第3章 电压比较器和乘法器

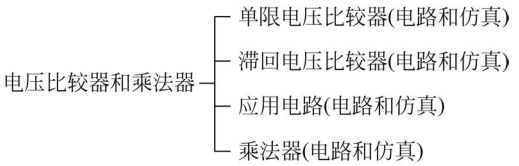
CHAPTER 3

集成电压比较器是一种重要的模拟集成电路，它的基本功能是对两个输入电压进行比较，并根据比较结果输出高电平或低电平。比较器的输入信号是连续变化的模拟量，而输出信号是数字量0或1。因此，比较器可以作为模拟电路和数字电路的接口电路。

模拟乘法器是实现两个模拟量相乘的非线性电子器件，它也是一种模拟集成电路，下面仅作为一个电路模块，介绍它的各种应用。

Multisim仿真分析： 瞬态分析、直流分析

本章知识结构图



微课视频

3.1 单限电压比较器

单限电压比较器是电压比较器最基本的应用形式。

3.1.1 电路

电路如图3-1所示。其中，图3-1(a)是在比较器的反相端接参考电压V_{REF}，同相端接输入电压v_I，以同相端的输入电压与反相端的参考电压比较，即同相单限电压比较器。图3-1(c)是在比较器的同相端接参考电压V_{REF}，反向端接输入电压v_I，以反相端的输入电压与同相端的参考电压比较，即反相单限电压比较器。

根据图3-1(a)和图3-1(c)，对于同相比较器来说，有

当$v_I > V_{REF}$时，$v_O = +V_{Om}$

当$v_I < V_{REF}$时，$v_O = -V_{Om}$

对于反相比较器来说，有

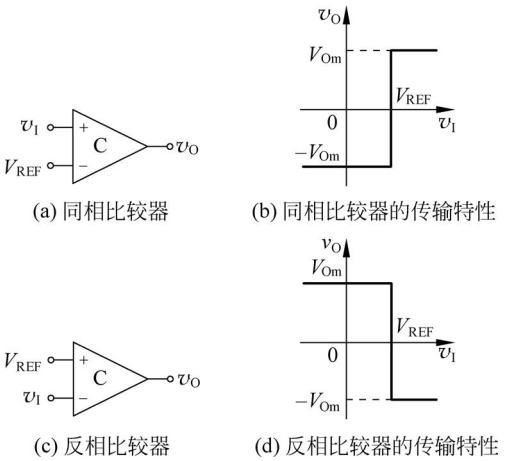
当$v_I > V_{REF}$时，$v_O = -V_{Om}$

当$v_I < V_{REF}$时，$v_O = +V_{Om}$

它们的电压传输特性分别如图3-1(b)和图3-1(d)所示。电路的门限电压$V_T = V_{REF}$，这里假设参考电压V_{REF}为正值。

3.1.2 仿真

实例 电压比较器如图3-2(a)所示，求出它的门限电压，画出其电压传输特性。



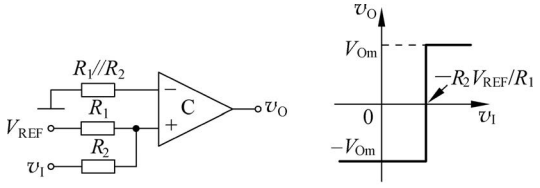
(a) 同相比较器　(b) 同相比较器的传输特性

(c) 反相比较器　(d) 反相比较器的传输特性

图 3-1　电压比较器两种最基本的应用形式

解析　利用叠加原理，可得

$$v_P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_I$$



(a) 电路　(b) 传输特性

图 3-2　电压比较器

因 v_P 与 v_N(=0)比较，故令 $v_P=0$，可求得门限电压，即

$$R_2 V_{REF} + R_1 v_I = 0$$

于是，门限电压

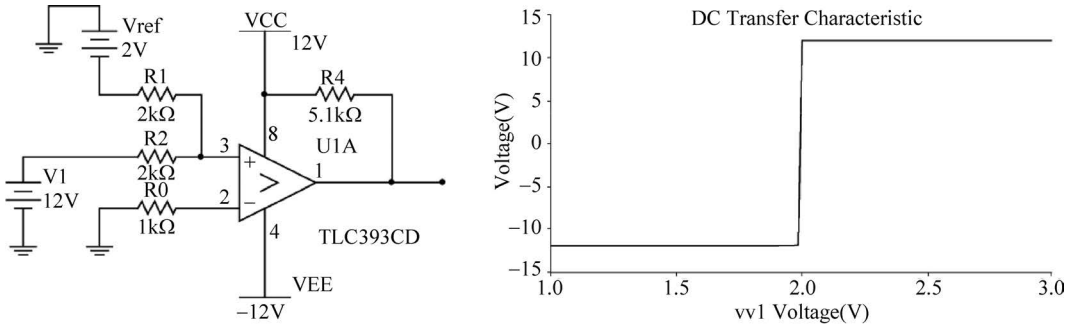
$$V_T = v_I = -\frac{R_2}{R_1} V_{REF}$$

当 $v_P>0$，即 $v_I>-\frac{R_2}{R_1}V_{REF}$ 时，输出为 V_{Om}；同理，当 $v_I<-\frac{R_2}{R_1}V_{REF}$ 时，输出为 $-V_{Om}$。由此，可画出图 3-2(a)的电压传输特性，如图 3-2(b)所示。这里令 $V_{REF}<0$。

仿真图如图 3-3(a)所示。图中，比较器采用集成电压比较器 TLC393CD，其输出端为集电极开路输出，须经上拉电阻 R_4 接电源 $+V_{CC}$，参考电压 V_{REF} 为 −2V。通过对 V1 的 DC 扫描，得到的电压传输特性如图 3-3(b)所示。仿真测试：输出电压最大值为 12.000 0V，最小值为 −11.895 4V；门限电压为 1.992 6V，与理论值 2V 基本吻合。

1. 过零电压比较器

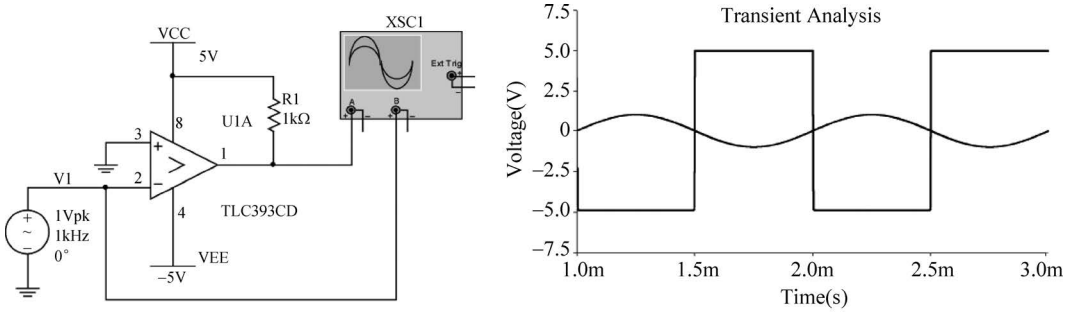
当门限电压 $V_{REF}=0$ 时，称其为过零电压比较器。图 3-4(a)给出了采用 TLC393CD 构成的过零电压比较器。为讨论问题方便，输入模拟信号以正弦波为例。图中，将同相端接地，反相端输入信号，构成反相输入过零比较器。在输入端加入电压幅值 1V、频率 1kHz 的正弦波信号，通过比较器后的输出波形为方波，如图 3-4(b)所示。图中，细线为输入波形，粗线为输出波形。仿真测试：输出高电平为 5.007 9V，输出低电平为 −4.871 3V，实现了过零比较器的



(a) 仿真图　　(b) 传输特性

图 3-3　比较器实例仿真

基本功能，即输入信号 v_I 与零的比较，当 $v_I>0$ 时，输出为低电平；当 $v_I<0$ 时，输出为高电平。



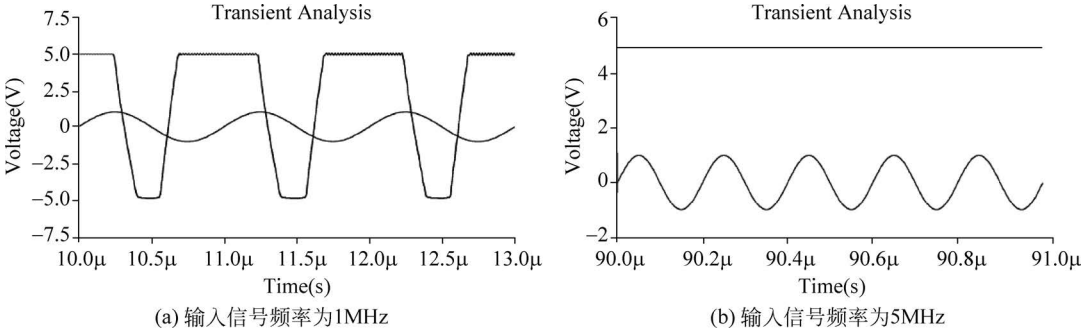
(a) 仿真图　　(b) 输入/输出波形

图 3-4　反相输入过零电压比较器

可见，过零比较器可作为零电平检测电路，也可以用于波形的“整形”，即将不规则的输入波形整形为规则的输出波形。

2. 响应时间对输出波形的影响

一个比较器是否能够正确地实现其功能，与它的一个重要指标——响应时间，有很大关系，即响应时间对输出波形的影响很大。下面以图 3-4(a)所示电路为例，在其输入端加入不同频率的正弦波信号，观察其输出信号波形的变化情况。输入信号的频率分别为 1kHz、1MHz 和 5MHz，输出波形分别如图 3-4(b)、图 3-5(a)和图 3-5(b)所示。



(a) 输入信号频率为1MHz　　(b) 输入信号频率为5MHz

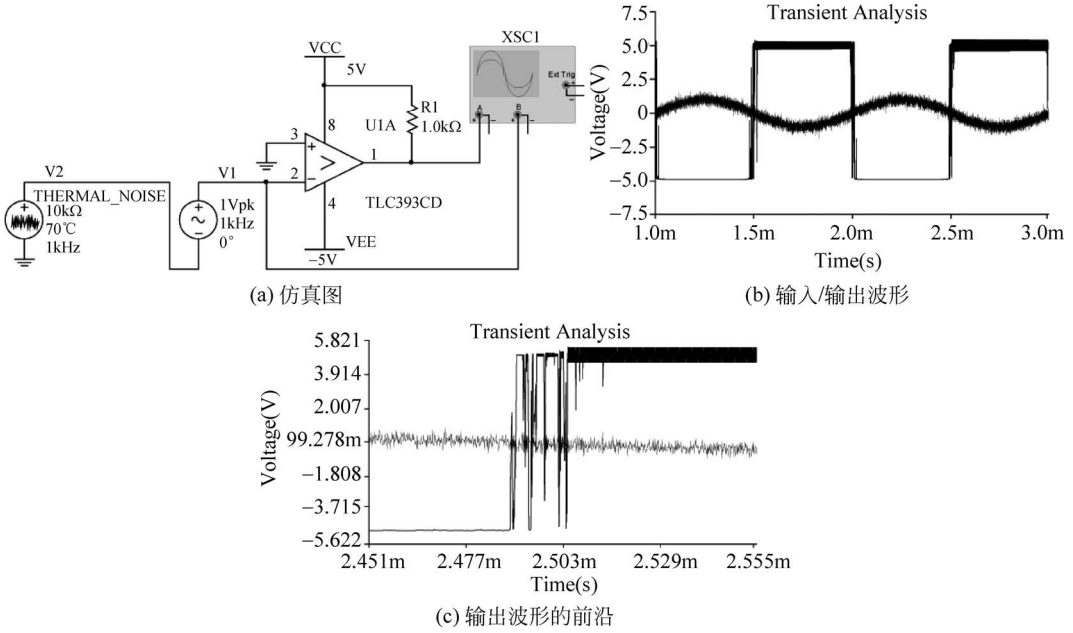
图 3-5　不同频率输入信号时的输出波形比较

可以看出，输入信号频率为 1kHz 时，比较器输出为方波；输入信号频率为 1MHz 时，比较器的响应时间对输出波形产生较大的影响，输出方波的上升沿和下降沿明显变差了，且输出

波形已不再是方波；输入信号频率为 5MHz 时，输出波形几乎为一条直线，说明信号的半周期已经小于比较器的响应时间，致使比较器的输出状态来不及翻转。因此，在实际应用中选择器件时，要特别注意器件的参数是否满足要求。

3. 噪声对输出波形的影响

我们知道，实际的信号并不像上述波形那样“纯”，这是因为信号在传输过程中要受到干扰或噪声的影响。当这样的信号进行电压比较时，就会在门限电压附近上下波动，造成比较器误判断，从而使输出电压在高、低电平之间反复跳变，这不仅导致输出波形异常，而且有可能对后续电路造成影响。图 3-6 给出了含噪声正弦波通过过零比较器的仿真电路及其输出波形。图中，用一个热噪声源与信号源串联，来模拟含噪声正弦波。通过过零比较器的输出波形如图 3-6(b)所示，其前、后沿明显出现了错误的跳变。输出波形的前沿如图 3-6(c)所示。这是我们不希望看到的。



(a) 仿真图　　(b) 输入/输出波形

(c) 输出波形的前沿

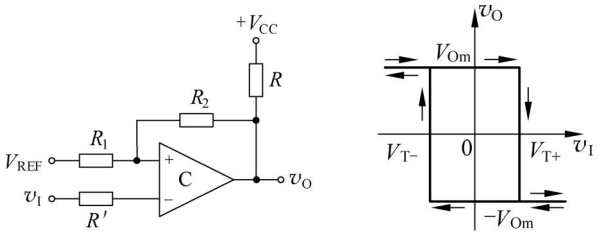
图 3-6　含噪声正弦波通过过零比较器的情况

3.2　滞回电压比较器

为了克服图 3-1(a)和图 3-1(c)单限电压比较器的不足，我们在电路中引入正反馈，一是正反馈加速了输出状态的转换，从而改善了输出波形的前后沿；二是通过正反馈，将输出的两个状态送回比较器的同相端，将单限比较器变为具有上、下门限的滞回比较器，从而使比较器具有很强的抗干扰能力，可以说是一举两得。

3.2.1　电路

反相输入滞回电压比较器及其传输特性如图 3-7 所示。图中，参考电压 V_{REF} 通过电阻 R_1 作用于比较器的同相端，同时，输出电压 v_O 通过电阻 R_2 也作用于比较器的同相端，构成正反馈；输入信号 v_I 通过电阻 $R'(R_1//R_2)$作用于比较器的反相端，即为反相输入滞回电压比较器。



(a) 电路　　(b) 传输特性

图 3-7　反相输入滞回电压比较器及其传输特性

令 $V_{REF}=0$，电路的上门限电压 V_{T+} 和下门限电压 V_{T-} 分别为

$$V_{T+}=+\frac{R_1}{R_1+R_2}V_{Om}$$

$$V_{T-}=-\frac{R_1}{R_1+R_2}V_{Om}$$

反相输入滞回比较器完整的电压传输特性如图 3-7(b)所示。可以看出，只要输入电压 v_I 满足 $V_{T-}<v_I<V_{T+}$，输出电压将保持原来的状态，即电路具有“记忆”功能；只有当 v_I 增大到 V_{T+} 以上或下降到 V_{T-} 以下时，输出才会转换状态。特别注意，曲线是具有方向性的。

滞回比较器的上门限电压 V_{T+} 与下门限电压 V_{T-} 之差称为回差，用 ΔV 来表示，即

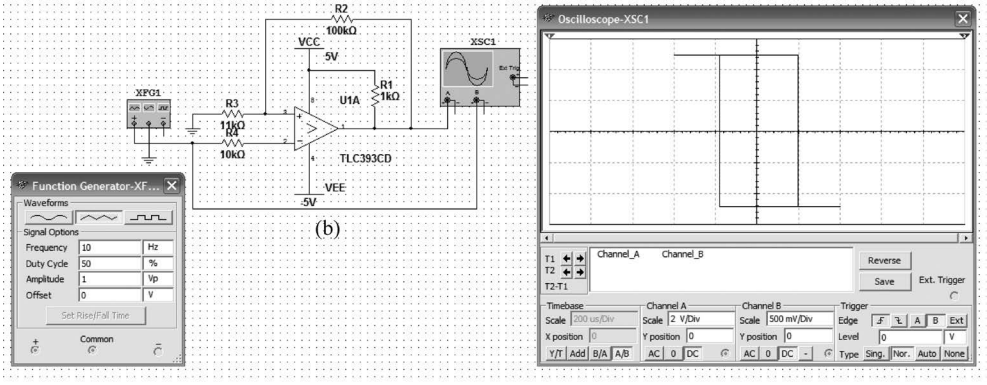
$$\Delta V=V_{T+}-V_{T-}=\frac{2R_1}{R_1+R_2}V_{Om}$$

由此可见，正是由于回差的存在，才使得滞回比较器输出状态的跳变，不再是发生在同一个输入信号的电平上，这样，当含噪声信号作用于比较器时，只要噪声信号的幅度不大于回差，则噪声就不会导致比较器输出状态的误跳变。

3.2.2　仿真

实例　根据实际情况设计一个滞回比较器。首先对噪声的幅度进行估测，约为 950mV，所以，设计比较器的回差约为 1V。参考图 3-7(a)，已知 $V_{Om}=5V$，取 $R_2=100k\Omega$，可求得 $R_1\approx11k\Omega$。

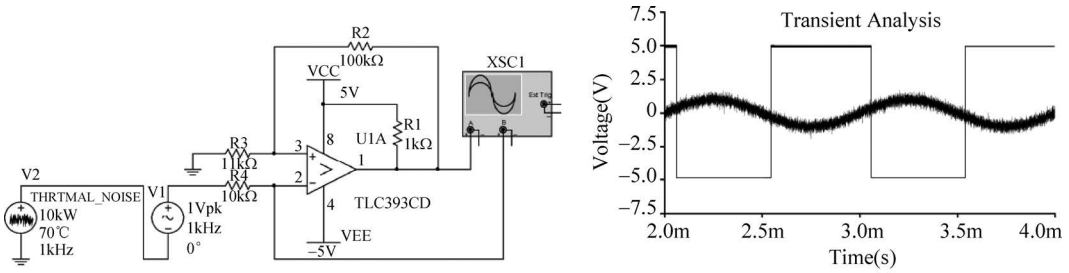
首先测试电压传输特性。在比较器的输入端接入三角波，以实现输入电压的正向和负向扫描；示波器设置为 A/B 状态，即 A 通道(纵轴)接输出电压，B 通道(横轴)接输入电压，示波器的其他选择如图 3-8(a)所示，可以得到滞回比较器的电压传输特性，如图 3-8(c)所示。



(a)　　(b)　　(c)

图 3-8　电压传输特性测量

对图 3-8 所示电压传输特性进行测量，测得其回差约为 0.982 7V，输出高电平为 4.955V，输出低电平为－4.871V，基本满足设计要求。含噪声正弦波通过滞回比较器的仿真电路及其输出波形如图 3-9(a)和图 3-9(b)所示。可以看出，输出波形是很规则的矩形波，且波形的前后沿也很陡峭。



(a) 电路　　(b) 输入/输出波形

图 3-9　含噪声正弦波通过滞回比较器的情况

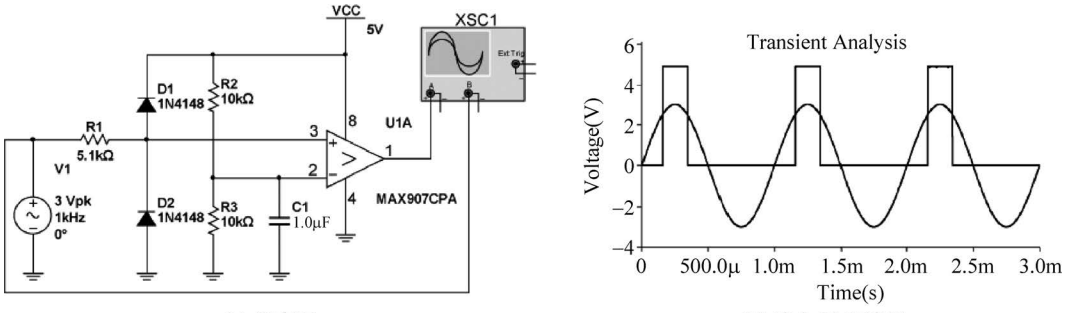
3.3　应用电路

在实际应用中，要根据需要，如采用单电源供电模式、利用运算放大器的非线性作比较器等，选用不同的集成芯片，并在电路中适当添加辅助电路，以提高电路的适应能力。下面将以实际的集成芯片为例，通过仿真来了解电路的结构和特性。

1. 单电源供电的比较器电路

1) 单限比较器

图 3-10(a)是由集成电压比较器构成的单电源供电模式下的单限比较器。图中，MAX907CPA 采用单＋4.5V～＋5.5V 电源电压供电，其输出高、低电平的典型值分别为 3.5V 和 0.3V，直接与 TTL 电平兼容。利用电阻 R_2、R_3 将电源电压＋V_{CC} 分压，得到该比较器的门限电压为＋$\dfrac{R_3}{R_2+R_3}V_{CC}$＝＋2.5V，这里的电容 C_1 为旁路电容，其作用是防止噪声引起比较器的误动作；输入信号经过电阻 R_1 加到比较器的同相端，这里的二极管 D1、D2 构成比较器输入端保护电路。图 3-10(b)给出了仿真输入(细线)、输出(粗线)波形。测试结果：门限电压为 2.496 0V，输出高电平为 4.928 4V，低电平为 18.229 7mV。



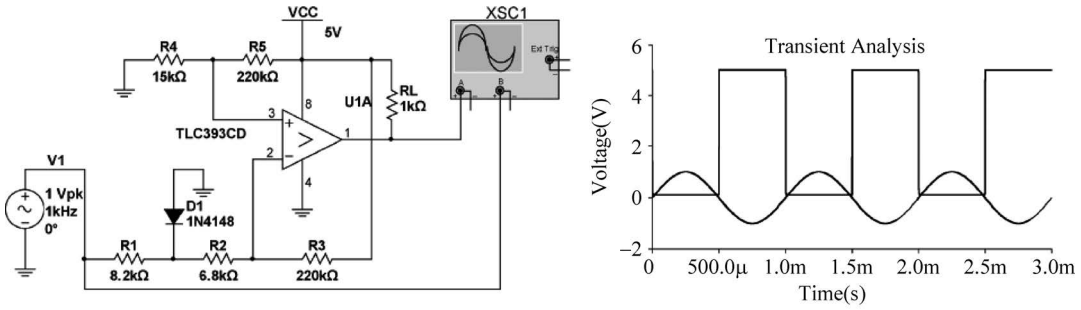
(a) 仿真图　　(b) 输入/输出波形

图 3-10　单电源供电的单限比较器

2) 过零比较器

图 3-11(a)是由集成电压比较器构成的单电源供电模式下的过零比较器。图中，

TLC393CD 可采用单电源或双电源供电，其输出高、低电平可以与 TTL、MOS 和 CMOS 电平兼容，这里采用单电源供电。首先利用电阻 R_4、R_5 将电源电压 $+V_{CC}$ 分压，由此得到比较器的同相端电压 $v_P=+\dfrac{R_4}{R_4+R_5}V_{CC}$，这是在单电源模式下为比较器内部电路提供一个工作电压而设置的；同理，将对应的相同阻值电阻接于反相端；输入信号 v_I 经过电阻 R_1、R_2 加到比较器的反相端，这样，反相端电压为 $v_N=\dfrac{R_1+R_2}{R_1+R_2+R_3}V_{CC}+\dfrac{R_3}{R_1+R_2+R_3}v_1$。当 $v_P=v_N$ 时，此时的输入电压即为比较器的门限电压。根据图中数据，可求得门限电压 $V_T=v_1=0$，也就是说，该电路为过零比较器。图中的二极管 D1 构成比较器输入端负向限幅电路。由于 TLC393CD 为集电极开路输出，故接有电阻 R_L 对电源电压 V_{CC}。图 3-11(b)给出了仿真输入(细线)、输出(粗线)波形。测试结果：门限电压为 7.737 8mV，输出高电平为 4.997 9V，低电平为 105.890 9mV。



(a) 仿真图　　(b) 输入/输出波形

图 3-11　单电源供电的过零比较器

2. 由集成运放构成的电压比较器

在要求工作速度不高的情况下，利用集成运放的非线性，将运放作为电压比较器使用，可构成低速比较器。一般来说，使用集成比较器时，与后续电路的接口是没有问题的，而使用运放时，输出电平通常比较高，为了适应数字电路的逻辑电平，则需要使用接口电路。

1) 滞回比较器

图 3-12(a)给出了由集成运放 741 构成的单电源供电的反相滞回比较器。图中，运放 741 采用单电源 +5V 供电。利用电阻 R_2、R_4 将电源电压 +5V 分压，得到 2.5V，为运放内部电路提供一个工作电压。根据叠加定理，可得到运放的同相端电压为

$$v_P=\frac{R_2//R_3}{R_4+R_2//R_3}V_{CC}+\frac{R_2//R_4}{R_3+R_2//R_4}v_O$$

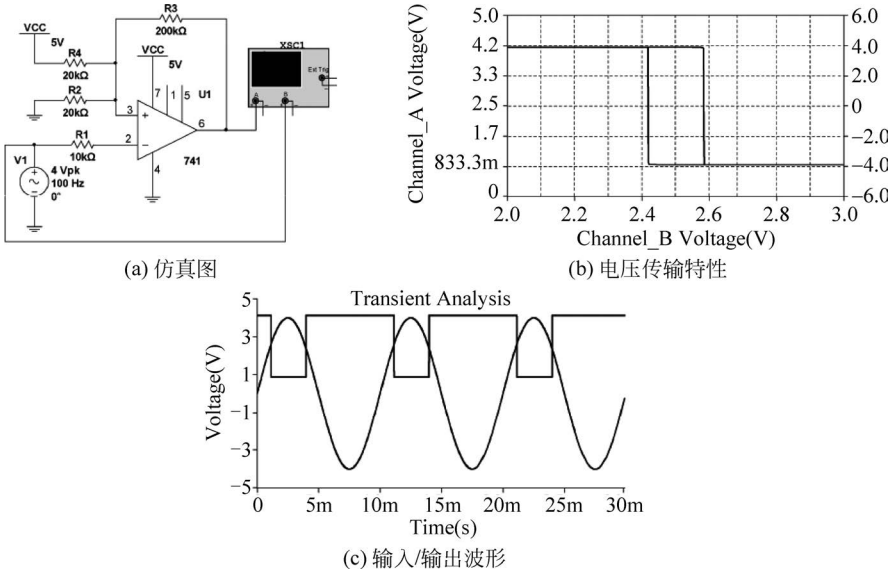
输入信号 v_1 通过电阻 R_1 加到运放的反相端，即 $v_1=v_N$。当 $v_P=v_N$ 时，求得的输入电压即为比较器的门限电压，考虑到输出的高电平 V_{oH} 和低电平 V_{oL}，于是，有

$$V_{T+}=\frac{R_2//R_3}{R_4+R_2//R_3}V_{CC}+\frac{R_2//R_4}{R_3+R_2//R_4}V_{oH}$$

$$V_{T-}=\frac{R_2//R_3}{R_4+R_2//R_3}V_{CC}+\frac{R_2//R_4}{R_3+R_2//R_4}V_{oL}$$

利用示波器得到该比较器的电压传输特性如图 3-12(b)所示。仿真测试：输出的高电平约为 4.118 0V，低电平约为 0.881 8V，回差为 164.226 6mV，上门限电压 $V_{T+}=2.582\ 4$V，下门限电压 $V_{T-}=2.418\ 2$V，而利用图中数据，可求得上门限电压 $V_{T+}=2.577\ 0$V，下门限电压 $V_{T-}=$

2.422 9V，与仿真测试值基本吻合。图 3-12(c)给出了仿真输入(细线)、输出(粗线)波形。



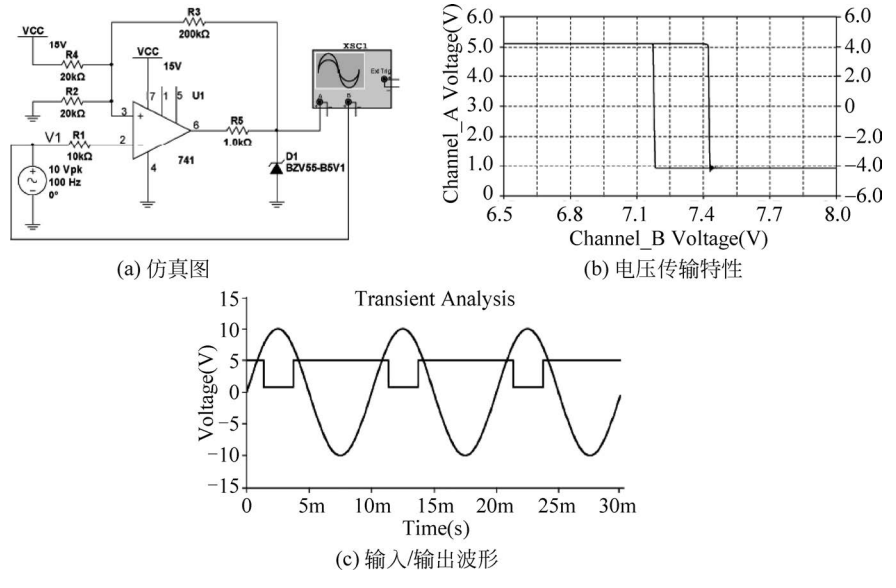
(a) 仿真图　(b) 电压传输特性

(c) 输入/输出波形

图 3-12　由集成运放构成的单电源供电滞回比较器

2) 带限幅电路的滞回比较器

若供电电压较高，如 15V，则电路输出端需接入限幅电路，限制输出电压的幅度，以便更好地适应后续的数字电路。电路如图 3-13(a)所示。图中，电阻 R_5 和稳压管 D1 构成最简单的单向限幅电路，正反馈电阻 R_3 的右端接于限幅输出端。仿真得到的电压传输特性和输入输出波形分别如图 3-13(b)和图 3-13(c)所示。仿真测试：输出的高电平约为 5.104 9V，低电平约为 0.928 8V，上门限电压 $V_{T+}=7.423\ 4$V，下门限电压 $V_{T-}=7.177\ 4$V，回差为 246mV。



(a) 仿真图　(b) 电压传输特性

(c) 输入/输出波形

图 3-13　单电源供电的带限幅电路的滞回比较器

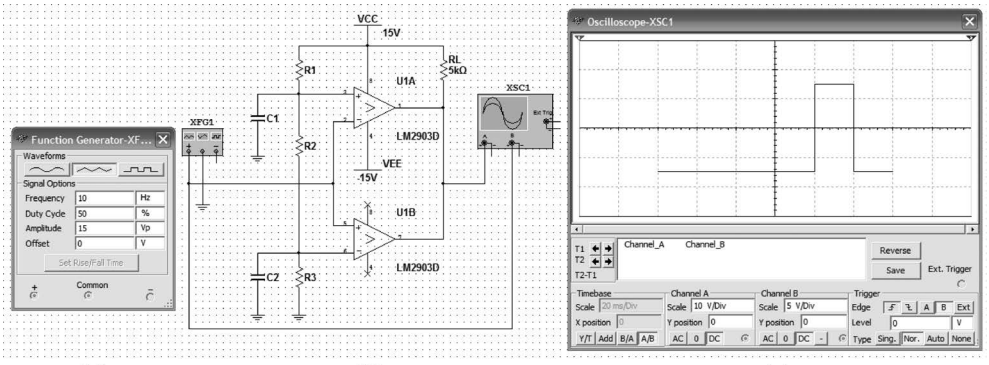
3. 窗口比较器

图 3-14 给出了由双集成电压比较器 LM2903D 构成的窗口比较器。可以看出，电路由两个单限比较器构成，输入电压 v_I 加在 U1A 的反相端和 U1B 的同相端，电阻 R_L 为二比较器

输出晶体管集电极的上拉电阻；电阻 R_1、R_2 和 R_3 将电源电压 V_{CC} 分压，分别得到上门限电平 V_{refH} 和下门限电平 V_{refL}，分别加在 U1A 的同相端和 U1B 的反相端，显然，$V_{refH}>V_{refL}$。它们由以下表达式给出，即

$$V_{refH}=\frac{R_2+R_3}{R_1+R_2+R_3}V_{CC}$$

$$V_{refL}=\frac{R_3}{R_1+R_2+R_3}V_{CC}$$



(a) (b) (c)

图 3-14　由双集成电压比较器 LM2903D 构成的窗口比较器

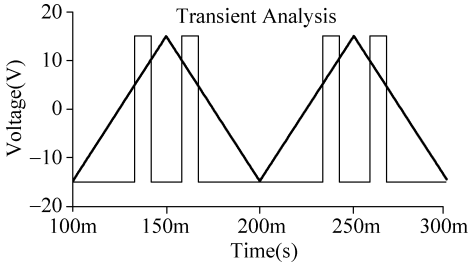
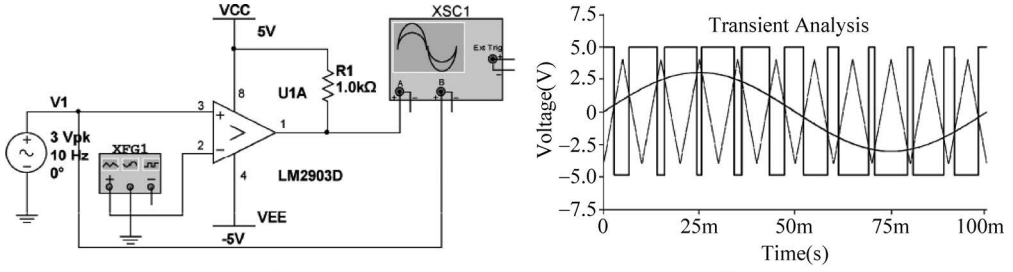


图 3-15　窗口比较器输入三角波的输出波形

这里取 $R_1=R_2=R_3$，可得 $V_{refH}=10V$，$V_{refL}=5V$，利用示波器仿真，得到此时窗口比较器的传输特性如图 3-14(c)所示。当输入三角波时，其输出波形如图 3-15 所示。

4. PWM 调制电路

在 D 类放大电路和开关电源电路中，需使用一种电路——PWM(Pulse Width Modulation)电路，即脉宽调制电路。这种电路是在基本比较器中，将参考电压改为三角波，输入信号如为正弦波，则随着输入信号的变化，输出矩形波的脉宽也随之变化。图 3-16 给出了 PWM 电路和输入/输出波形。



(a) 仿真图　　(b) 输入/输出波形

图 3-16　PWM 电路和输入/输出波形

3.4　乘法器

根据乘法运算的基本要求，模拟乘法器有两个输入端和一个输出端，输入电压和输出电压

均对“地”而言，其电路符号如图 3-17(a)所示。其中，输入的两个模拟信号是互不相干的，输出信号是它们的乘积，表示为

$$v_O = k v_X v_Y$$

式中，k 为乘积增益，其单位为 V^{-1}。

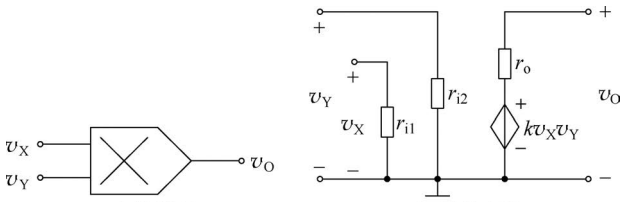


图 3-17　模拟乘法器

模拟乘法器的等效电路如图 3-17(b)所示。其中，r_{i1} 和 r_{i2} 分别为两个输入端的输入电阻，r_o 为输出电阻。对于理想模拟乘法器而言，r_{i1} 和 r_{i2} 应为无穷大，r_o 为零；k 为定值，且当 v_X 或 v_Y 为零时，v_O 也为零。

3.4.1　电路

1. 乘方运算电路

乘方运算电路如图 3-18 所示。输出电压为

$$v_O = k v_I^2$$

若输入电压为正弦波，即 $v_I = \sqrt{2} V_i \sin\omega t$，则输出电压为

$$v_O = 2kV_i^2 \sin^2\omega t = kV_i^2 - kV_i^2 \cos 2\omega t$$

式中，第一项为直流信号，第二项为输入信号的二倍频信号。

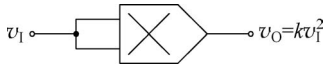


图 3-18　乘方运算电路

可通过输出端的耦合电容隔离直流信号，从而得到二倍频信号，此时的电路称为倍频电路。

2. 除法运算电路

将模拟乘法器置于集成运放的反馈支路中，便可构成除法运算电路，如图 3-19 所示。

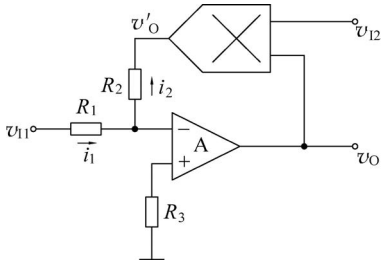


图 3-19　除法运算电路

值得注意的是，用运放和模拟乘法器构成运算电路时，必须保证运放引入的是负反馈。就图 3-19 所示电路来说，当 $i_1 = i_2$ 时，电路即引入了负反馈。具体地说，当 $v_{I1} > 0$ 时，$v'_O < 0$；当 $v_{I1} < 0$ 时，$v'_O > 0$。而 v_{I1} 与 v_O 反相，故要求 v'_O 与 v_O 同相。因此，当模拟乘法器为反相乘法器(k 小于零)时，v_{I2} 应小于零；当为同相乘法器(k 大于零)时，v_{I2} 应大于零，即 v_{I2} 应与 k 同符号。

根据运放的基本分析方法，有

$$\frac{v_{I1}}{R_1} = -\frac{v'_O}{R_2} = -\frac{k v_O v_{I2}}{R_2}$$

整理后可得到输出电压

$$v_O = -\frac{R_2}{kR_1}\frac{v_{I1}}{v_{I2}}$$

由于 v_{I2} 的极性受 k 的限制，故图 3-19 所示电路是一个两象限除法运算电路。

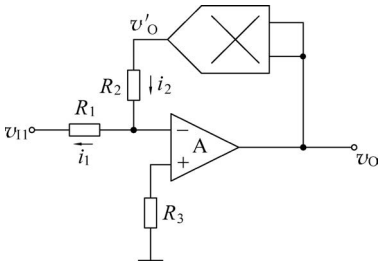


图 3-20　开方运算电路

根据运放的分析方法：

对于前一种情况，有

$$-\frac{v_{I1}}{R_1}=\frac{v'_O}{R_2}=\frac{kv_O^2}{R_2}$$

即

$$v_O=\sqrt{-\frac{R_2}{kR_1}v_{I1}}$$

对于后一种情况，有

$$-\frac{v_{I1}}{R_1}=\frac{v'_O}{R_2}=\frac{kv_O^2}{R_2}$$

即

$$v_O=-\sqrt{-\frac{R_2}{kR_1}v_{I1}}$$

在前一种情况中，若 $v_{I1}>0$，则 v'_O 依然大于零，会导致电路的反馈变为正反馈，从而使电路不能正常工作；同理，在后一种情况中，若 $v_{I1}<0$，则 v'_O 依然小于零，会导致电路的反馈变为正反馈，从而使电路也不能正常工作。因此，在实际电路中，需在运放的输出端接入一个二极管，如图 3-21 所示，以保证只有在 $v_{I1}<0$ 时电路才能正常工作。图中电阻 R_L 为二极管提供直流通路。

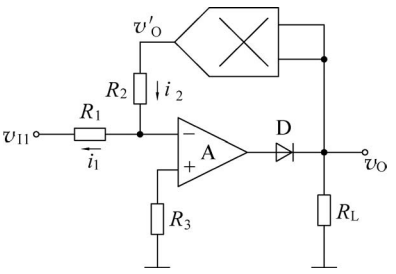


图 3-21　实用开方运算电路

3.4.2　仿真

1. 倍频电路

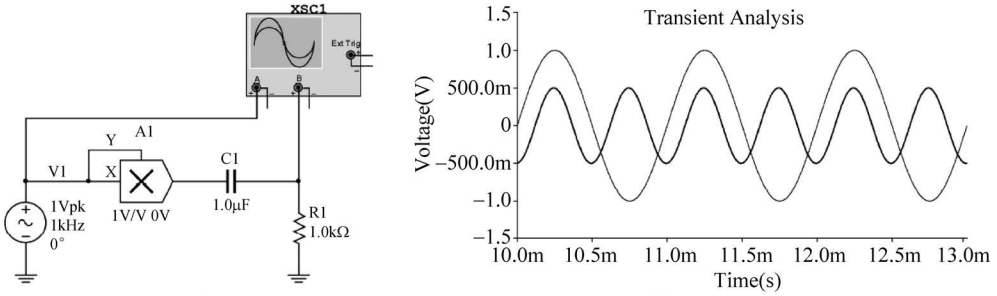
选择仿真库中的乘法器，其输出增益、X 增益和 Y 增益均设为 1V/V。在输入端加入峰值为 1V、频率为 1kHz 的正弦信号，输出端接入耦合电容和负载，通过瞬态分析，得到输入（细线）和输出（粗线）波形，如图 3-22 所示。可以看出，输出信号的频率为输入信号的 2 倍，而幅度为输入信号的一半。

2. 除法运算电路

除法电路仿真图如图 3-23 所示。因为 V_2 应与乘法器 k 同号，所以取 V_2 为正值。当 V_1 为 12V 时，输出电压为 −2.4V，如图 3-23(a)所示；当 V_1 为 −12V 时，输出电压为 2.4V，如图 3-23(b)所示，与理论值吻合得很好。

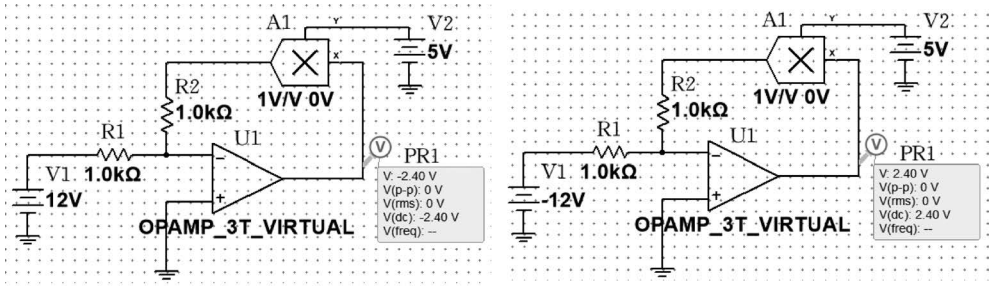
3. 开方运算电路

开方运算电路仿真图如图 3-24 所示。由于乘法器为同相乘法器，故 V_1 必须小于零，则输



(a) 仿真图　　(b) 输入/输出波形

图 3-22　倍频电路的仿真



(a) V_1为12V　　(b) V_1为−12V

图 3-23　除法电路仿真图

出电压大于零。当 V_1 为−9V 时，输出电压为 3V，如图 3-24 所示，与理论值吻合得很好。

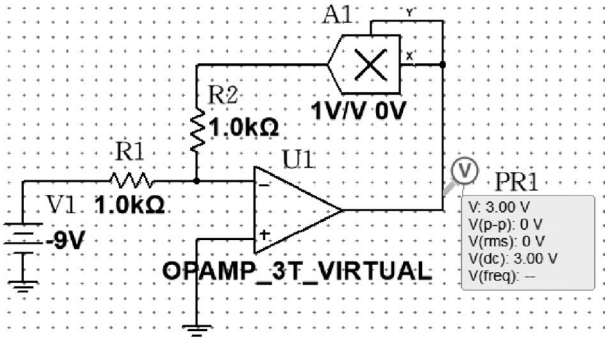


图 3-24　开方运算电路仿真图

更多模拟乘法器应用的介绍，可参见 11.7 节。