式适用于要求频偏较小的情况。



7.3 调频电路

一、直接调频电路

1. 变容二极管直接调频电路

2) 变容二极管直接调频性能分析

b. C_j 作为回路部分电容

在实际应用中，通常 $\gamma \neq 2$, C_j 作为回路总电容将会使调频特性出现非线性，输出信号的频率稳定度也将下降。因此，通常利用对变容二极管串联或并联电容的方法来调整回路总电容 C 与电压 u 之间的特性。

实际上，前面介绍的部分接入组态就是利用对变容二极管串联或并联电容的方法来调整回路总电容 C 与电压 u 之间的特性



7.3 调频电路

一、直接调频电路

1. 变容二极管直接调频电路

2) 变容二极管直接调频性能分析

b. C_j 作为回路部分电容

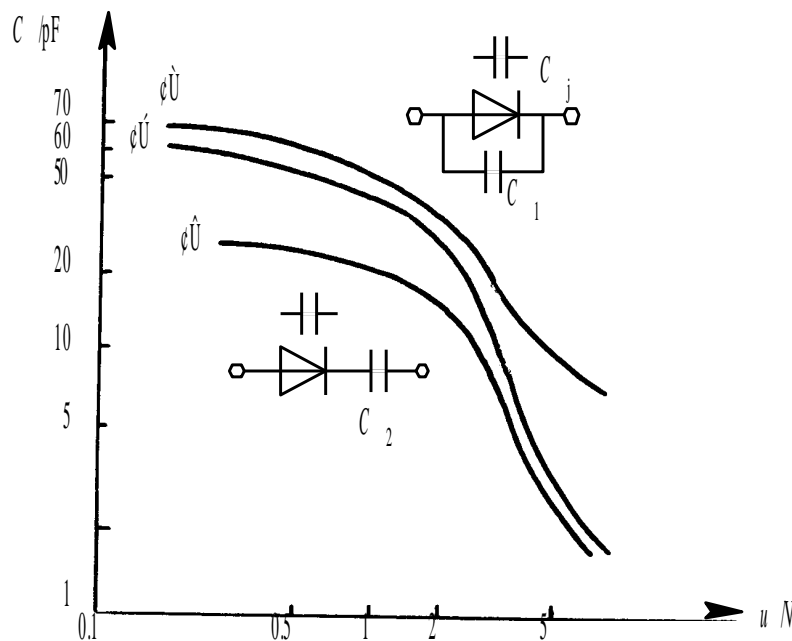
曲线①是并联电容 C_1 时的情形。

并联 C_1 后，各点电容均增加，但在原变容管 C_j 较小的区域并联电容影响大，在 C_j 值较大的区域，并联电容 C_1 影响小。

曲线③是串联电容 C_2 时的情形。

串联 C_2 后，各点电容均减小，但在原变容管 C_j 较大的区域串联电容影响大，在 C_j 值较小的区域，串联电容 C_1 影

并联电容可以较大地调整 C_j 值小的区域内的 $C \sim u$ 特性，而串联电容可以较大地调整 C_j 值较大的区域内的 $C \sim u$ 特性。



C_j 与固定电容串、并联后的特性

如果原变容管 $\gamma > 2$ ，则可以通过串并联电容的方法，使特性在一定偏压范围内接近的特性，从而实现线性调频。

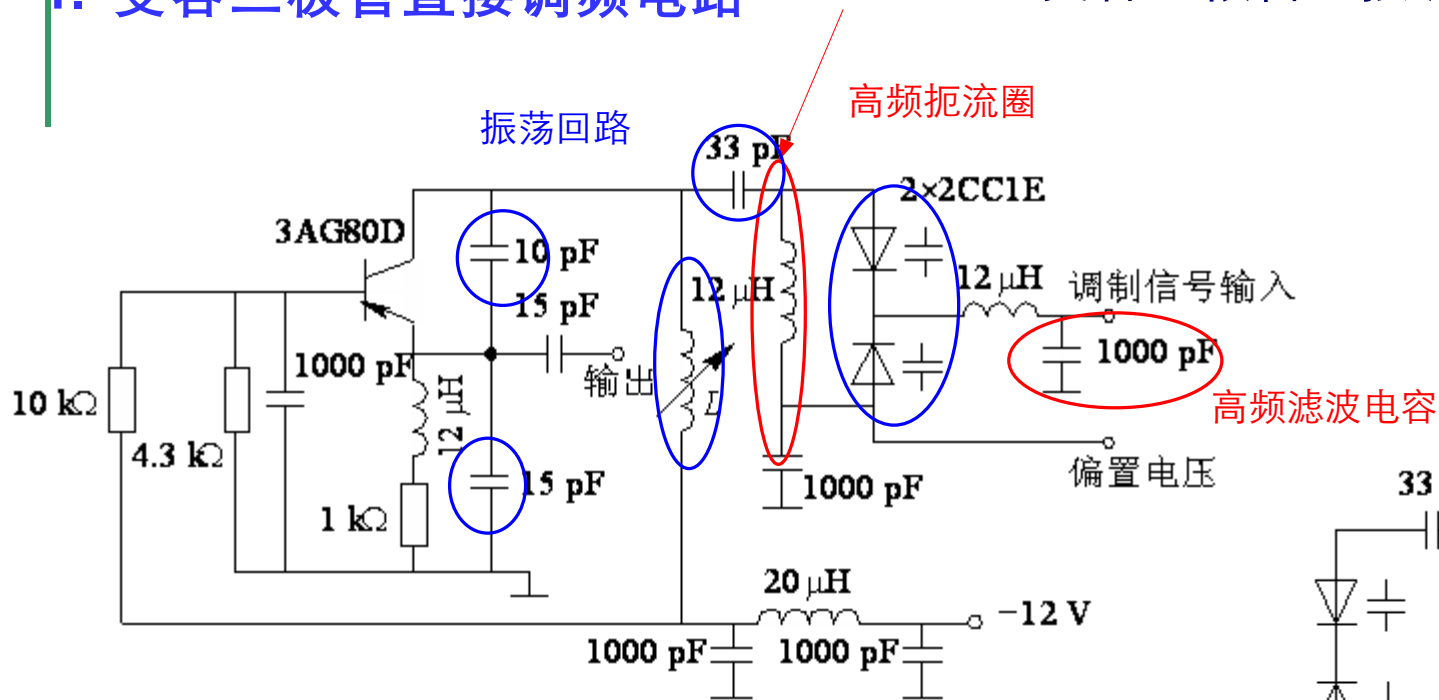


7.3 调频电路

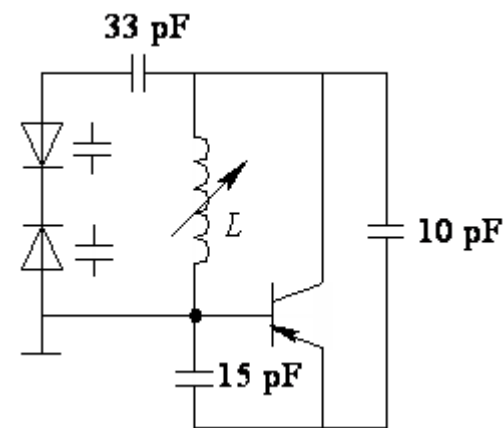
一、直接调频电路

1. 变容二极管直接调频电路

变容二极管直接调频电路举例



(a) 实际电路



(b) 等效电路



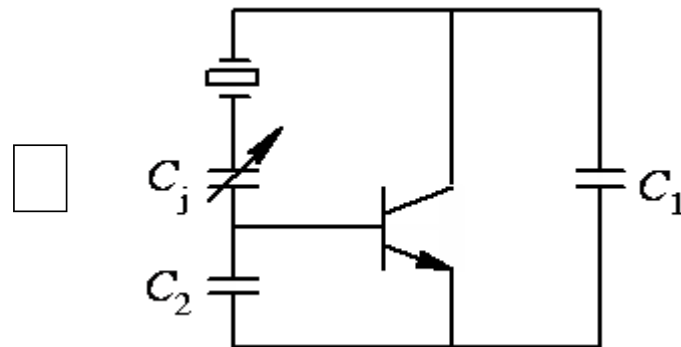
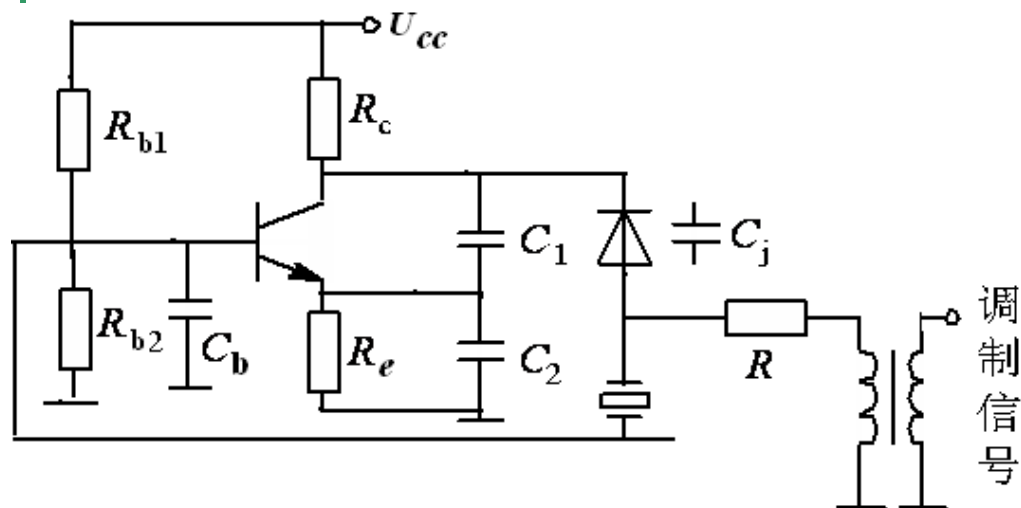
7.3 调频电路

一、直接调频电路

2. 晶体振荡器直接调频电路

变容二极管（LC 振荡器）直接调频电路的中心频率稳定度较差，因此为得到高稳定度的调频信号，可对晶体振荡器调频。

1) 电路



电路为并联型晶振皮尔斯电路，其稳定度高于密勒电路。

变容二极管相当于晶体振荡器中的微调电容，它与 C_1 、 C_2 的串联等效电容作为石英谐振器的负载电容 C_L 。



7.3 调频电路

一、直接调频电路

2. 晶体振荡器直接调频电路

1) 电路

• 电路的振荡频率为

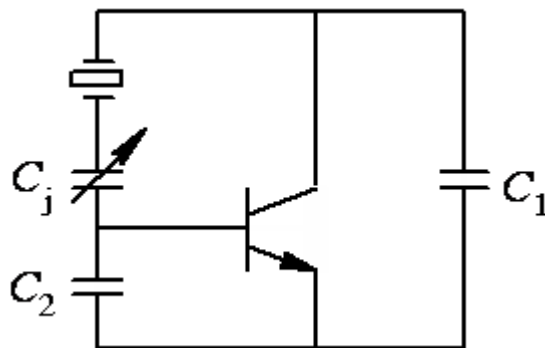
$$f_1 = f_q \left[1 + \frac{C_q}{2(C_L + C_0)} \right]$$

C_q ——晶体动态电容

C_0 ——晶体静态电容

C_L —— C_1, C_2 及 C_j 的串联电容

f_q ——晶体串联谐振频率



2) 原理

在变容管上加 u_Ω 后

$$\square C_j \nearrow \square C_L \nearrow \square f_1 \nearrow$$

→ 实现调频

由振荡回路“射同余异”的原则可知，振荡器工作于晶体的感性区， f_1 处于串联谐振频率 f_q 和并联谐振频率 f_0 之间。

由于晶体的相对频率的变化范围很小，加 C_j 的影响，因此最大频偏



7.3 调频电路

一、直接调频电路

2. 晶体振荡器直接调频电路

2) 原理

在实际电路中，需要采取扩大频偏的措施。

① 在晶体两端并联小电感。

这种方法扩展范围有限，而且会使调频信号的中心频率稳定度有所下

② 利用 π 型网络进行阻抗变换

③ 在调频振荡器输出端增设多次倍频和混频

该方法既满足了载频的要求又增加了频偏。



7.3 调频电路

一、直接调频电路

3. 张弛振荡器直接调频电路

张弛振荡器——载波不是正弦波

如果受调电路是张弛振荡器（矩形波或锯齿波），
则可得方波调频或三角波调频信号。

众所周知，振荡器的正当频率是由 RC 充放电速度决定，因此可用调制信号去控制电容充放电电流，则可控制重复频率，从而达到调频的目的。

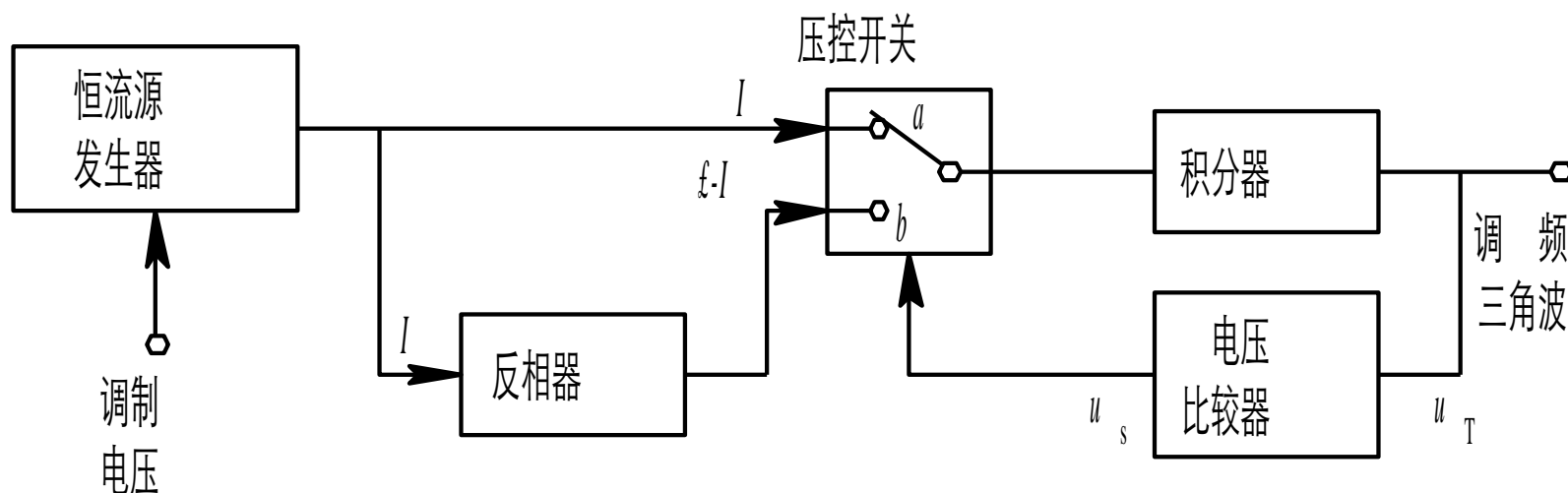


7.3 调频电路

一、直接调频电路

3. 张弛振荡器直接调频电路

调制信号控制恒流源发生器，当调制信号为零时，恒流源输出电流为 I ；当有调制电压时，输出电流为 $I + \Delta I(t)$ ， $\Delta I(t)$ 与调制信号成正比。恒流源成为受控恒流源，恒流源的输出分两路送至积分器，一路直接至压控开关 a ，另一路反向后送至 b ，再送至积分器，压控开关受 u_s 的控制。



三角波调频方框图



7.3 调频电路

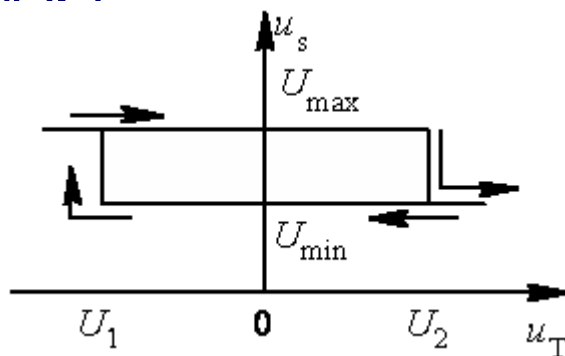
一、直接调频电路

3. 张弛振荡器直接调频电路

电压比较器有两个门限值 U_2, U_1 $U_2 > U_1$

当 u_T 增加时，只有当 $u_T = U_2$ 时，比较器才改变状态，输出为低电平 u_{min} （压控开关倒向 b）

当 u_T 减小时，只有当 $u_T = U_1$ 时，比较器才输出高电平 u_{max} （压控开关倒向 a）





7.3 调频电路

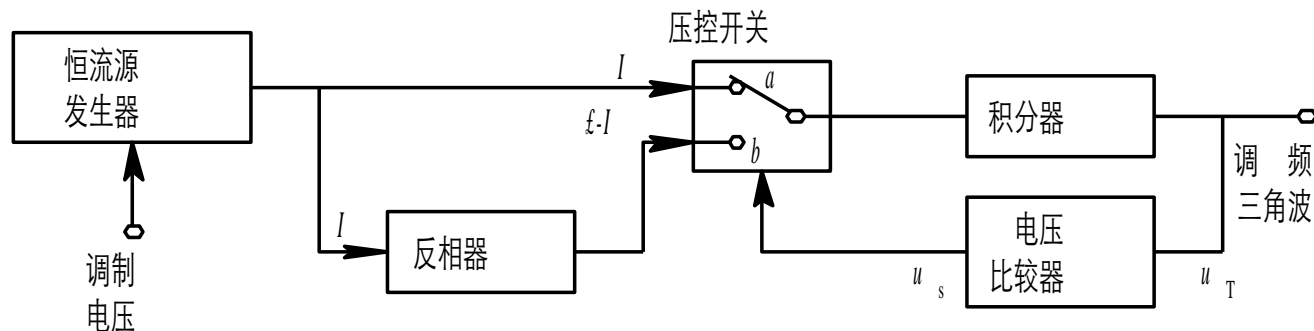
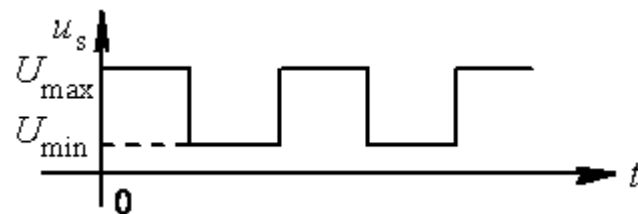
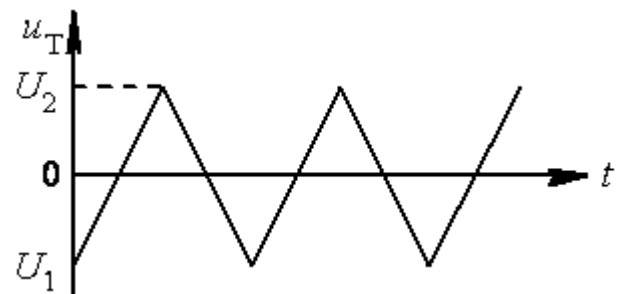
一、直接调频电路

3. 张弛振荡器直接调频电路

如果未加调制信号， I 不变，积分器输出电压的周期是固定的。

I 越大，则三角波的斜率越大，周期愈短
因此三角波的重复频率与 I 成正比

当外加调制电压时，恒流源电流与其成线性关系，因此三角波的频率与调制信号成线性关系





7.3 调频电路

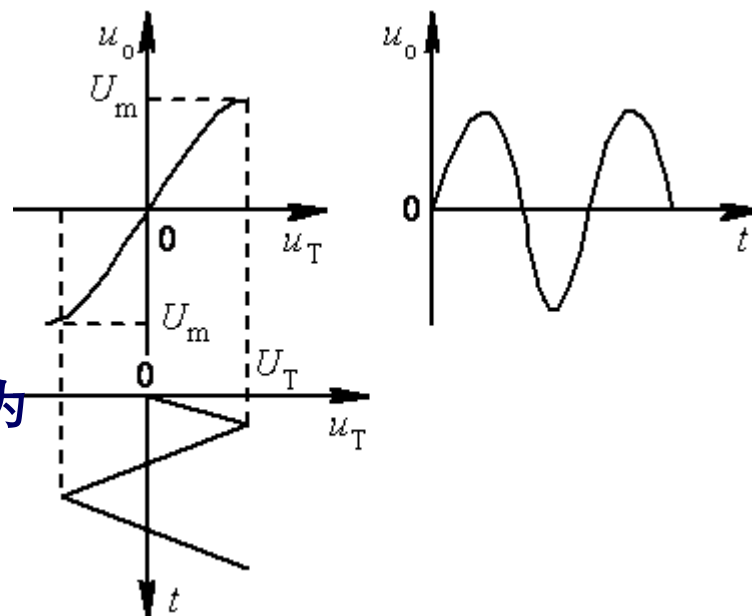
一、直接调频电路

3. 张弛振荡器直接调频电路

电压比较器输出的是调频方波电压。如要得到正弦调频信号，可在其输出端加波形变换电路或滤波器。

它是一个非线性网络，其传输特性为

$$u_o = U_m \sin \frac{\pi u_T}{2U_T}$$



三角波变为正弦波变换特性



7.3 调频电路

二、间接调频电路

间接调频的关键是调相，目前常用的调相电路有：

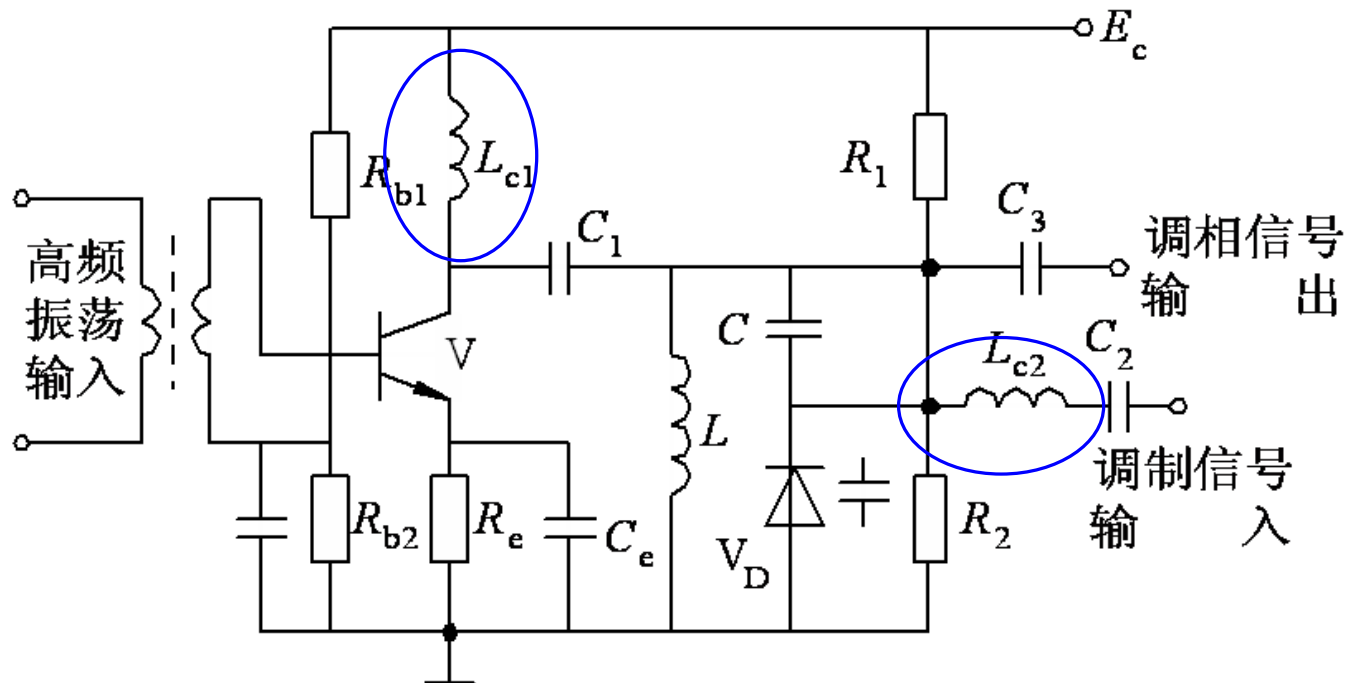
- (1) 回路参数移相电路
- (2) RC 网络移相电路
- (3) 可变延时法调相电路



7.3 调频电路

二、间接调频电路

1. 回路参数移相电路



它是一个变容二极管调相电路。它将受调制信号控制的变容管作为振荡回路的一个元件。

L_{c1} 、 L_{c2} 为高频扼流圈，分别防止高频信号进入直流电源及调制信号源中。



7.3 调频电路

二、间接调频电路

1. 回路参数移相电路

由第二章内容可知，高 Q 并联振荡回路中，电压、电流间相移为

$$\Delta\varphi = -\arctan\left(Q\frac{2\Delta f}{f_o}\right)$$

当 $\Delta\varphi < \pi/6$ $\tanh \varphi \approx \varphi$ ，上式简化为

$$\Delta\varphi \approx -2Q\frac{\Delta f}{f_0}$$

设输入调制信号为 $U_\Omega \cos \Omega t$ ，其瞬时频偏（此处为回路谐振频率的偏移为（见 p277 式 (7-32)）

$$\Delta f = \frac{1}{2p} \gamma m f_o \cos \Omega t \quad \blacklozenge \quad \Delta\varphi = -\frac{Q\gamma m \cos \Omega t}{p}$$



7.3 调频电路

二、间接调频电路

1. 回路参数移相电路

$$\Delta\varphi = -\frac{Q\gamma m \cos \Omega t}{p}$$

即回路产生的相移按输入调制信号的规律变化

注：上面的结论是在 $\Delta\varphi < \pi/6$ 的前提下推出的，因此回路相移特性的线性范围不大，因此这种电路得到的频偏不大

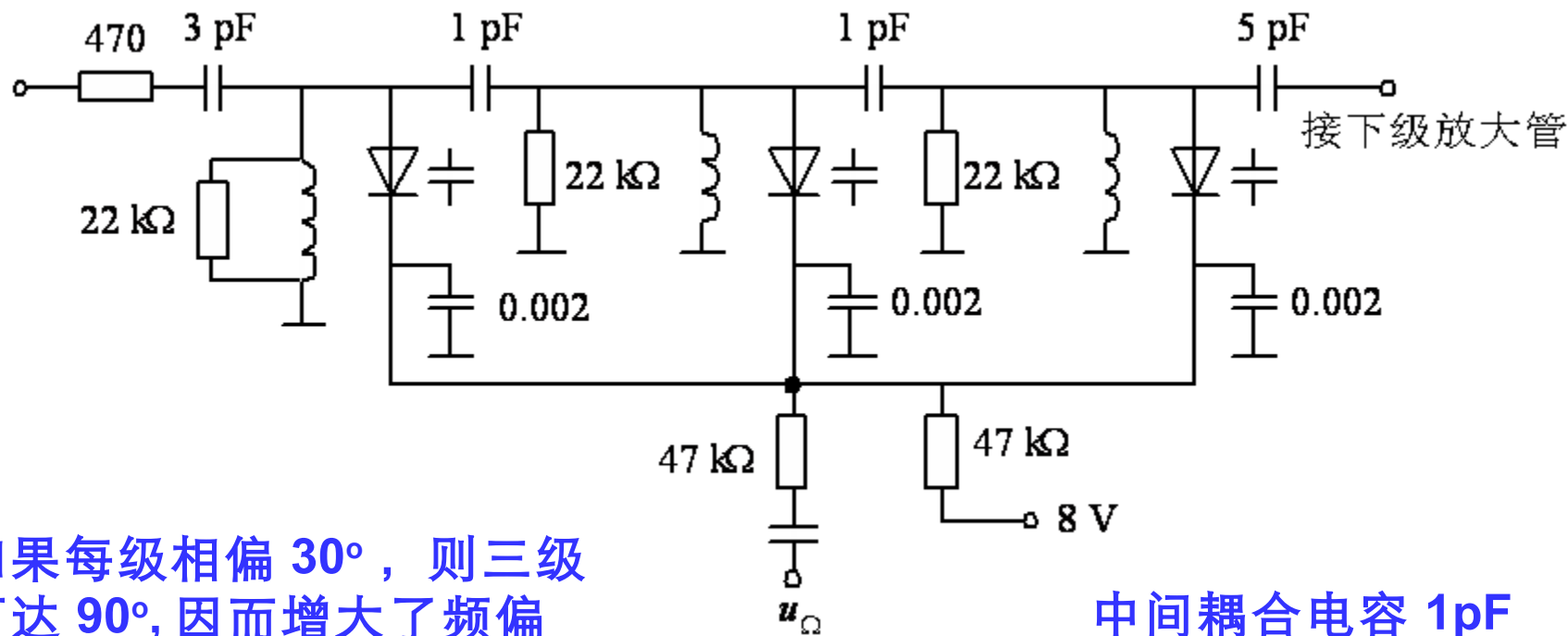
扩大频偏的措施：除了用倍频方法增大频偏外，还应改进调相电路本身。



7.3 调频电路

二、间接调频电路

1. 回路参数移相电路



如果每级相偏 30° ，则三级可达 90° ，因而增大了频偏。

三级回路级联的移相器

中间耦合电容 1pF ，因而相互影响小。