

图 6-39

利用下面的公式就能很容易地求出相角：

$$\tan \theta = \frac{V_L}{V_R} = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi fL}{R}$$

问题

请计算问题 30 中所讨论电路的相角。

答案

45°

36 请参照问题 31 所用的电路。

问题

请计算电路的相角。

答案

$$\tan \theta = \frac{X_L}{R} = \frac{2\text{k}\Omega}{1.5\text{k}\Omega} = 1.33$$

因此， $\theta = 53.1^\circ$ 。

6.8 小结

本章讨论了电容、电阻和电感等在分压器和滤波器电路中的应用。你学会了如何确定以下内容：

- 交流信号通过高通 RC 滤波器后的输出电压；
- 交流信号通过低通 RC 滤波器后的输出电压；
- 交流信号通过高通 RL 滤波器后的输出电压；
- 交流信号通过低通 RL 滤波器后的输出电压；
- 交流信号或者交-直流混合信号通过滤波器电路后的输出电压波形；
- 简单的相角和相差。

6.9 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

问题(1) ~ 问题(3)，请根据各题的电路计算下列参数。

- A. X_C
- B. Z
- C. V_{out}
- D. I
- E. $\tan \theta$ 和 θ

(1) 请参照图 6-40 所示的电路。

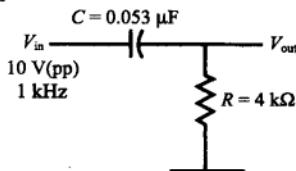


图 6-40

(2) 请参照图 6-41 所示的电路。

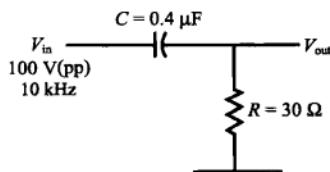


图 6-41

(3) 请参照图 6-42 所示的电路。

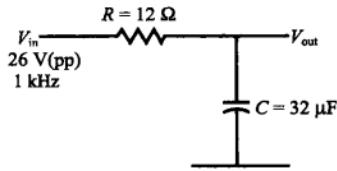


图 6-42

问题(4) ~ 问题(6)，请根据各题的电路计算下列参数。

- A. X_C
- B. AC V_{out}
- C. DC V_{out}

(4) 请参照图 6-43 所示的电路。

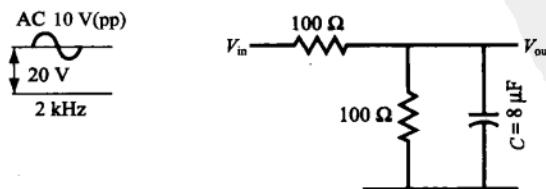


图 6-43

(5) 请参照图 6-44 所示的电路。

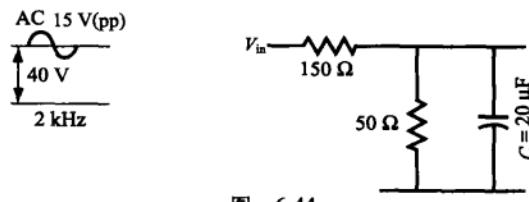


图 6-44

(6) 请参照图 6-45 所示的电路。

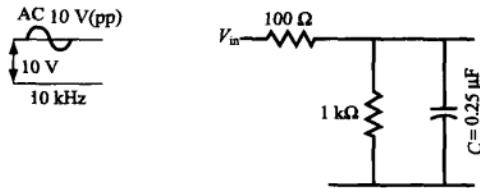


图 6-45

问题(7) ~ 问题(9)，请根据各题的电路计算下列参数。

- A. DC V_{out}
- B. X_L
- C. Z
- D. AC V_{out}
- E. $\tan \theta$ 和 θ

(7) 请参照图 6-46 所示的电路。

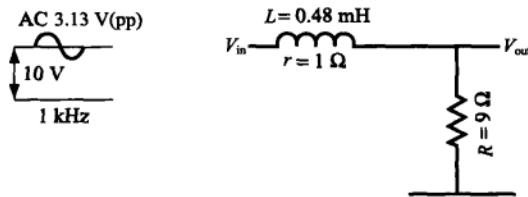


图 6-46

(8) 请参照图 6-47 所示的电路。

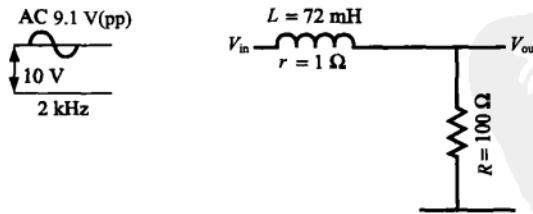


图 6-47

(9) 请参照图 6-48 所示的电路。

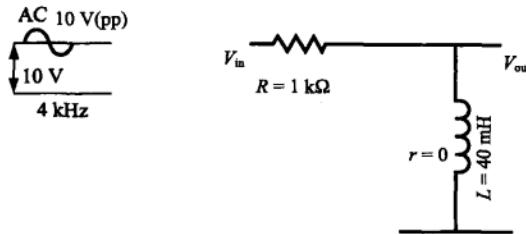


图 6-48

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同，请先复习圆括号内注明的问题，然后再继续学习下一章。

| | | | |
|-----|----|-------------------|---------------------|
| (1) | A. | $3\text{k}\Omega$ | (问题8、问题9、问题10、问题23) |
| | B. | $5\text{k}\Omega$ | |
| | C. | 8V | |
| | D. | 2A | |
| | E. | 36.87° | |
| (2) | A. | 40Ω | (问题8、问题9、问题23) |
| | B. | 50Ω | |
| | C. | 60V | |
| | D. | 2A | |
| | E. | 53.13° | |
| (3) | A. | 5Ω | (问题8、问题9、问题23) |
| | B. | 13Ω | |
| | C. | 10V | |
| | D. | 2A | |
| | E. | 22.63° | |
| (4) | A. | 10Ω | (问题26和问题27) |
| | B. | 1V | |
| | C. | 10V | |
| (5) | A. | 4Ω | (问题26和问题27) |
| | B. | 0.4V | |
| | C. | 10V | |
| (6) | A. | 64Ω | (问题26和问题27) |
| | B. | 5.4V | |
| | C. | 9.1V | |
| (7) | A. | 9V | (问题28~问题30、问题35) |
| | B. | 3Ω | |
| | C. | 10.4Ω | |
| | D. | 2.7V | |
| | E. | 16.7° | |

(续)

| | | | |
|-----|----|---------|------------------|
| (8) | A. | 10V | (问题28~问题30、问题35) |
| | B. | 904Ω | |
| | C. | 910Ω | |
| | D. | 1V | |
| | E. | 83.69° | |
| (9) | A. | 0V | (问题28~问题30、问题35) |
| | B. | 1kΩ | |
| | C. | 1.414kΩ | |
| | D. | 5V | |
| | E. | 45° | |



谐振电路

前面已经看到，电感和电容都会阻碍交流电的流动，并且电抗的大小与所施加信号的频率有关。

当同时使用电感和电容时，无论是串联还是并联，都会出现一种叫作谐振（resonance）的有趣现象。谐振是指在某个频率点电容和电感的电抗相等的状态。

本章将学习一些关于谐振电路的性质，并且集中研究那些有助于学习振荡器的性质（这将在本章最后几个问题中涉及，并会在第 9 章详细介绍）。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 求串联 LC 电路的阻抗；
- 计算串联 LC 电路的谐振频率；
- 绘制串联 LC 电路输出电压的草图；
- 求并联 LC 电路的阻抗；
- 计算并联 LC 电路的谐振频率；
- 绘制并联 LC 电路输出电压的草图；
- 计算简单的串并联 LC 电路的带宽和 Q 值；
- 计算振荡器的振荡频率。

7.1 电容和电感串联

很多电路都包含如图 7-1 所示的电容和电感串联的电路。



图 7-1

可以将串联的电容和电感与一个电阻组合成为分压器电路，如图 7-2 所示。包含有电阻（R）、电感（L）以及电容（C）的电路被称为 RLC 电路。请注意，即使电容和电感的顺序不同（如图 7-2 所示），但事实上，它们对电信号的作用效果完全一样。

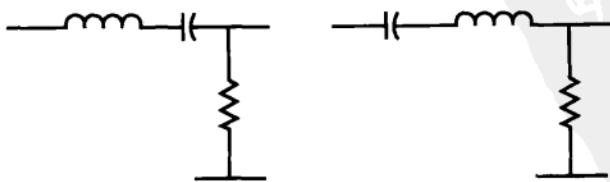


图 7-2

为了简化下面几个问题的计算,可以假设电感的直流电阻比电阻器 R 的电阻小得多,因此,计算中可以忽略该直流电阻。

在图 7-2 所示电路上施加交流信号时,就会发现,电感和电容的电抗值的大小都与信号频率有关。

问题

- A. 电感电抗的计算公式是什么?
- B. 电容电抗的计算公式是什么?

答案

A. $X_L = 2\pi fL$ B. $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$

2 可以用下列公式计算串联电容和电感的网络电抗 (X):

$$X = X_L - X_C$$

可以用下列公式计算图 7-2 所示的 RLC 电路的阻抗:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

请记住,在该公式中 $X^2 = (X_L + X_C)^2$ 。

请用下列参数值计算如图 7-2 所示的 RLC 电路的网络电抗和阻抗:

$$f = 1\text{kHz} \quad L = 100\text{mH} \quad C = 1\mu\text{F} \quad R = 500\Omega$$

问题

请按步骤计算下列值。

- A. 求解 X_L ;
- B. 求解 X_C ;
- C. 用 $X = X_L - X_C$ 求出网络电抗;
- D. 用 $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$ 求出阻抗。

答案

A. $X_L = 628\Omega$ B. $X_C = 160\Omega$ C. $X = 468\Omega$ (感性的) D. $Z = 685\Omega$

3 请用下列参数值计算图 7-2 所示电路的 RLC 串联电路的网络电抗和阻抗。

$$f = 100\text{Hz} \quad L = 0.5\text{H} \quad C = 5\mu\text{F} \quad R = 8\Omega$$

问题

按照问题 2 的步骤计算下列参数:

A. $X_L =$ _____

B. $X_C =$ _____

C. $X =$ _____

D. $Z =$ _____

答案

A. $X_L = 314\Omega$ B. $X_C = 318\Omega$ C. $X = -4\Omega$ (容性的) D. $Z = 9\Omega$

按照惯例，当网络表现为容性时，其电抗为负值。

- 4** 请用下列参数值计算图 7-2 所示电路的 RLC 串联电路的网络电抗和阻抗。

问题

A. $f = 10\text{kHz}$, $L = 15\text{mH}$, $C = 0.01\mu\text{F}$, $R = 494\Omega$

B. $f = 2\text{MHz}$, $L = 8\mu\text{H}$, $C = 0.001\mu\text{F}$, $R = 15\Omega$

答案

A. $X = -650\Omega$ (容性的), $Z = 816\Omega$

B. $X = 21\Omega$ (感性的), $Z = 25.8\Omega$

- 5** 对于图 7-3 所示电路，其输出电压等于电阻两端的压降。

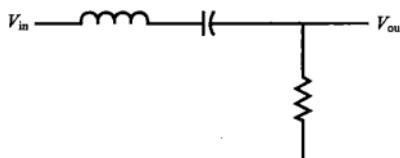


图 7-3

在问题 1~问题 4 中，串联电感和电容的网络电抗随着频率的变化而变化。因此，当频率改变时，电阻上的压降也会改变，进而输出电压 V_{out} 的振幅也随之变化。

如果画出图 7-3 所示电路的 V_{out} 与频率的关系曲线，那么就会得到与图 7-4 类似的结果。

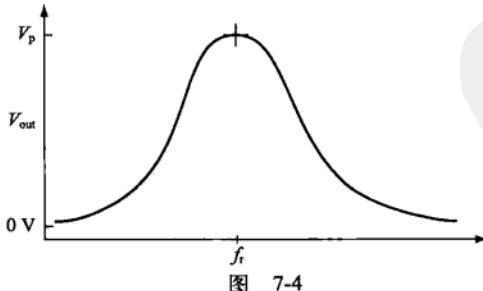


图 7-4

该曲线所示的最大输出电压 V_p 比 V_{in} 略小。输入峰值电压的这点微弱衰减是由电感的直流

电阻引起的。

在串联电感和电容的网络电抗的最小值对应的频率 f_r 处，输出电压达到峰值。在该频率处，电感和电容上的压降很小。因此，大部分输入电压都施加在电阻上，而输出电压此时达到最大值。

问题

在理想状态下，如果 X_C 等于 10.6Ω ，那么图 7-3 所示电路的网络电抗 (X) 为 0 时对应的 X_L 是多少？

答案

$$X = X_L - X_C = 0, \text{ 因此,}$$

$$X_L = X_C + X = 10.6\Omega + 0 = 10.6\Omega$$

6 通过令 X_L 的计算公式等于 X_C 的计算公式，可以求出 $X_L - X_C = 0$ 时对应的频率 f_r 。

$$2\pi f L = \frac{1}{2\pi f C}$$

因此，

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

其中 f_r 就是电路的谐振频率 (resonant frequency)。

问题

电阻值的大小对谐振频率有何影响？

答案

没有任何影响。

7 请用下面问题中给出的电容和电感值计算图 7-3 所示电路的谐振频率。

问题

A. $C = 1\mu\text{F}, L = 1\text{mH}$

B. $C = 16\mu\text{F}, L = 1.6\text{mH}$

答案

A. $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{1\times10^{-3}\times1\times10^{-6}}} = 5.0\text{kHz}$

B. $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{16\times10^{-6}\times1.6\times10^{-3}}} = 1\text{kHz}$

8 请用下面问题中给出的电容和电感值计算图 7-3 所示电路的谐振频率。

问题

A. $C = 0.1\mu\text{F}$, $L = 1\text{mH}$

B. $C = 1\mu\text{F}$, $L = 2\text{mH}$

答案

A. $f_r = 16\text{kHz}$ B. $f_r = 3.6\text{kHz}$

9 对于图 7-5 所示的 RLC 电路，其输出电压等于电容和电感上的压降。



图 7-5

如果绘出图 7-5 所示电路的 V_{out} 与频率的关系曲线，就会得到与图 7-6 类似的结果。

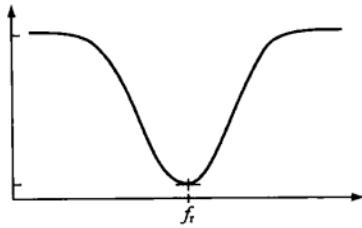


图 7-6

输出电压在电路的谐振频率点处达到最小值，因此可以用问题 6 给出的公式计算出该值。在谐振频率点处，串联电感和电容的网络电抗达到最小值。因此，电感和电容上的压降非常小，于是输出电压也达到最小值。

问题

期望的最小电压是多少？

答案

0V 或者接近 0V

10 可以将电容和电感并联，构成图 7-7 所示的电路。

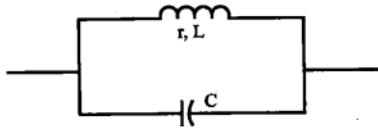


图 7-7

可以利用下列公式计算出该电路的谐振频率：

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2C}{L}}$$

在该公式中， r 是电感的直流电阻。然而，如果电感的电抗大于或等于电感直流电阻的 10 倍，那么就可以利用下面的简化公式。该公式也就是在问题 7 和问题 8 中用到的公式。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

符号 Q 等于 X_L/r 。因此，如果 Q 大于等于 10，那么就可以使用该简化公式。

问题

- A. 如果线圈的 Q 值等于 20，那么该用哪个公式计算并联电路的谐振频率？
- B. 如果 Q 等于 8 呢？

答案

A. $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

B. $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2C}{L}}$

注意 下面是已知 Q 值时，谐振频率计算公式的另一种形式。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{Q^2}{1+Q^2}}$$

II 可以用计算电路电抗的公式计算并联电感和电容对电流的总阻抗。

$Z_p = Q_2 r$ ，当 Q 大于等于 10 时

$$Z_p = \frac{L}{rC}，对于任意 Q 值$$

在谐振点，并联电感和电容的阻抗达到最大值。

可以用并联电感和电容构成分压电路，参见图 7-8。

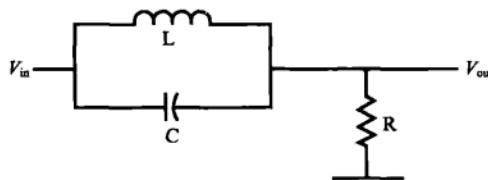


图 7-8

如果绘出图 7-8 所示电路的 V_{out} 与频率的关系曲线，就会得到如图 7-9 所示的结果。

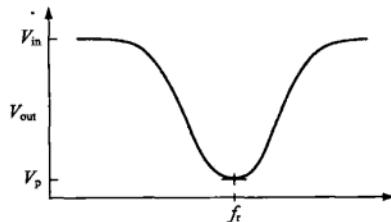


图 7-9

问题

- 分压器电路在谐振时的总阻抗是多少？
- 曲线最低点对应的频率点叫什么？
- 为什么输出电压在谐振点达到最小值？

答案

A. $Z_T = Z_P + R$

注意 该公式所示的关系仅在谐振点成立。在其他频率点， Z_T 的计算公式比较复杂，要将其看成 L 、 r 串联后再与电容并联的形式。

- 并联谐振频率。
- 输出电压在谐振频率处达到最小值。这是因为并联谐振电路的阻抗在该频率点达到最大值。

12 对于图 7-10 所示的电路，其输出电压等于电感和电容上的压降。

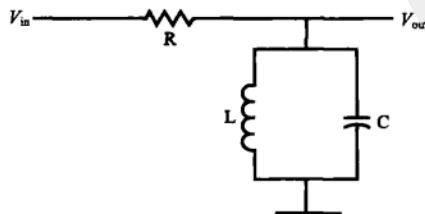


图 7-10

如果绘出图 7-10 所示电路的 V_{out} 与频率的关系曲线，就会得到与图 7-11 类似的结果。在谐振频率点，并联电感和电容的阻抗达到最大值。因此，并联电感和电容上的压降（即输出电压）达到最大值。

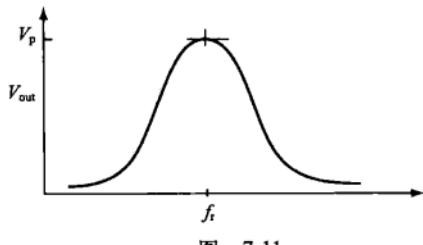


图 7-11

问题

该用哪个公式计算谐振频率？

答案

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} , \text{ 如果 } Q \text{ 大于等于 } 10$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}} , \text{ 如果 } Q \text{ 小于 } 10$$

13 求出下列两个示例的谐振频率，其中电容和电感是并联的。（ Q 值大于 10。）

问题

A. $L = 5\text{mH}$, $C = 5\mu\text{F}$ 。

B. $L = 1\text{mH}$, $C = 10\mu\text{F}$ 。

答案

A. $f_r = 1\text{kHz}$ (近似值) B. $f_r = 1.6\text{ kHz}$ (近似值)

7.2 输出曲线

14 下面就该仔细研究输出曲线了。以图 7-12 所示曲线为例，请仔细看看。

谐振频率 f_r 处的输入信号经过电路时受到的衰减最小，并且其输出电压等于峰值输出电压 V_p ，如图所示。

频率为 f_1 和 f_2 的信号几乎和频率为 f_r 的信号一样，能通过该电路。也就是说，这些频率处的信号的输出电压比较大，几乎和 f_r 的输出一样大。图中所示为 V_x 。

频率为 f_3 和 f_4 的信号的输出电压比较小。

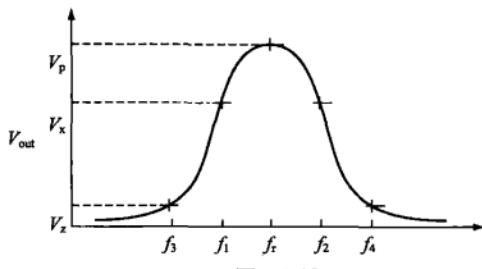


图 7-12

这两个频率的信号无法通过，也可以称为被谐振电路阻断（blocked）或拒绝（rejected）。对应的输出电压在图中标记为 V_z 。

串联或并联谐振电路的输出（或频率）响应曲线都具有高 Q 值的对称形状。可以假设当 Q 值大于 10 时曲线是对称的。

问题

- A. 某个频率的信号能通过电路意味着什么？
- B. 为什么频率为 f_1 和 f_2 的信号和 f_r 一样几乎全部通过电路？
- C. 某个频率的信号被阻断意味着什么？
- D. 前面所示的输出曲线中，哪些频率的信号被阻断了？
- E. 输出曲线看起来是对称的吗？对该电路来说这意味着什么？

答案

- A. 输出信号受到的衰减很小。
- B. 因为信号频率接近 f_r 。
- C. 输出电压小。
- D. f_1 和 f_2 （以及频率低于 f_3 或者高于 f_4 的信号）
- E. 是对称的。这意味着线圈的 Q 值大于 10。

15 在 f_r 和 f_3 之间或者 f_r 和 f_4 之间的某个频率点处，信号能够经过电路或者减小至称为被电路有效阻断的大小。分割线位于电路输出功率为输出峰值功率的一半处。即对应于峰值的 0.707 倍即 70.7%。对于问题 14 中的输出曲线，分割线位于 $0.707V_p$ 处。从图中得出的这两个对应频率被称为半功率频率（half power frequency）或者半功率点（half power point）。这些都是设计谐振电路和频率响应图时的常用表达。

如果某个频率的信号导致输出电压大于等于半功率点，那么就称为可以通过电路或者可被电路接受。如果低于半功率点，则称为被电路阻断或者拒绝。

问题

假设 $V_p = 10V$ 。那么可以通过电路的频段中最低电压是多少？

答案

$$V = 10V \times 0.707 = 7.07V$$

(如果某个频率的信号的输出电压大于7.07V，就称它能够通过电路。)

16 假设谐振频率信号经过电路后的输出为5V。而另一个频率信号经电路后的输出为3.3V。

问题

第二个频率的信号能否通过电路？

答案

$$V = V_p \times 0.707 = 5 \times 0.707 = 3.535V$$

3.3V小于3.535V，因此该频率的信号会被电路阻断。

17 在下面的示例中，请求出它们的半功率电压。

问题

- A. $V_p = 20V$ B. $V_p = 100V$ C. $V_p = 3.2V$

答案

- A. 14.14V B. 70.70V C. 2.262V

18 尽管本章是从谐振频率开始讨论的，但是也介绍了一些其他的频率。事实上，此时，本讨论正被应用于某个频段或者一段频率。

曲线上的半功率点就对应了两个频率点。假设它们是 f_1 和 f_2 。将 f_2 减去 f_1 得到的差值很重要，因为这就是电路允许通过的频率范围。这个范围被称为电路的带宽（bandwidth），可以利用下面的公式计算它。

$$BW = f_2 - f_1$$

频率在带宽内的所有信号都能通过电路，而频率在带宽之外的所有信号都会被电路阻断。具有这种输出特性的电路（比如图7-10所示的电路）被称为带通滤波器（bandpass filter）。

问题

请指出下面各对频率中哪一对对应的带宽更大。

- A. $f_2 = 200Hz, f_1 = 100Hz$
 B. $f_2 = 20Hz, f_1 = 10Hz$

答案

A所给的一对频率对应的带宽更大。

听收音机时，我们只想听到某一个电台的声音，并不想听到临近电台的声音。因此，收音机调谐器的带宽必须足够窄，以便只选择某一个电台对应的频率的信号。

然而，电视机的放大器必须允许 30Hz~4.5MHz 的信号都通过，因此它需要的带宽比收音机的大。电路带宽的大小应根据应用的需要或者电路使用的环境来决定。

19 最后几个问题将讨论允许谐振频率附近的一段频率的信号通过的电路的输出曲线（如图 7-13 所示的曲线）。

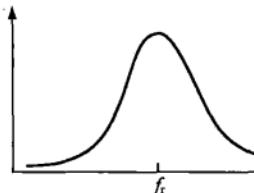


图 7-13

同样的理论和公式也适用于谐振频率及其附近的一段频率被阻断的情况，如图 7-14 中的曲线所示。

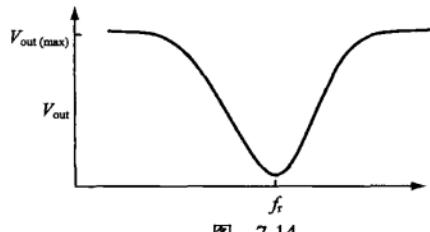


图 7-14

具有这种输出特性的电路（如图 7-8 所示电路）被称为陷波器（notch filter）或者带阻滤波器（band-reject filter）。

问题

- 应该用图 7-14 所示曲线上的哪些点确定电路的带宽？
- 谐振频率处的输出电压比这些点的高还是低？

答案

- 用半功率点 ($0.707V_{out(max)}$)
- 谐振频率处的输出电压是曲线的最低点，它比半功率点的电压低。

- 20** 先测量半功率点对应的频率 (f_1 和 f_2)，然后利用下面的公式求出电路的带宽：

$$BW = f_2 - f_1$$

或者，还可以利用下面的公式计算电路的带宽：

$$BW = \frac{f_t}{Q}$$

其中

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

这个计算带宽的公式表明，对于两个具有相同谐振频率的电路而言，电路的 Q 值越大，带宽就越小。

当计算一个包含串联的电容和电感的电路（比如图 7-15 所示电路）的 Q 值时，请用总的直流电阻（电感的直流电阻 r 与电阻 R 之和）来计算 Q 值。

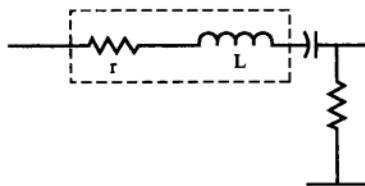


图 7-15

而计算一个包含并联的电容和电感的电路（比如图 7-16 所示电路）的 Q 值时，则不必考虑电阻 R 。计算时只要使用电感的直流电阻 r 即可。

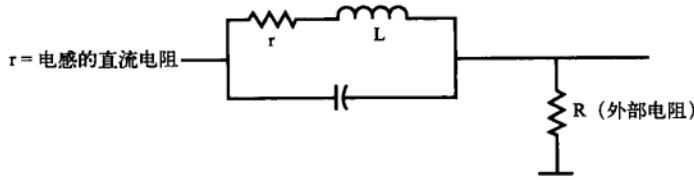


图 7-16

当计算一个包含并联的电感、电容和电阻的电路（比如图 7-17 所示的两个电路）的 Q 值时，只要考虑电阻 R 即可。

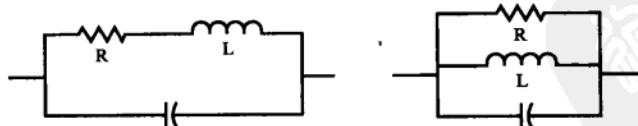


图 7-17

问题

对于图 7-18 所示电路，图中给出了所有元件的参数。请求出 f_t 、 Q 和 BW 。

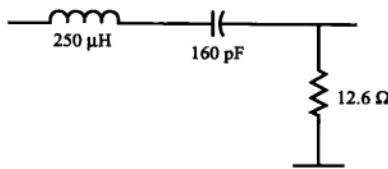


图 7-18

答案

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{250 \times 10^{-6} \times 160 \times 10^{-12}}} = 796 \text{ kHz}$$

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f L}{R} = \frac{2\pi \times 796 \text{ kHz} \times 250 \mu\text{H}}{12.6 \Omega} = 99.2$$

$$BW = \frac{f_r}{Q} = \frac{796 \text{ kHz}}{99.2} = 8 \text{ kHz}$$

21 请用图 7-19 所示电路及其参数值解答下面的问题。

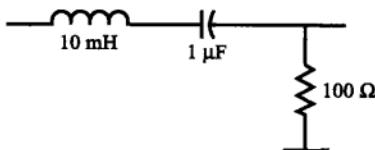


图 7-19

问题

请求出该电路的 f_r 、 Q 和 BW 。然后，在另一张纸上画出电路输出曲线，并标出通带频率和阻带频率。

答案

$$f_r = 1590 \text{ Hz}; Q = 1; BW = 1590 \text{ Hz}$$

输出曲线如图7-20所示。

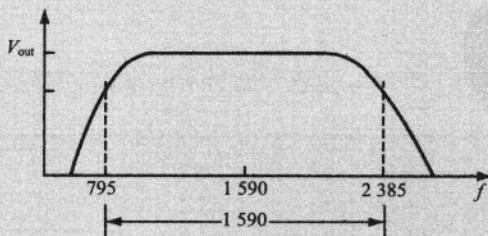


图 7-20

22 请用图 7-21 所示电路及其参数值解答下面的问题。

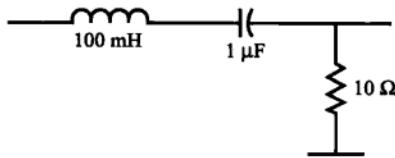


图 7-21

问题

请求出该电路的 f_r 、 Q 和 BW 。然后，在另一张纸上画出电路输出曲线。

答案

$$f_r = 500 \text{ Hz}, Q = 31.4, BW = 16 \text{ Hz}$$

输出曲线如图 7-22 所示。

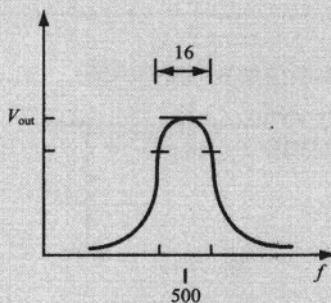


图 7-22

23 请用图 7-23 所示的电路求解本问题。其中，电阻值为 10Ω ，电感和电容值未知。

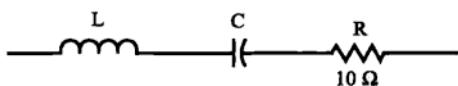


图 7-23

问题

请求出电路的谐振频率为 1200 Hz 、 Q 值为 80 时对应的电路带宽以及 L 和 C 值。

答案

$$BW = 15 \text{ Hz}, L = 106 \mu\text{H}, C = 0.166 \mu\text{F}$$

可以根据上述 L 和 C 值求出 f_r 进行验证。

24 请用图 7-23 所示电路求解本问题。其中，电阻值为 10Ω ，电感和电容值未知。

问题

请求出电路的谐振频率为 300kHz、带宽为 80kHz 时对应的电路 Q 值以及 L 和 C 值。

答案

$$Q = 3.75, L = 20\mu\text{H}, C = 0.014\mu\text{F}$$

25 仅允许窄带频率信号通过（或者阻断）的电路被称为高 Q 值电路 (high Q circuit)。图 7-24 是高 Q 值电路的输出曲线。

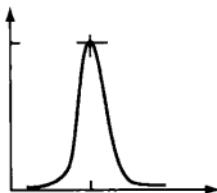


图 7-24

由于只允许窄带频率的信号通过，所以高 Q 值电路被称为对其通过的信号很有选择性。

允许宽带频率信号通过的电路被称为低 Q 值电路 (low Q circuit)。图 7-25 就是低 Q 值电路的输出曲线。

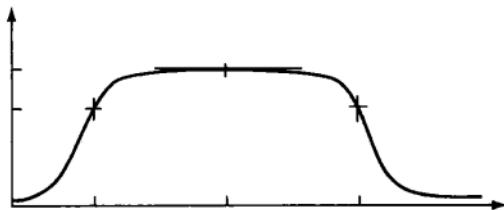


图 7-25

回忆问题 18 中的讨论（比较收音机调谐器和电视机放大器的带宽）将有助于回答下面的问题。

问题

- A. 哪个电路更具选择性，是收音机的调谐器还是电视机的放大器？
- B. 哪个需要采用低 Q 值电路，是收音机的调谐器还是电视机的放大器？

答案

- A. 收音机的调谐器
- B. 电视机的放大器

26 图 7-26 中的电感和电容是并联而不是串联的。但是，可以用与计算问题 20 中串联电路时相同的公式来计算该并联 LC 电路的 f_r 、 Q 值和带宽。

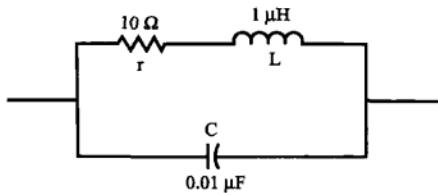


图 7-26

问题

请求出图 7-26 所示电路的 f_r 、 Q 值和带宽。

答案

- A. $f_r = 1.6\text{MHz}$
- B. $X_L = 10\Omega$, 因此 $Q = 10/0.01 = 1000$ (请注意这里唯一的电阻是电感的小直流电阻)
- C. $BW = 16\text{kHz}$ (这是一个 Q 值很高的电路)

27 在最后的几个问题中，将学习如何计算所给电路的 f_r 、 BW 和 Q 值，或者根据给定的 f_r 、 BW 和 Q 值指标计算所需元件的值。

一旦知道了电路的谐振频率和带宽，那么就能绘成该电路输出曲线的近似草图。通过本问题列出的简单计算，就能绘出与真值偏差不超过 1% 的曲线。

本问题绘出的曲线有时也被称为通用谐振曲线 (general resonance curve)。

可以按照以下步骤得出几个频率的输出电压。

- (1) 将谐振频率 f_r 处的峰值输出电压 V_p 记为 100%，它对应于图 7-27 中的 A 点。
- (2) f_1 和 f_2 处的输出电压为 100% 时的 0.707。在图 7-27 中，它们被记为 B 点。请注意 $f_2-f_1 = BW$ 。因此，在距离 f_r 半带宽处，输出为最大值的 70.7%。
- (3) f_3 和 f_4 处 (图 7-27 中标记为 C 点) 的输出电压为 V_p 的 44.7%。请注意 $f_4-f_3 = 2BW$ 。因此，在距离 f_r 一倍带宽处，输出为最大值的 44.7%。
- (4) f_5 和 f_6 处 (图 7-27 中标记为 D 点) 的输出电压为 V_p 的 32%。请注意 $f_6-f_5 = 3BW$ 。因此，在距离 f_r 1.5 倍带宽处，输出为最大值的 32%。
- (5) f_7 和 f_8 处 (图 7-27 中标记为 E 点)，输出电压为 V_p 的 24%。请注意 $f_8-f_7 = 4BW$ 。因此，在距离 f_r 2 倍带宽处，输出为最大值的 24%。
- (6) f_{10} 和 f_9 处 (图 7-27 中标记为 F 点)，输出电压为 V_p 的 13%。请注意 $f_{10}-f_9 = 8BW$ 。因此，在距离 f_r 4 倍带宽处，输出为最大值的 13%。

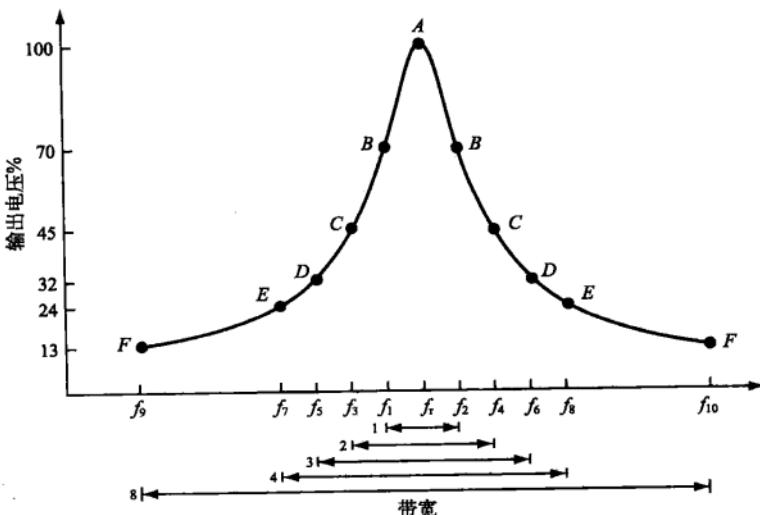


图 7-27

问题

请计算图 7-28 所示电路的 f_r 、 X_L 、 Q 值和 BW 。

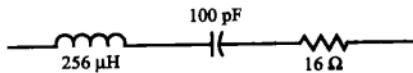


图 7-28

答案

$$f_r = 1 \text{ MHz}; X_L = 1607 \Omega; Q = 100; BW = 10 \text{ kHz}$$

28 下面，请计算问题 27 中步骤 1~步骤 6 对应输出电压（请参考图 7-27）。

问题

- A. 哪个频率点的输出电压为最大值？
- B. 哪个频率点的输出电压为 V_p 的 70%？
- C. 哪个频率点的输出电压为 V_p 的 45%？
- D. 哪个频率点的输出电压为 V_p 的 32%？
- E. 哪个频率点的输出电压为 V_p 的 24%？
- F. 哪个频率点的输出电压为 V_p 的 13%？



答案

- A. 1MHz
 B. 995kHz 和 1 005kHz (1MHz - 5kHz 和 1MHz + 5kHz)
 C. 990kHz 和 1 010kHz
 D. 985kHz 和 1 015kHz
 E. 980kHz 和 1 020kHz
 F. 960kHz 和 1 040kHz

29 可以用峰值电压乘以每个频率对应的百分比求出问题 28 的答案所给的各频率处的输出电压。

问题

请计算下面所给频率处的输出电压，假设峰值输出电压为 5V。

- A. 在 995kHz 处的输出电压是多少?
 B. 在 980kHz 处的输出电压是多少?

答案

- A. $V = 5V \times 0.70 = 3.5V$
 B. $V = 5V \times 0.24 = 1.2V$

图 7-29 所示输出曲线是由问题 28 计算得到的频率点以及本问题计算出的对应电压绘成的。

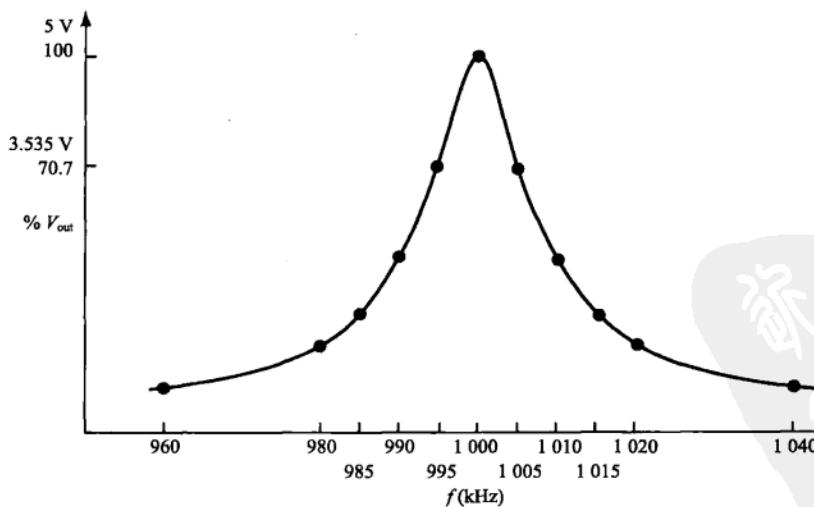


图 7-29

7.3 振荡器概述

电容和电感除了用于滤波输入信号的电路，还能用于振荡器（oscillator）电路。

振荡器是一种能够产生特定频率波形的电路。很多振荡器都使用并联 LC 调谐电路产生正弦波输出。本节将介绍振荡器中并联电容和电感的用法。

30 当图 7-30(1)所示电路中的开关闭合时，就有电流沿图示方向流过并联 LC 电路的两条支路。

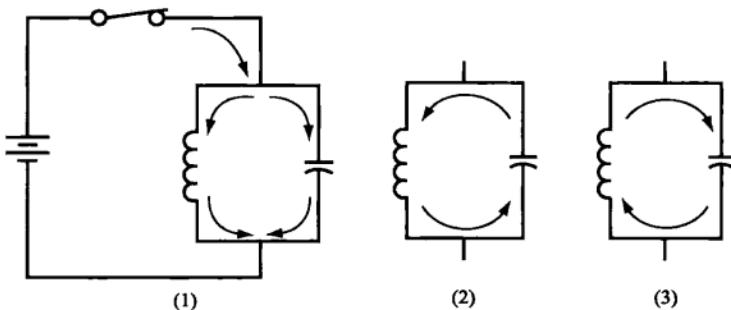


图 7-30

由于电感对电流变化有阻碍作用，所以开始时电流很难流过电感。相反，开始时电流很容易流过电容，这是因为电容上没有电荷，因而对电流没有阻碍作用。

随着电容上电荷的增加，电路中流过电容侧的电流逐渐减小。但是，流过电感的电流则越来越大。最终电容被充满，电路中电容侧没有电流，而电感中则有稳定的电流流过。

问题

当打开开关时，电容上的电荷有何变化？

答案

它将通过电感放电。（请注意电流方向，如图7-30(2)所示。）

31 当开关打开时，电流会继续流动，直至电容放电完毕。

问题

当电容完全放电后，流过电感的电流有多大？

答案

没有电流。

32 由于没有电流流过电感，所以磁场将消失。磁场的消失会在电感中产生感应电流，该电流与原先流过电感的电流的方向相同（请记住，电感会阻碍流过其中的电流的变化），参见图 7-30(2)。该电流会对电容充电，并使得电容的极性与电池的极性相反。

问题

当电感的磁场完全消失后，流过电感的电流多大？

答案

没有电流。

33 接下来，电容将再次通过电感放电，但是此时电流将沿反方向流动，如图 7-30(3)所示。电流方向的变化将产生极性相反的磁场。直到电容完全放电后磁场才会停止变化。

由于电感上没有电流流过，所以其磁场将会消失并且会产生如图 7-30(3)所示方向的电流。

问题

电感磁场感生的电流会对电容有何影响？

答案

将对电容充电，并且极性与之前的相同。

34 当磁场完全消失后，电容将停止充电。然后开始再次放电，并产生如图 7-30(2)所示方向的电流流过电感。电流将重复这种“交替”变化。

由于有电流流过电感，所以电感两端就会有压降。该压降的幅度将随电流变化幅度的改变而改变。

问题

如果用示波器观测电感上的电压，你认为它是什么样的波形？

答案

正弦波。

35 在理想电路中，这种振荡会不断延续，并产生连续的正弦波。但是在实际中，电感的直流电阻和其他导线上会有少量功率损耗，因此，正弦波的振幅会逐渐减小，并在几个周期后消失，如图 7-31 所示。



图 7-31

问题

你认为应该如何阻止这种缓慢衰减？

答案

可以通过在每个周期内更换一小部分能量来实现。

损失的能量可以通过在合适的时刻突然闭合或断开开关来注入电路中（参见图 7-30(1)）。这将维持振荡继续下去。

图 7-32 所示的电感可以接一个电子开关（比如晶体管）。改变电感上的压降就能使电子开关导通或者关断，从而断开或者闭合开关。

电感（这里也指线圈）上端点 B 至中点 A 的压降通常用来控制电子开关。点 A 和点 B 的位置参见图 7-32。

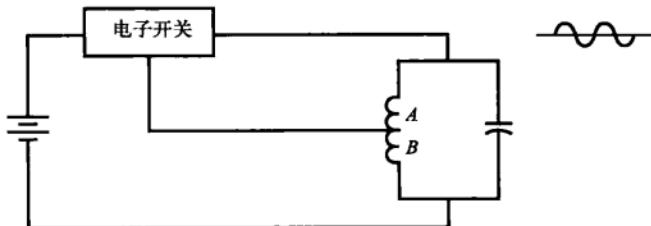


图 7-32

像这样将输出电压的一部分反馈到电路的前部就叫作反馈，反馈能保证电路正常运行。

合理地搭建出这种电路后，电路就能产生连续且振幅和频率都固定的正弦波。该电路被称为振荡器 (oscillator)。可以利用下面用于计算谐振频率的公式来计算振荡器产生的正弦波的频率。

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

分析实际的振荡器电路时就会用到本章后面几个问题中所学到的理论知识，比如第 9 章中就会分析振荡器电路。

7.4 小结

本章学习了以下有关谐振电路的知识。

- 串联 LC 电路和并联 LC 电路的阻抗是如何随着信号频率的变化而改变的。

- 并联 LC 电路的阻抗在谐振频率点达到最大值，而串联 LC 电路的阻抗则在谐振频率点达到最小值。
- 利用带宽的概念能很容易地计算出各种频率信号的输出电压，进而绘出准确的输出曲线。
- 带通滤波器和陷波器（或称带阻滤波器）理论。
- 为理解振荡器工作原理所必须学习的基本概念。

7.5 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

- (1) 计算串联 LC 电路的阻抗的公式是什么？
- (2) 计算串联 RLC 电路（包括电阻、电感和电容的电路）的阻抗的公式是什么？
- (3) 在谐振频率点处， X_C 和 X_L 满足什么关系？
- (4) 串联 RLC 电路在谐振频率点处，电阻上的电压等于多少？
- (5) 一个电阻与并联 LC 电路串联而成的电路，当并联 LC 电路在谐振频率点时，电阻上的压降是多少？

- (6) 串联电路在谐振时的阻抗是多少？
- (7) 并联电路在谐振时的阻抗计算公式是什么？
- (8) 电路的谐振频率的计算公式是什么？
- (9) 电路带宽的计算公式是什么？
- (10) 电路 Q 值的计算公式是什么？

问题(11) ~ 问题(13) 采用串联 LC 电路。在每种情况下， L 、 C 和 R 的值已知。请求出 f_r 、 X_L 、 X_C 、 Z 、 Q 以及 BW ，并绘出每个结果的输出曲线。

- (11) $L = 0.1\text{mH}$, $C = 0.01\mu\text{F}$, $R = 10\Omega$
- (12) $L = 4\text{mH}$, $C = 6.4\mu\text{F}$, $R = 0.25\Omega$
- (13) $L = 16\text{mH}$, $C = 10\mu\text{F}$, $R = 20\Omega$

问题(14) 和问题(15) 采用并联 LC 电路。电路中不包含 R ，但是 r 值已知。请求出 f_r 、 X_L 、 X_C 、 Z 、 Q 以及 BW 。

- (14) $L = 6.4\text{mH}$, $C = 10\mu\text{F}$, $r = 8\Omega$
- (15) $L = 0.7\text{mH}$, $C = 0.04\mu\text{F}$, $r = 1.3\Omega$
- (16) 请使用图 7-33 所示输出曲线回答下列问题。

- A. 输出曲线的峰值是多少？
- B. 谐振频率是多少？
- C. 半功率点的电压是多少？
- D. 半功率点对应的频率是多少？
- E. 带宽是多少？
- F. 电路的 Q 值是多少？



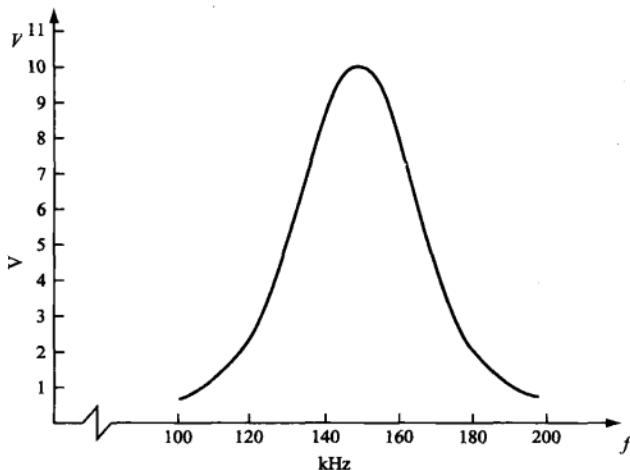


图 7-33

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同，请先复习圆括号内注明的问题，然后再继续学习下一章。

| | | |
|--|----------------------------------|--------|
| (1) | $Z = X_L - X_C$ | (问题2) |
| (2) | $Z = \sqrt{(X_L - X_C)^2 + R^2}$ | (问题2) |
| (3) | $X_L = X_C$ | (问题5) |
| (4) | 最大输出 | (问题5) |
| (5) | 最小输出 | (问题11) |
| (6) | Z 为最小值。理想时，它等于电阻值 | (问题5) |
| (7) | $Z = \frac{L}{Cr}$ | (问题10) |
| 在该公式中， r 代表线圈的电阻值 | | |
| (8) | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ | (问题6) |
| (9) | $BW = \frac{f_r}{Q}$ | (问题20) |
| (10) | $Q = \frac{X_L}{R}$ | (问题20) |
| 或者 | | |
| | $\frac{X_L}{r}$ | |
| 为了绘出问题(11) ~ 问题(13) 的输出曲线，请使用图 7-27作为指导，并补充适当的带宽和频率值 | | |
| (问题21 ~ 问题29) | | |

(续)

| | | |
|------|---|-------------|
| (11) | $f_r = 160\text{kHz}$, $X_L = X_C = 100\Omega$, $Q = 10$, $BW = 16\text{kHz}$, $Z = 10\Omega$ | (问题21~问题29) |
| (12) | $f_r = 1\text{kHz}$, $X_L = X_C = 25\Omega$, $Q = 100$, $BW = 10\text{Hz}$, $Z = 0.25\Omega$ | (问题21~问题29) |
| (13) | $f_r = 400\text{Hz}$, $X_L = X_C = 40\Omega$, $Q = 2$, $BW = 200\text{Hz}$, $Z = 20\Omega$ | (问题21~问题29) |
| (14) | $f_r = 600\text{Hz}$, $X_L = 24\Omega$, $X_C = 26.5\Omega$ $Q = 3$, $BW = 200\text{Hz}$, $Z = 80\Omega$ 由于 Q 未知, 所以要用问题10所示的两个更为复杂的公式来计算谐振频率 | (问题21~问题29) |
| (15) | $f_r = 30\text{Hz}$, $X_L = 132\Omega$, $X_C = 132\Omega$, $Q = 101.5$, $BW = 300\text{Hz}$, $Z = 13.4\Omega$ | (问题21~问题29) |
| (16) | A. 10.1V B. 148kHz C. $10.1 \times 0.707 = 7.14\text{V}$ D. 近似为 135kHz 和 160kHz (不是很对称) E. $BW = 25\text{kHz}$ F. $Q = \frac{f_r}{BW} \approx 5.9$ | (问题27和问题28) |



晶体管放大器

学习电子技术时会遇到很多非常微弱的交流信号。比如，光检测器从 DVD 上读取的信号还不足以驱动扬声器，来自麦克风的输出信号也太弱而无法作为无线电信号直接发射出去。在这种情况下，就必须用放大器对信号进行放大。

讲解将微弱信号放大成可用振幅信号的基本原理，最佳途径就是从单晶体管放大器开始。一旦理解了单晶体管放大器，那么就能抓住电子设备（如手机、MP3 播放器以及家用影音设备等）中放大电路的关键构件。

放大电路的结构多种多样。本章将用最简单也是最基本的放大电路来演示晶体管是如何放大信号的。你将看到设计放大器的全过程。

本章的重点是 BJT 放大器（BJT 在第 3 章和第 4 章已经介绍过，那里主要介绍晶体管在开关电路中的应用）。此外，本章还将介绍另外两种可构成放大器的元件：一种是 JFET（第 3 章和第 4 章介绍过）；另一种是集成电路，也称为运算放大器（简称运放）。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 计算放大器的电压增益；
- 计算放大电路的直流输出电压；
- 为某个放大电路选择合适的电阻值以实现期望的增益；
- 掌握几种增大单晶体管放大器增益的方法；
- 区分标准单晶体管放大器和射极跟随器电路的功能；
- 设计简单的射极跟随器电路；
- 分析简单电路，求解电路的直流输出和交流增益；
- 设计简单的共源极（JFET）放大器；
- 分析结型场效应管放大器，求解电路的交流增益；
- 认识运放及其连接方法。

8.1 学习晶体管放大器

■ 在第 3 章已经学习过如何使晶体管导通或者关断。还学习过如何计算放大电路中的电阻值，使得集电极的直流电压等于电源电压的一半。为了复习这个概念，请看图 8-1 所示电路。

请根据以下步骤求出 R_B ，使得集电极的直流电压 V_C 等于电源电压 V_S 的一半。

(1) 根据以下公式求解 I_C ：

$$I_C = \frac{V_R}{R_C} = \frac{V_S - V_C}{R_C}$$

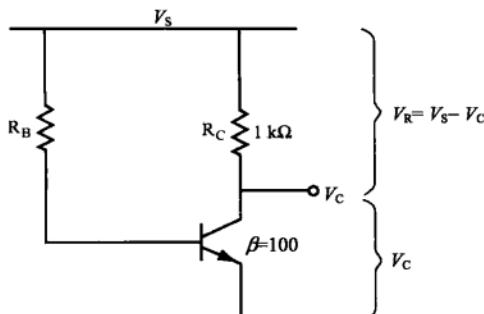


图 8-1

(2) 根据以下公式求解 I_B :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

(3) 根据以下公式求解 R_B :

$$R_B = \frac{V_s}{I_B}$$

问题

请根据上述步骤(1)~步骤(3)以及下列参数求出 R_B , 使得集电极电压等于 5V。

$V_s=10V$, $R_C=1k\Omega$, $\beta=100$

A. $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $I_B = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $R_B = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. $I_C = \frac{5V}{1k\Omega} = 5mA$

B. $I_B = \frac{5}{100} = 0.05mA$

C. $R_B = \frac{10V}{0.05mA} = 200k\Omega$

2 可以看到, 电阻 R_B 取 $200k\Omega$ 时, 集电极的输出电压为 5V。这种设置输出直流电压的过程被称为偏置 (biasing)。在问题 1 中, 将晶体管偏置成直流输出电压为 5V。

请用图 8-1 所示电路以及问题 1 所给出的公式解答下列问题。

问题

A. 如果减小 R_B , 那么 I_B 、 I_C 、 V_R 以及偏置点电压 V_c 会如何变化?

B. 如果增大 R_B , 那么 I_B 、 I_C 、 V_R 以及偏置点电压 V_c 会如何变化?

答案

- A. I_B 增大, I_C 增大, V_R 增大, V_C 减小。
 B. I_B 减小, I_C 减小, V_R 减小, V_C 增大。

3 从问题 2 中可以看出, 通过改变图 8-1 所示电路中的 R_B , 就能改变 I_B 。

晶体管能够放大 I_B 的小幅变化。因此, I_C 的波动大小就等于 I_B 变化量的 β 倍。

I_C 的变化能引起 R_C 上的压降 V_R 的变化。因此, 在集电极测得的输出电压也会随之改变。

问题

对于图 8-1 所示电路, 当 $R_B=168\text{k}\Omega$ 且 $V_S=10\text{V}$ 时, 请计算下列参数。

- A. $I_B = \frac{V_S}{R_B} = \text{_____}$
 B. $I_C = \beta I_B = \text{_____}$
 C. $V_R = I_C R_C = \text{_____}$
 D. $V_C = V_S - V_R = \text{_____}$

答案

$$\begin{array}{ll} \text{A. } I_B = \frac{10\text{V}}{168\text{k}\Omega} = 0.059\text{mA} & \text{B. } I_C = 100 \times 0.059 = 5.9\text{mA} \\ \text{C. } V_R = 1\text{k}\Omega \times 5.9\text{mA} = 5.9\text{V} & \text{D. } V_C = 10\text{V} - 5.9\text{V} = 4.1\text{V} \end{array}$$

4 请用图 8-1 所示电路回答下列问题 (其中 $V_S=10\text{V}$)。

问题

请计算下列 R_B 值对应的 V_C 。

- A. $100\text{k}\Omega$ B. $10\text{M}\Omega$ C. $133\text{k}\Omega$ D. $400\text{k}\Omega$

答案

- A. $I_B = 0.1\text{mA}$, $I_C = 10\text{mA}$, $V_C = 0\text{V}$
 B. $I_B = 1\mu\text{A}$, $I_C = 0.1\text{mA}$, $V_C \approx 10\text{V}$
 C. $I_B = 0.075\text{mA}$, $I_C = 7.5\text{mA}$, $V_C = 2.5\text{V}$
 D. $I_B = 0.025\text{mA}$, $I_C = 2.5\text{mA}$, $V_C = 7.5\text{V}$

5 图 8-2 左侧的图中绘出了问题 1 和问题 4 中计算出的 I_C 和 V_C 的值。连接这些点的直线被称为负载线 (load line)。

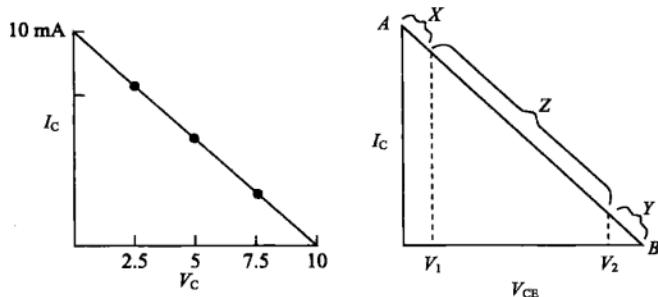


图 8-2

V_C 坐标轴表示晶体管的集电极和发射极之间的电压，而不是集电极到地的电压。因此，该坐标轴应标记为 V_{CE} ，如右图所示。（在该电路中， $V_{CE}=V_C$ ，因为集电极与地之间没有电阻。）

问题

- A. 在右图中的 A 点，晶体管是导通还是关断？
- B. 在 B 点，晶体管是导通还是关断？

答案

- A. 导通。因为流过的电流达最大值，此时的晶体管相当于短路，管压降为0V。
- B. 关断。因为没有电流流过晶体管，此时的晶体管相当于开路，管压降达最大值（这里为10V）。

6 图 8-2 右图中的 A 点被称为饱和点（或者饱和态点），因为集电极电流在该点达到最大值。

图 8-2 右图中的 B 点通常被称为关断点，因为晶体管在该点关断，没有集电极电流流过。

在 X 和 Y 区，增益 β 不是常数，因此它们被称为非线性区。请注意 $\beta=I_C/I_B$ 。因此， β 是图中直线的斜率。

粗略估计， V_1 约为 1V，而 V_2 比 B 点的电压低大约 1V。

问题

B 点对应的 V_{CE} 是多少？

答案

$V_{CE} = V_S$ ，这里为 10V。

7 图 8-2 右图的 Z 区中， β （即直线的斜率）为常数。因此，它也被称为线性区。当晶体

管工作在线性区时，输出信号不会出现失真。

问题

下列哪组 I_C 和 V_C 值能使图 8-1 所示电路的输出不失真？

- A. $I_C = 9\text{mA}$, $V_C = 1\text{V}$
- B. $I_C = 1\text{mA}$, $V_C = 9\text{V}$
- C. $I_C = 6\text{mA}$, $V_C = 4.5\text{V}$

答案

只有C，A和B都在非线性区。

8 如果在一个已经被偏置的晶体管的基极施加一个弱交流信号，那么弱交流信号的小幅度变化（如图 8-3 所示的正弦波）就会引起基极电流出现小幅变化。

基极电流的变化将被放大 β 倍，进而引起集电极电流出现相应的变化。集电极电流的变化反过来又会引起集电极电压出现类似的变化。

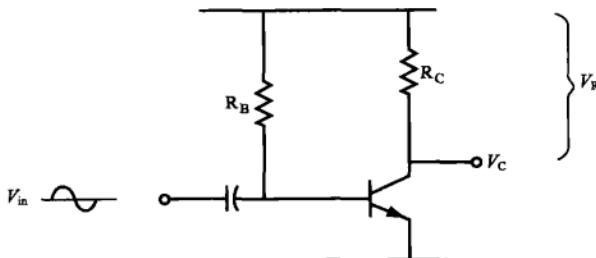


图 8-3

用于计算交流增益的 β 与计算直流变化的 β 不同。交流 β 是指共射极的交流前向电流传递系数，它对应于制造商提供的晶体管数据手册中的 h_{fe} 。当需要计算给定交流输入对应的交流输出或者确定交流电流变化时，就需要使用交流 β 。而计算基极或者集电极直流电流时则应使用直流 β 。你必须清楚该用哪个 β ，请记住，一个是用于计算直流，另一个是用于计算交流变化，这很关键。直流 β 有时也记为 h_{FE} 或者 β_{dc} 。

当 V_{in} 增大时，基极电流也随之增大，这将导致集电极电流增大。集电极电流的增加又会引起 R_C 上的压降增大，进而导致 V_C 减小。

注意 位于输入端的电容能阻断直流信号（电抗无穷大），但允许交流信号轻松通过（电抗低）。这是一种用于交流电路的输入和输出端的常见隔离技术。

问题

- A. 如果输入信号增大，那么集电极电压会如何变化？

B. 如果在输入端施加一个正弦波，那么你认为集电极会出现什么波形？

答案

A. 集电极电压 V_C 将会增大。

B. 正弦波，但是会反相，具体参见图8-4。

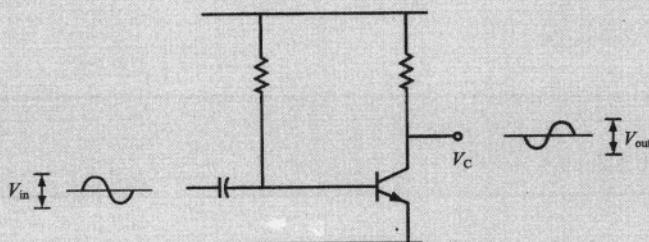


图 8-4

9 图 8-4 给出了放大电路的输入和输出的正弦波。

输入电压 V_{in} 施加在基极（严格来讲，它施加在基-射极二极管上）。集电极电压的变化以直流偏置点 V_C 为中心，并且变化幅度比输入电压大。因此，输出正弦波的振幅比输入正弦波的大（即信号被放大了）。

集电极输出是放大后的信号，它能够驱动负载（比如扬声器）。

为了区分输出信号中的交流变化量与直流偏置量，可用 V_{out} 表示交流输出电压。在大多数情况下， V_{out} 是峰峰值。

问题

A. V_C 代表什么？

B. V_{out} 代表什么？

答案

A. 集电极直流电压，或者是偏置点。

B. 交流输出电压。

输出电压与输入电压之比称为放大器的电压增益（voltage gain）。

$$\text{电压增益 } A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

为了计算出放大器的电压增益，就必须用示波器测量 V_{in} 和 V_{out} ，测量它们的峰峰值电压。

10 对于图 8-4 所示电路，可以用下列公式计算电压增益：

$$A_v = \beta \times \frac{R_L}{R_{in}}$$

在该公式中

□ R_L 为负载的电阻 (load resistance)。在该电路中，负载电阻就是集电极电阻 R_C 。

□ R_{in} 为晶体管的输入电阻 (input resistance)。可以在制造商提供的数据手册或者指标手册中找到 R_{in} 。对于大多数晶体管来说，输入电阻大约为 $1k\Omega \sim 2k\Omega$ 。

将下面两个电压增益公式组合起来就能求出 V_{out} 。

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \text{ 并且 } A_v = \beta \times \frac{R_L}{R_{in}}$$

$$\text{因此, } \frac{V_{out}}{V_{in}} = \beta \times \frac{R_L}{R_{in}}$$

为求出 V_{out} ，需要使用下面的公式。这里各参数的取值为： $R_{in}=1k\Omega$ ， $V_{in}=1mV$ ， $R_C=1k\Omega$ ， $\beta=100$ 。

$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{in} \times \beta \times \frac{R_L}{R_{in}} \\ &= 1mV \times 100 \times \frac{1k\Omega}{1k\Omega} \\ &= 100mV \end{aligned}$$

问题

- A. 如果 $R_{in}=2k\Omega$ ， $V_{in}=1mV$ ， $R_C=1k\Omega$ 且 $\beta=100$ ，请计算 V_{out} 。
 B. 请求出这两种情况下的电压增益。

答案

- A. $V_{out} = 50mV$ B. $A_v = 100$ 和 $A_v = 50$

这个简单的放大器能够提供高达 500 倍的电压增益。但是它有一些缺陷，从而限制了它的实用性。

- 由于不同晶体管的 β 值不同，如果更换晶体管， V_C 也会变化。为了补偿该影响，就必须调整 R_B 。
- R_{in} 或者 h_{ie} 因晶体管的不同而大不一样。这种变化，再加上 β 值的变化，就使得很难保持各个晶体管放大器的增益一致。
- R_{in} 和 β 会随温度的变化而变化，因此增益与温度有关。比如，如果本问题中讨论的简单放大器电路是按照 7 月份的沙漠环境而设计的，那么它可能在阿拉斯加的冬天完全失效。在实验室里工作得很好的放大器可能在户外的热天气或者冷天气里无法工作。

注意 如果放大器的增益和直流偏置点像本问题所描述的那样变化，那么就称其不稳定 (unstable)。为了保证能可靠运行，放大器应当尽可能地稳定。在后面的问题中，将看到如何设计稳定的放大器。

晶体管放大器实验

在下面的实验中，将搭建一个简单的晶体管放大电路，测量其输出电压和增益，并确定输出电压和增益随温度如何变化。

你需要以下设备和电源：

- 晶体管 1 个；
- $250\text{k}\Omega$ 电位计（即可变电阻）1 个；
- $1\text{k}\Omega$ 电阻 1 个；
- $10\text{k}\Omega$ 电阻 1 个；
- $0.1\mu\text{F}$ 电容 1 个；
- 9V 晶体管收音机电池 1 个或者实验电源 1 台；
- 面包板 1 块；
- 信号发生器 1 台或者正弦波振荡器 1 个；
- 示波器 1 台。

如果没有搭建电路和进行测量所需的材料设备，那么通读本实验即可。

请按照下列步骤完成本实验。

- (1) 在面包板上搭建如图 8-5 所示的电路。

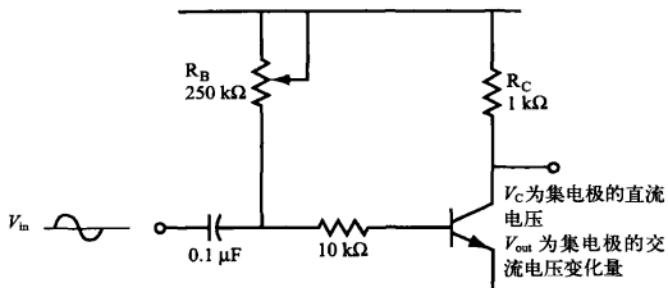


图 8-5

- (2) 调节电位计使得集电极的直流电压位于 4.5V 至 5V 之间。

(3) 将信号发生器连接到放大电路的输入端，并调节信号的频率，使信号发生器输出 1kHz 的正弦波。

(4) 调节信号发生器，使得通过示波器看到的晶体管集电极的输出不失真。要确保输出看起来像正弦波并且不会出现图 8-6 所示的情况。



图 8-6

- (5) 测量放大电路的正弦波输入和输出的峰峰值。

- (6) 根据公式 $A_V = V_{out} / V_{in}$ 求出电压增益。

(7) 接下来, 将电烙铁靠近正在工作的晶体管, 保持 15~30s, 对晶体管加热。请注意集电极直流电压的变化, 以及输出正弦波的峰峰值的变化。

(8) 更换晶体管, 重复步骤(2)~步骤(7)。请注意增益的变化。

你会发现, 根本无法确定输出信号将如何变化。这是因为不同晶体管的 β 和 R_{in} 值各不相同, 并且它们随温度变化的系数也不同。

理解偏置点和增益都会随温度变化而改变, 这一点很重要。显然, 这限制了该电路的实用性。为了设计出实用的稳定放大器, 就必须做一些改进, 这将在接下来的问题中介绍。

8.2 稳定的放大器

II 可以通过在电路中增加两个电阻来克服本章前 10 个问题中讨论的晶体管放大器的不稳定问题。图 8-7 所示的放大器电路中, 增加了 R_E 和 R_2 两个电阻的阻值。 R_2 和 R_1 (对应于前面电路中的 R_B) 能保证直流偏置点的稳定性。

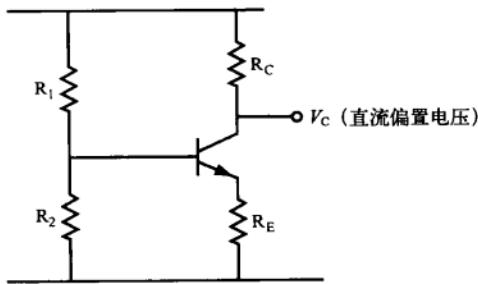


图 8-7

增加射极电阻 R_E 的阻值, 就能保证交流增益的稳定性。

图 8-8 中标示出了电路中的直流电流和电压。这些参数将用于接下来的几个问题。

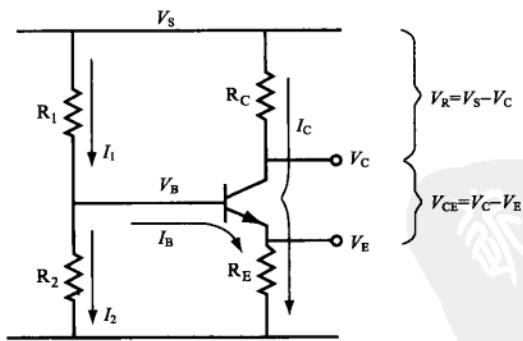


图 8-8

问题

设计放大电路并选择电阻值时, 有哪两个目标?

答案

稳定的直流偏置点，稳定的交流增益。

- 12** 首先请看增益。图 8-8 所示电路的增益计算公式如下：

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_C}{R_E}$$

该公式与问题 10 所示的公式略有不同。（目前还不需要复杂的数学证明。）这里，交流增益与晶体管的 β 和输入电阻无关。

尽管这两个参数会随温度而变化，而且还会因晶体管的不同而变化，但是，现在有办法不考虑这些变化因素而设定出固定的交流增益。

问题

请使用图 8-8 所示电路解答下列问题。其中 $R_C=10\text{k}\Omega$, $R_E=1\text{k}\Omega$ 。

- A. 如果 $\beta=100$, 那么晶体管的交流电压增益是多少?
- B. 如果 $\beta=500$, 那么增益又是多少?

答案

- A. 10 B. 10

- 13** 本问题通过两个示例帮助你理解如何计算电压增益和输出电压。

问题

- A. 计算图 8-8 所示放大电路的电压增益 A_v , 其中 $R_C=10\text{k}\Omega$, $R_E=1\text{k}\Omega$ 。然后用 A_v 计算输出电压, 其中输入信号是 2mV(pp)。
- B. 计算电压增益, 其中 $R_C=1\text{k}\Omega$, $R_E=250\Omega$ 。然后用 A_v 计算输出电压, 其中输入信号是 1V(pp)。

答案

A. $A_v = \frac{R_C}{R_E} = \frac{10\text{k}\Omega}{1\text{k}\Omega} = 10$

$V_{out}=10\times V_{in}=20\text{mV}$

B. $A_v = \frac{1\text{k}\Omega}{250\Omega} = 4$

$V_{out}=4\text{V(pp)}$

尽管图 8-8 所示放大电路的电压增益值很稳定, 但是它无法实现大增益。由于受各种因素的限制, 该电路的电压增益最高只能达到 50 左右。本章的后面, 还将讨论大电压增益的放大电路。

14 在继续学习前, 请先看一下图 8-8 所示放大电路的电流关系, 它通常都做了近似。可以用以下公式计算流过射极电阻的电流。

$$I_E = I_B + I_C$$

换句话说, 射极电流等于基极电流与集电极电流之和。

I_C 要比 I_B 大得多。因此, 可以假设射极电流等于集电极电流。

$$I_E = I_C$$

问题

请计算图 8-9 所示电路的 V_C 、 V_E 和 A_V , 其中 $V_S=10V$, $I_C=1mA$, $R_C=1k\Omega$ 且 $R_E=100\Omega$ 。

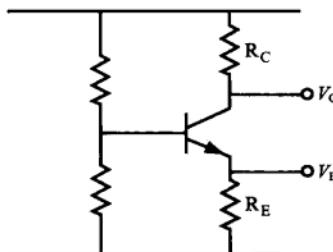


图 8-9

答案

$$V_R = 1k\Omega \times 1mA = 1V$$

$$V_C = V_S - V_R = 10 - 1 = 9V$$

$$V_E = 100\Omega \times 1mA = 0.1V$$

$$A_V = \frac{R_C}{R_E} = \frac{1k\Omega}{100\Omega} = 10$$

15 请用图 8-9 所示电路求解本问题。其中, $V_S = 10V$, $I_C = 1mA$, $R_C = 2k\Omega$, $R_E = 1k\Omega$ 。

问题

请计算 V_C 、 V_E 和 A_V 。

答案

$$V_R = 2k\Omega \times 1mA = 2V$$

$$V_C = 10 - 2 = 8V$$

$$V_E = 1k\Omega \times 1mA = 1V$$

$$A_V = \frac{R_C}{R_E} = \frac{2k\Omega}{1k\Omega} = 2$$

16 请用图 8-9 所示电路求解本问题。其中， $V_S = 10V$, $I_C = 1mA$ 。

问题

请用下列 R_C 和 R_E 值，求解 V_C 、 V_E 和 A_V 。

- A. $R_C = 5k\Omega$, $R_E = 1k\Omega$
- B. $R_C = 4.7k\Omega$, $R_E = 220\Omega$

答案

- A. $V_R = 5V$, $V_C = 5V$, $V_E = 1V$, $A_V = 5$
- B. $V_R = 4.7V$, $V_C = 5.3V$, $V_E = 0.22V$, $A_V = 21.36$

8.3 偏置

17 本问题将按步骤计算图 8-10 所示放大电路偏置所需的电阻值。

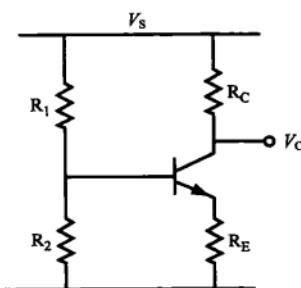


图 8-10

请根据下列步骤确定 R_1 、 R_2 和 R_E 的值，使得电路偏置到指定的直流输出电压并得到指定的交流电压增益。

首先请阅读下列步骤和相关公式，然后完成本示例。

(1) 用下列公式求解 R_E :

$$A_V = \frac{R_C}{R_E}$$

(2) 用下列公式求解 V_E :

$$A_V = \frac{V_R}{V_E} = \frac{V_S - V_C}{V_E}$$

(3) 用下列公式求解 V_B :

$$V_B = V_E + 0.7V$$

(4) 用下列公式求解 I_C :

$$I_C = \frac{V_S - V_C}{R_C}$$

(5) 用下列公式求解 I_B :

$$I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

(6) 求解 I_2 , 其中 I_2 等于 $10I_B$ (参照图 8-8)。根据经验, 这是实现稳定的直流偏置点的关键步骤。

(7) 用下列公式求出 R_2 :

$$R_2 = \frac{V_B}{I_2}$$

(8) 用下列公式求出 R_1 :

$$R_1 = \frac{V_S - V_B}{I_2 + I_B}$$

(9) 步骤 (7) 和步骤 (8) 可能会得出非标准的电阻值, 因此请选择最接近的标准值。

(10) 利用分压器公式计算步骤 (9) 选择的标准电阻值对应的电压, 看看它与步骤(3) 所得 V_B 值是否接近 (“接近”的意思是不超出理想值 10%)。

按照本过程做就能设计出实用的放大器, 其直流输出电压和交流增益都接近于本问题开始时指定的指标。

问题

请求出图 8-11 所示电路对应各问题中指定的参数值。其中, $A_V=10$, $V_C=5V$, $R_C=1k\Omega$, $\beta=100$, $V_S=10V$ 。

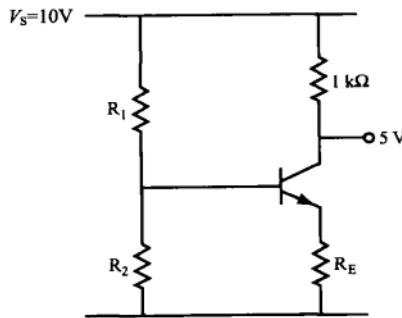


图 8-11

依次完成步骤(1)~步骤(10), 如果有必要, 请参考本问题中的步骤完成计算。

(1) 求出 R_E 。

$$A_V = \frac{R_C}{R_E} \text{。因此, } R_E = \frac{R_C}{A_V} = \frac{1k\Omega}{10} = 100\Omega$$

$$(2) V_E = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$(3) V_B = \underline{\hspace{2cm}}$$

(4) $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$

(5) $I_B = \underline{\hspace{2cm}}$

(6) $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(7) $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(8) $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

(9) 选择最接近 R_1 和 R_2 的标准电阻值。(10) 请根据采用标准电阻值的 R_1 和 R_2 求出 V_B 。**答案**

求得的结果应该与下列值很接近。

(1) 100Ω (2) $0.5V$ (3) $1.2V$ (4) $5mA$

(5) $0.05mA$ (6) $0.5mA$ (7) $2.4k\Omega$ (8) $16k\Omega$

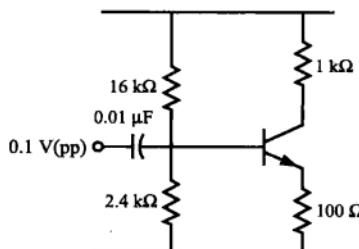
(9) $2.4k\Omega$ 和 $16k\Omega$ 都是标准值(精度为5%)。另一组可以接受的电阻值分别为 $2.2k\Omega$ 和 $15k\Omega$ 。(10) 采用 $2.4k\Omega$ 和 $16k\Omega$ 时, $V_B=1.3V$ 。采用 $2.2k\Omega$ 和 $15k\Omega$ 时, $V_B=1.28V$ 。无论是哪个 V_B 值, 都与步骤(3) 计算得到的 V_B 值 $1.2V$ 相差不超过10%。图 8-12 所示的放大电路采用了本问题计算得到的 R_1 、 R_2 和 R_E 值。

图 8-12

18 按照问题 17 中的步骤解答下列问题。**问题**请求出图 8-11 所示电路对应各问题的指定参数值。其中, $A_v=15$, $V_C=6V$, $\beta=100$, $R_C=3.3k\Omega$, $V_S=10V$ 。

(1) $R_E = \underline{\hspace{2cm}}$

(2) $V_E = \underline{\hspace{2cm}}$

(3) $V_B = \underline{\hspace{2cm}}$

(4) $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$

(5) $I_B = \underline{\hspace{2cm}}$

(6) $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(7) $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(8) $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

(9) 选择最接近 R_1 和 R_2 的标准电阻值。

(10) 请根据采用标准电阻值的 R_1 和 R_2 求出 V_B 。

答案

应该得到如下的结果：

(1) 220Ω (2) $0.27V$ (3) $0.97V$ (也可以使用 $1V$) (4) $1.2mA$

(5) $0.012mA$ (6) $0.12mA$ (7) $8.3k\Omega$ (8) $68.2k\Omega$

(9) 可以选择非常接近的标准电阻 $8.2k\Omega$ 和 $68 k\Omega$ 。

(10) 利用标准电阻值解得的结果是 1.08 。这与问题 3 计算出的 V_B 值非常接近。

19 问题 18 中讨论的电路的交流电压增益是 10。前面已经知道，图 8-11 所示放大电路的最大实用增益约为 50。

然而，在问题 10 中已知图 8-4 所示的放大电路的交流电压增益可以达到 500 倍。因此，尽管图 8-11 所示电路能保证直流偏置点的稳定性，但是其交流电压增益却比图 8-4 所示电路小得多。

可以通过在射极电阻上并联电容来提高放大电路的交流电压增益，同时又能保持直流偏置点的稳定性。具体参见图 8-13。

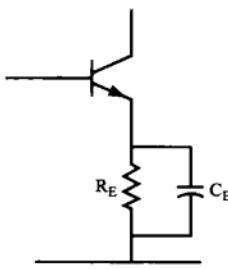


图 8-13

如果该电容对交流信号的电抗比 R_E 小很多，那么交流信号就将流过电容而不是电阻。因此，该电容也被称为射极旁路电容 (emitter bypass capacitor)。交流信号与直流信号“看到的”电路不同，直流信号会被电容阻断因而只能流过电阻。图 8-14 给出了交流信号和直流信号看到的不同电路。

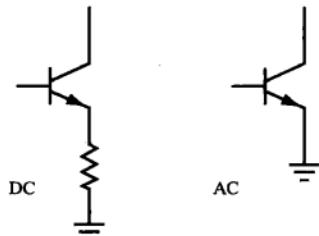


图 8-14

现在，交流电压增益就非常接近于问题1~问题10所讨论的放大电路了。

问题

- 射极旁路电容对交流信号有何影响？
- 射极旁路电容对交流电压增益有何影响？
- 带有射极旁路电容的放大电路的交流电压增益公式是什么？

答案

- 它使得射极看起来像是接地，并有效地使电路变为图8-4所示的形式。
- 它能增大增益。
- 与问题10所用的公式相同：

$$A_v = \beta \times \frac{R_C}{R_{in}}$$

20 当需要尽可能大的交流电压增益时，就可以采用图8-13所示的电路。当交流电压增益够大是首要目标时，预测增益的实际大小通常并不重要，因此公式不准确也没关系。如果需要准确的增益值，那就必须采用其他类型的放大电路，其增益值则相对较小。

可以按照下列步骤求出电容 C_E 的值。

- (1) 确定放大器必须处理的信号的最低频率。
- (2) 请用下列公式计算 X_C ：

$$X_C = \frac{R_E}{10}$$

- (3) 根据放大器必须工作的最低频率（由步骤(1)确定）并用下列公式计算 C_E ：

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

对于下列问题，请用在图8-12所示电路上增加了射极旁路电容的电路，如图8-15所示。

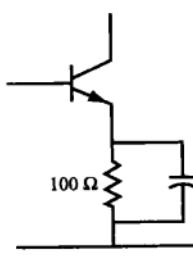


图 8-15

问题

根据前面的步骤计算 C_E 的值，放大器的最低工作频率为 50Hz。

(1) 放大器的最低工作频率为 50Hz。

(2) $X_C = \underline{\hspace{2cm}}$

(3) $C_E = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

$$X_C = 10\Omega \quad C_E = 320\mu F \text{ (近似值)}$$

带有射极旁路电容的放大器的交流电压增益公式（参见图 8-16 中的电路 2）与问题 1~问题 10 所讨论的放大器的交流电压增益公式相同，其射极直接与地相连（参见图 8-16 中的电路 1）。

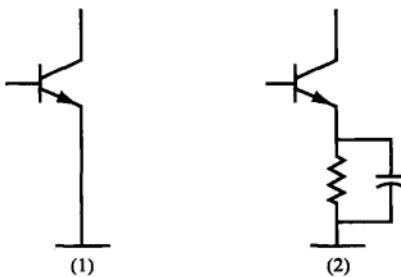


图 8-16

放大器的交流电压增益公式为

$$A_v = \beta \times \frac{R_C}{R_{in} + R_E}$$

(R_C 代替了 R_L ，因为集电极电阻就是放大器的总负载。)

□ 电路 1——这里 $R_E=0$ ，因此交流电压增益公式为

$$A_v = \beta \times \frac{R_C}{R_{in}}$$

□ 电路 2——这里 R_E 对交流信号为零，这是因为交流信号可以通过电容直接接地，交流电路中不包含 R_E 。因此，交流电压增益公式为

$$A_v = \beta \times \frac{R_C}{R_{in}}$$

21 为了获得更大的电压增益，可以采用两个晶体管放大器级联（cascaded）的形式。即可以将第一级放大器的输出接入第二级放大器的输入端。图 8-17 所示为双管放大电路，也被称为两级放大器（two-stage amplifier）。

可以通过将各级放大电路的增益相乘得到交流电压总增益。例如，如果第一级放大器的交流电压增益为 10，而第二级的交流电压增益为 10，那么交流电压总增益就为 100。

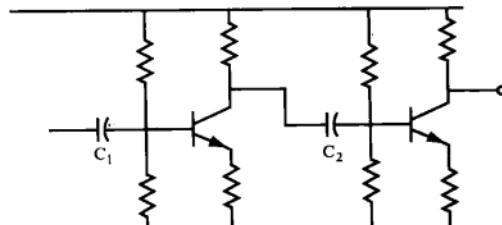


图 8-17

问题

- A. 假设有一个增益为 15 的放大器与一个增益为 25 的放大器级联，请问它们的总增益是多少?
 B. 如果两级放大器的增益分别是 13 和 17，那么总增益是多少？

答案

A. 375 B. 221

22 如果两级放大器都采用射极旁路电容，那么就能实现很大的交流电压增益。

问题

如果双管放大器每一级的增益是 100，那么交流电压总增益是多少？

答案

10 000

8.4 射极跟随器

23 图 8-18 所示为另一种放大器电路。

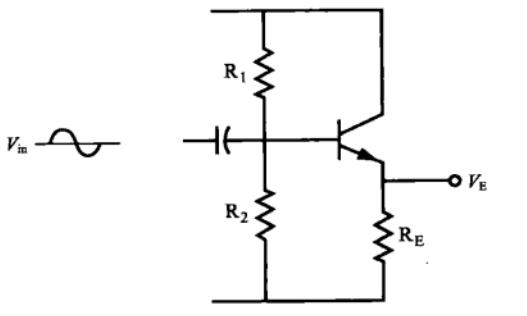


图 8-18



问题

图 8-18 所示电路与问题 11~问题 18 所讨论的放大器电路有何不同?

答案

它没有集电极电阻，并且输出信号是从射极引出的。

24 图 8-18 所示电路被称为射极跟随器 (emitter follower amplifier)。(在很多情况下，它也被称为共集极放大器 (common collector amplifier)。)

其输出信号有很多有趣的特性。

- 输出信号的峰峰值几乎与输入信号相等。换句话说，该电路的增益略小于 1，而实际中通常被视为 1。
- 输出信号与输入信号的相位相同。信号没有被反相。事实上，可以简单地将输出看作与输入相等。
- 放大器的输入阻抗非常大。因此，它从信号源获得的电流非常小。
- 放大器的输出阻抗非常低。因此，射极的信号可以看作是从内阻很小的电池或者信号发生器发出的。

问题

A. 射极跟随放大器的电压增益是多少?

B. 输出信号被反相了吗?

C. 射极跟随放大器的输入电阻怎样?

D. 输出电阻怎样?

答案

A. 1 B. 没有 C. 很高 D. 很低

25 本问题中的示例展示了射极跟随器电路的重要性。图 8-19 所示电路包含一个小的交流电机，其电阻为 100Ω ，并由来自信号发生器的 $10V(pp)$ 信号驱动。图中标记的 50Ω 电阻 R_G 是信号发生器的内阻。在本电路中，只有 $6.7V(pp)$ 施加在电机上，其余电压都消耗在 R_G 上。

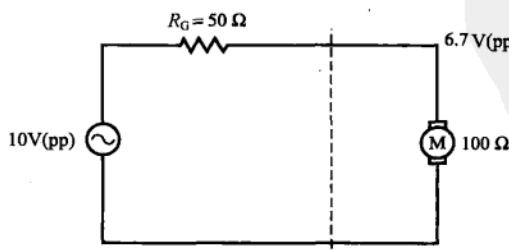


图 8-19

图 8-20 所示的电路与图 8-19 基本相同，只是在信号发生器与电机之间接入了一个晶体管，并将其配置成射极跟随器的形式。

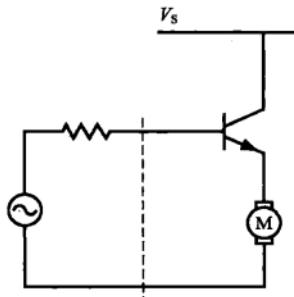


图 8-20

可以用下列公式计算晶体管的近似输入电阻。

$$R_{in} = \beta \times R_E = 100 \times 100\Omega = 10\,000\Omega \text{ (假设 } \beta=100 \text{)}$$

来自信号发生器的 10V(pp) 信号被晶体管 10 000Ω 的输入电阻和信号发生器的 50Ω 内阻分压。因此， R_G 上没有明显的压降，10V(pp) 信号几乎全都加在晶体管的基极上。晶体管的射极电压也保持为 10V(pp)。

此外，流过电机的电流现在来自电源而不是信号发生器，因此晶体管看起来像是一个具有极低内阻的信号发生器。

内阻 R_o 也被称为射极跟随器的输出阻抗 (output impedance)。可以用下列公式计算内阻。

$$R_o = \frac{\text{信号源的内阻}}{\beta}$$

对于图 8-20 所示电路， $R_G=50\Omega$ ， $\beta=100$ ， $R_o=0.5\Omega$ 。因此，图 8-20 所示电路相当于一个内阻为 0.5Ω 的信号发生器驱动电阻为 100Ω 的电机。因此，10V(pp) 输出电压几乎全都施加在电机上。

问题

- A. 本示例所用射极跟随器电路的用途是什么？
- B. 电路中使用到射极跟随器的哪两个特性？

答案

- A. 用于驱动无法直接由信号发生器驱动的负载。
- B. 输入电阻高和输出电阻低。

26 本问题采用问题 23~问题 25 中讨论的射极跟随器电路。

问题

- A. 射极跟随器电路的增益近似值是多少？

- B. 输出信号相对于输入信号的相位变化是多少?
 C. 输入电阻和输出电阻，哪个大?
 D. 射极跟随器在放大信号或者隔离负载方面，哪个更有效?

答案

- A. 1 B. 同相 C. 输入电阻 D. 隔离负载

27 请根据下列步骤设计射极跟随器电路。

- (1) 设定 V_E 。这是直流偏置电压，它通常被设定为电源电压的一半。
- (2) 请用 $V_B = V_E + 0.7V$ 求出 V_B 。
- (3) 设定 R_E 。这通常是已知参数，特别是对于电机或者其他要被驱动的负载。
- (4) 请用下列公式计算 I_E :

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

- (5) 请用下列公式计算 I_B :

$$I_B = \frac{I_E}{\beta}$$

- (6) 请用 $I_2 = 10I_B$ 求出 I_2 。

- (7) 请用下列公式计算 R_2 :

$$R_2 = \frac{V_B}{I_2}$$

- (8) 请用下列公式计算 R_1 :

$$R_1 = \frac{V_S - V_B}{I_2 + I_B}$$

通常， I_B 非常小，因此可以在该公式中忽略它。

- (9) 为 R_1 和 R_2 选择最接近的标准电阻值。

- (10) 请用分压公式检查标准电阻值对应的 V_B 与理想值的接近程度。

下面通过一个简单的设计示例说明该过程。请用图 8-21 所示电路中的参数值求解本问题。

问题

完成步骤(1) ~ 步骤(10)，求出两个偏置电阻值。

- (1) $V_E =$ _____
- (2) $V_B =$ _____
- (3) $R_E =$ _____
- (4) $I_E =$ _____
- (5) $I_B =$ _____

(6) $I_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(7) $R_2 = \underline{\hspace{2cm}}$

(8) $R_1 = \underline{\hspace{2cm}}$

(9) 请求出最接近 R_1 和 R_2 的标准电阻值。

(10) $V_B = \underline{\hspace{2cm}}$

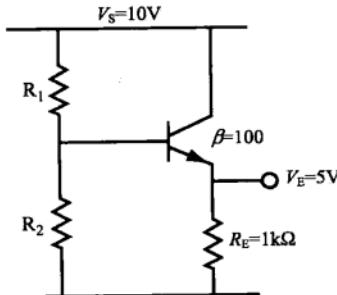


图 8-21

答案

求得的答案应该与下列值接近。

(1) 5V (图8-21已给出) (2) 5.7V (3) 1kΩ (图8-21已给出) (4) 5mA

(5) 0.05mA (6) 0.5mA (7) 11.4kΩ (8) 7.8kΩ

(9) 最接近的标准电阻值分别为8.2kΩ和12 kΩ。

(10) 标准电阻值对应的 $V_B = 5.94V$ 。这比步骤(2)计算出的 V_B 略大，但是还能接受。

V_E 是由偏置电阻设定的。因此，它与 R_E 的大小无关。几乎任何大小的 R_E 都能用于该电路。 R_E 的最小值可由下面的简单公式得到。

$$R_E = \frac{10R_2}{\beta}$$

8.5 放大器分析

28 到目前为止，我们的重点主要是在简单放大器和射极跟随器的设计方面。本节将展示如何“分析”已经设计好的电路。这里所谓的“分析”就是计算集电极直流电压（偏置点电压），求出交流增益。这个过程基本上和设计过程是相反的。

下面就从图 8-22 所示的电路开始。

分析电路的步骤如下。

(1) 请用下列公式求出 V_B :

$$V_B = V_s \times \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

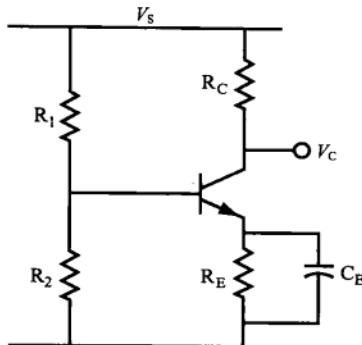


图 8-22

(2) 请用 $V_E = V_B - 0.7V$ 求出 V_E 。

(3) 请用下列公式求出 I_C :

$$I_C = \frac{V_E}{R_E}$$

注意 $I_C = I_E$ 。

(4) 请用 $V_R = R_C \times I_C$ 求出 V_R 。

(5) 请用 $V_C = V_S - V_R$ 求出 V_C 。这就是偏置点。

(6) 请用下列公式求出 A_V :

$$A_V = \frac{R_C}{R_E} \text{ 或 } A_V = \beta \times \frac{R_C}{R_{in}}$$

如果使用上面的第二个公式，必须先从制造商提供的晶体管数据手册中找出 R_{in} (或者 h_{ie})。请用图 8-23 所示电路解答下列问题。其中， $\beta=100$ ， $R_{in}=2k\Omega$ ，其他参数参见电路图中的标示。

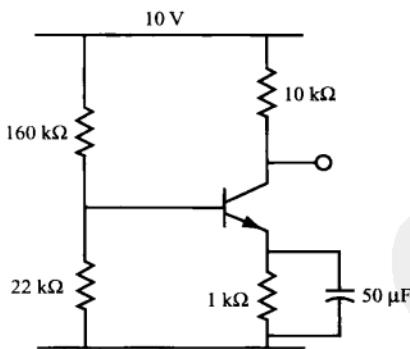


图 8-23

问题

请根据本问题的步骤(1) ~ 步骤(6) 求出 V_B 、 V_E 、 I_C 、 V_R 、 V_C 和 A_V 。

PDG

答案

$$(1) V_B = 10 \times \frac{22k\Omega}{160k\Omega + 22k\Omega} = 1.2V$$

$$(2) V_E = 1.2 - 0.7 = 0.5V$$

$$(3) I_C = \frac{0.5V}{1k\Omega} = 0.5mA$$

$$(4) V_R = 10k\Omega \times 0.5mA = 5V$$

$$(5) V_C = 10V - 5V = 5V \text{ (这是偏置点)}$$

(6) 带有电容时：

$$A_v = 100 \times \frac{10k\Omega}{2k\Omega} = 500 \text{ (大增益)}$$

不带电容时：

$$A_v = \frac{10k\Omega}{1k\Omega} = 10 \text{ (小增益)}$$

29 可以通过下面的简单步骤确定放大器能够正常通过的信号的最低频率。

(1) 确定 R_E 的值。

(2) 计算 $X_C = R_E/10$ 时对应的频率。请使用电容的电抗公式。(这是经过数学验证并且在实际中能得出合理的精确结果的经验公式之一。)

问题

对于图 8-23 所示的电路，请求出下列值。

A. $R_E = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $f = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. $R_E = 1k\Omega$ (电路图中已给出)

B. 因此，可以取 $X_C = 100\Omega$ ，并利用下列公式：

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$\text{因为 } 0.16 = \frac{1}{2\pi f} \text{, 所以 } 100\Omega = \frac{0.16}{f \times 50\mu F}$$

于是

$$f = \frac{0.16}{100 \times 50 \times 10^{-6}} = 32Hz$$

30 对于图 8-24 所示电路，请根据问题 28 和问题 29 给出的步骤解答下列问题。

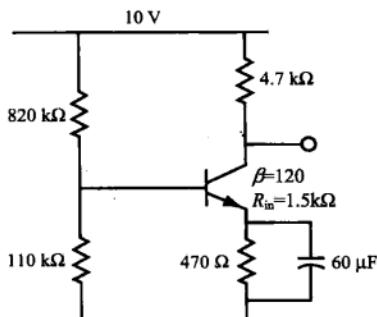


图 8-24

问题

- (1) $V_B = \underline{\hspace{2cm}}$
- (2) $V_E = \underline{\hspace{2cm}}$
- (3) $I_C = \underline{\hspace{2cm}}$
- (4) $V_R = \underline{\hspace{2cm}}$
- (5) $V_C = \underline{\hspace{2cm}}$
- (6) 带电容时: $A_V = \underline{\hspace{2cm}}$
不带电容时: $A_V = \underline{\hspace{2cm}}$
- (7) 低频检查: $f = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

答案应该与下面的值接近。

- | | | | |
|----------------|----------------|-----------|----------------|
| (1) 1.18V | (2) 0.48V | (3) 1mA | (4) 4.7V |
| (5) 5.3V (偏置点) | (6) 带电容时: 376; | 不带电容时: 10 | (7) 57Hz (近似值) |

8.6 结型场效应管放大器

31 第3章的问题29~问题32以及第4章的问题37~问题41都讨论过结型场效应管(JFET)。在解答本问题前, 你可以先复习前面那些问题。图 8-25 所示为 JFET 的典型偏置电路。

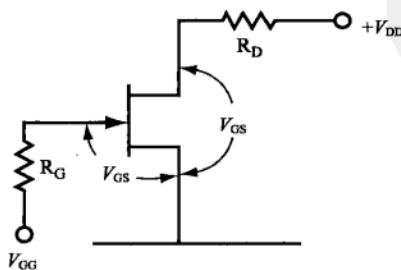


图 8-25

问题

- 本电路中使用的是哪种 JFET?
- 令 JFET 完全导通所需的 V_{GS} 电压是多少?
- 当 JFET 完全导通时流过的漏极电流是多少?
- 令 JFET 完全关断所需的 V_{GS} 电压是多少?
- 当 JFET 在电路中交替地完全导通或者关断时, JFET 被当作什么元件在使用?

答案

- N 沟道 JFET。
- $V_{GS} = 0V$ 就能令 JFET 完全导通。
- 漏极饱和电流 (I_{DSS})。
- 对于 N 沟道 JFET 来说, V_{GS} 要为负值才能完全关断它。 V_{GS} 电压必须大于或等于关断电压才能使 JFET 完全关断。
- JFET 被当作开关来使用。

32 通过给 JFET 施加门-源极电压令其偏置于完全导通与完全关断之间, 就可以用 JFET 来放大交流信号。可以用下列公式计算出偏置电压 V_{GS} 为一定大小时流过 JFET 的漏极电流, 进而绘出它的传输曲线。

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(\text{off})}} \right)^2$$

在该公式中, I_{DSS} 是漏极饱和电流值, 而 $V_{GS(\text{off})}$ 是关断时的门-源极电压。这两个值都标示在图 8-26 所示的传输曲线上。

对于图 8-26 所示的传输曲线, 其中 $I_{DSS} = 12\text{mA}$, $V_{GS(\text{off})} = -4\text{V}$ 。设定偏置电压 $V_{GS} = -2\text{V}$, 就得到漏极电流为

$$I_D = 12\text{mA} \times \left(1 - \frac{-2}{-4} \right)^2 = 12\text{mA} \times 0.5^2 = 3\text{mA}$$

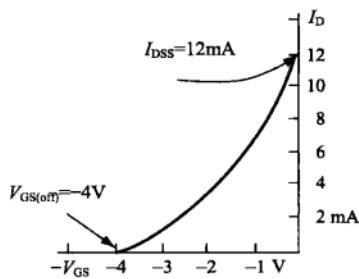


图 8-26

问题

计算下列值对应的漏极电流：

- A. $V_{GS} = -1.5V$ B. $V_{GS} = -0.5V$

答案

- A. 4.7mA B. 9.2mA

注意 对于给定的 JFET，其数据手册可能会给出范围很宽的 I_{DSS} 和 $V_{GS(off)}$ 值。因此，可能得用第 4 章问题 28 所介绍的方法实际测量它们。

33 对于图 8-25 所示的电路，请选择漏-源极电压 V_{DS} ，然后用下列公式计算负载电阻 R_D 的值。

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_D}$$

对于本问题，可以取 $I_D = 3mA$ ，漏极电源电压 V_{DD} 为 24V。计算使得 V_{DS} 达到期望值（这就是放大器的直流输出电压）的 R_D 值。

问题

请计算使得 $V_{DS}=10V$ 的 R_D 值。

答案

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{I_D} = \frac{24V - 10V}{3mA} = \frac{14V}{3mA} = 4.67k\Omega$$

34 对于图 8-27 所示电路（它被称为 JFET 共源极放大器），如果在 JFET 的门极施加 0.5V(pp) 的正弦波，那么漏极就会输出放大后的正弦波。

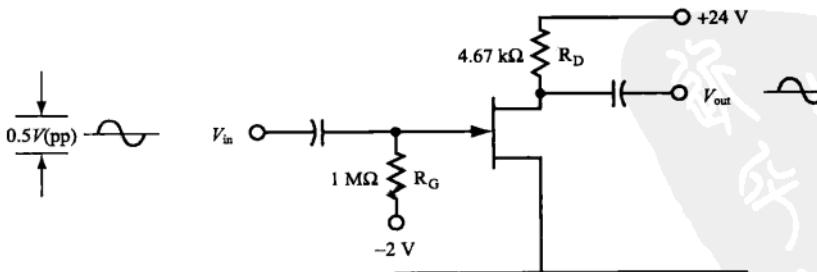


图 8-27

输入的正弦波叠加在-2V 的偏置电压上，然后共同施加在 JFET 的门极上。因此， V_{GS} 的变

化范围是 $-1.75V \sim -2.25V$ 。

问题

请用问题32中的公式，计算 V_{GS} 取最大值、最小值时对应的 I_D 。

答案

当 $V_{GS} = -1.75V$ 时， $I_D = 3.8mA$ ；当 $V_{GS} = -2.25V$ 时， $I_D = 2.3mA$

35 随着漏极电流的变化， V_{RD} （电阻 R_D 上的压降）也会改变。

问题

对于图8-27所示的电路，请计算 I_D 分别取问题34计算出的最大值、最小值时对应的 V_{RD} 。

答案

当 $I_D = 3.8mA$ 时， $V_{RD} = 3.8mA \times 4.67k\Omega = 17.7V$

当 $I_D = 2.3mA$ 时， $V_{RD} = 2.3mA \times 4.67k\Omega = 10.7V$

此时对应7V(pp)的正弦波。

36 随着 R_D 上压降的变化，输出电压也会随之改变。

问题

对于图8-27所示的电路，请计算 V_{RD} 分别取问题35计算出的最大值、最小值时对应的 V_{out} 。

答案

当 $V_{RD} = 17.7V$ 时， $V_{out} = V_{DD} - V_{RD} = 24V - 17.7V = 6.3V$

当 $V_{RD} = 10.7V$ 时， $V_{out} = V_{DD} - V_{RD} = 24V - 10.7V = 13.3V$

因此，输出信号是7V(pp)的正弦波。

37 下表列出了问题34~问题36的计算结果以及主流偏置点。

| V_{GS} | I_D | V_{RD} | V_{out} |
|----------|-------|----------|-----------|
| -1.75V | 3.8mA | 17.7V | 6.3V |
| -2.0V | 3.0mA | 14.0V | 10.0V |
| -2.25V | 2.3mA | 10.7V | 13.3V |

问题

交流输出信号的特性有哪些？

答案

输出信号是7V(pp)的正弦波，它与输入正弦波的频率相同。请注意，随着 V_{GS} 上的输入电压的增大（向零变化），输出电压会减小。随着输入电压的减小（变得越来越负），输出电压则增大。这意味着输出信号与输入信号的相位相差 180° 。

- 38** 请用下列公式计算问题 34~问题 37 所讨论的放大器的交流电压增益。

$$A_v = \frac{-V_{out}}{V_{in}}$$

公式中的负号表示输出信号与输入信号的相位相差 180° 。

问题

请计算问题 34~问题 37 所讨论的放大器的交流电源增益。

答案

$$A_v = \frac{-7V}{0.5V} = -14$$

- 39** 请用下列公式计算交流电压增益。

$$A_v = -g_m R_D$$

在该公式中， g_m 是 JFET 的跨导 (transconductance)，它是 JFET 的属性之一，也称为前向传输导纳 (forward transfer admittance)。JFET 制造商提供的数据手册中通常会给出典型的 g_m 值。还可以根据问题 37 表中的数据利用下面的公式计算出 g_m 。

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$$

在该公式中， Δ 表示 V_{GS} 的变化以及对应的漏极电流的波动。跨导的单位是姆欧 (mhos, 即 mA/V)。

问题

- A. 根据问题 37 表中的数据，本放大器所用 JFET 的 g_m 值是多少?
 B. 对应的交流电压增益是多少?

答案

A. $g_m = \frac{1.5mA}{0.5V} = 0.003$ 姆欧

B. $A_v = -0.003 \times 4670 = -14$ ，与问题 38 所得结果相同。

- 40** 设计一个基于 JFET 的共源极放大器，其中 JFET 的 $I_{DSS}=14.8mA$ ， $V_{GS(\text{off})}=-3.2V$ 。输

入信号为 40mV(pp)，漏极电压为 24V。

问题

- 请确定能使 JFET 偏置到传输曲线中点附近的 V_{GS} 。
- 当 V_{GS} 取步骤 A 算得的电压，请用问题 32 中的公式计算漏极电流。
- 请选择 V_{DS} 的值，并用问题 33 的公式计算 R_D 的值。
- 请根据输入信号计算出 V_{GS} 的最大值和最小值，并用问题 34 中的步骤计算出对应的漏极电流。
- 请根据问题 35 和问题 36 所用的步骤计算输入信号对应的最大和最小 V_{out} 。
- 请计算放大器的增益。

答案

A. $V_{GS} = -1.6V$

B. $I_D = 3.7mA$

C. 当 $V_{DS} = 10V$ 时，

$$R_D = \frac{14V}{3.7mA} = 3780\Omega$$

D. V_{GS} 将从 $-1.58V$ 变化至 $-1.62V$ 。请用问题 32 中的公式计算漏极电流。 I_D 将从 $3.79mA$ 变化至 $3.61mA$ 。

E. V_{RD} 将从 $14.3V$ 变化至 $13.6V$ 。因此， V_{out} 将从 $9.7V$ 变化至 $10.4V$ 。

F. $A_v = \frac{-0.7}{0.04} = -17.5$

41 请用问题 40 的 D 小题的结果，解答下列问题。

问题

请用问题 39 所讨论的公式计算 JFET 的跨导和交流电压增益。

答案

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}} = \frac{0.18mA}{40mA} = 0.0045 \text{ 姆欧}$$

$$A_v = -g_m R_D = -0.0045 \times 3780 = -17$$

这与问题 40 的 F 小题的结果非常接近。

42 图 8-28 所示的 JFET 放大电路只采用一个电源，而不像问题 34~问题 41 中的那样，漏极和门极分别使用单独的电源。

由于门极通过 R_G 接地，所以其直流电压为 0 伏。于是， R_S 上的压降即为门-源电压。为了

设计该电路，必须求出 R_S 和 R_D 的值。本问题使用与问题 34~问题 41 所讨论的放大器相同的偏置点，其中， $V_{GS} = -2V$, $I_D = 3mA$ 。请按照下列步骤进行。

(1) 请用下列公式计算 R_S ，注意到 $V_{RS} = V_{GS}$ 。

$$R_S = \frac{V_{RS}}{I_D} = \frac{V_{GS}}{I_D}$$

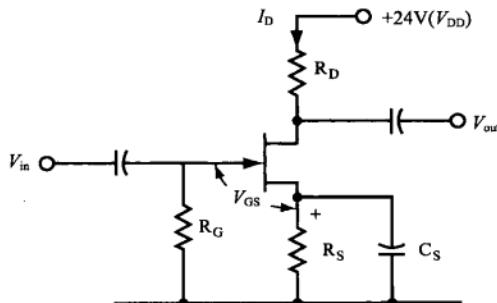


图 8-28

(2) 请用下列公式计算 R_D ，其中 $V_{DS}=10V$ ，其他值与问题 34~问题 41 所讨论的放大器使用的值相同。

$$R_D = \frac{V_{DD} - V_{DS} - V_s}{I_D}$$

(3) 请用下列公式计算 X_{CS} ：

$$X_{CS} = \frac{R_S}{10}$$

然后用下列公式计算 C_S ：

$$X_{CS} = \frac{1}{2\pi f C_S}$$

(4) 请用问题 34~问题 36 所示步骤计算峰峰值输出电压。

(5) 请用下列公式计算交流电压增益：

$$A_v = \frac{-V_{out}}{V_{in}}$$

注意 请选择 C_S ，使得它的电抗在需要放大频段的最低频率处不足 R_S 的 10%。JFET 的直流负载是 R_D 和 R_S 。交流负载则仅有 R_D ，这是因为 C_S 旁路了交流信号使之不经过 R_S ，而 R_S 则仅用于保证直流工作点的稳定性。使用 C_S 后会使增益略微减小，因为现在要用更小的 R_D 来计算输出的交流电压的摆幅。

问题

A. R_S 有多大？

- B. R_D 有多大?
- C. C_S 有多大? 假设 $f=1\text{kHz}$ 。
- D. 计算 V_{out} 的峰峰值, 其中 $V_{in}=0.5\text{V(pp)}$ 。
- E. 电压增益有多大?

答案

A. $R_s = \frac{2\text{V}}{3\text{mA}} = 667 \Omega$

B. $R_D = \frac{12\text{V}}{3\text{mA}} = 4\text{k}\Omega$

C. $X_{CS} = 66.7\Omega, C_S = 2.4\mu\text{F}$

D. 和问题37中一样, 交流漏极电流将从 3.8mA 变化至 2.3mA 。因为 R_D 是 $4\text{k}\Omega$, 所以现在 R_D 上的电压是 6V(pp) 。输出电压也是 6V(pp) 。

E. $A_v = \frac{-6}{0.5} = -12$, 增益是12。

8.7 运算放大器

43 如今使用的运算放大器(简称运放)实际上是一种集成电路。也就是说,这种器件能在一块非常小的硅片上制造出大量的晶体管和其他元件。集成运放比与它功能相同的由分立元件构成的放大器要小得多,并且也更加实用。

可以购买到的运放有多种封装。有些是TO金属封装,有些是扁平封装,还有些是DIP封装。有些单片集成电路中还集成有2个或者4个运放。

小尺寸、低价格和广泛的应用领域促使如今运放非常普通,甚至于它们自己就能构成一个电路,即使是普通运放也可能包含有20个甚至更多的晶体管。运放的特性与理想放大器非常接近。下面就是它们的部分特性:

- 高输入阻抗(不需要很大的输入电流);
- 高增益(可用于放大小信号);
- 低输出阻抗(不受负载的影响)。

问题

- A. 使用运放有哪些优点?
- B. 为什么运放制造商要使用集成电路技术?

答案

A. 小尺寸、低成本、应用范围广、高输入阻抗、高增益以及低输出阻抗。

B. 由于一个运放需要大量的晶体管和元件,所以必须使用集成电路技术将它们制造在一

个小硅片上。

44 图 8-29 所示为运放的原理图符号。

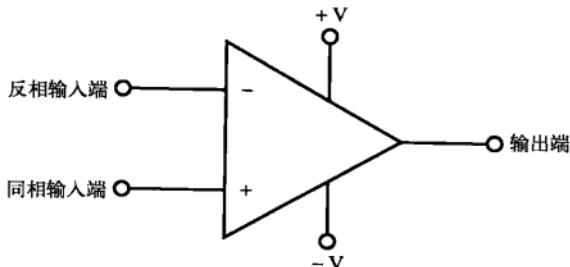


图 8-29

在反相输入端上输入信号，就会在输出端得到一个与输入信号相位相差 180° 的信号。在同相输入端上输入信号，就会在输出端得到一个与输入端同相位的信号。使用运放时，同时需要正负电源，并且运放的数据手册中会给出电压的大小。数据手册中通常还包含有电路图，告诉你如何在运放上连接外部元件以满足特殊的应用需要。这些电路图（展示出某个运放如何应用于各种应用中）对于设计者或者电子爱好者来说非常有用。

问题

- A. 运放需要几个端口，它们的功能分别是什么？
- B. 当输入信号接在反相输入端时，输出与输入的相对关系是怎样的？

答案

- A. 共有5个——2个输入端、1个输出端和2个电源端口。
- B. 输出与输入的相位相差 180° 。

45 图 8-30 所示为基本的运放电路。输入信号与反相输入端（标有负号）相连。因此，输出信号与输入信号相差 180° 。

可以用下面的公式计算出电路的交流电压增益。

$$A_V = \frac{-R_F}{R_{in}}$$

电阻 R_F 被称为反馈电阻 (feedback resistor)，这是因为它构成了从输出端至输入端的反馈通道。很多运放电路都有反馈环路。因为运放的增益很大，即使两个输入端的电压差很小，运放也很容易饱和（在最大增益下工作）。反馈环路可以使运放在较小的增益下工作，从而允许更宽的输入电压。当设计电路时，可以选择适当的反馈电阻值以达到特定的电压增益。图中电容的作用是阻断直流电路。

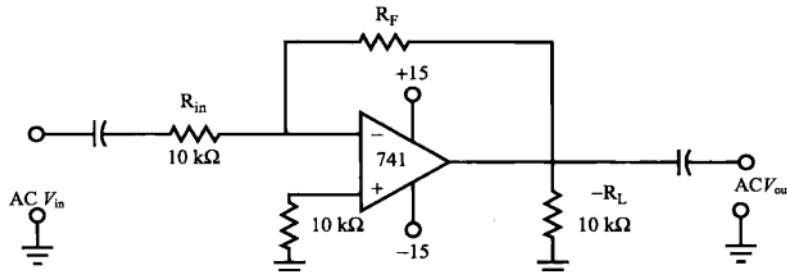


图 8-30

问题

- A. 计算 R_F 的值，使得放大器的交流电压增益为 120。
 B. 计算交流 V_{out} 。其中交流 V_{in} 为 5mV(rms)。

答案

A. $R_F = 120 \times 10\text{k}\Omega = 1.2\text{M}\Omega$

B. $V_{out} = 120 \times 5\text{mV} = 0.6\text{V(rms)}$

输出信号相对于输入信号是反相的。

- 46** 用图 8-30 所示的运放电路构建一个放大器。其中，输出电压为 12V(pp)，交流电压增益为 50，并且 $R_{in}=6.8\text{k}\Omega$ 。

问题

- A. 计算 R_F 的值。
 B. 计算产生前面指定的输出电压所需的 V_{in} 的值。

答案

A. $R_F = 50 \times 6.8\text{k}\Omega = 340\text{k}\Omega$

B. $V_{in} = \frac{12\text{V}_{pp}}{50} = 0.24\text{V(pp)} \text{ 或 } 0.168\text{V(rms)}$

8.8 小结

本章介绍了当前最常见的几种放大器：共射极 BJT 放大器、共源极 JFET 放大器以及运算放大器。本章最多也就只是触及到放大器领域的皮毛知识。事实上，还有很多各种各样的放大器。此外，这里学到的术语和设计方法只是为今后的学习打下基础。

通过本章的学习，你应该已经掌握了以下主要技能：

- 偏置点和增益确定后如何设计简单的放大器；
- 偏置点和增益确定后如何设计射极跟随器；
- 如何分析简单的放大电路。

8.9 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

(1) 图 8-1 所示放大电路有哪些主要问题？

(2) 该电路的增益公式是什么？

(3) 该电路的增益是大还是小？

请利用图 8-31 所示电路解答问题 4~问题 8。

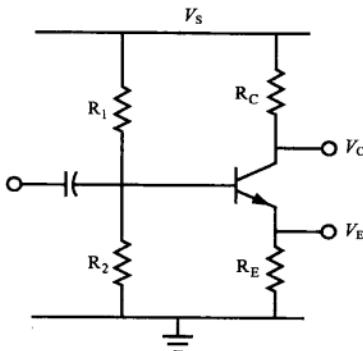


图 8-31

(4) 设计一个放大器，使得偏置点位于 5V，交流电压增益为 15。假设 $\beta = 75$ ， $R_{in} = 1.5k\Omega$ ， $V_S = 10V$ ，并且 $R_C = 2.4k\Omega$ 。在电路中增加 C_E ，并计算合适的值使得交流增益在 50Hz 处达到最大。增益的近似值是多少？

(5) 根据下列参数重复计算问题 (4)： $V_S = 28V$ ， $\beta = 80$ ， $R_{in} = 1k\Omega$ ，并且 $R_C = 10k\Omega$ 。偏置点电压为 14V，交流电压增益为 20。

(6) 根据下列参数重复计算问题 (4)： $V_S = 14V$ ， $\beta = 250$ ， $R_{in} = 1k\Omega$ ，并且 $R_C = 15k\Omega$ 。偏置点电压为 7V，交流电压增益为 50。

(7) 根据下列参数设计一个射极跟随器放大器： $V_S = 12V$ ， $R_E = 100\Omega$ ， $\beta = 35$ ， $V_E = 7V$ ， $R_C = 0\Omega$ 。

(8) 根据下列参数设计一个射极跟随器放大器： $V_S = 28V$ ， $R_E = 100\Omega$ ， $\beta = 35$ ， $V_E = 7V$ ， $R_C = 0\Omega$ 。在问题 9~问题 11 中，电阻和 β 值已知。请分析电路并求出偏置点及其增益。

(9) $R_1 = 16k\Omega$ ， $R_2 = 2.2k\Omega$ ， $R_E = 100\Omega$ ， $R_C = 1k\Omega$ ， $\beta = 100$ ， $V_S = 10V$

(10) $R_1 = 36k\Omega$ ， $R_2 = 3.3k\Omega$ ， $R_E = 110\Omega$ ， $R_C = 2.2k\Omega$ ， $\beta = 50$ ， $V_S = 12V$

(11) $R_1 = 2.2k\Omega$ ， $R_2 = 90k\Omega$ ， $R_E = 20\Omega$ ， $R_C = 300k\Omega$ ， $\beta = 30$ ， $V_S = 50V$

(12) 用问题 (4) 和问题 (5) 的电路构成两级放大器。当电路中两个晶体管都配有射极旁路电

容时放大电路的增益是多少？当电路中两个晶体管都没有旁路电容时，增益又是多少？

(13) 请用图 8-27 所示电路设计一个 JFET 放大器。JFET 的特性为： $I_{DSS}=20\text{mA}$, $V_{GS(\text{off})}=-4.2\text{V}$ 。期望的 V_{DS} 为 14V。请求出 R_D 。

(14) 如果问题(13)所用的 JFET 的跨导是 0.0048 姆欧，那么电压增益是多少？

(15) 如果问题(13)和问题(14)的 JFET 期望的输出电压为 8V(pp)，那么输入应该是多少？

(16) 请用图 8-28 所示电路设计一个 JFET 放大器。JFET 的特性为： $I_{DSS}=16\text{mA}$, $V_{GS(\text{off})}=-2.8\text{V}$ 。已知 V_{DS} 为 10V。请求出 R_S 、 C_S 和 R_D 。

(17) 如果问题(16)的 JFET 的输入电压为 20mV(pp)，那么交流输出电压是多少，增益又是多少？

(18) 对于图 8-30 所示运放电路，如果输入是 50mV，反馈电阻为 750kΩ，那么输出电压是多少？

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同，请先复习圆括号内注明的问题，然后再继续学习下一章。

| | | |
|---------|---|-------------|
| (1) | 偏置点不稳定，因此其增益会随温度变化而变化。此外，无法保证增益达到期望值 | (问题10) |
| (2) | $A_V = \beta \times \frac{R_C}{R_{in}}$ | (问题10) |
| (3) | 增益通常都很大 | (问题10) |
| (4)~(6) | 都是合适的值。你的结果应该与之接近 | |
| (4) | $R_1 = 29\text{k}\Omega$, $R_2 = 3.82\text{k}\Omega$, $R_E = 160\Omega$, $C_E = 200\mu\text{F}$, $A_V = 120$ | (问题17~问题22) |
| (5) | $R_1 = 138\text{k}\Omega$, $R_2 = 8\text{k}\Omega$, $R_E = 500\Omega$, $C_E = 64\mu\text{F}$, $A_V = 800$ | (问题17~问题22) |
| (6) | $R_1 = 640\text{k}\Omega$, $R_2 = 45\text{k}\Omega$, $R_E = 300\Omega$, $C_E = 107\mu\text{F}$, $A_V = 750$ | (问题17~问题22) |
| (7) | $R_1 = 8\text{k}\Omega$, $R_2 = 11.2\text{k}\Omega$ | (问题27) |
| (8) | $R_1 = 922\Omega$, $R_2 = 385\Omega$ | (问题27) |
| (9) | $V_C = 5\text{V}$, $A_V = 10$ | (问题28~问题30) |
| (10) | $V_C = 6\text{V}$, $A_V = 20$ | (问题28~问题30) |
| (11) | $V_C = 30\text{V}$, $A_V = 15$ | (问题28~问题30) |
| (12) | 当使用电容时， $A_V = 120 \times 800 = 96000$ 当不使用电容时， $A_V = 15 \times 20 = 300$ | (问题17~问题22) |
| (13) | 当 $V_{GS} = -2.1\text{V}$ 时， $I_D = 5\text{mA}$, $R_D = 2\text{k}\Omega$ | (问题31~问题33) |

(续)

| | | |
|------|--|--------|
| (14) | $A_v = -9.6\text{mV(pp)}$ | (问题39) |
| (15) | $V_{in}=83\text{mV(pp)}$ | (问题38) |
| (16) | 当 $V_{GS} = -1.4\text{V}$ 时, $I_D=4\text{mA}$ $R_S=350\Omega$ $C_S=4.5\mu\text{F}$ (假设 $f=1\text{kHz}$) $R_D=3.15\text{k}\Omega$ | (问题42) |
| (17) | V_{GS} 从 -1.39V 变化到 -1.41V , I_D 从 4.06mA 变化到 3.94mA , V_{out} 为 400mV(pp) , | (问题42) |
| | $A_v = \frac{-400}{20} = -20$ | |
| (18) | $A_v=-75$, $V_{out}=3.75\text{V}$ | (问题45) |



振 荡 器

本章将介绍振荡器。振荡器（oscillator）是一种能产生连续输出信号的电路。振荡器被广泛应用于电子设备中，它能产生各种不同的输出信号，如正弦波、方波或者三角波等。

如果振荡器的输出信号是固定频率的正弦波，那么该电路就被称为正弦波振荡器（sine wave oscillator）。广播和电视信号就是在空中传播的正弦波，而来自墙壁插座的 120V 交流电也是正弦波，电子技术中使用很多的测试信号也是正弦波。

本章将介绍 3 种正弦波振荡器。它们都是基于第 7 章介绍过的 LC 谐振电路来设定正弦波的频率的。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 认识振荡器的主要元件；
- 区分正/负反馈；
- 指定能导致电路发生振荡的反馈类型；
- 至少用两种方法为振荡器电路引入反馈；
- 理解 LC 谐振电路是如何设定振荡器的频率的；
- 设计一个简单的振荡器电路。

9.1 认识振荡器

1 振荡器可以分为 3 部分：(1) 放大器；(2) 反馈连接；(3) 设定频率的元件。

根据第 7 章问题 35（参见图 7-32）的介绍，在基本振荡器电路中，放大器代替了开关。

问题

画一个振荡器电路，并标出各部件。请用单独的一张纸完成绘图。

答案

参见图 9-1。

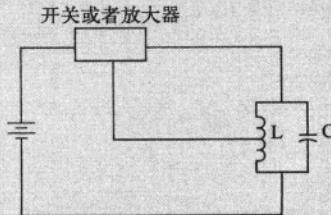


图 9-1

2 如果放大器的输出端与输入端相连，那么就构成了反馈。如果反馈相对于输入是反相的，如图 9-2 所示，那么反馈就是负极性（negative）的。

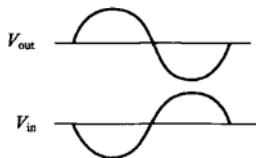


图 9-2

如图 9-3 所示电路，当集电极的信号经过反馈电阻被反馈至晶体管的基极时，反馈信号就相对于输入信号是反相的。因此该反馈是负极性的。

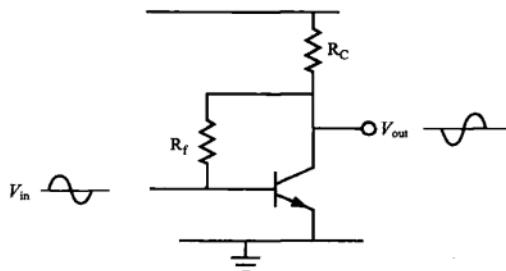


图 9-3

负反馈可以通过以下方法使放大器稳定工作：

- 防止直流偏置点和放大器的增益受温度影响而改变；
- 减小放大器的失真，进而改善音质。

问题

- A. 为什么高质量音频放大器中采用反馈信号？
- B. 它包含哪种反馈？

答案

- A. 为了减小失真。
- B. 负反馈。

3 如果输出端的反馈信号与输入端的信号同相位（如图 9-4 所示），那么电路的反馈就是正极性的（positive）。



图 9-4

在图 9-5 所示电路中，第二级晶体管的集电极与第一级晶体管的基极相连。由于第二级晶体管集电极的输出信号与第一级晶体管基极的信号同相，所以该电路构成正反馈。

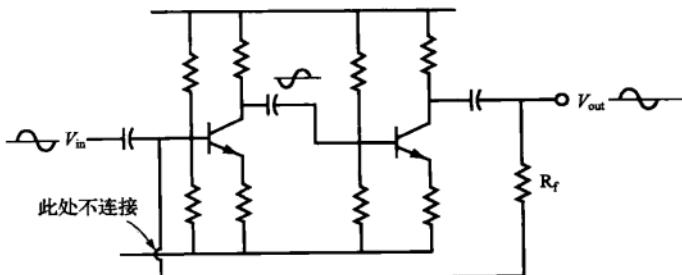


图 9-5

即使没有外部输入，正反馈也可以引起放大器振荡。

问题

- 为了稳定放大器，应该使用哪种类型的反馈？
- 振荡器中使用了那种类型的反馈？
- 为了产生反馈，应该将放大器的哪些部分连接起来？

答案

- A. 负反馈 B. 正反馈 C. 将放大器的输出与输入相连

4 图 9-6 所示放大器与第 8 章的问题 11~问题 18 所讨论的放大器属于同一类型。它们被称为共射极放大器 (common emitter amplifier)。

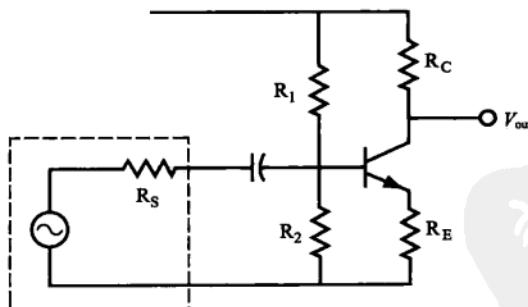


图 9-6

问题

- 负反馈对该放大器有何影响？
- 正反馈对该放大器有何影响？

答案

- A. 使之稳定，减小增益，减小失真。 B. 使电路发生振荡。

5 在图 9-6 所示的电路中，输入信号被施加到将被放大的基极。

问题

- A. 放大器电压增益的基本公式是什么？
 B. 图 9-6 所示放大器电路的电压增益公式是什么？

答案

$$A_v = \beta \times \frac{R_L}{R_m} \quad B. \quad A_v = \frac{R_L}{R_E} = \frac{R_C}{R_E}$$

(和第8章问题12中的讨论相同)

6 在图 9-7 所示电路中，输入信号被施加到晶体管的射极而非基极。该电路被称为共基极放大器 (common base amplifier)。

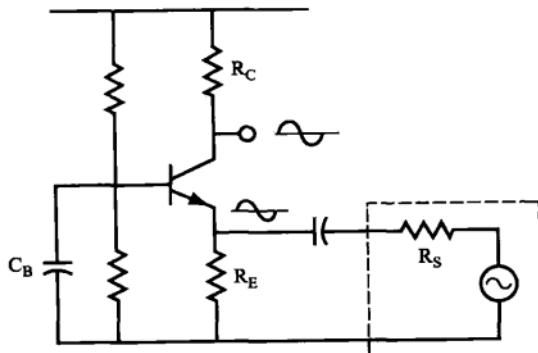


图 9-7

注意 如果在发射极施加信号，就会改变基-射极二极管上的压降，就好比在基极上施加了输入信号一样。因此，施加到射极的信号也会改变基极电流和集电极电流，就好像在基极施加了该信号一样。

这种放大器的电压增益公式可以简化，因为当信号反馈到射极时，输入阻抗非常低，以至于可以将其断开。因此共基极放大器的电压增益公式为

$$A_v = \frac{R_L}{R_S}$$

R_s 可以是输出电阻，也可以是电源或者发电机的输出阻抗。它通常被称作电源的内部阻抗 (internal impedance)。

问题

图 9-7 所示电路的电压增益公式是什么？

答案

$$A_v = \frac{R_L}{R_s} = \frac{R_C}{R'_s} \quad (R_C \text{是电路中的负载})$$

7 请注意，图 9-7 中的输入和输出正弦波是同相位的。尽管信号被放大了，但是并未被反相。

问题

- A. 如果将输入信号施加在发射极而非基极，那么输入信号会使放大器发生什么变化？
- B. 共基极放大器的输入阻抗比共射极放大器的大还是小？
- C. 共基极放大器的增益公式是什么？

答案

- A. 放大，但不反相
- B. 小
- C. $A_v = \frac{R_L}{R_s} = \frac{R_C}{R_s}$

8 图 9-8 所示的放大器电路中，晶体管的集电极到地之间接有并联的电感和电容。并联的电感和电容有时也被称为调谐（或者谐振）负载。

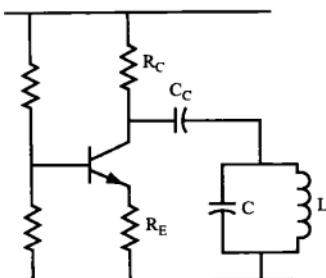


图 9-8

在该电路中，电感的直流电阻非常小，这使得集电极的直流电压接近 0V。因此，可以增加一个电容 C_C 使交流信号能通过 LC 电路，并且防止集电极的直流电压被拉至 0V。

问题

- A. 该用什么名词来描述本电路中的负载?
 B. 该电路是否包含振荡器所需的 3 个要素?

答案

- A. 谐振或者调谐 B. 没有, 漏掉了反馈连接

注意 图 9-8 所示电路的发射极或者基极都没有输入信号。通过给并联 LC 电路增加反馈连接, 就能为发射极或者基极提供一个输入信号, 这将在本章的后面介绍。

- 9** 请写出下列电路的电压增益公式。如果需要, 请参考问题 4~问题 6 的电路和电压增益公式。

问题

- A. 共射极电路_____ B. 共基极电路_____

答案

$$\text{A. } A_V = \frac{R_C}{R_E} \quad \text{B. } A_V = \frac{R_C}{R_S}$$

- 10** 共射极电路和共基极电路都能构成振荡器, 无论是哪种, 通常都要增加一个电容。

在共射极放大器中, 可以在射极和地之间增加一个电容 C_E , 就和第 8 章问题 19 和问题 20 中讨论的一样。

在共基极电路中, 可以在基极和地之间增加一个电容 C_B , 如图 9-7 所示。

问题

这两种情况有哪些共同的影响?

答案

放大器的增益会增大。

将增益增大到你认为“足够大”的点, 以使放大器可以用作振荡器。当共射极或者共基极放大器使用这些电容后, 通常不必计算出放大器的增益。

- 11** 根据第 7 章问题 6~问题 12 的讨论可知, LC 电路都有谐振频率。当振荡器中包含 LC 电路时, 振荡器的输出信号就应该是 LC 电路的谐振频率。

问题

振荡（或者谐振）频率的计算公式是什么？

答案

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

事实上，实际测量的频率和计算的频率并不完全一样。这是因为电容和电感值并不准确，并且电路中其他寄生电容也会影响振荡频率。当需要设定成精确的频率时，就需要使用调整电容或者调整电感。

I2 图 9-9 所示的并联 LC 电路接在集电极与电源电压之间，而不是接在集电极与地之间（如图 9-8 所示）。

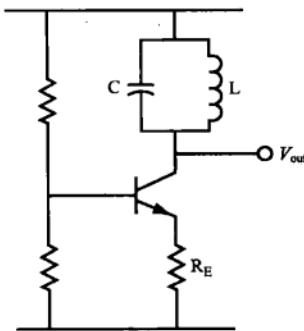


图 9-9

利用该电路和图 9-8 所示电路就能有选择地放大某个频率的信号而不放大其他频率的信号。

问题

- A. 该频率的期望值是多少？
- B. 请写出电路在谐振频率处的阻抗公式。
- C. 该频率处的交流电压增益是多少？

答案

A. 谐振频率

$$B. Z = \frac{L}{C \times r}$$

其中， r 是线圈的直流电阻。

$$C. A_v = \frac{Z}{R_E}$$

13 由于线圈的直流电阻很小，所示集电极上的直流电压通常非常接近于电源电压 V_s 。此外，直流输出电压的正峰值可以超过电源电压。当有大幅度交流输出时，正峰值可以达到 $2V_s$ ，如图 9-10 所示。

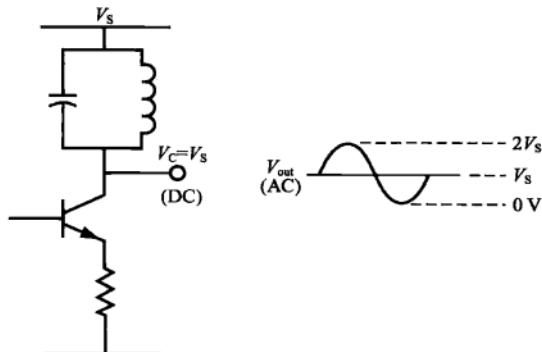


图 9-10

问题

请指出下列哪个是对图 9-10 所示电路的正确描述。

- A. 振荡器
- B. 调谐放大器
- C. 共基极电路
- D. 共射极电路

答案

B

9.2 反馈

14 为了将放大器转变成振荡器，必须将一部分输出信号接到输入端。反馈信号必须与输入信号同相才能引起振荡。

图 9-11 给出了 3 种从并联 LC 电路中提取反馈信号的方法。每一种都以其发明人的名字命名。

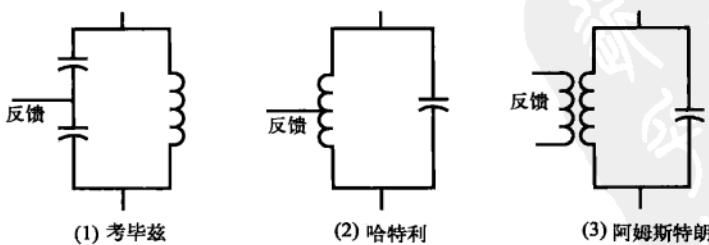


图 9-11

在考毕兹 (Colpitts) 方法中将构成分压器的两个电容之间的电压作为反馈信号。在哈特利 (Hartley) 方法中，则将线圈中间抽头的对地电压作为反馈信号。因此，感性分压器决定了反馈电压。阿姆斯特朗 (Armstrong) 方法则用降压变压器（一个比主线圈匝数少的电感）提取反馈电压。这 3 种方法大约提取了输出信号的 $1/10 \sim 1/2$ 作为反馈。

问题

- A. 考毕兹振荡器的反馈从何处提取？
- B. 哪种振荡器从线圈上的抽头提取反馈电压？
- C. 哪种振荡器未使用分压器？

答案

- A. 容性分压器 B. 哈特利 C. 阿姆斯特朗

15 在图 9-12 所示电路中，并联 LC 电路的一端作为输出电压，而另一端则与地相接。反馈电压 V_f 就是两个串联电容之间的电压。

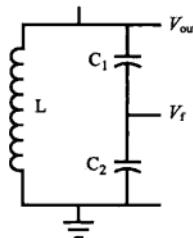


图 9-12

问题

请利用分压公式求解 V_f 。

答案

$$V_f = \frac{V_{out} X_{C2}}{X_{C1} + X_{C2}}$$

可变为

$$V_f = \frac{V_{out} C_1}{C_1 + C_2}$$

16 为了求出该电路的谐振频率，首先要求出两个串联电容的总等效电容 C_T 。然后将 C_T 代入谐振频率计算公式即可。

问题

- A. C_T 的计算公式是什么?
 B. 考毕兹振荡器的谐振频率的计算公式是什么?

答案

A. $C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

B. 如果 Q 大于等于 10, $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}}$

注意 如果 Q 小于 10, 那么可以利用下面两个公式之一来计算并联 LC 电路的谐振频率。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}} \quad \text{或者} \quad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{Q^2}{1+Q^2}}$$

17 图 9-13 所示的并联 LC 电路中, 反馈电压取自线圈的一个抽头, 该抽头到线圈的一端有 N_1 匝, 到另一端有 N_2 匝。

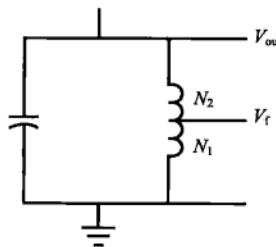


图 9-13

可以用分压公式, 由线圈各部分的匝数计算出反馈电压。

$$V_f = V_{out} \times \frac{N_1}{N_1 + N_2}$$

线圈的制造商会给出 N_1 和 N_2 。

问题

- A. 这种反馈方法是谁发明的?
 B. 用 V_f 除以 V_{out} , 结果是多少?

答案

- A. 哈特利 B. 在 1/10 到 1/2 之间

18 图 9-14 所示的并联 LC 电路中，反馈电压取自变压器的次级线圈。计算次级线圈电压的计算公式请参阅第 10 章的问题 6。

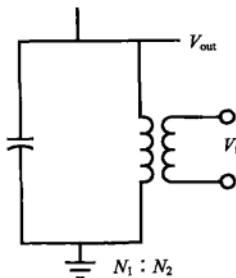


图 9-14

问题

这种振荡器是谁发明的？

答案

阿姆斯特朗

19 最后几个问题中介绍的反馈方法中，从输出端反馈至输入端的电压都只是总输出电压的一部分，大小在 V_{out} 的 1/10 到 1/2 之间。

为了确保振荡，反馈电压与放大器的电压增益之积必须大于 1，即

$$A_V \times V_f > 1$$

由于 A_V 远大于 1，因此这一点通常很容易满足。

振荡器没有外部输入。其输入是反馈而来的输出信号的一小部分。如果该反馈的相位和幅值合适，那么振荡器就能自动起振，并且一直持续到电路断电为止。

晶体管放大器要放大反馈信号才能维持振荡，并将来自电池或者电源的直流电信号转化为振荡的交流电信号。

问题

- A.** 如何才能将放大器变成振荡器？
- B.** 放大器需要什么样的输入才能变成振荡器？

答案

- A.** 一个能反馈正确相位和大小的谐振LC电路。
- B.** 不需要。如果反馈正确，振荡器就能起振。

9.3 考毕兹振荡器

20 图 9-15 所示为考毕兹振荡器电路，这是最简单的 LC 振荡器。

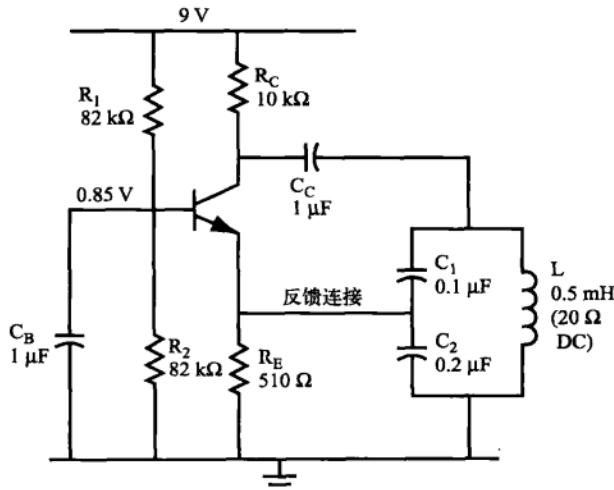


图 9-15

反馈信号取自容性分压器，并反馈至发射极。反馈通路能向发射极提供所需相位的反馈信号并构成正反馈。

在该电路中，电容 C_B 对交流信号的电抗非常低，因此交流信号都流过电容 C_B 而不是 R_2 。电容 C_E 的电抗 X_{CB} 在振荡频率处小于 160Ω 。如果 R_2 小于 $1.6k\Omega$ ，那么请选择适当的电容值，使得 X_{CB} 小于 R_2 的 $1/10$ 。

问题

对于图 9-15 所示电路，请估计 C_B 有多大？假设 f_t 等于 1kHz ， X_C 等于 160Ω 。

答案

$$X_{CB} = 160\Omega = \frac{1}{2\pi f C_B} = \frac{1}{2 \times \pi \times 10^3 \times C_B}$$

因此， $C_B = 1\mu\text{F}$ ， C_B 可取更大值。

21 请利用图 9-15 所示的考毕兹振荡器的参数值，解答下列问题。

问题

A. 调谐电路中两个串联电容的等效总电容是多少？

B. 振荡频率是多少？

C. 调谐电路在该频率处的阻抗是多少?

D. 反馈电压占输出电压的几成?

E. C_B 在振荡频率处的电抗是多少?

答案

A. $C_T = 0.067\mu F$

B. 由于 Q 未知, 应使用包含有线圈电阻的公式 (参见问题 16):

$$f_r = 26.75 \text{ kHz}$$

如果使用计算出来的 f_r 值计算 Q (就像第 8 章的问题 20 那样), 那么就会得到 $Q=4.2$ 。因此, 最好使用包含线圈电阻的公式来计算 f_r 。

C. 根据公式得

$$Z_T = \frac{L}{rC}, \quad Z_T = 373\Omega$$

D. 根据带有电容值的分压器公式得

$$V_f = V_{out} \cdot \frac{C_1}{C_1 + C_2} = \frac{V_{out}}{3}$$

E. X_{CB} 大约是 6Ω , 这是个非常理想的值 (比 R_2 的 8200Ω 小得多)。

22 图 9-16 所示的考毕兹振荡器电路采用不同的方法, 在并联 LC 电路和晶体管之间构成反馈连接。

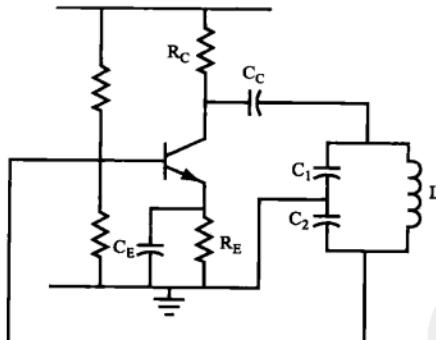


图 9-16

问题

请列出该电路与图 9-15 所示的电路的区别。

答案

反馈信号接在晶体管的基极而非发射极，而容性分压器的中点与地相接。此外还增加了电容 C_E 。（该连接为基极提供相位合适的反馈信号从而构成正反馈。）

- 23** 在图 9-16 所示电路中，电容 C_E 在振荡频率处的电抗小于 160Ω 。如果射极电阻 R_E 的值小于 $1.6k\Omega$ ，那么 C_E 在振荡频率处的电抗也要小于 $R_E/10$ 。

问题

如果在 1kHz 振荡器中使用 510Ω 的射极电阻，那么应该用多大的电容 C_E ？

答案

$$\text{由 } X_C = \frac{510}{10} = \frac{1}{2\pi f C_E} = \frac{0.16}{10^3 \times C_E}$$

得 $C_E = 3.2\mu\text{F}$ 。所以，应使用大于 $3\mu\text{F}$ 的电容。

- 24** 图 9-17 所示的考毕兹振荡器用并联 LC 电路连接集电极与电源电压。和图 9-15、图 9-16 的电路一样，该电路也能为晶体管（这里是反馈至晶体管的发射极）提供相位合适的反馈信号并构成正反馈。

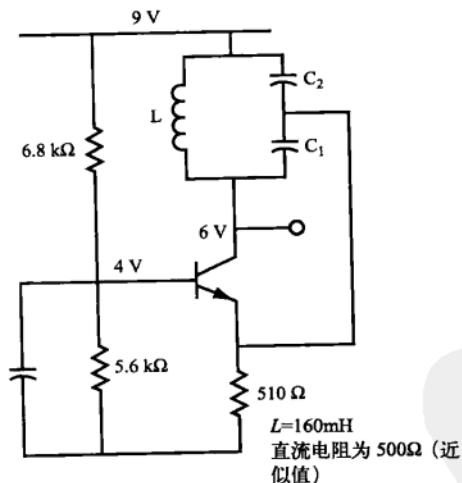


图 9-17

下表给出了图 9-17 所示电路可用的 C_1 和 C_2 值。

| C_1 | C_2 | C_1 | f_0 |
|-------------------|------------------|-------|-------|
| $0.01\mu\text{F}$ | $0.1\mu\text{F}$ | | |

(续)

| C_1 | C_2 | C_T | f_r |
|--------|-------|-------|-------|
| 0.01μF | 0.2μF | | |
| 0.01μF | 0.3μF | | |
| 0.1μF | 1μF | | |
| 0.2μF | 1μF | | |

问题

- A. 计算上表中各行的 C_T 和 f_r 值。
- B. 保持 C_1 不变而增大 C_2 会使谐振频率增大还是减小？
- C. 增大 C_1 对谐振频率有何影响？
- D. 什么条件才能达到最高谐振频率？
- E. 如果 C_1 固定为 0.01μF，而 C_2 在 0.005μF 至 0.5μF 之间变化，那么最高谐振频率是多少？

答案

- A. 下表给出 C_T 和 f_r 的值。

| C_1 | C_2 | C_T | f_r |
|--------|-------|----------|---------|
| 0.01μF | 0.1μF | 0.009μF | 4.19kHz |
| 0.01μF | 0.2μF | 0.0095μF | 4.08kHz |
| 0.01μF | 0.3μF | 0.0097μF | 4.04kHz |
| 0.1μF | 1μF | 0.09μF | 1.33kHz |
| 0.2μF | 1μF | 0.167μF | 0.97kHz |

- B. 增大 C_2 会降低谐振频率，因此，也会降低振荡的频率。
- C. 增加 C_1 也会降低谐振频率和振荡器的输出频率。
- D. 当 C_T 达到最低值时。
- E. 当 C_2 为 0.005μF、 C_T 为最小值 0.0033μF 时，频率达到最大值 6.9kHz。而最低频率出现在 C_2 为最大值 0.5μF 时。

可选实验

如果有示波器，就可以搭建图 9-17 所示的振荡器，看看测得的频率值与计算值是否相符。如果相差在 20% 以内，那么答案就是满意的。很多情况下，波形都可能失真。

9.4 哈特利振荡器

25 图 9-18 所示为哈特利振荡器电路。在这种电路中，反馈取自线圈的一个抽头。

电容 C_L 可以防止发射极的直流电压经线圈被下拉至 0V。 C_L 在振荡频率处的电抗应小于 $R_E/10$ 即 160Ω 。

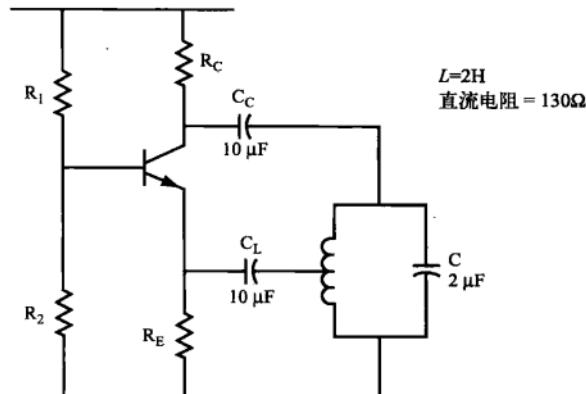


图 9-18

问题

请完成下列计算。

- A. 谐振频率是多大?
- B. 负载的近似阻抗是多少?
- C. 要想计算线圈压降中反馈至射极的比例, 还需要哪些信息?

答案

- A. 80Hz (近似值)
- B. 7.7k Ω (近似值)
- C. 线圈的匝数和抽头的位置。

图 9-19 所示的哈特利振荡器中, 并联 LC 电路连接在集电极和电源之间。与图 9-18 所示电路一样, 本电路也从线圈的抽头中提取相位正确的反馈信号送至晶体管的发射极, 从而构成正反馈。

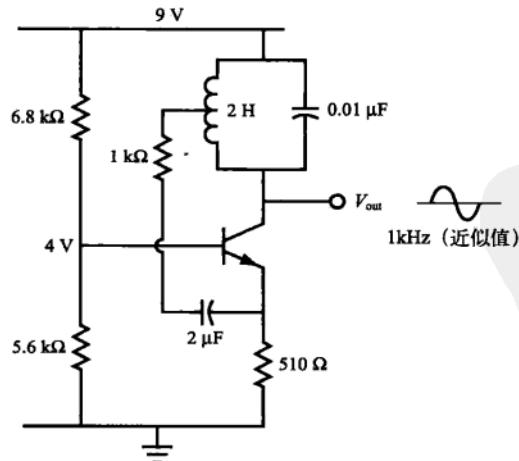


图 9-19

对于考毕兹振荡器来说，很容易选择两个电容实现期望的频率和期望的反馈电压。如果电路不振荡，只要简单地改变电容就能使之振荡，然后微调电容的大小达到期望的频率。

由于哈特利振荡器采用带抽头的线圈，要想得到不同的反馈电压就比较困难。而反馈比例无法改变，因为几乎无法增加或者改变线圈的抽头。

9.5 阿姆斯特朗振荡器

图 9-20 所示的阿姆斯特朗振荡器则更难设计和搭建。

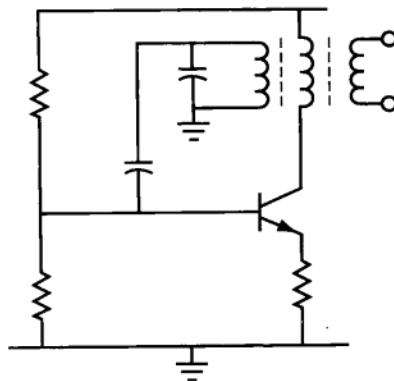


图 9-20

这里，振荡受到线圈上的外部绕线的影响比其他因素都大。

由于变压器和线圈种类繁多，所以几乎不可能给出设计阿姆斯特朗振荡器的简单步骤。而制造商提供的线圈所需匝数则能保证振荡器在最常用的频率下（无线电高频）正常工作。

由于实际困难，下面就不进一步介绍阿姆斯特朗振荡器及其变型了。

9.6 实用的振荡器设计

26 本节将简要介绍振荡器的实际问题，并给出简单的设计步骤。

在开始之前，请先通过回答下列问题来回顾本章的要点。

问题

- A. 振荡器需要有哪 3 个要素才能工作？
- B. 振荡器输出信号的频率由什么决定？
- C. 谁来提供反馈？
- D. 我们已经介绍了多少种为振荡器提供反馈的方法？
- E. 搭建好电路后，还需要什么条件才能启动振荡？



答案

- A. 放大器、LC谐振电路（或者其他能决定频率的元件）以及反馈。
- B. 输出信号的频率与谐振频率的相同。
- C. 谐振电路上的分压器
- D. 3种——考毕兹法、哈特利法和阿姆斯特朗法。
- E. 不需要其他条件——如果电路的参数合适，振荡器会自己起振。

搭建振荡器的主要实际问题是线圈的选择。对于大批量生产，制造商可以指定并购买所需的特定性能的线圈。但是在实验室或者工作间中，你本只打算搭建一个简单的电路，因此通常很难或者不可能找到电路设计时所需精确值的电感。通常是使用手头最方便使用的线圈，然后设计电路中的其他部分。这将面临3个问题。

- 你可能不知道电感的准确值。
- 电感值可能不是产生期望频率范围的最佳值。
- 线圈可能有也可能没有抽头点或者其他绕组，并且这可能导致改变电路设计。比如，如果没有抽头，那么就无法搭建哈特利振荡器。

由于考毕兹振荡器是实际中最容易的振荡器，并且能轻易地克服很多实际困难，所以接下来将集中研究这种振荡器。

在搭建考毕兹振荡器时，使用的线圈必须能达到你期望的频率范围。比如，电视机调谐部分的线圈并不适合用作1kHz的音频振荡器，因为电感值超出了低频音频电路的最佳范围。

9.6.1 简单的振荡器设计过程

27 接下来是简单的按步骤设计考毕兹振荡器的过程。考毕兹振荡器可以工作于很宽的频率范围内。（哈特利振荡器则可以按照与此非常类似的过程设计出来。）

按照下列步骤，就能搭建出在大多数情况下都能工作的振荡器。为了保证设计出的振荡器一定能工作，可以按照一定的步骤来做，但是过程要复杂得多。

如果你并不打算搭建振荡器，则可以使用这里提供的假设值，并根据计算结果绘出电路图。请按照以下步骤进行。

(1) 选择振荡器输出信号的频率。

(2) 选择合适的线圈。这一步对实际差异的影响最大。有些线圈值并不存在，因此只能选择与之最接近的。幸好可用的电感值的范围很宽，可以通过改变电容的值来获得期望的谐振频率。

(3) 如果已知电感的值，就可以利用下列公式计算出电容值。

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

请用计算出的电容值作为下一步的 C_1 。

(4) 如果不知道电感值，可选择任意值并记为 C_1 。这样得到的频率可能与期望值不同。但是，目前的主要目标还是使电路振荡。你可以稍后再调整它。

(5) 选择电容 C_2 为 C_1 的 3~10 倍。图 9-21 所示的两个电容和线圈接成了并联电路，其中两个电容构成分压器。

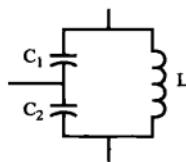


图 9-21

此时，请暂停一下并做一些假设。假设需要的振荡频率为 10kHz，并且有一个电感为 16mH 的线圈。

问题

- A. 所需的 C_1 的近似值是多少？
- B. 所需的 C_2 值是多少？

答案

- A. $C_1 = 0.016\mu\text{F}$ B. C_2 值的范围为 $0.048\mu\text{F} \sim 0.16\mu\text{F}$

28 下面，请继续按照下列步骤进行设计。

(6) 设计一个共射极增益约为 20 倍的放大器。将集电极直流电压设置为电源电压的一半。这里的要点是记住集电极电阻 R_C 应该是 LC 电路在谐振频率处阻抗的 1/10 左右。这一点通常难以做到，特别是当不知道线圈的电感值时。为此，通常可以做假设，因此 R_C 可以任意取值。

(7) 装配出如图 9-15 所示的电路。

(8) 请计算 C_C 的值。确认 X_C 在期望的频率处是否为 160Ω 。这又是一个“经验值”，并且可以用数学方法来验证它。请用下列公式：

$$C_C = \frac{1}{2\pi f_r X_C}$$

问题

请将目前已知的数据代入公式计算出 C_C 。

答案

$$C_C = \frac{1}{2\pi \times 10\text{kHz} \times 160\Omega} = 0.1\mu\text{F}$$

29 下面，请完成最后一步。

(9) 请计算 C_B 的值。再次选取适当的 C_B 值，使得 X_C 在期望的频率处为 160Ω 。

问题

C_B 值是多少？

答案

$$C_B = 0.1\mu\text{F}$$

30 完成设计过程。

(10) 给电路加电，并查看示波器的输出信号。如果输出信号在振荡，那么就请查看频率。如果信号的频率与期望频率相差较大，那么就更换 C_1 直至得到期望的频率。更换 C_2 使得电容比保持与第(5)步讨论时的相等。 C_2 会影响输出信号的大小。

(11) 如果输出信号不振荡，请进行 9.7 节给出的步骤。

9.6.2 可选实验

一旦振荡器开始工作，如果希望更进一步，可以将电路改为把反馈信号连在基极而非射极，参见图 9-16。为了构建该振荡器，需要计算 C_E 。并假设 X_C 在期望频率处为 160Ω 。

9.7 振荡器故障分析检查表

如果振荡器不工作，最常见的故障原因是反馈连接有问题。通过少量尝试（下面的检查表中的第(2)~(6)步会给出）就能解决。当不知道线圈究竟有多少抽头或者圈数时该方法特别有效。但是，如果出现问题，最好还是按照下列步骤进行检查。

- (1) 确保 C_B 、 C_C 和 C_E 足够大，它们的电抗都应大于 160Ω 。请确保 C_E 小于 R_E 的 $1/10$ 。
- (2) 检查 C_1/C_2 之比。应该在 3:1 至 10:1 之间。
- (3) 交换 C_1 和 C_2 。可能把它们接到了 LC 电路的错误一端。
- (4) 检查反馈连接来自并且去往正确的地方。
- (5) 检查 LC 电路的两端，确保它们接在正确的位置。
- (6) 检查集电极、基极和发射极的直流电压。
- (7) 检查 LC 电路的电容值。如果必要，试试其他值，直到电路起振。
- (8) 如果前面几步都无法使电路起振，请检查元件是否损坏，线圈是否开路或者短路，电容是否短路，晶体管是否损坏或者 β 太小。请仔细检查电路的连线。

在大多数情况下，完成上述的一步或者几步就能使电路振荡了。

即便是振荡器开始工作了，它还可能有一两个错误，如下所示。

- 输出波形失真——当 C_B 、 C_C 或者 C_E 太小，或者输出的振幅太大时就可能发生。
- 输出电压太小——当发生这种情况时，正弦波通常非常“干净”并且“纯正”。在考毕兹振荡器中，改变 C_1 和 C_2 的比例通常有助于提高输出信号的振幅。如果还不行，则可

以像第8章问题21讨论的那样，再用一个晶体管在振荡器之后构成放大器。

31 下面，请完成设计示例。使用电感为4mH的线圈，并按照问题27~问题30所介绍的各步骤设计并构建输出频率为25kHz的振荡器。

问题

- (1) 已知 f_r 为25kHz。
- (2) 已知 L 为4mH。
- (3) 请用公式计算 C_1 。
- (4) 可能不需要这一步。
- (5) 选择 C_2 。
- (6) 根据第8章所示的过程设计放大器。
- (7) 电路如图9-22所示。
- (8) 求解 C_C 。
- (9) 求解 C_B 。

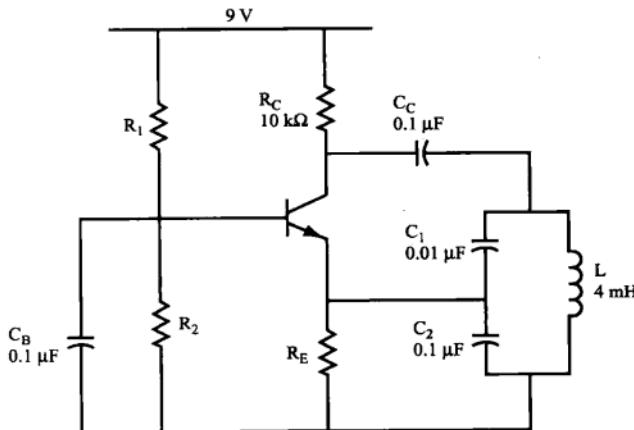


图 9-22

答案

$$C_1 = 0.01 \mu\text{F}$$

$$C_C = 0.047 \mu\text{F} \text{ (取 } 0.1 \mu\text{F)}$$

$$C_2 = 0.1 \mu\text{F}$$

$$C_B = 0.047 \mu\text{F} \text{ (取 } 0.1 \mu\text{F)}$$

步骤(10)~步骤(11)用来确定振荡器能工作。如果搭建了该电路，请进行步骤(10)~步骤(11)。如果没有搭建实际电路则不必进行。

32 图9-22给出了问题31中设计的电路。

测量本振荡器的输出信号，确保信号频率非常接近25kHz。

问题

请求出 LC 电路谐振时的阻抗。请注意 r (电感的直流电阻) 为 12Ω 。

答案

$$Z = \frac{L}{C \times r} = \frac{4 \times 10^{-3}}{0.01 \times 10^{-6} \times 12} = 33k\Omega \text{ (近似值)}$$

请注意计算结果大约是 R_C 的 3 倍，而不是问题 28 步骤(6)中建议的 10 倍。

33 如果愿意，可以完成第二个振荡器设计示例。请利用电感值为 $500\mu\text{H}$ 的线圈设计出输出信号频率为 250kHz 的振荡器。

问题

- (1) $f_r = 250\text{kHz}$
- (2) $L = 500\mu\text{H} = 0.5\text{mH}$
- (3) 求解 C_1 。
- (4) 不需要这一步。
- (5) 求解 C_2 。
- (6) 使用与上一个例题相同的放大器。
- (7) 电路如图 9-23 所示。
- (8) 求解 C_C 。
- (9) 求解 C_B 。

答案

$C_1 = 0.0008\mu\text{F}$ ；因此，可以选择 $0.001\mu\text{F}$ 的标准电容。

$C_2 = 0.0047\mu\text{F}$ ，这是标准值。

$C_B = C_C = 0.004\mu\text{F}$ (最小值)

34 问题 33 所设计的电路如图 9-23 所示。

请测量该振荡器的输出信号，确保信号频率为 250kHz 。

问题

请求出 LC 电路在谐振点的阻抗。请注意 r (电感的直流电阻) 为 20Ω 。

答案

$$Z = 30k\Omega$$

这大约是 R_C 的 3 倍，而不是问题 28 步骤(6)中建议的 10 倍。

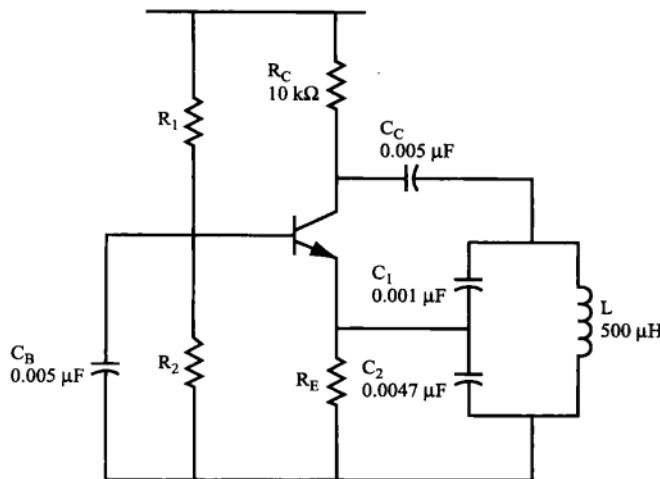


图 9-23

35 图 9-24 给出了几种其他的振荡电路。请计算每个电路的输出频率，如果愿意，可以搭建尽可能多的电路。请检查振荡器输出信号频率的测量值与计算值。

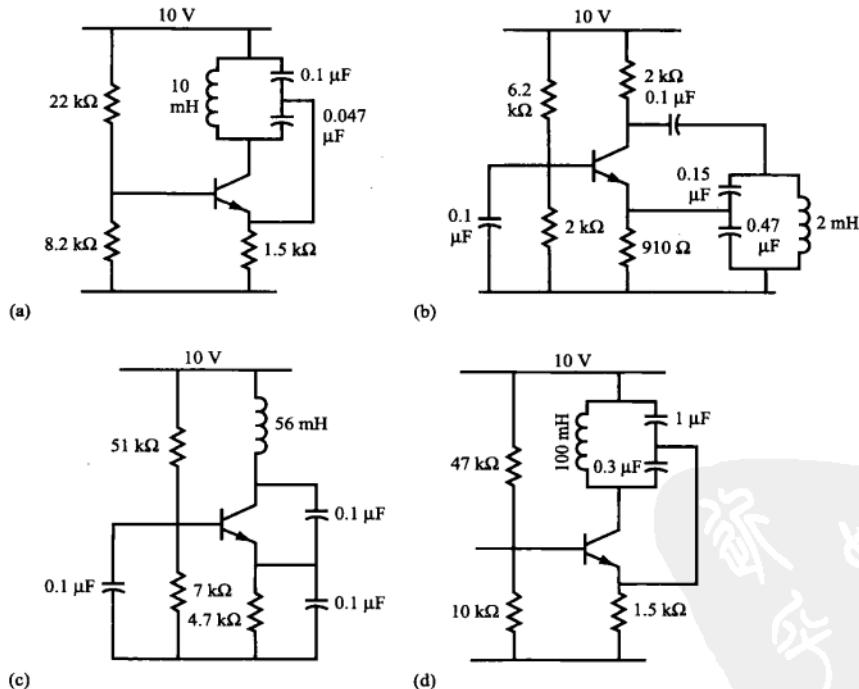


图 9-24

问题

各电路的输出频率是多少?

A. $f = \underline{\hspace{2cm}}$ B. $f = \underline{\hspace{2cm}}$ C. $f = \underline{\hspace{2cm}}$ D. $f = \underline{\hspace{2cm}}$

答案

A. 8.8kHz B. 10kHz C. 3kHz D. 1kHz

9.8 小结与应用

本章中，我们讨论了与振荡器有关的下列问题：

- 构成振荡器的主要要素；
- 如何区分正反馈和负反馈；
- 能引起电路振荡的反馈类型；
- 振荡器电路中获得反馈的两种方法；
- LC 谐振电路是如何设定振荡器频率的。

此外，还练习了设计一个简单的振荡器电路，以巩固对振荡器元件及其运行原理的理解。

9.9 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

- (1) 振荡器必备的 3 部分是什么？
- (2) 正反馈和负反馈的区别是什么？
- (3) 振荡器需要哪种反馈？
- (4) 振荡器频率的计算公式是什么？
- (5) 请绘出考毕兹振荡器。
- (6) 请绘出哈特利振荡器。
- (7) 请绘出阿姆斯特朗振荡器。

(8) 问题 27~问题 30 给出了设计振荡器的过程。问题 35 的电路与该过程的要求符合程度怎么样？换句话说，请检查 V_f 、 A_v 、 C_1/C_2 比、 R_C/Z 比以及频率。

A. $\underline{\hspace{2cm}}$ B. $\underline{\hspace{2cm}}$ C. $\underline{\hspace{2cm}}$ D. $\underline{\hspace{2cm}}$

(9) 对于图 9-23 所示电路，请计算振荡器中 C_1 、 C_2 、 C_C 和 C_B 的值，其中振荡频率为 10kHz，线圈的电感为 100mH。

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同，请先复习圆括号内注明的问题，然后再继续学习下

一章。

| | | |
|--------|---|-------------|
| (1) | 放大器、反馈和谐振负载 | (问题1) |
| (2) | 正反馈与输入“同相” 负反馈与输入“反相” | (问题2~问题3) |
| (3) | 正反馈 | (问题3) |
| (4) | $f_t = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ | (问题11) |
| (5) | 参见图9-15 | (问题20) |
| (6) | 参见图9-18 | (问题25) |
| (7) | 参见图9-20 | (问题25) |
| (8) A. | $V_f = \frac{0.047}{0.147}$ A_v 无法计算 $C_1/C_2 = 0.047/0.1 = 0.47$ 由于 r 未知，所以 Z 无法计算 $f_t = 8.8\text{kHz}$ (近似值) | (问题27~问题30) |
| B. | $V_f = \frac{0.15}{0.62}$ $A_v = 2.2$ (近似值) $C_1/C_2 = 1/3$ (近似值) Z 无法计算 $f_t = 10\text{kHz}$ (近似值) | |
| C. | $V_f = \frac{0.1}{0.2}$ A_v 无法计算 $C_1/C_2 = 1$ Z 无法计算 $f_t = 3\text{kHz}$ | |
| D. | $V_f = \frac{0.3}{1}$ A_v 无法计算 $C_1/C_2 = 0.3$ Z 无法计算 $f_t = 1\text{kHz}$ (近似值) | |
| (9) | $C_1 = 0.0033\mu\text{F}$, $C_2 = 0.01\mu\text{F}$, $C_B = C_C = 0.1\mu\text{F}$ | (问题26~问题30) |

变 压 器

变压器 (transformer) 常用于将某个交流电压“变换”为更低或者更高的交流电压。对手机充电时，就会用变压器将墙上插座里的市电 120V 交流电压降低为 5V 或者手机电池所需的充电电压。事实上，大多数从墙上插座取电的电子设备都会用变压器将来自插座的高压电降低为设备内部电子元件所需的低压电。

此外，还可以用变压器来提高电压。比如，有些制造集成电路的设备需要数千伏电压才能工作。用变压器就能将电力公司提供的 240V 电压提高到这些设备所需的电压。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 识别电路中的变压器；
- 解释并正确地应用匝比 (turns ratio) 和阻抗匹配 (impedance matching) 的概念；
- 识别两种变压器；
- 对涉及变压器的问题进行简单计算。

10.1 变压器基础

1 如图 10-1 所示，有两个位置非常接近的线圈。如果对第一个线圈（也称为初级线圈）施加一个交流电压，那么流过线圈的交流电就会在线圈周围产生波动的磁场。随着该磁场的强度和极性的变化，它会使第二线圈（也称为次级线圈）产生感应电流以及相应的交流电压。次级线圈中的交流感应信号与初级线圈上施加的交流信号的频率相等。



图 10-1

变压器的这两个线圈通常缠绕在磁性材料（如铁或者铁氧体）制成的铁芯上，以便增大磁场的强度。

问题

- A. 当这两个线圈缠绕在同一个铁芯时，它们之间是否在电气上是相通的？
- B. 什么设备包含有缠绕在同一个铁制或者铁氧体材料制成的骨架上两个线圈？
- C. 如果在初级线圈两端施加一个交流电压，那么次级线圈上会出现什么情况？

答案

- A. 不是 B. 变压器
C. 次级线圈上会感生出交流电，从而在次级线圈两端产生交流电压。

2 变压器只能处理交流信号。为了在次级线圈中产生电流，就需要变化的磁场（比如由流过初级线圈的交流电流产生的磁场）。流过初级线圈的直流电只能产生静止的磁场，并不会在次级线圈中感生出任何电流或电压。

当初级线圈上施加有正弦信号时，就能在次级线圈上观察出相同频率的正弦信号，参见图 10-2。

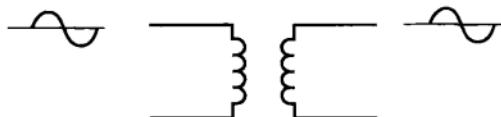


图 10-2

问题

- A. 施加在初级线圈上的信号与次级线圈上感生出的信号的频率有何不同?
B. 如果在初级线圈上施加 10V 直流信号，那么次级线圈上电压差是多大？

答案

- A. 没有差别。两个信号的频率相等。
B. 电压为零。当初级线圈上施加直流电压时，次级线圈上不会感生出电压或电流。可以将此情况总结为直流信号无法通过变压器。

3 比较次级线圈两端测得的输出波形和初级线圈两端测得的输出波形。如果输入为正时输出也为正（参见图 10-3），那么就称为同相（in phase）。

图 10-3 中线圈上的圆点表示每个线圈的同相端。如果某个线圈是相反的，那么其输出电压就与输入电压相位相反。此时称输出与输入反相（out of phase），并且圆点位于线圈的相反端。

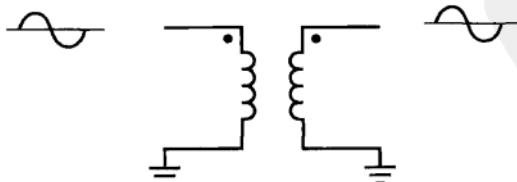


图 10-3

问题

在图 10-4 中，输出的正弦波与输入的正弦波反相。请在次级线圈上的正确位置画上圆点，以表示这种反相关系。

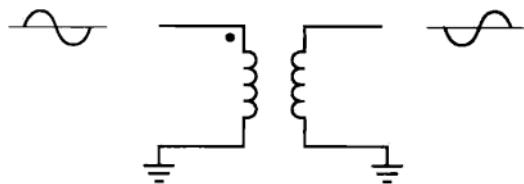


图 10-4

答案

圆点位于右边的线圈的下端。

- 4** 图 10-5 右侧所示的变压器有 3 个端口。位于线圈中部的第 3 个端口也称为中间抽头 (center tap)。

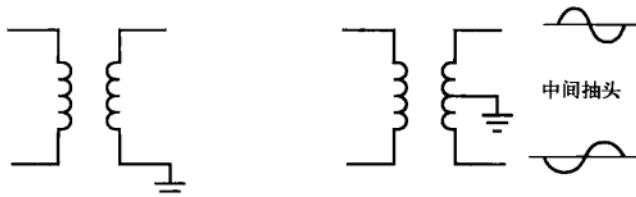


图 10-5

问题

图 10-5 右侧的变压器的两个输出波形有何不同？

答案

这两个波形的相位相差 180° 。即当某时刻上面的输出波形达到正的最大值时，下面的输出则达到负的最大值。

- 5** 在变压器中，次级线圈的输出电压与次级线圈的匝数成正比。如果增加次级线圈的绕线匝数，那么就能感生出更高的电压。如果减小次级线圈的绕线匝数，那么次级线圈上的感生电压就会降低。

问题

增大次级线圈的匝数对次级线圈上的输出电压有何影响？

答案

会增大次级线圈上的电压。

- 6** 图 10-6 所示的初级和次级线圈的匝数分别为 N_p 和 N_s 。

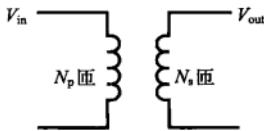


图 10-6

问题

输入电压和输出电压之比等于初级线圈的匝数与次级线圈的匝数之比。请用简单的公式表示该关系。

答案

$$\frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} = \frac{N_p}{N_s}$$

注意 初级线圈与次级线圈的匝数比称为匝比 (turns ratio, TR)。

$$TR = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}}$$

- 7** 请利用问题 6 得出的公式解答下列问题。

问题

如果在匝比为 2 (2 : 1) 的变压器的初级线圈上施加 10V(pp)的正弦波，请计算该变压器的输出电压。

答案

$$\frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} = \frac{N_p}{N_s} = TR$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \frac{N_s}{N_p} = V_{\text{in}} \times \frac{1}{TR}$$

$$V_{\text{out}} = V_{\text{in}} \times \frac{1}{TR} = 10 \times \frac{1}{2} = 5 \text{V(pp)}$$

8 请根据所给的输入电压和变压器的匝比，解答下列问题。

问题

请计算下列各题的 V_{out} 。

- A. $V_{\text{in}} = 20\text{V(pp)}$, 匝比 = 5 : 1。
- B. $V_{\text{in}} = 1\text{V(pp)}$, 匝比 = 1 : 10。
- C. $V_{\text{in}} = 100\text{V(rms)}$ 。请求出当变压器的初级线圈与次级线圈匝数相等时的 V_{out} 。

答案

- A. 4V(pp) (称为降压变压器)
- B. 10V(pp) (称为升压变压器)
- C. 100V(rms) (称为隔离变压器，在电气上分隔或隔离电压源和负载)

9 几乎所有从 120V 交流市电取电的电子设备都要用变压器将 120V 交流电压转换成更合适、更低的电压。图 10-7 所示的变压器能将 120V 交流电压降低为 28V 交流电压。

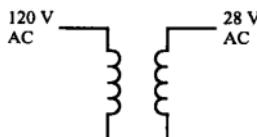


图 10-7

问题

请计算该变压器的匝比。

答案

$$TR = \frac{N_p}{N_s} = \frac{120}{28} = 4.3 : 1$$

10 图 10-8 所示的示波器波形取自 28V 的次级线圈。

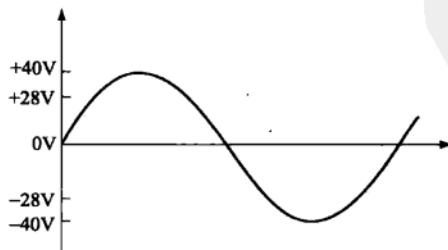


图 10-8

问题

- A. 28V 是峰峰值还是有效值?
 B. 施加在次级线圈的 28V 的峰峰值是多少?

答案

- A. 有效值 B. $2 \times 1.414 \times 28 = 79.184\text{V}$

II 和变压器的 28V 输出一样，墙上插座的市电 120V 也是有效值。

问题

市电电压的峰峰值是多少?

答案

大约 340V。

I2 变压器次级线圈上实测电压的大小取决于测量的时机和位置。图 10-9 所示为在带有中间抽头的 20V(pp) 次级线圈上，采用不同方式测量到的电压。

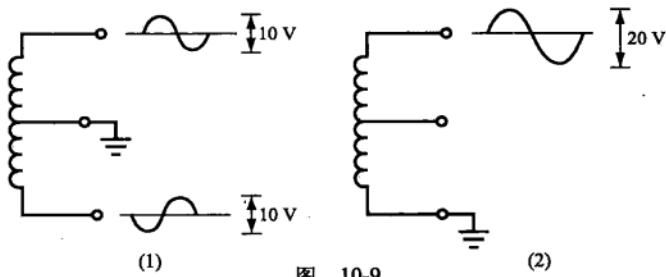


图 10-9

如果中间接头像图 10-9(1)所示那样接地，那么每个输出端对地的电压等于 10V(pp) AC。通过比较图(1)中两个端口处的波形可以看出，它们是反相的(相位相差 180°)。如果像图 10-9(2)所示那样，将底部的端口接地，且不使用中间抽头，那么顶部端口对地的电压为 20V(pp)。

问题

- A. 假设带中间抽头的次级线圈相对中间抽头的标称电压为 28V(rms)。当中间抽头接地时，输出电压的有效值是多少?
 B. 假设整个次级线圈上的总输出电压为 28V(rms)。线圈两个端口相对中间抽头的输出电压分别是多少?
 C. 假设带中间抽头的次级线圈上每个端口相对中间抽头的输出电压为 15V(rms)。当中间抽头未接时，输出电压的峰峰值是多少?

答案

- A. 线圈每个端口对中间抽头的电压为28V(rms)
 B. 14V(rms)（等于总 V_{out} 的一半）
 C. 当中间抽头未接时，输出电压为30V(rms)。因此， $V_{\text{pp}} = 2 \times 1.414 \times 30 = 84.84\text{V}$

13 当磁场在次级线圈上感生出交流信号时，会有一些功率损耗。变压器的输出功率与输入功率之比称为变压器的效率（efficiency）。为了便于讨论，可以假设变压器的效率为 100%。因此次级线圈的输出功率就等于初级线圈的输入功率。

输入功率 = 输出功率，即 $P_{\text{in}} = P_{\text{out}}$

然而， $P = VI$ 。因此，下列关系成立：

$$V_{\text{in}}I_{\text{in}} = V_{\text{out}}I_{\text{out}}$$

还可以将上面的公式改写为以下形式：

$$\frac{I_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{out}}} = TR$$

问题

- A. 如果输入功率为 12W，输入电压为 120V(rms)，那么变压器的输入电流是多少？
 B. 如果变压器的匝比为 5 : 1，那么它的输出电压是多少？
 C. 输出电流是多少？
 D. 输出功率是多少？

答案

注意 在计算交流功率时，必须使用电压和电流的有效值。

- A. $I_{\text{in}} = \frac{P_{\text{in}}}{V_{\text{in}}} = \frac{12}{120} = 0.1\text{A(rms)}$
 B. $V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}}}{TR} = \frac{120}{5} = 24\text{V(rms)}$
 C. $I_{\text{out}} = I_{\text{in}} \times TR = 0.1 \times 5 = 0.5\text{A(rms)}$
 D. $P_{\text{out}} = V_{\text{out}}I_{\text{out}} = 24 \times 0.5 = 12\text{W}$ （与输入功率相等）

10.2 通信电路中的变压器

14 在通信电路中，输入信号通常来自于很长的互联导线上，该导线被称为线路（line），其阻抗通常为 600Ω 。

问题

通信设备在设备的输出阻抗与负载阻抗相等时工作得最好。通信设备的输出阻抗应该取多大呢？

答案

当连接有 600Ω 的线路时，输出阻抗应为 600Ω 。

15 由于大多数电子设备的输出阻抗都不到 600Ω ，所以该设备通常需要通过变压器才能连接到线路。为方便起见，通常将变压器集成在电子设备内部。该变压器能使设备与线路相匹配，具体参见图 10-10。

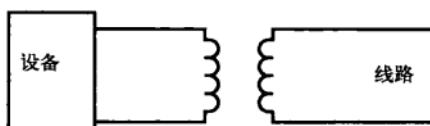


图 10-10

为了正常工作，变压器次级线圈的输出阻抗应为 600Ω ，以便与线路相匹配。变压器的输出阻抗（在次级线圈上测得）由两个因素决定。其中一个是设备的输出阻抗。

问题

另一个决定因素是什么？

答案

变压器的匝比。（各线圈的直流电阻对此无影响，因此可以忽略它们。）

16 图 10-11 所示电流中，变压器的初级线圈与信号发生器相接，其中信号发生器的输出阻抗为 Z_G 。变压器的次级接负载，负载的阻抗为 Z_L 。

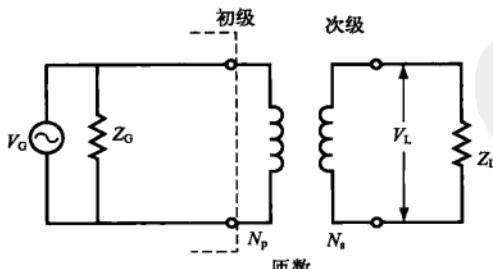


图 10-11

已知， $P_{in}=P_{out}$ 并且 $P=V^2/Z$ 。因此，可以写出由 V 和 Z 表示的信号源功率与负载功率相等

的公式。

$$\frac{V_G^2}{Z_G} = \frac{V_L^2}{Z_L}$$

还可以将上式改写为电压之比的形式，如下所示。

$$\frac{Z_G}{Z_L} = \left(\frac{V_G}{V_L} \right)^2$$

此外，由于 $V_G = V_{in}$, $V_L = V_{out}$, 并且 $V_{in}/V_{out} = N_p/N_s$, 所以下式成立。

$$\frac{Z_G}{Z_L} = \left(\frac{V_{in}}{V_{out}} \right)^2 = \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 = (TR)^2$$

因此，变压器的输入阻抗对输出阻抗之比等于匝比的平方。正如将在下面的问题 A 中看到的，可以确定用于匹配信号源和负载的变压器的匝比。这样，信号源就可以“认为”负载的阻抗与其自身的阻抗相等，同时负载也可以“认为”信号源的阻抗与其自身的阻抗相等。

在下列问题中，信号源的输出阻抗等于 $10\text{k}\Omega$ ，并且输出信号为 10V(pp) (3.53V(rms))。它将与 600Ω 的线路相接。

问题

- A. 为了使信号源与线路合适匹配，所需的匝比是多少？
- B. 请求出负载上的输出电压。
- C. 请求出负载电流和功率。

答案

A. $TR = \sqrt{\frac{Z_G}{Z_L}} = \sqrt{\frac{10000\Omega}{600\Omega}} = \frac{4.08}{1}$ 即 $4.08:1$

B. $V_L = \frac{V_G}{TR} = \frac{10}{4.08} = 2.45\text{V(pp)}$, 相当于 0.866V(rms)

C. $P_L = \frac{V_L^2}{Z_L} = \frac{3.53^2}{10000} = 1.25\text{mW}$

注意 在计算功率时，必须使用电压的有效值 (RMS)。

$$I_{in} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{1.25\text{mW}}{3.53\text{V(rms)}} = 0.354\text{mA(rms)}, \text{ 相当于 } 1\text{mA(pp)}$$

$$I_L = I_{in} \times TR = 0.354 \times 4.08 = 1.445\text{mA(rms)}, \text{ 相当于 } 4.08\text{mA(pp)}$$

$$P_L = \frac{V_L^2}{Z_L} = \frac{0.866^2}{600} = 1.25\text{mW}$$

这与输出功率相等。该电路如图10-12所示。

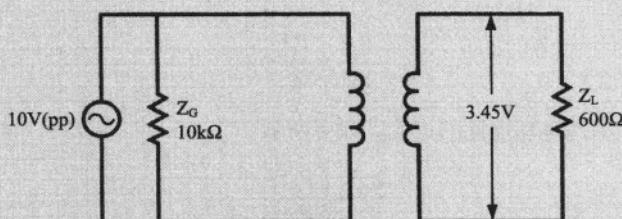


图 10-12

注意 对于信号源来说，如果朝负载看，看到的阻抗为 $10k\Omega$ ，而不是负载的实际阻抗 600Ω 。同样地，从负载朝信号源看，看到的阻抗则是 600Ω 。在此条件下可以在信号源与负载间实现最佳的传输功率。实际中，这里计算出的最佳条件几乎不存在。这是因为，不可能制造出匝比为 $4.08:1$ 的变压器，因此只能选择最接近的可用值，比如 $4:1$ 。匝比的差别将影响负载侧的传输条件，但是影响很微弱。

- 17 在本问题中，将看到变压器可以使信号源与负载匹配。

问题

- A. 为了使输出阻抗为 $2k\Omega$ 的信号源与 600Ω 的线路相匹配，所需的变压器匝比是多少？
B. 如果信号源产生 $1V(pp)$ 信号，那么负载上的电压是多少？

答案

- A. $TR = 1.83$
B. $V_L = 0.55V(pp)$

- 18 在本问题中，需要用变压器使信号源与 $2k\Omega$ 的负载相匹配。

问题

- A. 如果信号源的输出阻抗是 $5k\Omega$ ，那么需要多大的匝比才能使之与 $2k\Omega$ 的负载相匹配？
B. 如果负载所需的功率为 $20mW$ ，那么信号源所需的功率是多少？（首先，请求出负载上的电压。）
C. 变压器初级电流和次级电流分别是多少？信号源传入变压器初级的功率是多少？

答案

- A. $TR = 1.58$
B. $V_L = \sqrt{P_L \times Z_L} = \sqrt{20mW \times 2k\Omega} = 6.32V(rms)$ ；并且

$$V_G = V_L \times TR = 6.32V(\text{rms}) \times 1.58 = 10V(\text{rms})$$

C. $I_L = 3.16\text{mA(rms)}$, $I_p = 2\text{mA(rms)}$, $P_{in} = 20\text{mW}$

10.3 小结与应用

本章学习了下列有关变压器的问题：

- 交流信号感应到次级线圈的原理；
- 变压器次级线圈上的交流电压是如何根据不同匝比而升高或者下降的；
- 利用中间抽头可以从变压器上产生出各种电压；
- 利用变压器可以匹配信号源与负载之间的阻抗；
- 变压器可以使输出信号与输入信号反相。

10.4 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

- (1) 变压器是如何制成的？
- (2) 什么样的信号可以作为变压器的输入信号？
- (3) 如果在图 10-13 所示电路中的变压器上输入一个正弦信号，那么会得到怎样的输出信号？

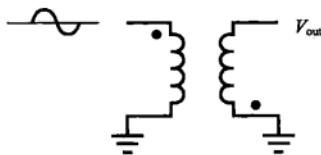


图 10-13

- (4) 术语匝比是什么意思？
- (5) 如果 $V_{in} = 1V(pp)$ 并且 $TR = 2$ ，那么输出电压是多少？
- (6) 如果 $V_{in} = 10V(pp)$ 并且 $V_{out} = 7V(pp)$ ，那么变压器的匝比是多少？
- (7) 在图 10-14 所示的带有中间抽头的变压器的次级线圈中，A 点至 B 点的电压可以表示为 $V_{A-B} = 28V(pp)$ 。请问 C 点至 A 点的电压是多少？

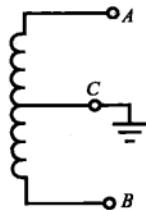


图 10-14

(8) 在图 10-14 所示的带有中间抽头的变压器的次级线圈中, B 点至 C 点的电压 $V_{B-C}=5V(pp)$ 。请问 A 点至 B 点的峰峰值电压是多少?

(9) 如果 $I_{in} = 0.5A(rms)$ 并且 $I_{out} = 2.0A(rms)$, 那么变压器的匝比是多少?

(10) 问题(9) 中的变压器是升压变压器还是降压变压器?

(11) 如果 $Z_L=600\Omega$ 并且 $Z_G=6k\Omega$, 请求出变压器的匝比。

(12) 如果 $Z_L=1k\Omega$ 并且匝比为 $10 : 1$, 那么信号源的(输出)阻抗是多少?

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同, 请先复习圆括号内注明的问题, 然后再继续学习下一章。

| | | |
|------|---|--------|
| (1) | 在同一个磁芯(比如铁或者铁氧体)上绕两个线圈即可 | (问题1) |
| (2) | 交流电压(直流不行) | (问题2) |
| (3) | 反相的正弦波 | (问题3) |
| (4) | 初级线圈的匝数与次级线圈的匝数之比 | (问题6) |
| (5) | $V_{out}=0.5V$ | (问题7) |
| (6) | $TR=1.43 : 1$ | (问题7) |
| (7) | $V_{C-A}=14V(pp)$ | (问题12) |
| (8) | $V_{A-B}=14.14V(pp)$ | (问题12) |
| (9) | $TR=4:1$ | (问题13) |
| (10) | 降压变压器。因为次级线圈的电压比初级线圈的低, 所以次级线圈中的电流比初级线圈中的高。这样才能保证变压器两边的功率相等 | (问题13) |
| (11) | $TR=3.2 : 1$ | (问题16) |
| (12) | $Z_G=100k\Omega$ | (问题16) |



电源电路

很多电子设备中都含有电源。电源电路从墙上插座里的 120V AC 取电后，将其转换为直流电，再为各种电子电路供电。

电源电路在原理上非常简单，而且本章将要介绍的电路都已经使用很多年了。由于电源电路包含本书涉及的很多知识要点，所以可以作为学习基本电子技术的绝佳总结。

二极管是电源电路中的重要元件。学习二极管如何作用于交流信号是理解很多电源工作原理的基础。因此，本章将从简单的交流电路中的二极管开始讨论。

请注意，本章的原理图始终都是为了说明二极管或者电源电路中的其他元件是如何作用于交流信号的。如果有示波器，那么就可以自己在面包板上搭建这些电路，并且观察这些波形。

学完本章后，你将具备以下能力：

- 说明二极管在交流电路中的功能；
- 掌握至少两种整流交流信号的方法；
- 画出整流器和平滑电路的输出波形；
- 计算电源电路的输出电压；
- 为电源电路确定合适的元件值。

11.1 交流电路中的二极管能产生脉动的直流信号

1 二极管的单向导电特性非常有用，因此它在交流电路中有多种用途。

问题

假设在图 11-1 所示电路的 A 点施加+20V DC。

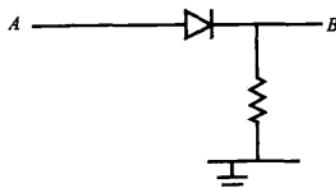


图 11-1

A. B 点的输出电压是多少？

B. 假设在 B 点施加+10V DC。那么 A 点电压是多少？

答案

- A. 20V DC (从现在起, 忽略二极管上的0.7V压降)
 B. 0V (二极管是反向偏置的)

2 图 11-2 是在图 11-1 所示电路中施加有直流分量为+20V DC、峰峰值为 20V 的交流信号时的情况。

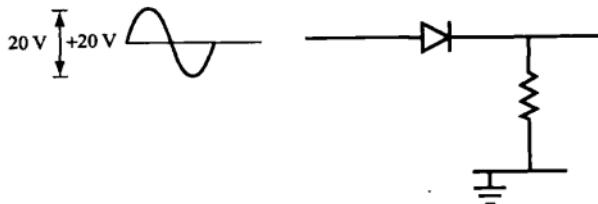


图 11-2

问题

- A. 输入信号的最大值和最小值分别是多少?
 B. 该电路的输出波形是怎样的?

答案

- A. 最大值为 $20V + 10V = 30V$
 最小值为 $20V - 10V = 10V$
 B. 二极管始终是正向偏置的, 因此它始终导通。所以, 输出波形与输入波形完全一致。

3 图 11-3 所示电路中施加有直流分量为 0V、峰峰值为 20V 的交流信号。

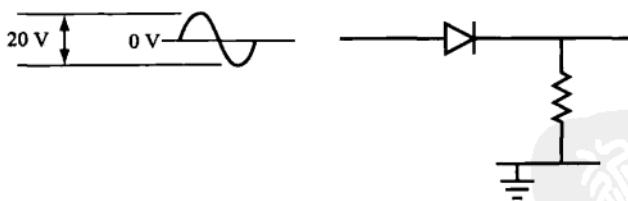


图 11-3

问题

- A. 输入信号的最大值和最小值分别是多少?
 B. 请在图 11-4 的空白区域画出该电路的输出波形。请记住, 只有输入波形的正半部分能够通过二极管。

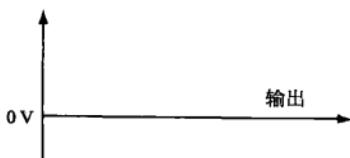


图 11-4

答案

- A. 最大值为+10V。最小值为-10V。
 B. 参见图11-5。

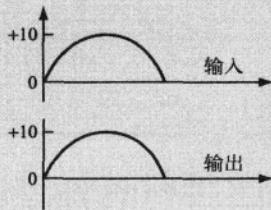


图 11-5

4 当输入信号为负时, 图 11-3 所示电路中的二极管将反向偏置。因此, 输出电压保持为 0V。

问题

图 11-6 所示为将施加在图 11-3 所示电路上的输入波形。请在空白纸上画出输出波形。

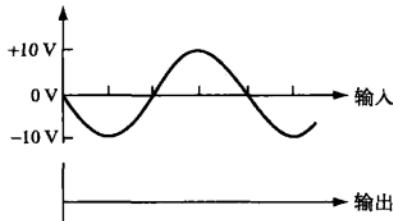


图 11-6

答案

参见图11-7。

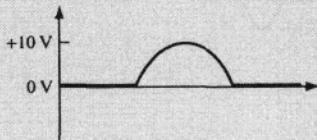


图 11-7

5 图11-7所示为图11-3所示电路中一个完整周期的输入波形产生的输出波形。

问题

下面,请画出在图11-6所示的输入波形条件下的3个完整周期的输出波形。请在另一张空白纸上画图。

答案

参见图11-8。

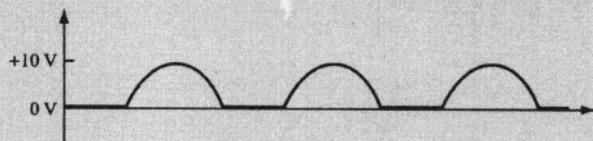


图 11-8

6 当二极管反向连接时,它将正偏,因此当输入信号为负时就能导通电流。在这种情况下,二极管在输入信号为正时反偏。因此,输出波形就与图11-8所示的输出波形反相。

问题

请在空白纸上画出3个输入信号周期的输出波形。假设二极管的连接方向与图11-3所示电路中的方向相反。

答案

参见图11-9。

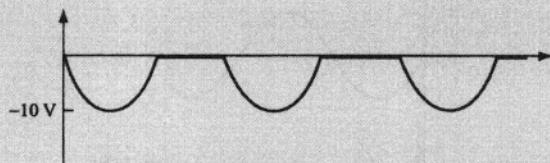


图 11-9

7 图11-10所示电路施加有20V(pp)的交流输入信号,且信号的中点位于-20V DC。

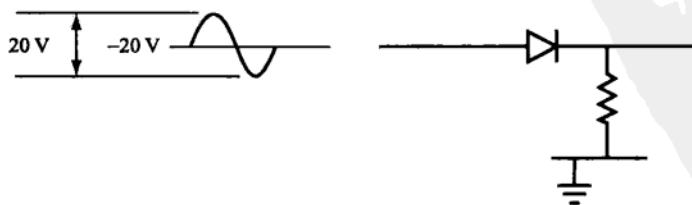


图 11-10

问题

- A. 二极管何时正偏?
B. 输出电压是多少?

答案

- A. 从不, 因为交流和直流信号的叠加电压的范围是 $-30V \sim -10V$ 。因此, 二极管始终处于反向偏置状态。
B. 固定值 $0V$ 。

8 正如你所看到的, 二极管既允许通过正极性交流电压波形, 也允许通过负极性交流电压波形, 这主要取决于如何将其接入电路的。因此, 交流输入信号将被转换成脉动的直流输出信号, 该过程被称作整流 (rectification)。能将交流电压的正极性或者负极性部分全部转换为脉冲直流电压信号的电路被称为半波整流器 (half-wave rectifier)。

问题

参照图 11-8 所示的输出波形。这些波形代表正极性电压脉冲, 还是负电压直流电压波形?

答案

图11-8所示波形代表正极性的直流电压脉冲。图11-9的波形代表负极性的直流电压脉冲。

9 图 11-11 所示电路显示了二极管与变压器次级相接的情况。

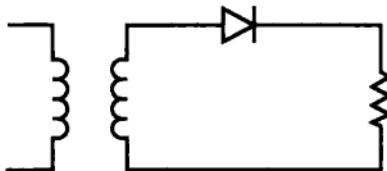


图 11-11

问题

- A. 二极管是如何作用于交流信号的?
B. 如果图 11-11 所示电路的变压器的次级线圈上有 $30V(pp)$ AC 输出信号 (均值为 $0V DC$),
请画出负载上的电压波形。请在单独的一张纸上绘图。

答案

A. 整流交流信号。

B. 参见图11-12。这种电路（被称为半波整流器）的输出波形包含有输入波形所有正极性部分或者负极性部分。

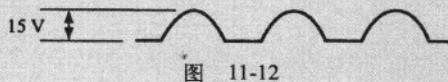


图 11-12

10 图 11-13 所示为变压器的次级线圈的两个端口的波形。A 点是经过二极管 D₁ 整流后的波形。B 点是经过二极管 D₂ 整流后的波形。

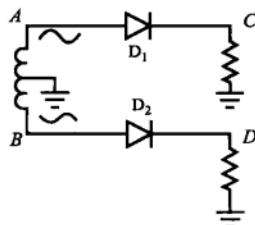


图 11-13

问题

- A. 在前半周期，哪个二极管导通？
- B. 在后半周期，哪个二极管导通？
- C. 请画出输入波形（A点和B点），并在下面画出各个输出波形（C点和D点）。请在单独的一张纸上作图。

答案

- A. 在前半周期，D₁正向偏置因此能导通，D₂反向偏置因此不能导通。
- B. 在后半周期，D₂正向偏置因此能导通，D₁反向偏置因此不能导通。
- C. 参见图11-14。

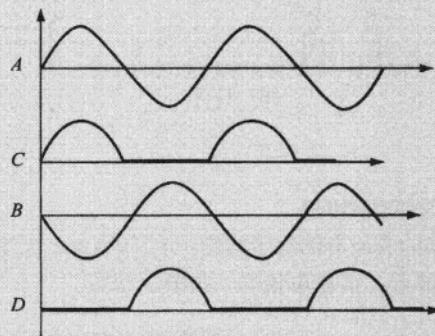


图 11-14

11 图 11-15 所示电路中，二极管的一端与带中间抽头的变压器的次级相接，而另一端则通过电阻接地。各二极管上的输出电压波形将共同施加在唯一的电阻负载上。这种电路被称为全波整流 (full-wave rectifier)。

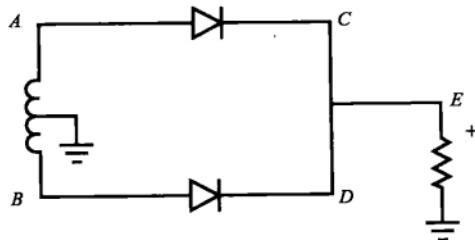


图 11-15

问题

请在单独的一张纸上，绘出图 11-15 所示电路中 E 点对应的电压波形。（该波形由图 11-14 所示 C 点和 D 点波形叠加而成。）

答案

参见图 11-16。

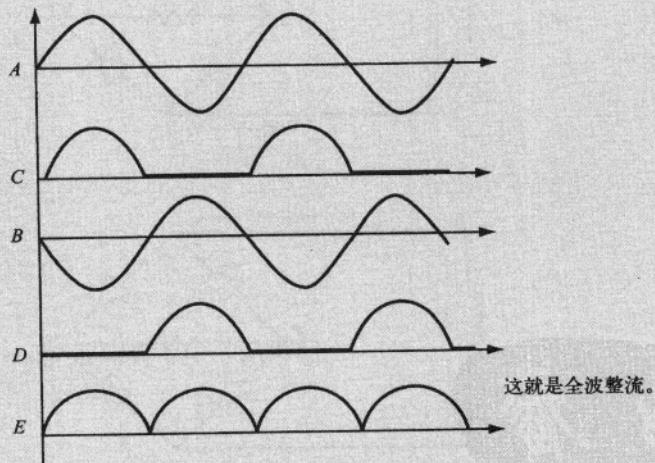


图 11-16

12 交流信号的全波整流可以比半波整流更加“平滑地”将交流信号转换为直流信号。

图 11-17 所示的全波整流电路使用了带有两套次级线圈的变压器，而不是一个带中点抽头的次级线圈。

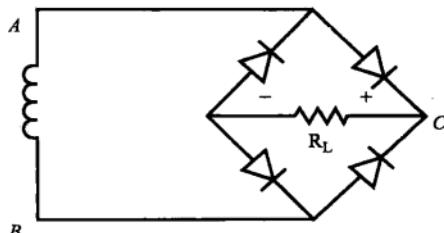


图 11-17

问题

该电路与图 11-15 所示电路有何区别？

答案

该电路的次级线圈没有中间抽头，并且使用了 4 个二极管。

13 图 11-18 给出了 A 点为正时的电流方向。

图 11-19 给出了 B 点为正时的电流方向。

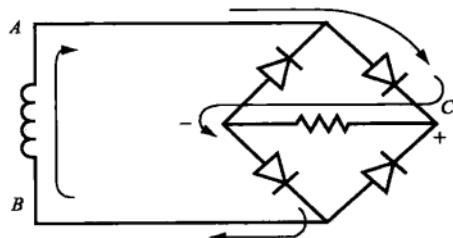


图 11-18

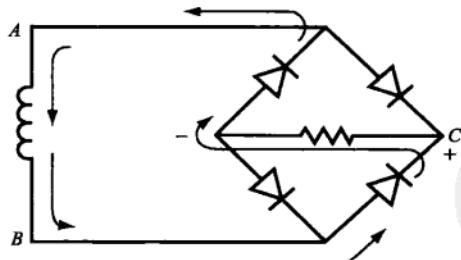


图 11-19

请注意，在上述两种情况下流过电阻负载的电流方向相同。

问题

A. 在每个导通通道中，电流需流过多少个二极管？



B. 请画出 C 点的电压波形。请在单独的一张纸上绘图。

答案

A. 每种情况下都是两个。

B. 参见图 11-20。

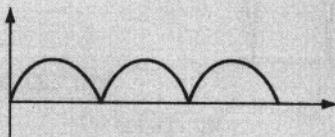


图 11-20

本章到目前为止已经研究了如何将交流信号转换为脉动的直流信号。事实上，整流后的交流信号通常被称为脉冲（pulsating）直流。下一步将学习如何将脉冲直流转换成平稳的直流。

11.2 平稳直流（平滑脉冲直流信号）

14 基本的电源电路可以分成 4 部分，具体参见图 11-21。

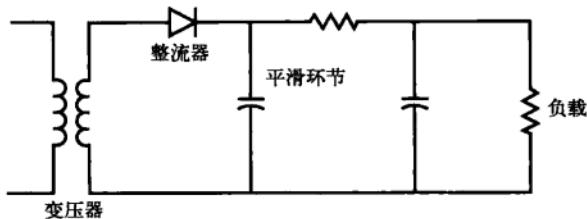


图 11-21

问题

- A. 如果在电源中使用带中间抽头的变压器，那么请问为了产生全波整流的输出需要多少个二极管？
- B. 图 11-21 所示的电源电路实现的是全波还是半波整流？
- C. 图 11-21 所示的电源电路的整流部分得到了什么样的输出信号？

答案

- A. 两个
- B. 半波
- C. 脉冲直流信号

15 电源电路中平滑环节的功能是将脉冲直流（PDC）信号转换成“纯”直流信号，尽

可能少带交流“纹波”。经过平滑后的直流电压信号如图 11-22 右图所示，它们将被施加到负载上。

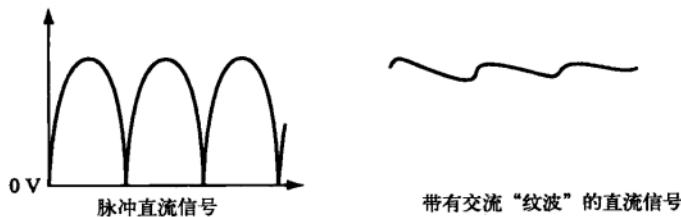


图 11-22

负载（被电源“驱动”）可以是简单的灯泡或者复杂的电子电路。无论使用何种负载，都需要电源输出端保持稳定的电压，并且从中获得稳定的电流。因此，负载带有阻性。

通常，负载所需的电压和电流（以及电阻）是已知的，因此必须设计出能够提供这些电压和电流的电源。

为了简化电路图，可以将该负载视为简单的电阻。

问题

- 电源的平滑部分有什么用？
- 与电源相连的是什么东西？可以将它看作什么？

答案

- 平滑部分将脉冲直流信号转换为“纯”直流信号。
- 与电源相接的是像灯泡或者电子电路这样的负载。在大多数情况下，都可以将负载看作电阻。

16 图 11-23 所示的电源电路带有电阻负载。

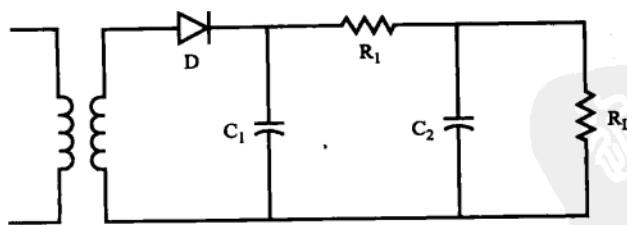


图 11-23

问题

请看图 11-23 所示的电路，并且回答下列问题。

- 该电路使用了哪种次级线圈？

- B. 该电路使用了哪种整流器?
 C. 哪些元件组成了平滑部分?
 D. 整流部分的输出波形是怎样的?

答案

- A. 不带中间抽头的次级线圈。
 B. 单二极管半波整流器。
 C. 一个电阻和两个电容 (R_1 、 C_1 和 C_2)。
 D. 半波脉冲直流信号。

17 图 11-24 所示为图 11-23 所示电源电路的整流部分的输出波形。



图 11-24

该波形将被输送至电源电路的平滑部分。下面利用一个直流脉冲（参见图 11-25）来分析平滑部分对该波形的作用过程。



图 11-25

当直流脉冲的电压值增加到最大值时，电容 C_1 也被充电至直流脉冲的峰值电压。

当输入的直流脉冲从最大值跌向 0V 时，电容 C_1 中存储的电子将通过电路释放。这将维持负载电阻两端的电压接近于最大值，参见图 11-26。即使 V_{in} 跌至零，直流脉冲也能使二极管右侧维持在最大电压处。

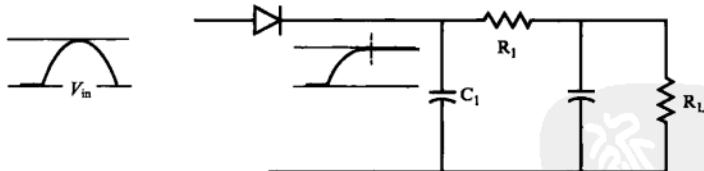


图 11-26

问题

哪条是电容 C_1 的放电通道？

答案

二极管不导通，因此电容无法通过二极管放电。唯一的放电通道是通过 R_i 和负载 R_L 。

- 18 如果不再有脉冲通过二极管，那么随着电容的放电，输出电压也会逐渐下降，从而会产生图 11-27 所示的波形。

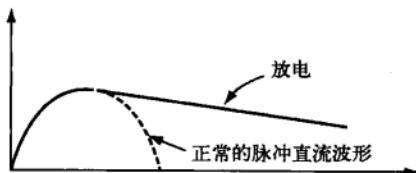


图 11-27

然而，如果在电容放电前又有脉冲通过二极管，结果就会产生图 11-28 所示的波形。

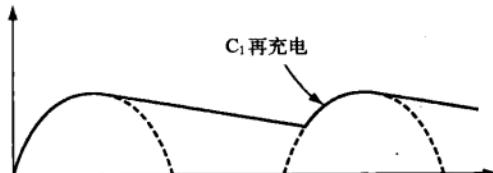


图 11-28

电容仅略微放电，就被第二个脉冲再次充电至最大电压。因此，施加在负载电阻上的电压只会略微下降。

继续施加脉冲就能再次产生相同的再充电效果。图 11-29 给出了最终的波形。

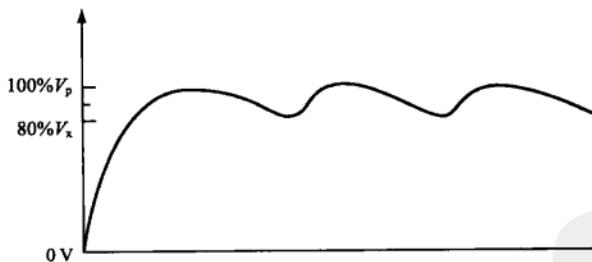


图 11-29

图 11-29 上的波形是带有交流纹波的直流量，它在 V_p 和 V_x 之间波动。如果选择 C_1 、 R_i 和 R_L 使得 C_1 的放电时间常数大约是输入脉冲时间宽度的 10 倍时，那么 V_x 就大约是 V_p 的 80%。

如果选择的放电时间大于输入脉冲时间宽度的 10 倍，那么平滑部分将进一步减小交流纹波。时间常数取为脉冲宽度的 10 倍是本章采用的实际设计值。

注意 电源电路的平滑部分有时也被称为低通滤波器 (low pass filter)。尽管该电路的功能也相当于低通滤波器，但是在将交流电转换为直流的电源电路中，它主要是响应脉冲直流信号，并从电容释放出电子。因此，这里的讨论采用平滑部分 (smoothing section) 这一术语。

问题

请估计图 11-29 所示波形的平均直流输出电压。

答案

大约是 V_p 的 90%。

19 图 11-30 所示电路的次级线圈的输出为 28V(rms)、60Hz 正弦波。在该电路中，要求在 100Ω 负载电阻上施加 10V DC。

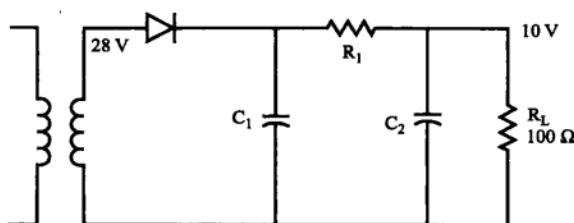


图 11-30

问题

整流器输出的峰值电压是多少？

答案

变压器次级线圈输出 28V(rms)，因此

$$V_p = \sqrt{2} \times V_{rms} = 1.414 \times 28V = 39.59V$$

即大约 40V。

20 图 11-31 是图 11-30 所示半波整流电路对正弦波整流后的波形。



图 11-31

问题

请计算出一个脉冲的宽度。

答案

60Hz代表60周/秒（即波长）。因此一个波长持续 $1/60\text{s}$ 。

$$1/60 \text{ s} = 1000/60 \text{ ms} = 16.67\text{ms}$$

因此，一个脉冲的宽度，等于半个波长，即8.33ms。

21 图 11-30 所示电路中 B 点平均直流电压大约是次级线圈输出的正弦波峰值的 90%，或者 $V_B=0.9\times40\text{V}=36\text{V}$ 。 R_1 和 R_L 构成分压器，从而将 36V 直流电降低为所需的 10V DC 后输出。

问题

利用分压器公式，计算 R_1 的值，使得 100Ω 负载电阻上有 10V DC。

答案

$$V_{\text{out}} = \frac{V_{\text{in}} R_L}{R_1 + R_L}$$

$$10 = \frac{36 \times 100}{R_1 + 100}$$

因此， $R_1=260\Omega$

22 图 11-32 所示的半波整流电路采用你计算得到的 R_1 电阻（ 260Ω ）。

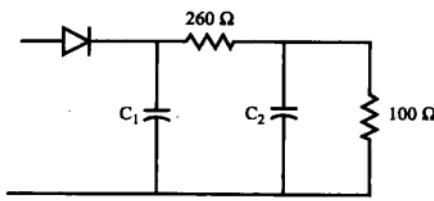


图 11-32

下面，请选择 C_1 ，使得电容通过这两个电阻的放电时间等于输入信号脉宽的 10 倍。

问题

A. 图 11-32 所示电路的放电时间常数应该有多长？请参考问题 18 和问题 20。

B. 给定时间常数后，请计算 C_1 的值。

答案

A. 时间常数应该是脉冲宽度 (8.33ms) 的10倍，因此，

$$\tau = 10 \times 8.33\text{ms} = 83.3\text{ms} \text{ 即 } 0.083\text{s}$$

B. $\tau = R \times C = (R_1 + R_L) \times C_1 = 360 \times C_1$

因此， $0.083\text{s} = 360 \times C_1$ 即 $C_1 = 230\mu\text{F}$

23 图 11-33 显示出半波整流电路中各位置的电压波形。

问题

A. 在该电路中，B 点和 C 点间的直流输出电压会如何变化？

B. 在该电路中，A 点和 C 点间的直流输出电压会如何变化？

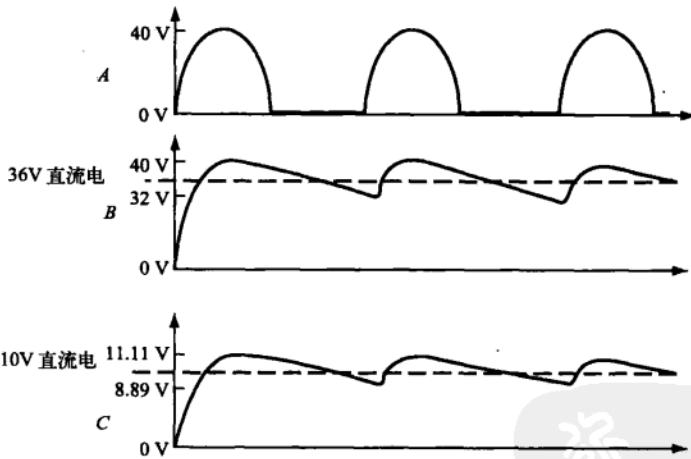
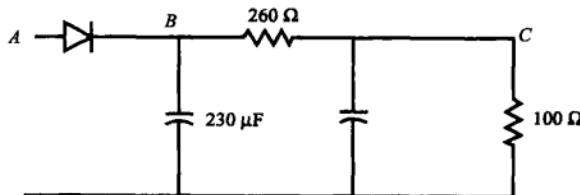


图 11-33

答案

A. 电压已由36V降低至10V。

B. 已由脉冲直流波形变为带有交流纹波的10V直流电压波形。

24 在大多数情况下，交流纹波的幅度还是太大，因此还需要进一步平滑。图 11-34 所示的半波整流电路采用 R_1 以及 R_L 和 C_2 的并联组成了分压器。该分压器能减小交流纹波以及直流电压的大小。

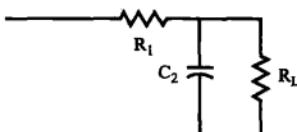


图 11-34

请选择 C_2 的值，使得电容的电抗 X_{C2} 小于等于负载电阻阻值的 $1/10$ 。 C_2 、 R_1 和 R_L 构成了交流分压器。正如第 6 章问题 26 中讨论的那样，选择这样的 C_2 值能简化带有并联电阻和电容的交流分压器电路的计算。

问题

- A. X_{C2} 该取多大？
- B. 电容电抗的计算公式是什么？
- C. 交流纹波的频率是多少？
- D. 请计算电容 C_2 的值。

答案

- A. $X_{C2}=R_L/10=100/10=10\Omega$ 或者更小
- B. $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$
- C. 60Hz。这是变压器次级线圈输出的正弦波的理想频率。
- D. 根据电抗公式，得

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 60\text{Hz} \times 10\Omega} = 265\mu\text{F}$$

25 图 11-35 所示为带有所有电容和电阻取值的半波整流电路。

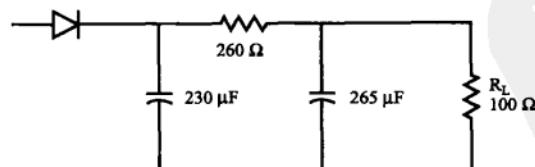


图 11-35

由于 X_{C2} 等于 R_L 的 $1/10$ ，所以可以在交流分压器计算中忽略 R_L 。这使得交流分压电路变为图 11-36。

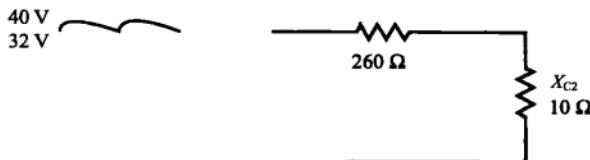


图 11-36

问题

- A. 交流分压器的输入电压的峰峰值是多少?
 B. 请利用第 6 章问题 26 中讨论过的交流分压器公式求解出 R_L 上的交流纹波电压。

答案

$$A. V_{pp} = V_p - V_x = 40V - 32V = 8V(pp)$$

$$B. AC V_{out} = AC V_{in} \times \frac{X_{C2}}{\sqrt{X_{C2}^2 + R_l^2}}$$

$$AC V_{out} = 8 \times \frac{10}{\sqrt{10^2 + 260^2}} = 0.31V(pp)$$

注意 该结果表明增加 C_2 后能降低图 11-33 所示曲线 C 上交流纹波，峰值从 11.11V 和 8.89V 降低至 10.155V 和 9.845V。这表明输出电压的纹波减小了。因此， C_2 有助于平滑输出的 10V DC 信号。

26 可以将该计算结果应用到最后的几个半波整流电路和全波整流电路问题中。在接下来的问题中，要计算为 100Ω 负载提供 10V DC 供电所需的 R_1 、 C_1 和 C_2 ，其中变压器次级线圈输出为 28V(rms) 正弦波，并采用全波整流电路。

图 11-37 所示为该电路整流部分的输出波形。

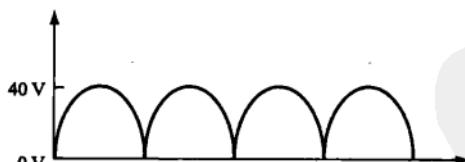


图 11-37

图 11-38 所示为使用平滑电容后得到的波形。

如果 C_1 的放电时间常数是波形周期的 10 倍，那么 V_x 约为 V_p 的 90%。直流电压的平均值约等于 V_p 的 95%。

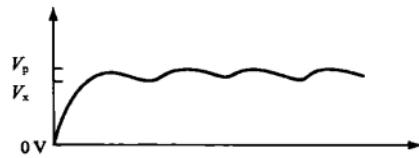


图 11-38

问题

- A. 图 11-33 所示电路中 B 点半波整流器的平均直流电压是多少?
 B. 图 11-38 中, 已知 $V_p=40V$, 请问波形的平均直流电压是多少?
 C. 为什么全波整流器的平均直流电压比半波整流器的高?

答案

- A. 36V, 相当于 V_p 的 90%
 B. 38V, 相当于 V_p 的 95%
 C. 这是因为全波整流时电容的放电时间短, 并导致其交流纹波更小。因此, 其 V_x 更高、平均直流电压也更高。

27 可以利用计算半波整流器中 R_1 值的方法 (参见问题 21) 来计算全波整流器的 R_1 值。

问题

请计算 R_1 的值。已知 $R_L=100\Omega$, $V_{in}=38V$, 并且要求 R_L 两端的电压为 $10V$ 。

答案

$$V_{out} = 10V = \frac{V_{in}R_L}{R_1 + R_L} = \frac{38 \times 100}{R_1 + 100}$$

因此, $R_1=280\Omega$

28 也可以用计算半波整流器中 C_1 值的方法 (参见问题 22) 计算全波整流器的 C_1 。

问题

请计算 C_1 的值。

答案

时间常数 $\tau = 83.3ms$, 放电电阻 $R_1+R_L=380\Omega$, $C_1=220\mu F$

29 利用分压器公式就能计算出采用全波整流器时负载电阻上的交流纹波, 其中 $R_i=280\Omega$, $R_L=180\Omega$ 。当 $V_p=40V$ 时, 计算结果为 $10.52V$ 。当 $V_x=36V$ 时, 计算结果为 $9.47V$ 。因此, 负载上的电压大小在 $9.47V$ 至 $10.52V$ 间变化, 平均电压为 $10V$ 。你可以通过增加一个并联在负载电阻上的第二电容来减小交流纹波。

问题

请利用问题 24 中计算半波整流器中 C_2 值的方法求解下面的问题。

A. 计算第二电容 C_2 的电抗。

B. 计算 C_2 的值。(注意全波整流器的交流纹波的频率为 $120Hz$ 。)

答案

A. 电抗应等于(或小于)负载电阻的 $1/10$ 。

因此, 应该小于等于 10Ω 。

$$B. C_2 = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \times \pi \times 120Hz \times 10\Omega} = 135\mu F$$

30 第一个平滑电容上的交流纹波在 $36V$ 至 $40V$ 间变化。当电路中仅有一个电容时, 负载上的交流纹波在 $9.47V$ 至 $10.52V$ 间波动。

问题

如果在负载上并联一个 $135\mu F$ 的第二电容, 请计算输出电压中交流纹波的上限值和下限值。计算时可以采用与问题 25 中求解半波整流器时相同的公式。其中, 问题 29 中的 X_{C2} 等于 10Ω , 问题 27 中的 $R_i=280\Omega$, AC $V_{in}=V_p-V_x=40V-36V=4V(pp)$ 。

答案

$$AC V_{out} = AC V_{in} \times \frac{X_{C2}}{\sqrt{R_i^2 + X_{C2}^2}} = 0.143V(pp)$$

结果近似等于 $0.14V(pp)$, 这意味着输出电压在 $9.93V$ 至 $10.07V$ 之间波动。这表明第二电容有效减小了纹波。此时的交流纹波小于问题 25 中采用半波整流器时的一半。换句话说, 全波整流器的输出比半波整流器的更光滑。

31 图 11-39 所示的全波整流电路中, 输出电压为 $5V$, 负载电阻为 50Ω 。请根据下列步骤计算其他元件的值。

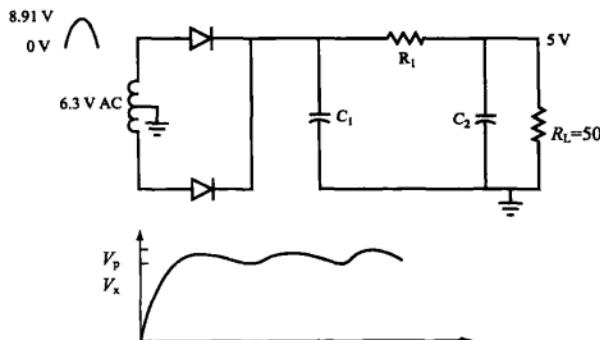


图 11-39

问题

- V_p 、 V_x 以及第一电容上的电压是多少？
- 请计算使输出为 5V DC 所需的 R_1 值。
- 请计算 C_1 值。
- 请计算 C_2 值。
- 输出端的交流纹波有多大？
- 请绘出带有计算结果的最终电路图。请在单独的纸上绘图。

答案

- $V_p = 6.3 \times \sqrt{2} = 8.91V$ ， $V_x = 90\% V_p = 8.02V$
直流电压等于 95% V_p ，即 8.46V。
- 大约 35Ω。
- 980μF。
- 当 $X_{C2}=5\Omega$ 、频率为 120Hz 时， $C_2=265\mu F$ 。
- 在平滑部分的输入端，交流变化为 8.02V ~ 8.91V，即 0.89V(pp)。利用交流分压器公式和 $R_1=35\Omega$ 、 $X_{C2}=5\Omega$ ，AC V_{out} 约等于 0.13V(pp)。因此，输出端的交流变化范围是 5.065V ~ 4.935V，这样的交流纹波是非常小的。
- 参见图 11-40。

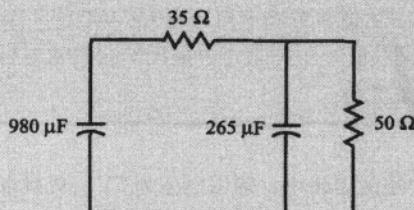


图 11-40

利用这里所示的简单步骤就能设计出电源电路。尽管这不是设计电源的唯一方法，但却是

最简单也是最有效的方法之一。

11.3 小结

本章介绍了下列与电源有关的概念以及计算。

二极管对交流信号的作用

- 对交流信号整流的方法
- 半波和全波整流电路设计
- 半波和全波整流电源电路的元件值的计算方法

11.4 自测题

下列问题将测试你对本章知识的掌握情况。请单独准备一张草纸作为绘图和计算之用。最后，请用自测题后的参考答案核对你的答案。

解答问题(1)~(5)时，请根据各题给定的输入信号画出每个电路的输出波形。

(1) 参见图 11-41。



图 11-41

(2) 参见图 11-42。

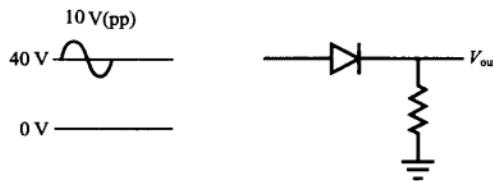


图 11-42

(3) 参见图 11-43。

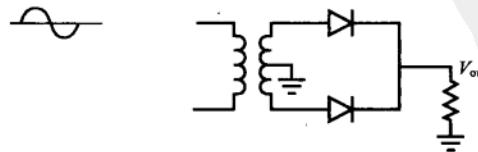


图 11-43

(4) 参见图 11-44。

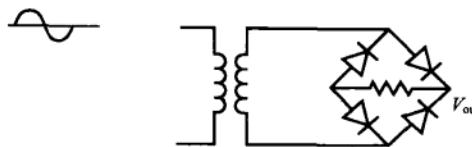


图 11-44

(5) 参见图 11-45。

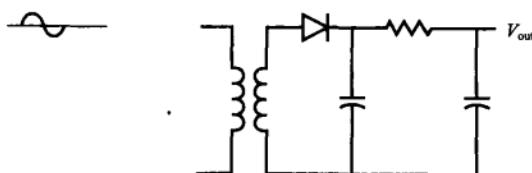


图 11-45

(6) 在图 11-46 所示电路中，变压器次级线圈上的信号大小为 100V(rms)、频率为 60Hz，现要求在 220Ω 负载上施加带有尽可能少的交流纹波的 28V DC 电压。请求出 R_1 、 C_1 和 C_2 。求出近似的交流纹波值。

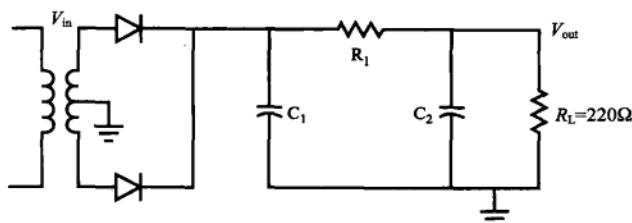


图 11-46

自测题答案

如果你的答案和下面给出的答案不同，请复习圆括号内注明的问题。

(1)

参见图 11-47

(问题 1~问题 5)



图 11-47

(2)

参见图 11-48

(问题 2)



图 11-48

(3)

参见图 11-49

(问题 11)



图 11-49

(续)

(4)

参见图11-50

(问题13)



图 11-50

(5)

参见图11-51

(问题15~问题18)



图 11-51

(6)

 $R_1=833\Omega, C_1=79\mu F$, 令 $X_{C2}=22\Omega$, 则有 $C_2=60\mu F$

(问题26~问题30)

$$\text{AC } V_{\text{out}} = 14 \times \frac{22}{\sqrt{22^2 + 833^2}} = 0.37 \text{V(pp)}$$

结束语与最终自测

本书研究了学习现代电子技术所需的基础知识，包括基本概念和公式。有了这些知识，将来无论是想作为一名电子爱好者，还是继续学习电气和电子工程，就都有了资本。

12.1 总结

读过本书后，你现在应该有能力阅读中级电子技术书和技术文章、搭建电子电路和工程，并能根据你的兴趣来钻研电子技术。特别地，你现在应已具备了以下能力：

- 识别电路原理图中所有重要的分立电子元件；
- 理解采用分立元件的电路是如何工作的；
- 计算能使电路高效工作的元件参数值；
- 设计简单的电路；
- 搭建简单的电路和电子项目。

为了了解自己对知识的掌握程度，你需要在本章最后完成一个最终测验。它能测试出你对本书所列概念及公式的理解程度。

如果完成了下面自测题并且感觉很自信，那么就证明你已经掌握了本书的知识，可以参考附录 A~附录 E，获得进一步学习所需的资源，如下所示。

- 书籍，比如 Paul Horowitz 和 Winfield Hill 的 *The Art of Electronics* (New York: Cambridge University Press, 1989) 就能提供大量深入学习电子技术的信息。
- 也可以购买关于电子技术项目的图书，比如 Earl Boysen 和 Nancy Muir 的 *Electronics Projects For Dummies* (Indianapolis: Wiley, 2006)，以帮助你搭建系统并且着手实践。
- 还可以浏览互联网以获得电子项目的创意。
- Earl Boysen 的网站 www.buildinggadgets.com，内容包括提示、创意以及各种优秀在线资源的链接。

注意 如果你对更深入的研究感兴趣，那么就应当明白，成为一名电工（或者技工）与成为电气（或者电子技术）工程师的道路是不同的。电子技师在军事院校、公立和私立的职业学校以及很多中学中就能培养完成。而工程师则需要掌握更高深的数学知识，并且要在受认可的学院或者大学学习至少 4 年的课程。

无论目标是什么，你都应当能自信满怀，因为本书已经为今后的学习打下了坚实的基础。无论将要涉足电子技术的哪个方面，都祝你好运！

12.2 最终自测题

这份最终测试能让你估计出自己对整个电子技术知识的掌握情况。请解答下列测试题并复习相关的参考知识。请用单独的纸张进行计算和绘图。

- (1) 如果 $R=1M\Omega$ 并且 $I=2\mu A$, 请求出电阻上的电压。
- (2) 如果 $V=5V$ 并且 $R=10k\Omega$, 请求出流过电阻的电流。
- (3) 如果 $V=28V$ 并且 $I=4A$, 请求出电阻的阻值。
- (4) 如果 300Ω 电阻与 220Ω 电阻并联, 请求出等效电阻。
- (5) 如果 $V=28V$ 并且 $I=5mA$, 请求出功率。
- (6) 如果流过 220Ω 电阻的电流为 $30.2mA$, 请问电阻功耗是多少?
- (7) 如果 1000Ω 电阻的额定功率为 $0.5W$, 那么允许安全流过该电阻的最大电流是多少?
- (8) 如果 10Ω 电阻与 32Ω 电阻串联后加在 $12V$ 电源上, 请问每个电阻上压降分别是多少, 两个压降之和是多少?
- (9) $1A$ 电流被并联的 6Ω 电阻和 12Ω 电阻分流。请求出流过每个电阻的电流。
- (10) $273mA$ 电流被并联的 330Ω 电阻和 660Ω 电阻分流。请求出流过每个电阻的电流。
- (11) 如果 $R=10k\Omega$ 并且 $C=1\mu F$, 请求出时间常数。
- (12) 如果 $R=1M\Omega$ 并且 $C=250\mu F$, 请求出时间常数。
- (13) $1\mu F$ 、 $2\mu F$ 和 $3\mu F$ 电容并联。请求出总电容。
- (14) $100\mu F$ 、 $220\mu F$ 和 $220\mu F$ 电容串联。请求出总电容。
- (15) $2pF$ 、 $22pF$ 和 $33pF$ 电容串联。请求出总电容。
- (16) 锗二极管的拐点电压是多少?
- (17) 硅二极管的拐点电压是多少?
- (18) 在图 12-1 所示电路中, $V_s=5V$, $R=1k\Omega$, 请求出流过二极管的电流 I_D 。

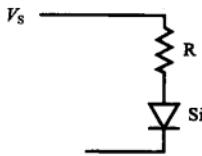


图 12-1

- (19) 若在问题(15) 的电路中, $V=12V$ 且 $R=100\Omega$ 。请求出 I_D 。
- (20) 在图 12-2 所示的电路中, $V_s=100V$, $R_1=7.2k\Omega$, $R_2=4k\Omega$ 且 $V_z=28V$ 。请求出流过齐纳二极管的电流 I_Z 。

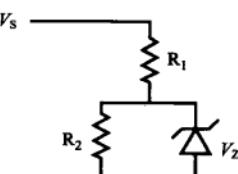


图 12-2

(21) 在图 12-2 所示的电路中, $V_s=10V$, $R_B=1k\Omega$, $R_C=10k\Omega$ 且 $V_Z=6.3V$ 。请求出 I_Z 。

(22) 利用图 12-3 所示电路回答本问题。

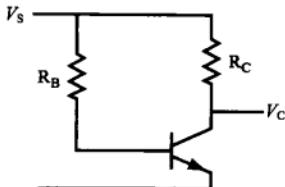


图 12-3

请求出集电极的直流电压 V_C 。其中 $V_s=28V$, $\beta=10$, $R_B=200k\Omega$, $R_C=10k\Omega$ 。

(23) 再次利用图 12-3 所示的电路, 请求出 R_B 。其中 $V_s=12V$, $\beta=250$, $R_C=2.2k\Omega$, $V_C=6V$ 。

(24) 利用图 12-3 所示的电路, 请求出 β 。其中 $V_s=10V$, $R_B=100k\Omega$, $R_C=1k\Omega$, $V_C=5V$ 。

(25) JFET 的 3 个端口分别叫什么名字, 是哪个端口控制 JFET 的工作?

JFET 的漏极电流何时达到其最大值?

(26) 请利用图 12-4 所示电路解答本问题。

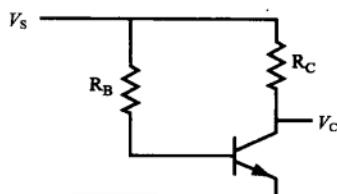


图 12-4

请求出能使晶体管导通的 R_B 值。其中, $V_s=14V$, $R_C=10k\Omega$, $\beta=50$ 。

(27) 再次利用图 12-4 所示电路求解能使晶体管导通的 R_B 值。其中, $V_s=5V$, $R_C=4.7k\Omega$, $\beta=100$ 。

(28) 请利用图 12-5 所示电路解答本问题。

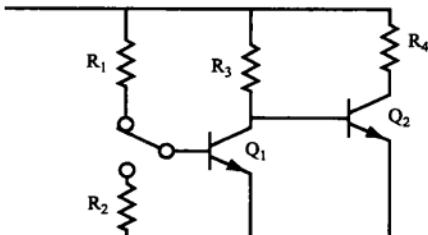


图 12-5

请求出 R_1 、 R_2 和 R_3 的值, 使得开关能令 Q_2 导通或者关断。其中 $V_s=10V$, $\beta_1=100$, $\beta_2=20$, $R_4=2.2k\Omega$ 。

(29) 请再次利用图 12-5 所示电路, 求出 R_1 、 R_2 和 R_3 的值, 使得开关能令 Q_2 导通或者关断。其中 $V_s=28V$, $\beta_1=30$, $\beta_2=10$, $R_4=220\Omega$ 。

(30) 某 N 沟道 JFET 的漏极饱和电流为 $I_{DSS}=14\text{mA}$ 。如果所用的漏极电压为 28V, 请计算漏极电阻 R_D 。

- (31) 请画出正弦波的一个周期。
- (32) 请在问题 31 所画的波形上标记处 V_{pp} 、 V_{rms} 以及周期。
- (33) 如果 $V_{pp}=10\text{V}$, 请求出 V_{rms} 。
- (34) 如果 $V_{rms}=120\text{V}$, 请求出 V_{pp} 。
- (35) 如果正弦波的频率为 14.5kHz, 那么该波形的周期是多少?
- (36) 请求出 $200\mu\text{F}$ 电容在 60Hz 处的电抗 X_C 。
- (37) 请求出在 10kHz 处电抗为 50Ω 的电容的电容值。
- (38) 请求出 10mH 电感在 440Hz 处的电抗 X_L 。
- (39) 请求出在 1kHz 处电抗为 100Ω 的电感的电感值。
- (40) 请求出 $0.1\mu\text{F}$ 电容与 4mH 电感在忽略内阻情况下的串、并联谐振频率。
- (41) 请根据图 12-6 所示电路解答本问题。

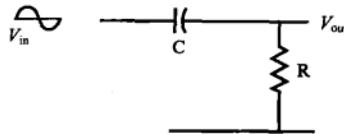


图 12-6

请求出 X_C 、 Z 、 V_{out} 、 I 、 $\tan\theta$ 以及 θ 。其中, $V_{in}=10\text{V(pp)}$, $f=1\text{kHz}$, $C=0.1\mu\text{F}$, $R=1\,600\Omega$ 。

(42) 请再次根据图 12-6 所示电路, 求出 X_C 、 Z 、 V_{out} 、 I 、 $\tan\theta$ 以及 θ 。其中, $V_{in}=120\text{V(rms)}$, $f=60\text{Hz}$, $C=0.33\mu\text{F}$, $R=6\text{k}\Omega$ 。

- (43) 在本题中, 请参考图 12-7 所示的电路。

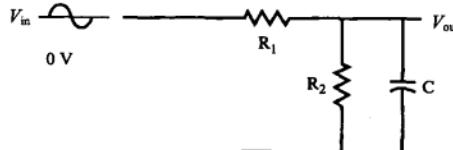


图 12-7

求出 X_C 、AC V_{out} 和 DC V_{out} 。其中, $V_{in}=1\text{V(pp)}$ AC, 并且含有 5V 的直流分量; $f=10\text{kHz}$; $R_1=10\text{k}\Omega$; $R_2=10\text{k}\Omega$; $C=0.2\mu\text{F}$ 。

(44) 请再次参考图 12-7 所示的电路。求出 X_C 、AC V_{out} 和 DC V_{out} 。其中, $V_{in}=0.5\text{V(pp)}$ AC, 并且含有 10V 的直流分量; $f=120\text{Hz}$; $R_1=80\Omega$; $R_2=20\Omega$; $C=1\,000\mu\text{F}$ 。

- (45) 本题请参考图 12-8 所示的电路。

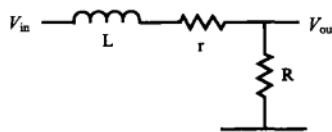


图 12-8

在本电路中, $V_{in}=10V(pp)$ AC, 并且含有 5V 的直流分量, $f=1kHz$; $L=10mH$, $r=9\Omega$, $R=54\Omega$ 。请求出 AC V_{out} 、DC V_{out} 、 X_L 、 Z 、 $\tan\theta$ 以及 θ 。

(46) 在图 12-9 所示的电路中, $L=1mH$, $C=0.1\mu F$, 并且 $R=10\Omega$ 。

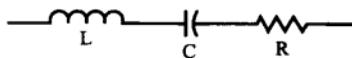


图 12-9

请求出 f_r 、 X_L 、 X_C 、 Z 、 Q 和带宽。

(47) 在图 12-10 所示电路中, $L=10mH$, $C=0.02\mu F$, 并且 $r=7\Omega$ 。

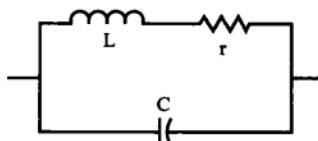


图 12-10

请求出 f_r 、 X_L 、 X_C 、 Z 、 Q 和带宽。

(48) 如果问题(47)的谐振电路两端的电压在谐振频率处的峰值为 8V, 请问它在半功率点的电压是多少?

半功率频率是多少?

(49) 请利用图 12-11 所示的放大电路解答本问题。

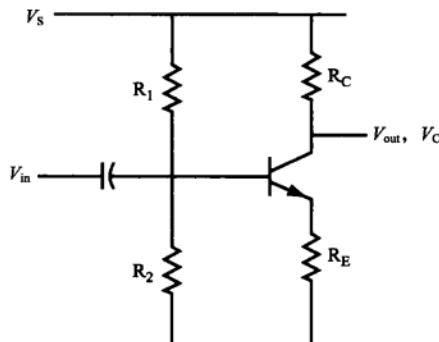


图 12-11

请求出 R_1 、 R_2 和 R_E 的值使得放大器的电压增益为 10。其中 $V_s=28V$, $R_C=1k\Omega$, $\beta=100$ 。

(50) 请再次利用图 12-11 所示的电路求出使得放大器的电压增益为 20 的 R_1 、 R_2 和 R_E 的值。其中 $V_s=10V$, $R_C=2.2k\Omega$, $\beta=50$ 。

(51) 利用图 12-11 所示的电路, 能否使问题(50) 的放大器获得最大增益? 假设需要通过的信号的最低频率为 50Hz。

(52) 对于第 1 章问题 42 所示的 JFET 放大器电路, 已知偏置点位 $V_{GS}=-2.8V$, 漏极电流 $I_D=2.7mA$, $V_{DS}=12V$, 请求出 R_S 和 R_D 。

- (53) 如果问题 52 使用的 JFET 的跨导为 4 000 微姆欧，那么它的交流电压增益是多少？
- (54) 某个运放电路在反相输入端接有 $8k\Omega$ 的输入电阻。为了使该运放电路获得 85 倍的增益，反馈电阻得取多大？
- (55) 如果问题(54) 中的运放电路的输入信号为 2mV，其输出信号是多少？
- (56) 什么是振荡器？
- (57) 为什么振荡器必须用正反馈而不是负反馈？
- (58) 考毕兹振荡器采用了哪种反馈方法？
- (59) 哈特利振荡器采用了哪种反馈方法？
- (60) 请画出一个考毕兹振荡器电路。
- (61) 请画出一个哈特利振荡器电路。
- (62) 振荡器输出频率的计算公式是什么？
- (63) 请画出带有中间抽头的变压器的电路符号。
- (64) 请为变压器的两个主要线圈命名。
- (65) 变压器的输入电压、输出电压、各线圈匝数之间的关系式是什么？
- (66) 变压器初级与次级线圈的匝比与电流之间的关系式是什么？
- (67) 变压器各线圈内匝数、初级线圈的阻抗、次级线圈的阻抗之间的关系式是什么？
- (68) 变压器有哪两个主要用途？
- (69) 请画出带有输出端平滑滤波的半波整流电路。
- (70) 请画出利用带中间抽头的变压器以及输出端平滑滤波器的全波整流电路。
- (71) 已知一个 10V(rms) 输入的全波整流电源，请计算 R_1 、 C_1 和 C_2 （参见图 12-12），使得能在 50Ω 负载上输出 50V DC。

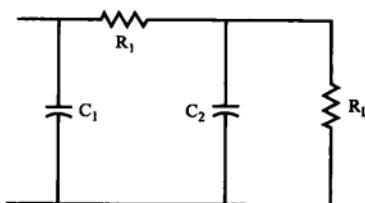


图 12-12

最终自测题答案

答案右侧的圆括号内的参考项给出了讲解对应题目所涉及知识的章名和题号，以便你能复习这些测试题涵盖的概念。

| | | |
|-----|---------------------|-----------------|
| (1) | $V=2V$ | (第1章，问题5) |
| (2) | $I=0.5mA$ | (第1章，问题6) |
| (3) | $R=7\Omega$ | (第1章，问题7) |
| (4) | 132Ω | (第1章，问题10) |
| (5) | $P=140mW$ 即 $0.14W$ | (第1章，问题13和问题14) |

(续)

| | | |
|------|---|------------------|
| (6) | 0.2W | (第1章, 问题13和问题15) |
| (7) | 22.36mA | (第1章, 问题13和问题16) |
| (8) | 2.86V, 9.14V, 12V | (第1章, 问题23和问题26) |
| (9) | 流过 6Ω 电阻的电流是 $2/3$ A, 流过 12Ω 电阻的电流是 $1/3$ A | (第1章, 问题28和问题29) |
| (10) | 流过 660Ω 电阻的电流是91mA, 流过 330Ω 电阻的电流是182mA | (第1章, 问题28和问题29) |
| (11) | $\tau=0.01s$ | (第1章, 问题34) |
| (12) | $\tau=250s$ | (第1章, 问题34) |
| (13) | $6\mu F$ | (第1章, 问题40) |
| (14) | $52.4\mu F$ | (第1章, 问题41) |
| (15) | $8.25\mu F$ | (第1章, 问题41) |
| (16) | 约为0.3V | (第2章, 问题10) |
| (17) | 约为0.7V | (第2章, 问题10) |
| (18) | $I_D=4.3mA$ | (第2章, 问题14) |
| (19) | $I_D=120mA$ | (第2章, 问题14) |
| (20) | $I_Z=3mA$ | (第2章, 问题31) |
| (21) | $I_Z=3.07mA$ | (第2章, 问题31) |
| (22) | $V_C=14V$ | (第3章, 问题21~问题24) |
| (23) | $R_B=1.1M\Omega$ | (第3章, 问题21~问题24) |
| (24) | $\beta=50$ | (第3章, 问题21~问题24) |
| (25) | 漏极、源极和门极。门极控制JFET | (第3章, 问题29) |
| (26) | $R_B=550k\Omega$ | (第4章, 问题8) |
| (27) | $R_B=470k\Omega$ | (第4章, 问题4~问题8) |
| (28) | $R_3=44k\Omega, R_1=2.2k\Omega, R_2=2.2k\Omega$ | (第4章, 问题19~问题23) |
| (29) | $R_3=2.2k\Omega, R_1=66k\Omega, R_2=66k\Omega$ | (第4章, 问题19~问题23) |
| (30) | $R_D=2k\Omega$ | (第4章, 问题39) |
| (31) | 参见图12-13 | (第5章, 问题7) |

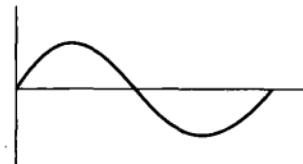


图 12-13

(32) 参见图12-14

(第5章, 问题3和问题7)

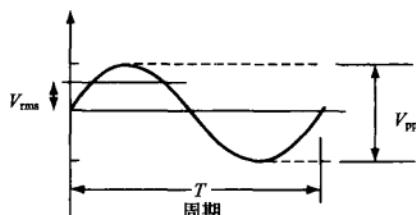


图 12-14

(续)

| | | |
|------|---|---------------------------|
| (33) | 3.535V | (第5章, 问题4) |
| (34) | 340V | (第5章, 问题5) |
| (35) | 69μs | (第5章, 问题7) |
| (36) | 13.3Ω | (第5章, 问题14) |
| (37) | 0.32μF | (第5章, 问题14) |
| (38) | 27.6Ω | (第5章, 问题17) |
| (39) | 16mH | (第5章, 问题17) |
| (40) | 8kHz | (第5章, 问题19和问题21) |
| (41) | $X_C=1.6k\Omega$, $Z=2.263\Omega$, $V_{out}=7.07V$, $I=4.4mA$, $\tan\theta=1$, $\theta=45^\circ$ | (第6章, 问题10和问题23) |
| (42) | $X_C=8k\Omega$, $Z=10k\Omega$, $V_{out}=72V$, $I=12mA$, $\tan\theta=1.33$, $\theta=53.13^\circ$ | (第6章, 问题10和问题23) |
| (43) | $X_C=80\Omega$, AC $V_{out}=8mV$, DC $V_{out}=2.5V$ | (第6章, 问题26) |
| (44) | $X_C=1.33\Omega$, AC $V_{out}=8.3mV$, DC $V_{out}=2V$ | (第6章, 问题26) |
| (45) | $X_L=80\Omega$, $Z=89\Omega$, AC $V_{out}=6.07V$, DC $V_{out}=4.3V$, $\tan\theta=1$, $\theta=45^\circ$ | (第6章, 问题31和问题35) |
| (46) | $f_i=16kHz$, $X_L=100\Omega$, $X_C=100\Omega$, $Z=10\Omega$, $Q=10$, $BW=1.6kHz$ | (第7章, 问题2、问题6和问题20) |
| (47) | $f_i=11.254Hz$, $X_L=X_C=707\Omega$, $Z=71.4k\Omega$, $Q=101$, $BW=111Hz$ | (第7章, 问题10、问题11和问题 20) |
| (48) | $V_{hp}=5.656V$, $f_{1hp}=11.198Hz$, $f_{2hp}=11.310Hz$ | (第7章, 问题27) |
| (49) | 你的答案应该很接近于下列值: $R_E=100\Omega$, $V_C=14V$, $V_E=1.4V$, $V_B=2.1V$, $R_2=1.5k\Omega$, $R_1=16.8k\Omega$ | (第8章, 问题17) |
| (50) | $R_E=110\Omega$, $V_C=5V$, $V_E=0.25V$, $V_B=0.95V$, $R_2=2.2k\Omega$, $R_1=18.1k\Omega$ | (第8章, 问题17) |
| (51) | 利用电容旁路射极电阻 R_E 可以提高增益; $C_E=300\mu F$ (近似值) | (第8章, 问题20) |
| (52) | $R_S=1.04k\Omega$, $R_D=3.41k\Omega$ | (第8章, 问题42) |
| (53) | $A_V=-13.6$ | (第8章, 问题39) |
| (54) | $R_F=680k\Omega$ | (第8章, 问题45) |
| (55) | $V_{out}=170mV$, 并且被反相 | (第8章, 问题45) |
| (56) | 振荡器是一种无需输入信号就能发射连续正弦波的电路。还有一些其他类型的振荡器, 其输出不是正弦波, 但是本书不讨论 | (第9章, 引言) |
| (57) | 正反馈保证放大器持续振荡并输出正弦波。负反馈则保证放大器稳定, 减小输出的波动 | (第9章, 问题2和问题3) |
| (58) | 容性分压器 | (第9章, 问题14) |
| (59) | 感性分压器 | (第9章, 问题14) |

(续)

(60) 参见图12-15

(第9章, 问题24)

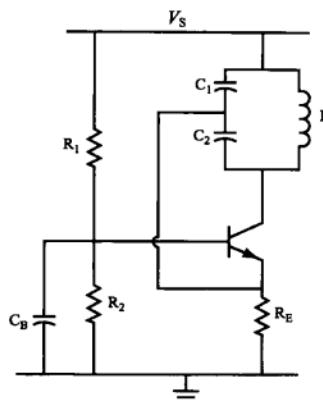


图 12-15

(61) 参见图12-16

(第9章, 问题25)

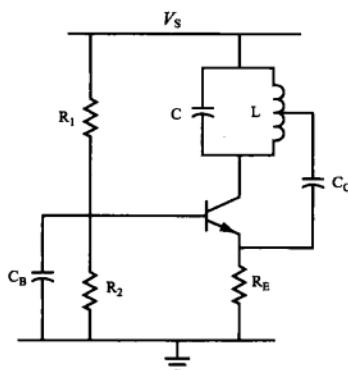


图 12-16

$$(62) f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(第9章, 问题11)

(63) 参见图12-17

(第10章, 问题4)

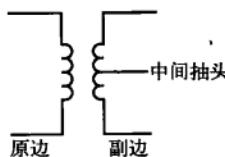


图 12-17

(64) 初级和次级

(第10章, 问题2)

$$(65) V_{in}/V_{out} = V_p/V_s = N_p/N_s = TR$$

(第10章, 问题6)

$$(66) I_{out}/I_{in} = I_s/I_p = N_p/N_s = TR$$

(第10章, 问题13)

$$(67) Z_{in}/Z_{out} = (N_p/N_s)^2, \text{ 或者阻抗比, 等于匝比的平方}$$

(第10章, 问题16)

(续)

(68) 用于升高或者降低交流电压，使信号源与负载的阻抗匹配

(第10章，引言)

(69) 参见图12-18

(第11章，问题14)

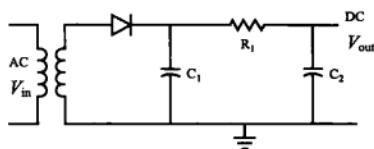


图 12-18

(70) 参见图12-19

(第11章，问题31)

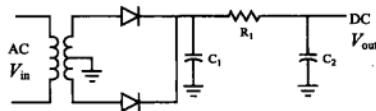


图 12-19

(71) $R_1=84\Omega$, $C_1=622\mu F$, $C_2=265\mu F$

(第11章，问题26~问题29)



附录 A

术语表

安培 (A) 电流的测量单位。

放大器 一种能够产生比输入信号功率更大、电压更高或电流更大的输出信号的电子设备或者电路。

电容 (C) 当在元件两端施加电压后，元件能够存储电荷的能力，单位法拉。

电容器 一种元件。如果在其两端施加电压，它就能够存储电荷；如果去除所施加的电压，它又能以电流的形式将电荷返还给电路。

分立元件 单独的电子元件，比如电阻、二极管、电容器和晶体管。

二极管 一种只能单向导电的元件。

法拉 (F) 电容的测量单位。

反馈 从放大器输出端到其输入端的连接，从而将部分输出电压用于控制、稳定或者调整放大器的工作。

频率 (f) 波形在给定时间周期段出现的周期数，单位赫兹（或者每周秒）。

地 零电压。这是电路测量的绝对参考点。

亨利 (H) 电感的单位。

阻抗 (Z) 电路对交流的总阻碍程度（包括电阻和电抗），单位欧姆。

电感 (L) 元件阻止电流变化的特性，单位亨利。

电感器 一种线圈。当线圈两端的电压改变时，它的磁场能阻止电流的变化。

集成电路 (IC) 非常小尺寸的硅片型电子元件，其上包含由大量晶体管和其他元件构成的电路。

基尔霍夫定律 用于直流和交流电路分析的一组基本公式，包括：电流定律 (KCL)：电路中某个节点的所有电流之和等于零；电压定律 (KVL)：电路中某个回路的电压和等于零。

欧姆 (Ω) 电阻的单位。

欧姆定律 用于计算电压、电流和电阻之间关系的公式，可表示为 $V=IR$ 。还可以表示为 $E=IR$ 。

运算放大器 (op-amp) 一种多级放大器集成电路。比起由分立元件构成的普通放大器，运算的尺寸要小得多，也更加实用。

振荡器 一种能产生连续输出信号的电路，比如正弦波或者方波。

相角 对于信号来说，可以指电流波形与电压波形间的超前或者滞后角。

相移 信号经过某个电路（比如放大器）后相位的变化。

功率 单位时间内消耗的总能量。功率的单位是瓦特。

电抗 (X) 元件对交流 (AC) 信号的阻碍程度，单位欧姆。电抗有两种：电容器表现出的容抗 (X_C) 和电感器表现出的感抗 (X_L)。

整流 将交流 (AC) 变为直流 (DC) 的过程。

电阻 (R) 元件对电流的阻碍程度，单位欧姆。

电阻器 一种元件。其大小由它对电流的阻碍程度决定。

半导体 一种能根据工作状态分别表现出导体或者绝缘体电气特性的材料。硅是电子元件中最常使用的半导体材料。

变压器 一种能将输入的交流电压变换为更高 (升压变压器) 或者更低 (降压变压器) 的交流电压的元件。

晶体管, BJT 双极型晶体管 (BJT) 是一种既可以用作开关也可用作放大器的半导体元件。

在任何情况下，都可以通过一个小输入信号来控制晶体管，进而产生大得多的输出信号。

晶体管, JFET 结型场效应管 (JFET)，和双极型晶体管类似，也能用作开关或者放大器。

晶体管, MOSFET 金属氧化硅场效应管 (MOSFET)，和 BJT、JFET 类似，MOSFET 也可以用作开关或者放大器。MOSFET 是集成电路中最常用的晶体管。

匝比 (TR) 变压器初级 (即输入) 线圈的匝数与次级 (即输出) 线圈的匝数之比。

电压 (V) 电势差，它能导致电流流过导体。

瓦特 (W) 功率的单位，1 瓦特等于 1 安培电流流过某个压降为 1 伏特的元件时产生的热。

齐纳 一种特殊的二极管。它能在特定的反偏电压下导通电流。



B 附录

符号和缩写表

下表列出了常见的符号和缩写。

| 符号/缩写 | 含 义 | 符号/缩写 | 含 义 |
|-----------|----------------------|---------------|------------|
| A | 安培 | R | 电阻器 |
| AC | 交流 | R_{in} | 晶体管的输入电阻 |
| A_v | 交流电压增益 | r | 电感器的直流电阻 |
| β | 电流增益 | T | 波形的周期 |
| BW | 带宽 | τ | 时间常数 |
| C | 电容器 | TR | 匝比 |
| DC | 直流 | θ | 相角 |
| F | 法拉 | V | 电压 |
| g_m | 跨导 | V_C | 晶体管的集电极电压 |
| f | 频率 | V_{DD} | 漏极电源电压 |
| f_t | 谐振频率 | V_E | 晶体管的发射极电压 |
| H | 亨利 | V_{GG} | 门极电源电压 |
| Hz | 赫兹 | V_{GS} | 门极到源极的电压 |
| I | 电流 | $V_{GS(off)}$ | 门极到源极的关断电压 |
| I_B | 基极电流 | V_{in} | 输入信号的交流电压 |
| I_C | 集电极电流 | V_{out} | 交流输出电压 |
| I_D | FET的漏极电流, 也指流过二极管的电流 | V_p | 峰值电压 |
| I_{DSS} | 饱和电流 | V_{pp} | 峰峰值电压 |
| L | 电感器 | V_{rms} | 均方根电压 |
| N_p | 初级线圈的匝数 | V_s | 供电电压 |
| N_s | 次级线圈的匝数 | W | 瓦特 |
| Ω | 欧姆 | X_C | 电容的电抗 |
| P | 功率 | X_L | 电感的电抗 |
| Q | 晶体管, 也指谐振电路的Q值 | Z | 阻抗 |

附录 C

10 的幂次方和工程前缀

下表列出了 10 的幂次，等价十进制值，用于表示该值的前缀、符号以及举例。

| 幂 次 | 十 进 制 | 前 缀 | 符 号 | 举 例 |
|------------|-------------------|--------|-------|------------------|
| 10^9 | 1 000 000 000 | Giga- | G | $\text{G}\Omega$ |
| 10^6 | 1 000 000 | Mega- | M | $\text{M}\Omega$ |
| 10^3 | 1 000 | Kilo- | k | $\text{k}\Omega$ |
| 10^{-3} | 0.001 | Milli- | m | mA |
| 10^{-6} | 0.000 001 | Micro- | μ | μA |
| 10^{-9} | 0.000 000 001 | Nano- | n | ns |
| 10^{-12} | 0.000 000 000 001 | Pico- | p | pF |



D 附录

标准碳化合物电阻值

最常用的电阻器是碳化合物电阻器，其容差为 $\pm 5\%$ ，额定功率为 $1/4\text{W}$ 或者 $1/2\text{W}$ 。下面列出了这种电阻的标准电阻值（单位欧姆）。你可以通过附录 E 列出的在线分销商购买其中任何一款电阻。功率电阻的可选值较少，你可以查阅各个供货商的产品目录。

注意 下面的“k”代表千欧姆，因此 7.5k 就代表 $7\,500\Omega$ 。类似的，“M”代表兆欧姆，因此 3.6M 则代表 $3\,600\,000\Omega$ 。

| | | | | | |
|-----|-----|------|------|------|------|
| 2.2 | 24 | 270 | 3.0k | 33k | 360k |
| 2.4 | 27 | 300 | 3.3k | 36k | 390k |
| 2.7 | 30 | 330 | 3.6k | 39k | 430k |
| 3 | 33 | 360 | 3.9k | 43k | 470k |
| 3.3 | 36 | 390 | 4.3k | 47k | 510k |
| 3.6 | 39 | 430 | 4.7k | 51k | 560k |
| 3.9 | 43 | 470 | 5.1k | 56k | 620k |
| 4.3 | 47 | 510 | 5.6k | 62k | 680k |
| 4.7 | 51 | 560 | 6.2k | 68k | 750k |
| 5.1 | 56 | 620 | 6.8k | 75k | 820k |
| 5.6 | 62 | 680 | 7.5k | 82k | 910k |
| 6.2 | 68 | 750 | 8.2k | 91k | 1.0M |
| 6.8 | 75 | 820 | 9.1k | 100k | 1.2M |
| 7.5 | 82 | 910 | 10k | 110k | 1.5M |
| 8.2 | 91 | 1.0k | 11k | 120k | 1.8M |
| 9.1 | 100 | 1.1k | 12k | 130k | 2.2M |
| 10 | 110 | 1.2k | 13k | 150k | 2.4M |
| 11 | 120 | 1.3k | 15k | 160k | 2.7M |
| 12 | 130 | 1.5k | 16k | 180k | 3.3M |
| 13 | 150 | 1.6k | 18k | 200k | 3.6M |
| 15 | 160 | 1.8k | 20k | 220k | 3.9M |
| 16 | 180 | 2.0k | 22k | 240k | 4.7M |
| 18 | 200 | 2.2k | 24k | 270k | 5.6M |
| 20 | 220 | 2.4k | 27k | 300k | 6.8M |
| 22 | 240 | 2.7k | 30k | 330k | 8.2M |

E 附录

补充资源

下列图书、杂志、辅助材料以及电子元件供应商列表可能引起那些希望获得更多知识的读者们的兴趣。他们对基本电子技术概念、电路设计的参考资料以及搭建电路所需的供应商信息都感兴趣。

E.1 网址

- Building Gadgets (www.buildinggadgets.com/) ——一个电子技术参考网站,由 Earl Boysen (他是本书的作者之一) 维护。这里有大量方便的电子学辅导材料、论坛、供货商以及有趣的电子项目等资料的链接。
- All About Circuits (www.allaboutcircuits.com/) ——包含在线的电子技术理论和电路方面的书籍,以及电子项目、单片机和通用电子技术问题等方面的论坛。
- Electronics Tutorials (www.Electronics-tutorials.com/) ——涉及电子技术广泛主题的辅导材料。
- Williamson Labs (www.williamson-labs.com/) ——电子元件与电路方面的辅导材料。很多辅导材料都包括动画说明,以便读者理解每个电路的功能。
- Electro Tech online (www.electro-tech-online.com/) ——关于电子技术项目和通用电子技术问题的论坛。
- Electronics Lab (www.electronics-lab.com/forum/) ——关于项目设计、电子技术理论、单片机以及数百个有趣项目的论坛。
- Discover Circuits (www.discovercircuits.com/) ——收集了成千上万个电子电路。

E.2 书籍

- *Electronics For Dummies, First Edition*, Gordon McComb 和 Earl Boysen 著 (Indianapolis: Wiley, 2005) ——一本很好的入门书,包括电子技术概念、元器件、电路以及方法等方面概论。
- *The Art of Electronics, Second Edition*, Paul Horowitz 和 Winfield Hill 著 (New York: Cambridge University Press, 1989) ——对设计电路以及理解现有电路的功能十分有用的参考书。
- *2008 ARRL Handbook for Radio Communications* (Newington, Connecticut: American Radio Relay League, 2008) ——尽管这是一本为无线电通信爱好者写的书,但是它也是一本有助于理解电路设计的参考书。

- *Electronics Projects For Dummies, First Edition*, Early Boysen 和 Nancy C. Muir 著 (Indianapolis: Wiley, 2006) ——包含搭建电子电路和项目的概论以及实践练习。

E.3 杂志

- *Everyday Practical Electronics Magazine* (www.epemag.wimborne.co.uk/) ——为那些关注于分立元件电路的爱好者和项目提供有关新元件的信息。
- *Nuts and Volts Magazine* (nutsvolts.com/) ——为那些关注于单片机电路的爱好者和项目提供有关新元件的信息。
- *EDN Magazine* (www.edn.com/) ——针对工程师的有关新元件/设计的文章。

E.4 供应商

本节介绍实体商店和在线分销商。

E.4.1 实体商店

- Radio Shack (www.radioshack.com/) ——电子元件销售商，在美国大多数城市设有商店。
- Fry's Electronics (www.frys.com/) ——电子元件销售商，在美国的 9 个州设有商店。

E.4.2 在线分销商

- Jameco Electronics (www.jameco.com/) ——一个中型分销商，销售用户所需的大多数元件。其产品目录的规模相当大，能很容易地从中找到所需的元件。
- Mouser Electronics (www.mouser.com/) ——一个大型分销商，销售各种元件，其网站建有很好的订购系统，允许用户将不同工程的订单归类在一起。如果你正在计划多个工程，那么这会很方便。运输时的包装也很好、标签很清晰。
- Digi-key (www.digikey.com/) ——另一个大型分销商，拥有类别十分丰富的元件。在 Digi-key 可以找到那些在小供应商很难找到的元件。



附录 F

参 考 公 式

从下表可以快速查阅出常用的公式。

| 参 数 | 公 式 | 章 (出处) |
|---------------|---|-----------|
| 带宽 | $BW = \frac{f_t}{Q}$ | 第7章, 问题20 |
| 电容 | | |
| 电容的并联 | $C_T = C_1 + C_2 + \dots + C_N$ | 第1章, 小结 |
| 电容的串联 | $\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N}$, 或者 $C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_N}}$, 或者 $C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ (两个电容时) | 第1章, 小结 |
| 频率 | $f = \frac{1}{T}$ | 第5章, 问题7 |
| 谐振频率 (串联LC电路) | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ | 第7章, 问题6 |
| 谐振频率 (并联LC电路) | $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 - \frac{r^2 C}{L}}$ (Q 小于10) $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ($Q \geq 10$) | 第7章, 问题10 |
| 增益 | | |
| 电压增益 | $A_V = \frac{V_{out}}{V_{in}}$ | 第8章, 问题9 |
| 电流增益 | $\beta = \frac{I_C}{I_B}$ | 第3章, 问题17 |
| 阻抗 | $Z = \sqrt{X_C^2 + R^2}$ | 第6章, 问题8 |
| 相移 | | |
| 相角 (RC电路) | $\tan \theta = \frac{X_C}{R} = \frac{1}{2\pi f RC}$ | 第6章, 问题23 |
| 相角 (LC电路) | $\tan \theta = \frac{X_L}{R} = \frac{2\pi f L}{R}$ | 第6章, 问题35 |

(续)

| 参 数 | 公 式 | 章 (出处) |
|-------------|---|-----------|
| Q 值 | $Q = \frac{X_L}{R}$ | 第7章, 问题20 |
| 电阻 | | |
| 电阻的并联 | $\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}$, 或者 $R_T = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_N}}$, 或者 $R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ (两个电阻时) | 第1章, 小结 |
| 电阻的串联 | $R_T = R_1 + R_2 + \dots + R_N$ | 第1章, 小结 |
| 功率 | $P = VI$, 或者 $P = I^2 R$, 或者 $P = \frac{V^2}{R}$ | 第1章, 小结 |
| 电抗 | | |
| 容抗 | $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ | 第5章, 问题13 |
| 感抗 | $X_L = 2\pi f L$ | 第5章, 问题16 |
| 时间常数 | $\tau = RC$ | 第1章, 小结 |
| 匝比 | $TR = \frac{N_p}{N_s}$ | 第11章, 问题7 |
| 电压 | | |
| 欧姆定律 (直流) | $V = IR$ | 第1章, 小结 |
| 欧姆定律 (交流) | $V = IZ$ | 第6章, 问题8 |
| 分压器 | $V_i = \frac{V_s R_i}{R_T}$ | 第1章, 小结 |
| 峰峰值电压 (正弦波) | $V_{pp} = 2V_p = 2 \times \sqrt{2} \times V_{rms}$ $= 2.828 \times V_{rms}$ | 第5章, 问题4 |
| RMS电压 (正弦波) | $V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times V_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{V_{pp}}{2}$ $= 0.707 \times \frac{V_{pp}}{2}$ | 第5章, 问题4 |
| 变压器输出电压 | $V_{out} = \frac{V_{in} N_s}{N_p}$ | 第11章, 问题7 |

附录 C

本书使用的原理图符号

下表列出了本书使用的原理图符号。

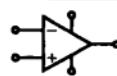
| 元 件 | 符 号 |
|---------|--|
| 电池 |  |
| 电容 |  |
| 二极管 | |
| | 普通二极管  |
| | 齐纳二极管  |
| 发电机（直流） |  |
| 地 |  |
| 电感器 |  |
| 灯泡 |  |
| 仪表 | |
| | 仪表  |
| | 安培表  |
| | 电压表  |
| 电机 |  |

(续)

元 件

符 号

运算放大器



电阻器

电阻器



可变电阻器（电位计）



信号发生器（正弦波）

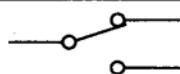


开关

单刀单掷（SPST）开关



单刀双掷（SPDT）开关



变压器

变压器



带有中间抽头的变压器



晶体管

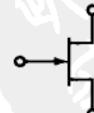
NPN型三极管



PNP型三极管



N沟道JFET



P沟道JFET

