

# 双耦合谐振回路选频特性仿真研究

唐旭英

(长安大学信息工程学院 西安 710064)

**摘要:** 双耦合谐振回路由初、次级 2 个 LC 单谐振回路经耦合器件(电感或电容)耦合形成,在无线电通信系统中广泛作为选频回路使用。在简要分析双耦合调谐回路谐振选频特性基础上,运用 Multisim10.0 电路仿真设计软件,对同步调谐、参差调谐 2 种双耦合调谐回路的选频特性进行了仿真,并对仿真结果进行了分析、说明。运用 Multisim10.0 仿真软件对双耦合调谐回路进行选频性能仿真,可以省略烦琐的电路计算过程,直观展示其谐振选频特性,直接测量谐振频率点和通频带数值,对电路参数设计和工程调试实现有直接的指导作用。

**关键词:** 双耦合谐振回路;互感耦合;电容耦合;同步调谐;参差调谐;选频特性;仿真

**中图分类号:** TN722.3    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 510.1010

## Simulating research on double coupling resonant circuit's frequency selective characteristics

Tang Xuying

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** The double coupling resonant circuits were made up of two LC single resonant circuit through element L or C. The circuits were widely used as frequency selective circuits in radio communication systems. Based on brief analysis of resonant frequency selective characteristics, the frequency selective characteristics of synchronous tuning and stagger tuning double coupling circuits were simulated by Multisim 10.0 circuit simulation software, and the simulated results were also analyzed and explained. With the help of Multisim 10.0, the tedious calculation of double coupling resonant circuit was omitted, the frequency selective characteristics were visually displayed, and the value of resonant frequency and transmission band were directly measured, it can also help to design the circuit parameters and to debug the circuit.

**Keywords:** double coupling resonant circuit; Inductance coupling; capacitance coupling; synchronous tuning; stagger tuning; frequency selective characteristics; simulating

### 1 引言

利用 LC 回路的谐振特性来实现选频功能的电路,称为 LC 谐振式选频电路,简称谐振回路。谐振回路在无线电通信技术中有着十分重要的选频应用,在无线电通信系统的接收端,通常运用谐振回路的谐振特性来从众多不同频率信号中选出有用信号,并抑制无用信号。谐振回路分为单谐振回路和耦合谐振回路,单谐振回路只有 1 个 LC 谐振回路,电路简单,调试容易,但是选频特性不理想(频带窄、带内不平坦、带外衰减慢),仅适用于频带较窄信号的选择;耦合谐振回路由 2 个或 2 个以上的 LC 回路通过一定的耦合

方式构成,电路较复杂,调试较烦琐,但选频特性好(频带宽、带内平坦、带外衰减快),选频应用广泛。而在实际应用中,最常用的耦合谐振选频回路是双耦合谐振回路,它由初、次级 2 个 LC 单谐振回路经耦合器件(互感或电容)耦合形成,如图 1 所示。对双耦合谐振回路,由于初、次级谐振回路之间相互影响,所以其选频特性理论计算、分析较烦琐,实际电路参数设计、调试较困难。

在简要分析双耦合调谐回路谐振选频特性基础上,运用 Multisim10.0 电路仿真设计软件,对同步调谐、参差调谐两种双耦合调谐回路的选频特性进行了仿真,并对仿真结果进行了分析、说明。

收稿日期:2014-12

## 2 双耦合谐振回路谐振选频特性分析

双耦合谐振回路的原理电路图如图1所示。图1(a)是通过互感  $M$  耦合的串联型双耦合回路,称为互感耦合回路;图1(b)是通过电容  $C_M$  耦合的并联型双耦合回路,称为电容耦合回路。

对于双耦合谐振回路来说,其谐振频率值主要取决于初、次级回路的电感、电容( $L$ 、 $C$ )数值大小,而选频特性则与初、次级回路之间的耦合程度(通常用耦合系数  $k$  来表示)有着密切的联系,改变耦合器件(互感  $M$  或电容  $C_M$ )数值,可以改变初、次级回路之间的耦合程度。

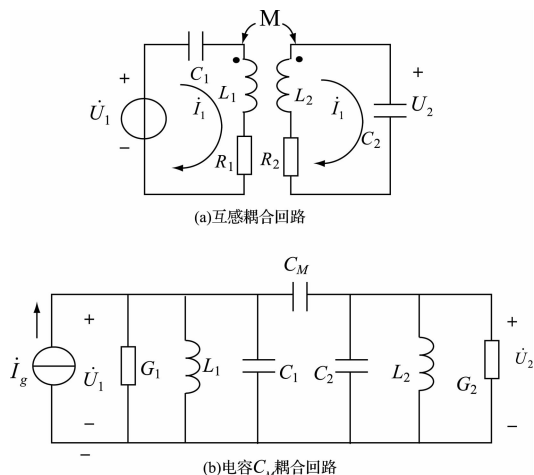


图1 双耦合谐振回路电路

根据耦合系数的定义,图1(a)所示互感耦合回路的耦合系数<sup>[1]</sup>:

$$k = \frac{|X_{12}|}{\sqrt{X_{11} \cdot X_{22}}} = \frac{\omega M}{\sqrt{\omega L_1 \cdot \omega L_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (1)$$

图1(b)所示电容耦合回路的耦合系数:

$$k = \frac{C_M}{\sqrt{(C_1 + C_M)(C_2 + C_M)}} \quad (2)$$

### 2.1 同步调谐双耦合回路选频特性

所谓耦合回路的谐振特性,是指在耦合回路参数( $L_1$ 、 $C_1$ 、 $L_2$ 、 $C_2$ )数值不变的情况下,次级回路的电压(电流)随信号源频率变化而变化的情况。

当双耦合谐振回路中  $L_1 = L_2 = L$ ,  $C_1 = C_2 = C$  时,初、次级回路的谐振频率将相同,称为同步调谐。

对电容双耦合回路,假设  $G_1 = G_2 = G$ ,则其归一化幅频特性方程<sup>[2]</sup>:

$$\alpha = \left| \frac{U_2}{U_{2\max}} \right| = \frac{2\eta}{\sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}} \quad (3)$$

式中:  $\eta = Qk$  称为耦合因数,而  $Q$ 、 $k$  分别是回路品质因数、耦合系数;  $\xi = Q \frac{2\Delta f}{f_0}$ , 是广义失谐量。

根据式(3),以  $f$  为变量,  $\eta$  为参变量,画出的电容双耦合次级回路归一化幅频谐振特性曲线如图2所示。可以看出,  $\eta$  值不同,曲线形状不同。

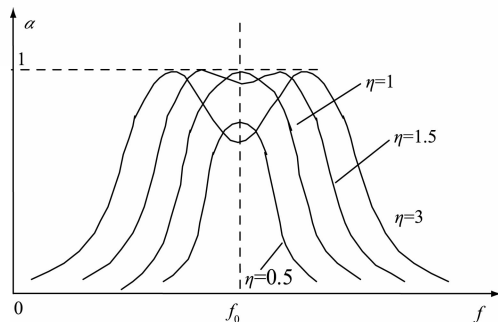


图2 互感耦合次级回路归一化谐振曲线

1)当  $\eta = 1$  时,为临界耦合状态,此时谐振曲线是单峰曲线。在谐振点上( $f = f_0$ ,  $\xi = 0$ ),  $\alpha = 1$ ,回路电压达到最大值。此时,初、次级回路均处于谐振状态,且满足最大功率传输条件,故此时称为最佳全谐振状态。

2)当  $\eta < 1$  时,为弱耦合状态,随着  $\eta$  减少,初、次级回路之间耦合变弱,  $\alpha$  变小,回路通频带也越窄。此时信号传输效率低,所以电路一般不工作在此种状态。

3)当  $\eta > 1$  时,为强耦合状态,初、次级回路之间耦合较强,信号的传输能力较强,且随着  $|\xi|$  的增大,  $\alpha$  值先是增大,而后又减小,在  $f = f_0$  ( $\xi = 0$ ) 的两边形成双峰,  $f = f_0$  处为谷点,且  $\eta$  值愈大,两峰点相距越远,谷点下凹也越厉害。此时通频带宽度与  $\eta$  值有关,  $\eta$  值越大,通频带越宽。但是要注意在谷点处  $\alpha$  值不能小于  $1/\sqrt{2}$ ,否则会影响信号的传输。

根据对偶关系,由电容双耦合回路得出的结论,完全适用于互感双耦合回路。

### 2.2 参差调谐双耦合回路选频特性

当双耦合谐振回路中  $L_1$ 、 $L_2$  或  $C_1$ 、 $C_2$  数值不同时,初、次级回路的谐振频率将不同,二者不能同时达到谐振状态,此时称为参差调谐。这时有<sup>[2]</sup>:

$$\alpha = \frac{2\eta}{\sqrt{(1 - \xi_1 \xi_2 + \eta^2)^2 + (\xi_1 + \xi_2)^2}} \quad (4)$$

式中:  $\eta = k \sqrt{Q_1 Q_2}$ ,  $Q_1$ 、 $Q_2$  分别为初、次级回路的品质因数。 $\xi_1$ 、 $\xi_2$  分别为初、次级回路的广义失谐量。改变  $\eta$  (即改变耦合系数  $k$ ) 时不仅双峰位置移动,而且峰的高度也发生变化。当  $\eta = k \sqrt{Q_1 Q_2} = 1$  时出现最大峰值,当  $\eta$  略大于1时,仍出现单峰谐振曲线,只是当  $\eta \gg 1$  时才出现双峰,且峰点高度也随  $\eta$  增大而下降。

参差调谐双耦合回路在电路调试过程中常常见到,只是因为其分析、计算十分烦琐,所以,在一般的教科书中往往不做分析、讨论。

### 3 双耦合谐振回路选频特性仿真

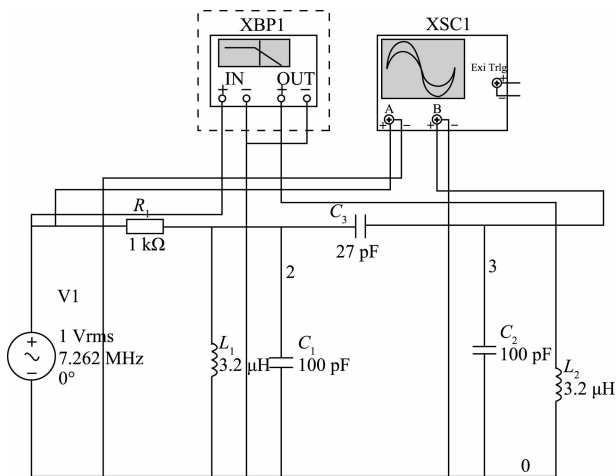
Multisim 是加拿大 IIT 公司推出的专门用于电路仿

真和设计的电子设计自动化软件<sup>[3-8]</sup>。运用 Multisim 10.0 计算机仿真软件对双耦合谐振回路的谐振选频特性进行仿真分析,可以省略烦琐的电路计算过程,直观地分析其谐振选频特性,直接测量谐振频率点和通频带数值,对双耦合谐振回路的电路参数设计和工程调试实现有直接的指导作用。

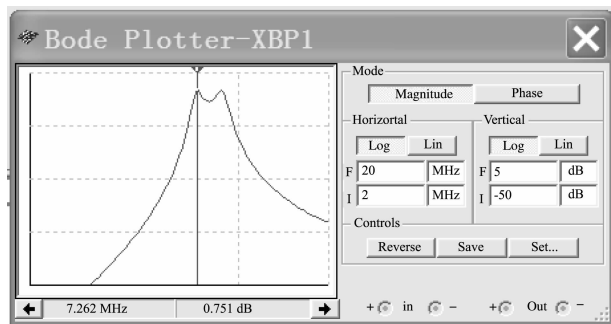
### 3.1 同步调谐双耦合回路选频特性仿真

电容耦合同步调谐双耦合回路的仿真电路如图 3(a)所示。图(b)为其幅频特性,图(c)为电路输入、输出波形。

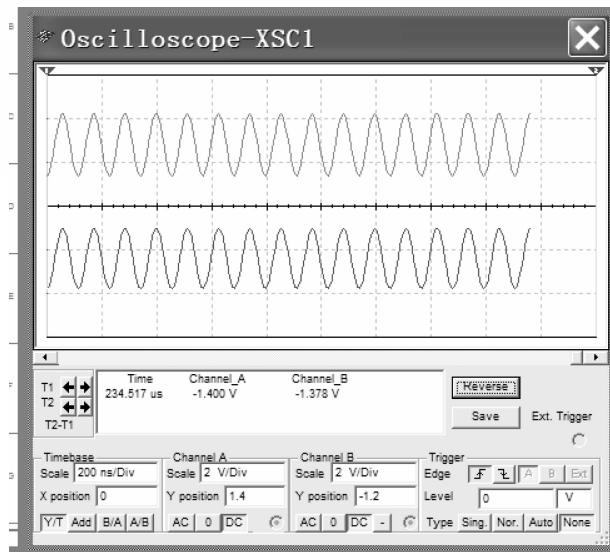
从仿真图形可知,在图 3(a)所示仿真器件数值下,电路的输出波形(图(c)下方波形)较好,电路的幅频特性曲线为双峰曲线(图(b)),耦合强度较大,电路处于强耦合状态。在图(b)中,改变标尺线的位置可以测量任意输入频率处的传输特性,如将标尺线移动到左峰位置,测量出左峰频率值为 7.262 MHz,此时信号传输能力最强。同理可测出右峰频率为 8.730 MHz,中心凹陷处频率为 7.962 MHz(此时幅度下降了 -2.51 dB,小于 -3 dB),电路的 -3 dB 带宽频率范围为 7.017~9.174 MHz,即 -3 dB 带宽为 2.157 MHz。通过图(c)可以观察到,改变信号源的输入信号频率时,若输入信号频率在电路的通频带内,则电路输出信号幅度较大,波形较好;随着信号源频率逐渐远离电路的通频带范围,输出信号幅度逐渐减少,直至为 0。电路的选频特性通过仿真一目了然。



(a)电容耦合同步调谐双耦合仿真电路



(b)幅频特性仿真



(c)输入输出波形仿真

图 3 同步调谐双耦合回路选频特性仿真

如果要改变电路的耦合状态,改变耦合电容  $C_3$  的数值即可,改变  $C_3$  值后,通过 Bode 表的仿真图形可以判断电路的工作状态。单峰曲线为临界耦合或弱耦合状态,双峰曲线为强耦合状态。如图 4 所示,当  $C_3$  数值减少到 15 pF 时,电路的幅频特性仿真图形变成单峰曲线,且峰点最高,此时在 8.237 MHz 频点处,电路输出最大,电路工作于临界耦合状态。若继续减少  $C_3$  的数值,幅频特性仿真图的峰点下降,工作于弱耦合状态。若  $C_3$  的数值  $>15$  pF,幅频特性曲线出现双峰,随着  $C_3$  数值的增大,两峰间距离拉大且中间凹陷点下降幅度加大。

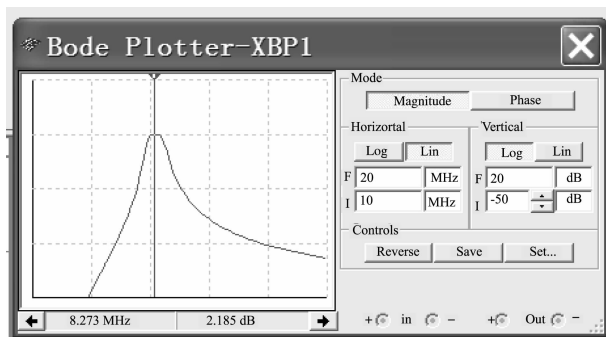
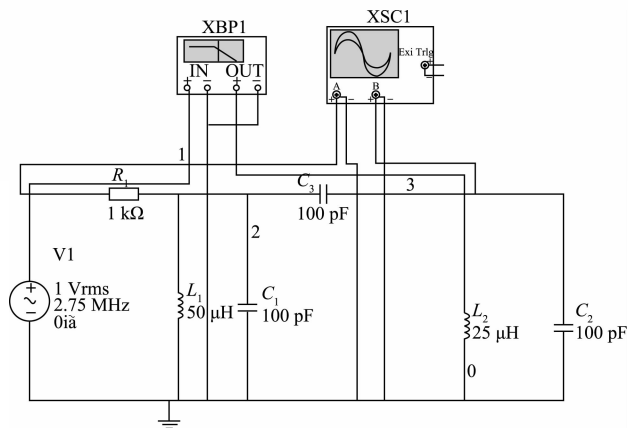


图 4  $C_3 = 15$  pF 时幅频特性仿真

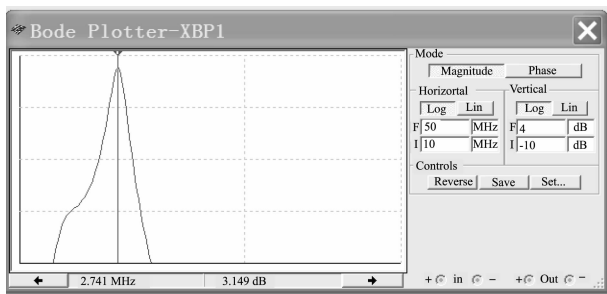
如果要改变电路的谐振频率,只要改变电路中的元件参数( $L_1 = L_2, C_1 = C_2$ )数值即可,改变后的电路选频效果如何,通过 Bode 表测量获得的电路幅频特性仿真图形可知。

### 3.2 参差调谐双耦合回路选频特性仿真

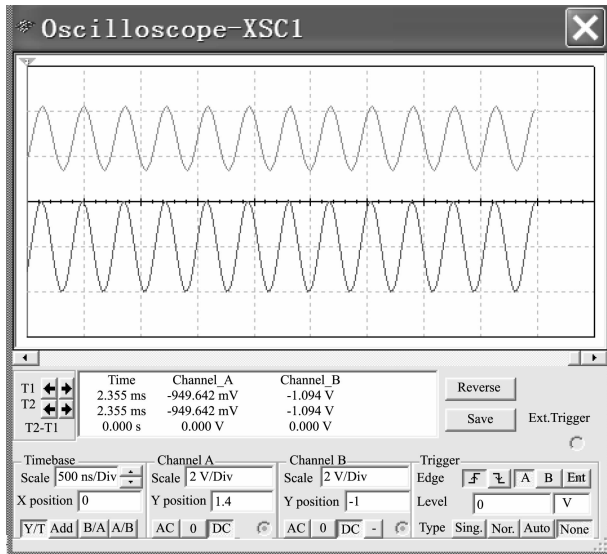
参差调谐双耦合回路因初、次级回路的  $L, C$  参数数值不同,电路的计算工作量很大,且容易出错。而通过该仿真,电路的选频特性很容易获得,既省去复杂的电路计算,又方便电路设计和调试。图 5(a)为参差调谐双耦合电路仿真,图(b)为电路的幅频特性仿真波形。



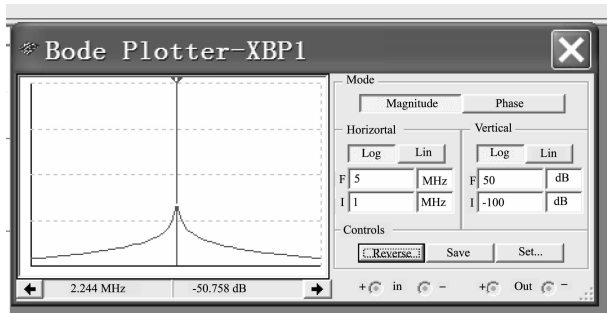
(a) 参差调谐双耦合仿真电路



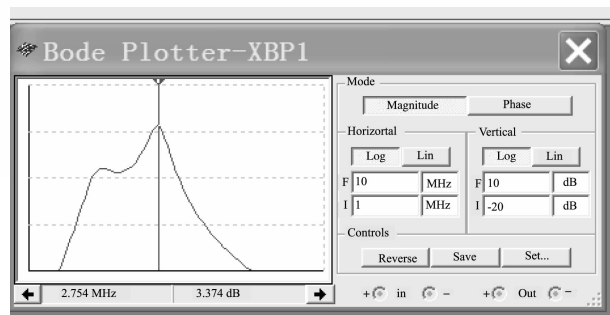
(b) 幅频特性仿真



(c) 输入输出波形仿真



(d)  $C_1=500$  pF时幅频特性仿真



(e)  $L_1=30$  μH时幅频特性仿真

图5 参差调谐双耦合回路选频特性仿真

在图(a)所示仿真器件数值下,通过计算,初、次级回路的谐振频率分别为 2.251 MHz 和 3.183 MHz,二者的中心频率为 2.727 MHz,与图(b)中测量结果 2.741 MHz 相差不大。从图(b)中可以看出,在中心频率点上,电路的输出比输入幅度高 3 dB,此时电路具有良好的传输特性,这一点通过图(c)电路输入输出信号波形也可以看出,图中下图为电路的输出信号波形图,其幅度明显大于上图的输入信号幅度,说明电路对信号源的 2.75 MHz 频率信号(该频率处于电路的通频带内)具有良好的选频特性。

在图(a)仿真电路中改变初、次级回路中的电容、电感或耦合电容的数值,可以改变电路幅频特性曲线。例如当  $C_1=500$  pF,其他参数不变时,电路的幅频特性仿真图如图(d)所示。此时,电路幅频特性曲线仍为单峰曲线,但是传输特性变差,在中心频率处传输特性为  $-50$  dB,原因是初、次级谐振回路的谐振频率相差较远。当  $L_1=30$  μH,  $C_1=150$  pF,电路的幅频特性仿真图如图(e)所示,此时幅频特性曲线变为双峰曲线,通频带明显变宽,输出信号幅度较大,即传输特性较好,此时初、次级谐振回路的谐振频率相差较小<sup>[9-10]</sup>。

#### 4 结论

给出了一种运用 Multisim10.0 电路仿真设计软件,对双耦合谐振回路选频特性进行仿真的方法,并对同步调谐、参差调谐 2 种双耦合谐振回路的选频性能进行了仿真,仿真结果表明:

1) 同步调谐、参差调谐 2 种双耦合谐振回路均可用于对信号进行选频,其选频性能优于单调谐 LC 回路,主要表现在电路的通频带较宽、带内较平坦、带外衰减快等;

2) 同步调谐、参差调谐 2 种双耦合谐振回路在实际工程应用时应工作在弱强耦合状态,此时电路的传输特性最佳,且电路通频带较宽。若工作在弱耦合状态,则信号的传输能力太弱;若工作在强耦合状态,则在通频带中心频率处可能会出现输出信号幅度下降超过 3 dB 的情况;若工作在临界耦合状态,电路传输特性虽然较好,但具体调试难以实现;

(下转第 58 页)