

电子电路设计实验讲义

李锡华 叶险峰 施红军

浙江大学信息与电子工程实验教学中心

实验室学生守则

- 一、凡是进入实验室的学生，必须自觉服从管理，严格执行实验室的各项管理规定，严格遵守仪器设备的操作规程，对严重违规者指导老师有权中止其实验。
- 二、学生必须按时进行实验，若有特殊情况不能按时参加实验的学生应提前请假。
- 三、进入实验室之前必须认真预习实验内容，明确实验目的、原理、实验步骤并按预习要求写出预习报告。
- 四、必须以实事求是的科学态度进行实验，认真如实记录实验数据。严禁抄袭他人数据或伪造实验记录，对于代做实验者按校纪进行处理。
- 五、仪器设备应按使用方法操作，不得随意更换或拆卸，实验完毕后应关闭实验桌上所有设备的电源，并将仪器、工具等放还原处，清理实验桌面，经指导老师同意后方可离开实验室。仪器设备若有故障，请报告老师处理。
- 六、实验室内不得在计算机上玩游戏或做与实验无关的事。
- 七、实验过程中应随时注意安全，不得擅自外接、拉配电板，若发现异常现象，应切断电源并报告值班老师处理，切勿盲目乱试，擅自拆修。
- 八、保持实验室内卫生文明整洁，不允许把食物带入实验室。实验室内不得乱扔杂物、纸屑、随地吐痰，不得大声喧哗，严禁吸烟。

实验室学生安全操作规则

为了培养学生严谨的科学作风，建立规范的实验操作，确保学生人身和仪器设备安全，顺利完成实验任务，特制定以下规则，请遵照执行。

1. 不得赤脚或穿拖鞋进入实验室。不得将食物带入实验室，不准随地乱丢废纸、废弃物，保持实验室整洁。
2. 实验中不得触摸裸露的接线柱、接线片、导线，不得用表棒、螺丝刀、镊子、剪刀等工具插入电源插座。严禁带电接线、拆线或改接线路。
3. 电烙铁要配置烙铁架，严禁将电烙铁随意放置在桌面或地上。电烙铁使用后要稳妥放置在烙铁架上，并随时注意导线、人体不要碰到烙铁头，以免烧化塑料引起短路以致触电事故或不必要的烫伤。电烙铁使用完毕或中途离开实验室要及时断电，以防引起火灾。
4. 实验接线完毕，要仔细核查，确认无误后方可接通电源。
5. 不要动用与本次实验无关的设备、仪器及工具和原材料。
6. 实验结束后，实验装置、仪器仪表及电烙铁要断电，并整理好实验相关的仪器、工具、导线、电缆、座椅等，清洁实验桌面。
7. 遇到故障应立即断电，并及时向指导教师报告。
8. 严守纪律、遵守实验室规章和安全制度，严格按操作规程进行。

课程名称：_____ 班级：_____

学生签名：_____ 20__年__月__日

目 录

第一篇 电子电路实验基础知识	1
第 1 章 电子电路设计与调试技术	1
1.1 电子电路设计的一般方法	1
1.2 电子电路组装与焊接技术	1
1.3 电子实验测量技术	2
1.4 电子实验调试技术	7
1.5 常见故障及其检测	9
1.6 噪声干扰及其抑制	12
第 2 章 电路板设计	15
2.1 用 Altium Designer 设计电路板	15
2.2 创建工程	15
2.3 在工程中创建原理图	15
2.4 设计电路原理图	16
2.5 原理图编译	17
2.6 生成网络表	17
2.7 设计 PCB	17
2.8 库文件编辑	21
第 3 章 OrCAD 软件基础	25
3.1 OrCAD 简介	25
3.2 OrCAD PSpice 的分析功能	25
3.3 OrCAD PSpice 的元器件	26
3.4 OrCAD PSpice 中的相关规定	27
3.5 OrCAD PSpice 电路仿真分析的基本过程简介	29
第 4 章 OrCAD 电路设计仿真分析的流程	30
4.1 用 Capture 绘制电路图	30
4.2 在 Capture 中设置分析方法	48
4.3 用 PSpice 执行仿真分析	49
4.4 在 PSpice 中查看分析结果	54
第 5 章 模拟电路分析示例	56
5.1 RLC 阻尼振荡电路性能分析	56
5.2 单管放大电路性能分析	57
第 6 章 数字电路分析示例	62
6.1 数字电路仿真分析的基本概念	62
6.2 全加器电路分析	62
6.3 十进制计数器电路分析	64
第 7 章 数模混合电路分析示例	66
7.1 简单数模混合振荡器电路分析	66
7.2 阶梯波电压产生电路分析	67
第 8 章 Multisim 软件基础	70
8.1 Multisim 简介	70
8.2 Multisim 应用举例一：RLC 电路仿真与分析	71

8.3 Multisim 应用举例二：555 电路仿真与分析	74
8.4 Multisim 应用举例三：方波三角波发生器电路仿真与分析	76
第二篇 电子电路基础实验	81
实验一 基尔霍夫定律实验研究	81
实验二 叠加定律实验研究	82
实验三 戴维南定理与诺顿定理的实验研究	83
实验四 OrCAD 使用练习	86
实验五 一阶 RC 电路的暂态响应仿真研究	101
实验六 一阶 RC 电路的瞬态响应过程实验研究	104
实验七 RLC 谐振电路仿真实验	106
实验八 RLC 谐振电路实验研究	109
第三篇 电子电路设计实验	112
实验一 晶体管共射放大电路设计	112
实验二 差分放大器的设计与调试	118
实验三 多级低频小信号放大器的设计与调试	122
实验四 两级阻容耦合负反馈放大电路设计与调试	125
实验五 集成运算放大器基本运算电路研究	128
实验六 集成运放构成的波形变换与产生电路研究	133
实验七 555 集成定时器的应用研究	139

第一篇 电子电路实验基础知识

第1章 电子电路设计与调试技术

1.1 电子电路设计的一般方法

1.1.1 电子电路设计的基本原则

电子电路设计是指根据给定的设计任务、要求和指标，选择合适的方案，确定电路的总体组成框图，接着选择合适的器件对各个单元电路进行设计，最后得到满足性能指标和功能要求的完整电路。

一个好的设计除了完全满足性能指标和功能要求外，还要求电路简单可靠，集成度高，电磁兼容性好，性价比高，同时要求系统的功耗要小，安装调试方便。

1.1.2 电子电路设计的一般步骤

一般来说，电子电路的设计不是一个简单的一次就能完成的过程，而是一个逐步试探逐步完善的过程。电子电路设计一般要经历以下步骤。

1. 仔细审题，分析性能指标

接到设计任务后，首先必须仔细分析设计课题的要求、各项性能指标的含义，以便明确系统要实现的功能和完成的任务。

2. 确定方案，画出总体框图，分配技术指标

明确课题任务后，就可以进行总体方案设计了。这时通过查阅资料，参考一些与设计课题类似的电路方案，查阅能够满足技术指标和功能要求的器件。对于同一个设计课题，实现的方案往往会有多个，这时应将不同方案进行比较，选择一个最佳方案。

方案确定后，把系统按照功能划分为若干个相互联系的单元电路，然后将技术指标和功能分配给各单元电路，并画出能够表达系统基本组成和相互关系的总体组成框图。

3. 设计单元电路

单元电路设计通常包括电路选择、元器件选择、电路及元件参数计算、计算机仿真和实验调试等步骤。计算机仿真可以提高实验效率，待仿真结果满意后再搭接硬件电路实验调试，最终各单元电路。

在设计单元电路时，在保证电路性能指标的前提下，要尽量减少元器件品种、规格，尽量选用集成电路。

4. 画出完整电路图

各单元电路设计完成后，应画出完整的电路原理图，搭接完整的电路进行实验调试，确认电路完全满足设计要求后，绘制正式的电路图。

1.2 电子电路组装与焊接技术

在制作电子装置焊接印制电路板（PCB）时，焊接工艺非常重要。电子线路的焊接质量是使电子装置达到预期性能指标的基础。焊接质量的好坏直接影响到电子装置的工作性能。不良的焊接质量或焊接方法会使电路不通或元器件损坏，这不仅会给调试带来很大困难，而且会严重影响电子装置工作的可靠性。在安装实验电路板时，应注意以下几点。

1. 安装前的准备

(1) 安装前应使用仪器认真检测各元器件的标称值与性能参数是否符合电路要求，确认无误后再进行装配，切勿急于求成。

(2) 装配时应妥善安排元器件的位置，合理布局，既要使布局紧凑，引线短，又要避免引线间相互交叉，以免造成短路故障。一般来说，应先按原理电路图画出实物安装图，然后才能进行安装焊接。

(3) 元器件的安装要便于检查、测量与更换。例如，对于印有标识的元器件应将标识朝外、方向一致，以便于观察；元器件本身的引脚长度要适当，以便于检测等。

图 1.3.1 所示为正确的元器件排列与安装示意图。

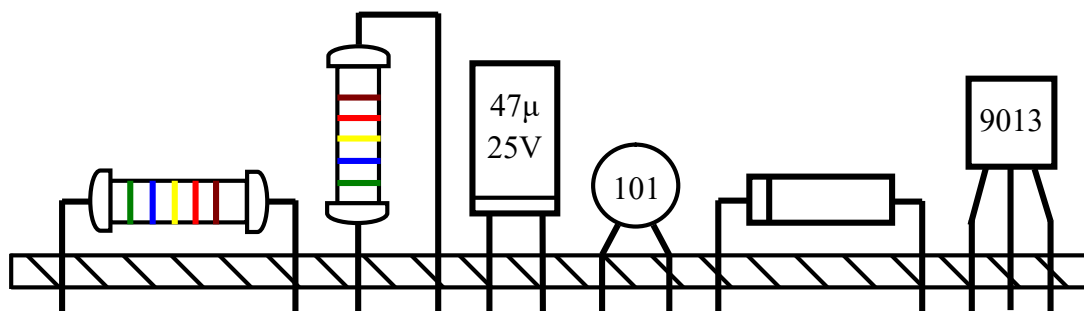


图 1.3.1 正确的元器件安装排列示意图

2. 焊接与安装

理解和掌握焊接要领，确保焊接质量，杜绝虚焊、假焊和漏焊。

(1) 选择合适的焊锡、焊剂和电烙铁。在电子线路的焊接中，常采用管状商用焊锡丝，并使用中性助焊剂(如松香)，一般选用 20~35W 的电烙铁，有条件的可选用恒温烙铁。

(2) 焊接前应对元件的引线认真地进行清洁处理(一般用刀刮净)，并预先上锡，这是防止虚焊的有效措施。因为金属表面的氧化物对锡的润湿小，如果不预先进行清洁和上锡处理，往往会出现焊锡虽然包住接点而实际上并未焊牢的所谓虚焊。虚焊点将带来严重的隐患，因此必须在一开始就引起足够的重视并予以消除。

(3) 焊接时应使电烙铁头与焊接物之间的接触面尽可能大，并严格控制焊接时间。电烙铁温度过低或焊接时间过短，不但易造成虚焊，而且焊点不光亮。电烙铁温度过高或焊接时间太长又会引起焊锡流淌，甚至烫坏元器件、导线和印制电路板。因此，初学者应注意掌握好电烙铁的温度和焊接时间，一般应使焊剂完全挥发、焊锡均匀地扩散到焊点周围时即可提起电烙铁。冷却时要注意防止焊件松动。

(4) 焊点上锡量要适中，焊点应光亮、圆滑，大小合适，周围清洁。

1.3 电子实验测量技术

电子测量是以电子技术的理论为依据、以电子测量仪器和设备为手段、以电量或非电量(可转化为电量)为对象的一种测量技术。

1.3.1 电子测量的基本特点

由于电子技术领域中的新理论、新技术、新器件、新材料和新工艺的不断涌现，电子测量技术得到了前所未有的迅速发展。与其他测量技术相比，电子测量具有以下几个特点。

1. 测量频率范围宽

电子测量可以根据不同的工作频段，采用不同的测量原理和使用不同的测量仪器，获得较宽的

频率测试范围。例如，DF2172B 型交流电压表可对频率为 $5\text{Hz} \sim 2\text{MHz}$ 的信号进行测量，一台较为先进的频率计其频率测量范围为 $10^{-6} \sim 10^{12} \text{Hz}$ 。

2. 量程范围大

电子测量的量值范围很宽。例如，普通万用表的测量范围为几伏至几百伏，约 2 个数量级；而毫伏表的测量范围可从毫伏至几百伏，达到 5 个数量级；数字电压表可达 7 个数量级。

3. 测量方便灵活、精度高

在电子测量中，各种电量之间的转换容易实现，对于像温度、压力、位移、速度等非电量物理量，可以通过各种传感器将其转换成电量来进行测量，可以根据不同的对象、不同的要求，以不同的方式完成测量任务，因而测量非常方便和灵活。

电子测量的精度与测量方法、测试技术以及所选用的仪器等因素有关。单就电子仪器的精度而言，目前已可达到相当高的水平。由于电压、频率基准的精确度越来越高，电子仪器的测量精度有了飞跃的提高，能显示 6~8 位数字的电压表和频率计被大量应用在电子测量中。

4. 易于实现遥控

可以通过各种传感器将现场待测量的物理量转换成易于传输的电信号，用有线或无线的方式传送到远程测控中心，以实现遥测、遥控。

5. 易于实现测量过程的自动化和测量仪器的智能化、小型化

微型计算机的发展，为测量自动化和测量仪器智能化提供了条件，使电子测量朝着智能化的方向发展，借助于计算机不仅可以实现自动测试和自动记录，而且可以实现测量数据的计算、分析和处理，大大增强仪器的功能。

1.3.2 电子测量的分类

电子测量的方法很多，类型划分方式也很多。

1. 按测量手段分类

对同一性质的被测量目标进行测量时，由于测量原理不同，选择的测量仪器、采用的测量手段也可能不一样。常用的有直接测量、间接测量和组合测量三种。

(1) 直接测量法。这是一种对被测对象直接进行量测并获得其数值的方法。例如，用电压表对各点电压量的测量就是直接测量。直接测量简单快捷，应用相当普遍。

(2) 间接测量法。当由于某种原因不能对被测量进行直接测量时，可以对与被测量有确切函数关系的一个或几个物理量进行测量，然后通过计算或推测得出被测量的数值，这种测量方法称为间接测量法。例如，在图 1.3.2(a)所示的放大电路中，为了测得静态电流 I_C ，可以测出 R_C 两端的电压 U_E ，然后通过欧姆定律求出 $I_C (\approx I_E)$ 的数值。测量如图 1.3.2(b)所示的输入电阻 R_i 的方法也是一样，可以先测出 R_s 两端的电压 $u_s - u_i$ ，然后换算成输入电流 $i_i = (u_s - u_i) / R_s$ ，再通过计算求得 $R_i (= u_i / i_i)$ 。

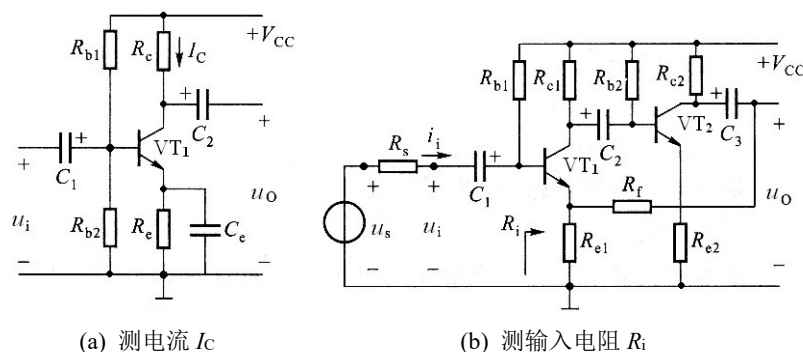


图 1.3.2 间接测量示意图

(3) 组合测量法。这是一种将直接测量法和间接测量法联合使用的测量方法，将被测量和另

外几个量组成联立方程组，最后通过求解方程组来得出被测量的数值。这种方法用计算机求解比较便捷。

2. 按测量方式分类

按测量方式可分为直读法和比较法。

(1) 直读法是用直接指示被测量大小的指示仪表进行测量，能够直接从仪表盘上或显示器上读取被测两数值的测量方法。

(2) 比较法是将被测量与标准量在比较仪器中进行比较，从而获得被测量数值的方法。例如，用电桥测量电阻时，标准电阻参与了测量过程，把被测电阻与标准电阻进行比较。这种方法准确度很高，但操作麻烦，相应的设备也比较昂贵。

1.3.3 电子测量的基本程序

电子电路的基本测量项目通常有静态测量和动态测量。测试程序一般是先静态、后动态。在完成基本测试项目的基础上，根据实际需要，有时还可进行某些专项测试，如在电源波动的情况下，进行电路稳定性的检查、抗干扰能力的测定等。

1. 静态测量

“静态”是指电路在不加输入信号或仅加固定电压信号时所处的稳定状态（对自激振荡电路来说是指停振状态）。

静态测量的对象主要是各节点的直流电位。当测量精度要求不高时，一般可采用普通万用表(如MF500型，直流电压档内阻为 $20\text{k}\Omega/\text{V}$)；而对一些精度要求较高的电路(如A/D转换电路、电压比较电路等)，可采用内阻大、精度高的数字电压表。

2. 动态测量

“动态”一般是指电路在外加输入信号作用下的工作状态(对自激振荡电路来说是指振荡状态)。例如，对放大电路来说，动态测量的主要对象通常有：

- (1) 信号的幅度和周期(或频率)；
- (2) 电压放大倍数和最大不失真输出电压；
- (3) 输入电阻和输出电阻；
- (4) 频率响应(f_L 、 f_H)；
- (5) 瞬态响应(t_r 、 t_f 、 t_p 、 δ)；
- (6) 共模抑制比 K_{CMRR} 。

动态测量通常用示波器进行，如通过观察和测量电路的输入、输出波形，利用直读法、比较法(或时标法)等，读测被测信号的幅度(峰值或峰-峰值)、周期(或频率)，以及正弦信号的相位，脉冲信号的脉宽、上升时间、下降时间等参数，并通过计算求得其他一些性能指标。对于正弦信号的幅度，也可用交流毫伏表读测其有效值。

动态测量时应选择合适的信号发生器和示波器，以减小测量误差。

1.3.4 电子电路主要特性参数的测量

1. 电压测量

电压是电子技术中最基本和最重要的参数之一，电路的工作状态和特性大多是以电压参数来表示的，因此电压测量是电子测量的基础。为使测量更准确，必须充分了解被测对象的特点，选择合适的测量仪器和测量方法，并掌握仪器的基本原理、性能和正确的使用方法。在选择仪器和进行测量时，应注意以下几点：

- (1) 考虑频率范围。必须使被测电压的频率处于所选测量仪器的工作频率范围内。
- (2) 考虑量程范围。可以根据被测电压的大约数值选择合适的量程档级。
- (3) 考虑电压表输入阻抗。因为电压表并联在被测对象两端，就相当于将表的输入阻抗并联

到被测对象的两端，因此，必须选择输入阻抗远大于被测端电阻值的电压表。否则，由于输入阻抗的影响，改变了被测电路的工作状态，从而引起较大的测量误差。

例如，测量图 1.3.3 所示电路中 A、B 两点间的电压。设电压表内阻为 R_i 。由图可知，未接电压表之前 A、B 两点间的电压为

$$U = U_s \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

接入电压表后，A、B 两点间的电压为

$$U' = U_s \frac{R_2 \parallel R_i}{R_1 + (R_2 \parallel R_i)} = U \frac{R_i}{R_i \parallel R_2 + R_1}$$

接入电压表前后 A、B 两点间电压的变化 ΔU 为

$$\Delta U = U' - U = \frac{-U}{1 + \frac{R_i}{R_1} + \frac{R_i}{R_2}}$$

由上式可见，只有当 $R_i \rightarrow \infty$ 时，才有 $\Delta U \rightarrow 0$ 。如果要求 $|\Delta U/U| < 1\%$ ，就要求 $(R_i/R_1) > 100$ 或 $(R_i/R_2) > 100$ 。

通常，一个正弦交流电压的大小可以用峰值表示，也可以用有效值及平均值来表示。

峰值：任意一个周期性交变电压 $u(t)$ ，在所观察的一个周期内，其电压所能达到的最大值称为该交流电压的峰值。当不存在直流分量时，峰值就是振幅值 U_m 。

有效值：当交流电压在一个周期内通过某纯阻性负载所产生的热量与一个直流电压在同一时间内、在同一负载上产生的热量相等时，该直流电压数值称为交流电压的有效值。在数学上，有效值与均方根值是同义的，且有

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}$$

有效值的应用很普遍，各类交流电压表的指示值几乎都是按正弦波有效值来标定的。

平均值：具有周期性的变化电压，其平均值定义为

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

式中， T 是正弦交流电压的周期。当 $u(t)$ 中含有直流分量时，其平均值 $\bar{U}$ 等于直流分量；而当 $u(t)$ 中不含直流分量时，则 $\bar{U} = 0$ 。

以上三个参数也适用于其他周期性的电压。但是在不同的场合，对不同的波形来说，强调的参数有所侧重。例如，对正弦交流电压来说，着重强调有效值；而对于脉冲波形电压来说，强调的是幅值，也就是峰值；在整流、滤波电路中，输出电压强调的是平均值（即输出直流电压）及峰-峰值（即输出的纹波电压）。

通常，用于测量电压大小的电压表分为两种类型，一种是交流电压表，另一种是直流电压表。前者只能测量单一频率的正弦交流电压的有效值，后者可以测量具有周期性的任意波形电压的平均值。

还有一个值得注意的问题，用电压表测量直流电压时，应注意“+”、“-”极性；测量交流电压时，应注意共地，以避免外界引入的干扰和意外过负荷的危险。

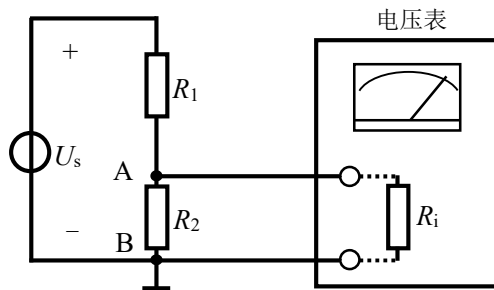


图 1.3.3 电压测量电路

2. 时间和频率的测量

时间测量通常是指对信号的时间参数进行测量，如信号的周期、脉冲宽度、上升时间和下降时间等。时间测量使用的仪器是示波器，具体方法如下。

将示波器的扫描速度微调功能关闭，调整示波器使屏幕上稳定地显示若干个周期的信号波形，那么波形的时间可用下式计算：

$$T = D(\text{div}) \times t/\text{div}$$

式中， T 为相应的时间间隔； $D(\text{div})$ 为波形被测两点在屏幕上的距离（格数）； t/div 为扫描速度。

注意，在测量信号周期时，可以测量信号的一个周期时间，也可以测量 n 个周期时间，再除以周期个数 n 。后一种测量的误差会更小些。

测量脉冲信号的脉宽 t_w 、上升时间 t_r 、下降时间 t_f 等参数时，只要按其定义测量出相应的时间间隔即可。

频率是电信号的一个重要参数，由于频率是周期的倒数，所以测量信号的频率一般是先测量信号的周期，再换算成频率。也可以用频率计直接测量信号的频率。由于频率计的精度很高，所以测量结果比示波器法要准确得多。

3. 放大电路电压放大倍数的测量

图 1.3.4 所示为测量放大电路电压放大倍数的原理图。由图可知，开关 S 分别指向 1 和 2 的位置，通过毫伏表测出输入电压和输出电压的有效值，即 U_i 和 U_o ，从而可求得放大电路的电压放大倍数。

若测量仪器为示波器，则可分别测量输入、输出电压的幅值，即 U_{im} 和 U_{om} ，然后，同样可求得放大电路的电压放大倍数

$$A_u = U_{om}/U_{im}$$

若同时要观察输入电压与输出电压之间的相位关系，则可使用双踪示波器。测量过程中，要注意输入信号的大小应适当，以免输出电压波形出现失真。

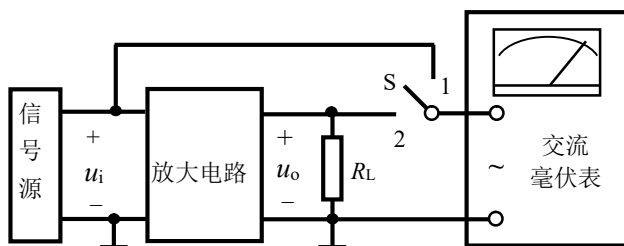


图 1.3.4 测量放大电路电压放大倍数的原理图

4. 放大电路输入电阻与输出电阻的测量

(1) 输入电阻

放大电路输入电阻是电路的基本动态参数之一，一般采用串联取样电阻的方法进行间接测量，测量电路如图 1.3.5 所示。

设输入信号频率处于放大电路的中频区，而且幅度适当，即保证放大电路输出电压波形不失真，通过毫伏表，分别测得 U_i 和 U_s ，则可由此计算输入电阻为

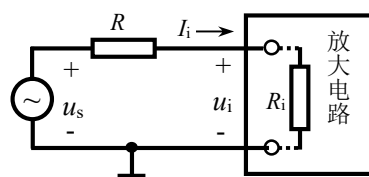


图 1.3.5 电阻分压法测量输入电阻

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{(U_s - U_i)/R} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R$$

若 R 是可变电阻，通过调节 R 值，使 $U_i = \frac{1}{2}U_s$ ，则有 $R_i = R$ ，这就是半压法测输入电阻。

(2) 输出电阻

输出电阻是衡量电路带负载能力的重要指标，一般希望输出电压源的输出电阻越小越好。常用输出电路加载测量法测量放大器的输出电阻，测量电路如图 1.3.6 所示。

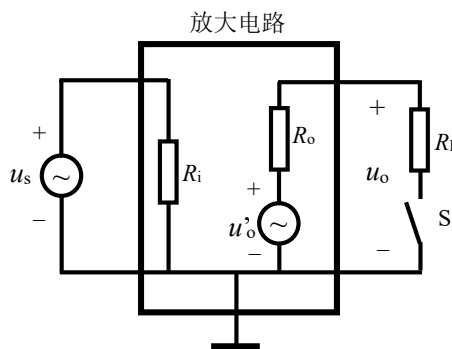


图 1.3.6 测量输出电阻原理图

在输入中频信号而且幅度不变的条件下,分别测出空载和带载两种情况下的输出电压值 U'_o 和 U_o (注意输出电压不能出现失真),则由此可得输出电阻为

$$R_o = \frac{U'_o - U_o}{U_o} R_L$$

同理,也可采用半压法测量输出电阻。

5. 放大电路频率特性的测量

频率特性是指放大倍数随输入信号频率的变化而变化的规律,一般采用逐点测量法,测量电路如图 1.3.7 所示。通过改变输入信号的频率(保持电压大小不变),并用示波器监视放大电路的输出电压,在输出波形无明显失真的条件下,选择一定数目的频率点,测出相应的输入电压 U_i 和输出电压 U_o ,由此可算得对应各频率点的 $|A_u| = |U_o / U_i|$,或以 dB 为单位,取 $20 \lg |A_u|$,然后就可画出对数幅频特性曲线。曲线上相对中频段下降 3dB 所对应的频率分别为上限频率 f_H 和下限频率 f_L 。频带宽度 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

另一种较简单的测量方法是,在任何频率下都保持输入电压大小不变,首先测出中频区的输出电压 U_{om} ,然后分别降低或升高输入信号频率,直至输出降至 U_{om} 的 0.707 倍,此时对应的频率分别为下限频率 f_L 和上限频率 f_H ,频带宽度 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。然后再在频带内、外分别测出几个频率点上的输出电压,计算出 $|A_u| = |U_o / U_i|$,并取 $20 \lg |A_u|$,由此即可画出幅频特性曲线。

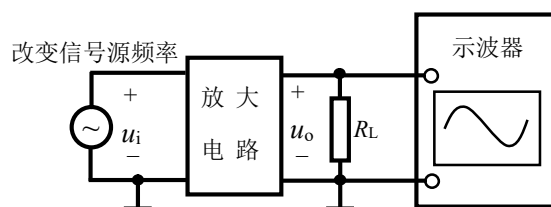


图 1.3.7 逐点法测量放大电路的频率特性

1.4 电子实验调试技术

对于一个电子电路,即使完全按照所设计的电路参数进行安装,不经过调试也往往难于立即实现预期的电路功能和性能指标,这是因为在设计时对各种客观因素的影响往往难以进行完全预测。例如,元器件性能的分散性、电路寄生参数的影响、交流电网的干扰以及在组装电路时由于不慎所带来的错误等,都可能造成预想不到的影响。因此,必须经过实验测试和调整,发现并纠正设计和组装中的不足,才能达到预定的设计要求。所以,掌握电子电路的调试技术是非常重要的。

电子电路的调试包括测试与调整两个方面。所谓调试,是以达到电路设计指标为目的而进行的一系列测试——判断——调整——再测试的反复过程。测试主要是对电路的各项技术指标和功能进行测量,判断是否达到设计要求。调整主要是在测量的基础上对电路进行必要的修正,使电路达到预定的功能和性能要求。

1.4.1 调试前的直观检查

实验电路安装完毕之后,不要急于通电测试,一定要认真做好调试前的检查工作,以便发现和纠正电路连接过程中的错误或疏漏。如果盲目地通电实验,有可能会损坏实验器材而产生新的故障。

1. 检查连线情况

对于安装在印制板上的实验电路,即使连线数量不是很多,也难免有接错线的情况。经常发生的错误有错接(即连线的一正确而另一端误接)、少接(指安装时漏接线)及多接(指在电路上是多余的线)等。检查连线一般可直接对照电路安装图进行,但若电路中布线较多,则应以元器件(如运算放大器、三极管)为中心,依次检查其引脚的有关连线,这样不仅可以查出错接或少接的线,而且也较易发现多余的连线。

为确保连线的可靠，在查线的同时，还可用万用表电阻档对接线作连通检查，而且最好直接在器件引脚处测量，这样可同时查出“虚焊”隐患。

2. 检查元器件及其安装情况

检查实验中用到的每个元器件，核对他们的型号和参数是否正确，重点检查集成电路、三极管、二极管、电解电容等引脚和极性是否接错，以及引脚间有无短路，同时还需检查元器件焊接处是否可靠。

需要指出的是，在焊接前必须对元器件进行筛选，以免给调试带来麻烦。

3. 检查电源输入端与公共接地端之间有无短路

通电前，还须用万用表检查电源输入端与地之间是否存在短路，若有，则必须进一步检查其原因。

在完成了以上各项检查并确认无误后，才可通电调试。此时应特别注意电源的正、负极性。

1.4.2 调试方法

为使调试工作进行顺利，在设计的电路图上应当标明有关测试点的电位值以及相应的波形图等主要参数。

通常采用先分调后联调(总调)的调试方法。因为任何复杂电路或系统实际上都是由一些基本单元电路组成的，所以调试时可以循着信号的流向，由前向后逐级调整各单元电路。其思想方法是由局部至整体，即在分步完成各单元电路调试的基础上，逐步扩大调试范围，最后完成整体电路的调试。采用这种调试方法的最大优点是能及时准确地发现和解决问题，因而它是新设计电路调试时最常用的方法。具体调试步骤如下。

1. 通电观察

通电前，先将电源与被调电路间的连线断开，将电源电压调至所要求的值，然后再接入电路。此时仔细观察电路有无异常现象，如有无冒烟、是否有异常气味、手摸元器件是否发烫以及电源有无被短路等。如果出现异常，应立即切断电源，并重新检查，待故障排除后才能再次通电。

经过通电观察，确认电路已能进行测量后，方可转入正常调试。

需要强调的是，在实验过程中要养成正确的通电与断电的习惯。正确的做法是，在接通电源时应先开启电源，电源电压调到需要的值后再接入到电路；断电时要先断开电源与电路的连线，再关闭电源。因为电源在开关的瞬间会产生较高的过冲电压，对元器件可能会造成损坏。

2. 静态调试

对于电子电路，它的一个重要特点是交、直流并存。一般情况下，直流为交流服务，是电路正常工作的基础。因此，电子电路的调试分为静态调试和动态调试两个过程，并且应该遵循“先调静态、后调动态”的原则。

所谓静态调试，是指在没有外加信号的条件下所进行的直流测试和调整过程。通常，为防止外界干扰信号串入电路，输入端与地之间要短接。

静态工作点的正确设置是非常重要的。在多级放大电路中，由于前级的信号小、后级的信号大，因此，从降低噪声和减小功耗的观点出发，前级的静态工作点在保证输出信号不失真的前提下，可以适当降低，而后级静态工作点应适当抬高。

在阻容耦合放大电路中，各级的静态工作点是相互独立的，所以各级放大电路的静态工作点仅与各单级放大电路直流通路中的元器件参数有关。在三极管、电源电压和负载一定的条件下，静态工作点的调整往往依靠改变基极偏置电阻来实现。

直接耦合式放大电路中，各级静态工作点相互牵制，必须考虑前后级之间的相互影响。

通过静态测试，可以及时发现已经损坏的元器件，判断电路工作状态，并及时调整电路参数，使电路工作状态符合设计要求。

3. 动态调试

动态调试是在静态调试的基础上进行的。在电路的输入端接入幅度和频率合适的正弦信号电压，然后采用信号跟踪法，即用示波器或毫伏表沿着信号的传递方向，逐级检查有关各点的波形和信号电压的大小，据此估算电路的性能指标、逻辑关系和时序关系，从中发现问题，并予以调整。

在动态测试过程中，示波器的信号输入方式最好置于“DC”档，这样可通过直接耦合方式同时观察被测信号的交、直流成分。

电路在动态工作时，应注意到放大电路的前后级之间是相互影响的。前级放大电路相当于后级放大电路的信号源，而后级放大电路则是前级放大电路的负载，两级之间通过输出、输入电阻相互影响，互相牵制。

完成了静态和动态调试后，即可检查整机电路的各项指标是否满足设计要求。如有必要，可进一步对电路参数进行合理的修正。

1.4.3 调试中的注意事项

调试结果是否正确，很大程度上受测量正确与否和测量精度的影响。为了保证调试的效果，必须减小测量误差，提高测量精度。为此，需注意以下几点。

(1) 必须做到心中有数，避免盲目性，调试前，应列出主要测试点的直流电压值、相应波形和一些主要参数，作为调试过程中分析判断的基本依据。

(2) 调试前要熟悉所用仪器的性能指标、使用方法和注意事项，避免由于仪器性能不符合要求或使用不当造成过大的测量误差，甚至得出错误的结果。

(3) 测量仪器与实验电路的接地端必须可靠地连接在一起（共地）。在实验调试中，所有测试仪器的接地端应与实验电路的接地端连接在一起，否则引入的干扰不仅会使实验电路的工作状态发生变化，而且将使测量结果出现误差。例如，在测量放大电路输入电阻的操作中，对于输入回路中电阻 R 两端电压的测量，不能用交流毫伏表直接跨接于 R 两端进行测量，而应分别测出其两端对地的交流电压 U_s 和 U_i ，然后将两者相减。

(4) 正确选择测试点。在测量过程中，能否正确选择测试点将直接影响到测量误差，甚至影响实验结论的正确性。图 1.3.8 所示电路是直接耦合多级放大电路中的部分电路，现假定要测 c_1 点静态直流电位 U_{C1} 。正确的测试方法应该是：先分别测出 e_2 点直流电位 U_{E2} 和 VT_2 管的 b、e 间电压 U_{BE2} ，然后根据 $U_{C1} = U_{E2} + U_{BE2}$ 即可求得结果。但若直接去测 c_1 点的电位，则即使所用万用表的电压量程档不变，也会出现较大的测量误差，原因是 c_1 点对地等效电阻较大，故万用表的接入分流效应明显。如果再用 c_1 、 e_2 点的电位实测值来计算 VT_2 管 b、e 间的电压，进而判断其工作状态，很有可能会得出 VT_2 截止的错误结论。

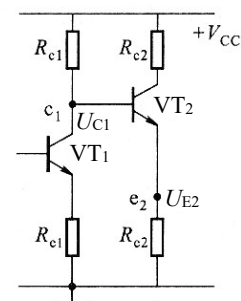


图 1.3.8 测试点的选择

(5) 用间接测量法简化测量操作。测试时，对于电流的测量常采用间接测量法，即测出该支路电阻的端电压，然后经过换算求得电流值。这样做的好处是操作方便，同时可避免因反复拆装线路而导致电路故障。

(6) 在调试过程中不但要认真观察和测量，还要善于记录。记录的内容包括实验条件、观察的现象、测量的数据、波形和相位关系等。只有有了大量可靠的实验记录并与理论计算结果加以比较，才能发现电路设计上的问题，完善设计方案。

1.5 常见故障及其检测

在电子电路的设计、安装与调试过程中，不可避免地会出现各种各样的故障现象，因此检查和排除故障是电子工程人员必备的实验技能。

面对一个复杂的电路，要从大量的元器件和线路中迅速、准确地找出故障，这确实不太容易，

而且故障又是五花八门，这就要求掌握正确的故障检查和排除方法。一般来说，故障诊断的过程是从故障现象出发，通过反复测试，做出分析判断，逐步找出故障的原因。

1.5.1 常见故障

(1) 测试设备引起的故障。可能有的测试设备本身就有故障，功能失常或测试探棒损坏，使之无法测试；还有可能是操作者对仪器使用不正确而引起故障，例如，示波器旋钮档级选择不当，结果造成波形异常甚至无波形。

(2) 电路中元器件本身原因引起的故障。如电阻、电容、晶体管及集成器件等特性不良或损坏。这种原因引起的故障现象经常是电路有输入而无输出或输出异常。

(3) 电路安装不良引起的故障。例如，连线错误（包括错接、漏接、多接、断线，布线不当等），元器件安装错误（包括元器件搞错、元器件管脚接错、极性接反等），接触不良（包括焊接点虚焊、接插点接触不牢靠、电位器滑动端接触不良、接地不良）等。

(4) 各种干扰引起的故障。所谓干扰，是指外界因素对电路有用信号产生的扰动。干扰源种类很多，常见的有以下几种：

① 接地处理不当引入的干扰。例如，接地线的电阻太大，电路各部分电流流过接地线会产生一个干扰信号，以致影响电路的正常工作。减小该干扰的有效措施是降低地线电阻，一般采用比较粗的铜线作接地线。

“共地”是抑制噪声和干扰的重要手段。所谓“共地”，是将电路中所有接地的元器件都接在电源的地电位参考点上。在正极性单电源供电电路中，电源的负极是电位参考点；在负极性单电源供电电路中，电源的正极是电位参考点；而在正负双电源供电电路中，以两个电源的正负极串接点为电位参考点。

② 直流电源因滤波不佳而引入的干扰。各种电子设备一般都由 50 Hz 交流电压经过整流、滤波及稳压得到直流电压源，因此，此直流电压源含有 50 Hz 或 100 Hz 的纹波电压，如果纹波电压幅度过大，必然会给电路引入干扰。这种干扰是有规律的，要减小这种干扰，必须采用纹波电压幅值小的稳压电源或引入滤波网络。

③ 感应干扰。干扰源通过分布电容耦合到电路，形成电场耦合干扰；干扰源通过电感耦合到电路，形成磁场耦合干扰。这些干扰均属于感应干扰，它将导致电子电路产生寄生振荡。排除和避免这类干扰的方法一是采取屏蔽措施，屏蔽壳要接地；二是引入补偿网络，抑制由干扰引起的寄生振荡。具体做法是，在电路的适当位置接入阻容网络或单一电容网络，实际参数大小可通过实验调试来确定。

1.5.2 检查、排除故障的基本方法

1. 直接观察法

直接观察法是指不使用任何仪器，只凭人的视觉、听觉、嗅觉以及直接碰摸元器件来发现问题，寻找和分析故障。

前面介绍的通电前检查和通电观察的内容就是直接观察法的主要内容。这种方法比较简单，也比较有效，故可作为对电路初步检查之用。

2. 参数测试法

参数测试法是借助于仪器发现问题，并通过理论分析找出故障原因。平时利用万用表检查电路的静态工作点就属于该测试法的运用。当发现测量值与设计值相差悬殊时，就可针对问题进行分析，直至得以解决。以图 1.3.9 所示电路为例，假定要测量由 VT₂ 管组成的射极跟随电路的静态工作点，在正常工作时，VT₂ 管的 b、c、e 电极上的静态电位应分别为 $U_{B2} \approx 8.3V$ 、 $U_{C2} = 15V$ 、 $U_{E2} \approx 7.6V$ ，集电极电流 $I_{C2} \approx 0.3mA$ 。但实测结果为 $U_{B2} \approx 0.19V$ 、 $U_{CE2} \approx 15V$ ，考虑到硅管正常工作时 $U_{BE} \approx 0.7V$ ，可见管子已处于截止状态。那么 VT₂ 管为什么会截止呢？进一步从决定 U_{B2} 电位的电阻 R_6 和 R_5 去

寻找, 结果发现问题出在 R_5 的选用上, 把阻值应为 $150\text{k}\Omega$ 的 R_5 误用了一个 $1.5\text{k}\Omega$ 的电阻, 经更换后故障即可排除。

顺便指出, 静态工作点也可以用示波器“DC”输入方式测定, 其优点是输入阻抗高, 因此对被测电路影响小, 而且还能同时看到被测点的对地直流电位和信号波形以及可能存在的干扰信号及噪声电压等, 这样就更有利于故障分析。

3. 信号寻迹法

在被调电路的输入端接入适当幅度与频率的信号(如 $f=1\text{kHz}$ 的正弦信号), 用示波器按信号的流向, 从前级到后级逐级观察电压波形及幅值的变化情况, 先确定故障在哪一级, 然后有的放矢地作进一步检查。这种方法对各种电路普遍适用, 在动态调试中应用更为广泛。

4. 对比法

当怀疑某一电路存在问题时, 可将此电路的参数和工作状态与相同的正常电路一一进行对比, 从中分析故障原因, 判断故障点。

5. 部件替换法

所谓部件替换法, 就是利用与故障电路同类型的电路部件、元器件或插件板来替换故障电路中的可疑部分, 从而可缩小故障范围, 以便快速、准确地找出故障点。

6. 补偿法

当有寄生振荡时, 可用适当容量的电容器使电路各个合适部位通过电容对地短路。如果电容接到某点寄生振荡消失, 表明振荡就产生在此点附近或前级电路中。

值得注意的是, 补偿电容要选得适当, 不宜过大, 通常只要能较好地消除有害信号即可。

7. 短路检查法

短路法就是采取临时短接一部分电路来寻找故障的方法。例如, 在图 1.3.10 所示电路中, 若用万用表测得 VT_2 管的集电极对地电压为零, 则有可能 L_1 所在支路为断路, 此时不妨将 L_1 两端短路, 如 U_{C2} 正常, 那就说明故障发生在 L_1 上。

短路法对检查断路故障最有效。但要注意的是, 在使用此法时, 应考虑到短路对电路的影响, 如对稳压电路就不能采用短路法。

8. 开路检查法

开路法对检查短路故障最有效, 这也是一种逐步缩小故障范围的方法。例如, 某稳压电源因接入一带有故障的电路使输出电流过大, 此时, 可采取依次断开故障电路某一支路的办法来检查故障。如果断开某支路后电流恢复正常, 则说明故障就发生在该支路上。

在实际调试中, 检查和排除故障的方法是多种多样的, 上面仅列举了几种常用的方法。这些方法的使用可根据设备条件、故障情况灵活掌握, 对于简单的故障或许用一种方法即可查找出故障点, 但对于较复杂的故障则需采用多种方法, 并互相补充、互相配合, 最后才能找出故障点。一般情况下, 寻找故障的常规做法是:

- (1) 采用直接观察法, 排除明显的故障。
- (2) 采用万用表或示波器检查静态工作点。
- (3) 可用信号跟踪法对电路作动态检查。

应当指出的是, 对于反馈环内的故障诊断是比较困难的, 因为只要闭环回路中有一个元器件或功能块发生故障, 就会使整个回路中处处呈现故障现象。此时, 首先应断开反馈回路, 使电路开环, 然后再接入一个适当的输入信号, 并利用信号跟踪法逐一查找发生故障的元器件或功能块。例如,

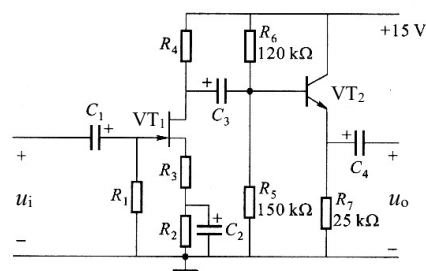


图 1.3.9 参数测试法示例

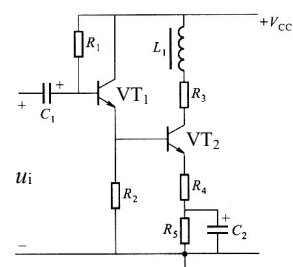


图 1.3.10 短路法示例

图 1.3.11 所示为一个带有反馈的方波和三角波发生电路， A_1 的输出信号 u_{o1} 作为 A_2 的输入信号， A_2 的输出信号 u_{o2} 作为 A_1 的输入信号，也就是说，若 A_1 组成的过零比较器或 A_2 组成的积分器发生故障，都将导致 u_{o1} 、 u_{o2} 无输出波形。寻找故障的方法是断开反馈回路中的一点(如图中所示的 B_1 点或 B_2 点)，假设断开 B_2 点，并从 B_2 点与 R_1 连线端输入一幅值适当的三角波，用示波器观察 u_{o1} 应为方波， u_{o2} 应为三角波，如果比较器没有输出(即 u_{o1} 为零)，则说明故障就发生在由 A_1 组成的过零比较器部分。若比较器有输出而 A_2 组成的积分器没有输出，则说明故障发生在由 A_2 组成的积分器部分。

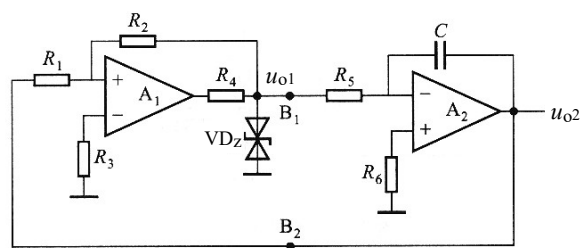


图 1.3.11 开路法示例

1.6 噪声干扰及其抑制

噪声是指干扰和破坏有用信号的无用信号，在测量中它严重影响有用信号的测量精度，特别是妨碍对微弱信号的检测。从广义上讲，噪声和干扰是同义语。如果要具体细分，则干扰是噪声造成的不良影响。当一个噪声电压使电路不能正常工作时，该噪声电压就称为干扰电压。一般来说噪声是很难消除的，但是可以降低噪声的强度，使其不致形成干扰。

1.6.1 形成噪声的三要素

要想抑制噪声和干扰，首先必须要搞清楚产生噪声的噪声源是什么，接收电路是什么，噪声是怎么耦合到接收电路中去。这就是平常所说的形成噪声的三要素，即噪声源、对噪声敏感的接收电路、耦合通道。然后，才能采取相应的措施加以抑制。通常从以下三个方面加以解决：对于噪声源，应抑制噪声源产生的噪声；对于噪声敏感的接收电路，应使接收电路对噪声不敏感；对于耦合通道，可抑制耦合通道的传输。

1.6.2 噪声的来源

噪声的来源是多种多样的，归纳起来可分为系统内部元件产生的噪声——固有噪声和系统外部来的干扰。

1. 固有噪声

电路中各种元器件本身就是噪声源。如电阻的固有噪声主要是由电阻内部的自由电子无规则的热运动造成的。晶体管的散粒噪声、低频噪声、爆烈噪声等都是固有噪声。

2. 系统外部来的干扰

其因素更多更复杂，如 50Hz 电源谐波所产生的干扰、生产设备所产生的电磁干扰以及元器件接触不良等。

1.6.3 噪声的耦合方式

噪声的耦合方式是指噪声源以什么方式耦合到电路中来，即耦合通道。了解耦合方式，才能采取相应的措施抑制干扰；通常，耦合方式有传导耦合、经公共阻抗的耦合和电磁场耦合三种形式。

1. 传导耦合

导线经过具有噪声的环境时，拾取到噪声并传送到电路造成干扰。噪声经电路输入引线或电源引线传至电路最为常见。

2. 经公共阻抗的耦合

经公共阻抗的耦合是通过地线和电源内阻产生的寄生反馈部分。

3. 电磁场耦合

电磁场耦合即感应噪声产生的干扰，包括电场、磁场和电磁感应。电磁场耦合根据辐射源的远近可分为两类。

(1) 近场感应：电容性感应——电力线通过相互间电容耦合来传播；电感性耦合——磁力线通过相互间电感耦合来传播。

(2) 远场的辐射：以电磁波方式传播。

一般地，高电压回路易产生电容性耦合源，大电流回路易产生电感性耦合源。

1.6.4 抑制干扰的方法

抑制干扰必须从产生干扰的三要素出发，找出解决办法。

1. 在噪声发源处抑制噪声

不难理解，在噪声发源处采取措施不让噪声传播出来，问题就会迎刃而解。因此在遇到干扰时，无论情况多么复杂，首先要查找噪声源，然后研究如何将噪声源的噪声抑制下去。工作现场常见的噪声源有电源变压器、继电器、荧光灯、集成电路处于开关工作状态、电机运转等，应根据不同情况采取适当的措施，如电源变压器采取屏蔽措施、继电器上并接二极管等。

2. 使接收电路对噪声不敏感

这两方面的含义，一是将易受干扰的元器件甚至整个电路屏蔽起来，使外来噪声尽量少进入电路中；二是放大电路本身固有噪声尽量小，因此通常选用噪声系数小的元器件，并通过合理布线来降低前置放大器的噪声。

3. 在噪声传播途径中抑制噪声

根据噪声传播途径的不同，采取相应手段将传播切断或削弱，从而达到抑制噪声的目的。

(1) 噪声传导耦合中最常见的是经输入引线和电源引线引入。对于不同的传导方式，抑制噪声可用不同的方法：输入引线通常采用屏蔽的方法来抑制噪声，如采用电缆线等。为防止经电源引线引入噪声，通常在对噪声敏感的某一级或几级或整个电路供电线上加入 RC (LC) 去耦电路。另外，使引线远离噪声源也是有效的方法之一。

(2) 公共阻抗耦合有两种：电源内阻和地线。其抑制噪声干扰的方法与抑制自激振荡相同。

(3) 抑制电磁场耦合噪声。抑制电磁场耦合噪声的常用方法是采用屏蔽技术和接地技术。

1.6.5 屏蔽技术与接地技术

屏蔽与接地是抑制干扰比较有效而且经常采用的方法。

1. 屏蔽技术

屏蔽是指对两个指定空间区域用金属进行电磁隔离，以抑制电场、磁场和电磁波由一个区域对另一个区域的感应和传播。屏蔽一般有两种，一种是静电屏蔽，另一种是电磁屏蔽。

对于屏蔽体材料：电屏蔽常采用导电率高的铜、铝或铁等金属；磁屏蔽采用高导磁率的磁性材料，如坡莫合金或铁材料等。

2. 接地技术

接地与屏蔽一样，也是抑制干扰的有效方法之一。如果能把屏蔽与接地结合起来使用，可以解决大部分干扰问题。

接地就是选择一个等电位点，它是系统或电路的基准电位，即参考点，但并不一定是大地的电位。一般仪器的机壳要接大地，这种地线称为保护地线，主要目的是保护人身安全。而这里所说的接地是指电路的信号地线(参考电位点)，它不一定与大地相连。

(1) 电路接地方式

信号地线的接地方式有两种：一点接地和多点接地。一点接地又有两种接法，即串联接地和并联接地，如图 1.3.12 所示。

串联接地方式从防止干扰的角度来看是不合理的，因各地线串联，地线呈现的电阻容易形成公共地线干扰；但由于比较简单，当各电路的电平相差不大时，使用得还比较多。

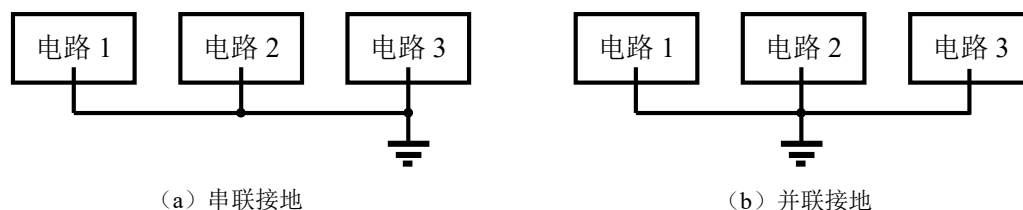


图 1.3.12 一点接地

并联接地方式在低频电路中最适用的，它没有公共阻抗支路，但需要连接很多导线，且导线较长，地线阻抗较大，所以不适用于高频电路。

多点接地是一种把电路中所用的地线分别连至最近的地线排上的一种方法，地线排一般是机壳，这样可以降低地线阻抗，比较适用于高频电路。

特别要注意的是，交流电源的地线不能用作信号地线，因为在一段电源地线的两点间会有数百毫伏甚至几伏的电压，这对低电平电路来说是一个非常严重的干扰。

(2) 模拟地与数字地

目前较大的电子系统中往往既有模拟电路，又有数字电路，为了防止数字信号(即大信号)对模拟电路产生干扰，一般将两者的地线分开，采用模拟地线和数字地线，使模拟电路和数字电路自成回路，这是很好的防干扰措施。

第2章 电路板设计

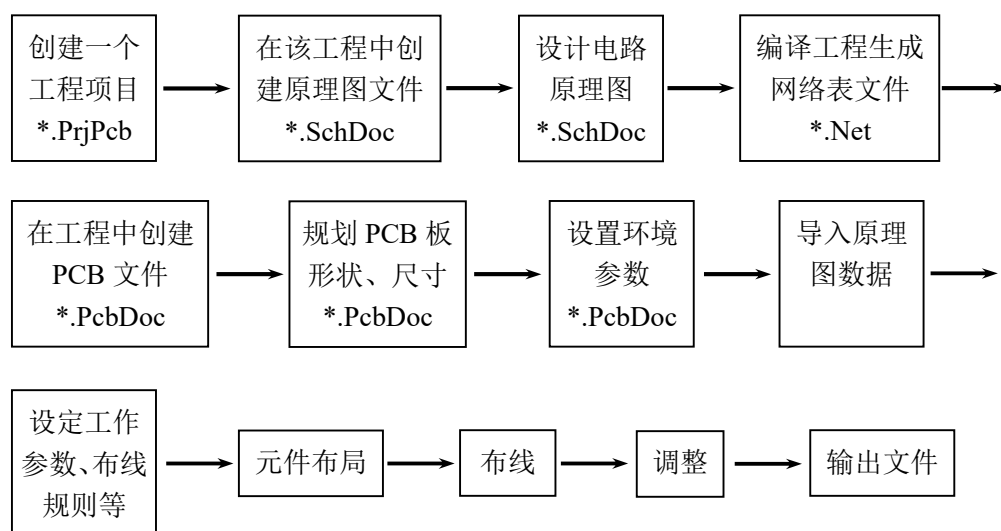
2.1 用 Altium Designer 设计电路板

Altium Designer 电子设计软件是目前行业中流行最广的印刷电路板设计工具，具有众多优势和强大的综合设计能力，对于未来的电子设计工程人员，掌握 Altium Designer 工具的使用是必不可少的专业素质要求。

Altium Designer 是一个完整的电子产品开发环境，涵盖了电子产品设计从原理图到实物板制作以及仿真测试的全过程。要设计一个电路板，首先要设计出正确的电路原理图，电路原理图是电子产品设计的灵魂所在。电路原理图设计是任何电路实现的前提，它的正确与否，直接影响到电子产品设计的成败。

电路原理图设计好后，编译生成网络表文件，根据网络表文件进行 PCB 电路板的设计。

在 Altium Designer 中，一项电路设计被视作为一项工程，其中的各种设计工作都是在该工程中进行。因此，用 AD 进行电路板设计的流程是：



2.2 创建工程

要开始一项电路板设计，首先要在 Altium Designer 环境中创建一项工程。执行菜单命令“File”→“New”→“Project”→“PCB Project”，此时系统创建了一个名为“PCB_Project1.PrjPCB”的工程，在工程面板中可看到。

点击工程面板中的“Project”按钮，或右击工程面板中的工程名，在弹出的快捷菜单中选择“Save Project As”，即可把本工程以适当的名称保存到合适的路径和位置。如图 2.1 所示。

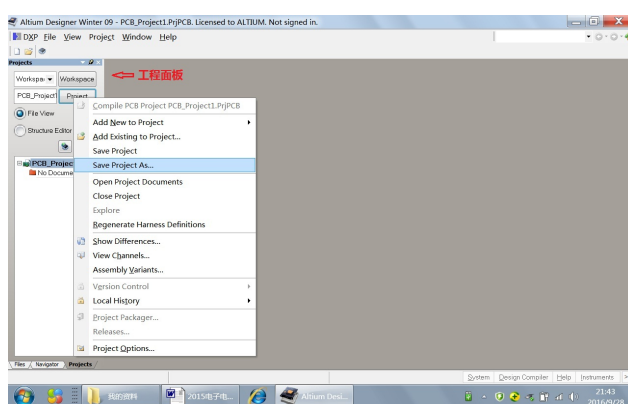


图 2.1 创建 PCB 工程

2.3 在工程中创建原理图

有 2 种方法可在工程中创建电路原理图：新建和加入。

1. 新建：点击工程面板中的“Project”按钮，或右击工程面板中的工程名，在弹出的快捷菜单中选择“Add New to Project”→“Schematic”，系统就在该工程下新建了一个名为“Sheet1.SchDoc”的原理图文件。可通过 Save As 命令保存为想要的名字。如图 2.2 所示。
2. 加入：如果事先已有编辑好的原理图，则在弹出的工程快捷菜单中选择第三项“Add Existing to Project...”，在随后弹出的对话框中选择想要加入的文件。

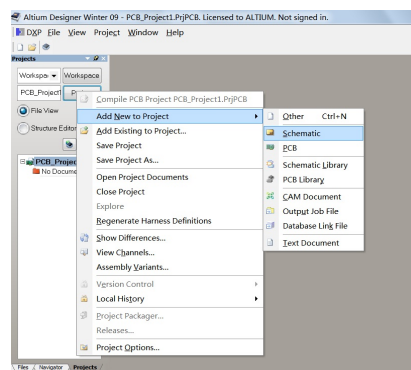


图 2.2 在工程中创建原理图

2.4 设计电路原理图

电路原理图的设计是在原理图编辑器中进行的，原理图编辑器主要用来绘制、编辑电路原理图，生成网络表。

电路原理图设计流程：开始→启动进入原理图编辑器→设置图纸规格→设置编辑器系统参数→放置电路元件、导线等→原理图调整→编译生成网表。

在绘制和编辑原理图之前，首先要启动原理图编辑器。启动原理图编辑器的方法是：从菜单“File”→“Open Project...”，选择要编辑的工程项目，在打开的工程面板中双击要编辑的原理图文件，此时屏幕右侧主窗口即为原理图编辑窗口。

在开始编辑原理图之前，需要对原理图的一些参数进行设置。右击原理图编辑窗口的空白处，在弹出的快捷菜单中选择“Option”→“Document Options...”(or“Sheet...”)，如图 2.3，弹出 Document Options 设置卡，在这个设置卡中，可设置图纸尺寸、栅格、长度单位等参数，如图 2.4 所示。

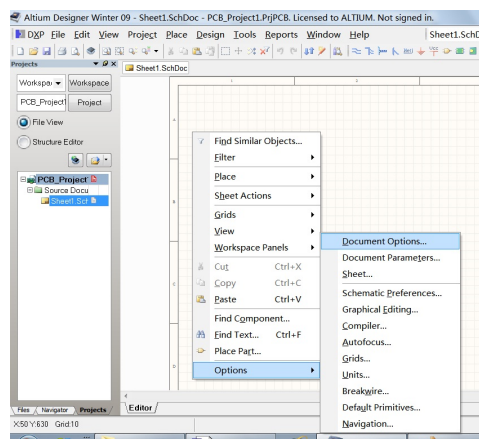


图 2.3 打开图纸及参数设置卡

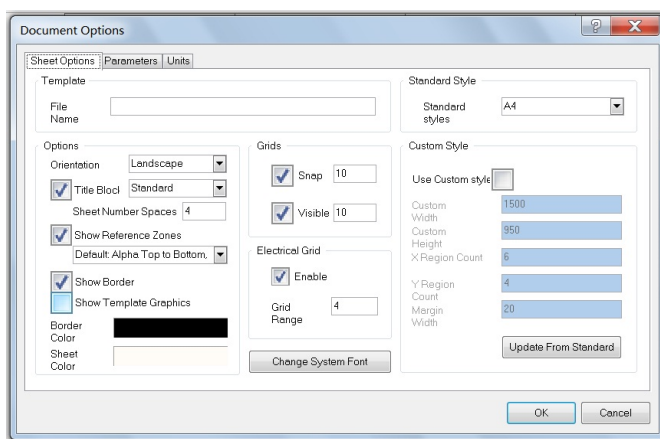


图 2.4 图纸及参数设置卡

在这个原理图参数设置窗口中，设置 Grids 的 Snap 和 Visible 各为 10，选中 Electric Grid 并设置 Grid Range 为 4，图纸尺寸选 Standard styles 为 A4（如原理图复杂，可选 A3 图纸，也可选择下面的 Custom style 并输入图纸的大小尺寸）。其它参数保留默认值即可。

在原理图编辑器窗口，选择主菜单的“Place”，弹出元件放置对话框，如图 2.5 所示。可放置电路所需的各种电路元件、连接线等，进行原理图的设计与编辑。

在放置元器件时，有时系统元件库中没有所需要的元器件，这时就需要安装含有所需元器件的元件库。安装元件库的方法是：执行菜单“Design”→“Add/ Remove Library...”，弹出 Available Libraries 对话框，如图 2.6 所示，显示了系统已安装的元件库，如要安装新的元件库，点击“Install”按钮，选择需要安装的元件库。如要删除已安装的元件库，则先选中该元件库，再点击“Remove”按钮。



图 2.5 放置元件

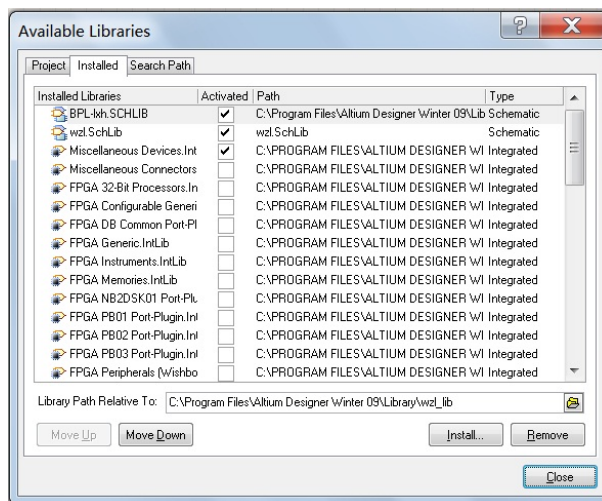


图 2.6 元件库加载/卸载

2.5 原理图编译

原理图编辑完成、检查无误后，进行编译。编译的目的是系统根据设置的规则检查有无错误，编译完成后弹出信息窗口，显示编译时发现的各種错误，包括致命错误、错误、警告等。对于致命错误和错误这两类错误，必须对原理图进行编辑和修改而加以纠正，直至编译后信息面板不显示错误为止。如果不进行在线仿真，就不需要进行编译。

2.6 生成网络表

网络表是指电路原理图中元器件引脚等电气点相互连接的关系列表。它的用途是为 PCB 板设计提供元件信息和线路连接信息。

由电路原理图生成的网络表可以设计 PCB 板，由 PCB 生成的网络表可以与原理图生成的网络表进行比较，以检查 PCB 设计是否正确。

由电路原理图生成网络表的方法是：执行菜单命令“Design”→“Netlist For Project”→“Protel”，如图 2.7 所示，系统生成 Protel 网络表，默认文件名与工程项目名称相同，后缀为 .Net，保存在项目所在文件夹中系统自建的“Project Outputs for *”子文件夹中。

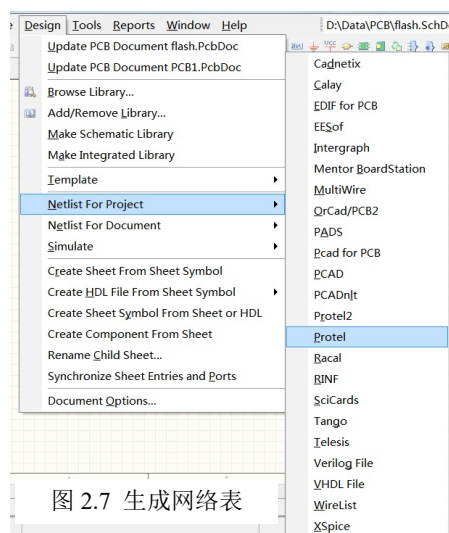


图 2.7 生成网络表

2.7 设计 PCB

1. 创建 PCB 文件

首先在工程面板中点击“Project”按钮，或右击工程面板中的工程名，或打开主菜单“Project”，在弹出的菜单中选择“Add New to Project”→“PCB”，如图 2.8，则系统就在该工程下新建了一个名为“PCB1.PcbDoc”的 PCB 文件。在 PCB 编辑环境中执行“File”→“Save As...”，可将该 PCB 文件保存为想要的名字。

2. 导入原理图数据

接下来就要导入原理图数据。导入原理图数据就是把原理图文件中的信息引入到 PCB 文件中，以便设计 PCB。导入数据的方法有 2 种：

- 1) 在 PCB 编辑环境下，执行菜单“Design”→“Import Changes From *.PrjPCB”，弹出 ECO 对话框，列出了对 PCB 文件加载网络表的信息和操作。依次点击对话框中的“Validate Changes”按钮、“Execute Changes”按钮，无错误时，对话框中的 Check 和 Done 栏均出现“√”，单击“Close”按钮完成数据导入。
- 2) 在原理图编辑环境下，执行菜单“Design”→“Update PCB Document *.PcbDoc”，弹出 ECO 对话框，以后的操作与前一种方法相同。

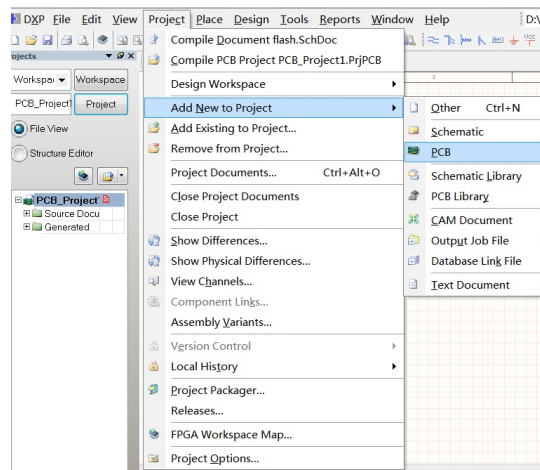


图 2.8 创建 PCB 文件

3. 板参数设置

板参数设置是设置 PCB 编辑器中的栅格及尺寸、长度单位等的参数，便于 PCB 编辑。

执行菜单“Design”→“Board Options”，打开板选项对话框，如图 2.9 所示，进行设置。栅格设置要便于摆放元件，栅格尺寸常用英制单位（mil），因为元器件实际尺寸基本上都是以英制为单位的。

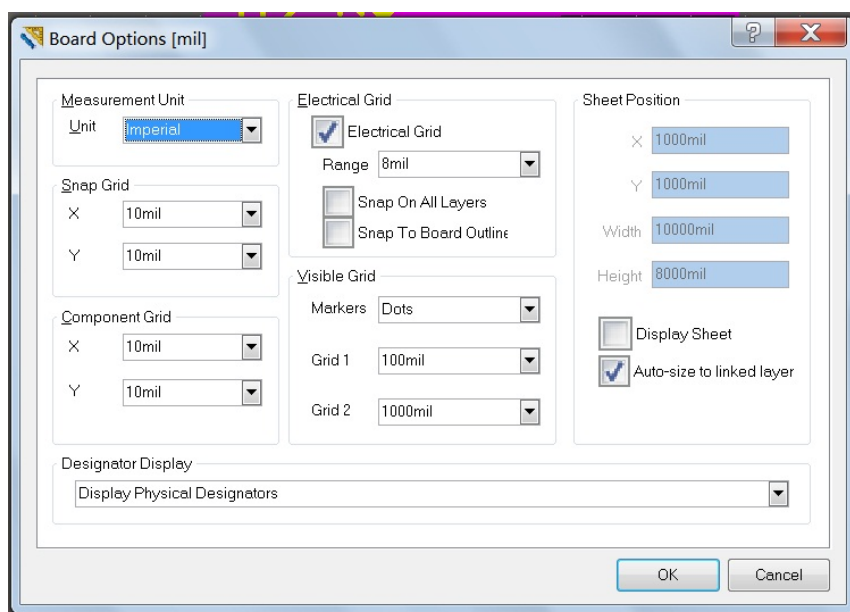


图 2.9 板参数设置对话框

- 1) Measurement Unit: 选择 Imperial。（英制）
- 2) Snap Grid: 捕获栅格，为鼠标所能识别的最小移动间距，通常设为 10mil 或 5mil。
- 3) Component Grid: 元件栅格，元件只摆放在此栅格整数倍的栅格点上。通常设为 10mil。
- 4) Electric Grid: 电栅格，电栅格可看成是吸引鼠标跳转的范围，在放置一个电气对象时将在此范围内捕获电气节点。通常设为略小于捕获栅格，4 或 8mil。
- 5) Visible Grid: 可视化栅格，可视化栅格即网格，用于显示，便于元器件及走线的对齐。为使屏幕清晰简洁，通常选用“Dots（栅格点）”，栅格值分别设为 100mil 和 1000mil。

4. 设置电路板禁止布线区

设置电路板禁止布线区就是确定电路板的电气边界。电气边界用来限定布线和元件放置的范围

围，它是通过在禁布层（Keepout Layer）上绘制边界来实现的。设置布线区的步骤如下：

- 1) 在 PCB 编辑环境下，单击窗口下方的 Keepout Layer 标签选中该层为当前工作层。
- 2) 预先确定电路板的电气边界，执行“Place”→“Line”，光标变成十字形，将光标移动到合适的位置，单击确定边界的一个起点，然后移动光标，至合适的某一点再单击，确定电气边界一边的另一个点（终点）。同样的操作可确定电路板电气边界的其他 3 个边界。

5. 定义板边界

通常，新建的 PCB 板是一个全黑的背景，需要定义板子的边界和形状等。执行“Design”→“Board Shape”→“Redefine Board Shape”，这时光标变为十字形，依次在合适的位置沿顺时针或逆时针单击板子各顶点形成一个封闭的多边形，此多边形即为新定义的电路板边界。

6. 设计规则设定

设计规则是设计过程中应遵守的原则，系统会根据设计规则实时对设计进行检查，检查所做的设计是否符合设计规则要求。

执行“Design”→“Rules”，打开 PCB 规则及约束编辑器面板，如图 2.10 所示，可对设计规则进行设置，共有 10 类规则。主要要对布线宽度和安全间距进行设置，其他可以使用默认值。

在 Electric Clearance，通常设置为 13mil。

在 Routing Width，通常设置 Min Width 为 10mil，Preferred Size 为 12mil，Max Width 为 200mil。

在 Routing Layers，勾选 Top Layer 和 Bottom Layer，取决于设计的是单面板还是双面板。如果设计的是单面板，则仅勾选 Bottom Layer。设计双面板时顶层和底层都需要勾选。

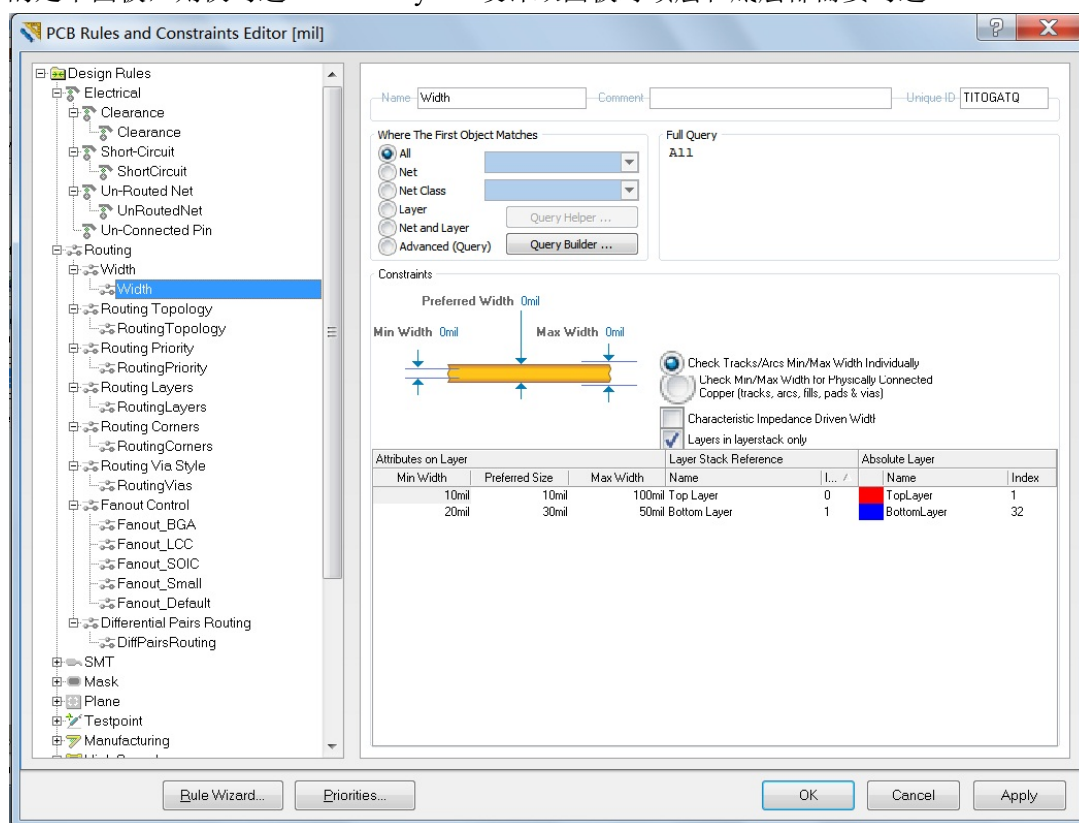


图 2.10 PCB 设计规则设置对话框

7. 元器件布局

在 PCB 板上合理放置元器件称为布局，元器件之间的连接称为布线或走线。

元器件布局就是将元器件封装按一定规则排列和摆放在电路板的合适位置上，要考虑散热通风、查找方便、检查容易、置换简单、协调美观等因素。PCB 编辑器中元器件布局有自动布局和手工布局两种方法，一般多采用先自动布局，然后进行手工调整的方法。

如何把元器件合理地排列和摆放到电路板中，使电路板紧凑，同时相互连线尽量短、交叉少，电气影响小呢？在元器件布局时要遵循一些基本原则，那就是：

（1）按电路模块进行布局。一个功能内的相关电路称为一个电路模块，电路模块中的元器件应采用就近集中原则放置，同时**数字电路和模拟电路**分开布置。

（2）定位孔、标准孔等非安装孔周围 1.5mm 内不贴装元件，螺钉等安装孔周围 3.5mm（对应 M2.5）、4mm（对应 M3）内不得贴装元件。

（3）发热元件不能紧邻导线和热敏元件。高热元件要均衡分布。

（4）**各类接插件应尽量布置在电路板的四周，方便插拔。**

（5）所有 IC（集成电路）元件单边对齐、方向应尽量一致，有极性的元件极性标示要明确，同一电路板上极性标示不得多于 2 个方向，出现 2 个方向时，2 个方向应互相垂直。贴片元件单边对齐，字符方向一致，封装方向一致。

（6）板面布线应疏密均衡、得当。

8.自动布线

布线参数设置完成，元器件布局好后，就可开始布线。对于简单的电路板一般采用手工布线。而较复杂的电路板，一般采用自动布线，再进行手工调整的方法进行布线。

自动布线方式灵活多样，根据需要既可进行全局布线，也可以对指定的区域、网络、元件或者某个连接进行布线。

执行主菜单“Auto Route”→可进行相应的自动布线。

9.手工调整

自动布线虽然效率高，但是一般不能达到满意的效果。因为自动布线主要是实现电气网络间的连接，很少考虑到特殊的电气、物理和散热等的要求，因此必须通过手工来进行调整，使电路板既能实现正确的连接，又能满足设计要求。

手工调整布线的最简单的方法是对不合理的布线先拆线，后手工再布线。

1) 拆线：执行菜单“Tools”→“Un-Route”，弹出拆线对话框，再选择拆线方式。

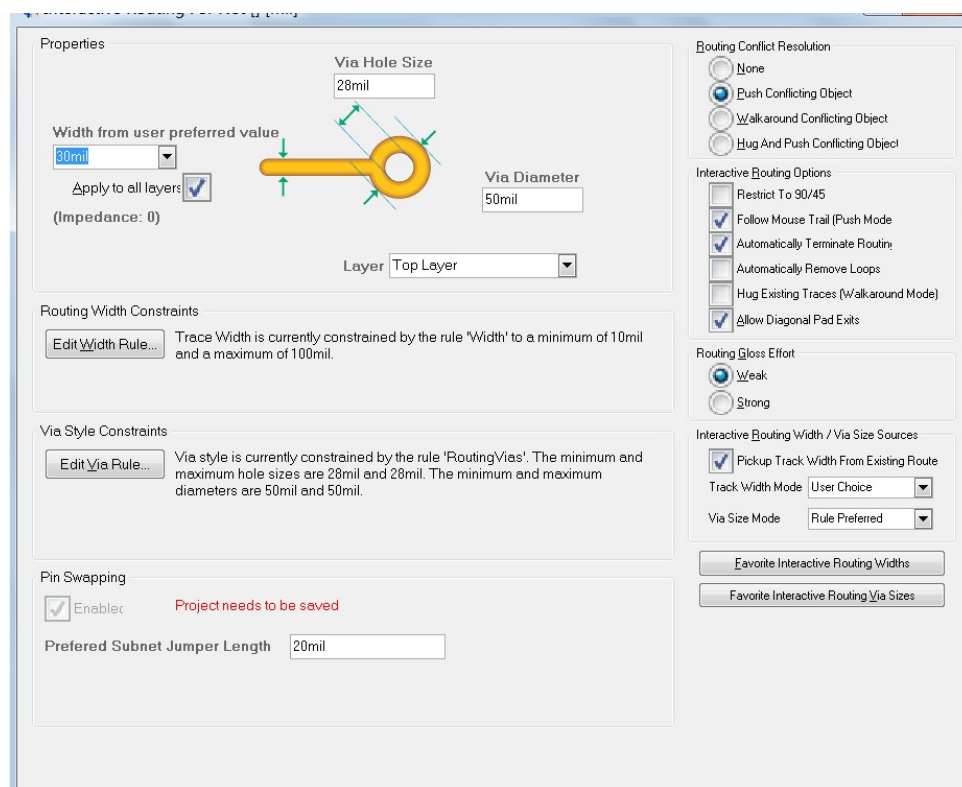


图 2.11 布线过程中重新设置布线参数

2) 手工布线: 手工布线就是使用飞线的引导将导线放置在电路板上。执行菜单“Place”→“Interactive Routing”, 进入布线状态, 光标变成十字状, 移动光标到布线的起始点单击鼠标开始布线, 移动鼠标到下一个点单击鼠标布上这一段导线, 直至到布线的终点。在布线过程中按鼠标右键或 Esc 键可中止本次布线退到布线状态; 在布线状态下按鼠标右键或 Esc 键即退出布线状态。

在布线过程中按 Tab 键, 可对布线宽度等参数进行重新设定如图 2.11。

双面板的顶层和底层均为布线层, 布线时的换层方法, 布线时按小键盘上的“*”键可在顶层与底层间进行切换, 同时自动放置一个过孔。

小键盘上的“+”、“-”可在各层间依次切换为当前工作层。

10. 放置敷铜

在完成了元器件布局和布线之后, 把 PCB 上没有放置元器件和导线的较大面积的空白地方用铜箔来填充, 这些铜箔区称为灌铜或多边形敷铜。

PCB 上大面积敷铜通常有两种作用: 一种是散热, 另一种是用做屏蔽来减小干扰。**注意: 只有在需要散热或者射频电路需要进行屏蔽时才会敷铜。**

大面积敷铜一般做成网格状, 敷铜只能放置在信号层, 可以连接到网络, 也可以独立存在。敷铜一般与网络 GND 相连。

执行菜单“Place”→“Polygon Pour...”, 设置好敷铜的参数, 移动光标到多边形的起点单击, 移动鼠标到下一个点单击鼠标, 直至围成多边形, 右击鼠标退出多边形放置模式, 此时在刚刚绘制的多边形内铺上了敷铜。

不是所有的电路板都要敷铜的, 只有在设计高频电路板或者需要借助电路板进行散热时才敷铜。

2.8 库文件编辑

新器件层出不穷, 有些器件在现有的元件库中找不到, 这时就要自己来编辑制作这些元件, 包括制作原理图库元件和封装图库元件。

一、原理图库编辑

1. 编辑原理图库文件

有 2 种方法来制作原理图库文件。

1) 新建一个原理图库文件, 在此文件中新建库元件: 执行菜单“File”→“New”→“Library”→“Schematic Library”, 如图 2.12 所示。然后保存为合适的文件名。

2) 在原有库文件中添加新元件: 执行菜单“File”→“Open”, 选择要添加新元件的库文件名打开, 选择 Extract Sources, 双击工程面板中原理图库文件打开。

2. 在库文件中添加新元件

在原理图库编辑窗口中, 执行菜单“Tools”→“New Component”, 输入新元件名, 在编辑窗口先画出元件的轮廓。按 Tab 键可对轮廓图形的属性进行修改。然后执行菜单“Place”→“Pin”, 放置元件的引

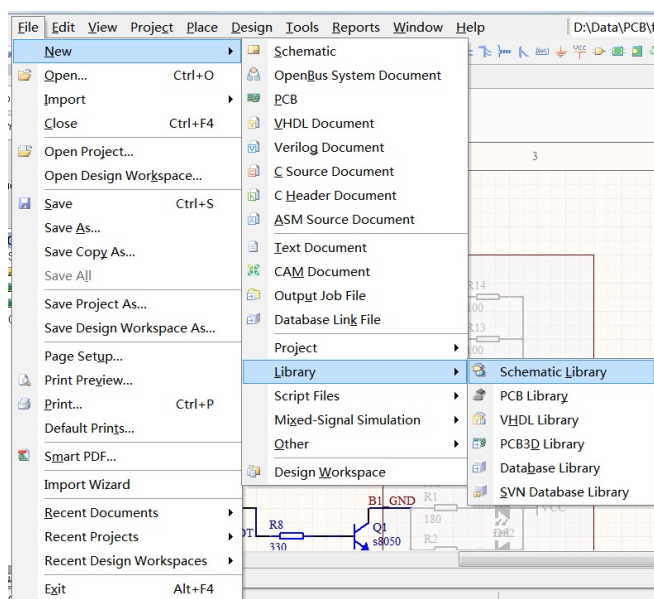


图 2.12 新建原理图库文件

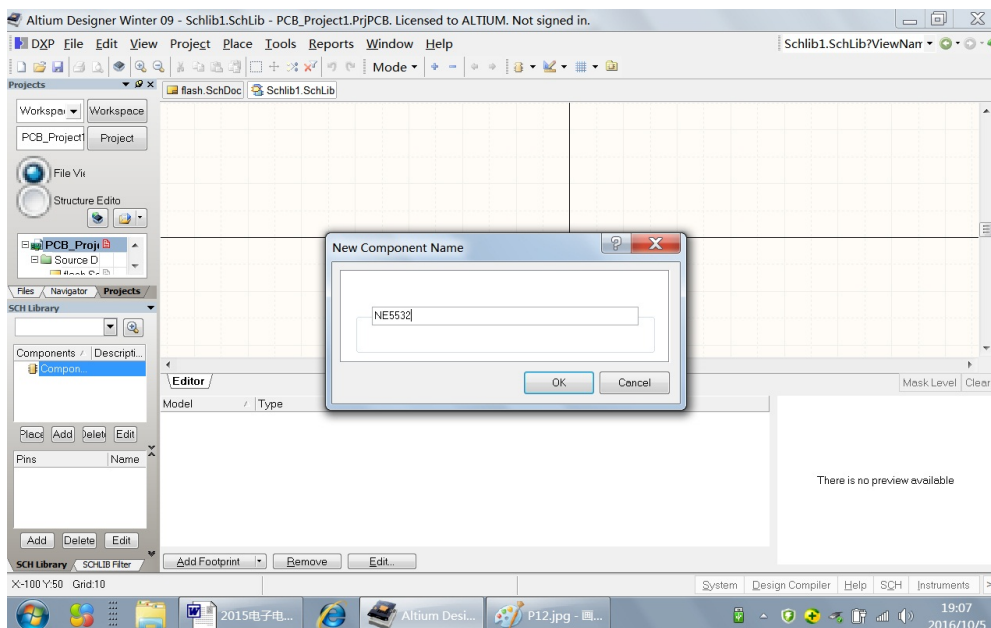


图 2.13 添加并命名新元件

脚。元件引脚靠近引脚名的一端为非电气端，应放置在元件轮廓边框上，另一端为电气端。放置时按空格键可旋转引脚方向，按 Tab 键或在放置后双击引脚，可对引脚属性进行修改。

编辑完成后，执行菜单“Tools”→“Component Properties...”，或在原理图库面板中选中新建的元件，单击“Edit”，打开库元件属性设置对话框，如图 2.14 所示，为元件添加标识、注释、封装等信息。

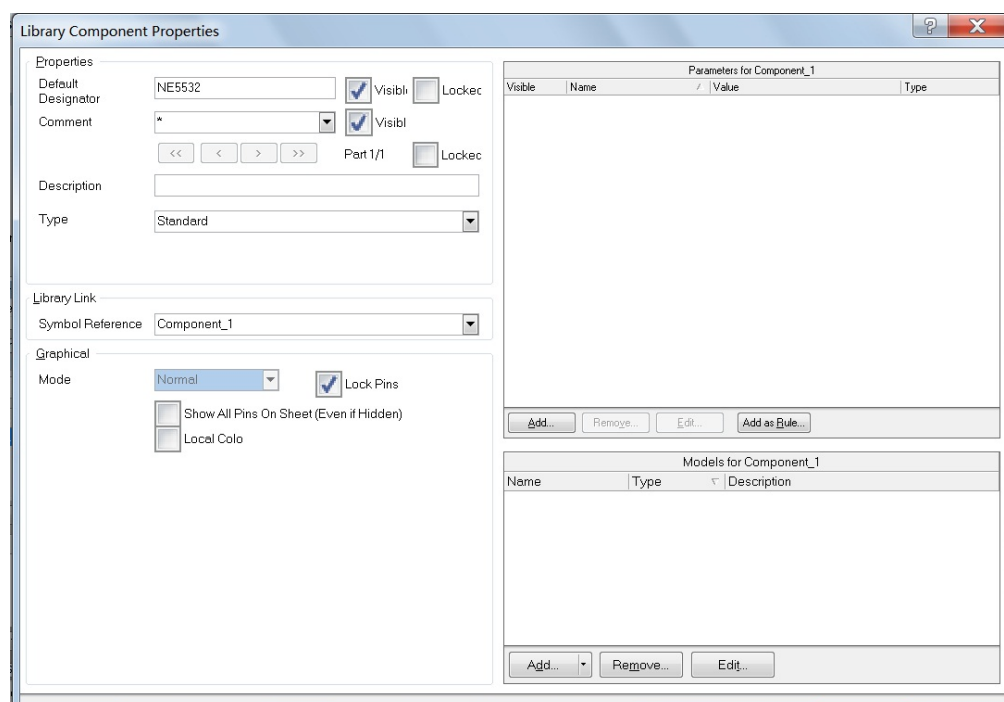


图 2.14 元件属性对话框

3. 创建一个多子件的原理图元件

在原理图库编辑器中执行菜单“Tools”→“New Component”，输入新元件名，画外形轮廓，添加引脚，创建第一个子件。其中的电源脚（VCC）和地脚（GND）要支持所有子件，所以将电源引脚（公共引脚）作为子件 0 设置，如图 2.15 所示。双击电源引脚，编辑其属性，其中电气类型设

为 Power, Hide 选中, Connect to 某一网络 (根据引脚设为 VCC 或 GND), **Part Number** (子件号) 设置为 0。

执行菜单 “Tools” → “New Part”, 创建新的子件, 直到创建全部子件。由于第一个子件中已设置了公共电源 VCC 和地 GND, 所以随后的子件中不需要再设置电源引脚了。

二、PCB 封装库文件编辑

1. 启动 PCB 库文件编辑器

有 2 种方法启动 PCB 库文件编辑器:

1) 执行 “File” → “New” → “Library” → “PCB Library”, 新建一个封装库文件 (参见新建原理图库文件), 同时启动 PCB 库文件编辑器。保存文件时可更改文件名。

2) 执行菜单 “File” → “Open”, 选择要打开的库文件名打开, 进入 PCB 库文件编辑器, 同时编辑器窗口显示库文件中的第一个元件封装。

2. 新建 PCB 封装

1) 在 PCB 封装库编辑器中执行菜单 “Tools” → “New Blank Component”。执行 “Tools” → “Library Options...”, 打开板参数设置对话框, 参见图 2.9。设置长度单位为 Imperial, 设置环境参数, 其中的网格参数应小于元件图件间的最小间距, 一般设为 5mil。

2) 开始放置焊盘, 执行 “Place” → “Pad”, 按 Tab 键可对焊盘属性进行设置。如图 2.16, 主要设置参数是焊盘编号 (标识)、形状、大小、通孔直径等, 通常 1 号焊盘设为正方形。依次放置所有焊盘。注意, 此时焊盘之间的间距必须与实物的引脚间距完全一致。

3) 所有焊盘放置完毕后, 绘制元件外形轮廓, 将 Top Overlay 设为当前工作层, 执行 “Place” → “Line”、“Arc” 等绘制出元件的外形轮廓。

4) 对于需要标注标识的元件, 如电解电容的极性, 可通过放置字符串的方式加以标注, 执行 “Place” → “String”。

5) 设置元件封装的参考点。每个元件封装都应有一个参考点, 是放置或移动元件时的坐标位置参考。通常把 1 号焊盘设为参考点。其设置方法为: 执行 “Edit” → “Set Reference” → “Pin 1”。

6) 保存封装。执行 “File” → “Save”, 保存创建好的封装。

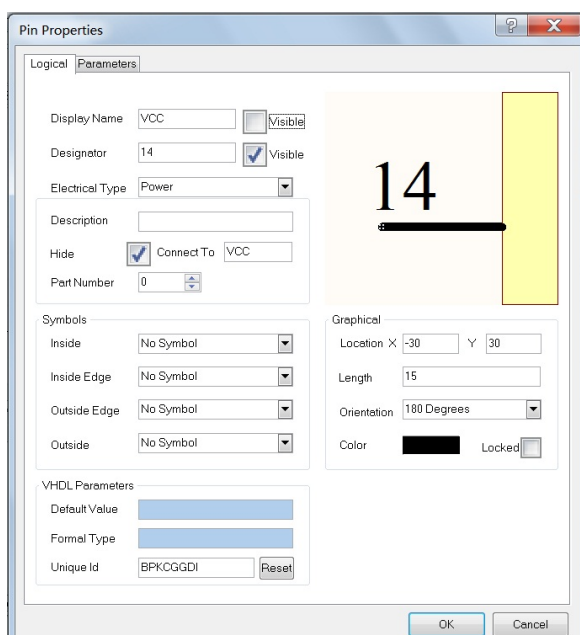


图 2.15 公共电源引脚属性设置

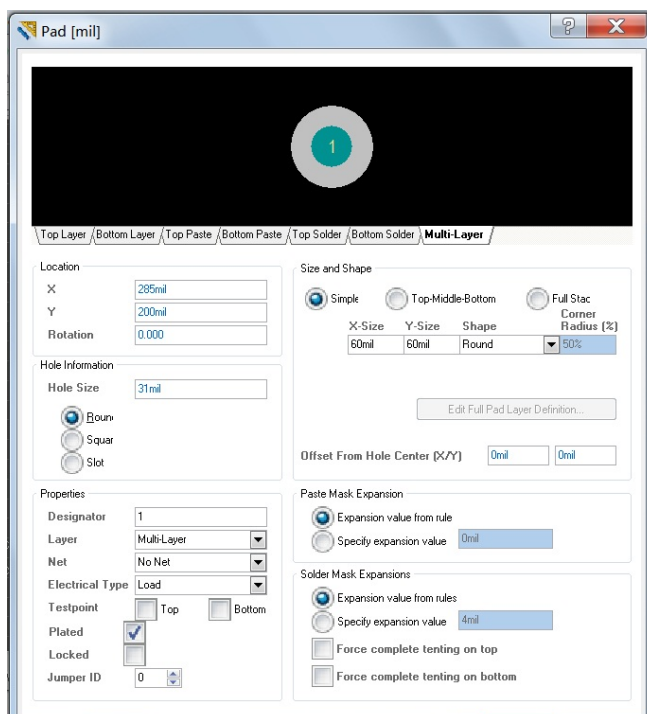


图 2.16 焊盘属性设置

附：一些快捷键（使用快捷键可提高工作效率）：

鼠标滚轮	图纸上下移动
Shift+滚轮	图纸左右移动
Ctrl+滚轮	图纸缩小放大
器件选中状态：	
空格	90° 旋转器件
器件悬放状态：	
空格	90° 旋转器件
Y	垂直翻转（注意：编辑 PCB 板图时不可翻转）
X	水平翻转（注意：编辑 PCB 板图时不可翻转）
Tab	进入器件属性编辑对话框
PgUp	放大图纸
PgDn	缩小图纸
End	重画图纸
上下左右光标键	按捕获网格移动光标
Shift+光标键	以 10 倍捕获网格移动光标
小键盘：	
+	PCB 编辑状态下，依次切换板层
-	PCB 编辑状态下，依次反方向切换板层（与+作用相反）
*	PCB 编辑状态下，在顶层与底层之间切换。

在菜单中，某个字母带下划线，该字母即为该菜单命令的快捷键。

常用元器件的封装：

普通电阻	AXIAL0.4
瓷片电容	RAD0.1、RAD0.2、CAP0.2
电解电容	RB.2/.4、CAP-EL
单排排针	SIPn, n=排针数
双排排针	IDCn, n=排针数
二极管	DIODE0.4, DIODE-4
晶振	XTAL1, RAD0.1, RAD0.2
双列直插 IC	DIPn, n=IC 管脚数
大按钮	AN-L
小按钮	AN-S
发光二极管	LED-3、LED-5
三极管	NPN-2、PNP、PNP-2
2 线电源插座	POWER PLUG2
3 线(5 芯)电源插座	POWER PLUG5

第3章 OrCAD 软件基础

3.1 OrCAD 简介

在众多的 EDA（电子设计自动化）工具中，Cadence 公司的 OrCAD 电路设计套件中的 PSpice 是当前使用最广泛的电路级仿真工具软件。PSpice 最初是专门用来进行模拟电路仿真的，发展到如今在模拟电路上的分析技术已经非常成熟了，现在的 PSpice 软件不仅可以对模拟电路进行仿真，而且还可以对数字电路进行仿真，这使得 PSpice 的应用范围更加广泛。作为一个电路设计工作者来说，熟练地使用 PSpice 来进行电路的分析和设计是必不可少的专业技能之一。

PSpice 是以 SPICE 为核心发展起来的。SPICE 是 Simulation Program with IC Emphasis 的缩写，主要用于模拟集成电路的电路分析和辅助设计，该程序是由美国加利福尼亚大学伯克利分校电工和计算机科学系开发的。其第 1 版于 1972 年完成，1975 年推出正式实用化版本。自 SPICE 问世以来，其版本不断更新，其中以 1981 年的 SPICE2G5 版本影响最为深远，是 20 世纪 80 年代世界上应用最广泛的电路设计工具。此后多年 SPICE 软件的更新主要体现在电路分析功能的扩充、算法的改进与完善、元器件模型的更新和增加以及输入输出界面的改善等方面。1988 年 SPICE 被美国定为国家工业标准。各种以 SPICE 为核心的商用电路仿真工具，在 SPICE 的基础上作了很多实用化的工作。其中 Microsim 公司的 PSpice（Personal SPICE）是 SPICE 家族成员中十分出色和著名的一个，是当今世界上广为流行的一款高性能的电子电路计算机辅助分析与设计软件包，它不仅具有 SPICE 原有的功能，在输入输出、图形处理、算法的可靠性和收敛性、仿真速度、模拟功能扩展以及模型参数库和宏模型库等方面都有所改善和扩充。

Microsim 公司推出的 PSpice 版本不断升级，有 DOS 版本和 Windows 版本，功能也不断增强完善。由于 PSpice 超强的电路仿真功能，后来 OrCAD 公司将其收购并集成在 OrCAD 电路设计套件之中，并正式更名为 OrCAD PSpice A/D，其中的“A/D”表示其有模拟（Analog）电路、数字（Digital）电路以及数模混合电路的仿真能力，从而成为了 OrCAD 套件的重要组成部分。再后来 Cadence 公司又并购了 OrCAD 套件。经过重新整合后，集成的 OrCAD 套件系统的最新版本主要包括以下组成部分：电路图绘制软件（OrCAD Capture）、电路仿真软件（OrCAD PSpice A/D）、印刷电路板设计及布线软件（OrCAD PCB Editor 与 OrCAD PCB Router）等。其中，OrCAD Capture 是 OrCAD 软件系统的前端处理程序。它是一个电路原理图输入软件，主要功能是绘制由电路元器件构成的电路图，包括设置元器件的参数、产生网表等文件，为电路仿真计算提供各种基本信息（如电路的拓扑结构、元器件参数等）；OrCAD PSpice A/D 可对模拟电路、数字电路及数模混合电路进行仿真分析；OrCAD PCB Editor 和 OrCAD PCB Router 是印刷电路板设计及布线软件，在使用 OrCAD PSpice A/D 对电路图仿真完成后，即可使用 OrCAD PCB Editor 和 OrCAD PCB Router 软件对相应电路图进行印刷电路板（PCB）的设计。值得一提的是，OrCAD Capture CIS（Component Information System，元器件信息系统）是可随 OrCAD Capture 软件一起使用的一个组件，它可通过访问本地及远程的元器件数据库来帮助设计者管理在电路图设计中的各种元器件属性信息。

本章将以 Cadence 公司的 OrCAD Release 16.3 为典型软件，着重介绍 OrCAD Capture 电路图绘制软件和 OrCAD PSpice A/D 电路仿真软件的主要功能及其使用方法，并通过一些设计实例分析与后续实验，使学生初步掌握使用 OrCAD 这样的 CAD（计算机辅助设计）和 EDA 工具进行电子电路分析与设计的基本方法，培养学生使用 CAD 和 EDA 工具的习惯和能力。

3.2 OrCAD PSpice 的分析功能

PSpice 电路仿真程序是一个应用广泛的计算机辅助设计软件，它的功能非常强大，可以对电路进行各种分析，包括直流工作点和直流扫描分析、交流扫描分析、瞬态分析、参数扫描分析、温度分析、灵敏度分析、直流传输特性分析以及蒙特卡罗分析等。下面分别介绍一下这几种分析功能。

1. 直流分析

直流分析是瞬态分析和交流小信号分析的基础，通常用直流分析来决定瞬态的初始条件和交流小信号分析时电路中非线性元件的小信号模型参数，包括计算电路的直流工作点、直流小信号传输函数和直流转移特性曲线。

直流分析是在电路中电感短路、电容开路的情况下，计算电路的静态工作点。它可以给出电路所有节点的电位，所有电压源的电流和电路中总的直流消耗，所有晶体管的偏置电压、各级电流等信息，所有晶体管在此工作点下的交流小信号线性化模型参数。

2. 直流扫描分析

直流扫描分析是指在指定的范围内，某一个（或两个）独立源或其他电路元件参数步进变化时，计算电路直流输出变量的相应的变化曲线。

3. 交流小信号分析

交流小信号分析是在正弦小信号工作条件下的一种线性频域分析，是一种先行分析方法，包括频率分析、失真分析和噪声分析。程序首先计算电路的直流工作点，以确定电路中非线性器件的线性化模型参数，然后在用户指定的频率范围内，对此线性化电路进行频率扫描分析。交流扫描分析能够计算出电路的幅频和相频响应，或频域传输函数。

4. 瞬态分析

瞬态分析是一种非线性的时域分析方法，包括在用户指定的时间区域内进行电路的瞬态特性分析，以及在大信号正弦波激励情况下，对输出波形进行傅里叶分析，计算基波和 2 ~ 9 次谐波系数及失真系数。瞬态分析时，电路的初始状态可由用户自行指定。如果用户不指定，则程序自动进行直流分析，用直流解作为电路初始状态。

5. 参数扫描分析

参数扫描分析可以对电路中某一元器件的参数值进行扫描，观察它对电路特性的影响，然后确定该元器件取什么值时电路性能最好，这方便了电路的设计。

6. 灵敏度分析

灵敏度分析是计算电路指定的输出变量对电路元件参数的小信号灵敏度值，又可分为直流灵敏度分析和交流小信号灵敏度分析。在 PSpice 中只有直流灵敏度分析，它是一种小信号微分灵敏度。

7. 温度特性分析

缺省时是在 27℃ 情况下进行各种分析和仿真的，如果用户指定电路的工作温度，则可以进行不同温度下的电路特性分析。

8. 蒙特卡罗分析和最坏情况分析

二者都属于统计分析。蒙特卡罗(Monte Carlo)分析是分析电路元器件参数在它们各自的容差范围内以某种统计分布规律随机变化时电路特性的变化情况。最坏情况(Worst Case)分析则是使电路元器件参数同时按容差范围内的最大变化量改变时，得到电路在最坏情况下的特性。

3.3 OrCAD PSpice 的元器件

PSpice 能够分析的电路可包含 R、C、L、传输线、独立源、线性和非线性受控源、常用半导体器件以及一些常用的单元电路和数字电路。PSpice 中的元器件模型包括下面几种。

1. 无源元件

无源元件包括电阻、电容、电感、磁芯、传输线和控制开关，在符号库中分别用 R、C、L、K、T 和 N 来表示。

2. 半导体器件

半导体器件包括二极管、双极型三极管、结型场效应管、MOS 场效应管、砷化镓场效应管、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和可控硅等。由于这些半导体器件的特征方程通常是非线性的，因此在 PSpice 中用不同的模型来描述这些器件，并且不同的分析功能所采用的模型也是不同的，一般有直

流模型、交流小信号模型、瞬态模型、噪声模型和温度模型等。在模型库中，命名通常以关键字开头，后接若干字母或数字，如 Q2N3904 表示一种 NPN 型三极管。

3. 信号源及电源

任何电路描述中，信号源及电源总是必不可少的。在 PSpice 中，信号源分为独立信号源和受控信号源两种，独立信号源有独立电压源和独立电流源两种；受控信号源分为 4 类：电压控制电流源(VCCS)、电压控制电压源(VCVS)、电流控制电流源(CCCS)和电流控制电压源(CCVS)。

独立信号源又分为直流源、交流小信号源和瞬态源，分别用于直流分析、交流小信号分析和瞬态分析。瞬态源有脉冲、正弦、指数、分段线性 and 单频调频五种形式。直流源、交流小信号源和瞬态源可以组合在一起使用，如正弦瞬态电压源(VSIN)元件包含了直流电压源、交流电压源和正弦瞬态电压源。VSIN 元件中的 DC 属性用于设置直流电压源，AC 属性用于设置交流电压源，VOFF、VAMPL、FREQ 等属性用于设置瞬态电压源。

4. 常用的单元电路和数字电路

包括模拟电路中常用的集成运放、电压比较器及数字电路中常用的各种门电路、触发器、延迟线、可编程逻辑阵列、RAM、ROM 等。这些电路可作为一个单元电路出现在整体电路中，并且不必考虑单元电路内部的电路结构。对于这些集成电路，在模型库中通常以其型号作为元器件名称，例如，74 系列的数字集成电路芯片就直接以其型号作为元器件名称。

PSpice 软件为不同类别的元器件赋予了不同的字母代号以示区别，如表 4.2.1 所示。

表 4.2.1 元器件类别及其名称代号

名称代号	元器件类别	名称代号	元器件类别
B	GaAs 场效应晶体管	L	电感
C	电容	M	MOS 场效应晶体管
D	二极管	Q	双极型晶体管
E	电压控制电压源(vcvS)	R	电阻
F	电流控制电流源(CCCS)	S	电压控制开关
G	电压控制电流源(VCCS)	T	传输线
H	电流控制电压源(CCVS)	U	数字电路单元
I	独立电流源	V	独立电压源
J	结型场效应晶体管(JFET)	W	电流控制开关
K	互感、磁芯、传输线耦合	Z	绝缘栅双极晶体管(IGBT)

3.4 OrCAD PSpice 中的相关规定

在 PSpice 的编辑框中输入参数值或表达式时，应符合 PSpice 软件的有关规定。PSpice 规定参数由数值和单位两部分组成，数值可以用十进制数或浮点数来表示，也可以用运算表达式或定义的函数来表示，但表达式或函数一定要放在大括号中，例如，{250*1.414}、{SIN(50)}。多个数值或表达式之间用逗号或空格分开，多个空格等效于一个空格。

单位由比例因子和缺省单位两部分组成，用英文字母表示，不区分大小写。比例因子如表 4.2.2 所示。比例因子中应特别注意毫与兆的区别：兆要用“MEG”表示，“M”不分大写或小写，都表示毫(milli-)，这一点与人们平时的习惯有些不同，使用时非常容易出错。缺省的物理单位与人们的习惯相一致，如表 4.2.3 所示。因此，在实际使用时通常将缺省单位忽略。例如，当表示频率时，1000、1000Hz、1kHz、1KHz、1k、1E+3 都表示同一个频率。

PSpice 软件提供的部分常用的运算和函数列于表 4.2.4。

PSpice 的仿真分析结果通常通过 Probe 程序来查看，其输出变量主要有电压量（用“V”表示）

和电流量（用“I”表示）。输出变量的表示有多种格式。

表 4.2.2 比例因子

比例因子	对应数值	备 注
F	10 ⁻¹⁵	飞(femto-)
P	10 ⁻¹²	皮(pico-)
N	10 ⁻⁹	纳(nano-)
U	10 ⁻⁶	微(micro-)
M	10 ⁻³	毫(milli-)
K	10 ³	千(kilo-)
MEG	10 ⁶	兆(mega-)
G	10 ⁹	吉(giga-)

表 4.2.3 缺省物理单位

物理量	缺省单位
电压(V)	伏特(V)
电流(I)	安培(A)
频率(f)	赫兹(Hz)
电阻(R)	欧姆(Ohm)
电容(C)	法拉(F)
电感(L)	亨利(H)
角度(Ang)	角(Deg)

表 4.2.4 PSpice 中常用的运算和函数

运算和函数	意 义	运算和函数	意 义
+, -, *, /	加、减、乘、除	SIN(x)	x 的正弦
ABS(x)	x 的绝对值	COS(x)	x 的余弦
SGN(x)	符号函数	TAN(x)	x 的正切
EXP(x)	e 的 x 次幂	ATAN(x)	x 反正切
LOG(x)	x 的自然对数	DB(x)	20lg x
LOG10(x)	x 的以 10 为底的对数	MIN(x)	x 的最小值
PWR(x,y)	x 的 y 次幂	MAX(x)	x 的最大值
SQRT(x)	x 的平方根	RMS(x)	x 的均方根值

(1) 用节点名来表示，基本格式为

V (节点标记) 表示该节点的电位（即该节点对地之间的电压）

V (节点标记 1, 节点标记 2) 表示两节点之间的电压

例如，若电路中将输出端的节点名设置为 out，则 V(out)就表示输出电压；V(\$N_0001)表示节点名为\$N_0001 的电位，其中\$N_0001 是 PSpice 软件自动设置的缺省节点名，可通过输出文件来查看该节点的连接关系。

(2) 用元器件名和端口名来表示，基本格式为

V(元件序号) 表示该元件两端之间的电压

V 引脚(元件序号) 表示该元件引脚的电位

I(元件序号) 表示流过该元件的电流，只适用于两端元件

I 引脚(元件序号) 表示流入该元件引脚的电流，适用于三端元件或多端元件

在 PSpice 中，对于两端元件，用“1”和“2”作为两个引出端名称；对于独立电源，用“+”和“-”作为两个引出端名称。例如，V(Rb:1)和 V1(Rb)都表示基极电阻 Rb 上 1 端的电位，V(Vi:+)表示电压源 Vi 正端的电位，V(Vi:+, Vi:-)则表示电压源 Vi 两端的电压。

对于多端元件，常用字母来作为引出端名称，如双极型晶体管的基极、集电极和发射极分别为 B、C 和 E，场效应晶体管的栅极、漏极、源极和衬底分别为 G、D、S 和 B。所以，V(Q1:B)和 VB(Q1)表示晶体管 Q1 的基极电压，V(Q1:b, Q1:e)表示晶体管 Q1 的发射结电压。

对于电流的参考方向，PSpice 规定两端元件的电流正方向是从元件的 1 端流进，从 2 端流出。例如，I(R1)表示流过电阻 R1 上的电流，如果在电路图上将电阻 R1 翻转一下，则 I(R1)的电流就与原来的结果差一负号。多端元件的电流参考方向定义为从引出端流入元件为正方向。例如，IC(Q1)

表示晶体管的集电极电流，因此若 PNP 型晶体管工作在放大状态，则 IC(Q1)的结果为负值。

(3) 查看交流扫描分析的输出结果时，通常在电压 V 或电流 I 后面增加一个附加项来表示相对应的量，附加项的含义如表 4.2.5 所示。例如，VP(Q1:c)表示 V(Q1:c)的相位量。

表 4.2.5 附加项的含义

附加项	含 义
(不加)	幅值量
M	幅值量
P	相位量
DB	幅值分贝量，等于 DB(X)
R	实部
I	虚部
G	群延迟量，即相位对频率的偏导数

3.5 OrCAD 电路仿真分析的基本过程简介

OrCAD 将 Capture 和 PSpice 两个程序集成起来，在 Capture 窗口环境下即可启动 PSpice 程序对电路进行仿真分析，操作十分便捷。进行 OrCAD 仿真分析的基本步骤是：绘制电路图、设置分析方式及其参数、执行仿真分析、输出仿真结果并查看，其基本过程如图 4.2.1 所示，具体如下述。

- (1) 通过电路图编辑程序 Capture 输入编辑电路图。
- (2) 在电路图编辑程序 Capture 中设置电路的分析方式及分析参数。
- (3) 运行电路仿真分析程序 PSpice A/D。
- (4) 运行图形后处理程序 Probe 程序查看输出图形及电路输出文件。

使用 OrCAD 软件通常是从 Capture 电路图编辑程序开始的，而且在 Capture 电路图编辑程序中可以设置电路的分析方式和参数，并且可以通过菜单命令启动电路仿真分析程序 PSpice A/D 及图形后处理程序 Probe。

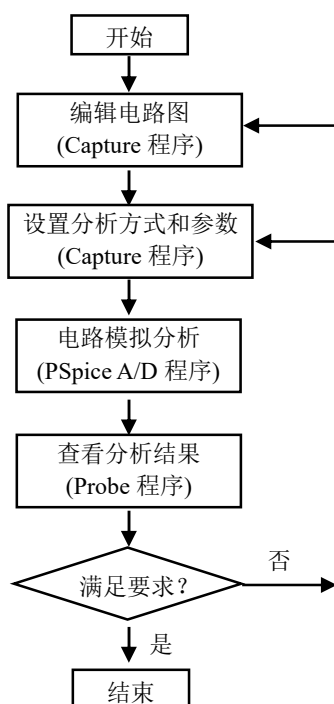


图 4.2.1 OrCAD 模拟分析过程

第 4 章 OrCAD 电路设计仿真分析的流程

4.1 用 Capture 绘制电路图

要使用 OrCAD PSpice 程序分析计算电子电路的性能，必须给计算机输入足够的信息，以便后续仿真程序读取。这些信息包括：电路的拓扑结构、元器件参数、分析方式及分析参数、电路的输出信息和输出变量。

目前常采用的电路输入方法有图形输入和文本输入两种。文本输入方法是用记事本等文本编辑器编写电路描述文件（后缀为.cir），它规定了一系统输入和输出语句，有一定语法，用这些语句和语法来描述要进行仿真分析的电子电路的连接关系等上述四方面信息。图形输入方法是采用绘图软件画出电路图，例如，使用 OrCAD Capture 软件或 Schematics 软件（Cadence 公司推荐使用功能强大的 Capture 软件，因为该公司对较早期的 Schematics 软件的支持和升级已基本停止），利用其编辑功能设置元器件参数、分析类型和参数等，这种方法比较方便直观，符合工程习惯，可以保存与打印电路图，所以受到大多数用户的欢迎。

这里主要介绍采用 OrCAD Capture 软件绘制电路图的电路输入方法，而采用 OrCAD Capture CIS 软件绘制电路图的方法与之基本一致，不再赘述。

4.1.1 运行 Capture 软件

1. 启动 Capture 软件

在 Windows 环境下，从单击“开始”按钮出发，依次单击“程序/Cadence/Release 16.3/OrCAD Capture”，在弹出的“Cadence Product Choices”选择框中选择“OrCAD Capture”后点 OK 按钮，屏幕上即显示出 OrCAD Capture 主窗口，如图 4.3.1 所示。

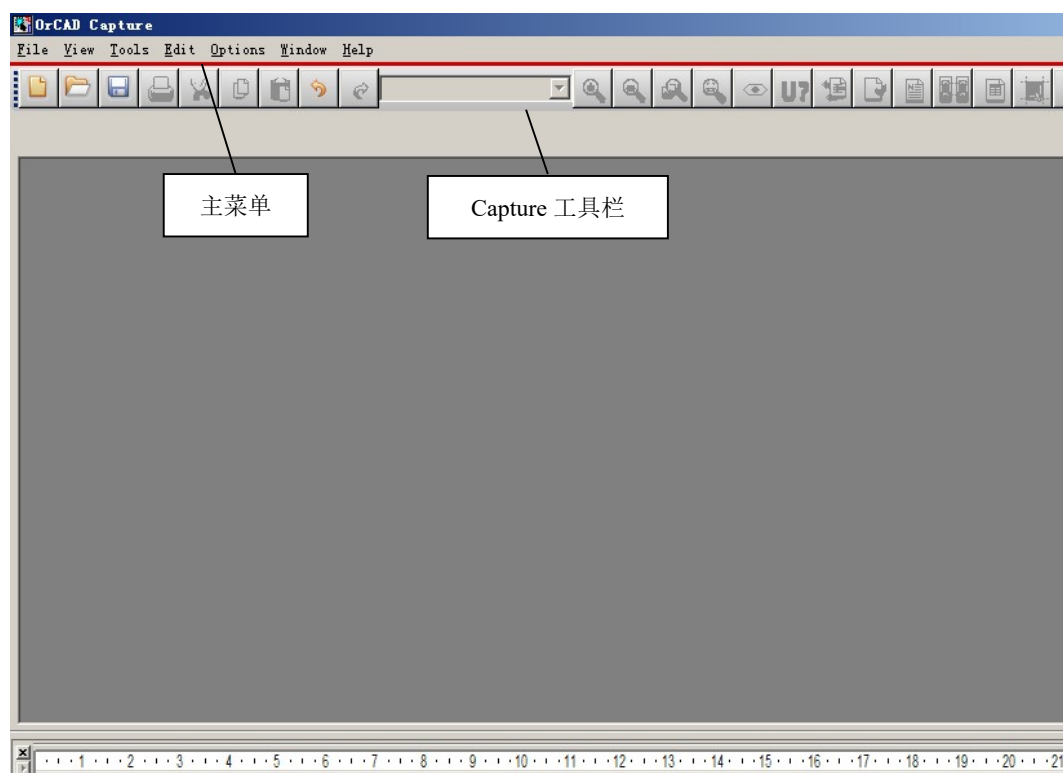


图 4.3.1 OrCAD Capture 主窗口（部分）

在窗口的上方是主菜单和工具栏。在下方是 Session Log 窗口，用以显示 Capture 操作流程或是错误信息，必要时可存档，然后用文字编辑程序查看其内容；右键点击该窗口左边条可切换其显示

方式是驻留显示（Docked）、浮动显示（Floating）、独立子窗口（MDI Child）显示或是隐藏（隐藏后可通过点击主菜单 Windows/Session Log 将其再次调出显示）。工具栏中各图标按钮的功能均可通过主菜单中的对应菜单选项来实现，熟练使用图标按钮可以大大提高操作速度。工具栏各图标按钮的功能列于表 4.3.1 中（将鼠标移至各图标按钮上时会自动浮现出其功能提示，并会在窗口下方状态栏中进行解释）。

表 4.3.1 工具栏上各图标按钮的功能

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26																									
1	新建一个与当前活动窗口同类型的项目或文件										14	缩放显示整个电路图中所有对象													
2	打开已存在的项目或文件（快捷键 Ctrl+O）										15	鱼眼视图（只放大电路图中特定对象的焦点区域）													
3	保存文件（快捷键 Ctrl+S）										16	重新进行索引编号（一般用于从 Capture 向 PCB Layout 前向传递电路更新信息）													
4	打印（快捷键 Ctrl+P）										17	反相重编（将 PCB Layout 序号变化回传到 Capture 电路图中）													
5	剪切（快捷键 Ctrl+S）										18	执行设计规则检查													
6	复制（快捷键 Ctrl+C）										19	产生电连接网表													
7	粘贴（快捷键 Ctrl+V）										20	报告元件的交叉参考位置													
8	撤销上一次操作（快捷键 Ctrl+Z）										21	产生所用材料帐单													
9	重做撤销的上一次操作（快捷键 Ctrl+Y）										22	使光标只能在坐标网格点上移动													
10	在电路图上放置已调用过的元件										23	切换对象被选取的方式：选中区域内完整包含的所有元件及连线，或者是选中区域内相交触及到的所有元件及连线													
11	放大显示（快捷键 I）										24	切换拖动对象时其电气线的连接关系是否允许变化													
12	缩小显示（快捷键 O）										25	转向显示项目管理程序													
13	放大选中区域内的所有对象										26	启动在线帮助信息（快捷键 F1）													

值得一提的是，在 OrCAD 16.3 版中比以前的版本多了一个“Tools”主菜单，其下的 Customize 命令可以定制显示的各个工具栏；或者也可右键单击菜单栏旁边的空白区域，弹出 Customize 命令子菜单进行定制。缺省情况下显示的工具栏有四个：Capture、Draw、PSpice 和 Search（其中 Draw 工具栏即为下文中的绘图工具栏），如图 4.3.2 所示，这里的图 4.3.1 和表 4.3.1 中仅以 Capture 工具栏的显示为例。

2. 新建一个设计项目，打开第一页绘图页编辑窗口

在 OrCAD 软件中，将一个电路分析设计任务的全过程当作一个项目进行管理，由专门的项目管理程序（Project Manager）对该项目所涉及的电路图输入、仿真要求、图形符号库、模型参数库及有关输出结果等实施组织管理。

在 Capture 主窗口中，从主菜单中选择“File/New/Project...”，或单击工具栏中的“打开新项目”图标，弹出“New Project”对话框，如图 4.3.3 所示。在“Name”栏内输入项目名称，如“circuit_1”，在“Create a New Project Using”栏中选择“Analog or Mixed A/D”选项（全称为“Analog or Mixed Signal Circuit Wizard”。注意：若要对电路进行 PSpice 仿真则必须选择该项，而不能选择第四项 Schematic），然后在“Location”栏内输入新项目要存放的路径（也可单击“Browse...”按钮选择存放路径）。设置完毕，单击“OK”按钮确认，这时会弹出如图 4.3.4 所示的“Create PSpice Project”对话框。

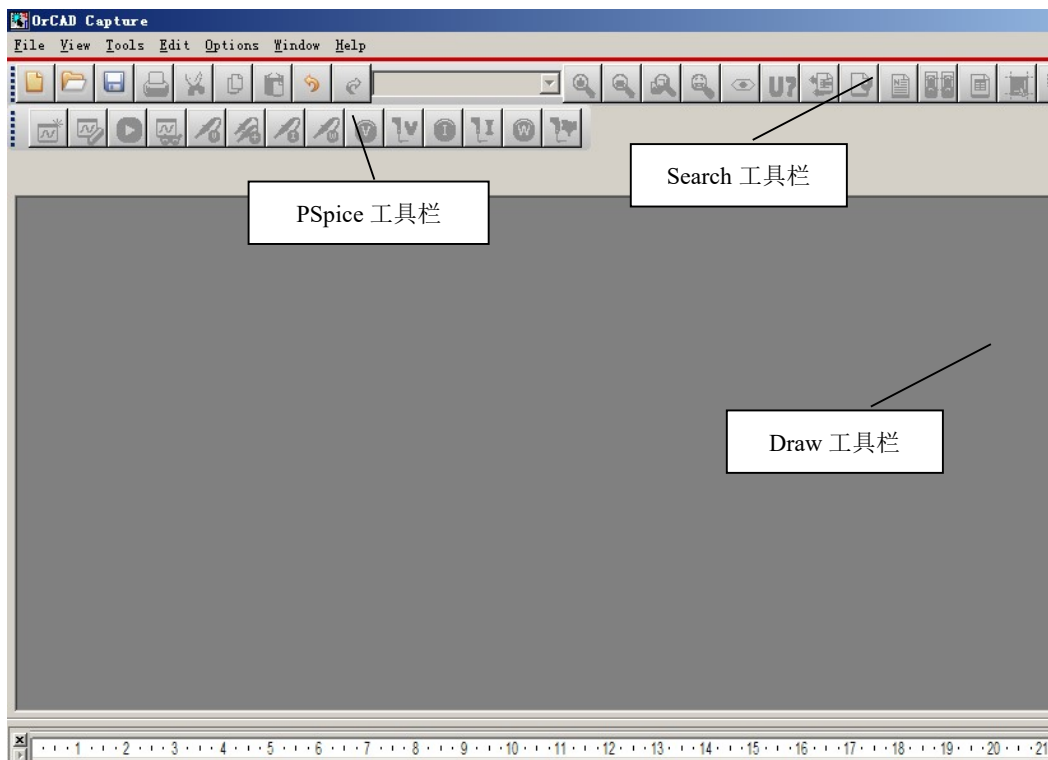


图 4.3.2 OrCAD Capture 主窗口（缺省的全貌）

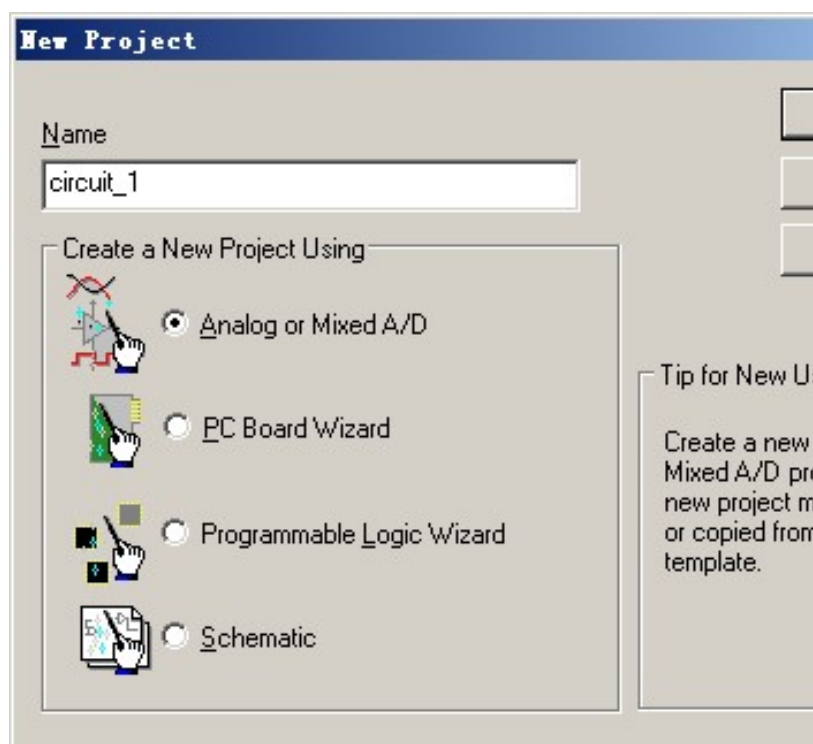


图 4.3.3 “New Project” 对话框

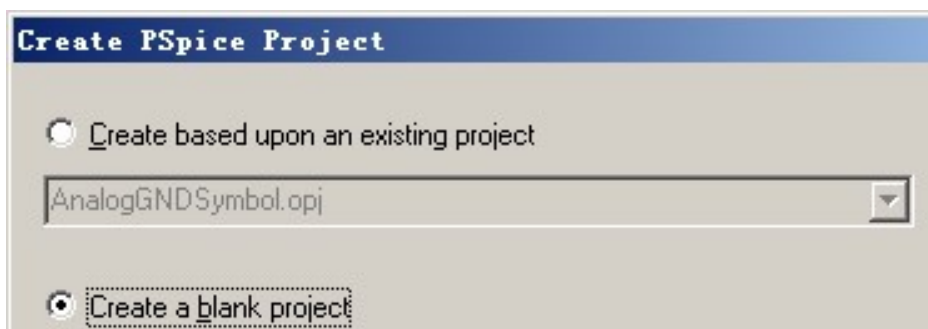


图 4.3.4 “Create PSpice Project”对话框

选择“Create a blank project”选项，单击“OK”按钮确认，即显示出电路图编辑即 OrCAD Capture 窗口，如图 4.3.5 所示。其左边是新建项目“circuit_1”的项目管理器窗口，右边是第一页绘图页编辑窗口。

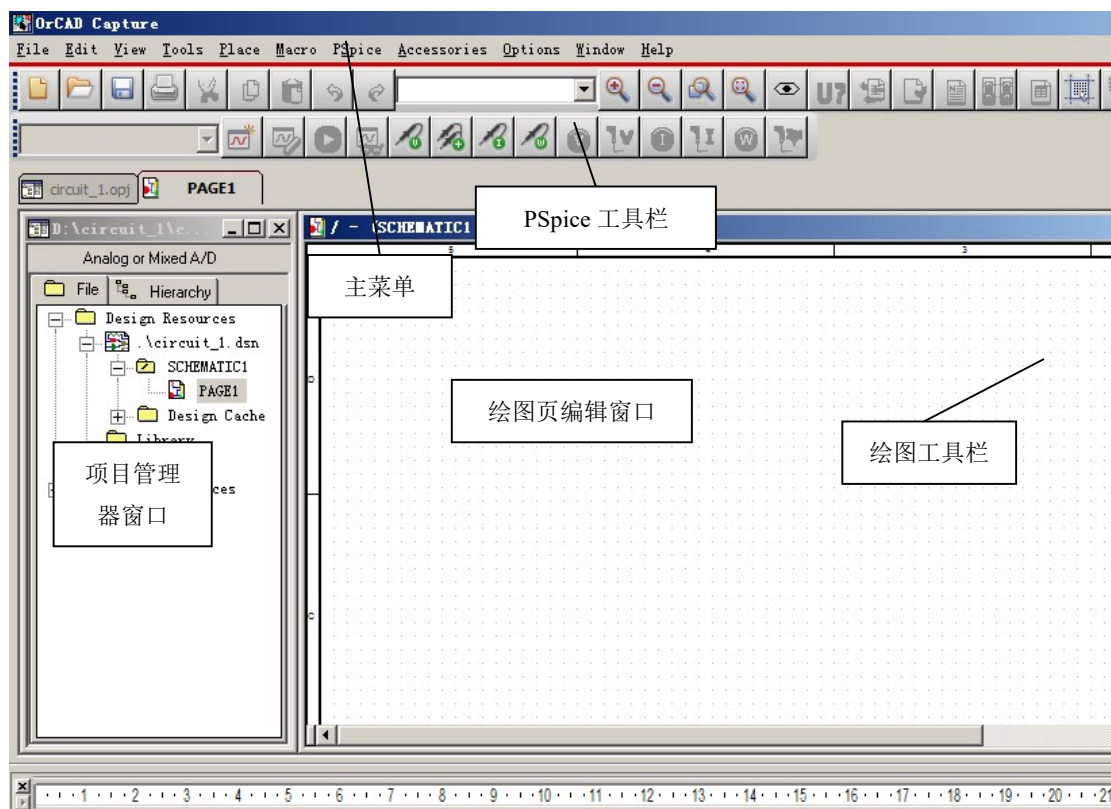


图 4.3.5 电路图编辑窗口

该窗口画面在图 4.3.1 OrCAD Capture 主窗口基础上，增加了几项主菜单命令、PSpice 工具栏及绘图工具栏等。

(1)主菜单: 共有 11 个主菜单命令，每个主菜单命令下的子菜单选项及其功能分别列于表 4.3.2~表 4.3.12 中。

表 4.3.2 “File” 主菜单命令

N <u>ew</u>		新建项目文件等
O <u>pen</u>		打开项目文件等
C <u>lose</u>		关闭当前绘图页编辑窗口
 S <u>ave</u>	Ct	保存当前电路图页面
E <u>xport</u> Selection...		将电路图中选中的单元存入库文件
I <u>mpor</u> t Selection...		从存放单元电路的文件中调入需要的单元
P <u>rint</u> P re <u>view</u> ...		打印预览
P <u>rint</u> ...	Ct	打印
P <u>rint</u> S etup...		打印设置
P <u>rint</u> A rea		打印范围设置
I <u>mpor</u> t Design...		导入其它格式的电路图并将其转换为 Capture 能接受的格式
E <u>xpor</u> t Design...		将用 Capture 绘制的电路图转换为其它格式并导出
1 circuit_1.opj		最近打开的文件列表
2 D:\OPAm _p _8_2_1\OPAm _p _8_2_1.		
3 D:\OPAm _p _8_2\OPAm _p _8_2.opj		
4 D:\CEAm _p _8_1_1\CEAm _p .opj		
5 D:\CEAm _p _8_1\Triode.opj		
		退出

表 4.3.3 “Edit” 主菜单命令

 U <u>ndo</u>	Ctrl-	还原
 R <u>edo</u>	Ctrl-	撤消还原
R <u>epeat</u>	]	重复执行前面的命令
L abel S tate		操作电路图编辑的状态信息（设置、跳转或删除）
 C <u>ut</u>	Ctrl-	剪切
 C <u>opy</u>	Ctrl-	复制
 P <u>aste</u>	Ctrl-	粘贴
D <u>el</u> ete	D-	删除
S elect A ll	Ctrl-	选中整个电路图
P roperties...	Ctrl-	对选中元器件的参数进行设置
P art		编辑修改选中元器件的图形
P Spice M odel		编辑修改选中元器件的模型参数
P Spice S timulus		设置输入激励源信号的波形
M irror		镜像翻转选中的元器件
		旋转选中的元器件
		搜索元器件
		替换所搜索的元器件

表 4.3.4 “View” 主菜单命令

<u>A</u> scend Hierarchy	Shif	➔	显示上一层的电路图
<u>D</u> escend Hierarchy	Shif		显示下一层的电路图
Synchr <u>o</u> nize <u>U</u> p	Shif		底层块管脚修改后更新相应顶层电路图
Synchr <u>o</u> nize <u>D</u> own	Shif		将顶层电路图中块修改更新到底层块中
Synchr <u>o</u> nize <u>A</u> cross	Shif		更新同一层中所有块的实例
<u>G</u> o To...	Ctr		根据设置将光标移动到相应的位置
<u>Z</u> oom			以不同倍率放大或缩小显示电路图
<u>T</u> oolbar			切换窗口中是否显示各个工具栏
☒ <u>S</u> tatus Bar			切换窗口中是否显示状态栏
☒ <u>G</u> rid			切换绘图页编辑窗口中是否显示坐标网格点
☒ <u>G</u> rid <u>R</u> eferences			切换绘图页编辑窗口中是否显示图幅分区
			控制在电路图中选择操作时选中哪些对象
			上一电路图页面
			下一电路图页面

表 4.3.5 “Tools” 主菜单命令

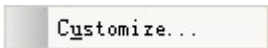
		<table><tr><td>定制各项工具栏及命令的显示</td></tr></table>	定制各项工具栏及命令的显示
定制各项工具栏及命令的显示			

表 4.3.6 “Place” 主菜单命令

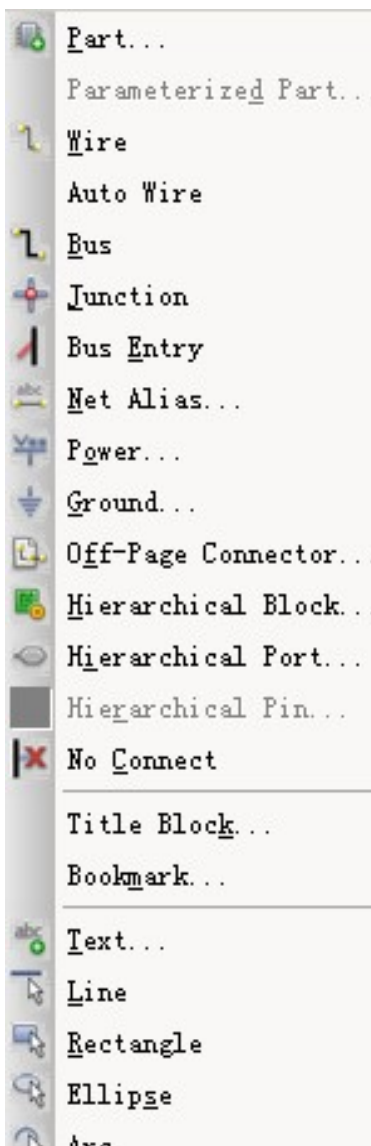
	→	<table><tr><td>调用元器件</td></tr><tr><td>调用在放置元件对话框中选择的一参数化元件</td></tr><tr><td>绘制连线</td></tr><tr><td>自动连线</td></tr><tr><td>绘制总线</td></tr><tr><td>放置连接点</td></tr><tr><td>绘制总线分支线</td></tr><tr><td>设置节点别名</td></tr><tr><td>调用电源</td></tr><tr><td>调用接地</td></tr><tr><td>放置跨页连接端子</td></tr><tr><td>放置层次块</td></tr><tr><td>放置输入/输出端口</td></tr><tr><td>放置层次块引脚</td></tr><tr><td>放置“不连接”符号</td></tr></table>	调用元器件	调用在放置元件对话框中选择的一参数化元件	绘制连线	自动连线	绘制总线	放置连接点	绘制总线分支线	设置节点别名	调用电源	调用接地	放置跨页连接端子	放置层次块	放置输入/输出端口	放置层次块引脚	放置“不连接”符号
调用元器件																	
调用在放置元件对话框中选择的一参数化元件																	
绘制连线																	
自动连线																	
绘制总线																	
放置连接点																	
绘制总线分支线																	
设置节点别名																	
调用电源																	
调用接地																	
放置跨页连接端子																	
放置层次块																	
放置输入/输出端口																	
放置层次块引脚																	
放置“不连接”符号																	
		<table><tr><td>绘制图纸标题栏</td></tr><tr><td>在图纸中设置书签标志</td></tr></table>	绘制图纸标题栏	在图纸中设置书签标志													
绘制图纸标题栏																	
在图纸中设置书签标志																	
		<table><tr><td>添加说明文字</td></tr><tr><td>绘制直线</td></tr><tr><td>绘制矩形</td></tr><tr><td>绘制椭圆</td></tr><tr><td>绘制圆弧</td></tr><tr><td>绘制椭圆弧</td></tr><tr><td>绘制贝塞尔曲线</td></tr><tr><td>绘制折线或多边形</td></tr><tr><td>放置图片</td></tr><tr><td>放置 OLE 对象</td></tr></table>	添加说明文字	绘制直线	绘制矩形	绘制椭圆	绘制圆弧	绘制椭圆弧	绘制贝塞尔曲线	绘制折线或多边形	放置图片	放置 OLE 对象					
添加说明文字																	
绘制直线																	
绘制矩形																	
绘制椭圆																	
绘制圆弧																	
绘制椭圆弧																	
绘制贝塞尔曲线																	
绘制折线或多边形																	
放置图片																	
放置 OLE 对象																	

表 4.3.7 “Macro” 主菜单命令

	→	<table><tr><td>配置当前绘图过程中采用的宏</td></tr><tr><td>运行一个宏</td></tr><tr><td>将用户指定的一系列绘图动作记录下来,生成一个宏以备后面调用</td></tr></table>	配置当前绘图过程中采用的宏	运行一个宏	将用户指定的一系列绘图动作记录下来,生成一个宏以备后面调用
配置当前绘图过程中采用的宏					
运行一个宏					
将用户指定的一系列绘图动作记录下来,生成一个宏以备后面调用					

表 4.3.8 “PSpice” 主菜单命令

 N ew Simulation Profile E dit Simulation Profile R un V iew Simulation Results V iew Output File C reate Netlist V iew Netlist A dvanced Analysis	➔	打开新的仿真设置文件
		编辑仿真设置文件
		执行 PSpice 仿真
		观察仿真结果
		查看输出文件
		生成电路连接网表文件
		查看电路连接网表文件
		高级分析及优化设计
		设置电路中的数据采集标记点
		设置直流工作点偏置电流、电压及功率等

表 4.3.9 “Accessories” 主菜单命令

 AliasRot	➔	旋转所有选中的别名、端口名等
--	---	----------------

表 4.3.10 “Options” 主菜单命令

 P references... D esign Template... A uto b ackup...	➔	设置 Capture 软件运行时的有关参数
		设置与电路设计有关的模板及默认参数
		自动备份设置
		设置当前图纸页的相关参数

表 4.3.11 “Windows” 主菜单命令

 N ew Window C ascade T ile H orizontally T ile V ertically A rrange Icons ☒ 1 Session Log ☒ 2 D:\circuit_1\circuit_1.o	➔	打开一个与当前活动窗口完全相同的窗口
		将多个窗口层叠方式排列
		将多个窗口上下排列
		将多个窗口左右排列
		排列最小化的窗口图标
		切换是否恢复 Session Log 窗口显示
		当前打开的窗口列表
		关闭所有窗口

表 4.3.12 “Help” 主菜单命令

 O rCAD Capture H elp W hat's N ew K nown Problems and S olutio W eb Resources L earning OrCAD Capture D ocumentation	➔	Capture 软件的在线帮助
		新增功能及改进说明
		已知问题及解决办法
		相关 Web 资源
		Capture 软件的使用教程
		相关在线文档
		Capture 软件版本说明及注册登记信息

(2) “PSpice” 工具栏：此工具栏对应于 “PSpice” 主命令菜单中的子命令，共有 14 个快捷按钮，其功能见表 4.3.13 所述。

表 4.3.13 “PSpice” 工具栏各图标按钮的功能

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
													
1	打开新的仿真设置文件						8	放置功耗探针					
2	编辑仿真设置文件						9	使能偏置电压显示					
3	执行 PSpice 仿真						10	切换显示选中对象的电压偏置点数值					
4	观察 PSpice 仿真结果						11	使能偏置电流显示					
5	放置电压探针						12	切换显示选中对象的电流偏置点数值					
6	放置电压差探针						13	使能静态偏置点功耗显示					
7	放置电流探针						14	切换显示选中对象的静态偏置点功耗					

(3) 绘图工具栏：只有当绘图页编辑窗口为工作窗口时才出现此绘图工具栏，它对应于 “Place” 主命令菜单中的子命令，共有 27 个快捷按钮，其功能见表 4.3.14 所述（注：如图 4.3.5 所示，绘图工具栏本为竖排，现为便于说明起见，将其拖放成横排）。

表 4.3.14 绘图工具栏各图标按钮的功能

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
																										
1	选择对象														15	放置层次块引脚										
2	调用元器件（快捷键 P）														16	放置跨页连接端子										
3	绘制连线（快捷键 W）														17	放置“不连接”符号										
4	自动连接两点														18	绘制直线										
5	自动连接多点														19	绘制折线或多边形										
6	自动连接到总线														20	绘制矩形										
7	设置节点别名（快捷键 N）														21	绘制椭圆										
8	绘制总线（快捷键 B）														22	绘制圆弧										
9	放置连接点（快捷键 J）														23	绘制椭圆弧										
10	绘制总线分支线（快捷键 E）														24	绘制贝塞尔曲线										
11	调用电源（快捷键 F）														25	添加说明文字（快捷键 T）										
12	调用接地（快捷键 G）														26	放置 IEEE 符号										
13	放置层次块														27	放置引脚阵列										
14	放置输入/输出端口																									

OrCAD Capture 绘图软件提供了三种电路图的绘制方式：单页、拼接式和分层式电路图设计，用户可根据所绘电路图的规模和复杂程度进行选择。

4.1.2 用 Capture 软件绘制电路原理图

用 OrCAD Capture 绘图软件绘制电路图的具体步骤如下。

1. 加载元器件库

OrCAD Capture 中提供了上万个元器件模型，分别存放在近 80 个库文件中。常用的库有：

ANALOG 库：无源元件库，如电阻、电容、电感等。

BIPOLAR 库：BJT 晶体管库。

DIODE 库：二极管库。

JFET 库：结型场效应管库。

OPAMP 库：通用运算放大器库。

OPTO 库：光电器件库。

PWRBJT 库：功率 BJT 管库。

PWMOS 库：功率 MOS 场效应管库。

XTAL 库：晶体振荡器库。

SOURCE 库：激励源信号（包括电压源、电流源）以及接地库。

SPECIAL 库：一些特殊的符号库。

如果是第一次运行 Capture 程序，或在使用过程中没有找到电路图中所需的元器件，就需要添加元器件库，库文件以.olb 为扩展名。具体操作方法是：在图 4.3.5 所示的电路图编辑窗口中，单击绘图工具栏的调用元器件图标按钮，或
在主菜单中选择“Place/Part...”，或直接按 P 键，即可弹出“Place Part”对话框，如图 4.3.6 所示，然后可按如下两种情况进行操作。

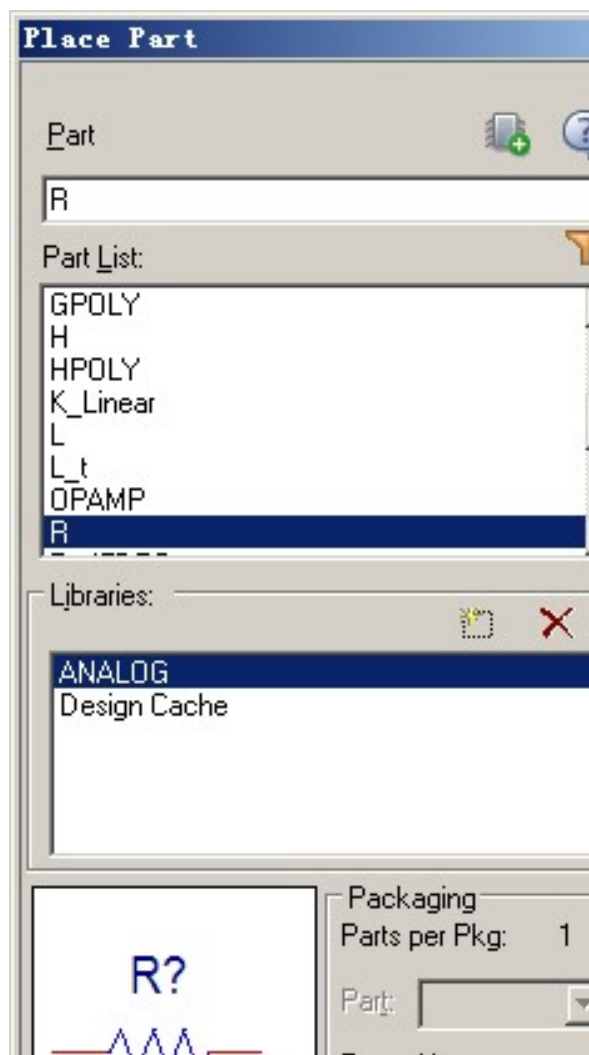


图 4.3.6 “Place Part”对话框

(1) 若事先不知道元件所在的库,可按元件名搜索元器件库,然后再将其添加到元器件库“Libraries”列表中。例如搜索电容元件,可在“Place Part”对话框中单击“Search for Part”旁边的“+”按钮,出现含元件搜索界面的“Place Part”对话框,如图 4.3.7 所示。在“Search For”栏内输入待搜索的元件名“C”,然后单击“Path”栏边的“...”浏览按钮打开“Browse File”对话框(如图 4.3.8 所示)设置元器件库搜索路径目录(注意:为了仿真分析方便起见,这里一般选择...\tools\capture\library\pspice\目录),或者也可直接输入搜索路径目录,接着再单击“Search For”栏旁边的  (Part Search) 按钮或直接按回车键启动搜索,这时元件库列表中就会列出包含电容“C”的全部元器件库,选中第一个元器件库 analog.olb 后单击下面的“Add”按钮或是直接双击该库,则 analog.olb 库就被加载到“Place Part”对话框的元器件库“Libraries”列表中。

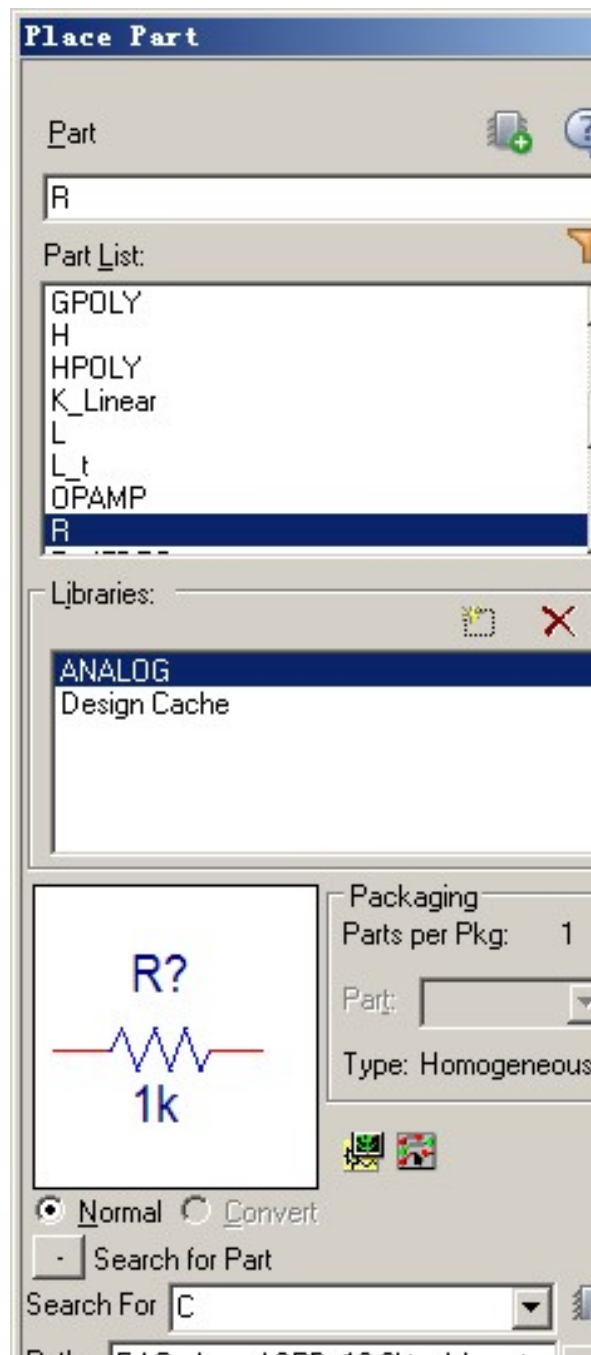


图 4.3.7 “Part Search”对话框(搜索元件)



图 4.3.8 搜索元件时的“Browse File”对话框

(2) 若事先已经知道元器件所在的库，这时可直接单击“Place Part”对话框的“Libraries”框中的  (Add Library) 按钮，屏幕上将弹出“Browse File”对话框，如图 4.3.9 所示。它列出了 OrCAD Capture 提供的元器件库文件清单（以.olb 为后缀名）。从中选取需要的库名称，如 analog.olb，单击“打开(O)”按钮，即将选中的元器件库文件添加到“Place Part”对话框的元器件库“Libraries”列表中。

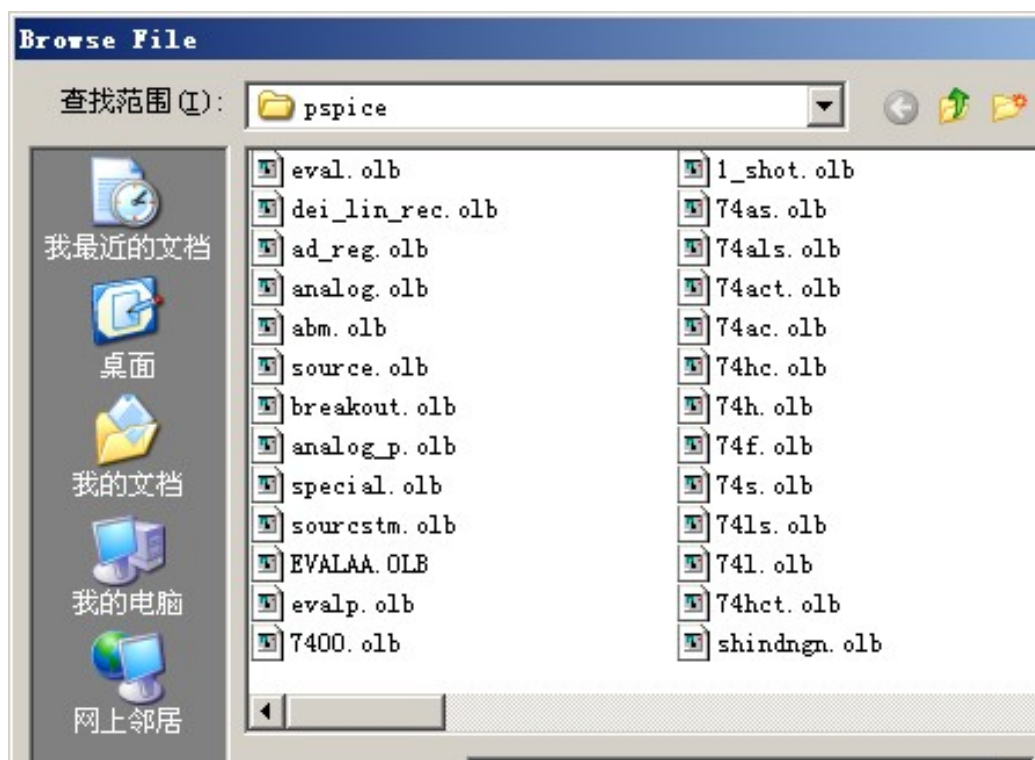


图 4.3.9 添加元器件库时的“Browse File”对话框

值得一提的是，Design Cache 库不是 OrCAD Capture 系统预先提供的元器件库，而是在绘制电路图的过程中自动形成的缓存元器件库。在该库中存放的是在当前电路图绘制中已用过的各种元器件，包括曾经用过但已删去的那些元器件。如果是第一次使用 Capture 软件绘制电路图，在 Libraries 栏中只有 Design Cache 库，而且该库是空的，这时就需要按上面介绍的两种方法之一先添加必需的元器件库，或者也可以将所有库文件全选中从而将它们全都添加进来以方便搜索元器件。

2. 在电路图中放置电路元器件

放置电路元器件就是从系统的元器件库中调出所需的元器件，并按规定的方向放置在电路图中的指定位置。

(1) 调用一般元器件

一般元器件是指常用的电阻、电容、电感、二极管、晶体管等。现以放置电阻 R 为例来说明一般元器件的调用放置方法。

首先在图 4.3.6 “Place Part” 对话框中的元器件库 (Libraries) 列表中查找并选中所用元器件的库。现放置电阻元件，应选中 “ANALOG” 库，然后在 “Part” 栏内直接输入需调用的元件名 (或元件名的前几个字母，也可配合 “*” 和 “?” 两个通配符使用)，在这里输入 “R”，该元件名就会出现在元件列表中。在元件列表中选中元件名 “R”，在左下角的小窗口内会显示出电阻 R 的图形，直接双击元件名 “R” 或单击 “OK” 按钮，关闭 “Place Part” 对话框，系统进入放置元件模式，电阻 R 的图形会在所绘制的电路图中随光标移动。将其移动到合适位置，单击鼠标左键或空格键，就可以将电阻元件放置于此，如图 4.3.10 所示。之后窗口中仍有一个电阻图形随光标移动，表示仍可在其它位置继续放置电阻元件，每单击一次左键就定位放置一个电阻元件。若要退出元件放置模式，可按键盘上的 “Esc” 键直接退出，也可单击鼠标右键，在弹出的功能菜单中选择 “End Mode” 退

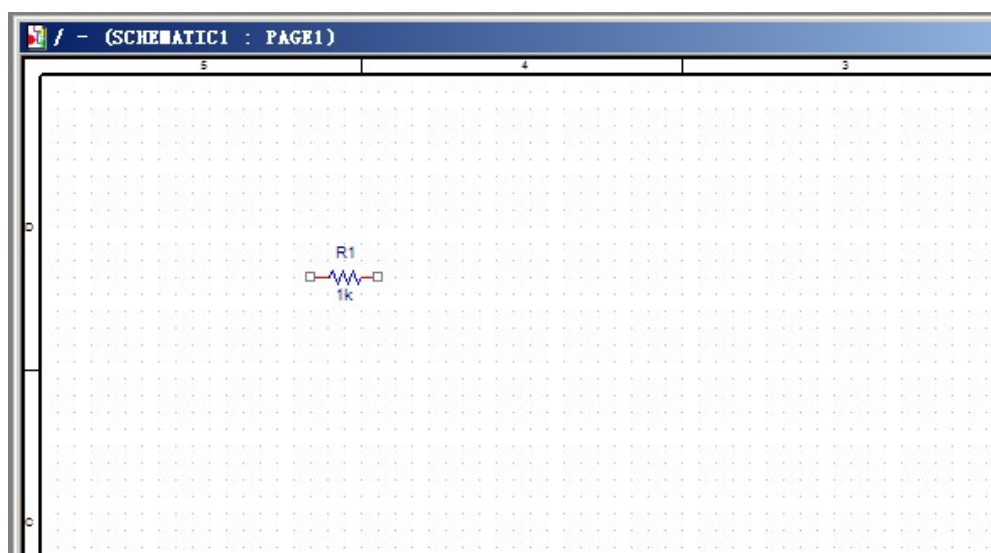


图 4.3.10 将电阻 R 放置于电路图中

出。

在图 4.3.6 中左下角小窗口内的电阻图形包括有三部分内容：一是电阻元件的电路符号；二是电阻元件名称的关键字 R 和以?表示的序号 (以后系统会自动为其统一生成在电路图中的序号，此序号以后可人为修改)；三是电阻值 1k (系统默认赋值，以后可人为修改)。

如果放置一个双极型晶体管，按以上的办法操作，选中 “BIPOLAR” 库中的晶体管 Q2N2217，小窗口会显示出如图 4.3.11 所示的图形。它也是由三部分组成的：双极型 NPN 晶体管的电路符号、双极型晶体管名称的关键字 Q 和序号、以及晶体管的型号 Q2N2217。这里的晶体管的型号与其 PSpice 模型参数是对应的。

在放置元件的过程中，可根据实际需要进行修改。如果处于元件放置模式下 (即选定元件后正在放置元件过程中)，可直接单击鼠标右键，弹出如图 4.3.12 所示的功能菜单。如果已退出元件放置模式，则应选中该元件，再单击鼠标右键调用功能菜单，如图 4.3.13 所示。选取菜单中不同的选项可对元件符号进行各种编辑，如镜像翻转、旋转、编辑元件属性、放大或缩小窗口显示比较以及剪切、复制、粘贴等操作。



图 4.3.11 晶体管的图形

(2) 调用电源和接地



图 4.3.12 处于元件放置模式下的右键功能菜单

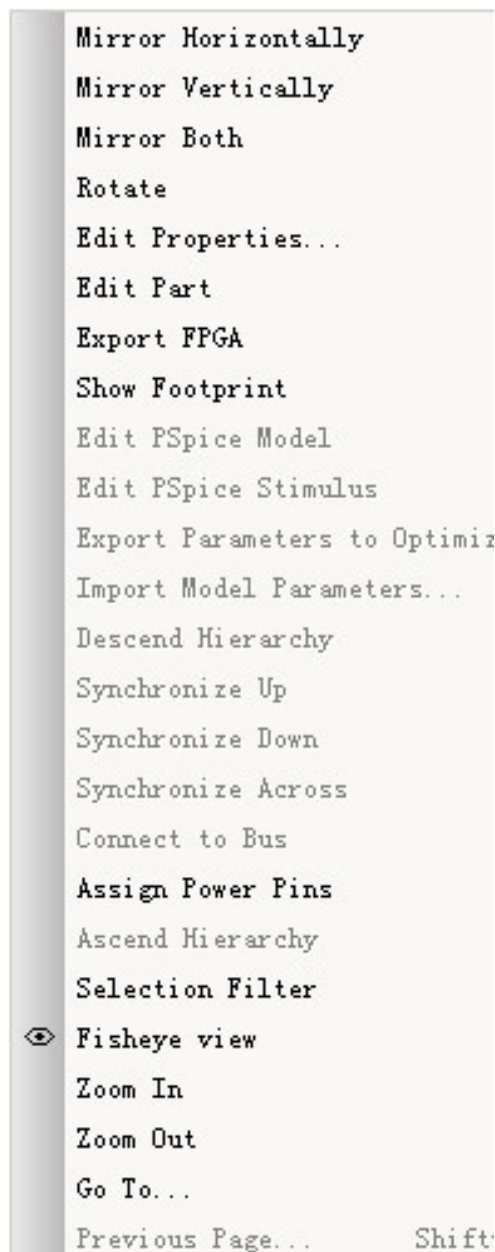


图 4.3.13 退出元件放置模式后的右键功能菜单

OrCAD Capture 元器件库中有两类电源。一类是 CAPSYM 库中提供的四种电源，此类电源在电路图中只表示该处要连接一种电源，本身没有数值，所以在仿真时不能简单用这类电源；另一类电源是由 SOURCE 库提供的，可通过设置赋值，直接用于电路的仿真。

接地的情况与电源类似，CAPSYM 库中提供的四种接地只代表一种电学上的“接地”，而只有 SOURCE 库中的接地（节点编号为 0）才代表电位为零的“地”。

在使用电源和接地时与前面所述一般元件不大一样，应注意以下几点。

① 模拟电路中的直流电压源（或电流源）、交流信号源和瞬态信号源以及数字电路中的输入信号源，均应选择主菜单的“Place/Part...”命令或单击绘图工具栏的按钮，打开“Place Part”对话框，再从 SOURCE 库中选用。

② 数字电路中所用的高、低电平信号，应选择主菜单的“Place/Power...”命令或单击绘图工具栏的按钮，从 SOURCE 库中选用\$D_HI 和\$D_LO 两种电源，如图 4.3.14 所示，操作方法与调用

一般元件相同。

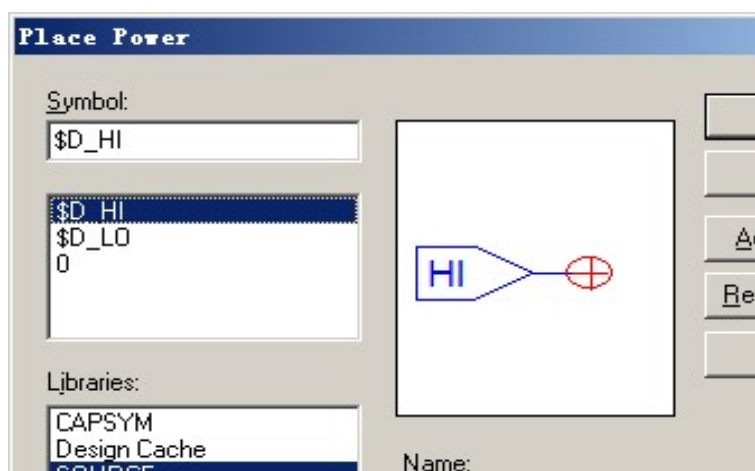


图 4.3.14 “Place Power”对话框

③ 在执行 PSpice 仿真分析时，电路中必须要有一个电位为零的接地点。这种零电位的接地，应由主菜单的“Place/Ground”命令或单击绘图工具栏的按钮，打开“Place Ground”对话框，从 SOURCE 库中选用编号为 0 的接地，如图 4.3.15 所示，操作方法与调用一般元件的方法相同。

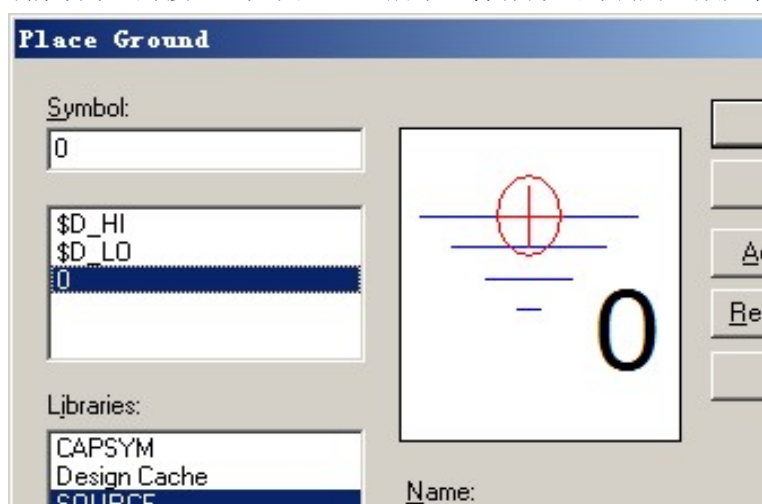


图 4.3.15 “Place Ground”对话框

④ 如果在电路图中使用了 CAPSYM 库中的电源或接地，则需在该电路图的旁边附加具有电平值的电源或接地，如图 4.3.16 所示，以说明电路图中电源或接地的电平值。

在电路图设计中，如果内建元器件库中没有合适的元器件，也可自行编辑现有的元器件特性或创建新的元器件模型，但由于元器件模型的创建过程比较复杂，难度也较大，一般可采用以下两种简单易行的解决办法。

一是通过编辑修改现有的元器件特性参数，设置创建自己的元器件的模型参数。例如，要设置创建一个 NPN 型晶体管的模型参数，可按下述方法进行操作。先在绘图页编辑窗口中放置一个同类型的 NPN 晶体管（如 Q2N2217）并选中它，然后单击鼠标右键弹出功能菜单栏，选择“Edit PSpice Model”选项，打开 PSpice 模型编辑器窗口，如图 4.3.17 所示，将 Q2N2217 的模型参数改为新晶体管的参数，再保存即可（文件后缀名为.lib）。然后，重新回到绘图页编辑窗口中，事先放置的元器件模型参数已改为新的参数，PSpice 将按新的模型参数进行仿真分析。

二是 OrCAD Capture 软件具有 Internet 查阅和调用元器件库的功能，需要时可以从相关网站下载新的元器件库。

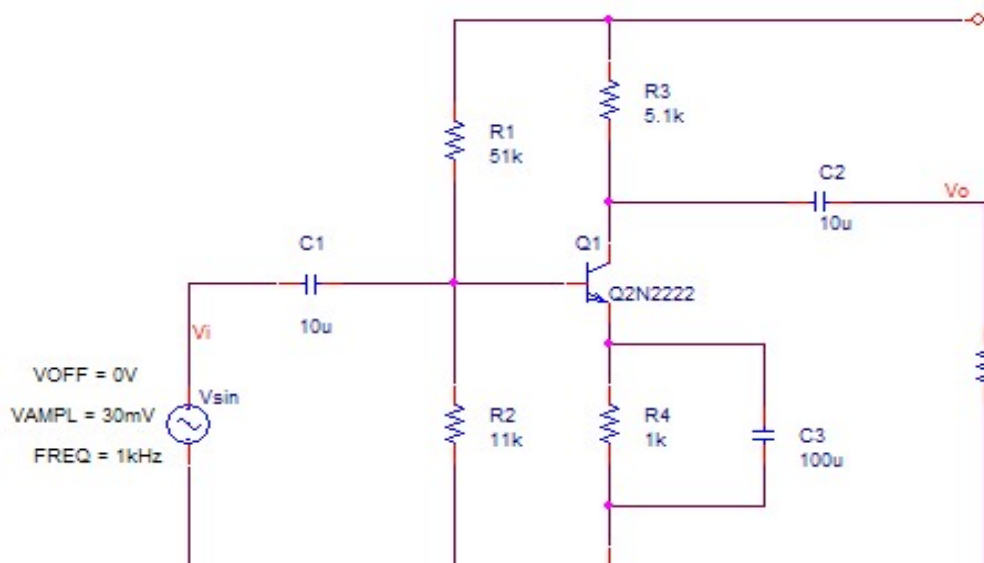


图 4.3.16 用附加电源 V1 说明 VCC 的电平值

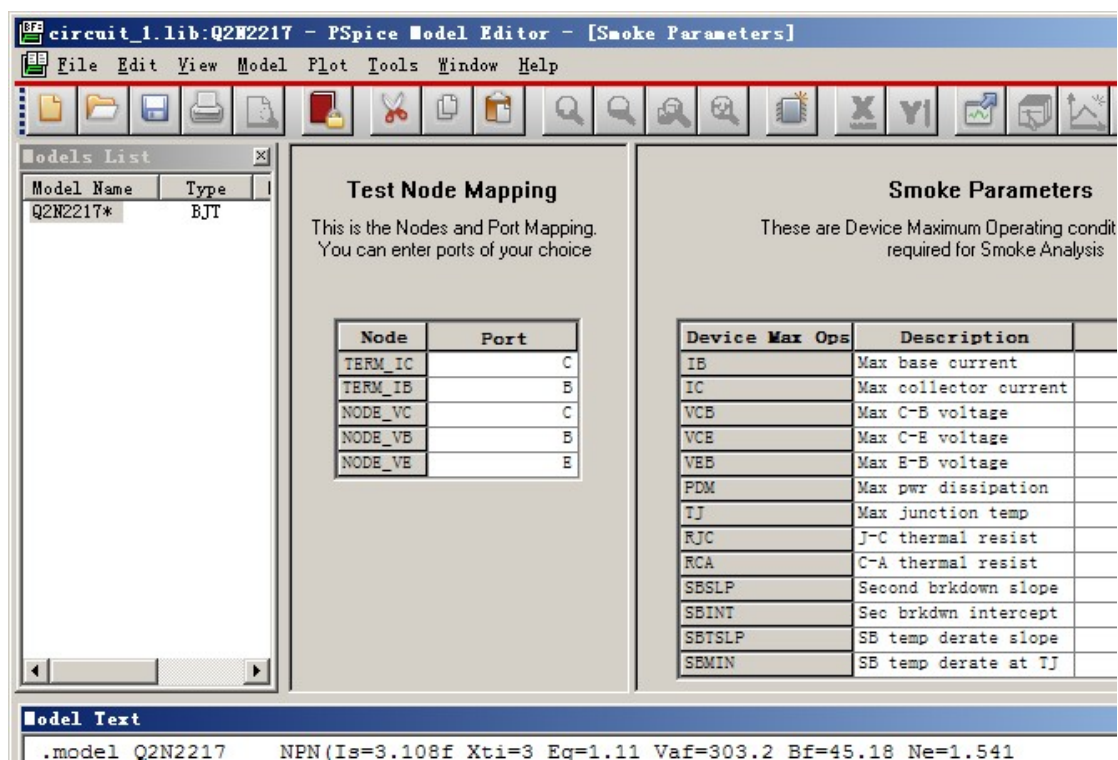


图 4.3.17 PSpice 模型编辑器窗口

3. 连接线路

在电路图中放置好各种元器件后，就可以进行元器件间的连线、放置连接点等操作了。

使用主菜单的“Place/Wire”命令或点击绘图工具栏的  按钮，或直接按键盘上的 w 键，即可进入连线状态，这时光标形状由箭头变为十字形。将光标移到连线的起始位置，单击鼠标左键（确认起始位置），移动鼠标光标，出现的预拉线随之移动，此时每单击一次鼠标左键就会放置一个转折点，光标在当前位置旋转 90°可继续下一段的连线。若需要任意角度的连线，要先按着键盘上的 Shift 键，再用鼠标光标控制预拉线的移动方向。若预拉线正好与另一段连线或元器件的任一引脚相连，单击鼠标左键就可结束其间的连线。单击鼠标右键调出功能菜单栏，选择“End Wire”选项，

可结束当前连线，但不退出连线状态，而按键盘上的 Esc 键才可退出连线状态，这时光标恢复为箭头状，进入选择状态。

在连线过程中还需注意，元器件的两端接点为空心小方块，连线的两端接点为实心小方块，两个元器件的接点或元器件接点与连线接点接触在一起，均表示彼此相连接。在两条线十字和丁字交叉点处加一圆形实心点，表示两条线是相连接的。如图 4.3.18 所示。若十字交叉点或丁字形相接点成为一段连线的端点，该位置就自动成为相接点。



图 4.3.18 元器件、连线接点

在两条线十字交叉点处若没有圆形实心点，则表明这两条线是不相连接的。欲使它们相连，需在连线的交叉点处放置圆心实心点。具体操作方法是：选择主菜单的“Place/Junction”命令或单击绘图工具栏的按钮，系统进入放置连接点的状态，箭头状的光标处出现实心圆点，移动光标至放置连接点处，单击鼠标左键，即在该位置放置一个圆形实心点。之后系统仍处于放置连接点状态，可继续在其它位置放置连接点，按键盘上的 Esc 键可退出放置状态，也可单击鼠标右键调出功能菜单栏，选择“End Mode”选项退出放置状态。

在放置连接点状态下，如果将带有实心圆点的光标移至某个连接点处，单击鼠标左键，则可删除该位置上原有的连接点。

4. 重新设置节点号或节点名称（即设置节点别名）

对于绘制好的电路图，OrCAD Capture 软件会为图中的每个节点自动确定一个节点编号，形式是以字母 N 开头，后面紧跟数字，如 N00237 之类（可在仿真分析结果.OUT 文件中查看到，.OUT 文件参见 4.3 节）。节点编号主要有以下两个作用。

- （1）通过节点编号来描述电路中各个元器件之间的连接关系，即确定电路的拓扑结构。
- （2）电路图中不同位置的两点，只要它们有相同的节点编号就表示实际上二者是相连在一起的同一点。

节点编号是由 Capture 软件自动赋予的，它不出现在所绘制的电路图中（而是出现在仿真结果.OUT 文件中），所以每个节点编号在电路图中是看不见的，在实际应用时很不方便。这时可以根据实际需要，人为地给某些节点重新起一个节点名，该节点名将直接显示在电路图中。例如，为电

路的输出节点起名为“vo”，方法是选择主菜单的“Place/Net Alias...”命令，或单击绘图工具栏的按钮，打开“Place Net Alias”对话框，如图 4.3.19 所示。在“Alias”文本框内输入 vo，对话框下

面三个栏目可用于设置该节点名的颜色、旋转放置方位和字体。完成各项设置后，单击“OK”按钮，这时光标的箭头处出现带有该节点名的小矩形框，将光标移动到选定位置，单击鼠标左键即可。图 4.3.16 中的输入、输出节点上的 Vi、Vo 就是这样放置的。按键盘上的 Esc 键可退出放置状态，也可单击鼠标右键调出功能菜单，选择“End Mode”选项退出放置状态。

5. 电路图的编辑修改

对所绘制的电路图进行编辑修改，包括对电路图的移动、删除、复制、修改图中元器件属性参数、增加必要的附加说明（如文字或图形）等操作。

对被编辑修改的对象（如电源、一般元件、接地、连线等）进行移动、删除、复制、剪切、粘贴等操作方法与 Windows

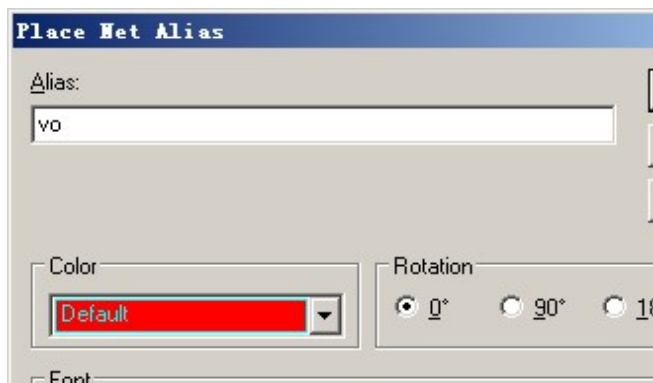


图 4.3.19 “Place Net Alias”对话框

系统中一般软件的操作方法类似。而绘图工具栏各图标按钮的使用也与 Windows 中的画图板等绘图工具软件的使用方法相同，此处不再赘述。这里只着重介绍元器件属性参数的编辑修改方法。

(1) 同时编辑修改元器件的各种属性参数

首先选中需修改的对象（整体上被红色虚线所框住才算是选中了），再执行主菜单的“Edit /Properties...”命令，或单击鼠标右键调出功能菜单栏，选择“Edit Properties...”选项，或者双击被选中的对象，打开属性参数编辑器（Property Editor）窗口，如图 4.3.20 所示，图中以电阻 R 为例。

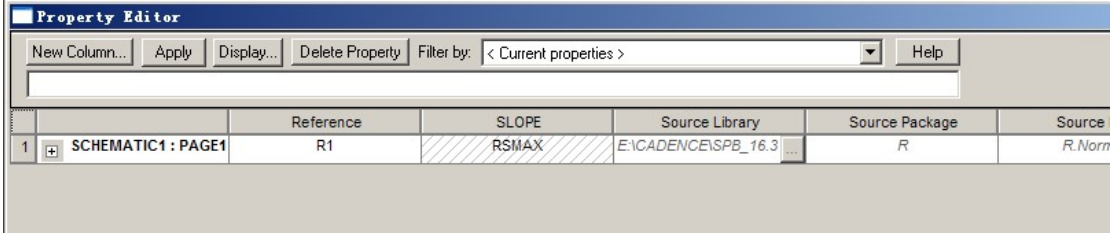


图 4.3.20 属性参数编辑器窗口

在属性参数编辑器窗口中，不仅可以同时编辑修改多个属性参数，如将“Reference”栏下的 R1 改为 R2，后面的“Value”栏下的 1k 改为 2k 等，还可为选中的对象新增一个用户自定义的参数栏（用“New Column...”按钮），也可设置属性参数的显示方式（用“Display...”按钮），以及针对不同软件的需要而有选择性地显示参数（用“Filter by:”下拉列表框）等。

(2) 单项修改元器件值或元器件序号

如将电阻值由 1k 改为 10k，首先选中待修改的值 1k（注意只选中该值本身而不是选中整个电阻图形），直接双击鼠标左键，或者单击鼠标右键调出功能菜单，选择“Edit Properties...”选项，这时可打开“Display Properties”对话框，如图 4.3.21 所示，将“Value”栏内的电阻值改为 10k 即可。同时还可修改该电阻值在电路图中的显示形式（Display Format）、字体（Font）、颜色（Color）以及旋转放置方位（Rotation）。修改完毕后单击“OK”按钮确认。

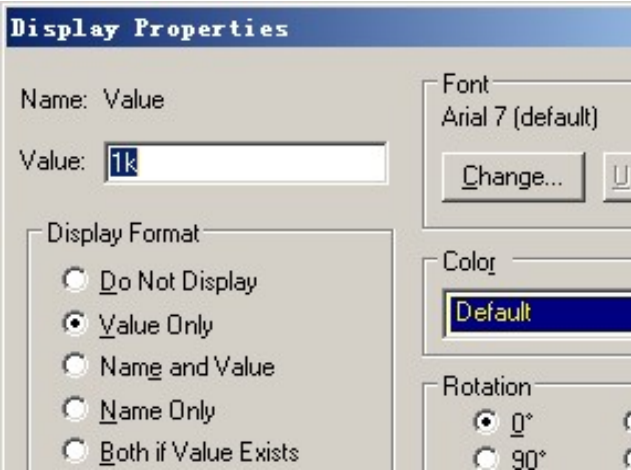


图 4.3.21 元器件值的“Display Properties”对话框

若需修改元器件序号，如电阻 R1 改为 R2，则应选中序号“R1”，采用如上所述的类似方法，调出如图 4.3.22 所示的“Display Properties”对话框来进行修改。

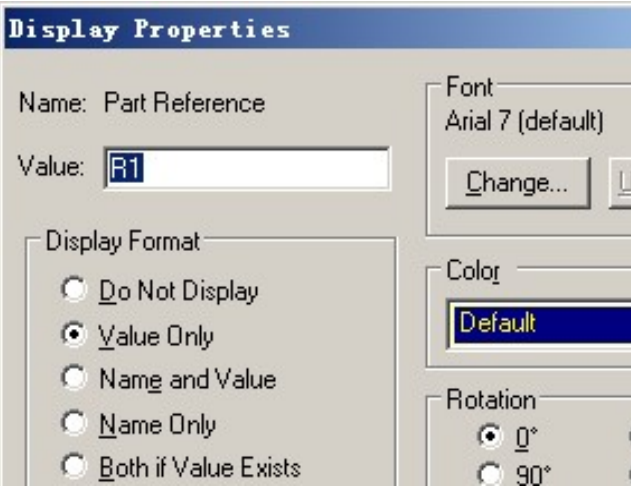


图 4.3.22 元器件序号的“Display Properties”对话框

另外，对于已选中的元器件值或元器件序号，可用鼠标拖动以改变它们在电路图中的位置。

6. 电路图的保存、打开及打印

(1) 电路图的保存

执行主菜单的“File/Save”命令，或单击工具栏按钮，或使用键盘快捷键 Ctrl+S 均可保存电路图。

(2) 打开电路图

执行主菜单的“File/Open/ Project...”命

令，或单击工具栏按钮，打开“Open Project”对话框，选中项目文件（后缀为.opj），双击之或单击“打开”按钮即可将其调出来使用，之前已绘制好的电路图将会呈现在绘图页编辑窗口中。

（3）打印电路图

关于电路图的打印和打印预览的操作方法与 Windows 系统中一般软件的操作方法类似，可使用“File”主菜单下面的“Print”相关命令或单击工具栏按钮，这里不再赘述。

4.2 在 Capture 中设置分析方法

在执行仿真分析之前，需要设置仿真分析的类型（如直流工作点分析、瞬态分析等），并设置分析的参数。

OrCAD PSpice A/D 将直流工作点分析、直流扫描分析、交流小信号分析和瞬态分析定为基本分析类型，其它类型的分析（如温度特性分析、参数扫描分析、蒙特卡罗分析等）可以与上述的基本分析类型配合起来使用。一种基本分析类型加上其它分析类型称为一个分析类型组，该组的名称一般由其基本分析类型来确定。PSpice 程序根据分析类型组来确定分析类型及其参数设置，其结果存放在以.sim 为后缀名的文件中。

直流工作点分析（Analysis type 选择 Bias Point）是在电容开路、电感短路的情况下，计算电路的静态工作点。

直流扫描分析（Analysis type 选择 DC Sweep）是计算某一个（或两个）独立源或其它电路元器件参数（如温度或电阻阻值参数等）在一定范围内步进或按列表取值变化时，电路直流输出变量随之变化的特性。

交流小信号分析（Analysis type 选择 AC Sweep/Noise）（也称交流扫描分析）是一种线性频域分析，它首先计算电路的直流工作点，以确定电路中非线性器件的线性化模型参数，然后在用户指定的频率范围内，对该线性化的电路进行频率扫描分析。其主要功能是计算电路的频响特性（包括幅频特性和相频特性），以及电路的输入阻抗和输出阻抗等。

瞬态分析（Analysis type 选择 Time Domain (Transient)）是一种非线性时域分析，它是在给定激励信号作用下，计算电路输出端的时域响应特性。瞬态分析结果自动存入以.dat 为扩展名的数据文件中，在 PSpice A/D 的 Probe 窗口中可以显示其输出波形。在 PSpice 中，用于瞬态分析的激励信号源共有五种，分别是：脉冲源、正弦源、指数源、分段线性源和调频源（注：在 Capture 中，它们均位于 SOURCE.OLB 库里，分别名为 VPULSE、VSIN、VEXP、VPWL 和 VSFFM）。

在 Capture 中执行主菜单的“PSpice/New Simulation Profile”命令，或单击 PSpice 工具栏按钮, 即可打开“New Simulation”对话框，如图 4.3.23 所示。

在“Name”栏内输入分析类型组的名称（如进行交流小信号分析，就输入 AC），在“Inherit From:”栏选取“none”（因第一次进行仿真分析需人工设置分析参数，而没有以前用过的分析参数可以继承），再单击“Create”按钮，在弹出的“Cadence Product Choices”选择框中选择“PSpice A/D”后点 OK 按钮，这时将打开仿真分析类型和参数设置对话框，如图 4.3.24 所示。

在分析类型和参数设置对话框中，通常需要进行三项设置。

- （1）在“Analysis type:”栏内选择基本分析类型（即四种基本分析类型中的一种）。
- （2）在“Options”栏内选择与之配合使用的其它分析类型。

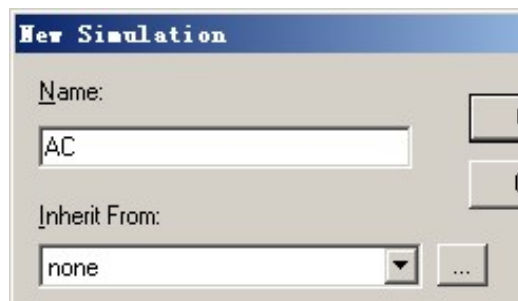


图 4.3.23 “New Simulation”对话框

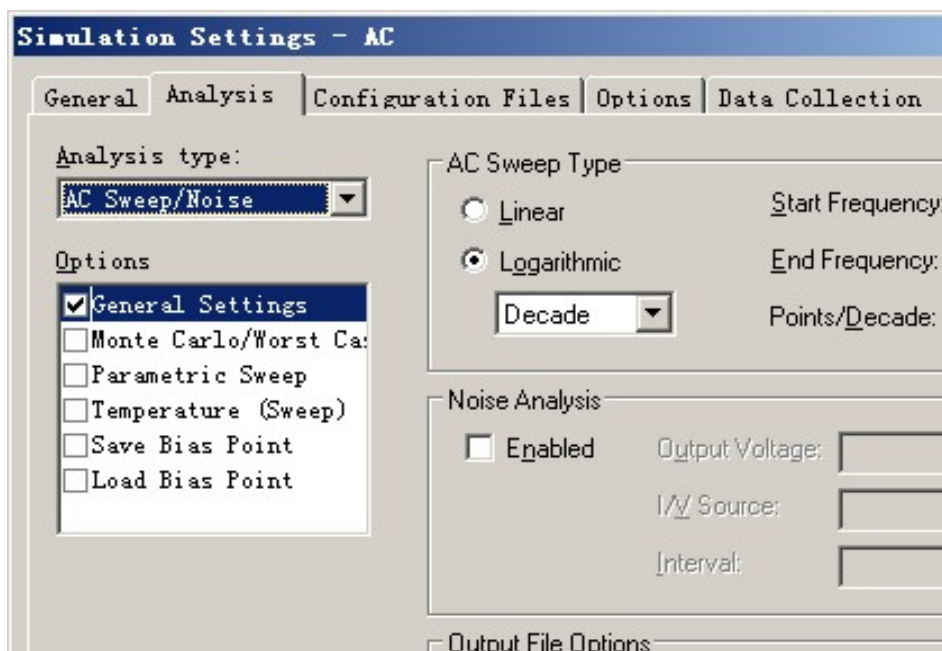


图 4.3.24 仿真分析类型和分析参数设置对话框

(3) 设置分析参数，例如进行交流小信号分析，需设置频率扫描的类型、起始频率、终止频率以及分析点数等。不同的分析类型需要设置的参数也不同。

完成上述设置后，单击“确定”按钮，将其保存。

如果需要修改分析类型和参数设置，可选择主菜单的“PSpice/Edit Simulation Profile”命令，或单击 PSpice 工具栏按钮，再次打开如图 4.3.24 所示的对话框，它显示的是以前设置过的分析参数，用户可根据最新的实际需要进行修改。

4.3 用 PSpice 执行仿真分析

在 Capture 中执行主菜单的“PSpice/Run”命令，或单击 PSpice 工具栏按钮，即开始进行电路仿真分析。这时将会出现如图 4.3.25 所示的 PSpice 窗口（注：这里为瞬态分析波形图），它有四个子窗口：上面的子窗口为波形显示窗口（Probe 窗口），显示分析得到的波形或曲线；左下方的子窗口为输出窗口（Output Window），显示目前仿真操作的进度等有关文本信息；下方中部的子窗口为仿真状态窗口（Simulation Status Window），显示分析参数设置、电路中元器件列表等信息；右下方的子窗口为游标信息窗口（Cursor Window），显示可沿波形移动的游标（Cursor）的相关数值信息。后三个子窗口是否出现取决于主菜单“View”命令中的三个相应子命令选项。

仿真分析的结果分别存放于以.DAT 和.OUT 为扩展名的文件中。其中，.DAT 文件是绘图数据文件，供 Probe 绘图时调用；.OUT 文件是一个文本文件，内含电路拓扑结构描述、元器件清单、仿真分析的参数设置、仿真过程中产生的出错信息等，可通过主菜单“View”中“Output File”子命令来浏览其内容。

PSpice 窗口共有九项主菜单，每项主菜单下的子菜单选项及其功能分别列于表 4.3.15~表 4.3.23 中。常用的 Probe 和 Cursor 工具栏的图标按钮共有 25 个，其功能列于表 4.3.24 中。

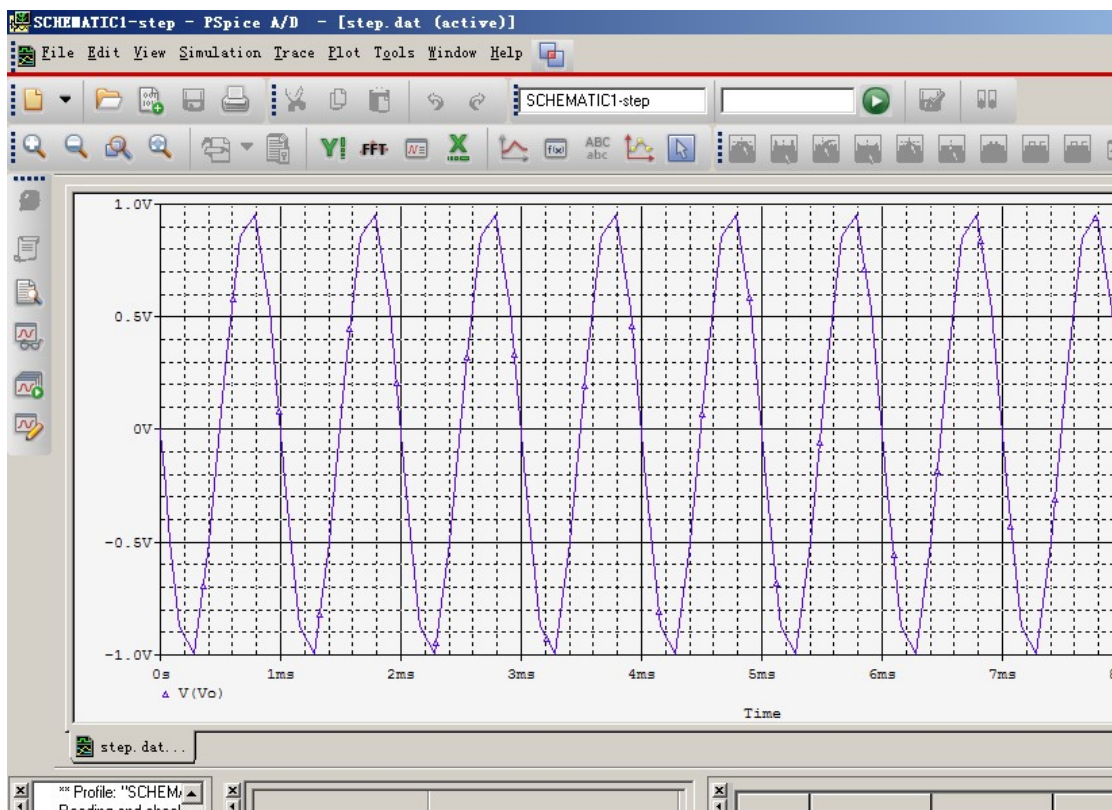


图 4.3.25 PSpice 窗口

表 4.3.15 “File” 主菜单

New	新建仿真分析类型组或文本文件
Open... Ctr	打开 Probe 数据文件 (.dat) 等
Append Waveform (.DAT)...	打开另一数据文件 (.dat) 将其添加到当前波形数据中
Close	关闭 Probe 窗口
Open Simulation...	打开电路仿真分析进程
Close Simulation	关闭电路仿真分析进程
...	
Save Ctr	将窗口中的文本数据存入原文件
Save As...	将窗口中的文本数据另存为一文件
Export	导出选中的数据成另一些文件形式
Import	导入文本文件
Open File Location	打开当前仿真所在文件夹位置
Page Setup...	打印波形的页面设置
Printer Setup...	打印机设置
Print Preview	打印预览
Print... Ctr	打印
Log Commands...	将各种用于显示和处理信号波形的命令存入以.cmd 为扩展名的文件
	运行以.cmd 为扩展名的命令文件
	PSpice 程序最近进行的仿真分析
	PSpice 程序最近处理过的文件名
	退出 PSpice 窗口

表 4.3.16 “Edit” 主菜单

	Undo	Alt+Backsp	还原
	Redo		撤消还原
			剪切
	Cut	Shift+Del	复制
	Copy	Ctrl	粘贴
	Paste	Ctrl	删除
	Delete	Ctrl	全选
	Select All	Ctrl	查找窗口中的文本数据
			查找下一个
	Find...	Ctrl	替换
	Find Next		光标移至指定行
	Replace...	Ctrl	插入文件
	Goto Line...	Ctrl	切换行号显示
	Insert File...		切换对窗口中某些文本数据加注书签与否
			下一个书签
			前一个书签
			清除书签
	Toggle Line Number Display		修改 Probe 窗口中已显示的信号波形及由字符表示的标注符等对象
	Toggle Bookmark		

表 4.3.17 “View” 主菜单

	Zoom	确定 Probe 窗口中波形显示缩放等方式
	Measurement Results	切换显示测量结果窗口
	Circuit File	在 Probe 窗口中显示电路描述文件
	Output File	在 Probe 窗口中显示仿真结果输出文件
	Simulation Results	在 Probe 窗口中显示 .dat 波形描述文件
	Simulation Messages	在 Probe 窗口中显示仿真产生的信息文件
		设置仿真顺序和查询仿真进程
	Simulation Queue	切换显示输出窗口
☒	Output Window	切换显示光标窗口
☒	Cursor Window	切换显示仿真状态窗口
☒	Simulation Status Window	确定窗口中是否显示工具栏按钮
		确定窗口中是否显示状态栏
		确定 Probe 窗口下方是否显示工作窗口列表栏
		切换标准和替换显示模式
☒	Status Bar	使 Probe 窗口位于其它窗口的最上面
☒	Workbook Mode	大数据文件模式设置
		载入大数据文件的下一部分

表 4.3.18 “Simulation” 主菜单

	Run SCHEMATIC1-step	对当前的电路执行仿真分析
	Pause	暂停仿真分析
	Save Simulation State	保存仿真状态
	Stop	停止仿真分析
	Edit Profile...	编辑修改仿真分析类型及参数 编辑修改运行时设置

表 4.3.19 “Trace” 主菜单

	Add Trace... In:	在 Probe 窗口中增加一条或多条波形曲线
	Delete All Traces Ctrl+De	删除 Probe 窗口中显示的所有波形
	Undelete Traces Ctl	恢复刚被删除的波形
	Fourier	对显示的波形进行傅里叶变换
	Performance Analysis...	启动电路性能分析过程
	Cursor	在 Probe 窗口中启动游标功能
	Macros...	编辑修改宏命令 编辑修改或计算测量函数表达式 报告计算分析出的测量函数表达式值

表 4.3.20 “Plot” 主菜单

	Axis Settings...	设置 X 和 Y 坐标轴的范围及刻度等属性
	Add Y Axis Ctr	增加 Y 坐标轴
	Delete Y Axis Ctrl+Shif	删除选中的 Y 坐标轴
	Add Plot to Window	在同一个 Probe 窗口中增加一个波形显示区
	Delete Plot	删除选中的波形显示区
	Unsyncronize X Axis	使新增的波形显示区采用独立的 X 轴刻度
	Digital Size...	设置数字信号波形名称的长度等
	Label	为窗口中显示的波形添加字符、符号或图形
	AC	这三条子命令用来选择显示 AC 分析、DC 分析或 TRAN 分析的波形和曲线

表 4.3.21 “Tools” 主菜单

	Customize...	根据用户的要求设置工具栏按钮及快捷键等
	Options	对 Probe 运行中的某些状态参数进行设置

表 4.3.22 “Window” 主菜单

New Window	在 Probe 窗口中打开一个新的波形显示窗口
Close	关闭当前选中的波形显示窗口
Close All	关闭所有的波形显示窗口
Cascade	将多个窗口以层叠方式排列
Tile Horizontally	将多个窗口上下排列
Tile Vertically	将多个窗口左右排列
Title..	修改选中的波形显示窗口的标题名称
Display Control...	对显示波形进行保存、删除、调入、恢复等处理
	将显示的波形复制到剪贴板
	目前已打开的波形显示窗口的名称和编号

表 4.3.23 “Help” 主菜单

PSpice A/D Help	PSpice A/D 软件的在线帮助
What's New	新增功能及改进说明
Known Problems and Solutions	已知问题及解决办法
Web Resources	相关 Web 资源
Documentation	相关在线文档
	PSpice A/D 软件版本说明及注册登记信息

表 4.3.24 Probe 和 Cursor 工具栏图标按钮的功能

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1	将波形放大													14	切换在波形曲线上标识实际数据点与否									
2	将波形缩小													15	切换游标显示与否									
3	将选中区域的波形放大，并充满整个显示区													16	使游标沿波形曲线移至下一波峰位置									
4	使整个波形都能在显示区显示出来													17	使游标沿波形曲线移至下一波谷位置									
5	载入大数据文件的下一部分													18	使游标沿波形曲线移至下一个斜率极大值位置									
6	切换大数据文件载入模式													19	使游标移至波形曲线的最小值位置									
7	切换 Y 轴坐标刻度类型													20	使游标移至波形曲线的最大值位置									
8	对显示的波形进行傅里叶变换													21	使游标从当前位置沿波形曲线移至下一仿真数据点									
9	直接切换电路性能分析（不用向导）													22	按 Probe 规定格式编制游标搜索命令									
10	切换 X 轴坐标刻度类型													23	游标从当前位置移至下一数字跳变点									
11	在 Probe 窗口中增加波形曲线													24	游标从当前位置移至上一数字跳变点									
12	报告计算分析出的测量函数表达式值													25	给波形曲线上当前游标位置加注数据点坐标数值									
13	为 Probe 窗口中显示的波形添加文本																							

要注意的是，如果仿真分析时发现电路图存在错误或仿真分析参数设置不当等情况，则屏幕上会显示出错信息。此时应仔细分析出错信息，找到错误之处，修改后再重新进行仿真操作。

4.4 在 PSpice 中查看分析结果

在图 4.3.25 所示的 PSpice 的 Probe 窗口中，会以波形、曲线形式显示出分析结果。而在 PSpice 中执行“View/Output File”菜单命令，可以打开.OUT 文件这一文本型输出文件，供用户浏览、分析和编辑，仿真失败时也会将有关的出错信息存放在.OUT 文件中。

在电路分析过程中，通常习惯以波形、曲线形式显示电路的性能，所以常用 Probe 程序输出仿真结果。Probe 其实就是 PSpice 的一个图形后处理程序，它可将仿真结果快速而精确地以图形的形式显示出来，类似于实验室中的示波器、频率特性测试仪、频谱分析仪等测量仪器。使用 Probe 程序需要注意以下几个问题。

(1) Probe 窗口中数值的比例因子

Probe 窗口中数值的比例因子与 PSpice 的电路描述语言源程序（即.CIR 文件）及 Capture 软件中略有不同，使用中应注意。Probe 中用小写字母 m 表示 10^{-3} ，用大写字母 M 或 MEG 表示 10^6 ；而在 PSpice 源程序和 Capture 软件中，m 和 M 均表示 10^{-3} ，必须用 MEG 表示 10^6 。

(2) Probe 的常用函数

Probe 程序不但能够显示波形和曲线，而且还可以对这些信号的波形和曲线进行运算（加、减、乘、除及其它函数运算），并将结果波形和曲线显示出来。

表 4.3.25 列出了 Probe 程序常用的运算函数，其中一些函数是 PSpice 仿真程序没有的。

表 4.3.25 Probe 程序常用的运算函数

运算函数	含 义	PSpice 是否采用
ABS(x)	取 x 的绝对值	是
SGN(x)	x>0 为+1, x=0 为 0, x<0 为-1	是
SQRT(x)	取 x 的平方根, 即 $x^{1/2}$	是
EXP(x)	取 x 的指数值, 即 e^x	是
LOG(x)	取 x 的自然对数值, 即 $\ln(x)$	是
LOG10(x)	取 x 的常用对数值, 即 $\lg(x)$	是
M(x)	取 x 的模	是
P(x)	取 x 的相位值 (单位为度)	是
R(x)	取 x 的实部	是
IMG(x)	取 x 的虚部	是
G(x)	取 x 的群延迟值 (单位为秒)	否
PWR(x,y)	取 x 的 y 次方值	是
SIN(x)	取 x 的正弦函数值	是
COS(x)	取 x 的余弦函数值	是
TAN(x)	取 x 的正切函数值	是
ARCTAN(x)	取 x 的反正切函数值	是
d(x)	取 x 的微分值	否
s(x)	取 x 的积分值	否
AVG(x)	在 x 轴范围取 x 的平均值	否
AVGX(x,d)	在 x 轴上从(x-d)到(x)范围取 x 的平均值	否
RMS(x)	取 x 的均方根值	否
DB(x)	取 x 的分贝值	否
MIN(x)	取 x 的实部最小值	否
MAX(x)	取 x 的实部最大值	否

(3) 输出变量

在 Probe 窗口中显示仿真结果，需要指定输出变量。PSpice 的输出变量种类繁多，表 4.3.26 列出了直流扫描和瞬态分析的输出变量的格式和意义。

表 4.3.26 直流扫描和瞬态分析的输出变量

格 式	意 义	举 例
V(N)	节点 N 的电位	V(12)
V(N+,N-)	节点 N+和 N-之间的电压	V(3,5)
V(NAME)	名为 NAME 的两端元器件上的电压	V(RL)
VX(NAME)	名为 NAME 的元器件 X 端的电位	VB(Q1)
VXY(NAME)	名为 NAME 的元器件 X 和 Y 两端间的电压	VBE(Q2)
I(NAME)	通过名为 NAME 的元器件的电流	I(D1)
IX(NAME)	进入名为 NAME 的元器件 X 端的电流	IC(Q3)
IZ(NAME)	流经名为 NAME 的传输线 Z 端的电流	IA(T2)

第5章 模拟电路分析示例

5.1 RLC 阻尼振荡电路性能分析

一个阻尼振荡电路如图 4.4.1 所示，其衰减系数 $\zeta = 0.2$ ，电阻 $R_1 = 2\zeta \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 4\Omega$ ，计算当输入电压源 V_i 为

分段线性源（0s 时 0V，1 μ s 时 1V，16ms 时 1V）时电容 C_1 的振荡波形。然后分别计算在保持电感 L_1 和电容 C_1 不变的情况下改变 R_1 的值使衰减系数 $\zeta=1$ 及 $\zeta>1$ 时的振荡波形，分析其性能。

解：首先在 OrCAD Capture 中绘制该电路图，如图 4.4.2 所示。输入信号源 V_i 从 SOURCE.OLB 库中取分段线性源 VPWL，将其命名为 V1，双击该信号源图标进入属性设计界面，根据要求的“0s 时 0V，1 μ s 时 1V，16ms 时 1V”（相当于一个阶跃电压），将其属性设置为：T1=0、T2=1 μ s、T3=16ms、V1=0、V2=1V、V3=1V，其余属性不变。

现在要观察振荡波形，故需进行瞬态分析，瞬态分析的参数设置如图 4.4.3 所示。主要设置仿真终止时间（Run to time）为 16ms，最大仿真步长（Maximum step size）为 0.01ms。

在 Capture 中选择菜单 PSpice 下的 Run 命令，就会弹出 PSpice A/D 窗口并开始进行瞬态分析，然后在其中的 Probe 窗口中即可观察输出电压等的波形。通过在 PSpice A/D 中选择菜单 Trace 下的 Add Trace... 命令，或是直接点击绘图工具栏中的 Add Trace 图标按钮，打开 Add

Traces 对话框，在下方的 Trace Expression 栏内直接输入或是从左侧列表框中找到 V(Vout)，点“OK”按钮确定后，即可显示出电容 C_1 的振荡波形，如图 4.4.4 所示。可见这是一个阻尼振荡波形或者叫欠阻尼振荡波形。

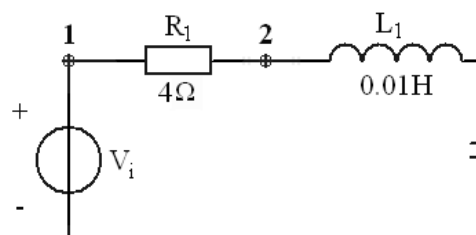


图 4.4.1 RLC 阻尼振荡电路

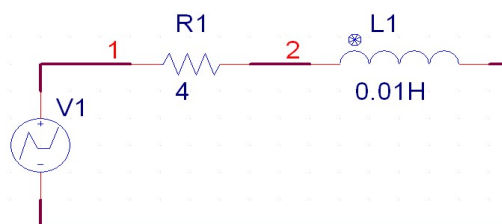


图 4.4.2 Capture 中的 RLC 阻尼振荡电路图

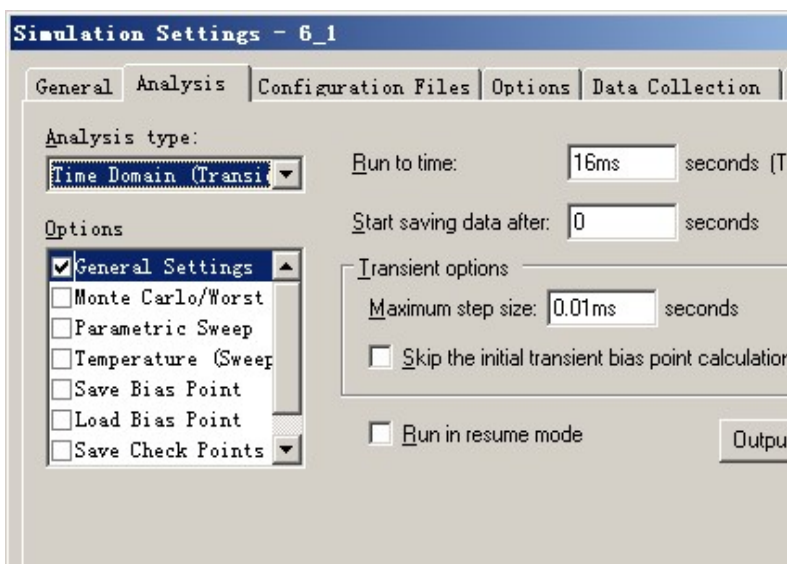


图 4.4.3 瞬态分析参数设置

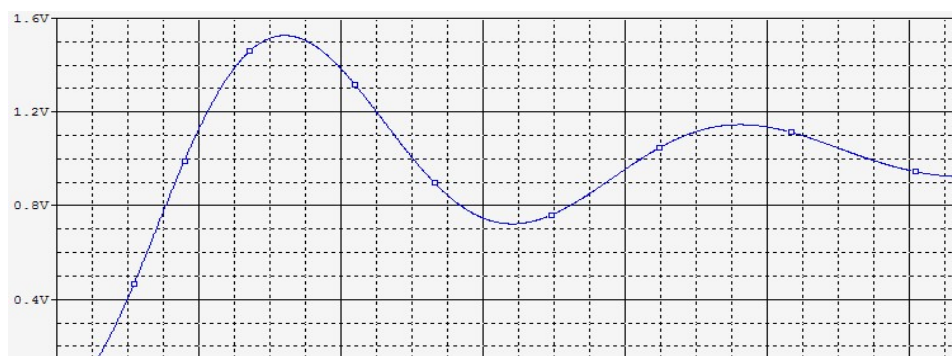


图 4.4.4 阻尼振荡波形

我们知道，在 RLC 电路中当 R 、 L 和 C 三值确定后，该电路的衰减系数 ξ 也就确定下来了，有 $\xi = \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \frac{R}{2}$ 。衰减系数越大，则阻尼振荡衰减就越快；衰减系数越小，阻尼振荡衰减就越慢。

当 $\xi < 1$ 时，电路处于欠阻尼状态，呈现衰减振荡，最后停止；而当 $\xi = 1$ 时，该电路处于临界阻尼状态；当 $\xi > 1$ 时，该电路处于过阻尼状态，根本振荡不起来（即波形不到一个完整周期）。

在 RLC 电路中保持 L 和 C 不变的情况下，如果修改 R 的值，使 $\xi < 1$ ，则会像上面 $\xi = 0.2$ 的情况那样将出现欠阻尼的衰减振荡波形；使 $\xi = 1$ ，则出现临界阻尼状态的波形；使 $\xi > 1$ ，则出现过阻尼状态，振荡不起来。

下面分别来看一下临界阻尼和过阻尼这两种情况的波形。

(1) $R=20\Omega$ 时， $\xi=1$ ，其临界阻尼振荡波形如图 4.4.5 所示。

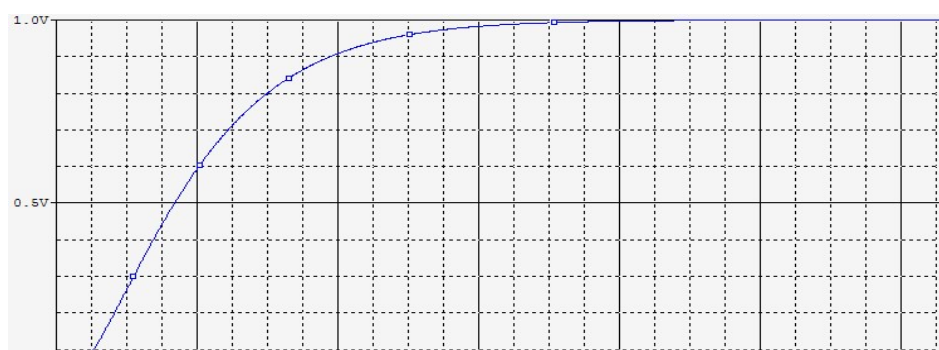


图 4.4.5 临界阻尼振荡波形

(2) $R=100\Omega$ 时， $\xi=5>1$ ，其过阻尼振荡波形如图 4.4.6 所示。

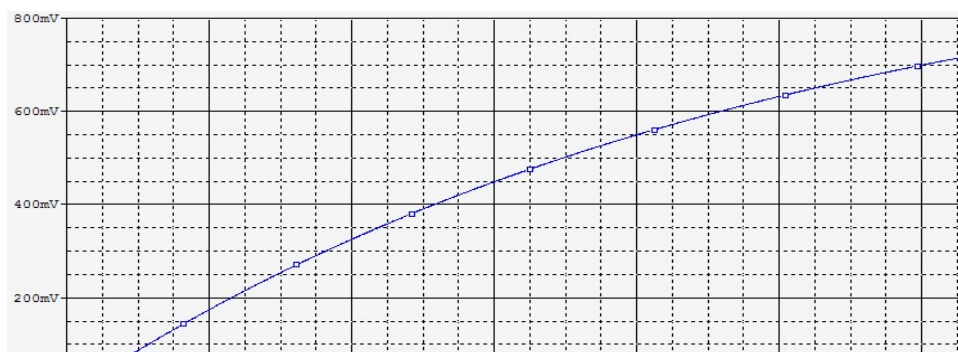


图 4.4.6 过阻尼振荡波形

5.2 单管放大电路性能分析

单管放大器电路的原理图如图 4.4.7 所示。设晶体管型号为 Q2N2222。要求：

- 1) 调节偏置电压 V_{BB} 使晶体管的静态电流 $I_{CQ} \approx 1\text{mA}$ ；
- 2) 输入信号为 $V_s = V_{SM} \sin(2\pi \times 1000t)\text{mV}$ ，求当 V_{SM} 为 20mV 时的输出电压 V_o 的波形。

解：在 OrCAD Capture 中绘制该电路图。其中 V_s 为正弦电压源 VSIN（其参数待后面设置），而 V_{BB} 和 V_{CC} 均为直流电压源 VDC。

1) 在 Capture 中，将电路图 4.4.7 中的输入信号源取正弦信号源 VSIN，其主要参数设置为：DC=0（其余参数保持不变）。分析“调节偏置电压 V_{BB} 使晶体管的静态电流 $I_{CQ} \approx 1\text{mA}$ ”这一要求，其实就是需要对直流电压源 V_{BB} 进行直流扫描分析。

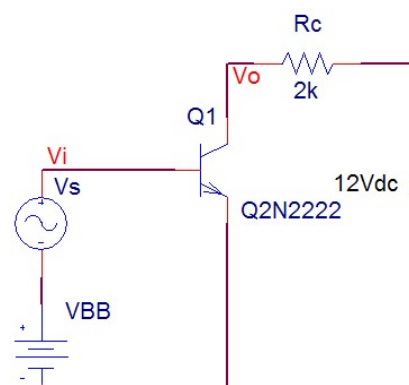


图 4.4.7 单管放大器电路

在 Capture 中选择菜单 PSpice 下的 New Simulation Profile 命令，或是直接点击 PSpice 工具栏上的 New Simulation Profile 图标按钮，打开“New Simulation”对话框，在“Name”栏内输入分析类型组的名称“DC”，在“Inherit From”栏内选择“none”，然后单击“Create”按钮，打开如图 4.4.8 所示的“Simulation Settings - DC”对话框。

在“Analysis type”栏内选择“DC Sweep”，在“Options”栏内选定默认项“Primary Sweep”。其右侧为扫描参数设置的栏目选项。

(1)“Sweep variable”栏目：可选择扫描变量，有 Voltage source（电压源）、Current source（电流源）、Global parameter（全局参数）、Model parameter（模型参数）及 Temperature（温度）。扫描变量的右侧输入名称，其中“Name”栏内输入扫描变量名称，“Model Type”栏内输入模型类型，“Model Name”栏内输入模型名称，“Parameter Name”栏内输入模型参数名称，后三个输入项一般用于模型参数的扫描。

(2)“Sweep type”栏目：可设置扫描类型，分别为 Linear（线性）、Logarithmic（对数）、Value list（列表）。若选择 Linear 方式，需在右侧的 Start value、End value 和 Increment 栏内分别设置扫描变量的起始值、终止值和步长；若选择 Logarithmic 方式，需在右侧的下拉列表中选择 Octave（倍频程）或 Decade（十倍频程）；若选择 Value list 方式时，则在其右侧栏内直接输入扫描变量的所有取值。

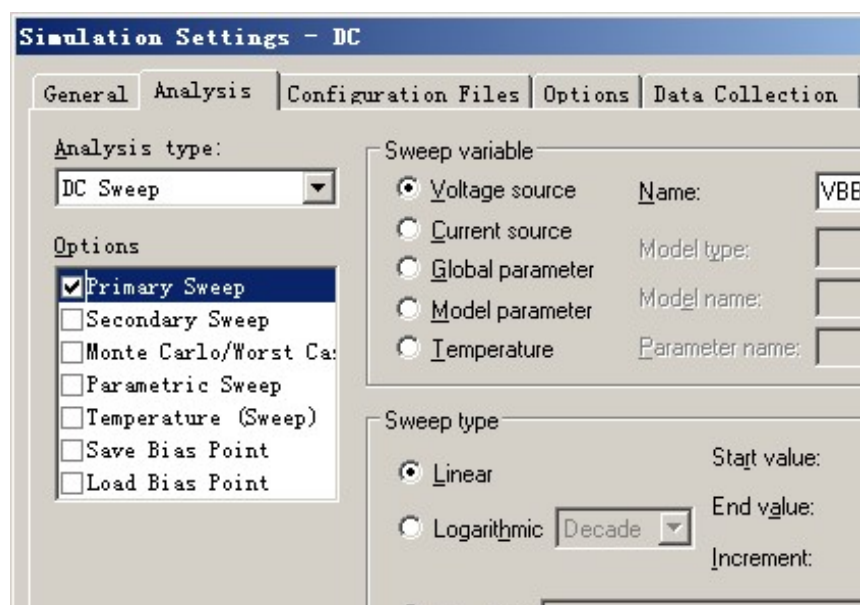


图 4.4.8 直流扫描设置

因为在本例中需对 V_{BB} 进行扫描，所以 Sweep variable 选择 Voltage source，名称为 VBB；Sweep type 选择 Linear 方式，Start value 为 0，End value 为 2V，Increment 为 0.001V（注：各设置值的单位默认为 V），如图 4.4.8 所示。

分析参数设置完毕，单击“确定”按钮存档。然后执行仿真分析，使用主菜单 PSpice 下的 Run 命令或单击 PSpice 工具栏的 Run 按钮来启动 PSpice A/D 程序，开始仿真。

仿真分析完成后，在屏幕上会显示

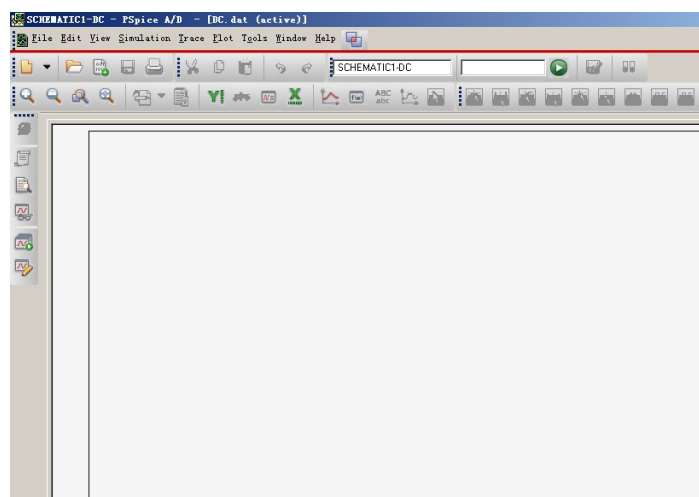


图 4.4.9 直流扫描的 PSpice A/D 空白窗口

出类似于图 4.4.9 所示的 PSpice A/D 窗口，不过其 Probe 窗口内只显示出坐标系（横轴和纵轴）。其中横轴变量就是前面设置的扫描变量 V_{BB} ，坐标范围为 0~2V，而纵轴还没有输出变量，有待接下来指定。

为了设置输出变量，可执行 PSpice A/D 的主菜单 Trace 中的 Add Trace...命令，或单击 PSpice 工具栏的 Add Trace 图标按钮，打开如图 4.4.10 所示的 Add Traces 对话框。在其左边的 Simulation Output Variables 栏内选择 IC(Q1)（即输出变量为晶体管 Q1 的集电极电流 I_{CQ1} ），对话框下方的 Trace Expression 栏内就会出现 IC(Q1)，也可直接在 Trace Expression 栏内输入 IC(Q1)，然后单击 OK 按钮。在 Probe 窗口内就会显示 $I_{CQ1}=f(V_{BB})$ 的曲线，如图 4.4.11 所示。利用游标 Cursor 功能很容易得出，当 $I_{CQ1}\approx 1\text{mA}$ 时所需直流偏置电压 $V_{BB}\approx 642.836\text{mV}$ 。

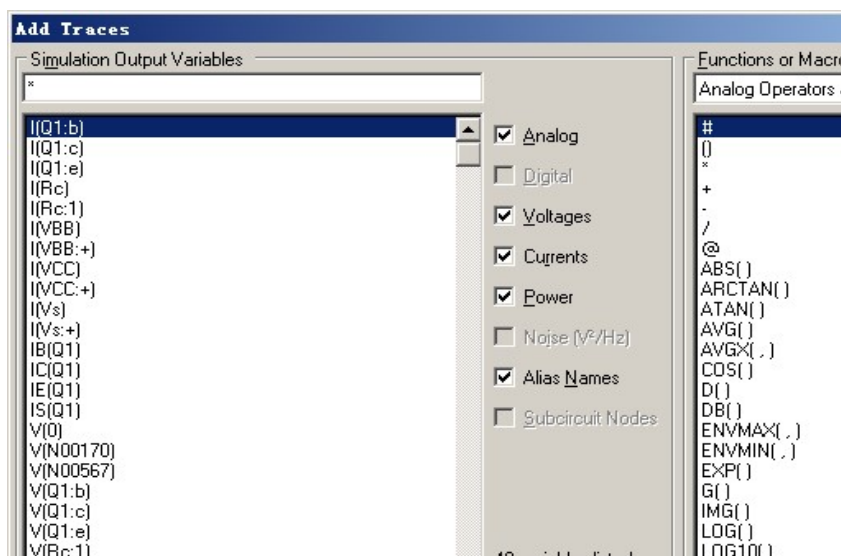


图 4.4.10 Add Traces 对话框

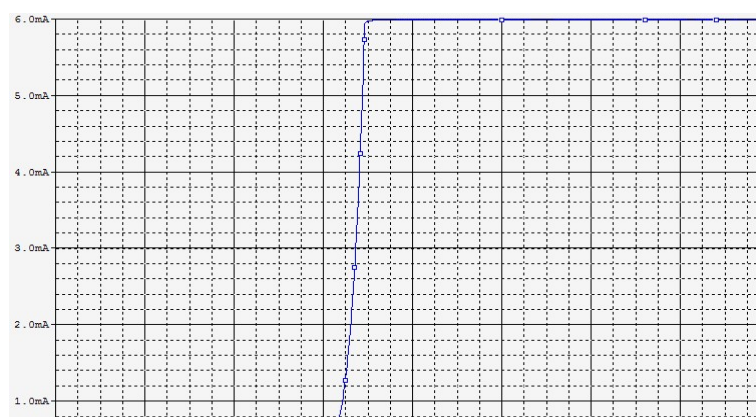


图 4.4.11 IC(Q1)与 V_{BB} 的关系曲线

利用游标 Cursor 测量曲线特定点的值是很方便的。在 Probe 窗口内，执行主菜单 Trace 中的 Cursor 下的 Display 命令或单击 Probe 工具栏上的 Toggle Cursor 图标按钮，则会出现一个小的 Cursor 窗口，它显示出当前游标 1 和游标 2 在横轴及纵轴上的坐标值，移动游标则坐标值会沿着曲线发生相应变化，其中游标 1 为鼠标左键按下时出现的大叉线，游标 2 为鼠标右键按下时出现的大叉线。

要精确定位，可以在菜单 Trace 中的 Cursor 下的 Search Commands 命令里输入 search 命令，比如 search level (1m)，就能找到纵坐标为 1mA 所对应的横坐标值。注意方向，缺省为从当前游标所在点向前（Forward）搜索，例如 search forward level (1m)，也可改为向后（Backward）搜索，例如 search backward level (1m)，所以在开始搜索前要先估计想找到的大致相对位置。

2) 在 Capture 中，将电路图 4.4.7 中的输入信号源取正弦信号源 VSIN，其主要参数设置为：

VOFF=0、VAMPL=20mV、FREQ=1k（其余参数保持不变）；而将 VBB 的直流电压值就设置为 1）中求得的结果即 642.836mV。这里题目要求得到输出电压波形，其实就是需要进行瞬态分析。分析类型和参数的设置方法如下：新建一个分析类型组的名称为 TRAN。打开“Simulation Settings – TRAN”对话框，在“Analysis type”栏内选择“Time Domain (Transient)”，设置瞬态分析的起始存储时间、终止时间和时间步长分别为 1ms、16ms 和 5 μ s，如图 4.4.12 所示。

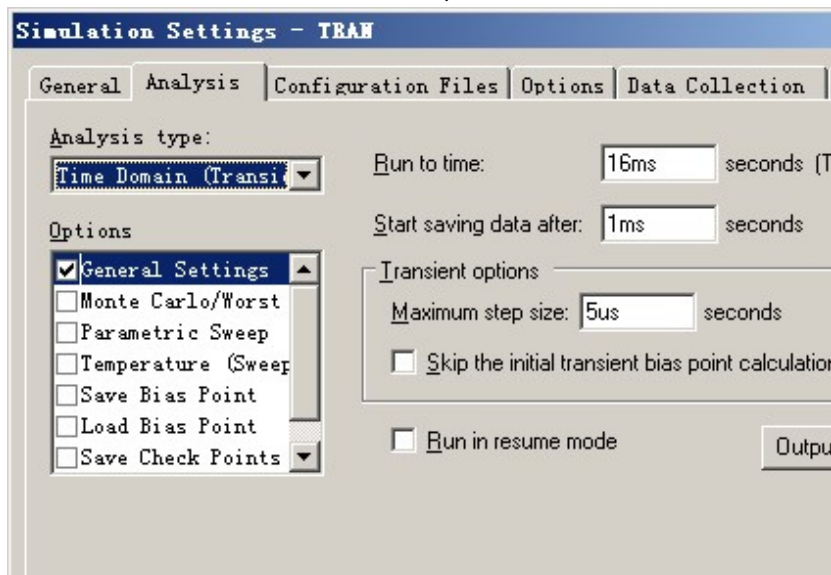


图 4.4.12 瞬态分析设置

瞬态分析完成后，会出现类似图 4.4.13 所示的 PSpice A/D 窗口，利用其中的 Probe 窗口来观察输入、输出电压等波形。

打开 Add Traces 对话框，在下方的 Trace Expression 栏内直接输入“V(Vi),V(Vo)”，则在同一坐标系里显示出 V_i 和 V_o 的波形，如图 4.4.14 所示。图中的坐标范围是按输出电压幅度自动设置的，输入电压的幅度很小，其波形接近直线，所以在同一坐标系里观察两个大小相差悬殊的信号波形并不合适。

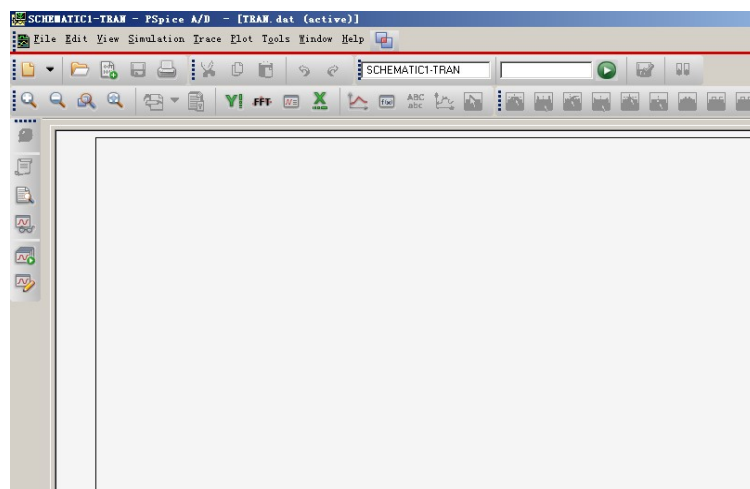


图 4.4.13 瞬态分析的 PSpice A/D 空白窗口

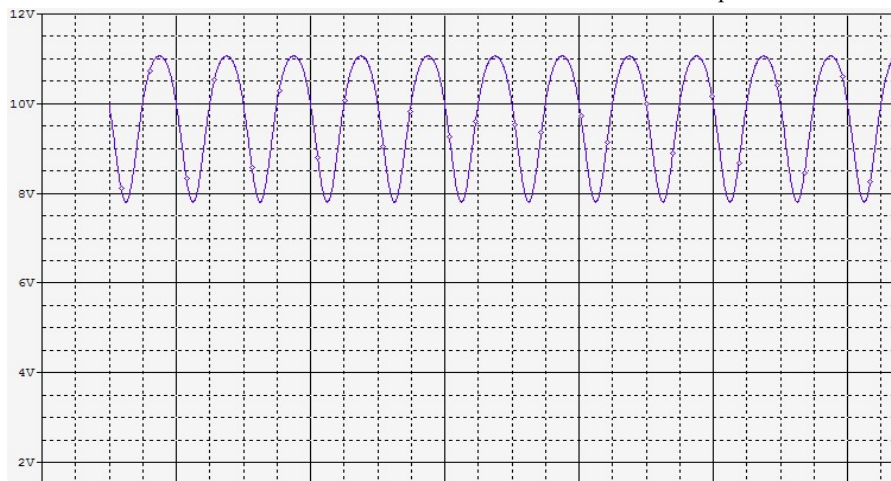


图 4.4.14 瞬态分析的输入、输出波形

为了使各波形都有合适的高度，可将同一个 Probe 窗口分为多个显示区，每一显示区显示一波形，各显示区可有独立的 X 轴坐标和 Y 轴坐标（大多数情况下是共用同一个 X 轴坐标）。方法是使用 PSpice A/D 主菜单 Plot 的 Add Plot to Window 命令，在 Probe 窗口内打开另一个图形显示区，然后在两个显示区分别选择显示输入和输出电压的波形，如图 4.4.15 所示。另一种方法是，在原 Probe 窗口打开后，再打开一个或多个波形显示窗口，分别显示不同的波形。方法是使用 PSpice A/D 主菜

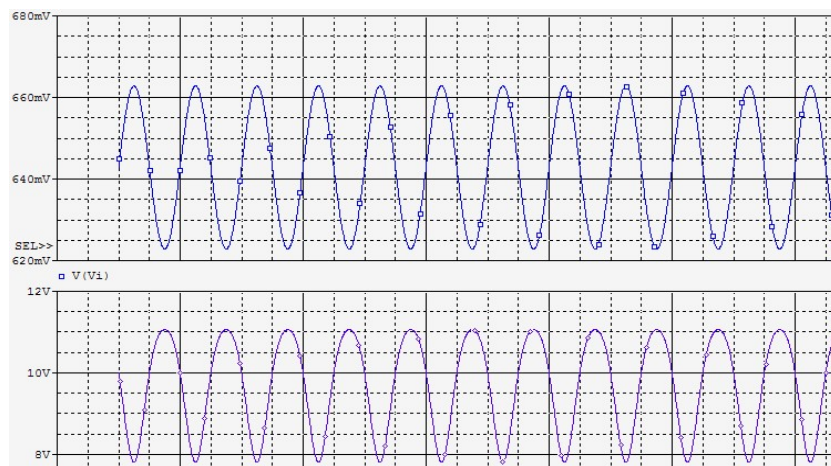


图 4.4.15 分两个 Plot 区域显示输入、输出波形

单 Windows 的 New Window 命令打开另一个波形显示窗口，然后用主菜单 Window 的 Tile Vertically 命令或 Window 的 Tile Horizontally 命令，将窗口上下或左右排列，再分别显示输入和输出电压波形，如图 4.4.16 所示。

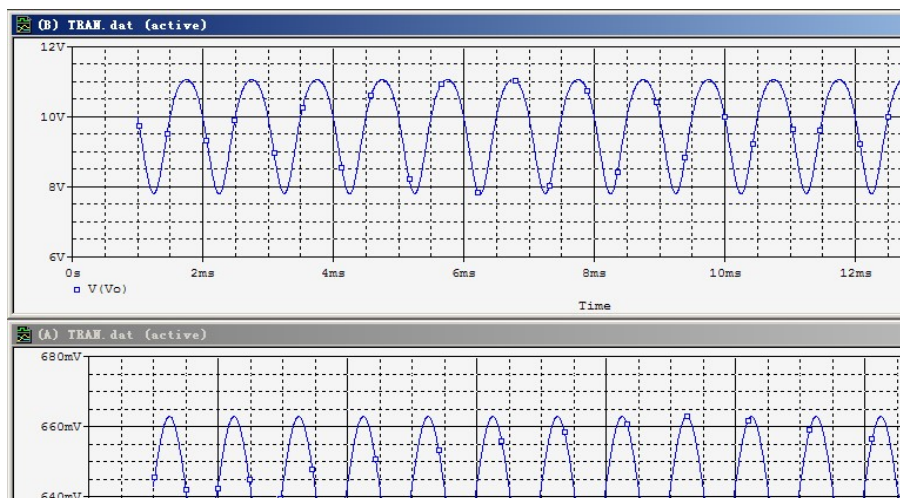


图 4.4.16 分两个窗口显示输入、输出波形

从上述几图中的波形可以看出，输出电压的幅度约为 1.62735V，输入电压的幅度为 20mV，增益约为 81.3675 倍，二者相位差为 180 度。

第 6 章 数字电路分析示例

6.1 数字电路仿真分析的基本概念

1. 数字电路仿真分析的主要功能

数字电路的仿真分析也称为逻辑仿真分析，它是根据给定的电路拓扑结构及内部器件的功能和延迟特性，来分析计算整个数字电路的特性。其仿真分析功能包括如下几个方面。

- (1) 分析数字电路输出与输入之间的逻辑关系。
- (2) 分析数字电路的延迟特性。
- (3) 对包括有模拟电路单元和数字电路单元的电路进行数模混合仿真，并可同时显示出电路内的模拟信号和数字信号的波形。
- (4) 最坏情况分析：在进行仿真分析时，每个单元电路的延迟特性一般都是取其标称值。若取各单元电路延迟时间的最大值和最小值的组合，进行电路特性的仿真分析，就称之为最坏情况分析。
- (5) 检查数字电路中是否存在时序异常和竞争冒险现象。

2. 数字电路仿真分析的步骤

用 PSpice 程序进行逻辑仿真分析的步骤与分析模拟电路类似，也包括在 Capture 中绘制逻辑电路图、确定分析类型、设置仿真分析参数，在 PSpice A/D 中进行逻辑仿真分析以及在 PSpice A/D 的 Probe 窗口及输出文本文件中观察仿真分析的结果等。

3. 数字信号源

要进行逻辑仿真分析，必须在数字电路的输入端施加激励信号。PSpice 的逻辑激励信号有如下三类。

- (1) 时钟信号 (Clock Stimulus)。它是一种规则的周期性一位信号，其波形描述最简单。
- (2) 一般数字激励信号 (Digital Signal Stimulus)。它也是一位信号，但其波形变化可比时钟信号复杂。
- (3) 总线激励信号 (Digital Bus Stimulus)。分为 2 位、4 位、8 位、16 位和 32 位等五种。

SOURCE.OLB 库和 SOURCSTM.OLB 库中共有 4 类 17 种不同的逻辑激励信号源，分别是 SOURCE 库中的 DigClock 类 (1 种)、FileStim 类 (6 种)、STIM 类 (4 种) 和 SOURCSTM 库中的 DigStim 类 (6 种)。在绘制电路图时，放置激励信号源的方法与一般元器件相同。

6.2 全加器电路分析

一位全加器的逻辑功能如表 4.5.1 所示，其中输入信号 A 、 B 为两个相加的数， C_{in} 为前一级的进位信号；输出信号 Sum 、 C_{out} 分别为本级和与进位。试设计一位全加器电路并进行逻辑仿真分析，验证其逻辑功能。

解：所设计的一位全加器电路如图 4.5.1 所示。

首先，在 Capture 中绘制出该电路图。图中输入信号源采用 SOURCSTM.OLB 库中的 DigStim1 (亦可采用其它数字逻辑激励信号源)。电路中用到的异或门 U1 (74LS86)、与门 U2 (74LS08) 及或门 U3 (74LS32) 三种芯片都选自 7400.OLB 库，每个芯片都内含四个功能一样的逻辑门，以异或门 U1 为例，分别编号为 U1A、U1B、U1C 和 U1D。逻辑门的编号可由双击逻辑门后弹出的元器件属性参数编辑器窗口的 “Designator” 进行选定。

表 4.5.1 全加器真值表

C_{in}	B	A	C_{out}	Sum
0	0	0	0	0
0	0	1	0	1
0	1	0	0	1
0	1	1	1	0
1	0	0	0	1
1	0	1	1	0
1	1	0	1	0
1	1	1	1	1

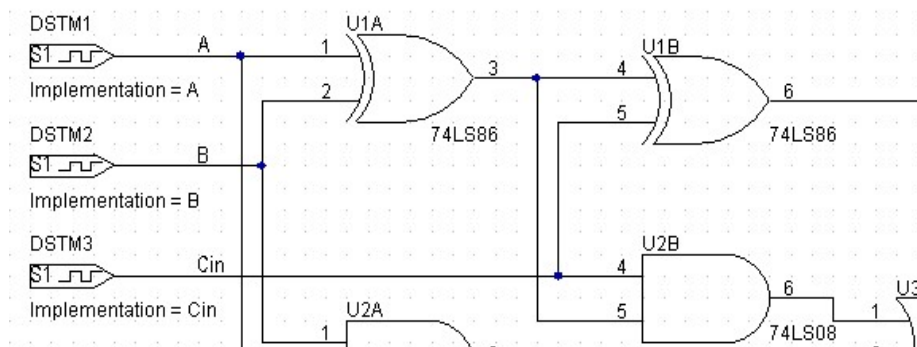


图 4.5.1 一位全加器电路

在 Capture 中电路图绘制完毕，要设置激励信号波形。现选择激励信号源 DSTM1，然后执行 Capture 主菜单 Edit 的 PSpice Stimulus 命令，会显示出如图 4.5.2 所示的 Stimulus Editor (StmEd) 程

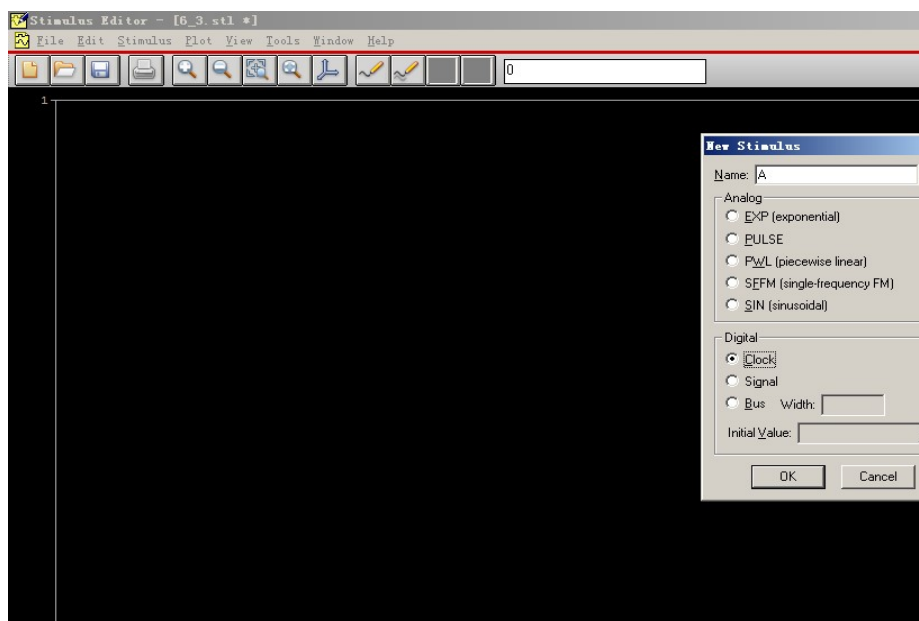


图 4.5.2 StmEd 程序窗口及“New Stimulus”对话框

序窗口及“New Stimulus”对话框。对话框的“Name”栏内输入信号名称“A”，在“Digital”栏内选择“Clock”选项。单击“OK”按钮，会弹出如图 4.5.3 所示的时钟信号参数设置对话框。在该对话框中设置输入信号 A 的频率 (Frequency) 为 2kHz，占空比 (Duty cycle) 为 0.5，起始值 (Initial value) 为 0，时间延迟 (Time delay) 为 0。单击“OK”按钮，与设置参数值对应的 A 信号波形就会显示在 StmEd 程序窗口中。

用同样的方法分别设置输入信号 B (频率为 1kHz) 和 Cin (频率为 500Hz)。所有波形如图 4.5.4 所示。

如果显示的信号波形满足要求，即可使用图 4.5.4 中的 File 菜单的 Exit 命令关闭 StmEd 程序窗口，并将信号波形的设置结果存放在扩展名为.stl 的文件中。

下面在 Capture 中进行分析类型和参数的设置。在点击菜单 PSpice 的 New Simulation Profile 命令后出现的“New Simulation”对话框中的“Name”栏内输入“ADD”，然后在打开的“Simulation Settings - ADD”对话框中，设置仿真分析类型为瞬态分析即“Time Domain (Transient)”。因输入信号 A、B、Cin 的周期分别为 0.5ms、1ms 及 2ms，仿真时间 (Run to time) 可取为 4ms，这样可以进行两

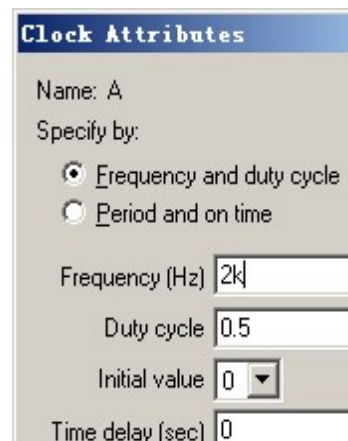


图 4.5.3 时钟信号参数设置对话框

次全加功能的仿真验证，而最大仿真步长（Maximum step size）可设置为 0.01ms。

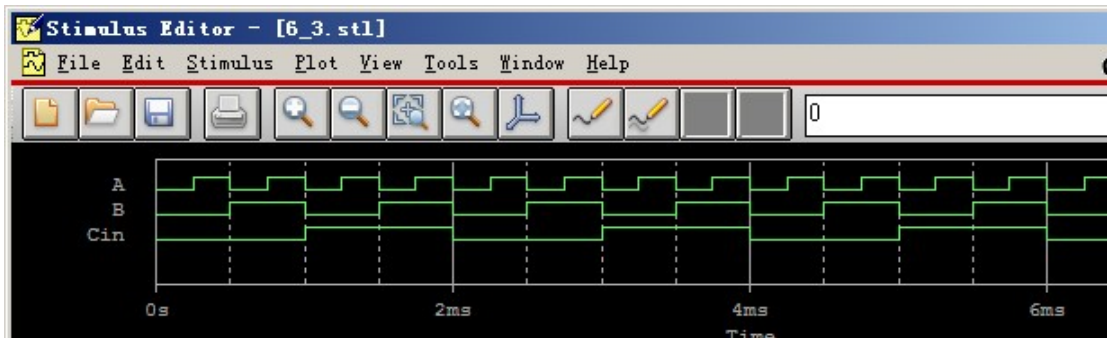


图 4.5.4 StmEd 窗口中的输入信号波形

设置完成后，在 Capture 中点击 PSpice 菜单下的 Run 命令启动 PSpice A/D 程序进行仿真。在 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中通过“Add Traces”添加各信号名称，即可观察 A、B、C_{in} 和 Sum、C_{out} 等各变量的波形，如图 4.5.5 所示。由图 4.5.5 可见，其中波形所表示的逻辑关系与表 4.5.1 完全相符，表明电路设计符合要求。

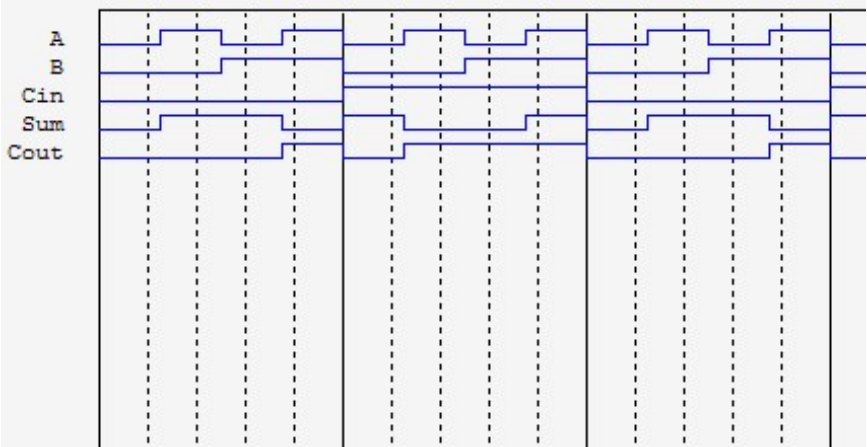


图 4.5.5 一位全加器的逻辑仿真信号波形

6.3 十进制计数器电路分析

试设计一个一位十进制计数器电路并进行逻辑仿真分析，验证其逻辑功能。

解：所设计的一位十进制计数器电路如图 4.5.6 所示，在 OrCAD Capture 中绘制出该电路图。图中用到的芯片 74LS160A 选自 74LS.OLB 库（注：图比较拥挤，其中的 1 脚为清零端 CLR，2 脚为时钟端 CLK，10 脚和 7 脚为计数使能端 ENT 和 ENP，9 脚为置数使能端 LOAD）；输入信号源采用 SOURCE.OLB 库中的 DigClock，清零脉冲选择 SOURCE.OLB 库

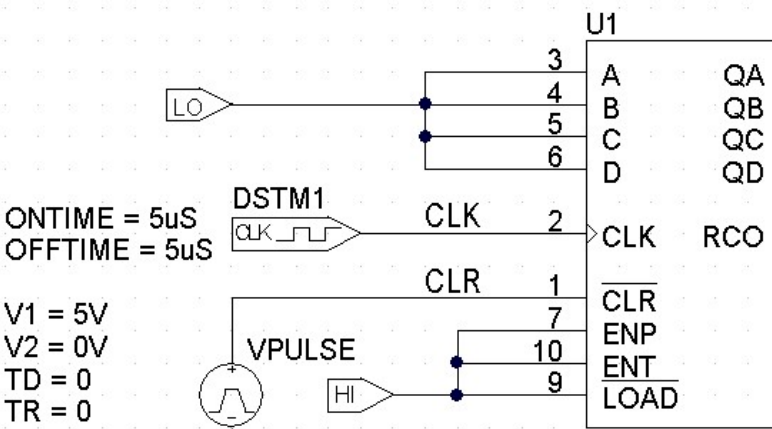


图 4.5.6 十进制计数器电路

中的 VPULSE，参数设置已标于图中，其中 DigClock 的 ONTIME 和 OFFTIME 分别表示高低电平持续时间，而 VPULSE 的 V1 表示脉冲起始电压（低电压），V2 表示脉冲电压（高电压），TD 表示

延迟时间，TR 表示上升时间，TF 表示下降时间，PW 表示脉冲宽度（高电压持续时间），PER 表示脉冲周期；高低电平“HI”和“LO”通过选择菜单 Place 下的 Power...命令或单击绘图工具栏中的“Place power”图标按钮，打开“Place Power”对话框，从 SOURCE 库中选用\$D_HI 和\$D_LO 两种来分别表示高低电平。

下面在 Capture 中进行分析类型和参数的设置。在点击菜单 PSpice 的 New Simulation Profile 命令后出现的“New Simulation”对话框中的“Name”栏内输入“COUNTER10”，然后打开“Simulation Settings - COUNTER10”对话框，设置仿真分析类型为瞬态分析即“Time Domain (Transient)”，设置其参数为：仿真时间（Run to time）0.4ms，最大仿真步长（Maximum step size）1 μ s。

设置完成后，在 Capture 中点击 PSpice 菜单下的 Run 命令启动 PSpice A/D 程序进行仿真。在 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中通过“Add Traces”添加各信号名称，即可观察各输入、输出变量的波形，如图 4.5.7 所示，其中 CLK、D、C、B、A、CO 为数字信号，而 V(CLR)为模拟电压信号，故二者自动分成两个 Plot 区域加以显示。由图 4.5.7 可见，其中波形所表示的逻辑关系正是一位十进制计数器（可以看到正确的同步计数及异步清零功能），表明电路设计符合要求。

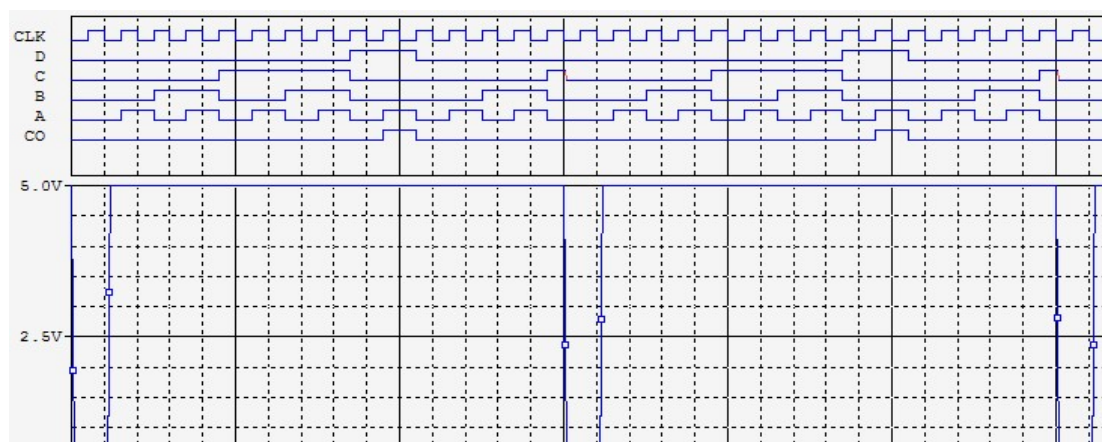


图 4.5.7 十进制计数器的逻辑仿真信号波形

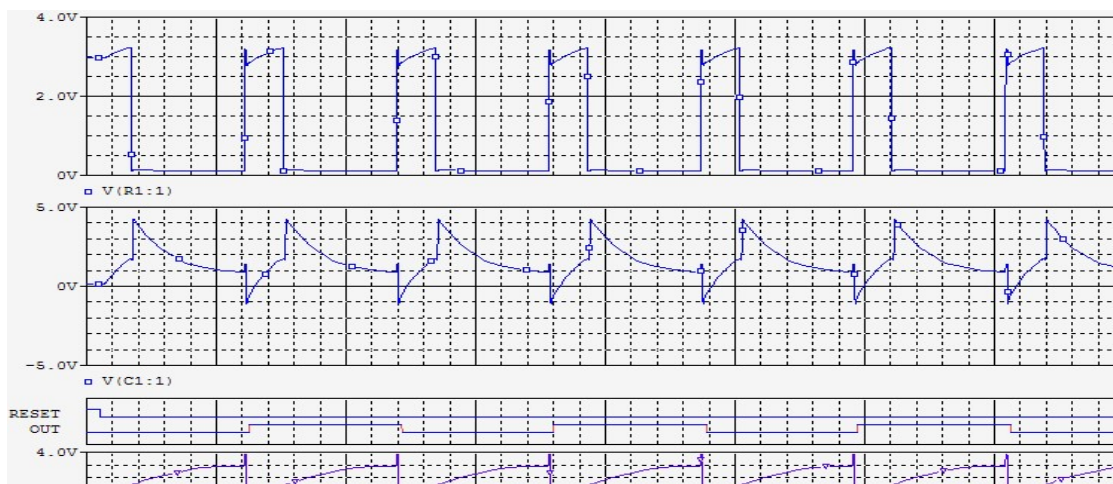


图 4.6.3 电路仿真分析信号波形

由图 4.6.3 中波形可以看出，经过 RC 谐振电路后，非门 U3B 输出的信号已经是一个接近于周期性矩形波的模拟电压振荡信号了，周期约为 $1.17\mu\text{s}$ ，用它可以作为送给数字器件 74107 J/K 触发器的时钟信号。而 74107 这一 J/K 触发器是接成 T 触发器的形式的，即来一个时钟，输出就翻转一次，因此最后输出的信号 OUT 是一个很好的数字方波信号，周期约为 $2.34\mu\text{s}$ 。仿真结果表明，该电路能产生符合设计要求的振荡信号。

由图 4.6.3 中波形还可以看出，第二个 7414 的输入端跟输出端的信号其实就是简单的取反关系，因此第二个 7414 完全可以换成一般的非门 7404，这时本电路的振荡部分核心电路如图 4.6.4 所示。另外，值得一提的是，7405 的 OC 特性在该电路初始化复位时也很重要，因为没有接上拉电阻的关系，所以 7405 的 2 点在本应为高电平的时候实际上处于开路悬空状态，不影响后面电路的振荡。

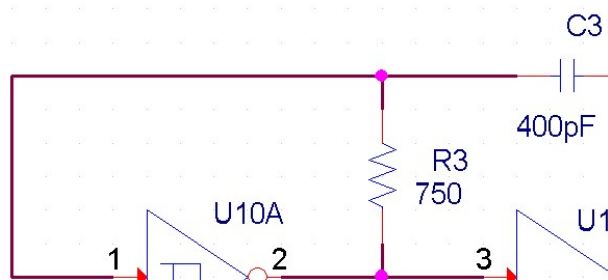


图 4.6.4 修改后的振荡部分核心电路

7.2 阶梯波电压产生电路分析

设计一个阶梯波电压产生电路，输出一个具有 16 级台阶的阶梯波电压。

解：可产生阶梯波电压的电路有很多种结构，这里采用时钟源、四位二进制同步计数器、电阻网络（实际作用相当于 DAC）和集成运放组成一种阶梯波电压产生电路，如图 4.6.5 所示。

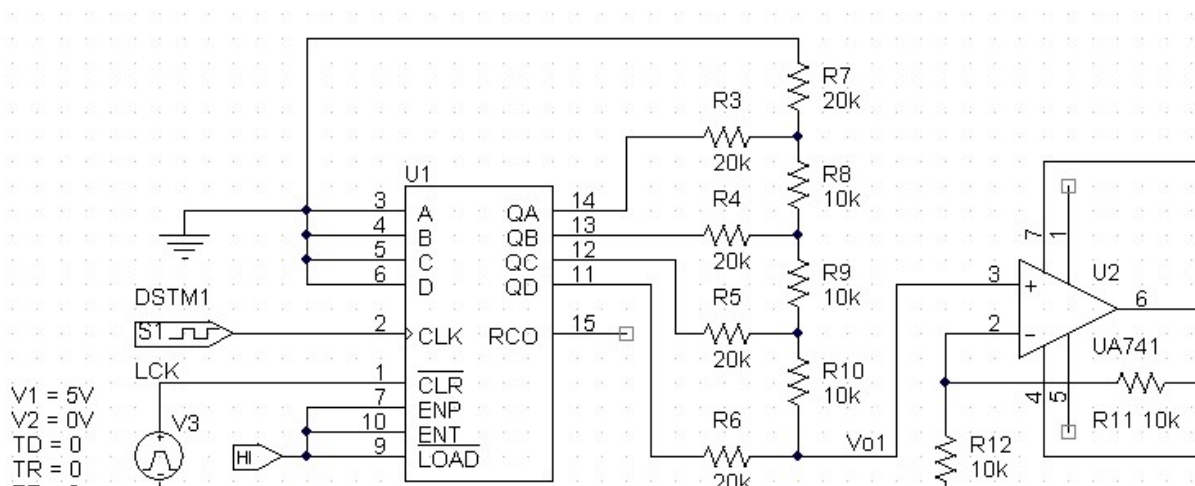


图 4.6.5 阶梯波产生电路

在 OrCAD Capture 中绘制该电路图。图 4.6.5 中输入时钟源 DSTM1 采用 SOURCSTM.OLB 库中的 DigStim1, 选中它后执行 Capture 主菜单 Edit 的 PSpice Stimulus 命令, 在出现的 Stimulus Editor 窗口中编辑输入一个频率为 1kHz、占空比为 0.5、起始值为 0、延迟时间为 0 的周期性方波信号 CLK 作为时钟送给后面的计数器 (具体过程参见 6.5.2 节); 清零脉冲信号 V3 选择 SOURCE.OLB 库中的 VPULSE, 参数设置已标于图 4.6.5 中 (具体意义参见 6.5.3 节); 高电平 “HI” 通过选择菜单 Place 下的 Power... 命令或单击绘图工具栏中的 “Place power” 图标按钮, 打开 “Place Power” 对话框, 从 SOURCE 库中选用 \$D_HI 即可; 二进制计数器 U1 (74LS161A, 选自 74LS.OLB 库, 其中的 1 脚为清零端 $\overline{\text{CLR}}$)、电阻网络 ($R_3 \sim R_{10}$) 组成阶梯波形成电路; 集成运算放大器 U2 为缓冲放大电路, 具体采用 OPAMP.OLB 库中的 uA741。

假设计数器 U1 的四个输出端 (11、12、13、14 脚) 输出的数字量分别为 D_3 、 D_2 、 D_1 和 D_0 , 它们的低电平为 $V_{OL} \approx 0$, 高电平为 V_{OH} 。当 D_i ($i=0, 1, 2, 3$) 为 0 时, 该端所连接电阻的左端近乎接地; 当 D_i 为 1 时, 该端所连接电阻的左端接高电平 V_{OH} 。经过简单推导可知, 电阻网络的输出电压 $V_{O1} \approx \frac{1}{2^4} (2^3 D_3 + 2^2 D_2 + 2^1 D_1 + 2^0 D_0) V_{OH}$, 可见电压 V_{O1} 与计数器输出的数字量成正比。因此, 在上述计数脉冲作用下, $D_3 D_2 D_1 D_0$ 的状态从 0000 到 1111 循环变化时, 则 V_{O1} 的波形即是具有 16 级台阶的阶梯波。该阶梯波经过运放 U2 缓冲放大后, 幅度增加。图 4.6.5 中的电阻 R_{13} 和电容 C_1 为低通滤波器, 用以滤除阶梯波跳变边沿产生的毛刺。

下面在 Capture 中进行分析类型和参数的设置。在点击菜单 PSpice 的 New Simulation Profile 命令后出现的 “New Simulation” 对话框中的 “Name” 栏内输入 “STEP”, 然后在打开的 “Simulation Settings – STEP” 对话框中, 设置仿真分析类型为瞬态分析即 “Time Domain (Transient)”。参数选择为: 仿真时间 (Run to time) 80ms, 最大仿真步长 (Maximum step size) 100 μ s。

设置完成后, 在 Capture 中点击 PSpice 菜单下的 Run 命令启动 PSpice A/D 程序进行仿真。在 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中通过 “Add Traces” 添加各信号名称, 即可在 Probe 窗口中观察到该电路的输出波形, 如图 4.6.6 和图 4.6.7 所示。

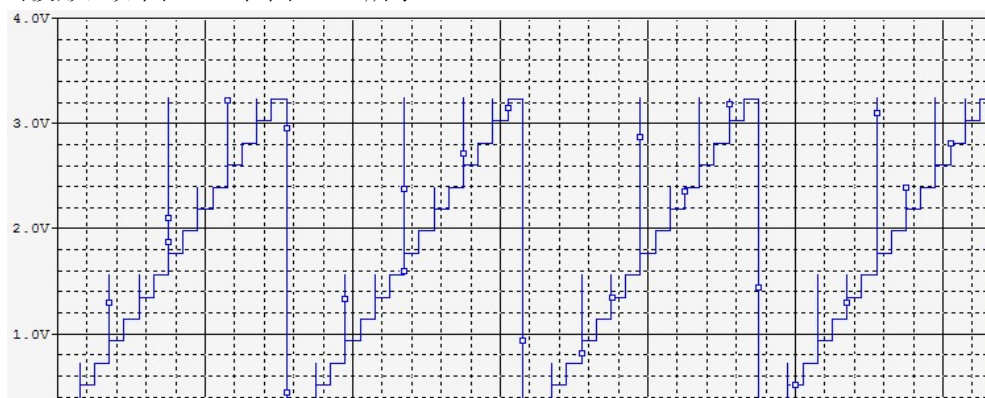


图 4.6.6 阶梯波形成电路输出波形

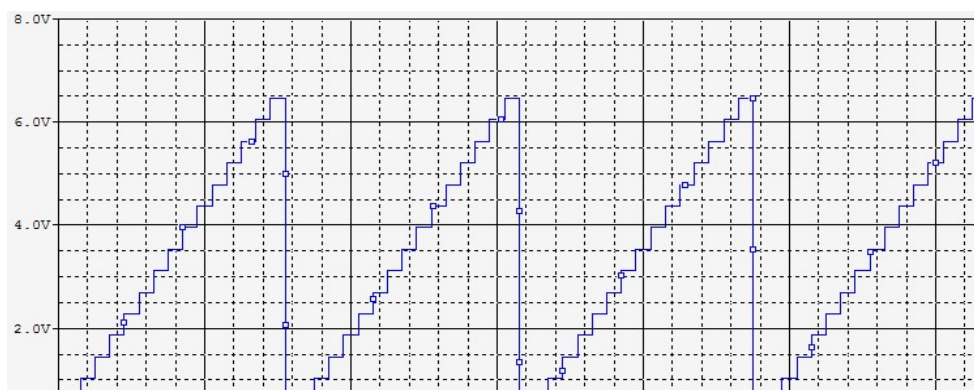


图 4.6.7 电路最终输出波形

由图中波形可以看出，阶梯波形成电路的输出电压 V_{O1} 是具有 16 级台阶（带有毛刺）的阶梯波电压，利用游标 **Cursor** 功能可测得其幅度约为 3.2326V，周期约为 15.978ms（约等于 16ms，正好就是 16 个输入时钟源周期的时间）。经过运放缓冲放大及低通滤波后，电路最终输出的 V_{O2} 便为符合设计要求的比较平滑、没有毛刺的阶梯波了。

第8章 Multisim 软件基础

8.1 Multisim 简介

Electronics WorkBench (简称 EWB) 是一款优秀的虚拟电子工作台电路仿真 EDA 软件, 最初由加拿大 IIT (Interactive Image Technologies) 公司推出, 人们最熟悉的就是 EWB 5.0。在 EWB 5.0 之后, 改名为 Multisim 6.0, 后来又陆续发行了 Multisim 2001、Multisim 7.0、8.0、9.0、10.0 等版本, 目前的最新版本为 Multisim 13.0。从 Multisim 2001 开始, 该软件不再单纯是一个电路仿真模拟软件, 而是增加了一些其他部分, 如 Ultiboard、Ultroute、Commsim 等。在 2006 年初被美国 NI (National Instruments) 公司收购前, 该软件包括如下几个部分:

- (1) Multicap: 专业电路图绘制、捕获软件。
- (2) Multisim: 电路仿真软件, 提供完整的电子电路分析模拟功能, 集成了 Multicap。
- (3) Ultiboard: 与 Multicap、Multisim 紧密结合的自动布线软件。
- (4) Ultroute: 高级自动布局布线引擎, 需要搭配 Ultiboard 使用。
- (5) Commsim: 通信系统分析仿真软件。
- (6) MultiMCU: MCU 设计编程软件, 与 Multisim 协同工作, 为 Multisim 增加微控制器模拟功能, 可使 Multisim 建立包含有内置执行代码的 MCU 的仿真模拟模型。
- (7) MultiVHDL: VHDL 语言设计编程软件, 与 Multisim 协同工作, 可使 Multisim 建立包含有 VHDL 部件的仿真模拟模型。
- (8) Multiverilog: 与 MultiVHDL 类似, 只不过针对 Verilog HDL 语言。

在被 NI 收购后, Commsim 和 Multiverilog 被放弃, 也就是说目前只剩下 Multicap、Multisim、Ultiboard、Ultroute、MultiMCU 和 MultiVHDL 这几部分。Multisim 10.0 版本套件已于 2007 年 1 月由 NI 公司将其更名为 National Instruments Circuit Design Suite 10.0 版本套件后推出。该套件中主要包含 Multisim、Multisim MCU Module 和 Ultiboard 等组件, 而且该套件已被 NI 公司改进, 可以为 LabVIEW 提供外部协同, 使其更具有生命力, 不久就会被集成到 LabVIEW 虚拟实验室平台中去。2010 年 1 月, NI 推出了最新的 NI Circuit Design Suite 11.0 版本。

本节主要介绍 NI Circuit Design Suite 套件中的 Multisim 软件。它可以将不同类型的电路组成混合电路进行仿真, 具有界面直观、操作方便等特点, 创建电路、选用元件和测试仪器均可以图形方式直观完成。该软件提供了详细的电路分析手段, 如电路的瞬态分析和稳态分析、时域和频域分析、器件的线性与非线性分析、电路的噪声分析和失真分析, 以及离散傅立叶分析、电路零极点分析、交直流灵敏度分析和电路容差分析等多种电路分析方法。

该软件具有下列特点。

- (1) 采用直观的图形界面创建电路: 在计算机屏幕上模仿真实实验室的工作台, 绘制电路图需要的元器件、电路仿真需要的测试仪器均可直接从屏幕上选取。
- (2) 软件仪器的控制面板外形和操作方式都与实物相似, 可以实时显示测量结果。
- (3) 带有丰富的电路元件库, 提供多种电路分析方法。
- (4) 作为设计工具, 它可以同其它流行的电路分析、设计和制板软件交换数据。
- (5) 是一个优秀的电子技术训练工具, 利用它提供的虚拟仪器可以用比实验室中更灵活的方式进行电路实验、仿真电路的实际运行情况、熟悉常用电子仪器的测量方法。

目前 Multisim 软件具有 18000 多种元件模型, 具备如信号源、基本元器件、模拟数字集成电路、指示器件、控制部件、机电部件等各种元器件。它可以对模拟电路、数字电路等电路进行仿真, 并且提供了十多种虚拟仪器 (如示波器、万用表、信号发生器、功率表等), 以及 18 种仿真分析功能 (如直流工作点分析、交流分析、瞬态分析、傅里叶分析、噪声分析、直流扫描分析等, 其仿真内核即为著名的 SPICE 仿真工具)。并且支持 VHDL 语言的设计输入和仿真。同时提供了多种仿真信息输出方式, 将电路原理图转入电路板设计软件, 如 Protel、OrCAD, 而且支持远程控制功能, 可实

现交互式教学。Multisim在保留了EWB以往版本形象直观等诸多优点的基础之上，大大增强了软件的仿真测试和分析功能，同时还大大扩充了元件库中仿真元件的数量，特别是增加了若干个与实际元件相对应的建模精确的真实（Real）仿真元件模型，配合强大的仿真分析功能，使得仿真设计的结果更精确、更可靠。

目前Multisim集成了最新发布的NI LabVIEW图形化开发环境软件和NI SignalExpress交互测量软件的功能。这一软件通过桥接普通设计及测试工具来帮助设计工程师提高效率，减少产品上市时间。使用Multisim，工程师可以通过运用仿真数据来提高测试能力，这些实际的数据都是由LabVIEW采集，作为虚拟电路测试时的数据来源。通过集成模拟数据库及仿真测试，工程师们可以减少失误，缩减设计时间，增加设计量。除了软件提供的20种仪器外，工程师们还可以运用LabVIEW来实现完全自定义的虚拟仪器，并将这些仪器用在Multisim环境中。

8.2 Multisim 应用举例一：RLC 电路仿真与分析

在本例中，利用简单的电阻器、电容器及电感器串联电路，输入脉波信号，再以示波器测量其输入输出之间的关系，以找出电容抗、电感抗与频率的关系；还有求出在谐振时电容器及电感器上的电压分别为多少。

电路图如图 4.7.1 所示。

1. 相关知识

如图 4.7.1 所示为 RLC 串联电路，其中的电容抗、电感抗为

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}, \quad X_L = 2\pi fL$$

电容抗会随频率上升而变小、电感抗会随频率上升而变大。电路的总阻抗为

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

当电容抗与电感抗相等时，其矢量和为零，整个电路的阻抗等于电阻器上的电阻值，即 $Z=R$ ，这时，电路电流为 $I=V_1/R_1$

电阻器上的电压为 $V_R=V_1$

电感器上的电压为 $V_L=I \times X_L$

电感器上的电压为 $V_C=I \times X_C$

谐振频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$

2. Multisim 中器件选择

- 电阻 R_1 、电感 L_1 、电容 C_1 取自基本元件库（Basic）中的虚拟电阻、电感、电容。
- 正弦波电压源 V_1 、接地符号取自电源/信号源元件库（Sources），其中 V_1 取自 SIGNAL_VOLTAGE_SOURCES 元件组中的 AC_VOLTAGE。
- 再从虚拟仪器库（Instruments）中取一个示波器（Oscilloscope）。

3. 操作

（1）双击打开电路图上的示波器，如图 4.7.2 所示。

（2）在 Timebase 区块的 Scale 字段里，将水平扫描的周期设定为 200us/Div（每格 200 微秒）；分别在 Channel A 及 Channel B 区块的 Scale 字段里，将两个通道输入信号的垂直刻度分别设为 10mV/Div（每格 10mV）和 50mV/Div（每格 50mV），然后按工具栏上的  图标或直接按 F5 快捷键开始上电运行，可见到示波器的反应，如图 4.7.3 所示。

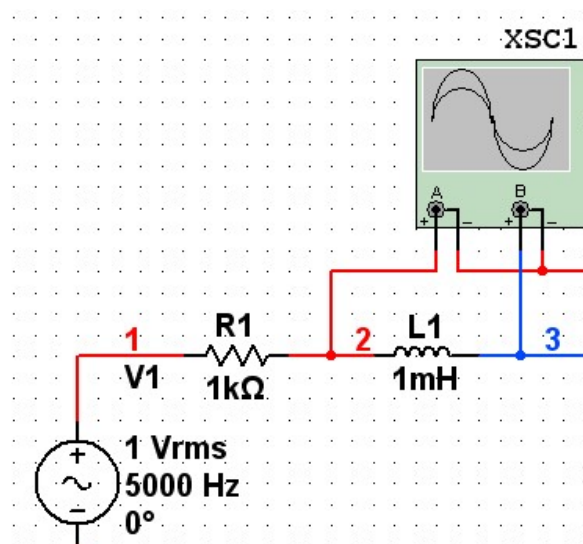


图 4.7.1 RLC 电路图

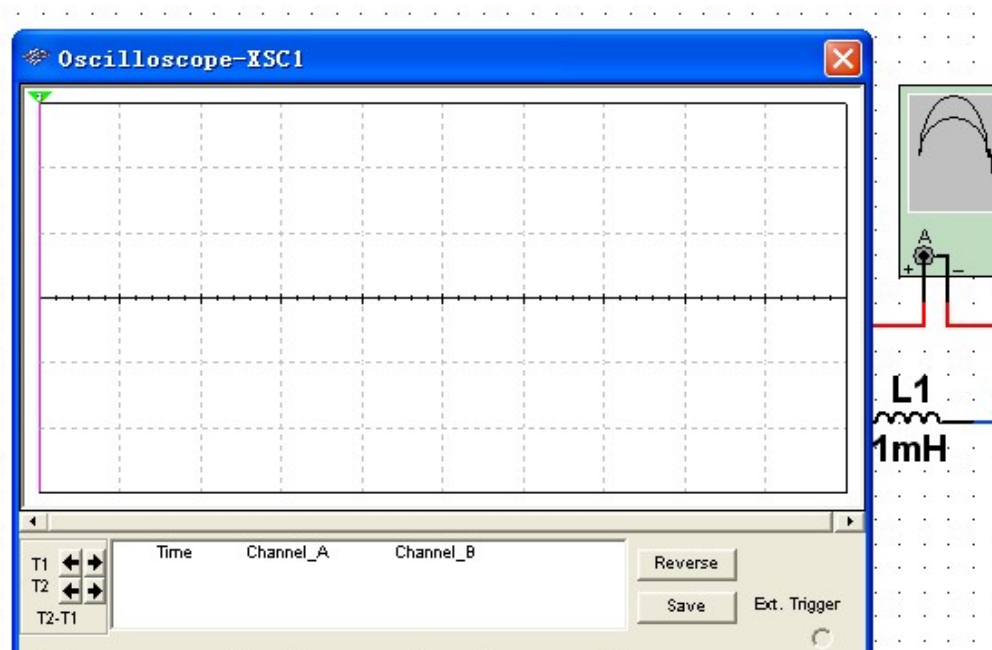


图 4.7.2 打开示波器的 RLC 电路图

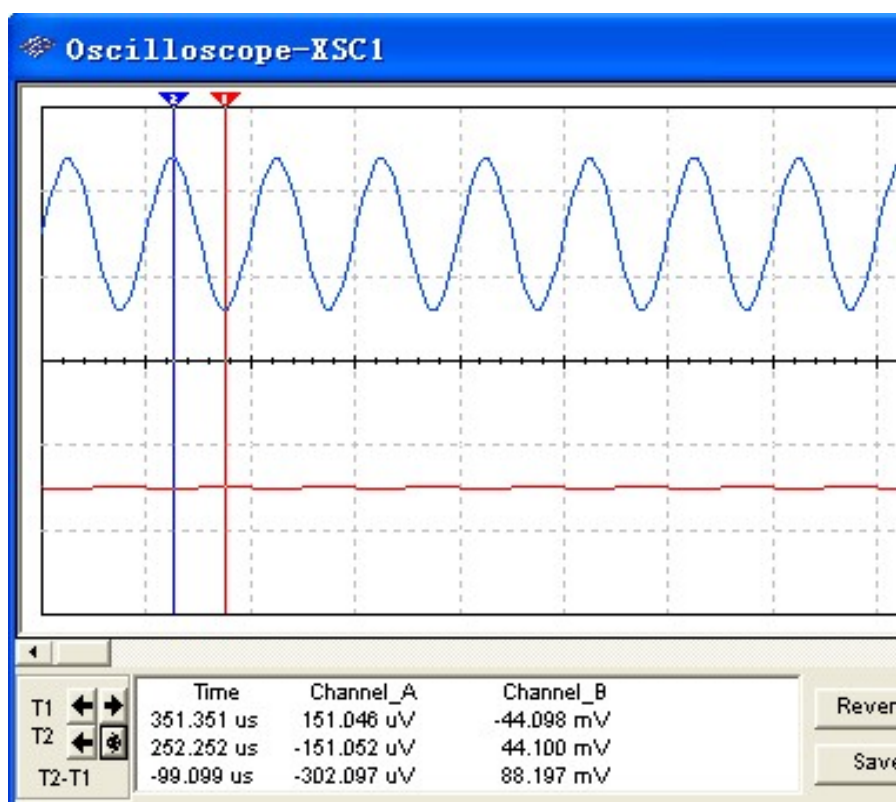


图 4.7.3 RLC 电路上电运行后的示波器显示

(3) 从图 4.7.3 可以看出，电容两端的电压为正弦电压，峰-峰值约为 88mV，电感与电阻相连点对地电压几乎为 0，说明电感上的电压与电容上的电压大小相等，方向相反，相加后相互抵消，电路处于谐振状态。下面来计算电路谐振时的参数。谐振频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1\text{mH} \times 1\mu\text{F}}} = \frac{1}{6.283 \times \sqrt{10^{-9}}} \approx \frac{1}{2 \times 10^{-4}} = 5000\text{Hz}$$

$$X_L = X_C = 2\pi \times 5000 \times 1 \times 10^{-3} = 31.4\Omega$$

$$V_L = V_C = I \times X_C = (V_1 / R_1) \times 31.4 = 31.4\text{mV}$$

$$V_{\text{CP-P}} = 2\sqrt{2}V_C \approx 89\text{mV}$$

以上计算结果与仿真数据完全吻合。

(4) 在虚拟仪器库中，选一个波德图描绘器 (Bode Plotter)，并按图 4.7.4 连接。

(5) 双击打开波德图描绘器，如图 4.7.5 所示。

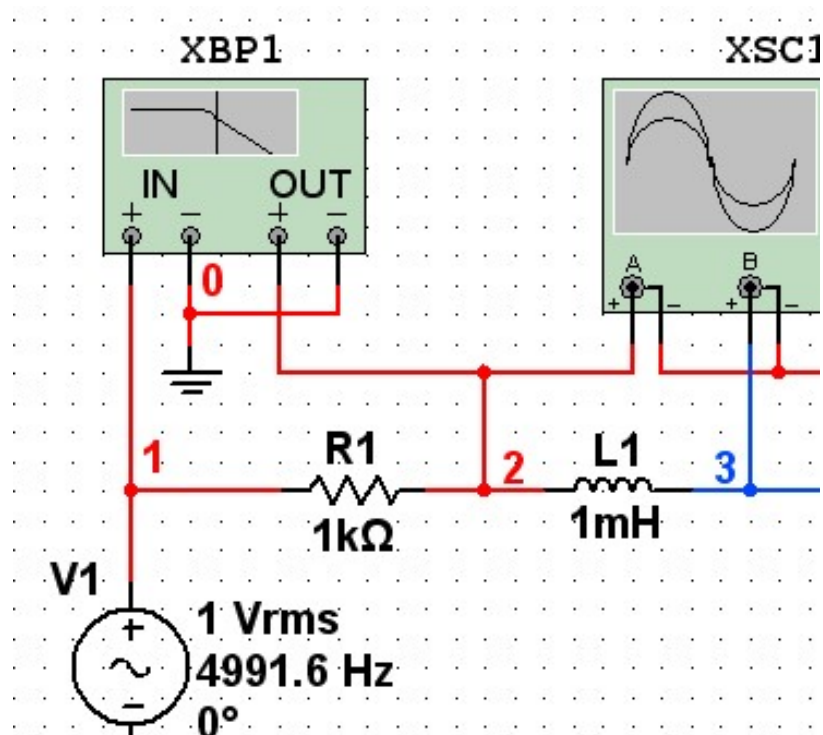


图 4.7.4 在 RLC 电路图中连接波德图描绘器

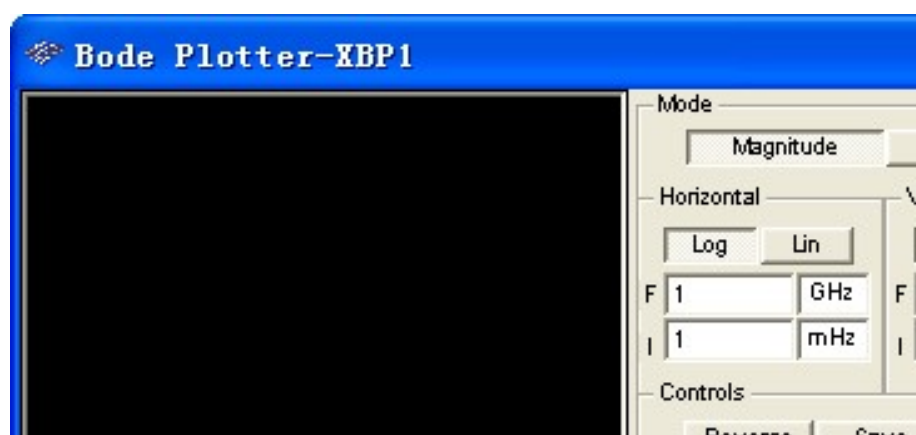


图 4.7.5 打开的波德图描绘器

(6) 将 Vertical 区块的 I 字段调整为-80dB，Horizontal 区块的 F 字段调整为 1MHz、I 字段调整为 1Hz。然后上电运行。如图 4.7.6 所示。

(7) 按 **Phase** 按钮看看相位的频率响应图，如图 4.7.7 所示。

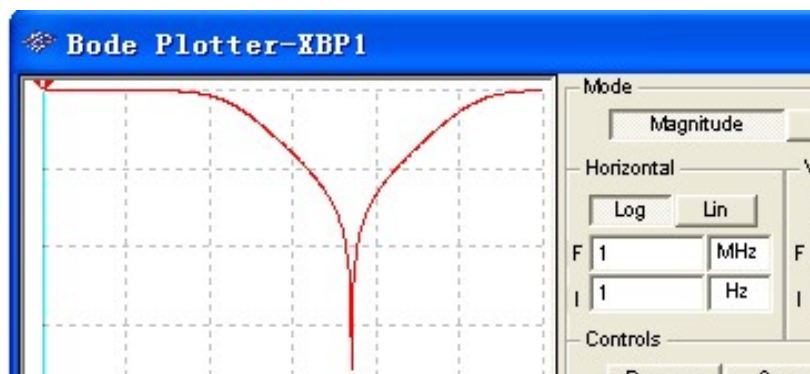


图 4.7.6 上电运行后的波德图描绘器显示（幅频响应图）

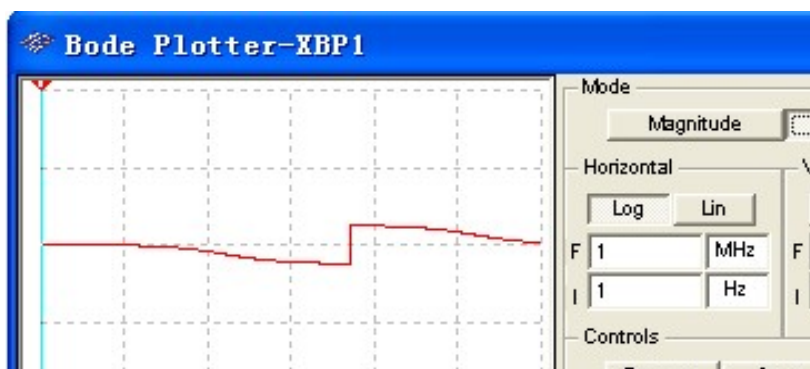


图 4.7.7 上电运行后的波德图描绘器显示（相频响应图）

8.3 Multisim 应用举例二：555 电路仿真与分析

在本例中，利用最常用的 555 时基电路，设计一个无稳态多谐振荡器，在其输出端连接一个示波器观察测量其输出波形变化。

电路如图 4.7.8 所示。

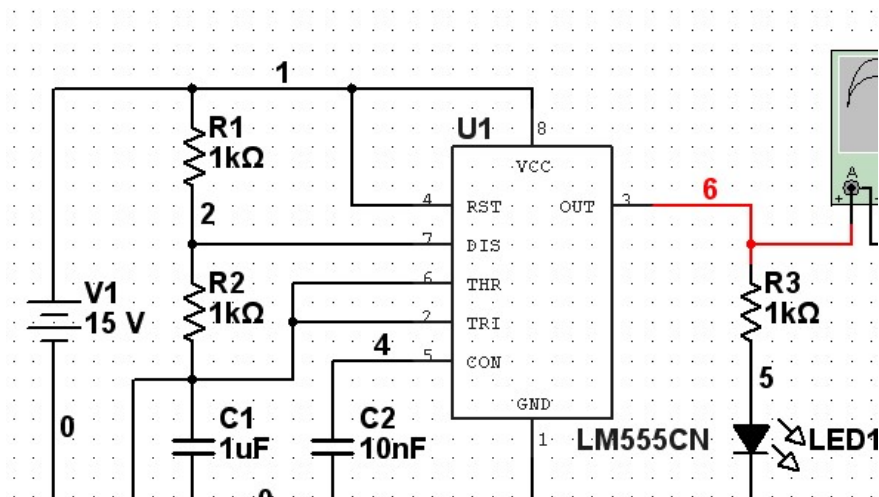


图 4.7.8 555 多谐振荡器电路图

1. 相关知识

在如图 4.7.8 所示的 555 无稳态多谐振荡电路中，电容 C_1 的充电周期为

$$T_1 = 0.7(R_1 + R_2)C_1 = 0.7 \times 2\text{k}\Omega \times 1\mu\text{F} = 1.4\text{ms}$$

放电周期为

$$T_2 = 0.7R_2C_1 = 0.7 \times 1\text{k}\Omega \times 1\mu\text{F} = 0.7\text{ms}$$

电路的振荡周期为

$$T = T_1 + T_2 = 0.7(R_1 + 2R_2)C_1 = 2.1\text{ms}$$

其振荡频率为 $f=1/T=476\text{Hz}$ 。

在电容器 C_1 上，只要充电达到 $\frac{2}{3}V_1$ 的上限电压，输出即翻转，同时该电容器将开始放电；而放电降至 $\frac{1}{3}V_1$ 的下限电压，输出再次翻转，同时该电容器又将开始充电，如此周而复始，不断振荡。

2. Multisim 器件选择

- 电阻器 R_1 、 R_2 、 R_3 及电容器 C_1 、 C_2 取自基本元件库 (Basic) 的虚拟电阻器、虚拟电容器。
- 15V 电池 V_1 、接地符号取自电源/信号源元件库 (Sources)。
- 555 取自混合模式元件库 (Mixed) 中的 TIMER 元件组。
- 再从虚拟仪器库 (Instruments) 中取一个示波器 (Oscilloscope)。

3. 操作

(1) 上电运行后，双击示波器打开面板，如图 4.7.9 所示。

(2) 在图 4.7.9 中，方波是输出端的波形，而锯齿波是电容器 C_1 的充放电曲线。在 Timebase 区块里，我们将水平扫描的时间设为 $2\text{ms}/\text{Div}$ (每格 2 毫秒)，而两个通道的垂直刻度都为 $5\text{V}/\text{Div}$ (每格 5V)。所以，在显示屏上，所出现的脉冲波有点拥挤。现在把水平扫描的时间调为 $500\mu\text{s}/\text{Div}$ (每格 500 微秒)，示波器显示如图 4.7.10 所示。

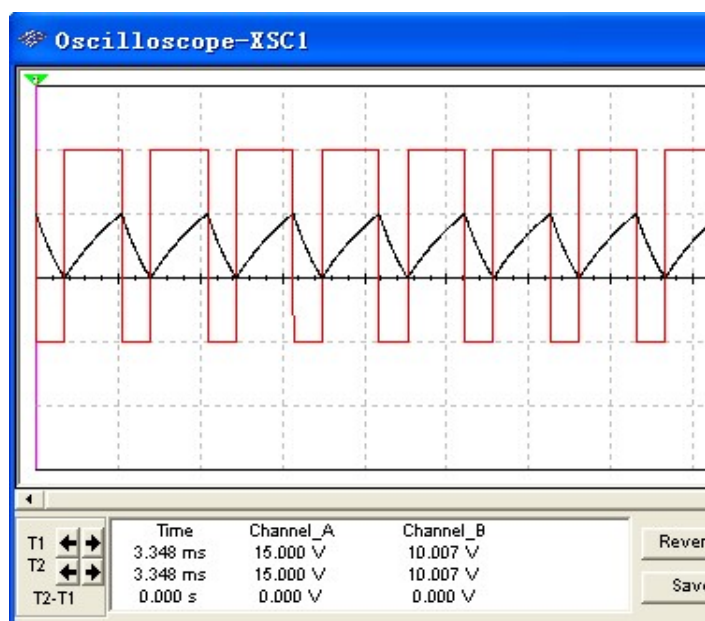


图 4.7.9 555 电路上电运行后的示波器显示

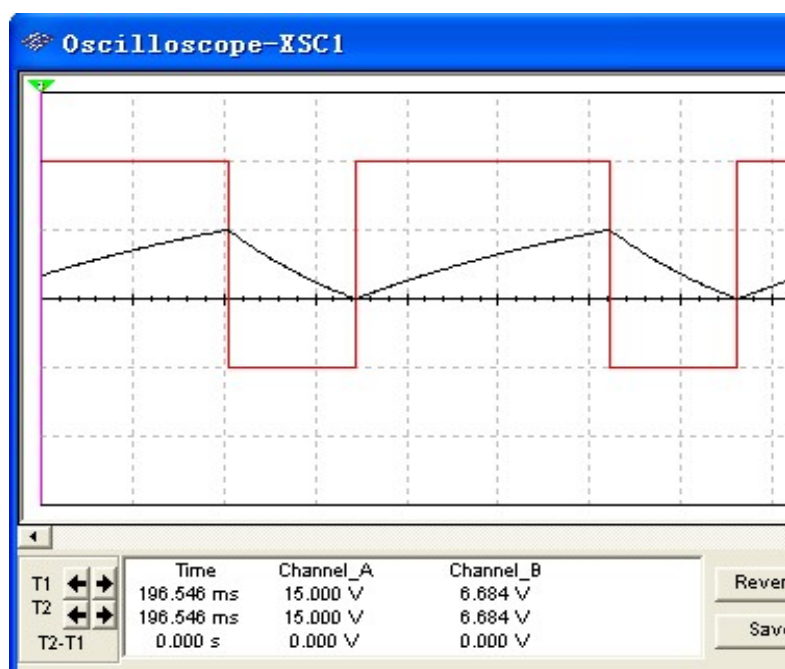


图 4.7.10 调整水平扫描刻度后的示波器显示

(3) 利用光标，可以看到如表 4.7.1 所示的测量值（表中包括了上面的计算值）。
由表可见，测量值与计算值几乎完全相符。

表 4.7.1 555 电路的测量值和计算值

项 目	测量值	计算值
高电平宽度	1.403ms	1.4ms
低电平宽度	688.776μs	0.7ms
振荡周期	2.092ms	2.1ms
振荡频率	478Hz	476Hz
上限电压	9.942V	10V
下限电压	5.020V	5V

8.4 Multisim 应用举例三：方波三角波发生器电路仿真与分析

用运放设计一个方波和三角波发生电路。改变电阻和电容的取值，观察其频率的变化。

1. 电路图及仿真简析

电路图如图 4.7.11 所示。

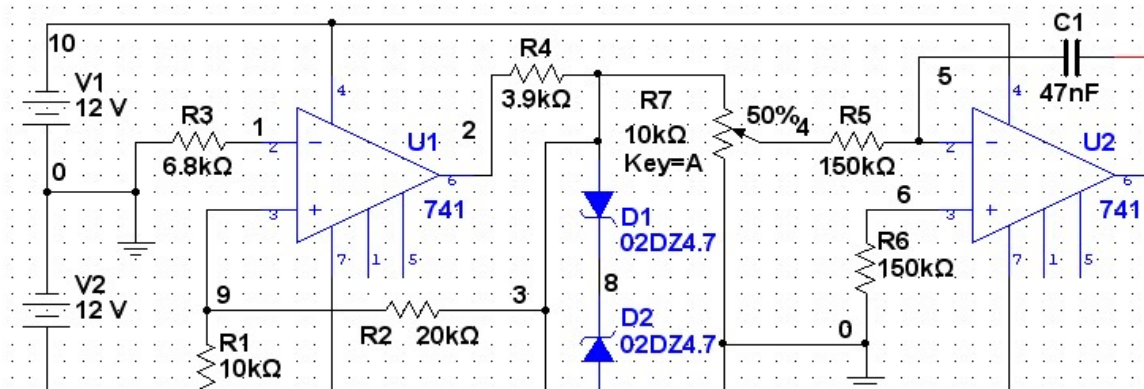


图 4.7.11 方波三角波发生电路图（运放用 741）

仿真后虚拟示波器显示波形如图 4.7.12 所示。

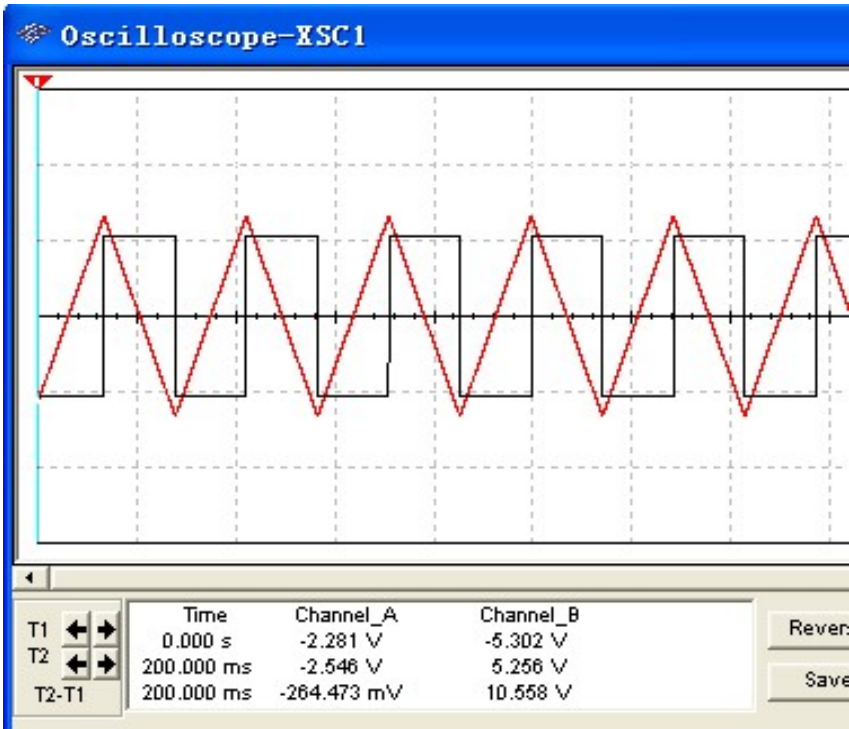


图 4.7.12 方波三角波发生电路的示波器显示

由图 4.7.11 可见, 该电路包括由前一个运放 741 组成的迟滞比较器和由后一个运放 741 组成的积分器两个部分。前一 741 产生方波 (在示波器的 B 踪), 经后一 741 积分后产生三角波 (在示波器的 A 踪)。为保证所需的极性, 这里将积分器的输出与比较器的同相输入端相连。

根据该电路自激振荡过程分析及 Multisim 仿真分析可知, 这是一个对称的三角波和方波振荡。选择不同的双端稳压管稳压值 (这里取的是两个对头的稳压值为 4.7V 的单端稳压管 D_1 、 D_2), 可调节输出方波的幅值, 但同时影响三角波的幅值; 改变 R_1/R_2 比值可调节三角波的幅值, 影响振荡频率, 但不影响方波的幅值; 改变电位器 R_7 的分压系数和积分时间常数 R_5C_1 , 可调节振荡频率, 但不影响输出波形幅值。

2. 电路原理详细分析

电路原理如图 4.7.11 所示, 此电路中包括了方波和三角波发生电路。其中一个运放 U_1 与周边电路组成迟滞比较器, 用于产生对称方波, 如图 4.7.13 所示。图中标 3 处便是对称方波的输出点。

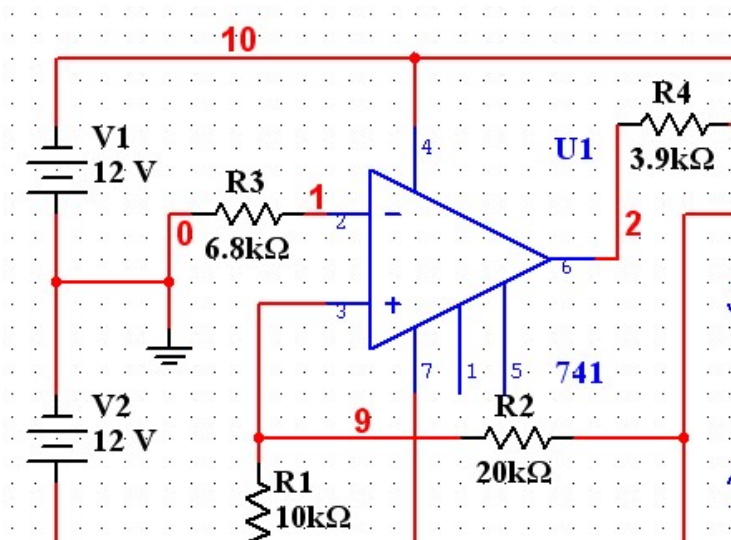


图 6.7.13 第一级运放电路 (产生方波)

另一个运放 U_2 则与周边电路组成积分器, 如图 4.7.14 所示, 它的输入便是由 U_1 产生的对称方波, 经过 U_2 积分便产生了三角波。

电路的自激振荡过程分析如下。 U_1 迟滞比较器的基准电压 $E_i=0$, 它的高低输出电压由稳压管 D_z 的稳定电压决定。即: $E_g=E_w$, $E_d=-E_w$

它的上门限电压为 $E_{ms} = -\frac{R_1}{R_2} E_d = \frac{R_1}{R_2} E_w$

下门限电压为 $E_{mx} = -\frac{R_1}{R_2} E_g = -\frac{R_1}{R_2} E_w$

门限宽度为 $\Delta E_m = \frac{R_1}{R_2} (E_g - E_d) = 2 \frac{R_1}{R_2} E_w$

式中, E_w 为稳压管的稳定电压, E_g 为方波的正幅值电压, E_d 为方波的负幅值电压, E_{ms} 为三角波的正向幅值电压, E_{mx} 为三角波的负向幅值电压。

当 3 处的输出电压 $V_3 = E_d = -E_w$, 经过电位器 R_7 的分压后, 加到积分器的输入电压为负值, 若 R_7 的分压系数为 a , 则此值为 $-aE_w$ 。积分器 U_2 对此电压进行积分, 其输出将从 E_{mx} 线性增长到 E_{ms} , 所需时间为 T_1 。当达到 E_{ms} 时, 比较器输出从 E_d 突变到 $E_g = E_w$ 。这时, 积

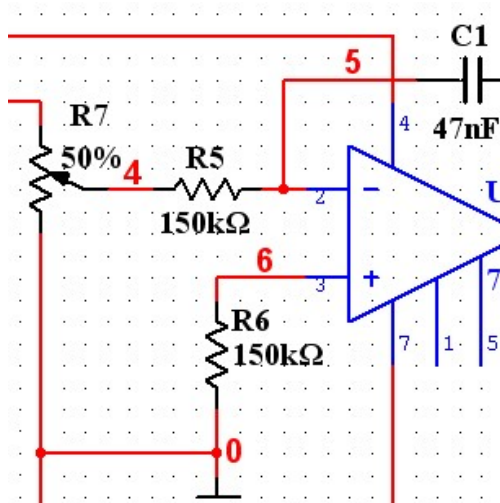


图 6.7.14 第二级运放电路 (产生三角波)

分器的输入电压极性反号，变为 aE_w ，积分器反向积分，它的输出电压从 E_{ms} 线性下降，直到 E_{mx} ，所需时间为 T_2 。当回到 E_{mx} 时，上述过程又重复，如此形成自激振荡。

反相积分器的输出电压和输入电压之间的一般关系式为 $V_o = -\frac{1}{\tau} \int V_i dt + V_o(0)$ ，其中 τ 为积分时间常数， $V_o(0)$ 为积分初始值。

在由积分器和迟滞比较器组成的振荡电路中，积分器输出电压的区间由迟滞比较器的上下门限电压决定，即 $E_{ms}-E_{mx}$ 。

若 T_1 代表积分器从 E_{mx} 积分到 E_{ms} ，相应的输入电压和积分时间常数分别为 V_{i1} 和 τ_1 ，而 T_2 代表积分器从 E_{ms} 积分到 E_{mx} 所需的时间，相应的输入电压和积分时间常数分别为 V_{i2} 和 τ_2 。这样，可以得到下面的关系：

$$\Delta E_m = E_{ms} - E_{mx} = -\frac{1}{\tau_1} \int_0^{T_1} V_{i1} dt$$

$$\Delta E_m = -(E_{mx} - E_{ms}) = \frac{1}{\tau_2} \int_0^{T_2} V_{i2} dt$$

$$T_1 = T_2 = \frac{2R_1 R_5 C_1}{aR_2}$$

$$\text{振荡频率为 } f_z = \frac{1}{T_z} = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{R_2}{4R_1 R_5 C_1} a。$$

3. 仿真结果详细分析

由上述理论分析，利用该电路图中的元器件数值可以算出，积分器的理论线性增长与下降的时间都是 14.1ms。而仿真分析结果如图 4.7.15 和图 4.7.16 所示，其中，上升时间和下降时间都为 $t=14.35\text{ms}$ ，与理论值基本相符。

通过上述分析，可以知道在改变分压系数和积分常数时，可以调节振荡频率，但是不影响输出电压的幅值；而改变 R_1/R_2 比值时可以改变三角波的幅值和振荡频率，但是不会影响方波的幅值。

如改变分压系数为 0.2 时，则可以改变振荡频率。理论上振荡周期为 70.5ms。仿真波形的振荡周期为 71.07ms，如图 4.7.17 所示，与理论值基本相符，而且三角波与方波的幅值没有太大的变动。

如改变 $R_1/R_2=1$ 时，电路仿真波形如图 4.7.18 所示。很明显，三角波的幅值变大了，振荡周期与 $R_1/R_2=0.5$ 相比而言变大了，即振荡频率变小了。

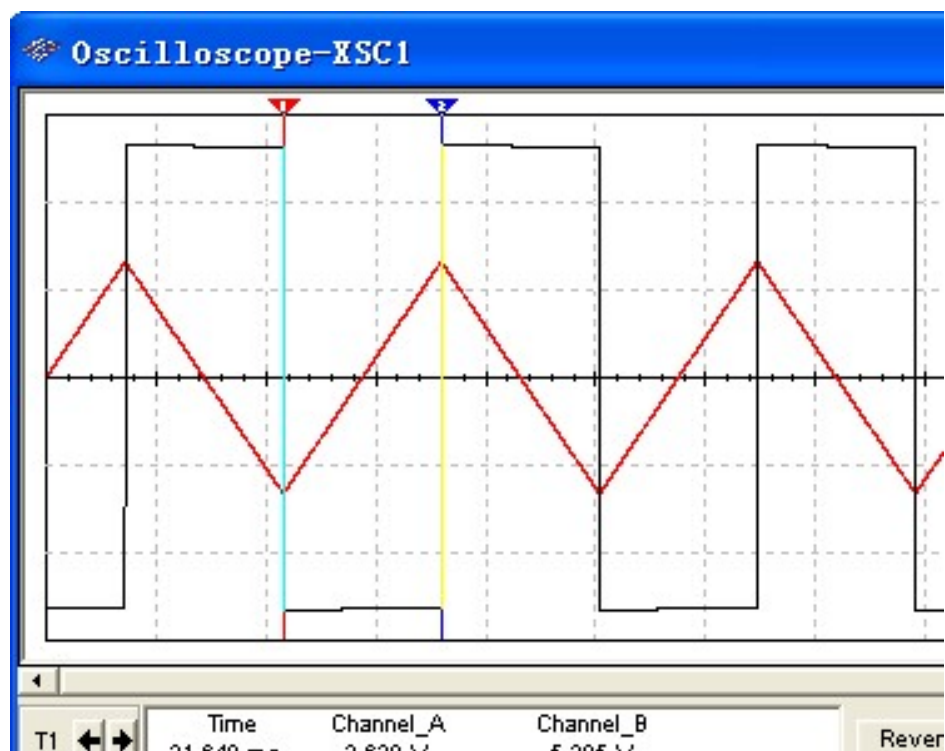


图 6.7.15 上升时间计算仿真波形图

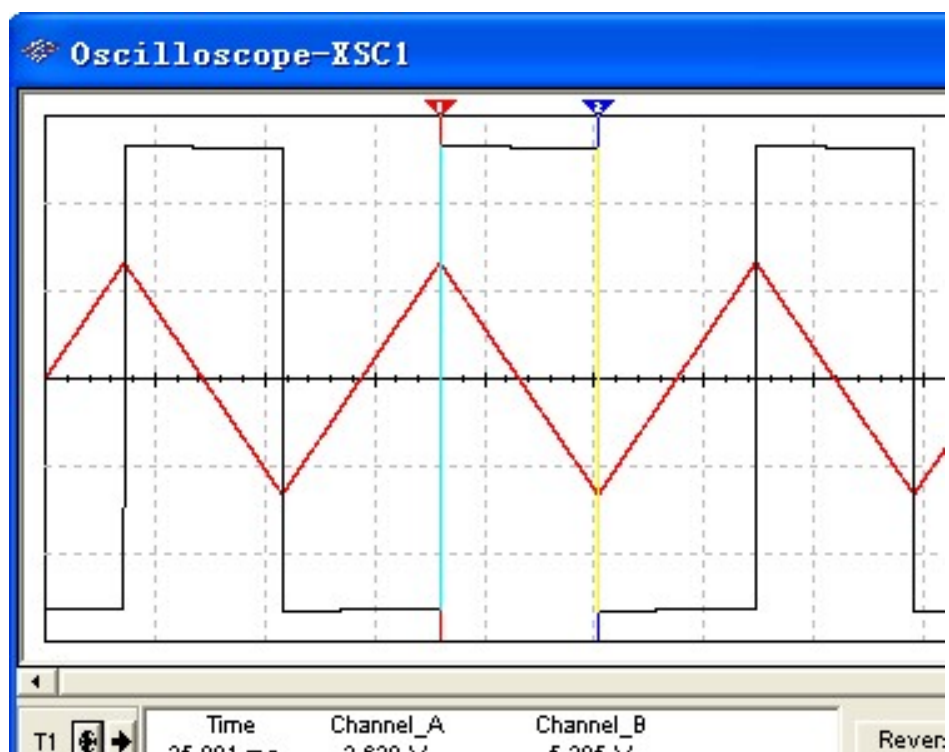


图 6.7.16 下降时间计算仿真波形图

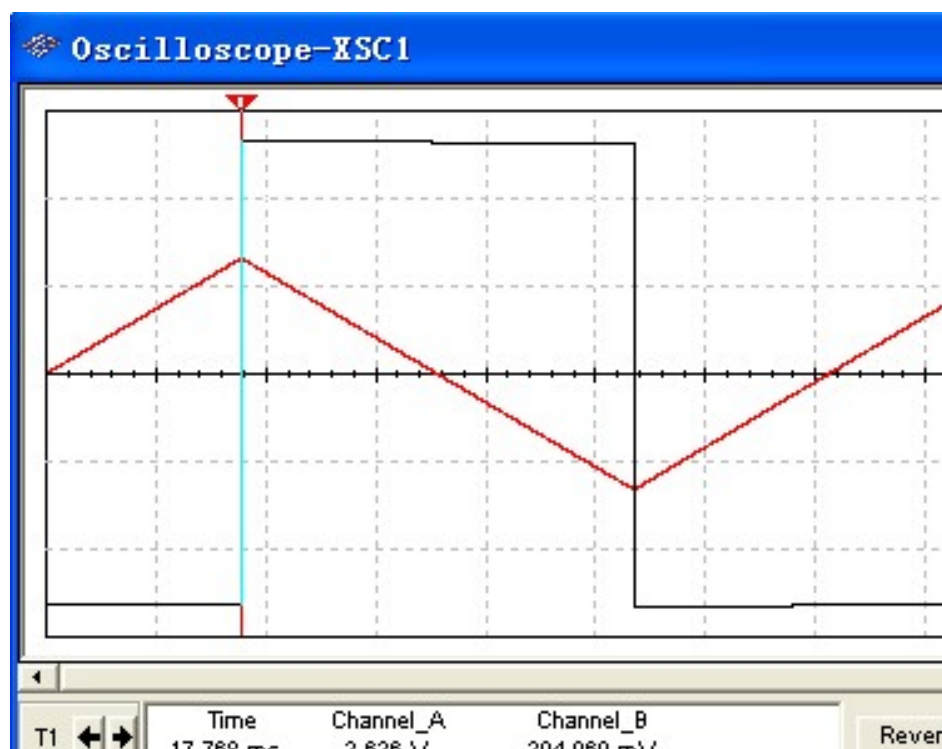


图 6.7.17 改变分压系数后的仿真波形图

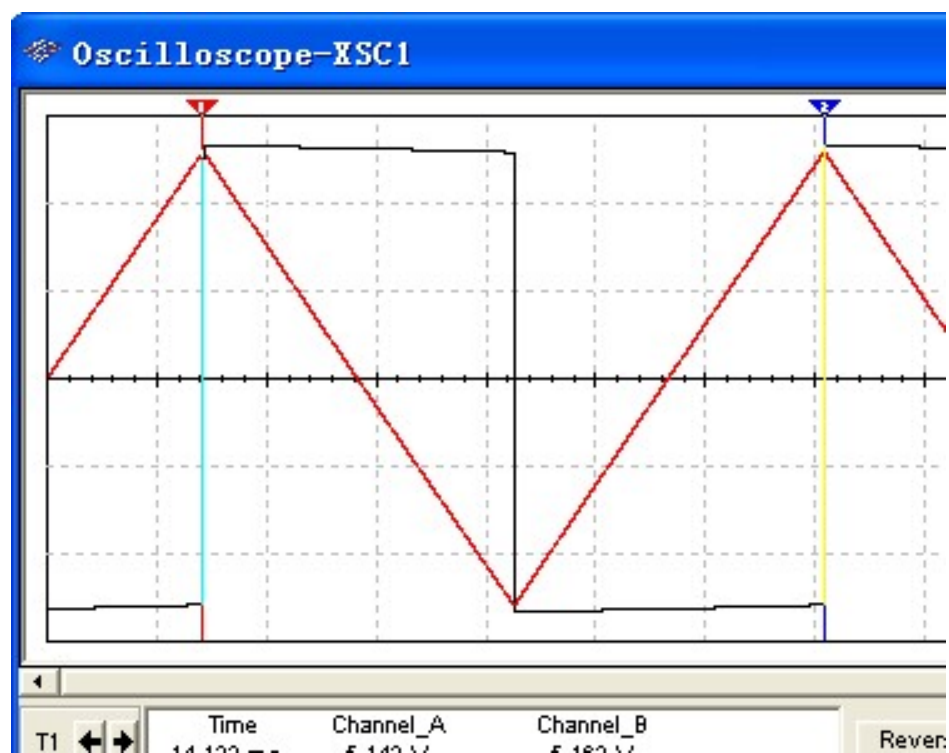


图 6.7.18 改变 R_1/R_2 后的仿真波形图

第二篇 电子电路基础实验

实验一 基尔霍夫定律实验研究

一、实验目的

验证基尔霍夫电流、电压定律的正确性，加深对基尔霍夫定律的理解。

二、实验理论基础

基尔霍夫定律是电路的基本定律。测量某电路中的各支路电流及每个元件两端的电压，应能分别满足基尔霍夫电流定律（KCL）和电压定律（KVL）。即对电路中的任一个节点而言，应有 $\sum I=0$ ；对电路中的任何一个闭合回路而言，应有 $\sum U=0$ 。

注意：运用上述定律时必须注意各支路或闭合回路中电流的正方向，此方向可预先任意设定。

三、实验电路设计

本实验使用图 1 所示的电路来验证基尔霍夫定律。

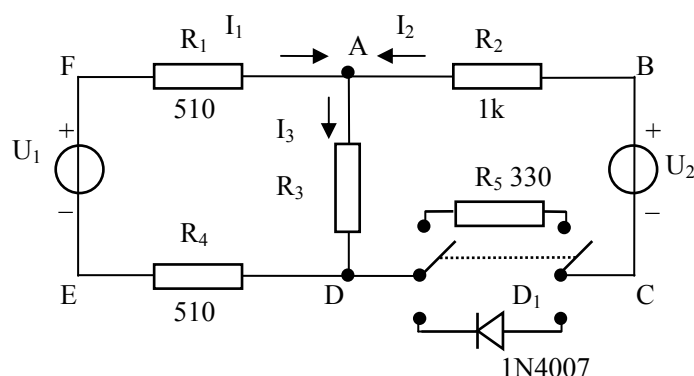


图 1 验证基尔霍夫定律的实验电路

四、实验任务要求

实验前先任意设定三条支路和三个闭合回路的电流正方向。图1中的 I_1 、 I_2 、 I_3 的方向已设定。三个闭合回路的电流正方向可设为ADEF、BADCB和FBCEF。

将两路直流稳压源接入电路，其中 $U_{s1}=6V$ ， $U_{s2}=12V$ ；先将电阻**R5**接入电路，完成下列步骤。再用二极管**D1**代替**R5**，重复实验。

1、先理论计算出3个支路的电流值 I_1 、 I_2 和 I_3 记入表1中，然后用电流表分别测量支路电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ，将测量数据记录于表1中，验证基尔霍夫电流定律是否成立。

表1 各支路电流测量值

	I_1 (mA)	I_2 (mA)	I_3 (mA)
计算值			
测量值			

2、先理论计算出表2所列各节点之间的电压并记录于表2中，然后用数字万用表分别测量各节点间的电压值，记录数据，并验证基尔霍夫电压定律是否成立。

表.2 各节点间电压测量值

	U_1 (V)	U_2 (V)	U_{FA} (V)	U_{AB} (V)	U_{AD} (V)	U_{CD} (V)	U_{DE} (V)
计算值							
测量值							

五、实验操作要点

- 1、所有需要测量的电压值，均以万用表测量的数据为准。电压源的输出电压 U_1 、 U_2 也需要测量，并以测量值为准，不可取电源本身的显示值。
- 2、需防止稳压电源两个输出端碰线短路。
- 3、根据图1的电路参数，先计算出待测的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 以及各电阻上的电压值的理论值，以便实验测量时可正确地选择仪表的量程和判断测量的正确与否。

六、思考题

- 1、如果设定不同的电压与电流参考方向，基尔霍夫定律是否仍然成立？
- 2、如果电路中含有非线性器件，基尔霍夫定律是否仍然成立？（在图1所示电路中，可选择将二极管1N4007替换电阻 R_5 连入电路，进行实验验证。）

实验二 叠加定理实验研究

一、实验目的

- 1、实验研究叠加定理的正确性；
- 2、加深叠加定理适用范围的认识。

二、实验理论基础

叠加定理是指：若干个电源在某线性网络的任一支路产生的电流或在任意两个节点之间产生的电压，等于这些电源分别单独作用于该网络时，在该部分所产生的电流与电压的代数和。需要注意的是，对于非线性网络，叠加定理将不再成立，也不能用叠加定理计算或处理功率、能量等二次的物理量。

三、实验电路设计

实验电路如图1所示。

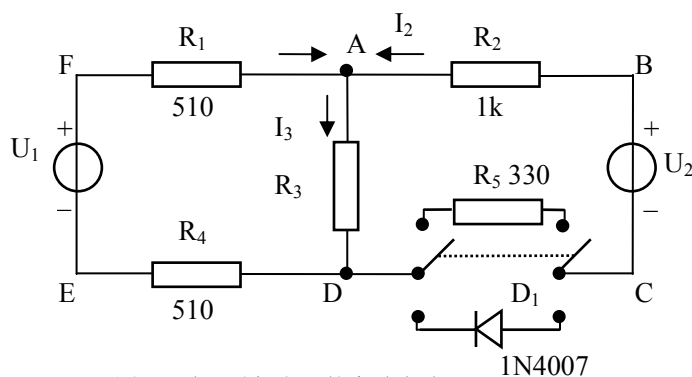


图1 验证叠加定理的实验电路

四、实验任务要求

- 1、将两路稳压电源 U_1 和 U_2 的输出分别调节为 6V 和 12V
- 2、在节点 F, E 之间接入电压源 U_1 , U_2 处不接电源, 将节点 B, C 短接, 测量各点电压与各支路电流, 将测量数据记录于表 1。
- 3、 U_1 处不接电源, 将节点 F, E 之间短路, 在节点 B, C 之间接入电压源 U_2 , 再次测量各点电压与各支路电流, 将测量数据记录于表 1。
- 4、同时接上电压源 U_1 和 U_2 , 重复上述测量, 将测量数据记录于表 1。

根据表 1 中的测量数据验证叠加定理是否成立。

表 1 实验数据记录

	U_1	U_2	I_1	I_2	I_3	U_{AB}	U_{CD}	U_{AD}	U_{DE}	U_{FA}
U_1 单独作用										
U_2 单独作用										
U_1 与 U_2 共同作用										

*单位: 电压 (V), 电流 (mA)

- 5、将 R_5 更换为二极管 D_1 , 重复步骤 2、3、4, 将测量数据记录于表 2, 根据表 2 中的测量数据验证叠加定理是否成立。

表 2 实验数据记录

	U_1	U_2	I_1	I_2	I_3	U_{AB}	U_{CD}	U_{AD}	U_{DE}	U_{FA}
U_1 单独作用										
U_2 单独作用										
U_1 与 U_2 共同作用										

*单位: 电压 (V), 电流 (mA)

五、实验操作要点

- 1、根据实验任务要求, 顺序完成每一步骤。用电流表测量各支路的电流, 尽可能不使用万用表的电流挡来测量。
- 2、实验测量时, 注意及时更换仪表量程。

六、思考题

- 1、可否直接将不起作用的电源 (U_1 或 U_2) 短接置零?
- 2、根据测量数据, 计算各种状况下, 某一电阻消耗的功率, 并验证功率是否具有叠加性。

实验三 戴维南定理与诺顿定理的实验研究

一、实验目的

- 1、实验研究戴维南定理与诺顿定理。
- 2、掌握有源二端口网络等效电路参数的测量方法。

二、实验原理

任何一个线性网络，如果只研究其中一条支路的电压与电流，则可将电路的其余部分视为一个含源的单端口网络。该网络可以等效于一个电压源或者是一个电流源。

如果将该网络等效于一个电压源，则电压源的输出电压等于该网络的开路电压，等效内阻等于该网络中各电源均为零时的无源网络的入端电阻，这就是戴维南定理。如图 1 所示，其电压源的电动势 U_s 等于这个有源二端口网络的开路电压 U_{oc} ，其等效电阻 R_0 等于该网络中所有独立源均置零（理想电压源视为短接，理想电流源视为开路）时的等效电阻。

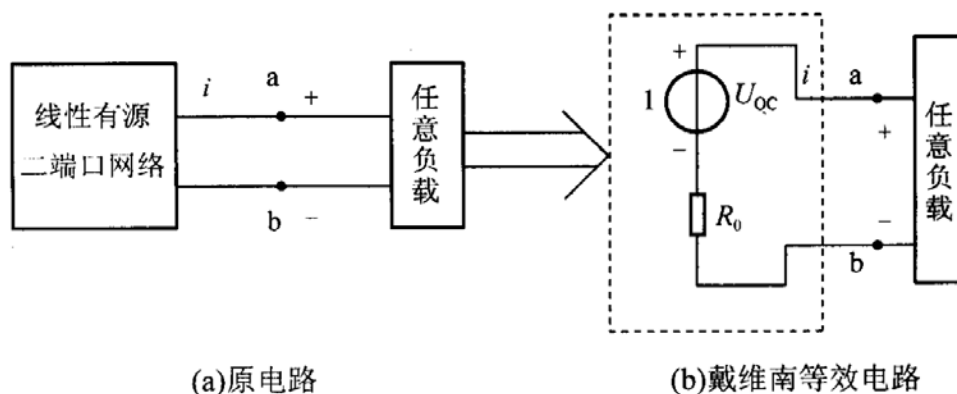


图 1 戴维南等效电路图

如果将该网络等效于一个电流源，则电流源的输出电流等于该网络的短路电流，等效内导等于该网络中各电源均为零时的无源网络的入端电导，这就是诺顿定理。

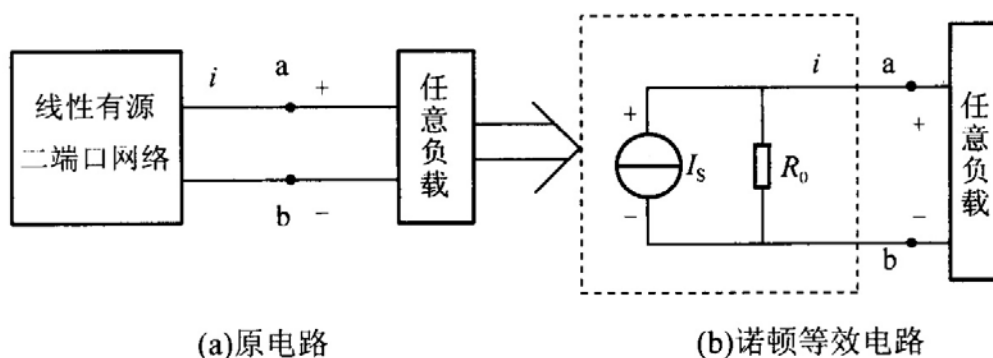


图 2 诺顿等效电路图

有源二端口网络等效参数的测量方法：

1、开路电压、短路电流法测 R_0 。在有源二端口网络输出端开路时，用电压表直接测出其输出端的开路电压 U_{oc} ，然后再将其输出端短路，用电流表测其短路电流 I_{sc} ，其等效内阻为 $R_0 = U_{oc} / I_{sc}$ 。如果二端口网络的内阻很小，若将其输出端短路则易损坏其内部元件，因此不宜用此法。

2、伏安法。用电压表、电流表测出有源二端口网络的外特性如图 3 所示。根据外特性曲线输出斜率 $tg\phi$ ，则内阻为

$$R_0 = \frac{U_{oc} - U_N}{I_N}。其中，额定值 I_N 时的输出端电压值为 U_N 。$$

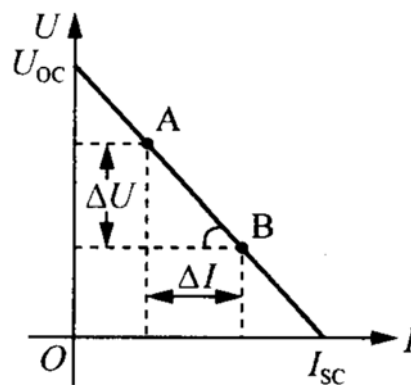


图 3 开路电压、短路电流法

3、半电压法测 R_0 。如图 4 所示，当负载 R_L 的电压为被测网络开路电压的一半时，负载电阻即为被测有源二端口网络的等效内阻值。

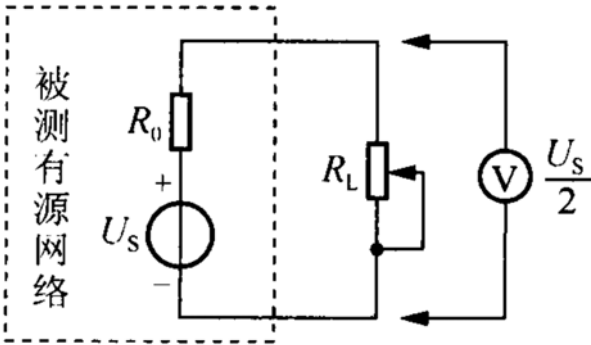


图 4 半电压法测试图

三、实验内容

实验电路如图 5 所示，

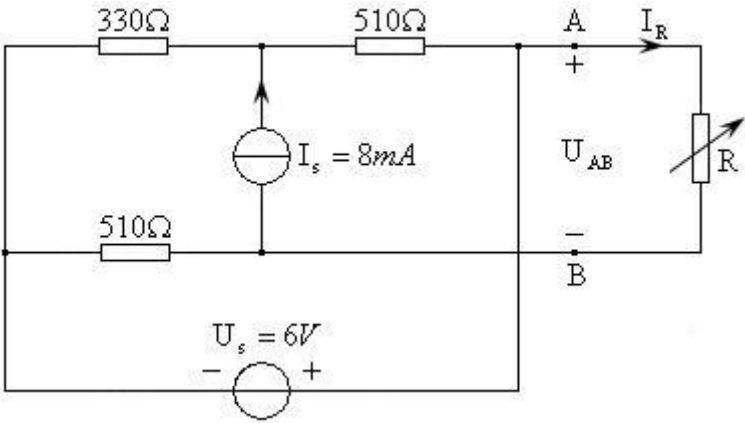


图 5 戴维南与诺顿定理的实验电路

(1)用开路电压、短路电流法测定戴维南等效电路的 U_{OC} 、 R_0 和诺顿等效电路的 I_{SC} 、 R_0 。按图 5 接入稳压电源 $U_s=6V$ 和恒流源 $I_s=8mA$ ，接入负载 R_L 。测出 U_{OC} 和 I_{SC} ，并计算出 R_0 (测 U_{OC} 时，不要接入电流表)填入表 1 中。

表 1 实验数据

U_{OC} (V)	I_{SC} (mA)	$R_0=U_{OC}/I_{SC}$ (Ω)

(2)负载实验。按图 5 接入负载 R_L ，改变 R_L 阻值，测量有源二端口网络的外特性，将实验数据填入表 2 中。对 U - I 进行作图。注意：尽量在 U_{AB} 从 0—>开路电压 U_{OC} 之间均匀选取测试点。

表 2 实验数据

R_L (Ω)									
U_{AB} (V)									
I (mA)									

(3)验证戴维南定理：用一只 $1k\Omega$ 的电位器作为 R_0 ，将其阻值调整到等于步骤(1)所得的等效电阻 R_0 的值，然后令其与直流稳压电源 U_{oc} (即步骤(1)所测得的开路电压值)相串联，按图 1 进行实验，将实验数据填入表 3 中，作图对戴维南定理进行验证。注意：尽量在 U_{AB} 从 0—>开路电压 U_{OC} 之间

均匀选取测试点。

表 3 实验数据

$R_L (\Omega)$									
$U_{AB} (V)$									
$I (mA)$									

(4) 验证诺顿定理：用一只 $1k\Omega$ 的电位器作为 R_o ，将其阻值调整到等于步骤(1)所得的等效电阻 R_o 的值，然后按图 2，令其与直流恒流源 I_s (调到步骤(1)所测得的短路电流 I_{sc} 的值) 相并联，进行实验。将实验数据填入表 4 中，作图对诺顿定理进行验证。注意： U_{AB} 尽量均匀取值。

表 4 实验数据

$R_L (\Omega)$									
$U_{AB} (V)$									
$I (mA)$									

四、实验操作要点

- 1、根据实验任务要求，完成每一步骤。为方便比较验证，在以上 3 个实验中 R_L 的取值尽量相近。
- 2、直流电压源不能短路，且电源只能向外提供功率而不能从外吸收功率，以免损坏设备。

五、思考题

- 1、在求戴维南或诺顿等效电路时，做短路实验，则测 I_{sc} 的条件是什么？在本实验中可否直接做负载短路实验？实验前对线路图图 5 预先做好计算，以便调整实验线路及测量时可准确地选取电表的量程。
- 2、简述测量有源二端口网络开路电压及等效内阻的几种方法，并比较其优缺点。

实验四 OrCAD 使用练习

一、实验目的

1. 了解 OrCAD 套件中的 Capture 和 PSpice A/D 软件的常用菜单和命令的使用。
2. 掌握 OrCAD 中 Capture 软件的电路图输入和编辑方法。
3. 学习 OrCAD 中 PSpice A/D 软件的分析设置、仿真、波形查看的方法。
4. 学习半导体器件特性、电路特性的仿真分析方法。

二、实验理论基础

1. 二极管特性的仿真分析

二极管伏安特性是指二极管两端的电压与流过二极管的电流之间的关系，主要特点是单向导电性和非线性，并且易受温度的影响。用 PSpice 软件仿真分析二极管的伏安特性的过程如下。

1) 输入电路图

(1) 从元件库中依次取出 VSRC、R、D1N4148、AGND 等元件放置在电路图上，如图 1 所示。先不考虑对二极管的输出波形进行仿真，因此取直流电压源 VSRC 元件即可。

(2) 按图中线路连接关系进行连线。

(3) 将电阻的阻值设为 $1k\Omega$ ，电阻名称设为 R，电压源名称设

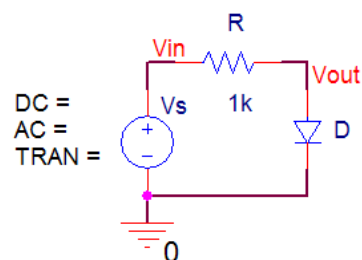


图 1 二极管特性测试电路

为 V_s 。

2) 设置分析参数

二极管伏安特性的仿真分析对电压源 V_s 进行直流扫描 (DC Sweep) 分析。为了仿真二极管的正向导通特性、反向特性和击穿特性, 应使 V_s 的变化范围足够大。所以, 二极管测试电路的直流扫描分析参数可设置为: 扫描变量类型为电压源, 扫描变量为 V_s , 扫描类型为线性扫描, 初始值为 -200V, 终值为 40V, 增量为 0.1V, 如图 2 所示 (该对话框通过运行主菜单 PSpice 下的 New Simulation Profile 命令弹出, Profile 名称可自定义, 这里定义为 DC)。

为了仿真分析二极管在不同温度下的伏安特性, 还需设置直流扫描的次要分析 (Secondary Sweep, 相当于旧版本软件中的内嵌分析 Nested Sweep), 即对于电压源 V_s 的每一个扫描点, PSpice 还要对不同的温度进行仿真计算。在图 2 所示对话框中选中 Options 栏中的 Secondary Sweep, 如图 3 所示, 然后将次要分析参数设置为: 扫描变量类型为温度, 扫描类型为列表扫描, 扫描值为 -10 (°C), 0 (°C), 30 (°C)。

3) 运行仿真分析程序

在 Capture 程序中按 F11 功能键或从 PSpice 主菜单中选择 Run 命令, 调出 PSpice A/D 程序对所输入的二极管特性测试电路进行直流扫描仿真分析。

4) 查看仿真结果

在 PSpice A/D 的 Probe 窗口中显示 $I(D)$ 曲线, 结果如图 4 所示。需注意的是, 图 4 只是二极管电流与电压源之间的关系, 还不是二极管的伏安特性曲线。为了得到二极管的伏安特性曲线, 应该将横坐标变量改为二极管两端的电压。

从 PSpice A/D 的 Plot 主菜单中选择 Axis Settings... 命令, 在弹出

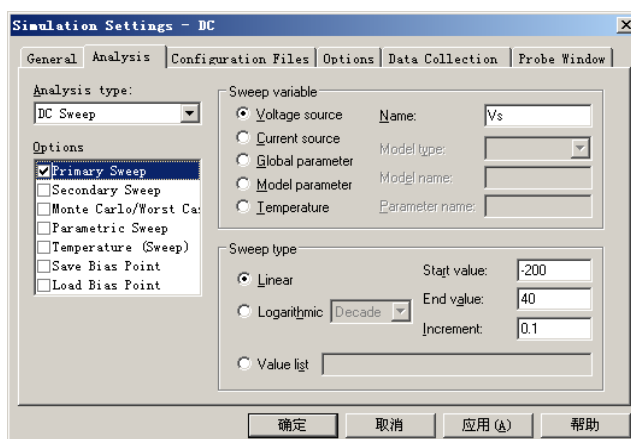


图 2 二极管电路的直流分析设置

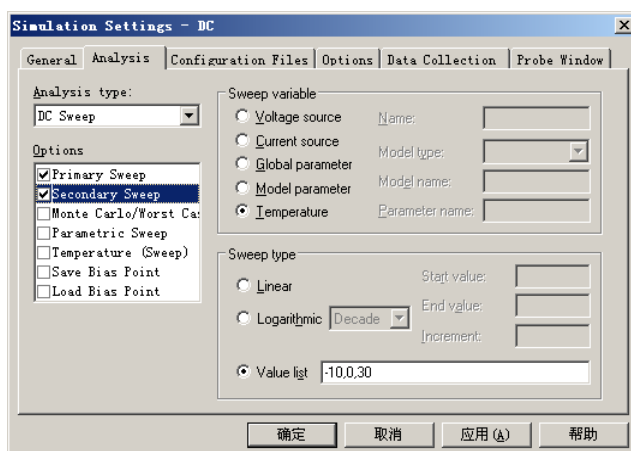


图 3 次要分析设置 (温度)

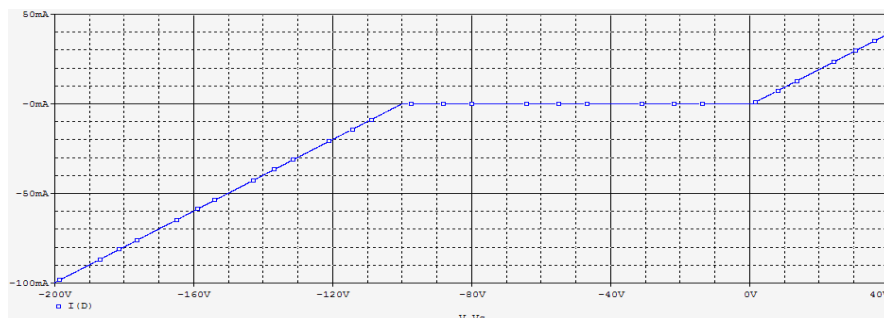


图 4 $I(D)$ 与电压源 V_s 之间的关系

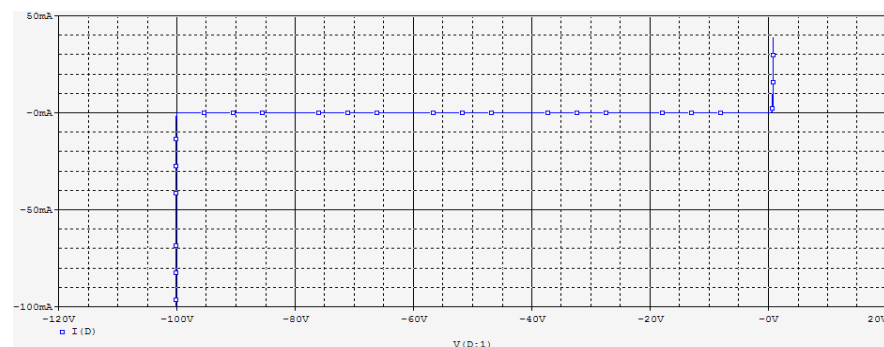


图 5 二极管的伏安特性曲线

的对话框的 X Axis 属性页中按下 Axis Variable...按钮，选择二极管电压 $V(D:1)$ 作为 X 轴坐标变量，得到二极管的伏安特性曲线，如图 5 所示。从图中可以看出二极管正偏时导通，电压近似为 0；二极管反偏时截止，电流近似为 0；当反向偏置电压过大时，则二极管处于反向击穿状态，反向电流将急剧增大。

为了得到二极管在不同温度下的正向伏安特性曲线，需改变 X 轴和 Y 轴的坐标范围。从 Plot 菜单中选择 Axis Settings...命令，将 X 轴坐标范围设置为 0V 至 1V，如图 6 所示。类似地，从 Plot 菜单中选择 Axis Settings...命令，将 Y 轴坐标范围设置为 0mA 至 40mA，如图 7 所示。得到的二极管在不同温度下的伏安特性曲线如图 8 所示，由电子技术知识可知，温度升高时二极管电流增大，所以最左边的特性曲线为 30℃时的伏安特性，中间曲线是 0℃时的伏安特性，右边曲线是 -10℃时的伏安特性。30℃时的伏安特性曲线与 0℃时的伏安特性曲线之间的间隔要比 0℃时的伏安特性曲线与 -10℃时的伏安特性曲线的间隔大，这也是在设置中选择 -10℃、0℃、30℃这三个不同温度间隔的原因。

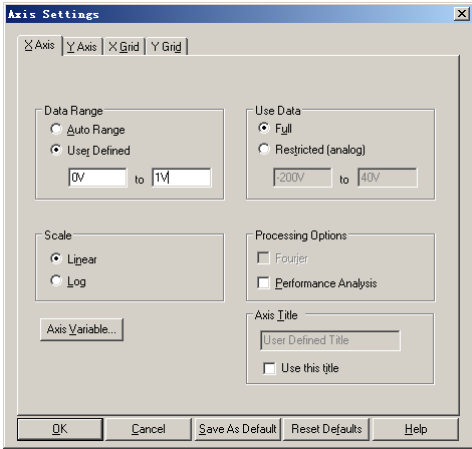


图 6 X 坐标轴设置

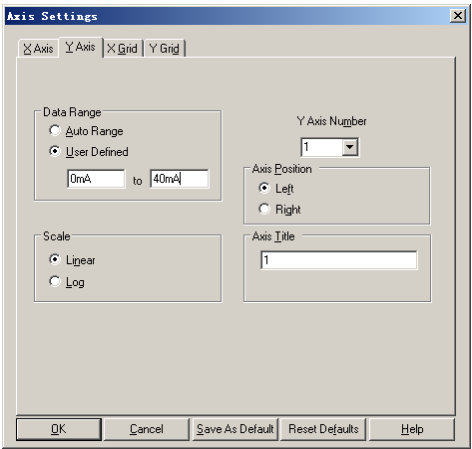


图 7 Y 坐标轴设置

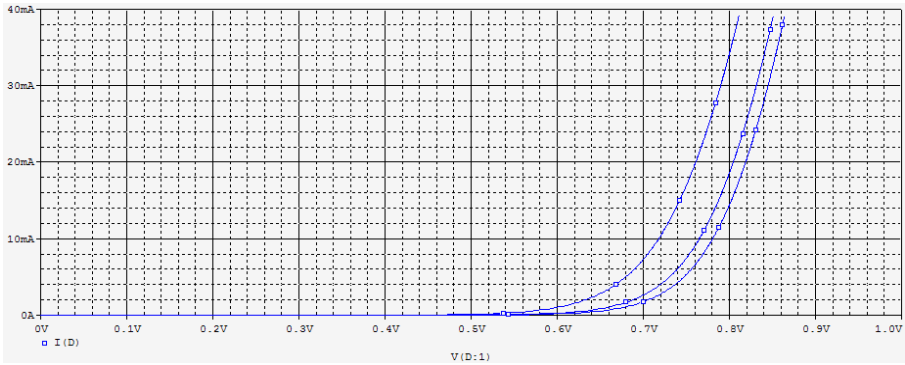


图 8 二极管在不同温度下的伏安特

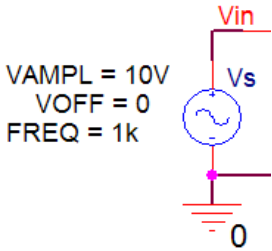


图 9 VSIN 元件参数设置

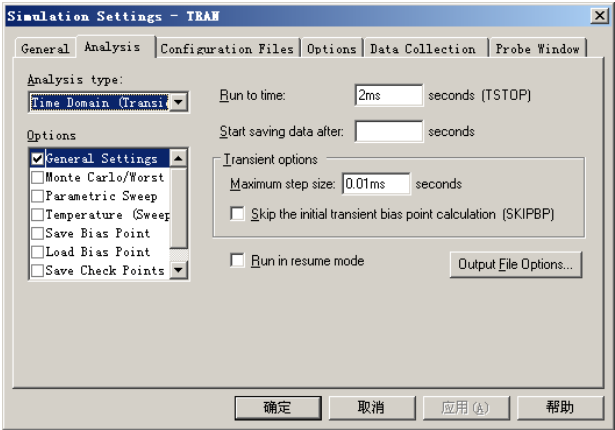


图 10 瞬态分析参数设置

5) 仿真二极管两端的电压波形

为了仿真分析二极管两端的电压波形,需要在电路中加入瞬态电源。将电路中的电源 V_s 用 VSIN 元件代替,并设置元件参数为 $V_{OFF}=0$, $V_{AMPL}=10V$, $FREQ=1kHz$, 如图 9 所示。设置瞬态分析 (Transient Analysis), 如图 10 所示, 参数为 Run to time=2ms, Maximum step size=0.01ms。然后执行仿真分析, 在 PSpice A/D 的 Probe 窗口中显示 $V(V_{out})$, 结果如图 11 所示。

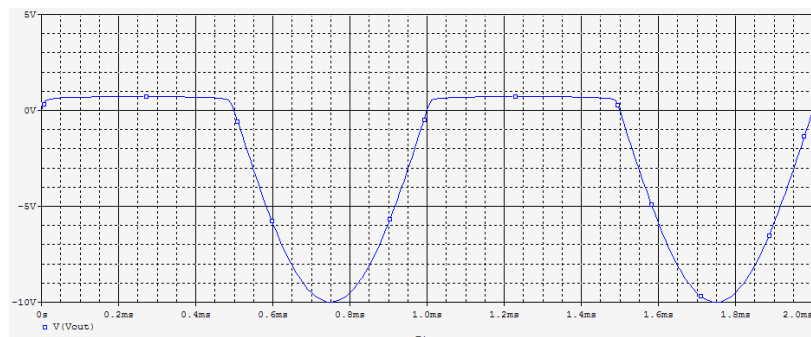


图 11 二极管两端的电压波形

2. 三极管特性的仿真分析

三极管的共射输出特性曲线是在一定的基极电流下, 三极管的集电极电流与集电极发射极间电压之间的关系。用 PSpice 软件仿真分析三极管的伏安特性的过程如下。

1) 输入电路图

从元件库中依次取出 ISRC、Q2N3904、VSRC、R、AGND 等元件放置在电路图上, 并连接好线路, 如图 12 所示。注意图中电流源 I_B 的方向。将电阻的阻值设为 $2k\Omega$, 电阻名称设为 R_c ; 电流源名称设为 I_B , 电压源名称设为 V_{CC} 。

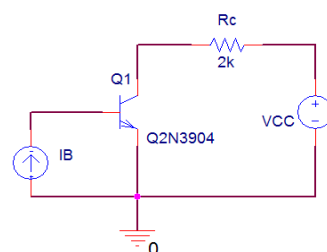


图 12 三极管特性测试电路

2) 设置分析参数

三极管输出特性的仿真分析需要设置直流扫描分析, 并设置直流次要分析。直流扫描分析参数可设置为: 扫描变量类型为电压源, 扫描变量为 V_{CC} , 扫描类型为线性扫描, 初始值为 0V, 终值为 50V, 增量为 0.1V, 如图 13 所示。直流次要分析参数可设置为: 扫描变量类型为电流源, 扫描变量为 I_B , 扫描类型为线性扫描, 初始值为 0, 终值为 $100\mu A$, 增量为 $10\mu A$, 如图 14 所示。

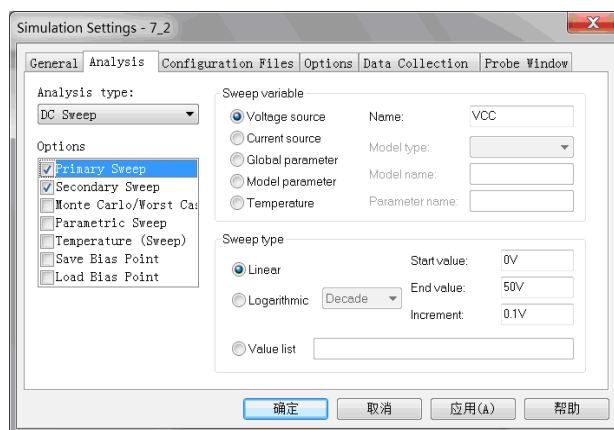


图 13 三极管电路的直流分析设置

3) 运行仿真分析程序

在 Capture 程序中按 F11 功能键或从 PSpice 主菜单中选择 Run 命令, 调出 PSpice A/D 程序对所输入的三极管特性测试电路进行直流仿真分析。

4) 查看仿真结果

在 PSpice A/D 的 Probe 窗口中显示三极管集电极电流 $I_C(Q1)$ 的曲线, 如图 15 所示, 注意缺省的 X 坐标为直流扫描分析的扫描变量, 即电压源 V_{CC} , 所以此时的曲线并不是三极管的输出特性曲线。因此, 还需将 X 轴变量设置为

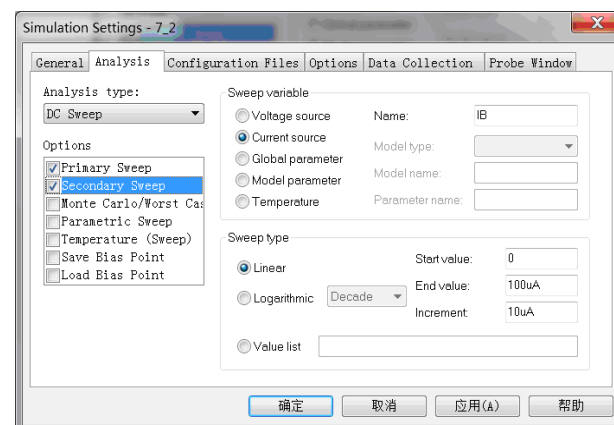


图 14 次要分析设置

三极管集电极与发射极之间的电压（在图 12 中即集电极电压） $V(Q1:c)$ ，并选择合适的坐标范围，可得到三极管的输出特性曲线，如图 16 所示，其中的曲线从上到下依次对应 $I_B=100\mu A$ 、 $90\mu A$ 、...、 $10\mu A$ 、 $0\mu A$ 。

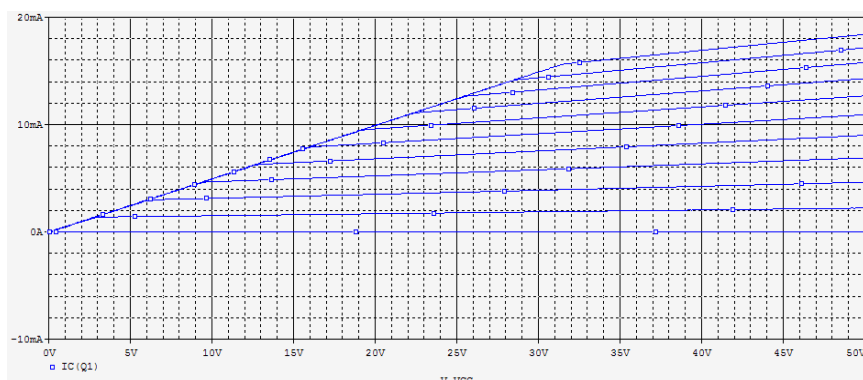


图 15 $I_C(Q1)$ 与电压源 V_{CC} 的关系

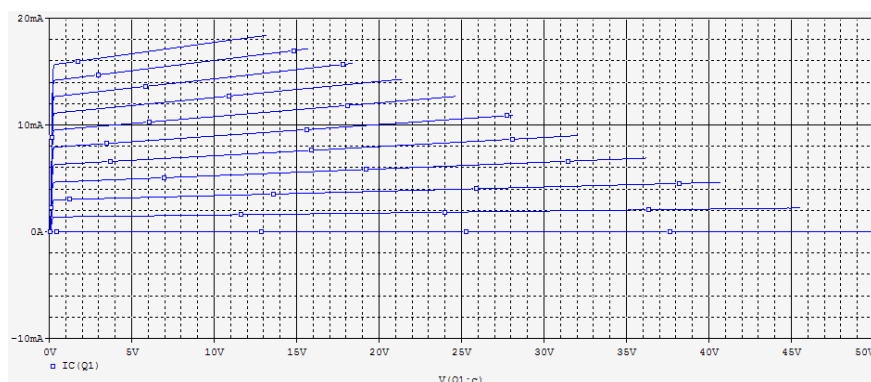


图 16 三极管的输出特性曲线

3. 对称差分放大电路的基本特性分析

1) 首先利用 Capture 画出对称的差分放大电路的电路图

打开 OrCAD Capture，新建一个类型为 Analog and Mixed A/D 的项目 Project，然后开始画电路图。

(1) 从 BIPOLAR 库中取出两个 NPN 型晶体管 2N2222，分别命名为 Q1 和 Q2，这两个晶体管作为放大管。然后再取出另外两个 NPN 型晶体管 2N3904，将其分别命名为 Q3 和 Q4，用以组成恒流源，为放大管提供合适的工作电流，如图 17 所示。

(2) 从 ANALOG 库中取出 7 个电阻，放置在电路图中的合适的位置。电阻分别命名为 R_{C1} 、 R_{C2} 、 R_{S1} 、 R_{S2} 、 R_e 、 R_1 和 R_2 ；大小设置按前面的顺序依次为 $3k\Omega$ 、 $3k\Omega$ 、 100Ω 、 100Ω 、 $1k\Omega$ 、 $10k\Omega$ 和 $2k\Omega$ ，如图 17 所示。

(3) 直接从 Place 主菜单选 Power...，或是直接点绘图工具栏

上的“Place power”图标按钮，或是直接按快捷键 F，选择其中的 VCC/CAPSYM 放到电路图中，共放四个，其中两个保持 VCC 名称，另外两个的名称改为 VEE，如图 17

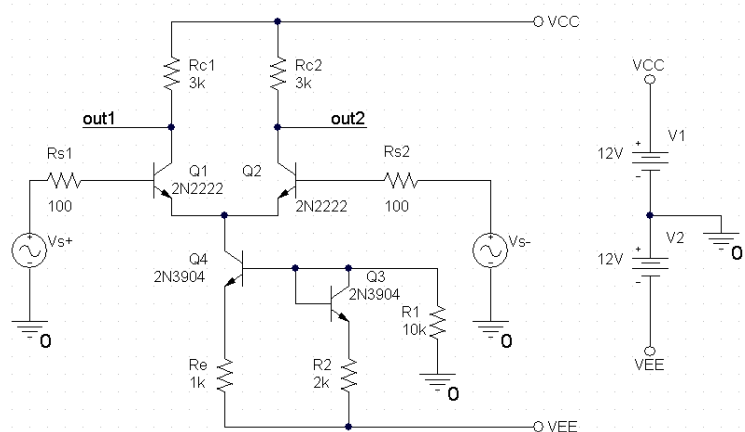


图 17 Capture 中的差分放大电路图

所示。

(4) 从 SOURCE 库中取出两个直流电压源 (VDC)，分别命名为 V1 和 V2，大小设为 12V，作为供电电源，如图 17 所示。

(5) 从 SOURCE 库中取出两个正弦电压源 (VSIN)，并将其分别命名为 “Vs+” 和 “Vs-”，放在如图 17 所示的位置，作为差分放大电路的信号源。双击正弦电压源的图形，弹出属性设置对话框如图 18 所示 (不全)，其中除了瞬态的属性 “VAMPL”、“VOFF” 和 “FREQ” 三项外，还有 “DC” 和 “AC” 两项。当进行直流扫描分析时，其中的 “DC” 项起作用，此时正弦电压源相当于直流电压源 (VDC)；当进行交流扫描分析时，其中的 “AC” 项起作用，此时正弦电压源相当于交流电压源 (VAC)；当进行瞬态分析时，其中的瞬态属性 “VAMPL”、“VOFF” 和 “FREQ” 三项起作用，这时输出的就是瞬态正弦信号。这里对 Vs+ 和 Vs- 均进行如下设置：DC=0，VOFF=0，VAMPL=10mV，FREQ=1k，其余设置保持原有默认值即可，只不过 Vs+ 的 “AC” 项设置为 10mV，而 Vs- 的 “AC” 项设置为 -10mV，这样才能起到差模输入的作用。值得一提的是，当选中某项字段 (如 “AC”) 后，再点图 18 上排的 “Display...” 按钮，就可以设置该项字段是否在电路图上显示出来，可以不显示，也可以同时显示该项名称及数值，还可以只显示名称或数值，这样有助于使电路图更加直观易看。

New Column...

Apply

Display...

Delete Property

Filter by: < Current properties >

Help

		AC	BiasValue Power	Color	DC	Designator	DF
1	SCHEMATIC1: PAGE1	10mV	-3.159nW	Default	0.56208mV		0

图 18 对正弦电压源进行设置

(6) 直接从 Place 主菜单选 Ground...，或是直接点绘图工具栏上的 “Place ground”

图标按钮，或是直接按快捷键 G，选择其中的 0/CAPSYM 或 GND/CAPSYM 放到电路图中，共放四个，如图 17 所示。

(7) 直接从差分放大电路的两个输出端拉两根导线出来 (即用主菜单 Place 的 Wire 命令)，分别将它们通过主菜单 Place 的 Net Alias 命令而命名为 “out1”、“out2”，如图 17 所示。用导线将图中元器件按照图示连接起来。

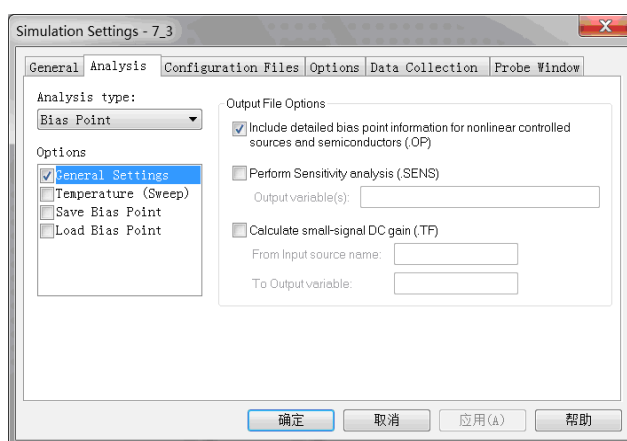


图 19 直流工作点分析设置

(8) 保存电路图。

2) 直流工作点分析

确定在 Capture 中新建的 Simulation Profile 的 PSpice 仿真分析类型设置中选择了 “Bias Point” (即直流工作点分析)，如图 19 所示。然后在 Capture 中单击菜单 “PSpice” 下的 “Run” 项，开始进行模拟计算。计算完成后，在 Capture 界面下，在主菜单项 “PSpice” 下面的 “Bias Points” 中选择 “Enable”，然后确认其中的 “Enable Bias Current Display” 和

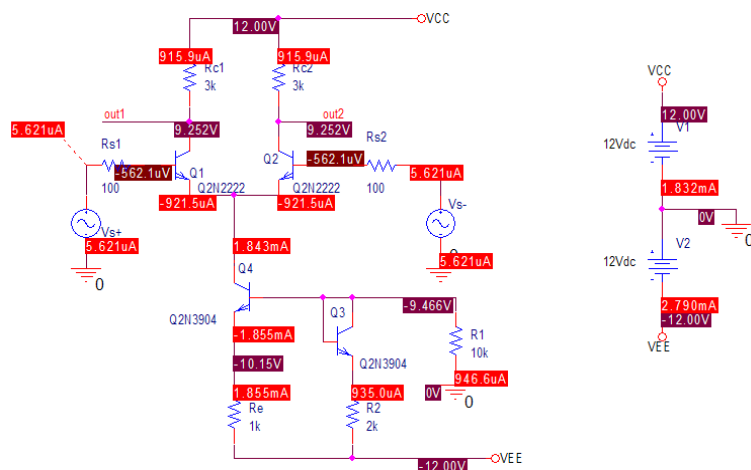


图 20 差分放大电路的直流工作点

“Enable Bias Voltage Display”两项，在电路图中删除不需要显示的电流和电压值。各个支路的电流值和各个节点的电压值显示如图 20 所示。

其中恒流源给出的静态电流是 1.843mA；晶体管 Q1 和 Q2 的发射极电流相等，同为 0.9215mA，这是由于差分放大电路的对称结构导致的；输出端 out1 和 out2 的直流电压均为 9.252V；而晶体管 Q1 和 Q2 的基极电位-0.5621mV，但该点电位应该为零，这样在多级差分放大电路中才能进行直接耦合，因此，双击正弦电压源 Vs+和 Vs-，将其中“DC”项设置为 0.5621mV。保存电路图。

3) 双端输入时的基本特性

前面建立的电路图是双端输入的形式，可以通过这个电路来分析双端输入、双端输出，以及双端输入、单端输出这两种差分放大电路的一些基本特性。

确定在 Capture 中新建的 Simulation Profile 的 PSpice 仿真分析类型设置为交流扫描分析“AC Sweep”，进行交流扫描分析设置如图 21 所示。单击“确定”按钮进行确认。

在 Capture 中单击菜单“PSpice”下的“Run”项，调用 PSpice A/D 进行模拟计算。计算结束后，在弹出的 PSpice A/D 程序中，选择菜单“Trace”中的“Add Trace...”项，对要显示的变量进行编辑，在 Probe 窗口中观察单端输出时的电压增益和双端输出时的电压增益，表达式分别为“ $V(out1)/(V(Vs+:+)-V(Vs-:))$ ”和“ $(V(out1)-V(out2))/(V(Vs+:+)-V(Vs-:))$ ”，曲线如图 22 所示。

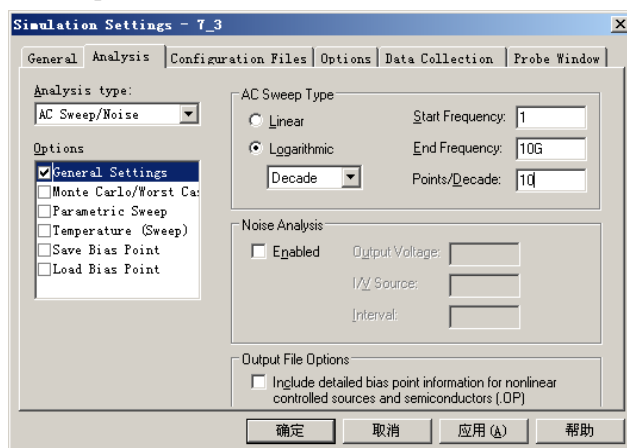


图 21 交流扫描分析的设置

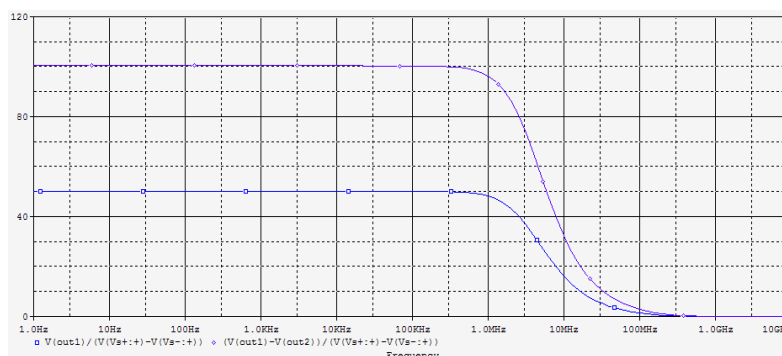


图 22 双端输入时的差模电压增益频响曲线

利用 PSpice A/D 中的 Probe 提供的游标工具（从主菜单 Trace 下的 Cursor 中的 Display 调出游标显示，鼠标左键点击可出现 1 号游标，鼠标右键点击可出现 2 号游标，它们都可沿着波形移动，同时在下方的 Cursor Window 窗口中将显示游标当前所在点的位置），可测得双端输出时的差模电压增益为 100.363，单端输出时的差模电压增益正好是双端输出的一半，为 50.181，这是由于在输入时信号源 Vs+输入 10mV 的交流信号，而信号源 Vs-输入的是-10mV 的交流信号，这就产生幅度相同、相位相差 180° 的差模输入信号，又由于差分放大电路的两边完全对称，所以两个输出端输出的是幅度相同，相位相差 180° 的信号。由图中还可以测得两条曲线的上限截止频率点都为 3.4032MHz（可利用主菜单 Trace 下的 Cursor 中的 Search Commands 或是直接点击游标窗口中的 Cursor

Search  图标按钮，在弹出的 Search Command 对话框中输入形如“search level (max-3db)”的游标搜索命令进行搜索），这说明两种输出形式的频响特性一样。值得一提的是，使用 search 命令可以精确定位游标位置。如已知 X 坐标要找到波形上相应的 Y 坐标（游标的大叉定位到相应的 Y 坐标

点), 可使用 search xvalue (YOURXVALUE)命令, 其中要注意搜索方向需自行估计 (估计要定位的点在当前点的哪个方位), 如果没有指定方向的话, 则缺省的是向前 forward (另外还有一种方向是向后 backward); 如已知 Y 坐标要找到波形上相应的 X 坐标 (游标的大叉定位到相应的 X 坐标点), 可使用 search level (YOURYVALUE)命令, 仍要注意方向。

下面分析一下理想的双端输入情况的共模特性。

电路图需要略微做一下修改。首先在 Capture 中将前面的电路图 17 打开, 将信号源 Vs- 的“AC”属性改为 10mV, 使其和信号源 Vs+ 一样, 这样就相当于在两个输入端加上了相同的信号即共模输入。

还是选择交流扫描分析, 分析设置同上面分析差模增益时的设置一样, 参见图 21。然后选择主菜单“PSpice”中的“Run”项开始进行计算模拟。计算完毕后, 在弹出的 PSpice A/D 程序中, 选择其菜单“Trace”中的“Add Trace...”项, 在弹出的跟踪变量选择对话框中进行编辑, 使其中“Trace Expression”中的表达式分别为“(V(out1)-V(out2))/V(Vs+:+)”和“V(out1)/V(Vs+:+)", 分别表示双端输出和单端输出时的电压增益。观察 PSpice A/D 的 Probe 窗口中的曲线, 如图 23 所示。

调用游标工具“Cursor”, 测得双端输出时的共模电压增益为 1.000E-30, 注意在 PSpice 中用 1.000E-30 来表示 0, 所以双端输出时的共模电压增益实际上为零。这是由于输入信号相同, 两边的电路结构也相同, 致使输出的被放大的信号也相同。同时测得在中低频段单端输出时共模电压增益为 0.000769, 也已经非常小, 说明了单端输出情况下也具有良好的抑制共模信号的特性。但是随着频率的进一步增大, 共模电压增益将会急剧增大, 增加到一定的程度后将不会再有剧烈的增减, 但是无论如何这个共模电压增益总是小于 1。

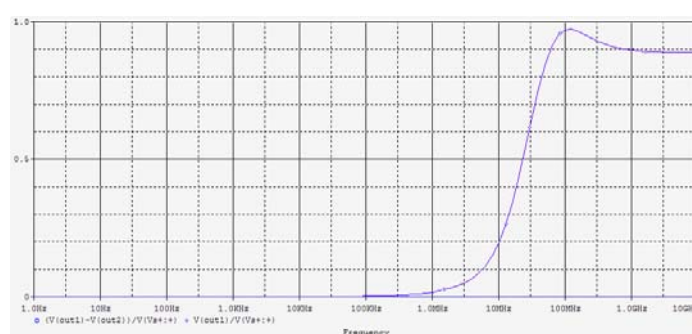


图 23 双端输入时的共模电压增益频响曲线

4) 单端输入时的基本特性

在差分放大电路中如果输入信号是通过在两个输入端加上大小相等, 相位相反的信号我们称其为双端输入, 如果输入信号只从一端接入, 而另一端的输入信号为零, 则称为单端输入。人们往往对双端输入的差分放大电路的各项特性理解得非常深入, 但是对于单端输入时往往有些不知所以然, 下面就利用 PSpice 对单端输入的差分放大电路的性能进行分析, 使大家能够对差分放大电路有一个真正的深入理解。

在 Capture 界面中, 打开原电路图 17。双击信号源 Vs-, 弹出属性设置对话框将其中的 AC、VOFF、VAMPL 和 FREQ 项均改为 0, DC 保持不变仍为 0.5621mV。保存电路图。

然后在 Capture 中的电路图界面上, 单击主菜单“PSpice”下的“Markers”, 选择其中的“Voltage Level”, 或是直接点击 PSpice 工具栏中的 Voltage Marker 图标按钮, 将“Voltage Marker”放置在输出端 out1, 以同样的方法放置另一个“Voltage Marker”于输出端 out2。然后再选择“PSpice”主菜单的“Markers”下的“Voltage Differential”, 这可用于观察两个节点之间的电压差, 将其正端放在输出端 out1, 将负端放在输出端 out2, 这是为了观察双端的输出电压, 如图 24 所示。

在 Capture 设置 Simulation Profile 的 PSpice 仿真分析类型为交流扫描分析“AC Sweep”, 分析参数的具体设置和前面双端输入时分析差模电压增益时一样, 参见图 21。

在 Capture 中单击菜单“PSpice”中的“Run”项, 调用 PSpice A/D 进行仿真计算, 计算结束后, 我们可以在弹出的 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中看到图中有三条输出曲线, 如图 25 所示。调用游标工具“Cursor”, 测得输出端 out1 的输出电压 V(out1)和输出端 out2

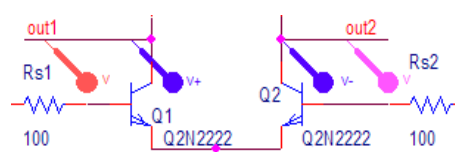


图 24 在电路图中放置“Marker”

的输出电压 $V(out2)$ 均为 $501.819mV$ ，双端输出电压 $V(out1,out2)$ 正好是单端输出电压的 2 倍为 $1.0036V$ 。因为输入的信号电压为 $10mV$ ，所以双端输出时的电压增益为 100.36 ，单端输出时为 50.1819 ，这个数值与前面计算该差分放大电路的差模电压增益是一致的。而且上限截止频率也都是 $3.4032MHz$ ，也与前面一致。

我们再来观察一下各种输出方式中各输出端输出的瞬态波形和相位关系。在 Capture 中设置 PSpice 仿真分析类型为瞬态分析 “Time Domain (Transient)”，对瞬态分析进行设置，如图 26 所示。其中终止时间 “Run to time” 设置为 $3ms$ ，最大步长 “Maximum step size” 设置为 $1\mu s$ ，单击 “确定” 按钮确认（其中 Start saving data after 栏不填的默认值即为 0）。

然后在 Capture 中单击菜单 “PSpice” 中的 “Run” 项，开始仿真计算。计算结束后，在弹出的 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中观察曲线，如图 27 所示。

从图中可以看出输出端 out1 和 out2 输出的也是幅度大小相同，相位相反的正弦波，而且在单端输出时具有直流偏移，这个直流偏移是由两个晶体管 Q1 和 Q2 的静态偏置电压提供的。而在双端输出时，直流偏移为零，这是由于两端 (out1 和 out2) 的直流偏移相减，互相抵消的缘故。

在上面的单端输入的差分放大电路里，输入端加的信号源 V_s 是 $+10mV$ 的交流电压，利用模拟电路知识可以知道这等效于输入了 $10mV$ 的差模信号和 $5mV$ 的共模信号（利用线性叠加定理）。根据 Probe 窗口波形图中的结果得知输出的结果（双端）为 $1.0036V$ ，与理论计算的差模输出结果相同，故也可以说这个结果输出信号其实就是差模信号经过差分放大电路后输出的信号；而由于该差分放大电路具有非常大的共模抑制作用，所以 $5mV$ 的共模信号经过差分放大电路后迅速衰减，到输出端就几乎等于零了，即可说共模输入信号对结果输出信号几乎没有贡献。

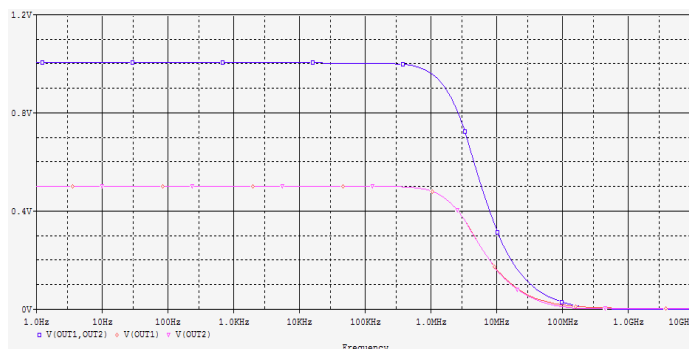


图 25 单端输入时的输出电压频响曲线

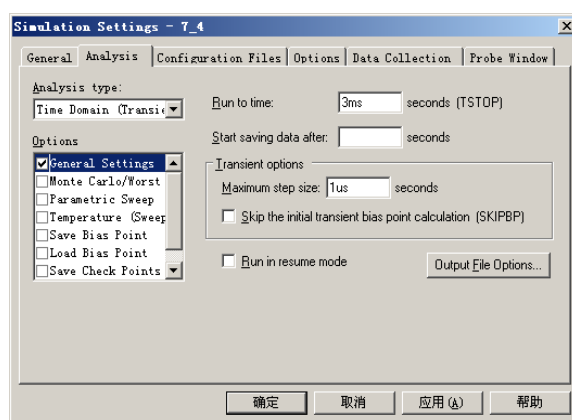


图 26 进行瞬态分析设置

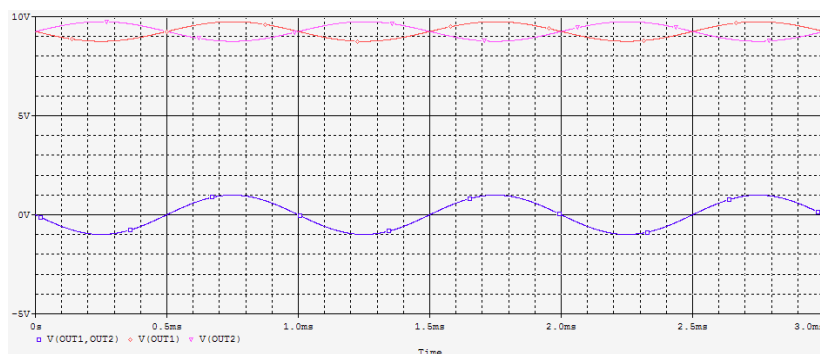


图 27 单端输入时瞬态波形的输出

可见无论是单端输入方式还是双端输入方式，只要输出方式一致，放大倍数就相等，而且单端输出时的放大倍数是双端输出时的一半。

5) 共模抑制比 CMRR

衡量差分放大电路的共模抑制作用不能只是简单地观察共模增益，而是应该和差模增益进行比较来衡量一个差分放大电路对共模信号的抑制作用。模拟电路中定义了共模抑制比 CMRR，它是指

差模增益和共模增益的比值，该值越大，说明对共模信号的抑制作用越强。下面来讨论如何利用 PSpice 进行共模抑制比的分析。

要测量共模抑制比就要同时测得共模增益和差模增益，而测量共模增益和差模增益需要两个完全相同的电路。可以用图 28 所示的电路连接方法来测量，其中的 Cmod 和 Dmod 是完全相同的差分放大电路模块。我们有两种解决方法：其一是用各个分立元件组成两个完全相同的差分放大电路，这种方法繁琐，出错的几率也大。其二是将要测量分析的电路编辑成为一个子电路，形成库文件，用使用元器件的办法来使用该电路，这种办法由于既需要编辑电路图符号，又需要编写电路描述语句，相对来说比较复杂，适合于在电路中需要反复调用该模块时使用。而在这里是利用层次块的概念来进行层次性电路设计的。

这里介绍一下层次性电路设计的一些内容。以前所绘制的电路图中往往是一个元件一个元件地添加。电路元件完全在同一个电路图中，通过导线将各个元件连接起来，就和实际的电路形式一样，这对于简单的电路还算比较容易实现，但当电路规模太大时，过多的元器件，过多的导线连接，很容易产生错误，而且电路调试起来也很麻烦，层次性电路设计就是专门针对大规模电路进行设计的一种设计方法。

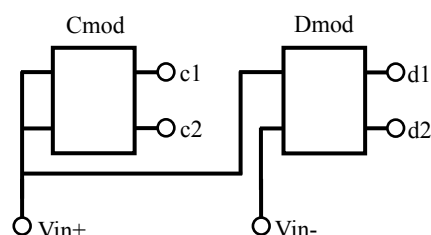


图 28 计算 CMRR 的电路接法示意图

在层次性电路设计中，电路图及其对应的电路都是分层次的。对于较为基本的电路形式可以用较低层次的电路图表示，而更高级的电路形式则可以用较高层次的电路图表示，在高层次的电路设计中可以将低层次的电路图表示为“块”，然后将低层次的电路当作模块进行调用，这样设计一个复杂的电路就被分解为设计几个比较简单的电路了。但是层次性电路设计与创建的新的模型和子电路及其符号不同，用户自创的新模型及其图形符号都是保存在库文件(*.olb)中的，而在层次性电路设计中，各层次的电路图保存在同一工程项目的不同电路图页面中。

在进行层次性电路设计中有两种设计方法。

第一种方法是由上而下的设计方法。首先用具有各自功能的“块”组建其最高层次的电路，然后根据各个块的功能设计出各个块的电路图。

第二种方法是自下而上的设计方法，首先画出各个底层的“块”的电路图，然后利用这些设计好的块，来组成更高层的电路图。

在层次电路设计中关键能够准确地将底层电路划分成“块”，然后将各个层次电路中相关联的部分连接起来。“块”的概念非常重要，它代表了一个或者多个低层次的电路图，可以在高层次电路中调用一个或者多个相同的“块”。一个“块”与外部电路的接口成为管脚，并且一个“块”的管脚必须与该“块”所代表的电路中设置的外部接口一一对应。

这里采用层次性电路设计方法来测试该差分放大电路的共模抑制比。要测试分析该差分放大电路的共模抑制比，需要两个完全相同的差分放大电路模块，将差分放大电路作为最低层次的模块，然后在高层次的电路中进行调用，来测试该差分放大电路的共模抑制比。

在学习这些内容时，既要注意分析电路的性能，又要领会这种分析方法的真谛，最后达到学为己用的目的。这里采取自上而下的设计方法。

下面利用 Capture 开始编辑电路图。

(1) 首先新建一个电路图页面。方法是在 Capture 的项目管理器窗口（即标题为*.opj 的窗口）中的 File 页面下的 Design Resources 的项目文件名*.dsn 下面的 SCHEMATIC1 处点右键，在弹出菜单中选择 New Page。

(2) 在这个新页面中（假设其名称为 PAGE2），选择主菜单 Place 下面的 Hierarchical Block... 命令，将出现的“块”放置在合适的位置，然后用同样方法再取另一“块”放好，将其分别命名为 Cmod 和 Dmod，分别表示测量共模增益和差模增益的“块”。注意：在弹出的“Place Hierarchical Block”

对话框中，名字（Reference 和 Implementation name）都可以写成一样的 Cmod 或 Dmod 等自定义名称，Implementation Type 选 Schematic View，下面的 Path 空着，点“OK”后即可新建一个空的层次块，如图 29 所示。

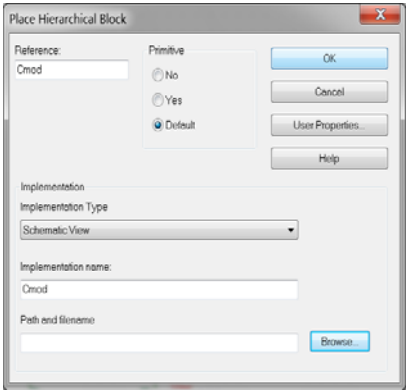


图 29 “块”的设置对话框

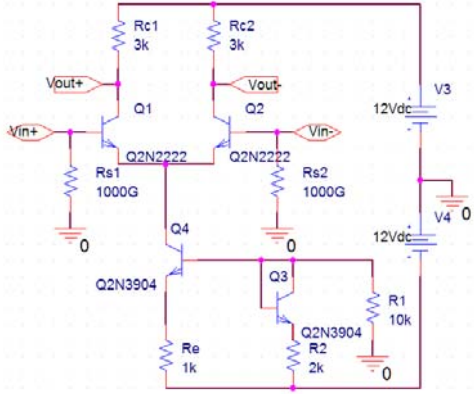


图 30 共模抑制比测试中“块”的电路图

(3) 然后双击 Cmod 块，在弹出的“New Page in Schematic: 'Cmod'”对话框中，填入 Cmod 块的底层页面名称如“PAGE1”，点“OK”后即可打开一个标题为“Cmod”的新空白页面。

(4) 然后在该 Cmod 空白页面中，将前面的电路图 17 的页面内容全选后拷贝粘贴过来，并进行一些修改：删除正相输入信号源 Vs+和反相输入信号源 Vs-，同时电阻 Rs1 和 Rs2 移动到合适的位置，如图 30 所示，将它们的大小都设置为 1000GΩ。在 Capture 和 PSpice 中不允许有悬空的节点，当某些节点确实要悬空时，就需要在它和地之间接一个特别大的电阻，这样既能满足悬空的要求，又符合了 Capture 和 PSpice 的标准。然后将原来电路输出端的两个连线 out1 和 out2 删除。同时将电路的直流电源直接连接到电路上，而不使用 VCC 和 VEE 来过渡表示，连接如图 30 所示。

(5) 然后在该 Cmod 页面中，添加该层次块的输入/输出端口。在主菜单 Place 中选择 Hierarchical Port...，然后在弹出的“Place Hierarchical Port”对话框中选择输入/输出端口的图形符号（建议输入添加 PORTRIGHT-R，输出添加 PORTRIGHT-L，不过也不一定要如此，实际上可选择列表框中的任意符号，关键还是接下来的输入/输出属性要设置正确），点“OK”确定后，在电路图页面中修改这些 Port 缺省的名字，在这里我们将该差分放大电路的正负两个输入端的 Port 分别改名为 Vin+和 Vin-，而将该差分放大电路的两个输出端的 Port 分别改名为 Vout+和 Vout-；然后双击这些 Port，进入属性设置，将其 Type 属性按需要改为 Input(输入)或 Output(输出)，如 Vin+和 Vin-为 Input，Vout+和 Vout-为 Output，如图 31 所示。

Name	Type
Vout+	Output
Name	Type
Vout-	Output
Name	Type
Vin+	Input
Name	Type
Vin-	Input

图 31 “块”管脚属性的设置

(6) 然后回到刚才新建的 PAGE2 页面中，选中 Cmod 块后点右键并在弹出菜单中选择 Synchronize Up(即将底层图的输入/输出端口信息反映到顶层图的块符号上去)，这时顶层图 PAGE2 上就出现了底层图的两个输入端口 Vin+、Vin-和两个输出端口 Vout+和 Vout-，如图 32 所示。这时若双击端口名称如 Vin+旁边表示端口的小块，就可进入该端口的属性设置界面，可确认该端口是 Input 还是 Output 属性。

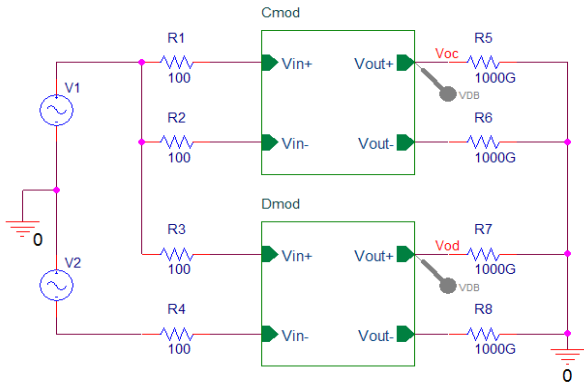


图 32 顶层电路图

(7) 然后用类似方法设置好 Dmod 块的底层电路图及其输入/输出端口。

(8) 然后按照图 32 所示电路图连接好两个块，并加入一些电阻和两个输入 VSIN 源等元器件，保存电路图，就构成一个完整的顶层电路图可以进行共模抑制比的测试仿真分析了。其中两个 VSIN 正弦电压源分别命名为 V1 和 V2，它们的 AC 值均设置为 10mV，其余各项属性值均设为 0 即可。

(9) 在 Capture 中单击 PSpice 主菜单下的“Markers”中的“Advanced”，选择其下的“dB Magnitude of Voltage”，指明观察电压幅度用 dB 分贝数表示，如图 33 所示。每选中一项，在 Capture 最下面一行状态栏中都会有这个“Marker”的描述。这里将选择的分贝电压指针分别放置在电路图中 Cmod 和 Dmod 中的 Vout+端，如图 32 所示。

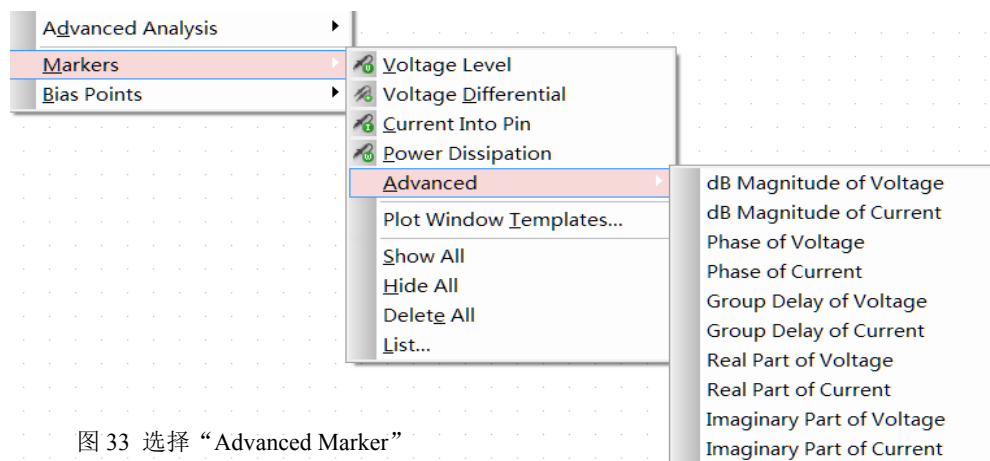


图 33 选择“Advanced Marker”

(10) 在 Capture 中新建 Simulation Profile 并选择交流扫描分析“AC Sweep”，在交流扫描分析设置对话框中交流扫描方式“AC Sweep Type”选择“Decade”项，其余设置如图 34 所示。

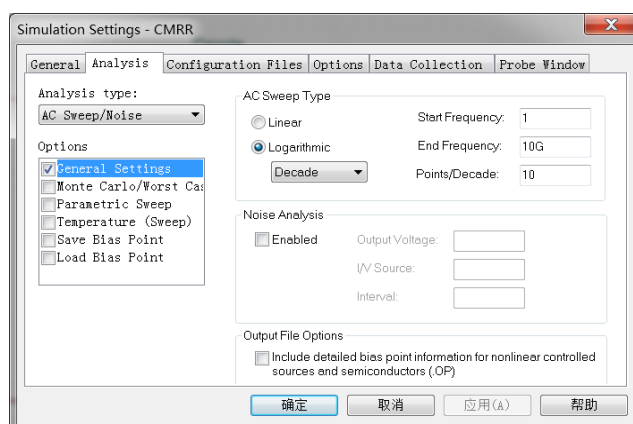


图 34 设置交流扫描分析

(11) 在 Capture 中单击菜单“PSpice”中的“Run”项，开始进行仿真计算。计算完毕后，在弹出的 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中已经可以看到两条输出曲线 DB(Dmod:Vout+)和 DB(Cmod:Vout+)，即差模和共模输出信号的频率响应曲线（单位为 dB），如图 35 所示。然后在 PSpice A/D 中选择菜单“Trace”中的“Add Trace...”项，在弹出的变量跟踪选择对话框中添加下面的变量

$DB(V(Dmod:Vout+)/V(Dmod:Vin+)-V(Dmod:Vin-))-DB(V(Cmod:Vout+)/V(Cmod:Vin+))$ ，该表达式正是该差分放大电路的共模抑制比（单位为 dB），观察它的曲线如图 35 所示。

(12) 利用游标 Cursor 工具测得在中低频段共模抑制比为 96.457dB，而它的上限截止频率为 48.069kHz，远远低于差模增益的上限截止频率。由图中曲线可以看出共模增益的频率特性不是很好，共模抑制比的频率特性主要就是由共模增益的频率特性决定的。注意：由于这里纵坐标已是 dB 数，因此在使用游标搜索命令来找到上限截止

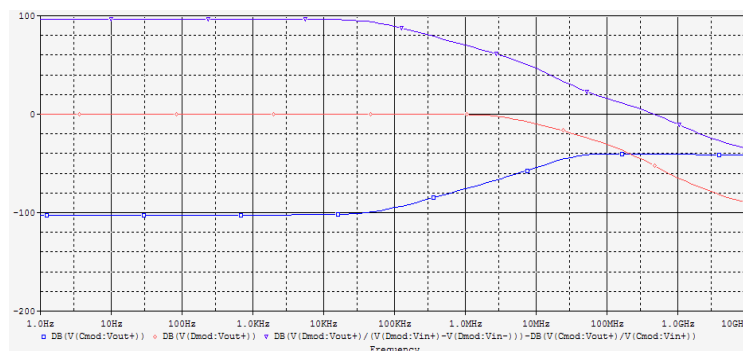


图 35 差模和共模信号输出频响曲线及共模抑制比频

频率时应使用如下命令：search level (max-3)，而不能再使用以前用过的命令：search level (max-3db)。

4. 非对称差分放大电路的基本特性分析

在实际的差分放大电路中往往很难实现电路的完全对称，由于配对晶体管参数失配和集电极负载电阻 R_C 的失配使差分放大电路的性能变差，主要表现为：当输入为差模信号时输出会产生共模分量，当输入为共模信号时输出会产生差模分量。如果下一级也是差分放大电路，这种差模输入—共模输出或共模输入—差模输出的转换将对整个放大电路的性能产生不利影响。

在 Capture 中打开包含前面的电路图 17 的工程项目。对该电路图进行编辑，将偏置电阻 R_1 的大小改为 $5k\Omega$ 。然后将电路图中集电极偏置电阻 R_{C2} 的大小由 $3k\Omega$ 改为 $2.5k\Omega$ 。选中晶体管 Q2，单击 Capture 中主菜单“Edit”下的“PSpice Model”项，或者是在选中 Q2（围绕 Q2 出现一个虚线方框）后点右键在弹出菜单中选择“Edit PSpice Model”命令，在弹出的“PSpice Model Editor”窗口下方的“Model Text”中修改其参数属性，如图 36 所示。其中“Is”由 $14.34F$ 更改为 $20F$ ，“Bf”由 255.9 更改为 200 ，“Rb”由 10Ω 更改为 20Ω 。在 PSpice Model Editor 窗口中点 File 菜单下的 Save 命令，或是直接点上排工具栏中的 Save Library 图标按钮，保存该晶体管模型。

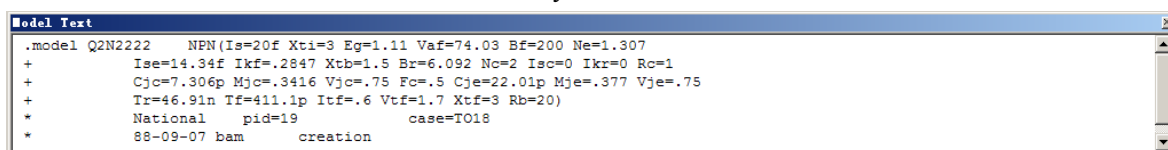


图 36 更改模型的参数

先输入差模信号，观察一下输出的共模信号。将输入的信号源 V_{s+} 中的“AC”项设为 $10mV$ ， V_{s-} 中的“AC”项设为 $-10mV$ 。将 out1 和 out2 上全部加上“Voltage Marker”。保存电路图。最后的电路图如图 37 所示。

进行交流小信号分析，交流小信号设置同前面理想对称差分放大电路中的双端输入的分析相同，如图 21 所示。然后在 Capture 中选择菜单“PSpice”中的“Run”项，开始计算模拟。计算完毕后，在弹出的 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中，观察输出的频响曲线如图 38 所示。

用游标 Cursor 工具测得在中低频段正相输出端 $V(out1)$ 的输出电压为 $1.6544V$ ，而反相输出端

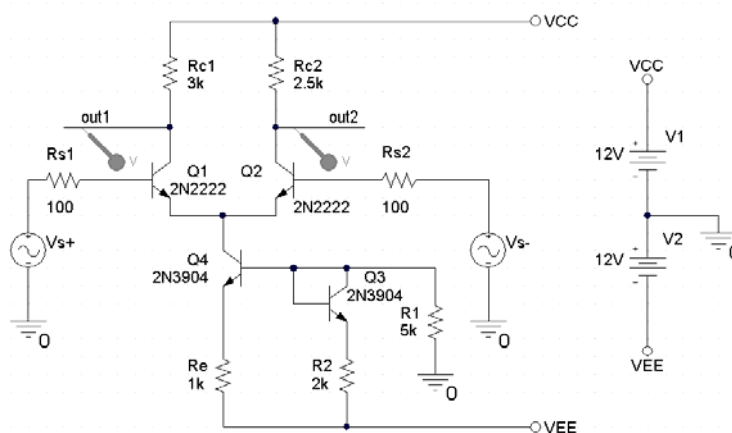


图 37 非对称差分放大电路的电路图

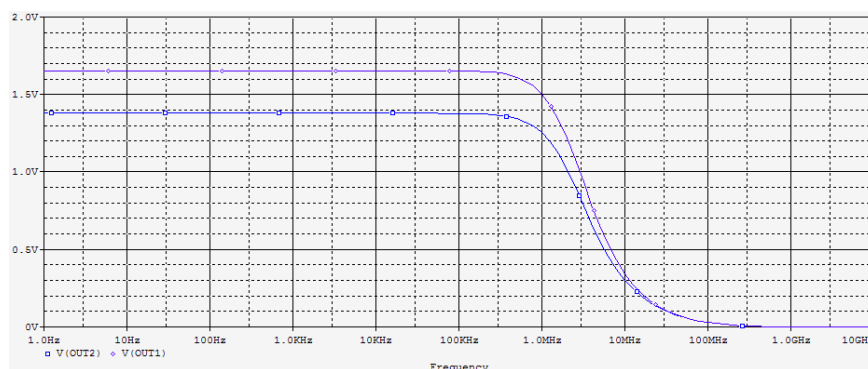


图 38 非对称差分放大电路差模输入情况下的输出频响曲线

$V(out2)$ 的输出电压为 $1.3788V$ ，两者的相位相反，可通过瞬态分析来观察到（如图 39 所示，过程略；

注意瞬态分析时 VSIN 电压源的 VAMPL、VOFF、FREQ 参数必须正确设置，瞬态分析参数中的时间参数也应适当设置)。可知共模输出电压 V_{co} 为 $(1.6544+(-1.3788))/2 = (1.6544-1.3788)/2 = 0.1378(V)$ ，差模输出电压 V_{do} 为 $(1.6544-(-1.3788))/2=(1.6544+1.3788)/2=1.5166(V)$ 。差模输出电压对下一级差分放大电路的输入信号是有用的，而共模输出电压由于其幅度较小，且下一级差分放大电路对其有较强的抑制作用，输出幅度会急剧衰减。可见差模输入—共模输出这种模式对多级差分放大电路的影响不大。

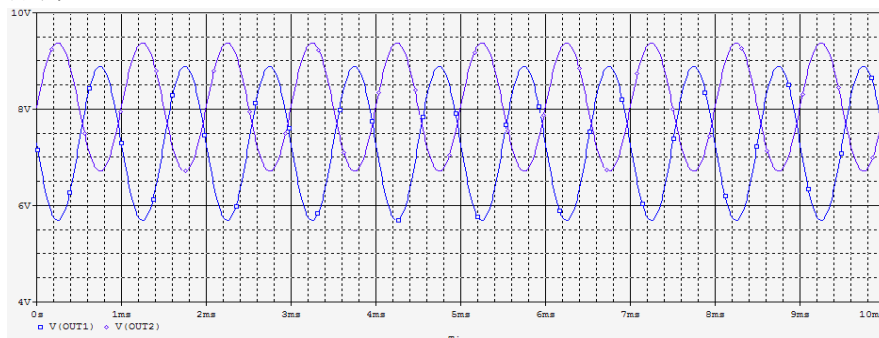


图 39 非对称差分放大电路差模输入情况下的输出瞬态曲线

下面看看共模输入—差模输出情况的电路特性。

修改输入信号源，将前面的电路中的信号源 V_{s+} 和 V_{s-} 的“AC”项都改为 1V。然后进行交流小信号分析的设置，设置同前面理想差分放大电路中的双端输入的分析相同，见图 21。在 Capture 中单击菜单“PSpice”下的“Run”项，开始进行仿真计算。计算完毕后，在弹出的 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中，观察输出的频响曲线如图 40 所示。

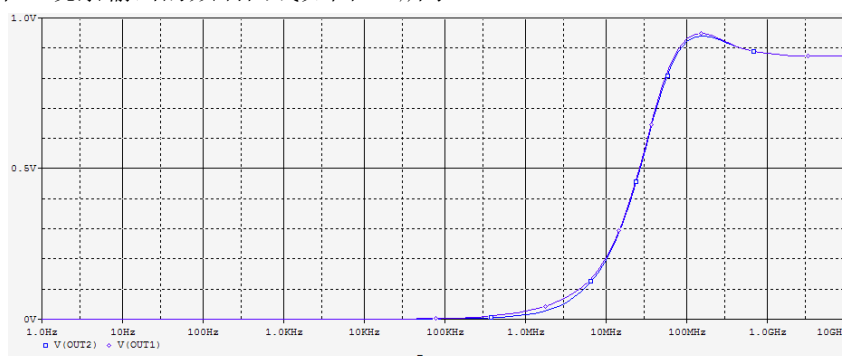


图 40 非对称差分放大电路共模输入情况下的输出频响曲线

在 PSpice A/D 中选择菜单“Plot”中的“Axis Settings...”命令，在弹出的 Axis Settings 对话框中，将 X 轴（X Axis）的数据范围（Data Range）改为 1.0Hz 到 100MHz，将 Y 轴（Y Axis）的数据范围（Data Range）改为 0V 到 5.0mV，可以看到放大后的输出曲线，如图 41 所示。

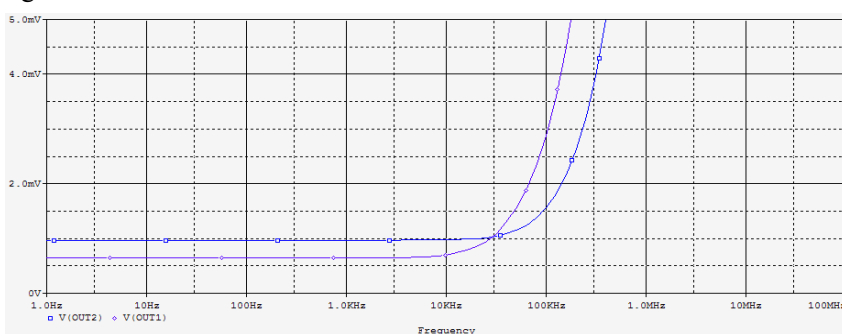


图 41 非对称差分放大电路共模输入情况下的输出频响曲线（放大后）

用游标 Cursor 工具测得，正相输出端 out1 的输出电压 $V(out1)$ 为 0.642915mV，反相输出端 out2 的输出电压 $V(out2)$ 为 0.968984mV，这两者的相位相同，可通过瞬态分析来观察到，如图 42 所示（过程略）。注意瞬态分析时 VSIN 电压源的 VAMPL、VOFF、FREQ 参数必须正确设置，瞬态分析参数

中的时间参数也应适当设置)。所以输出的差模电压为 $(0.642915-0.968984)/2=-0.1630345(\text{mV})$ ，输出的共模电压为 $(0.642915+0.968984)/2=0.8059495(\text{mV})$ 。输出的共模信号在经过下一级差分放大电路时经过强烈的抑制作用使其迅速衰减，而输出的差模信号是下一级差分放大电路的输入信号，会被放大传送到输出端，这个影响很大。

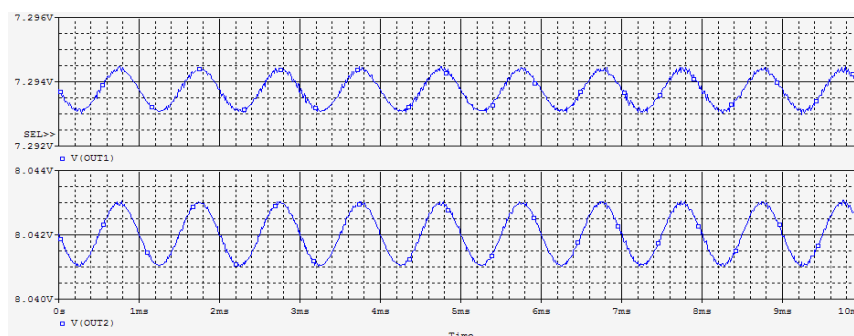


图 42 非对称差分放大电路共模输入情况下的输出瞬态曲线

通过以上的分析表明，对于非理想对称的差分放大电路，在差模输入—共模输出和共模输入—差模输出两种情况下，共模输入—差模输出由于共模输入产生的差模信号本身就是有害信号，这个差模信号经过下一级会被放大，对真正的差模信号会形成干扰，因而十分有害。而差模输入产生的共模输出信号比差模信号小很多，而且经过下一级差动放大电路的共模抑制作用，它的危害将非常小。

为了减小共模输入所产生的差模输出对下一级的影响，应尽量提高该级差分放大电路的共模抑制比。

三、实验电路设计

1. 二极管特性测试电路（如图 1 所示）
2. 三极管特性测试电路（如图 12 所示）
3. 对称差分放大电路（如图 17 所示）
4. 非对称差分放大电路（如图 37 所示）

四、实验任务要求

1. 在 OrCAD Capture 中输入二极管特性测试电路，并设置合适的分析方式及参数，在 OrCAD PSpice A/D 中仿真分析二极管的伏安特性。
2. 在直流分析中设置对温度的次要分析，仿真分析二极管在不同温度下的伏安特性。
3. 将二极管特性测试电路中的电源 Vs 用 VSIN 元件代替，并设置合适的元件参数，在 OrCAD PSpice A/D 中仿真分析二极管两端的输出波形。
4. 在 OrCAD Capture 中输入三极管特性测试电路，在 OrCAD PSpice A/D 中仿真分析三极管的输出特性，并估算其电流放大倍数。
5. 利用 OrCAD Capture 和 PSpice A/D 仿真分析对称差分放大电路的性能参数，记录仿真分析所得到的单端输入、双端输入时的差模、共模电压增益频率曲线、瞬态输出波形等，并分析说明这些曲线的含义。
6. 利用 OrCAD Capture 和 PSpice A/D 仿真分析非对称差分放大电路的性能参数，记录仿真分析所得到的单端输入、双端输入时的差模、共模电压增益频率曲线、瞬态输出波形等，并分析说明这些曲线的含义。

五、实验操作要点

1. 在 OrCAD Capture 中输入电路图。
2. 在 OrCAD Capture 中设置仿真分析参数。
3. 运行仿真分析程序 OrCAD PSpice A/D 进行仿真分析。
4. 在 OrCAD PSpice A/D 的 Probe 窗口中查看各电路图的仿真结果，观察伏安特性曲线、直流工作情况、交流电压波形、输出特性曲线等。

六、思考题

1. OrCAD 软件在电路分析及设计过程中起什么作用？
2. 用 OrCAD 软件对电路进行仿真分析时，是否要求每个节点必须有标号？在电路中设置节点标号有何作用？
3. 用 OrCAD 的 PSpice A/D 中的 Probe 图形后处理程序查看图形时，对于不同的分析设置，其缺省的横坐标是哪个变量？
4. 在仿真分析二极管特性测试电路的电压波形时，若瞬态分析不设置 Maximum step size 参数，则结果会出现什么情况？
5. 若要仿真分析三极管特性测试电路的输入特性，应如何设置扫描分析方式和参数？

实验五 一阶 RC 电路的暂态响应仿真研究

一、实验目的

1. 熟悉一阶 RC 电路的零状态响应、零输入响应和全响应。
2. 研究一阶电路在阶跃激励和方波激励下，响应的基本规律与特点。
3. 掌握积分电路和微分电路的基本概念。
4. 研究一阶动态电路阶跃响应与冲激响应的关系。
5. 根据响应曲线计算 RC 电路的时间常数 τ 。

二、实验理论基础

相关基本概念：

- ① 零输入响应：系统的输入为零，完全由系统的初始状态引起的响应。
- ② 零状态响应：系统的初始状态为零，完全由系统的输入引起的响应。
- ③ 全响应：系统的初始状态与输入共同作用所引起的响应。
- ④ 时间常数：放电过程中，电压或电流信号从某时刻开始，衰减到该时刻的 36.8%所需的时间。或者充电过程中，电压或电流信号从某时刻开始，上升至该时刻与稳态值差值的 63.2%所需的时间。

1. 一阶 RC 电路的零输入响应，即放电过程。

当图 8.4.1 所示电路中的开关从位置 a 合向位置 b 时，电路中的响应随时间的变化规律如下：

$$u_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (t \geq 0_+)$$

$$u_R(t) = -u_C(t) = -U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \quad (t \geq 0_+)$$

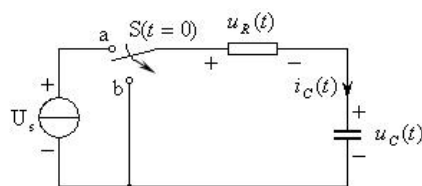


图 8.4.1 一阶 RC 电路

$$i_C(t) = \frac{U_R(t)}{R} = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (t \geq 0_+)$$

$u_C(t)$, $u_R(t)$ 以及 $i_C(t)$ 的变化规律如图 8.4.2 所示。其中时间常数 τ , 可以通过下述两种方法确定:

- ① 根据时间常数的定义确定, τ 为图 8.4.3 中的 AB 段。
- ② 从变化曲线中的某时刻作该曲线的切线, 得到切距 CD, 即为时间常数 τ , 如图 8.4.3 所示。

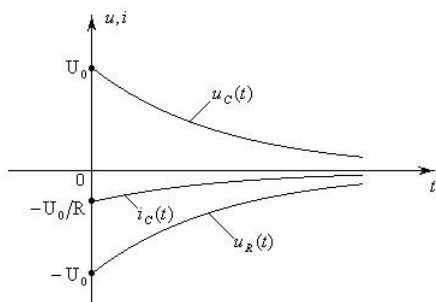


图 8.4.2 一阶 RC 电路的零输入响应曲线

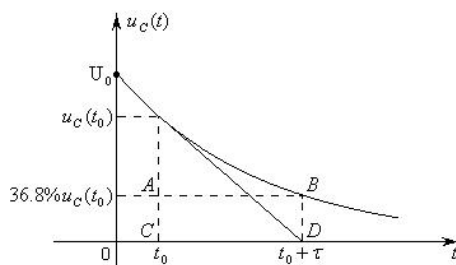


图 8.4.3 时间常数的测量

2. 一阶 RC 电路的零状态响应, 即为充电过程。

当图 8.4.1 所示电路中的开关从位置 b 合向位置 a 时, 电路中各变量的零状态响应为:

$$u_C(t) = U_s (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (t \geq 0_+)$$

$$u_R(t) = U_s e^{-\frac{t}{RC}} \quad (t \geq 0_+)$$

$$i_C(t) = \frac{U_R(t)}{R} = \frac{U_s}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (t \geq 0_+)$$

$\tau = RC$ 为时间常数, 如图 8.4.4 所示, 同样可以根据前述的两种方法进行测量或计算。

3. 方波响应

当激励信号为方波时, 如果方波的半个周期大于或等于 RC 电路阶跃响应的瞬态过程所经历的时间, 则观察到的响应波形中, 零输入响应与零状态响应均包含在内, 图 8.4.5(a) 所示为 $\tau \ll T$ 时, $u_C(t)$ 与 $u_R(t)$ 的波形曲线。如果方波的周期很小, 满足 $\tau \gg T$ 时, 则 $u_C(t)$ 与 $u_R(t)$ 的变化情况如图 8.4.5(b) 所示。

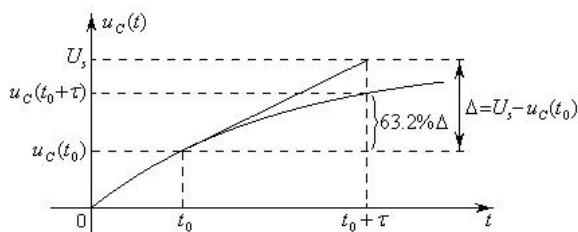
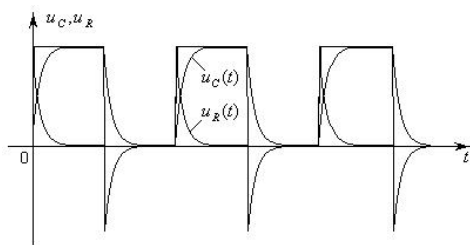
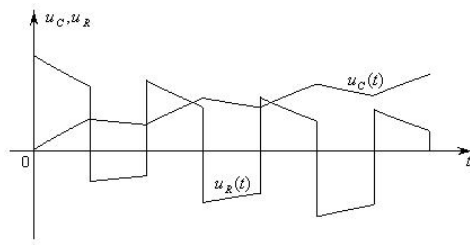


图 8.4.4 一阶 RC 电路零状态响应与时间常数的测量



(a) $\tau \ll T$



(b) $\tau \gg T$

图 8.4.5 一阶 RC 电路的周期方波响应

4. 微分与积分电路

当方波激励加在图 8.4.6(a) 所示的 RC 电路上时, 若 $\tau \gg T$ (一般取 $\tau = 10T$), 输出电压与输入电压关系如下:

$$i(t) \approx \frac{u_s(t)}{R}$$

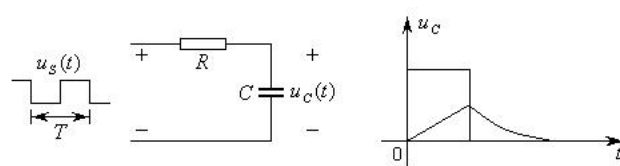
$$u_C(t) = \frac{\int_0^t i(\xi) d\xi}{C} \approx \frac{\int_0^t u_s(\xi) d\xi}{RC}$$

电容上的输出电压近似为三角波，此电路称为积分电路。当方波的频率一定时， τ 值越大，输出三角波的线性度越好，但其幅度较小；当 τ 值变小时，波形的幅度增大，但其线性度变差。

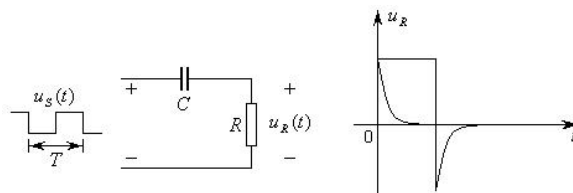
在图 8.4.6(b)所示电路中，若 $\tau \ll T$ （一般取 $T=10\tau$ ），输出和输入构成微分关系：

$$u_C(t) \approx u_s(t)$$

$$u_R(t) = RC \frac{du_C(t)}{dt} \approx RC \frac{du_s(t)}{dt}$$



(a) 一阶 RC 电路构成的积分器



(b) 一阶 RC 电路构成的微分器

图 8.4.6 积分电路与微分电路中响应与激励的关系

三、实验电路设计

实验仿真电路有 2 个，分别如图 8.4.8、8.4.9 所示。

图 8.4.8 所示的电路用于观察零状态和零输入响应，其元件参数为： $R=510\Omega$ ， $C=0.1\mu F$ ， $U_s=6V$ ，在观察 $u_C(t)$ 的零状态响应时，应注意需将 $u_C(t)$ 的初始状态设置为 0；在观察 $u_C(t)$ 的零输入响应时，应将 $u_C(t)$ 的初始状态设置为一定值。

图 8.4.9 所示的电路用于观察一阶 RC 电路的周期方波响应，其元件参数为： $R=10K\Omega$ ， $C=47nF$ ， U_s 为周期方波激励，频率为 2000Hz，占空比为 50%，电压峰峰值为 10V。

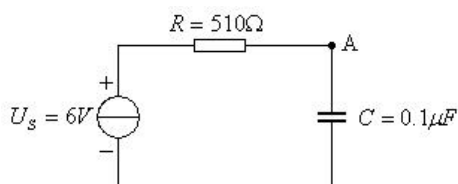


图 8.4.8 实验电路 1

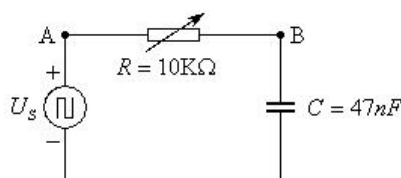


图 8.4.9 实验电路 2（周期方波响应的观察）

四、实验任务要求

- 对图 8.4.8 所示的实验电路 1，建立起仿真电路，设置好仿真参数。
 - ① 熟悉 ORCAD 探针的使用方法。
 - ② 使用探针观察节点 A 上的信号波形（零状态响应信号）。
 - ③ 测量零状态响应信号的时间常数。
- 对图 8.4.9 所示的实验电路 2，建立起仿真电路，设置好仿真参数。
 - ① 观察方波激励信号（节点 A）与方波响应信号（节点 B）的信号波形。
 - ② 测量方波响应信号的时间常数。
 - ③ 改变方波激励周期或者改变电阻 R 的大小，使得时间常数由 τ 变为 0.1τ ， 0.5τ ， 2τ ， 10τ ，观察输出波形的变化。

五、实验操作要点

1. 熟悉ORCAD的编程与使用方法，包括如何导入元件电路元器件、建立仿真电路原理图、设置仿真参数。
2. 熟悉 ORCAD 探针的使用方法，包括如何利用探针观察信号，测量信号参数。

六、思考题

1. 已知 RC 串联电路的 $R=10\Omega$ ， $C=0.1\mu\text{F}$ ，试计算时间常数 τ 。
2. 对上述 RC 电路施加直流信号激励，画出 $u_C(t)$ 的零状态响应，结合 $u_C(t)$ 的波形图说明时间常数 τ 如何测量。
3. 什么是积分电路与微分电路？它们分别具备何条件？在周期方波的激励下，其输出信号如何变化？

实验六 一阶 RC 电路的瞬态响应过程实验研究

一、实验目的

1. 熟悉一阶 RC 电路的零状态响应、零输入响应过程。
2. 研究一阶 RC 电路在零输入、阶跃激励情况下，响应的基本规律和特点。
3. 学习用示波器观察分析 RC 电路的响应。
4. 从响应曲线中求 RC 电路的时间常数。

二、实验理论基础

1. 一阶 RC 电路的零输入响应（放电过程）

电路在无激励情况下，由储能元件的初始状态引起的响应称为零输入响应，即电路初始状态不为零，输入为零所引起的电路响应。实际上是电容器 C 的初始电压经电阻 R 放电过程。在图 9.8.1 中，先让开关 K 合于位置 a，使电容 C 的初始电压值 $u_C(0_-) = U_0$ ，再将开关 K 转到位置 b。电容器开始放电，放电方程为：

$$u_C + RC \frac{du_C}{dt} = 0 \quad (t \geq 0)$$

可以得出电容器上的电压和电流随时间变化的规律：

$$u_C(t) = u_C(0_-) e^{-\frac{t}{RC}} = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0)$$

$$i_C(t) = -\frac{u_C(0_-) e^{-\frac{t}{RC}}}{R} = -\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0)$$

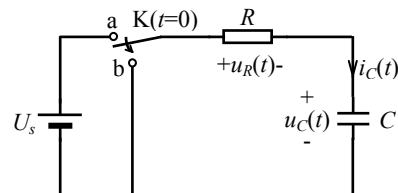


图 9.8.1 一阶电路

式中 $\tau = RC$ ，即为时间常数，其物理意义是 $u_C(t)$ 衰减到 $1/e$ (36.8%) $u_C(0)$ 所需要的时间，反映了电路过渡过程的快慢程度。 τ 越大，暂态响应所持续的时间越长，即过渡过程的时间越长；反之， τ 越小，

The graph shows the voltage $u_C(t)$ on the vertical axis and time t on the horizontal axis. The curve starts at U_0 on the vertical axis and decays exponentially. Two points are marked on the curve: at time t_0 , the voltage is $u_C(t_0)$; and at time $t_0 + \tau$, the voltage is $u_C(t_0 + \tau) = 36.8\% u_C(t_0)$. Dashed lines connect these points to the axes.

105

RC 电路的响应是一个十分短暂的单次变化瞬态过程，一次激励引起电路一次响应。要在示波器上显示 RC 电路的响应曲线进而进行观察和测量有关参数，就必须周期性地重复进行激励，使这种单次变化的过程重复出现，而且要保证激励信号与示波器扫描的同步，只有这样，才能在示波器上显示稳定的电路响应曲线。

为此，实验时必须设计一个实验方案，实现对 RC 电路的周期性重复激励和向示波器提供扫描同步信号。图 9.8.4 是观测零状态响应过程的实验电路，选用 555 时基电路作激励脉冲信号发生电路，用 CD4066 电子开关实现电路中开关的切换，脉冲信号的前沿为示波器提供扫描同步触发信号。

四、实验任务要求

1. 设计一个用示波器观察 RC 电路零输入响应、零状态响应和测量电路时间常数的实验方案。
2. 制作实验电路板。
3. 用示波器观察 RC 电路的零输入响应、零状态响应，描绘响应曲线，求出电路的时间常数。
4. 更换电路中电阻、电容的大小（即改变时间常数），重新测量电路的各种响应，分别求出每次测量的时间常数。
5. 理论计算（仿真）电路的时间常数，并与实验测量值比较。

五、实验操作要点

1. 明确实验目的、实验要求与实验原理。
2. 画出实验原理电路图，标上元器件参数，说明实验步骤。
3. 根据示波器的显示，选择合适的激励源周期，使响应曲线描绘出各种 RC 电路的响应波形，加以比较，并分别与仿真曲线进行比较分析。
4. 进行测量误差分析。

六、思考题

1. 什么是零输入响应、零状态响应？
2. 在用示波器观察 RC 电路响应时如何才能使示波器的扫描与电路激励同步？
3. 什么是时间常数？它在电路中起什么作用？

实验七 RLC 谐振电路仿真实验

一、实验目的

1. 用仿真方法研究二阶动态电路的响应，了解元件参数对响应的影响。
2. 观察、分析二阶电路响应的三种不同情况及其特点，加深对二阶电路响应的认识与理解。

二、实验理论基础

图 8.3.1 所示二阶电路的瞬态响应满足以下微分方程：

$$LC \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + RC \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0$$

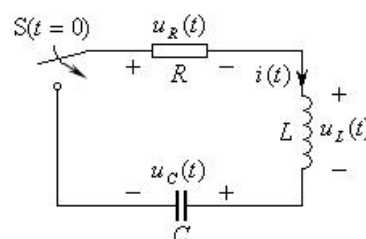


图 8.3.1 RLC 串联电路

初始条件为:

$$u_C(0_-) = U_0, \quad \left. \frac{du_C(t)}{dt} \right|_{t=0} = \frac{i(0_-)}{C} = \frac{I_0}{C}$$

式中 U_0 与 I_0 分别为电容与电感上的初始状态, 参考方向如图 8.3.1 所示。

$$\text{特征方程为: } s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0$$

$$\text{特征根为: } s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

方程的解有以下几种情况:

1. $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$, 即 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 特征方程有两个不等的负实根。这时, 瞬态过程为过阻尼情况。

$u_C(t)$ 与 $i(t)$ 的形式为:

$$u_C(t) = \frac{U_0}{s_1 - s_2} (s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{s_1 t}) + \frac{I_0/C}{s_1 - s_2} (e^{s_1 t} - e^{s_2 t})$$

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{U_0}{L(s_1 - s_2)} (e^{s_2 t} - e^{s_1 t}) + \frac{I_0}{s_1 - s_2} (s_1 e^{s_1 t} - s_2 e^{s_2 t})$$

图 8.3.2 所示响应波形对应于 $I_0 = 0$, $U_0 > 0$ 的情况。

其中, $t_1 = \frac{\ln(s_2/s_1)}{s_1 - s_2}$, 是 $i(t)$ 的极值点, 也是 $u_C(t)$ 的拐点, 这是由于,

$$\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=t_1} = \left. \frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} \right|_{t=t_1} = 0$$

而 $t_2 = \frac{2 \ln(s_2/s_1)}{s_1 - s_2} = 2t_1$, 是 $u_L(t)$ 的极值点, 也是 $i(t)$ 的拐点。

2. $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}$, 即 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 特征方程有两个相等的负实根, $s_1 = s_2 = -\frac{R}{2L} = s$ 。这时, 瞬

态过程为临界阻尼情况。 $u_C(t)$ 与 $i(t)$ 的形式为:

$$u_C(t) = U_0 (1 - st) e^{st} + \frac{I_0}{C} t e^{st}$$

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = -\frac{U_0}{L} t e^{st} + I_0 (1 + st) e^{st}$$

当 $I_0 = 0$, $U_0 > 0$ 时, 响应波形与图 8.3.2 所示响应波形相似, 其中 $t_1 = \frac{1}{s}$, $t_2 = 2t_1 = \frac{2}{s}$ 。

3. $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}$, 即 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, 特征方程有一对共轭复根, 其实部为负。这时, 瞬态过程为欠阻尼情况。

若令 $\alpha = \frac{R}{2L}$ (衰减系数), $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (谐振角频率), $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ (振荡角频率), 则

特征根为:

$$s_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} = -\alpha \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = -\alpha \pm j\omega_d$$

这时 $u_C(t)$ 与 $i(t)$ 的形式为:

$$u_C(t) = U_0 \frac{\omega_0}{\omega_d} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t + \theta) + \frac{I_0}{\omega_d C} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t)$$

$$i(t) = -\frac{U_0}{\omega_d L} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t) - I_0 \frac{\omega_0}{\omega_d} e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t - \theta)$$

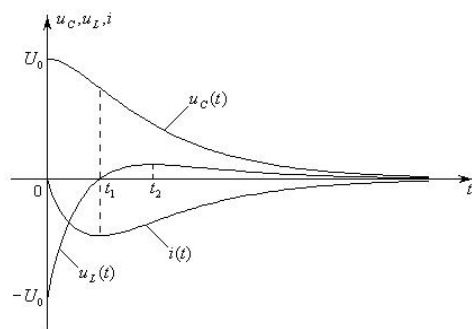


图 8.3.2 过阻尼情况下的响应信号波形

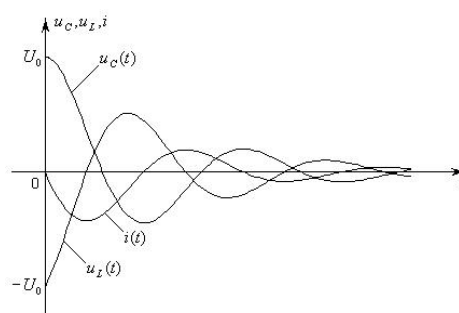


图 8.3.3 欠阻尼情况下的响应信号波形

其中, $\theta = \arctan\left(\frac{\omega_d}{\alpha}\right)$ 。当 $I_0 = 0$, $U_0 > 0$ 时, 响应波形如图 8.3.3 所示。

三、实验电路设计

实验仿真电路原理图如图 8.3.4 所示。其中元件参数为: $R=10\text{K}\Omega$, $C=1\text{nF}$, $L=1\text{mH}$, U_s 为周期方波激励, 频率为 5KHz , 占空比为 50% , 电压峰峰值为 5V 。

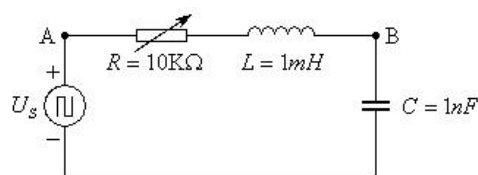


图 8.3.4 实验电路 (RLC 串联电路)

四、实验任务要求

对图 8.3.4 所示的实验电路, 建立起仿真电路, 设置好仿真参数。

1. 将电位器 R 设置为最大阻值 $R_{\max}=10\text{K}\Omega$ ，使用探针观察 $u_C(t)$ （节点 B）的信号波形。
2. 将电位器阻值逐次减小，每次减小 5%，使用探针观察 $u_C(t)$ 处于过阻尼，临界阻尼以及欠阻尼三种情况下的信号波形。
3. 记录三种阻尼情况所对应的电阻值，并与理论值进行对比。

五、实验操作要点

1. ORCAD 的编程与使用方法，包括如何导入元件电路元器件、建立仿真电路原理图、设置仿真参数。
2. 熟悉 ORCAD 探针的使用方法，包括如何利用探针观察信号，测量信号参数。
3. 学习掌握 ORCAD 中电位器的电阻值的调节方法。

六、思考题

1. 根据实验电路中的元件参数，计算临界阻尼情况所对应的电阻值。
2. 如何根据欠阻尼情况下的 $u_C(t)$ 的波形测量衰减系数 α 与振荡角频率 ω_d 。
3. 使用周期方波作为二阶电路的激励，其频率应如何选择？

实验八 RLC 谐振电路实验研究

一、实验目的

1. 掌握谐振电路的频率特性，加深对谐振电路特性的认识。
2. 掌握谐振电路的选频特性、通频带及其应用。
3. 掌握谐振频率以及品质因数的测量方法。
4. 掌握实验曲线的测量与作图技巧。

二、实验理论基础

由 RLC 构成的串联谐振电路如图 9.7.1 所示。谐振角频率记为 ω_0 ，则有 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。电感与电容的阻抗分别为 $\omega_0 L$ 与 $\frac{1}{\omega_0 C}$ ，又可以称之为电路的特性阻抗，记为 ρ 。特性阻抗与电阻 R 的比值

称为该电路的品质因数，记为 Q ，即 $Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 。

RLC 串联电路谐振时，电路的阻抗最小，电路的电流达到最大值，该值的大小取决于电路中的电阻值 R ，与电感、电容的值无关，即 $I_{\max} = \frac{U}{R}$ 。因此，可以在电路中串接电流表或在 R 的两端

用电压表监测电阻上的电压，然后不断改变激励源频率（幅度保持不变），测得电流随频率变化的曲线，当电流达到最大值时所对应的频率即为谐振频率，如图 9.7.2 所示。

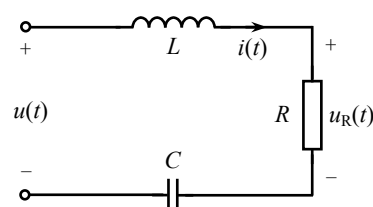


图 9.7.1 RLC 串联谐振电路

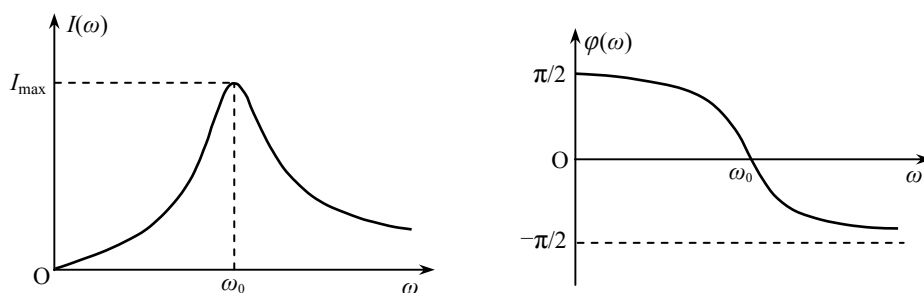


图 9.7.2 RLC 串联谐振电路的幅频与相频特性

电路谐振的另一个特点是电压与电流的相位相同,通过测量图9.7.1中的 $u(t)$ 与 $u_R(t)$ 的相位差可以判断电路是否处于谐振状态。利用示波器测量相位差的方法有两种:直接法与李沙育图形法。直接法是在示波器的屏幕上同时显示两个被测正弦信号波形,调节示波器的扫描速度开关与扫描微调开关,使得一个正弦波周期占满显示屏水平刻度8格(cm),这时读出两个正弦信号的最大值或零点之间的水平距离,乘以 360/8 即为两个信号之间的相位差。李沙育图形法请参阅示波器使用相关章节,在此不再赘述。

由于RLC串联谐振电路的品质因数为 $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$,若保持L与C的值不变,只需改变R值,就能改变电路的Q值。电路的幅频特性曲线随着电阻R的增加(Q下降)而下移,为了能更直观的反映电路的谐振特性随Q值而变化,通常会采用归一化的谐振曲线图。在该图中,纵坐标为 I/I_0 ,横坐标为 $\eta = \omega/\omega_0$,如图9.7.3所示,该图又称为通用谐振曲线图。从图中可以看出,Q值越大,曲线就越尖锐(陡峭),Q值越小,曲线就越平坦。

RLC串联谐振电路具有带通的选频特性。当谐振曲线的幅度下降至峰值的0.707倍时,所对应的频率称为截止频率 f_c 。小于谐振频率的截止频率称为下截止频率,可以用 f_{c1} 来表示,大于谐振频率的截止频率称为上截止频率,可以用 f_{c2} 来表示,上、下截止频率之间的频带范围为谐振电路的通带范围,其带宽为 $\Delta f = f_{c2} - f_{c1} = f_0/Q$,如图9.7.3所示。

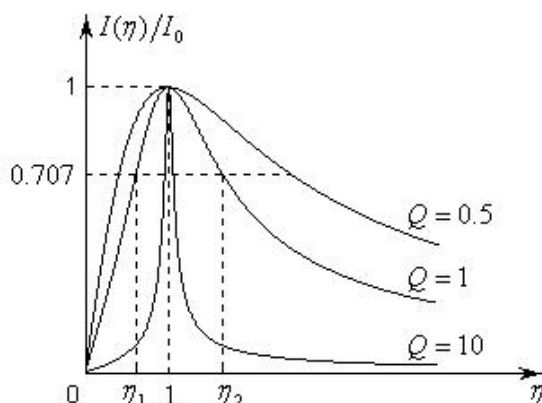
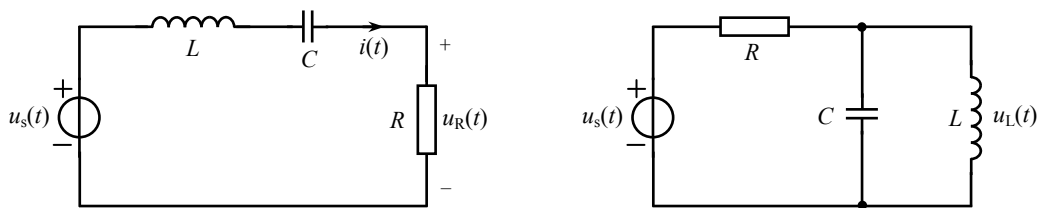


图 9.7.3 不同 Q 下的归一化谐振曲线(通用谐振曲线)

三、实验电路设计

本实验要求设计的RLC串联谐振电路与并联谐振电路如图9.7.4所示。在图9.7.4(a)中, $L=40\text{mH}$, $C=0.1\mu\text{F}$, $R=100\Omega$ 。在图9.7.4(b)中, $L=40\text{mH}$, $C=0.1\mu\text{F}$, $R=100\text{k}\Omega$ 。激励信号源为正弦信号。



(a) 串联谐振电路

(b) 并联谐振电路

图 9.7.4 RLC 谐振实验电路

四、实验任务要求

1. 计算图 9.7.4(a)中 RLC 串联谐振电路的品质因数 Q 与谐振频率 f_0 。
 - (1) 以 f_0 为频率中心，向左、向右调节激励信号源的频率，但幅度 U_S 需保持不变，测量电阻 R 上的电压 U_R ，自拟表格记录数据。
 - (2) 双踪观察并记录 $u_R(t)$ 与 $u_S(t)$ 的曲线随频率的变化，描述 $u_R(t)$ 与 $u_S(t)$ 的相位变化情况。
 - (3) 根据测量数据画出 U_R 的通用谐振曲线，并确定上、下截止频率，以及通带宽度。
2. 将图 9.7.4(a)电路中的 R 增大至 $1\text{k}\Omega$ ，重复任务 1 的内容。

五、实验操作要点

1. 绘制谐振曲线时，需在谐振点左右各测 10 个以上频率点，在谐振频率附近需较为密集，谐振曲线的最小幅值需小于最大峰值的 0.1 倍。
2. 测量电压时需使用示波器，不能使用普通的交流电压表。

六、思考题

1. 如何判断电路是否处于谐振状态？
2. 实际测出的谐振频率与理论值是否有误差，分析误差产生的原因。
3. 选频通带宽度： $\Delta f = f_{C2} - f_{C1} = f_0 / Q$ ，试根据定义推导该公式。

第三篇 电子电路设计实验

实验一 晶体管共射放大电路设计

实验目的 学习晶体管放大电路的设计方法，掌握晶体管放大电路静态工作点的设置、测量与调整方法，了解放大器的非线性失真，掌握放大器电压增益、输入电阻、输出电阻、幅频响应等基本性能指标的测量方法，理解负反馈对放大电路性能的影响。

一、晶体管共射放大电路分析计算

图 2.1.1 所示为分立电路中普遍采用的阻容耦合共射放大电路。它采用的是分压式电流负反馈偏置电路。射极电阻 R_{E1} 、 R_{E2} 都参与了直流电流负反馈，但只有 R_{E1} 参与交流电流负反馈，因为旁路电容 C_E 交流时可认为短路。

1、静态工作点计算

静态工作点计算主要是确定晶体管的静态电流 I_C 和集射静态压降 V_{CE} 。 I_C 值可用来计算小信号模型参数，进而计算放大电路的电压增益、输入电阻、输出电阻等主要性能指标， V_{CE} 值用来判断晶体管是否处于放大状态。

图2.1.1所示电路的直流通路如图2.1.2 (a)。该电路的近似计算通常假设 $I_{R1} \gg I_B$ ，求得 V_B 、 V_E ，进而求得 I_E 、 I_C 和 V_{CE} 。但这种估算有时候误差很大。实际上只需对这电路进行简单的戴维宁等效（如图2.1.2 (b)）就可计算出准确得多的直流结果。

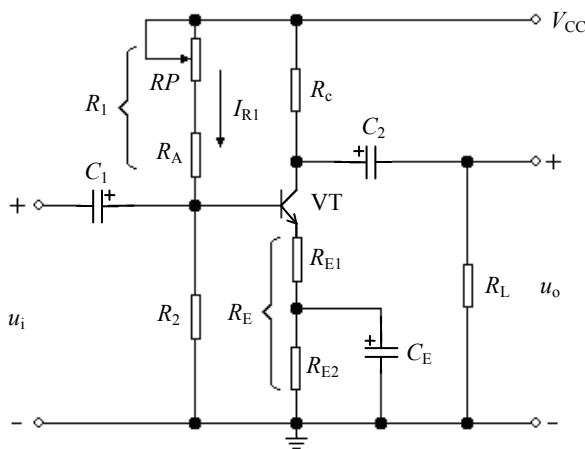


图 2.1.1 带射极负反馈的共射放大电路

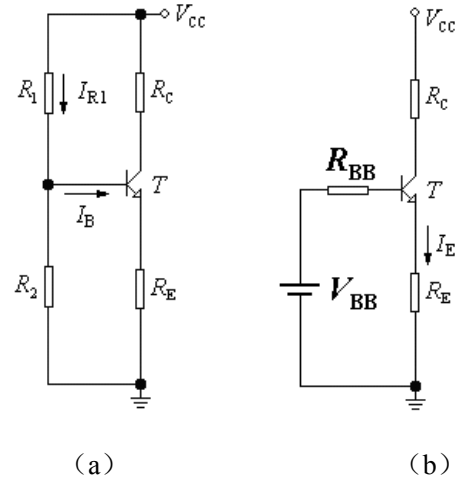


图 2.1.2 直流通路及其戴维宁等效电路

戴维宁等效电路中

$$\begin{cases} V_{BB} = V_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} & (2.1.1) \\ R_{BB} = R_1 \parallel R_2 & (2.1.2) \end{cases}$$

当晶体管处于放大状态时，可得

$$\left\{ \begin{array}{l} I_E = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_{BB}}{1+\beta}} \quad (2.1.3) \\ I_C = \frac{\beta}{1+\beta} I_E \approx I_E \quad (2.1.4) \\ V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E) I_C \quad (2.1.5) \end{array} \right.$$

2、交流性能指标计算

性能指标计算前，先算出需要用到的晶体管小信号模型参数

$$\left\{ \begin{array}{l} g_m = \frac{I_C}{V_T} \quad (2.1.6) \\ r_\pi = \frac{\beta}{g_m} \quad (2.1.7) \\ r_e = \frac{\alpha}{g_m} \quad (2.1.8) \end{array} \right.$$

图2.1.1所示电路的交流通路如图2.1.3所示。

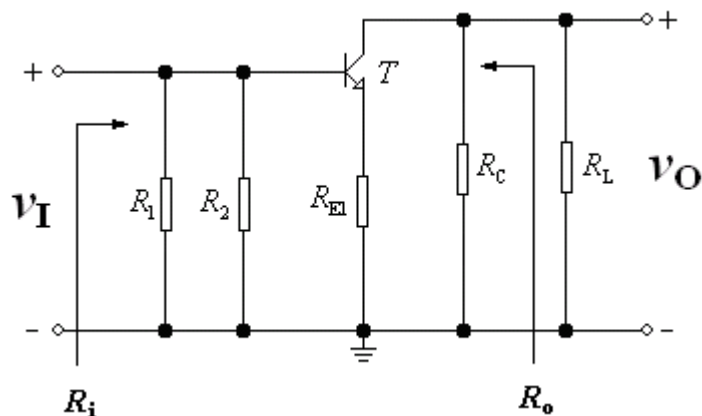


图2.1.3 交流通路

(1) 电压增益 A_v

共射放大电路从基极到集电极的电压增益：值为集电极总电阻与发射极总电阻之比，相位为反相关系。

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{\text{集电极总电阻}}{\text{发射极总电阻}} = -\frac{R'_C}{R'_E} = -\frac{R_C \parallel R_L}{r_e + R_{E1}} \quad (2.1.9)$$

(2) 输入电阻 R_i

放大器的输入电阻是指从信号源位置向放大电路输入端视入的交流电阻。它反映了放大器将从信号源开路电压中获取多少比例的分压。其理论值按图2.1.3的交流通路计算为

$$R_i = R_1 \parallel R_2 \parallel [(1+\beta)(r_e + R_{E1})] \quad (2.1.10)$$

(3) 输出电阻 R_o

放大器的输出电阻是指从负载位置向放大电路输出端视入的交流电阻。它反映了负载将从放大器输出的开路电压中获取多少比例的分压。其理论值为

$$R_o \approx R_C \quad (2.1.11)$$

(4) 通频带与截止频率

$$\text{通频带 } BW = f_H - f_L \quad (2.1.12)$$

式中, f_H 为上限截止频率, 主要受晶体管内部结电容及电路的分布电容限制; f_L 为下限截止频率, 主要受射极旁路电容 C_E 及耦合电容 C_1 、 C_2 影响。

要严格计算电容 C_1 、 C_2 及 C_E 同时存在对放大器低频特性的影响较为复杂。工程上常用短路时间常数法进行简化计算。先求出每个电容单独存在时的转折频率 ω_{C1} 、 ω_{C2} 、和 ω_{CE} , 则这些电容同时存在时的下限截止频率为

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\omega_{C1}^2 + \omega_{C2}^2 + \omega_{CE}^2} \quad (2.1.13)$$

计算每个电容单独作用的短路时间常数时, 令其他电容短路, 信号电压源也短路, 等效电路如图2.1.4。其中 R_S 为信号源内阻。

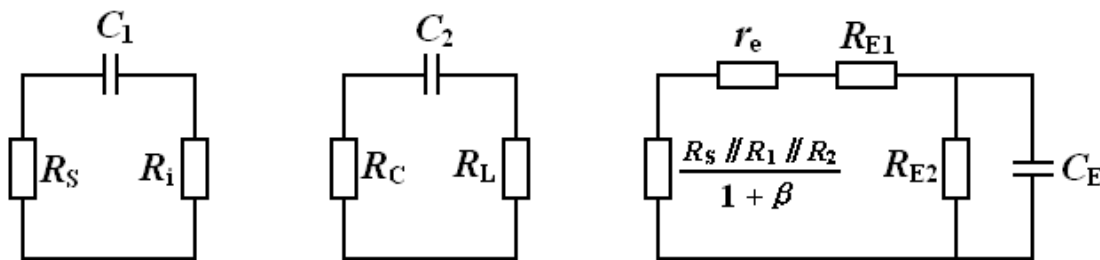


图2.1.4 电容单独作用时计算短路时间常数的等效电路

可以得到

$$\omega_{C1} = \frac{1}{(R_S + R_i) C_1} \quad (2.1.14)$$

$$\omega_{C2} = \frac{1}{(R_C + R_L) C_2} \quad (2.1.15)$$

$$\omega_{CE} = \frac{1}{\left[R_{E2} \parallel \left(R_{E1} + r_e + \frac{R_S \parallel R_1 \parallel R_2}{1 + \beta} \right) \right] C_E} \quad (2.1.16)$$

通常, 旁路电容 C_E 的视入等效电阻比耦合电容 C_1 、 C_2 的视入等效电阻小得多。因此, 当这三个电容值相当时, 整个电路下限截止频率 f_L 主要由旁路电容 C_E 引入的转折频率决定。

二、晶体管共射放大电路设计

晶体管放大电路设计就是按照放大器的性能指标要求, 选择电路结构, 确定各元件参数值的过程。由于给出的性能指标要求通常是一个范围而不是确定的值, 因此设计结果一般不是唯一的, 这与电路的分析计算通常有确定的唯一结果不同。这在一定程度上增加了电路设计的多样性、灵活性和复杂性。

根据性能指标范围确定静态工作点和元件参数值时有一些原则和经验公式可以参照。

(1) 在微弱信号放大或前置放大器设计时需要考虑晶体管的噪声系数。通常, 高频小信号晶体管工作电流在 $0.5\text{mA} \sim 2\text{mA}$ 时噪声最小, 一般设定在 1mA 以下。

(2) 由静态电流 I_E 式 (2.1.3) 可以看出, 要使静态工作点较稳定, 应取 $V_{BB} \gg V_{BE}$ 。对硅晶体管, 一般取 V_{BB} 为 $3\text{V} \sim 5\text{V}$ 。

(3) 要保证 V_B 足够稳定, 应使 $I_{R1} \gg I_B$, 常取 I_{R1} 为 $(5 \sim 10) I_B$ 。

(4) 为获得较大的输出信号摆幅和电压增益, 基极静态电压不能太高, 工程设计中一般取 V_B 或 $V_{BB} \approx \left(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4} \right) V_{CC}$ 。

(5) 由于射极电阻 R_{E1} 的负反馈作用, 增大 R_{E1} 能提高电路的输入电阻、能提高电压增益的稳定

性, 但将使电压增益值 $|A_V|$ 下降。另一方面, 当电压增益要求给定时, 增大 R_{E1} 就需要提高集电极电阻 R_C , 而这将降低晶体管的集电极静态电压 V_C 、影响输出信号摆幅。因此, R_{E1} 、 R_C 的确定需要根据电压增益 A_V 的大小及稳定性、输入电阻要求、输出信号摆幅等进行综合考虑。

(6) 耦合电容 C_1 、 C_2 和旁路电容 C_E 的取值。一般来说, C_1 、 C_2 、 C_E 取值越大, 放大器的下限截止频率越低。但电容越大, 体积也大、漏电电流也大。如果放大器的低频特性要求不是很苛刻, 没有必要每次都计算这三个电容值。 C_1 、 C_2 常取 $(1\sim 20)\mu\text{F}$ 、 C_E 常取 $(30\sim 100)\mu\text{F}$ 。

三、设计举例

设计一阻容耦合单级放大电路。

已知条件: $V_{CC}=+12\text{V}$, $R_L=3\text{k}\Omega$, $V_i=10\text{mV}$, $R_S=600\Omega$

性能指标要求: $|A_V|>15\text{V/V}$, $R_i>5\text{k}\Omega$, $f_L<50\text{Hz}$

解:

(1) 电路结构及晶体管选择

电路结构采用图2.1.1所示的射极电流负反馈共射放大电路, 这个电路可以获得较稳定的静态工作点。晶体管选用9013, 其特征频率 $f_T\geq 150\text{MHz}$ 。 β 按100计算。

(2) 静态工作点设置: R_E 、 R_1 、 R_2

由于被测信号幅度较小, 考虑噪声系数、取晶体管静态电流为 $I_C=1\text{mA}$ 。

取 $V_B=\frac{1}{4}V_{CC}=3\text{V}$, 得 $R_E\approx\frac{V_B-V_{BE}}{I_C}=2.3\text{k}\Omega$, 取标称值 $2.2\text{k}\Omega$ 。

当 $I_{R1}\gg I_B$ 时, $V_{BB}\approx V_B=3\text{V}$, 由 V_{BB} 式可得 $12\times\frac{R_2}{R_1+R_2}=3$, 因此 $R_1:R_2=3:1$ 。

R_1 、 R_2 的取值太小会使输入电阻要求($R_i>5\text{k}\Omega$)难以满足, 取值太大会使静态工作点稳定要求($I_{R1}\gg I_B$)难以满足。因此, R_1 、 R_2 的具体取值有两个考虑思路。

从输入电阻计算式看, 一般取 R_2 为 R_i 下限值的3倍即可满足输入电阻要求, 取 $R_2=15\text{k}\Omega$, 则 $R_1=45\text{k}\Omega$ 。

按 $I_{R1}\gg I_B$, 取 $I_{R1}=10I_B=0.1\text{mA}$, 则 $R_1=\frac{V_{CC}-V_B}{I_{R1}}=90\text{k}\Omega$, 因此 $R_2=30\text{k}\Omega$ 。

综合以上两点考虑, R_2 可取标称值 $20\text{k}\Omega$, R_1 可取值为 $60\text{k}\Omega$ 。为使静态工作点容易调整, R_1 可由 $36\text{k}\Omega$ 固定电阻和 $50\text{k}\Omega$ 电位器串联构成。

(3) 电压增益有关元件值的确定: R_C 、 R_{E1}

由 $I_C=1\text{mA}$ 得 $r_e\approx 26\Omega$ 。取 $|A_V|=20\text{V/V}$, 由 A_V 计算式可得 $\frac{R_C\parallel 3000}{26+R_{E1}}=20$ 。

R_C 、 R_{E1} 的具体取值也有两个考虑思路。

从输入电阻 R_i 入手。先取定一个符合要求的 R_i , 按 R_i 计算式可以确定 R_{E1} , 然后可确定 R_C 和 R_{E2} 。取 $R_i=5\text{k}\Omega$, 由 R_i 理论式(2.1.10)可得 $R_{E1}=48\Omega$, $R_C=2.94\text{k}\Omega$, $R_{E2}=2.2\text{k}\Omega$ 。

从输出信号摆幅考虑。先取定一个使输出信号摆幅较大的集电极电位 V_C , 由此可确定集电极电阻 R_C , 然后由增益式确定 R_{E1} 和 R_{E2} 。如取 $V_C=\frac{2}{3}V_{CC}=8\text{V}$, 可以获得 4V 左右的输出信号摆幅。则 $R_C=\frac{V_{CC}-V_C}{I_C}=4\text{k}\Omega$, $R_{E1}=60\Omega$, $R_{E2}=2.2\text{k}\Omega$ 。

因此, R_C 、 R_{E1} 、 R_{E2} 的标称值可分别取为 $3.9\text{k}\Omega$ 、 56Ω 和 $2.2\text{k}\Omega$ 。

(4) 电容的确定

$$\text{取 } f_L=40\text{Hz}, \text{ 则 } C_E = \frac{1}{2\pi f_L \left[R_{E2} \parallel \left(R_{E1} + r_e + \frac{R_S \parallel R_1 \parallel R_2}{1 + \beta} \right) \right]} \approx 45\mu\text{F}, \text{ 可用标称值为 } 47\mu\text{F} \text{ 的}$$

电解电容。 C_1 、 C_2 可用标称值为 $22\mu\text{F}$ 的电解电容。

(5) 验算

由 $R_1=60\text{k}\Omega$, $R_2=20\text{k}\Omega$, $R_C=3.9\text{k}\Omega$, $R_{E1}=56\Omega$, $R_{E2}=2.2\text{k}\Omega$, $C_1=C_2=22\mu\text{F}$, $C_E=47\mu\text{F}$ 和 $V_{CC}=+12\text{V}$, 可以算得 $I_C=0.947\text{mA}$ 、 $V_C=8.3067\text{V}$, $|A_v|=20.38\text{V/V}$, $R_i=5.386\text{k}\Omega$, $f_L=38.2\text{Hz}$ 。

四、电路安装与调试

1、静态工作点调整与测量

根据设计的元件值组装电路, 接通电源, 测量电路的静态工作点。

测量方法: 不加输入信号, 将放大电路输入端与地短接。用万用表直流电压档分别测量晶体管的B、C、E极对地电压, 判断晶体管工作状态。

如果 $V_C \approx V_{CC}$, 则说明晶体管接近截止区; 如果 $V_{CE} \leq 0.5\text{V}$, 则说明晶体管已进入饱和区。除此之外, 晶体管工作在放大区, 但这并不能说明工作于合适的静态工作点。

静态工作点过高或过低都容易产生非线性失真。若 Q 点过高, 如图2.1.5所示的 Q_1 , 稍大的输入信号正半周将使晶体管进入饱和区, β 值明显减小, 因而 i_c 波形将出现顶部压缩、输出电压 u_{ce} 波形将在底部压缩, 这称为饱和失真; 若 Q 点太低, 如图2.1.5所示的 Q_2 , 稍大的输入信号负半周将使晶体管进入截止区, 因而 i_c 波形将出现底部压缩、输出电压 u_{ce} 波形将在顶部压缩, 这称为截止失真。

大信号工作时, 为了得到最大不失真输出电压幅度, 其静态工作点应设在交流负载线的中间位置, 如图2.1.6所示。但当输出信号幅度不是太大时, Q 点不一定要选在交流负载线的中点, 而是可根据其他要求来选择。例如, 希望放大器耗电少、噪声低或输入阻抗高, Q 点可选得低一些; 而当希望放大器增益高时, 就要求 Q 点适当高一些。

调整静态工作点的方法就是改变上偏置电阻 R_1 的大小, 即调节电位器的阻值, 同时用万用表检测集电极电阻 R_C 两端压降, 以判断 V_{CE} 和 I_C 是否为合适值。

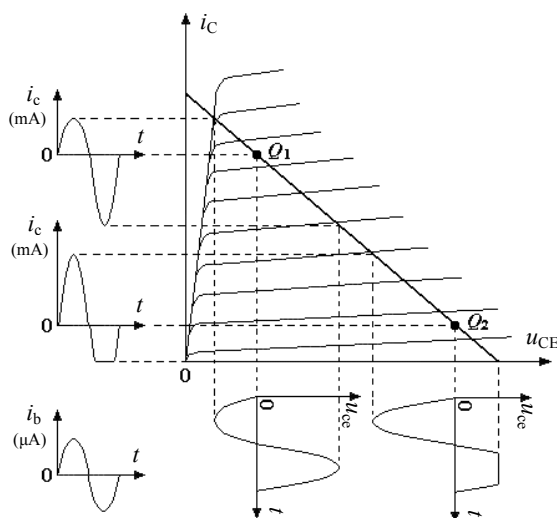


图 2.1.5 静态工作点选取不当产生的非线性失真

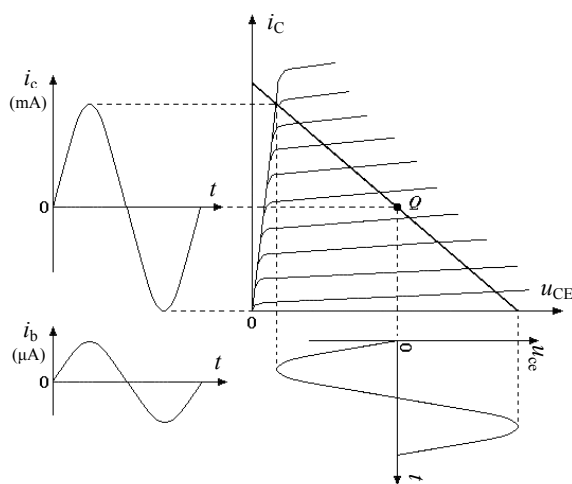


图 2.1.6 为获得最大不失真输出电压的静态工作点选取

2、交流性能指标测试

交流性能指标包括电压增益、输入电阻、输出电阻、最大不失真输出电压、通频带等, 这些参

数必须在输出信号不失真的情况下测试才有意义。

(1) 电压增益 A_V

测量方法：给定正弦输入信号的幅度和频率，在确定输出波形无明显失真的情况下，用示波器分别测出输出电压的峰峰值 V_{OPP} 和输入电压的峰峰值 V_{iPP} ， V_{OPP} 与 V_{iPP} 之比即为电压增益。

测量时应注意用示波器的双踪示波功能观察输出信号与输入信号的相位关系。

(2) 输入电阻 R_i

测量方法：在信号源与被测放大器输入端之间串入一个与被测 R_i 相当（理论估算）的已知电阻 R ，在输出波形不失真的情况下，分别测出 u_s 和 u_i ，则放大器的输入电阻为

$$R_i = \frac{u_i}{(u_s - u_i)/R} = \frac{u_i}{u_s - u_i} \times R \quad (2.1.17)$$

(3) 输出电阻 R_o

测量方法：在输出电压波形不失真的情况下，分别测出输出端空载时的输出电压 u_o 和接入已知负载 R_L 后的输出电压 u_o' ，则放大器的输出电阻为

$$R_o = \frac{u_o - u_o'}{u_o' / R_L} = \left(\frac{u_o}{u_o'} - 1 \right) \times R_L \quad (2.1.18)$$

(4) 幅频特性

放大电路一般含有电抗元件，这使得电路对不同频率信号具有不同的放大能力，即电压增益是频率的函数。电压增益的大小与频率的函数关系称为幅频特性。一般用逐点法进行测量。

在保持输入信号幅度不变、且输出波形不失真的情况下，改变输入信号频率，逐点测量并记录各频率点的电压增益，以各点数据描绘出的双对数坐标曲线即为幅频特性曲线。由曲线可确定放大电路的上、下限截止频率，用 f_H 和 f_L 表示，频带宽度 $BW=f_H-f_L \approx f_H$ 。

以上指标的详细测量方法请参阅第一篇第 1 章的 1.3 节“电子实验测量技术”。

五、实验任务与要求

1、设计一阻容耦合单级放大电路

已知条件： $V_{CC}=+10V$ ， $R_L=5.1k\Omega$ ， $V_i=10mV$ ， $R_S=600\Omega$

性能指标要求： $f_L < 30Hz$ ，对频率为 $1kHz$ 的正弦信号 $|A_V| > 15V/V$ ， $R_i > 7.5k\Omega$

2、设计要求

(1) 写出详细设计过程并进行验算

(2) 用软件进行仿真

3、电路安装、调整与测量

自己编写调试步骤，自己设计数据记录表格

4、探索研究内容

(1) 改变 R_{E1} 的大小探究对放大器增益的影响；(2) 改变 C_E 的大小探究放大器下限截止频率的变化；(3) 探究静态工作点对放大器动态范围的影响；(4) 在晶体管的 B、C 间接入一瓷片电容（数百 PF ），分析对放大器什么性能产生影响，探究电容的大小对该性能的影响。以上探究内容可先用软件仿真，然后进行实验研究。

5、写出设计性实验报告

实验二 差分放大器的设计与调试

学习目的 学习晶体管差分放大电路的设计方法，掌握差分放大器基本参数的测试方法和调试技能。熟悉基本差分放大器与恒流源偏置差分放大器的性能差别，掌握提高共模抑制能力的措施。

一、差分放大电路原理与分析

差分放大器又称为射耦对，由于它能提供许多模拟电路所需要的差模输入特性，能抑制零点漂移，可实现射耦对之间的直接级联，因此得到广泛应用。差分放大器是模拟电路的基本单元电路之一，常作为集成运算放大器的输入级。

差分放大电路的最简单形式如图2.2.1所示，它由两个元件参数完全相同的共射放大器组成。晶体管 VT_1 、 VT_2 为差分对管，参数完全相同，电路也对称， $R_{C1} = R_{C2} = R_C$ 。

差分放大器有两个信号输入端和两个信号输出端，可以构成四种不同连接方式：

- 双端输入-双端输出
- 双端输入-单端输出
- 单端输入-双端输出
- 单端输入-单端输出

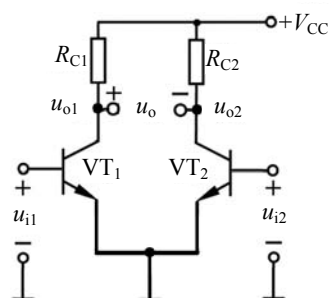


图 2.2.1 差分放大电路的最简单形式

该电路常用于放大两个输入信号之差，因此被称为差分放大器。

差分放大器对差模输入信号和共模输入信号有完全不同的响应，引入如下定义：

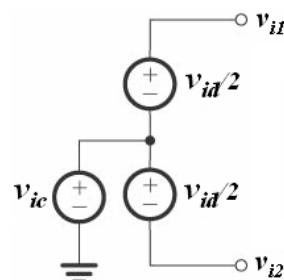
$$\begin{cases} \text{差模输入电压} & u_{id} = u_{i1} - u_{i2} & (2.2.1) \\ \text{共模输入电压} & u_{ic} = \frac{1}{2}(u_{i1} + u_{i2}) & (2.2.2) \end{cases}$$

因此，实际输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} 用共模分量和差模分量可以表示为

$$u_{i1} = u_{ic} + \frac{1}{2}u_{id} \quad (2.2.3)$$

$$u_{i2} = u_{ic} - \frac{1}{2}u_{id} \quad (2.2.4)$$

如图所示。



当输入为纯共模信号时，即 $u_{id} = 0$ 、 $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ ，由于电路完全对称，有

$$\begin{cases} \text{单端输出电压} & u_{o1} = u_{o2} = A_{u1} u_{ic} & (2.2.5) \\ \text{双端输出电压} & u_o = u_{o1} - u_{o2} = 0 & (2.2.6) \end{cases}$$

这里 A_{u1} 是共射放大器电压增益。因此，该电路双端输出时能有效地抑制共模信号引入的零点漂移。

当输入为纯差模信号时，即 $u_{ic} = 0$ 、 $u_{i1} = +\frac{1}{2}u_{id}$ 、 $u_{i2} = -\frac{1}{2}u_{id}$

$$\begin{cases} \text{单端输出电压为} & u_{o1} = +\frac{1}{2}A_{u1}u_{id}、u_{o2} = -\frac{1}{2}A_{u1}u_{id} & (2.2.7) \\ \text{双端输出电压为} & u_o = u_{o1} - u_{o2} = A_{u1}u_{id} & (2.2.8) \end{cases}$$

因此，无论单端输出、还是双端输出，差分放大器都能有效地放大差模输入信号。

如果输入信号足够小，差分放大器工作于线性区、满足叠加原理，则差分放大器总输出电压为

$$u_o = u_{od} + u_{oc} = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic} \quad (2.2.9)$$

其中， $A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}}$ 为差模电压增益， $A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}}$ 为共模电压增益。

差分放大器的基本特点就是能有效地抑制共模信号，放大差模信号。常用共模抑制比 $CMRR$ 来

衡量差分放大器抑制共模信号的能力。 $CMRR$ 定义为差模电压增益 A_{ud} 与共模电压增益 A_{uc} 之比的绝对值, $CMRR = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$, 或 $CMRR = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$ (dB)。

二、差分放大器实用电路

1、长尾型差分放大电路

它由两个带射极负反馈电阻的共射放大器组成, 如图2.2.2所示。 R_{EE} 是两个晶体管共用的射极串联电阻。差模输入时、射极为信号地, R_{EE} 无负反馈作用, 不影响差模电压增益。但对共模信号, 射极不再是信号地, 较大的 R_{EE} 有较强的负反馈作用, 使共模电压增益 A_{uc} 大大低于差模电压增益 A_{ud} , 从而提高共模抑制比, 并稳定了静态工作点。

静态时, 即 $u_{i1} = u_{i2} = 0$, 有

$$\begin{cases} I_O = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{R_{EE}} \end{cases} \quad (2.2.10)$$

$$\begin{cases} I_{C1} = I_{C2} \approx \frac{1}{2} I_O \end{cases} \quad (2.2.11)$$

$$\begin{cases} V_{C1} = V_{C2} \approx V_{CC} - \frac{1}{2} I_O R_C \end{cases} \quad (2.2.12)$$

晶体管 VT_1 、 VT_2 的跨导为

$$g_{m1} = g_{m2} = g_m \approx \frac{1}{2} \frac{I_O}{V_T} \quad (2.2.13)$$

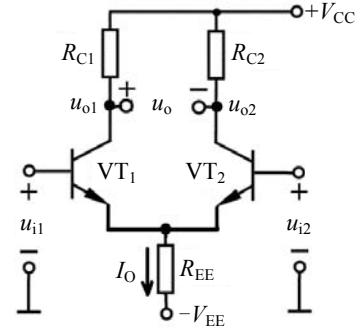


图 2.2.2 长尾型差分放大电路

所以差分放大器的静态工作点由偏置电流 I_O 决定。

差模电压增益计算

设 $u_{ic} = 0$ 、有 $u_{i1} = +\frac{1}{2}u_{id}$ 、 $u_{i2} = -\frac{1}{2}u_{id}$, 即输入为一对幅度相等、相位相反的信号, 则 $\Delta i_{C1} = -\Delta i_{C2}$, 因此 $i_{C1} + i_{C2} = \text{常数}$, 流过 R_{EE} 的电流不变, 发射极E仍为信号地, 有 $u_{o1} = -u_{o2} = \frac{1}{2} A_{u1} u_{id}$ 。这与图2.2.1所示的最简单形式的结论相同。

双端输出时, 差模电压增益为

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{id}} = A_{u1} = -g_m R_C \quad (2.2.14)$$

单端 u_{o1} 输出时, 差模电压增益为

$$A_{ud1} = \frac{u_{o1}}{u_{id}} = -\frac{1}{2} g_m R_C \quad (2.2.15)$$

单端 u_{o2} 输出时, 差模电压增益为

$$A_{ud2} = \frac{u_{o2}}{u_{id}} = \frac{1}{2} g_m R_C \quad (2.2.16)$$

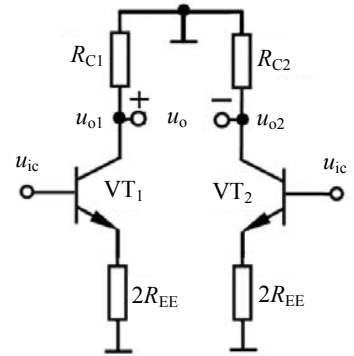


图 2.2.3 共模输入时的交流通路

共模电压增益和共模抑制比计算

纯共模输入时的交流通路如图2.2.3所示。 $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$, 即输入为一对幅度相等、相位相同的信号, 则 $\Delta i_{C1} = \Delta i_{C2}$, 因此

$$u_{o1} = u_{o2} = -\frac{\alpha R_C}{r_e + 2R_{EE}} u_{ic} \approx -\frac{g_m R_C}{1 + 2g_m R_{EE}} u_{ic} \quad (2.2.17)$$

双端输出时,

$$\begin{cases} \text{共模电压增益为} & A_{uc} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{ic}} = 0 \end{cases} \quad (2.2.18)$$

$$\text{共模抑制比为} \quad CMRR = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \infty \quad (2.2.19)$$

单端输出时，

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{共模电压增益为} \quad A_{uc1} = \frac{u_{o1}}{u_{ic}} = \frac{u_{o2}}{u_{ic}} = -\frac{g_m R_C}{1 + 2g_m R_{EE}} \end{array} \right. \quad (2.2.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{共模抑制比为} \quad CMRR = \left| \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right| = \frac{1}{2}(1 + 2g_m R_{EE}) \approx g_m R_{EE} \end{array} \right. \quad (2.2.21)$$

实际分立器件构成的差分放大电路中，两个晶体管的参数不可能完全一致，需加入调零电位器 RP ，使零输入时有零双端输出，如图2.2.4所示。 R_{B1} 、 R_{B2} 用来提高差分放大器的差模输入电阻。为保持差分放大电路的对称性，一般取 $R_{B1} = R_{B2} = R_B$ 。该电路的几个主要参数计算公式列于表2.2.1中。表中， r_e 为晶体管的发射极视入电阻， $r_e \approx \frac{1}{g_m}$ 。

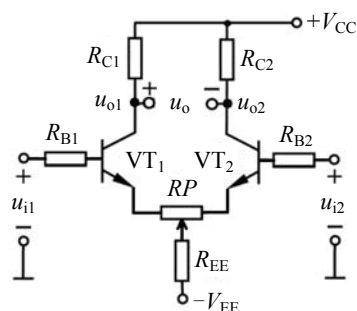


图 2.2.4 长尾型差分放大器实用电路

表 2.2.1 长尾型差分放大器主要参数计算公式

	双端输出	单端输出
差模电压增益	$-\frac{R_C \parallel (\frac{1}{2} R_L)}{\frac{R_B}{1+\beta} + r_e + \frac{1}{2} RP}$	$-\frac{R_C \parallel R_L}{2(\frac{R_B}{1+\beta} + r_e + \frac{1}{2} RP)}$
共模电压增益	0	$-\frac{R_C \parallel R_L}{\frac{R_B}{1+\beta} + r_e + \frac{1}{2} RP + 2R_{EE}}$
共模抑制比	∞	$\frac{1}{2} + \frac{R_{EE}}{\frac{R_B}{1+\beta} + r_e + \frac{1}{2} RP}$
差模输入电阻	$2R_B + (1 + \beta)(2r_e + RP)$	$2R_B + (1 + \beta)(2r_e + RP)$
共模输入电阻	$\frac{1}{2}[R_B + (1 + \beta)(r_e + \frac{1}{2} RP + 2R_{EE})]$	$\frac{1}{2}[R_B + (1 + \beta)(r_e + \frac{1}{2} RP + 2R_{EE})]$
输出电阻	$2R_C$	R_C

2、恒流源偏置的差分放大电路

由表2.2.1可见，提高 R_{EE} ，可降低共模电压增益、提高差分放大器的共模抑制能力。但提高 R_{EE} 、又要保持偏置电流 I_0 不变，就需要提高负电源电压 V_{EE} 的值。

用恒流源代替偏置电阻 R_{EE} ，可进一步提高差分放大器的共模抑制能力，并使静态工作点更加稳定。实用恒流源偏置差分放大器电路如图2.2.5所示。调节电位器 RP_2 可改变差分放大器的静态工作点。此时，恒流源的交流输出电阻相当于偏置电阻 R_{EE} ，可用于共模电压增益、共模抑制比等的计算。

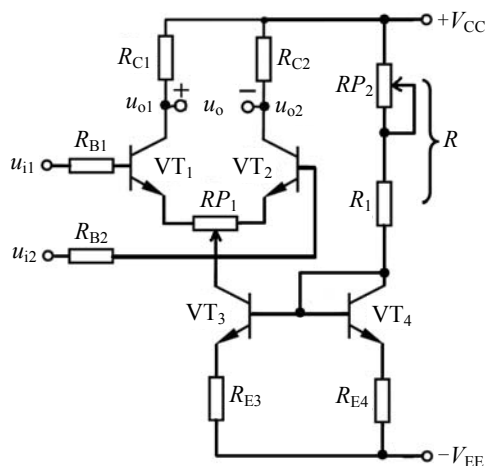


图 2.2.5 恒流源偏置差分放大电路

三、差分放大电路设计

差分放大器的设计，通常就是根据给出的连接方

式、电源电压、负载电阻、输入信号幅度等已知条件，和差模电压增益、差模输入电阻、共模抑制比等性能指标要求，确定电路结构、选择晶体管、确定各电阻值等的过程。设计时要注意以下几点。

1、如果对共模抑制比的要求较高，应采用恒流源偏置结构，并尽可能采用集成差分对管。常用的集成差分对管有S3DG6、S3DG8、BG319等。如果用分立晶体管构成差分放大电路，应选用 β 值尽可能接近的同型号晶体管。

2、调零电位器 RP 的取值以足够调节平衡为准、应尽量小一点，因为 RP 的提高将减小差模电压增益。一般取值在 $50\Omega \sim 150\Omega$ 之间。如果选用集成差分对管，由于对称性较好， RP 值可更小、甚至不用。

3、晶体管的静态电流通常取值在几百 $\mu A \sim$ 几 mA 之间，因为大部分小功率晶体管在此电流范围内时噪声最小。为简单起见一般采用对称电源，即取 $V_{EE}=V_{CC}$ 。

4、对于恒流源偏置型差分放大器，一般取 $R_{E3}=R_{E4}$ ，范围为几百 $\Omega \sim$ 几 $k\Omega$ 。实验中，为了观察到稍大幅度的共模输出信号，可取为 R_{E3} 、 R_{E4} 几十 Ω ，或直接短路。

四、设计实例

设计一个双端输入-双端输出恒流源偏置差分放大电路。

已知条件：晶体管 $\beta=80$ ，取 $V_{EE}=V_{CC}=12V$ ，负载 $R_L=30k\Omega$ 。

性能指标要求： $R_{id}>30k\Omega$ ， $|A_{ud}|>15V/V$ ， $CMRR>60dB$ 。

解：选取电路结构如图 2.2.5 所示。

取恒流源偏置电流为 $I_O=1mA$ ，则： $I_{C1}=I_{C2}\approx 0.5mA$ ， $g_m=\frac{I_C}{V_T}\approx 0.019/\Omega$ ， $r_e\approx \frac{1}{g_m}\approx 52\Omega$ 。

由 $R_{id}=R_{B1}+R_{B2}+(1+\beta)(2r_e+RP_1)$ ，取 $RP_1=100\Omega$ 、 $R_{id}=35k\Omega$ ，则 $R_{B1}=R_{B2}\approx 9.2k\Omega$ ，取标称值 $9.1k\Omega$ 。

由双端输出 $A_{ud}=-\frac{R_C\parallel(\frac{1}{2}R_L)}{\frac{R_B}{1+\beta}+r_e+\frac{1}{2}RP_1}$ ，取 $|A_{ud}|=20V/V$ ，得 $R_C=11.8k\Omega$ ，取标称值 $12k\Omega$ 。

验证晶体管工作点是否恰当。 $V_C=V_{CC}-I_C R_C=6V$ ，因此晶体管将工作于放大区、并且静态工作点接近负载线中部，上述参数选择合理。如果晶体管工作点不合适，可修改 I_O 的值，重新计算电路参数。

对于恒流源电路，元件参数计算如下。由指标要求 $CMRR>60dB$ ，可得要求共模增益 $|A_{uc}|<0.02V/V$ 。由于电路连接方式为双端输出，理论共模增益为零。取 $R_{E3}=R_{E4}=2k\Omega$ ，则流过电阻 R 的电流 I_{REF} 为 $I_{REF}\approx I_O=1mA$ ，而 $I_{REF}\approx \frac{V_{CC}-(-V_{EE})-V_{BE}}{R+R_{E4}}$ ，因此 $R=21.3k\Omega$ ，可由

阻值为 $15k\Omega$ 的固定电阻 R_1 和可调范围为 $0\sim 10k\Omega$ 的电位器 RP_2 串联构成。

五、实验任务要求

1. 设计一个单端输入-单端输出恒流源偏置差分放大电路。晶体管 β 按120计算，电源电压 $\pm 12V$ ，负载 $R_L=20k\Omega$ 。性能指标要求：差模输入电阻 $R_{id}>20k\Omega$ ，差模电压增益 $|A_{ud}|>20V/V$ ，共模抑制比 $CMRR>40dB$ 。
2. 测量并选择晶体管、电阻等，使需配对的元器件参数尽量一致，记录各元器件参数值。
3. 组装电路，调节放大器零点，使零输入时有零双端输出。

将差分放大器两个输入端与地短接，接通电源，用数字万用表直流档测量双端输出电压 u_o ，仔细调节调零电位器 RP_1 ，使 $u_o=0$ 。

4. 测试并调整电路的静态工作点。

测量 R_C 两端的电压，并调节电位器 RP_2 静态偏置电流 I_O 满足设计要求。测量并记录差分放大器各节点直流电压，并根据测量值计算 I_{C1} 、 I_{C2} 、 I_O 、 V_{CE1} 、 V_{CE2} 。

5. 测量差模电压增益。

(1) 分别输入直流差模信号 $+25\text{mV}$ 和 -25mV ，用数字万用表测量单端输出电压 u_{od1} 、 u_{od2} 。

分别计算各差模电压增益 A_{ud1} 、 A_{ud2} 及 A_{ud} 。

(2) 单端输入： u_{i1} 加峰峰值为 50mV 、频率为 1kHz 的正弦信号。用双踪示波观察 u_{i1} 与 u_{C1} 、 u_{C2} 的相位关系。在输出波形不失真的情况下，用示波器测量并记录 u_{i1} 、 u_{C1} 、 u_{C2} 的交流分量，并根据测量值计算单端输出及双端输出时的差模电压增益。

6. 测量共模电压增益。

将两输入端短接，并输入峰峰值为 1V 、频率为 1kHz 的正弦信号，用示波器观测 u_{C1} 和 u_{C2} 。如果电路的对称性很好， u_{C1} 、 u_{C2} 的波形都将近似为一条水平直线。如果电路的对称性不是很好， u_{C1} 、 u_{C2} 的波形可能为一对幅度相等、相位相反的正弦波。

在输出波形不失真的情况下，用示波器测量并记录 u_{i1} 、 u_{C1} 、 u_{C2} 的幅度，画出它们的波形，注意它们的相位关系。如果输出波形幅度太小，可适当提高输入信号的幅度。

根据测量值计算单端输出和双端输出时的共模电压增益。进一步计算出共模抑制比。

六、实验操作要点

1. 测量静态指标和动态指标前，一定要先调零。
2. 调整静态偏置电流 I_O 也可以通过监测电阻 R_{C1} 、 R_{C2} 两端的电压 U_{Rc} 、改变电位器 RP_2 来实现。
3. 有的集成差分对管的发射极是连接在一起的，无法串入调零电位器，此时可通过调整 R_{C1} 或 R_{C2} 来实现调零，但这将引入一定的共模增益、损失一些共模抑制比。
4. 设计电路时应考虑如何产生测试时需要用到的直流差模信号 $+25\text{mV}$ 和 -25mV 。
5. 如果要求用双端输入方式进行测试，那么还需要设计测试用信号发生电路。可以用隔离变压器、或单端输入-双端输出的差分放大电路、或运算放大器电路等实现。
6. 差模输入电阻的测量原理与共射放大电路输入电阻测量原理相同。需注意的是，在一个输入端串入已知阻值辅助电阻时，为保持差分放大电路的对称性，在另一输入端也应串入相同值的电阻。但计算时还需要减去那个电阻的阻值。

实验三 多级低频小信号放大器的设计与调试

一、实验目的

1. 了解多级放大电路中级间耦合的几种方式及各自特点，掌握多级放大电路主要性能指标的计算方法。
2. 学习多级低频小信号放大器设计的基本知识。
3. 学习印刷电路板设计软件，用其绘制电路原理图（SCH图）和印刷电路版图（PCB图）。
4. 学习电路制作，进一步巩固放大电路主要性能指标的测量方法。

二、实验理论基础

多级放大电路一般可以分为三个组成部分：输入级、中间级和输出级，其框图如图9.5.1所示，通常每一级由一种基本单元电路构成。

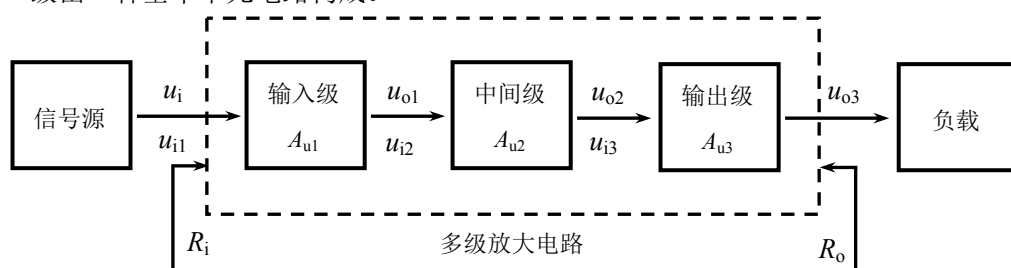


图 9.5.1 多级放大电路内部框图

1. 多级放大器的级间耦合方式

多级放大电路中各单级放大电路之间的连接称为耦合。常用的耦合方式有：阻容耦合、直接耦合、变压器耦合等。

在分立元件构成的晶体管小信号放大电路中，阻容耦合用得最多。阻容耦合时前后级之间通过电容连接，各级电路的静态工作点相互独立、互不影响，电路的分析计算和设计调整相对比较简单。但耦合电容不能传送直流信号，因此这种耦合方式不适用于直流放大器。

直接耦合电路不存在电抗元件，低频特性好、便于集成。但各级电路的静态工作点相互牵制、不易调试，且存在直流电平漂移引起零点漂移问题。

变压器耦合时直流信号无法通过，各级电路静态工作点相互独立，还可使前后级电路阻抗匹配，实现最佳功率传输。但低频变压器体积大，不易集成，且频带较窄。

2. 多级放大电路主要性能指标计算

(1) 电压增益计算

多级放大电路总电压增益等于各级电路电压增益的乘积，图9.5.1所示多级放大电路的总电压增益为 $A_u = A_{u1} \times A_{u2} \times A_{u3}$ 。计算各级电路电压增益时须考虑前后级电路的影响，要把后级电路的输入电阻视作本级电路的负载电阻，把前级电路的输出电阻视作本级信号源的内阻。

(2) 输入电阻、输出电阻计算

一般来说，多级放大器的输入电阻就是输入级电路的输入电阻，输出电阻就是输出级电路的输出电阻。

(3) 通频带

多级放大电路的下限截止频率 f_L 高于各级电路的下限截止频率：

$f_L \approx \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \dots + f_{Ln}^2}$ ，上限截止频率 f_H 低于各级电路的上限截止频率：

$$\frac{1}{f_H} = \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{Hn}^2}} \quad \text{。 因}$$

此，多级放大电路总的通频带要比各单级电路的通频带都窄。

三、实验电路设计

1. 多级放大电路设计的一般步骤

电子电路设计的一般流程如图9.5.2所示，因此设计多级放大电路的一般步骤如下。

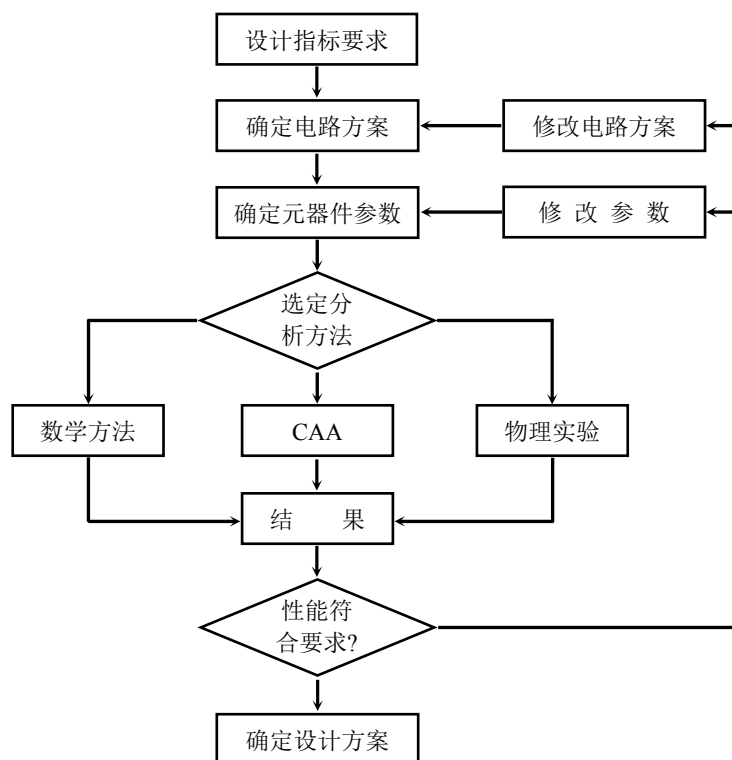


图 9.5.2 电子电路设计的一般流程

(1) 根据设计任务拟定电路方案

设计任务一般会给出电压增益、输入电阻、输出电阻、通频带等指标要求，根据这些要求完成以下工作：

多级放大电路由几级基本放大电路组成？

各级电路采用何种组态，各用什么器件？

初步确定各级电路的具体指标分配。

级与级之间采用何种耦合方式？

(2) 各级单元电路设计

单元电路设计就是根据方案所选择的基本组态及该级电路的具体指标确定元器件参数。多级放大电路中常用的单元电路有：差分放大电路、共射放大电路、射极跟随器、恒流源电路等。

(3) 耦合电容的确定

如果采用电容耦合方式，耦合电容将对电路的下限截止频率 f_L 产生影响。

(4) 仿真

使用电路CAD工具对所设计电路进行仿真，根据仿真结果可以对设计方案进行修改，使其性能指标满足设计任务要求，并且要留有一定的余量。另外仿真结果还可用于与实验测试结果相比较。

2. 设计示例

试设计一个低频小信号放大电路，要求：电压增益 $\geq 45\text{dB}$ ，负载电阻 $3.3\text{k}\Omega$ ，正弦输入信号 5mV （有效值），输出电阻 $\leq 200\Omega$ 。

(1) 总体设计

单级共射放大器的电压增益一般在 $20 \sim 40\text{V/V}$ 之间比较合适，太大则电路的稳定性较差。因此 $\geq 45\text{dB}$ 的电压增益需用两级共射放大电路来实现。另外从输出电阻来看，共射放大器的输出电阻一般在几 $\text{k}\Omega$ 以上，不能满足要求，只能用射极跟随器作输出级，其输出电阻很容易做到 $\leq 200\Omega$ 。因此，初步确定由两级共射放大电路和一级射极跟随器来实现。

由于任务中没有规定频率特性方面的要求，为简单起见，级与级之间采用电容耦合方式。

前级共射放大电路的静态工作电流可取为 $0.5\text{mA} \sim 2\text{mA}$ ，后级电路的静态工作电流可以取得大些。因为前级电路的信号小，而晶体管静态工作电流在 $0.5\text{mA} \sim 2\text{mA}$ 时噪声较小，这有利于提高信噪比。后级电路的信号电压较大，静态工作电流取得大一些可使输出电压不至于失真。因此第二级共射放大电路的电压增益可取得大一些，可取为第一级共射电路电压增益的2倍左右。由于射极跟随器的电压增益接近于1，考虑一定的电压增益余量后，第一级共射放大器的电压增益取为 20V/V ，第二级共射放大器的电压增益取为 40V/V 。

(2) 各部分的具体设计

各部分的具体设计方法请参阅本篇的实验1。

四、实验任务要求

1. 设计一个由晶体管构成的低频小信号放大器。已知正弦信号源幅度 10mV ，频率范围 $10\text{Hz} \sim 100\text{kHz}$ ，内阻约 $1\text{k}\Omega$ ，负载电阻 $2.2\text{k}\Omega$ 。性能指标要求：电压增益 $> 45\text{dB}$ ，输出电阻 $< 150\Omega$ 。

要求详细阐述设计步骤，说明设计方案、电路原理、各元器件及参数选择依据。

2. 用 OrCAD 软件对所设计电路进行模拟仿真分析。

3. 用印刷电路板设计软件绘制电路原理图（SCH图）和印刷电路版图（PCB图）。

4. 制作、安装、调试所设计电路，自行编写测试步骤，以验证电路是否满足设计要求。

五、实验操作要点

1. 原理图设计时，直流电源应带有去耦电路。

2. 设计时应考虑各级电路能进行独立调试，即级与级之间经跳线连接、容易脱卸。
3. 印刷电路板设计时，要考虑电源插座、输入插座、输出插座等。
4. 为便于示波器等的探头接入，在各主要节点应设计有测试点。
5. 电路板的四角应设计有安装孔，以便安装螺杆将电路板支撑起来。

实验四 两级阻容耦合负反馈放大器的设计与调试

一、实验目的

1. 加深理解负反馈放大电路的工作原理及特点，深入理解交流负反馈对放大电路性能的影响。
2. 掌握两级阻容耦合放大器及由其构成的负反馈放大电路的设计及调试方法。
3. 熟悉负反馈放大电路的实验研究方法，巩固放大电路主要参数的测试方法。

二、实验理论基础

为了获得足够高的电压增益，或者为了满足一定的输入、输出阻抗要求，实际的放大电路通常由两个或两个以上的基本放大电路级联而成。在该电路基础上引入适当的负反馈构成的闭环放大电路其性能会有很大的改善。

1. 负反馈放大电路

反馈放大器的通用结构如图9.6.1所示，它由正向传输的基本放大器 A 和反向传输的反馈网络 F 构成。基本放大器的净输入信号 x_i 是源信号 x_s 与反馈信号 x_f 比较后的差值，即 $x_i = x_s - x_f$ 。负反馈放大器的增益，即闭环增益为 $A_f = \frac{x_o}{x_s} = \frac{Ax_i}{x_i + F(Ax_i)} = \frac{A}{1 + AF}$ 。这里 A 为基本放大器的增益，即开环增益， $A = \frac{x_o}{x_i}$ ； F 为反馈系数， $F = \frac{x_f}{x_o}$ 。开环增益与反馈系数的乘积 AF 称为环路增益。 $(1+AF)$ 通常称为反馈深度，反映引入负反馈后放大电路增益下降的程度。

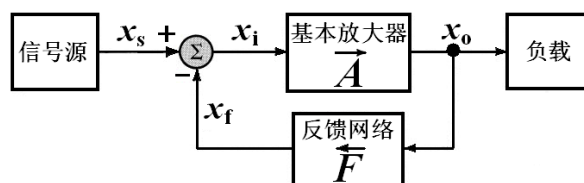


图 9.6.1 反馈放大器通用结构示意图

当电路满足 $(1+AF) \gg 1$ 时，称为深度负反馈，此时有 $A_f \approx \frac{1}{F}$ ，这说明深度负反馈条件下闭环放大器的增益完全取决于反馈网络参数，与基本放大电路参数无关。通常反馈网络由无源元件 R 、 C 等构成，因此深度负反馈下闭环放大器的增益非常稳定。

负反馈虽然使放大电路的增益降低，但能在多方面改善放大器的动态指标。其中最重要的一点是，当电源电压变化、温度改变或者器件老化等引起有源器件工作点变化时，负反馈可以稳定放大器的增益。另外，负反馈可以使设计者以所希望的方式调节电路的输入阻抗和输出阻抗，可以减小非线性失真，可以扩展电路的带宽等。

根据输出端取样方式和输入端接入方式的不同，负反馈放大器有四种结构、或称为四种组态，即电压串联负反馈、电流串联负反馈、电压并联负反馈、电流并联负反馈。这四种组态对放大器性能的具体影响，概括起来可以这样说：电压负反馈的反馈信号取自输出电压，将稳定输出电压、减小输出阻抗；电流负反馈的反馈信号取自输出电流，将稳定输出电流、提高输出阻抗。串联负反馈

的反馈信号串入到输入回路，将提高输入阻抗；并联负反馈的反馈信号与输入信号并联，将减小输入阻抗。

2. 反馈组态构成及判别的典型电路

如图9.6.2所示为晶体管电路中反馈网络常采用的取样和比较结构，图9.6.3所示的电路结构则适用于运算放大器电路。其中（1）示意的是输入回路中反馈信号与输入信号的叠加情况及相应的反馈类型，（2）和（3）示意的是输出回路中反馈信号的取样情况及相应的反馈类型。

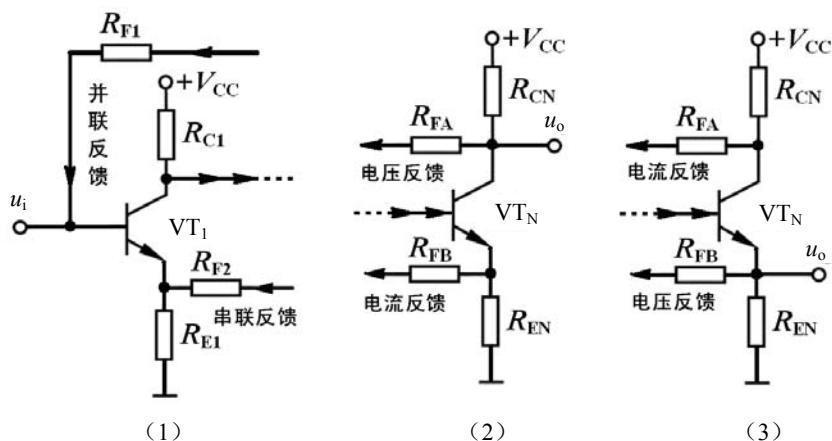


图 9.6.2 晶体管负反馈电路反馈类型判别典型电路

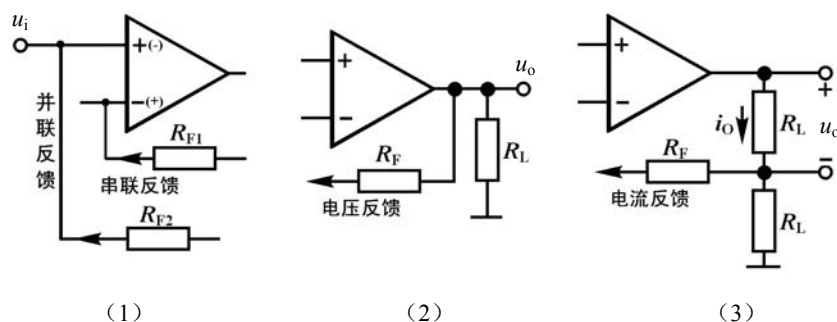


图 9.6.3 运放构成的负反馈电路反馈类型判别典型电路

三、实验电路设计

1. 负反馈放大电路的设计

首先，根据负载的要求及信号情况确定采用哪一种负反馈组态。在负载变化情况下，要求放大器输出电压保持稳定，在输出端就要采用电压取样；在负载变化情况下，要求放大器输出电流保持稳定，在输出端就要采用电流取样。至于输入端采用串联还是并联方式，主要根据对放大电路输入电阻的要求而定。当要求放大电路具有高输入电阻时，宜采用串联反馈；当要求放大电路具有低输入电阻时，宜采用并联反馈。例如，要求输入电阻较高（如 $R_i \geq 20k\Omega$ ），在输入端则应采用串联反馈方式；要求输出电阻较低（如 $R_o < 100\Omega$ ），在输出端应采用电压取样。

其次，根据闭环增益和反馈深度要求，初步确定反馈系数、开环增益的值。为了使电路的闭环增益足够稳定，反馈深度要适当大一些，即满足深度负反馈的条件。

第三，根据选择的开环增益确定开环放大电路的级数和电路结构，选取各级的静态工作点，初步设计开环放大电路和反馈网络的元件参数。

第四，使用计算机辅助分析与设计工具对所设计电路进行仿真分析和优化，使电路性能指标满足设计要求，电路结构和元器件参数合理。

2. 设计实例

本实验研究的负反馈放大电路其基本放大器是阻容耦合两级放大电路。如图9.6.4所示为常用的单电源供电阻容耦合两级放大电路。阻容耦合使前后两级电路的静态工作点相互独立，电路的分析

计算和设计调试相对简单。需要注意的是，后级电路的输入电阻就是前级电路的负载。通常前级电路的静态工作电流取为 $0.5\text{mA}\sim 2\text{mA}$ ，后级电路的静态工作电流可以取得稍大些。这是因为前级电路的信号较小，晶体管静态工作电流在 $0.5\text{mA}\sim 2\text{mA}$ 时噪声较小，有利于提高信噪比；而后级电路的信号较大，静态工作电流取得大一些可使输出电压不至于失真。

设计要求：以图9.6.4所示电路为基本放大器，引入负反馈。要求 $A_{uf} \geq 50\text{V/V}$ ， $R_{if} \geq 50\text{k}\Omega$ ， $R_{of} \leq 500\Omega$ 。 $R_L = 2\text{k}\Omega$ ， $V_{CC} = +12\text{V}$ 。

(1) 反馈网络设计

根据输入电阻和输出电阻要求，应引入电压串联负反馈，电路如图9.6.5所示。单级放大器增益一般可设计为 $20\sim 40\text{V/V}$ ，由于第一级存在电流串联负反馈，且第二级输入阻抗较低，所以 A_{u1} 可取 10V/V 左右，第二级增益 A_{u2} 取 30V/V 左右。则基本放大器增益为 $A_u \approx 300\text{V/V}$ 。

由 $A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u F}$ 可得 $F = \frac{1}{A_{uf}} - \frac{1}{A_u}$ 。设计要求 $A_{uf} \geq 50\text{V/V}$ ，留余量取 $A_{uf} = 60\text{V/V}$ ，可得 $F \approx 0.0133\text{V/V}$ 。

射极电阻 R_{E2} 不能太大，否则负反馈太强，使得放大器增益很小，一般取 $30\sim 100\Omega$ 之间。现取 $R_{E2} = 56\Omega$ 。由 $F = \frac{R_{E2}}{R_{E2} + R_F}$ 可得， $R_F = 4.144\text{k}\Omega$ ，取 $R_F = 4.7\text{k}\Omega$ 。

(2) 基本放大器设计

由负反馈放大电路画其基本放大电路时不能简单地只是断开负反馈网络，而是既要去掉反馈作用，又要将反馈网络的影响考虑到基本放大电路中去，即考虑反馈网络对基本放大器的负载效应。

画基本放大器的输入回路时，对于电压负反馈，可将负反馈放大器的输出端交流短路。画基本放大器的输出回路时，由于是串联负反馈，需将反馈放大器的输入端（VT₁管的射极）开路。这样就得到如图9.6.6所示的基本放大电路。

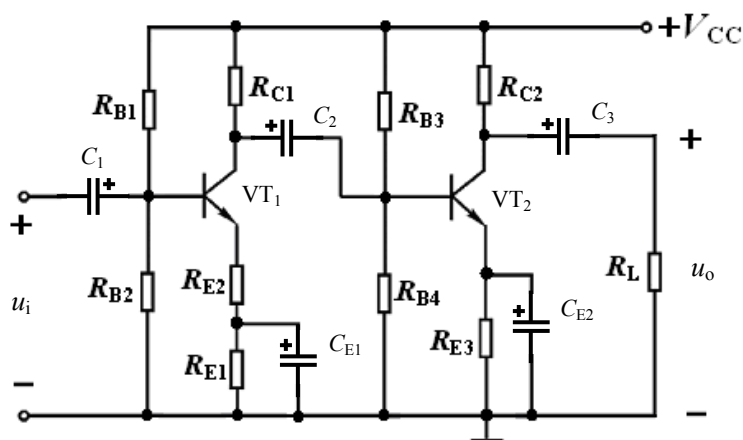


图 9.6.4 常用单电源供电电阻容耦合两级放大电路

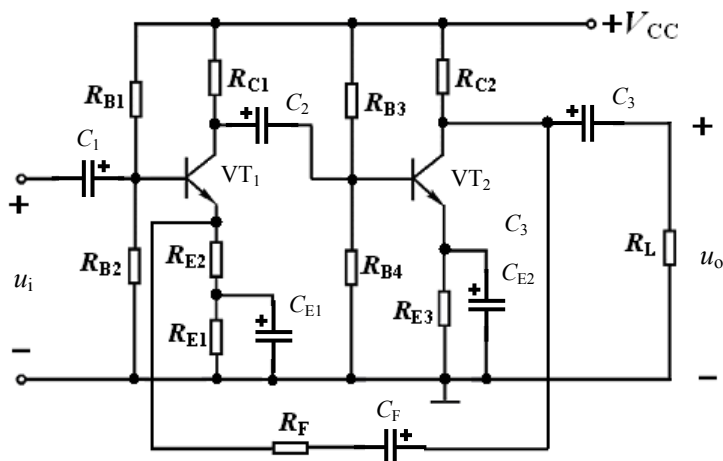


图 9.6.5 两级阻容耦合负反馈放大电路

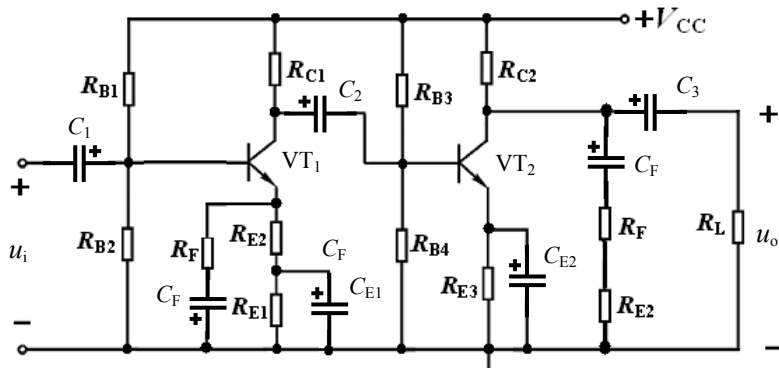


图 9.6.6 负反馈放大器的基本放大电路

基本放大器的电路参数设计方法可参考单级放大器的设计。

四、实验任务要求

1. 设计一个两级阻容耦合电压放大电路，并在其中引入电压串联负反馈，电路结构参考图9.6.5。指标要求：电压增益 $A_{uf}=40\pm 10\%$ ，反馈深度不低于10，输入电阻 $R_{if}\geq 50k\Omega$ ，输出电阻 $R_{of}\leq 200\Omega$ 。 $R_L=2k\Omega$ ， $V_{CC}=+12V$ 。
2. 组装电路，测试并调整电路的静态工作点。
3. 断开负反馈，按图9.6.6所示连接电路，测试基本放大器的各项性能指标： A_u 、 R_i 、 R_o 、 f_L 、 f_H ，并通过改变电源电压、或用电吹风改变元器件温度等方式来观察电压增益的稳定性。
4. 引入电压串联负反馈，按图9.6.5所示连接电路，测试负反馈放大器的各项性能指标： A_{uf} 、 R_{if} 、 R_{of} 、 f_{Lf} 、 f_{Hf} ，用3中同样的方法观察电压增益的稳定性，并与3作比较。
5. 通过改变基本放大器的增益和反馈网络来探究反馈放大器增益的影响因素。

五、实验操作要点

1. 按性能指标设计电路时，要留有一定的余量。
2. 由于基本放大器由两级共射放大电路构成，可能产生自激振荡，在测试、调整电路静态工作点时，需确认电路无自激。可以这样判断，在输入端人为加一微弱的干扰信号，如1kHz、2mV的正弦信号，用示波器观察输出电压波形是否有自激振荡。若有自激，可以在VT₂的基极与集电极之间加一容量为200pF左右的消振电容消除自激。
3. 开环放大器的增益不要取得太大，因为高增益多级放大器容易引起自激，施加负反馈后也较难补偿。

实验五 集成运算放大器基本运算电路研究

一、实验目的

1. 研究由集成运放构成的比例、加法、减法、积分等基本运算电路的组成与功能，加深对集成运放线性应用电路结构和性能特点的理解，掌握其设计方法。
2. 了解集成运放在实际应用时应考虑的一些问题，掌握其正确使用方法。

二、实验理论基础

集成运算放大器（简称集成运放）是一种具有高电压增益、高输入阻抗、低输出阻抗的直接耦合多级放大电路。由于集成运放具有极高的差模电压增益，要使其稳定工作于线性区，必须加深度负反馈，否则它将工作于饱和区或非线性状态。以集成运放为基本放大电路，外加恰当反馈网络构成的深度负反馈电路，可以实现比例、加法、减法、积分等模拟运算功能。

1. 理想运算放大器

工程设计与分析时，往往把运算放大器视为理想运放，就是将运放的各项技术指标理想化。满足下列条件的运算放大器称为理想运放。

- 开环差模电压增益 $A_{ud}=\infty$
- 输入电阻 $R_i=\infty$
- 输出电阻 $R_o=0$

- 共模抑制比 $CMRR = \infty$
- 带宽 $BW = \infty$
- 失调、温漂、内部噪声均为零等。

2. 理想运放在线性应用时的两个重要特性

由上述理想技术指标容易导出运放工作在线性区时的两个重要特性。

(1) “虚短”： $U_+ = U_-$ 。即运放的同相输入端和反相输入端的电位“无限”接近，就象短路一样，但不是真正的短路。

(2) “虚断”： $I_+ = 0$, $I_- = 0$ 。即同相输入端和反相输入端的偏置电流趋于零，就象断路一样，但不是真正的断路。

这两个特性使得集成运放构成的深度负反馈电路的分析和设计大大简化，而且与实测结果的误差很小。

3. 基本运算电路

(1) 反相放大器

反相放大器是最常用的信号放大电路之一，其电路结构如图9.2.1所示。这是一个电压-并联负反馈电路，其主要技术指标为：

- 闭环电压增益 $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_F}{R_1}$
- 输入电阻 $R_i = R_1$
- 输出电阻 $R_o = 0$

若取 $R_F = R_1$ ，则 $A_{uf} = -1$ ，为倒相器，可作为信号的极性转换电路。

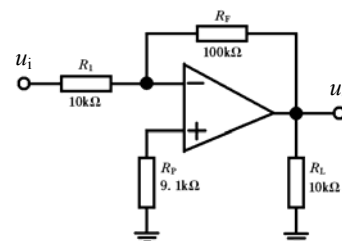


图 9.2.1 反相放大器电路

R_p 是直流平衡电阻，取 $R_p = R_1 \parallel R_F$ 。利用叠加原理，可以求出由输入偏置电流 I_+ 和 I_- 产生的输出失调电压为

$$u_o' = I_- R_F - I_+ R_p \left(1 + \frac{R_F}{R_1} \right)$$

当 $R_p = R_1 \parallel R_F$ 时，有 $u_o' = (I_- - I_+) R_F = I_{OS} R_F$ ，可以看出 R_p 可减小输入偏置电流引起的运算误差。

(2) 反相权重加法器

图9.2.2所示为反相权重加法器电路。其输出电压可表示为

$$u_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} u_{i1} + \frac{R_F}{R_2} u_{i2} \right)$$

这实际上是反相放大器的扩展应用，对多输入信号情况可以以此类推。 R_p 为直流平衡电阻，取 $R_p = R_1 \parallel R_2 \parallel R_F$ 。

若取 $R_1 = R_2 = R_F$ ，则输出电压为： $u_o = -(u_{i1} + u_{i2})$ ，为简单的反相加法器。

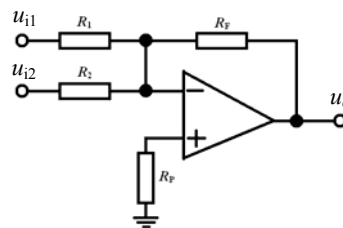


图 9.2.2 反相权重加法器电路

(3) 同相放大器

同相放大器也是最常用的信号放大电路之一，其电路结构如图9.2.3所示。这是一个电压-串联负反馈电路，其主要技术指标为：

- 闭环电压增益 $A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$
- 输入电阻 $R_i = \infty$
- 输出电阻 $R_o = 0$

取直流平衡电阻 $R_p = R_1 \parallel R_F$ ，可减小输入偏置电流引起的运算误差。

同相放大器具有输入电阻非常高、输出电阻很低的特点，广泛用于前置放大级。若使 $R_1 = \infty$ （即

开路)，则 $u_o = u_i$ ，即为如图9.2.4所示的电压跟随器。

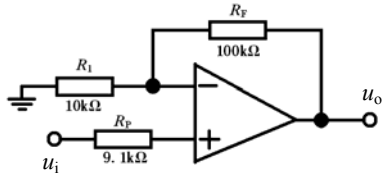


图 9.2.3 同相比例放大电路

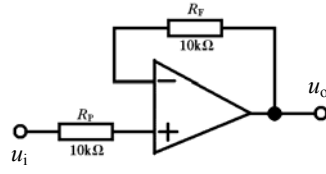


图 9.2.4 电压跟随器电路

(4) 差动放大器（减法器）

差动放大器电路如图9.2.5所示，它实际上是反相组态和同相组态的综合应用。当电阻两个 R_1 和两个 R_F 完全匹配时，输出电压可表示为：

$$u_o = -\frac{R_F}{R_1}(u_{i1} - u_{i2})$$

可以看出，差动放大器的输出电压与两个输入电压之差成正比，而与两个输入电压的共模分量无关。由于差动放大器具有双端输入-单端输出、共模抑制比高等特点，在测量电路中获得了广泛的应用。在实际应用中，其主要用途是从大的共模信号背景中提取并放大差模信号，常被用作传感器或测量仪器的前端放大器。

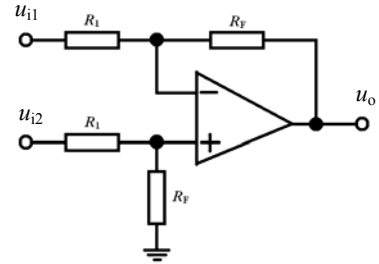


图 9.2.5 差动放大电路

(5) 反相积分器

反相积分器的基本电路如图9.2.6所示。假设集成运放为理想运放，并设电容两端初始电压为零，则输出电压为：

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_i(t) dt$$

当输入信号为一阶跃信号时，如：

$$u_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ E, & t \geq 0 \end{cases}$$

则有： $u_o(t) = -\frac{E}{R_1 C} t$

输出为一随时间线性变化的电压，如图9.2.7所示。

(6) 单电源供电的交流放大电路

在放大纯交流信号时，可以采用单电源供电。图9.2.8所示为单一正电源供电的交流电压放大电路。 R_2 、 R_3 为偏置电阻，用来设置运放同相端的静态电压。为了获得最大的输出电压动态范围，一般取 $R_2 = R_3$ ，此时放大器输出端的直流偏置电压等于同相端的直流偏置电压、均为 $V_{CC}/2$ 。

由于运放的输入端和输出端的直流电位不为零，所以需要采用电容 C_1 、 C_2 来隔离直流信号耦合交流信号。因此该电路只能放大纯交流信号。该交流放大电路的电压增益与反相比例放大电路相同：

$$A_{uf} = u_o/u_i = -R_F/R_1。$$

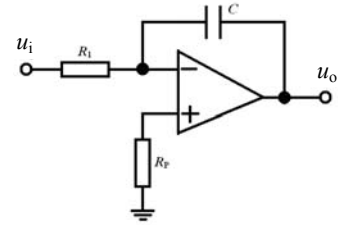


图 9.2.6 反相积分器基本电路

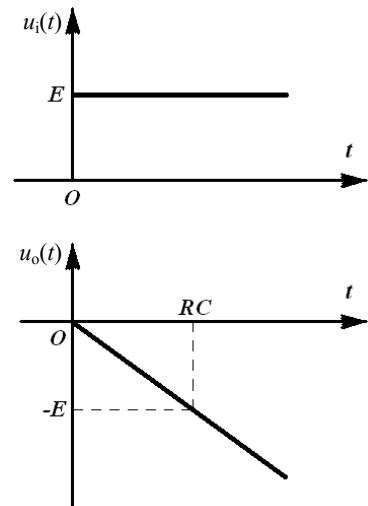


图 9.2.7 输入阶跃信号时的反相积分器输出波形

三、实验电路设计

集成运算放大器基本运算电路设计,就是根据设计要求,选择集成运放型号、确定电路结构及元件参数等。反相放大器、同相放大器、差动放大器等电路的设计原则基本类似。

1. 反相放大器等电路的设计

通常,反相放大器的设计指标有:闭环电压增益 A_{uf} 、输入电阻 R_i 、负载电阻 R_L 、输入信号幅度范围、输出电压动态范围、被放大信号频率范围、信号源内阻等。

(1) 集成运放的选择

在被放大信号频率很低或为直流信号,且幅度又不太小、运放失调等的影响可忽略的情况下,通常选择通用运放就能满足设计要求。这时一般手头有什么运放就用什么运放即可,推荐使用TI公司的 $\mu A741$ 运放。

当输入为微弱信号时,为了减小放大误差,应选用失调和漂移足够小的运算放大器。例如反相放大器输入信号幅度为10mV左右,就不应选用输入失调电压典型值为5mV的 $\mu A741$,而高精度运放TI公司的OP07是个不错的选择(输入失调电压典型值为60 μV)。

如果速度要求较高,就要选用高速运放。尤其是在放大高频大幅度信号时,一定要考虑运放的转换速率 S_R ,它表示输出电压每微秒的最大变化量。例如, $\mu A741$ 的单位增益带宽为1MHz, S_R 为0.5V/ μs 。如果将它接成电压跟随器,输入峰峰值为5V、频率为200KHz的方波,那么它的输出电压为一个幅值只有1.5V左右的三角波。这时可选用TI公司的NE5534,NE5534的单位增益带宽为10MHz, S_R 为13V/ μs 。

(2) 外电路元件参数的确定

在元件参数选择时,一般先根据电压增益要求确定 R_F 与 R_1 的比值,然后具体选择 R_F 、 R_1 的阻值。若对输入电阻 R_i 没有明确要求,则先依据经验选取 R_F 。选取原则:流过 R_F 的电流应小于集成运放的最大输出电流(一般小于10mA),同时又要远大于集成运放的输入偏置电流 I_B 。通常反馈电阻 R_F 的取值在几十k Ω ~几百k Ω 之间,不宜过大或过小。因为 R_F 过大、 R_1 也大,输入失调电流流过上述电阻会在运放输入端产生较大的附加差模电压,引起较大的输出失调;另一方面,1M Ω 以上的大电阻通常噪声大、稳定性差、精度低。若 R_F 过小、 R_1 也小,使输入电阻 R_i 过小,可能满足不了要求。

另外需要注意的是,按 $R_p = R_1 \parallel R_F$ 确定 R_p 时, R_1 应包括信号源内阻或前级电路的输出电阻。

同相放大器等电路的设计原则基本与反相放大器相似。需要指出的是,用作电压跟随器时,通常保留 R_F ,以减小漂移并起保护作用。 R_F 一般取10k Ω 左右阻值。

2. 反相积分器电路的设计

(1) 集成运放的选择

输入失调电压、输入失调电流和输入偏置电流会引起积分漂移,积分漂移是积分器的主要误差之一。为了减小积分漂移,可选择失调小、漂移小的集成运算放大器,如TI的JFET输入的运放LF356、TL081等。

(2) 外电路元件参数的确定

对于方波信号(阶跃信号)的输入, R_1 、 C 值应满足: $\frac{E}{R_1 C} \frac{T}{2} < U_{omax}$, U_{omax} 为运放输出电压最大值, E 为方波幅度、 T 为方波周期。即积分时间常数 $R_1 C$ 值不能太小,否则积分输出会使运放饱和。反之, $R_1 C$ 值太大,在一定的积分时间内输出电压幅度将很小。

由于反相积分器的输入电阻就是 R_1 ,往往希望 R_1 取得大一些。但增加 R_1 ,势必要减小 C ,这会加剧输入失调电流引入的积分漂移。因此,在 R_1 满足输入电阻的条件下,尽量选大一点的 C 。然而,

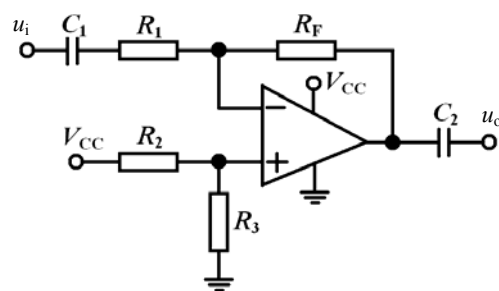


图 9.2.8 单电源供电的反比例放大电路

C 值取得过大又会带来漏电等问题。一般情况下,积分电容的值不宜超过 $1\mu\text{F}$ 。常选漏电小、容量稳定的聚苯乙烯电容、涤纶电容、或钽电容等,典型取值 $0.1\mu\text{F}$ 、 $0.01\mu\text{F}$ 。

实际电路中,常在积分电容两端并联一个电阻 R_f ,如图9.2.9所示,用以限制电路的低频(直流)电压增益。当输入信号频率远大于 $\frac{1}{2\pi R_f C}$ 时, R_f 可认为开路,电路为基本积分器。当输入信号频率远低于 $\frac{1}{2\pi R_f C}$ 、接近直流时,如果不接 R_f ,则运放近似开环,运放将饱和;接上 R_f , C 可认为开路,电路为反相放大器。

但是 R_f 的接入将对积分电容 C 产生分流作用,从而导致积分误差。为减小积分误差,一般需满足 $R_f \gg R_1$,通常取 $R_f \geq 10R_1$ 。

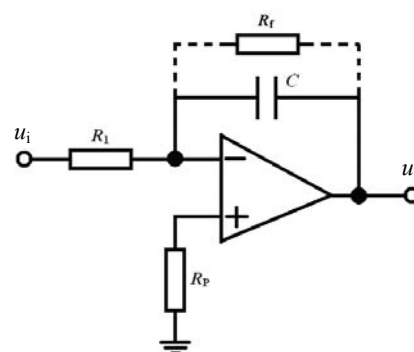


图 9.2.9 反相积分器实用电路

四、实验任务要求

运放的型号由实验室给定,电源电压建议用 $\pm 12\text{V}$ 。

1. 反相放大器设计与研究

- (1) 设计一反相放大器电路。要求:输入阻抗 $R_i = 10\text{k}\Omega$, 闭环电压增益 $|A_{uf}| = 10$ 。
- (2) 安装该放大器电路,在输入端加入频率为 1kHz 的正弦信号,研究输出信号与输入信号的幅度、相位等的关系。自己拟定一组幅度恰当的输入信号,结果填入自拟的表格中。

2. 设计实现一个算术运算电路

实现运算关系: $U_o = 2U_{i1} + 2U_{i2} - 4U_{i3}$ 。输入信号范围: $50\text{mV} \sim 200\text{mV}$,选择几组输入信号进行验证。

3. 反相积分器设计与研究

- (1) 设计一反相积分器电路,用以将方波变换成三角波。已知输入方波幅度约 2V 、频率约 1kHz ,使三角波幅度为 $\frac{1}{2}V_{CC}$ 左右。
- (2) 安装该积分器电路,观察积分器漂移情况。
- (3) 输入方波,用双踪示波器同时观察 u_i 和 u_o 的波形,记录波形,标出幅值和周期。
- (4) 探究与积分电容并联的反馈电阻 R_f 对积分器输出的影响。

五、实验操作要点

1. 组装电路前,需对所有电阻、电容逐一测量,并做好记录。
2. 查找资料,了解所用运放的性能指标、引脚分布等相关内容。实验时各个管脚不要接错,尤其是正、负电源脚不要接反。
3. 根据实验内容要求设计电路,计算各电路输出电压的理论值,设计数据记录表格。
4. 画波形图时要注意输入、输出波形间的相位关系。
5. 记录并分析讨论实验中出现的现象和问题。

六、思考题

1. 用运算放大器构成的负反馈电路其输出电阻可认为零,那么它能直接驱动电阻为 8Ω 的负载吗?为什么?

2. 在同相电压跟随器电路中，设集成运放的最大输出电压为 $\pm 12\text{V}$ ，转换速率为 $0.5\text{V}/\mu\text{s}$ ，输入正弦信号。当输入信号的频率为 1kHz 时，其最大不失真输出电压的幅度是多少？为了使最大不失真输出电压的幅度达到 8V ，信号的最高频率是多少？
3. 反相比例放大电路中，电阻 R_1 的取值不可太小（如几十 Ω ），为什么？
4. 若要设计一个 $A_{uf}=20$ 的同相放大电路，用于放大频率为 150kHz 的正弦信号，运放选用 $\mu\text{A}741$ 可以吗？选用 $\text{LM}318$ 可以吗？为什么？若放大频率为 1500kHz 的正弦信号呢？

实验六 集成运放构成的波形变换与产生电路研究

一、实验目的

1. 掌握运放在开环、正反馈下的工作特点。
2. 掌握比较器电路的电路构成及其工作原理。
3. 掌握方波、三角波和正弦波发生器的电路构成及其工作原理。

二、实验理论基础

1. 运放在开环、正反馈下的工作特点

运放在开环或引入正反馈下，它工作在限幅区（非线性工作区），这时运放有两个重要特点。

（1）运放的两个输入端输入电流为零。

（2）运放的两个输入端不一定是等电位，运放的输出状态在两个输入端等电位时发生翻转，即当 U 由小于 U_+ 变至等于（稍大于） U_+ 时，运放由正向限幅状态突变为负向限幅状态；当 U 由大于 U_+ 变至等于（稍小于） U_+ 时，运放由负向限幅状态突变至正向限幅状态。运放只是在正向限幅和负向限幅两种状态转换瞬间经过线性工作区。

2. 比较器

如图 8.5.1(a)所示是将运算放大器在开环下应用而构成一个电压比较器，输入电压 u_i 与参考电压 U_{Ref} 相比较，当 $u_i < U_{\text{Ref}}$ 时，运放输出低电平，即 $u_o = -U_{\text{OM}}$ ；当 $u_i > U_{\text{Ref}}$ 时，运放输出高电平，即 $u_o = U_{\text{OM}}$ 。因此，以 U_{Ref} 为界，当输入电压 u_i 变化时，输出端反映出两种状态：高电平和低电平。

表示输出电压与输入电压之间关系的特性曲线，称为传输特性。如图 8.5.1(b)所示为图 8.5.1(a)比较器的传输特性。

当 $U_{\text{Ref}}=0$ 时，即输入电压与零电平相比较，则该比较器称之为过零比较器。

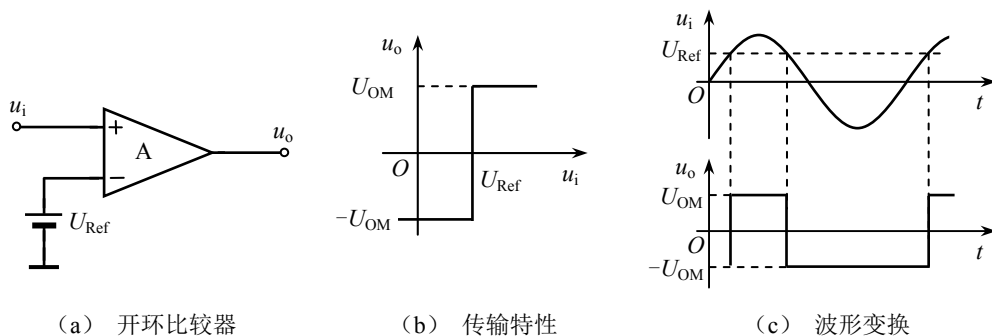


图 8.5.1 开环比较器及其传输特性

3. 滞回比较器

比较器结构简单，灵敏度高，但抗干扰能力差。如果引入正反馈，可以构成具有滞后传输特性

的滞回比较器，也称为施密特触发器。如图 8.5.2(a)所示为一反相输入的滞回比较器。在该电路中，

当 $u_o = U_{OM}$ 时，运放 U_+ 的电压称为上门限电压，其值 U_1 为：
$$U_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_f} U_{OM}$$

当 $u_o = -U_{OM}$ 时，运放 U_+ 的电压称为下门限电压，其值 U_2 为：
$$U_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_f} (-U_{OM})$$

因此当 u_i 由小增大到等于 U_1 时，运放由正向限幅状态翻转为负向限幅状态，而当 u_i 由大减小到等于 U_2 时，运放由负向限幅状态翻转为正向限幅状态，电路的电压传输特性如图 8.5.2(b)所示。

如果图 8.5.1(a)和 8.5.2(a)中的 u_i 为正弦波，则 u_o 为如图 8.5.1(c)和图 8.5.2(c)所示的方波，由此，比较器可以实现波形的变换。

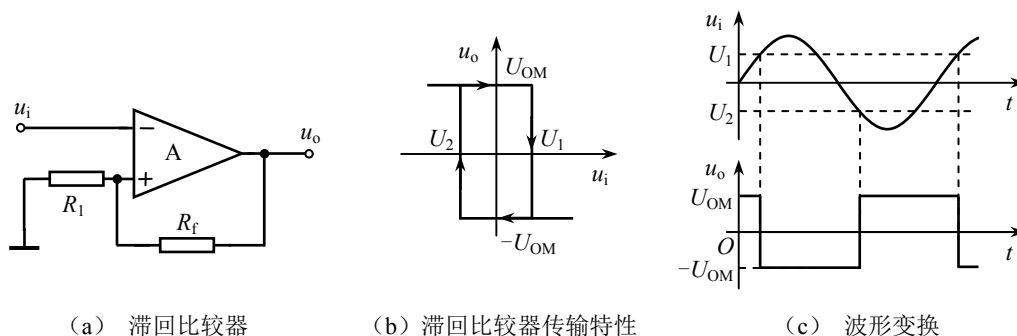


图 8.5.2 滞回比较器及其传输特性

若为了使输出电压的幅度被限制在 $\pm U_Z$ ，可采用双向稳压管 VD_Z ，电路如图 8.5.3 所示，图中 R 是稳压管的限流电阻。

4. 方波发生器

方波发生器是一种能产生方波的信号发生电路，又称为多谐振荡电路。它是由一个反相输入的滞回比较器和一个 RC 积分电路组成，基本电路如图 8.5.4(a)所示。

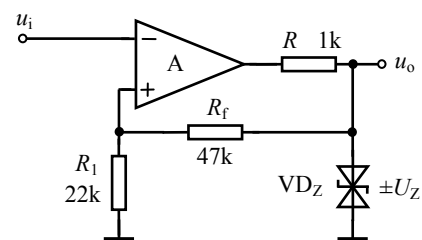
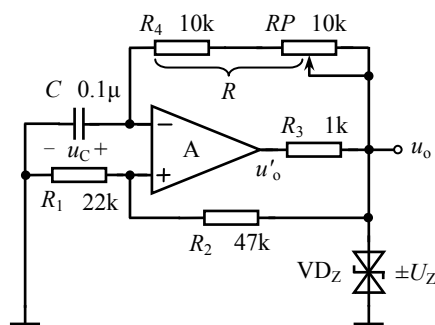
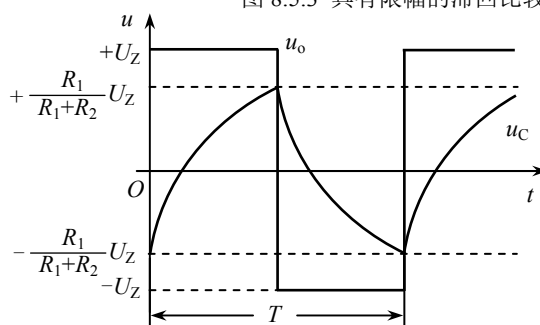


图 8.5.3 具有限幅的滞回比较器



(a) 方波发生器



(b) 波形图

图 8.5.4 方波发生器及其波形图

电路接通电源的瞬时，电路的输出为正向限幅还是负向限幅是随机的，设输出处于正向限幅，即 $u_o = U_Z$ 时，则电容 C 充电，其上的电压 u_c 按指数规律上升，当 u_c 上升到等于 $\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$ 时，运放的输出翻转为负向限幅， $u_o = -U_Z$ 。若输出处于负向限幅，即 $u_o = -U_Z$ 时，则电容 C 放电，其上电压 u_c 按指数规律下降，当 u_c 下降到等于 $-\frac{R_1}{R_1 + R_2} U_Z$ 时，运放的输出又翻转为正向限幅，如此循环，形成方波输出电压，输出电压波形图如图 8.5.4(b)所示。

由分析可知，输出方波的周期为：

$$T = 2RC \ln\left(1 + 2 \frac{R_1}{R_2}\right)$$

5. 三角波发生器

三角波发生器电路如图 8.5.5(a)所示, 它由一个同相输入滞回比较器(其上、下门限电压分别为 $\frac{R_1}{R_2}U_Z$ 、 $-\frac{R_1}{R_2}U_Z$) 和一个积分器构成。滞回比较器的输出作为积分器的输入, 积分器的输出(即三角波发生器的输出)作为滞回比较器的输入。

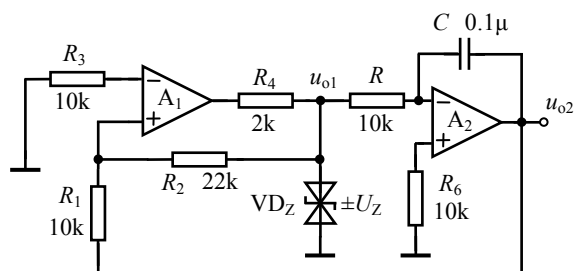
设电源接通, $u_{o1} = U_Z$, 则 u_{o2} 线性下降, 当下降到 $-\frac{R_1}{R_2}U_Z$ 时, 运放 A_1 输出翻转, 变为 $u_{o1} = -U_Z$;

当 $u_{o1} = -U_Z$ 时, 则 u_{o2} 线性增长, 当 u_{o2} 增长到 $\frac{R_1}{R_2}U_Z$ 时, 运放 A_1 输出再次翻转, 变为 $u_{o1} = U_Z$ 。

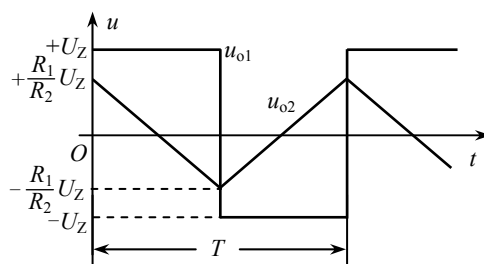
这样反复不已, 便可得到方波 u_{o1} 和三角波 u_{o2} , 波形图如图 8.5.5(b)所示。

三角波的峰值 $U_{O2m} = \frac{R_1}{R_2}U_Z$, 周期 $T = 4 \frac{R_1}{R_2} R \cdot C$

由以分析可知, 改变 U_Z 可改变输出电压 u_{o1} 、 u_{o2} 的幅度, 改变 R_1/R_2 的比值, 可改方波、三角波的周期和频率, 同时影响三角波输出电压的幅度, 但不影响方波输出电压的幅度; 改变 R 和 C , 可改变频率, 而不影响输出电压的幅度。



(a) 三角波发生器电路



(b) 波形图

图 8.5.5 三角波发生器及其波形图

6. 正弦波文氏振荡电路

如图 8.5.6 所示电路是由运放构成的 RC 桥式振荡电路, 其中 RC 串、并联电路构成正反馈支路, 同时兼作选频网络, R_1 、 RP 及二极管等元件构成负反馈和稳幅环节。

振荡频率为:

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

在频率 f_0 下, 正反馈网络的反馈系数为:

$$F_u = \frac{u_f}{u_o} = \frac{1}{3},$$

只有同相放大器的放大倍数 $A_u = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 3$ 时, 才

能满足振荡的振幅平衡条件 $A_u F_u = 1$, 即 $R_f = 2R_1$ 。

为了使电路容易起振, 应使 $A_u F_u$ 略大于 1, 即 R_f 应略大于 $2R_1$, 这可由调节 RP 来实现。

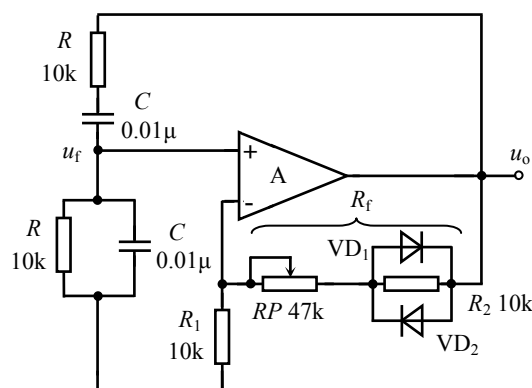


图 8.5.6 正弦波文氏振荡电路

电路中采用二极管来实现稳幅作用, 开始起振时输出电压幅度较小, 尚不足以使二极管导通, 此时 $R_f > 2R_1$, 放大器的电压增益大于 3, 而后随着输出幅度增加, 正向二极管导通, 其正向电阻逐渐减小, 直至 $R_f = 2R_1$ 时振荡稳定。达到稳态后, 文氏振荡器将输出幅度一定的正弦波。如果放大器

的电压增益过高，运放就有可能进入饱和状态，这时输出的不再是正弦波，而是方波。

二极管两端并联电阻 R_2 用于适当削弱二极管的非线性影响，以改善输出波形。

三、实验电路设计

1. 开环比较器电路设计

在 ORCAD 中画出电路图如图 8.5.7 所示，其中的输入信号源 V_i 取了 VSIN 源，比较参考源 U_{ref} 取了 VDC 源，运放取 uA741，输出端 U_o 接 $1000G\Omega$ 的大电阻是为避免悬空引起 PSpice 报错。

首先，设置瞬态分析（Transient）以得到输入、输出信号的波形。瞬态分析的参数设置为：终止时间 5ms，最大步长 1us。在 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中可得如图 8.5.8 所示的波形。从图 8.5.8 中可见，输出确实是在输入大于参考电压 U_{ref} 时为高电平 12V，小于 U_{ref} 时为低电平 -12V。

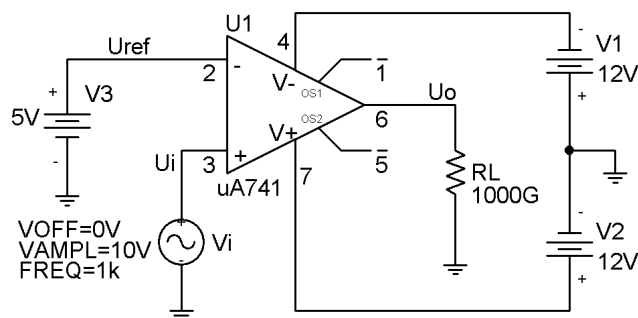


图 8.5.7 开环比较器电路图

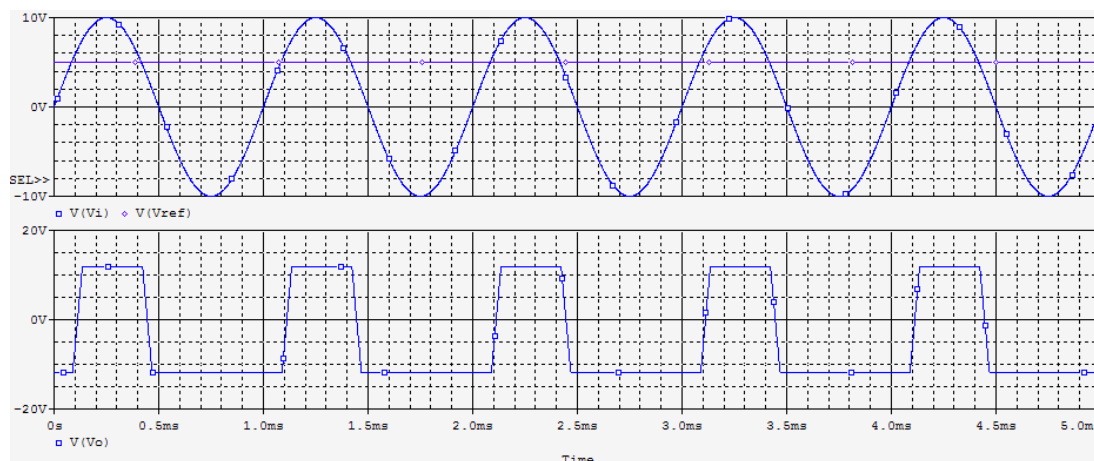


图 8.5.8 开环比较器输入输出波形

然后，设置直流扫描分析（DC Sweep）以得到运放的传输特性曲线，即输出电压与输入电压之间关系的特性曲线。直流扫描分析的参数设置为：扫描变量为电压源 V_i （注意：虽然 V_i 是 VSIN 源，但是它也有 DC 属性，当进行直流扫描分析时，它的 DC 属性就将起作用，此时 VSIN 源就相当于

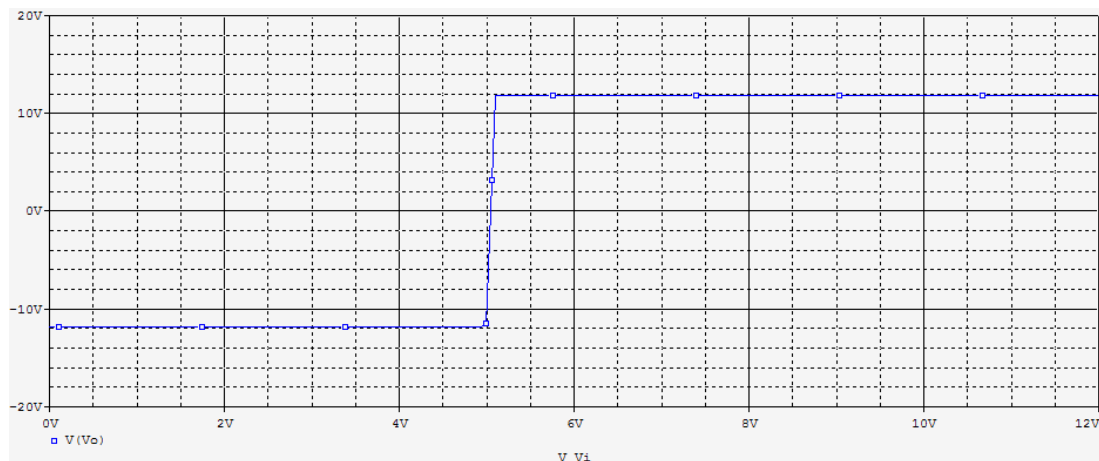


图 8.5.9 开环比较器传输特性曲线

直流电压源 VDC)，扫描类型为线性扫描，扫描设置为：初值 0，终值 12V，步长 0.1V。在 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中可得如图 8.5.9 所示的曲线。从图 8.5.9 中可见，随着输入的变化，输出确实是在参考电压 U_{ref} 处发生跳变的。

2. 滞回比较器设计

在 OrCAD 中画出电路图如图 8.5.10 所示，其中的输入信号源 V_i 取 VSIN 源，运放取 uA741。

首先，设置瞬态分析（Transient）以得到输入、输出信号的波形。瞬态分析的参数设置为：终止时间 5ms，最大步长 1us。在 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中可得如图 8.5.11 所示的波形。利用游标 Cursor 工具，从图中可见，当输入由高到低变化到约 -3.8V 时输出发生由低电平（约 -11.647V）到高电平（约 11.647V）的跳变；而当输入由低到高变化到约 3.8V 时输出发生由高电平到低电平的跳变。

然后，设置直流扫描分析（DC Sweep）以得到运放的传输特性曲线，

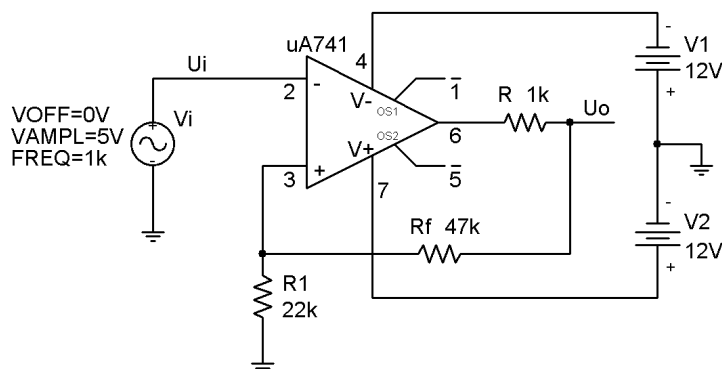


图 8.5.10 滞回比较器电路图

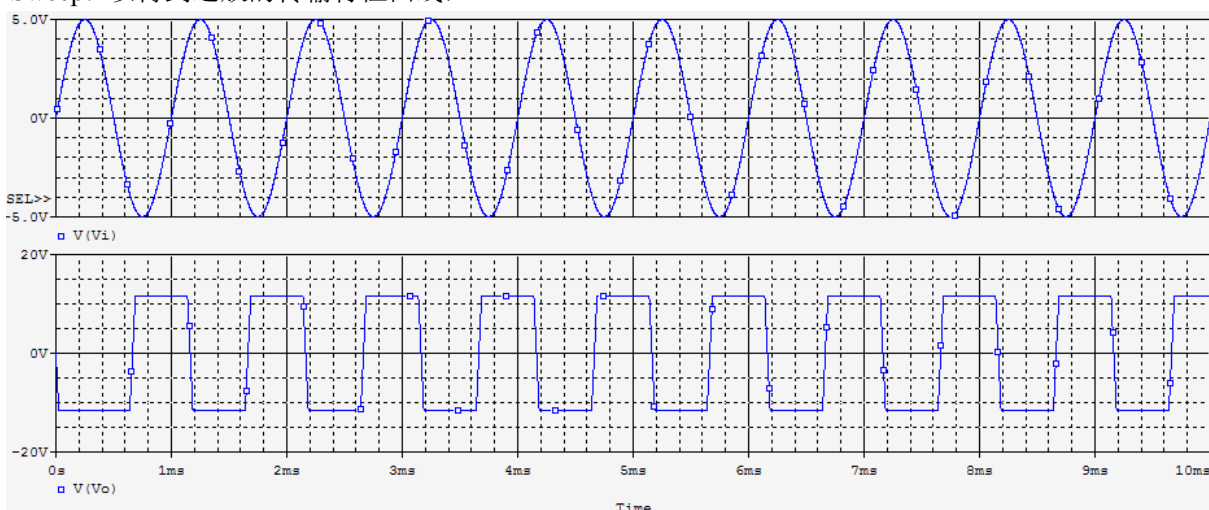


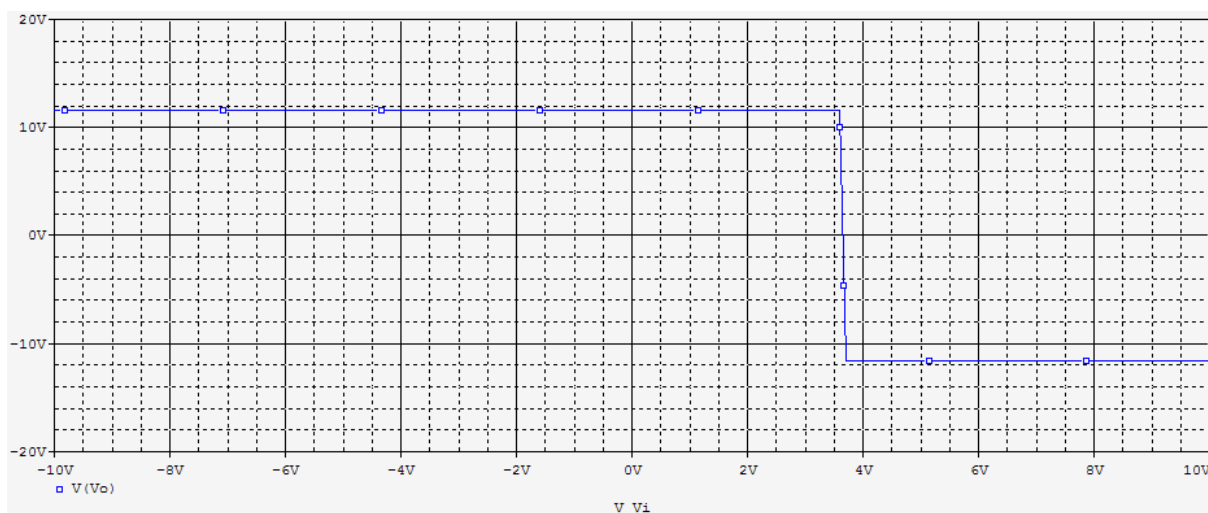
图 8.5.11 滞回比较器输入输出波形

即输出电压与输入电压之间关系的特性曲线。由于滞回比较器在输入信号由高到低变化和由低到高变化时其输出信号的变化情况是不一样的，因此需要进行两次直流扫描分析，一次是输入由低到高变化，一次是输入由高到低变化。直流扫描分析的参数设置为：扫描变量为电压源 V_i ，扫描类型为线性扫描，扫描设置为：一次是“初值 -10V，终值 10V，步长 0.1V”，一次是“初值 10V，终值 -10V，步长 -0.1V”。在 PSpice A/D 程序的 Probe 窗口中可得如图 8.5.12 所示的曲线。利用游标 Cursor 工具，从图 8.5.12 中可以得到，当输入由低到高变化变到约 3.7V 时输出发生由高电平到低电平的跳变，而当输入由高到低变化变到约 -3.7V 时输出发生由低电平到高电平的跳变，这与图 8.5.11 的结论基本一致。

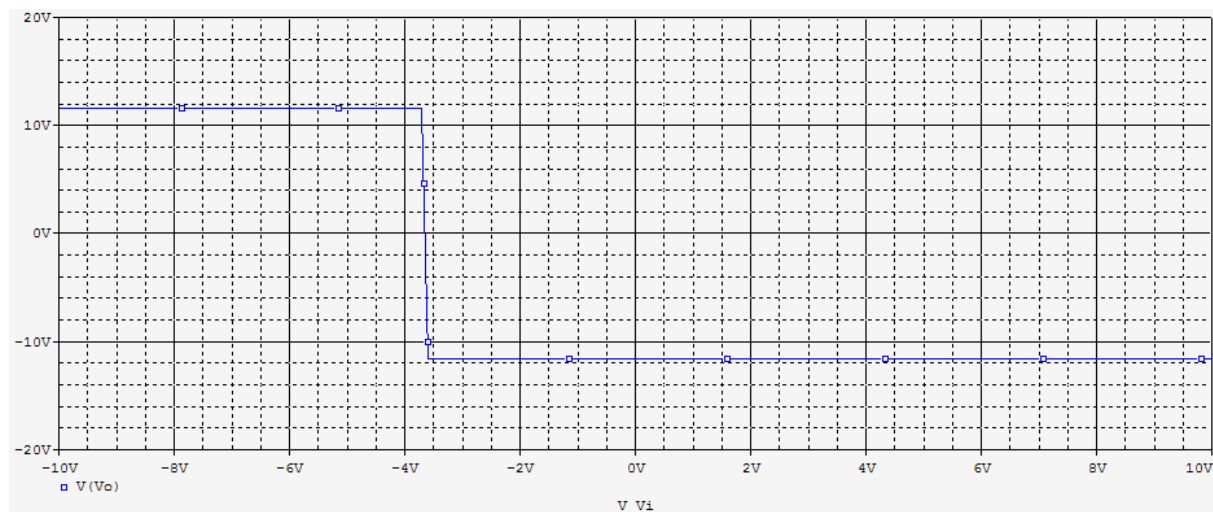
四、实验任务要求

1. 开环比较器的设计

- (1) 设计电路，取 $U_{ref} = 6V$ ，输入 $u_i = 10\sin\omega t$ 时，画出输入、输出波形和电压传输特性曲线。
- (2) 变化 U_{ref} ，画出输入、输出波形和电压传输特性曲线。



(a) 输入由低到高变化时的输出变化情况



(b) 输入由高到低变化时的输出变化情况

图 8.5.12 滞回比较器传输特性曲线

(3) 整理实验数据，将仿真结果与理论计算值进行比较，分析误差原因。

2. 电路图和输入电压 u_i 的波形如图 8.5.13 所示

(1) 画出 u_{o1} 、 u_{o2} 的波形图和电压传输特性曲线。

(2) 将仿真结果与理论计算值进行比较，分析误差原因。

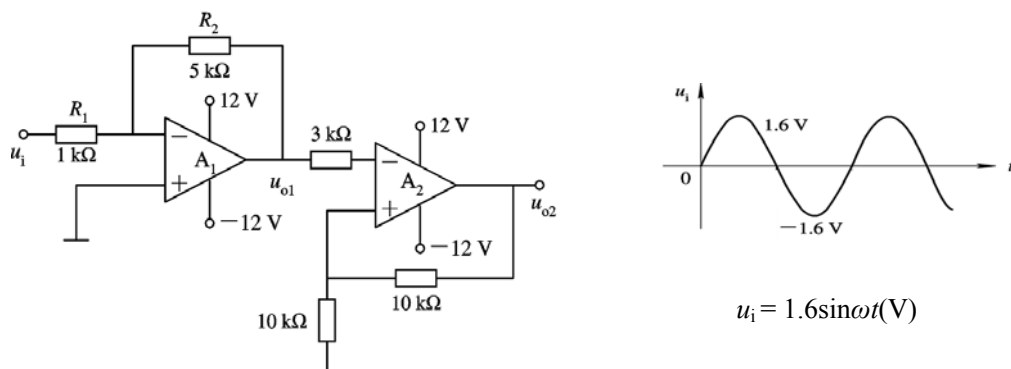


图 8.5.13 实验任务 2 图

3. 方波发生器

- (1) 设计电路，产生 500Hz 左右的方波，运放电源取 $\pm 12\text{V}$ 。
- (2) 将仿真测量频率值与理论计算值进行比较，分析误差原因。
- (3) 探究哪些元件决定方波的频率。

4. 三角波发生器

- (1) 设计一个方波、三角波发生器，设计指标要求如下：
输出电压： $u_{o1P-P} \leq 24\text{V}$ （方波）， $u_{o2P-P} = 8\text{V}$ （三角波）；输出频率：100Hz ~ 1kHz
绘出标有元件数值的实验电路图。
- (2) 整理实验数据，将仿真测量频率值与理论计算值进行比较，分析误差原因。
- (3) 探究哪些元件会影响三角波的频率和幅值。

5. 正弦波发生器

- (1) 对于图 8.5.6 正弦波文氏桥振荡电路，仿真测量其峰峰值、振荡周期及频率，并与理论计算值进行比较，分析误差原因。
- (2) 改变 RP ，观察输出现象，分析振荡器的起振振幅条件和稳定振幅条件。

五、实验操作要点

1. 在 OrCAD Capture 中输入开环比较器、滞回比较器、方波发生器、三角波发生器、正弦波发生器的电路图，设置仿真分析参数。
2. 运行仿真分析程序 OrCAD PSpice A/D 进行仿真分析。
3. 在 OrCAD PSpice A/D 的 Probe 窗口中查看仿真结果，观察几种集成运放波形变换与产生电路的工作情况。

六、思考题

1. 反相输入滞回比较器与同相输入滞回比较器的传输特性曲线有何不同？
2. 为什么说过零比较器的抗干扰能力差，怎样改进提高比较器抗干扰能力？
3. 如何用运放产生锯齿波？
4. 正弦波发生器中，如不能起振，可能是什么原因，应怎样处理？如波形失真严重，又该如何处理？
5. 在波形发生器各电路中，“相位补偿”和“调零”是否需要？为什么？

实验七 555 集成定时器的应用研究

一、实验目的

1. 熟悉 555 集成定时器的结构、工作原理及其特点。
2. 掌握由 555 集成定时器构成的单稳态触发器、多谐振荡器和施密特触发器的工作原理与应用电路的设计方法。熟练安装与调试各实验电路。

二、实验理论基础

集成定时器又称为集成时基电路或 555 电路，是一种数字、模拟混合型的中规模集成电路，外加电阻、电容可以组成多谐振荡器、单稳态电路、施密特触发器、报警器等，应用十分广泛。由于其内部使用了三个 $5\text{k}\Omega$ 电阻，故取名 555 电路。其电路类型有双极型和 CMOS 型两大类，几乎所有的双极型产品型号最后的三位数码都是 555 或 556，所有的 CMOS 产品型号最后四位数码都是 7555 或 7556。两者的结构与工作原理类似，逻辑功能和引脚排列完全相同，易于互换。555 和 7555 是单定时器。556 和 7556 是双定时器。

双极型 555 的电源电压 $V_{\text{CC}} = +3 \sim +15\text{V}$ ，最大输出电流可达 200mA ，能直接驱动继电器；CMOS 型的 555 电源电压为 $+3 \sim +18\text{V}$ ，最大输出电流 4mA 。输出低电平电压 $U_{\text{OL}} \approx 0\text{V}$ ，高电平电压 $U_{\text{OH}} \approx +V_{\text{CC}}$ 。

555 电路的内部电路方框图如图 9.9.1 所示。它含有两个电压比较器，一个基本 RS 触发器，一个放电开关管 VT_{D} ，比较器的参考电压由三只 $5\text{k}\Omega$ 电阻器构成的分压器提供。它们分别使高电平比较器 C_1 的同相输入端和低电平比较器 C_2 反相输入端的参考电平为 $\frac{2}{3}V_{\text{CC}}$ 和 $\frac{1}{3}V_{\text{CC}}$ 。 C_1 与 C_2 的输出端控制 RS 触发器状态和放电管开关状态。当输入信号自 6 脚，即高电平触发输入并超过参考电平 $\frac{2}{3}V_{\text{CC}}$ 时，触发器复位，555 的输出端 3 脚输出低电平，同时放电开关管导通；当输入信号自 2 脚输入并低于 $\frac{1}{3}V_{\text{CC}}$ 时，触发器置位，555 的 3 脚输出高电平，同时放电开关管截止。

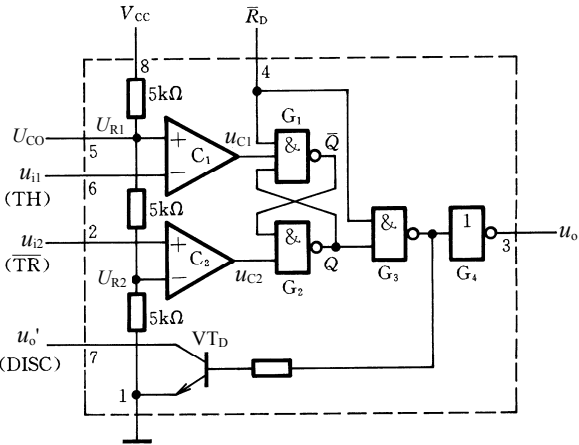


图 9.9.1 555 定时器内部框图

$\overline{R_{\text{D}}}$ (4 脚)是复位端，当 $\overline{R_{\text{D}}} = 0$ ，555 输出低电平。平时 $\overline{R_{\text{D}}}$ 端开路或接 V_{CC} 。

U_{CO} (5 脚)是控制电压端，平时输出 $\frac{2}{3}V_{\text{CC}}$ 作为比较器 C_1 的参考电平。当 5 脚外接一个输入电压，即改变了比较器的参考电平，从而实现对输出的另一种控制。在不接外加电压时，通常接一个 $0.01\mu\text{F}$ 的电容器到地，起滤波作用，以消除外来的干扰，确保参考电平的稳定。 VT_{D} 为放电管。当 VT_{D} 导通时，将给接于 7 脚的电容器提供低阻放电通路。555 的基本功能如表 9.9.1 所示。

555 集成定时器主要是用电阻和电容构成充放电电路，并由两个比较器来检测电容器上的电压，以确定输出电平的高低和放电开关管的通断。这就可以很方便地构成从微秒到数十分钟的延时电路，可方便地构成单稳态触发器、多谐振荡器和施密特触发器等脉冲产生或波形变换电路。

表 9.9.1 555 集成定时器基本功能表

输 入			输 出	
阈值输入 u_{i1} (6)	触发输入 u_{i2} (2)	复位 $\overline{R_{\text{D}}}$ (4)	输出 u_o (3)	放电管 VT_{D} (7)
$\times$	$\times$	0	0	导通
$<2V_{\text{CC}}/3$	$<V_{\text{CC}}/3$	1	1	截止
$>2V_{\text{CC}}/3$	$>V_{\text{CC}}/3$	1	0	导通
$<2V_{\text{CC}}/3$	$>V_{\text{CC}}/3$	1	不变	不变

三、实验电路设计

1. 单稳态触发器及其应用

由 555 组成的单稳态触发器如图 9.9.2(a)所示。电路工作原理是，设接通电源时 VT_D 截止，电源 $+V_{CC}$ 通过 R 向 C 充电，单稳态电路即开始一个暂态过程，当 u_C 上升到 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 时反相比较器 C_1 翻转，输出低电平，RS 触发器复位，输出端 u_o 为“0”，三极管 VT_D 导通，暂态过程结束， C 经 VT_D 迅速放电；如果此时 u_i 为高电平 ($u_i > \frac{1}{3}V_{CC}$)，即没有触发输入信号，则输出端保持稳态不变 ($u_o=0$)。

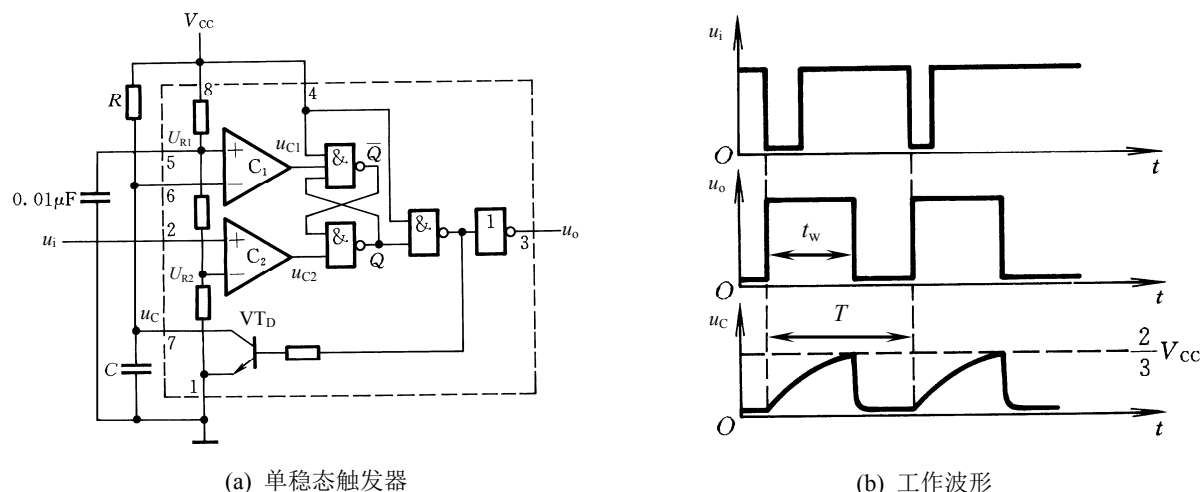


图 9.9.2 555 定时器组成的单稳态触发器

如果由 (2) 脚输入一个触发脉冲 (即 $u_i < \frac{1}{3}V_{CC}$)，此时同相比较器 C_2 翻转，输出低电平，RS 触发器置位，输出端 u_o 为“1”，三极管 VT_D 截止。此后电源 $+V_{CC}$ 通过 R 再次向 C 充电，重复上述过程。工作波形如图 9.9.2(b)所示，其中， u_i 为输入触发脉冲， u_C 为电容 C 两端的电压， u_o 为输出脉冲， t_w 为延时脉冲的宽度即暂稳态持续时间 (或延时时间)，决定于外接元件 R 、 C 的大小，分析表明：

$$t_w = RC \ln 3 \approx 1.1RC \quad (9.9.1)$$

通过改变 R 、 C 的大小，可使延时时间在几微秒到几十分钟之间变化。触发脉冲的周期 T 应大于 t_w 才能保证每个触发脉冲起作用。

当这种单稳态电路作为计时器用时，可直接驱动小型继电器，并可以使用复位端 (4 脚) 接地的方法来中止暂态，重新计时。此外尚须用一个续流二极管与继电器线圈并接，以防继电器线圈反电势损坏内部功率管。

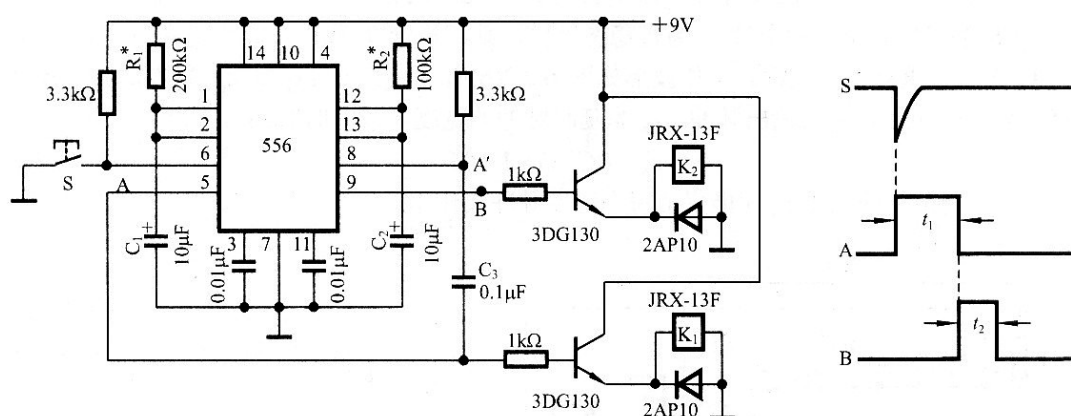


图 9.9.3 556 组成的两级定时器电路

图 9.9.3 所示为由一片 556 时基电路（双 555）组成的两级定时器电路。第一级定时器受开关 S 触发，产生的延时脉冲 A 驱动继电器 K_1 ，延时脉冲 A 的延时时间为

$$t_1 \approx 1.1R_1C_1 \quad (9.9.2)$$

A 点脉冲信号下降沿到来时，通过电容 C_3 产生的负跳变又触发第二级定时器，产生延时脉冲 B，驱动继电器 K_2 ，B 的延迟时间

$$t_2 \approx 1.1R_2C_2 \quad (9.9.3)$$

这样，每触发一次开关 S，可自动完成继电器 K_1 和 K_2 的启动与复位，因此该电路可以实现时序操作及控制。

2. 多谐振荡器及其应用

555 组成的多谐振荡器如图 9.9.4(a)所示。它由 555 定时器和外接元件 R_1 、 R_2 、 C 构成，脚 2 与脚 6 直接相连。电路没有稳态，仅存在两个暂稳态，电路亦不需要外加触发信号，利用电源通过 R_1 、 R_2 向 C 充电，以及 C 通过 R_2 向放电端 7 脚放电，使电路产生振荡。电路的工作过程是：设接通电源时三极管截止， $+V_{CC}$ 经外接电阻 R_1 、 R_2 向电容 C 充电，当 C 上的电压 u_C 上升到 $(2/3)V_{CC}$ 时，比较器 C_1 翻转输出低电平，RS 触发器复位，输出 u_o 为“0”，三极管 VT_D 导通， C 经 R_2 和 VT_D 放电；当 u_C 下降到 $(1/3)V_{CC}$ 时，比较器 C_2 翻转输出低电平，RS 触发器置位，输出 u_o 为“1”，三极管 VT_D 截止， C 又开始充电，如此周而复始，输出端便可获得周期性的矩形脉冲波。电路的工作波形如图 9.9.4(b)所示。

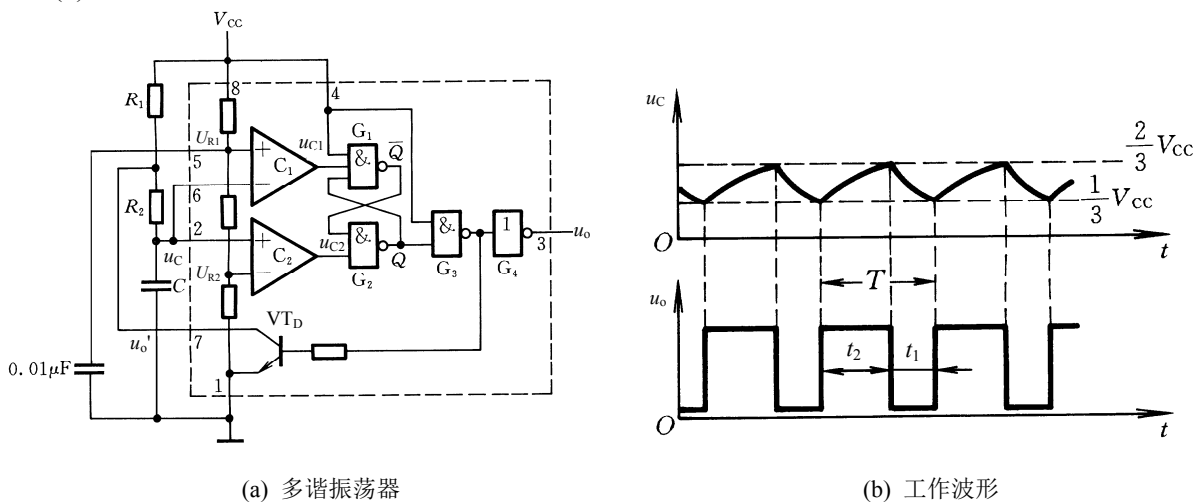


图 9.9.4 555 定时器组成的多谐振荡器

分析表明：电容 C 的放电时间 t_1 与充电时间 t_2 分别为：

$$t_1 = R_2C \ln 2 \approx 0.7R_2C \quad (9.9.4)$$

$$t_2 = (R_1 + R_2)C \ln 2 \approx 0.7(R_1 + R_2)C \quad (9.9.5)$$

输出脉冲的周期为：

$$T = t_1 + t_2 = R_2C \ln 2 + (R_1 + R_2)C \ln 2 \approx 0.7(R_1 + 2R_2)C \quad (9.9.6)$$

脉冲的占空比为：

$$q = \frac{t_2}{T} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + 2R_2} \quad (9.9.7)$$

由式 (9.9.6)、式 (9.9.7) 可以看出：电路的振荡周期 T 、占空比 q 仅与外接阻容元件 (R_1 、 R_2 和 C) 的值有关，不受电源电压变化的影响；改变 R_1 、 R_2 即可改变占空比，其值可在较大的范围内调节；改变 C 的值，可单独改变周期而不影响占空比。

555 组成的多谐振荡器可以用作各种时钟脉冲发生器，蜂鸣器信号源，多音频警报器信号源等。

3. 施密特触发器及其应用

将 555 定时器的阈值输入端 6 和触发输入端 2 相接, 由于 555 内部比较器 C_1 、 C_2 的参考电压不同, 因而, RS 触发器的置 0、置 1 必然发生在 u_i 的不同电平处。因此, 输出电压 u_o 由高变低和由低变高所对应的 u_i 值也不同, 这样就构成了施密特触发器, 如图 9.9.5(a)所示。

电路的工作原理是, 如果 u_i 由 0V 开始逐渐增加, 当 $u_i < V_{CC}/3$ 时, 输出 u_o 为高电平; u_i 继续增加, 如 $V_{CC}/3 < u_i < 2V_{CC}/3$, 输出 u_o 维持高电平不变; u_i 再增加, 一旦 $u_i > 2V_{CC}/3$, u_o 就由高电平跳变为低电平; 之后 u_i 再增加, 电路输出将保持在低电平不变。如果 u_i 由大于 $2V_{CC}/3$ 开始逐渐下降, 只要 $u_i > V_{CC}/3$, 电路输出状态保持不变仍为低电平; 只有当 $u_i < V_{CC}/3$ 时, 电路才再次翻转, u_o 由低电平跳变为高电平。图 9.9.5(b)所示是该施密特触发器的电压传输特性曲线, 这是一个典型的反相输出的施密特触发器特性, 其回差电压为 $V_{CC}/3$ 。

如果 5 脚的参考电压由外接可调节的直流电压 U_{CO} 提供, 那么, 正向阈值电压 $U_{T+} = U_{CO}$, 负向阈值电压 $U_{T-} = U_{CO}/2$, 回差电压 $\Delta U_T = 1/2 U_{CO}$ 。通过调节 U_{CO} , 可以改变阈值电压和回差电压的大小。

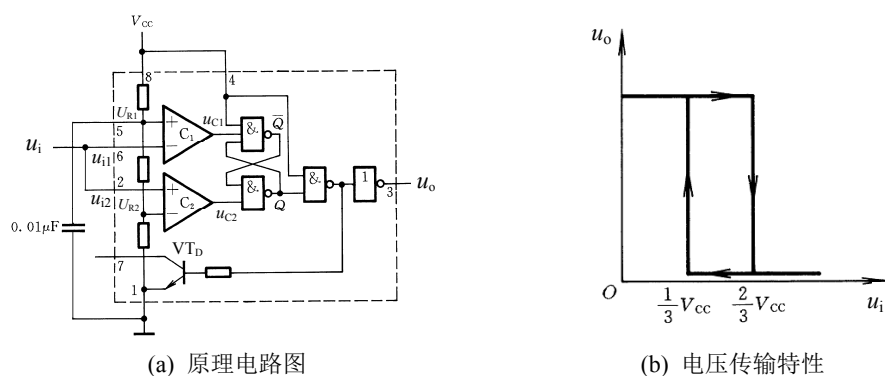


图 9.9.5 555 组成的施密特触发器

施密特触发器可用于波形变换, 利用施密特触发器状态转换过程中的正反馈作用, 可以把边沿变化缓慢的周期性信号变换为边沿很陡的矩形脉冲信号。施密特触发器也用于脉冲信号波形整形, 只要设置合适的施密特触发器的阈值电压, 就可以用施密特触发器通过整形来消除干扰和噪声, 从而获得比较理想的矩形脉冲信号。施密特触发器还可用于脉冲幅度鉴别。

四、实验任务要求

1. 使用 555 定时器设计一个时间延迟电路, 要求该电路对某一脉冲信号的下降沿延迟 0.5ms 后输出一个脉冲宽度为 200μs 的正脉冲信号。测试并描绘各主要点的波形。探究延时时间的关键因素。
2. 使用 555 定时器设计并制作一个占空比为 50%, 频率约为 1KHz 的方波信号发生器。观测 u_c 、 u_o 的波形, 测定波形参数。探究哪些元件影响方波的频率和占空比。
3. 模拟声响报警器设计与制作。

用两片 555 定时器组成两个多谐振荡器, 调节定时元件, 使振荡器 I 输出较低频率(1Hz 左右), 振荡器 II 输出较高频率(800Hz 左右)。振荡器 I 的输出经 10kΩ 电阻连接到振荡器 II 的 5 脚, 控制振荡器 II 的阈值电压。接通电源, 试听音响效果。调换外接阻容元件, 再试听音响效果。直到满意为止。

4. 实验要求

- (1) 详细写出电路原理和设计过程, 计算各 R 、 C 取值, 并进行仿真。
- (2) 要求测量各种情况下的 u_c 、 u_o 的波形和波形参数, 并进行理论分析比较。

五、实验操作要点

1. 555 定时器使用的电源电压很宽，为 $3 \sim 15\text{V}$ ，本实验中使用 $+5\text{V}$ 。
2. 单稳态电路和多谐振荡器电路的时间参数由(9.9.1)式、(9.9.4)~(9.9.5)式决定；施密特触发器的阈值电压由 5 脚的电压值决定。
3. 单稳态电路的触发信号（输入信号）选择要特别注意， u_i 的周期必须大于输出脉冲的宽度 t_w ，并且其低电平的持续时间要小于输出脉冲的宽度 t_w 。一般用 R 、 C 构成的微分电路将输入信号引入 555 的触发端 2 脚。
4. 在设计占空比可调的方波信号发生器（多谐振荡器）时，可利用二极管的单向导电特性将电容 C 的充电回路和放电回路分开，如图 9.9.6 所示，这样可分别调节方波的高电平持续时间和低电平持续时间，从而得到任意的占空比。
5. 实验中推荐使用 TI 公司的 555 集成定时器电路。

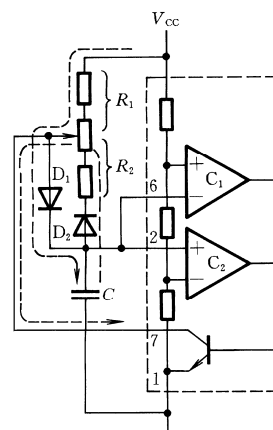


图 9.9.6 用二极管将充放电回路分开

六、思考题

1. 如图 9.9.7(a)所示是由 555 定时器构成的施密特触发器电路，输入信号 u_i 为三角波，如图 9.9.7(b)所示。

(1) 用示波器观测图中 u_i' 、 u_o 点的波形时，应该采用什么耦合方式（直流、交流）？

(2) 画出 u_i' 、 u_o 点的波形，并标明幅度。

(3) 说明正向阈值电压和负向阈值电压是多少？并在 u_i' 中标出。

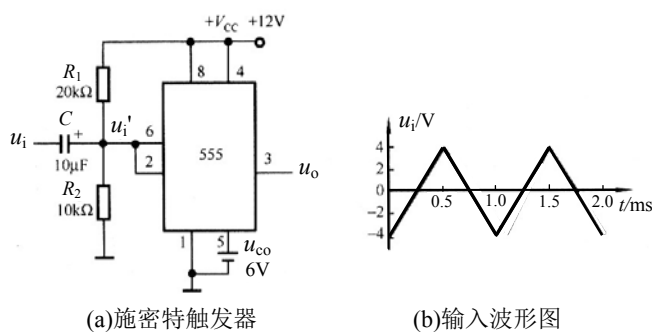


图 9.9.7 由 555 构成的施密特触发器

2. 如何用示波器测定施密特触发器的电压传输特性曲线？
3. 用 555 定时器设计一个产生锯齿波的电路，要求锯齿波正程（扫描）时间约为 1ms ，逆程时间尽可能短。请画出电路图，进行仿真并解释工作原理。