



双调谐谐振放大电路理论仿真分析与 实验设计

金伟正, 孙 原, 杨光义
(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 为满足高频双调谐谐振放大电路在通信电子实验教学中的需要, 对高频双调谐谐振放大器中的电容并联双回路的耦合特性进行理论推导和数学分析, 给出其归一化频率特性函数的二维、三维详细分析图, 提出通频带具有连续与离散分布两种状态, 并设计高频双调谐谐振放大器硬件实验电路验证其正确性。通过该实验电路, 学生能透彻地理解高频双调谐谐振放大电路的原理及掌握电路设计方法。

关键词: 高频; 双调谐回路谐振放大; 并联谐振; 耦合振荡回路

中图分类号: TN761.2; G642.423

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230348

Experiment of the Double Tuned Resonant Amplifier Circuit Based on Theoretical Analysis

JIN Weizheng, SUN Yuan, YANG Guangyi

(Electronic Information College, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to meet the teaching needs of high frequency double tuning resonance amplifier circuit that is absent in the communication electronic experiment teaching, the coupling characteristics of capacitor parallel double circuit in high-frequency double tuned amplifier are theoretically deduced and mathematically analyzed, and the two-dimensional and three-dimensional detailed analysis diagrams of the normalized frequency characteristic function of the circuit are given. In the experiment design, the passband of this circuit has two states of continuous and discrete distribution, and the hardware experimental circuit of double tuned amplifier is designed to verify the correctness. Through the experimental circuit, students can thoroughly understand the principle of the high-frequency small signal resonant amplification circuit and master the circuit design method.

Key words: high frequency; dual tuning loop resonant amplification; parallel resonance; coupled oscillation loop

高频电子线路是电子与通信等专业的一门重要的专业基础课, 该课程的主要任务是让学生熟悉高频电子线路各个单元电路的基本概念和工作原理, 掌握各种非线性电子线路分析和设计方法, 以培养学生对电路系统的分析与设计能力, 进而为后续电子类课程打下基础。在课程教学中, 高频小信号谐振放大电路是最重要的电路, 其中高频双调谐谐振放大电路又是通信电子线路中的一个重要研究内容^[1-2]。而在现有的高频电子线路课程教学中, 往往只会关注对单调谐回路谐振放大电路的原理讲解而常常忽略双调谐回路谐

振放大电路。为填补教学空白, 本文介绍了一套高频双调谐谐振放大实验电路, 通过本实验电路的学习, 学生能够全面地理解并掌握高频双调谐回路谐振放大电路的基本原理与设计分析方法^[3]。高频双调谐谐振放大电路具有频带宽、选择性好等特性^[4-5], 其电路包括放大回路、谐振回路和直流馈电 3 部分。

1 原理介绍

实验原理电路图如图 1 所示, 分为信号放大、频率选择和直流馈电 3 部分。首先天线的高

收稿日期: 2023-07-15

基金项目: 武汉大学教学研究项目(WHU-2020-413200083)。

作者简介: 金伟正, 博士, 副教授, 主要从事高频电子线路教学和软件无线电等科研工作。E-mail: jwz@whu.edu.cn

频小信号通过具有选频作用的高频变压器耦合到放大管的基电极端, 作为放大器的输入信号。BG_{1_B} 为三极管 S9018, 采用共发射极组态, 根据文献 [6-9], 配置合适的元件参数, 实现输入交流小信号的放大。JP_{3_B} 为选择开关, 通过短路子跳

线改变发射极电阻, 可改变集电极静态电流, 同时对静态工作点有不同的稳定作用。该电路以双调谐并联谐振回路作负载, 实现选频。JP_{1_B}、JP_{2_B} 为选择开关, 通过短路子跳线改变初级和次级回路的并联谐振电阻, 从而改变两个回路的 Q 值。

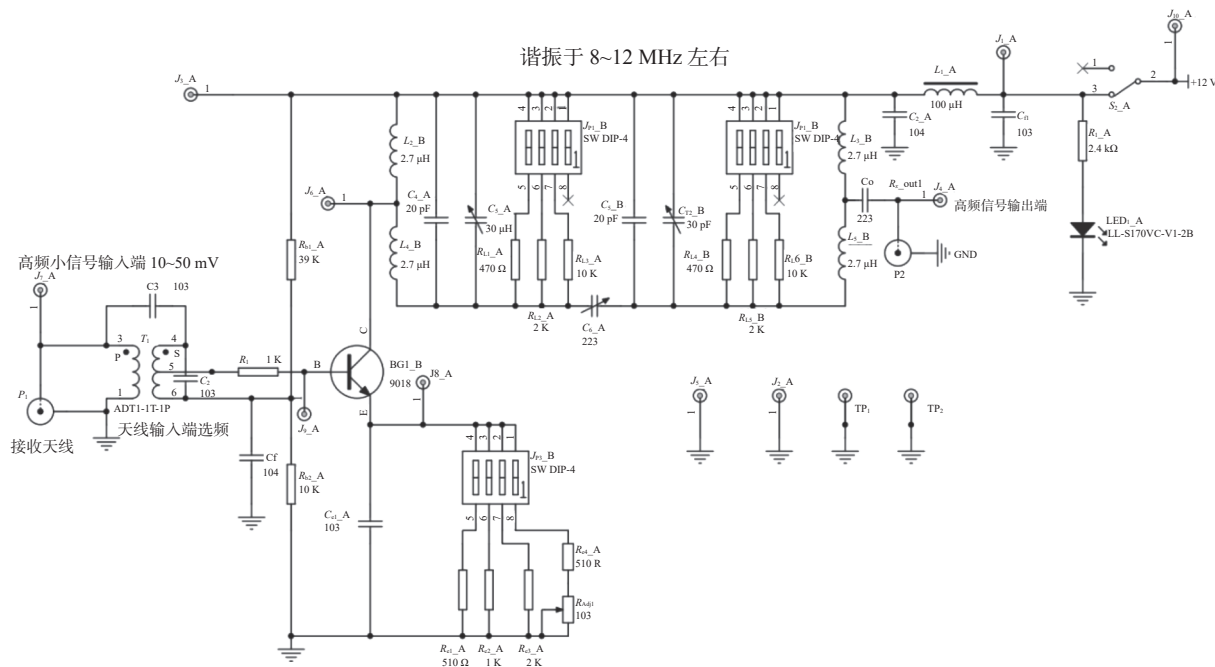


图1 实验原理电路图

三极管放大电路以晶体管 S9018 为核心, 为电容耦合并联型双调谐回路提供足够幅值的放大信号。电容耦合并联型双回路为两个相同元件参数的 LC 回路, 使用耦合电容 C_{6_A} 进行初级和次级两个回路的耦合, 能够实现将三极管放大电路输出信号进行选频, 同时可以调整耦合强度, 使得在实验电路最后能够输出所需要的频带信号。初级回路和次级回路都采用部分接入的方式, 接入系数均为 0.5。对于直流馈电部分, S_{2_A} 开关拨到 3, 进行正常供电, 开关拨到 1, 关断供电, LED₁ 为上电指示灯。根据文献 [10-12], 选择合适的直流馈电电路围绕上述两个模块分布在实验电路的周围, 为三极管放大电路和电容耦合并联型回路提供稳定直流馈电。

2 耦合双调谐回路理论分析

实验电路的耦合双调谐回路的交流通路原理电路, 如图 2 所示。电容耦合并联型回路能够将信号通过电容耦合的方式输出, 直接决定着电路

的选频特性^[13]。归一化更具有普遍应用意义, 通过对频率进行归一化处理, 可以更清楚观察到选频特性的变化, 分析通频带。

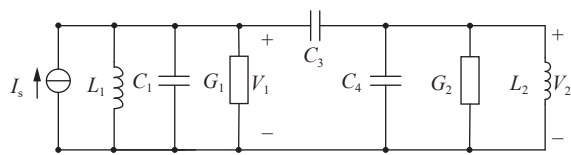


图2 电容耦合并联回路

假定电路参数呈对称结构, 有: $L_1 = L_2 = L$, $C_1 = C_2 = C$, $G_1 = G_2 = G$ 。引入品质因数 $Q = \frac{1}{\omega_0 LG}$ 以及广义失谐 $\xi = Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$ (其中 ω_0 为谐振频率), 根据图 2 列写节点方程求得次级回路电压 V_2 为^[14]:

$$V_2 = \frac{j\omega C_3 I_s}{G^2(1 + j\xi^2)^2 + \omega^2 C_3^2} = \frac{j\omega C_3 I_s}{G \left(1 - \xi^2 + \frac{\omega^2 C_3^2}{G^2} + j2\xi \right)} \quad (1)$$

式中: ξ 为广义失谐无量纲; ω 为输入信号角频

率, 单位 rad/s。

对 V_2 取模, 并引入耦合系数 $\eta = \frac{\omega C_3}{G}$ 可得:

$$V_2 = \frac{2\eta I_s}{G\sqrt{(1-\xi^2+\eta^2)^2+4\xi^2}} \quad (2)$$

对式(2)做关于 ξ 的偏微分并进行数学分析可知, 当耦合系数 $\eta = 1.0$ 时, 次级回路电压 V_2 在 $\xi_0 = 0$ 处有最大值 $V_{2\max} = \frac{I_s}{G}$, 此时称为最佳耦合。对次级回路电压 V_2 的表达式处理可得归一化频率特性函数 α :

$$\alpha = \frac{V_2}{V_{2\max}} = \frac{2\eta}{\sqrt{(1-\xi^2+\eta^2)^2+4\xi^2}} \quad (3)$$

对式(3)两边作关于 η 和 ξ 的偏微分可得:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \eta} = -\frac{4\eta^2(1-\xi^2+\eta^2)}{[4\xi^2+\xi(1-\xi^2+\eta^2)^2]^{1.5} + \sqrt{4\xi^2+\xi(1-\xi^2+\eta^2)^2}^{0.5}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \xi} = -\frac{\eta[8\xi-4\xi(1-\xi^2+\eta^2)]}{[4\xi^2+\xi(1-\xi^2+\eta^2)^2]^{1.5}} \quad (5)$$

首先, 讨论归一化函数 α 随 η 的变化趋势。令 $\frac{\partial \alpha}{\partial \eta} = 0$, 可得方程的解为: $\eta_{1,2} = \pm\sqrt{1+\xi^2}$, $\eta_{3,4} = \pm j\sqrt{1+\xi^2}$ 。由于耦合因数 η 的值始终为正实数, 保留解 $\eta = \sqrt{1+\xi^2}$ 进行讨论, 由数学分析可知, 归一化函数 α 在 $\eta = \sqrt{1+\xi^2}$ 处取到极大值 1, 以 $\xi = 0$ 为例, 如图 3 所示。

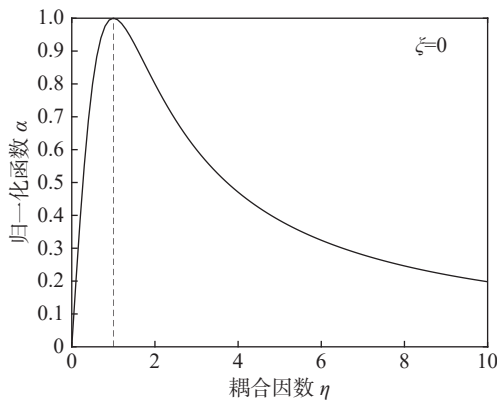


图 3 归一化函数 α 随耦合因数 η 变化示意图

其次, 讨论归一化函数 α 随 ξ 的变化趋势。由数学分析可知对归一化函数 α 分别在 $\xi_0 = 0$, $\xi_1 = -\sqrt{\eta^2-1}$, $\xi_2 = \sqrt{\eta^2-1}$ 处有极值。当 $0 < \eta < 1.0$ 时, 有:

$$\left. \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=0} \leq 0 \quad (6)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} \right|_{\xi_{1,2}=\pm\sqrt{\eta^2-1}} \geq 0 \quad (7)$$

此时归一化函数 α 在 $\xi_0 = 0$ 有极大值, 在 $\xi_{1,2} = \pm\sqrt{\eta^2-1}$ 处有极小值。又因为 $\xi_{1,2} = \pm\sqrt{\eta^2-1}$ 此时为虚数, 故归一化函数 α 在实平面上仅有极大值 $\alpha_{\max} = \frac{2\eta}{\eta^2+1}$, 当 $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \alpha_{\max}$ 时:

$$\xi_1 = -\sqrt{\eta^2-1 + \sqrt{2\eta^4+2}} \quad (8)$$

$$\xi_2 = \sqrt{\eta^2-1 + \sqrt{2\eta^4+2}} \quad (9)$$

以 $\eta = 0.5$ 为例, 如图 4(a) 所示, α 在实平面上仅有极大值 $\alpha_{\max} = 0.8$, 当 $\alpha = 0.8 \times \frac{1}{\sqrt{2}}$ 时, $\xi_1 = -0.84$, $\xi_2 = 0.84$ 。当 $\eta = 1.0$ 时, 如图 4(b) 所示。此时归一化函数 α 在实平面上有最大值 $\alpha_{\max} = 1$; 当 $\eta > 1.0$ 时, 有:

$$\left. \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} \right|_{\xi=0} > 0 \quad (10)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \xi^2} \right|_{\xi_{1,2}=\pm\sqrt{\eta^2-1}} < 0 \quad (11)$$

此时归一化函数 α 在 $\xi_0 = 0$ 处有极小值:

$$\alpha_{\min} = \frac{2\eta}{\eta^2+1} \quad (12)$$

在 $\xi_{1,2} = \pm\sqrt{\eta^2-1}$ 处有极大值 $\alpha_{\max} = 1$ 。当 $\alpha = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 时, $\xi = \pm\sqrt{\eta^2 \pm 2\eta - 1}$, 以 $\eta = 2.0$ 为例, 如图 4(c) 所示。

由图 4(a) 和图 4(c) 可知, 电容耦合并联型回路的通频带随耦合程度的不同将产生连续与离散两种分布情况, 即在弱耦合和临界耦合情况下, 回路通频带将连续分布, 在强耦合情况下, 可能会出现两个通频带, 以下将根据 η 的不同取值范围逐步分析。由通频带定义可知:

$$\alpha = \frac{V_2}{V_{2\max}} = \frac{2\eta}{\sqrt{(1-\xi^2+\eta^2)^2+4\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \alpha_{\max} \quad (13)$$

1) 当 $0 \leq \eta < 1$ 时, 回路处于弱耦合, $\alpha_{\max} = \frac{2\eta}{\eta^2+1}$ 解得满足式(6)的广义失谐为 $\xi = \pm\sqrt{\eta^2 + \sqrt{2+2\eta^4} - 1}$ 。通频带 $2\Delta f_{0.7}$

$\sqrt{\eta^2 + \sqrt{2+2\eta^4} - 1} \frac{f_0}{Q}$, 如图4(a)所示。

2) 当 $1 \leq \eta < 1 + \sqrt{2}$ 时, 回路处于临界耦合或强耦合, $\alpha_{\max} = 1$, 解得满足式(6)的广义失谐为 $\xi = \pm \sqrt{\eta^2 \pm 2\eta - 1}$ 。通频带 $2\Delta f_{0.7} = \sqrt{\eta^2 + 2\eta - 1} \frac{f_0}{Q}$, 如图4(b)所示。

3) 当 $\eta > 1 + \sqrt{2}$ 时, 谷值附近在 $-\sqrt{\eta^2 - 2\eta - 1} < \xi < \sqrt{\eta^2 - 2\eta - 1}$ 范围内的次级回路电压值 V_2 未能达到最大电压值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 即在广义失谐满足 $-\sqrt{\eta^2 + 2\eta - 1} < \xi < -\sqrt{\eta^2 - 2\eta - 1}$ 或 $\sqrt{\eta^2 - 2\eta - 1} < \xi < \sqrt{\eta^2 + 2\eta - 1}$ 时

次级回路电压值 V_2 才能大于最大电压值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$, 通频带呈离散分布, 单侧通频带为 $2\Delta f_{0.7} = (\sqrt{\eta^2 + 2\eta - 1} - \sqrt{\eta^2 - 2\eta - 1}) \frac{f_0}{Q}$, 如图4(c)所示。

使用 MTALAB 对式(3)进行三维可视化如图5所示, 图5(a)为正视俯视图, 图5(b)为正视投影图, 图5(c)为 η 、 ξ 起始点在前端的侧视俯视图, 图5(d)为 η 、 ξ 起始点在后端的侧视俯视图。由以上分析可知, 在设计元件参数时应使回路处于弱耦合状态并使谐振频率保持在合理的范围之内。

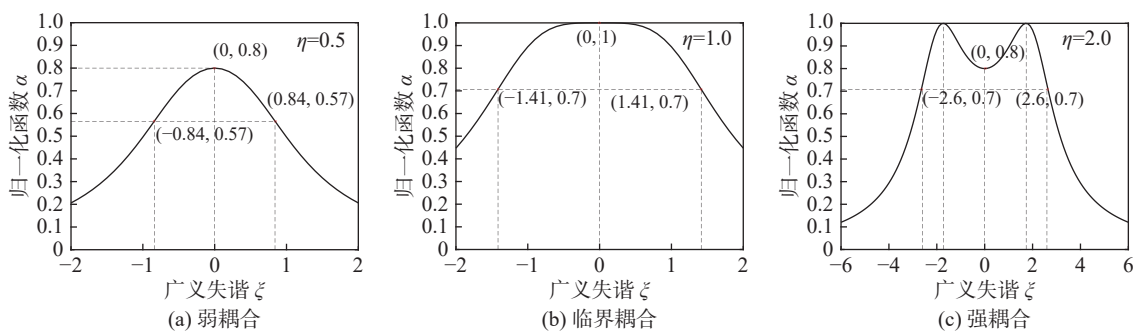


图4 归一化函数 α 随广义失谐 ξ 变化曲线与通频带示意图

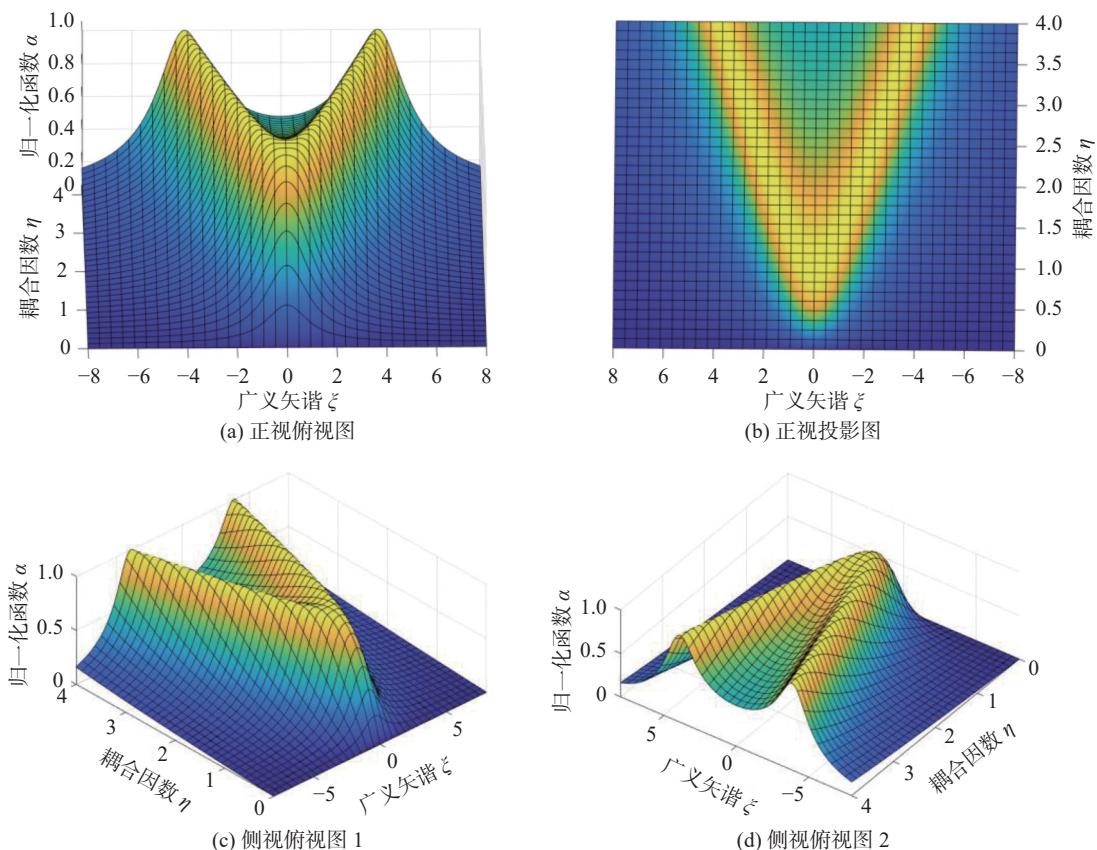


图5 归一化函数 α 的三维响应图

3 实验数据分析

高频双调谐回路谐振放大器实验板电路如图 6 所示。由于本文已经给出完整的实验电路图，限于论文篇幅，仅对高频双调谐谐振放大器处于临界耦合、弱耦合及强耦合状态下的幅频特性进行测试，其余性能测试略过。

调节耦合电容 C_{6_A} 使电路处于强耦合、弱耦合状态，分别通过短路子连通跳线开关 JP_{1_B} 、 JP_{2_B} 和 JP_{3_B} ，将电路板上的 R_{e3_A} 、 R_{L3_A} 和 R_{L6_B} 选中连接电路。设置输入信号幅度为 100 mV，频率为 $f=8.7$ MHz，将信号接入三极管放大电路输入端。通过调节可调电容 C_{T1_B} 、 C_{T2_B} 和输入信号频率，使得在实验电路输出端的示波器探头能检测到最大电压幅度，其所对应频率即为双调谐回路的谐振频率。而后保持此时输入信

号幅度不变，改变信号频率，测得实验电路在不同条件下对应的输出电压。保持射级偏置电阻不变，改变短路子依次将谐振回路中并联电阻 R_{L1_B} 与 R_{L4_B} 、 R_{L2_B} 与 R_{L5_B} 同时接入电路，并重复上述操作^[14]。实验过程中测得数据如表 1~表 3 所示，示波器显示波形如图 7 所示。



图 6 高频双调谐回路谐振放大器实验板实物图

表 1 $R_e=1$ k Ω , $R_L=10$ k Ω 时输出 V_o 电压随输入信号频率 f_0 变化情况

f_0 /MHz	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4
V_o /mV	253	269	281	297	314	326	334	350	354	358	354	350	346	338	350	318
f_0 /MHz	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	10.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
V_o /mV	306	297	285	277	269	253	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

表 2 $R_e=1$ k Ω , $R_L=2$ k Ω 时输出 V_o 电压随输入信号频率 f_0 变化情况

f_0 /MHz	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5
V_o /mV	165	169	177	185	189	201	209	217	221	229	233	237	245	245	241	237
f_0 /MHz	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	10.0	—
V_o /mV	237	233	229	225	217	213	209	201	197	193	185	181	173	173	167	—

表 3 $R_e=1$ k Ω , $R_L=470$ Ω 时输出 V_o 电压随输入信号频率 f_0 变化情况

f_0 /MHz	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5
V_o /mV	120	125	129	131	135	136	139	141	142	145	145	146	145	144	142	141
f_0 /MHz	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9	10.0	—
V_o /mV	140	140	140	136	133	131	129	126	125	123	121	120	119	117	115	—

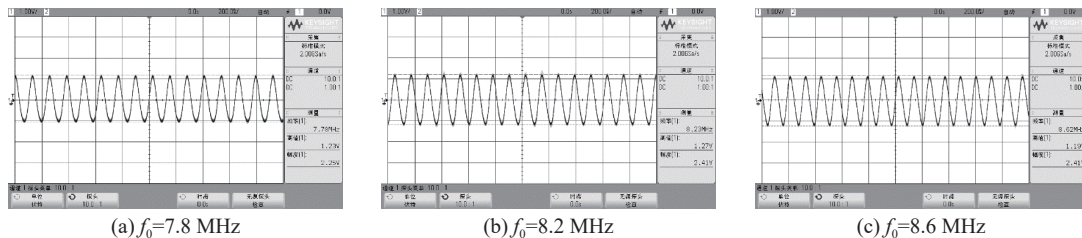


图 7 $R_e=1$ k Ω , $R_L=2$ k Ω 时不同频率下的输出波形图

通过对实验结果进行记录与数据处理可以得到双调谐放大电路幅频特性曲线图如图 8 所示。由图 8 可知，随着电阻 R_L 的减小，即并联谐振电导 G 的增加，电路的电压增益 A_v 逐渐减小，与之

相应的通频带 $2\Delta f_{0.7}$ 也逐渐变宽，且谐振频率逐渐减小。基于前文分析可知，在弱耦合情况下，随着并联谐振电导 G 的增加，次级回路电压值将下降，电压增益 A_v 将减小，而随着品质因数 Q 的减小，

通频带 $2\Delta f_{0.7} = \xi \frac{f_0}{Q}$ 增加。此外, 在实验操作中为找到最大输出电压, 会对实验电路中的可调电容进行调节, 这使得选频回路的谐振频率将会发生变动。

调节耦合电容 C_{6_A} 使电路处于强耦合状态,

按照上面的测试方法, 取 $R_c=1\text{ k}\Omega$, $R_L=2\text{ k}\Omega$ 时, 输出 V_o 电压随输入信号频率 f_0 变化情况如表 4 所示。双峰幅频特性曲线如图 9 所示, 和理论分析完全吻合。

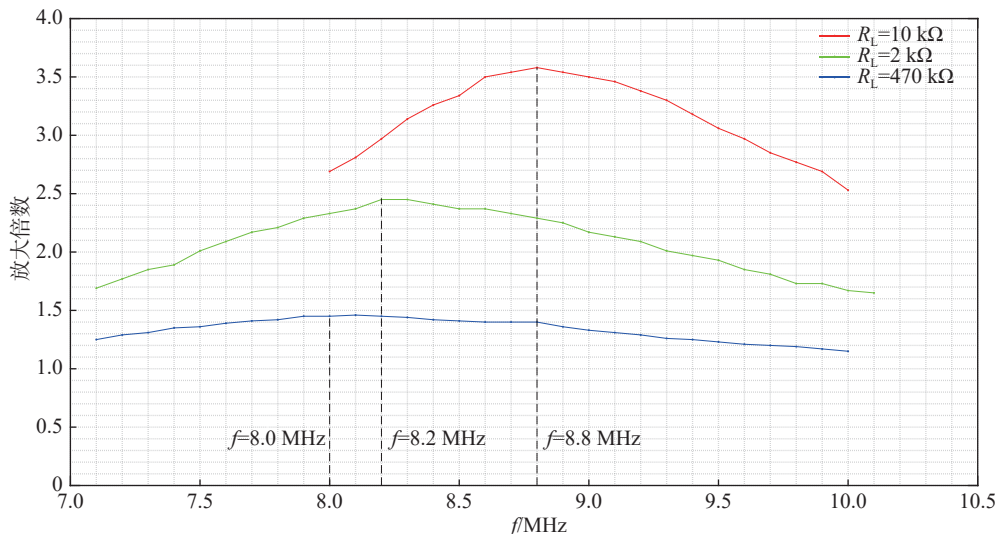


图 8 临界耦合或弱耦合的幅频特性曲线图

表 4 $R_c=1\text{ k}\Omega$, $R_L=2\text{ k}\Omega$ 时, 输出 V_o 电压随输入信号频率 f_0 变化情况

f_0/MHz	7.0	7.1	7.2	7.3	7.4	7.5	7.6	7.7	7.8	7.9	8.0	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5
V_o/mV	154	160	165	175	180	205	236	245	246	235	225	210	200	200	210	225
f_0/MHz	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	—	—	—	—	—
V_o/mV	235	246	247	237	202	180	175	170	165	159	157	—	—	—	—	—

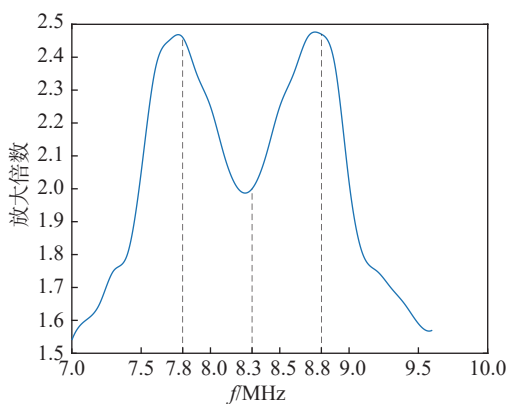


图 9 强耦合的幅频特性曲线图

4 结束语

本文对高频双调谐放大器中的电容并联双回路的耦合特性进行理论推导和数学分析, 设计的双调谐放大电路硬件实验电路验证了理论的正确性。分析了弱耦合、临界耦合和强耦合情况下的通频特性, 得出通频带可能连续或离散分布的结果。实验结果表明, 该电路能够很好地完成高频

小信号的放大以及选频等功能, 目前已经成功应用于武汉大学电子信息学院高频电子线路实验课程教学中, 实验效果良好。

参考文献

- [1] 许赛男. 幅频特性的数学分析[J]. 电子工程师, 2005(12): 16-19.
- [2] 苏恒. 双调谐滤波器设计与失谐问题的研究[D]. 江门: 五邑大学, 2013.
- [3] 王建武, 白古月. 带有并联电阻的双调谐滤波器参数特性分析[J]. 科技创新导报, 2011(36): 73-74.
- [4] 周继伟. 谐振功率放大电路的直流馈电电路和匹配网络分析[J]. 信息与电脑(理论版), 2010(14): 34.
- [5] 金伟正, 代永红, 王晓艳, 等. 高频电子线路[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
- [6] 董尚斌, 代永红, 金伟正, 等. 电子线路 II[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- [7] 吕晓兰, 崔得龙, 谢玉鹏. “层次递进式” 电信专业实践教学改革[J]. 黑龙江教育: 理论与实践, 2021(5): 90-92.
- [8] 李研达. 单调谐回路谐振放大器与双调谐回路谐振放

- 大器特性分析[J]. *安阳师范学院学报*, 2009(2): 50-52.
- [9] 姚玉钦. 串、并联耦合双调谐回路通频带及其选择性的分析与比较[J]. *安阳大学学报*, 2002(2): 18-19.
- [10] 沈世芳. 基于双调谐高频放大器的应用[J]. *集成电路应用*, 2018, 35(10): 62-64.
- [11] 张肃文. 高频电子线路 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [12] 茹履石. 互感耦合双调谐回路谐振的讨论[J]. *电工教学*, 1995, 17(4): 40-44.
- [13] 王积成. 双调谐电感耦合回路电流的极值频率及其峰值判别式[J]. *电声技术*, 1981(3): 10-15.
- [14] 杨光义, 金伟正. 高频电子线路实验指导书 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.

编辑 钟晓

(上接第 31 页)

- [2] 黎科, 邹永东, 张永夏. 植物学创新性实验教学改革探索与实践[J]. *实验室研究与探索*, 2011, 30(8): 309-311.
- [3] 韦杏雨. 基于问题的学习 (PBL) 实践研究[J]. *内蒙古师范大学学报 (哲学社会科学版)*, 2018, 47(3): 58-62.
- [4] 赵青山, 李健, 孙占海. 教学与科研实验室协同开放的探索[J]. *实验科学与技术*, 2019, 17(6): 157-160.
- [5] 王东辉. 慕课与虚拟仿真技术共同助力“植物学综合实验”科研型教学改革[J]. *高校生物学教学研究 (电子版)*, 2022, 12(6): 49-52.
- [6] 梁文斌, 唐婧文, 陈雪妮. 植物显微技术“科研式”实验教学的探索与实践[J]. *实验科学与技术*, 2018, 16(5): 95-98.
- [7] 黎茵, 张以顺. 农杆菌注射渗透法转化烟草实验研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(11): 50-52.
- [8] 吴英杰, 姜波, 张岩, 等. 农杆菌介导的烟草瞬时表达试验条件优化[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(9): 110-112.
- [9] 王东辉. 研究生实验教学模式的创新与实践: 以原位杂交实验课为例[J]. *高校生物学教学研究 (电子版)*, 2017, 7(3): 43-47.
- [10] 仝晓燕. 探索研究性实验教学提高学生的创新能力[J]. *高校实验室工作研究*, 2007, 92(2): 20-23.
- [11] 李华玮, 张沪寅, 黄建忠, 等. 基于 OBE 理念的人工智能专业实验教学模式研究与实践[J]. *实验科学与技术*, 2022, 20(2): 87-91.
- [12] 曲晨宁, 李小燕, 赵洁, 等. 探讨植物发育生物学实验教学改革[J]. *实验科学与技术*, 2016, 14(1): 125-127.

编辑 王燕