

主编 郑发泰 翁正国

振荡电路 制作与调试

ZHENDANG DIANLU ZHIZUO YU TIAOSHI



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



振荡电路制作与调试

主 编 郑发泰 翁正国

副主编 李方园 郑翔南



机 械 工 业 出 版 社

本书以培养电子行业的高技能应用型人才为宗旨,结合振荡电路的设计制作过程,采用项目化教学方法,将知识、技能、素质的训练融合于项目产品的设计制作过程,突出技能训练,满足职业岗位需求。整本书围绕振荡电路的设计制作与调试进行组织,通过项目化的教学,培养学生认知振荡电路常见元器件、正弦波振荡电路和非正弦波振荡电路。通过综合实验与实训,提高振荡电路制作与调试的基本技能。

本书适用于高职高专院校电子信息类专业的师生使用,也可供从事电子行业的工程技术人员参考。本教材配备有配套的电子课件、课程网站,可供教师在教学中使用,也可供学生复习或自学。

图书在版编目(CIP)数据

振荡电路制作与调试/郑发泰,翁正国主编. —北京:机械工业出版社, 2013. 6

ISBN 978-7-111-43037-7

I. ①振… II. ①郑…②翁… III. ①振荡电路—电路设计
IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 136299 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:任 鑫

版式设计:常天培 责任校对:张 媛

责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·8 75 印张·211 千字

0 001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-43037-7

定价:22.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

“振荡电路制作与调试”是高职高专和中等职业技术学校电子信息类专业的重要课程之一。通过本课程的学习与实践，可帮助学生掌握常用元器件的识读，认知振荡电路在制作与调试过程中常用仪器仪表的使用、注意事项和测量基础知识，掌握正弦振荡电路和非正弦振荡电路制作过程以及在调试过程中应注意的事项，为今后的学习和工作打下良好的基础。

本教材的内容是根据应用电子技术专业服务性专业建设工作任务与职业能力而设置的，振荡电路制作与调试是本专业课程体系中的工程技术型课程。本课程将以工作任务为逻辑主线来组织，将完成工作任务必需的相关理论知识构建于项目之中，学生在完成具体项目的过程中完成相应的工作任务，训练职业能力，掌握相应的理论知识。

本教材的参考教学时间为 48 学时。全书共分为五个项目，内容覆盖了元器件的认知与检验，常用仪器仪表的使用与测量基础知识，多种正弦振荡电路的结构、原理、电路分析和电路特点，多种非正弦振荡电路的结构、参数计算、分析方法、波形变换电路的结构和变换原理以及波形产生电路测试和调试的基本方法。

本书在编写过程中认真研究了现阶段学生的知识体系和能力内涵，正确认识应用型人才培养的知识与能力结构，注重培养学生掌握必备的基本理论、专业知识和实际工程的基本技能，把握理论以够用为度，知识、技能和方法以理解、掌握、初步运用为度的编写原则。

参加本书编写的老师有浙江工商职业技术学院的郑发泰、翁正国、李方园、张培忠、李翠凤，浙江康盛股份有限公司技术部的张夏仙，宁波永望电子有限公司技术部的俞坚，禾光科技有限公司的金彪。郑发泰负责本书的统稿工作。在编写过程中还得到了奥克兰理工大学（Auckland University of Technology）郑翔南的大力支持，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

作者

2013 年 3 月

目 录

前言

项目一 电路元器件的基础	1
项目导读	1
相关知识	2
知识一 电阻（位）器	2
一、电阻（位）器的类型及其主要参数	2
二、电阻（位）器的检测	6
知识二 电容器	7
一、电容的类型及其主要参数	7
二、电容器的主要特性	9
三、电容器的检测	11
知识三 电感器	13
一、电感的类型及其主要参数	13
二、电感器的主要特性	15
三、变压器的类型及其主要参数	16
四、变压器的主要特性	17
五、电感器和变压器的检测	19
知识四 半导体分立元器件	19
一、半导体分立器件的型号命名	19
二、半导体二极管的类型与参数	20
三、二极管的主要特性	21
四、二极管引脚的判别及检测	23
五、半导体晶体管的类型	23
六、半导体晶体管的特性	25
七、半导体晶体管的检测	27
八、场效应晶体管	27
知识五 半导体集成电路	29
一、集成电路的分类及引脚识别	29
二、模拟集成电路	31
三、数字集成电路	31
四、集成电路的检测	33
知识六 压电器件	33
知识七 表面安装元器件	35
一、表面安装元器件的分类与特性	35
二、片式无源器件与有源器件	36
任务与实施	37
思考题	38

项目二 常用仪器仪表与数据处理	39
项目导读	39
相关知识	40
知识一 电子仪器仪表的使用与维护	40
一、电子仪器仪表的选择与使用	40
二、电子仪器的日常维护	41
知识二 常用电源与信号源	41
一、直流稳压电源	41
二、低频信号发生器	42
三、高频信号发生器	43
四、函数信号发生器	45
知识三 万用表	47
一、磁电式万用表	47
二、数字万用表	48
三、毫伏表	48
知识四 示波器	49
知识五 晶体管特性图示仪	54
知识六 频率特性测试仪（扫频仪）	56
知识七 数据处理基础知识	58
一、测量误差	58
二、测量误差处理	59
三、数据处理与图形处理	60
任务与实施	61
思考题	62
项目三 正弦波振荡电路	63
项目导读	63
相关知识	64
知识一 正弦波振荡器电路基础	64
一、正弦波振荡器电路组成及各单元电 路的作用	64
二、振荡器电路工作条件和种类	65
三、正弦波振荡器电路分析方法	65
知识二 自动电平控制电路	66
一、ALC 电路基础	66
二、集成 ALC 电路	67
知识三 RC 正弦波振荡器电路	68
一、RC 移相电路	68

二、RC 移相正弦波振荡器电路	70	振荡器	112
三、RC 选频正弦波振荡器电路	71	一、目标	112
知识四 变压器耦合正弦波振荡器电路	73	二、原理与说明	112
知识五 电感三点式正弦波振荡器电路	75	三、实验仪器与设备	113
知识六 电容三点式正弦波振荡器电路	76	四、实验内容和步骤	113
知识七 差动式正弦波振荡器电路	77	五、注意事项	113
知识八 双管推挽式振荡器电路	78	六、实验报告	113
任务与实施	79	七、思考题	113
思考题	81	任务三 石英晶体振荡器	113
项目四 非正弦波振荡电路	82	一、目标	113
项目导读	82	二、原理与说明	114
相关知识	83	三、实验仪器与设备	114
知识一 方波振荡电路	83	四、实验内容和步骤	115
一、自激多谐振荡电路	83	五、注意事项	115
二、由门电路构成的方波振荡电路	87	六、实验报告	115
三、由施密特反相器构成的方波振荡电路	90	七、思考题	115
四、由运算放大器构成的方波振荡电路	92	任务四 金属探测器的制作与调试	116
五、由 555 定时器构成的方波振荡电路	93	一、目标	116
知识二 锯齿波振荡电路	96	二、原理与说明	116
一、锯齿波发生电路原理	96	三、实验仪器与设备	118
二、采用恒流充电的锯齿波振荡电路	97	四、实验内容和步骤	118
三、由运算放大器构成的锯齿波振荡电路	99	五、注意事项	120
知识三 三角波振荡电路	100	六、实验报告	120
知识四 波形变换电路	102	七、思考题	120
一、三角波变锯齿波电路	102	任务五 信号发生器的制作与调试	120
二、三角波变正弦波电路	103	一、目标	120
任务与实施	104	二、原理与说明	121
思考题	106	三、实验仪器与设备	123
项目五 综合训练与提高	107	四、实验内容和步骤	123
项目导读	107	五、注意事项	125
任务一 555 定时器的应用	108	六、实验报告要求	125
一、目标	108	七、思考题	126
二、原理与说明	108	附录	127
三、实验仪器与设备	108	附录 A 电阻和电位器的型号命名法	127
四、实验内容和步骤	109	附录 B 电阻（位）器的标称值系列和允许偏差等级	128
五、注意事项	111	附录 C 四色环和五色环电阻器的色标含义	128
六、实验报告	111	附录 D 常用电位器阻值特性说明	129
七、思考题	111	附录 E 电容的型号命名方法	130
任务二 由集成运放器构成的 RC 正弦波		附录 F 半导体分立器件型号命名方法	131
		附录 G 国产半导体集成电路型号命名法	132
		参考文献	133

项目一 电路元器件的基础

项目导读

以电路为核心的电子产品为载体，通过教师讲授，训练学生拆卸、检测、筛选产品中的元器件，完成识别电路板上的各种电子元器件等项目；通过讲授元器件的参数标识方法和检测方法；让学生了解各种元器件的指标和特性；训练学生正确选择仪器仪表，完成检测各种电子元器件参数的项目，以达到认识常见振荡电路设计的元器件，判别元器件质量好坏的目的。

【知识要求】

- 熟悉常用电子元器件的外形和特征
- 熟悉常用电子元器件的参数和功能
- 熟悉常用电子元器件的命名与标注
- 熟悉 SMT 元器件的特点、种类和规格

【能力要求】

- 能够选择仪器仪表检测电子元器件的参数
- 能够检验电子元器件的外观质量
- 能够筛选电子元器件
- 能够熟练地应用常见元器件

相关知识

常用的振荡电路元器件有电阻器、电容器、电感器、半导体器件、表面安装元器件等。

知识一 电阻（位）器

电阻（位）器是在电子电路中用得最多的元器件之一，电阻器简称电阻。在电路中主要起分压、分流、负载（能量转换）等作用，也用于稳定、调节、控制电压或电流的大小。

电阻（位）器的文字符号用大写字母“ R ”表示。电阻的单位是欧姆（ Ω ），常用的单位还有千欧姆（ $k\Omega$ ）、兆欧姆（ $M\Omega$ ）。它们之间的换算关系是：

$$1M\Omega = 10^3k\Omega = 10^6\Omega$$

一、电阻（位）器的类型及其主要参数

电阻（位）器从结构上可分为固定电阻器和可变电阻（位）器两大类，常见电阻（位）器的外形和电路图形符号如图 1-1 所示。

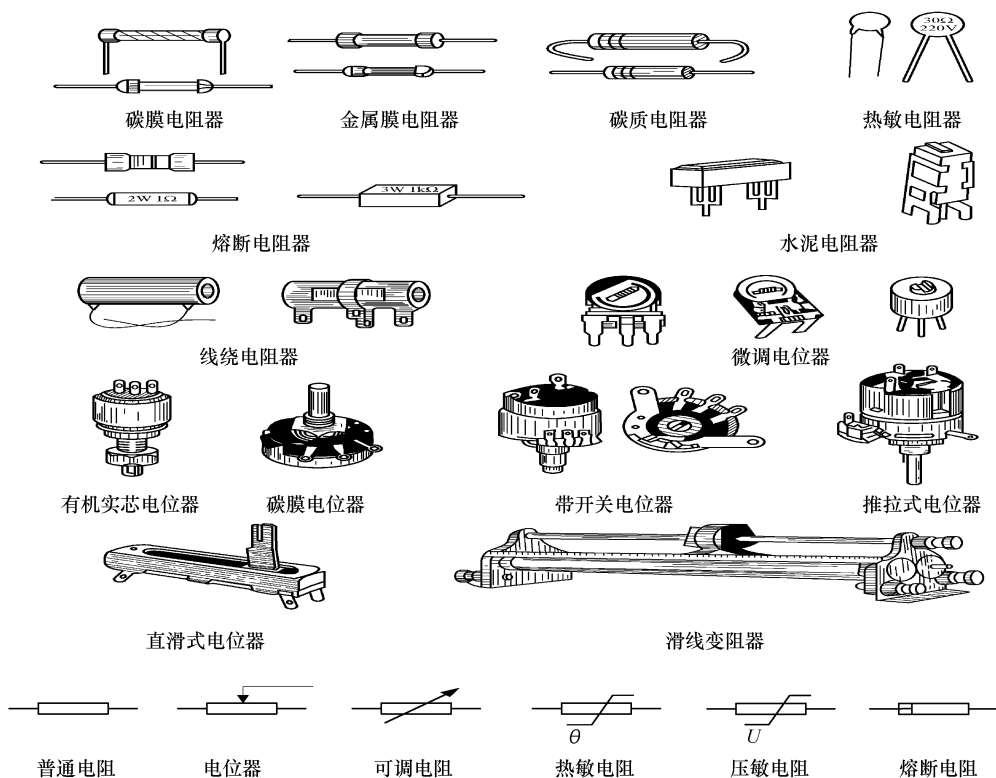


图 1-1 常见电阻（位）器的外形和电路图形符号

在振荡电路设计中，常用的有普通电阻器、可调电阻器和电位器。可调电阻器又称微调电阻器、可变电阻器，其阻值可以在一定的范围内任意改变，常用在电阻阻值要求可变动而

又不常变动的场合。电位器就是在可调电阻上再加一个开关，做成同轴联动形式，如收音机中的音量旋钮和电源开关等。

根据国家标准 GB/T 2470—1995 中的规定，电阻及电位器的型号由四部分组成，具体见附录 A。

1. 额定功率

在规定的温度和环境下，电阻器在电路中长时间连续正常工作时所允许消耗的最大功率，叫电阻器的额定功率。如果电阻器在超过额定功率工作时，温度会明显升高，电性能也会不稳定，严重的会烧毁。

对于不同类型的电阻器有不同的额定功率等级，表 1-1 列出了电阻（位）器的额定功率等级。不同额定功率的电阻器，在电路图中的标注有多种，有的是直接在电路图中标出该电阻器的功率数值（如 $\times W$ 或 $\times \times W$ ），有的则在图中用电路图符号来表示，如图 1-2 所示。

表 1-1 电阻（位）器的额定功率等级

种类	额定功率/W
线绕电阻	0.05、0.125、0.25、0.5、1、2、4、8、10、16、25、40、50、75、100、150、250、500
非线性电阻	0.05、0.125、0.25、0.5、1、2、5、10、25、50、100
线绕电位器	0.25、0.5、1、1.6、2、3、5、10、16、25、40、63、100
非线性电位器	0.025、0.05、0.1、0.25、0.5、1、2、3

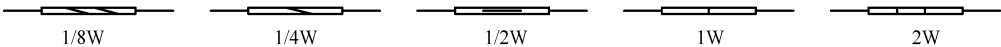


图 1-2 电阻器额定功率的符号表示

2. 标称阻值和允许偏差

电阻器上所标注的阻值称为标称值。电阻器的实际阻值 R 和标称值 R_R 之差除以标称值所得到的百分数，为电阻器的允许误差 δ ，即

$$\delta = \frac{R - R_R}{R_R} \times 100\%$$

误差越小的电阻（位）器，其标称值规格越多。常用固定电阻器标称值的系列和允许误差等级如附录 B 所示。

电阻器上的标称值是按国家规定的阻值系列标注的，因此在选用时必须按阻值系列去选用，使用时将表中的数值乘以 $10^n \Omega$ （ n 为整数），就成为这一阻值系列。如附录 B 中的 E24 系列的 1.8 就代表有 1.8Ω 、 18Ω 、 180Ω 、 $1.8 k\Omega$ 、 $180 k\Omega$ 等电阻值。

3. 电阻器的标识

阻值和允许误差在电阻上常用的标识方法有 4 种。

(1) 直接标识法

将电阻器的阻值和误差等级直接用数字和文字符号标识在电阻器上。对小于 1000Ω 的阻值只标出数值，不标单位。准确度等级只标 I 级或 II 级，III 级不标注。直接标识法电阻器如图 1-3 所示。它的标称阻值是

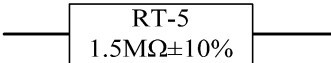


图 1-3 电阻器直标法

1. $5\text{M}\Omega$ ，允许误差为 $\pm 10\%$ ，RT-5 表示是碳膜电阻，额定功率为 5W 。

(2) 文字符号法

将需要标识的主要参数与技术指标用文字和数字符号有规律的标识在电阻器上。欧姆用 Ω 表示、千欧用 k 表示、兆欧 ($10^6\Omega$) 用 M 表示、吉欧 ($10^9\Omega$) 用 G 表示、太欧 ($10^{12}\Omega$) 用 T 表示。电阻值的整数部分写在阻值单位的前面，电阻值的小数部分写在阻值单位的后面，特定的字母表示电阻的允许误差，可参照附录 B 所示。

[例 1.1] 解释下列用文字符号法标注的电阻的含义：7R5J、3k3、R12。

解：7R5J 表示该电阻标称值为 7.5Ω ，允许偏差为 $\pm 5\%$ ；

3k3 表示该电阻标称值为 $3.3\text{k}\Omega$ ，允许偏差为 $\pm 10\%$ ；

R12 表示该电阻标称值为 0.12Ω ，允许偏差为 $\pm 20\%$ 。

(3) 数码标注法

用三位阿拉伯数字标注在电阻器上，来表示电阻器的标称值的方法称为数码标注法。前 2 位代表电阻值的有效数，第 3 位数 n 表示倍乘 10^n （即有效值后 0 的个数），这里 n 取 $0 \sim 8$ ，9 是个特例，意思是 10^{-1} ，单位默认为 Ω ，电阻器的允许误差表示与文字符号法相同。

[例 1.2] 解释下列用数码标注法标注的电阻的含义：102J、756k、220、229。

解：102J 表示该电阻标称值为 $10 \times 10^2\Omega = 1\text{k}\Omega$ ，J 表示该电阻的允许偏差为 $\pm 5\%$ ；

756k 表示该电阻标称值为 $75 \times 10^6\Omega = 75\text{M}\Omega$ ，K 表示该电阻的允许偏差为 $\pm 10\%$ ；

220 表示该电阻标称值为 $22 \times 10^0\Omega = 22\Omega$ ，表示该电阻的允许偏差为 $\pm 20\%$ ；

229 表示该电阻标称值为 $22 \times 10^{-1}\Omega = 2.2\Omega$ ，表示该电阻的允许偏差为 $\pm 20\%$ 。

(4) 色环标识法

对体积很小的电阻和一些合成电阻（位）器，其阻值和误差常用色环来标识，如图 1-4 所示。色环标注法有 4 环和 5 环两种。4 环电阻器的 4 道色环，第 1 道环和第 2 道环分别表示电阻器的第 1 位和第 2 位有效数字，第 3 道环表示 10 的乘方数（即 10^n ， n 为颜色所表示的数字），第 4 道环表示允许误差（若无第 4 道色环，则误差为 $\pm 20\%$ ）。色环电阻的单位一律为 Ω 。

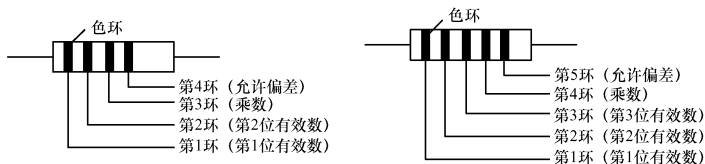


图 1-4 电阻器的色环标注法

现在普遍使用的是精密电阻，精密电阻一般用 5 道色环标识，它的前三道色环表示 3 位有效数字，第 4 道色环表示 10^n （ n 为颜色所代表的数字），第 5 道色环表示阻值的允许误差。4 色环和 5 色环电阻器的色标含义如附录 C 所示。

采用色环标识的电阻（位）器，颜色醒目，标识清晰，不易褪色，从不同的角度都能看清阻值和允许偏差。目前，在国际上都广泛采用色标法。

4. 电位器的主要参数

电位器的主要参数除与电阻器相同之外还有如下参数。

(1) 额定功率

电位器的两个固定端上允许耗散的最大功率为电位器的额定功率。使用中应注意, 额定功率不等于中心抽头与固定端的功率。电位器的额定功率有 0.1W、0.25W、0.5W、1W、1.6W、2W、3W、5W、10W、16W、25W 等。

(2) 标称阻值

标在电位器上的阻值, 其系列与电阻器系列类似, 它等于电位器两个固定端之间的电阻值。

(3) 允许误差等级

根据不同准确度等级, 实际阻值与标称阻值可允许 $\pm 20\%$ 、 $\pm 10\%$ 、 $\pm 5\%$ 、 $\pm 2\%$ 、 $\pm 1\%$ 的误差。精密电位器的准确度可达 $\pm 0.1\%$ 。

注意: 由于电阻体阻值分布的不均匀性和滑动触头接触电阻的存在, 电位器的滑动臂在电阻上移动时会产生噪声, 这种噪声对电子设备的工作将产生不良影响。

5. 电阻(位)器的主要特性

1) 电阻器对直流和交流电路的电阻特性相同。在直流或交流电路中电阻位器对电流起阻碍作用, 这大大方便了电阻电路的分析, 如图 1-5 所示。

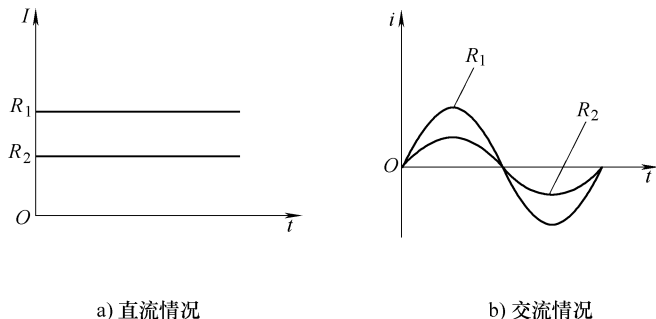


图 1-5 电位器对直流和交流作用示意图

当电阻器的阻值不同时, 流过电阻器的直流电流、交流电流也不同, 当阻值增大 ($R_2 > R_1$) 时, 流过电阻器的直流、交流电流都要减小。

2) 电阻器在不同频率下的电阻特性相同。在交流电路中, 同一只电阻器对不同频率信号所呈现的阻值相同, 不会因为交流电的频率不同而出现阻值的变化, 这是电阻器的一个重要特性。分析交流电路中电阻器的工作原理时, 可不必考虑交流电频率对电路工作的影响。

3) 电阻器对不同类型信号的电阻特性相同。不仅在正弦波的电路中阻值不变, 而且在脉冲信号、三角波信号处理和放大电路中阻值也不变。几种常用电位器阻值特性说明如附录 D 所示。

6. 电阻器基本工作原理

(1) 提供电压

如图 1-6 所示, 电阻 R_1 为 B 点提供直流电压。

电阻 R_1 在 A 点与 B 点之间构成了一个支路, 将 A 点的直流电压 $+V$ 加到了 B 点, 使 B 点也有直流电压。显然, 电阻 R_1 用来为电路中某点建立与直流电压 $+V$ 之间的联系。

如果电路中的某一点需要直流电压时, 就可以在该点和直流电压 $+V$ 端之间接一只电阻。

(2) 提供电流回路

如图 1-7 所示, 电阻 R_2 为电路提供一个电流回路。

电阻 R_2 连接在 VT_1 发射极与地线之间, 电路中的 A 点与 B 点通过 R_2 接通, 这样 VT_1 发射极输出的电流可以通过 R_2 流到地线, 从而构成了一个电流回路。因此, 如果电路中需要一个电流回路时, 就可以接入一只电阻。

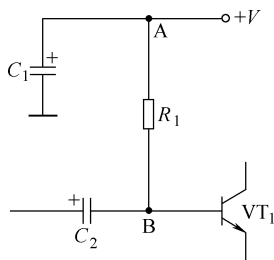


图 1-6 电压回路示意图

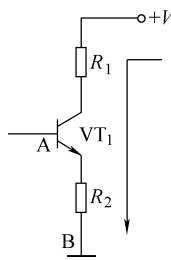


图 1-7 电流回路示意图

7. 阻值大小对电路的影响

在电路分析中, 有时只是需要进行定性分析, 即分析电路中有没有电压 (或有没有电流), 但是有时则需要进行定量分析, 即有电压时这一电压有多大 (或有电流时这一电流有多大)。

图 1-8 所示为电压、电流和电阻三者之间关系示意图。从图中可以看出, 直流电压 $+V$ 等于 R_1 两端电压加上 VT_1 基极电压。直流电压 $+V$ 是不变的, 当 R_1 的阻值大小发生变化时 R_1 两端的电压随之变化, 从而 VT_1 基极电压大小也变化。基集电压为 $V_A = +V - I \times R_1$ 。

1) 如果电阻 R_1 阻值增大时, R_1 两端的电压会增大, 导致 VT_1 基极电压下降。

2) 如果电阻 R_1 阻值减小时, R_1 两端的电压下降, 导致 VT_1 基极电压增大。

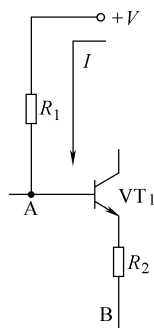


图 1-8 回路示意图

二、电阻 (位) 器的检测

1. 普通电阻的检测

当电阻的参数标识因某种原因脱落或欲知道其精确阻值时, 就需要用仪器对电阻的阻值进行测量。对于常用的碳膜、金属膜电阻以及线绕电阻的阻值, 可用普通数字万用表或指针式万用表的电阻挡直接测量。在具体测量时应注意以下两点:

(1) 合理选择量程

如果使用指针式万用表, 应先将万用表功能选择置于“ Ω ”挡。由于指针式万用表的电阻挡刻度线是一条非均匀的刻度线, 因此必须选择合适的量程, 使被测电阻的指示值尽可能位于刻度线的 0 刻度到全程 $2/3$ 的这一段位置上, 这样可提高测量的准确度。对于上百千欧的电阻 (位) 器, 则应选用 $R \times 10k\Omega$ 挡来进行测量。

(2) 注意调零

所谓“调零”就是将万用表的两只表笔短接，调节“调零”旋钮使表针指向表盘上的“0 Ω ”位置上。

2. 电位器的检测

(1) 检测要求

电位器的总阻值要符合标识数值，电位器的中心滑动端与电阻体之间要接触良好，其动态噪声和静态噪声应尽量小，其开关应动作准确可靠。

(2) 检测方法

先测量电位器的总阻值，即两端片之间的阻值为标称值，然后再测量它的中心端与电阻体的接触情况。将一只表笔接电位器的中心焊接片，另一只表笔接其余两端片中的任意一个，慢慢将其转柄从一个极端位置旋转至另一个极端位置，其阻值应从零（或标称值）连续变化到标称值（或零）。

知识二 电 容 器

电容器简称电容。电容是一种能存储电能的元器件，由于充电需要时间，所以电容器上的电压不能突变。电容在电路中有通交流隔直流、通高频阻低频的作用。在电路中也常用作交流信号的耦合、交流旁路、电源滤波、谐振选频等。

电容的文字符号用大写字母“C”表示。电容的单位是法拉（F），常用的单位还有毫法（mF）、微法（ μF ）、纳法（nF）、皮法（pF）。它们之间的换算关系是：

$$1\text{F} = 10^3\text{mF} = 10^6\mu\text{F} = 10^9\text{nF} = 10^{12}\text{pF}$$

一、电容的类型及其主要参数

电容按结构可分为固定电容和可变电容，可变电容中又有半可变（微调）电容和全可变电容之分。电容按材料介质可分为气体介质电容、纸介电容、有机薄膜电容、瓷介电容、云母电容、玻璃釉电容、电解电容、钽电容等。电容还可分为有极性电容和无极性电容。常见电容器外形和电路图形符号如图 1-9 所示。

根据国标 GB2470—1995 中的规定，电容的产品型号一般由 4 部分组成，分别代表名称、材料、分类和序号。电容器的型号命名方法如附录 E 所示。

1. 电容的主要参数

(1) 额定工作电压

额定工作电压是指电容器在规定的工作温度范围内，长期、可靠地工作所能承受的最大直流电压，也称为耐压。如果工作电压超过电容器的耐压，电容器将击穿，造成不可修复的永久损坏。耐压大小与电容器介质的种类和厚度有关。

(2) 标称电容量

电容两端加上一定的电压后而能储存电荷的能力称为电容器的电容量，它是电容器的一个主要指标。标称电容量也就是标注在电容器上的电容量，国产电容器的标称值系列规定与电阻器相同。

(3) 允许偏差

2. 电容容量和偏差的标识方法

电容的容量和偏差的标识方法有如下几种。

(1) 直标法

在电容器的表面上直接标识出产品的主要参数和技术指标的方法。例如在电容上标识： $33\mu\text{F} \pm 5\%$ ， 32V 。

(2) 文字符号法

将需要标识的主要参数与技术性能用文字、数字符号有规律的组合标识在电容器的表面上。采用文字符号法时，将容量的整数部分写在容量单位标识符号前面，小数部分放在单位符号后面。

例如， 3.3pF 标识为 $3\text{p}3$ ， 1000pF 标识为 1n ， 6800pF 标识为 $6\text{n}8$ ， $2.2\mu\text{F}$ 标识为 $2\mu 2$ 。

(3) 数字表示法

体积较小的电容常用数字标识法。一般用 3 位整数，第 1 位、第 2 位为有效数字，第 3 位表示有效数字后面零的个数，单位为皮法（ pF ），但是当第 3 位数是 9 时表示 10^{-1} 。

例如，“243”表示容量为 24000pF ，而“339”表示容量为 $33 \times 10^{-1}\text{pF}$ （ 3.3pF ）。

(4) 色标法

电容容量的色标法原则上与电阻（位）器类似，其单位为皮法（ pF ）。

二、电容器的主要特性

掌握电容器的主要特性对分析有电容器参与的电路工作原理十分重要。在电子元器件中，电容器的特性比较多，且比较复杂。

1. 隔直流通交流

电容器在直流电路中，由于直流电压方向不变，对电容器的充电方向始终不变，待电容器充满电荷之后，电路中便无电流的流动，所以电容器具有隔直流的作用。

图 1-10 所示为电容器隔直流通交流特性示意图。

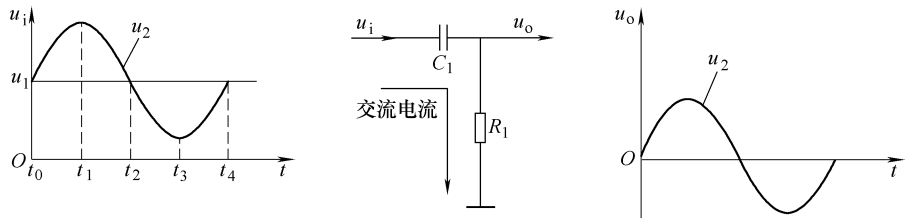


图 1-10 电容器隔直流通交流特性示意图

输入信号 u_i 是一个由直流电压 u_1 和交流电压 u_2 复合而成的信号， u_1 和 u_2 相加得到输入信号 u_i 波形。

直流电压 u_1 和交流电压 u_2 相加的理解过程可以分下列几个时刻（见图中输入信号 u_i 波形）。

t_0 时刻， u_i 等于 u_1 ， u_2 为 0， $u_1 + u_2 = u_1$ ， u_i 波形为 u_1 。

t_1 时刻， u_1 仍为 u_1 ， u_2 为正峰值， u_i 波形为 u_1 加上 u_2 （正峰值），此时 u_i 为最大值。

t_2 时刻，因为 u_2 为 0，所以 u_i 大小为 u_1 。

t_3 时刻, u_2 为负峰值, 所以此时 u_i 为 u_1 减去负峰值, u_i 为最小。

t_4 时刻, 两信号电压相加情况与 t_0 时刻相同。

输入信号 u_i 加到电路中, 有直流和交流两种情况。

1) 直流电压 u_1 加到电路中的分析。由于电容 C_1 的隔直作用, 直流电压不能通过 C_1 , 所以在输出端没有直流电压, 这是电容器的隔直特性在电路中的具体体现。

2) 交流电压 u_2 加到电路中的分析。由于电容 C_1 具有通交流作用, u_i 信号中的交流电压能够通过电容 C_1 和电阻 R_1 构成回路, 在回路中产生交流电流, 流过电阻 R_1 的交流信号电流在 R_1 两端的交流电压即为输出电压 u_o 。

所以, 输出信号 u_o 中只有输入信号 u_i 中的交流信号成分 u_2 , 没有直流成分 u_1 , 这样实现隔直通交的电路功能。

2. 容抗计算

电容器让交流电通过时对交流电流存在着阻碍作用, 就同电阻阻碍电流一样, 所以在大多数的电路分析中, 可以将电容器在电路中的作用当成一个“特殊”电阻器来等效理解, 称为容抗。

在交流电的频率和电容器容量大小不同的情况下, 电容器对交流电的阻碍作用容抗也不同。

电容器的容抗用 X_c 表示, 容抗 X_c 的大小由下列公式计算而得:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$

式中, 2π 为常数; f 为交流信号的频率, 单位为 Hz; C 为电容器的容量, 单位为 F。

3. 电容器储能特性

理论上讲电容器不消耗电能, 电容器中所充的电荷会储存在电容器中, 只要外部电路中不存在让电容器放电的条件 (放电电路), 电荷就一直储存在电容器中, 电容器的这种特性称为储能特性。

实际上电容器存在着各种能量损耗, 当然比起电阻器来它对电能的损耗要小得多。在电容电路的分析中, 通常不考虑电容器的耗能, 因为考虑耗能后电路分析变得很复杂。

4. 电容器两端电压计算

许多电容电路分析中需要用到电容器两端电压不能突变的特性, 这是分析电容电路工作原理时的一个重要特性, 也是一个难点。

电容器两端的电压 U 由下式决定:

$$U = \frac{Q}{C}$$

式中, Q 为电容器内部的电荷量; C 为电容器的容量。电容器内部没有电荷时, 电容器两端的电压为 0V, 电容器中电荷越多, 电容器两端的电压越大。电容器两端的电压与容量成反比关系, 在同样的电荷量时, 容量越大, 电容器两端的电压越小, 大电容器两端的电压低于小电容器两端的电压。

5. 充放电过程中电容器两端电压不能突变的特性

图 1-11 所示是电容器两端电压不能突变特性示意图。 E_1 是直流电源, S_1 是开关, R_1 是电阻, C_1 是电容, 这是一个直流电源对电容 C_1 充电的电路。

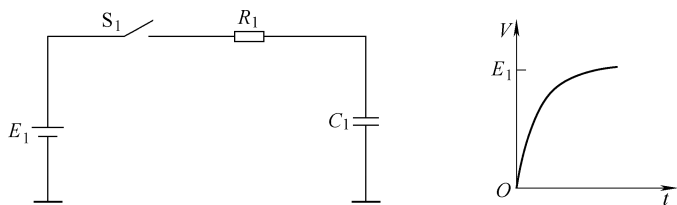


图 1-11 电容器两端电压不能突变特性示意图

1) S_1 未合上时, 电容器 C_1 中无电荷, 由上述公式可知, 因为 $Q=0$, 所以 $U=0V$, C_1 两端的电压为 $0V$ 。

2) S_1 接通瞬间, 开始对 C_1 充电, 对 C_1 的充电要有一个过程, 所以 S_1 合上瞬间 C_1 上仍然无电荷, C_1 两端的电压仍为 $0V$ 。由于在开关 S_1 合上后瞬间 C_1 中的电荷只能逐渐积累而不能突然增多, 所以 C_1 两端的电压也不能发生突变, C_1 电压仍然为 $0V$ 。

3) 假如原来 C_1 内部有电荷, 这时 C_1 原来就有电压, 在接通电源瞬间 C_1 两端的电压仍等于原先的电压, 即 C_1 两端的电压大小没有改变, 这也是由 C_1 两端的电压不能突变特性决定的。

当电容器开始放电的瞬间, 电容器两端的电压也不能发生突变, 其原理与充电情况一样, 因为电容器上的电荷在充电、放电时只能逐渐积累或释放, 它是一个渐变的过程, 所以电容器两端电压也只能是渐变而非突变。

6. 大容量电解电容器高频特性差

电解电容器是电容器中的一种, 它具有一般电容器的特性, 但由于电解电容器的结构, 这种电容器还有其他的一些特性。

电解电容器是一种低频电容器, 它主要工作在频率较低的电路中, 不宜工作在频率较高的电路中, 因为电解电容器的高频特性不好, 容量很大的电解电容器的高频特性更差。图 1-12 所示为大容量电解电容器的等效电路。

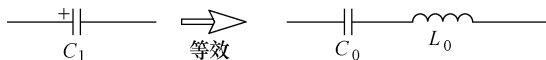


图 1-12 大容量电解电容器的等效电路

从理论上讲, 对电容器而言, 当容量一定后, 频率越高容抗越小, 电解电容器的容量大, 它的容抗应该很小, 但是从它的等效电路中可以看出, 一个容量比较大的电解电容器由一个容量等于 C_1 的纯电容 C_0 和一个电感 L_0 (等效电感) 串联而成。

在等效电路中, 大容量的电解电容器还有一个等效电感 L_0 的存在。当频率较高时, 电容 C_0 的容抗很小, 但是 L_0 的感抗较大 (频率越高、感抗越大), 结果大容量电容器高频时总的阻抗不是减小, 反而增大, 这说明大容量的电解电容器的高频特性差。

三、电容器的检测

电容器常出现的故障有极间短路、极间开路、漏电、容量变小及介质损耗增大等, 这里对电容器的检测主要是通过用指针式万用表对电容器进行简单测量, 判断电容器是否有开

路、短路、漏电等故障。对于好的电容器，可以估测有关的参数、极性等。

1. 普通固定电容器的检测

检测容量在 $0.01\mu\text{F}$ 以下的电容器，万用表选 $R \times 10\text{k}\Omega$ 挡。测量时，两表笔分别接电容的两个端子，因为电容器容量很小，万用表几乎看不出充、放电现象，所以指针指到 ∞ 位置不动。若指针有偏转且不回到 ∞ 位置，则说明电容器漏电；若指针接近或指到零，则说明电容器两极短路。这种检测不能测出开路故障和估测容量。若用数字万用表可测出电容器的容量，若容量明显小于标称值，则说明电容器已失效；若容量接近于零，则说明电容器开路。在进行检测时，都应注意正确操作，不要用手指同时接触被测电容的两个端子。

检测容量在 $0.01\mu\text{F}$ 以上的电容器时，仍用万用表 $R \times 10\text{k}\Omega$ 挡，由于容量相对较大，万用表能够看到充、放电现象。检测时，先用两表笔任意触碰电容的两个引脚，万用表指针会向右摆动一下，随即向左迅速返回 ∞ 位置；然后调换表笔再测试一次，这次指针摆动角度应该是上次的 2 倍。电容器容量越大，测量时摆动的角度越大，由此可估计电容器的容量（估计容量时可以用相同容量的标准电容器作比较或凭经验判断）。反复调换表笔触碰电容两端，万用表指针始终不向右摆动，说明该电容已失效或开路；若指针向右摆动后不能再向左回到 ∞ 位置，说明电容器漏电；若指针接近或指到零电阻位置，则说明电容器已经击穿短路。

2. 电解电容器的检测

电解电容器的容量比一般固定电容器大得多，所以电容器的充、放电过程很明显，测量时，一般 $1 \sim 47\mu\text{F}$ 的电容可用 $R \times 1\text{k}\Omega$ 挡测量，大于 $47\mu\text{F}$ 的电容可用 $R \times 100\Omega$ 挡测量。

(1) 漏电阻的测量

将万用表红、黑表笔分别接电容器负极和正极，在刚接触的瞬间，万用表指针向右偏转一个角度，接着逐渐向左回转，直到停在某一位置，此位置指针的偏转角度越小，说明漏电流越小，电容器的性能越好。然后将红、黑表笔对调，万用表指针将重复上述摆动现象，因为这一次电解电容器加的是反向工作电压，所以反向漏电流要比正向漏电流要大，即指针最后停的位置角度偏转比前面一次大，这属于正常。在检测中，若正、反向均无充电现象，则说明电容器容量消失或内部断路；如果所测阻值很小或为零，说明电容器漏电大或已击穿损坏。

(2) 极性的判断

新的电解电容器在上面都有容量和耐压的标注，而且为了电子工厂的工人在生产线上插件的方便，正极已经做成了长脚。但有时会遇到正、负极标志不明的电解电容器，这时可利用上述测量漏电流的方法加以判断，即两次测量中漏电流小的那次是正向接法，此时黑表笔接的是电解电容器正极。

(3) 容量的估计

电解电容器容量的估计方法与普通固定电容器相似，只是充、放电时间相对比较长，指针偏转角度要大得多。

3. 可变电容器的检测

(1) 检查机械性能

旋动转轴，应感觉转动平滑，力度均匀，不应有时松时紧，甚至被卡住的现象，转轴在各方向都不应有松动现象；转动可变电容器时，查看动片和定片之间的绝缘薄膜，动片应该

很顺畅地滑过薄膜而不应多薄膜有推挤现象，动片应能完全旋进和旋出。

(2) 检查电气性能

用万用表 $R \times 10k\Omega$ 挡测量动片与定片之间的电阻，应为 ∞ ，然后在转动转轴的情况下，万用表指针都应在 ∞ 位置不动。对于多连可变电容器，每一连都要经过检查，而且各连定片之间的电阻应该是 ∞ 。在上面所有检查过程中，如果有指针出现偏转甚至指向零的情况，说明动片和定片之间存在漏电或碰片现象；如果碰到某一角度，万用表读数为无穷大或是出现一定阻值，说明可变电容器动片与定片之间存在漏电现象。

现在大多数可变电容器带有微调电容器，可以用上面类似的方法一并检查，检查时应注意由于引出端子较多，不要弄错。

知识三 电 感 器

电感器又叫电感线圈，简称电感，它是用漆包线或纱包线在绝缘骨架上绕制而成，它的性质是当线圈中的电流发生变化时能产生感应电动势（自感），这个感应电动势使得电感器中的电流不能突变。当电感中有电流通过时，电感器能储存一定量的磁场能，所以它是储能元件。电感器在电路中具有通直流阻交流、通低频阻高频的作用，它对电流阻碍作用的大小与通过它的电流频率有关，频率越高阻碍作用越大。电感器在电路中常用作交流信号的扼流、电源滤波、谐振选频等。

电感的文字符号用大写字母“ L ”表示。电感的单位是亨利（H），常用的单位还有毫亨（mH）、微亨（ μH ），它们之间的换算关系为

$$1H = 10^3 mH = 10^6 \mu H$$

一、电感的类型及其主要参数

1. 常用电感器及其特点

常用电感器和变压器的外形及图形符号如图 1-13 所示。

电感有很多种类，按绕制方式的不同可分为单层线圈、多层线圈、蜂房式线圈等；按导磁材料的不同可分为空心线圈、铁心线圈、铜心线圈、铁氧体线圈等；按结构不同可分为固定电感器、可变电感器、微调电感器等；按线圈的数量不同可分为普通电感器（单个线圈）、变压器（多个线圈）；按工作频率不同可分为高频扼流圈、低频扼流圈；按作用的不同可分为振荡线圈、延时线圈、滤波线圈、偏转线圈、消磁线圈等。

(1) 小型固定式电感

这种电感是将铜线绕在磁心上，再用环氧树脂或塑料封装而成。其主要特点是体积小、重量轻、结构牢固和安装使用方便等。在电路中用于滤波、陷波、扼流、振荡、延迟等。它的电感量用直标法和色标法标注在电感器上。

(2) 高频扼流圈

高频扼流圈在结构上就是一个铁氧体磁心线圈，其匝数的多少由工作频率决定。高频扼流圈用在高频电路中用来阻碍高频电流的通过。在电路中，高频扼流圈常与电容串联组成滤波电路，起到分开高频和低频信号的作用。

(3) 低频扼流圈

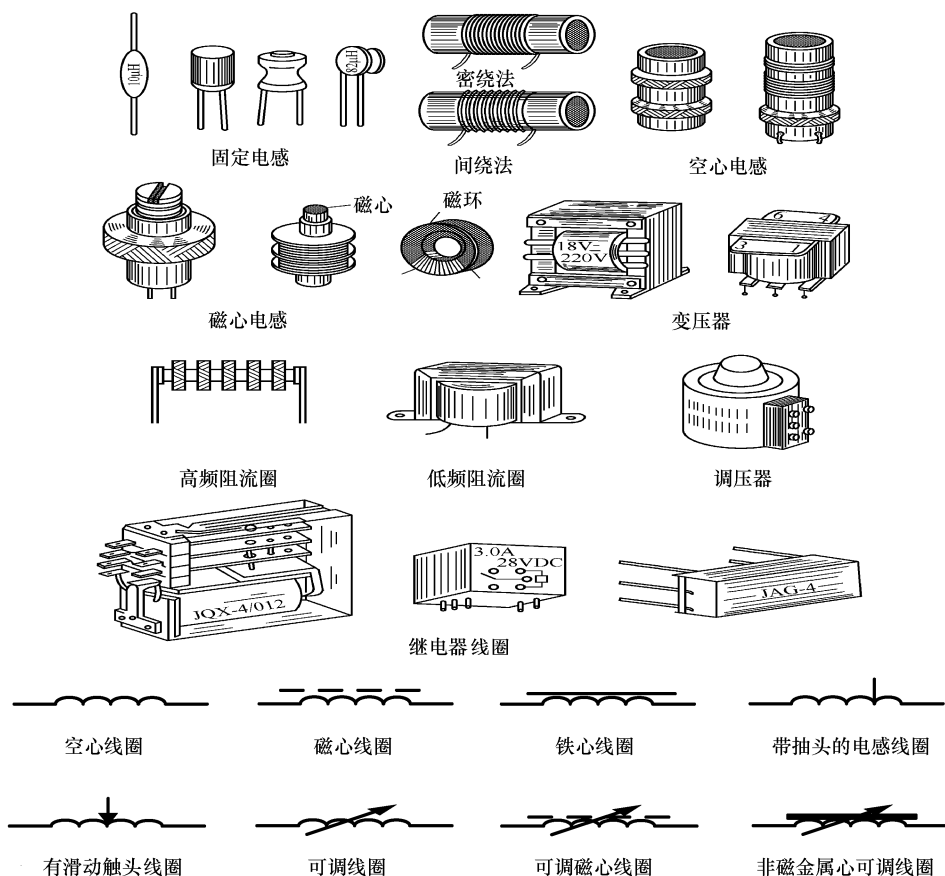


图 1-13 常用电感器外形和图形符号

低频扼流圈又称滤波线圈，一般由铁心、绕组等构成。其结构有封闭式和开启式两种，封闭式的结构防潮性能较好。由于工作频率较低，所以匝数较多、体积大、重量大。其作用是遏制低频电流的通过，常与电容组成滤波电路，以滤除整流后残存的交流成分。

(4) 可变电感线圈

在线圈中插入磁心（或铜心），改变磁心在线圈中的位置就可以达到改变电感量的目的。如磁棒式天线线圈就是一个可变电感线圈，其电感量可在一定的范围内调节。它还能与可变电容组成调谐器，用于改变谐振回路的谐振频率。

(5) 贴片电感

贴片电感即为片状电感，具有体积小、可靠性高的特点，适用于小型印制电路板上。

2. 电感的主要参数

(1) 标称电感量

电感量又叫自感系数，它是描述电感线圈具有自感能力大小的一个物理量，它的大小与线圈的匝数、有无磁心及磁心的材料、线圈的体积等有关，匝数多、体积大、磁心磁导率大，则电感量大。标称电感量就是标注在电感器上的电感量，一般按 E12 系列标注。

(2) 允许偏差

电感器上标称的电感量与实际电感的最大允许偏差,称为电感器的允许偏差。用于振荡等电路中的电感器准确度要求较高,一般允许偏差为 $\pm 0.2\% \sim \pm 0.5\%$;而用于耦合、高频阻流等电路中的线圈准确度要求相对较低,允许偏差为 $\pm 10\% \sim \pm 20\%$ 。

(3) 品质因数

品质因数通常也称 Q 值,是指电感器在某一频率的交流电压下,所呈现的感抗与其等效损耗电阻之比。它是电感器的一个重要参数,电感器的 Q 值越高,其损耗越小,效率越高。线圈品质因数的高低与线圈的导线截面积大小、导线材料、磁性材料、绕制方法等有关。

(4) 分布电容

分布电容是指线圈的匝与匝之间、层与层之间、线圈与磁心等材料之间存在的电容。电感器的分布电容会使其适应的工作频率降低,电路的工作频率越高,分布电容的影响越大。

(5) 额定电流

额定电流是指电感器长时间正常工作允许通过的最大电流。额定电流的大小主要由线圈导线的截面积大小决定。在电感器工作电流超过额定电流时,线圈会严重发热或被烧毁。

二、电感器的主要特性

电感器在电路中有时单独使用,有时则与其他元器件一起构成一个单元电路。电感器典型的应用电路有:与电容器构成 LC 串联谐振电路、与电容器构成 LC 并联谐振电路、单独使用时构成滤波电路。

(1) 通直流阻交流特性

通直流是指电感器对直流电而言呈通路,如果不计电感线圈的直流电阻,那么直流电流可以“畅通无阻”地流过电感器。对直流电流而言,线圈本身很小的直流电阻对直流电流的阻碍作用很小,所以在电路分析中往往可以忽略不计,从而简化了电感电路的分析。

阻交流是指当交流电流流过电感器时,电感器对交流电流存在阻碍作用,阻碍交流电流的是电感线圈的感抗。

(2) 感抗特性

电感器的感抗大小与两个因素有关:电感器的电感量 L 和流过电感器的交流电流频率 f 。电感器的感抗 X_L 计算公式如下:

$$X_L = 2\pi fL$$

式中, X_L 为电感器的感抗; f 为流过电感器的频率; L 为电感器的电感量。

电感器的感抗与频率成正比。换言之,在电感量确定的前提下,流过该电感器的交流电流频率越高,电感器对这一交流电流的感抗越大,反之频率越低感抗也越小,这一点同电容器容抗与频率之间的关系相反。

电感器的感抗与电感量之间也成正比关系。在流过电感器的交流电流频率一定的情况下,电感量越大的电感器对这一交流电流的感抗越大,反之电感量越小感抗也越小,这一点同电容器容抗与容量之间的关系也是相反的。

电感器的感抗与电感量 L 和频率 f 之间都成正比关系,即 L 和 f 越大感抗越大, L 和 f 越小感抗越小。

三、变压器的类型及其主要参数

变压器是变换电压、电流和阻抗的器件。按变压器工作频率的高低可分为低频变压器、中频变压器、高频变压器和行输出变压器，常用变压器实物外形如图 1-14 所示。

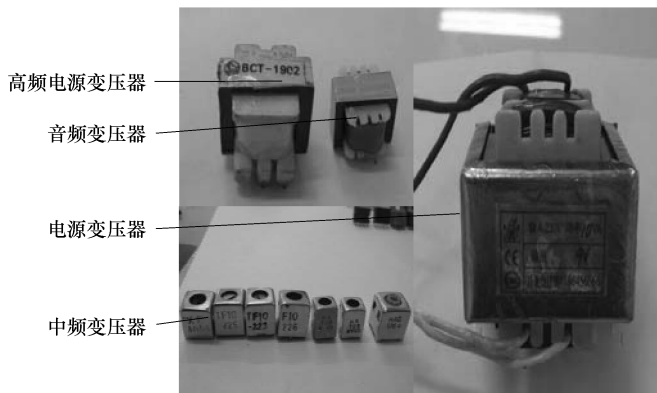


图 1-14 变压器实物外形图

1. 低频变压器

低频变压器又分为音频变压器和电源变压器两种。音频变压器的主要作用是实现阻抗匹配、耦合信号。电源变压器可以将 220V/50Hz 交流电压升高或降低，变成所需的各种交流电压。

2. 中频变压器

中频变压器是超外差式收音机和电视机中的重要器件。它的磁心和磁帽是用高频或低频特性的磁性材料制成的，低频磁心用于收音机，高频磁心用于电视机和调频收音机。中频变压器的适用频率范围从几千赫兹到几十兆赫兹，在电路中起选频和耦合等作用。它在很大程度上决定了接收机的灵敏度、选择性和通频带。

3. 高频变压器

高频变压器又分为耦合线圈和调谐线圈两类。调谐线圈与电容可组成串、并联谐振回路，用于选频等作用。天线线圈、振荡线圈等都是高频线圈。

4. 行输出变压器

行输出变压器又称为逆行程变压器，接在电视机行扫描的输出级，将行逆程反峰电压升压后再经过整流、滤波，为显像管提供几万伏的阳极高压和几百伏的加速极电压、聚焦极电压以及其他电路所需的直流电压。

5. 变压器的主要参数

(1) 电压比

电压比 n 指变压器的一次电压 U_1 与二次电压 U_2 的比值，或一次线圈数 N_1 与二次线圈数 N_2 比值，即

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

(2) 额定功率

额定功率是指在规定的频率和电压下, 变压器能长期工作而不超过规定温升的输出功率。

(3) 效率

效率是指在额定负载时, 变压器的输出功率 P_2 和输入功率 P_1 的比值, 即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100\%$$

(4) 绝缘电阻

绝缘电阻是表征变压器绝缘性能的一个参数, 是施加在绝缘层上的电压与漏电流的比值, 包括绕组之间、绕组与铁心及外壳之间的绝缘阻值。由于绝缘电阻很大, 一般只能用绝缘电阻表 (或万用表的 $R \times 10k\Omega$ 挡) 测量其阻值。如果变压器的绝缘电阻过低, 在使用中可能出现机壳带电甚至将变压器绕组击穿烧毁的现象。

四、变压器的主要特性

掌握变压器主要的特性对分析变压器电路有着举足轻重的作用。

1. 隔离特性

所谓变压器隔离特性, 是指一次与二次回路之间共用同一参考点。隔离特性是变压器的重要特性之一, 电源变压器的安全性是由这一特性决定的。图 1-15 所示电路中的 T 是电源变压器, 输入电压是 220V 交流市电电压, 该电压加在一次线圈 1 和 2 之间。

由交流市电电压的相关特性可知, 它的相线 (俗称火线) 与零线之间有 220V 交流电压, 而零线与大地等电位, 这样, 相线与大地之间存在 220V 交流电压。人站在大地上直接接触相线有生命危险。

假设电路中的变压器 T 是一个 1:1 变压器, 即它输入 220V 交流电压时, 它输出电压也是 220V, 但要注意, 变压器输出的 220V 电压是指二次线圈两端之间的电压, 即 3 和 4 端之间的电压。

二次线圈的任一端 (如 3 端) 对大地端之间的电压为 0, 这是因为二次线圈的输出电压不以大地为参考端, 同时一次和二次线圈之间高度绝缘。这样, 人站在大地上只接触变压器 T 二次线圈任一端, 没有生命危险 (切不可同时接触二次线圈 3 和 4 端), 而若接触一次线圈的相线端则会触电, 这便是变压器的隔离作用。

在许多电子电器中使用交流 220V 作为电源, 为了保证设备使用过程中使用者的人身安全, 需要将 220V 交流电源进行隔离, 这时使用电源变压器, 同时电源变压器将 220V 交流电压降低到适合的电压。电路中的 T 是具有降压和隔离作用的电源变压器。在故障检修中, 经常需要在通电状态下接触电路中的元器件或电路中的地线。加入电源变压器之后可以防止触电的危险。

注意: 当人体同时接触 1:1 变压器二次线圈的两个端点时, 220V 电压加到人身上, 仍然有生命危险。

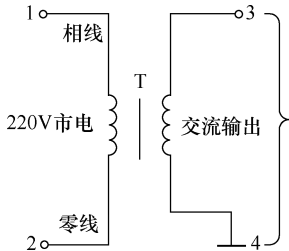


图 1-15 电源变压器

大多数电子电器中,电源变压器二次线圈输出的交流电压很低,所以采用变压器之后不存在触电的危险,这对故障检修很有益。

2. 隔直流通交流特性

变压器同电容器一样,也具有隔直流,通交流特性,利用变压器的通交流和隔直流特性可构成耦合电路。

图 1-16 所示是变压器耦合电路示意图。这一电路利用了变压器隔直流通交流特性,将放大晶体管 VT_1 与后面电路的直流隔开,同时耦合变压器二次输出经 VT_1 放大后的信号。

3. 二次线圈输出信号与输入信号频率相同

变压器的二次线圈输出电压一定是交流电压,这一电压的频率也一定与加到一次线圈两端的交流电压频率相同。因为一次线圈产生的交变磁场变化规律与输入交流电压的变化规律相同,而二次线圈交流输出电压变化规律同磁场变化规律一样,因此输出电压频率同输入电压的频率相同。

变压器的二次输出电压大小可以与一次线圈两端的交流输入电压大小不同,这由变压器的电压比决定。

4. 变压器同名端

变压器的同名端是指两个端点电压相位是同相位关系,所谓同相位是指两个端点电压同时增大或减小。同名端与变压器的一次、二次线圈的绕制方向有关,当一次和二次线圈以同一个方向绕在铁心上时,两个线圈的头是同名端,两个线圈的尾也是同名端,同一个线圈的头和尾端的电压相位相反,如图 1-17 所示。

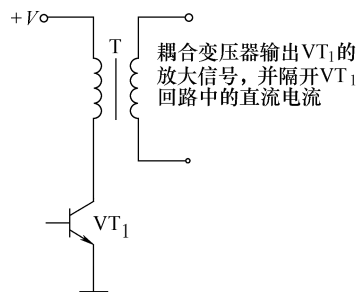


图 1-16 变压器耦合电路

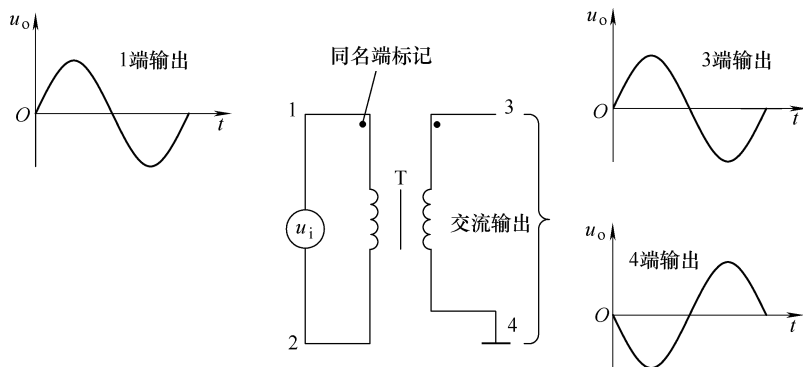


图 1-17 变压器同名端示意图

图 1-17 中电路的 T 是一个变压器,可以看出在变压器一次线圈 1 端和二次线圈 3 端各标出一个黑点表示 1 端和 3 端是同名端,那么 1 端和 3 端的电压波形,在同一时刻增大或减小。二次线圈 4 端电压的相位与 3 端的恰恰相反,电压波形一个在正半周时另一个在负半周,它们的电压一个在增大时另一个在减小,所以是反向的关系。

如果只考虑变压器输出电压大小而不考虑输出电压相位时,可不标出同名端。但是,在

有些振荡电路的正反馈电路中，为了分析正反馈过程的方便，要求了解变压器一次和二次线圈输出电压的相位，此时就要在变压器中标出同名端。

五、电感器和变压器的检测

1. 电感器的检测

对电感进行测量首先要进行外观检查，看线圈有无松散，引脚有无折断、生锈现象。然后用万用表的欧姆挡测量线圈的直流电阻，若为无穷大，说明线圈（或与引出线间）有断路；若比正常值小很多，说明有局部短路；若为零，则线圈被完全短路。对于有金属屏蔽罩的电感线圈，还需检查它的线圈与屏蔽罩之间是否短路；对于有磁心的可调电感，螺纹配合要好。

2. 变压器的测量

对变压器的测量主要是测量变压器线圈的直流电阻和各绕组之间的绝缘电阻。

(1) 线圈直流电阻的测量

由于变压器线圈的直流电阻很小，所以一般用万用表的 $R \times 1\Omega$ 挡来测绕组的电阻值，即可判断绕组有无短路或断路现象。对于某些晶体管收音机中使用的输入、输出变压器，由于它们体积相同，外形相似，一旦标识脱落，直观上很难区分，此时可根据其线圈直流电阻值进行区分。一般情况下，输入变压器的直流电阻值较大，一次侧多为几百欧姆，二次侧多为 $100 \sim 200\Omega$ ；输出变压器的一次侧多为几十欧姆到上百欧姆，二次侧多为零点几欧姆到几欧姆。

(2) 绕组间绝缘电阻的测量

变压器各绕组之间以及绕组和铁心之间的绝缘电阻可用 $500V$ 或 $1000V$ 绝缘电阻表（兆欧表）进行测量。根据不同的变压器，选择不同的绝缘电阻表。一般电源变压器和扼流圈应选用 $1000V$ 绝缘电阻表，其绝缘电阻应不小于 $1000M\Omega$ ；晶体管输入变压器和输出变压器应使用 $500V$ 绝缘电阻表测量，其绝缘电阻应不小于 $100M\Omega$ 。若无绝缘电阻表，也可用万用表的 $R \times 10k\Omega$ 挡测量，测量时，表头指针应不动（相当于电阻为 ∞ ）。

知识四 半导体分立元器件

半导体器件主要是以硅、锗等半导体材料制作而成的电子元器件，具有体积小、重量轻、耗电省、寿命长、工作可靠等一系列优点，应用十分广泛。

一、半导体分立器件的型号命名

按国家标准 GB/T 249—1989 的规定，国产半导体分立器件的型号命名由 5 部分组成，第 1 部分为半导体器件的电极数，用数字表示，2 代表二极管，3 代表晶体管；第 2 部分为半导体器件的材料和极性，用字母表示，有 A、B、C、D、E 几种；第 3 部分为半导体的类别，用字母表示，如整流管用“整”字汉语拼音的第一个字母“Z”表示；第 4 部分为序号，用数字表示；第 5 部分为规格，用字母表示。有些特殊半导体器件，如场效应晶体管、复合管、激光管器件等没有第 1、第 2 部分，只有第 3、第 4、第 5 部分。半导体器件型号的各部分含义如附录 F 所示。

[例 1.3] 电路器件外壳标有 2AP9、2CZ10、3DG6 符号，它们各表示什么含义？

解：由附录 F 可知，2AP9 为 N 型锗材料普通二极管；2CZ10 为 N 型硅材料整流二极管；3DG6 为 NPN 型硅材料高频小功率晶体管。

二、半导体二极管的类型与参数

半导体二极管（简称二极管）按材料可分为硅和锗两种；按结构可分为点接触型和面接触型；按用途可分为整流管、稳压管、检波管和开关管等。常用二极管的外形和图形符号如图 1-18 所示。

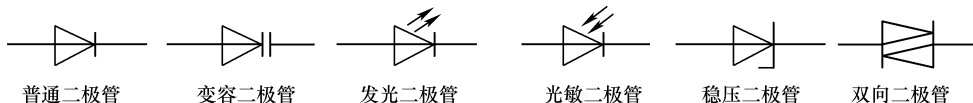
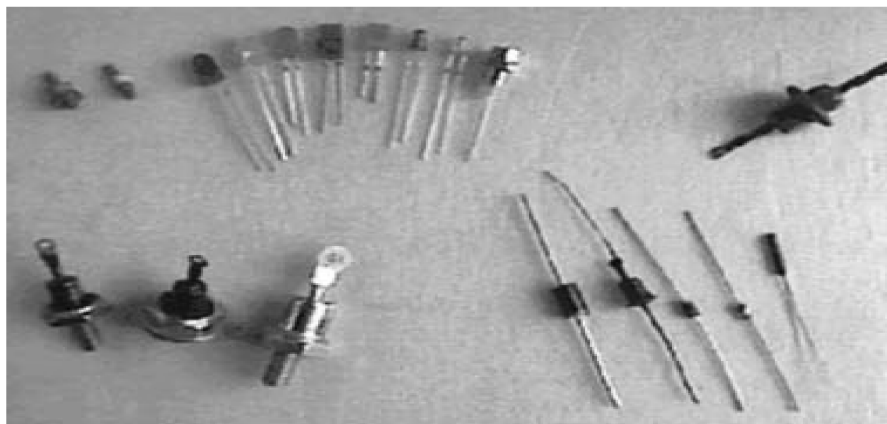


图 1-18 常用二极管外形与图形符号

1. 常用二极管的类型

(1) 整流二极管

整流二极管简称整流管，主要用在整流电路中，即把交流电变换成脉动的直流电，工作在正向导通区和反向截止区之间。整流管为面接触型，结电容较大，因此能够通过较大的电流，但只适合在较低频率下工作（3kHz 以内）。有时也利用整流管的正向特性，当稳压管用。

(2) 稳压二极管

稳压管主要用在直流电源和需稳压的电路中，作用是稳定电压。它工作在反向击穿区，特点是反向击穿区的伏安特性曲线很陡（越陡稳压性能越好），以致在较大的电流变化时其两端电压基本不变，故能实现稳压。稳压管在使用时一定要串接限流电阻，防止过电流烧坏管子。

(3) 发光二极管

发光二极管简写做 LED，其作用是将电信号转换成光信号，工作在正向导通区。发光管常用砷化镓或磷化镓等材料制成，材料不同发光颜色不同，常见的有红色、黄色、绿色、蓝色、白色等发光二极管，另有变色和红外发光二极管。发光二极管的外形有圆形、长方形、

三角形、正方形、组合形、特殊形等，工作电流为 $5 \sim 20\text{mA}$ ，工作时电压为 $1.5 \sim 3.5\text{V}$ 。发光管在使用时也要串接限流电阻。发光二极管被广泛应用在家电、仪器等设备上作为信息显示。

(4) 光敏二极管

光敏二极管也称光电二极管，其作用是将光的强弱变化转换成电流（电压）变化，它是在反向偏压下工作的。光敏二极管是运用半导体的光敏特性原理制成的，其特点是在强光下的电阻小，得到的反向电流大（称光电流或亮电流）；在黑暗条件下的电阻大，得到的反向电流小（称暗电流）。光电管的 PN 结的面积较大，且留有透光口，常用在光电转换控制器或测光传感器中。光电管的亮、暗电流相差越大越好。

(5) 检波二极管

检波二极管主要用在检波电路中，它与低通滤波器一道把高频信号中的调制信号还原出来，工作区域与整流管相同。检波管为点接触型，结电容小，适合在高频小电流下工作。检波管常为锗管，采用玻璃外壳封装。

(6) 变容二极管

变容管相当于一个压控可变电容，其作用是将电压的变化转换成电容量的变换，工作在反向截止区。变容管是利用 PN 结的结电容随反向电压的升高而减小的原理制成的，如 2CB14 型变容管，当电压在 $-3 \sim -25\text{V}$ 变化时，结电容在 $20 \sim 3\text{pF}$ 变化。由于结电容一般不大，所以变容管主要在高频压控振荡电路中作为谐振电容器使用，如电视机高频头中的输入回路及本振回路的振荡电容器。

2. 二极管的主要参数

(1) 最大整流电流 I_F

二极管长时间正常工作时，允许通过的最大正向电流，称为最大整流电流。因为电流通过二极管时会使管子发热，如果电流超过最大整流电流，二极管会因过热而烧坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{RM}

二极管长期正常工作时，两端允许的最高反向电压，称为二极管的耐压值。如果反向电压超过该值，二极管会有击穿的危险。在晶体管手册中，给出的最高反向工作电压一般是击穿电压的一半。

(3) 反向饱和电流 I_S

二极管在规定的温度和最高反向工作电压作用下流过的反向电流，称为反向饱和电流。反向饱和电流越小，二极管的性能越好。反向饱和电流的大小与二极管的材料和温度有关，硅管比锗管在高温下具有较好的稳定性。

三、二极管的主要特性

1. 二极管正向特性和反向特性

图 1-19 所示是二极管的伏-安（ $U-I$ ）特性曲线，以此说明二极管正向和反向特性。

图 1-19 中横轴是电压（ U ），即加到二极管两极引脚之间的电压，正电压表示二极管正极电压高于负极电压，负电压表示二极管正极电压低于负极电压；纵轴是电流（ I ），即流过二极管的电流，正方向表示从正极流向负极，负方向表示从负极流向正极。

正向特性曲线落在第一象限，在正向时正极电压大于负极电压，此时电流从二极管正极

流向负极；反向特性曲线落在第三象限，在反向时正极电压小于负极电压，此时电流从负极流向正极。

观察正向特性曲线，给二极管加的正向电压小于一定值时，正向电流很小，当正向电压大到一定程度后，正向电流则迅速增大，并且正向电压稍许增大一点，正向电流就增大许多。使二极管正向电流开始迅速增大的正向电压以称为起始电压。

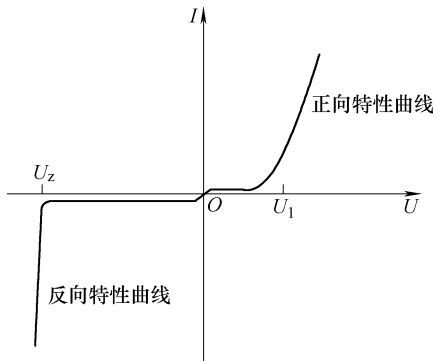


图 1-19 二极管的伏-安 (U - I) 特性曲线

观察反向特性曲线，给二极管加的反向电压小于一定值时，反向电流始终很小；当所加的反向电压大到一定值时，反向电流迅速增大，二极管处于电击穿状态。使反向电流开始迅速增大的反向电压 U_z 称为反向击穿电压。当二极管处于反向击穿状态时，它便失去了单向导电特性。

2. 二极管单向导电特性

一根导线、一只电阻器或电容器，它们都能沿两个方向流过电流，是双向导电的。但是二极管中的电流不允许这样双向流动，否则二极管会损坏。二极管引脚有正、负之分，流过二极管的电流只能从正极引脚流向负极引脚，不能从负极引脚流向正极引脚。

单向导电特性对电路分析具有指导意义。二极管电路符号中的三角形形象地表示出电流的方向，在电路分析时可以利用电路符号这一提示作用，方便地知道二极管的电流流动方向。

3. 二极管正向电压降基本不变特性和温度特性

二极管正向导通后的管子的电压降是基本不变的，但不是绝对不变的，下列因素会导致二极管的电压降有一个微小的变化。

- 1) 当温度升高时，管的电压降会略有下降；温度降低时，管的电压降会略有增大。
- 2) 正向电流发生很大变化时，正向电压降会有微小的增大变化。换句话说讲，正向电压有一个微小的增大变化时，将引起正向电流很大的增大变化，反之则为减小变化。

4. 二极管正向电阻小、反向电阻大特性

电阻器的标称阻值没有正向和反向之分，二极管由于具有单向导电特性，所以它的两根引脚之间的电阻分为正向电阻和反向电阻两种。

正向电阻是二极管正向导通后正、负极之间的电阻（是 PN 结的正向电阻），这一电阻很小，即正向电阻小。

反向电阻是二极管处于反向偏置而未击穿时的电阻（是 PN 结的反向电阻），这一电阻很大，即反向电阻大。正、反向电阻的大小是相对的，即反向电阻远远大于正向电阻，并且要求越大越好。

5. 二极管开关特性

利用二极管正向电阻和反向电阻相差很大的特性，可以将二极管作为电子开关器件，即所谓的开关二极管。二极管正向导通时，其内阻很小，相当于开关接通；二极管反向截止时，两引脚之间的电阻很大，相当于开关断开。

开关二极管与机械式开关相比,二极管导通时的内阻并不为零,二极管截止时的电阻也不为开路。但是,二极管的这两种工作状态下的电阻已经相差很大,在电路中可以起到电路通与断的控制作用。

四、二极管引脚的判别及检测

二极管的型号一般标注在二极管上,知道了型号就可以通过查晶体管使用手册知道其电参数,有的二极管在外壳上面有极性的色标,从而可判断出正、负极。二极管的质量主要是由生产厂家控制的。二极管可以用万用表测量来判断其极性和好坏。

1. 普通二极管的检测

普通二极管外壳上均印有型号和标记。标记方法有箭头、色点、色环等3种,箭头所指方向或靠近色环的一端为二极管的负极,有色点的一端为正极。若型号和标记脱落时,可用万用表的欧姆挡进行判别,其原理是根据二极管的单向导电性,其反向电阻远远大于正向电阻。检测具体过程如下。

1) 判别极性:将万用表选在 $R \times 100\Omega$ 或 $R \times 1k\Omega$ 挡,两表笔分别接二极管的两个电极。若测出的电阻值较小(硅管为几百欧姆到几千欧姆,锗管为 $100\Omega \sim 1k\Omega$),说明是正向导通,此时黑表笔接的是二极管的正极,红表笔接的则是负极;若测出的电阻值较大(几十千欧姆到几百千欧姆),为反向截止,此时红表笔接的是二极管的正极,黑表笔接的是负极。

2) 检查好坏:可通过测量正、反向电阻来判断二极管的好坏。一般小功率硅二极管正向电阻为几百千欧姆到几兆欧姆,锗二极管约为 $100\Omega \sim 1k\Omega$ 。

3) 判别硅、锗管:若不知被测的二极管是硅管还是锗管,可根据硅管、锗管的导通电压降不同来判别。将二极管接在电路中,当其导通时,用万用表测其正向电压降,硅管一般为 $0.6 \sim 0.7V$,锗管为 $0.1 \sim 0.3V$ 。

2. 稳压管的检测

1) 极性的判别:与普通二极管的判别方法相同

2) 检查好坏:万用表置于 $R \times 10k\Omega$ 挡,黑表笔接稳压管的“-”极,红表笔接“+”。若此时的反向电阻很小(与使用 $R \times 1k\Omega$ 挡时的检测值相比较),说明该稳压管正常。因为万用表 $R \times 10k\Omega$ 挡的内部电压都在 $9V$ 以上,可达到被测稳压管的击穿电压,使其阻值大大减小。

五、半导体晶体管的类型

半导体晶体管又称双极型晶体管,简称晶体管,是一种电流控制型元器件。其最基本的作用是放大,它具有体积小、结构牢固、寿命长、耗电省等优点,被广泛应用于各种电子设备中。常用晶体管的外形与图形符号如图 1-20 所示。

1. 晶体管的种类

晶体管主要有 NPN 和 PNP 型两类。一般可以根据命名法从晶体管管壳上面的符号识别出它的型号和类型。例如,晶体管的管壳上印的是 3DG6,表明它是 NPN 型高频小功率硅晶体管。同时,为了能直观地表明晶体管的放大倍数,常在晶体管的外壳上标注不同的色标。可以从管壳上色标的颜色来判断管子的电流放大倍数 β 值的大致范围。见表 1-3。

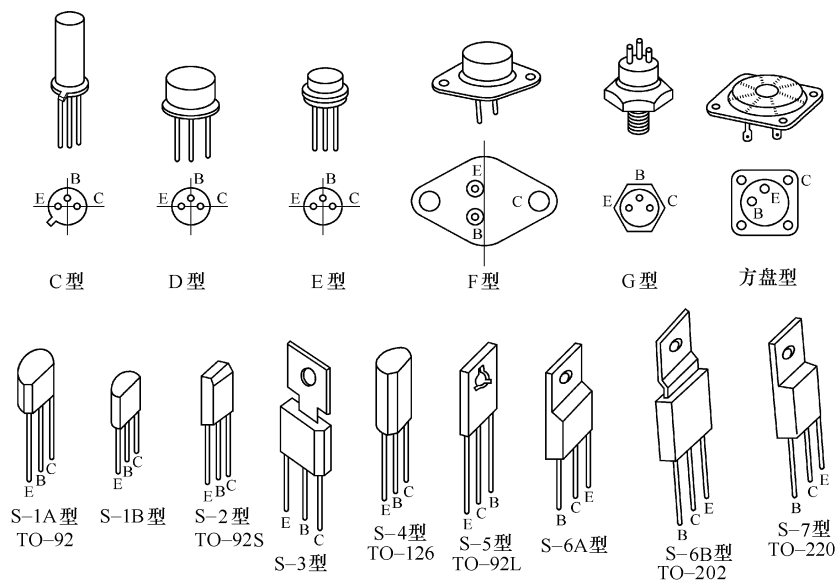


图 1-20 常用晶体管外形与图形符号

表 1-3 部分晶体管 β 值色标表示

β 范围	0 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 40	40 ~ 55	55 ~ 80	80 ~ 120	120 ~ 180	180 ~ 270	270 ~ 400	400 以上
色标	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	黑

(1) 普通小功率晶体管

普通小功率晶体管常见的有半圆柱形塑胶封装和帽子形金属封装，一般在小信号电路中做放大、开关和信号处理用。高频晶体管为点结型，低频晶体管为面结型，根据半导体材料，目前以硅管居多。

(2) 普通大功率晶体管

普通大功率晶体管，常见的有扁平形塑胶封装和菱形铁壳封装等，外形要比小功率管大得多，电极引出脚粗大，管体上有固定散热片的螺钉孔，有些大功率管的外壳与集电极相通。大功率管用在需要大功率输出的电路中，如音响的末级功放管、电源的调整管等。

(3) 达林顿管

达林顿管又称复合管，主要由两个晶体管复合而成，有普通型和带保护型两种，内部结构如图 1-21 所示。

图 1-21a 和图 1-21b 是复合管普通型；图 1-21c 和图 1-21d 是保护型，保护电阻 R_1 和 R_2 分别是几千欧姆和几十欧姆，VD 是阻尼二极管。复合管的极性由前面的晶体管极性决定，电流放大倍数是两个晶体管放大倍数的乘积。复合管的开关速度快、增益高、导通彻底，特别适用在大功率的开关电路和驱动电路上，如电极调速、逆变电路、继电器驱动、LED 显示屏驱动等。

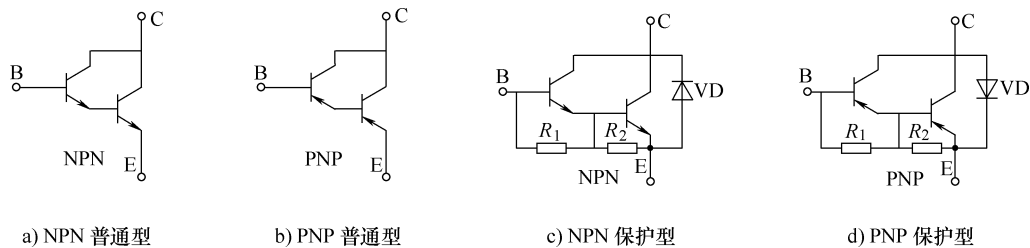


图 1-21 达林顿管内部结构

(4) 带阻尼行输出管

行输出管是电视机、彩色显示器的一个关键器件，工作在行描电路的输出级，简称行管，它的作用是与逆程电容、阻尼二极管、行偏转线圈一道形成锯齿波水平扫描电流，并通过行输出变压器产生所需的高压、中压和低压。带阻尼的行输出管内集成了阻尼二极管 VD 和一只保护电阻 R_1 ，大功率管基本都是 NPN 型，结构如图 1-22 所示。行输出管的耐压要求在 1kV 以上，所以都有较大的散热片。

(5) 晶体管阵列

晶体管阵列是一种将若干个晶体管封装在一起，构成外形类似集成电路的器件。在电路中有较多应用，可以简化线路的设计，如图 1-23 所示的 ULN2003 外形图与俯视图。

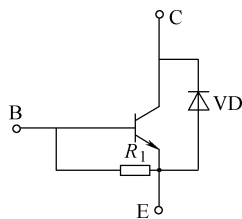


图 1-22 行输出管内部结构

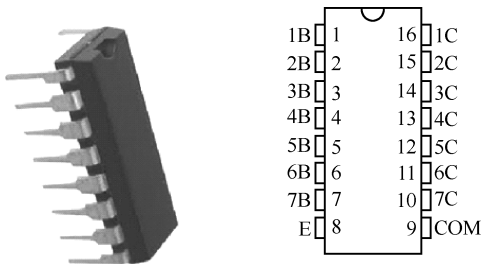


图 1-23 ULN2003 外形图与俯视图

六、半导体晶体管的特性

分析晶体管电路的工作原理，需要掌握晶体管的重要特性，这样才能轻松自如地分析晶体管电路。晶体管是一个电流控制器件，它用基极电流来控制集电极电流和发射极电流，没有基极电流就没有集电极电流和发射极电流。

1. 晶体管电流放大特性

晶体管电流放大能力很容易理解和记忆，只要有一个很小的基极电流，晶体管就会有一个很大的集电极和发射极电流，这是由晶体管的特性所决定的。不同的晶体管有不同的电流放大倍数，所以不同晶体管对基极电流放大能力也是不同的。

晶体管在正常工作时，晶体管的基极电流、集电极电流和发射极电流同时存在，同时消失。

基极电流是信号输入电流，集电极电流和发射极电流是信号输出电流，信号的输出电流

远大于信号的输入电流，说明晶体管能够对输入电流进行放大。

2. 晶体管基极电流控制集电极电流特性

当晶体管工作在放大状态时，晶体管集电极电流和发射极电流由直流电源提供，晶体管本身并不能放大电流，只是用基极电流去控制由直流电源为集电极和发射极所提供电流的特性，这样等效理解成晶体管放大了基极输入电流。如图 1-24 所示电路说明晶体管基极电流控制集电极电流的过程。

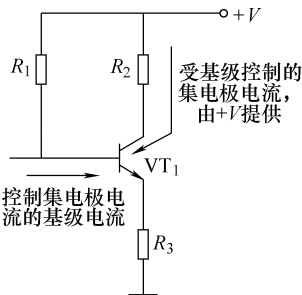


图 1-24 晶体管基极电流控制集电极电流

电路中的 R_2 为晶体管 VT_1 集电极提供电流通路，流过 VT_1 集电极的电流回路是：直流工作电压 $+V \rightarrow$ 电阻 $R_2 \rightarrow VT_1$ 集电极 $\rightarrow VT_1$ 发射极 $\rightarrow$ 地线，构成回路。

集电极电流由直流工作电压 $+V$ 提供，但是集电极电流的大小受到基极电流的控制，基极电流大集电极电流大，基极电流小集电极电流小，所以基极电流只是控制了直流电源 $+V$ 为 VT_1 集电极所提供电流的大小。

注意：晶体管能将直流电源的电流按照基极输入电流的要求转换成集电极电流和发射极电流，从这个角度上讲晶体管是一个电流转换器件。所谓电流放大，就是将直流电源的电流，按基极输入电流的变化规律转换成集电极电流和发射极电流。

3. 发射极电压跟随基极电压特性

晶体管发射极电压跟随基极电压特性其电路如图 1-25 所示。

当晶体管进入放大工作状态后，基极与发射极之间的 PN 结已处于导通状态，这时 PN 结电压降基本不变。这样，基极电压升高时发射极电压也升高，基极电压下降时发射极电压也下降，显然发射极电压跟随基极电压变化而变化。

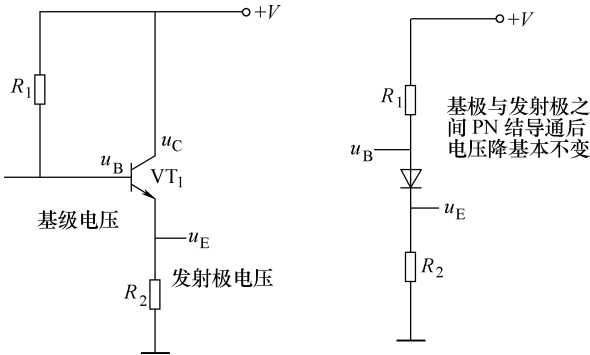


图 1-25 晶体管发射极电压跟随基极电压特性

晶体管的发射极电压跟随特性有一定条件，并不是在任何电压下均存在这一特性，只在基极与发射极之间的 PN 结处于导通状态时，发射极电压才跟随基极电压。在晶体管的直流电路分析过程中用到这一特性。无论是 NPN 型还是 PNP 型晶体管都存在这一特性。

4. 晶体管开关特性

晶体管同二极管一样，也可以作为电子开关器件，构成电子开关电路。当晶体管用于开关电路中时，晶体管工作在截止、饱和两个状态，见表 1-4。

表 1-4 晶体管开关特性

开关状态	晶体管工作状态	内阻特性	等效电路	说明
开关接通	饱和状态	集电极与发射极之间内阻很小	开关接通 C 级 E 级 S1	晶体管基极是控制极，基极电流很大，晶体管进入饱和状态

(续)

开关状态	晶体管工作状态	内阻特性	等效电路	说明
开关断开	截止状态	集电极与发射极之间内阻很大	开关断开 C级 ——— E级 S₁	基极电流为0，晶体管处于截止状态。晶体管在截止、饱和时集电极与发射极之间的内阻相差很大，可以用晶体管作为电子开关器件

七、半导体晶体管的检测

常用的小功率管有金属外壳封装和塑料封装两种，可直接观测出3个电极发射极（E）、基极（B）、集电极（C）。但不能只看3个电极就说明管子的一切问题，仍需进一步判断管型和管子的好坏。一般可用万用表的 $R \times 100\Omega$ 和 $R \times 1k\Omega$ 挡来进行判别。

(1) 基极和管型的判断

将黑表笔任接一极，红表笔分别依次接另外两极。若在两次测量中表针均偏转很大（说明管子的PN结已导通，电阻较小），则黑表笔接的电极为基极（B），同时该管为NPN型；反之，将表笔对调（红表笔任接一极），重复以上操作，则也可确定管子的基极（B），其管型为PNP型。

(2) 管子好坏的判断

若在以上操作中无一电极满足上述现象，则说明管子已坏。也可用万用表的 h_{FE} 挡来进行判别。当管型确定后，将晶体管插入“NPN”或“PNP”插孔，将万用表置于 h_{FE} 挡，若 h_{FE} (β) 值不正常（如为零或大于300），则说明管子已坏。

八、场效应晶体管

场效应晶体管（FET），又称单极型晶体管，它属于电压控制型半导体元器件。其特点是输入电阻很高（ $10^6 \sim 10^{15}\Omega$ ）、噪声小、功耗低、无二次击穿现象，受温度和辐射影响小，特别适用于要求高灵敏度和低噪声的电路。场效应晶体管和晶体管一样都能实现信号的控制和放大，但由于它们的构造和工作原理截然不同，所以两者的差别很大。在某些特殊应用方面，场效应晶体管优于晶体管，是晶体管所无法替代的。

1. 场效应晶体管的类型

场效应晶体管分为结型（JFET）和绝缘栅型（MOS FET）。结型场效应晶体管又分为N沟道和P沟道两种；绝缘栅型场效应晶体管除有N沟道和P沟道之分外，还有增强型与耗尽型之分。场效应晶体管的电路符号如图1-26所示。

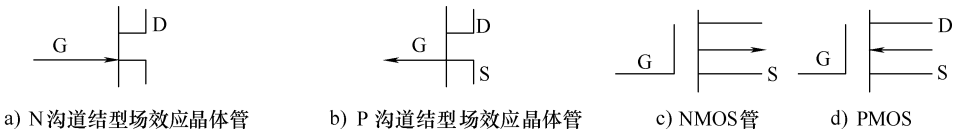


图1-26 场效应晶体管的电路图形符号

场效应晶体管和晶体管的比较情况见表 1-5。

表 1-5 场效应晶体管与晶体管的比较

元器件 项目	场效应晶体管	晶体管
导电机构	只用多子	既用多子，又用少子
导电方式	电场漂移	载流子浓度扩散及电场漂移
控制方式	电压控制	电流控制
类型	P 沟道，N 沟道	PNP，NPN
放大参数	$G_m = 1 \sim 6\text{ms}$	$\beta = 50 \sim 100$ 或更大
输入电阻	$10^6 \sim 10^{15} \Omega$	$10^2 \sim 10^4 \Omega$
抗辐射能力	在宇宙射线辐射下，仍能正常工作	差
噪声	小	较大
热稳定性	好	差
制造工艺	简单，成本低，便于集成化	较复杂

2. 场效应晶体管的特性

场效应晶体管和双极性晶体管都具有放大作用，但在性能上有一定的差别，它与晶体管相比具有如下特性：

1) 场效应晶体管是电压控制器件，它通过 U_{GS} 来控制 I_D ；而晶体管是电流控制器件，通过 I_B 控制 I_C 。

2) 场效应晶体管放大信号时的输入端电流极小，因此它的输入电阻很高，能达到 $10^{10}\Omega$ 以上；而晶体管放大信号时基极总有电流，所以输入电阻较小，一般为几千欧姆。因为场效应晶体管的这个特点，所以在存放、取用、焊接时，要特别注意感应电荷可能击穿管子造成损坏。绝缘栅场效应晶体管存放时要将 3 只引脚短路，焊接时电烙铁要可靠接地，最好拔下插头，并先焊接栅极以避免栅极悬空。

3) 场效应晶体管是利用多数载流子导电的，而晶体管导电既有多数载流子也有少数载流子，因为少数载流子浓度容易受温度、辐射等影响，所以场效应晶体管的热稳定性、抗辐射等性能要比晶体管强得多。

4) 场效应晶体管在结构上是对称的，它的漏极和源极可以互换，耗尽型绝缘栅管的栅极电压可正可负，灵活性比双极型晶体管强。

5) 场效应晶体管因其输入的高阻抗常用在电路的输入级，因其具有电子管的声音效果，常用在音响的末级功放；晶体管放大电路的电压放大系数要大于场效应晶体管，晶体管的安装工艺要求低于场效应晶体管，所以晶体管在各种电路中有着广泛的应用。

6) 场效应晶体管和晶体管虽然都有放大和开关功能，但场效应晶体管还可以在微电流、低电压条件下工作，且便于集成，所以广泛应用在大规模和超大规模集成电路中。

3. 结型场效应晶体管的检测

(1) 极性及管型的判别

用万用表 $R \times 1k\Omega$ 挡尝试测量, 如果某只引脚与另外两只引脚之间都存在单向导电性, 则该脚为栅极 G, 管子是结型场效应晶体管; 如果用万用表黑表笔接栅极, 红表笔分别去接另外两只引脚, 若两次测出的阻值都较小, 则该管为 N 沟道, 否则为 P 沟道。当栅极确定后, 由于结型场效应晶体管结构上的对称性, 原则上另两只引脚可任意定为源极 S 和漏极 D。

(2) 好坏的判别

好的结型场效应晶体管, 其 G 极与 D 极、G 极与 S 极之间应该有单向导电性, D 极与 S 极之间的正、反向电阻应相等, 为几千欧姆。可以用万用表测量结型场效应晶体管的放大能力, 方法是: 在两表笔分别接 D 极和 S 极的情况下、用手触及 G 极, 指针应发生偏转, 偏转角度越大, 放大能力越强; 交换表笔后再测一次, 比较两次指针偏转角度大小, 偏转大的那次所加到管子上的电压极性更适合管子工作, 或者说这时更适宜确定 D 极和 S 极、即对于 N 沟道管这时接黑表笔的定为 D 极, P 沟道管接黑表笔的定为 S 极。

绝缘栅场效应晶体管由于容易受到感应电压的危害, 一般不用万用表检测, 而用专用检测仪检测。

知识五 半导体集成电路

集成电路是采用半导体制作工艺, 在一块较小的单晶硅片上制作许多晶体管及电阻器、电容器等元器件, 并按照多层布线或隧道布线的方法将元器件组合成完整的电子电路。集成电路的体积小、耗电低、稳定性好, 从某种意义上讲, 集成电路是衡量一个电子产品是否先进的主要标志。

一、集成电路的分类及引脚识别

1. 集成电路的分类

- 1) 按传送信号的特点可分为模拟集成电路、数字集成电路。
- 2) 按有源器件可分为双极性集成电路、MOS 型集成电路、双极型-MOS 型集成电路。
- 3) 按集成度可分为小规模集成电路 (SSI)、中规模集成电路 (MSI)、大规模集成电路 (LSI) 和超大规模集成电路 (VLSI)。
- 4) 按封装形式可分为晶体管式封装、扁平封装和直插式封装等。
- 5) 按其制作工艺可分为半导体集成电路、薄膜集成电路、厚膜集成电路、混合集成电路等。

半导体集成电路的型号由 5 部分组成, 各部分的符号及意义如附录 G 所示。

2. 集成电路的引脚识别

集成电路的引脚较多, 且分布均匀, 每一个引脚的功能各不相同, 引脚的排列也有多种形式; 但每一个集成电路的第一个引脚上会有一个标记, 具体表现如下:

1) 圆形金属封装集成电路的引脚排列。将该集成电路的引脚朝上, 从标记开始, 顺时针方向依次读出引脚读数 (即 1、2、3、…), 如图 1-27a 所示。

2) 双列扁平陶瓷封装或双列直插式封装集成电路的引脚排列。找出该集成电路的标记, 将有标记的这一面对观察者, 最靠近标记的引脚为 1, 然后从 1 脚开始, 逆时针方向

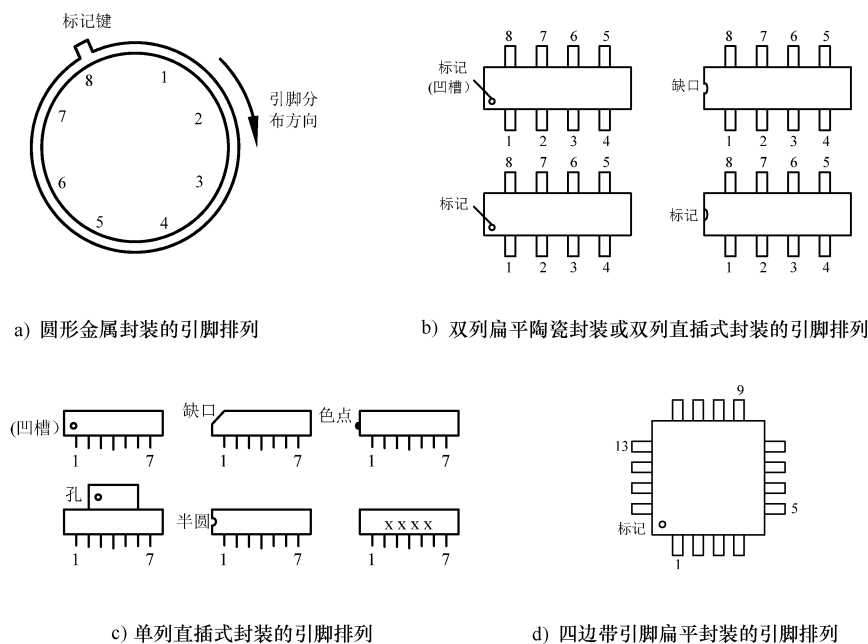


图 1-27 集成电路的引脚识别

依次为引脚的顺序读数，如图 1-27b 所示。

3) 单列直插式封装集成电路的引脚。找出该集成电路的标记，将集成电路的引脚朝下、标记朝左，则从标记开始，从左到右依次为引脚 1、2、3…，如图 1-27c 所示。

4) 四边带引脚的扁平封装集成电路的引脚排列。找出该集成电路的标记，将集成电路的引脚朝下，最靠近标记的引脚为 1 号引脚，然后从 1 脚开始，逆时针方向依次为引脚的顺序读数。如图 1-27d 所示。

集成电路在使用中要注意以下事项：

1) 使用集成电路时，其各项电性能指标（电源电压、静态工作电流、功率损耗、环境温度等）应符合要求。

2) 在电路的设计安装时，应使集成电路远离热源。对输出功率较大的集成电路应采取有效的散热措施。

3) 进行整机装配焊接时，一般最后对集成电路进行焊接，手工焊接时，一般使用 20 ~ 30W 的电烙铁，且焊接时间应尽量短（少于 10s）；避免由于焊接过程中的高温而损坏集成电路。

4) 不能带电焊接或插拔集成电路。

5) 正确处理好集成电路的空脚，不能擅自将空脚接地、接电源或悬空，应根据各集成电路的实际情况进行处理。

6) 使用 MOS 集成电路时，应特别注意防止静电感应击穿。对 MOS 电路所用的检测仪器、工具以及连接 MOS 块的电路都应进行良好的接地。存储时，必须将 MOS 电路装在金属盒内或用金属箔纸包装好，以防止外界电场对 MOS 电路产生静电感应将其击穿。

二、模拟集成电路

模拟集成电路按用途可分为运算放大器、直流稳压器、功率放大器、电压比较器等。模拟集成电路与数字集成电路的差别不但在信号的处理方式上,而且在电源电压上的差别更大。模拟集成电路的电源电压根据型号的不同,可以不相同,而且数值较高,视具体用途而定。

1. 集成运算放大器

自从1964年美国制造出第一个单片集成运放 $\mu A702$ 以来,集成运算放大器(简称集成运放)得到了广泛的应用,目前它已成为线性集成电路中品种和数量最多的一类。

国标统一命名法规定,集成运放各个品种的型号由字母和阿拉伯数字两部分组成。字母在首部,统一采用CF两个字母,C表示国标,F表示线性放大器,其后的数字表示集成运放的类型。例如,通用型单运算放大器CF007($\mu A741$),双运算放大器F353等。

2. 时基电路

集成时基电路又称为集成定时器或555电路,它是一种数字、模拟混合型的中规模集成电路,应用十分广泛。它是一种产生时间延迟和多种脉冲信号的电路,由于内部电压标准使用了三个 $5k\Omega$ 电阻,故取名555电路。其电路类型有双极型(TTL)和互补金属氧化物半导体(CMOS)型两大类,两者的结构与工作原理类似。图1-28所示为555定时器的引脚排列。

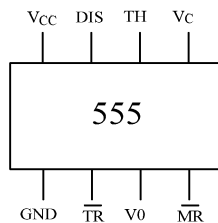


图 1-28 555 引脚排列

555 时基电路具有以下几个特点:

1) 555 时基电路是一种将模拟电路和数字电路巧妙结合在一起的电路。

2) 555 时基电路可采用 $4.5 \sim 15V$ 的单独电源,也可以和其他的运算放大器和TTL电路共用电源。

3) 一个单独的555时基电路,可以提供近15min的较准确的定时时间。

4) 555 时基电路具有一定的输出功率,最大输出电流达为200mA,可直接驱动继电器、小电动机、指示灯及扬声器等负载。

因此,555 时基电路可用在脉冲发生器、方波发生器、单稳态多谐振荡器、双稳态多谐振荡器、自由振荡器、内振荡器、定时电路、延时电路、脉冲调制电路、仪器仪表的各种控制电路中。

三、数字集成电路

数字集成电路按结构不同可分为双极型和单极型电路。其中双极型电路根据电路结构不同又可分为电阻-晶体管电路(RTL)、二极管-晶体管电路(DTL)、晶体管-晶体管电路(TTL)、射极耦合电路(ECL)、高抗干扰电路(HTL)等多种;单极型电路有JFET、N沟道MOS电路(NMOS)、P沟道MOS电路(PMOS)、互补型MOS电路(CMOS)等4种。

1. TTL 系列和 CMOS 系列数字集成电路的型号含义

目前,数字集成电路使用较多的TTL系列和CMOS系列可以对比使用,各自的型号含

义见表 1-6。

表 1-6 TTL 系列和 CMOS 系列数字集成电路的型号含义

类型	产品系列	含义	类型	产品系列	含义
TTL	54/74 × × ×	标准系列	CMOS	54/74 × × ×	高速系列，其速度与 TTL 或 LSTTL 门电路相当
	54/74H × × ×	高速系列			
	54/74L × × ×	低功耗系列			
	54/74S × × ×	肖特基系列		54/74HCT × × ×	与 TTL 兼容的高速系列
	54/74LS × × ×	低功耗肖特基系列			
	54/74AS × × ×	先进的肖特基系列			
	54/74ALS × × ×	先进的低功耗肖特基系列			

2. 常用的 TTL 系列和 CMOS 系列数字集成电路的类型

(1) 门电路

常用的门电路见表 1-7。

表 1-7 常用 TTL 系列和 CMOS 系列门电路类型

产品系列名称对照		门电路类型
74 系列 TTL 集成电路	CMOS4000 系列集成电路（CC、CD 或 TC 系列）	
LS00	4011	2 输入端 4 与非门
LS02	4001	2 输入端 4 或非门
LS04	4069	6 反相器
LS08	4081	2 输入端 4 与门
LS32	4071	2 输入端 4 或门
LS86	4070	2 输入端 4 异或门

(2) 组合集成电路

常用的组合集成电路见表 1-8。

表 1-8 常用的组合集成电路类型

集成电路型号	组合集成电路名称	集成电路型号	组合集成电路名称
74LS138	3-8 线译码器（多路分配器）	74LS192	同步十进制双时钟可逆计数器
74LS151	8 选 1 数据选择器（多路转换器）	74LS194	4 位双向移位寄存器
74LS153	双 4 线-1 线数据选择器 （多路转换器）	74LS161	4 位二进制同步计数器
74LS147	10-4 线数据选择器（多路转换器）	74LS183	双全加器
74LS90	异步二-五-十进制计数器	74LS47	4 线-七段译码器
74LS163	8 位串入/并出移位寄存器	74LS48	4 线-七段译码驱动器

四、集成电路的检测

1. 电阻检测法

用万用表的欧姆挡测量集成电路各引脚对地的正、反向电阻，并与参考资料或与一块同类型的、好的集成电路比较，从而判断该集成电路的好坏。

2. 电压检测法

对测试的集成电路通电，使用万用表的直流电压挡，测量集成电路各引脚对地的电压，将测出的结果与该集成电路参考资料所提供的标准电压值进行比较，从而判断是该集成电路有问题，还是集成电路的外围电路元器件有问题。

3. 波形检测法

用示波器测量集成电路各引脚的波形，并与标准波形进行比较，从而发现是否存在问题。

4. 替代法

用一块好的同类型的集成电路进行替代测试。这种方法往往是在前几种方法初步检测之后，基本认为集成电路有问题时，所采用的方法。该方法的特点是直接、见效快，但拆焊麻烦，且易损坏集成电路和线路板。

知识六 压电 器 件

压电器件是利用材料的压电效应制成的器件。压电器件的应用范围很广，在通信、广播、导航、医疗、精密测量和计算、清洗、探伤、引燃引爆、高压小电流等领域有着广泛的应用。常用的有石英谐振器、陶瓷滤波器和声表面波滤波器。

1. 石英谐振器

石英谐振器简称晶振，在结构上，石英谐振器是将晶体按一定的方向切割成很薄的晶片，再将晶片两个对应的表面抛光和涂敷银层，引出引脚并进行封装。给晶振加上交变电压，石英晶体薄片在外加电压形成的交变电场的作用下会产生机械振动，当交变电场的频率与晶体的固有频率相同时，晶体会出现剧烈的振动现象，这就是晶体的谐振特性。由于石英谐振器具有体积小、重量轻、可靠性高、频率稳定性极高等优点，因而在家用电器和通信设备中被广泛应用。晶振的封装按电极的不同有双电极型、三电极型和双对电极型等几种；按封装材料的不同有金属封装、玻璃封装、陶瓷封装和塑料封装等。图 1-29 所示为其常见电路符号。

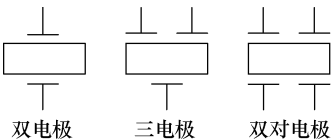


图 1-29 常见晶振的电路符号

国产品振的型号命名方法为：第 1 部分用汉语拼音表示外壳材料和形状，第 2 部分用字母表示石英片的切割方式，第 3 部分用阿拉伯数字表示晶振的主要性能参数及外形尺寸。具体含义见表 1-9。

例如，JF12.000 为金属外壳、FT 切割方式、谐振频率为 12MHz 的晶振。

石英晶体的测量：用万用表 $R \times 10k\Omega$ 挡测量各脚之间的电阻应为无穷大，电阻较小或

表 1-9 石英晶体谐振器的型号命名及含义

第 1 部分		第 2 部分		第 3 部分
外壳材料和形状		石英片切割方式		主要性能参数及外形尺寸
符号	意义	符号	意义	用数字表示晶振的主要性能参数及外形尺寸
B	玻璃壳	A	AT 切割方式	
		B	BT 切割方式	
		C	CT 切割方式	
		D	DT 切割方式	
S	塑料壳	E	ET 切割方式	
		F	FT 切割方式	
		H	HT 切割方式	
		M	MT 切割方式	
J	金属壳	N	NT 切割方式	
		U	音叉弯曲振动 WX 切割方式	
		X	伸缩振动 X 切割方式	
		Y	Y 切割方式	

为 0 则说明该晶振已经损坏。好的晶振各引脚间不通，但引脚间不通并不能说明晶振就一定是好的。

2. 陶瓷滤波器

陶瓷滤波器是利用具有压电效应的陶瓷材料制造而成的。结构上，陶瓷滤波器是将一个或多个压电陶瓷振子用金属支架固定并引出导线，再进行封装。原理上，交变信号加到陶瓷滤波器的输入端，陶瓷片会随之振动，当信号频率与陶瓷片的固有振荡频率相同时，机械振幅最大，这时从输出端输出的电信号也最大。陶瓷滤波器有两个主要特性：一是能实现电能到机械能在到电能的转化；二是具有 LC 回路的选频作用。

陶瓷滤波器按频率特性可分为带通滤波器（又称滤波器）和带阻滤波器（又称陷波器）；按电极的不同有双电极、三电极和四电极等几类。陶瓷滤波器具有 Q 值高，幅频、相频特性好，体积小，信噪比高，工作稳定等特点，在彩色电视机、收音机等家用电器及其他电子产品中已广泛应用，主要用在选频网络、中频调谐、鉴频和滤波等电路中。

陶瓷滤波器的结构、基本特性、工作原理等与石英晶体相似，只是石英晶体的工作稳定性、频率准确度等技术指标更好些。石英晶体由于成本较高，所以一般用在频率要求十分稳定的振荡电路中，而在要求不太高的电路中常采用陶瓷谐振器件。

国产陶瓷滤波器的型号中，第 1 个字母表示器件功能，如 L 表示滤波器，X 表示陷波器，J 表示鉴频器，Z 表示谐振器；第 2 个字母表示材料性质，用 T 表示压电陶瓷，后面的数字和 K（或 M）表示频率大小和单位。例如，LT6.5MA 为 6.5MHz 的压电陶瓷带通滤波器，XT4.43MA 为 4.43MHz 的压电陶瓷带阻滤波器。

陶瓷滤波器的好坏可用万用表检测，方法与晶振检测类似。

知识七 表面安装元器件

近年来，表面安装元器件（见图 1-30）。已广泛应用于计算机、通信设备和音视频产品中。表面安装元器件（SMT 元器件）又称为贴片元器件，或称片状元器件，它包括表面安装元件 SMC（Surface Mount Component）和表面安装器件 SMD（Surface Mount Device）。



图 1-30 SMT 元器件外形图

一、表面安装元器件的分类与特性

1. 表面安装元器件分类

表面安装元器件基本上都是片状结构。这里所说的片状结构是个广义的概念，从结构形状上说，包括薄片矩形、圆柱形、扁平形等。表面安装元器件同传统元器件一样，也可以从功能上分为无源器件、有源器件和机电器件三类，见表 1-10。

表 1-10 表面安装元器件按功能分类

类 别	封装器件	种 类
无源器件	电阻器	厚膜电阻器、薄膜电阻器、热敏器件、电位器
	电容器	多层陶瓷电容器、有机薄膜电容器、云母电容器、片式钽电容器等
	电感器	多层电感器、线绕电感器、片式变压器等
	复合器件	电阻网络、电容网络、滤波器等
有源器件	分立组件	二极管、晶体管、晶体振荡器等
	集成电路	片式集成电路、大规模集成电路等
机电器件	开关、继电器	钮子开关、轻触开关、簧片继电器等
	连接器	片式跨接线、圆柱形跨接线、接插件连接器等
	微电动机	微型微电动机等

2. 表面安装元器件的特性

微型电子产品的广泛使用促进了 SMC 和 SMD 向微型化发展。同时,一些机电元件,如开关、继电器、滤波器、延迟线、热敏和压敏电阻等也都实现了片式化。表面安装元器件有以下几个显著的特性:

1) 在 SMT 元器件的电极上,有些焊端完全没有引线,有些只有非常小的引线;相邻电极之间的间距比传统的双列直插式集成电路的引线间距(2.54mm)小很多,IC 的引脚中心距已由 1.27mm 减小到了 0.3mm;在集成度相同的情况下,SMT 元器件的体积比传统的元器件小很多,片式电阻电容已经由早期的 3.2mm × 1.6mm 缩小到 0.6mm × 0.3mm;且随着裸芯片技术的发展,BGA 和 CSP 类高引脚数器件已广泛应用到生产中。

2) SMT 元器件直接贴装在印制电路板表面,将电极焊接在元器件同一面的焊盘上。这样,印制板上通孔的周围没有焊盘,使印制电路板的布线密度大大提高。

3) 表面安装不仅影响电路板上所占面积,而且也影响器件和组件的电学特性。无引线或短引线,减少了寄生电容和寄生电感,从而改善了高频特性,有利于提高使用频率和电路速度。

4) 形状简单、结构牢固,紧贴在印制电路板表面上,提高了可靠性和抗振性;安装时没有引线打弯、剪线,在制造印制板时,减少了插装元器件的通孔;尺寸和形状标准化,能够采取自动贴片机进行自动贴装,效率高,可靠性高,便于大批量生产,而且综合成本较低。

5) 从传统的意义上来讲,表面安装元器件没有引脚或具有短引脚,与插装元器件相比,可焊性检测方法和要求是不同的,整个表面组件承受的温度较高,但表面安装引脚或端点,与 DIP 引脚相比,在焊接时承受的温度较低。

当然,表面安装元器件也存在着不足之处。例如,密封芯片载体很贵,一般用于高可靠性产品,它要求与基板的热膨胀系数匹配,即使这样,焊点仍然容易在热循环过程中失效。由于元器件都紧紧贴在基板表面上,元器件与 PCB 表面非常贴近,基板上的空隙就相当小,给清洗造成了困难,要达到清洁的目的,必须要有非常良好的工艺控制。元器件体积小,电阻电容一般不设标记,一旦弄乱就不容易搞清楚。元器件与 PCB 之间热膨胀系数存在差异,在 SMT 产品中必须注意到此类问题。

二、片式无源器件与有源器件

1. 片式 SMC 器件

SMC 包括片状电阻器、电容器、滤波器和陶瓷振荡器等。单片陶瓷电容器、钽电容器和厚膜电阻器为最主要的无源元件,它们一般呈矩形或圆柱形,其表面安装形式已获得广泛应用。

SMC 特性参数的数值系列与传统元件的差别不大,标准的标称数值有 E6、E12、E24 等。长方体 SMC 是根据其外形尺寸的大小划分成几个系列型号的。矩形表面安装元器件的尺寸规格由 4 个数字和一些符号表示,现有两种表示方法,欧美产品大多采用英制系列,日本产品采用公制系列,我国两种系列都在使用。

在表面安装元器件的规格表示中,前两位数字表示表面安装元器件的长度,后两位数字表示其宽度,符号表示元器件的种类,典型的 SMC 系列的外形尺寸意义见表 1-11。

表 1-11 典型的矩形表面安装元器件 SMC 系列的外形尺寸意义

公制/英制型号	长 L / (mm/in)	宽 M / (mm/in)	额定功率 P/W	最大工作电压 U/V
3225/1210	3.2/0.12	2.5/0.10	1/4	200
3216/1206	3.2/0.12	1.6/0.06	1/8	200
2012/0805	2.0/0.08	1.25/0.05	1/10	150
1608/0603	1.6/0.06	0.8/0.03	1/16	50
1005/0402	1.0/0.04	0.5/0.02	1/20	50

例如：

1) 公制系列 2012C 的意义是：对应的是英制系列 0805 的矩形贴片电容，其规格尺寸为：长 $L=2.0\text{mm}$ (0.08in)，宽 $W=1.25\text{mm}$ (0.05in)；参数特性是：额定功率为 1/10W，最大工作电压为 150V。

2) 公制系列 3216R 的意义是：对应的是英制系列 1206 的矩形贴片电阻，其规格尺寸为：长 $L=3.2\text{mm}$ (0.12in)，宽 $W=1.6\text{mm}$ (0.06in)；参数特性是：额定功率为 1/8W，最大工作电压为 20V。

一般片状的厚度为 0.4~0.6mm。片状的数值采用数码表示法直接标在器件表面，当阻值小于 10Ω 的用 R 代替小数点。如 5R6 表示 5.6Ω。

2. 片式有源器件

为适应 SMT 的发展，各类半导体器件，包括分立器件中的二极管、晶体管、场效应晶体管，集成电路的小规模、中规模、大规模、超大规模，甚至大规模集成电路及各种半导体器件，如气敏、色敏、压敏、磁敏和离子敏等器件，正迅速地向表面组装化发展，成为新型的表面组装器件（SMD）。

SMD 的出现对推动 SMT 的进一步发展具有十分重要的意义。这是因为，SMD 的外形尺寸小，易于实现高密度安装；精密的编带包装适宜高效率地自动化安装；采用 SMD 的电子设备，体积小、重量轻，性能得到了改善，整机可靠性获得提高，生产成本降低。SMD 与传统的 SIP 及 DIP 器件的功能相同，但封装结构不同。

表面组装技术提供了比通孔插装技术更多的有源封装类型。例如，在 DIP 中，只有 3 个主要的本体尺寸 300mil[⊖]、400mil 和 600mil，中心间距为 100mil。陶瓷封装和塑料封装的封装尺寸和引脚结构都一样。与之相比，表面组装却要复杂得多。

任务与实施

1. 任务

元器件的选择与测试。

2. 任务实施器材

- 1) 电子产品原理图一份，相应的电子产品一套。
- 2) 各种类型、不同规格的新元器件（应包括任务要求所需的元器件）。
- 3) 各种类型、不同规格的已经损坏的元器件。

⊖ 1mil = 25.4 × 10⁻⁶m，后同。

- 4) 每人配备指针式万用表和数字万用表各一只。
- 5) 元器件手册。
3. 任务实施过程
 - 1) 拆卸电子产品上的元器件。
 - 2) 根据原理图查阅资料, 确定选择元器件的类型及型号。
 - 3) 辨别各种类型的元器件, 识别各种元器件上的各种标志及标称值。
 - 4) 用万用表对元器件进行检测。
 - 5) 对测试结果记录到自制的表格中, 撰写工作报告。

思考题

1. 什么是电阻? 电阻有哪些主要参数?
2. 什么是电解电容? 与普通电容相比, 它有什么不同?
3. 什么是电感? 电感有哪些主要参数?
4. 电阻、电容、电感的主要标志方法有哪些? 怎么识读?
5. 如何用万用表检测判断二极管的引脚极性及好坏?
6. 晶体管通常按哪几个方面进行分类? 各自分为哪几类?
7. 什么是表面贴片元器件? 它有哪些优点?

项目二 常用仪器仪表与数据处理

项目导读

常用电子仪器仪表是指在电路制作与调试过程中经常用来测量电压、电流、频率、波形和元器件参数等使用的仪器仪表以及调试电路所需的各种信号发生器。本项目主要介绍了电子仪器仪表的使用与维护，常用电源与信号源、常用仪器仪表的功能和使用方法以及测量基础知识。

通过本项目的学习，可使学生能正确选择与使用常用仪器仪表，完成基本电参数的测量方法。了解电子测量技术的基本知识以及误差分析，掌握测量的方法和仪器的应用。

【知识要求】

- 熟练掌握一般电子仪器仪表的使用常规
- 了解常用电子仪器仪表的性能指标和使用方法
- 了解实验环境和掌握实验操作规程
- 掌握测量基本知识
- 掌握撰写测试报告的一般方法

【能力要求】

- 会正确地选择和使用电子仪器仪表
- 能够科学地操作和维护电子仪器仪表
- 会根据仪器仪表以及操作规程制定测试方法
- 能够进行测量数据分析
- 会写一般性的测试报告

相关知识

知识一 电子仪器仪表的使用与维护

在电路制作与调试实验中，通常使用的电子仪器仪表有直流稳压源、信号发生器、万用表、晶体管毫伏表、示波器、晶体管特性图示仪等。常用电子仪器仪表在电路中的作用如图 2-1 所示。正确地选择、使用和维护电子仪器仪表是电子工程技术人员必须具备的基本技能之一。

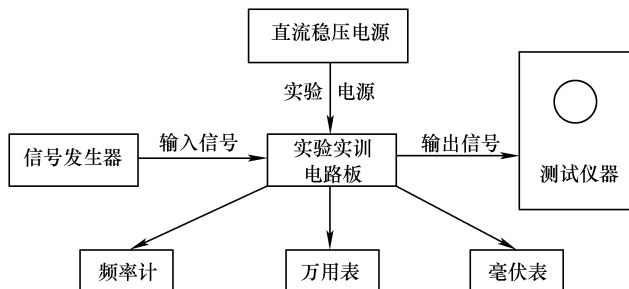


图 2-1 常用电子仪器仪表在电路中的作用

一、电子仪器仪表的选择与使用

为了电路测量的安全和准确，正确地选择与使用电子测量仪器和设备是很重要的，实验时一般应注意如下几个事项。

1. 正确选用测量仪器

实验时应根据测量原理和测量方法、被测电量的情况和测量准确度的要求合理地选用仪器。例如，要测量频率为 15MHz、幅度为 2V 的交流电压，不能选择 DA16-1 型毫伏表，因其主要技术指标（即频率范围为 20Hz ~ 1MHz）不符合被测量的要求，选择 DA22 型毫伏表就可满足要求了。

2. 正确选择测量仪器的功能和量程

为了保证仪器正常工作和测试结果的准确性，在仪器接入被测电路之前，必须熟悉仪器面板上旋钮和开关的名称、作用及调节方法。正确调整仪器面板上所有开关、旋钮，并注意旋钮的方向和极限位置，转动旋钮时要轻缓，切忌用力过猛。测量时应选择好合适的功能和量程。在测量值不好估计的情况下，应将仪器的“衰减”或“量程”旋钮放在较大的挡位，以免仪器过载而损坏。

3. 掌握仪器的正确使用方法和操作程序

按照仪器使用说明书规定的方法正确地操作，以保证测试结果的正确和电路测试安全。例如，使用直流稳压电源时，必须先调整好输出电压，然后再接入被测电路。若要改变被测电路时，必须关闭稳压电源。又如电子电压表有两个输入端，一个是接地端，另一个是非接地端，测试时应先将接地端与被测信号接地端（公共端）相连，然后再连接非接地端，否

则指针将可能被打弯。

4. 注意仪器的“接地”问题

由于大多数电子测量仪器采用单端输入、单端输出的形式，即仪器的两个测量端点不对称，所以总有一个端点与仪器外壳相连，并与电缆引线的外屏蔽线连在一起。这个端点通常用符号“⊥”表示。电路实验中，所有仪器的“⊥”点都必须连接在一起，即为“共地”，如图 2-2 所示。

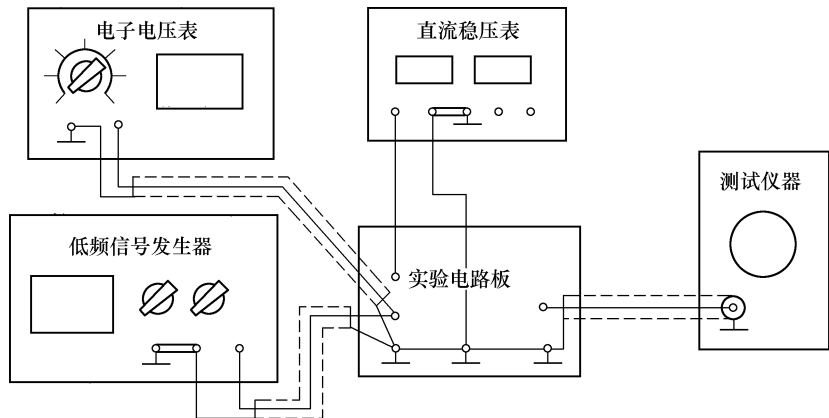


图 2-2 实验仪器和被测电路共地

“共地”避免了外界的干扰，也保证了测试安全，因此应特别注意电子仪器的“共地”问题。例如，多台仪器组成的测试系统，当所有仪器外壳都通过接地线的电源插头接大地时，若没“共地”轻则使信号短路，重则会烧坏被测电路的元器件。因此，在测量时，绝不可将接地端与非接地端任意调换。

5. 正确连接电源

在连接仪器电路时，应先检查供电电压与仪器工作电压是否相符，仪器的电源电压变换装置是否插在或扳至相应电压位置。对于有通风设备的电子仪器，开机通电后应注意内部风扇工作是否正常，若不正常应立即关掉电源，否则仪器会被烧坏。

二、电子仪器的日常维护

电子仪器要注意防尘、防潮、避免日晒。暂时不用时，要盖上防尘罩，放置在干燥通风处。较长时间不用时，应定期通电除潮，并对机内电容器充电，防止失效。还应注意防腐蚀和防漏电，如定期检查仪表内的电池，以免其流液、腐烂，若仪表长期不用，应取出电池。检查电子仪器是否漏电时，可用绝缘电阻表。对于绝缘电阻小于 $500\text{k}\Omega$ 的电子仪器，应禁止使用，并予以检查。

知识二 常用电源与信号源

一、直流稳压电源

直流稳压电源具有稳压、稳流功能，由于其输出电压、电流稳定，通常作为直流电压源

和直流电流源使用。

1. 功能

直流稳压电源是用来提供可调直流电压的电源设备，在电网电压或负载变化时，能保持其输出电压基本稳定不变。直流稳压电源的内阻非常小，在其工作范围内，直流稳压电源的伏安特性十分接近于理想电压源。

2. 使用说明

直流稳压电源的型号很多，虽然面板布置上有所不同，但使用方法基本相同。这里以 JWY-30F 型晶体管直流稳压电源为例进行说明。它是直流双路稳压电源，可同时提供两组输出电压。面板配置了电压表、电流表、电压粗调旋钮、电压细调旋钮、监测转换开关等。JWY-30F 型晶体管直流稳压电源的面板布置如图 2-3 所示。

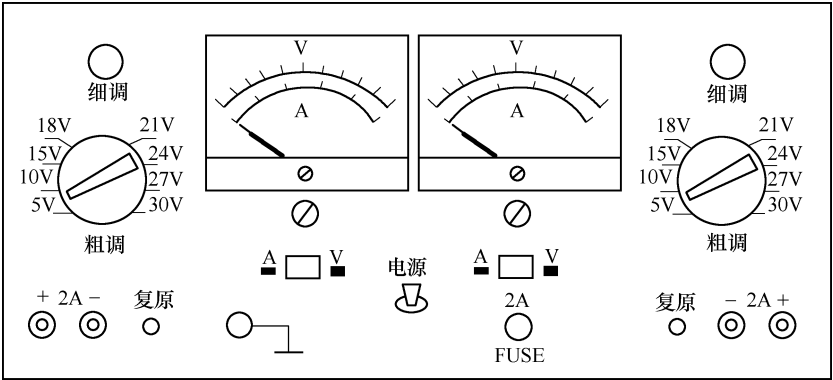


图 2-3 JWY-30F 型晶体管直流稳压电源的面板

- 1) 接通 220V 工频电源，闭合电源开关，电源指示灯亮。
- 2) 根据所需电压先调节“电压粗调”旋钮，将其置于所需电压段，然后配合调节“电压细调”旋钮到所需电压值。
- 3) 该电源有额定电流为 2A 的两组电源，并由两对正负端钮输出直流稳压电压。该电源面板上装有电压表（0 ~ 35V）、电流表（0 ~ 2.5A），它们是两组电源共用的，并由 A-V 开关的切换选择显示电压或电流读数（一般准确度较低，作为监视仪表）。
- 4) 使用中不得将输出端短路，不要使输出电流超过其额定电流值。若发生过载和短路，稳压电源的输出短路保护装置将会自动切断输出，待排除故障后，按一下复位按钮（或更换熔丝后，重新启动）。
- 5) 面板上接地符号的接线柱是接地保护用的，不得与输出负极接线柱和负载接地相连。

二、低频信号发生器

这里以 XD-2 型低频信号发生器为例进行说明。XD-2 型低频信号发生器能产生 1Hz ~ 1MHz 的正弦信号电压，最大输出略大于 5V，最大衰减量达到 90dB（31600 倍），具有较小的失真度，并附有满量程为 5V 的电压指示表。

1. 主要技术特性

- 1) 频率范围：1Hz ~ 1MHz，分 6 个频段；

- 2) 频率特性不均匀度: 小于 $\pm 1\text{dB}$;
- 3) 最大输出电压: 5V ;
- 4) 输出衰减: $0 \sim 90\text{dB}$;
- 5) 电压表指示误差: 在频率 $2\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 时, 不大于 $\pm 0.5\%$;
- 6) 电源供电: $220\text{V} \pm 10\%$, 50Hz , 功耗不大于 13W 。

2. 使用方法

XD-2 型低频信号发生器面板布置如图 2-4 所示。

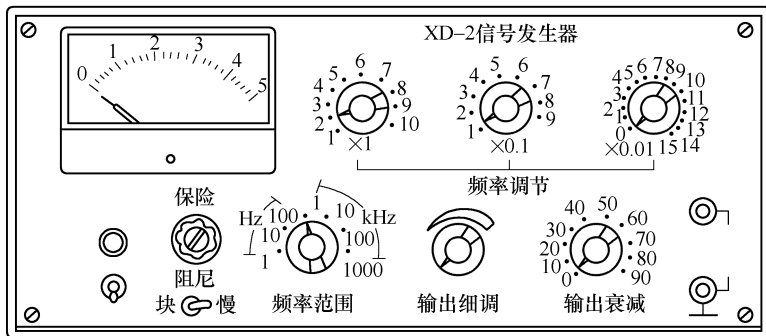


图 2-4 XD-2 型低频信号发生器面板

1) 准备。仪器通电前, 先将“输出衰减”和“输出细调”调节旋钮逆时针方向旋到最小位置, 检查电源电压是否与仪器所需电源相符, 然后接通电源开关, 电源指示灯亮。若要得到足够的频率稳定性, 则需要预热 10min 。

2) 频率调节。根据所需频率, 先选择“频率范围”中的频段, 再调节“频率调节”旋钮, 使指针指在所需频率位置即可。例如, 需要仪器输出 486Hz 电压信号, 可先将“频率范围”开关置于“ 100 ”处, 再调节“频率调节”旋钮: “频率调节”中“ $\times 1$ ”旋钮置于“ 4 ”处, “频率调节”中“ $\times 0.1$ ”旋钮置于“ 8 ”处, “频率调节”中“ $\times 0.01$ ”旋钮置于“ 6 ”处即可。

3) 电压输出。由面板上“输出”插座引出。在“输出衰减”置于“ 0 ”时, 调节“输出细调”可以得到 $1 \sim 5\text{V}$ 的输出电压。需要较小信号电压时, 可用衰减开关控制, 如把“输出衰减”置于“ 20dB ”, 这时的实际输出电压比表头指示值缩小了 10 倍。

三、高频信号发生器

XFG-7 型高频信号发生器又称标准调幅信号发生器, 能产生频率为 $100\text{kHz} \sim 30\text{MHz}$ 连续可变的高频等幅正弦波和调幅波。

1. 主要技术特性

- 1) 频率范围: $100\text{kHz} \sim 30\text{MHz}$, 分为 8 个频段。
- 2) 输出阻抗与输出电压。
 - ① 在“ $0 \sim 0.1\text{V}$ ”插孔输出以下内容:
 - a. 输出电压为 $0 \sim 0.1\text{V}$, 分 $10\mu\text{V}$ 、 $100\mu\text{V}$ 、 1mV 、 10mV 、 100mV 5 挡, 每挡可以细调, 输出阻抗约为 40Ω 。
 - b. 在有分压电阻的电缆终端“ 0.1 ”插口输出为 $0 \sim 10\text{mV}$, 输出阻抗为 8Ω 。

c. 在有分压电阻的电缆终端“1”插口输出为 $0 \sim 0.1\text{V}$ ，输出阻抗为 40Ω 。

② 在“ $0 \sim 1\text{V}$ ”插孔输出以下内容

a. 输出电压为 $0 \sim 1\text{V}$ ，连续可变。输出阻抗为 40Ω 。

b. 内调幅频率： 400Hz 和 1000Hz 两种。

c. 调幅度： $0 \sim 100\%$ 连续可调。

2. 使用方法

XFG-7 型高频信号发生器面板布置如图 2-5 所示。

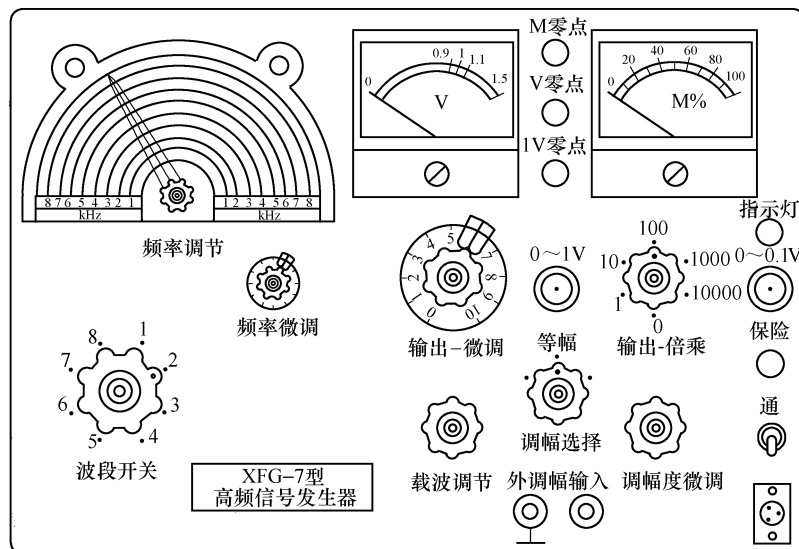


图 2-5 XFG-7 型高频信号发生器面板布置

(1) 开机前的准备

仪器可使用 110V 、 127V 或 220V 的交流电源，应选择相应电源电压和频率，或通过变压器配接。不要把使用的电源线和输出电缆绞在一起或靠得太近。

仪器接通电源前必须将各旋钮旋至起始位置，即

- 1) “载波调节”和“调幅度微调”向左旋转至极点。
- 2) “输出-微调”旋钮旋在最小。
- 3) “输出-倍乘”旋钮旋在“1”。
- 4) 电源开关放在“断”位置。

此后，将电源插头插入电源。

(2) 调整零点

通电前调好指示表的机械零点，通电后，把“波段开关”放在任意两挡位之间，使振荡不工作，这时如果表头有指示，说明零点没调好。此时，应调节电压表（“V”表）的零位旋钮，使指针指在零点。

(3) 调节所需频率

将“波段开关”置于与所需频率有关的波段，调节“频率调节”的粗调旋钮到所需的频率附近，再调节微调旋钮至准确频率（注意：改变频率范围要把载波调到最小）。

(4) 调节输出电压

转动“载波调节”旋钮，使电压表指在红线“1”上，再根据需要输出电压的大小选定输出插孔（保持电压表指示1V输出才能稳定）。

1) 输出电压在0.1V以上，选用“0~1V”插孔。这时“输出-微调”的最大读数为1V，将“输出-微调”旋钮调节到所需的输出电压值。

2) 输出电压在0.1V以下，选用“0~0.1V”插孔。这时的输出信号电压等于“输出-微调”读数和“输出-倍乘”开关所指的倍乘数的乘积，单位为 μV 。例如，“输出-微调”指在“2”，“输出-倍乘”开关放在“1000”，则输出电压为 $2 \times 1000 \mu\text{V} = 2000 \mu\text{V}$ 。

3) 如果要求输出低阻抗的微弱信号，则在“0~0.1V”插孔上加用带有分压电阻的电缆，并在“0.1”插口处引出信号，信号的大小按上所述读数方法读数后再乘上0.1。

(5) 高频等幅信号输出

把“调幅选择”开关调到“等幅”位置。

(6) 调幅波输出。

内部调制：本机内有400Hz及1000Hz的音频振荡器供内部调制用。内部调制时的工作顺序如下：

- 1) 将“调幅选择”旋转到400Hz或1000Hz上，“调幅度调节”旋钮向左旋至零。
- 2) 校准“V”表的零点。
- 3) 使“V”表的指示在“1”（否则M%的指示是不正确的）。
- 4) 用“M%”零点调节将“M%”表的指针调至零点（一般30%幅度的调幅波用得较多）。

外部调制：若要判断接收机的音频特性，必须使用外部的音频电压源来调制。

还需要指出，无论内调幅或外调幅，当调制系数较大及调制频率较高时，再加上调幅后，会引起电压表（“V”表）的指示加大，但不应将其调回。

四、函数信号发生器

函数信号发生器是一种多波形信号发生器，应用十分广泛。目前，通用仪器的函数发生器能产生方波、三角波、锯齿波、正弦波等信号。有些函数信号发生器还具有数字频率计、计数器及电压显示功能。该仪器各端口还具有保护功能，可防止输出短路电流和外电路电流的倒流对仪器造成损失。现以YB1635型函数信号发生器为例进行说明。

本仪器是一种精密的测试仪器，具有连续信号、扫描信号、函数信号、脉冲信号和外部测频等功能。

1. 主要技术特性

(1) 电压输出

- 1) 频率范围：0.2Hz~2MHz，频率调整率0.1~1。
- 2) 输出阻抗：50 Ω 。
- 3) 输出波形：正弦波、三角波、方波、单次波、斜波、TTL方波、直流电平。
- 4) 输出电压幅度：峰-峰值10V（ $1 \pm 10\%$ ）（50 Ω 负载）、峰-峰值20V（ $1 \pm 10\%$ ）（1M Ω 负载）。
- 5) 对称度：20%~80%。
- 6) 衰减准确度： $\leq \pm 3\%$ 。

(2) TTL 输出

- 1) 输出幅度： $\geq +3V$ 。
- 2) 输出信号阻抗： 600Ω 。

(3) 频率计数

- 1) 频率范围： $0.1Hz \sim 10MHz$ 。
- 2) 测量准确度： $1\% \pm 1$ 个字。
- 3) 时基频率： $10MHz$ 。
- 4) 闸门时间： $10s$ 、 $1s$ 、 $0.1s$ 、 $0.01s$ 。
- 5) 时基：标称， $10MHz$ 。

2. 使用说明

YB1635 型函数信号发生器面板布置如图 2-6 所示。

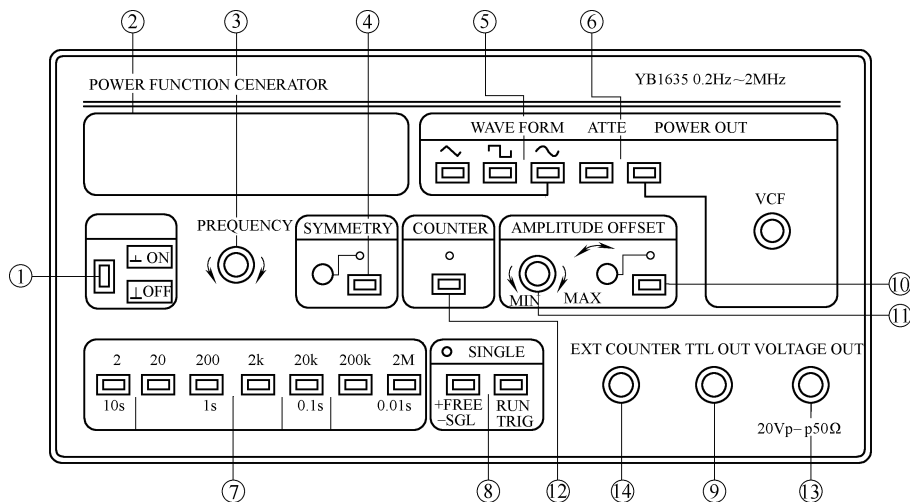


图 2-6 YB1635 型函数信号发生器面板布置

- 1) 电源开关 (POWER)：信号发生器接上电源后，可控制电源通断。
- 2) 频率显示窗口：显示输出信号的频率或外测信号的频率。
- 3) 频率调节旋钮 (FREQUENCY)：调节此旋钮改变输出信号频率。顺时针旋转，频率增大；逆时针旋转，频率减小。
- 4) 对称性 (SYMMETRY)：将对称性开关按入，对称性指示灯亮，调节对称性旋钮可改变输出信号的对称性。
- 5) 波形选择开关 (WAVE FORM)：按入对应波形的某一键，可选择需要的波形，3 个键都未按下，无信号输出，此时为直流电平。
- 6) 衰减开关 (ATTE)：电压输出衰减开关，两挡开关组合为 20dB、40dB、60dB。
- 7) 频率范围选择开关 (兼频率计数闸门开关)：根据需要的频率，按下其中的一个键。
- 8) 单次开关 (SINGLE)：当“SGL”开关按下，单次指示灯亮，仪器处于单次状态，每按一次“TRIG”键，电压输出端口输出一个单次波形。
- 9) TTL 信号输出端 (TTL OUT)：输出标准的 TTL 幅度的脉冲信号，输出阻抗为 600Ω 。
- 10) 直流偏置 (OFFSET)：按入直流偏置开关，直流偏置指示灯亮，此时调节直流偏

置旋钮，可改变直流电平。

11) 幅度调节旋钮 (AMPLITUDE): 顺时针旋转，增大“电压输出”的输出幅度；逆时针旋转，减小“电压输出”的输出幅度。

12) 外测开关 (COUNTER): 此开关按下时，频率显示窗口显示外测信号频率。外测信号由 EXT. COUNTER 输入插座输入。

13) 电压输出端口 (VOLTAGE OUT): 由此端口输出电压。

14) EXT. COUNTER: 外测信号输入端口。

知识三 万 用 表

万用表是应用最广泛的电工仪表之一，分模拟式与数字两类。它们又各有多种型号。普通万用表可以用来测量直流电流、直流电压、交流电压、电阻和音频电平等电量，较高级时万用表还可以测量交流电流、电感量、电容量、功率及晶体管的共发射极直流电流放大倍数 h_{ie} 等电气参数。这里以磁电式万用表和 DA890A 型数字万用表为例进行说明。

一、磁电式万用表

磁电式万用表由磁电系测量机构（微安表）、若干分流器、分压器、半导体二极管及转换开关等组成，可以用来测量直流电流、直流电压、交流电压和电阻等。其使用方法如下。

1) 熟悉表型：使用万用表之前应仔细了解面板结构，并熟悉各旋钮的作用。

2) 调零：万用表应水平放置，测量前先检查表头指针是否在零点，若不在零点，应先调零。

3) 选挡：将红表笔插入正极插孔，黑表笔插入负极插孔。按测量数据的种类和量程，正确选择挡位。

4) 接入线路与读取数值。

① 测量直流电压。将两个表笔与被测电压并联，红表笔接待测电压的高电位，黑表笔接待测电压的低电位，万用表指针正偏，读取的电压的读数记为正电压；万用表指针反偏，对调两表笔的接入点后，再读取的电压的指示值，应记为负电压。

② 测量交流电压。将两个表笔与被测电压并联，电表指针指示为电压的有效值。

③ 测量直流电流。将万用表串联接入电路，电流应从红表笔流入，从黑表笔流出。万用表指针正偏，读取的电流的读数记为正电流；万用表指针反偏，对调两表笔的接入点后，再读取的电流的指示值，应记为负电流。

④ 测量电阻。如电阻挡的量程有“ $R \times 1$ ”、“ $R \times 10$ ”、“ $R \times 100$ ”、“ $R \times 1k$ ”等，测量前应根据被测电阻值，拨动旋钮，选择适当的量程（一般以电阻刻度的中间位置接近被测电阻值为好）。

选定量程后，短接两个表笔，调节调零旋钮，使指针指在电阻刻度的零位上。每次调换电阻挡时，都应重新调零。

将两个表笔分别与待测电阻两端相接，读取电阻读数：阻值 = 表头指示 $\times$ 倍率。

用完万用表后应将转换开关置于交流电压最高挡或空挡上。

二、数字万用表

数字万用表是采用数字化的测量技术，把连续的模拟量转换成不连续的、离散数字形式加以显示的仪表。因为数字万用表具有显示清晰、读数准确、测量范围宽、测量速度快、输入阻抗高等优点，所以广泛应用于电子测量中。

数字万用表的常规测试项目包括：直流和交流电压、电阻、二极管、带声响的通断测试及晶体管 h_{fe} 的测试。DA890A 型数字万用表面板布置如图 2-7 所示。

DA890A 型主要功能说明如下：

1) 电源开关。使用时将电源开关置于“ON”位置；使用完毕置于“OFF”位置。

2) 显示器。最大指示值为 1999 或 -1999。当被测量超过最大指示值时，显示“1”或“-1”。

3) 晶体管测试座。测量晶体管 h_{fe} 值。

4) 功能/量程选择开关。根据被测的电量（电压、电流、电阻等）选择相应的按钮。按被测量的大小，选择适当的量程。按下功能开关的同时按下相应的量程按钮。

5) 输入插座。将黑表笔插入“COM”孔，将红表笔插入“20A”或“mA”孔，可测量电流；将红表笔插入“V/ Ω ”孔，黑表笔插入“COM”孔，可测量电压或电阻。

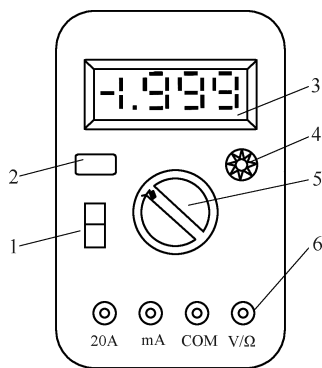


图 2-7 DA890A 型数字万用表面板布置示意图

- 1—电容测试座 2—按键式电源开关
3—液晶显示器 4—晶体管测试座
5—量程转换开关 6—输入插座

三、毫伏表

毫伏表是测量正弦交流电压有效值的电子仪器。与一般交流电压表相比，毫伏表的量程多、频率范围宽、灵敏度高、适用范围更广。毫伏表的输入阻抗高，输入电容小，对被测电路影响小。因此，在电子电路的测量中毫伏表得到了广泛的应用。

目前，电子技术实验中常用的毫伏表有 DA-16 型晶体管毫伏表和 DA-1 型超高频毫伏表等。

1. 晶体管毫伏表

DA16-1 型晶体管毫伏表为晶体管放大检波式电压表。被测电压经过放大和整流后再送至磁电系测量机构，表面示值均按正弦交流电压的有效值刻度。

(1) 主要技术指标

- 1) 测试电压范围：100 μ V ~ 300V，共分 11 挡。
- 2) 频率范围：20Hz ~ 1MHz。
- 3) 输入阻抗：频率为 1kHz 时，1M Ω ，70pF。
- 4) 仪器基本误差：不超过满刻度的 $\pm 3\%$ 。

(2) 使用说明

DA16-1 型晶体管毫伏表的面板布置如图 2-8 所示。

由于晶体管的过载能力较差，使用中应特别注意避免过载。应注意以下内容：

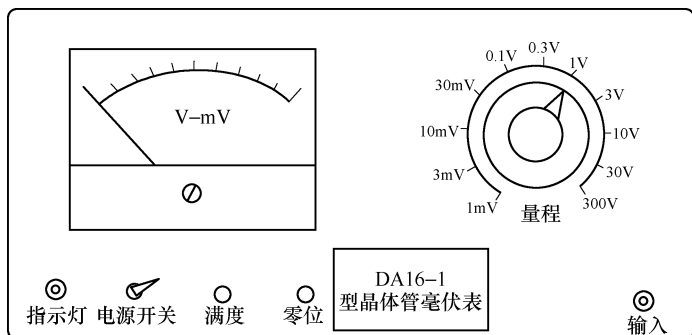


图 2-8 DA16-1 型晶体管毫伏表的面板

1) 接、断电方式。本仪器为晶体管式，一般不需要预热。由于灵敏度高，在测量接线时，应先接输入地线，后接入另一根输入线。测量结束后，应先断开非接地的那一根输入线，再断开接地的输入线，以免因感应电压使仪表过载。

2) 量程开关调节方式。测量毫伏级电压时，应该在输入端接好后，再把量程选择开关从 10V 以上挡级调到相应的毫伏级。测量完毕后，应先把量程调到 10V 以上挡级，再断开输入端连接导线。在低量程挡测量时，由于噪声的影响，仪器的指针可能会有轻微抖动，只要不影响读数，属正常现象。

2. 超高频晶体管毫伏表

DA-1 型超高频毫伏表是属于调制式工作程式的电压表。被测交流电压经检波变成直流，经过斩波器把直流变成交流，再进行交流放大，然后经过检波器变换成与输入成正比的直流信号推动微安表指针偏转。

(1) 主要技术指标

- 1) 测试交流电压范围：0.3mV ~ 3V，共分 8 挡。
- 2) 频率范围：10kHz ~ 1000MHz。
- 3) 输入阻抗： $R_i \geq 10k\Omega$ ， $C_i < 2.5pF$ 。
- 4) 仪器基本误差：1mV 挡 $\leq \pm 15\%$ ，3mV 挡 $\leq \pm 5\%$ ，其他各挡 $\leq \pm 3\%$ 。
- 5) 被测处直流电压：最大 40V。

(2) 使用说明

DA-1 型超高频毫伏表的面板布置示意，如图 2-9 所示。

使用时应注意根据不同的频率选择不同的接地方式，且被测处直流电压不得超过 40V。当使用 3V 挡测量电压或探针触到较高电压或手后，接着要测 3mV 以下的电压时，需等待 1 ~ 2min，以便仪器回零。

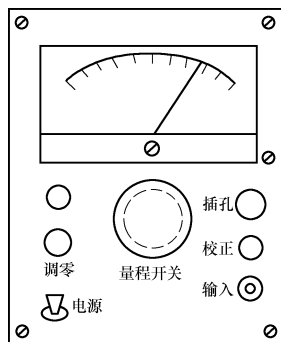


图 2-9 DA-1 型超高频毫伏表的面板图

知识四 示波器

示波器是一种综合性的电信号测试仪器。通过示波器可以观察各种电信号的波形，并从波形图上计算被测量波形的幅值（峰-峰值）、周期（频率），计算两个同频率波形的相位差

及脉冲宽度等。这里以 SR-8 型双踪示波器为例进行说明。

SR-8 型双踪示波器是一种晶体管示波器,它既能定性、定量地观测某一待测信号,又能将两个不同信号在屏幕上同时显示,以便对它们进行分析和对比。与一般通用示波器不同,SR-8 型双踪示波器的 Y 轴输入具有两个通道,受机内电子开关控制,共有 5 种不同的工作状态: Y_A 、 Y_B 、交替、断续和 $Y_A + Y_B$ 。

- 1) Y_A 工作状态: Y_B 通道被阻塞,仅 Y_A 通道单踪显示。
- 2) Y_B 工作状态: Y_A 通道被阻塞,仅 Y_B 通道单踪显示。
- 3) “交替”工作状态: 电子开关使 Y_A 、 Y_B 通道轮流工作,用于待测信号频率较高时的双踪显示。
- 4) “断续”工作状态: 电子开关以 200kHz 固定频率轮流接通 Y_A 、 Y_B 通道,可以实现较低频率信号的双踪显示。
- 5) “ $Y_A + Y_B$ ”工作状态: 两个信号均通过放大器,示波器显示出两个信号叠加后的波形。

1. 主要技术性能

(1) 垂直系统

- 1) 频带宽度: 交流时为 10Hz ~ 15MHz; 直流时为 0 ~ 15MHz。
- 2) Y 轴灵敏度: 10mV/div ~ 20V/div, 共分 11 挡; 还有灵敏度“微调”装置,灵敏度连续可调。
- 3) 输入阻抗: 直接输入 1M Ω /50pF; 经探头输入 10M Ω /50pF。
- 4) 最大允许输入电压: 400V (DC/AC_{P-P})。

(2) 水平系统

- 1) 频带宽度: 100Hz ~ 250kHz。
 - 2) X 轴灵敏度: $\leq 3V/div$ 。
 - 3) 输入阻抗: 1M Ω /40pF。
 - 4) 扫描时基: 0.2 $\mu s/div$ ~ 1s/div 分 21 挡。
- (3) 其他
- 1) 校准信号: 1V, 1000Hz 方波。
 - 2) 触发灵敏度: 内触发不大于 1div, 外触发不大于 0.5V。

2. SR-8 型双踪示波器旋钮及作用

SR-8 示波器面板布置如图 2-10 所示。

(1) 显示部分

- 1) “ $\odot$ ” (聚焦)、“ α ” (辉度)、“O” (辅助聚焦): 能分别调节光点的大小和亮度,适当调节旋钮,可获得清晰的波形。
- 2) “ $\otimes$ ” (标尺亮度): 调节坐标刻度线亮度。
- 3) “寻迹”: 按下键时,能使偏离荧光屏的光迹回到显示屏上,帮助寻迹。

(2) 垂直 (Y 轴) 系统。

- 1) 显示方式选择开关: 用以选择 Y_A 、 Y_B 、 $Y_A + Y_B$ 、交替和断续 5 种不同的工作状态。
- 2) “DC $\perp$ AC” 输入端耦合方式选择开关: 测量交流信号时置于“AC”位; 测直流或缓慢变化信号时置于“DC”位; 置于“ $\perp$ ”位时,输入端接地。可确定输入为零时,光迹

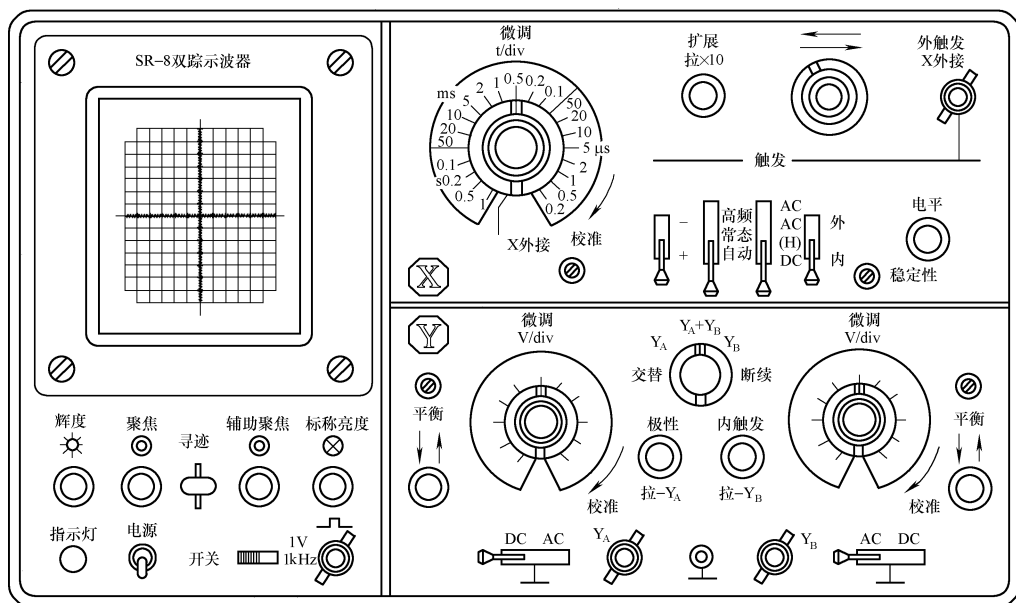


图 2-10 SR-8 双踪示波器面板

在屏幕上的基准位置。

3) “ $\uparrow \downarrow$ ” Y 轴移位旋钮：可使波形上下移动。

4) “V/div 微调”：灵敏度选择旋钮（黑色），从 10mV/div ~ 20V/div 分 11 挡。里层的微调（红色）旋钮为灵敏度细调，将它顺时针旋转到底，即为校准位置。

5) “平衡”：当 Y 轴放大器输入电路出现不平衡时，显示的光点或波形就会随“V/div”开关的“微调”旋转在 Y 轴方向发生位移，调节“平衡”电位器能将这种位移减至最小。

6) “极性”、“拉-Y_A”：Y_A 通道的极性转换拉式开关。在按的位置时，波形正常显示；在拉的位置 Y_A 作倒相显示。

7) “内触发”、“拉-Y_B”：触发源选择开关。在按的位置，触发信号分别取自 Y_A 和 Y_B 的输入信号，适合于单踪或双踪显示，但不能对双踪波形作时间比较。在拉的位置，触发信号只取自 Y_B 通道的输入信号，因而它适合于双踪显示时，对比两个被测信号的时间和相位差。

8) Y 轴输入插座：被测信号由此直接或经探头输入。

(3) 水平（X 轴）系统

1) “t/div 微调”：扫描速度选择旋钮（黑色）及其微调（红色），微调旋钮顺时针旋到底即为校准位置。

2) “扩展”、“拉 $\times 10$ ”：将被测信号的波形在 X 轴方向扩展 10 倍，一般用于测量重复率较高的信号。

3) “外触发”、“X 外接”插座：外触发信号和 X 轴外接信号公用的输入端。

4) “ $\rightleftarrows$ ”（移位旋钮）：可使波形左右移动。

(4) 触发系统

1) “内、外”：触发源选择开关。置于“内”时，可取自机内 Y 轴通道的被测信号；

置于“外”时，来自机外 X 轴外触发信号。

2) “+、-”：触发极性选择开关。可选择触发信号的上升沿或下降沿对扫描进行触发控制。

3) “AC、AC (H)、DC”：触发耦合方式开关。当信号为直流或极低频率时置 DC，信号为交流时置 AC，当信号频率较高时置 AC (H)。

4) “高频、常态、自动”：触发方式开关。一般置于常态，信号频率高时置高频位置，频率低时置自动位置。

5) “稳定性”：波形同步不稳时，可调节该旋钮使波形稳定（正常情况下一般不需要调节）。

6) “电平”：选择波形触发点的旋钮，可调节触发信号幅度使波形稳定。

3. 使用方法

1) 未加入信号前，检查并接通电源，稍等片刻后（示波管预热），调节辉度、聚焦、移位等旋钮于适中位置，调出清晰的扫描基线。若扫描基线偏离屏幕，可按“寻迹”旋钮帮助寻迹，并使基线回到屏幕中央。

2) Y 轴有两种输入，单踪时可选 Y_A 或 Y_B 通道；双踪显示时，将两信号分别从 Y_A 、 Y_B 端输入，并根据信号频率的高低选用合适的显示方式（交替或断续）。

3) 根据信号的性质、大小、频率范围，选择“DC、 $\perp$ 、AC”、“高频、常态、自动”、Y 轴灵敏度及 X 轴扫描速度等旋钮，配合调节“电平”旋钮，从而获得大小适用的稳定波形。

4. 案例分析

(1) 直流信号幅值（含交流成分）测量

首先将被测信号加到输入端，并将输入耦合开关置于地（GND）位置。于是示波器屏幕上将出现一条水平扫描线，此线可能处于任意位置，具体设置由所测电量极性决定。由于被测信号是正极性，所以可把 0 电平设置在图 2-11 所示位置。

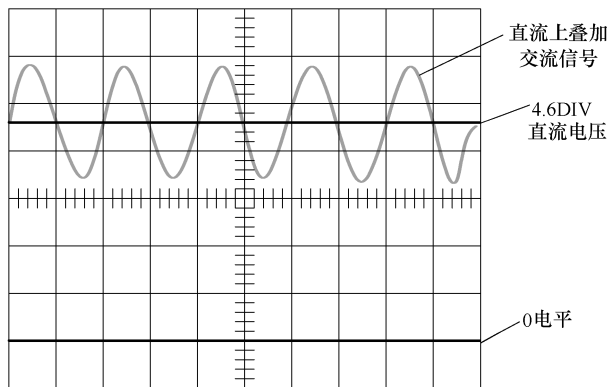


图 2-11 含交流分量的直流信号波形

上述设定完成后，将输入耦合开关置于直流（DC）位置。于是一个直流信号上叠加交流分量的波形出现在示波器屏幕上，含有交流分量的直流信号波形如图 2-11 所示。

从波形的直观位置可以看出直流电压幅度为 4.6div（格），若垂直灵敏度为 0.2V/div，探头衰减比为 1:1，则被测电压值为

$$V = \text{垂直距离 (div)} \times \text{垂直灵敏度值 (V/div)} \times \text{探头衰减比}$$

即

$$V = 4.6 \times 0.2 \times 1\text{V} = 0.92\text{V}$$

(2) 交流信号幅值测量

若只测量交流信号幅值,则将被测信号送入示波器输入端,使输入耦合开关置于交流(AC)位置。调整垂直灵敏度旋钮及扫描时间旋钮,使波形大小适当,交流信号幅值测量如图2-12所示。

由图2-12可知读数为2.4div,若此时垂直灵敏度为0.2V/div,探头衰减比为1:1,则测量电压值为: $2.4 \times 0.2 \times 1\text{V} = 0.48\text{V}$ 。

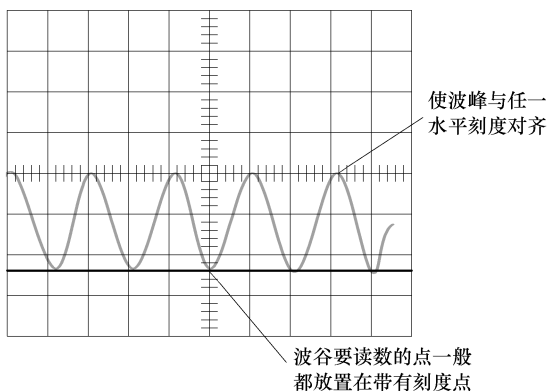


图2-12 交流信号幅值测量

(3) 周期或频率测量

由于频率和周期是倒数关系,所以频率都是换算成周期后,再通过示波器进行波形周期的测量。

计算公式是: 周期 = 水平距离 (div) $\times$ 时间轴挡 (ms/div)

由图2-13可见,信号波形的水平距离为3.2div,时间轴挡为1ms/div,则有

$$\text{周期 } T = 2.2 \times 1\text{ms} = 2.2\text{ms}$$

$$\text{频率 } f = 1/T = 1/2.2 \times 10^3\text{Hz} = 454.5\text{Hz}$$

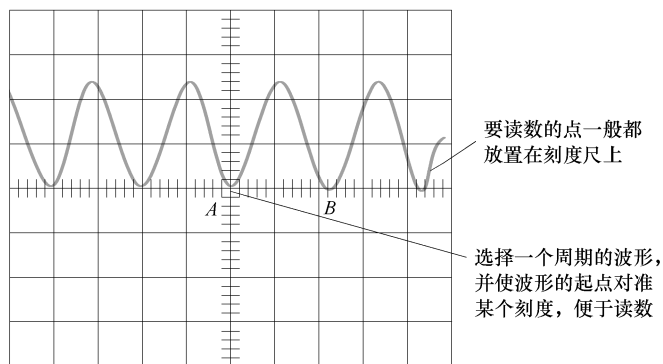


图2-13 信号周期测量

(4) 正弦信号相位差的测量

将两个信号分别从CH1和CH2通道送入示波器进行比较,并选择双踪显示波形。调整时间轴和水平位置,此时两信号起始点之间的水平距离为相位差,如图2-14所示。

周期 T 就是点A与点C之间的水平距离,为6div;点A与点B之间的水平距离为2div,所以相位差 φ 为: $\varphi = 2/6 \times 360^\circ = 120^\circ$ 。

(5) 叠加操作

将垂直方式 (VERT MODE) 设定在相加 (ADD) 状态,可在屏幕上观察到CH1和CH2信号的代数和。如果按下了CH2反相 (INV) 按键开关,则显示为CH1和CH2信号之差。

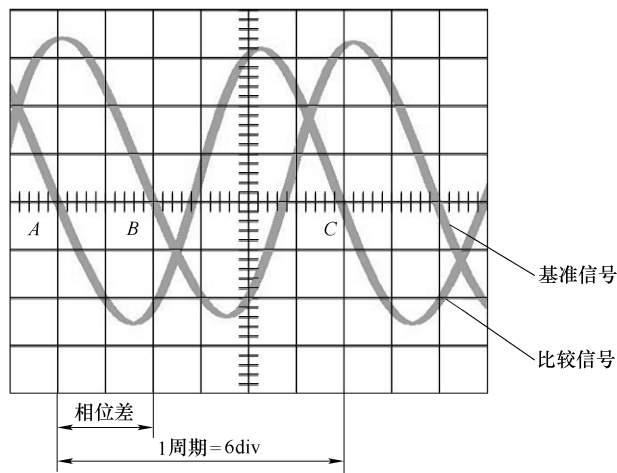


图 2-14 相位测量

知识五 晶体管特性图示仪

晶体管特性图示仪是目前使用极为广泛的一种图示仪，它能在示波管荧光屏上直接显示各种晶体管特性曲线，具有直观、读测方便等优点。这种仪器能测试 PNP 和 NPN 型晶体管的共发射极、共集电极和共基极的各种特性（输出特性、输入特性、转移特性、 β 参数特性）以及晶体管的各种极限参数等。这里介绍电路实验室常用的 JT-1 型晶体管特性图示仪。

1. 主要技术指标

(1) Y 轴偏转因数

- 1) 集电极电流范围：0.01 ~ 1000mA/度，分 16 挡，误差不大于 $\pm 3\%$ 。
- 2) 集电极电流倍率： $\times 2$ 、 $\times 1$ 、 $\times 0.1$ ，分 3 挡，误差不大于 $\pm 3\%$ 。
- 3) 基极电压范围：0.01 ~ 0.5V/度，分 6 挡，误差不大于 $\pm 3\%$ 。

(2) X 轴偏转因数

- 1) 集电极电压范围：0.01 ~ 20V/度，分 11 挡，误差不大于 $\pm 3\%$ 。
- 2) 基极电压范围：0.01 ~ 0.5V/度，分 6 挡，误差不大于 $\pm 3\%$ 。

(3) 基极阶梯信号。

- 1) 阶梯电流范围：0.001 ~ 200mA/级，分 17 挡，误差不大于 $\pm 5\%$ 。
- 2) 阶梯电压范围：0.01 ~ 0.2V/级，分 5 挡，误差不大于 $\pm 5\%$ 。
- 3) 串联电阻：1 Ω ~ 22k Ω ，分为 24 挡。
- 4) 每族级数：4 ~ 12 级连续可调。
- 5) 每秒级数：100 或 200 级，共 3 挡。
- 6) 阶梯作用：重复、关、单族，分为 3 挡。
- 7) 极性：正或负，分为 2 挡。

(4) 集电极扫描信号

- 1) 峰值电压：0 ~ 20V 正或负连续可调。
- 2) 电流容量：0 ~ 20V 范围内为 10A（平均值），0 ~ 200V 范围内为 1A（平均值）。

3) 功耗电阻: $0 \sim 100\text{k}\Omega$, 分为 17 挡, 误差不大于 $\pm 5\%$ 。

2. 面板各主要旋钮的作用

JT-1 型晶体管特性图示仪面板布置如图 2-15 所示。它由示波管及控制旋钮、Y 轴作用、X 轴作用、集电极扫描信号、基极阶梯信号和测试台等 6 个单元组成。各单元的作用如下:

- 1) 示波管及控制旋钮: 包括聚焦、辅助聚焦、辉度、标尺亮度(用于照明刻度)。
- 2) Y 轴作用: “毫安-伏/度”选择开关、移位、直流平衡、放大器校正等。
- 3) X 轴作用: “伏/度”开关、移位、直流平衡、放大器校正等。

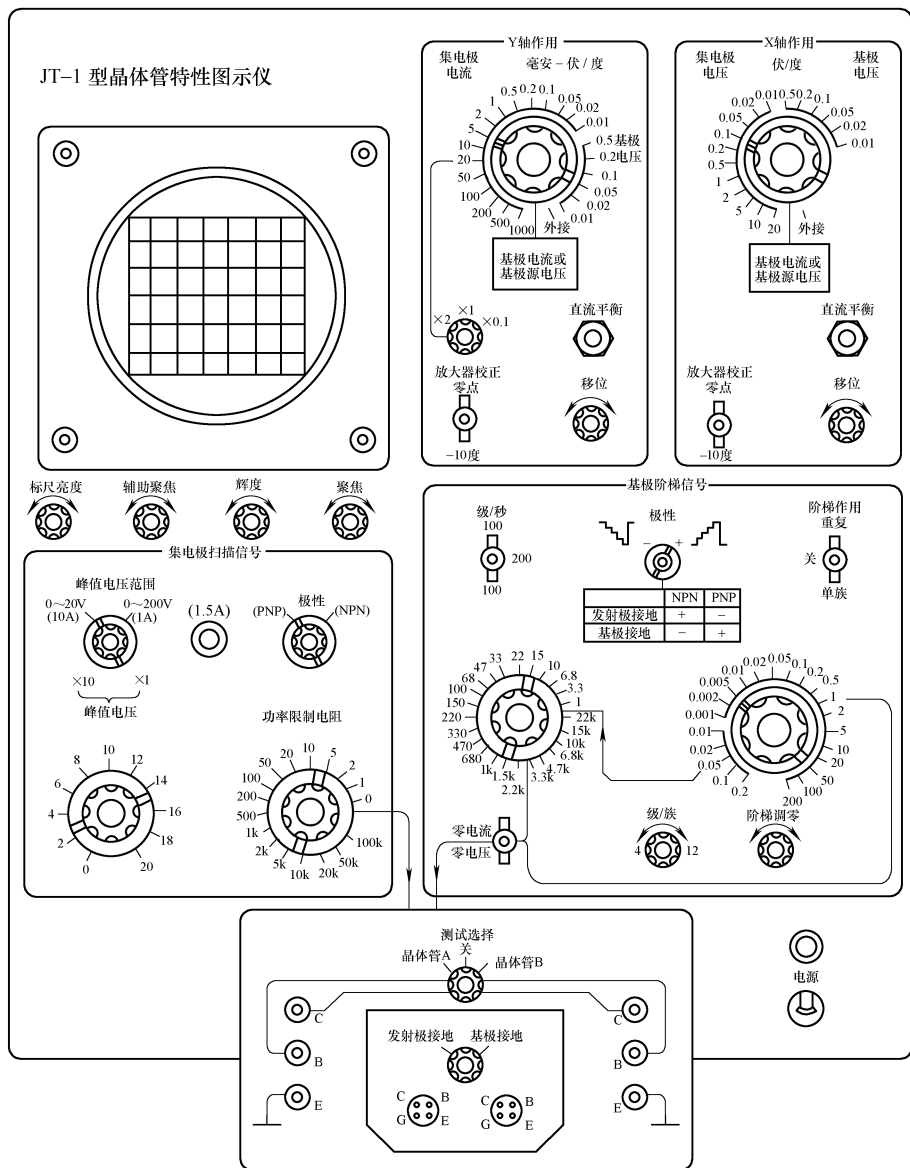


图 2-15 JT-1 型晶体管特性图示仪面板

4) 集电极扫描信号。

① “峰值电压范围”开关：用来选择集电极扫描信号电压的大小，分 0 ~ 20V (10A)、0 ~ 200V (1A) 两挡。

② “峰值电压”旋钮：与峰值电压范围开关配合使用，能在 0 ~ 20V 与 0 ~ 200V 连续调节。

③ “极性”开关：转换集电极电压的极性。当选用共发射极电路时，测 PNP 管用“-”，测 NPN 管用“+”

④ “功率限制”电阻开关：用来改变串接在被测管集电极电路的电阻，以控制集电极功耗。可根据测试管的额定功率和测量时所加的峰值电压来选择电阻值，也可作为被测管的集电极负载电阻。

5) 基极阶梯信号。

① “阶梯选择”开关：共 22 挡，其作用是选择需要输入被测管输入端的电流，提供基极阶梯电压、基极阶梯电流。

② “串联电阻”开关：当阶梯开关置于伏/级时，串联在被测管输入端的电阻。

③ “极性”开关：根据被测管的不同类型和接地方式，改变阶梯信号的正负极性，可按面板上表格中的规定进行。

④ “阶梯调零”旋钮：将阶梯信号起始电位调到零电位，以保证测试结果的准确性。

⑤ “零电流/零电压”按键开关：当按键开关置于中间位置时，阶梯信号加到被测管的基极；当置于“零电流”时，被测管的基极开路；当置于“零电压”时，被测管的基极与发射极短路。

⑥ “级/族”旋钮：4 ~ 12 级范围内，连续调节阶梯信号的级数。

⑦ “级/秒”开关：每秒钟显示的阶梯级数，用来改变阶梯信号的频率和相位，分上“100”、下“100”及“200”挡。在测试晶体管输入特性曲线时用“200”挡。

⑧ “阶梯作用”开关：分为 3 挡。

“重复”：阶梯信号重复地加到被测管的基极，可用来观察被测管的特性曲线。

“关”：阶梯信号停止输出，不显示特性曲线。

“单族”：开关每扳至“单族”一次，就输出一级阶梯信号，相应显示一条曲线。可利用这种瞬时作用，来观察被测管的各种极限特性。

6) 测试台：“测试选择”开关、晶体管插座、接地选择开关。

知识六 频率特性测试仪（扫频仪）

频率特性测试仪，俗称扫频仪。它是一种用示波器直接显示被测设备频率响应曲线的直观测试设备。其广泛地应用于调试宽带放大器，短波通信机和雷达接收机的中频放大器，电视差转机、电视接收机的图像和伴音通道，调频广播发射机和接收机高频放大器、中频放大器、鉴频器和滤波器等有源和无源网络。如测量高、中频放大器的增益，高频调谐器、或滤波器的幅频特性等。这里将介绍常见的 BT-3A 型频率特性测试仪。

1. 主要技术指标

1) 中心频率：1MHz ~ 300MHz 分 3 个波段（Ⅰ：1 ~ 75MHz；Ⅱ：75 ~ 150MHz；Ⅲ：

150 ~ 300MHz)。

2) 扫频频偏：最小频偏小于 $\pm 0.5\%$ ，最大频偏大于 $\pm 7.5\text{MHz}$ 。

3) 输出扫频信号电压：大于等于 0.1V (有效值)。

4) 频标信号：1MHz、10MHz 和外接 3 种。

5) 扫频信号输出阻抗：75 Ω 。

6) 扫频信号输出衰减：粗衰减 (0 ~ 60dB) 分 7 挡，细衰减 (0 ~ 10dB) 分 7 挡。

BT-3A 型扫频仪面板布置如图 2-16 所示。

2. 仪器的使用

(1) 仪器的检查

1) 调节好仪器的辉度和聚焦，使扫描基线足够亮和细。

2) 将“频标选择”开关扳向 1MHz 或 10MHz，此时扫描基线上呈现频标信号，调节“频标幅度”旋钮，可改变频标的幅度。

3) 将“频率偏移”旋钮旋到最大，荧光屏上呈现的频标数应满足 $\pm 7.5\text{MHz}$ 。

4) 将检波器探测器的探针插入仪器输出端，并接好地线。每一波段都在荧光屏上出现方框，将“频标选择”旋至 10MHz 处，转动中心频率旋钮，检查每一波段范围是否符合要求。

5) 在输出插孔上，插入匹配输出电缆，用高频毫伏表检查仪器的输出电压是否大于 100mV 。

(2) 测试频率特性

1) 检查仪器正常工作后，将输出电缆的一端接“扫频电压输出”插座，另一端接被测设备的输入端，根据被测设备选定某一工作频段，并适当调节频标增益。用检波探测器将被测设备的输出电压检波送至垂直输入，在荧光屏上可见到被测设备的频率特性曲线，频标叠加在曲线上。

2) 如果被测设备带有检波器，则不用检波探测器，而用输入电缆直接接入仪器的垂直输入端。

3) 当需要某些非 1MHz 的频标时，可以将“频标选择”置“外接”，从“外接”频标接线柱加入所需的频标信号。

4) 测试时，输出电缆和检波探测器的接地线应尽量短一些，检波探测器的探针上也不应再加接导线。

(3) 频标定值法

1) 将检波探测器与仪器的“扫描电压输出”插座用带 75Ω 负载的 75Ω 电缆连接好，屏幕上应出现方块。

2) 将“频标选择”开关旋向 10MHz、“波段”开关置“Ⅰ”、“中心频率”度盘在起始

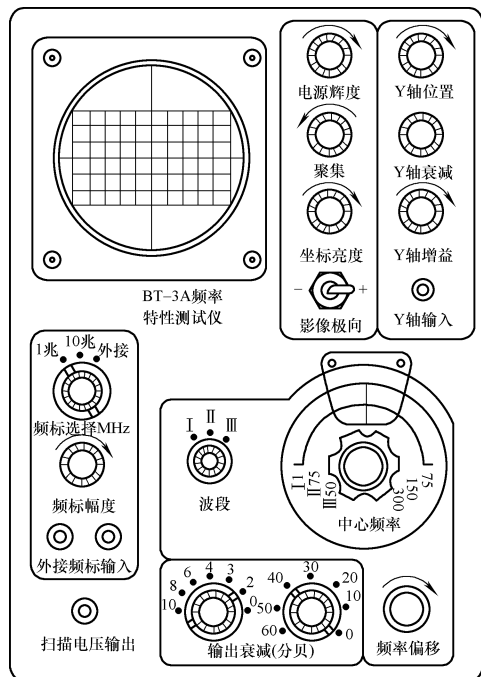


图 2-16 BT-3A 型扫频仪面板

位置附近时，屏幕中心线上应出现零拍，逆时针旋转“中心频率”度盘，通过屏幕中心线的频标数应多于7.5个。

3) “波段”开关置“Ⅱ”，“中心频率”度盘从起始位置逆时针旋转时，第一个经过屏幕中心频标应为70MHz，然后依此数记，第二波段最高中心频率应大于150MHz。

4) 欲得第三波段某一频率，只需在第二波段找出三波段所需频率的 $\frac{1}{2}$ 频率处，然后将“波段”开关旋转到“Ⅲ”即可。

(4) 放大器增益的测试

1) 把扫频仪输出电缆与检波探头短接。

2) 扫频仪“输出衰减”旋在“0”dB。

3) 调节“Y轴增益”，使荧光屏上显示的图形占纵坐标5（也可以是其他数目）。

4) 保持“Y轴增益”不变，把扫频仪的输出接至放大器的输入，输入接放大器的输出，这时荧光屏上将显示放大器的频率特性曲线。此时，再调节扫频仪的“输出衰减”，使荧光屏上显示的放大器曲线也占5格，这时“输出衰减”所指示的分贝数就是放大器的增益。

知识七 数据处理基础知识

一、测量误差

1. 真值 (A_0)

真值是指被测量本身具有的真实值，一般用 A_0 表示。然而在实际测量过程中，由于人们认识的局限性、测量手段的不完善和测量工具的不准确等因素的影响，真值一般是不可知的。在实际测量中，经常使用“约定真值”和“相对真值”的概念，即通常用标准计量器具所测得的数值代替真值。

2. 测量值 (A_x)

由测量器具测出的量值称为测量值，也称示值。

3. 仪器满刻度值 (A_M)

仪表指针满偏时的刻度值称为满刻度值，一般对应量程值。

4. 绝对误差 (Δ_x)

测量值与真值之间的差值称为绝对误差。绝对误差表示为

$$\Delta_x = A_x - A_0 \quad (2-1)$$

Δ_x 是具有大小、正负和单位的数值，它的大小和符号分别表示测量值偏离真值的程度和方向。

5. 修正值 (C)

修正值是指绝对值与绝对误差 Δ_x 相等，而符号相反的值，通常用 C 表示，即 $C = -\Delta_x$ 。

6. 相对误差 (Δ_r)

相对误差是绝对误差与平均值之比值，常用百分数表示。在实际使用时，相对误差有几

种不同的表示形式。

$$\text{实际相对误差:} \quad \Delta r_A = \frac{A_X - A_0}{A_0} \times 100\% \quad (2-2)$$

$$\text{示值相对误差:} \quad \Delta r_X = \frac{A_X - A_0}{A_X} \times 100\% \quad (2-3)$$

$$\text{满度相对误差:} \quad \Delta r_M = \frac{A_X - A_0}{A_M} \times 100\% \quad (2-4)$$

一般电工仪表的基本误差通常用 $\pm K\%$ 来表示准确度等级:

$$\pm K\% = \frac{(A_X - A_0)_{\max}}{A_M} \times 100\% \quad (2-5)$$

式中, K 称为仪表的准确度。

我国的仪表按其准确度等级, 共分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 等 7 个等级, 其中准确度等级和基本误差之间的关系见表 2-1。

表 2-1 准确度等级与基本误差之间的关系

准确度等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 (%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0
用途	通常选作标准表		多用于实验室			要求不高的工程测量	

二、测量误差处理

在实际测量过程中, 测量误差虽然是不可避免的, 但可以采用某些措施来减少误差。

1. 测量仪表

1) 对测量仪表要经常进行校正。采用标准式或准确度高于被校正仪表的仪表进行校正。此外, 仪表在使用前要作零点调整。例如, 仪表在未通电时, 指针应指在零点, 当偏离零点时, 可用机械调零装置进行调整。

2) 尽可能选择小量程进行测量。因为某个量程的最大绝对误差是一定的, 误差一般随着量程的增大而增大。当选用大量程进行测量时, 最大相对误差就会增大。

3) 要考虑仪表接入线路后, 仪表内阻对测量值的影响。例如测量电阻时就要考虑是内接还是外接。

4) 稳压源内阻的考虑。分析时, 可采用等效理想电压源与内阻串联。

5) 测量仪表放置方法要正确。要求水平放置的仪表, 如果垂直放置就会影响测量误差。此外, 还要考虑磁场的影响, 如有无高压变压器对测量仪表的干扰等。

2. 测量线路与测量方法

1) 选择合适的测量线路。例如, 用伏安法测量电阻, 就要根据测量电阻的阻值大小来选择内接或外接的测量线路, 这样可以提高测量准确度。

2) 采用特殊的测量方法。如替代法, 即用同一标准量代替被测量, 使仪表的读数保持不变, 而被测量的值就等于该标准量。这样的测量结果与仪表的误差及外界条件的干扰无关, 如采用电桥测量电阻。

此外, 多次测量可以减少偶然误差的影响, 所求平均值更接近准确结果。消除疏忽误差的根本办法是加强测量者的责任感, 要有认真负责、一丝不苟的工作精神。

三、数据处理与图形处理

测量数据通常采用数据和图形两种形式来表示。

1. 数据处理

测量数据通常由准确数字和欠准数字两部分组成。数据处理过程中应用无理数（如 π ）时，不可能取无穷位，所以通常得到的测量数据和测量结果均为近似数，其位数各不相同。为了使测量结果表示统一，计算简便，要进行舍入处理。

数据的舍入规则如下：

- 1) 小于 5，舍去。
- 2) 大于 5，进上去。
- 3) 等于 5，采用偶数法则，即末位是偶数，则末位不变；末位是奇数，则保留末位加 1。

例如，将下列数据舍入到小数点后第二位。

- ① 29.8212→29.82（舍去）
 - ② 23.5289→23.53（进 1）
 - ③ 18.2355→18.24（3 为奇数，进 1）
 - ④ 18.2455→18.24（4 为偶数，不变）
- 4) 舍入时要一步到位，不能逐位舍入，如
- 22.2948（保留小数点后第二位）→22.295→22.30（错误）
- 22.2948（保留小数点后第二位）→22.29（正确）

2. 有效数字的运算规则

所截取得到的近似数，其绝对误差的绝对值不超过近似数末位的半个单位，则该近似数从左边第一个非零数到最末一位数字为止的全部数字，称为有效数字。有效数字与数据的准确度密切相关。例如，数据 3.14 和 3.140，两者在数值大小上是相等的，但由于有效位数的不同，代表的测量准确度相差很大。

- 3.14（三位有效数字，绝对误差 ≤ 0.005 ）
- 3.140（四位有效数字，绝对误差 ≤ 0.0005 ）

3. 图形处理

在分析两个或多个变量之间的关系时，用曲线表示比用数字表示更加形象直观。曲线绘制的方法如下：

1) 坐标系和图样的选择首先应根据被测量选择合适的坐标系。常用的坐标系有：直角坐标、半对数坐标、全对数坐标和极坐标等。然后根据所选坐标系确定图样和比例尺。

2) 测量数据图解法的分析测量的目的往往不只是单纯地获得某个量值，而是找出某两个量 x 和 y （或更多个量）之间的函数关系，例如测量元器件的伏安特性曲线。

对于这种要求确定函数关系的测量，一般都需要根据测量数据来绘制实验曲线，称为测量数据图解法，并对该曲线进行定量分析。

3) 绘制实验曲线的具体方法。

- ① 整理实验数据，并将数据列表。
- ② 选择合适的 x 轴测试点，应使各数据点大体上沿曲线均匀分布。对于分布不均的数

据,可通过变换方法解决。在曲线出现数据拐点之处,应增加 x 轴的测量点,以便更确切地显示曲线的变化细节。

通常在测试数据之前,要进行预测,如二极管伏安特性测试,以便掌握实验数据的详细分布和数据拐点,做到心中有数。

③ 在适当的坐标系上标出数据点。当把多种数据绘制在同一图上进行比较时,最好采用不同的标记表示。

④ 纵、横坐标比例尺不必相同,也不一定从坐标原点(零值点)开始。坐标比例尺的选择,应以便于读数和分析为原则。

⑤ 注意曲线的关键部分。在极值附近,应尽可能测出真正的极值。为此,测点需更细密,否则可能得不到正确的结果。在作最大功率传输的实验中,假定虚线是正确的曲线,如图 2-17 所示。由于选择的测试点间隔较大(A、C 两点),则描绘出来的曲线就是实线部分,曲线的最高点变成了 A 点,这就影响了测量准确度,所以应该在 AC 之间多取几个测量点。

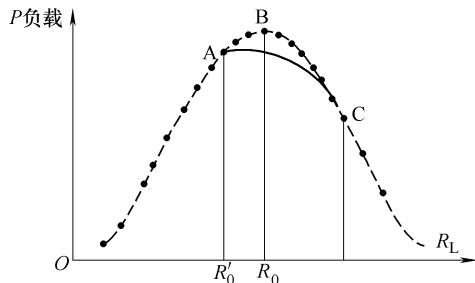


图 2-17 最大功率传输曲线

⑥ 画出拟合曲线。测量数据是一些离散点,一般不应把各数据点直接连成一条波动的折线,也不应画出一条弯曲甚多的曲线,而应该运用有关的误差理论,画出一条尽可能靠近各数据点而又比较平滑的拟合曲线。

任务与实施

1. 任务

常用仪器的使用与测量。

2. 实验原理与说明

1) 低频信号发生器为电路提供频率和幅度的正弦输入信号,信号频率为 20Hz ~ 1MHz,幅度为 1mV ~ 5V。

2) 示波器用来观察电路中各点的波形,以监视电路是否正常工作,同时还用于测量波形的周期、幅度及电路的特性曲线。

3) 交流毫伏表用于测量电路中的正弦信号的有效值,其电压的测量范围为 1mV ~ 300V,频率范围在 20Hz ~ 1MHz。

3. 实验仪器与设备

1) 低频信号发生器 1 台。

2) 示波器 1 台。

3) 交流毫伏表 1 台。

4. 实验内容与步骤

(1) 示波器校准

1) 接通示波器的电源开关,调节“辉度”、“聚焦”、“辅助聚焦”、“标尺亮度”及 X 轴、Y 轴移位旋钮,使扫描时基线处于屏幕中心位置。

2) 显示方式选择开关置于“ Y_A ”，Y 轴输入选择开关置于“AC”，触发源选择置于“内”，触发耦合开关置于“AC”，触发方式置于“自动”。

3) 将“微调 t/div ”旋钮置于“0.2ms”， Y_A 通道的“微调 V/div ”旋钮置于“0.2V”，示波器探头接在校准信号的输出端和 Y_A 通道的输入端之间。

4) 调整“微调 t/div ”旋钮里层的微调（红色）旋钮，使显示的方波在水平方向恰好占 5 格，完成频率校准。

5) 调整 Y_A 通道的“微调 V/div ”旋钮里层的微调（红色）旋钮，使显示的方波在垂直方向恰好占 5 格，完成幅度校准。

(2) 用示波器和交流毫伏表测量信号参数

1) 调整低频信号发生器有关旋钮，使其输出频率分别为 100Hz、1kHz、10kHz、100kHz，有效值分别为 1V、100mV、10mV、1mV 的正弦波。

2) 改变示波器的“微调 t/div ”和“微调 V/div ”旋钮，测量信号源的输出电压频率及峰峰值，填写表 2-2 中。

3) 改变交流毫伏表的量程，测量信号源的输出电压有效值，填写表 2-2。

表 2-2 示波器和毫伏表测量

信号电压频率	示波器测量值		信号电压 毫伏表读数/V	示波器测量值	
	周期/ms	频率/Hz		峰峰值/mV	有效值/mV
100Hz					
1kHz					
10kHz					
100kHz					

5. 注意事项

- 1) 注意各仪器的连接方法及接地问题。
- 2) 在使用交流毫伏表时，应先将输入端短路，调节“调零”旋钮使指针指示为零，再开始测试。
- 3) 转动仪器面板各旋钮时，用力要适当，不可用力过猛，以免造成机械损坏。

思 考 题

- 1. 为了保证电路测量的安全和准确，如何正确地选择、使用电子测量仪器仪表？
- 2. 用低频信号发生器输出幅度为 4V、频率为 674Hz 的电压信号，应如何进行幅度和频率的调节？
- 3. YB1635 型函数信号发生器可以输出什么波形？
- 4. 调节直流稳压电源使其输 8V、10V、15V 电压，并用万用表测试。
- 5. 普通万用表常用于测量什么？数字万用表是否有更多的测试功能？
- 6. 比较万用表和毫伏表的电压、电流测量挡次和测量范围。
- 7. 熟悉双踪示波器作用，通过实验学习用示波器观察信号波形，测量波形的幅值（峰-峰值），周期（频率）和两个同频率波形的相位差及脉冲宽度等。
- 8. 晶体管特性图示仪能测试 PNP 和 NPN 型晶体管的共发射极、共集电极和共基极的什么特性和参数？
- 9. 直接显示被测设备频率响应曲线的直观测试设备是什么？它被广泛地应用于哪些情况？

项目三 正弦波振荡电路

项目导读

所谓振荡器就是不需要外部电路输入信号，自身能够产生某种信号的电路。正弦波振荡器是众多振荡器电路中常见的一种，是靠电路自身结构特点产生一定频率和幅度的正弦输出信号的电路。

本项目详细而系统地介绍了正弦波振荡器电路基础、自动电平控制电路、RC 正弦波振荡器电路、变压器耦合正弦波振荡器电路、电感三点式正弦波振荡器电路、电容三点式正弦波振荡器电路、差动式正弦波振荡器电路、双管推挽式振荡器电路等结构和工作原理。

通过对振荡电路的分析，使学生掌握直流电路、放大电路、正反馈电路和选频电路的分析法，了解振荡器的起振过程和稳幅机理，熟悉各种振荡电路的特性。

【知识要求】

- 熟悉 RC 正弦波振荡器电路结构和工作原理
- 熟悉变压器耦合正弦波振荡器电路结构和工作原理
- 熟悉电感三点式正弦波振荡器电路结构和工作原理
- 熟悉电容三点式正弦波振荡器电路结构和工作原理
- 理解差动式正弦波振荡器电路结构和工作原理
- 理解双管推挽式振荡器电路结构和工作原理
- 了解振荡电路的平衡条件、起振条件和稳定条件

【能力要求】

- 熟悉 RC 正弦波振荡器电路的调试方法
- 熟悉变压器耦合正弦波振荡器电路的调试方法
- 熟悉电感三点式正弦波振荡器电路的调试方法
- 熟悉电容三点式正弦波振荡器电路的调试方法
- 观察 RC 参数对振荡频率的影响，学习振荡频率的测量方法
- 观察、比较各种振荡电路的性能、特点

相关知识

知识一 正弦波振荡器电路基础

正弦波振荡电路是一种基本的模拟电子电路。电子技术实验中经常使用的低频信号发生器就是一种正弦波振荡电路。大功率的振荡电路还可以直接为工业生产提供能源,例如高频加热炉的高频电源。此外,诸如超声波探伤、无线电和广播电视信号的发送和接收等都离不开正弦波振荡电路。总之,正弦波振荡电路在测量、自动控制、通信和热处理等各种技术领域中,都有着广泛的应用。

一、正弦波振荡器电路组成及各单元电路的作用

1. 正弦波振荡器电路组成

从结构上看,正弦波振荡器就是一个没有输入信号的带有选频电路的正反馈放大器。它也是一种能量转换器,无需外加信号就能自动地把直流电转换成具有一定频率、一定波形和一定幅度的交流电。正弦波振荡器电路一般包括放大电路、反馈电路、选频电路和稳幅环节。其基本结构如图 3-1 所示。

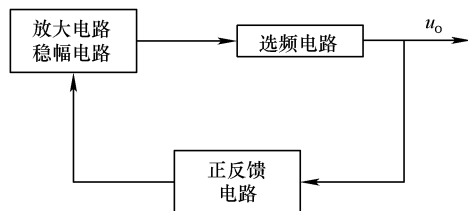


图 3-1 正弦波振荡器电路基本结构

2. 各单元电路作用

(1) 放大电路

它具有一定的电压放大倍数,可对选择出来的某一频率的信号进行放大。电路可根据需要采用单级放大电路或多级放大电路。

(2) 反馈电路

它是将输出信号反馈到输入端,引入自激振荡所需的正反馈,一般反馈电路由线性元件 R 、 L 和 C 按需要组成。

(3) 选频电路

它是选出指定频率的信号,以便正弦波振荡电路实现单一频率振荡。正弦波振荡器必须具有选频电路,否则在很宽的频率范围内都能振荡,产生的将是多谐波而不是单一频率的正弦波。选频电路分为 RC 选频电路(由电阻和电容组成)和 LC 选频电路(由电感和电容组成)。使用 RC 选频电路的正弦波振荡电路称为 RC 振荡电路,多用来产生低频正弦信号。使用 LC 选频电路的正弦波振荡电路称为 LC 振荡电路,多用来产生高频正弦信号。

选频电路可以设置在放大电路中,也可以设置在反馈电路中。在一般常见电路中,选频电路和正反馈电路由同一电路组成。

(4) 稳幅电路

稳幅电路具有稳定输出信号幅值的作用,可确保电路达到稳幅振荡,输出等幅信号。有源器件常兼有限幅的作用,在振荡电路中利用有源器件本身的非线性达到稳幅的目的,称为

内稳幅；而在有些振荡电路中需加入专门稳幅电路，称为外稳幅。在分立元器件构成的正弦波振荡电路中，一般不需要稳幅电路。

二、振荡器电路工作条件和种类

1. 振荡器电路工作条件

要使正弦波振荡器电路能够正常工作，必须具备以下条件：

(1) 放大条件

振荡器电路中的振荡管对振荡信号要有放大能力，只有这样才能通过正反馈和放大电路，使信号不断增大，实现电路振荡。

(2) 相位条件

相位条件具体地讲是要求具有正反馈电路。由于是正反馈，从振荡器输出端反馈到振荡器输入端的信号加强了原输入信号，即反馈信号与原输入信号是同相位的关系，这样反馈信号进一步加强了振荡器原先的输入信号。同时，在振荡器电路中，还要根据电路设计需要振荡稳幅和选频电路。

相位条件和放大条件（也称幅度条件）是振荡器电路中必不可少的两个最基本的条件。

(3) 振荡电路和选频电路。

2. 正弦波振荡器种类

正弦波振荡器种类很多，几种常用的正弦波振荡器电路。

- 1) RC 移相式正弦波振荡器。
- 2) RC 选频正弦波振荡器。
- 3) 变压器耦合正弦波振荡器。
- 4) 电感三点式正弦波振荡器。
- 5) 电容三点式正弦波振荡器。
- 6) 差动式正弦波振荡器。

三、正弦波振荡器电路分析方法

正弦波振荡器电路的分析步骤和方法

1. 直流电路分析

正弦波振荡器直流电路分析法与放大器直流电路分析方法相同，振荡管的放大能力是由直流电路来保证的。

2. 正反馈过程分析

正反馈过程分析与负反馈电路相同，只是反馈的结果应该是加强了振荡管的净输入信号。

3. 选频电路分析

首先分析 LC 并联谐振电路作为选频电路的分析方法，至于采用 RC 选频电路分析方法在后面具体电路中介绍。

- 1) 找出谐振线圈 L ，通过电路图中 L 的符号可以比较容易的找出。
- 2) 找出谐振电容，此时凡是与 L 并联的电容均参与了谐振。

注意：查找谐振电容应该是在找出 L 之后进行，因为在电路中，通常电感 L 比较少，容易找出，电容在电路中比较多，不容易找出。

3) 对于选频电路中的电容或电感若是可变的，都将改变振荡器的振荡频率，这说明这一振荡电路的振荡频率可以调整。

4. 找出振荡器电路输出端

振荡器电路的输出端与其他电路是相连的，输出信号可以取自振荡管的各个电极，可以通过变压器耦合，也可以通过电容器耦合。

5. 运用稳幅原理

电路的稳幅原理是在正反馈和振荡管放大的作用下，使信号幅度增大，振荡管的基极电流也增大，当基极电流大到一定程度之后，基极电流的增大将引起振荡管的电流放大倍数 β 减小，振荡信号电流越大 β 越小，最终导致 β 很小，使振荡器输出信号幅度减小，即振荡管基极电流减小， β 又增大，因振荡管具备放大能力，使振荡信号再次增大，这样反复循环总有一点是动平衡的。此时振荡信号的幅度处于不变状态，达到稳幅的目的。

6. 运用起振原理

起振原理是：当开始振荡时的振荡信号产生过程是在振荡器电路的电源接通瞬间，由于电源电流的波动，这一电流波动中含有频率幅度范围很宽的噪声，这其中必有一个频率等于振荡频率的噪声（信号），这一信号被振荡器电路放大和正反馈，信号幅度越来越大，逐渐形成振荡信号，完成了振荡器的起振过程。

知识二 自动电平控制电路

自动电平控制（Automatic Level Control, ALC）电路是针对由于元器件本身变化、环境引起工作点变化等，在电路中加入的稳定电平的电路。在一定范围内，ALC 电路可自动纠正偏移的电平回到要求的数值。

ALC 电路按照电路组成可分为

- 1) 分立式元器件 ALC 电路，此时 ALC 电路全部由分立元器件构成。
- 2) 分立式元器件和集成电路混合型电路，此时 ALC 电路中的控制电路部分设在集成电路内部，一般设在前置放大器集成电路中。ALC 电路中的整流电路部分由分立元器件构成。
- 3) 集成电路 ALC 电路，此时 ALC 电路中的绝大部分电路设在集成电路内部，通常设在前置放大器集成电路中。

一、ALC 电路基础

在实际应用中，通过使用继电器可达到 ALC 控制的目的，因为继电器在不同情况下可实现通断和电平变化。例如，在监控电路中要求具备报警功能，在系统发出报警时，继电器变化输出电平，保护电路，但不是完全断电的操作，当恢复工作时，通过自动电平控制，恢复工作时电平。再如对录音信号电平进行自动控制，以保证录音大信号出现时不发生磁带的饱和和失真。基本的 ALC 电路如图 3-2 所示。

ALC 电路主要由整流电路、滤波和延迟电路、控制电路 3 个部分组成。输入信号 u_i 进

入录音放大器中,放大后的录音输出信号 u_o 分为两路,一路送到录放磁头,另一路经 C_2 耦合到 ALC 电路。

1. 整流电路

电路中的二极管 VD_1 构成整流电路,将录音信号转换成单向脉动性直流电。加到 VD_1 正极的信号在正半周使 VD_1 导通,在负半周使 VD_1 截止。 VD_1 导通后的电流对 C_1 充电, C_1 起平滑作用,在 A 点取得 ALC 直流控制电压,这一电压与录音信号大小成正比。

2. 控制过程

电路中 A 点的直流控制电压经 R_1 加到 VT_1 基极,这时 VT_1 导通,使 VT_1 集电极与发射极之间的内阻减小,构成对输入信号 u_i 的分流回路,使净输入录音放大器的录音信号减小。这是 ALC 电路的基本工作原理。

当输入的录音信号 u_i 较小时,电路中 A 点的直流控制电压较小,不足以使 VT_1 导通,此时 VT_1 无分流作用,无 ALC 作用。

当输入的录音信号 u_i 大到一定程度时,电路中 A 点的直流控制电压已能够使 VT_1 开始导通,此时开始具有 ALC 作用。

随着输入的录音信号 u_i 继续加大时, A 点的直流控制电压也在加大,且录音信号越大, A 点的直流控制电压越大, VT_1 导通越深,其集电极与发射极之间的内阻越小,对 u_i 信号的分流量越大,控制越强。

3. ALC 延迟

电路中加了的电容 C_1 和电阻 R_1 起滤波和延迟作用,以获得适当的 ALC 电路起控制时间和恢复时间。当录音大信号出现时,由于电容 C_1 两端的电压不能突变,即 A 点的直流控制电压是逐渐上升的,使得 ALC 作用有一个延迟过程。在大信号过去后, C_1 中的电荷通过 R_1 、 VT_1 发射结回路放电,使 ALC 作用消失有个延迟过程,这样可避免录音信号的大小发生突然起伏变化,同时有利于改善录音噪声等特性。

二、集成 ALC 电路

集成电路 TA7669BP 内部电路中的 ALC 电路如图 3-3 所示。TA7668BP 为双声道录音放大器电路。在 TA7668BP 内部电路中设有一个双声道的 ALC 电路。电路中的 $VT_1 \sim VT_6$ 构成 ALC 电路。 VT_7 是⑦脚上输入信号 u_i 的前置放大管,只画出了一个声道控制电路,另一声道控制电路与此对称。

1. 放大和整流电路

集成电路⑤、⑩脚是 TA7668BP 内部电路中两个声道前置放大器的输出引脚,来自⑤、⑩脚的左、右声道录音信号分别经 R_1 、 R_2 加到 VT_1 和 VT_2 基极。由于 VT_1 和 VT_2 无偏置,所以只能在较大录音信号正半周出现时才能使 VT_1 和 VT_2 获得正向偏置后导通、放大,从而将左、右声道录音信号混合,并取出它们的平均信号大小,同时将音频信号转换成单向脉冲性直流控制电压从其集电极输出。 VT_1 和 VT_2 导通后其集电极电压下降,且录音信号越大

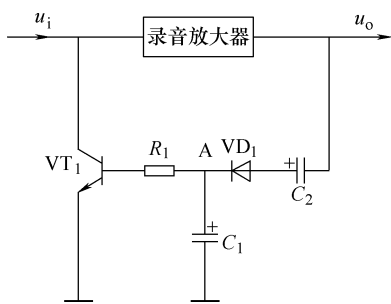


图 3-2 基本的 ALC 电路

其集电极电压越低。

2. ALC 过程

VT_1 和 VT_2 集电极电压下降, 经 R_4 加到 VT_3 基极, VT_3 获得正向偏置而导通, VT_3 集电极输出电流经 R_5 加到 VT_5 基极。 VT_3 集电极输出电流一方面通过⑧脚外接的 C_{417} 进行平滑 (此时录放开关 S3-4 在图示录音位置)。另一方面使 VT_5 导通, 导通后的 VT_5 发射极电流经 R_6 加到 VT_6 基极, 使 VT_6 导通。 VT_6 导通后, 其集电极、发射极之间的内阻下降, 对⑦脚上输入信号 u_i 进行分流衰减。当⑤、⑩脚上录音信号越大时, VT_1 、 VT_2 、 VT_3 、 VT_5 和 VT_6 各管导通程度越深, VT_6 内阻越小, 对⑦脚输入信号分流衰减量越大, 实现 ALC。

3. ALC 电路工作状态的的控制

集成电路 TA7668BP 的⑧脚用来控制内部电路中 ALC 电路工作状态。

录音时, 录放开关 S3-4 在录音位置上, 将 C_{417} 和 R_{107} 接入电路, 起平滑作用。

放音时, 录放开关 S3-4 置于放音 (P) 位置, S3-4 将⑧脚直接接地, 使 VT_5 基极电压为 0V, 这样 VT_5 、 VT_6 处于截止状态, 无 ALC 作用, 因为放音时不需要 ALC 电路工作。

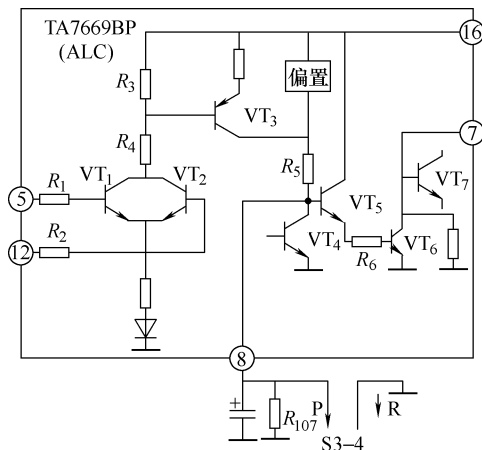


图 3-3 TA7669BP 内部 ALC 电路

知识三 RC 正弦波振荡器电路

RC 正弦波振荡器是利用 RC 移相电路原理构成的正弦波振荡器, 在介绍 RC 正弦波振荡器电路前首先要掌握 RC 移相电路的工作原理。

一、RC 移相电路

RC 电路可以用来对输入信号的相位进行移相, 即改变输出信号与输入信号之间的相位差。根据电容元件的位置不同有 RC 滞后移相电路和 RC 超前移相电路两种。

在介绍 RC 移相电路工作原理之前, 先要对电阻器、电容器上的电流相位和电压降相位之间的关系进行说明。

1. 电流与电压之间相位关系

(1) 电阻器上电流与电压之间的相位关系

电压和电流之间的相位是指电压变化时所引起的电流变化的情况。

当电压在增大时, 电流也在同时增大, 并始终同步变化, 这说明电压和电流之间是同相位的, 即相位差为 0。

当电压增大时, 电流减小, 这说明它们之间是不同相的。电压与电流之间的相位差可以在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内变化。不同的元器件上的电流与电压的相位差是不同的。

(2) 电容器上电流与电压之间的相位关系

电容器上的电流和电压相位相差是电流超前电压 90° , 如图 3-4 所示。当电容器在外加

电压的作用下,对电容进行充电,其电流为 i_C 。注意:只有对电容器充电之后,电容器内部有了电荷,电容器两端才有电压 u_C ,所以流过电容器的电流是超前电压的。

2. RC 滞后移相电路

图 3-5 所示是 RC 滞后移相电路。电路中的 u_i 是输入信号电压, u_o 是经这一移相电路后的输出信号电压, i 是流过电阻 R_1 和电容 C_1 的电流。

为了方便分析 RC 滞后移相电路的工作原理,用画图分析的方法。具体画图步骤如下。

(1) 画出流过电阻和电容的电流矢量 i

如图 3-6a 所示,流过电阻和电容的电流矢量 i ,它是一条水平线,其长短表示电流的大小。

(2) 画出电阻上的电压矢量

如图 3-6b 所示,由于电阻上的电压降 u_R 与电流 i 是同相位的,所以 u_R 也是一条水平线(与 i 矢量线之间无夹角,表示同相位)。

(3) 画出电容上的电压矢量

如图 3-6c 所示,由于电容两端电压滞后于流过电容的电流 90° ,所以将电容两端的电压 u_C 画成与电流 i 垂直的线,且朝下(以 i 为基准,顺时针方向为相位滞后),该线的长短表示电容上电压的大小。

(4) 画出平行四边形

从 RC 滞后移相电路中可以看出,输入信号电压 $u_i = u_R + u_C$ (这是矢量相加),先画出平行四边形,再画出输入信号电压 u_i ,如图 3-6d 所示。

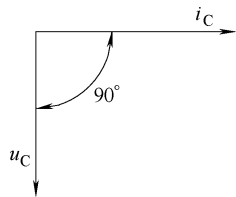


图 3-4 电流与电压的相位关系

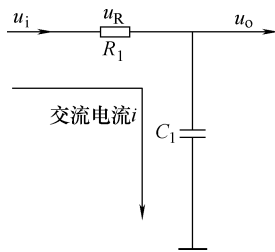


图 3-5 RC 滞后移相电路

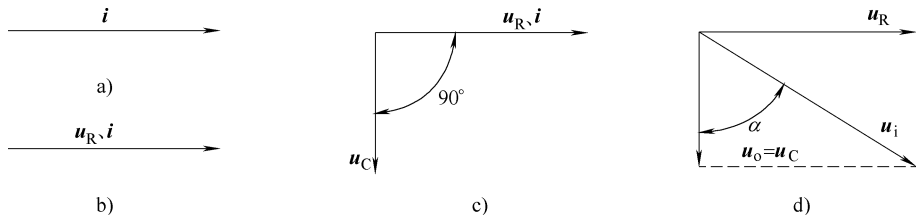


图 3-6 矢量图作图步骤

3. RC 超前移相电路

图 3-7 所示是 RC 超前移相电路,这一电路与 RC 滞后移相电路相比,只是电路中电阻和电容的位置变换了,输出电压取自于电阻 R_1 。

根据上面介绍的矢量图画图步骤,画出矢量图后很容易看出,输出信号电压 u_o 超前于输入电压 u_i 一个角度,如图 3-8 所示。

具体的画图步骤是:①画出电流 i ;②画出电阻上电压降 u_R ;③画出电容上电压降 u_C ,并画出平行四边形;④画出输入电压 u_i 。

注意:RC 超前移相电路的最大相移量小于 90° 。改变电路中的电阻或电容的大小,可以改变相移量。

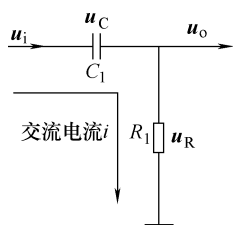


图 3-7 RC 超前移相电路

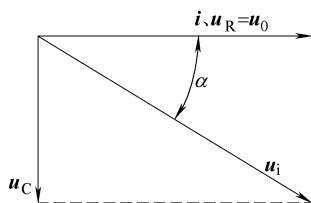


图 3-8 RC 超前移相电路矢量图

二、RC 移相正弦波振荡器电路

RC 移相正弦波振荡器电路如图 3-9 所示。电路中 VT_1 接成共发射极放大器电路， u_o 为振荡器的正弦输出信号。

1. 直流电路

电路中的电阻 R_3 和 R_4 构成 VT_1 的分压式偏置电路， R_5 是 VT_1 的集电极负载电阻， R_6 是 VT_1 的发射极电阻， VT_1 具备处于放大状态的直流电路工作条件。 VT_1 工作在放大状态下，这是一个振荡器所必需的。

2. 正反馈电路

无论是什么类型的振荡器，必须存在正反馈环节。这个振荡器电路的正反馈过程是：共发射极放大器电路具有反相的作用，即输出信号电压与输入信号电压之间相位差为 180° ，如若对放大器的输出信号再移相 180° 后加到放大器的输入端，那么就移相了 360° ，这样反馈回来的信号与输入信号之间是同相的关系。

电路中的电容 C_1 和电阻 R_1 构成第一个 RC 超前移相电路， C_2 和 R_2 构成第二个 RC 移相电路， C_3 和放大器输入电阻（由于 R_3 、 R_4 和 VT_1 的输入电阻并联）构成第三个 RC 移相电路。

这 3 个 RC 移相电路对信号移相 180° ，再加上 VT_1 共发射极放大器电路本身的 180° 移相，使 VT_1 集电极经 3 个 RC 移相电路后加到 VT_1 基极上的信号相位与基极上原信号相位相同，所以这是正反馈过程，满足相位正反馈条件。

3. 振荡过程

图 3-10 所示为振荡信号相位示意图，设振荡信号相位在 VT_1 基极为正，经 VT_1 倒相放大（ VT_1 接成共发射极放大器，其集电极信号电压相位与基极信号电压相位相反），这一振荡信号加入 3 个 RC 移相电路，对信号再移相 180° ，使反馈信号电压相位与 VT_1 基极上输入信号电压相位之间同相，符合振荡的相位条件。

4. 电路特点

1) 电路中只采用一级共发射极放大器，对信号已经产生了 180° 的相移，这是由共发射极放大器特性决定的。

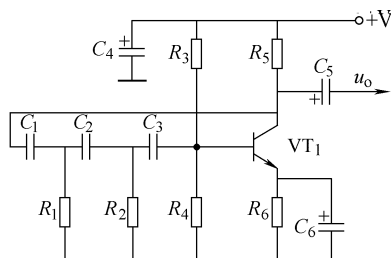


图 3-9 RC 移相式正弦波振荡器电路

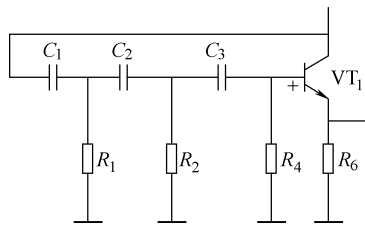


图 3-10 振荡信号相位示意图

2) 这种振荡器中,用了3个RC超前移相电路,第一个先对频率 f_0 的信号移相,第二个是在第一个已经移相的基础上再移相,第三个也是这样,3个累计移相恰好为 180° 。3个RC移相电路只是对频率为 f_0 的信号才发生振荡。RC移相式的振荡频率一般低于200kHz。

3) 这种振荡器的电路结构比较简单、成本低,缺点是选择性较差,输出信号也不稳定,振荡频率不易调整。

三、RC 选频正弦波振荡器电路

RC电路也可以构成选频电路,图3-11是采用RC选频电路的正弦波振荡器电路,这是一个由两只晶体管构成的振荡器电路,VT₁和VT₂构成两级共发射极放大器电路, R_2 、 C_1 、 R_1 和 C_2 构成RC选频电路。

1. RC 选频电路选频原理

RC选频电路由 R_2 和 C_1 串联电路、 R_1 和 C_2 并联电路组成。

(1) 输入信号频率很低时的电路分析

图3-12a所示是一个RC选频电路。 R_2 和 C_1 串联, R_1 和 C_2 为并联,它们构成分压电路、 u_i 为输入信号, u_o 为这一分压电路的输出信号。其等效电路如图3-12b所示。

注意:在这分压电路中,当输入信号频率从很低升高时,输出信号 u_o 在增大,如图3-12c所示。

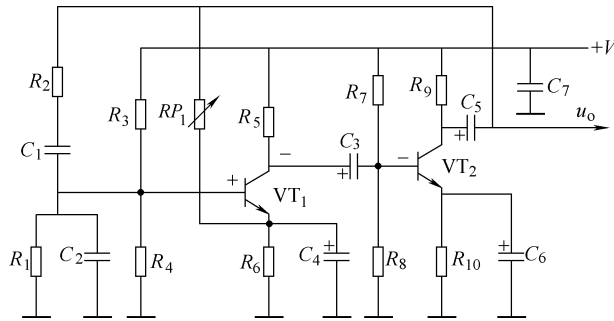


图 3-11 RC 选频电路的正弦波振荡器电路

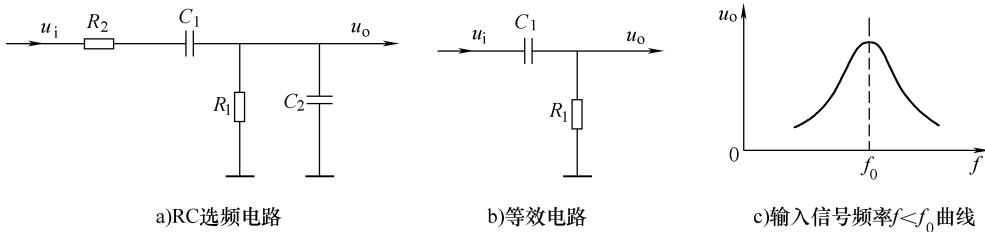


图 3-12 输入频率低时电路分析示意图

(2) 当输入信号频率高到一定程度时的电路分析

当输入信号频率高于振荡频率 f_0 后,由于频率高了, C_1 的容抗远小于电阻 R_2 ,这样在RC串联电路中只有 R_2 在起作用。同时,由于频率高了, C_2 的容抗远小于电阻 R_1 ,这样在RC并联电路中只有 C_2 在起作用,此时的等效电路如图3-13a所示。从这一RC分压电路中可以看出,当输入信号频率降低时,输出信号电压 u_o 将减小,如图3-13b所示频率高于 f_0 的那段曲线。

从上面分析可知,当输入信号频率为 f_0 时,RC选频电路的输出信号电压 u_o 为最大,其他频率输入信号的输出幅度均很小,说明了电路可以从众多信号频率中选出某一个频率的信号,具有选频作用,所选信号的频率为 f_0 。

RC选频电路在选频过程中,对频率为 f_0 的信号不产生附加的相移,也就是说电路只有

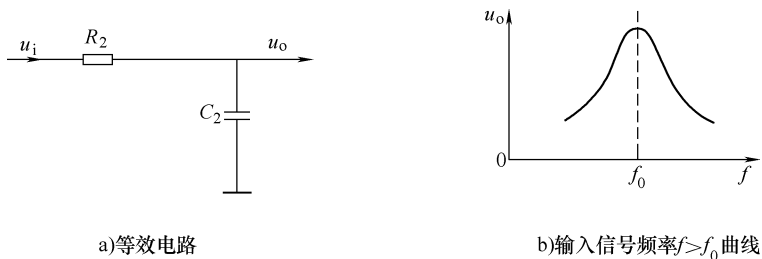


图 3-13 输入频率高时电路分析示意图

选频作用，没有移相作用。

2. 正反馈过程分析

RC 选频电路正弦波振荡器中， VT_1 和 VT_2 构成共发射极放大器，这种放大器对信号电压具有反相的作用，两级放大器对信号电压分别反相一次，两次反相之后又成为同相位了，如图 3-11 所示电路中的信号相位标注。设 VT_1 基极为 +，其集电极为 -， VT_2 再次反相后其集电极为 +。图 3-14 所示是正反馈回路示意图。当输入 VT_1 基极的信号电压相位为正时， VT_2 集电极输出信号电压的相位也是为正。

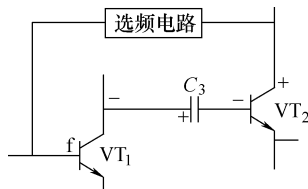


图 3-14 正反馈回路示意图

这一输出信号经 RC 选频电路的选频，取出频率为 f_0 的信号，加到 VT_1 基极。这一信号相位仍然为正，这样加强了 VT_1 基极上的输入信号，所以是正反馈过程，使振荡器满足了相位条件。

3. 振荡过程

VT_1 和 VT_2 是具备放大能力的（直流电路保证两管进入放大状态），这样振荡器同时满足相位和幅度条件。经 VT_1 和 VT_2 放大后的信号，从 VT_2 集电极输出，经 R_2 、 C_1 、 R_1 和 C_2 组成的 RC 选频电路，选出频率为 f_0 信号，加到 VT_1 基极，加强了 VT_1 基极频率为 f_0 的幅度，这个频率信号再经 VT_1 和 VT_2 放大，再次正反馈到 VT_1 基极，这样振荡器进入振荡的工作状态。

4. 电路分析说明

在这一振荡器中，要用到两级共发射极放大电路，利用这两级共发射极放大器对信号进行两次倒相来满足相位条件，振荡器工作过程分析如下：

(1) RC 选频电路原理

RC 选频电路只在输入信号频率为 f_0 时，输出信号电压才为最大，并且对频率为 f_0 信号没有附加的相位移。对于频率小于或高于 f_0 的信号，其幅度小，并且有附加相位移，这样就破坏了振荡器的相位条件而不能产生振荡，所以只有频率为 f_0 的信号才能在这一振荡器中振荡。

(2) 振荡频率计算公式

当电路中的 $R_1 = R_2$ ， $C_1 = C_2$ ，且 VT_1 放大器的输入电阻值远大于 R_1 阻值（或 R_2 阻值）， VT_2 放大器的输出电阻值远小于 R_1 阻值（或 R_2 阻值）时，这种振荡器的振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_1 \times C_1}$$

(3) 主要缺点

RC 选频电路的选频特性不太好, 对频率为 f_0 附近的信号衰减不足, 这样振荡信号的波形存在较大的失真。另外, 放大器的放大倍数太大时, 晶体管容易进入饱和状态, 使振荡信号产生削顶失真, 振荡器输出信号失真更大。为了解决上述问题给电路中引入负反馈电路, 图 3-15 所示电路中的可变电阻器 RP_1 , 它用来构成环路的负反馈电路。

这一负反馈电路的负反馈过程是: 某一瞬间 VT_1 基极信号电压相位为正, 则 VT_2 集电极上信号电压相位也为正, 这一输出信号经 RP_1 加到了 VT_1 的发射极上, 使 VT_1 的发射极信号电压增大, VT_1 的基极信号电流减小, 所以这是负反馈过程, 是一个电压串联负反馈电路。

在接入反馈电阻 RP_1 之后, RP_1 与其他元器件构成了一个 RC 电桥, 如图 3-16 所示。从这一电路中可以看出, 4 个臂的电桥, 两个由 RC 选频电路构成, 另两个由负反馈电路构成。反馈信号 (输入到电桥的信号) 加到一条对角线上, 加到 VT_1 基极回路的电桥输出信号取自另一个对角线上。由于这些元器件构成了一个电桥, 所以这种振荡器称为桥式振荡器, 又称为文氏振荡器。这一振荡器的工作稳定性大大增强, 通过调整负反馈电阻 RP_1 的阻值, 使整个负反馈放大器的放大倍数为 3 或略大于 3 时, 即可以满足振荡条件, 并输出比较稳定的正弦信号。

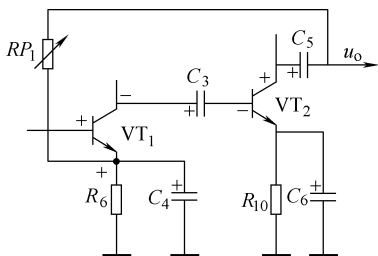


图 3-15 振荡信号相位示意图

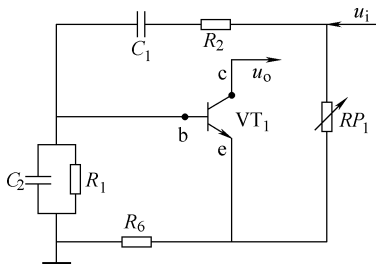


图 3-16 RC 电桥

知识四 变压器耦合正弦波振荡器电路

变压器耦合正弦波振荡器电路如图 3-17 所示。电路中, VT_1 为振荡管, T_1 为振荡耦合变压器, L_2 和 C_2 构成 LC 谐振选频电路, u_o 为振荡器的输出信号。

1. 直流电路

(1) VT_1 偏置电路

电路中, 直流工作电压 $+V$ 经 T_1 的 L_2 线圈加到 VT_1 集电极。 RP_1 、 R_1 和 R_2 对 $+V$ 分压后的电压加到 VT_1 基极, 建立 VT_1 的直流偏置电压, R_3 为 VT_1 的发射极电阻。这样, VT_1 就具备放大所需要的直流工作条件。

(2) RP_1 作用

调节 RP_1 可改变 VT_1 的静态直流偏置电流大小, 从而可改变振荡器输出信号 u_o 的大小。电阻 R_1 是保护电阻, 防止 RP_1 的阻值调的太小使 VT_1 的工作电流太大而损坏。在加了 R_1 之后, 即使 RP_1 的阻值被调整为零, 还有 R_1 限制 VT_1 的基极电流不会很大, 达到保护 VT_1 的

目的。

2. 正反馈电路

电路中, T_1 是振荡耦合变压器, 用它来完成正反馈。从图中可以看出, T_1 的一次绕组 L_1 (正反馈线圈) 接在 VT_1 的输入回路中 (基极回路), 它的二次绕组接在 VT_1 的输出回路中 (集电极回路)。 T_1 的同名端如图中黑点所示。

这一电路正反馈过程是: 假设振荡信号某瞬间在 VT_1 基极为 +, 使 VT_1 基极电流增大, 则其集电极为 -, 这样 T_1 的二次绕组 L_2 下端为 -, 上端为 +, 根据同名端概念, T_1 的一次绕组 L_1 下端为 +, 与 VT_1 基极极性一致, 所以 L_2 上的输出信号经 T_1 耦合到一次绕组 L_1 , 加强了 VT_1 的输入信号, 这是正反馈过程。

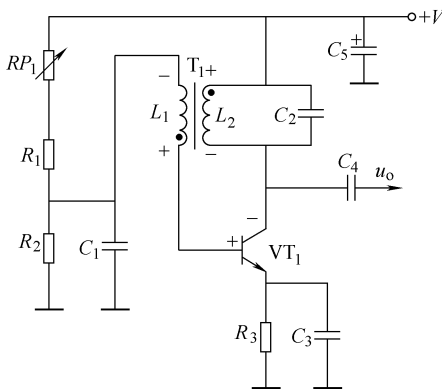


图 3-17 变压器耦合正弦波振荡器电路

3. 振荡原理

振荡器没有输入信号, 振荡器工作后则能输出信号 u_o 。前面在分析正反馈过程中, 假设 VT_1 基极有振荡信号, 振荡信号是怎么产生的, 这由振荡器的起振原理来说明。

在振荡器的直流工作电压 +V 接通瞬间, 在 VT_1 中会产生噪声, 这一噪声的频率范围很宽, 其中含有所需要的振荡信号频率 f_0 。由于 VT_1 中的噪声 (此时作为信号) 被 VT_1 放大, 经正反馈, 噪声又进入 VT_1 的基极, 再次经放大和正反馈, VT_1 中的振荡信号便产生了。

4. 选频电路

电路中的 L_2 和 C_2 构成 LC 并联谐振电路 (电路中只有这一个 LC 并联谐振电路), 该电路的谐振频率便是振荡信号频率 f_0 。

从电路中可以看出, L_2 和 C_2 并联谐振电路是 VT_1 的集电极负载电阻, 由于并联谐振时该电路的阻抗最大, 所以 VT_1 的集电极负载电阻最大, VT_1 对频率为 f_0 信号的放大倍数最大。对于 f_0 之外的其他频率信号, 由于 L_2 和 C_2 失谐, 电路阻抗很小, VT_1 的放大倍数很小, 这样输出信号 u_o 是以频率为 f_0 的振荡信号, 达到选频的目的。电路中 C_1 是振荡信号旁路电容, 将 L_1 上端振荡信号交流接地, L_1 耦合过来的正反馈信号又进入 VT_1 的输入回路, 这一回路为 L_1 下端 $\rightarrow VT_1$ 基极 $\rightarrow VT_1$ 发射极 $\rightarrow$ 发射极旁路电容 $C_3 \rightarrow$ 地端 $\rightarrow$ 旁路电容 $C_1 \rightarrow L_1$ 上端, 形成正反馈回路。

5. 电路特点

- 1) 需要一个耦合变压器。
- 2) 调整 RP_1 的阻值大小, 可改变振荡管 VT_1 的静态工作电流, 从而可以改变振荡输出信号的大小。这种振荡器的振荡输出信号是从振荡耦合变压器的次级绕组输出的。
- 3) 适合于频率较低的场合下使用 (几十千赫兹到几兆赫兹), 通常只用几十千赫兹。
- 4) 由于采用了变压器可以进行阻抗的匹配, 故输出信号电压较大, 但在使用变压器时要注意接线, 一次或二次绕组的头尾引线接反了将不能产生正反馈 (变为负反馈), 不能振荡。

5) 变压器耦合振荡器电路也有多种, 按振荡管的接法有共集电极耦合振荡, 共发射极耦合振荡和共基极耦合振荡电路, 这几种振荡电路的工作原理基本一样。

知识五 电感三点式正弦波振荡器电路

电感三点式正弦波振荡器电路如图 3-18 所示。这一电路中, VT_1 是振荡管, T_1 的一次绕组是振荡电感, u_o 是振荡器输出信号, 由变压器 T_1 的二次侧输出。

1. 电路分析

(1) 直流电路

直流工作电压 $+V$ 经 T_1 的一次绕组 L_1 抽头及抽头上的线圈加到 VT_1 集电极, R_1 、 RP_1 和 R_2 构成 VT_1 的基极分压式偏置电路, R_3 为 VT_1 的发射极电阻。这样 VT_1 就具备了放大能力。

(2) 正反馈过程

假设振荡信号电压某瞬间在 VT_1 基极为 $+$, 经 VT_1 放大和倒相后, 其集电极上信号电压极性为 $-$, 即 T_1 一次绕组上端为 $-$ 。由于 T_1 一次绕组的抽头接 $+V$ 端, $+V$ 相当于交流接地, 在它的下端信号电压极性为 $+$, 经 C_2 耦合到 VT_1 基极, 与其基极极性相同, 加强了输入信号, 所以这是正反馈过程。

(3) 振荡原理

在接通电源 $+V$ 后, 电路开始起振, 通过正反馈、放大和稳幅环节, 振荡器稳定工作。 L_1 和 C_1 构成 LC 并联谐振选频电路, 振荡器的振荡频率由 L_1 和 C_1 并联谐振电路的谐振频率决定。

电路中的 C_2 是正反馈耦合电容, 将 T_1 的一次绕组上正反馈信号耦合到 VT_1 基极。 C_2 容量大, 振荡器容易起振。另外, C_2 具有隔直流作用, 将 VT_1 集电极和基极上的直流电压隔开。 C_3 为振荡管 VT_1 的发射极旁路电容, 将发射极交流接地。振荡器输出信号取自 T_1 的二次绕组, T_1 在这里起耦合作用。

2. 电路分析说明

1) 正反馈信号的反馈传输线路与变压器耦合振荡器电路不同, 它只在一次绕组中传输, 二次绕组不参与正反馈信号的传输。

2) 振荡电感一定是有抽头的, 振荡电感的 3 根引脚或是直接与振荡管某个电极相连, 或是通过电容相连, 要注意直流电源 $+V$ 对交流而言是接地的。

3) 分辨这种电路中的振荡电感比较容易, 带抽头的是振荡电感, 与该绕组相并联的是谐振电容, 振荡电感和谐振电容构成 LC 并联谐振选频电路。

4) 带抽头的 L_1 是一次绕组, VT_1 集电极电流流过 T_1 的二次绕组 L_2 才有振荡信号输出。

3. 电路特点

1) 振荡频率一般, 可以达到几十兆赫兹。

2) 电路比较容易起振。

3) 频率调整比较方便, 只要将电感 L_1 中加入磁心, 调整磁心位置就能改变 L_1 的电感量, 就能改变选频电路的谐振频率, 从而改变振荡频率。

4) 正反馈信号取自 L_1 抽头与下端之间的一段绕组上, 由于电感不能将谐波抑制掉, 所

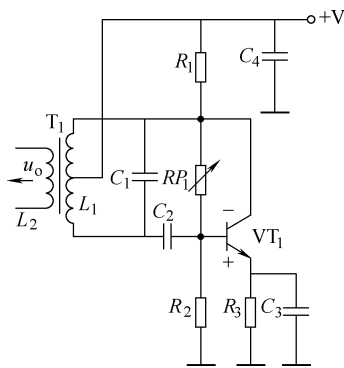


图 3-18 振荡信号相位示意图

以振荡器输出信号中谐波成分较多。

知识六 电容三点式正弦波振荡器电路

电容三点式正弦波振荡器电路又称考毕茨振荡器电路。图 3-19 是电容三点式正弦波振荡器电路的一种变形电路。VT₁ 是振荡管，C₆ 是输出端耦合电容，L₁ 和 C₅、C₄、C₃、C₂ 构成 LC 并联谐振选频电路。C₁ 是 VT₁ 的集电极旁路电容，将 VT₁ 集电极交流接地。

1. 直流电路

直流工作电压 +V 经 R₁ 给 VT₁ 集电极加上直流工作电压，R₃、R₄ 分压后为 VT₁ 提供基极偏置电压，R₂ 是 VT₁ 发射极电阻。

2. 正反馈电路

假设某瞬间振荡管 VT₁ 基极上的振荡信号极性为 +（使振荡管基极电流增大），则 VT₁ 集电极为 -，经 C₁ 旁路到接地端为 -，极性为负的反馈信号电压经 C₂ 和 C₃ 分压后加到 VT₁ 发射极（或认为反馈信号从 C₂ 加到 VT₁ 发射极），其反馈信号极性仍为 -。由于发射极电压为 -，使 VT₁ 基极电流更大，这是正反馈过程。

C₂、C₃ 的容量相对大小可以决定正反馈的强弱，以满足振荡的幅度条件。在一些振荡频率较高的电路中，可以用 VT₁ 基极和发射极之间发射结电容来代替 C₃，在分析时要注意这一点。

3. 振荡原理以及选频电路分析

这一振荡器电路的振荡原理同前面介绍的基本一样，这里主要说明选频电路的工作原理。选频电路由 C₄、C₃、C₂ 串联之后与 C₅ 并联，再与 L₁ 并联构成 LC 并联谐振选频电路。

这一 LC 并联谐振电路接在振荡器输出端与地之间，设该电路的谐振频率为 f₀，在谐振时该电路阻抗最大，对输出信号分流衰减很小，而当该电路失谐时此电路阻抗很小，对地分流衰减严重，使 VT₁ 基极上的信号很小，这样只有频率为 f₀ 的信号在 VT₁ 基极上的幅度为最大，VT₁ 的放大量最大，达到选频的目的。

4. 电容 C₄ 作用

在典型的电容三点式正弦波振荡器电路中，C₄ 容量取得较大，且远大于 C₂、C₃ 的容量，那么 C₂、C₃、C₄ 的串联后总容量主要取决于 C₂、C₃、C₄ 对谐振频率影响很小，这样的电路称之为考毕茨振荡器电路。

由于 C₂、C₃ 容量较小，VT₁ 的电极间电容会影响振荡频率，造成振荡频率不稳定，为此应将 C₄ 的容量取较小值。这样 C₄ 在决定振荡频率上的影响将占重要位置，可以克服晶体管电极间电容的影响，使振荡频率比较稳定。这种 C₄ 取值较小的电路是考毕茨振荡器电路的变形电路，称之为锡拉振荡器电路。图 3-20 是另一种电容三点式正弦波振荡器

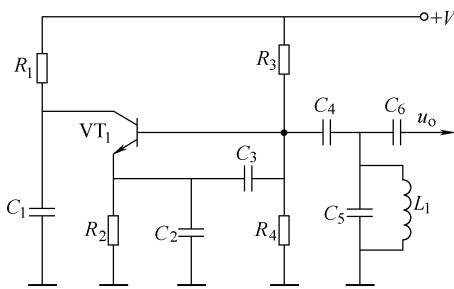


图 3-19 电容三点式正弦波振荡器电路

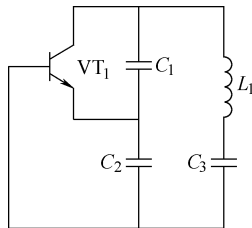


图 3-20 电容三点式正弦波振荡器变形电路

从上述分析可知,这种振荡器电路中的 VT_1 和 VT_2 像推挽功率放大器电路中的功放管一样,一只处于振荡状态时,另一只处于截止状态,振荡信号的正、负半周信号是由两只晶体管合作完成的。两只晶体管的振荡信号电流(各半个周期)流过 T_1 的一次绕组,从二次绕组输出,并完成两个半周信号合并成一个完整周期信号的任务。

4. 选频电路分析

电路中的选频电路由 L_2 和 C_4 构成,这是一个 LC 并联谐振电路,设谐振频率信号为 f_0 。在谐振时该电路的阻抗最大,即 T_1 二次绕组的阻抗为最大。

VT_1 的集电极负载是 L_1 抽头以上线圈, VT_2 的集电极负载是 L_1 抽头以下线圈, L_1 与 L_2 构成一个变压器。

由于 L_2 在频率为 f_0 时的阻抗最大,这样 L_1 在频率为 f_0 时的阻抗也为最大,即 VT_1 和 VT_2 的集电极负载阻抗在频率为 f_0 最大, VT_1 和 VT_2 的放大倍数为最大,所以这一振荡器电路放大和振荡频率为 f_0 的信号,这样从 L_2 抽头输出的振荡信号频率为而。

5. 电路特点

1) R_2 和 R_3 分别是 VT_1 和 VT_2 的发射极直流和交流负反馈电阻,能够稳定振荡器电路的工作,改善振荡器的输出信号波形,减小输出信号失真。

2) 电容 C_3 接在 VT_1 和 VT_2 基极之间,可以改善振荡信号正,负半周信号的对称性,也就是改善了振荡信号的失真。

3) L_1 的抽头是由中心抽头,这样 VT_1 和 VT_2 的集电极负载阻抗才相等。

任务与实施

1. 任务

LC 正弦波振荡器实验。

2. 要求

1) 整理实验数据,并根据实验结果对振荡电路进行性能分析。

2) 计算最高振荡频率域最低振荡频率,并与测量数据相比较。

3) 简述测试方法,画出测试电路框图。

3. 实验原理与说明

本实验选用的电路是为提高频率稳定性而设计的改进型电容三点式振荡器,实验电路如图 3-23 所示。

前级电路由 VT_1 组成改进型电容三点式振荡电路,它和普通电容三点式电路的区别,仅在于电感支路串入电容器 C_3 、 C_4 ,可变电容器 C_3 用来调节电路振荡频率 f_0 ,即

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_3(C_3 + C_4)}}$$

反馈系数 $F_{(+)}$ 为

$$F_{(+)} = \frac{C_1 + C_0}{C_2 + C_i}$$

在调节电路振荡频率 f_0 时, C_3 的变化和反馈系数无关。而调节 C_1 、 C_2 的比例,在改变反馈系数时又不影响振荡频率。

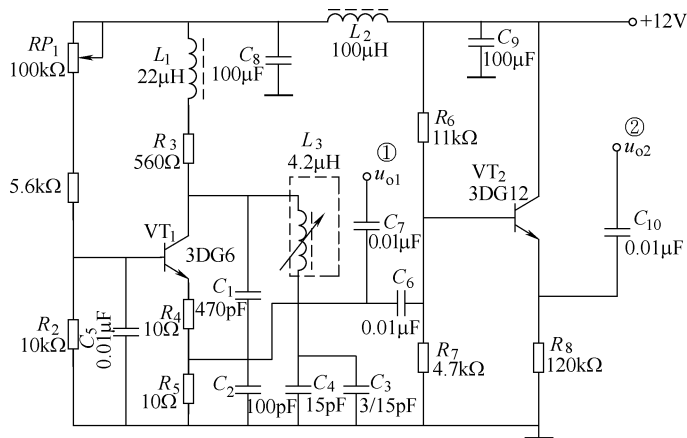


图 3-23 LC 振荡器实验电路图

后级电路由 VT₂ 构成射极跟随器，借以减小负载电阻变化对振荡频率的影响。测试点 ②接电容 C₁₀，用于测量振荡器频率时，起到振荡器与频率计之间直流分量的隔离作用。

4. 实验仪器与设备

- 1) 直流稳压电源 1 台。
- 2) 双踪示波器 1 台。
- 3) 数字频率计 1 台。
- 4) 晶体管毫伏表 1 只。
- 5) 万用表 1 只。
- 6) 实验电路板。
- 7) 无感螺钉旋具 1 支。
- 8) 仪器仪表、元器件手册。

5. 实验内容与步骤

(1) 调整静态工作点

接通电源，用一根导线将 L₃ 短接，使电路停振，调节振荡级偏置电阻 RP₁，使 VT₁ 集电极电流 i_{C1} = 5mA，即发射极电压 U_{BQ1} ≈ 5V，测量此时静态工作电压，并记录在表 3-1 中。

表 3-1 静态、动态工作点测试记录

单位/V		U _{EQ}	U _{BQ}	U _{CQ}
停振状态	VT ₁			
	VT ₂			
振荡状态	VT ₁			
	VT ₂			

(2) 观察电路停振、振荡两种状态工作点的变化

取下短路线后，电路即可振荡，同时 VT₁ 发射极直流电压 U_{EQ1} 也将偏离停振时所测的数值，测量此时的各级工作电压，并记录在表 3-1 中。比较停振、起振时的 U_{EQ1}。

(3) 观察振荡器输出波形

振荡电路工作正常，用示波器在振荡级输出端 u_{o2} 观察正弦波波形，测量其振荡频率及电压幅度，画出所观测到的正弦波波形。

(4) 测量振荡电路的频率及其变化范围

调整电容器 C_3 (用无感螺钉旋具), 使其处于顺时针或逆时针最大位置, 分别测量电路的最高振荡频率与最低振荡频率, 并与理论计算结果进行比较。

(5) 测量电路反馈深度对振荡电压 u_{o1} 的影响

测量条件: $f=f_{\min}$ 、 $U_{EQ1}=5V$ 。

1) 使 $C_1=470pF$, 在 C_2 两端并联容量分别为 $330pF$ 、 $1000pF$ 的电容, 测量不同容量对应的振荡电压 u_{o1} 的幅度和频率, 并将测试数据填入表 3-2 中。

表 3-2 反馈深度对振荡电压 u_{o1} 的影响

输出	C_2/pF	330	1000
	u_{o1}/V		
	f/MHz		

2) 使 $C_2=1000pF$, 在 C_1 两端并联容量分别为 $330pF$ 、 $510pF$ 的电容, 测量不同容量对应的振荡电压 u_{o1} 的幅度和频率, 并将测试数据填入表 3-3 中。

表 3-3 反馈深度对振荡电压 u_{o1} 的影响

输出	C_2/pF	330	510
	u_{o1}/V		
	f/MHz		

6. 注意事项

1) 在改变 C_1 、 C_2 大小从而改变电路反馈深度时, 由于晶体管参数不一致, 有可能造成电路停振, 因此表中给出的电容值, 只作为参考。

2) 可变电感为中频变压器, 调节磁心时应使用无感旋具轻轻地旋转。

思 考 题

- 1. 调试振荡电路静态工作点的目的是什么?
- 2. 电路停振和振荡时, U_{EQ1} 的值为何不同?
- 3. 电源电压变化时对振荡频率有何影响?
- 4. 反馈系数对输出电压有何影响?

项目四 非正弦波振荡电路

项目导读

波形产生电路包含正弦波振荡电路和非正弦波产生电路。它们不需要输入信号便能产生各种周期性的波形，如正弦波、矩形波和锯齿波等。波形变换电路是将输入信号的波形变成另一种形状，例如将方波变换成三角波，将正弦波变换成矩形波等。

常用的非正弦波信号发生器有方波、三角波和锯齿波信号发生器。在方波发生器中，当 RC 积分电路充电和放电时常数不相等时，高电平和低电平持续时间也不相等，电路输出信号为矩形波。在三角波发生器中，当积分电路充电和放电时间常数不等时，电路输出为锯齿波。输出信号的频率受外加控制电压控制的振荡器称为压控振荡器。

【知识要求】

- 熟悉常用振荡电路电子元器件的参数和功能
- 熟悉常用自激多谐振荡电路的结构与工作原理
- 掌握产生方波、锯齿波、三角波电路的结构和参数计算
- 掌握方波、锯齿波、三角波振荡电路的工作原理和分析方法
- 掌握波形变换电路的结构和变换原理
- 掌握波形产生电路测试和调试的基本方法

【能力要求】

- 能够选择正确的仪器仪表检测电子元器件的参数
- 能够制作与调试由门电路构成的方波振荡电路
- 能够制作与调试由施密特反相器构成的方波振荡电路
- 能够制作与调试由 555 定时器构成的方波振荡电路
- 能够制作与调试恒流充电的锯齿波振荡电路
- 能够制作与调试由运算放大器构成的方波、锯齿波、三角波振荡电路

相关知识

知识一 方波振荡电路

方波信号可分解为无限多个频率的正弦波的叠加, 其中有一个是基波, 其余是谐波, 因此, 能产生方波信号的振荡电路也称为多谐振荡电路。这种电路即使没有外加触发信号, 也能自行产生方波振荡, 故此类电路也称为无稳态电路。

由于自激多谐振荡电路结构简单, 能产生不同频率和宽度的方波信号, 所以它也是比较常见的方波振荡电路。自激多谐振荡器有集电极-基极耦合型和射极耦合型两种基本类型。此外, 还有互补型多谐振荡电路以及使用较多的用 555 定时器构成的方波振荡电路。同时, 还可以采用门电路及运算放大电路来构成各种方波振荡电路。

一、自激多谐振荡电路

1. 集电极-基极耦合自激多谐振荡电路

由晶体管构成的集电极-基极耦合自激多谐振荡电路如图 4-1 所示。从电路图上看, 它基本上是由两级 RC 耦合放大器组成, 每一级的输出均耦合到另一级的输入, 各级交替导通和截止, 每次只有一级是导通的。

从电路表面上看, 它与两级 RC 正弦振荡器比较相似, 但实际上却是不同的。正弦波振荡电路不会进入截止状态, 而多谐振荡电路却会进入截止状态, 这是因为电路中 RC 耦合网络的时间常数较大造成的。尽管在时间上是交替的, 可是这两级产生的都是方波输出, 所以多谐振荡器的输出可取自任何一级。

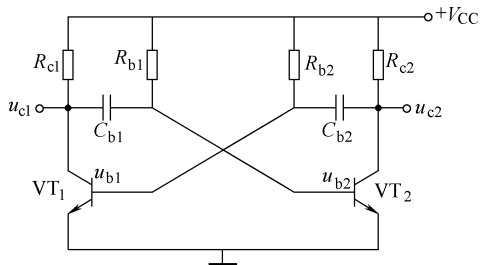
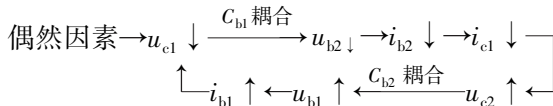


图 4-1 集电极-基极耦合自激多谐振荡器电路

电路的工作过程。在电源接通后, 因为两个晶体管的基极通过电阻 R_{b1} 或 R_{b2} 接至电源 V_{CC} , 所以 VT_1 、 VT_2 都有可能导通。但在导通的过程中, 由于晶体管或其他元件参数的微小差异以及噪声干扰的影响, 两个晶体管的导通速度有所不同。如果 VT_1 比 VT_2 导通速度快, 那么 VT_1 集电极电位下降也快。差异一旦产生, 会通过电路的正反馈过程迅速扩大, 直到 VT_1 饱和、 VT_2 截止, 其变化过程如下:



一旦 VT_1 饱和、 VT_2 截止, 连锁反应就会停止, 出现暂稳态。随后, C_{b1} 开始放电, 放电电流的通路为: $V_{CC} \rightarrow R_{b2} \rightarrow C_{b1} \rightarrow$ 集电极 $\rightarrow VT_1$ 发射极 $\rightarrow$ 地。随着放电的进行, VT_2 基极电位逐渐上升。与此同时, 由于 VT_2 截止, 其集电极为高电位, 故 C_{b2} 将充电, 充电电流的路径为 $V_{CC} \rightarrow R_{c2} \rightarrow C_{b2} \rightarrow VT_1$ 基极 $\rightarrow VT_1$ 发射极 $\rightarrow$ 地。

当截止管 VT_2 的基极电位 u_{b2} 随放电过程而逐渐上升到晶体管的开启电压 (硅管约为

0.6V) 时, VT_2 由截止变为导通、 u_{c2} 相应下降, 依靠电路的正反馈, 又产生如下连锁反应:

$$\begin{array}{c} C_{b1} \text{ 放电} \rightarrow u_{b2} \uparrow \rightarrow i_{b2} \uparrow \rightarrow i_{c2} \uparrow \rightarrow u_{c2} \downarrow \\ \uparrow \\ u_{c1} \uparrow \leftarrow i_{c1} \downarrow \leftarrow i_{b1} \downarrow \leftarrow u_{b1} \downarrow \end{array}$$

直到原来的饱和管 VT_1 截止, 而 VT_2 则因 i_{c2} 不断上升而饱和, 这样就完成了一次状态转换。这时, VT_2 截止状态的维持是由于 C_{b2} 放电而使 VT_1 的基极电位 u_{b1} 为负值。但是, u_{b1} 随 C_{b2} 的放电而上升。与此同时, 由于 VT_1 截止而使 C_{b1} 充电, 为下一次放电做好准备。而 u_{b1} 一旦上升到 +0.6V, VT_1 将由截止转为重新导通。这样周而复始, 状态不断转换, 就形成了多谐振荡过程, 其工作波形如图 4-2 所示。

通过以上分析可知, 电路的转换发生在 u_{b1} 、 u_{b2} 达到可以使晶体管导通的时刻。因 u_{b1} 、 u_{b2} 是按指数规律上升的, 所以电路的脉冲宽度可以近似地表示为

$$t_{w1} \approx 0.7R_{b1}C_{b1} \quad t_{w2} \approx 0.7R_{b2}C_{b2} \quad (4-1)$$

因此, 电路的工作周期为

$$T = t_{w1} + t_{w2} \approx 0.7(R_{b1}C_{b1} + R_{b2}C_{b2}) \quad (4-2)$$

若电路是对称的, 即 $R_{b1} = R_{b2} = R_b$, $R_{c1} = R_{c2} = R_c$, $C_{b1} = C_{b2} = C_b$, 则有

$$T \approx 1.4R_bC_b \quad (4-3)$$

电路的恢复时间为

$$t_B \approx 2.3\tau_B = 2.3(R_c + r_{be})C_b \approx 2.3R_cC_b \quad (4-4)$$

因 $t_w = t_{w1} = t_{w2} = T/2 \approx 0.7R_bC_b$, 故恢复时间与脉冲宽度比为

$$t_B/t_w = 3.3R_c/R_b \quad (4-5)$$

如果忽略晶体管的饱和电压降, 则有

$$I_{cs} \approx V_{CC}/R_c, I_{bs} \approx V_{CC}/R_b \quad (4-6)$$

为了保证晶体管饱和, 必须保证

$$I_{bs} \geq I_{cs}/\beta_{\min} \quad (4-7)$$

将式 (4-5) 和式 (4-6) 分别代入式 (4-7), 得

$$R_b < \beta_{\min} R_c, t_B/t_w \geq 3.3/\beta_{\min} \quad (4-8)$$

由此可见, 自激多谐振荡器的恢复时间是相当大的。如果 $\beta_{\min} = 30$, 则它至少占脉冲宽度的 11%。如果恢复时间为 $t_B \approx (3 \sim 5)R_cC_b$, 则此值更大。这样大的恢复时间, 使 VT_1 和 VT_2 集电极输出的方波上升边沿十分缓慢, 这就限制了工作频率的提高。同时, 由于转换过程的时间长短受晶体管特性影响, 因此更换晶体管时将会影响电路的振荡周期, 所以需采取相应措施对这种振荡电路的上升边沿进行改进来改善该电路上升边沿的上升速率, 常用的有下面三种电路。

(1) 加有隔离二极管的自激多谐振荡器

加有隔离二极管的自激多谐振荡器电路如图 4-3 所示。其电路能提高上升速率的原理是通过加入二极管使得 $R_{c1}C_{b1}(R_{c2}C_{b2})$ 变为 $R'_{c1}C_{b1}(R'_{c2}C_{b2})$ 。而 $R'_{c1}C_{b1}(R'_{c2}C_{b2})$ 可以比 $R_{c1}C_{b1}(R_{c2}C_{b2})$ 小很多, 因此可以缩短电路的过渡时间, 提高工作频率。

(2) 加有射极跟随器的自激多谐振荡器

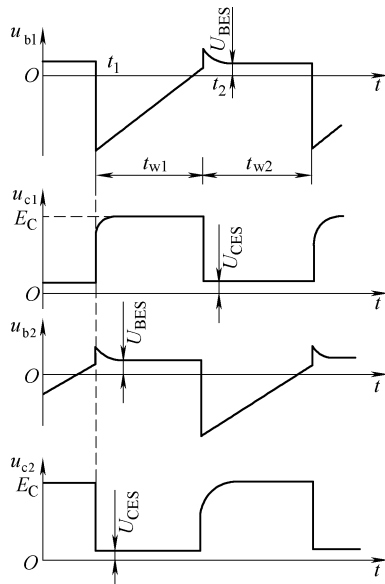


图 4-2 电路的工作波形图

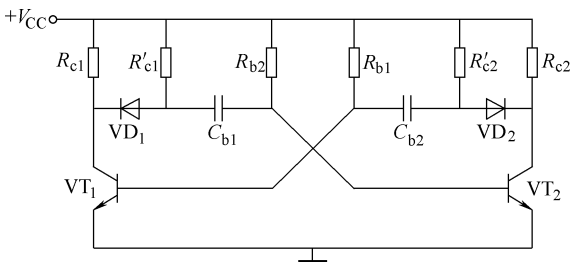


图 4-3 加有隔离二极管的自激多谐振荡器电路

加有射极跟随器的多谐振荡电路如图 4-4 所示。射极跟随器输出阻抗低，放大倍数又接近于 1，因此，当脉冲取自 A、B 两点时，上升速率很高，且脉冲幅度近于 VT_1 、 VT_2 集电极脉冲的幅度。电位器 RP 的作用是调整电路输出脉冲的对称性。

(3) 加有附加电源的自激多谐振荡器

采用了附加电源的多谐振荡电路如图 4-5 所示。这种电路采取降低输出脉冲幅度的方法来换取较小的上升时间。图中脉冲的幅度被固定为 4V。

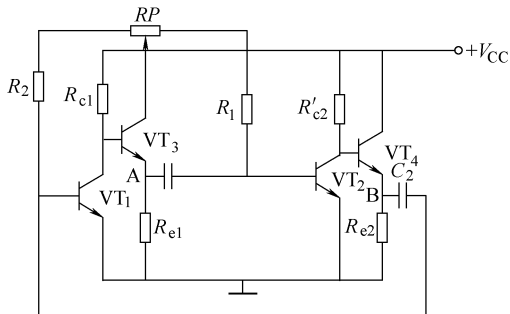


图 4-4 加有射极跟随器的多谐振荡电路

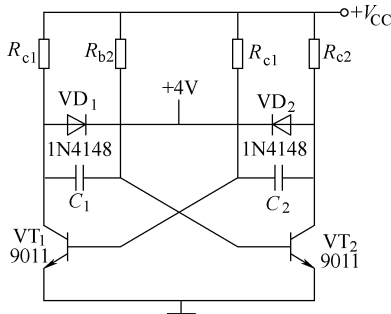


图 4-5 附加电源的多谐振荡电路

2. 射极耦合自激多谐振荡电路

图 4-6a 所示为射极耦合自激多谐振荡器。这种电路与集电极-基极耦合自激多谐振荡器相比，具有如下优点：集电极-基极耦合自激多谐振荡电路的两个晶体管是共射极接法，工作时晶体管在导通与截止间反复转换，最高工作频率受晶体管载流子的储存时间和 f_β 的限制，而射极耦合自激多谐振荡电路中的晶体管可以工作在放大区，按共基极接法，工作频率不受储存时间的限制，其最高截止频率为 f_a ，且 $f_a > f_\beta$ ，所以这种电路能产生较高频率振荡，具有高速性能。电路的输出取自 VT_2 的集电极，与电路的转换无关，不影响恢复时间，晶体管的特性对振荡频率的影响较小，输出脉冲前后沿皆陡直。射极耦合自激多谐振荡电路只用了一个电容，调整工作频率时比较容易。射极耦合自激多谐振荡电路有以下缺点：只有一个电容，不论是晶体管还是射极电阻都要相当对称；输出脉冲幅度较小，电源电压的利用率只有 70% 左右。

电路中 VT_1 基极接固定电压 V_{BB} ， VT_2 基极直接连到 VT_1 集电极， VT_1 和 VT_2 的发射极通过电容 C 耦合。该电路的工作原理如下：当接通电源时， VT_1 、 VT_2 可能同时导通，但由于电路不对称，两边导通程度有差别。设 $i_{C1} > i_{C2}$ ，则产生以下反馈过程为

$$i_{C1} \downarrow \rightarrow u_{C1} \downarrow \rightarrow u_{B2} \downarrow \rightarrow i_{C2} \downarrow \xrightarrow{\text{经 } C \text{ 耦合}} u_{E1} \downarrow \rightarrow u_{BE1} \uparrow \rightarrow i_{C1} \circ$$

由于上述反馈作用避免了两管同时导通的可能，电路进入 VT_1 导通， VT_2 截止的暂稳

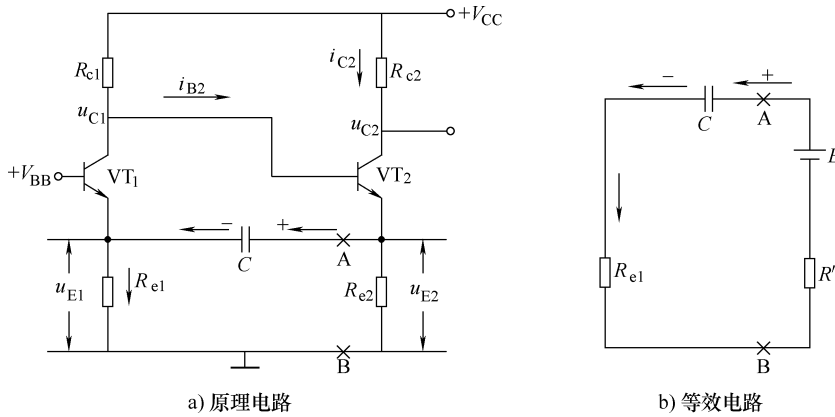


图 4-6 射极耦合自激多谐振荡电路

态。在这个暂稳态期间，电容 C 按图 4-6a 中实线路径充电，导致电路翻转到 VT_1 截止、 VT_2 放大的另一个暂稳态。随后，电容 C 按图 4-6a 中虚线路径放电。当 u_{BE2} 达到翻转电压（硅管约 0.6V）时， VT_1 又导通， VT_2 又截止，电路回到原来的暂稳态，其翻转的反馈过程为

$$i_{C1} \uparrow \rightarrow u_{E2} \uparrow \xrightarrow{\text{经 } C \text{ 耦合}} u_{E1} \uparrow \rightarrow u_{BE1} \downarrow \rightarrow i_{C1} \downarrow \rightarrow u_{C1} \uparrow \rightarrow u_{B2} \uparrow \rightarrow i_{C1} \circ$$

如此循环往复，形成振荡。图 4-6b 是从图 4-6a 中 A、B 两点向左看得到的等效电路。其中 VT_2 电路看作射极跟随器， E 为等效电源， R' 射极跟随器的等效输出电阻。

图 4-6a 电路的工作波形如图 4-7 所示，电路的工作周期为 $T = t_{p1} + t_{p2}$ 。图中， $\tau_1 \approx R_{e1}C$ ； $\tau_2 \approx R_{e2}C$ 。

通常 $V_{CC} \geq i_{B2}R_{c1} + u_{BE2}$ ， $i_B \geq I_{cs}/\beta_{\min}$ ， $V_{BB} \geq u_{CE1} - u_{BE1}$ ，可以认为过渡过程的初始电压与终止电压近似是 V_{CC} 和 V_{BB} 。因此有

$$t_{p1} \approx \tau_2 \ln \frac{V_{CC}}{V_{BB}} \quad (4-9)$$

$$t_{p2} \approx \tau_1 \ln \frac{V_{CC}}{V_{BB}} \quad (4-10)$$

若 $R_{e1} = R_{e2}$ ，则 $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ ， $t_{p1} = t_{p2} = t_p$ ，那么有

$$T \approx 2\tau \ln \frac{V_{CC}}{V_{BB}} \quad (4-11)$$

图 4-8a 与图 4-6a 的区别在于只用了一个电源 V_{CC} ， V_{BB} 由 V_{CC} 的分压提供。由此可见，射极耦合自激多谐振荡器的工作频率基本不受电源电压的影响（ V_{CC}/V_{BB} 为分压比的倒数，是固定值），是比较稳定的。由于发射极电阻阻

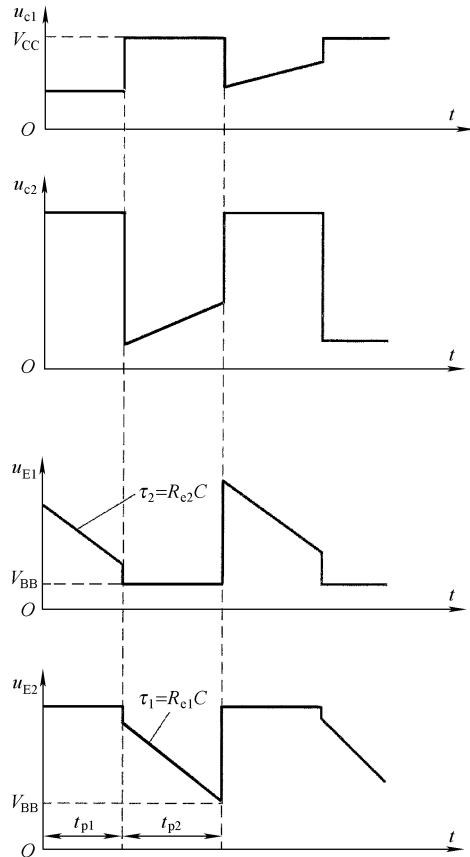


图 4-7 射极自激多谐振荡器各电极波形

值一般都较小, 因此该电路不适合于产生周期较长的信号。图 4-8b 是另外一种结构的射极耦合自激振荡电路的结构, 它将耦合电容由发射极移到了集电极和基极, 其原理与图 4-6 类似。因基极电路的电阻可以取得较大, 故该电路有利于产生周期较长的信号。

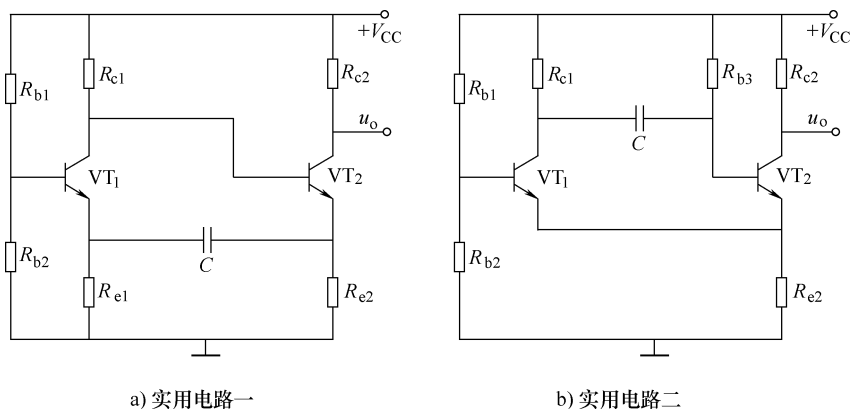


图 4-8 实用的射极自激多谐振荡器电路

二、由门电路构成的方波振荡电路

1. TTL 门方波振荡电路

方波振荡电路常由 TTL 门电路和 CMOS 门电路组成。由于 TTL 门电路的速度比 CMOS 门电路的速度快, 故 TTL 门电路适用于组成工作频率较高的方波振荡电路, 而 CMOS 门电路适用于组成工作频率较低的方波振荡电路。

由 TTL 门电路组成的方波振荡电路有两种形式: 一种是由奇数个非门组成的简单环形方波振荡电路, 另一种是由非门和 RC 延时电路组成的改进型环形方波振荡电路。

(1) 简单环形方波振荡电路

把奇数个非门首尾相接成环状, 就可组成简单环形方波振荡电路。图 4-9a 为由 3 个非门构成的方波振荡电路。若输出信号 u_o 的某个随机状态为高电平, 经过三级倒相后, u_o 就会翻转为低电平。考虑到传输门电路的平均延迟时间 t_{pd} , u_o 的周期为 $6t_{pd}$ 。图 4-9b 为电路中各点的工作波形图。

因为简单环形方波振荡电路的振荡周期取决于 t_{pd} , 此值较小 (一般为几十纳秒) 且不可调, 所以该电路产生的脉冲信号频率极高 (最高达 8MHz) 且无法控制, 实用价值不大, 不过可以用此方法来测量门的延时时间。对该电路改进的方法是附加一个 RC 延时电路, 这样不仅可以降低振荡频率, 还

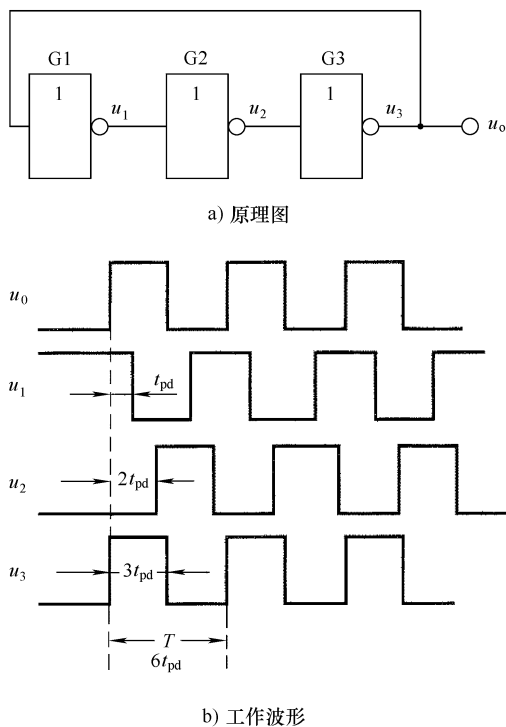


图 4-9 简单环形方波振荡电路及工作波形图

能通过 R 、 C 来控制振荡频率。

(2) RC 延时环形方波振荡电路

如图 4-10 所示, RC 延时环形方波振荡电路由 3 个非门 ($G1$ 、 $G2$ 、 $G3$)、两个电阻 (R 、 R_s) 和一个电容 C 组成。

R_s 是 $G3$ 的限流保护电阻, 一般为 100Ω

左右; R 、 C 为定时器件, R 值要小于非

门的关门电阻, 一般在 700Ω 以下, 否则电路无法正常工作。由于电路中 R 、 C 值较大, 从 $u_2 \sim u_4$ 的传输时间大大增加, 电路振荡周期基本上由 R 、 C 的值决定, 门延迟时间 t_{pd} 可以忽略不计。

在图 4-10 电路中, 假设电源刚接通时电路的输出信号 u_o 为高电平, 由于此时 C 尚未充电, 其两端电压为零, 则 u_2 、 u_4 为低电平, 电路处于第 1 暂稳态。随着 u_3 高电平通过电阻 R 对 C 充电, u_4 逐渐升高。当 u_4 超过 $G3$ 的输入闭值电平 U_{th} 时, $G3$ 翻转, $u_o = u_1$ 变为低电平, 使 $G1$ 也翻转, u_2 变为高电平。由于电容电压不能突变, u_4 也有一个正跳变, 保持 $G3$ 输出为低电平, 此时电路进入第 2 暂稳态。随着 u_2 高电平经 R 对 C 的反向充电, u_4 逐渐下降。当 u_4 低于 U_{th} 时, $G3$ 再次翻转, 电路又回到第 1 暂稳态。如此循环, 就形成了连续振荡。电路各点的工作波形如图 4-11 所示。

图 4-10 所示电路的振荡周期分为充电时间 t_{w1} 和放电时间 t_{w2} 两部分。根据 RC 电路的基本工作原理, 可以得到充电时间为

$$t_{w1} = RC \ln \frac{U_{oH} + U_{th}}{U_{oH} - U_{th}} \quad (4-12)$$

同理, 可求得放电时间为

$$t_{w2} = RC \ln \frac{U_{oL} - (U_{oH} + U_{th})}{U_{oL} - U_{th}} \quad (4-13)$$

式中, U_{oH} 和 U_{oL} 分别为非门输出的高电平电压和低电平电压。设 $U_{oH} = 3V$ 、 $U_{oL} = 0.3V$ 、 $U_{th} = 1.4V$, 则脉冲周期为

$$T = t_{w1} + t_{w2} \approx 0.6RC + 1.3RC \approx 1.9RC \quad (4-14)$$

从以上分析看出, 要改变脉宽和周期, 可以通过改变定时元件 R 和 C 来实现。由于图 4-10 电路中 R 的阻值不能过大 (700Ω 以下), 这就限制了频率的调节范围。如果在环形振荡器中增加一级射级跟随器, 可增大 R 的调节范围。在图 4-12 电路中, R 的取值可以达到 $10k\Omega$ 。若将晶体管改为场效应晶体管, R 的取值可以达到 $20M\Omega$ 。这样, 可以得到很宽的频率调节范围。

2. CMOS 门方波振荡电路

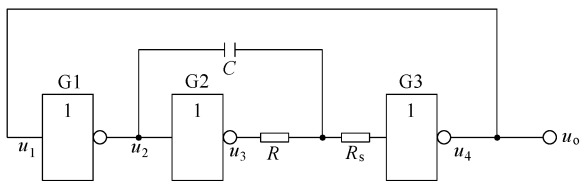


图 4-10 RC 延时环形方波振荡电路

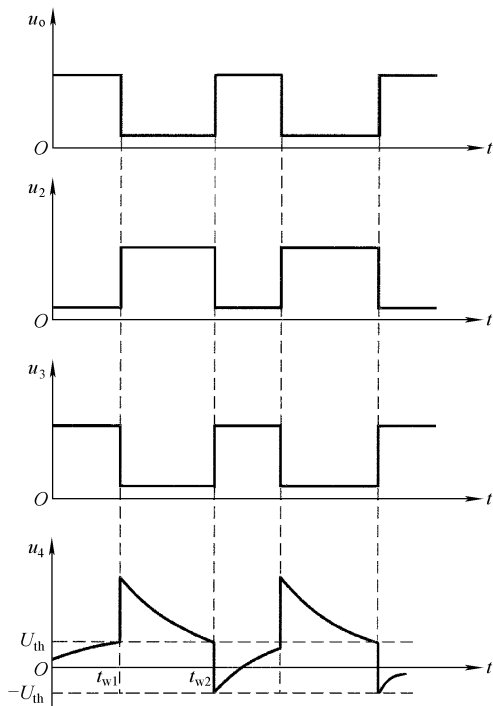


图 4-11 电路的工作波形图

由于 CMOS 门电路的输入阻抗高 ($>10^8 \Omega$), 对定时电阻阻值基本上没有限制, 所以不需要大容量电容就能获得较大的时间常数。而且 CMOS 门电路阈值电压 U_{th} 比较稳定, 因此常用 CMOS 电路来构成方波振荡电路, 尤其适用于频率稳定性和标准度要求不太严格的低频时钟振荡电路。

非对称式 CMOS 门方波振荡电路

图 4-13a 所示为一个由 CMOS 反相器与阻容元件构成的方波振荡电路。电阻 R_s 是反相器输入保护电阻, 接入与否并不影响振荡频率。该电路在接通电源 V_{DD} 后, 因 RC 串联电路中 C 的电压随电容充放电过程不断变化, 从而使两个反相器的状态不断发生翻转, 产生自激振荡。

接通电源后, 假设电路的初始状态 u_i 为低电平, G1 截止, u_{o1} 为高电平, G2 导通, u_{o2} 为低电平, 这一状态即为第 1 暂稳态。此时, R 两端的电位不相等, 于是电源经 G1、R 和 G2 对 C 充电, 使得 u_i 按指数规律上升。当 u_i 达到 G1 的闭值电压 U_{th} 时, G1 由截止变为导通, 电路发生如下正反馈过程: $u_i \uparrow \rightarrow u_{o1} \downarrow \rightarrow u_{o2} \uparrow \xrightarrow{\text{返回}} u_i$ 。即 G1 导通, G2 截止, u_{o1} 为低电平, u_{o2} 为高电平, 此为电路的第 2 暂稳态。在电路进入该状态的瞬间, G2 的输出电位 u_{o2} 由低电平上跳至高电平, 幅度约为 V_{DD} 。由于电容两极间电位不能突变, 使得 u_i 也上跳到 V_{DD} 。由于 CMOS 门电路的输入电路中保护二极管的钳位作用, 使 u_i 略高于 V_{DD} 。此时 R 两端电位不等, C 通过 R、G1 及 G2 放电, 使 u_i 不断下降。当 u_i 下降到 U_{th} 时, 电路发生如下正反馈过程: $u_i \downarrow \rightarrow u_{o1} \uparrow \rightarrow u_{o2} \downarrow \xrightarrow{\text{返回}} u_i$ 。使得 G1 截止, G2 导通, 即 u_{o1} = 高电平, u_{o2} = 低电平, 电路发生翻转, 又回到第 1 暂稳态。此后 C 重复充电、放电, 在输出端即可获得方波输出信号, 其电路工作波形如图 4-13b 所示。

考虑到 CMOS 门电路输入端钳位二极管的限幅作用, u_i 在发生正跳变时峰值不可能超过 $V_{DD} + U_F$ (U_F 为二极管的导通电压降), 发生负跳变时峰值不可能超过 $-U_F$ 。对 CMOS 电路, $U_{th} \approx V_{DD}/2$, 则第 1 暂稳态时间和第 2 暂稳态时间相等, G2 的输出 u_{o2} 为方波, 振荡周

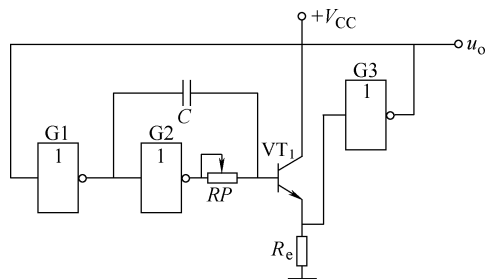
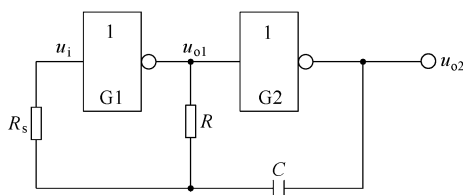
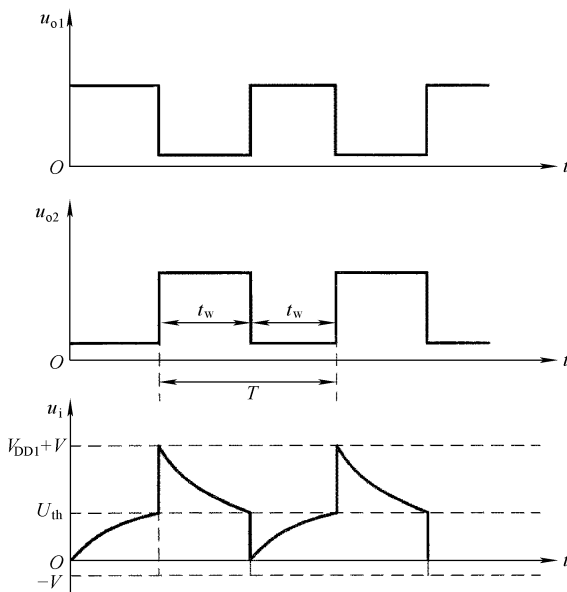


图 4-12 改进的 RC 延时环形方波振荡电路



a) 方波振荡电路图



b) 电路的工作波形图

图 4-13 非对称式 CMOS 门方波振荡电路和工作波形

期为

$$T = 2RC \ln \frac{u_{i1}(\infty) - u_{i1}(0_+)}{u_{i1}(\infty) - u_{i1}(t_1)} = 2RC \ln \frac{V_{DD} - 0}{V_{DD} - V_{DD}/2} = 2RC \ln 2 \approx 1.4RC \quad (4-15)$$

振荡频率为

$$f = 1/T = 1/1.4RC \quad (4-16)$$

对图 4-13a 所示电路, 若 $V_{DD} = 10V$, $U_{th} = 5V$, $U_F = 1V$, $R = 100k\Omega$, $C = 0.001\mu F$, 则电路的振荡频率为

$$T = t_{w1} + t_{w2} = RC \ln \frac{V_{DD} + U_F}{U_{th}} + RC \ln \frac{V_{DD} - U_F}{V_{DD} - U_{th}} = 1.557 \times 10^{-4} s$$

振荡频率为

$$f = 1/T = 6.3kHz$$

三、由施密特反相器构成的方波振荡电路

施密特反相器 (也称施密特触发器) 和普通反相器的最大不同点在于当其输入电压增大和减小时, 电路有不同的阈值电压 U_{T+} 和 U_{T-} , 其传输特性如图 4-14 所示。通常将 U_{T+} 称为正向阈值电压, U_{T-} 称为负向阈值电压, $\Delta U_T = U_{T+} - U_{T-}$ 称为回差电压。

施密特反相器常用于波形的整形与变换、脉冲幅度鉴别等, 也可用来构成方波振荡电路, 其典型电路如图 4-15 所示。该电路所需要元器件除了 CMOS 施密特触发器 74HC14 (或 4584B、40106) 以外, 只有一个电阻和一个电容。

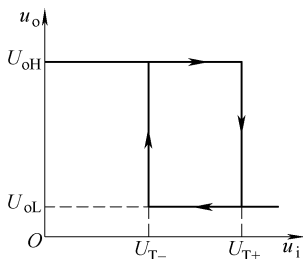


图 4-14 施密特反相器的传输特性

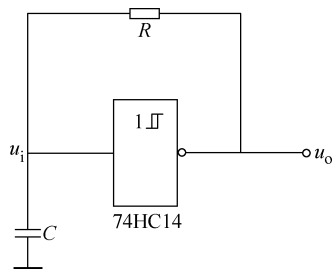


图 4-15 用施密特反相器构成的方波振荡电路

在接通电源的瞬间, 电容 C 上的电压为 $0V$, 输出 u_o 为高电平。随后 u_o 通过 R 对 C 充电, 当 u_i 达到 U_{T+} 时, 施密特反相器翻转, 输出为低电平。此后 C 开始放电, u_i 下降, 当 u_i 下降到 U_{T-} 时, 电路又发生翻转, u_o 变为高电平。如此周而复始, 形成振荡。

根据图 4-16 所示的电压波形可知, 电路的振荡周期等于电容充电时间 t_{w1} 和放电时间 t_{w2} 之和, 即

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

根据 RC 电路充放电规律有

$$t_{w1} = RC \ln \frac{U_{oH} - U_{T-}}{U_{oH} - U_{T+}} \quad t_{w2} = RC \ln \frac{U_{T+}}{U_{T-}} \quad (4-17)$$

所以有

$$T = t_{w1} + t_{w2} = RC \left(\ln \frac{U_{oH} - U_{T-}}{U_{oH} - U_{T+}} + \ln \frac{U_{T+}}{U_{T-}} \right) \quad (4-18)$$

占空比为

$$D = \ln \frac{V_{DD} - U_{T-}}{V_{DD} - U_{T+}} \left(\frac{V_{DD} - U_{T-}}{V_{DD} - U_{T+}} \times \frac{U_{T+}}{U_{T-}} \right)^{-1} \quad (4-19)$$

由于 CMOS 施密特反相器输入阻抗非常高, 在当负载电流较小情况下, $U_{oH} \approx V_{DD}$, $U_{oL} \approx 0$, 所以实际设计时, 可采用下式计算振荡周期:

$$T = t_{w1} + t_{w2} = RC \left(\ln \frac{U_{DD} - U_{T-}}{U_{DD} - U_{T+}} + \ln \frac{U_{T+}}{U_{T-}} \right) \quad (4-20)$$

需要注意的是, 当 C 的容量较大时, 为了防止它的放电电流对集成电路内部输入保护二极管流造成冲击, 应在施密特反相器的输入端接入电阻 R_s 进行限流。当 C 的容量较小时则可省去。

当采用 TTL 施密特反相器时, 为了保证输入端能够达到 U_{T-} , R 不能大于 470Ω , 其最小值则由门的扇出数确定 (不能小于 100Ω)。

由式 (4-19) 可知, 图 4-15 电路的振荡频率除了与时间常数 RC 有关外, 还与电源电压 V_{DD} 、正向阈值电压 U_{T+} 、负向阈值电压 U_{T-} 有关。因此, 该电路虽然结构简单, 但稳定性较差。

为了使输出信号的脉冲宽度可调, 可采用两个二极管和一个电位器将两个 RC 回路隔离开, 这样就可以对占空比进行调整, 如图 4-17 所示。

CMOS 数字集成电路输入阻抗高, 因此定时元件的电阻可以使用高阻值的电阻, 使得电路能够在超低频范围也能产生振荡。而当振荡频率高达数兆赫时, 要注意集成电路芯片本身的传输延迟时间的影响。

采用 74HC14 可实现较高的振荡频率, 但因此时定时元件 R 、 C 较小, 电路的杂散电容与器件输入电容 C_i 会对电路的稳定性产生影响如图 4-18 所示。温度与电源电压的变化都会使振荡频率发生变化。由于 C_i 接近 10pF , 因此, 实际中使用的定时电容最小值约为 100pF , 而 R 的最小值为 $1\text{k}\Omega$, 这样可计算出最高振荡频率约为 8MHz 。

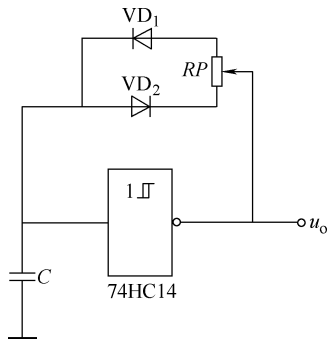


图 4-17 占空比可调的方波振荡电路

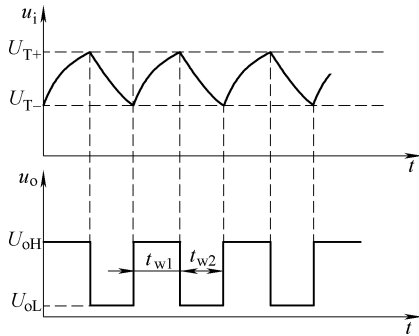


图 4-16 电路的工作波形图

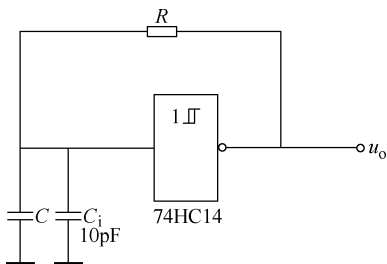


图 4-18 定时电容容量较小时的情况

当振荡频率很低时,除应使用高阻值的定时电阻外,定时电容的容量也应尽量大,但此时最好不要使用普通的铝电解电容。这是因为铝电解电容的绝缘电阻只有几兆欧姆,此时已不能忽略,它等效于一个电容 C 与一个电阻 R_1 的并联如图 4-19 所示。而且振荡频率越低, C 越大,漏电等效电阻 R_1 较低。在实际使用时一般要使用钽电解电容代替铝电解电容。

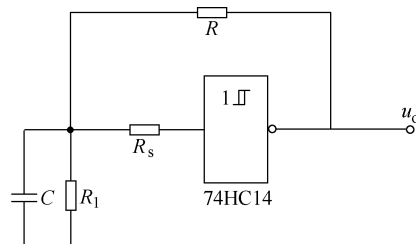
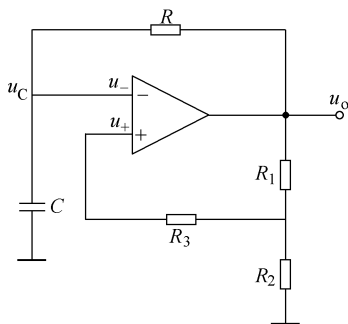


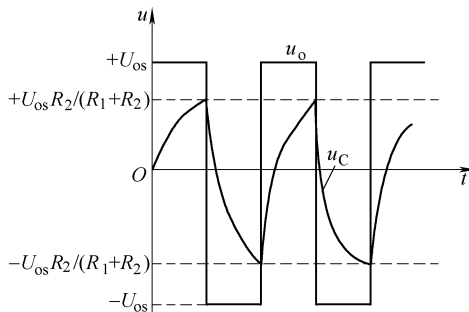
图 4-19 定时电容容量较大时的情况

四、由运算放大器构成的方波振荡电路

图 4-20 所示是由运算放大器构成的方波振荡电路。输出电压 u_o 经 R_1 和 R_2 分压,将部分电压通过 R_3 反馈到同相输入端作为基准电压,其基准电压 $u_{R2} = R_2/(R_1 + R_2)$ 与 u_o 同相位。同时, u_o 又经过 R 与电容 C 组成积分电路,将电容电压 u_C 作为输入电压接至反相端,与基准电压 u_{R2} 进行比较。



a) 电路图



b) 工作波形

图 4-20 由运算放大器的构成的方波振荡电路与工作波形图

假如在接通电源之前 $u_C = 0$, 则接通电源后由于干扰电压的作用, u_o 很快达到饱和值, 而其极性则是随机的。如设此时 $u_o = +U_{os}$ (正饱和值), 则同相输入端电压为 $u_+ = +U_{os} R_2/(R_1 + R_2)$ 。同时, 电容 C 通过 R 被充电, 反相输入端电压 $u_- = u_C$ 按指数规律上升。当 u_- 略大于 u_+ 时, 输出电压 u_o 反相变为负值, 并由于正反馈作用很快从正饱和值 $+U_{os}$ 变为负饱和值 $-U_{os}$ 。此时, $u_+ = -U_{os} R_2/(R_1 + R_2)$, 同时 C 通过 R 放电并进行反向充电。当 u_- 反向充电到比 u_+ 更为负时, u_o 又从 $-U_{os}$ 变为 $+U_{os}$ 。如此反复翻转, 输出端便可输出方波振荡信号。可以证明, 电路的振荡周期为

$$T = 2RC \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right) \quad (4-21)$$

由此可见, 电路振荡频率除与时间常数 R 、 C 有关外, 还与 R_1 与 R_2 比值有关。当 $R_1 = R_2$ 时, 有

$$T = 2RC \ln 3 \approx 2.2RC \quad (4-22)$$

在图 4-20 电路中, R 的取值范围一般为 $10k\Omega \sim 10M\Omega$ 。电容 C 在超低频率应用时需要大容量电容, 因铝电解电容绝缘电阻不够大, 稳定性不太好, 一应使用钽电解电容。假设 $C = 100\mu F$, $R = 10M\Omega$, 由式 (4-18) 可计算出振荡周期约为 2000s, 即 33min。但由于电容

的漏电，实际电路的延时时间要小很多。图 4-21 所示为振荡频率连续可调的实用方波振荡电路。

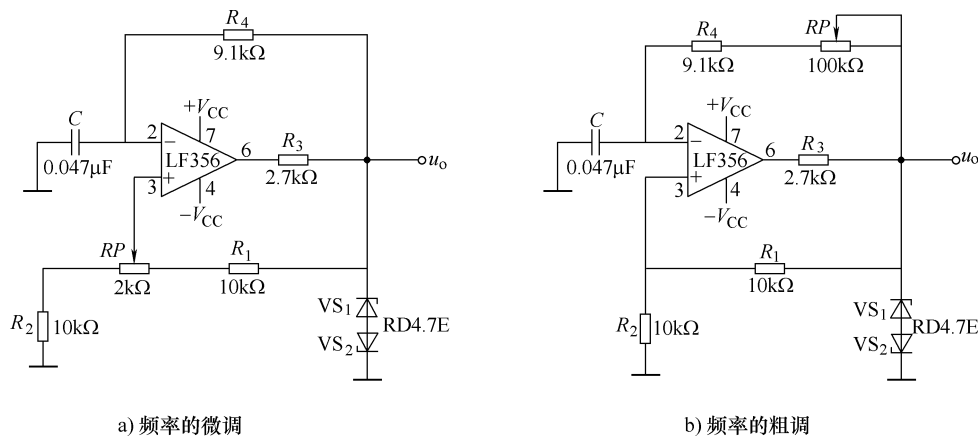


图 4-21 振荡频率可调的方波振荡电路

图 4-21a 是通过改变 R_1 和 R_2 的比值来调整频率，主要用于频率微调的场合；图 4-21b 是通过改变积分回路时间常数的方法来调整频率，调整范围比较宽。运算放大器的输出端接有稳压二极管构成的限幅电路，主要起输出稳振幅作用，并可通过选用不同稳压值的稳压二极管来任意设定输出电压的振幅，同时，输出信号的幅度也不受电源电压变化的影响。这是用运算放大器构成的方波振荡电路的优点所在。另外，为了双向稳幅，应使用相同稳压值的稳压二极管，这样可得到正负幅度大致对称的方波波形。由于受到运算放大器本身转换速度的限制，这种电路不适用于高频振荡，它比用门电路构成的方波振荡电路工作频率低很多，只适用于低频应用。

五、由 555 定时器构成的方波振荡电路

555 定时器是一种应用极为广泛的中规模集成电路。它将模拟电路和数字电路巧妙地结合在一起，使用灵活、方便，只需外接少量阻容元件就可构成脉冲发生器、施密特触发器等，因而被广泛应用于仪器、仪表的各种控制电路中。

555 定时器有双极型（如 NE555、5G555）和 CMOS 型（如 C7555）两种，它们的工作原理基本相同。通常，单极型具有较大的驱动能力，可直接驱动继电器、小电动机、指示灯及扬声器等负载，CMOS 定时器具有低功耗、输入阻抗高等优点。表 4-1 列出了 555 定时器的引脚功能，图 4-22 是它的内部结构功能框图。

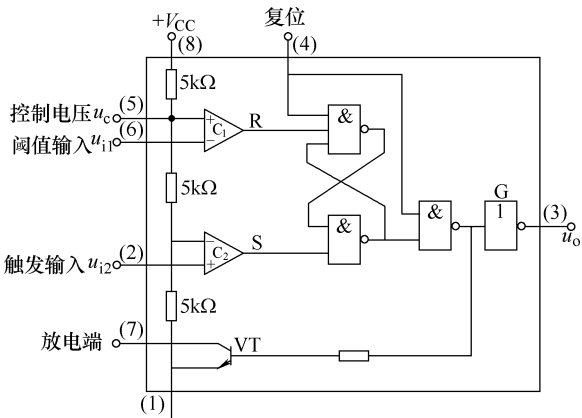
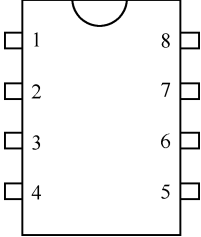


图 4-22 定时器内部功能框图

表 4-1 555 定时器的引脚功能

引脚图	引脚号	引脚名称	引脚功能
	1	GND	接地端，即电源负极
	2	TRI	触发输入端，简称低触发端，触发电压为 $V_{CC}/3$
	3	OUT	输出端，可将继电器、小电动机及指示灯等负载的一端与它相连，另一端接地或电源的正极
	4	RES	复位端，复位电压为 0.7V
	5	CONT	控制电压端，控制电压为 $2V_{CC}/3$
	6	THR	阈值输入端，简称高触发端，阈值电压为 $2V_{CC}/3$
	7	DISCH	放电端
	8	VCC	电源（+ V_{CC} ）

由图 4-22 可知，555 定时器由一个分压器、两个电压比较器 C_1 和 C_2 、一个基本 RS 触发器、一个放电管 VT 和一个输出缓冲器 G 5 个部分组成。定时器的主要功能取决于比较器，由其输出直接控制 RS 触发器和放电管的状态，从而决定整个电路的输出状态。当复位端为低电平时，不管其他输入端状态如何，输出 u_o 均为低电平，因此，正常工作时应将其接高电平。输出缓冲器 G 的作用是提高负载能力，并隔离负载对定时器的影响。

分压电路由 3 个阻值均为 $5k\Omega$ 的电阻串联构成（这也是该芯片称为 555 定时器的原因），为电压比较器 C_1 和 C_2 提供基准电压。由图 4-22 可知，当 5 脚悬空时， C_1 和 C_2 的比较电压分别为 $2V_{CC}/3$ 和 $V_{CC}/3$ 。当电压控制端外加控制电压时，比较器的参考电压将发生变化，电路的阈值电压、触发电平也将随之改变，并进而影响电路的定时参数。为了防止干扰，当不外加控制电压时，电压控制端一般用一个小电容（如 $0.1\mu F$ ）接地，以旁路高频干扰。

电压比较器 C_1 和 C_2 是两个结构完全相同的理想运算放大器。当 $u_{i1} > 2V_{CC}/3$ ， $u_{i2} > 2V_{CC}/3$ 时， C_1 的输出 R 为高电平， C_2 的输出 S 为低电平，基本 RS 触发器被置 0，放电管 VT 导通，输出端 u_o 为低电平；当 $u_{i1} < 2V_{CC}/3$ ， $u_{i2} < 2V_{CC}/3$ 时， C_1 的输出 R 为低电平， C_2 的输出 S 为高电平，基本 RS 触发器被置 1，放电管 VT 截止，输出端 u_o 为高电平；当 $u_{i1} < 2V_{CC}/3$ ， $u_{i2} > 2V_{CC}/3$ 时， C_1 和 C_2 输出均为低电平，基本 RS 触发器 $R=0$ 、 $S=0$ ，触发器状态不变，电路也保持原状态。由此可得到表 4-2 所示 555 定时器电压控制端悬空时的逻辑功能表。

表 4-2 555 定时器逻辑功能表

输入			比较器输出		输出	
阈值输入 (u_{i1})	触发输入 (u_{i2})	复位 (R_D)	R	S	输出 (u_o)	放电管 VT
×	×	0	×	×	0	导通
$< 2V_{CC}/3$	$< V_{CC}/3$	1	0	1	1	截止
$> 2V_{CC}/3$	$> V_{CC}/3$	1	1	0	0	导通
$< 2V_{CC}/3$	$> V_{CC}/3$	1	0	0	保持	保持

由 555 定时器构成的方波振荡电路如图 4-23a 所示，其工作波形见图 4-23b。

接通电源后电容 C 被充电， u_C 上升。当 u_C 上升到 $2V_{CC}/3$ 时，触发器被复位，同时放电

管 VT 导通, 输出 u_o 为低电平, C 通过 R_2 和 VT 放电, 使 u_C 下降。当 u_C 下降到 $V_{CC}/3$ 时, 触发器又被置位, u_o 翻转为高电平。这样周而复始, 即可从输出端 u_o 得到方波信号输出。

由图 4-23b 可知, 电容器 C 放电时间为

$$t_{w1} = R_2 C \ln^2 \approx 0.7 R_2 C \quad (4-23)$$

当电容器 C 放电结束时, VT 截止, 电源 V_{CC} 通过 R_1 、 R_2 向 C 充电, u_C 由 $V_{CC}/3$ 上升到 $2V_{CC}/3$, 所需时间为

$$t_{w2} = (R_1 + R_2) C \ln^2 \approx 0.7 (R_1 + R_2) C \quad (4-24)$$

因此, 电路输出的方波周期为

$$T = t_{w1} + t_{w2} \approx 0.7 (R_1 + 2R_2) C \quad (4-25)$$

$$f \approx 1.43 / (R_1 + 2R_2) C \quad (4-26)$$

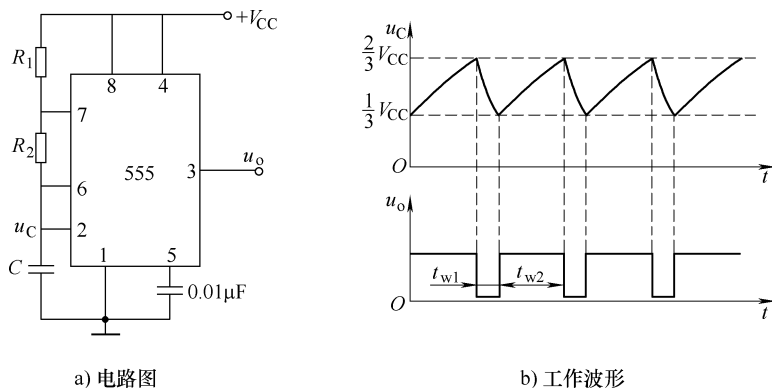


图 4-23 由 555 定时器构成的方波振荡电路

由于 555 定时器内部的比较器灵敏度很高, 而且采用了差分电路形式, 因此其振荡频率受电源电压和温度变化的影响很小。

图 4-23 所示电路正负脉冲宽度不等, 占空比固定不变。为了克服这个缺点, 可将其改进为图 4-24 所示的形式。利用二极管 VD_1 、 VD_2 的单向导电性将电容 C 的充放电回路隔离, 构成占空比可调的方波振荡电路。

在图 4-24 中, 电容器 C 通过 R_B 、 VD_2 及 VD_1 放电的时间为

$$t_{w1} \approx 0.7 R_B C \quad (4-27)$$

电源 V_{CC} 通过 R_A 、 VD_1 向 C 充电的时间为

$$t_{w2} \approx 0.7 R_A C \quad (4-28)$$

因此, 振荡频率为

$$f = 1 / (t_{w1} + t_{w2}) \approx 1.43 / (R_A + R_B) C \quad (4-29)$$

占空比为

$$D = R_A / (R_A + R_B) \quad (4-30)$$

用 555 定时器构成的方波振荡电路的变化形式很多, 但其基本原理大同小异。

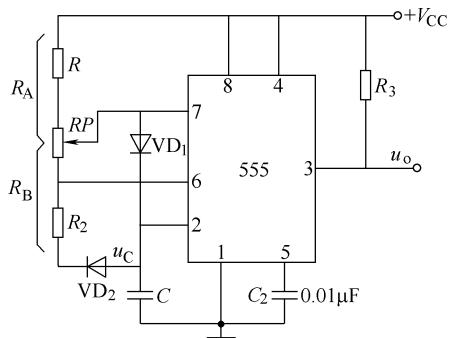


图 4-24 占空比可调的方波振荡电路

知识二 锯齿波振荡电路

锯齿波是一种常用非正弦波信号。锯齿波发生电路又称扫描电路或时基发生器,是示波器、电视机、数字电压表等电子设备中经常用到的一种单元电路。锯齿波信号的特点是电压(或电流)先随时间呈线性增加,随后迅速降落,再上升,再降落,如此反复。

一、锯齿波发生电路原理

如图 4-25 所示,描述锯齿波参数主要有:输出幅度 U_m (或 I_m)、扫描时间 T_1 、回扫时间 T_2 和周期 $T = T_1 + T_2$,而 U_m/T_1 (或 I_m/T_1) 称为扫描速率。

产生锯齿波的基本方法就是利用图 4-26a 所示的 RC 充放电电路。在 T_1 期间,电源 E 通过电阻 R 向电容 C 充电, C 两端电压按指数规律上升,即

$$u_o = E(1 - e^{-t/RC}) \quad (4-31)$$

此时合上开关 S , C 通过 S 放电,两端电压在 T_2 期间迅速下降为零。由于 T_1 只占指数曲线起始段的很小一部分,即 $T_1 \leq RC$,由式 (4-31) 得:

$$u_o \approx \frac{E}{RC}t \quad (4-32)$$

可近似认为在 T_1 期间 u_o 是线性增长的,这样,就可以在输出端得到如图 4-26b 所示锯齿状的输出电压波形。只要让开关 S 不断地打开、闭合就会在输出端得到锯齿波。在实际电路中,开关 S 通常是用晶体管开关电路实现的。

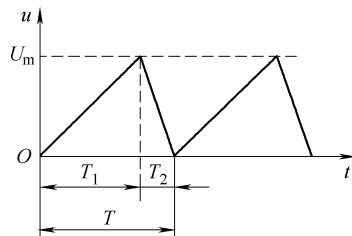
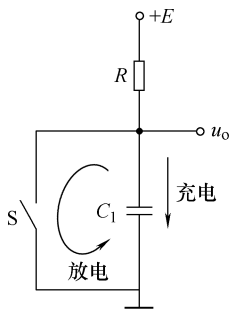
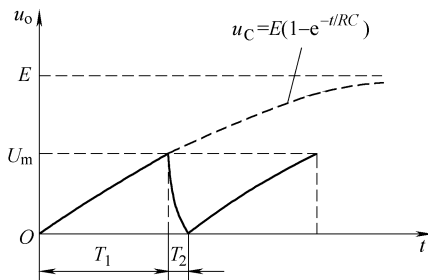


图 4-25 锯齿波参数



a) 电路图



b) 波形图

图 4-26 产生锯齿波的基本方法

衡量锯齿波发生电路质量好坏最基本的标准就是输出电压 u_o 的线性度。如果要使 u_o 有较好的线性度,就必须满足 $T_1 \leq RC$ 的条件。由式 (4-32),有

$$U_m = \frac{E}{RC}T_1 \quad T_1 = \frac{E}{RC}U_m \quad (4-33)$$

因此,在 E 为定值的条件下, U_m 越大,则 T_1 越大, u_o 的线性度也越差。为使 u_o 尽可能地线性变化, U_m 应尽可能地小,所以, u_o 的线性度和电源 E 的利用率是有矛盾的。

由上面分析可知,要提高锯齿波的线性度就应尽量增大时间常数 RC ,因此可采用提高电阻值 R 或电容量 C 这两个途径来提高线性度。对于第一个途径,可通过用一个恒流源对

电容充电来达到, 这相当于使 $R \rightarrow \infty$, $RC \rightarrow \infty$; 另一个途径则可通过引入深度负反馈来达到, 这相当于使 $C \rightarrow \infty$, $RC \rightarrow \infty$ 。

在实现电压线性上升之后, 应在一定电压值下完成翻转过程, 以使电压下降到原始值。要达到此目的, 可像图 4-27a 那样将一个具有负阻抗特性曲线的放电元器件 (如双向击穿二极管、辉光管、肖特基二极管、单结晶体管等) 与电容 C 并联。这类放电元器件在电压大于阈值电压时呈低阻性, 电压小于一定值呈高阻性, 其伏安特性如图 4-27b 所示。当电容两端电压达到开关阈值时, 电容将通过放电元器件放电; 放电结束后, 放电元器件又重新变为高阻状态, 电容又再次充电。这样, 放电元器件便与 RC 电路一起构成了如图 4-27a 所示的简易锯齿波发生电路, 其电压输出波形如图 4-27c 所示。

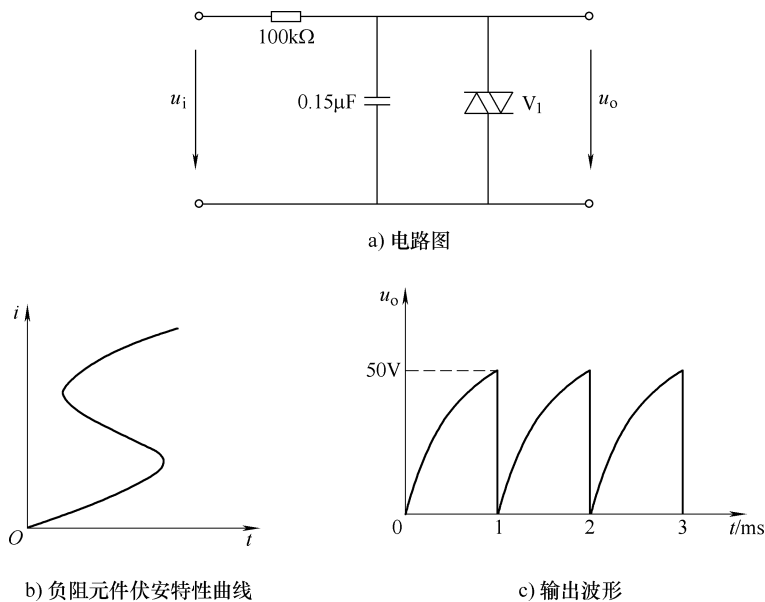


图 4-27 简易锯齿波发生电路原理

二、采用恒流充电的锯齿波振荡电路

锯齿波电路设计的关键是采取适当的措施来提高输出电压的线性度, 其中的一个简单有效方法就是采用恒定电流充电, 因为不用恒定电流充电时, 随着电容两端电压的升高, 充电电流会逐渐减小, 导致电荷的积累越来越慢, 从而形成了输出电压的非线性。如采用恒定电流 I 充电, 由于有

$$Q = It = Cu_c$$

即电容上积累的电荷与时间成比例, 从而有

$$u_c = \frac{I}{C}t \quad (4-34)$$

这样电容两端电压也就具有线性关系了。因此, 采用恒流充电时不受扫描时间 $T_1 \leq RC$ 条件的限制, 这样既保证了较好的线性度, 电源的利用率也很高。

恒流充电可用共基极电路来实现。这是因为在共基极电路中, i_c 几乎不随 u_{CB} 变化, 只要 i_E 保持恒定, i_c 也就恒定, 因而共基极电路可认为是一个恒流源。

图 4-28 为恒流源锯齿波发生电路的工作原理图。如在 t_1 时刻开关 S 断开, 电容 C 充电, 输出电压 u_o 将从 $-E_C$ 开始呈线性上升。在 t_2 时刻开关 S 闭合, 电容两端迅速放电, u_o 也迅速下降至 $-E_C$, 从而获得了线性度较好的锯齿波。

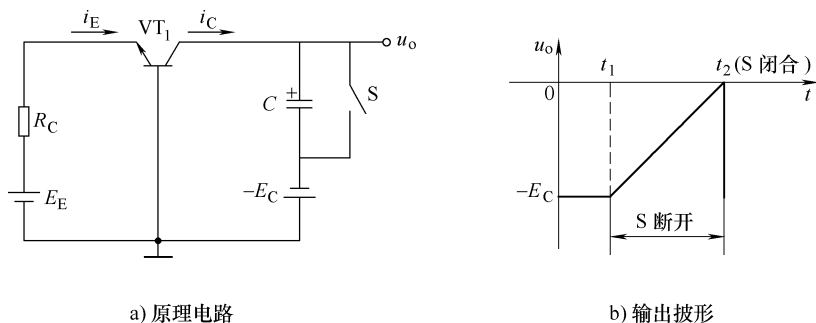


图 4-28 恒流源锯齿波发生电路工作原理图

将图 4-28 中的开关 S 用晶体管开关电路代替, 就可以组成一个实际的锯齿波发生电路, 如图 4-29 所示。图中各元器件的作用如下: VT_1 为恒流源; VT_2 起开关作用, 当基极输入为高电平时导通, 低电平时截止; 稳压管 VZ 的作用是使 VT_1 发射极电流 i_E 保持恒定; R_3 为限流电阻; R_1 、 R_2 为 VT_2 的正向偏置电阻。

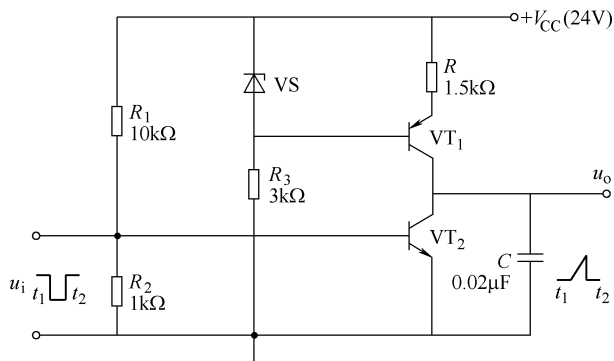


图 4-29 实际锯齿波发生电路

在图 4-29 中, u_i 为一方波脉冲, 当其起始电压为高电平时, VT_2 导通, 电容 C 两端电压约为 $0V$ 。在 $t_1 \sim t_2$ 期间, 输入端为低电平, VT_2 截止, VT_1 组成的恒流源对 C 充电, 这时 u_o 线性上升。在 t_2 时刻输入端又变为高电平, VT_2 重新导通, 电容 C 迅速放电, u_o 快速下降到 $0V$ 。这样就可以在输出端得到锯齿波电压。锯齿波的幅度可按下式计算:

$$U_m = \frac{V_{CC}}{RC} T_1 \quad (4-35)$$

式中, $T_1 = t_2 - t_1$ 为锯齿波扫描时间。显然, U_m 输入的负脉冲宽度有关。例如, 当 $V_{CC} = 24V$, $R = 1.5k\Omega$, $C = 0.02\mu F$ 时, 若 T_1 分别为 $0.1ms$ 、 $0.2ms$, 则 U_m 分别为 $8V$ 、 $16V$ 。

图 4-30 是输入负脉冲宽度分别为 $0.1ms$ 、 $0.2ms$ 和 $0.3ms$ 时的输出电压波形。

这里需要指出的是, 当负脉冲宽度大于 $0.2ms$ 时, U_m 总是等于 $16V$ 。这是由于 R 分压引起的。当 $V_{CC} = 24V$ 时, 加至 VT_2 集电极和发射极两端的电压只有 $16V$ 。因此, 当负脉冲过宽时, 锯齿波将出现如图 4-30c 所示的平顶现象。

由于恒流源锯齿波发生电路采用共基极电路, 输出阻抗极高, 必须用射极输出器来提高

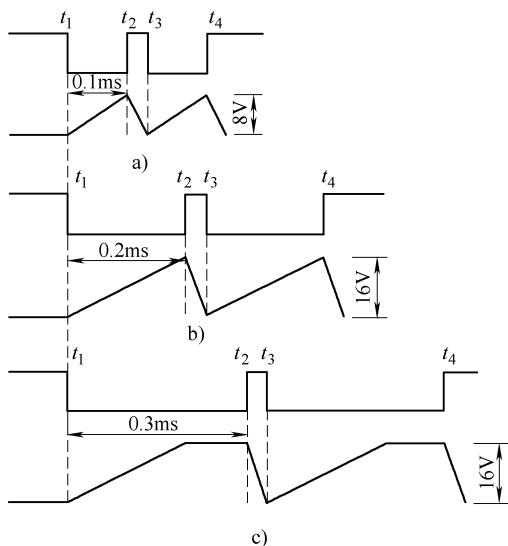


图 4-30 不同负脉冲宽度时的输出电压波形

带负载能力。

三、由运算放大器构成的锯齿波振荡电路

如果积分电路正向积分的时间常数远大于反向积分的时间常数，或者反向积分的时间常数远大于正向积分的时间常数，那么输出电压 u_o 上升和下降的斜率就会相差很大，就可以输出锯齿波振荡信号。利用二极管的单向导电性可使积分电路两个方向的积分通路不同，就可以得到锯齿波发生电路，如图 4-31a 所示，其中 $R_{RP} \geq R_3$ 。

设二极管导通时的电阻可忽略不计，电位器 RP 的滑动端移到最上端。当 $u_o = +U_Z$ 时 (U_Z 为稳压二极管的稳压值)， VD_1 导通， VD_2 截止，输出电压为

$$u_{o2} = -\frac{1}{R_3 C} U_Z (t - t_0) + u_{o2}(t_0) \quad (t_1 < t < t_0) \quad (4-36)$$

u_{o2} 随时间线性下降。当 $u_{o1} = -U_Z$ 时， VD_2 导通， VD_1 截止，输出电压为

$$u_{o2} = -\frac{1}{(R_3 + R_{RP}) C} U_Z (t - t_1) + u_{o2}(t_1) \quad (t_2 < t < t_1) \quad (4-37)$$

u_{o2} 随时间线性上升。由于 $R_{RP} \geq R_3$ ， u_{o1} 和 u_{o2} 的波形如图 4-31b 所示。

由式 (4-36) 和式 (4-37) 可得出下降时间为

$$T_1 = t_1 - t_0 \approx 2 \frac{R_1}{R_2} R_3 C$$

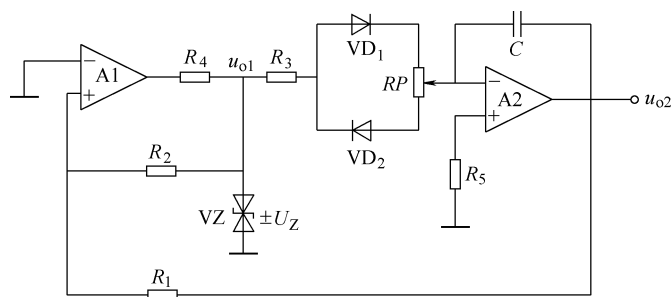
上升时间为

$$T_2 = t_2 - t_1 \approx 2 \frac{R_1}{R_2} (R_3 + R_{RP}) C$$

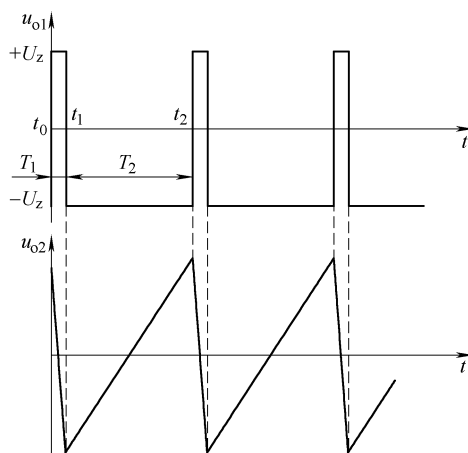
振荡周期为

$$T = T_1 + T_2 = \frac{2R_1(2R_3 + R_{RP})C}{R_2} \quad (4-38)$$

因为 $R_{RP} \geq R_3$ ，所以 $T \approx T_2$ ，输出为锯齿波信号。



a) 原理图



b) 工作波形

图 4-31 运算放大器构成的锯齿波振荡电路及工作波形

由式 (4-36) 和式 (4-37) 可得 u_{o1} 的占空比为

$$D = \frac{T_1}{T} = \frac{R_3}{2R_3 + R_{RP}} \quad (4-39)$$

该电路通过调整 R_1 和 R_2 可以改变锯齿波的幅值；调整 R_1 、 R_2 、 R_{RP} 和 C ，可以改变振荡周期；调整电位器滑动端的位置，可以改变 u_{o1} 的占空比以及锯齿波上升和下降的斜率。

知识三 三角波振荡电路

锯齿波与三角波的区别是：三角波上升和下降的斜率相等，而锯齿波上升和下降的斜率不相等。

对由运算放大器构成的方波振荡电路，当滞回比较器的阈值电压值比较小时，可将电容两端的电压看成近似三角波。但是，一方面这个三角波的线性度较差，另一方面带负载后将使电路的性能发生变化。实际上，只要将方波电压作为积分运算电路的输入，在积分运算电路的输出端就能得到三角波电压输出，如图 4-32a 所示。当方波发生电路的输出电压 $u_o = +U_z$ 时，积分运算电路的输出电压 u_{o2} 将线性下降；而当 $u_{o1} = -U_z$ 时， u_{o2} 将线性上升，波形如图 4-32b 所示。该电路实际上就是将方波变换为三角波。

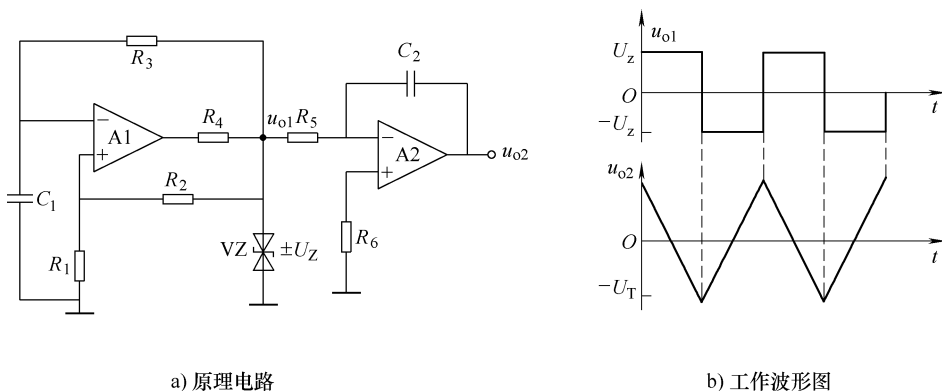


图 4-32 由运算放大器构成的三角波发生电路

在实用电路中，一般不采用上述波形交换的手段获得三角波，而是将方波发生电路中的 RC 充放电回路用积分运算电路来替代，滞回比较器和积分电路的输出互为另一个电路的输入，如图 4-33 所示。由 A1 构成的带有回差的滞回比较器的电压传输特性如图 4-34 所示。

在图 4-33 电路中，有

$$u_{o2} = -\frac{1}{R_3 C} U_Z (t - t_0) + u_{o2}(t_0) \quad (t_0 < t < t_1) \quad (4-40)$$

积分电路反向积分， u_{o2} 随时间的增长线性下降。当 $u_{o1} = -U_T$ 时， u_{o1} 将从 $+U_Z$ 跃变为 $-U_Z$ ，使得：

$$u_{o2} = -\frac{1}{R_3 C} U_Z (t - t_0) + u_{o2}(t_1) \quad (t_0 < t < t_1) \quad (4-41)$$

式中， $u_{o2}(t_1)$ 是 u_{o1} 产生跃变时的输出电压，积分电路正向积分， u_{o2} 随时间线性增大。一旦 $u_{o2} = +U_T$ ， u_{o1} 将从 $+U_Z$ 跃变为 $-U_Z$ ，回到初态，积分电路又开始反向积分。电路重复上述过程，产生自激振荡。

由以上分析可知， u_{o2} 是三角波，幅值为 $\pm U_T$ ； u_{o1} 是方波，幅值为 $\pm U_Z$ ，电路的输出波形如图 4-35 所示。

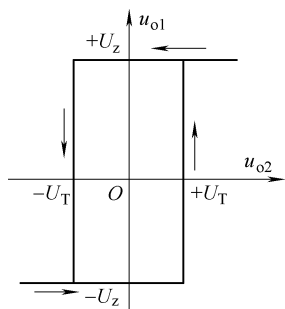


图 4-34 滞回比较器的电压传输特性

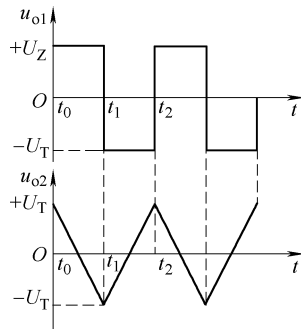


图 4-35 三角波振荡电路波形

由于图 4-33 所示电路能够同时产生方波和三角波, 所以该电路也称为三角波-方波发生电路。由于积分电路引入了深度电压反馈, 所以即使负载电阻在相当大的范围内变化, 三角波输出电压也几乎不变。由图 4-35 可知, 正向积分的起始值为 $-U_T$, 终了值为 $+U_Z$, 积分时间是振荡周期的一半, 故 $+U_T = \frac{1}{R_3 C} U \times \frac{T}{2} + (-U_T)$; 式中, $u_T = \frac{R_1}{R_2} U_Z$ 。所以振荡周期为

$$T = 4R_1 R_3 C / R_2 \quad (4-42)$$

振荡频率为

$$f = R_2 / 4R_1 R_3 C \quad (4-43)$$

调节 R_1 、 R_2 、 R_3 和 C , 都可以改变振荡频率; 而调节 R_1 和 R_2 , 可以改变三角波的幅值。

知识四 波形变换电路

从三角波和锯齿波发生电路的分析可知, 这类波形发生电路的基本设计思路是将一种形状的波形变换成另一种形状的波形, 即实现波形交换。由于电路中的两部分互为输入、输出, 因此可以产生自激振荡。实际上, 利用一些基本电路就可以实现波形交换。例如, 利用积分电路可将方波变为三角波, 利用电压比较器可将正弦波变为方波, 利用模拟乘法器可将正弦波二倍频等。

一、三角波变锯齿波电路

三角波信号如图 4-36a 所示, 经波形变换电路获得的锯齿波信号如图 4-36b 所示。分析两个波形的关系可知, 当三角波上升时, 锯齿波与之相等, 即

$$u_o : u_i = 1 : 1 \quad (4-44)$$

三角波下降时, 锯齿波与之相反, 即

$$u_o : u_i = -1 : 1 \quad (4-45)$$

因此, 此波形变换电路应为比例运算电路, 当三角波上升时, 比例系数为 1; 当三角波下降时, 比例系数为 -1。利用可控的电子开关, 可以实现比例系数的变化。三角波变锯齿波电路如图 4-37 所示。

其中电子开关 S 为示意图, u_c 是电子开关的控制电压, 它与输入三角波电压的对应关系如图中所示。当 u_c 为低电平时, 开关断开; 当 u_c 为高电平时, 开关闭合。分析含电子开关的电路时, 应分别求出开关断开和闭合两种情况下输出和输入间的函数关系, 而且为了简单起见, 常常忽略开关断开的漏电流和闭合时的电压降。

当开关断开时, u_i 同时作用于集成运放的反相输入端和同相输入端, 根据虚短和虚断的概念

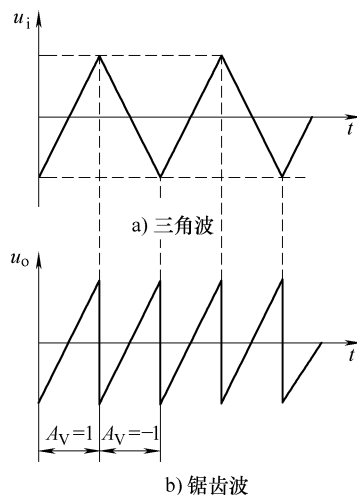


图 4-36 三角波与锯齿波的比较

$$u_- = u_+ = \frac{R_5}{R_3 + R_4 + R_5} u_i = \frac{u_i}{2} \quad (4-46)$$

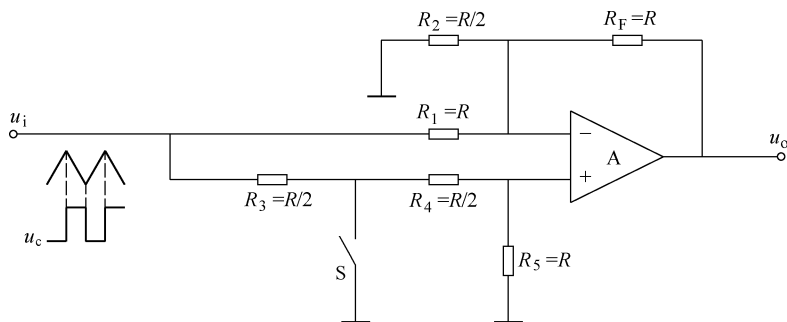


图 4-37 三角波变锯齿波的电路

反向输入端的电流方程为

$$\frac{u_i - u_N}{R_1} = \frac{u_-}{R_2} + \frac{u_- - u_o}{R_f} \quad (4-47)$$

将 $R_1 = R_f = R$ 、 $R_2 = R/2$ 和式 (4-46) 代入上式, 得

$$u_o = -u_i \quad (4-48)$$

当开关闭合时, 集成运放的同相输入端和反向输入端为虚地, $u_+ = u_- = 0$ 。电阻 R_2 中电流为零, 等效电路是反比例运算电路, 因此有

$$u_o = -u_i \quad (4-49)$$

式 (4-48) 和式 (4-49) 符合式 (4-44) 和式 (4-45) 的要求, 从而实现了将三角波转换成锯齿波。

二、三角波变正弦波电路

图 4-38 是采用开关电容滤波器实现的三角波到正弦波转换的电路。在图 4-38 电路中, 方波时钟脉冲 CP 经过可逆计数器进行十进制计数。每计 10 个脉冲为一个周期, 计数器前 5 个脉冲为加计数状态, 计数器后 5 个脉冲为减计数状态。这样, 计数器的输出经过电阻叠加后形成阶梯三角波, 并加到开关电容滤波器上。

此电路由一个可预置的 N 计数器 CD4018B 和一个 8 阶开关电容调滤波器 MAX29 构成。

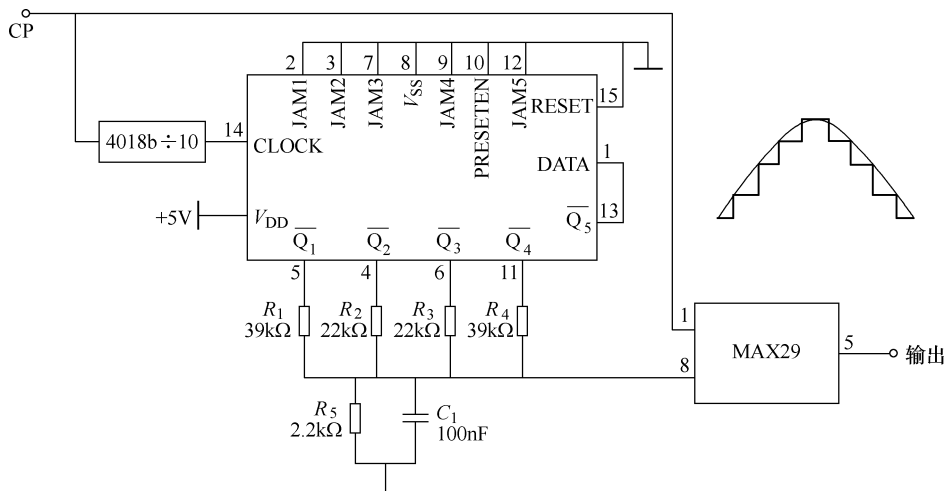


图 4-38 采用开关电容滤波器的三角波到正弦波的转换电路

时钟脉冲输入 CP 的一部分驱动 MAX29，另一部分被第 1 个 10 进制计数器 (4018B) 分频，再由第 2 个 10 进制计数器分频，输出的阶梯波经 $R_1 \sim R_5$ 和 C_1 的作用转变为平滑的三角波，再经 MAX29 滤波后输出。电路的输出频率随输入时钟而变化，其关系为 $f_{\text{out}} = f_{\text{in}}/100$ 。

开关电容带通滤波器的工作原理可以用图 4-39 来说明。时钟脉冲驱动的开关器件 S 将 N 个电容器逐个地轮流接入电路，如图 4-39a 所示，每个电容器连接的时间 $1/Nf_c$ ，其中 N 为开关的数目， f_c 为开关频率， $C_1 = C_2 = \dots = C_N$ 。如果输入信号频率和开关频率或开关频率的谐波相等，则每个周期接入的电容器都在输入信号波形每个周期的某个固定位置接入，每个电容器都分别被充电到相应的输入电压值，所以滤波器的输出是一个类似于输入信号波形的阶梯波，如图 4-39b 所示。如果输入信号频率高于或低于电容器的接入频率 f_c ，则电容器接入时的位置不确定，这时电容器上的平均电压非常低，几乎没有输出信号，这样就实现了带通滤波。只要改变开关频率，即时钟脉冲频率，就可以方便地改变带通滤波器的中心频率，构成跟踪滤波器。

开关电容滤波器具有以下优点：

1) 中心频率 f_0 由时钟脉冲频率 f_c 控制，改变中心频率时不需改换电路元器件，因此不仅中心频率的调节范围很宽，而且可以遥控。

2) 如 $C_1 = C_2 = \dots = C_N = C$ ，则滤波器的带宽 Δf 正比于 $1/NRC$ ，故 Δf 可以通过一个电阻很方便地调节，电路 Q 值可以做得很高。

3) 因为中心频率和带宽是分别调节的，调节时互不影响。

4) 滤波器选通频率的稳定性主要取决于时钟脉冲的稳定性，如果采用石英晶体时钟脉冲来驱动开关电容滤波器，则滤波器的稳定性极高。

5) 在同一中心频率的情况下，可采用较小的元器件值。

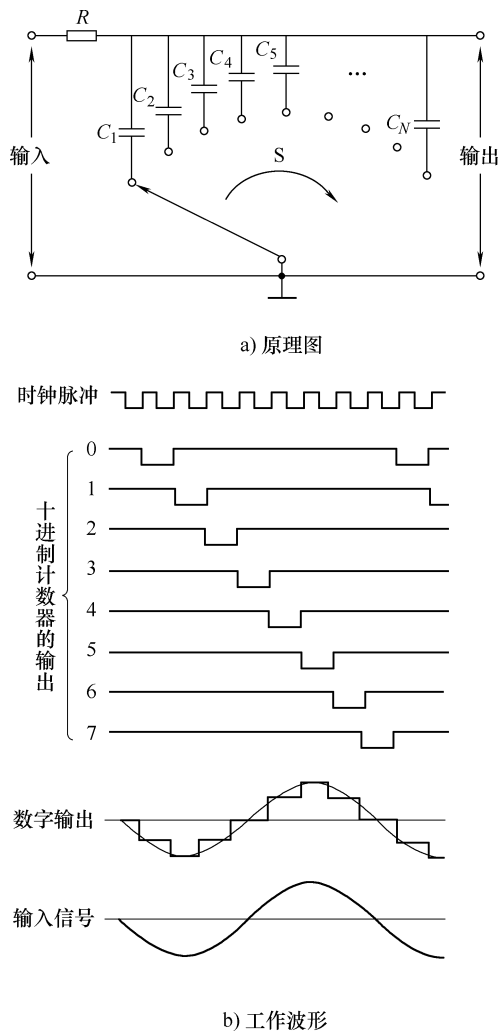


图 4-39 开关电容带通滤波器的工作原理

任务与实施

1. 任务

波形产生电路。

2. 实验原理与说明

本实验采用 LM324 集成运算放大器和外接反馈网络构成基本运算电路，LM324 的外部

引脚功能，如图 4-40 所示。

(1) 比较器

图 4-41 所示为过零比较器，运算放大器工作在非线性状态，其输入和输出电压的关系为

$$\begin{aligned} u_i > 0 \quad u_o &= -U_Z \text{ 或 } u_o = -U_Z \\ u_i < 0 \quad u_o &= +U_Z \text{ 或 } u_o = +U_Z \\ u_o &= 0 \text{ 状态转换} \end{aligned}$$

当 u_i 为正弦波时， u_o 为方波。

(2) 方波-三角波发生器

图 4-42 为方波-三角波发生器，它由滞回比较器和 RC 积分电路组成。其工作原理是：当 $u_+ > u_-$ 时， $u_o = +U_Z$ ，此电压通过 R_2 给电容 C 充电，即 u_- 上升；当 $u_- > u_+$ 时， $u_o = -U_Z$ ，电容 C 通过 R_2 放电。电容的反复充放电，在输出端得到方波，在电容 C 两端得到三角波。

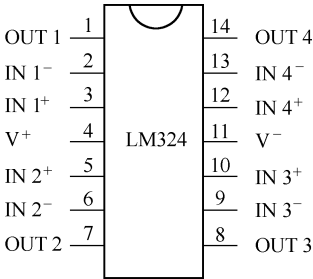


图 4-40 LM324 的外部引脚功能

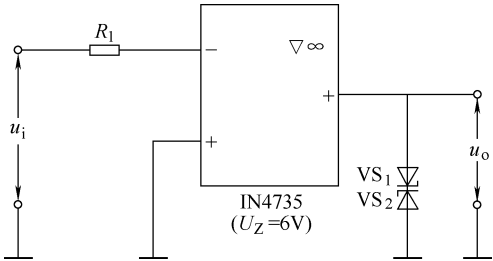


图 4-41 比较器

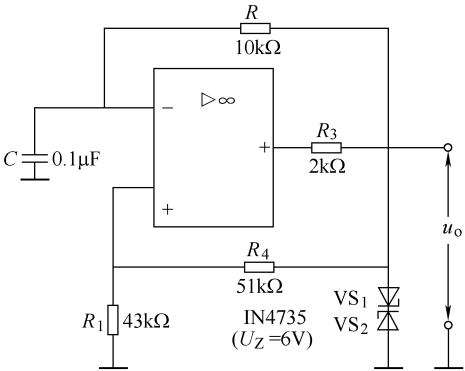


图 4-42 方波-三角波发生器

3. 任务实施器材

- 1) 低频信号发生器 1 台。
- 2) 直流稳压电源 1 台。
- 3) 双踪示波器 1 台。
- 4) 交流毫伏表 1 只。
- 5) 万用表 1 只。

6) 仪器仪表、元器件手册。

4. 任务实施过程

(1) 比较器

1) 接通信号源, 使其输出信号为 100mV、1kHz 的正弦波。

2) 用毫伏表测量输出电压 u_o 。

3) 将示波器接在电路的 u_i 和 u_o 端, 观察并绘制波形。

(2) 方波-三角波发生器

1) 接成图 4-43 所示电路。检查无误后, 接通电源。

2) 用毫伏表测量输出电压 u_o 与电容两端电压 u_c 。

3) 将示波器接在电路 u_c 和 u_o 端, 观察并绘制波形。

5. 注意事项

1) 在焊接集成运算放大器之前, 应正确识别引脚功能。

2) 在实验中, 应防止输出端的两个稳压管开路。

思考题

1. 在图 4-42 中, 若输入信号幅度为 200mV 或 10mV 时, 输出电压 u_o 应分别为多少? 若两个稳压管有一个开路, 输出电压又为多少?

2. 在图 4-42 中, 若输入信号频率为 10kHz, 幅度为 100mV, 输出电压的频率和幅度各为多少?

3. 在图 4-42 中, 改变 R_2 , 输出端波形会发生什么变化?

4. 利用集成运算放大器 LM324 设计一个 $f_0 = 1\text{kHz}$, $u_o = 8\text{V}$ 的方波-三角波发生器, 画出电路, 并标出所用元器件的参数。

项目五 综合训练与提高

项目导读

从项目任务出发，通过课堂听课、教师引导、小组讨论、芯片功能查找、电路焊接、功能调试，即“教、学、做”一体，掌握完成任务所需知识点和相应的技能。

【知识要求】

- 熟悉集成块的主要技术参数及引脚功能
- 了解石英晶体振荡器的工作原理及特点
- 掌握晶体振荡器电路的基本构成形式及参数计算方法
- 由 555 定时器构成多谐振荡器电路特点及应用
- 555 定时器应用电路的功能分析及参数计算
- 熟悉正反馈而产生自激振荡的条件以及对振荡波形的影响
- 理解 RC 桥式振荡器的构成和工作原理

【能力要求】

- 掌握 555 定时器的功能分析及功能测试方法，锻炼学习资料的查询能力
- 熟悉振荡器参数对振荡频率的影响，学习振荡频率的测量方法
- 观察 RC 参数对振荡频率的影响
- 能够应用 555 定时器设计功能电路
- 观察、比较振荡器电路的性能、特点

任务一 555 定时器的应用

一、目标

1. 知识目标

- 1) 了解 555 定时器的结构、工作原理、引脚功能。
- 2) 了解由 555 定时器构成多谐振荡器，掌握多谐振荡器的功能特点、参数计算。
- 3) 熟悉 555 定时器的典型应用。

2. 能力目标

- 1) 掌握 555 定时器的功能分析及功能测试方法。
- 2) 能应用 555 定时器设计功能电路。
- 3) 锻炼学习资料的查询能力。

二、原理与说明

555 定时器是一种电路结构简单、使用方便灵活、应用非常广泛的模拟与数字电路相结合的中规模集成电路。它具有较强的负载能力和较高的触发灵敏度，因而在自动控制、仪器仪表、家用电器等许多领域都有着广泛地应用。

555 电路类型分单极性（CMOS）和双极性（TTL）两种。大多数情况下，两种定时器可以相互代替。555 电路的电源电压范围较宽，可在 4.5 ~ 18V 范围内工作。其驱动电流大，灌电流（外部电流通过芯片引脚向芯片内流入的电流称为灌电流）可达 200mA，并能提供与 TTL、MOS 电路一致的逻辑电平。

在 555 定时器外部连接少许阻容元器件可构成单稳态触发器、施密特触发器和多谐振荡器。

单稳态触发器只有一个稳态，在输入触发信号作用下，由稳态进入暂稳态，经一段时间后，自动回到原来的稳态，输出单脉冲信号。单稳态触发器主要用于脉冲整形、定时、脉宽展宽等。

施密特触发器有两个稳态，具有滞后电压传输特性，主要用于波形变换、整形及脉冲幅度鉴别等。

多谐振荡器是一种自激振荡电路，它无稳态，只有两个暂稳态。接通电源后，无需外加触发脉冲信号，依靠电容的充放电电路便能在两个暂稳态之间相互翻转，产生矩形脉冲信号。

三、实验仪器与设备

- 1) 实验电路实验台 1 个。
- 2) 双踪示波器 1 台。
- 3) 555 定时器 1 片。
- 4) 电位器、电阻、电容若干。

四、实验内容和步骤

1. 555 芯片功能测试

图 5-1 为 555 定时器芯片引脚图。

- 1) 对照表 5-1, 熟悉 555 定时器各引脚功能与使用。
- 2) 按表 5-1 测试 555 芯片输入与输出关系, 熟悉其工作特点。

注意: V_{CC} 外加电压可置 5V, 控制电压端 V_M 外加电压可改变定时器中比较器的参考电压, 若不用, 可通过电容 (0.01 μ F) 接地。

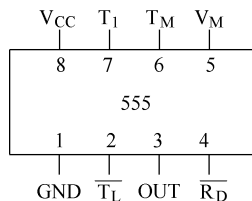


图 5-1 555 定时器芯片引脚图

表 5-1 555 定时器逻辑功能表

输入			输出	
阈值输入 (T_H)	触发输入 (T_L)	复位 (R_D)	输出 (OUT)	放电管 T_1
$\times$	$\times$	0	0	导通
$< 2V_{CC}/3$	$< V_{CC}/3$	1	1	截止
$> 2V_{CC}/3$	$> V_{CC}/3$	1	0	导通
$< 2V_{CC}/3$	$> V_{CC}/3$	1	保持	保持
$> 2V_{CC}/3$	$< V_{CC}/3$	1	1	截止

2. 集成定时器 555 构成单稳态电路

图 5-2 是由 555 定时器和外接定时元件 R_2 、 C_3 构成的单稳态触发器。

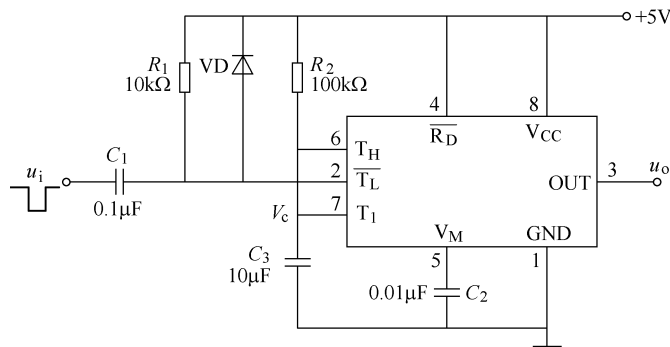


图 5-2 单稳态触发器

图中, VD 为钳位二极管, C_1 、 R_1 、VD 构成触发电路。暂态的持续时间 t_w 取决于外接元件 R_2 、 C_3 值的大小 ($t_w = 1.1R_2 \times C_3$)。通过改变 R_2 、 C_3 的大小, 可使持续时间在几个微秒到几十分钟之间变化。

1) 按图 5-3 所示接线, 取 $R_2 = 100k\Omega$ 、 $C_3 = 47\mu F$, 输入信号 u_i 由单次脉冲源提供, 用双踪示波器观察 V_c 、 u_o 波形的变化。测定输出的幅度与暂稳时间。

2) 将 R_2 的值改为 $1k\Omega$, C_3 的值改为 $0.1\mu F$, 输入端加 $1kHz$ 的连续脉冲, 用双踪示波器观察 u_i 、 V_c 、 u_o 波形。测定输出 u_o 波形幅度与暂稳时间。

3. 用集成定时器 555 构成多谐振荡器

由 555 定时器和外接元件 R_1 、 R_2 、 C 构成多谐振荡器, 如图 5-3 所示。

电路没有稳态, 仅存在两个暂稳态, 电路也不需要外接触发信号。

输出信号的时间参数是: $T = t_{w1} + t_{w2}$

式中, $t_{w1} = 0.7 (R_1 + R_2) C$; $t_{w2} = 0.7 R_2 C$ 。

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

555 定时器配以少量的元件即可获得较高准确度的振荡频率和具有较强的功率输出能力。因此这种形式的多谐振荡器应用很广。

按图 5-3 所示接线, 用双踪示波器观察 V_C 、 u_o 的波形, 测定频率, 画出输出波形图。

4. 集成定时器 555 构成施密特触发器

如图 5-4 所示, 只要将 555 定时器阈值输入端 6 和触发输入端 2 连接在一起作为信号输入端, 即可构成施密特触发器。设输入信号 u_i 为半波整流波形。当 u_i 上升到 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 时, u_o 从高电平翻转为低电平; 当 u_i 下降到 $\frac{1}{3}V_{CC}$ 时, u_o 从低电平翻转为高电平。

$$\text{回差电压 } \Delta u = \frac{2}{3}V_{CC} - \frac{1}{3}V_{CC} = \frac{1}{3}V_{CC}。$$

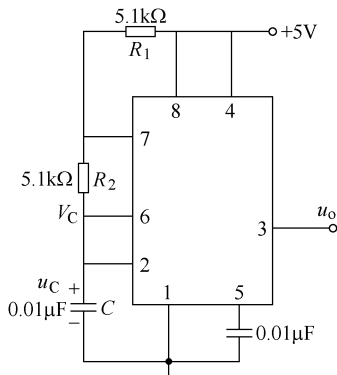


图 5-3 多谐振荡器

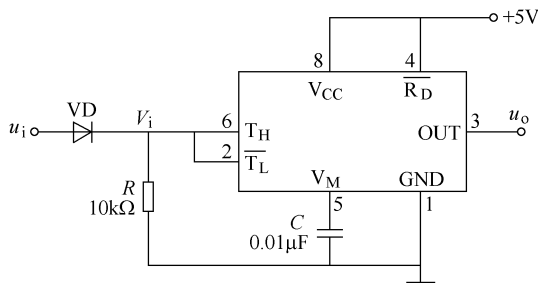


图 5-4 施密特触发器

1) 按图 5-4 所示接线。输入正弦信号由音频信号源提供, 预先调好 u_i 的频率为 $1kHz$, 接通电源, 逐渐加大 u_i 的幅度, 观察输出 u_o 的波形。

2) 测试 u_o - u_i 电压传输特性, 算出回差电压 Δu 。

5. 模拟声响电路

1) 按图 5-5 所示接线, 组成两个多谐振荡器, 调节定时元件, 使 I 输出较低频率, II 输出较高频率, 连好线, 接通电源, 试听音响效果。调换外接阻容元件, 再试听音响效果。

2) 试分析电路工作原理。

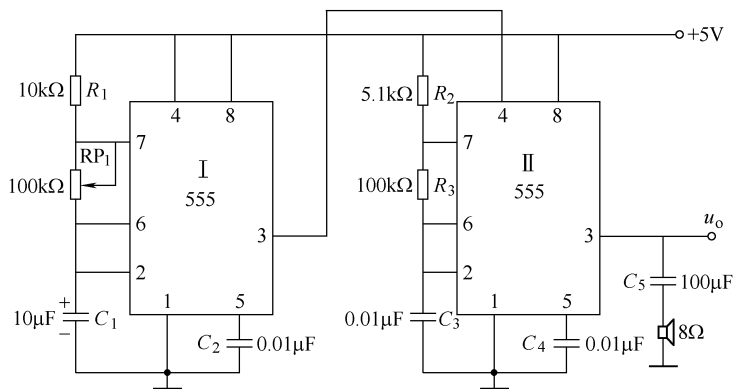


图 5-5 模拟声响电路

五、注意事项

1) 由双极型构成的 555 定时器的电源电压为 $+5 \sim +15\text{V}$ ，输出的最大电流可达 200mA ，CMOS 型的电源电压为 $+3 \sim +18\text{V}$ 。

2) V_M 是控制电压端（5 脚），平时输出 $\frac{2}{3}V_{CC}$ 作为比较器的参考电平，当 5 脚外接一个输入电压，即改变了比较器的参考电平，从而实现对输出的另一种控制。

3) 在不接外加电压时，通常在 5 脚接一个 $0.01\mu\text{F}$ 的电容到地，起滤波作用，以消除外来的干扰，确保参考电平稳定。

六、实验报告

- 1) 总结 555 定时器的功能与使用。
- 2) 总结单稳态触发器、多谐振荡器、施密特触发器的功能，绘出在对应电路中观测到的输出波形。
- 3) 试分析模拟声响电路工作原理。

七、思考题

- 1) 在实验中 555 定时器 5 脚所接的电容起什么作用？
- 2) 什么是占空比？如何组成占空比可调的多谐振荡器？
- 3) 由 555 定时器组成 50Hz 多谐振荡器。参考电路原理图如图 5-6 所示。

① 画出原理图，确定实际电路连接图。

② 列出元器件清单，领取元器件。

③ 焊接电路。注意元器件布局，检查焊点质量以及有无电源短路、连焊、虚焊、漏焊现象。

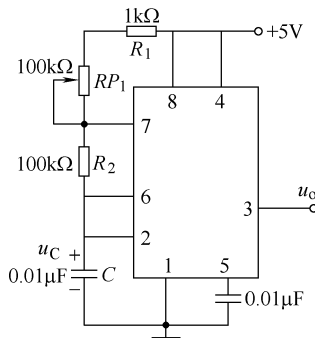


图 5-6 参考电路原理图

④ 通电调试。用示波器观测电容器两端的电压波形及输出信号波形, 调节滑动电阻器, 测试频率范围 (与理论计算比较), 并做好记录。频率最后调到 50Hz。

⑤ 在完成上述设计与制作调试过程后, 撰写实验报告, 并在小组内进行自我评价、组员评价, 最后由教师给出评价, 三个评价结合作为本次工作任务完成情况的综合评价。

任务二 由集成运放器构成的 RC 正弦波振荡器

一、目标

1. 知识目标

- 1) 理解 RC 桥式振荡器的构成和工作原理。
- 2) 研究反馈深度对振荡波形的影响。
- 3) 熟悉集成运算放大器的主要技术参数及引脚功能。

2. 能力目标

- 1) 熟悉正弦波振荡电路的调试方法。
- 2) 观察 R 、 C 参数对振荡频率的影响, 学习振荡频率的测量方法。
- 3) 观察、比较任务一中振荡器电路的性能、特点。

二、原理与说明

1. 电路特点

RC 正弦波振荡器为一种反馈性振荡器。其反馈电路或选频电路由电阻器 R 和电容器 C 构成。这类振荡器多用于几十赫兹至几百千赫兹范围的音频至超音频频段, 所以也称为音频振荡器。RC 正弦波振荡器通常有桥式振荡器、移项式振荡器及双 T 网络式振荡器等。RC 正弦波振荡器的基本工作原理、起振和平衡时的相位条件及振幅条件与 LC 振荡器相同。

2. 实验电路及主要元器件作用

实验电路如图 5-7 所示。

图 5-7 是采用集成运算放大器 741 构成的 RC 文氏桥式振荡器电路图。它由两部分组成, 即集成运算放大器、 R_1 和 RP 构成的基本放大器和 R 、 C 串并联组成的正反馈网络。图中, R_1 、 R_2 接在输出端与反向输入端之间, 构成反馈, 与 R_2 并联的二极管 VD_1 、 VD_2 构成非线性元件, 即 R_2 、 VD_1 、 VD_2 组成一非线性电阻。当振荡幅度较小时, 流过二极管的电流较小, 二极管的等效电阻比较大, 负反馈较弱, 放大器增益较高, 有利于起振。当振荡幅度增大时, 流过二极管的电流增加, 其等效电阻逐渐减小, 负反馈增强, 放大器增益自动减小, 从而达到自动稳幅的目的。

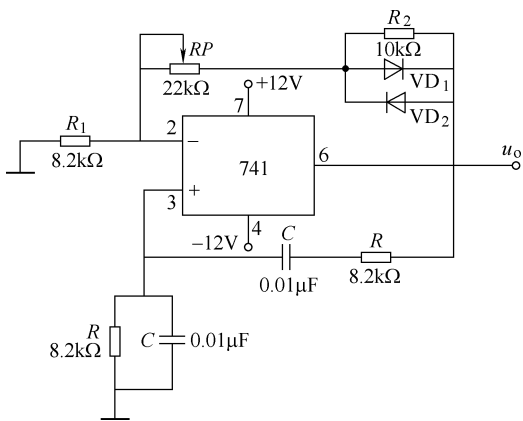


图 5-7 RC 桥式振荡器电路

的。电位器 RP 用来调节放大器的闭环增益, 调节 RP , 使 $RP + R_2$ 略大于 $2R_1$, 则起振后振荡幅度较小, 但输出波形比较好; 调节 RP , 使 $RP + R_2 \geq 2R_1$ 时, 振荡幅度增加, 但输出波形失真度也增大。

振荡器的振荡频率取决于 R 、 C 串并联选频电路的参数。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{RC}}$$

三、实验仪器与设备

- 1) 示波器 1 台。
- 2) 交流毫伏表 1 只。
- 3) 稳压电源 1 台。
- 4) 数字频率计 1 台。
- 5) 万用表 1 只。

四、实验内容和步骤

- 1) 适当调整电位器 RP , 使电路产生振荡, 输出稳定不失真的正弦波。
- 2) 测试并计算电路的振荡频率。
- 3) 改变振荡频率。
- 4) 改变输出电压。
- 5) 振荡器输出幅度为最大、稳定且不失真时, 测量 u_F 、 u_o , 并计算反馈系数 $F(F = u_F/u_o)$ 。

五、注意事项

- 1) 正确识别引脚功能, 正确搭接实验电路。
- 2) 自行设计实验步骤, 设计记录表格。

六、实验报告

- 1) 分析负反馈对振荡波形的影响。
- 2) 实际测量和理论计算的振荡频率有无误差? 为什么?
- 3) 简述 RC 振荡电路的工作原理和振荡条件。

七、思考题

- 1) 二极管在电路中的作用是什么? 若它们开路, 对振荡器正常工作是否影响? 为什么?
- 2) 若元器件完好, 接线正确, 电源电压正常, 电路无正弦波输出, 原因何在? 如何解决?

任务三 石英晶体振荡器

一、目标

1. 知识目标

- 1) 了解石英晶体振荡器的工作原理及特点。

2) 掌握晶体振荡器电路的基本构成形式及参数计算方法。

2. 能力目标

- 1) 熟悉石英晶体的基本特性。
- 2) 进一步熟悉数字频率计使用方法。
- 3) 在面包板上熟练插接电路。
- 4) 掌握晶体振荡电路的测量方法。

二、原理与说明

1. 石英晶体的基本特性

利用石英晶体的压电和反压电效应对正弦振荡频率进行控制的振荡器称为晶体振荡器, 其频率稳定度一般可高达 10^{-6} 以上。石英晶体振荡器根据晶体在振荡器线路中的工作方式可分为两类: 一类是石英晶体在电路中作为等效电感使用, 称为并联谐振晶体振荡器; 另一类是石英晶体以串联谐振的形式出现, 称为串联谐振晶体振荡器。当振荡器振荡频率域晶体固有频率相同时, 晶体的电抗趋于零。

石英晶体的基本工作原理是压电效应, 它的固有频率高低与晶体片的尺寸、振荡模式和切割方式有密切关系。石英晶体的特性还与温度有关, 所以晶体的工作电流应保持在 1mA 以下。因为电流流过晶体时会发热, 所以过大的工作电流会影响其工作频率稳定度。

2. 实验电路及主要元器件作用

实验电路如图 5-8 所示。在该电路中, R_1 、 R_2 和 RP 是晶体管 VT_1 的分压式偏流电阻, R_4 为自偏电阻, R_3 为晶体管的集电极直流负载电阻。 C_1 和 C_2 为高频旁路电容, C_5 为输出耦合电容, R_L 是交流等效负载, L 和 C_3 、 C_4 互为异性的电抗元件。当 $f=f_s$ 时, 晶体的电抗趋于零, 使得电路中的正反馈处于最强, 满足振荡的振幅条件, 产生自激振荡。

3. 各元器件参数

电阻 $R_1 = 33\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 22\text{k}\Omega$ 、 $R_3 = 1.6\text{k}\Omega$ 、 $R_4 = 510\Omega$, 电位器 $RP = 10\text{k}\Omega$, 电感器 $L = 33\mu\text{H}$, 电容器 $C_1 = C_2 = C_5 = 0.1\mu\text{F}$ 、 $C_3 = 100\text{pF}$ 、 $C_4 = 150\text{pF}$, 晶体管 VT_1 型号为 9018, 石英晶体振荡器的频率为 3.58MHz 。

三、实验仪器与设备

- 1) 双踪示波器 1 台。
- 2) 交流毫伏表 1 只。
- 3) 直流稳压电源 1 台。
- 4) 数字频率计 1 台。
- 5) 万用表 1 只。
- 6) 面包板 1 块。

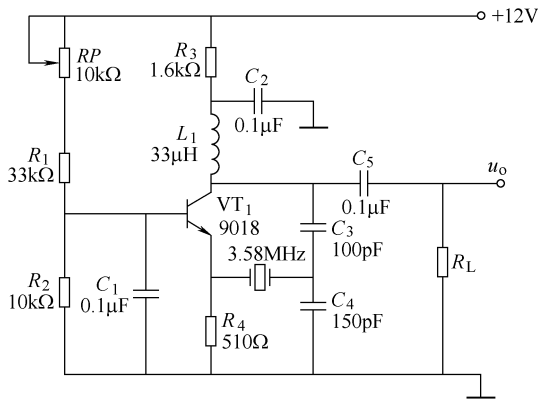


图 5-8 串联谐振石英晶体振荡器电路图

四、实验内容和步骤

1) 按图 5-8 所示在面包板上插好实验电路。检查无误后, 接通实验电路电源 +12V。

2) 调整振荡晶体管的工作状态, 观察电路输出波形。调节电位器 RP , 使电路起振并使电路输出幅度达到最大和最小时, 用毫伏表分别测得晶体管 VT_1 发射极电压 $u_{E_{\max}}$ 和 $u_{E_{\min}}$, 同时测量电路最大输出幅度 $u_{o_{\max}}$ 、最小输出幅度 $u_{o_{\min}}$ 及所对应的振荡频率, 填入表 5-2 中, 并画出电路振荡波形。

表 5-2 振荡晶体管工作状态

$u_{E_{\max}}/\text{V}$		$u_{E_{\min}}/\text{V}$	
$u_{o_{\max}}/\text{V}$		$u_{o_{\min}}/\text{V}$	
振荡频率/kHz		振荡频率/kHz	

3) 观察电路停振与振荡时振荡管基极电压的变化。在输出幅度最大时, 用万用表直流 2.5V 挡测量晶体管 VT 的基极电压, 然后将电感 L_1 短路, 使电路停振, 观察晶体管 VT_1 基极的电位变化情况, 填入表 5-3 中, 并说明变化过程。

表 5-3 电路停振与振荡时振荡管基极电压的变化

	VT_1 基极电位/V
L_1 接入	
L_1 短路	

4) 观察负载变化对振荡频率的影响。将负载 R_L 分别替换为 $10\text{k}\Omega$ 、 $2\text{k}\Omega$ 、 $1\text{k}\Omega$ 的电阻, 测量振荡频率的变化, 将测量结果填入表 5-4 中。

表 5-4 负载变化对振荡频率的影响

$R_L/\text{k}\Omega$	10	2	1
f/MHz			

五、注意事项

若实验中电路不起振, 注意检查电路的插接是否正确。电路插接无误, 一般都可以产生振荡。

六、实验报告

- 1) 整理实验数据。
- 2) 画出交流等效电路图。
- 3) 试分析该实验电路的特点。
- 4) 试说明在电路振荡或电路停振的条件下, 晶体管 VT_1 基极电位的变化。

七、思考题

- 1) 石英晶体振荡器有几种基本类型? 本实验中的石英晶体振荡器属于那种类型?
- 2) 石英晶体在不同类型电路中的作用有什么不同?
- 3) 试说明石英晶体振荡器的频率稳定度高的原因。

任务四 金属探测器的制作与调试

一、目标

1. 知识目标

- 1) 理解高频振荡器、振荡检测器、音频振荡器的构成和工作原理。
- 2) 研究正反馈而产生自激高频振荡的条件以及对振荡波形的影响。
- 3) 熟悉集成块的主要技术参数及引脚功能。

2. 能力目标

- 1) 熟悉高频振荡器、振荡检测器、音频振荡器电路的调试方法。
- 2) 观察振荡器参数对振荡频率的影响，学习振荡频率的测量方法。
- 3) 学会高频振荡器探测金属的方法。
- 4) 学会振荡器的调试与使用方法。
- 5) 观察、比较三个振荡器电路的性能、特点。

二、原理与说明

1. 实物图

金属探测器的实物图如图 5-9 所示。



图 5-9 金属探测器实物图

2. 金属探测器的工作原理

金属探测器主要由高频振荡器、振荡检测器和音频振荡器组成，其原理如图 5-10 所示。

(1) 高频振荡器

高频振荡器由晶体管 VT_1 和高压变压器 T_1 等组成，是一种变压器反馈型 LC 振荡器。 T_1

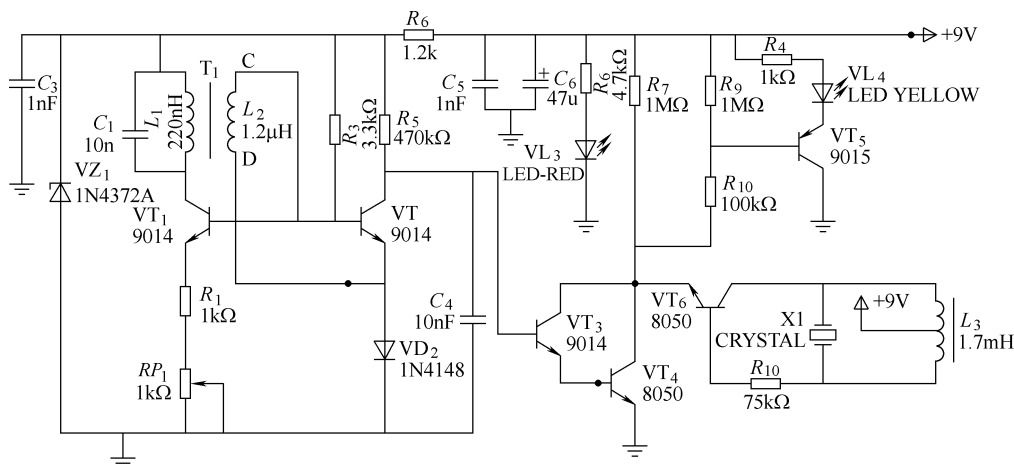


图 5-10 金属探测器原理

的一次绕组 L_1 和电容器 C_1 组成 LC 并联振荡回路，其振荡频率约为 48kHz，由 L_1 的电感量和 C_1 的电容量决定。 T_1 的二次绕组 L_2 作为振荡器的反馈线圈，其“C”端接振荡管 VT_1 的基极，“D”端接 VD_2 。由于 VD_2 处于正向导通状态，对高频信号来说，“D”端可视为接地。在高频变压器 T_1 中，如果“A”和“D”端分别为一、二次绕组绕线方向的首端，则从“C”端输入到振荡管 VT_1 基极的反馈信号能够使电路形成正反馈而产生自激高频振荡。振荡器反馈电压的大小与线圈 L_1 、 L_2 的匝数比有关，匝数比过小，由于反馈太弱，不容易起振，过大引起振荡波形失真，还会使金属探测器灵敏度大为降低。振荡管 VT_1 的偏置电路由 R_3 和二极管 VD_2 组成， R_3 为 VD_2 的限流电阻。由于二极管正向阈值电压恒定（约为 0.7V），通过二次绕组 L_2 加到 VT_1 的基极，以得到稳定的偏置电压。显然，这种稳压式的偏置电路能够大大增强 VT_1 高频振荡器的稳定性。为了进一步提高金属探测器的可靠性和灵敏度，高频振荡器通过稳压电路供电，其电路由稳压二极管 VZ_1 、限流电阻器 R_6 和去耦电容器 C_3 组成。振荡管 VT_1 发射极与地之间接有电位器，具有发射极电流负反馈作用，其电阻值越大，负反馈作用越强， VT_1 的放大能力也就越低，甚至于使电路停振。

(2) 振荡检测器

振荡检测器由晶体管开关电路和滤波电路组成。开关电路由晶体管 VT_2 、二极管 VD_2 等组成，滤波电路由滤波电阻器 R_5 ，滤波电容器 C_4 组成。在开关电路中， VT_2 的基极与二次绕组 L_2 的“C”端相连，当高频振荡器工作时，经高频变压器 T_1 耦合过来的振荡信号，正半周使 VT_2 导通， VT_2 集电极输出负脉冲信号，经过 RC 滤波器，在负载电阻器 R_5 上输出低电平信号。当高频振荡器停振荡时，“C”端无振荡信号，又由于二极管 VD_2 接在 VT_2 发射极与地之间， VT_2 基极被反向偏置， VT_2 处于可靠的截止状态， VT_2 集电极为高电平，经过滤波器，在 R_4 上得到高电平信号。由此可见，当高频振荡器正常工作时，在 R_4 上得到低电平信号，停振时，为高电平，由此完成了对振荡器工作状态的检测。

(3) 音频振荡器

音频振荡器采用单管振荡器，由晶体管 VT_6 ，电阻器 R_{10} 、电感 L_3 和蜂鸣器 X1 组成电感三点式振荡器。

3. 高频振荡器探测金属的方法

调节高频振荡器的增益电位器, 恰好使振荡器处于临界振荡状态, 也就是说刚好使振荡器起振。当探测线圈 L_1 靠近金属物体时, 由于电磁感应现象, 会在金属导体中产生涡电流, 使振荡回路中的能量损耗增大, 正反馈减弱, 处于临界态的振荡器振荡减弱, 甚至无法维持振荡所需的最低能量而停振。如果能检测出这种变化, 并转换成声音信号, 根据声音有无, 就可以判定探测线圈下面是否有金属物体了。

4. 调试与使用方法

金属探测器电路除了灵敏度调节电位器外, 没有调整部分, 只要焊接无误, 电路就能正常工作。整机在静态, 也就是扬声器不发声时, 总电流约为 10mA, 探测到金属扬声器发出声音时, 整机电流上升到 20mA。一个新的积层电池可以工作 20 ~ 30h。

新焊接的金属探测器如果不能正常工作, 首先要检查电路板上各元器件、接线焊接是否有误, 再测量电池电压及供电回路是否正常, 稳压二极管 VD_1 稳定电压为 5.5 ~ 6.5V, VD_2 极性不要焊反。探测碟内振荡线圈一、二次及首尾端不要焊错。其安装图如图 5-11 所示。

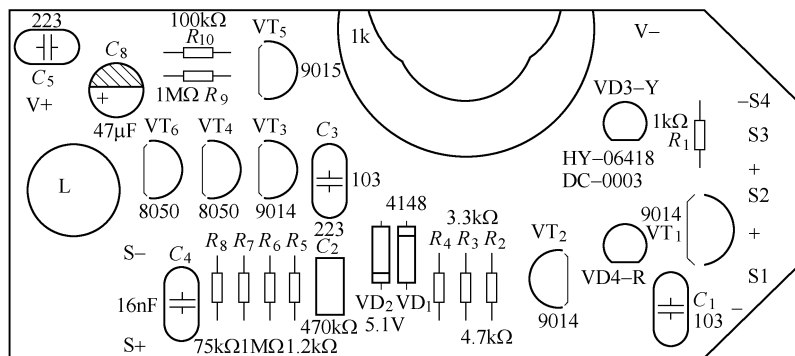


图 5-11 金属探测器安装图

三、实验仪器与设备

- 1) 金属探测器套件 1 套。
- 2) 示波器 1 台。
- 3) 直流稳压电源 1 台。
- 4) 万用表 1 只。
- 5) 频率计 1 台。
- 6) RLC 测试仪一台。

四、实验内容和步骤

先用 RLC 测试仪测量振荡线圈 T_1 的一次电感 (100kHz 挡)、 L_3 电感 (1kHz 挡) 和 C_1 电容值 (100kHz 挡)、蜂鸣器静态电容值 (1kHz 挡), 并做好记录, 而后根据提供的金属探测器套件与电路图, 完成金属探测器的焊接与装配。装配时做到先低后高的顺序, 也就是先电阻与二极管、电位器、瓷片电容、晶体管、电解电容、发光二极管, 之后电源线, 最后探测线圈。检测焊接无误, 元器件没有装错的情况下, 进行以下调试与测试。在下列电路测试与调试过程中, 除特别说明外, 电源电压为 9V。

1. 直流工作点的测试

通过分析电路,初步计算电路工作点,按下列要求,测试各电路静态电压,分别填入相应的表格。

逆时针方向转动 RP_1 到底,此时蜂鸣器响,发光管 VL_4 亮,用万用表测量电路各点电压,记录到表 5-5。

表 5-5 直流工作点测试记录

VT ₁ 基极/V	VT ₁ 发射极/V	VT ₁ 集电极/V	VT ₂ 基极/V	VT ₂ 发射极/V	VT ₂ 集电极/V	VT ₃ 集电极/V

2. 电路调试与测试

1) 逆时针方向转动 RP_1 , 刚好开启 RP_1 开关,阻值最小,高频振荡器振荡最强,此时蜂鸣器不响,发光管 VL_4 不亮,用万用表测量电路各点电压,并示波器观察 VT₁ 集电极和基极波形,用频率计测量工作频率,检验工作频率是否与理论一致,记录到表 5-6。

表 5-6 电路高频振荡最强状态测试记录

工作状态	电压测量	VT ₁ 基极 /V	VT ₁ 发射极 /V	VT ₁ 集电极 /V	VT ₂ 基极 /V	VT ₂ 发射极 /V	VT ₂ 集电极 /V
$RP_1 = 0$	波形测量	VT ₁ 基极		VT ₁ 发射极		VT ₁ 集电极	
		C_1 (nF)	L_1 (μH)	$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}$ /kHz	测量 f_0 /kHz	Δf_0 /kHz	γ_{f_0} (%)

2) 逆时针方向调节 RP_1 , 打开 RP_1 开关后继续慢慢转动 RP_1 , 刚好使黄色二极管亮、蜂鸣器发声。金属探测器的高频振荡器停止工作或者振荡较弱,不能推动 VT₂ 导通。用万用表测量电路各点电压,用示波器观察 VT₁、VT₆ 集电极波形,并用频率计测量 VT₁、VT₆ 振荡频率 f_0 和 f_1 , 在表 5-7 中做好记录。

表 5-7 电路临界状态测试记录

工作状态	电压测量	VT ₁ 基极 /V	VT ₁ 发射极 /V	VT ₁ 集电极 /V	VT ₂ 基极 /V	VT ₂ 发射极 /V	VT ₂ 集电极 /V
RP_1 临界 (蜂鸣器刚好响)	波形测量	VT ₆ 集电极					
		X_1 /nF	L_3 /mH	$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_3 X_1}}$ /kHz	测量 f_1 /kHz	Δf_1 /kHz	γ_{f_1} (%)

3) 顺时针方向微微转动 RP_1 ，使发光二极管 VL_4 刚好不亮、蜂鸣器不鸣。这时，金属探测器的灵敏度处于最高状态，用电阻引脚从上往下逐渐靠近探测线圈中心，如果一个电阻检测不到，则增加电阻数量，看金属探测器检测到电阻引脚时候距离中心点的距离。

3. 调整中心频率

在 C_1 上并联 10nF 涤纶电容，按上述第 3 点，测量高频振荡频率与电容 C_1 的关系及工作频率对探测灵敏度的影响。记录数据到表 5-8。

表 5-8 灵敏度测试记录

C_1/nF	f_0/kHz	距离/cm	电阻数量/个
10			
20			

五、注意事项

- 1) 探测线圈一、二次的同名端不要接错。S1，S2 为一次线圈，S3，S4 为反馈线圈，A、D 端为同名端（对应实际线圈是同侧输出端为同名端）。
- 2) 9V 电池要注意极性：大的为正极，小的为负极。

六、实验报告

- 1) 整理实验数据。
- 2) 画出各工作状态电路振荡波形。
- 3) 根据实验测试情况，简要分析高频振荡频率对检测灵敏度的影响？
- 4) 根据 VT_1 各极的电压与振荡情况，如何用万用表简要判断振荡电路工作情况？

七、思考题

- 1) 变压器反馈式振荡电路工作频率由什么决定？
- 2) 从晶体管 VT_1 的发射极波形看（正弦半波），为什么集电极的波形是正弦波？
- 3) 电容 C_4 有什么作用？如果在 VT_3 集电极对地并接 10 μ F 电容会有什么效果？请结合试验说明。

任务五 信号发生器的制作与调试

一、目标

- 1. 知识目标
 - 1) 了解单片函数发生器 ICL8038 的工作原理和应用。
 - 2) 了解其他常用单片信号发生器使用。
 - 3) 掌握正弦波、方波、三角波之间的转换原理。
 - 4) 掌握信号发生器的设计方法和测试技术。
 - 5) 掌握利用电容充放电原理实现波形产生方法。

- 6) 能够利用芯片给出资料, 掌握元器件的参数计算。
2. 能力目标
 - 1) 能够自行设计并调试三角波到正弦波转换电路。
 - 2) 能够制作调试音频信号发生器。
 - 3) 能够利用 ICL8038 设计制作扫频信号或者调频信号。
 - 4) 学会使用失真度测试仪。
 - 5) 能够安装和调试分立元器件与集成电路组成的多级电子电路小系统。

二、原理与说明

1. ICL8038 简介

ICL 8038 是一种具有多种波形输出的精密振荡集成电路, 只需调整个别的外部元器件就能产生从 0.001Hz ~ 300kHz 的低失真正弦波、三角波、矩形波等脉冲信号。输出波形的频率和占空比还可以由电流或电阻控制。另外, 由于该芯片具有调频信号输入端, 所以可以用来对低频信号进行频率调制。

2. 主要特点

- 1) 具有在发生温度变化时产生低的频率漂移, 最大不超过 50ppm/°C。
- 2) 正弦波输出具有低于 1% 的失真度。
- 3) 三角波输出具有 0.1% 高线性度。
- 4) 具有 0.001Hz ~ 1MHz 的频率输出范围, 工作变化周期宽。
- 5) 占空比在 2% ~ 98% 之间任意可调。
- 6) 高的电平输出范围; 从 TTL 电平至 28V。
- 7) 具有正弦波、三角波和方波等多种函数信号输出。
- 8) 易于使用, 只需要很少的外部条件。

3. 引脚特点

引脚如图 5-12 所示。

1) 脚 1、12 (SINE WAVE ADJUST): 正弦波失真度调节。

2) 脚 2 (SINE WAVE OUT): 正弦波输出。

3) 脚 3 (TRIANGLE OUT): 三角波输出。

4) 脚 4、5 (DUTY CYCLE FREQUENCY): 方波的占空比调节、正弦波和三角波的对称调节。

5) 脚 6 (V+): 正电源 $\pm 10 \sim \pm 18\text{V}$ 。

6) 脚 7 (FM BIAS): 内部频率调节偏置电压输入。

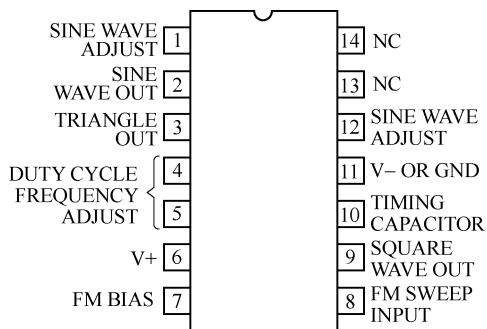


图 5-12 ICL8038 引脚图

7) 脚 8 (FM SWEEP): 外部扫描频率电压输入。

8) 脚 9 (SQUARE WAVE OUT): 方波输出, 为开路结构。

9) 脚 10 (TIMING CAPACITOR): 外接振荡电容。

10) 脚 11 (V- OR GND): 负电源或地。

11) 脚 13、14 (NC): 空脚。

4. 工作原理

ICL8038 是单片集成函数信号发生器, 其内部框图如图 5-13 所示。它由恒流源 1 和 2、电压比较器 1 和 2、触发器、缓冲器和三角波变换正弦波电路等组成。

外接电容 C 由两个恒流源充电和放电, 振荡电容 C 由外部接入, 它是由内部两个恒流源来完成充电放电过程。恒流源 2 的工作状态是由恒流源 1 对电容器 C 连续充电, 增加电容电压, 从而改变比较器的输入电平, 比较器的状态改变, 带动触发器翻转来连续控制。当触发器的状态使恒流源 2 处于关闭状态, 电容电压达到比较器 1 输入电压规定值的 $2/3$ 倍时, 比较器 1 状态改变, 使触发器工作状态发生翻转, 将模拟开关 S 导通。由于恒流源 2 的工作电流值为 $2I$, 是恒流源 1 的 2 倍, 电容器处于放电状态, 在单位时间内电容器端电压将线性下降, 当电容电压下降到比较器 2 的输入电压规定值的 $1/3$ 倍时, 比较器 2 状态改变, 使触发器又翻转回到原来的状态, 这样周期性的循环, 完成振荡过程。

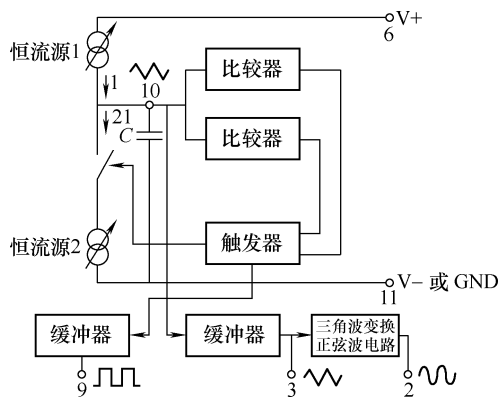


图 5-13 ICL8038 内部框图

在以上基本电路中很容易获得 4 种函数信号。假如电容器在充电过程和放电过程的时间常数相等, 而且在电容器充放电时, 电容电压就是三角波函数, 三角波信号由此获得。由于触发器的工作状态变化时间也是由电容电压的充放电过程决定的, 所以触发器的状态翻转, 就能产生方波函数信号, 在芯片内部, 这两种函数信号经缓冲器功率放大, 并从脚 3 和脚 9 输出。适当选择外部的电阻 R_A 、 R_B 和电容 C (见图 5-14) 可以满足方波函数等信号在频率、占空比调节的全部范围。因此, 对两个恒流源在 I 和 $2I$ 电流不对称的情况下, 可以循环调节 R_A 或 R_B (见图 5-14), 从最小到最大, 任意选择调整, 所以只要调节电容器充放电时间不相等, 就可获得锯齿波等函数信号。正弦函数信号由三角波函数信号经过非线性变换而获得。利用二极管的非线性特性, 可以将三角波信号的上升或下降斜率逐次逼近正弦波的斜率。ICL8038 中的非线性网络是由 4 级击穿点的非线性逼近网络构成。一般说来, 逼近点越多得到的正弦波效果越好, 失真度也越小, 在本芯片中 $N=4$, 失真度可以小于 1%。在实测中得到正弦信号的失真度可达 0.5% 左右。由于 ICL8038 单片函数发生器有两种工作方式, 即输出函数信号的频率调节电压 (8 脚对电源正极电压 $V_C = 11/50V_{CC}$) 可以由内部 (7 脚) 供给, 也可以由外部供给 (8 脚)。ICL8039 基本应用输出信号如图 5-15 所示。

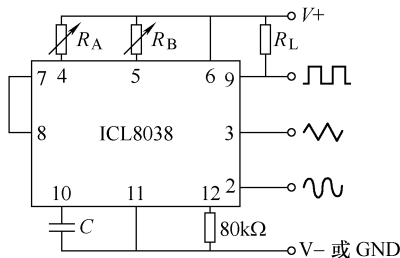


图 5-14 采用内部电压供给的基本应用电路

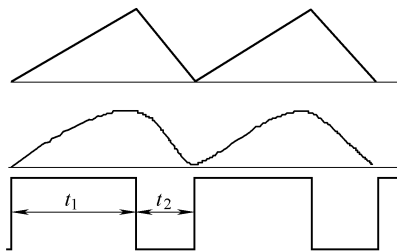


图 5-15 ICL8038 基本应用输出信号

在三角波电压上升阶段, 电容 C 充电, 电容电压从 $1/3$ 电源电压上升到比较器输入电压 (电源电压的 $2/3$) 所需时间为

$$t_1 = \frac{CV}{I} = \frac{C \times \frac{V_{CC}}{3}}{\frac{11}{50} \times \frac{V_{CC}}{R_A}} = \frac{R_A \times C}{0.66}$$

在三角波电压下降阶段, 电容 C 放电, 电容电压从 $2/3$ 电源电压降到比较器输入电压 ($1/3$ 电源电压) 所需时间为

$$t_2 = \frac{CV}{I} = \frac{C \times \frac{V_{CC}}{3}}{2 \times \frac{11}{50} \times \frac{V_{CC}}{R_A} - \frac{11}{50} \times \frac{V_{CC}}{R_A}} = \frac{R_A \times R_B \times C}{0.66 (2R_A - R_B)}$$

频率为

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_A \times C}{0.66} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B}\right)}$$

假如 $R_A = R_B = C$ 时, 有

$$f = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{1}{\frac{R_A \times C}{0.66} \left(1 + \frac{R_B}{2R_A - R_B}\right)} = \frac{0.33}{R_C}$$

当 $R_A = R_B$ 时, 就可以得到占空比为 50% 的方波, 调节占空比, 可以减少输出正弦波失真。

由于 ICL8038 单片函数发生器所产生的正弦波是由三角波经非线性网络变换而获得。该芯片的 1 脚和 12 脚就是为调节输出正弦波失真度而设置的。在 ICL8039 典型应用中, 1 脚接电位器, 调节振荡电容充电时间过程中的非线性逼近点, 12 脚电位器调节振荡电容在放电时间过程中的非线性逼近点。在实际应用中, 两只 $100\text{k}\Omega$ 的电位器应选择多圈准确度电位器, 反复调节, 可以达到很好的效果。

三、实验仪器与设备

- 1) 信号发生器套件 1 套。
- 2) 示波器 1 台。
- 3) 直流稳压电源 1 台。
- 4) 频率计 1 台。
- 5) 失真度测试仪一台。

四、实验内容和步骤

根据提供的信号发生器套件、信号发生器工作原理 (见图 5-16)、PCB 印制图 (见图 5-17), 完成信号发生器的焊接与装配。装配时做到先低后高的顺序, 也就是先电阻与二极

4) 把 RP_1 调到最大 (输出频率最高), 用示波器分别观察方波、三角波、正弦波波形, 并做好记录, 同时测量出输出频率和正弦波失真情况填写表 5-9。

表 5-9 波形输出情况测试记录

输出波形	波 形	频率/Hz	峰峰值/V	正弦波失真 (%)
三角波				
方波				
正弦波				

调节 RP_1 , 降低输出频率, 同时观察正弦波输出及失真情况, 直至正弦波失真大于 5% 为止, 记录到表 5-10 中。

表 5-10 工作频率范围测量

输出波形	最低频率/Hz	最高频率/Hz	峰峰值/V	正弦波失真情况 (%)
三角波				—
方波				—
正弦波				

五、注意事项

1) 供电电源为双电源, 不低于 $\pm 14V$, 否则稳压集成电路不能正常工作, 不要忘记通常的电源为双路电源, 需要串联, 且串联点为地。

2) 在要求输出正弦波时候, 先调节 RP_4 使矩形波输出在对称情况下 (即为方波时), 再调节 RP_2 和 RP_3 使正弦波失真最小。

3) 虽然在各输出端串接了 51Ω 电阻, 还是要注意不要短路, 以免损坏器件。

4) C_6 尽量选用误差比较小的涤纶电容, 在 RP_1 调到最大的情况下输出频率为 $20kHz$ 。

5) 如果需要输出三角波, 则把 RP_4 改用 $10k\Omega$ 或者更大的。调节 RP_4 可以输出三角波、锯齿波、方波和正弦波, 但工作频率也会随之改变。

六、实验报告要求

1) 整理实验数据。

- 2) 画出三个输出端输出波形。
- 3) 根据实验测试情况, 简要分析输出较低频率信号时 (几十赫兹), 失真明显增加的原因。

七、思考题

- 1) 从本电路产生信号方法来看, 产生信号是否一定要正反馈才能够实现?
- 2) 深入了解 ICL8038 从三角波到正弦波的变换电路, 采用其他方法设计三角波变换成正弦波的电路。
- 3) 为了能够在大范围 (频率) 内调节输出信号, 尽量减少失真, 对电路进行改进, 提出自己的思路。
- 4) 结合已学的知识, 采用运算放大器设计三角波、方波、正弦波电路。

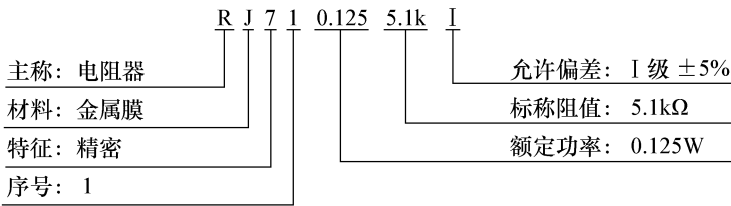
附录

附录 A 电阻和电位器的型号命名法

根据国家标准 GB/T 2470—1995 的规定，电阻及电位器的型号由四部分组成。

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分
用字母表示主称		用字母表示材料		用数字或字母表示特征		用字母和数字表示意义
符号	意义	符号	意义	符号	意义	额定功率 阻值 允许偏差 准确度等级等
R W	电阻器 电位器	T	碳膜	1, 2	普通	
		H	合成膜	3	超高频	
		P	硼碳膜	4	高阻	
		U	硅碳膜	5	高温	
		C	沉积膜	7	精密	
		I	玻璃釉膜	8	电阻器-高压	
		J	金属膜	9	电位器-特殊	
		Y	氧化膜	G	高功率	
		S	有机实芯	T	可调	
		N	无机实芯	X	小型	
		X	线绕	L	测量用	
		R	热敏	W	微调	
		G	光敏	D	多圈	
		M	压敏			

例如，RJ71-0.125-5.1KI 型电阻器。



可见，RJ71 表示精密金属模电阻器，其额定功率为 0.125W，标称电阻值为 5.1kΩ，允许偏差为 ±5%。

附录 B 电阻（位）器的标称值系列和允许偏差等级

表 B-1 常用电阻（位）器的标称值系列

系列	允许偏差	电阻标称值
E24	I 级 $\pm 5\%$	1.0、1.1、1.2、1.3、1.5、1.6、1.8、2.0、2.2、2.4、2.7、3.0、3.3、3.6、3.9、4.3、4.7、5.1、5.6、6.2、6.8、7.5、8.2、9.1
E12	II 级 $\pm 10\%$	1.0、1.1、1.5、1.8、2.2、2.7、3.3、3.9、4.7、5.6、6.8、8.2
E6	III 级 $\pm 20\%$	1.0、1.5、2.2、3.3、4.7、6.8

表 B-2 常用电阻的允许偏差等级

允许偏差	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$
等级	005	01	I	II	III
文字符号	D	F	J	K	M

附录 C 四色环和五色环电阻器的色标含义

表 C-1 四色环电阻器的色标表示法

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银	无色
第一位有效值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
第二位有效值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
倍乘	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{-1}	10^{-2}	
允许偏差(%)										-20 ~ 50	± 5	± 10	± 20

表 C-2 五色环电阻器的色标表示法

颜色	黑	棕	红	橙	黄	绿	蓝	紫	灰	白	金	银
第一位有效值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
第二位有效值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
第三位有效值	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
倍乘	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	10^8	10^9	10^{-1}	10^{-2}
允许偏差(%)		± 1	± 2			± 0.5	± 0.25	± 0.1				

例如，如图 C-1 所示，读出图 C-1a、b 两图色环电阻标识的阻值。

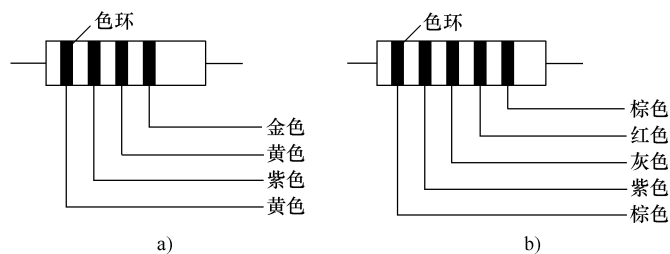


图 C-1 色标法的电阻器

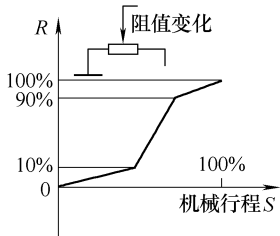
图 C-1a 中，该色环电阻的有效色环是黄色（4）、紫色（7），倍乘环是黄色（ 10^4 ），误差环是金色（ $\pm 5\%$ ）。即该色环电阻为 $470000\Omega \pm 5\% = 470\text{k}\Omega (1 \pm 5\%)$ 。

图 C-1b 中，该色环电阻的有效色环是棕色（1）、紫色（7）、灰色（8），倍乘环是黄色（ 10^2 ），误差环是棕色（ $\pm 1\%$ ）。即该色环电阻为 $17800\Omega \pm 1\% = 17.8\text{k}\Omega (1 \pm 1\%)$ 。

附录 D 常用电位器阻值特性说明

名称和电位器阻值特性曲线	说 明
X 型电位器	X 型电位器称为线性电位器，阻值分布特性是线性的。从曲线中可以看出，动片从起始端均匀转动（或滑动）时，阻值在均匀增大。在 X 型电位器整个动片行程内，动片触点移动的单位长度内的阻值变化量处处相等，即阻值变化是线性的，线性电位器由此得名。在 X 型电位器中，当动片转动至一半机械行程处时，动片到两个定片的阻值相等。由于 X 型电位器是线性的，所以这种电位器的两个定片可以互换
Z 型电位器	在 Z 型电位器整个动片行程内，动片触点移动的单位长度内的阻值变化量处处不相等。随着动片向上滑动，单位长度内阻值变化量增大，动片触点刚开始滑动（顺时针方向转动转柄）的那部分，动片与地端定片之间的阻值上升比较缓慢，动片触点滑到后半程阻值迅速增大，阻值分布特性同指数曲线一样，所以称为指数型电位器 动片转动到最后时（全行程），动片到地端定片之间的阻值等于电位器的标称阻值。当动片转动至一半机械行程处时，动片到两个定片的阻值不相等，到地端定片的阻值远小于到另一个定片的阻值，根据这一特性可以分辨出两个定片中哪一个是接地端的定片
D 型电位器	D 型电位器又称对数型电位器，它与 Z 型电位器一样属于非线性电位器。D 型电位器在动片触点刚开始滑动时阻值迅速增大，到后来阻值增大得缓慢 对于 Z 型和 D 型电位器，由于阻值分布特性的原因，它们的两根定片引脚不能相互接反，两根定片引脚中有一根应接地，当动片逆时针方向转动到头后，动片与地端定片之间的阻值为 0，通过测量动片与定片之间的电阻值可以分辨出两个定片中哪个是应接地的定片

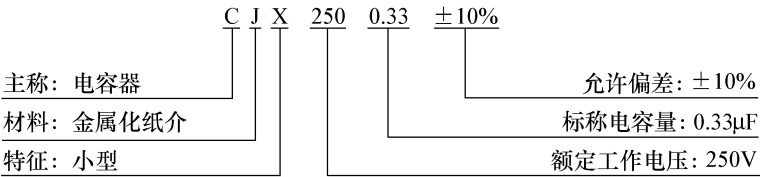
(续)

名称和电位器阻值特性曲线	说 明
 S型电位器	从阻值特性曲线中可以看出，在转柄转动的起始部分和最后部分，阻值增大明显变缓，在中间部分阻值增大率很大，这种电位器可以用在立体声平衡控制器电路中

附录 E 电容的型号命名方法

第一部分		第二部分		第三部分					第四部分
主称		用字母表示材料		用字母表示特征					用字母或数字表示序号
符号	意义	符号	意义	符号	意义				意义
					瓷介电容	云母电容	有机电容	电解电容	
C	电 容 器	A	钽电解	1	圆片	非密封	非密封	箔式	包括：品种、尺寸代号、温度特性、直流工作电压、标称值、允许偏差、标准代号等
		B	聚苯乙烯	2	管形	非密封	非密封	箔式	
		C	高频陶瓷	3	蝶形	密封	密封	烧结粉液体	
		D	铝电解	4	独石	密封	密封	烧结粉固体	
		E	其他电解	5	穿心	—	—	—	
		G	合金电解	6	支柱	—	—	—	
		H	复合介质	7	—	—	—	无极性	
		I	玻璃釉	8	高压	高压	高压	—	
		J	合金化纸	9		—	特殊	特殊	
		L	聚酯膜	10		—	卧式	卧式	
		N	铌电解	11		—	立式	立式	
		O	玻璃膜	12		—	无感式		
		Q	漆膜	C	穿心式				
		S	聚碳酸酯	D	低压				
		T	低频陶瓷	J	金属化				
		V	云母纸介	M	密封				
		Y	云母介质	S	独石				
		Z	纸介质	W	微调				
		BB	聚丙烯膜	X	小型				
		LS	聚碳酸酯膜	Y	高压				

例如，电容器 CJX-250-0. 33- ± 10%。



附录 F 半导体分立器件型号命名方法

第一部分		第二部分		第三部分		第四部分	第五部分
用阿拉伯数字表示器件的电极数目		用汉语拼音字母表示器件的材料和极性		用汉语拼音字母表示器件的类型		用阿拉伯数字表示序号	用汉语拼音字母表示规格号
符号	意义	符号	意义	符号	意义		
2	二极管	A	N 型，锗材料	P	小信号管		
		B	P 型，锗材料	V	混频检波管		
		C	N 型，硅材料	W	电压调整管和电压基准管		
		D	P 型，硅材料	C	变容管		
3	三极管	A	PNP 型，锗材料	Z	整流管		
		B	NPN 型，锗材料	L	整流堆		
		C	PNP 型，硅材料	S	隧道管		
		D	NPN 型，硅材料	K	开关管		
		E	化合物材料	X	低频小功率晶体管 ($f_a < 3\text{MHz}$, $P_c < 1\text{W}$)		
				G	高频小功率晶体管 ($f_a \geq 3\text{MHz}$, $P_c < 1\text{W}$)		
				D	低频大功率晶体管 ($f_a < 3\text{MHz}$, $P_c \geq 1\text{W}$)		
				A	高频大功率晶体管 ($f_a \geq 3\text{MHz}$, $P_c \geq 1\text{W}$)		
				T	闸流管		
				Y	体效应管		
				B	雪崩管		
				J	阶跃恢复管		
				CS	场效应晶体管		
				BT	特殊晶体管		
				FH	复合管		
				PIN	PIN 管		

附录 G 国产半导体集成电路型号命名法

第一部分		第二部分		第三部分	第四部分		第五部分		
国标		电路类型		电路系列和 代号	温度范围		封装形式		
符 号	意 义	符号	意义	用数字或数字与字母混合表示集成电路系列和 代号	符 号	意义	符 号	意义	
C	中 国 制 造	B	非线性电路		C	0 ~ 70℃	B	塑料扁平	
		C	CMOS 电路				C	陶瓷芯片载体封装	
		D	音响、电视电路		G	- 25 ~ 70℃	D	多层陶瓷双列直插	
		E	ECL 电路				E	塑料芯片载体封装	
		F	线性放大器		L	- 25 ~ 80℃	F	多层陶瓷扁平	
		H	HTL 电路				G	网络阵列封装	
		J	接口电路		E	- 40 ~ 85℃	H	黑瓷扁平	
		M	存储器				J	黑瓷双列直插封装	
		W	稳压器		R	- 55 ~ 85℃	K	金属菱形封装	
		T	TTL 电路				P	塑料双列直插封装	
		μ	微型机电路		M	- 55 ~ 125℃	S	塑料单列直插封装	
		A/D	模-数转换器					T	金属圆形封装
		D/A	数-模转换器						
		SC	通信专用电路						
		SS	敏感电路						
		SW	钟表电路						

参 考 文 献

- [1] 张澄. 高频电子电路 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011.
- [2] 张虹. 实用电路基础 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [3] 赵家贵. 电子电路设计 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [4] 陈光梦. 高频电路基础 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 2011.
- [5] 王成华, 等. 电路与模拟电子学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] 张恩沛. 电路分析实训教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [7] 王慧玲. 电路实验与综合实训 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [8] 王苹, 等. 数字电子技术及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [9] 段九州. 振荡电路实用设计手册 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2002.
- [10] 张正明. 电路与电子技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [11] 胡斌. 图表细说元器件及实用电路 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [12] 钟苏. 高频电路分析与实践 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
- [13] 陈士英, 郭炯杰. 电路域模拟电子技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [14] 胡斌. 振荡器和控制器电路识图入门突破 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [15] 刘联会, 李玉魁. 高频电路及其应用 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2009.
- [16] 胡斌, 胡松. 控制器与振荡器电路识图入门 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [17] 林志琦, 蒋惠萍. 信号发生电路原理与实用设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2010.

地址:北京市百万庄大街22号
邮政编码:100037

电话服务

社服务中心:010-88361066

销售一部:010-68326294

销售二部:010-88379649

读者购书热线:010-88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术 / 电子技术 / 电子制作

ISBN 978-7-111-43037-7

策划编辑◎林春泉

ISBN 978-7-111-43037-7



9 787111 430377 >

定价: 22.00元