

9 脉冲波形的变换与产生

一、内容提要及重点

本章的内容提要：

1. 单稳态触发器工作特点如下

(1) 单稳态触发器没有触发脉冲作用时电路处于一种稳定状态。

(2) 在触发脉冲作用下,电路由稳态翻转到暂稳态。

(3) 电路在持续一段时间后自动回到稳态,暂稳态持续时间取决于电路中的 RC 参数值。

电路主要应用于定时、延时及脉冲的变换等。

2. 单稳态触发器有多种构成形式,如用门电路构成的微分型单稳态触发器、集成单稳态触发器 74121、MC1483 和 555 定时器构成单稳态触发器等。电路的主要参数输出脉冲宽度、最高工作频率、恢复时间等。如微分型单稳态触发器的输出脉冲宽度 $t_w \approx 0.7RC$ 。恢复时间

$$t_{re} = (3 \sim 5)RC, \text{最高工作频率 } f_{\max} = \frac{1}{T_{\min}} < \frac{1}{t_w + t_{re}}$$

3. 施密特触发器属于电平触发方式的电路,其工作特点如下

(1) 当输入达到某一定值时,输出电压发生跳变,由于电路中正反馈的作用,其输出电压波形的边沿很陡。

(2) 电路有两个阈值电压,电压传输特性具有滞回特性。

4. 施密特触发器的构成形式有门电路构成的施密特触发器、集成施密特触发器和 555 定时器构成施密特触发器。电路主要应用于波形变换、整形和幅度的鉴别电路的主要参数有:正向阈值电压 V_{T+} 、负向阈值电压 V_{T-} 、回差电压 ΔV_T 。

正向阈值电压 V_{T+} :输入电压上升时,使电路输出状态发生转换时所对应的输入电压。

负向阈值电压 V_{T-} :输入电压下降时,使电路输出状态发生转换时所对应的输入电压。

回差电压 ΔV_T : $\Delta V_T = V_{T+} - V_{T-}$ 。

如 CMOS 反相器构成的施密特触发器的

$$\text{正向阈值电压} \quad V_{T+} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{TH}$$

$$\text{负向阈值电压} \quad V_{T-} = \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) V_{TH}$$

$$\text{回差电压} \quad \Delta V_T = V_{T+} - V_{T-} = 2 \frac{R_1}{R_2} V_{TH} = \frac{R_1}{R_2} V_{DD}$$

5. 多谐振荡器是一种自激振荡电路。在接通电源后,无需外加信号电路就能自动产生脉冲波形,常用做数字系统作脉冲信号源。电路没有稳态,只有两个暂稳态,因此又称为无稳态电路。

多谐振荡器有门电路和 RC 延迟电路构成的多谐振荡器、施密特触发器构成的多谐振荡器、石英晶体振荡器和 555 定时器构成多谐振荡器。

多谐振荡器的主要参数有:振荡频率、占空比等。

6. 555 定时器是一种数-模混合的中规模集成电路,只要简单外接电路就可以构成施密特触发器、单稳态触发器和多谐振荡器。

本章的重点:

1. 单稳态触发器、施密特触发器和多谐振荡器的工作原理,电路分析及相关参数的计算。
2. 脉冲电路的分析方法。分析的关键在于电容在充、放电过程中,其电压变化对门电路输入电平的影响。

二、典型例题解析

例 9.1 由 CMOS 门组成的单稳态触发器如图 9.1(a) 所示。其中 $V_{DD} = 5V$, $V_{TH} = 0.4V_{DD}$, $C = 1nF$, $V_{OH} \approx 5V$, $V_{OL} \approx 0V$ 。

(1) 设输入 v_i 的波形如图 9.1(b) 所示,试画出 v_{i2} 及 v_o 的波形。

(2) 试确定电阻 R 的值,使输出脉冲宽度为 $10\mu s$ 。

解题思路:① 根据微分型单稳态触发器的工作原理,分析电路的工作过程。明确稳态时 v_{i2} 及 v_o 的电平和当触发脉冲到达时电路状态的变化。画波形时注意逻辑门电路的阈值电压值。

② 根据三要素公式推导出脉冲宽度的公式,然后确定脉冲宽度。

解:(1) 微分型单稳态触发器处于稳态时 $v_{i2} = V_{DD} = 5V$, $v_o = 0V$ 。当触发脉冲的上升沿到来时电路进入暂稳态, v_{i2} 跳变为低电平, v_o 跳变为高电平,电容开始充电。触发脉冲消失,当电容开始充电使 $v_{i2} = V_{TH} = 0.4V_{DD} = 2V$ 时电路从暂稳态返回至稳态。

图 9.1(a) 所示电路中 v_o 及 v_{i2} 的波形如图 9.1(c) 所示。

(2) 由三要素公式可知

$$v_c(t) = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$t = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(t)}$$

当 $t = t_w$ 时, $v_c(t_w) = 0.4V_{DD} = 2V$, $v_c(0^+) = 0$, $v_c(\infty) = 5V$, 代入上式得

$$t_w = RC \ln \frac{5}{3} \approx 0.51RC$$

根据上式可求得

$$R = \frac{t_w}{0.51C} = \frac{10^{-5}}{0.51 \times 10^{-9}} \approx 19.6k\Omega$$

例 9.2 由集成单稳态触发器 74121 所组成的电路及参数如图 9.2(a) 所示,触发输入信号

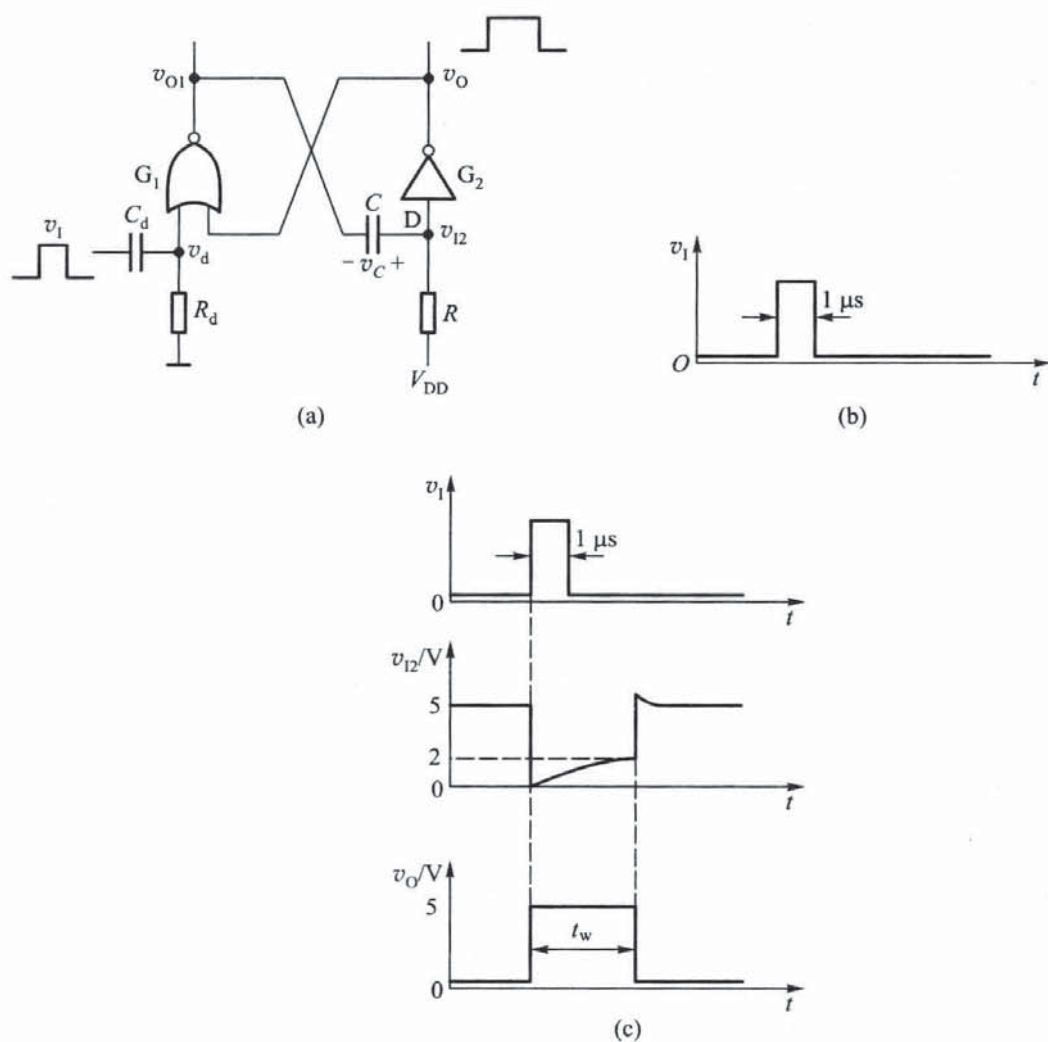


图 9.1

如图 9.2(b) 所示。

(1) 计算在 v_1 作用下 v_{O1} 、 v_{O2} 输出脉冲的宽度。

(2) 画出对应 v_1 的输出 v_{O1} 、 v_{O2} 的波形。

解题思路:① 根据 74121 的功能, 确定每块集成芯片的工作状态。画波形时注意 A_1 、 A_2 为下降沿触发输入端, B 为上升沿触发输入端。

② 根据公式计算 v_{O1} 、 v_{O2} 输出脉冲的宽度。

解:(1) 74121 集成单稳态触发器输出脉冲宽度为

$$t_w \approx 0.7RC$$

将参数代入上式可求得

$$t_{w1} = 0.7 \times 5.5 \times 10^3 \times 1.3 \times 10^{-6} \approx 5 \text{ ms}$$

$$t_{w2} = 0.7 \times 1.1 \times 10^3 \times 1.3 \times 10^{-6} \approx 1 \text{ ms}$$

(2) 稳态时输出 v_{O1} 、 v_{O2} 均为 0。当触发脉冲 v_1 的下降沿到达时, v_{O1} 跳变为高电平, 片(1)进入暂稳态, 在持续 5ms 结束。 v_{O1} 的下降沿使 v_{O2} 跳变为高电平, 片(2)进入暂稳态并持续 1ms 结束。 v_{O1} 、 v_{O2} 的波形如图 9.2(c) 所示。

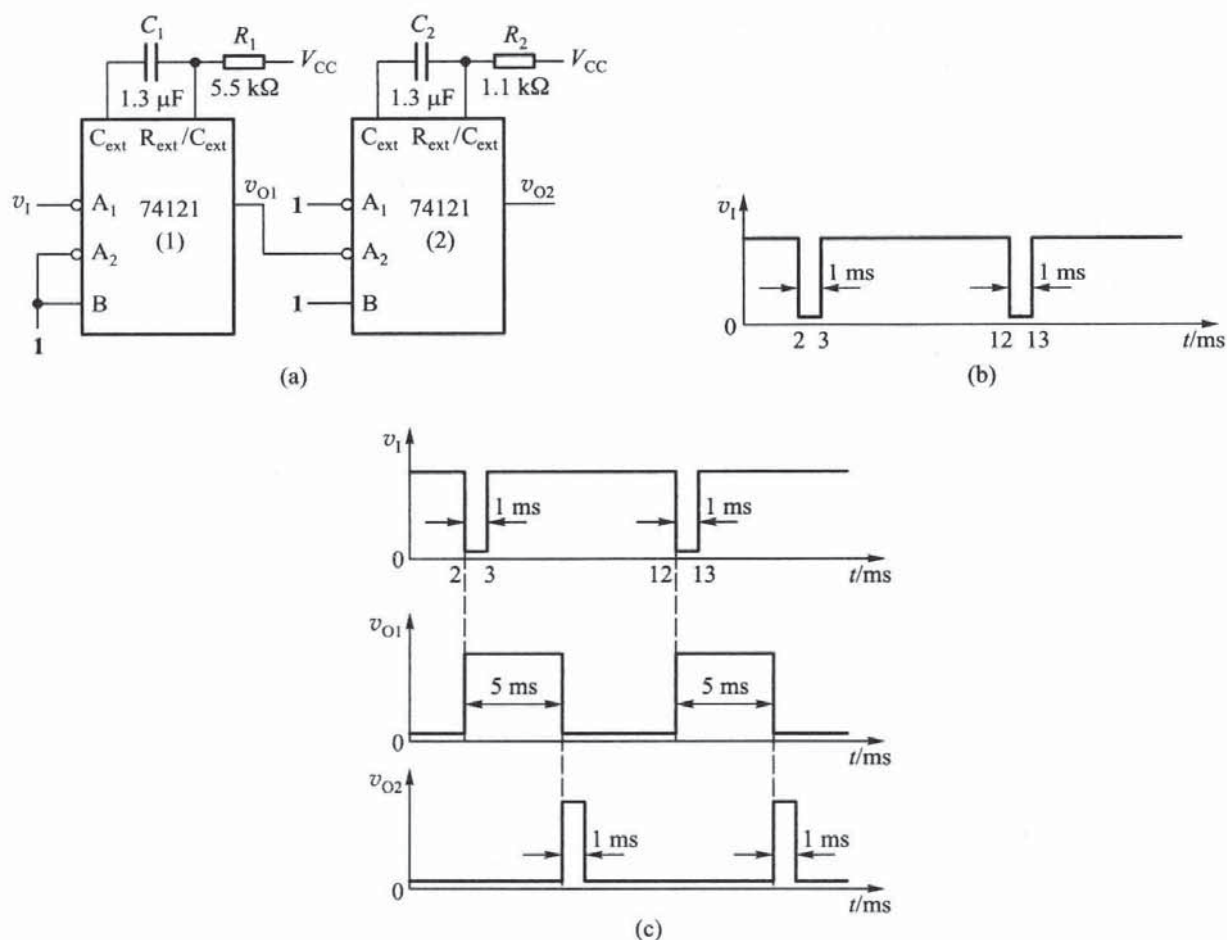


图 9.2 例 9.2 的电路及工作波形

(a) 电路 (b) 输入波形 (c) 工作波形

例 9.3 CMOS 施密特与非门组成的电路如图 9.3(a) 所示, 窄脉冲触发输入信号 v_i 如图 9.3(b) 所示。已知 $R=5\text{k}\Omega$, $C=0.1\text{ }\mu\text{F}$, $V_{\text{DD}}=5\text{V}$, $V_{\text{OH}}\approx 5\text{V}$, $V_{\text{OL}}\approx 0\text{V}$, $V_{\text{T}+}=3.3\text{V}$, $V_{\text{T}-}=1.8\text{V}$ 。

(1) 分析电路的工作原理, 画出 v_c 及 v_o 的波形(两个触发脉冲间隔的时间足够长)。

(2) 计算输出高电平持续的时间。

解题思路: ① 正确分析电路: 电路由施密特与非门和场效应管构成。场效应管截止时电容充电, 导通时电容放电。注意电容充、放电会导致 v_c 的电压的变换, 进而会改变施密特与非门的输出状态。

② 通过分析可知, 输出高电平持续的时间为电容从 $V_{\text{T}-}$ 充电到 $V_{\text{T}+}$ 所需时间, 可根据三要素公式计算输出高电平持续的时间。

解: (1) 触发信号来到之前, v_i 的低电平使场效应管截止, 电容充电到稳态值, $v_c = V_{\text{DD}} = 5\text{V}$ 。施密特与非门的两个输入端均为高电平, 输出 $v_o = 0$ 。电路处于稳定状态,

当正触发脉冲到达时, MOS 管 T 导通, 其导通电阻通常为几十至几百欧。电容 C 通过 MOS 管放电。当 v_c 下降到 $V_{\text{T}-}$ 时, 施密特与非门关闭, 输出 $v_o = 1$, 电路进入暂稳态。

在暂稳态期间触发脉冲已经消失, v_i 的低电平又使 T 截止, V_{DD} 通过 R 向 C 充电, v_c 从 $V_{\text{T}-}$ 开始逐渐增加, 当增加到 $v_c = V_{\text{T}+}$ 时, 输出 $v_o = 0$ 暂稳态结束, 此时下一个触发脉冲没有到来时, T 仍

然截止, v_c 继续充电至 V_{DD} 。分析电路可知图 9.3(a) 所示电路为单稳态触发器。稳态时, 输出低电平; 暂稳态时, 输出高电平。

(2) 根据三要素公式

$$v_c(t) = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

并且 $v_i(0^+) = V_{T-} = 1.8\text{V}$, $v_i(\infty) = V_{DD} = 5\text{V}$, $v_i(t_w) = V_{T+} = 3.3\text{V}$, $\tau = RC$

于是可求出

$$t_w = RC \ln \frac{V_{DD} - V_{T-}}{V_{DD} - V_{T+}} = 5 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6} \ln \frac{5 - 1.8}{5 - 3.3} \approx 0.32\text{ms}$$

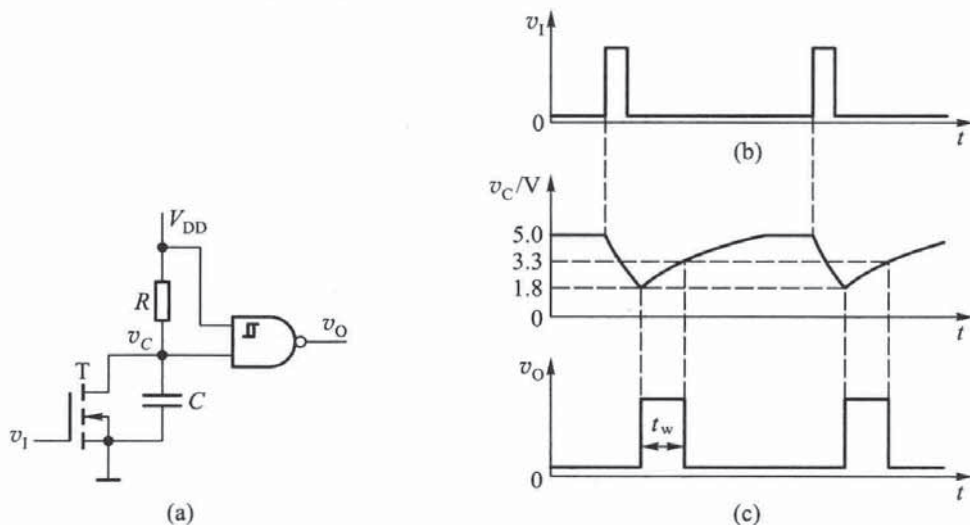


图 9.3 例 9.3 的电路及工作波形

(a) 电路 (b) 输入波形 (c) 输出波形

例 9.4 由 CMOS 施密特与非门构成的门控多谐振荡器如图 9.4(a) 所示。触发控制信号 v_i 如图 9.4(b) 所示。

(1) 分析电路的工作原理, 画出 v_c 及 v_o 的波形。

(2) 试写出该电路各个充、放电时间及振荡频率的表达式。

解题思路: ① 分析电路工作原理。当 $v_i = 0$ 时, 与非门关闭, 输出为高电平。当 $v_i = 1$ 时, 与非门导通, 此时电路为多谐振荡器。电路为可控振荡器。

② 稳态时电容的充、放电时间即为两个暂态维持时间, 可根据三要素公式计算。在确定充、放电时间后即可得到振荡频率的表达式。

解: (1) 当 $v_i = 0$ 时, 与非门关闭, 输出为高电平, 并通过 R 向电容 C 充电至 $v_{cc} = V_{DD}$ 。当 $v_i = 1$ 时, 与非门输出 v_o 跳变为低电平。此后电容 C 开始放电, v_c 下降。当 v_c 下降到 V_{T-} 时, 电路发生翻转, v_o 由低电平跳变为高电平, C 又被重新充电。当 v_c 上升到 V_{T+} 时, 施密特触发器又发生翻转, v_o 又由高电平跳变为低电平, C 又开始放电。如此周而复始, 在输出端得到矩形波, 如图 9.4(c) 所示。

(2) 根据 RC 电路过渡过程可知

$$t = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(t)}$$

当 $t=T_0$ 时, $v_c(T_0)=V_{T-}$, $v_c(0^+)=V_{DD}$, $v_c(\infty)=0$, 代入上式得

$$T_0 = RC \ln \frac{V_{DD}}{V_{T-}}$$

同理可求得电路振荡稳定时的充、放电时间为

$$T_1 = RC \ln \frac{V_{DD}-V_{T-}}{V_{DD}-V_{T+}}$$

$$T_2 = RC \ln \frac{V_{T+}}{V_{T-}}$$

振荡频率

$$f = \frac{1}{T_1+T_2} = \frac{1}{RC \ln \frac{V_{T+}(V_{DD}-V_{T-})}{V_{T-}(V_{DD}-V_{T+})}}$$

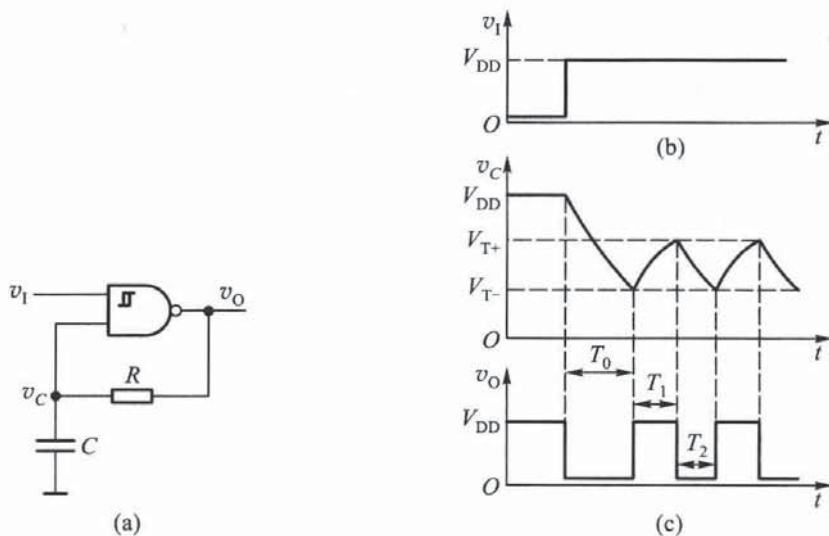


图 9.4

(a) 电路 (b) 输入波形 (c) 工作波形

例 9.5 由 555 定时器组成的电路如图 9.5(a) 所示, 图中 $R_1=R_2=5\text{k}\Omega$, $C=0.01\text{ }\mu\text{F}$, D 为理想二极管。理想运放 A 的供电电压为 $\pm 15\text{V}$, 其他参数如图所示。

(1) 试问 555(0)、555(1) 各组成什么电路;

(2) 画出 v_c 、 v_A 和 v_o 的波形, 并计算出 v_o 的周期。

解题思路: ① 根据电路结构确定电路功能。图 9.5(a) 所示电路包含多谐振荡器、施密特触发器及运放构成的反相加法电路。

② 确定单元电路的功能及相互连接关系, 正确画出 v_c 、 v_A 和 v_o 的波形。

解: (1) 555(0) 组成多谐振荡器, 555(1) 组成施密特触发器。施密特触发器的正向阈值电压 $V_{T+} = \frac{2V_{CC}}{3} = 3.33\text{V}$, 负向阈值电压 $V_{T-} = \frac{V_{CC}}{3} = 1.67\text{V}$

(2) 如果忽略 $50\text{k}\Omega$ 电阻对多谐振荡器充、放电的影响, 可以画出 v_A 的波形。由运放构成的反相加法电路将 v_c 与 -10V 直流电压相加, 得到信号 v_A ($v_A = 10 - v_c$), v_A 为施密特触发器的触发信号, 根据施密特触发器的工作原理, 可以画出输出 v_o 的波形如图 9.5(b) 所示。多谐振荡器充、放

电的时间分别为

$$t_{\text{pH}} = R_1 C \ln 2 \approx 0.7 R_1 C$$

$$t_{\text{pL}} = R_2 C \ln 2 \approx 0.7 R_2 C$$

施密特触发器输出电压 v_o 的周期

$$T \approx 0.7 (R_1 + R_2) C$$

$$= 0.7 \times (5 + 5) \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} = 70 \mu\text{s}$$

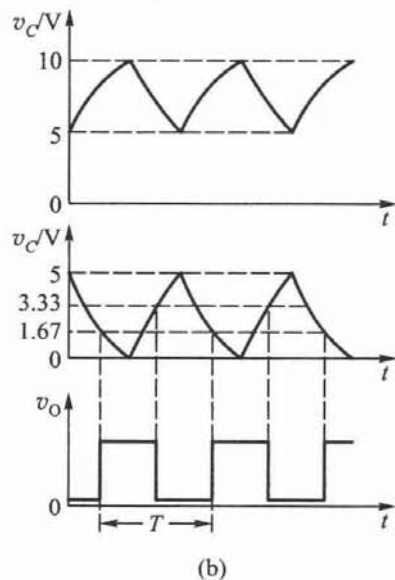
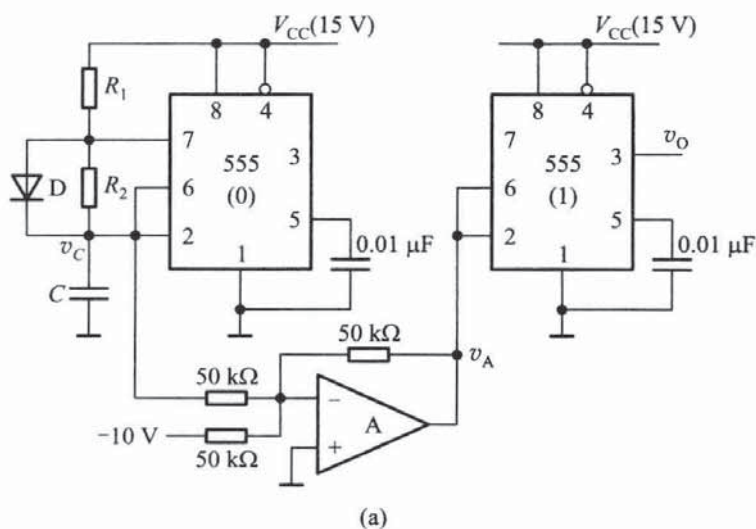


图 9.5 例 9.5 电路及工作波形

(a) 电路 (b) 工作波形

三、习题全解

9.1 单稳态触发器

9.1.1 微分型单稳态电路如图题 9.1.1 所示, 已知 $C = 0.01 \mu\text{F}$, $R = 9.1 \text{k}\Omega$, 电源电压 $V_{\text{DD}} = 10\text{V}$ 。试对应已知输入波形画出电路输出 v_o 的波形, 并确定输出脉宽 t_w 及幅值大小。

解: 根据微分型单稳态电路分析可知, 电路在输入信号的上升沿到来时, 从稳态进入暂稳态, 暂稳态在维持一段时间后, 会自动返回到稳态。于是, 可对应输入波形画出输出波形如图题解 9.1.1 所示。

暂稳态持续时间由电路中的 RC 延时环节参数值决定。

电路的输出脉宽

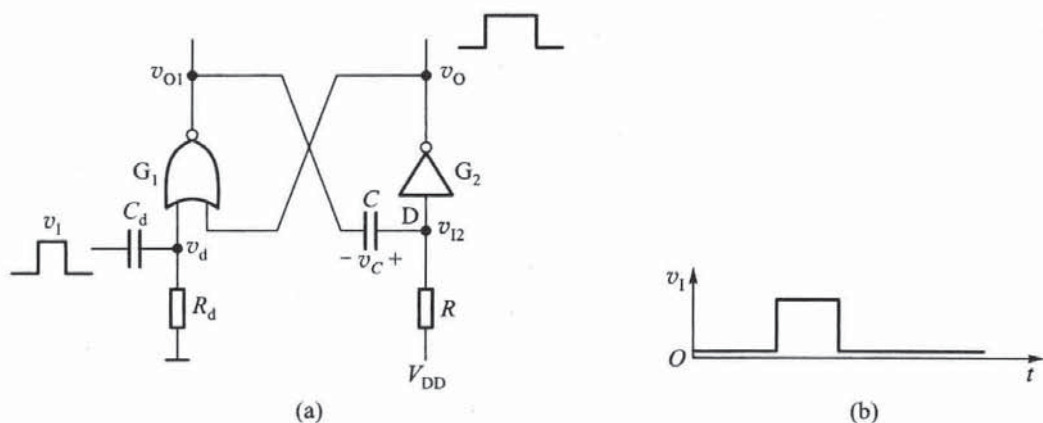
$$t_w \approx 0.7 RC$$

将 $C = 0.01 \mu\text{F}$, $R = 9.1 \text{k}\Omega$ 代入上式

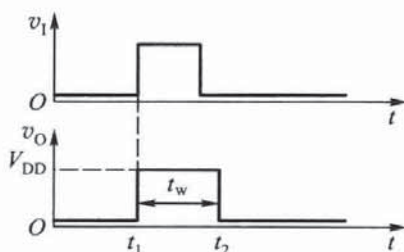
$$t_w \approx 0.7 \times 0.01 \times 10^{-6} \times 9.1 \times 10^3 \\ = 0.0637 \text{ms}$$

输出波形的幅值

$$V_m = V_{\text{OH}} - V_{\text{OL}}$$



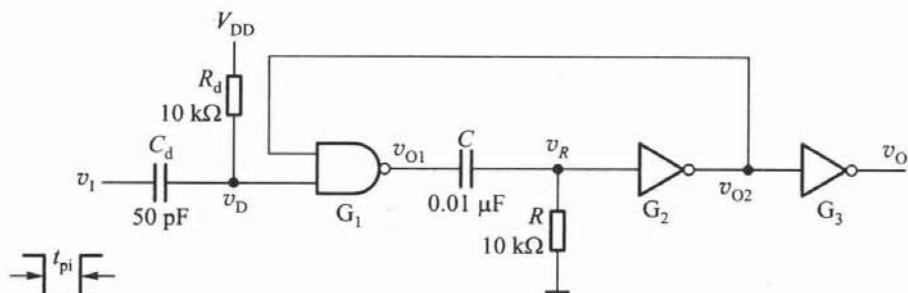
图题 9.1.1



图题解 9.1.1

$$\approx V_{DD} - 0 = V_{DD}$$

9.1.2 由 CMOS 逻辑门组成的微分型单稳电路如图题 9.1.2 所示。其中 t_{pi} 为 $3\ \mu s$ 、 $C_d = 50\ pF$ 、 $R_d = 10\ k\Omega$ 、 $C = 0.01\ \mu F$ 、 $R = 10\ k\Omega$ ，试对应 v_1 分别画出 v_d 、 v_{O1} 、 v_R 、 v_{O2} 、 v_O 的波形，并求出输出脉冲宽度。



图题 9.1.2

解: 设定 CMOS 反相器的阈值电压 $V_{TH} \approx \frac{V_{DD}}{2}$; CMOS 门的 $V_{OL} \approx 0V$, $V_{OH} \approx V_{DD}$ 。

首先分析由电路的工作过程。

(1) 没有触发信号时电路处于一种稳定状态

没有触发信号时, v_1 为高电平, $v_d = V_{DD}$ 。由于 G_2 门的输入端经电阻 R 接地, $v_{O2} \approx V_{DD}$; $v_O \approx 0$ 这样, G_1 门的输出 $v_{O1} \approx 0$ 。电路处于一种稳定状态。

(2) 外加触发信号, 电路由稳态翻转到暂稳态。

在输入触发脉冲 v_i 的下降沿, R_d 、 C_d 微分电路输出的负脉冲使 v_{o1} 迅速地从低电平跳变为高电平。由于电容 C 两端的电压不可能突变, v_R 也同时跳变为高电平。 v_{o2} 跳变为低电平, v_o 跳变为高电平, 电路进入暂稳态。

(3) 电容器 C 充电, 电路自动从暂稳态返回至稳态。

进入暂稳态期后, 随着电容 C 的充电, 电阻 R 上的电流逐渐减弱, v_R 按指数规律下降, 当 v_R 下降到 G_2 的阈值电压 V_{TH} 时, v_{o2} 跳回到高电平, v_o 返回到低电平, 暂稳态结束。在 v_{o1} 跳回低电平后, 电容 C 放电, 经一段恢复时间, 电路完全恢复到稳态。

根据上述分析可画出单稳态触发器各点电压工作波形如图题解 9.1.2 所示。

(4) 输出脉宽 t_w 的计算

根据 RC 电路过渡过程分析可知,

$$v_R(t) = v_R(\infty) + [v_R(0^+) - v_R(\infty)] e^{-t/RC},$$

将 $v_R(0^+) = V_{DD}$, $v_R(\infty) = 0V$, $v_R(t_w) = V_{TH} \approx V_{DD}/2$ 代入上式,

$$\begin{aligned} \text{得} \quad t_w &= RC \ln \frac{v_R(\infty) - v_R(0^+)}{v_R(\infty) - v_R(t_w)} \\ &= 10 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6} \times \ln 2 s \\ &= 69 \mu s \end{aligned}$$

9.1.3 图题 9.1.3 所示电路是用 CMOS 或非门构成的单稳态触发器的另一种形式。试回答下列问题:

(1) 分析电路的工作原理; (2) 画出加入触发脉冲后 v_{o1} 、 v_{o2} 及 v_R 的工作波形; (3) 写出输出脉宽 t_w 的表达式。

解: (1) 电路工作过程如下:

稳态: G_1 门的一个输入端经 R 接地, $v_R = 0$, 无触发信号, $v_i = 0$, $v_{o1} = 1$, $v_{o2} = 0$, v_C 为 $0V$ 。

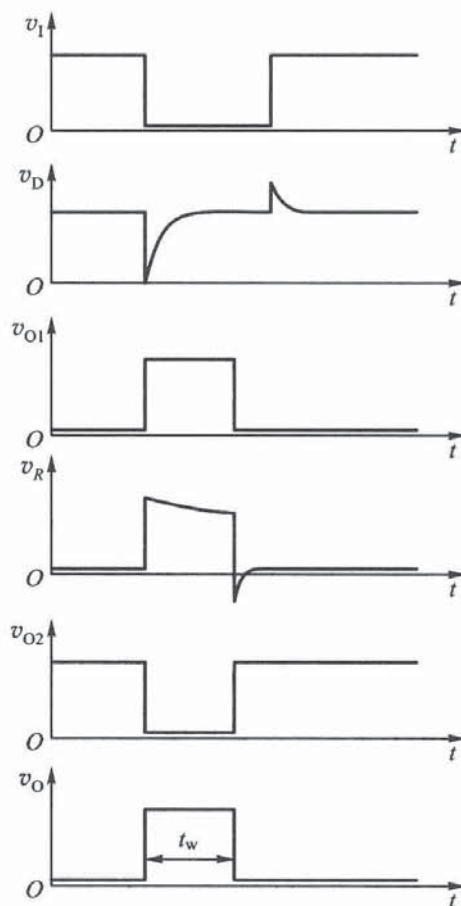
暂稳态: 当触发脉冲 v_i 由 0 上跳至高电平, G_1 门输出下跳至低电平, G_2 门输出 v_{o2} 上跳至高电平, 由于电容两端的电压不能突变, 于是 v_R 由低电平跳变至高电平, 且与 v_{o2} 跳变幅度相同。此后 G_2 门输出的高电平向电容 C 放电, v_R 成指数规律下降。

返回稳态: v_i 撤销后, 电容放电, v_R 成指数规律下降, 当 v_R 下降至 G_1 的门阈值电压 V_{TH} 时, 使 G_1 输入全为 0, v_{o1} 跳变到高电平, v_{o2} 跳变回低电平, 暂稳态结束。

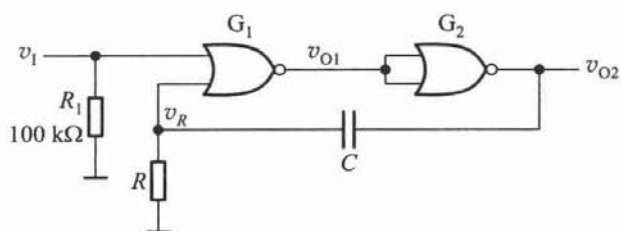
恢复阶段: 此后电容充电, 使 v_R 回到稳态值, 电路返回到稳态。

(2) v_i 、 v_{o1} 、 v_{o2} 、 v_R 的工作波形如图题解 9.1.3 所示。

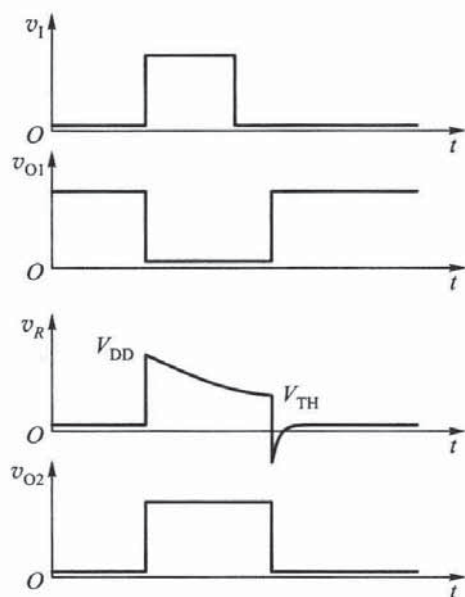
(3) 输出脉宽 t_w 取决于暂稳态的持续时间, 其值为



图题解 9.1.2



图题 9.1.3



图题解 9.1.3

$$t_w = \tau \ln \frac{v_R(\infty) - v_R(0^+)}{v_R(\infty) - v_R(t_w)}$$

式中 $v_R(\infty) = 0$, $v_R(0^+) = V_{DD}$, $v_R(t_w) = v_{TH}$

设 $V_{TH} = \frac{V_{DD}}{2}$, 则

$$t_w \approx 0.7RC$$

9.1.4 由集成单稳态触发器 74121 组成的延时电路及输入波形如图题 9.1.4 所示。(1) 计算输出脉宽的变化范围;(2) 解释为什么使用电位器时要串接一个电阻。

解:(1) 电路中集成单稳 74121 的输出脉宽与电路外接电阻、电容取值有关。

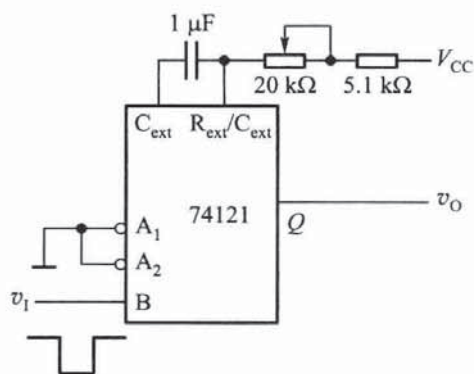
$$t_w \approx 0.7RC$$

依题意将 $C = 1 \mu\text{F}$ $R = (5.1 \sim 25.1) \text{k}\Omega$ 代入上式

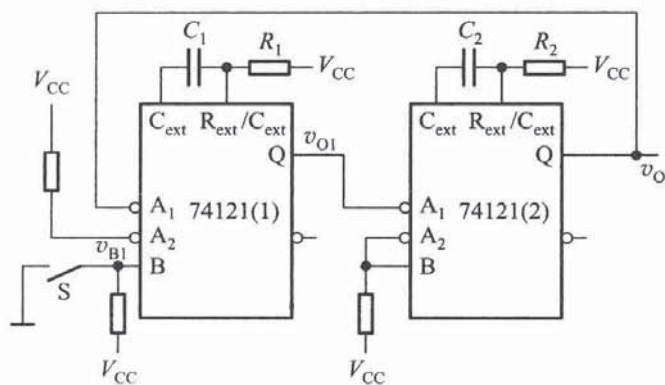
可算得 $t_w \approx (3.57 \sim 17.57) \text{ms}$

(2) 若不串接 $5.1 \text{k}\Omega$ 电阻, 单稳 74121 外接电阻仅为电位器, 那么当电位器阻值一旦调为 0 时, 单稳态会因无定时电阻而无法开始正常工作。

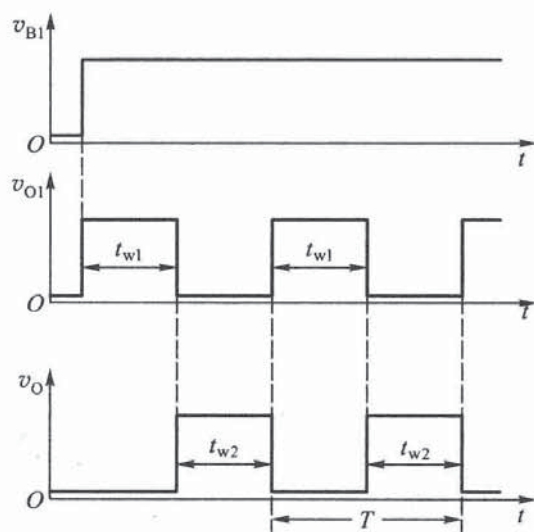
9.1.5 利用两片集成单稳态触发器 74LS121 构成的多谐振荡器如图题 9.1.5 所示, 试说明其工作原理, 并计算电路的振荡频率。



图题 9.1.4



图题 9.1.5



图题解 9.1.5

解:当开关 S 从闭合变为断开时, 74121(1) B 端从低电平跳变为高电平使单稳(1)进入暂稳态, v_{O1} 输出正脉冲, 脉宽为 $0.7R_1C_1$ 。随后, 在 v_{O1} 的下降沿到来时, 单稳(2)进入暂稳态, 脉宽为 $0.7R_2C_2$ 。由于 v_O 与 74121(1) 的 $\overline{A_1}$ 相接, 当 74121(2) 的暂稳态结束, v_O 的下降沿到来时, 74121(1) 在其触发下进入暂稳态……, 如此循环往复不断。于是, 在 v_O 端得到一定频率的脉冲输出, 电路为多谐振荡器。其工作波形如图题解 9.1.5 所示。

从分析所得工作波形可见, 电路周期为: $T = t_{w1} + t_{w2} = 0.7(R_1C_1 + R_2C_2)$ 。

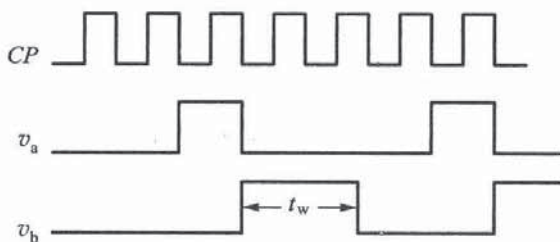
振荡频率, $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.7(R_1C_1 + R_2C_2)}$ 。

9.1.6 某控制系统要求在 CP 的作用下产生时序信号 v_a 、 v_b 。两信号与 CP 的时序关系如图题 9.1.6 所示。用 4 位二进制计数器 74LVC161、集成单稳 74121 设计该信号产生电路, 试画出电路图。

解:分析题中给定的 CP、 v_a 及 v_b 的时序关系可知, v_a 与 CP 呈四分频关系, 而 v_b 则是在 v_a 波形的下降沿触发下, 产生的脉宽为 t_w 的正脉冲。

电路设计应做如下考虑: 首先, 设计出 v_a 产生电路, 然后将 v_a 作为单稳态触发器的触发信号, 即可得到输出波形 v_b 。

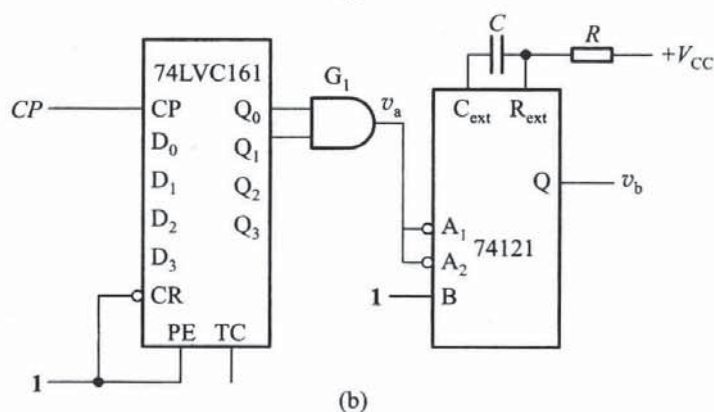
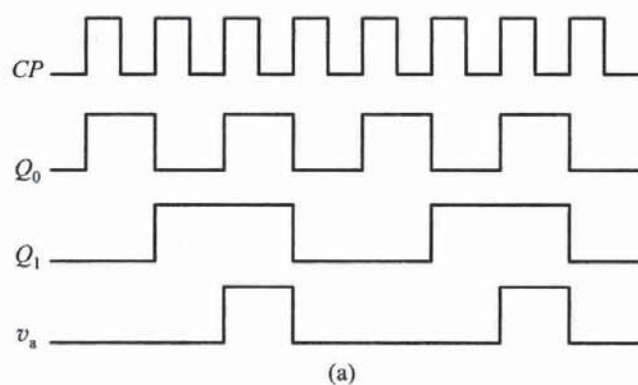
根据 74LVC161 的逻辑功能表, 将其连接为 4 位二进制加法计数器的工作状态。画出计数器 Q_1Q_0 的工作波形如图题解 9.1.6(a) 所示, $v_a = Q_1Q_0$ 。于是, 用一片 74LVC16 和与门就可组成 v_a 产生电路。然后, 再用 v_a 作为集成单稳触发器 74121 的触发信号, 这样, 在 74121 的 Q 端即可得到 v_b 波形。合理选择 R、C 的值 ($t_w = 0.7RC$), 使 t_w 的值满足题意要求。由以上分析, 可画出 v_a 、 v_b 时序信号产生电路如图题解 9.1.6(b) 所示。



图题 9.1.6

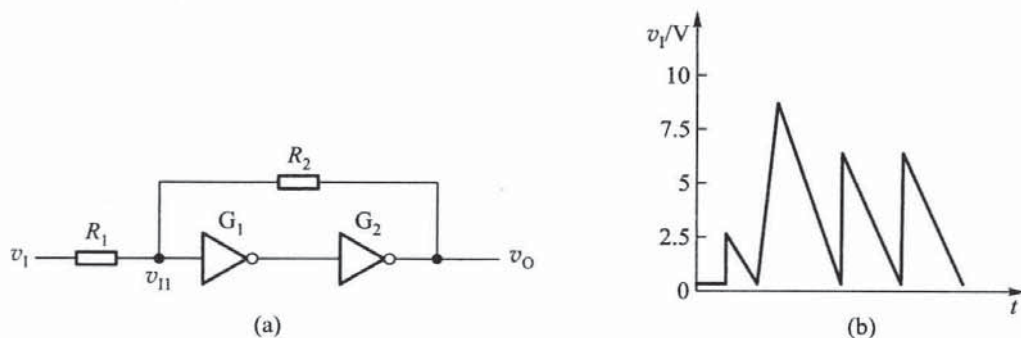
9.2 施密特触发器

9.2.1 在图题 9.2.1 所示的施密特触发器电路中, 已知 $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 20k\Omega$ 。G₁、G₂ 为



图题解 9.1.6

CMOS 反相器, $V_{DD} = 10V$, $V_{TH} = \frac{1}{2}V_{DD}$ 。



图题 9.2.1

(1) 试计算电路的正向阈值电压 V_{T+} 、负向阈值电压 V_{T-} 和回差电压 ΔV_{TC} 。

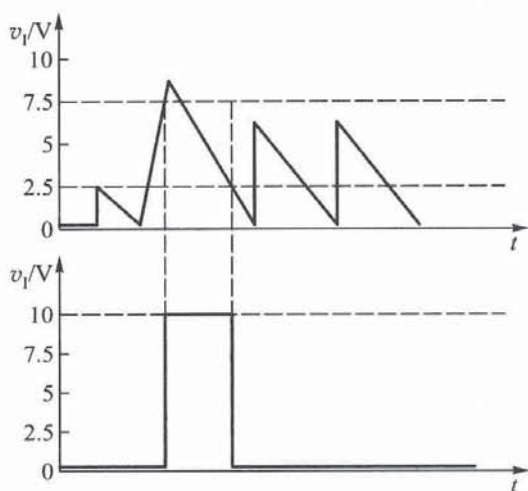
(2) 若电路的输入信号 v_1 波形如图题 9.2.1(b) 所示, 试画出相应的输出电压 v_o 的波形。

解: 由电路分析可知 $V_{T+} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) V_{TH}$, $V_{T-} \approx \left(1 - \frac{R_1}{R_2}\right) V_{TH}$ $\Delta V_T \approx 2 \frac{R_1}{R_2} V_{TH} = \frac{R_1}{R_2} V_{DD}$

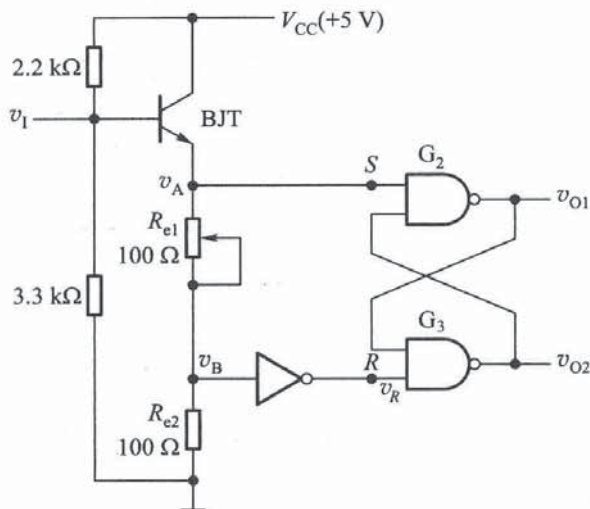
将 $V_{DD} = 15V$, $V_{TH} = \frac{1}{2}V_{DD}$ $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 20k\Omega$ 等参数代入上述各式, 可得

$$V_{T+} = 7.5V \quad V_{T-} = 2.5V \quad \Delta V_T \approx \frac{R_1}{R_2} V_{DD} = 5V$$

根据施密特触发器的电压传输特性,对应输入波形可画出输出波形如图题解 9.2.1 所示。



图题解 9.2.1



图题 9.2.2

9.2.2 图题 9.2.2 电路为一个回差可调的施密特电路,它是利用射极跟随器的射极电阻来调节回差的。

(1) 分析电路的工作原理;

(2) 当 R_{e1} 在 $50 \sim 100 \Omega$ 的范围内变动时,试计算回差的变化范围。

解: 图题 9.2.2 是利用射极跟随器的射极电阻分压改变滞后电压的施密特电路。工作原理如下:

当 v_i 足够高时, v_A 、 v_B 均为高电平, v_R 为低电平, v_{O1} 为低电平, v_{O2} 为高电平。输入电压减小,当 v_i 下降到 $v_B = 1.4V$ (G_3 门的阈值电压) 时, G_3 门关闭, v_R 为高电平,但 v_A 仍高于 $1.4V$, G_2 开通,电路仍维持原来状态。只有当 v_A 也下降 $1.4V$ 时,基本 RS 触发器才发生翻转,这时的 v_i 为负向阈值电平。显然 $V_{T-} = 1.4V + V_{BE}$ 。

当 v_i 上升,使 v_A 上升至 $1.4V$ 时,基本 RS 触发器并不翻转,只有当 v_B 上升至 $1.4V$ 时,电路返回至第一稳态,这时 v_i 为正向阈值电平,

$$\text{显然} \quad V_{T+} = \frac{1.4}{R_{e1}} \times (R_{e1} + R_{e2}) + V_{BE}$$

$$\text{故} \quad \Delta V_T = V_{T+} - V_{T-} = R_{e1} / R_{e2} \times 1.4V$$

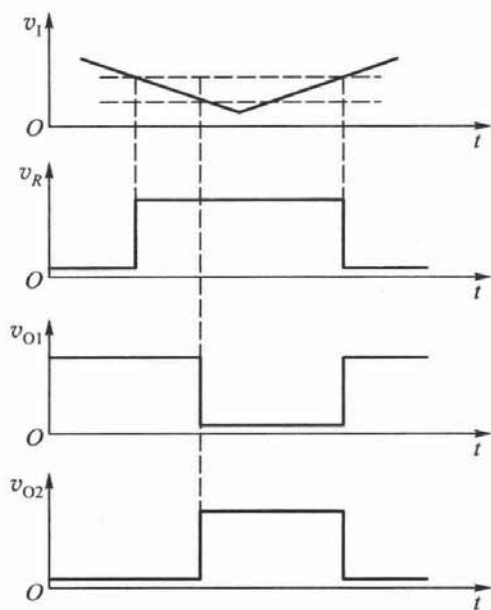
从上述分析可知,改变电阻 R_{e1} 的大小,即可调节滞后电压。当 v_i 输入为三角波时,电路各点波形如图题解 9.2.2 所示。

由上式可以算出,当 $R_{e1} = 50 \Omega$ 时, $\Delta V_T = 50/100 \times 1.4 = 0.7V$; 当 $R_{e1} = 100 \Omega$ 时, $\Delta V_T = 1.4V$ 。可见 R_{e1} 在 $50 \sim 100 \Omega$ 之间变化时, ΔV_T 变动范围为 $0.7 \sim 1.4V$ 。

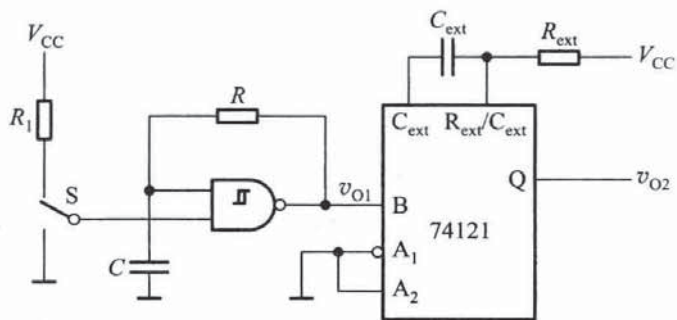
9.2.3 集成施密特和集成单稳态触发器 74121 构成的电路如图题 9.2.3 所示。已知集成施密特的 $V_{DD} = 10V$, $R = 100k\Omega$, $C = 0.01 \mu F$, $V_{T+} = 6.3V$, $V_{T-} = 2.7V$, $C_{ext} = 0.01 \mu F$, $R_{ext} = 30k\Omega$ 。

(1) 分别计算 v_{O1} 的周期及 v_{O2} 的脉宽。

(2) 根据计算结果画出 v_{O1} 、 v_{O2} 的波形。



图题解 9.2.2



图题 9.2.3

解:(1) 集成施密特组成多谐振荡器,当 S 开关接高电平后,电路开始振荡,其振荡周期

$$T = RC \ln \left(\frac{V_{DD} - V_{T-}}{V_{DD} - V_{T+}} \cdot \frac{V_{T+}}{V_{T-}} \right) = \left[10^5 \times 10^{-8} \times \ln \frac{7.3}{3.7} \cdot \frac{6.3}{2.7} \right] \text{S}$$

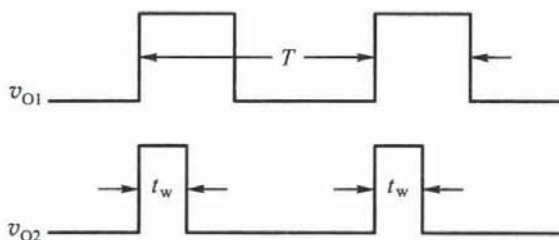
$$T = 1.53 \text{ms}$$

单稳输出脉宽为

$$t_w \approx 0.7 R_{\text{ext}} C_{\text{ext}} = (0.7 \times 3 \times 10^4 \times 10^{-8}) \text{S}$$

$$t_w = 0.21 \text{ms}$$

(2) 分析电路可画出 v_{O1} 及 v_{O2} 的波形图题解 9.2.3 所示。

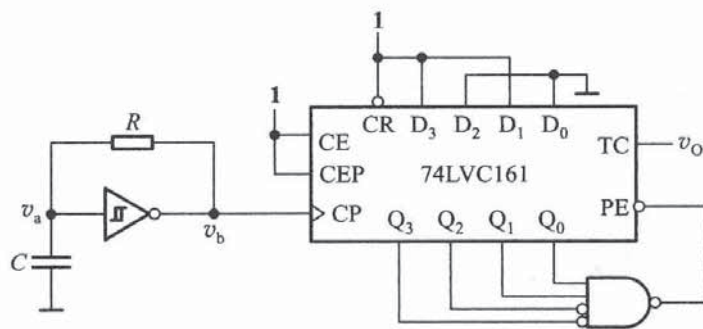


图题解 9.2.3

9.2.4 集成施密特触发器和 4 位同步二进制加法器 74LVC161 组成的电路如图题 9.2.4 所示。

- (1) 分别说明图中两部分电路的功能;
- (2) 画出图中 74LVC161 组成的电路的状态图;
- (3) 画出图中 v_a 、 v_b 和 v_o 的对应波形。

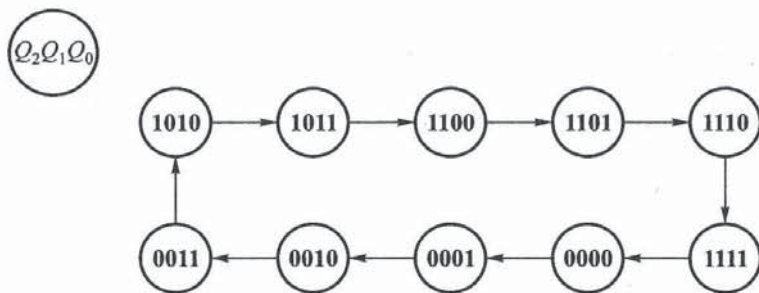
解:(1) 图题 9.2.4 所示电路由脉冲产生电路和计数器两部分组成。集成施密特触发器和电阻 R 、电容 C 组成多谐振荡器,为计数器提供时钟脉冲。而 4 位同步二进制加法器 74LVC161 和与非门组成二进制加法计数器。



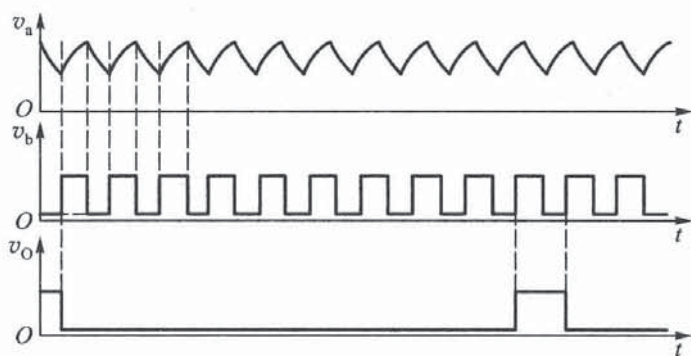
图题 9.2.4

(2) 图中 74LVC161 用“反馈置数法”构成的计数器。设电路的初始状态为 **1010**, 在第 10 个脉冲作用后, $Q_3 Q_2 Q_1 Q_0 = \mathbf{0011}$ 。这时, Q_3 、 Q_2 、 Q_1 、 Q_0 信号经与非门使 74LVC161 的同步置数为 0011 状态, 完成一个计数周期。电路只有 **1010 ~ 0011** 十个状态, 状态图如图题解 9.2.4(a) 所示。该电路经 10 个时钟脉冲完成一次循环, 因此, 模为 $M=10$, 是十进制计数器。

(3) 根据上述分析可画出图中 v_a 、 v_b 和 v_o 的波形如图题解 9.2.4(b) 所示。



(a)



(b)

图题解 9.2.4

9.2.5 已知某些电路的输入、输出波形分别如图题 9.2.5(a)、(b)、(c)、(d) 所示, 试问应选择哪些电路才能实现如图所示的输入、输出波形对应关系?

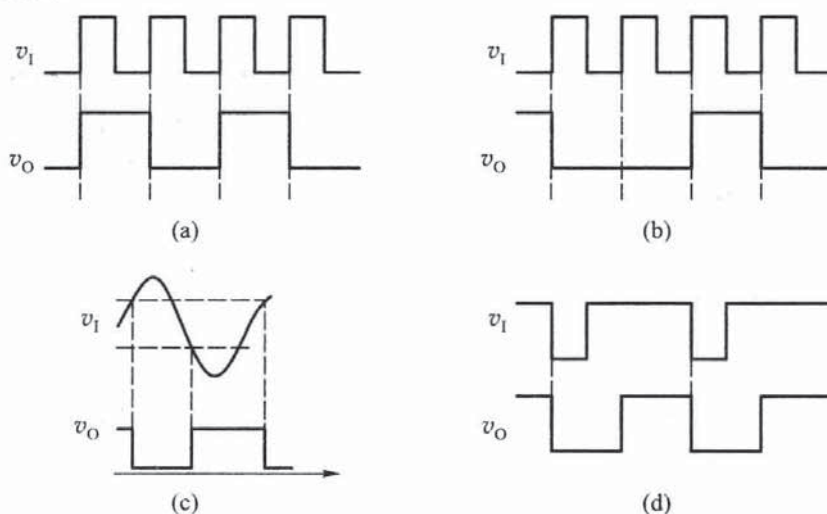
解: 分析图题 9.2.5(a) 所示输入、输出波形的对应关系, 可见一个输出波形的周期内包含了

输入信号两个周期,它们之间是2分频关系,所以,应用2分频电路实现。

同理,图题9.2.5(b)中一个输出波形的周期内包含了三个输入信号周期,它们之间是3分频关系,所以,应用3分频电路实现。

图题9.2.5(c)所示输入波形为正弦波,而输出波形为矩形波,显然,这种输入输出波形关系是通过施密特触发器实现波形变换。

而图题9.2.5(d)所示输入、输出波形的对应关系是,在每个输入波形的下降沿触发下都会产生一个负脉冲。所以,要选择下降沿触发,输出为负脉冲的单稳态触发器才能实现这种输入、输出波形的对应关系。

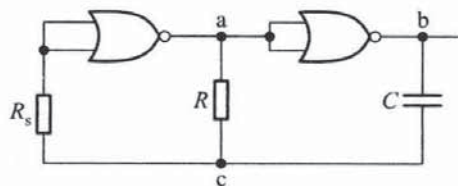


图题 9.2.5

9.3 多谐振荡器

9.3.1 图题9.3.1所示电路为CMOS或非门构成的多谐振荡器,图中 $R_s = 10R$ 。

(1) 画出 a 、 b 、 c 各点的波形;(2) 计算电路的振荡周期;(3) 当阈值电压 V_{TH} 由 $V_{DD}/2$ 改变至 $2V_{DD}/3$ 时,电路的振荡频率如何变化?与主教材中图9.3.1(a)电路相比说明 R_s 的作用。



图题 9.3.1

解:(1) 图题9.3.1属改进后的RC振荡器,电阻 R_s ($10R$)的加入,使得电容 C 的一端(c 点)电位变化时,其过冲由无 R_s 时的 V_{DD} (或 V_{SS})上升为 $V_{TH}+V_{DD}$ (或下降至 $V_{TH}-V_{DD}$),这样电容 C 两端电压的峰-峰值由原来的 $V_{DD}-V_{SS}$ 上升至 $(V_{TH}+V_{DD})-(V_{TH}-V_{DD})$,从而大大减小了由于转折电压的离散性所导致的振荡周期的变化。另一方面 R_s 电阻的串入有限流作用,保护了输入二极管。 a 、 b 、 c 各点波形如图题解9.3.1所示。

(2) 振荡周期 T 的计算:根据RC电路过渡过程分析可知

$$v_c = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)] e^{-\frac{t}{RC}}$$

可得

$$t = RC \ln \frac{v_c(0^+) - v_c(\infty)}{v_c(t) - v_c(\infty)}$$

由于 $R_s \gg R$, 因此, 可忽略 G_1 门输入二极管导通时由 R_s 支路对电容充放电的影响, 于是, 计算出:

$$t_1 = RC \ln \frac{V_{DD} + V_{TH}}{V_{TH}}$$

$$t_2 = RC \ln \frac{2V_{DD} - V_{TH}}{V_{DD} - V_{TH}}$$

$$T = t_1 + t_2 = RC \ln \frac{(V_{DD} + V_{TH})(2V_{DD} - V_{TH})}{V_{TH}(V_{DD} - V_{TH})}$$

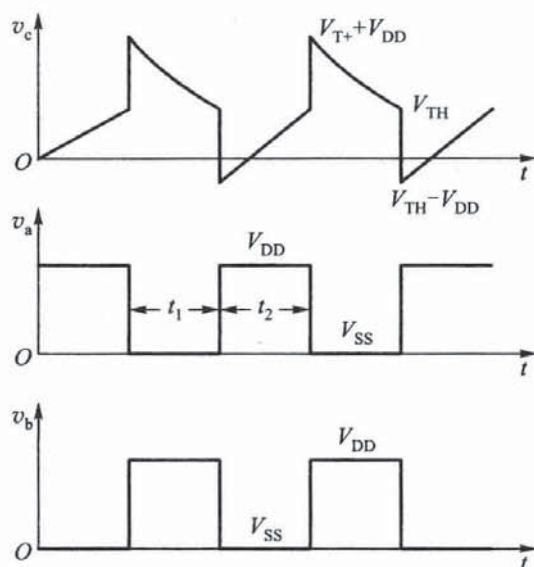
如 $V_{TH} = \frac{V_{DD}}{2}$, 则

$$T = RC \ln 9 \approx 2.2RC$$

如 $V_{TH} = \frac{2}{3}V_{DD}$, 则

$$T = RC \ln 10$$

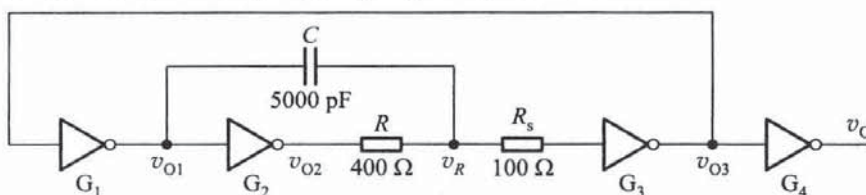
当 V_{TH} 由 $\frac{V_{DD}}{2}$ 改变至 $\frac{2}{3}V_{DD}$ 后, 频率减小。



图题解 9.3.1

9.3.2 RC 环型多谐振荡电路如图题 9.3.2 所示

示, 试分析电路的振荡过程, 画出 v_{O1} 、 v_{O2} 、 v_R 、 v_{O3} 及 v_O 的波形。



图题 9.3.2

解: 若电路接通电源瞬间, v_{O3} 输出为 1, 则 v_{O1} 为 0, v_{O2} 为 1。由于电容电压不能突变, v_R 也为 0, 从而保持 v_{O3} 为高电平, 这是电路第一暂稳态: $v_{O1} = 0, v_{O2} = 1, v_{O3} = 1, v_O = 0$ 。

此稳态不能长久维持, 电容 C 通过图题解 9.3.2(a) 所示电路进行充电, 使 v_R 上升。一旦 v_R 达到门坎电平, 就会产生正反馈雪崩过程:

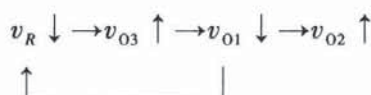
$$v_R \uparrow \rightarrow v_{O3} \downarrow \rightarrow v_{O1} \uparrow \rightarrow v_{O2} \downarrow$$



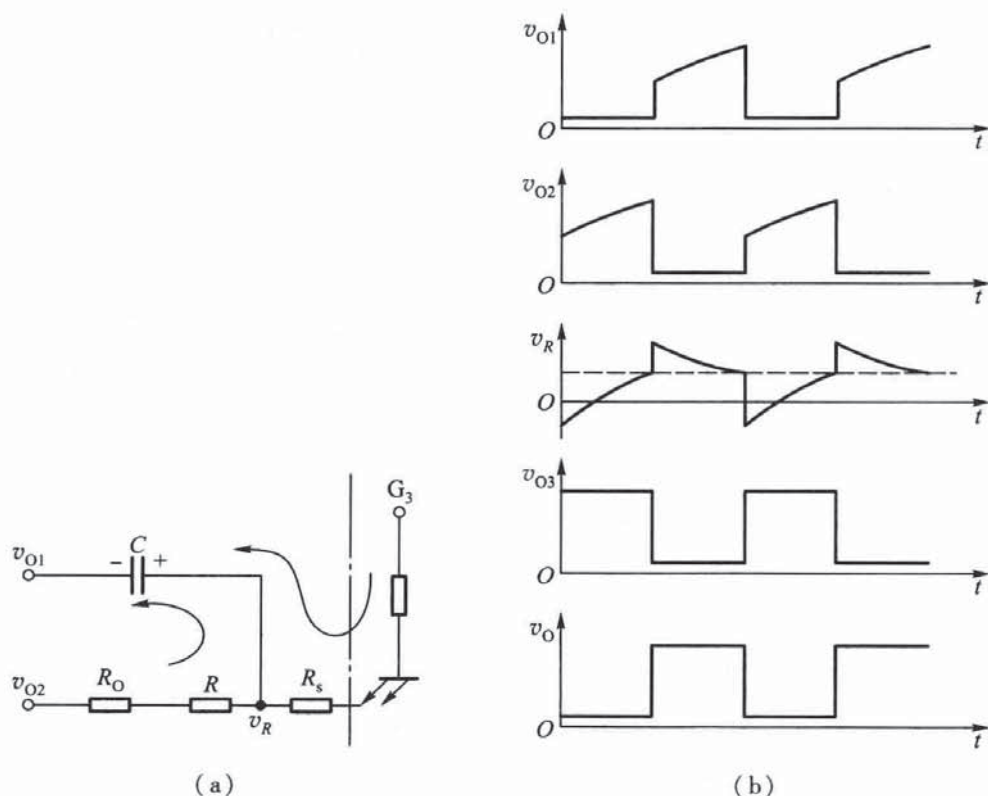
v_C 不能突变

使电路进入第二暂稳态: $v_{O1} = 0, v_{O2} = 0, v_{O3} = 0, v_O = 1$ 。

同样第二暂稳态也不能长久维持。在此期间, v_{O1} 通过电阻 R 及 G_2 门对电容 C 反向充电, v_R 将按指数规律下降。当 v_R 下降至门坎电平, 又发生下述雪崩过程:

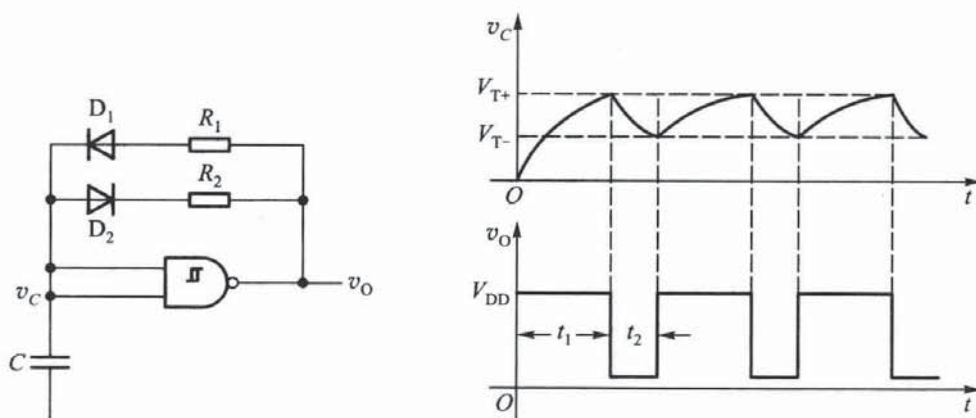


结果使电路返回至第一暂稳态,如此周而复始,产生振荡。各点的工作波形如题解 9.3.2 (b) 所示。



图题解 9.3.2

9.3.3 由集成施密特 CMOS 与非门电路组成的脉冲占空比可调多谐振荡器如图题 9.3.3 所示。设电路中 R_1 、 R_2 、 C 及 V_{DD} 、 V_{T+} 、 V_{T-} 的值已知, (1) 定性画出 v_c 及 v_o 波形; (2) 写出输出信号 v_o 频率表达式。



图题 9.3.3

图题解 9.3.3

解: (1) 设当电路接通电源时, 电容 C 上的初始电压为零, v_o 输出高电平, 并经 R_1 、 D_1 向 C 充电, 当电容两端电压充到使 $v_c = V_{T+}$ 时, 输出跳变为低电平, 电容 C 又经 D_2 、 R_2 放电。当放至 $v_c =$

V_{T-} 时, v_o 又变为高电平, 电容 C 重新开始充电, 如此周而复始, 在输出端便可得到振荡波形。设 $R_1 > R_2$, 分析可得 v_c 及 v_o 的电压波形如图题解 9.3.3 所示。

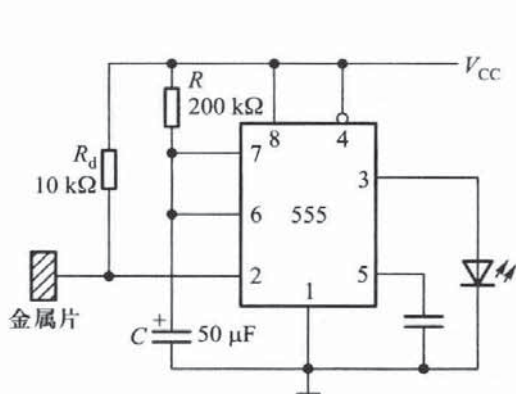
(2) 根据 v_c 及 v_o 电压波形得到 v_o 信号周期的表达式为:

$$\begin{aligned} T &= t_1 + t_2 \\ &= R_1 C_1 \ln \frac{V_{DD} - V_{T-}}{V_{DD} - V_{T+}} + R_2 C_2 \ln \frac{V_{T+}}{V_{T-}} \\ f &= \frac{1}{T} \end{aligned}$$

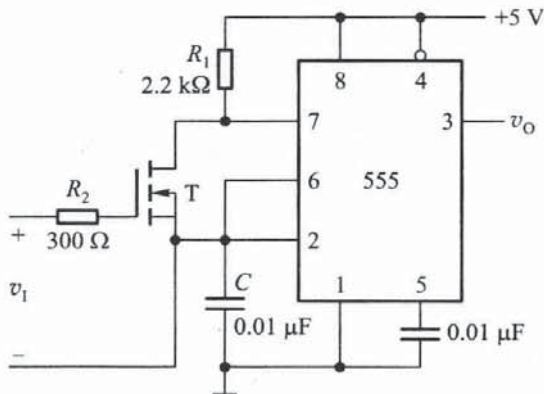
9.4 555 定时器及其应用

9.4.1 图题 9.4.1 所示为一简易触摸开关电路。当手摸金属片时, 发光二极管亮, 经过一定时间后, 发光二极管自动熄灭。试说明其工作原理, 试问发光二极管亮多长时间自动熄灭?

解: 图题 9.4.1 所示电路中, 555 定时器与 R 、 C 组成单稳态触发器。当手摸金属片时, 给单稳态触发器输入触发信号, 单稳态触发器从稳态时进入暂稳态, 输出高电平, 发光二极管发亮。经 t_w 暂稳态结束, 单稳态触发器自动返回到稳态, 输出高电平, 发光二极管自动熄灭。发光二极管亮的时间 $t = t_w \approx 1.1RC = 1.1 \times 200 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6} \text{ s} = 11 \text{ s}$



图题 9.4.1



图题 9.4.2

9.4.2 由 555 定时器及场效应管 T 组成的某功能电路如图题 9.4.2 所示, 电路中 T 工作于可变电阻区, 其导通电阻为 R_{DS} 。(1) 说明电路功能; (2) 写出输出 v_o 频率的表达式。

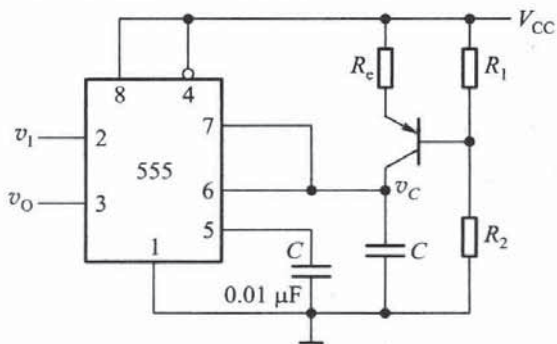
解: (1) 555 定时器与 R_1 、 R_{DS} 及 C 组成多谐振荡器。依题意, 场效应管 T 工作于可变电阻区, 当 v_1 变化时, R_{DS} 的阻值不同, 改变 v_1 的数值, 可改变振荡器的振荡频率。电路为压控振荡器。

(2) 根据 555 组成多谐振荡器的工作原理可得:

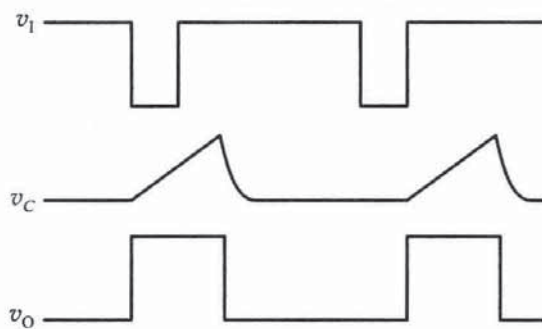
$$\begin{aligned} t_{PH} &\approx 0.7(R_1 + R_{DS})C \\ t_{PL} &\approx 0.7R_{DS}C \\ f &= \frac{1}{t_{PH} + t_{PL}} \approx \frac{1.43}{(R_1 + 2R_{DS})C} \end{aligned}$$

9.4.3 由 555 定时器构成的锯齿波发生器如图题 9.4.3 所示。图中三极管 T 和电阻 R_1 、 R_2 、 R_e 构成恒流源, 给定时电容 C 充电, 当触发输入端输入负脉冲后, 画出电容电压 v_c 及 555 输出端 v_o 的波形, 并计算电容 C 充电的时间。

解:(1)当 v_i 输入一负脉冲后,555 内 RS 触发器置 1,放电 BJTT 截止,定时电容由恒流源电路充电,有 $v_c = \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = \frac{1}{C} \int_0^t I_0 dt = \frac{I_0}{C} t$ 。故电容两端电压 v_c 随时间线性增长。当 $v_c \geq \frac{2V_{CC}}{3}$ 时, BJTT 导通,电容放电,各点波形如图题解 9.4.3 所示。



图题 9.4.3



图题解 9.4.3

(2) 输出脉宽 t_w

t_w 为定时电容 C 上电压 v_c 从 0 充电至 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 所需的时间。

$$t_w = \left(\frac{2}{3} \cdot V_{CC} \cdot C \right) / I_0$$

其中,

$$I_0 = \frac{V_{CC} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} + V_{BE}}{R_e}$$

若 $\frac{V_{CC} R_2}{R_1 + R_2} \gg V_{BE}$, 则

$$t_w = \frac{2R_e(R_1 + R_2)C}{3R_2}$$

9.4.4 由 555 定时器组成的脉冲宽度鉴别电路及输入 v_i 波形如图题 9.4.4 所示。集成施密特触发器的 $V_{T+} = 3.3\text{V}$ 、 $V_{T-} = 1.6\text{V}$ 。已知单稳的输出脉宽 t_w 与 t_1 、 t_2 关系为 $t_1 < t_w < t_2$ 。对应 v_i 画出电路中 B、C、D、E 各点波形,并说明 D、E 端输出负脉冲的作用。

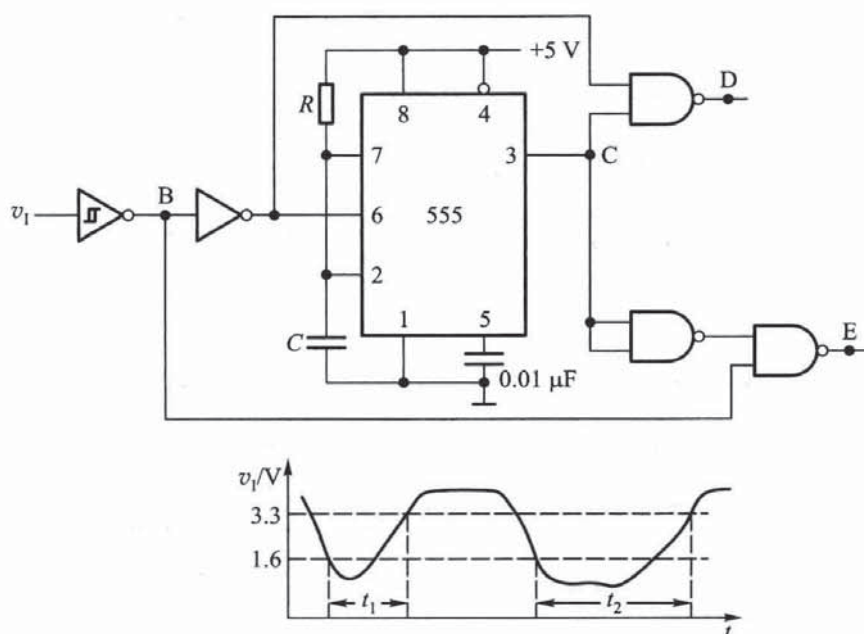
解:电路中集成施密特触发器将 v_i 整形为矩形波后,作为由 555 定时器组成的单稳态触发器的触发信号,分析电路可得电路中 B、C、D 及 E 各点的电压波形图题解 9.4.4 所示。

根据波形分析可知,当 D 端输出负脉冲时,表明 $t_w > t_1$,而 E 端输出负脉冲时表明 $t_w < t_2$ 。

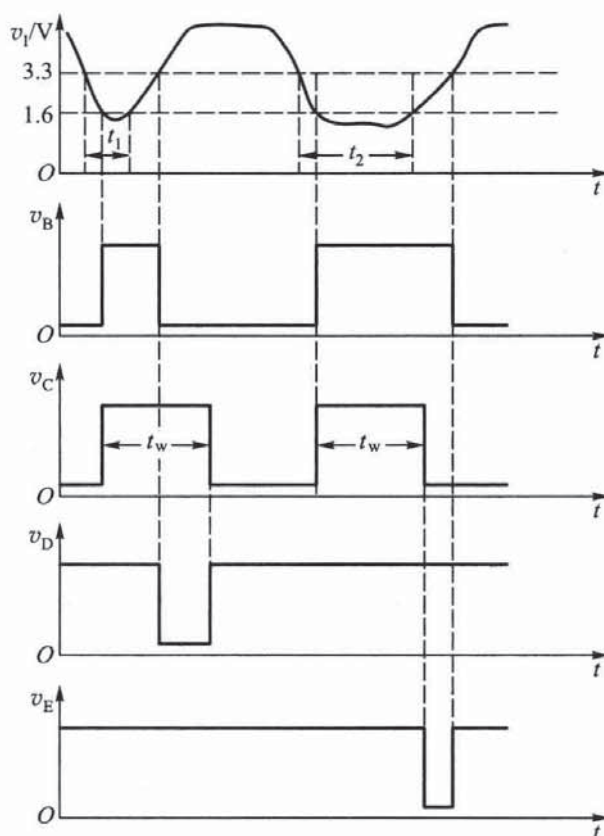
9.4.5 图题 9.4.5(a) 为心律失常报警电路,经放大后的心电信号 v_i 如图(b)所示, v_i 的幅值 $v_{im} = 4\text{V}$ 。(1) 对应 v_i 分别画出图中 A、B、E 三点波形;(2) 说明电路的组成及工作原理。

解:图题 9.4.5(a) 中 555 定时器(1) 组成施密特触发器,将输入心电信号变换为脉冲信号。555(2) 与三极管、 R 、 C 组成可重复触发的单稳。电路中, RC 参数取值使单稳输出脉宽 t_w 大于正常心电信号周期。分析该电路可画出 v_A 、 v_B 、 v_C 各点电压波形如图题解 9.4.5 所示。

根据 v_A 、 v_B 、 v_E 各点电压波形可知,当心律失常产生漏波时,E 点输出低电平,发光二极管 D_2 亮,心电情况正常时发光二极管 D_1 亮。

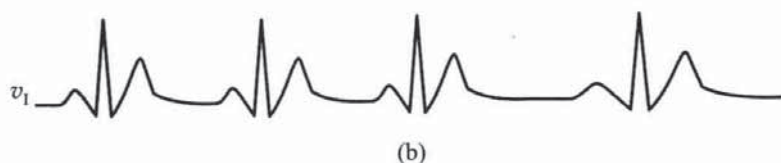
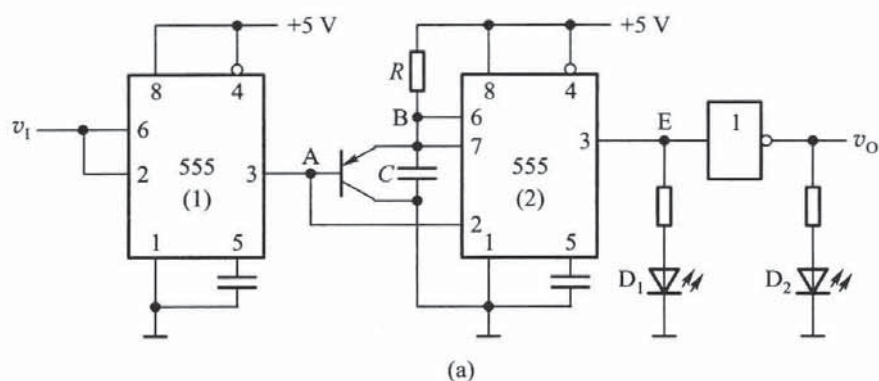


图题 9.4.4

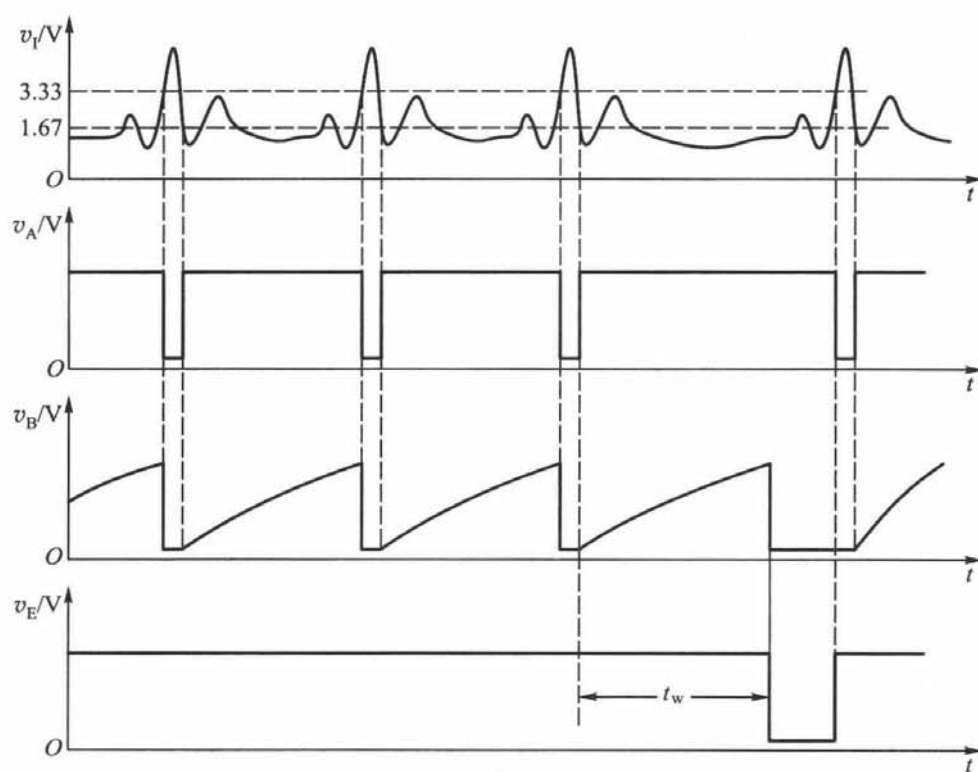


图题解 9.4.4

9.4.6 一防盗报警电路如图题 9.4.6 所示, a、b 两端被一细铜丝接通, 此铜丝置于小偷必经之处。当小偷闯入室内将铜丝碰断后, 扬声器即发出报警声。



图题 9.4.5

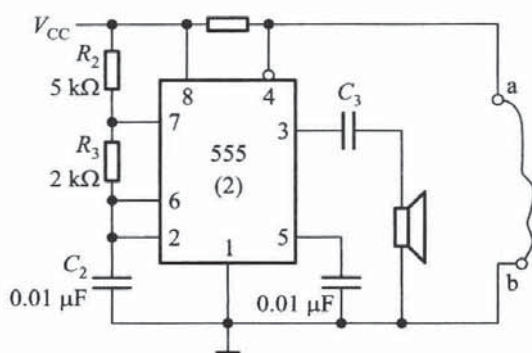


图题解 9.4.5

- (1) 试问 555 定时器接成何种电路？
- (2) 简要说明该报警电路的工作原理。
- (3) 试根据图中参数计算电路的振荡频率。

解：(1) 当细铜丝断开时，555 定时器为“多谐振荡器电路”。

- (2) 正常情况下，a、b 两端被一细铜丝接通，555 定时器的 4 脚为低电平使其输出端 3 脚复



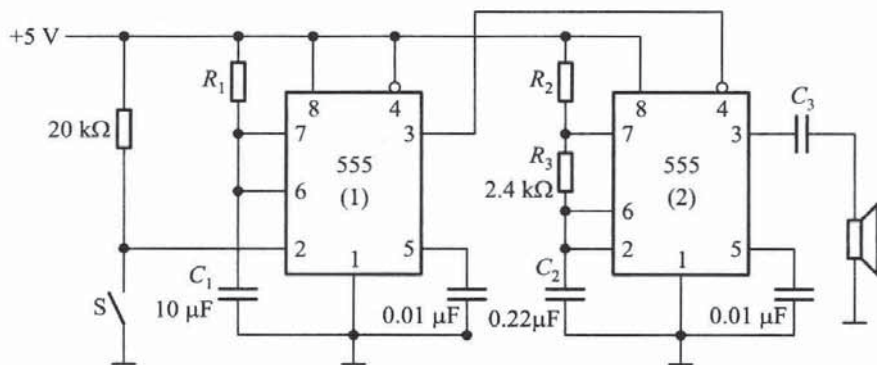
图题 9.4.6

位,扬声器无声音发出;当小偷闯入室内将铜丝碰断后,则4脚变为高电平,多谐振荡器工作,输出端3脚产生连续的方波信号,此时扬声器即发出报警声。

$$(3) \text{ 多谐振荡器的振荡频率 } f = \frac{1}{0.7(R_2 + 2R_3)C_2}$$

将 $R_2 = 5\text{ k}\Omega$, $R_3 = 2\text{ k}\Omega$, $C_2 = 0.01\text{ }\mu\text{F}$ 代入上式求得报警时扬声器的振荡频率 $f = 15.87\text{ kHz}$ 。

9.4.7 分析如图题 9.4.7 所示电路。简述电路组成及工作原理。若要求扬声器在开关 S 按下后以 1.2 kHz 的频率持续响 10 秒钟,试确定图中 R_1 、 R_2 的阻值。



图题 9.4.7

解:图中 555(1) 组成单稳态触发器,其输出 v_{o1} 当作为 555(2) 组成的多谐振荡器的清零信号。当 S 开关接通,555(1) 的②脚由高电平跳变为低电平,单稳被触发,输出脉宽为 t_w 的正脉冲。在 t_w 时间内 555(2) 的清零信号为高电平,多谐振荡器工作,其振荡频率为 1.2 kHz 。当单稳返回稳态后, $v_{o1} = 0$, 555(2) 被清零,多谐振荡器停振。

依题意,单稳脉宽 $t_w = 10\text{ s}$

$$t_w = 1.1R_1C_1$$

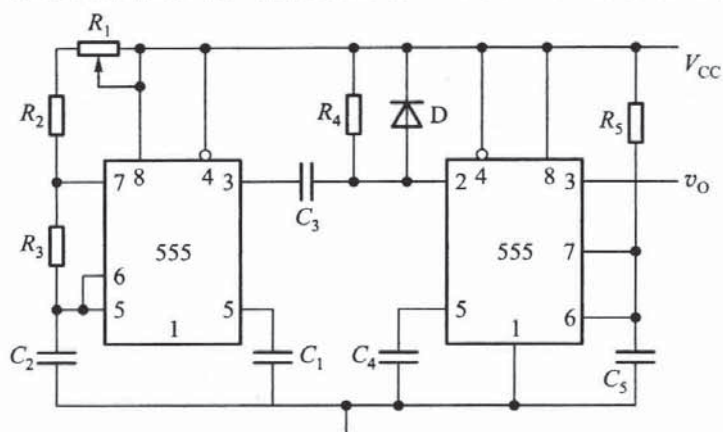
已知 $C_1 = 10\text{ }\mu\text{F}$, 代入上式求得 $R_1 = 910\text{ k}\Omega$

$$\text{多谐振荡器振荡频率 } f = \frac{1}{0.7(R_2 + 2R_3)C_2}$$

已知 $R_3 = 2.4\text{ k}\Omega$, $C_2 = 0.22\text{ }\mu\text{F}$, 代入上式求得 $R_2 = 0.61\text{ k}\Omega$

9.4.8 图题 9.4.8 电路为两个 555 定时器构成的频率可调而脉宽不变的方波发生器,试说

明工作原理;确定频率变化的范围和输出脉宽;解释二极管 D 在电路中的作用。



图题 9.4.8

解:前级 555 为多谐振荡器,后级 555 构成单稳态触发器。调节多谐振荡器电位器 R_1 可改变其输出频率,多谐振荡器的输出经 C_3 、 R_4 微分电路变换为窄脉冲后作为单稳触发信号,由于单稳的定时元件 R_5 、 C_5 不变,故输出脉宽不变。于是,在单稳的输出端得到频率可调而输出脉宽不变的矩形波。其振荡频率变化范围为

$$\frac{1}{0.7(R_1 + R_2 + 2R_3)C} \sim \frac{1}{0.7(R_2 + 2R_3)C}$$

$$\text{输出脉宽 } t_w = R_5 C_5 \ln 3 = 1.1 R_5 C_5$$

二极管 D 在电路中起限幅削波的作用,避免大电压加到单稳输入端,造成电路因过压损坏。