

实验五 脉冲波形发生电路的设计

实验报告

姓名：_____ 赵文亮 _____

学号：_____ 2016011452 _____

班级：_____ 自 64 _____

桌号：_____ 22 _____

日期：_____ 2017 年 12 月 21 日 _____

目录

1 实验目的	1
2 预习任务	1
3 最终电路	5
3.1 输入电路	6
3.2 微分电路	6
3.3 定时电路	7
3.4 放电电路	8
3.5 计数电路	8
4 波形分析	8
4.1 输入电路波形	8
4.2 微分电路波形	10
4.3 定时电路波形	10
5 实验总结	11
5.1 脉冲波形发生电路的设计和调试步骤	11
5.1.1 脉冲波形发生电路的设计步骤	11
5.1.2 脉冲波形发生电路的调试步骤	12
5.2 其他功能电路的设计和调试步骤，注明元件取值并说明理由	12
5.3 实验中遇到的问题及解决方法	14
6 思考题	15

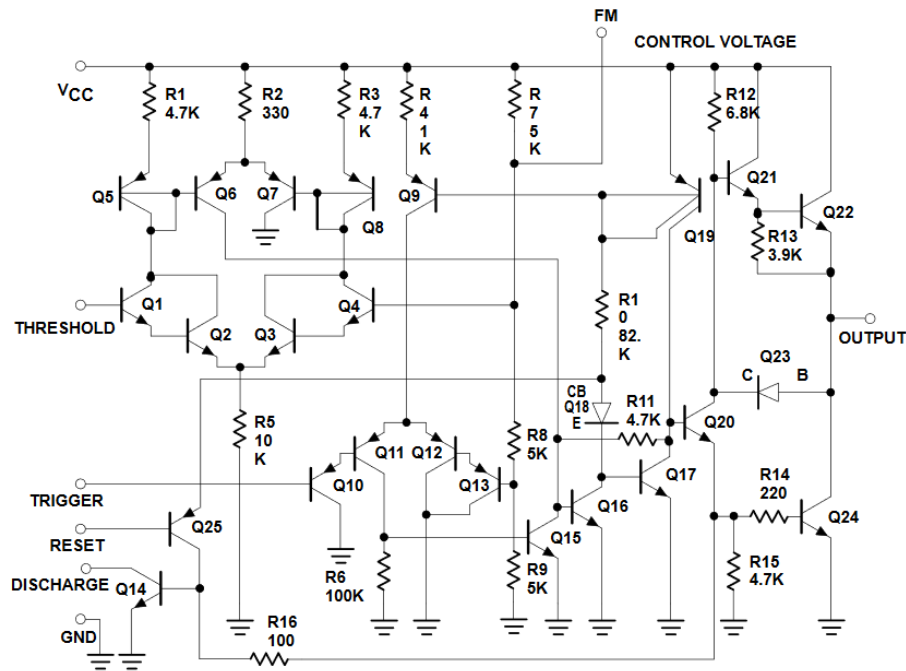
1 实验目的

- 1. 学习脉冲波形发生电路的设计方法和调试方法。
- 2. 学习按模块划分电路的设计与调试的方法。

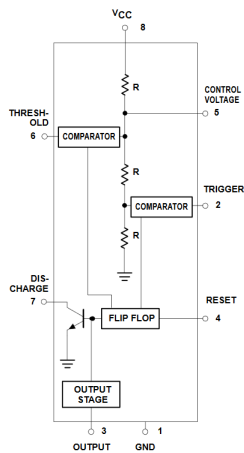
2 预习任务

- 1. 查阅 555 定时器内部结构及引脚图。设计定时电路，计算电阻和电容值。

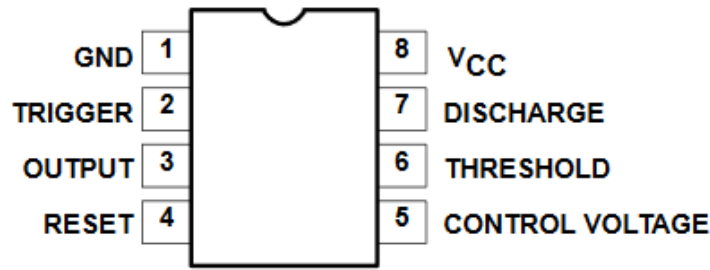
555 定时器的内部结构图、原理简图和引脚图如图 1 所示。



(a) 555 定时器内部结构图



(b) 555 定时器原理简图



(c) 555 定时器引脚图

图 1: 555 定时器结构及引脚图

定时电路本质上就是一个单稳态电路，所以只需使用 555 来接成单稳态电路。定时电路模块如图 2 所示。

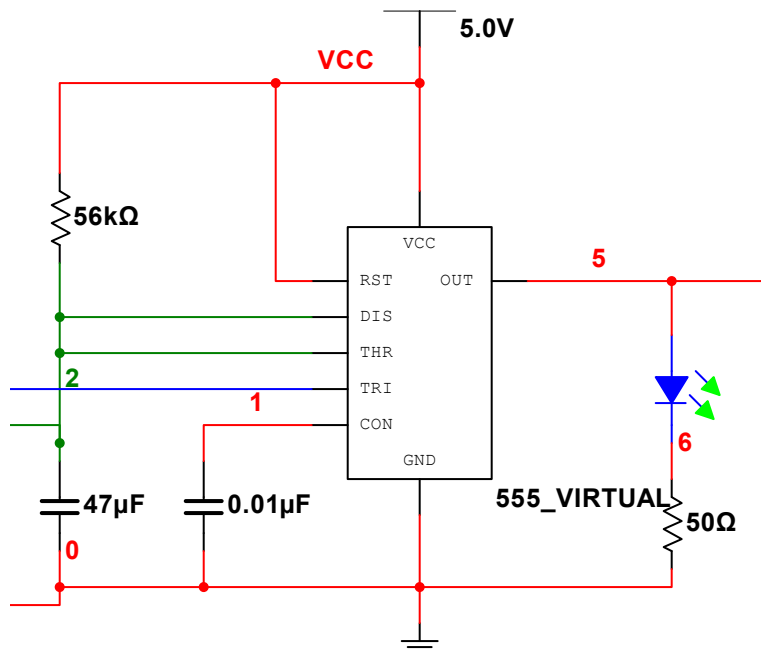


图 2: 定时电路模块

下面分析单稳态电路的工作原理，并计算 R, C 的取值。稳态时输入端为高电平，输出端为低电平，内部 T_D 导通，将 OC 输出端拉低。当输入端有一个负脉冲时，输出变为高电平，内部 T_D 截止，OC 输出端由电阻上拉，THR 端接入的电容开始充电。当电容充电到 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 且之前输入端已经回到了高电平，则输出端变为低电平。

根据三要素法，易得：

$$t_W = RC \ln \frac{V_{CC} - 0}{V_{CC} - \frac{2}{3}V_{CC}} = RC \ln 3 \quad (1)$$

由于要求 t_W 在 1~5s 之内，取中间值 3s，求得

$$RC = \frac{3}{\ln 3} = 2.73s$$

通过查看已有的元件，找到一组比较接近的电阻电容： $R = 56k, C = 47\mu F$ 。重新代入式 (1) 中计算可得：

$$t_W = 2.8915s$$

2. 认识和学习红外发射管、光电三极管及其工作原理。

- 红外发射管原理：红外发射管具有单向导电性，当外加的正向电压使得正向电流足够大时会发射红外光。应用电路如图 3a。
- 光电三极管原理：依据光照强度控制集电极电流大小。无光照时存在暗电流 I_{CE0} 。当 u_{CE} 足够大时，光照强度越大，集电极电流越大。

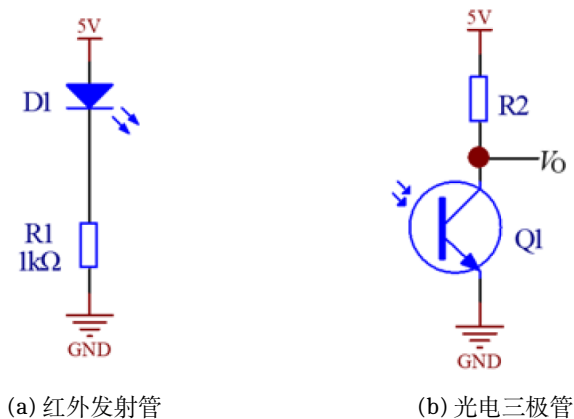


图 3: 应用电路图

3. 分析红外发射管和光电三极管的应用电路，估算图 3b 中 R_2 的阻值。

为了保证光电三极管能够驱动后一级的电路，其输出的高低电平必须满足后级标准。理想条件下，无光照时暗电流很小，后级所需的高电平自然满足；有光照时，为了保证后级可以得到高质量的低电平， R_2 的阻值必须足够大。由于有光照时集电极电流约在几百微安到几毫安之间，估算 $R_2 = V_{CC}/100\mu A = 50k\Omega$ 。考虑到已有元件，此处可以尝试 $56k\Omega$ 的电阻。事实上由于暗电流的存在， R_2 也不能取的过大，否则高电平输出不理想。由于三极管参数不同，实验过程中需要合理调节 R_2 的阻值来满足条件。

4. 根据电流功能进行模块划分，画出各模块电路输入输出波形。

必做部分主要有两个模块：

- 定时电路。即 555 接成的单稳态电路。
- 微分电路。用于从输入信号中取一个延迟很短的下降沿的脉冲。

波形如图 4 所示。图中的输入信由开关模拟，蓝色的波形是微分电路的输出，绿色的波形是 $47\mu F$ 电容的电压，红色的波形是定时电路的输出。从游标示数可以看出，脉冲宽度为 $2.885s$ ，和预期的结果相差无几。

选做任务主要有两个模块：

- 放电模块。每个输入负脉冲到来时将电容放电，从而实现重复触发。
- 计数模块。使用 74HC161 改装。

重复触发的波形如图 5。图中输入信号连续给出负脉冲，可以看到每次电容都会放电，从而重新计时。在这段时间内定时器的输出保持高电平不变。

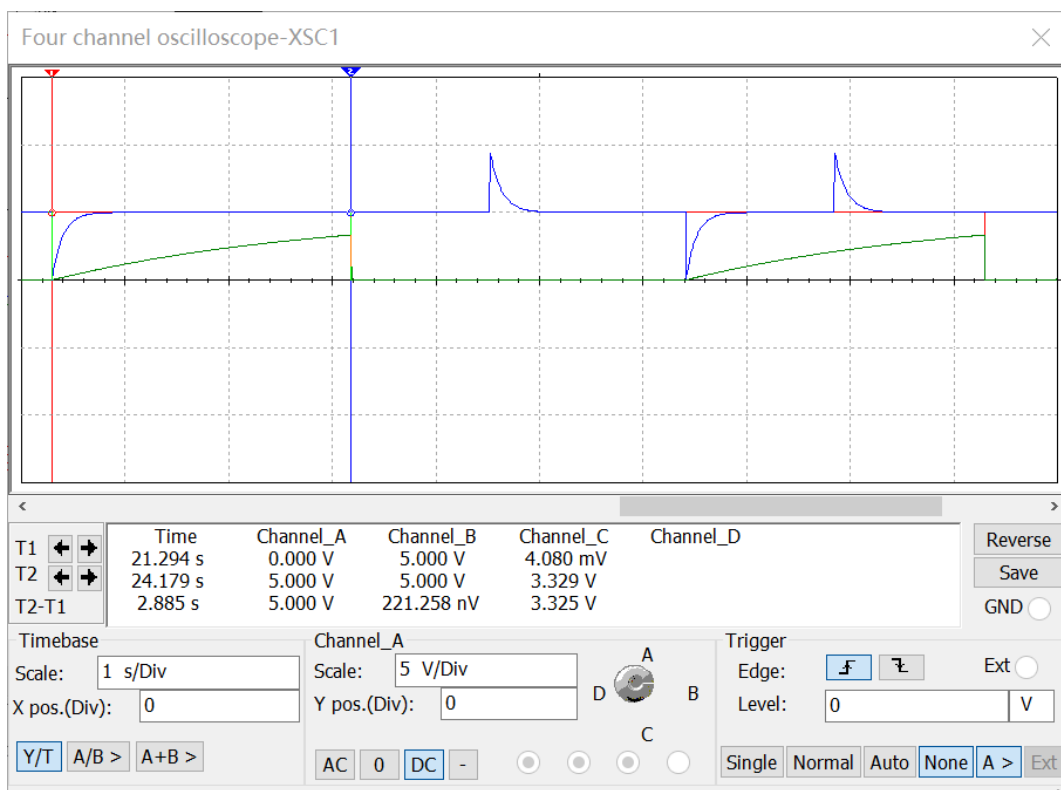


图 4: 必做任务波形

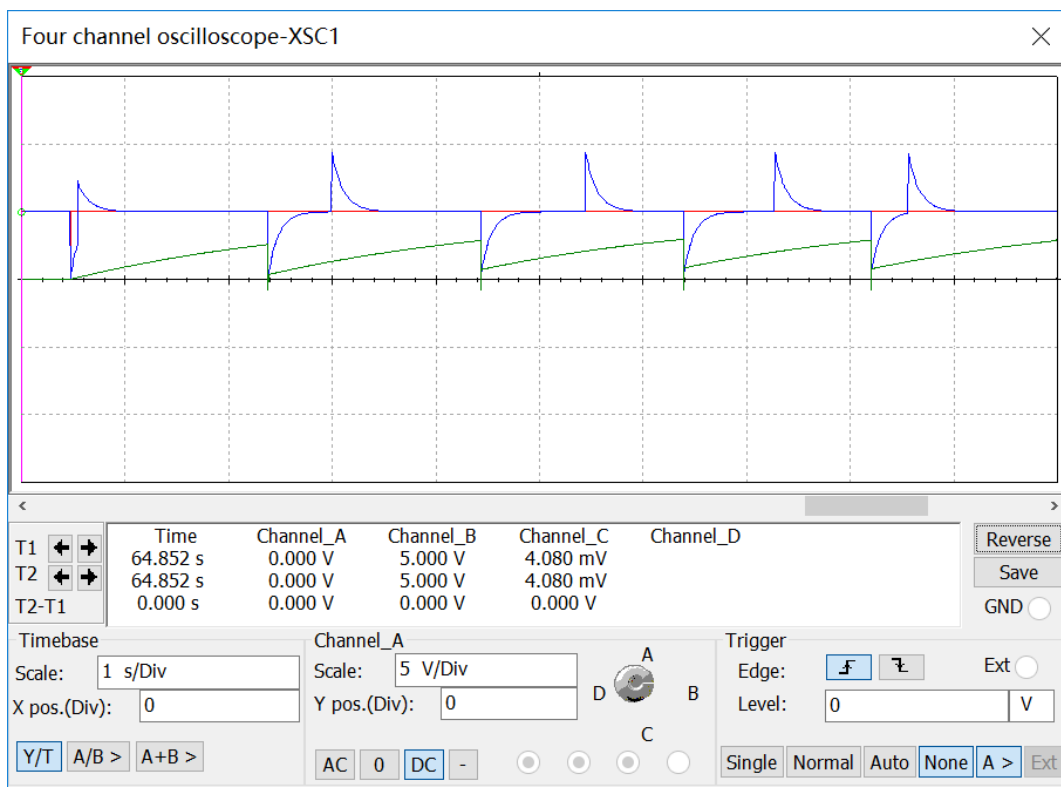


图 5: 选做任务波形

5. 画出实现电路功能的纸板电路图。

完整电路图如图 6 所示。

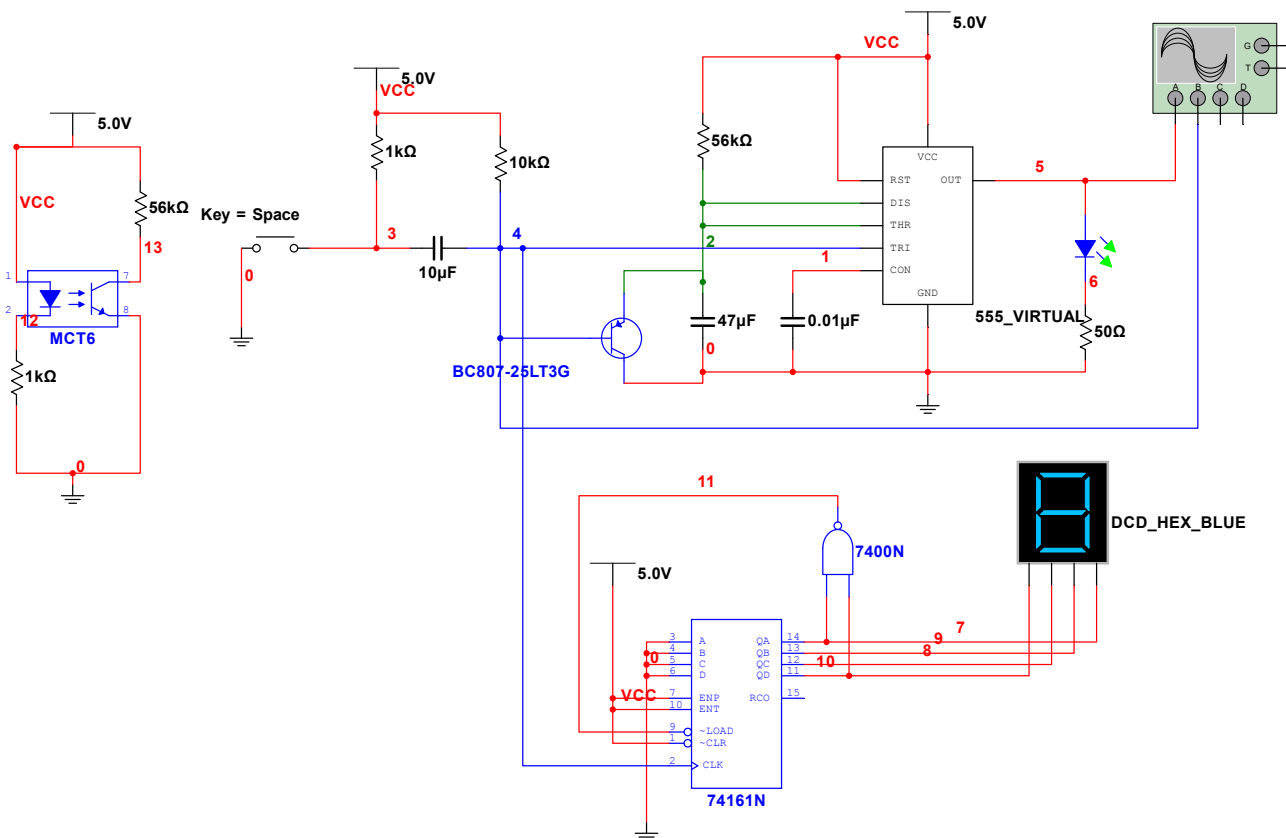


图 6: 完整电路图

6. 写出分模块调试电路的方法和步骤、注意事项等。

调试方法和步骤：

- 检查红外对管是否可以在遮挡后给出负脉冲。
- 检查微分电路是否可以得到足够小的负脉冲。
- 检查定时电路的功能。
- 检查计数器是否按照预期工作，很可能出现毛刺，也许需要防抖处理。

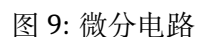
注意事项：

- 合理选择电路中各个电阻电容的参数值，确认无误后接入。
- 注意保存波形。

3 最终电路

本次实验最终的电路与预习时设计的电路有所不同。如图 7 所示。

The circuit diagram illustrates a 555 timer-based frequency divider and LED driver. The 555_VIRTUAL timer (A1) is configured with VCC = 5.0V and GND. The timing network consists of a 56kΩ resistor (R5) and a 47μF capacitor (C2). The control voltage is set by a 0.01μF capacitor (C1). The timer's output (OUT) drives an LED (LED1) through a 50Ω resistor (R4). The timer is also connected to a 2N2218 transistor (Q1) via a 56kΩ resistor (R5). The transistor's base is connected to the timer's output, and its emitter is grounded. The collector is connected to a 5.0V VCC supply. The circuit includes a 74161N counter (U1) with VCC = 5.0V and GND. The counter's output (QA) is connected to a 7400N NAND gate (U3) and a DCD_HEX_BLUE display. The counter's clock input (CLK) is connected to the timer's output. The counter's enable inputs (ENP, ENT) are connected to VCC. The counter's load inputs (~LOAD, ~CLR) are connected to GND. The counter's output (QA) is connected to the DCD_HEX_BLUE display. The circuit is powered by a 5.0V VCC supply.



3.4 放电电路

为了实现重复触发，使用 NPN 型三极管²对电容 C_2 进行放电。如图 11。施密特反相器的输入端连接的是微分电路的输出端，这样在有物体遮挡时，施密特反相器的输出端会给出一个正向脉冲。这个正向脉冲会使三极管导通，从而将电容放电。这样就可以实现重复触发。

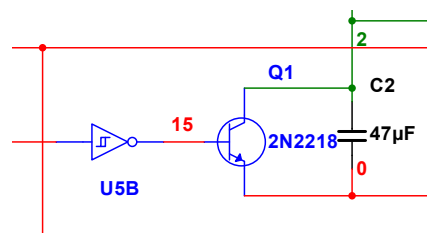


图 11: 放电电路

3.5 计数电路

计数电路如图 12 所示。

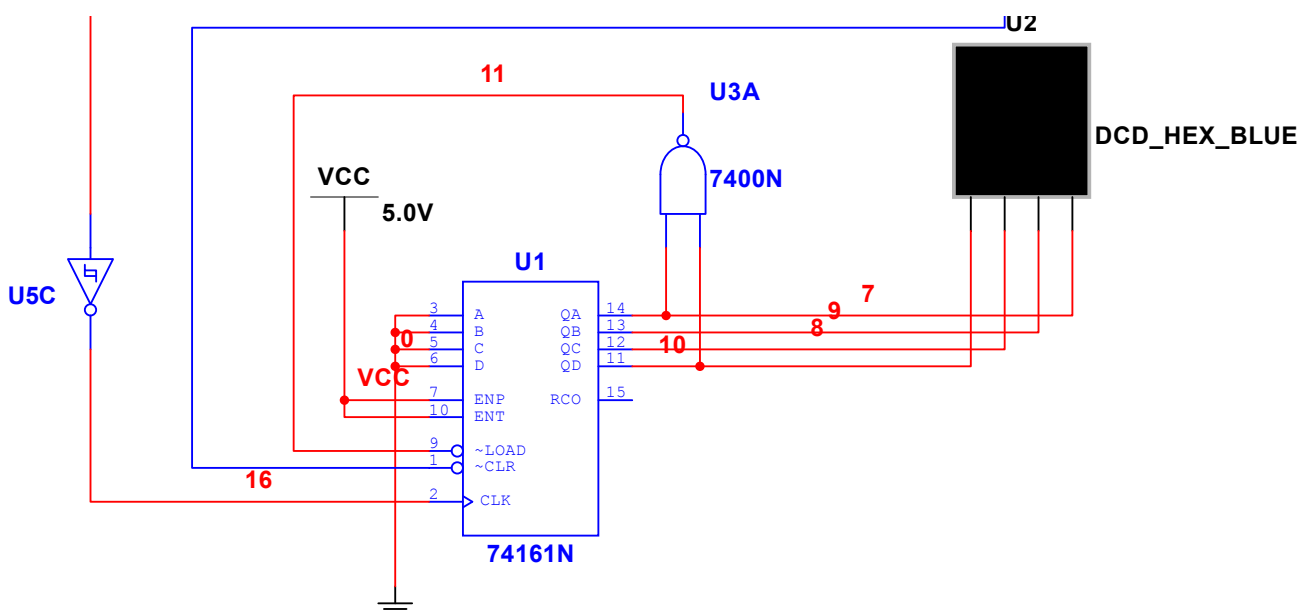


图 12: 计数电路

使用十六进制计数器 74HC161 通过同步置数法进行改装。将微分电路的输出端经过施密特反相器连接到计数器的 CLK 输入，就可以对每一个经过的物体捕捉上升沿计数。由于实验课上增加了实验要求“所有物体经过后计数置零”，我将 555 定时器的输出端连接到计数器的置零端，这样就可以实现所需功能。

4 波形分析

4.1 输入电路波形

遮挡红外对管数次，得到光电三极管 c 极波形如图 13。可以看到，每次遮挡红外对管时，输出端都会给出一个正脉冲。虽然电压满足后续驱动标准，但是这个脉冲可能会有一些抖动，不适合直接作为后级的输入。为此在设计中加入了施密特反相器。图 14 中将光电三极管 c 极波形和经过施密特反相器后的波

²见 15 页 5.3。

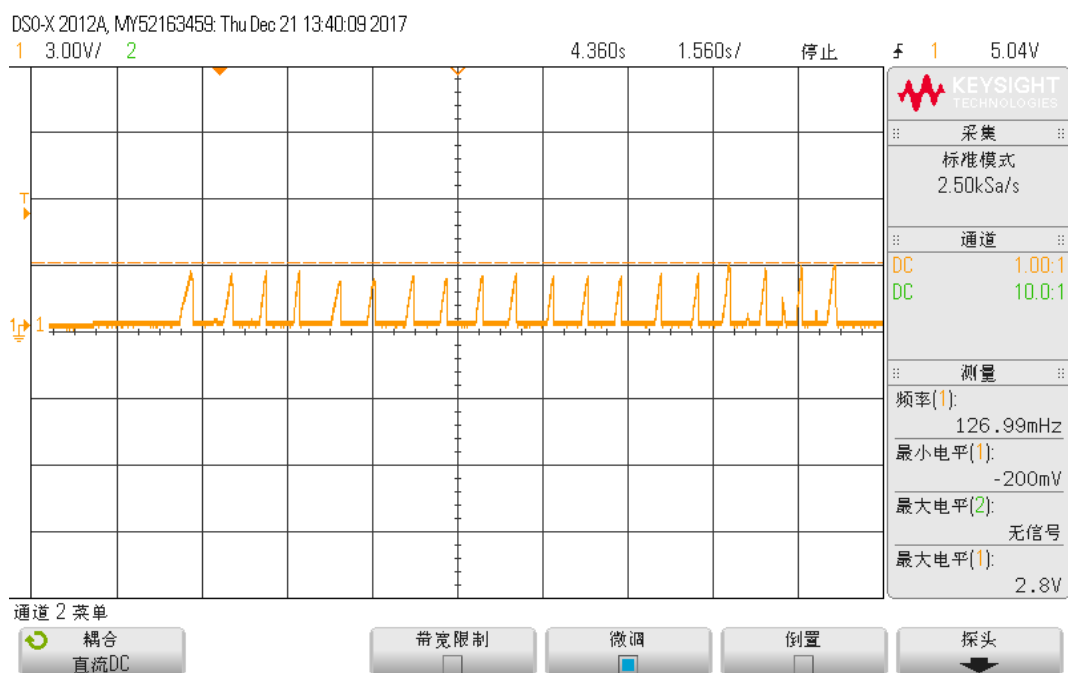


图 13: 光电三极管 c 极波形

形对比。可以看出，虽然光电三极管的 c 极电压存在抖动，但是经过施密特反相器处理后，得到了近乎完

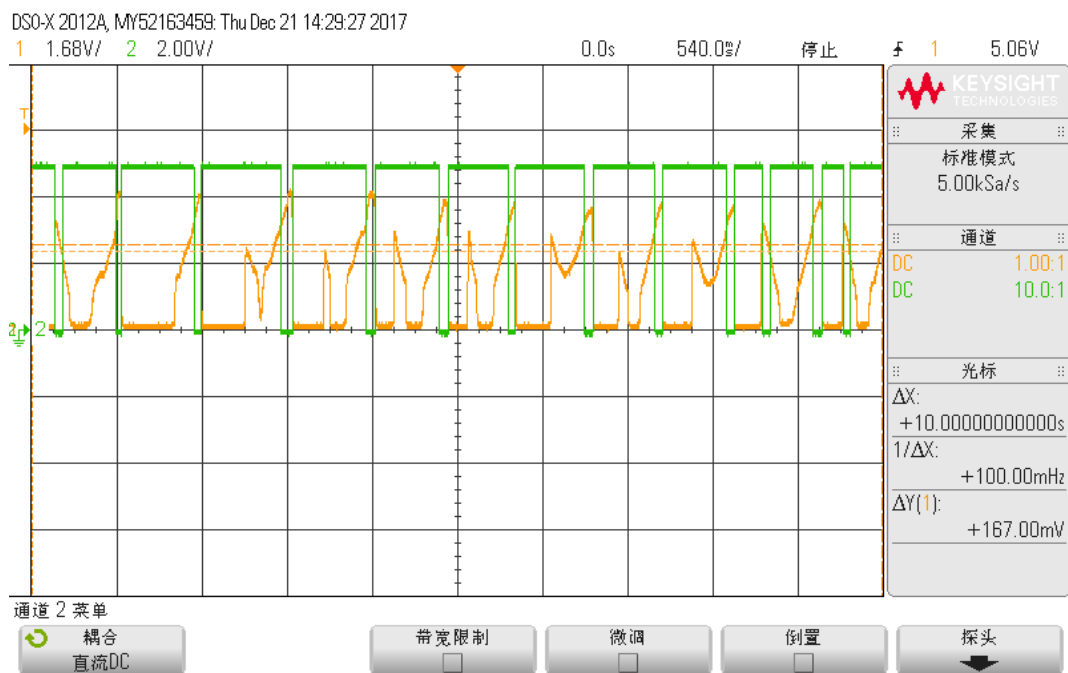


图 14: 输入模块波形

美的方波。这提高了信号的可靠性。

4.2 微分电路波形

微分电路的输入输出波形如图 15 所示。可见，微分电路成功地从输入端的负脉冲获得了更窄的脉冲。

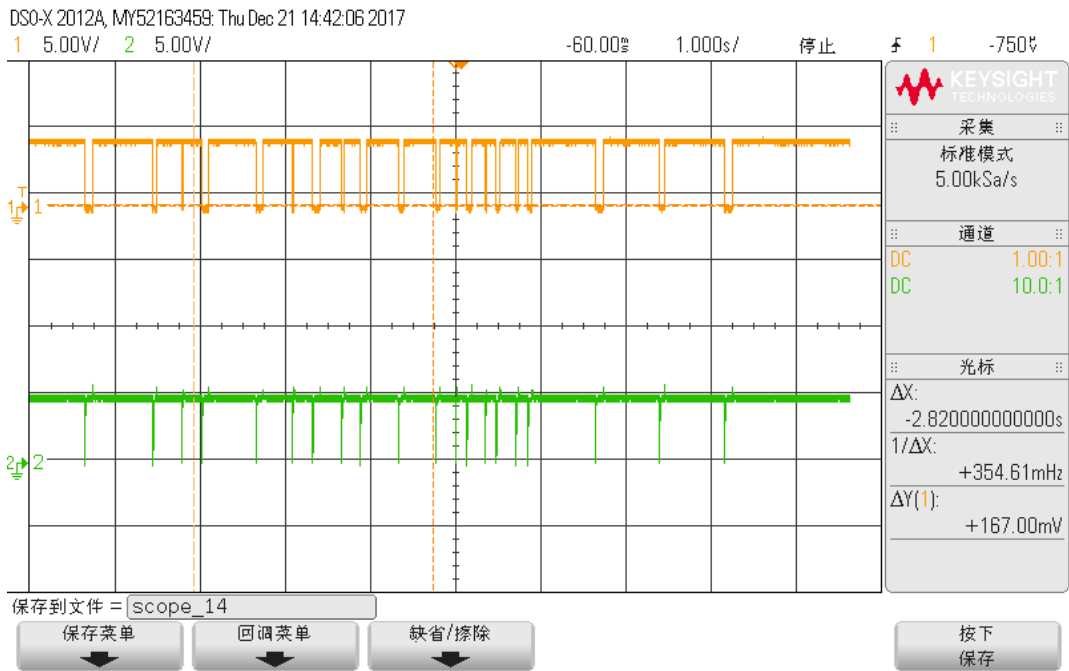


图 15: 微分电路波形

4.3 定时电路波形

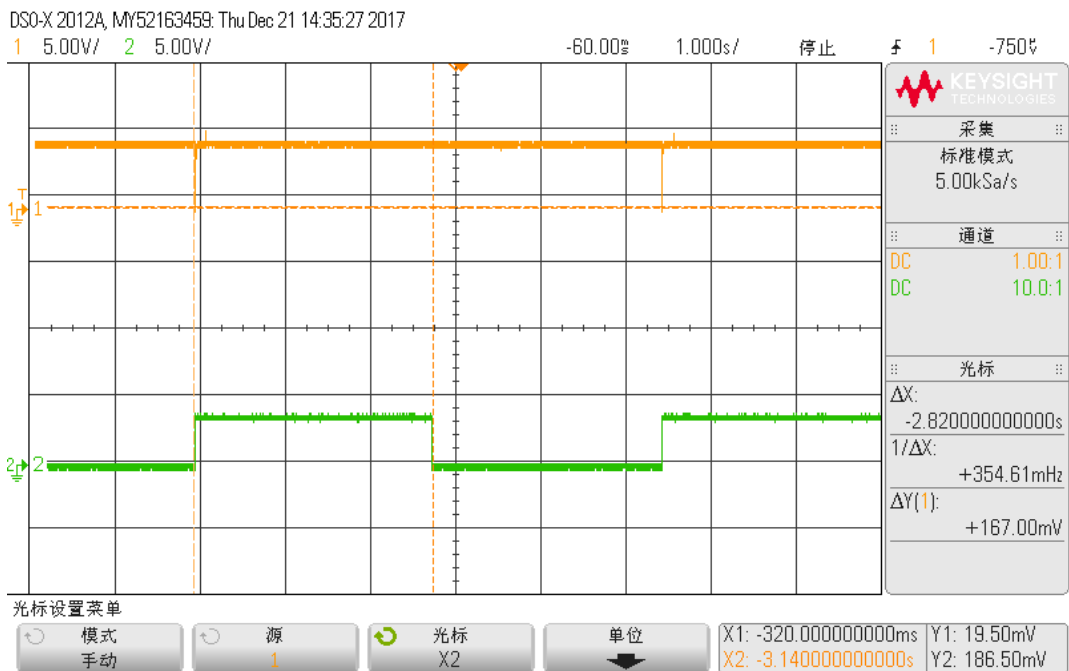


图 16: 定时器输入输出波形

555 定时器的 TRI 输入端和 OUT 输出端的波形如图 16 所示。黄色的波形是输入信号，来自微分电路；绿色的波形是输出的脉冲。利用 Cursor 功能可以测出，输出脉冲的宽度是 2.82s，这和理论值 2.8915 相差不多。

此外，由于脉冲波形的产生与电容 C_2 的充放电密切相关，还应关心电容 C_2 两端电压的波形。在必做任务的单次触发的情况下， C_2 两端电压波形与 555 的 OUT 端输出脉冲波形如图 17 所示。

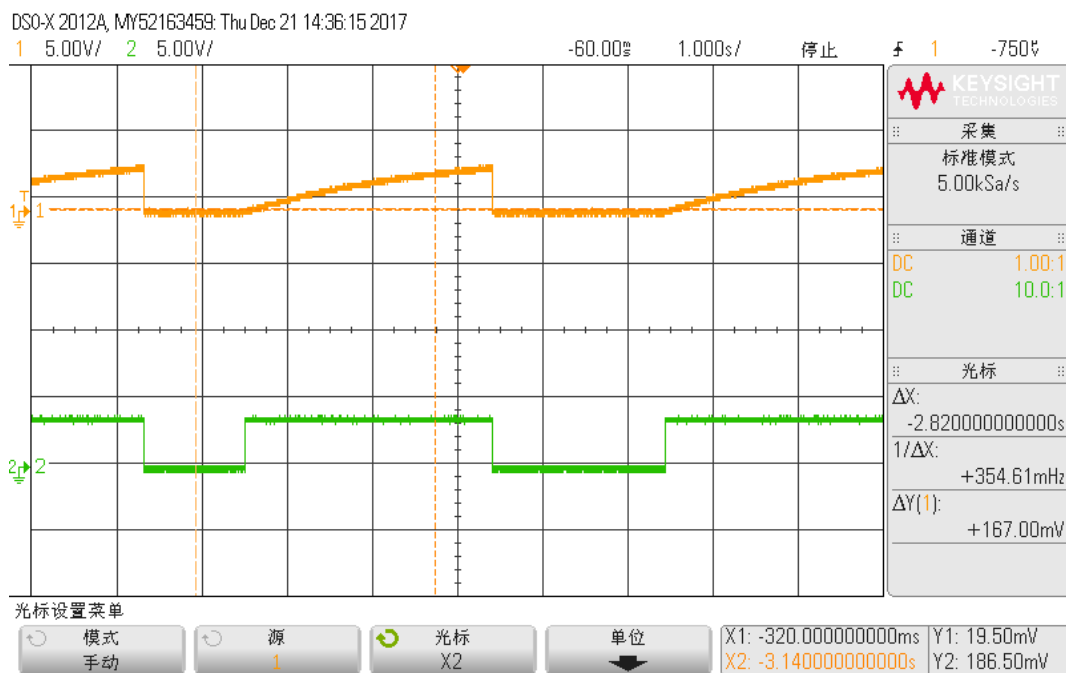


图 17: 单次触发 C_2 电压及输出电压波形

可见，每次触发脉冲到来的时候，电容都开始充电，输出端变为高电平；待电容充电到一定值时，输出端变为低电平，同时电容瞬间放电至电压为零。而且从图中可以看出，电容充电的阈值大约为 $\frac{2}{3}$ 个大格（即 $\frac{2}{3}V_{cc}$ ），这和单稳态电路的原理完全符合。

图 18 显示了重复触发下电容两端电压波形与输出波形。从波形中可以看出，在第一次触发后，输出端变为高电平，电容开始充电；在电容充电到阈值电压之前如果再次触发，则电容迅速放电到电压为零，而输出端也因此保持高电平不变。最后一次触发后，电容照例充电到阈值电压，则输出端随之变为低电平，电容也随之放电。可见，电路完美地实现了所需的功能。

5 实验总结

5.1 脉冲波形发生电路的设计和调试步骤

5.1.1 脉冲波形发生电路的设计步骤

1. 明确设计目标，根据功能划分模块，确定每一模块的输入信号和输出信号应有的关系。
2. 选择使用的电子元器件。
3. 根据设计目标和电子器件的工作原理，分析脉冲波形的产生机理，作出原理图。

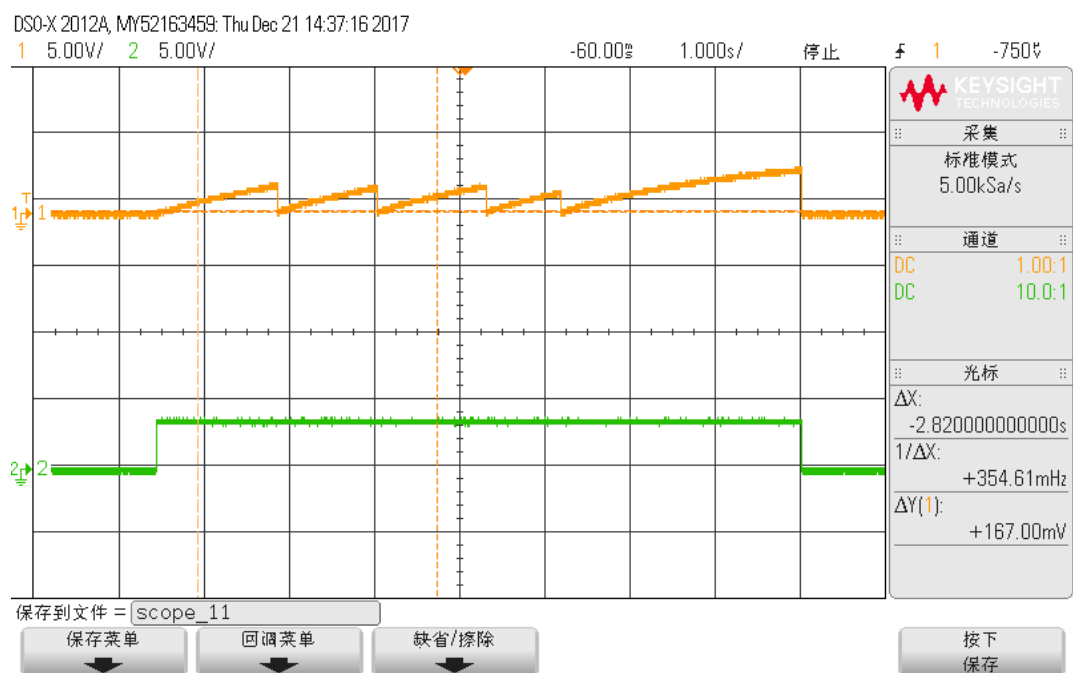


图 18: 重复触发 C_2 电压及输出电压波形

4. 根据原理图画出生成波形图。
5. 如果对脉冲波形的时间参数有要求，则需要分析波形图中的关键点，由此推导时间参数与电路参数的关系（主要是电阻电容的取值）。
6. 利用软件（如 Multisim）对电路进行仿真。
7. 搭接电路。

5.1.2 脉冲波形发生电路的调试步骤

首先检查功能是否正确，如不正确，按照以下步骤调试。

1. 由于最前端的输入为模拟信号，很可能出现抖动或者电压不符合标准的情况。用示波器先测量输入模块的输出端电压，观察波形，判断是否产生了有效脉冲。
2. 按照电路模块的次序从输入到输出依次检查波形，找到不符合预期的模块。
3. 对于输入输出关系不符合预期的模块，将其从电路中分离出来单独调试。可以利用稳定的脉冲源（例如本实验中可以使用学习机上的脉冲按键）来提供输入信号，一边检查输出信号。
4. 将有误模块调试成功后，重新接入电路测试。

5.2 其他功能电路的设计和调试步骤，注明元件取值并说明理由

其他的功能模块包括输入电路、微分电路、放电电路、计数器电路。

• 输入电路如图 8 所示。设计步骤为：

1. 了解红外发射管和光电三极管的工作原理。
2. 合理确定电阻参数。

调试步骤为：

1. 遮挡红外发射管和光电三极管之间，用示波器测量输出端是否有脉冲。
2. 如果没有脉冲，检查两个管子是否对准。
3. 获得脉冲后，还应检查脉冲的电压是否满足后级电路的驱动标准。若不满足，需要调整电阻取值。

本实验中取 $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 56\text{k}\Omega$ 。对于 R_1 ，需要考虑两个问题。首先 R_1 不能过小，否则红外发射管上的电流过大容易将其损坏； R_1 也不能过大，否则产生的电流不足以使红外发射管发出红外光。即：

$$\frac{V_{CC} - V_D}{I_{\max}} \leq R_1 \leq \frac{V_{CC} - V_D}{I_{\min}} \quad (2)$$

其中 V_D 是红外发射管的导通压降，本实验中采用的小功率红外发射管的导通压降一般为 $1.1\sim 1.5\text{V}$ 。 I_{\max} 表示最大电流， I_{\min} 表示使红外发射管发光的最小电流。本实验中的红外发射管的 I_{\max} 约为 20mA ，而 I_{\min} 应该处于 mA 的量级。若以 3mA 估算， V_D 以 1.1V 计算，可以得到：

$$195\Omega \leq R_1 \leq 1.3\text{k}\Omega$$

当然，实际的取值与红外二极管本身的参数相关，本实验中 R_1 选择了 $1\text{k}\Omega$ ，并得到了较好的结果。

对于 R_2 ，需要满足：当光电三极管导通时，输出理想的低电平；光电三极管截止时，上拉出理想的高电平。即：

$$\begin{cases} V_{CC} - I_c R_2 \leq V_{\text{IL}(\max)} \\ \frac{R_{\text{in}} V_{CC}}{R_2 + R_{\text{in}}} \geq V_{\text{IH}(\min)} \end{cases} \quad (3)$$

其中 I_c 为导通的电流，大约为几百微安到几毫安之间； $V_{\text{IL}(\max)}$, $V_{\text{IH}(\min)}$ 是后级电路可以辨认的低电平和高电平的阈值； R_{in} 是三极管截止时的内阻。事实上 R_{in} 的值不是一个定值（见 5.3），故本次实验首先采用第一个方程估算 R_2 的取值约为 $50\text{k}\Omega$ ，在根据元件盒中的资源，最终选用了 $56\text{k}\Omega$ ，并取得了不错的效果。

• 微分电路如图 9 所示。设计步骤为：

1. 从微分电路的原理出发，设计电路结构。
2. 从实际电路的需求确定电阻电容的参数值。

调试步骤为：

1. 在输入端施加一个负脉冲，利用示波器观察输出端波形是否正确。波形正确的标准是，输出的负脉冲可以被后级电路认为是低电平，且输出负脉冲的宽度小于 t_w 。

2. 如果不满足要求，需要合理调整电阻电容的取值。

本实验中电阻和电容的取值需要满足：

$$t_{\text{setup}} < 5R_3C_3 < t_W \quad (4)$$

其中系数 5 是因为通常认为 RC 电路的过渡过程在 3~5 个时间常数后结束； t_{setup} 是后级电路所需的建立时间（包括 555 定时器、计数器、用于放电的三极管等），应该为的量级。 t_W 是脉冲的宽度，本实验中为 3s 左右。故可以设置 R_3C_3 的乘积的量级为 ms，则很容易满足式 (4) 的要求。本实验中取 $R_3 = 10\text{k}\Omega$, $C_3 = 470\text{nF}$ 。

- 放电电路如图 11 所示。设计步骤如下：

1. 选用合适的三极管，确认选用的三极管是 PNP 型还是 NPN 型。
2. 根据选用的三极管种类来连接电路。

调试步骤为：

1. 给三极管 B 极一个脉冲（依据三极管是 PNP 还是 NPN 分别为负脉冲和正脉冲），用示波器测量电容（定时电路中）的电压，观察电容是否瞬间放电。
2. 如果电容不放电，需要检查是否将三极管极性接错。
3. 如果放电不完全，很可能是输入脉冲的宽度不够造成的。为此需要修改前级电路参数。

- 计数电路如图 12 所示。设计步骤如下：

1. 选择使用的芯片，如果进制不符合要求需要进行改装。
2. 连接附加端，例如本实验中将定时器的输出接入了置零端，一边在最后一个物体通过时清零计数器。
3. 将输入连接到数码管。

调试步骤如下：

1. 对计数器的时钟输入端施加脉冲，观察数码管显示是否符合预期。
2. 如果显示错误，检查数码管的四位与计数器的输出数据的四位是否存在高位低位接反的情况。并检查导线松动等原因。

5.3 实验中遇到的问题及解决方法

本次实验前，我提前搭好了面包板上的电路，并利用我手边已有的资源提前进行了测试。我使用了单片机的 5V 输出作为面包板的 V_{cc} ，利用 FPGA 编写了数码管显示电路，利用单片机上的 LED 灯作为输出和辅助调试的工具。所以，我在实验课上进行得非常顺利，只是没有想到老师会增加“最后物体通过后置零”这个任务。不过这个任务并不困难，只要利用计数器的清零端即可。在提前调试的过程中，我也确实遇到了很多问题：

1. 正负脉冲弄混。在预习中，我使用 Multisim 仿真的过程中只是简单地使用开关来模拟了光电三极管的输出。但是这就导致了我连接电路的时候将光电三极管输出脉冲的正负弄错了。不过这影响不大，只需要在输出加一个反相器即可。
2. 三极管种类弄混。在预习中，我使用 PNP 型三极管进行仿真。在搭接电路时，我看到元件盒中有三极管，并且对应的位置上面用铅笔写着“PNP”。我便未经测试就以为这就是我需要的 PNP。但是当我调试选做任务时，始终不能实现放电。后来我经过查阅资料才发现这其实是 NPN 的三极管。我修改了电路之后，便成功实现重复触发。
3. 噪声影响计数。但是我还不能实现稳定的计数：即每通过一个物体计数器增加 1。我知道这可能是因为计数器的 CLK 输入端存在毛刺。由于电路中有许多电阻、电容等，这种毛刺很容易出现。于是我在所有的模拟器件后面都增加了施密特反相器来起到一定的滤波作用。例如，我在输入电路的后级、微分电路与计数器的连接、微分电路与三极管的连接处增加了施密特反相器，效果非常好。
4. 光电三极管内阻变化。实验课上，我很快便验收成功了必做和选做任务。后来我试图保存波形的时候，我发现电路居然失灵了。我按照调试步骤首先检查输入电路，发现输入电路已经不能产生理想的高电平了。通过分析我想到，可能是通电一段时间后三极管内阻变小了。于是，我减小 R_2 电阻的阻值到 $15k\Omega$ ，成功地解决了问题。

6 思考题

1. R_1 的选取应该考虑哪些因素？这次实验中 D_1 的导通正向电流是多少、导通压降是多少？

答：首先 R_1 不能过小，否则红外发射管上的电流过大容易将其损坏； R_1 也不能过大，否则产生的电流不足以使红外发射管发出红外光。即：

$$\frac{V_{CC} - V_D}{I_{\max}} \leq R_1 \leq \frac{V_{CC} - V_D}{I_{\min}} \quad (5)$$

其中 V_D 是红外发射管的导通压降， I_{\max} 表示最大电流， I_{\min} 表示使红外发射管发光的最小电流，详见 5.2。本实验中测得 D_1 的导通正向电流为 $4.43mA$ ，导通压降为 $1.132V$ 。

2. 请简述 R_2 选取原则。在实验中使用的是 74HC 系列器件，若将其更换为 74LS 系列器件 R_2 的取值会发生什么变化？

答： R_2 需要满足：当光电三极管导通时，输出理想的低电平；光电三极管截止时，上拉出理想的高电平。即：

$$\begin{cases} V_{CC} - I_c R_2 \leq V_{IL(\max)} \\ \frac{R_{in} V_{CC}}{R_2 + R_{in}} \geq V_{IH(\min)} \end{cases} \quad (6)$$

其中 I_c 为导通时集电极电流； $V_{IL(\max)}$, $V_{IH(\min)}$ 是后级电路可以辨别的低电平和高电平的阈值； R_{in} 是三极管截止时的内阻。将 R_2 的阻值范围记做 $[R_{\min}, R_{\max}]$ 。74HC 系列为 CMOS 工艺，而 74LS 为 TTL 工艺，其高低电平标准和 CMOS 有所不同，故计算出的 R_2 取值范围 $[R_{\min}, R_{\max}]$ 也有所不同。

Transfer characteristics for 74HC

Voltages are referenced to GND (ground = 0 V)

SYMBOL	PARAMETER	T _{amb} (°C)								UNIT	TEST CONDITIONS	
		74HC									V _{CC} (V)	WAVEFORMS
		+25			-40 to +85		-40 to +125					
		min.	typ.	max.	min.	max.	min.	max.				
V _{T+}	positive-going threshold	0.7 1.7 2.1	1.18 2.38 3.14	1.5 3.15 4.2	0.7 1.7 2.1	1.5 3.15 4.2	0.7 1.7 2.1	1.5 3.15 4.2	V	2.0 4.5 6.0	Figs 6 and 7	
V _{T-}	negative-going threshold	0.3 0.9 1.2	0.52 1.40 1.89	0.90 2.00 2.60	0.3 0.90 1.20	0.90 2.00 2.60	0.30 0.90 1.2	0.90 2.00 2.60	V	2.0 4.5 6.0	Figs 6 and 7	
V _H	hysteresis (V _{T+} - V _{T-})	0.2 0.4 0.6	0.66 0.98 1.25	1.0 1.4 1.6	0.2 0.4 0.6	1.0 1.4 1.6	0.2 0.4 0.6	1.0 1.4 1.6	V	2.0 4.5 6.0	Figs 6 and 7	

图 19: 74HC14 输入电压特性

DC CHARACTERISTICS OVER OPERATING TEMPERATURE RANGE (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Limits			Unit	Test Conditions
		Min	Typ	Max		
V _{T+}	Positive-Going Threshold Voltage	1.5		2.0	V	V _{CC} = 5.0 V
V _{T-}	Negative-Going Threshold Voltage	0.6		1.1	V	V _{CC} = 5.0 V
V _{T+} - V _{T-}	Hysteresis	0.4	0.8		V	V _{CC} = 5.0 V
V _{IK}	Input Clamp Diode Voltage		-0.65	-1.5	V	V _{CC} = MIN, I _{IN} = -18 mA
V _{OH}	Output HIGH Voltage	54	2.5	3.4	V	V _{CC} = MIN, I _{OH} = -400 μA, V _{IN} = V _{IL}
		74	2.7	3.4	V	
V _{OL}	Output LOW Voltage	54, 74		0.25	0.4	V _{CC} = MIN, I _{OL} = 4.0 mA, V _{IN} = 2.0 V
		74		0.35	0.5	V _{CC} = MIN, I _{OL} = 8.0 mA, V _{IN} = 2.0 V
I _{T+}	Input Current at Positive-Going Threshold		-0.14		mA	V _{CC} = 5.0 V, V _{IN} = V _{T+}
I _{T-}	Input Current at Negative-Going Threshold		-0.18		mA	V _{CC} = 5.0 V, V _{IN} = V _{T-}

图 20: 74LS14 输入电压特性

由于本次实验中我在光电三极管的 c 极接入了施密特反相器 74HC14，故下面的推导都使用 74HC14 和 74LS14 的参数。首先查阅 datasheet 得到二者的输入特性，分别为图 19 和图 20 所示。

为了统一标准，对两者都采用电压特性中的 max 值。很遗憾，74HC14 并没有 V_{CC} = 5V 时的参数。为了得到近似的参数值，我使用线性回归的方法对不同 V_{CC} 下的 V_{T+} 和 V_{T-} 进行拟合，得到 74HC14 在常温 V_{CC} = 5V 下的 V_{T+} 和 V_{T-} 分别为 3.51V 和 2.19V，两次拟合的相关系数分别为 r₁ = 0.9998 和 r₂ = 0.9996，可见拟合效果很好。下面讨论选用 74HC14 和 74LS14 时 V_{T+} 和 V_{T-} 的取值。

- 对于高电平 V_{T+}，74HC14 需要满足：

$$\frac{R_{in}V_{CC}}{R_2 + R_{in}} \geq V_{(HC)T+}$$

通过 datasheet 可以看到，74LS14 存在高电平的输入电流，而且这个电流已经达到了 mA 的量

级，不可忽略。故则需要将 I_{T+} 考虑在内，推导之后得到结果：

$$\frac{R_{in}(V_{CC} - RI_{(LS)T+})}{R_2 + R_{in}} \geq V_{(LS)T-}$$

进一步得出 R_{\max} 的取值：

$$\begin{cases} R_{(HC)\max} = \frac{V_{CC} - V_{(HC)T+}}{V_{(HC)T+}} R_{in} \\ R_{(LS)\max} = \frac{V_{CC} - V_{(LS)T+}}{V_{(LS)T+} + R_{in}I_{(LS)T+}} R_{in} \end{cases} \quad (7)$$

上式即为使用两种不同芯片的 R_2 的最大值的取值表达式。然而，由于 R_{in} 未知，仅通过上式无法确定 $R_{(HC)}$ 和 $R_{(LS)}$ 的相对大小。而事实上 R_{in} 的取值也会随通电时间的变化而变化。另一方面，如果没有使用施密特反相器，而是使用普通的反相器，则 TTL 工艺的高电平输入的电流会很小，在 μA 量级，可以忽略。这时可以明显地看出 $R_{(LS)\max} > R_{(HC)\max}$ 。

- 对于低电平 V_{T-} ，不难得出：

$$\begin{cases} R_{(HC)\min} = \frac{V_{CC} - V_{(HC)T-}}{I_c} \\ R_{(LS)\min} = \frac{V_{CC} - V_{(LS)T-}}{I_c + |I_{(LS)T-}|} \end{cases} \quad (8)$$

代入数据 $V_{CC} = 5V$ ， $V_{(HC)T-} = 2.19V$ ， $V_{(LS)T-} = 0.18mA$ ， $I_c = 100\mu A$ ，可以得出：

$$\begin{cases} R_{(HC)\min} = 28.1k\Omega \\ R_{(LS)\min} = 13.9k\Omega \end{cases}$$

可以看出 $R_{(LS)\min} < R_{(HC)\min}$