

数字电路实践技术

贾秀美 主编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

前 言

《脉冲与数字电路》是一门实践性很强的课程,通过实验不仅可以巩固和加深对基础理论知识的理解,而且可以培养学生独立分析问题、解决问题的能力 and 严谨的工作作风,以适应市场经济建设对人才培养的要求。

为了适应深化教学改革的需要和加强实践性环节的教学,参照高等学校工科电子技术课程教学指导组制定的《脉冲与数字电路实验基本要求》,结合多年的实验教学实践,编写了这本教材。

近几年来,随着数字电子技术的迅速发展,在数字电子系统、控制系统和信号处理等在各种中、大规模集成电路各方面得到广泛的运用,这就要求学生熟悉并掌握常用中、大规模集成电路的实际应用方法。除通过实验教学培养学生掌握数字电路的基本实验方法及分析问题、检查排除故障和使用常用仪器这些基本实验技能外,还必须重视培养学生工程设计的能力。

本书以数字电路为主、TTL 和 CMOS 集成电路并重,加强了常用中、大规模集成电路及设计性实验和内容。本书在第一部分(即第一章至第六章)共设有 19 个基本实验,着重培养学生掌握基本知识和技能训练以及独立解决实际问题的能力。部分实验采用了中、大规模集成电路以设计性为主的大型实验,根据教学内容编写了不同类型实验,可根据不同专业的要求选做内容。第二部分(即第七章)共有 13 个综合性和 5 个提高性实验课题,可作为理论课教学结束后进行的大型实验或课程设计的参考。实践证明,这个环节能使学生在综合运用所学理论知识的基础上,拓宽知识面、系统地进行电子电路的工程实践训练,为后续课的学习、毕业设计乃至工程技术工作打下一个良好的基础。第三部分(即第八章)介绍了常用的实验仪器。附录中介绍了常用的数码管显示器、TTL 和 CMOS 显示译码器及它们之间的动、静态连接方法,以及本书使用的常用逻辑图形符号,给出了 TTL 器件、CMOS 器件的型号对照表及器件引出端脚排列图,可供实验、课程设计和毕业设计参考。

为了达到实验的预期目的,学生在实验前必须认真做好预习,明白实验原理、内容和方法;实验中要实事求是、一丝不苟,充分发挥主观能动性,独立完成实验;实验后要认真撰写实验报告。通过实验,一定能在理论知识结合实践技能方面有较大的提高。

本书第二、三、四、五章由主编贾秀美编写,第一、八章和附录由副主编宋年年编写,第六、七章由副主编秦建敏编写。

本书由太原理工大学马福昌教授主审。在本书编写过程中,得到了从事教学实验工作多年的杨六海副教授、渠云田副教授、丁芳老师的支持与帮助,吸收了许多宝贵的意见。本书的编辑与出版还得到了太原理工大学电气与动力工程学院各位领导的大力支持,编者在此一并致以诚挚的谢意。

鉴于时间仓促和编著者水平有限,书中如有不妥之处,敬请读者批评指正。

编著者

1999 年 5 月

目 录

第一章 示波器与脉冲电路及其应用	(1)
第一节 双踪示波器及其应用	(1)
一、YB4322型双踪示波器的基本工作原理	(1)
二、脉冲波形参数及其测量	(2)
三、双踪显示测量方法	(5)
四、用示波器监测脉冲信号发生器输出信号的波形参数	(6)
第二节 晶体管开关特性、限幅器与钳位器	(6)
一、晶体二极管的开关特性	(6)
二、晶体管的开关特性	(7)
三、限幅器	(9)
四、钳位器	(9)
第三节 555定时器和集成单稳态触发器及其应用	(9)
一、555时基电路	(9)
二、集成单稳态触发器及其应用	(12)
实验一 双踪示波器及其应用	(13)
实验二 晶体管开关特性测试	(15)
实验三 555定时器及其应用	(17)
第二章 集成逻辑门	(19)
第一节 TTL 逻辑门	(19)
TTL 与非门的主要参数	(19)
第二节 CMOS 集成电路及其接口电路	(21)
一、CMOS 与非门的主要参数	(21)
二、CMOS 电路的接口电路	(22)
第三节 集电极开路门和三态门的使用方法	(23)
一、集电极开路门	(23)
二、三态门	(24)
实验一 门电路的参数测量	(25)
实验二 TTL 门电路的逻辑变换和测试	(26)
第三章 组合电路的分析与设计	(28)
第一节 组合电路的分析	(28)
第二节 组合电路的设计	(30)
一、用基本电路进行组合逻辑设计	(30)
二、用SSI设计组合电路和冒险现象的观察与消除	(31)
三、用中规模集成电路进行组合逻辑设计	(34)
实验一 组合逻辑电路分析	(41)
实验二 二进制加法器及其应用	(42)

实验三	用SSI设计组合逻辑电路	(44)
实验四	组合逻辑电路设计	(45)
实验五	用MSI设计组合逻辑电路	(45)
实验六	一位BCD加法器设计	(46)
第四章	集成触发器及其应用	(48)
第一节	集成触发器的原理	(48)
一、	基本RS触发器	(49)
二、	JK触发器和维持阻塞D触发器	(50)
三、	T触发器和T'触发器之间的相互转换	(52)
四、	CMOS触发器	(54)
五、	触发器的脉冲工作特性	(55)
六、	触发器的应用	(55)
实验	触发器的应用	(56)
第五章	时序电路的设计及其应用	(57)
第一节	同步时序电路设计	(57)
一、	同步计数器的设计	(57)
二、	同步分频器的设计	(59)
三、	移位寄存器的设计	(61)
四、	脉冲分配器及其设计	(62)
五、	序列信号发生器及其设计	(66)
第二节	异步时序电路设计	(68)
一、	异步计数器的设计	(68)
二、	N进制异步计数器的设计	(72)
第三节	MSI移位寄存器及其应用	(74)
集成	移位寄存器	(74)
第四节	MIS计数器及其应用	(80)
一、	集成异步计数器	(80)
二、	集成同步计数器	(81)
第五节	RAM和ROM的操作及应用	(89)
一、	静态随机存取存储器RAM	(89)
二、	ROM(只读存储器)	(92)
第六节	数/模和模/数转换器及其应用	(94)
一、	D/A转换器	(94)
二、	A/D转换器	(97)
实验一	时序电路的分析	(100)
实验二	同步时序电路设计(一)	(102)
实验三	同步时序电路设计(二)	(103)
实验四	MSI时序电路的应用	(103)
实验五	RAM和ROM及应用	(108)

实验六 D/A、A/D 转换器的应用	(110)
第六章 通用阵列逻辑实验	(112)
第一节 GAL 的基本结构	(112)
一、GAL 具有通用逻辑电路的基本结构	(112)
二、PLD 器件内部逻辑电路的一般表示方法	(113)
三、GAL16V8 内部结构	(114)
四、GAL 器件输出通道的五种构型	(117)
五、GAL16V8 结构的使用要点	(119)
第二节 如何用 GAL 设计数字逻辑电路	(119)
一、逻辑设计	(120)
二、编辑逻辑描述文件(PLD 文件)	(121)
第三节 CLPE 通用编程器用法简介	(126)
一、简介	(126)
二、CLPE 通用编程器使用方法	(127)
第七章 数字电路课程设计	(130)
第一节 概论	(130)
一、课程设计的目的与要求	(130)
二、课程设计的教学过程	(130)
第二节 数字电路系统设计方法	(131)
一、数字电路系统的组成与类别	(131)
二、数字电路系统的设计步骤	(134)
第三节 数字小系统设计举例——可编程时钟控制器	(134)
一、课题的任务与要求	(134)
二、设计过程	(135)
第四节 设计参考单元电路	(148)
一、脉冲波形产生电路	(148)
二、信号变换电路	(152)
三、音响与报警电路	(158)
四、驱动显示电路	(161)
五、A/D 和 D/A 变换的典型应用电路	(167)
第五节 数字电路课程设计基本题题选	(171)
一、数字式竞赛抢答器	(171)
二、数字电子钟	(172)
三、交通信号灯控制器	(173)
四、出租车自动计费器	(175)
五、四路彩灯显示系统	(176)
六、三位数字显示计时系统	(176)
七、电子密码锁	(176)
八、电子拔河游戏机	(177)
九、声控电子锁	(178)

十、多路数据采集系统	(180)
十一、数字频率计	(182)
十二、GAL 多路数据选择器的设计	(183)
十三、GAL 十进制可逆计数器的设计	(183)
第六节 数字电路设计提高题题选	(185)
一、数字万用表	(185)
二、数字波形合成器	(187)
三、用示波器进行乒乓球游戏	(192)
第八章 实验仪器	(195)
第一节 YB4322型双踪示波器	(195)
一、概述	(195)
二、主要技术性能	(195)
三、基本工作原理	(196)
四、使用方法	(198)
第二节 E312型电子计数式频率计	(201)
一、概述	(201)
二、主要技术性能	(201)
三、基本工作原理	(203)
四、使用方法	(206)
五、测量误差	(210)
第三节 XC-13型脉冲信号发生器	(211)
一、概述	(211)
二、主要技术性能	(211)
三、基本工作原理	(212)
四、使用方法	(213)
第四节 SD-1型数字逻辑电路实验仪	(214)
一、概述	(214)
二、主要技术性能	(215)
附录一 显示译码器和数码管	(217)
一、常用的数码显示器件	(217)
二、显示译码器	(218)
附录二 实验基本知识	(230)
一、集成电路命名规则	(230)
二、逻辑图形符号	(231)
三、TTL 集成电路与 CMOS 集成电路的使用规则	(235)
四、实验电路布线及常见故障的检查与排除	(237)
附录三 常用集成电路型号对照表与引出端排列图	(241)
主要参考书目	(260)

第一章 示波器与脉冲电路及其应用

第一节 双踪示波器及其应用

YB 4322 型双踪示波器频带宽度为 $10 \sim 20 \text{ MHz}$ ，用以观察和测定两种不同电信号的时间过程，它可以同时显示两个不同电信号的波形，以便分析比较；也可以显示两个信号的和（CH1 + CH2）和两个信号的差（CH1 - CH2）；还可以任选某一通道作单踪显示。

一、YB4322 型双踪示波器的基本工作原理

1. 整机的原理方框图

该机主要由主机、Y 轴偏转系统、X 轴偏转系统和 Z 轴放大器几个主要部分组成，整机的原理框图如第八章图 8-1 所示，面板上各控制开关和旋钮如图 8-2 所示。

主机包括示波器显示系统、校正信号和电源供给。校正信号用以检查、校对 Y 轴灵敏度和扫描速度；各级电路所需的低压电源由低压电子稳压器供给，示波管显示系统所需高压由高频高压发生器供给。

Y 轴偏转系统含有 CH1 和 CH2 两个结构相同、相互独立的输入通道及共用 Y 轴输出放大器，并含有切换逻辑电路（即电子开关）。电子开关受显示方式开关（图 8-2 MODE ⑰）和扫描信号的控制，对两个通道的信号进行切换，即根据需要选择显示 CH1 和 CH2 通道的信号或同时显示 CH1 和 CH2 信号（双踪显示），被选中的信号经放大后送到示波管 Y 轴偏转板。

触发信号送至触发电路整形、微分后，取其负向脉冲信号，触发启动时基发生器产生锯齿波扫描信号（当触发方式开关 TRIG ⑳置于 AUTO 时，时基发生器则产生自激扫描信号），锯齿波扫描信号经 X 轴放大器放大后送到示波器 X 轴偏转板。

当显示方式开关分别置于 ALT、CHOP（双踪）位置时，荧光屏上就以“交替”或“断续”显示方式同时显示两个不同信号的波形。

Z 轴放大器由增辉驱动电路与消隐驱动电路组成。增辉驱动电路受时基发生器控制，使示波管只在扫描正程显示光迹。当示波器工作在断续方式时，消隐驱动电路受电子开关控制，使扫描线在由显示 CH1 到显示 CH2 与由显示 CH2 到显示 CH1 的转移过程中示波管不显示光迹。

2. 示波器的工作特性

（1）脉冲示波器是脉冲与数字电路实验的常用仪器之一，其主要技术指标是示波器 Y 轴放大器的频带宽度 B 及放大器的输入阻抗。

脉冲示波器能够观察包括脉冲波形在内的各种信号波形。众所周知，脉冲的前、后沿愈陡，其频谱所占带宽愈宽。如果要 Y 轴放大器不失真地传送脉冲信号，它必须有足够的带宽。目前大多数通用示波器 Y 轴放大器的低频响应已扩展至直流，因此 Y 轴放大器的高频响应将直接影响波形的失真。使用一台 Y 轴放大器频带宽度为 B 的示波器观察一个理想的阶跃信号，示波器荧光屏上将显示一个具有边沿时间 t_0 的阶跃信号，称 t_0 为示波器的建立时间。实验证明，示波器的频带宽度 B 和建立时间 t_0 存在如下的近似关系（波形的上冲量 $\delta \leq 5\%$ ）：

$$Bt_{r0} \approx 0.35$$

YB 4322 示波器频带宽度为 DC ~ 20 MHz, 建立时间(即上升时间) t_{r0} 通常为 17.5 ns, 当 Y 轴“扩展 $\times 5$ ”时约 23 ns。

(2) 连续扫描、触发扫描和高速扫描。为了在荧光屏上显示稳定的信号波形, 要求 X 轴的扫描信号必须与被测信号同步。YB 4322 型示波器有三种扫描工作方式。一种是连续扫描工作方式 [YB 4322 示波器的触发方式开关置于 AUTO (自动档)], 此时扫描电路产生自激扫描信号, 荧光屏显示扫描线。在观察信号波形时, 扫描信号能在一定范围内与外加被测信号同步, 使显示的波形稳定。连续扫描工作方式通常用来观察工作频率不高的正弦波信号。另一种是触发扫描工作方式 [YB 4322 型示波器触发方式开关置于 NORM (常态档)], 此时示波器扫描受触发信号控制, 在无触发信号时扫描停止(扫描处于等待状态), 荧光屏上无扫描线。触发扫描工作方式用来观察包括脉冲波形在内的各种信号波形。当 LEVEL (电平) 旋钮 ⑱ 置于 0 (锁定) 位置时, 触发电平自动地保持在最佳值, 而与信号幅度无关(从很小的幅度到大的幅度), 不需要手动调节。还有一种扫描处于高频同步状态, 用时基发生器产生的频率约 200 kHz 的自激振荡信号去同步被测信号, 使荧光屏上显示的波形稳定。LEVEL (电平) 旋钮 ⑱ 对波形的稳定有控制作用(详见第八章第一节)。这种方式对观察较高频率的信号是有利的。

3. 触发源选择与显示方式的关系

(1) 触发源: INT (内触发)、EXT (外触发)。

(2) 内触发。当触发源选择开关 (SOURCE ⑳) 置于 INT 位置时, 其触发输入信号取自 Y 轴放大器, 经适当放大后反馈自触发电路。这种触发形式操作比较简单, 适用于正常测试。

(3) 外触发。是指扫描的触发信号由机外直接加入。触发信号可以是被测信号, 也可以是与被测信号有固定时间关系, 且边沿较陡的信号, 因而这种触发方式的优点是不受 Y 轴系统操作的影响, 特别是不受“V/DIV”灵敏度选择开关的牵制。因此, 当使用外触发信号源启动扫描后, 即使再变动 Y 轴系统的控制旋钮, 只要外触发波形无变化, 仍能进行正常的触发。

如果需要在输入被测信号之前或者之后开始启动扫描, 那么利用外触发形式即能观察这种情况。

二、脉冲波形参数及其测量

1. 脉冲波形参数

矩形脉冲是常见的一种脉冲波, 其波形如图 1-1 所示。其主要参数有: 重复周期 T 、脉宽 t_w 、上升时间 t_r 、下降时间 t_f 和脉冲幅度 V_m 等。方波脉冲参数的定义与矩形脉冲相同。尖脉冲是另一种常见的脉冲波, 它的脉冲宽度是指在 $0.1V_m$ 处, 波形的前沿到后沿之间的时间间隔。正尖脉冲的幅度为 V_m^+ , 负尖脉冲的脉冲幅度为 V_m^- 。

2. 电压测量方法

用示波器测量电压, 实际上是测量波形的幅度。因此, 在测量幅度时, 灵敏度 (V/DIV) 微调旋钮必须置于 CAL 校正位置。使被测波形稳定地显示在荧光屏中央。一般要求被测部分在 Y 轴方向占 4 ~ 6 大格 (DIV), 以减少测量误差。

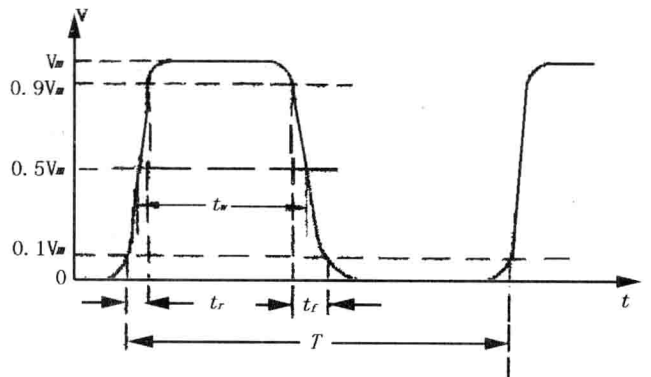


图 1-1 实际的矩形脉冲波形

由于被测信号一般都含有交流及直流两种成分,如图 1-2 所示。通常在测量波形的交流成分的电压值时,应将 Y 轴输入耦合置于 AC 的位置,以隔开被测信号的直流成分。

(1) 交流电压与脉冲幅度的测量

若灵敏度选择开关所处档的标称值为 V_0 (V/DIV), 被测波形在荧光屏 Y 轴上所占尺寸为 H (DIV), 探头在 $\times 1$ 档处, 则被测波形的电压幅值为

$$V = HV_0 \text{ (V)} \quad (1)$$

若被测波形的电压幅值很大时, 则要使用探头的 $\times 10$ 档(将被测信号衰减 10 倍), 此时被测电压的实际数值应是荧光屏上直接读的数值的 10 倍, 即

$$V = HV_0 \times 10 \text{ (V)} \quad (2)$$

在使用探头或直接送到示波器(不用探头)来测量快速变化的信号时, 必须注意接地点应选在被测点附近。波形的高、低电平的值也可用上述方法测量。

(2) 被测信号直流成分的测量

测量步骤如下:

① 显示被测信号波形。将 Y 轴输入耦合置于 AC, 将被测信号从示波器探头送入, 使波形大小适中、位置合适。

② 确定零电平基准线。将 Y 轴输入耦合置于 GND, 触发方式开关置于 AUTO (自动), 荧光屏将显示扫描基线。把扫描基线调至与邻近的水平标尺线重叠。此水平标尺线即为零电平基准线。然后将输入耦合重新置于 AC, 显示被测信号波形(如果被测信号为直流电压, 波形只是一条直线即扫描基线, 而且与零电平基准线重叠)。要记住从波形顶部到零电平基准线之间的距离, 用 H_1 (DIV) 表示, 如图 1-3(a) 所示。

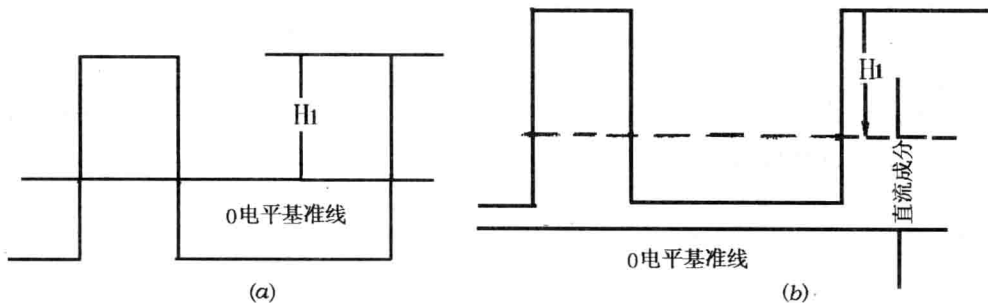


图 1-3 被测信号波形

(a) 不含直流成分的波形(上、下波形面积相等); (b) 含直流成分的波形

③ 读波形的直流成分(或直流电压)的值。将输入耦合从 AC 置于 DC, 此时被测信号波形就要在 Y 轴方向上发生位移。此时, 从波形顶部开始(向下), 距离为 H_1 (DIV) 处(AC 耦合时, 零电平基准线就在此处), 此处与零电平基准线之间距离的电压值即为被测信号的直流成分, 如图 1-3(b)

所示。如果被测信号为直流电压，扫描基线发生位移，位移距离的电压值即为直流电压之值。其值仍按上述(1)或(2)式计算。被测波形位于零电平基准线上方的为正电压值，位于零电平基准线下方的为负电压值。

3. 时间测量方法

时间测量是指对脉冲重复周期、脉冲宽度和边沿时间等时间参数的测量。在测量时间参数时，扫描速度(TIME/DIV)微调旋钮必须置于“校正”位置，扫描扩展置于常态(按入)。调节有关开关和旋钮，使被测波形稳定地显示在屏幕中央，一般要求被测部分在X轴方向占4~6大格(DIV)。

(1) 脉冲重复周期和脉冲宽度的测量

如果扫描时间(TIME/DIV)所处档的标称值是 t_0 ($\mu\text{s}/\text{DIV}$)，被测波形在X轴方向所占的水平距离为 L (DIV) (例如在图1-4中 $L = 4.45 \text{ DIV}$)，则测得时间为

$$t = L t_0 (\mu\text{s}) \quad (3)$$

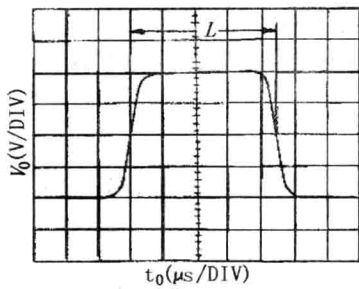


图1-4 时间(脉冲宽度)测量

若被测时间很小，在扫描时间开关置于 $0.2 \mu\text{s}/\text{DIV}$ 时，还无法读出X轴距离，则可借助于示波器的“扩展 $\times 5$ ”开关，使波形在X轴方向放大5倍。若此时荧光屏上测得的距离为 L (DIV)，则测得的时间为

$$t = L \cdot t_0 \times \frac{1}{5} \quad (4)$$

(2) 脉冲边沿时间的测量

测量步骤如下：

① 合理地选择示波器的触发极性(用触发极性选择开关控制)。若测量波形的上升边沿，应使用“+”极性触

发；若测量波形的下降边沿，应使用“-”极性触发。

② 调节Y轴灵敏度选择开关及其微调旋钮，使被测信号的波形幅度占满荧光屏中间6大格(顶部与底部各空1大格)。改变扫描时间选择开关，使被测边沿稳定地显示在荧光屏上，并在X轴方向有足够的格数。

③ 根据边沿时间的定义，波形的光迹分别与荧光屏中间6格的第一与第六格中的虚线相交(两交点的幅值为 $0.1V_m$ 与 $0.9V_m$)，若两交点在X轴方向上的距离为 L (DIV)，此时的扫描时间为 t_0 ($\mu\text{s}/\text{DIV}$)，则测得的边沿时间为

$$t_r = L t_0 (\mu\text{s}) \quad (5)$$

若扫描时间为 $0.2 \mu\text{s}/\text{DIV}$ 时 L 仍然很小，则应采用扫描“扩展 $\times 5$ ”开关，使波形在X轴方向放大5倍，使上述的两交点在X轴方向有足够的格数，如图1-5所示。则此时测得的边沿时间为

$$\begin{aligned} t_r &= L \times 0.2 \times \frac{1}{5} \\ &= 40L (\text{ns}) \end{aligned} \quad (6)$$

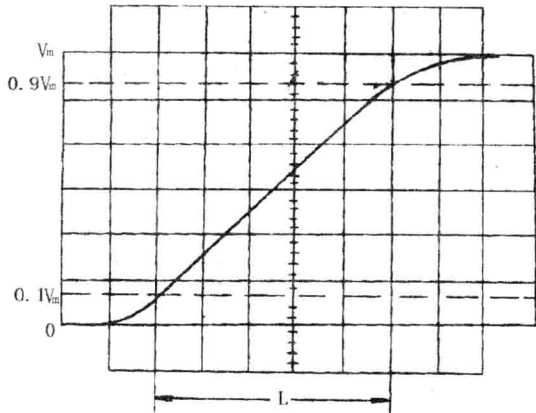


图1-5 边沿时间测量

为了不失真地显示被测波形边沿,要求被测边沿时间应大于本机的上升时间 t_{r0} (23 ns) 的三倍以上,否则其前沿(或后沿)的时间值 t_r (或 t_f) 应由下式校正:

$$t_r = \sqrt{t^2 - t_{r0}^2} \quad (7)$$

上述测量边沿时间的方法同样可以用来测量尖脉冲的脉宽。

三、双踪显示测量方法

双踪显示可以用来直接观测和比较周期成简单整数比的两个信号波形的时间和相位关系。测量时,显示方式开关(MODE ⑰)应置于 ALT 或 CHOP (双踪),内触发信号由触发源选择开关(SOURCE ⑳)选择确定。示波器的触发信号应按以下基本方法选取:

(1) 选取较稳定的、边沿较陡的信号作触发信号,因此通常选取被测电路的输入信号 V_1 作示波器的触发信号,如图 1-6(a) 所示。

(2) 测量两个波形的相对延迟时间时,应把时间导前的信号作触发信号,如图 1-6(b) 所示的信号 V_1 。

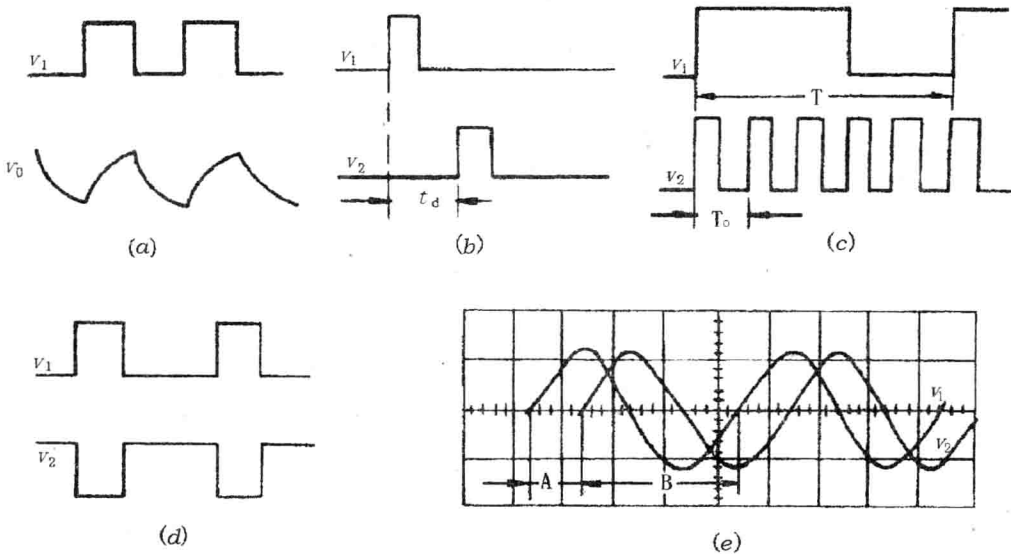


图 1-6 YB 4322 型双踪显示触发信号的方法
(a) 选 V_1 ; (b) ~ (e) 均选 V_1 和相位差的测量

(3) 显示周期比大于 1 的两信号时,宜把周期较长的信号选作触发信号,如图 1-6(c) 所示的 V_1 信号。

(4) 双踪显示可以直观地比较频率相同的两信号之间的相位是同相位还是反相,见图 1-6(d)。可测量两相同频率的正弦信号之间的相位差 φ ,见图 1-6(e),相位差 φ 用式(8)计算。应选时间导前的信号作触发信号,如图 1-6(d) 和图 1-6(e) 所示的信号 V_1 。

$$\varphi = \frac{360^\circ}{B} \cdot A \quad (8)$$

请注意,对于 SR 8 型双踪示波器作双踪显示时,在使用内触发方式工作时,必须把内触发选择开关“内触发,拉 Y_B ”置于“拉 Y_B ”位置。此时示波器的触发信号取自 Y_B 输入通道,必须在两路被测信号中选择其中一个较合适的信号作为示波器的触发信号,从 Y_B 输入端输入。

四、用示波器监测脉冲信号发生器输出信号的波形参数

实验使用的方波信号由脉冲信号发生器提供,实验使用的信号应满足 TTL 电路(包括电源电压为 +5 V 的 CMOS 电路)的要求,主要参数如下:

(1) 方波信号(即 $t_w \approx \frac{1}{2}T$) 的周期应在 1 Hz 到 100 Hz 范围内可调。信号边沿时间应小于或等于 100 ns。方波的低电平电压值 $V_L \approx 0 \text{ V}$ ($0 \text{ V} \leq V_L \leq 0.4 \text{ V}$), 高电平电压值 $V_H \approx 4.5 \text{ V}$ ($3.2 \text{ V} \leq V_H \leq 5 \text{ V}$)。

(2) 单次脉冲或阶跃信号等其他脉冲信号输出,其边沿时间和高、低电平电压值的要求同上。

简易脉冲信号发生器与通常使用的函数发生器、数字逻辑实验仪提供的信号源等相似,输出信号的边沿时间、 V_L 与 V_H 等值是不可调的,并完全符合实验要求。对于那些上述参数可调的信号发生器,在使用前必须将参数调节在要求的范围内,方可接入电路进行实验。

大多数脉冲信号发生器的信号周期必须在示波器的监测下调节。例如要求信号发生器输出周期 $T = 10 \mu\text{s}$ 的方波信号,应把示波器的扫描时间开关置于 $2 \mu\text{s} / \text{DIV}$ 档(扫描微调置于标准位置,扩展 $\times 5$ 开关置于常态),调节信号发生器的周期(频率)旋钮,使荧光屏上显示波形的周期在 X 轴方向占 5 DIV。

第二节 晶体管开关特性、限幅器与钳位器

一、晶体二极管的开关特性

在用二极管构成的一些脉冲电路中,都是把二极管的导通和截止两种工作状态看作是无惰性的,即二极管的端电压为正向时,二极管就导通;端电压反向时,管子就截止。这样的假定在信号频率(即开关速度)较低时,可以认为是正确的。但当开关速度提高到例如每秒百万次以上时,二极管本身的惰性就不容忽视了,它会阻碍开关速度的进一步提高。

1. 二极管开关特性的表现

二极管开关特性表现在正向导通与反向截止这样两种不同状态的转换过程。二极管从反向截止到正向导通与从正向导通到反向截止相比,所需的时间很短,一般可以忽略不计,因而下面着重讨论二极管从正向导通到反向截止的转换过程。

在图 1-7 所示电路的输入端加入开关方波信号 V_1 ,当加在二极管上的电压突然由正向偏置 ($+V_1$) 变为反向偏置 ($-V_2$) 时,二极管并未立即截止,而是出现一个较大的反向电流,即电流由 $\frac{V_1}{R}$ 突然变到 $-\frac{V_2}{R}$ (同时,二极管上仍维持很小的正向压降),并将这种情况维持一段时间 t_s 后,反向电流才开始减小,再经过 t_f 后,反向电流才等于静态特性上的反向电流 I_0 (同时, V_D 也下降到 $-V_2$),如图 1-7 所示。其中 t_s 为存贮时间, t_f 为下降时间,而把 $t_{rr} = t_s + t_f$ 叫做反向恢复时间。

2. 产生这种现象的原因

二极管在正向导通时,载流子不断地向对方区域扩散。空穴向 N 区扩散,成为 N 区的少数载流子。电子向 P 区扩散,成为 P 区的少数载流子。于是在两个区内都有相当数量的少数载流子存贮。这时若有反向电压作用于二极管上,就会发生少数载流子的漂移运动,形成反向电流 $i \approx -\frac{V_2}{R}$,经过

一段时间后 $i \approx I_0$, 存贮电荷逐渐消散。由此可见, 二极管的开关转换过程, 实质上是结电容充电、放电和存贮电荷的建立与消散的过程, 反向恢复时间 t_{rr} 是存贮电荷消散所需要的时间。

3. 减小反向恢复时间 t_{rr} 的方法

图 1-7 所示 t_{rr} 这段时间与二极管的结构有关。若 PN 结面积小, 结电容就小, 则存贮电荷就少, 所以存贮时间 t_s 就短; 若在二极管内部掺金, 可以加速存贮电荷的复合, t_s 就小。同时, t_{rr} 也与正向导通电流和反向电流(驱散存贮电荷的速度)有关。因此减小反向恢复时间 t_{rr} 有两条途径。

一是从二极管的结构上想办法。开关二极管的 PN 结面积小, 则结电容就小, 这样存贮电荷就少, 所以存贮时间 t_s 就小; 同时, 在二极管内部掺金, 就可以使存贮电荷很快地复合而消失, 所以存贮时间 t_s 就很小。

二是从电路上想办法。当管子选定后, 减小正向导通电流和增大反向驱动电流, 即可加速电路的转换过程。前者的作用是减小存贮电荷, 后者的作用是提高存贮电荷的驱散速度。

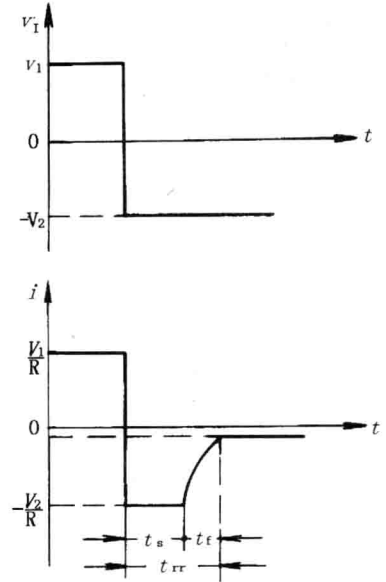
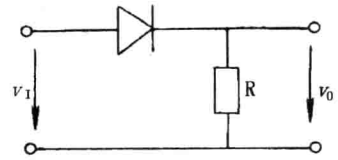


图 1-7 二极管开关特性

二、晶体管的开关特性

1. 晶体管从截止到饱和, 或从饱和到截止状态的转换时间

晶体管从截止到饱和, 或从饱和到截止状态的转换都需要一定时间才能完成。图 1-8 所示电路的输入端, 加一个理想的矩形脉冲电压 V_i , 它有足够的幅度(在 $-V_2$ 和 $+V_1$ 之间变化), 能使晶体管从截止进入饱和, 再从饱和进入截止, 其波形如图所示。可见, i_c 的波形已经不是一个理想的矩形波了, 起始部分和平顶部分都延迟了一段时间, 上升沿和下降沿都变得缓慢了。为了对晶体管的瞬态过程进行定量描述, 引入以下几个参数来表征晶体管的开关特性。

从 V_i 开始跃升到 i_c 上升到 $0.1I_{cs}$ 所需时间定义为延迟时间 t_d , 而 i_c 从 $0.1I_{cs}$ 增长到 $0.9I_{cs}$ 的时间为上升时间 t_r 。从 V_i 开始跃降到 i_c 下降到 $0.9I_{cs}$ 的时间为存贮时间 t_s , 而从 $0.9I_{cs}$ 下降到 $0.1I_{cs}$ 的时间为下降时间 t_f , 如图 1-8 所示。通常称 $t_{on} = t_d + t_r$ 为三极管开关的“接通时间”, $t_{off} = t_s + t_f$ 称为“断开时间”。

2. 造成晶体管上述开关特性的主要原因

(1) 延迟时间 t_d

在输入电压 V_i 的作用下, 发射结电容 C_{be} 上的电压由负值变为正值, 但这个变化是不能瞬时完成的, 而有一个充电过程。当发射结电容 C_{be} 上的电压由负值上升到阈值 V_T 时, 晶体管刚开始导通, 电子开始向基区发射, 再逐步扩散到集电区, 形成集电极电流。这是出现延迟时间的主要原因。

(2) 上升时间 t_r

当电子由发射区发射到基区后, 并不是立即就到达集电区, 而要经过一个扩散路程。在这段路程内, 电子一面向集电区扩散, 一面与空穴复合而消失。这样, 就在基区建立起一定的载流子的浓度分布, 而上升时间 t_r 就是建立起对应于 $0.9I_{cs}$ 那样的浓度分布所需的时间。

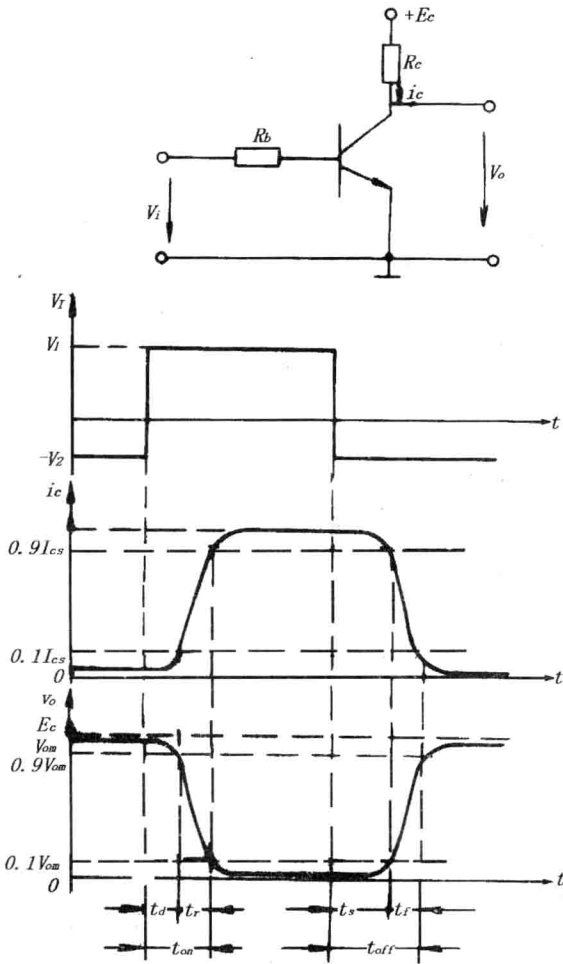


图 1-8 晶体管开关特性

心,从而加速存储电荷的复合消失过程,这样就可以减小存储时间 t_s 。开关管在结构上采取了以上措施,所以开关性能很好。

(2) 改进电路以提高三极管开关的转换速度

当管子选定后,加大正向基极电流,可以减小 t_r ,但同时加深了晶体管的饱和深度, t_s 也随之增加;加大反向基极电流,有利于减小 t_s 和 t_f ,但加深了晶体管的截止程度,对减小 t_d 不利。所以这些参数是相互制约的,在电路设计时要全面考虑。改善晶体三极管开关特性的实验电路如图 1-9 所示。

① 采用加速电容 C_b 。通常在基极电阻 R_{b1} 上并联一个近百 pF 的小电容 C_b (见图 1-9)。当 V_i 由 $-V_2$ 跃升到 $+V_1$ 时,由于 C_b 的存在, R_{b1} 相当于被短路, V_i 几乎全部加到基极上,引起一个瞬时猛冲的正向基极电流,促使基区电荷快速增长,使三极管迅速进入饱和

(3) 存储时间 t_s

三极管饱和后,基区和集电结两旁积累了多余的电荷。当 V_i 由 $+V_1$ 降为 $-V_2$ 时,这些存储电荷在反向电压作用下形成反向基极电流,三极管开始向截止状态转化。存储在集电结两旁的多余电荷要经过时间 t_s 才能消散掉。在这段时间内,基区的多余电荷也逐渐消失。但两个 PN 结仍为正偏, $I_{cs} = E_c/R_c$ 不变。

(4) 下降时间 t_f

集电结两旁存储的多余电荷消散后,晶体管退出饱和区。但基区中仍剩下一部分电荷,并陆续为集电极所吸收,形成逐渐下降的集电极电流。另外,集电结由正偏转为反偏,集电结电容上的电压也要变化,但这个变化也不能在瞬间完成,而有一个放电过程,电路中要出现一个放电电流,这也是形成集电极电流 i_c 下降过程的一个原因。

3. 改善晶体管开关特性的方法

改善晶体管开关特性,就是设法减小晶体管的接通时间 t_{on} 和断开时间 t_{off} ,以提高开关速度。

(1) 改善晶体管的内部结构

减小晶体管 PN 结的面积,从而减小结电容,这样就可以减小延迟时间 t_d 和下降时间 t_f 。减小基区和集电区的长度,则可以减小饱和时的存储电荷。在晶体管内部掺金,以建立复合中

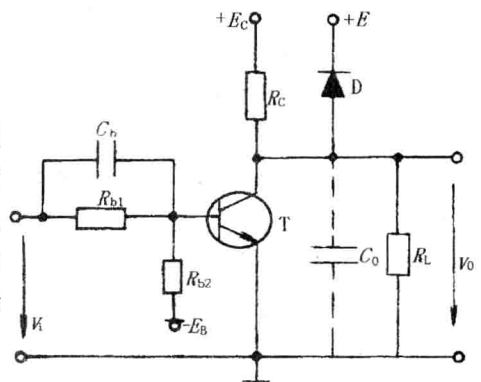
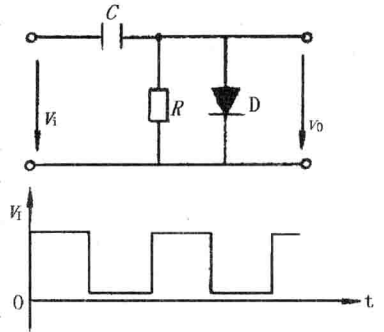


图 1-9 利用加速电容、二极管箝位改善晶体管开关电路的开关特性

状态,使 t_d 和 t_r 大大缩短。在基区建立电荷的同时, C_b 被充电, i_b 逐渐减小。 C_b 充电结束相当于开路, 电路进入稳态。 i_b 的稳定值由 R_{b1} 、 R_{b2} 及 $-E_B$ 、 $+V_1$ 共同决定。电路参数选择在使晶体管工作于浅饱和状态,基区存贮电荷并不多。当 V_i 由 $+V_1$ 降为 $-V_2$ 时, R_{b1} 再次被短路,造成一个反向猛冲的基极电流,大大加快基区多余电荷的消散,使晶体管迅速截止,大大缩短了 t_s 和 t_f 。随着 C_b 放电,反向基极电流下降至 0,电路进入稳态。可见, C_b 在瞬态过程中才起作用,稳态时相当于开路,对电路没有影响。 C_b 既加速了晶体管的接通过程,又加速了断开过程,故称为加速电容。采用加速电容改善晶体管的开关性能,是一种经济而有效的方法,在脉冲电路中得到广泛应用。

② 在晶体管的集电极加二极管箝位,减小上升时间 t_r 。在晶体管的集电极加二极管箝位电路,如图 1-9 所示。当管子由饱和进入截止状态时,随着电源对分布电容和负载电容充电, V_o 逐渐上升。因为 $E_c > E$,当 V_o 超过 E 后,二极管 D 导通,使 V_o 最高值被箝位在 E ,从而缩短 V_o 波形的上升边沿,而且上升边的起始部分又比较陡,所以大大地缩短了输出波形的上升时间 t_r 。这就可以解决输出端分布电容和负载电容引起的输出波形边沿时间长的问题,还可以在在一定程度上避免负载电阻 R_L 的变化带来输出高电平不稳的缺点。



三、限幅器

限幅器是一种波形变换电路,可以用二极管和晶体管等非线性器件构成。二极管限幅器是利用二极管导通时和截止时呈现的阻抗不同来实现限幅的,其限幅电平由外接偏压决定。晶体管限幅器则利用晶体管的截止特性或饱和特性实现限幅。由于晶体管具有倒相作用,截止限幅使输出波形出现平顶,饱和限幅使输出波形出现平底,如同时利用这两个特性,可实现双向限幅。若使晶体管的静态工作点处于负载线性区的中点,则能实现上、下对称的限幅。

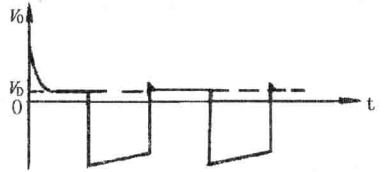


图 1-10 二极管箝位特性

四、钳位器

钳位的目的是将脉冲波形的顶部或底部钳制在一定的电平上,从而避免脉冲信号通过阻容耦合电路时产生的波形渐移现象。利用二极管和晶体管的非线性特性均可实现对波形的钳位。二极管钳位特性如图 1-10 所示,利用二极管 D 的正、反向不同阻值,达到将输入信号顶部钳制在 V_D 值的目的 (V_D 为二极管导通电压)。

第三节 555 定时器和集成单稳态触发器及其应用

一、555 时基电路

555 定时器是一种产生时间延迟和多种脉冲信号的电路。其电路类型有双极型和 CMOS 型两种,但二者的工作原理很类似,没有本质区别。几乎所有的双极型产品型号最后的三位数码都是 555 或 556;所有的 CMOS 产品型号最后四位数码都是 7555 或 7556;二者的逻辑功能和引脚排列完

全相同,易于互换。555 或 7555 是单定时器,556 或 7556 是双定时器。双极型的电源电压 $V_{cc} = +5 \sim +15 \text{ V}$,输出的最大电流可达 200 mA,CMOS 型的电源电压 $V_{DD} = +3 \text{ V} \sim +18 \text{ V}$ 。当 $V_{CC}(V_{DD}) = +5 \text{ V}$ 时,电路输出与 TTL 电路兼容。

以双极型 555 定时器为例进行说明,它的内部电路框图如图 1-11 所示。

电路主要由比较器 C_1 、 C_2 及一个 RS 触发器和泄放晶体管 T_D 三部分组成。 C_1 、 C_2 的参考电压由 3 个 $5 \text{ k}\Omega$ 电阻分压而定,其值分别为 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 和 $\frac{1}{3}V_{CC}$ 。当 $V_{TH} > \frac{2}{3}V_{CC}$ 时,比较器 C_1 输出 V_{C1} 为 1,反之为 0;当 $V_{TR} < \frac{1}{3}V_{CC}$ 时, C_2 输出 V_{C2} 为 1,反之为 0。利用触发输入端 \overline{TR} 输入一个小于 $\frac{1}{3}V_{CC}$ 的信号,或者利用阈值输入端 TH 输入一个大于 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 的信号,可以使 RS 触发器状态发生变换。CT 是控制输入端,可以外接输入电压,以改变比较器的参考电压值。在不外加电压时,通常接 $0.01 \mu\text{F}$ 电容到地,起滤波作用,以保证参考电压稳定。 C_t 是放电输入端,当输出 $F = 0$ (即 $\overline{Q} = 1$) 时, T_D 截止, C_t 端对地开路(外接定时电容充电)。 \overline{R} 是复位端。当 $\overline{R} = 0$ 时,输出 $F = 0$ 。555 电路能够产生精确的延迟和振荡,能够输出从微秒级到小时级时间范围很广的信号。

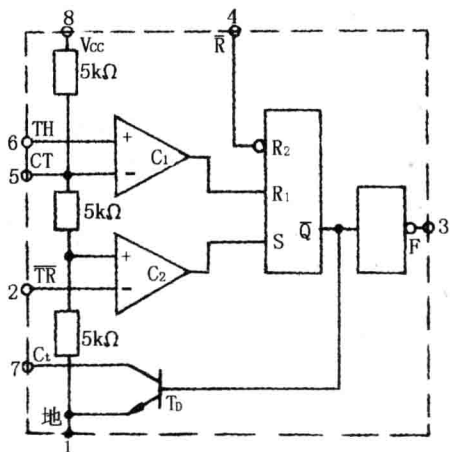


图 1-11 555 时基电路内部电路框图

1. 组成单稳态触发器

将 555 定时器接成单稳态触发器,如图 1-12 所示。其中 R 和 C 是外接定时元件, R_1 、 R_2 和 C_1 是保证电路在没有触发信号触发时,触发输入端 \overline{TR} 的电压大于 $\frac{1}{3}V_{CC}$,使电路处于稳态。此时输出端 F 为低电平,放电端 C_t 与地短路。这个电路用输入脉冲的下降沿触发。

稳态时,这个电路一定处于 $V_{C1} = V_{C2} = 0$ 、 $Q = 0$ 的状态。如果接通电源后 $Q = 1$,则 T_D 截止, V_{CC} 通过 R 对 C 充电,当 C 充电到 $V_C > \frac{2}{3}V_{CC}$ 时, V_{C1} 变为 1,于是将触发器置 0,使 T_D 导通, C 通过 C_t 放电,使 $V_C = 0$ 。以后由于 $V_{C1} = V_{C2} = 0$,触发器保持 0 态不变,输出也相应地稳定在 $F = 0$ 的状态。

当触发负脉冲到达后,驱动 \overline{TR} 端使电路进入暂稳态,使 $V_{C2} = 1$,触发器被置位,电路输出 F 由 0 变 1。同时 T_D 截止, C_t 对地开路,电源 V_{CC} 通过 R 向 C 充电, V_C 上升,当 $V_C > \frac{2}{3}V_{CC}$ 时, V_{C1} 变为 1,将触发器置 0,于是输出 F 返回起始态 $F = 0$,同时 T_D 导通, C_t 对地短路,电容 C 通过 C_t 迅速放电,直至 $V_C \approx 0$ 。于是暂稳态结束,电路返回稳态,等待下一次触发信号的到来。

暂稳态($F = 1$)持续时间的长短,取决于定时元件 R 和 C 的大小,输出脉冲宽度 $t_w = 1.1RC$ 。

2. 组成自激多谐振荡器

555 电路接成自激多谐振荡器,如图 1-13(a) 所示。该电路的工作过程不同之处,是电路没有稳态,仅存在两个暂稳态,电路不需要外加触发信号,利用电源通过 R_1 、 R_2 向 C 充电,以及 C 通过 R_2 向放电端 C_t 放电,使电路产生振荡。输出信号的时间参数是

$$T = t_{w1} + t_{w2}$$

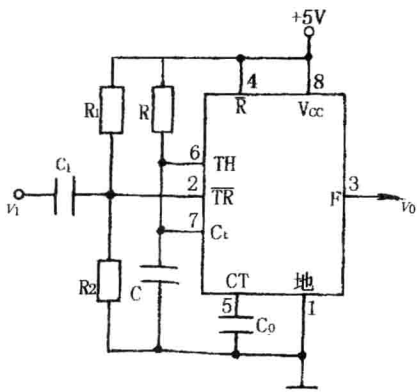


图 1-12 单稳态触发器电路

其中, $t_{w1} = 0.7(R_1 + R_2)C$ (正脉冲宽度)

$$t_{w2} = 0.7R_2C \text{ (负脉冲宽度)}$$

$$T = 0.7(R_1 + 2R_2)C$$

555 电路要求 R_1 与 R_2 均应大于或等于 $1\text{ k}\Omega$, 但 $R_1 + R_2$ 应小于或等于 $3.3\text{ M}\Omega$ 。

(1) 组成占空比可调的方波发生器。电路如图 1-14 所示。它比图 1-13(a) 所示电路增加了一个电位器和两个导引二极管。D₁、D₂ 用来决定电容充、放电电流流经电阻的途径(充电时 D₁ 导通、D₂ 截止, 放电时 D₂ 导通、D₁ 截止)。占空比

$$q = \frac{t_{w1}}{t_{w1} + t_{w2}} \approx \frac{0.7R_A C}{0.7R_A C + 0.7R_B C} = \frac{R_A}{R_A + R_B}$$

可见, 若取 $R_A = R_B$, 电路即可输出占空比为 50% 的方波信号; 或者取 $R_1 = R_2$, 电位器调到中心点或不用时, 也可得到占空比约为 50% 的方波信号。

(2) 接成晶体振荡器。在图 1-13(a) 所示电路中, 在 C 与 R₂ 连接点和 TR 与 TH 连接点之间的连线上, 串入一个如图 1-13(b) 所示的晶体网络, 电路便成为一个晶体振荡器。晶体网络中 $1\text{ M}\Omega$ 电阻作直流通路用, 并联电容用来微调振荡器的频率。只要选择 R₁、R₂ 和 C, 使在晶体网络接入之前, 电路振荡在晶体的基频(或谐频)附近, 接入网络后, 电路就能输出一个频率等于晶体基频(或谐频)的稳定振荡信号。

(3) 组成占空比连续可调并能调节振荡频率的脉冲信号发生器。电路如图 1-15 所示。对 C₁ 充电时, 充电电流通过 R₁、D₁、W₂ 和 W₁; 放电时通过 W₁、W₂、D₂ 和 R₂。当 $R_1 = R_2$ 、W₂ 调到中心点或不用时, 因充、放电时间基本相等, 其占空比约为 50%, 此时调节 W₁ 仅改变频率, 占空比不变。如 W₂

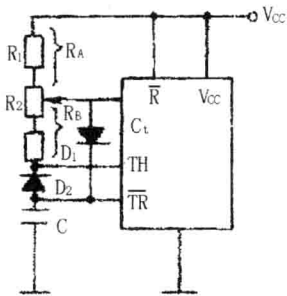


图 1-14 占空比可调的方波发生器

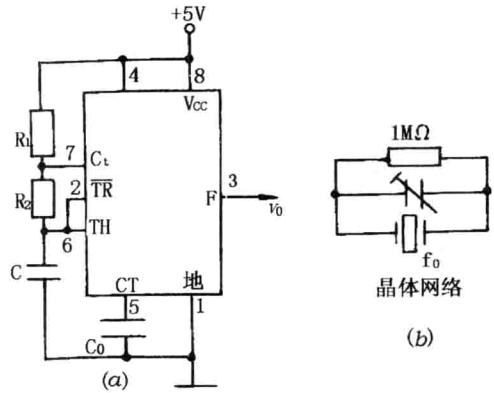


图 1-13 自激多谐振荡器电路

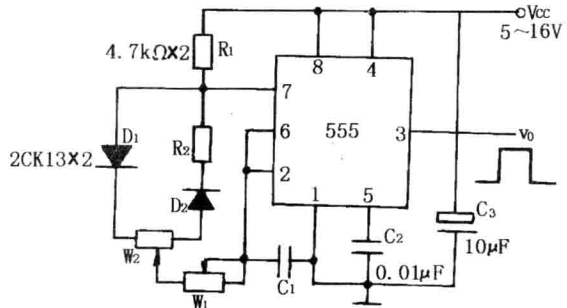


图 1-15 占空比和频率均可调的脉冲信号发生器