

仪器仪表刊授大学教材

电子测量仪器



中国仪器仪表学会

本教材是根据1986年“电子测量仪表与控制系统”专业教材编审会上所审定的教学大纲编写的。

随着生产及科学技术的发展,生产过程自动化程度的提高,测量仪表及过程控制装置几乎电子化,并向着智能化和用计算机进行系统实时控制的方向发展。因此,电子测量仪器就成为自动化仪表的生产、使用和维护所必备的测试工具。

本教材根据专业需要,主要讨论低频范畴常用电子测量仪器的基本原理、技术性能和使用方法。让学员在此基础上具备正确选择、使用、维护电子测量仪器的基本知识,以及具备在生产和科研中常遇到的电子线路中的阻抗、电压、频率、信号波形及系统的动态过程等物理参数测量的基本技能。

书中内容以测量仪器为主线,按其原理和功能分成以下几部分:信号源(主要讨论低频正弦波信号发生器,多波形信号发生器);模拟式测量仪器(主要讨论万用表、晶体管毫伏表、RLC电桥、Q表等);示波器及其应用(主要讨论通用示波器);晶体管特性图示仪,频率特性测试仪;数字式测试仪器(主要讨论数字频率计、数字电压表);最后一章讨论电子测量仪器的使用条件及选择方法,并讨论新型电子测量仪器及展望。

电子测量仪器种类繁多,限于篇幅,教材中仅以目前常用的,国内生产的典型产品为例进行讨论。在学员已有的电子技术理论基础上来分析仪器电子线路的工作原理,电路结构特点以及如何正确使用仪器。为便于自学,每章设有复习思考题。

本书由清华大学自动化系童诗白教授和张乃国高级工程师主审。在编写过程中得到南京工学院田良副教授、林其毓工程师以及上海无线电廿一厂、上海电表厂、上海无线电仪器厂、天津无线电一厂、天津电子仪器厂、北京电子显示仪器厂等支持和协助,在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在谬误之处,恳请读者批评指正。

作 者

1986年8月于山东工业大学

目 录

前 言

第一章 概 述

第一节 电子测量的意义、特点和内容	(1)
一、电子测量的意义	(1)
二、电子测量的特点	(1)
三、电子测量的基本内容	(2)
第二节 电子测量仪器的特点及分类	(2)
一、电子测量仪器的特点	(2)
二、电子测量仪器的分类	(2)
第三节 电子测量仪器的技术性能	(3)
一、量程	(3)
二、频率范围	(4)
三、准确度	(4)
四、分辨力	(4)
五、稳定性	(4)
六、输入输出阻抗	(4)
本章思考题	(5)

第二章 信号源

第一节 概述	(6)
一、信号源的用途	(6)
二、信号源的分类	(6)
三、信号发生器的技术性能	(6)
第二节 低频正弦信号发生器	(7)
一、整机组成原理框图	(7)
二、RC串并联正弦振荡器	(7)
三、功率放大部分	(15)
四、输出电压指示电路	(19)
五、电源部分	(20)
六、XD-1A型信号源主要技术指标	(21)
七、使用	(22)

第三节 函数发生器	(23)
一、S101函数发生器原理框图.....	(24)
二、电路工作原理.....	(24)
三、主要技术指标.....	(28)
四、使用与维修.....	(30)
本章思考题.....	(32)

第三章 常用电参数测量仪器

第一节 电磁式与电子式万用表	(33)
一、基本工作原理.....	(33)
二、高内阻集成运放型万用表MF-65型.....	(41)
三、万用表的使用.....	(46)
第二节 阻抗电桥	(51)
一、电路组成.....	(51)
二、桥路测量原理.....	(52)
三、附属电路.....	(55)
四、技术特性.....	(57)
五、使用方法.....	(59)
第三节 Q表	(61)
一、Q表的基本原理.....	(62)
二、CQ ₀ 型Q表技术性能.....	(66)
三、Q表使用.....	(67)
本章思考题.....	(72)

第四章 通用示波器

第一节 概述	(73)
一、用途.....	(73)
二、电子示波器的典型结构.....	(73)
三、示波器用于测量的特点.....	(74)
四、主要技术性能.....	(74)
五、示波器的分类.....	(76)
第二节 示波器	(77)
一、电子枪的组成及射线形成原理.....	(77)
二、电子射线偏转原理.....	(78)
三、荧光屏.....	(80)
第三节 波形显示原理	(81)
一、电子射线在 U_x 、 U_y 电压作用下的偏转情况.....	(81)
二、同步作用.....	(82)
第四节 示波器通道的组成及工作原理	(84)

一、Y轴通道	(84)
二、X轴通道	(94)
三、示波器主机	(104)
四、SR8型双踪示波器主要技术指标	(108)
第五节 示波器的使用与维护	(109)
一、使用	(109)
二、常见故障分析	(114)
三、示波器的校验	(117)
四、示波器的选择及使用时注意的事项	(121)
本章思考题	(123)

第五章 晶体管特性图示仪

第一节 晶体管特性曲线图示原理	(125)
第二节 集电极扫描电压源	(127)
第三节 阶梯信号发生器	(128)
一、脉冲形成电路	(129)
二、阶梯波电压形成	(132)
三、脉冲阶梯波电压形成	(136)
四、阶梯波放大器	(138)
第四节 QT-2型图示仪主要技术性能指标	(140)
一、特点	(140)
二、主要性能指标	(140)
第五节 图示仪的使用	(142)
一、测试前的工作	(142)
二、常用晶体管静态特性曲线显测举例	(143)
本章思考题	(149)

第六章 频率特性测试仪

第一节 概述	(150)
第二节 扫频信号发生器	(151)
一、扫频信号发生器电路组成	(151)
二、扫频振荡器	(152)
三、调频振荡器	(155)
四、混频电路	(156)
五、输出放大器	(158)
六、自动稳幅电路	(159)
第三节 频率标记电路	(160)
一、频标电路组成	(160)
二、晶体管振荡与十进分频器	(161)

三、窄脉冲形成电路·····	(162)
四、频标形成的原理以组成电路·····	(163)
第四节 RT-4型扫频仪技术规范及其使用方法·····	(164)
一、技术性能·····	(164)
二、使用·····	(164)
本章思考题·····	(171)

第七章 数字测量仪器

第一节 概述·····	(173)
第二节 数字电压表(DVM)·····	(174)
一、A-D转换器分类及转换原理·····	(174)
二、PZ-26型数字电压表单元电路·····	(185)
三、PZ-26的主要技术指标·····	(197)
四、PZ-26的使用·····	(198)
第三节 通用电子数字计数器·····	(199)
一、电子计数器的分类及功能·····	(199)
二、通用计数器的基本原理·····	(200)
三、E312A主要技术特性·····	(207)
四、通用计数器的使用·····	(208)
五、故障与维护·····	(213)
本章思考题·····	(215)

第八章 电子测量仪器的使用与测量结果的处理

第一节 电子测量仪器的使用·····	(216)
一、使用电子仪器的基本条件·····	(216)
二、使用电子测量仪器应注意的事项·····	(216)
第二节 测量结果的处理·····	(217)
一、电子测量仪器误差的表示方法·····	(218)
二、进行一次测量时的误差估计·····	(219)
三、测量数据的有效数字处理·····	(220)
第三节 智能仪器及测试系统·····	(221)
一、智能仪器的特性·····	(221)
二、智能仪器的组成·····	(222)
三、自动测试系统·····	(224)
本章思考题·····	(225)

第一章 概 述

第一节 电子测量的意义、特点和内容

一、电子测量的意义

测量 是人们获得表征事物的物理或化学现象和定量信息的过程。为科研、生产提供技术数据,以便分析和掌握事物发展的规律。它的重要性,可以引用著名科学家门捷列也夫的一句话,他说:“没有测量,就没有科学”。可见,科学是从有了测量而开始的。它是人们认识和改造自然的重要手段。

电子测量 它包括凡是利用电子技术对各种电参数(包括将非电量转换成电量)进行的测量。随着生产的发展和生产过程自动化程度的不断提高,电子测量不仅对电参数的稳态进行测量,还可以对自动控制系统的过渡过程及频率特性进行动态测量,作为自动控制系统的过渡过程分析和调整的依据。随着科学技术的高度发展,电子测量几乎渗透到各个测量领域,由天文到地理,从宏观的宇宙到微观的粒子,无所不包。尤其要求精密测量的场合,往往都是运用电子测量的方法来实现的。它与近代科学技术密切相关,互相依存,互相促进。电子测量技术的水平从某种意义上标志着一个国家科学技术发展的水平。

二、电子测量的特点

电子测量技术与其它测量技术相比有:

1. 测量的频率范围宽:除直流外,交流可从 10^{-6}Hz 至 10^{12}Hz 。由于测量的频率范围宽所以它的应用范围也就很广,从缓慢变化的工业生产中物理参数的测量到无线电的微波测量等等。当然在不同的频段内,采用的测试手段和仪器是不同的。

2. 量程范围广:所谓量程是指同一台仪器能够测量被测量大小的范围。例如一台高灵敏度的数字电压表能从纳伏测到千伏,它的测量范围可达11个数量级,电子计数器能测到 100GHz ,达到17个数量级。

3. 测量准确度高:电子测量的准确度比其它的测量方法要高得多。例如长度测量准确度为 10^{-8} ,热量测量准确度为 10^{-6} ,力学测量准确度约为 10^{-7} 等均未超出 10^{-10} 。而电子测量,尤其是对频率和时间的测量,其准确度可以达到 10^{-13} 。这是目前测量准确度达到的最高标准。由于频率测量的准确度高,一般希望尽量把其它物理参数转换成频率来测量。以提高这些参数的测量准确度。

4. 测量速度快:电子测量速度所以快,是由于它是通过电磁波的传播或电子运动而进行工作的,其速度之快是其它测量方法难以类比的。因为测量速度快,所以可用它来测量瞬息万变的量。例如研究原子核裂变过程,测量人造卫星、洲际导弹发射过程中的运动速度,以及工业控制系统的过程控制参数的测量。作为研究、控制、调整这些参数的依据。如果测

量速度不高，就不能进行及时地调整，那么人造卫星就不能到达预定的轨道，洲际导弹不可能到达预定的目标，自动控制失去了作用。所以说高速度精确测量是近代尖端科学发展的重要前提。

5. 可以实现遥测：凡是人体不便于或难以进入的区域，例如上至天体下至深海，特高温、特低温，核反应堆等，均可通过适当的传感器与电子仪器连接起来进行遥测。

6. 易于实现测量过程自动化：随着大规模集成电路的产生，微处理器的功能得以扩展，并引进到电子测量仪器中，使得测量仪器智能化，从而可以实现测量的程序化，当与被测设备连接成系统后便可实现测量过程的自动化。

综上所述，电子测量技术有它一系列的特殊优点，所以被广泛的应用在自然科学的各个领域内。

三、电子测量的基本内容

由于电子测量的范围较广，归纳起来大致包括以下几个方面：

1. 电路参数的测量：主要包括电阻 R 、电容 C ，电感 L ，阻抗 Z ，品质因素 Q ，损耗等参数的测量；
2. 电能测量：如电压、电流、功率等电参数的测量；
3. 电信号的特性及其干扰的测量：如信号的波形、频率、相位、频谱、噪声的测量；
4. 电子元器件特性及参数测量：如电子管、晶体管、集成元件等特性的测量；
5. 非电量的电测：凡是通过各种途径将非电量如热工参数（温度、压力、流量等）、机械量（速度、位移、转速、力矩等）以及物理的、化学的、生物的、医学等有关参量转换成电量，均可用电子测量方法进行测量。关于非电量的转换和测量在自动检验课中进行讨论。

第二节 电子测量仪器的特点及分类

一、电子测量仪器的特点

电子测量仪器是指以电子技术为基础，以电子元件为核心，附加上指示器、显示器、记录器、打印机等终端设备组合而成的。它是实现电子测量的物质基础，是测量的工具。以上叙述的电子测量的特点是通过电子测量仪器来实现的，两者是统一的。而电子测量技术的水平，主要取决于电子测量仪器的种类和质量。随着电子科学技术及其它科学技术的发展，对电子测量仪器提出新的要求，促使电子仪器向着高准确度多功能、高速度，数字化、集成化、智能化、自动化等方向发展。

二、电子测量仪器的分类

由于电子测量仪器种类繁多，分类方法也不尽相同，只能大致地进行如下划分。

1. 按功能分类：电子测量仪器可分为专用和通用电子测量仪器两大类。专用电子仪器

是为特定的测试目的而设计的,只适用于特定的测试对象和测试条件。如无线电和军事方面用的超高频测试仪,微波测试仪,雷达综合测试仪,动态测试仪,计量上用的精密测试仪等。而通用电子仪器其适用范围较宽,通用性强,按其功能来分大致如下:

信号源:通称信号发生器,有低频、高频、超高频信号发生器,函数发生器、脉冲信号发生器等。

元件参数测试仪:如阻抗电桥、电容测试仪、RLC分选仪、电信器测试仪、绝缘电阻测试仪、Q表、电子管参数测试仪、晶体管特性图示仪、集成电路测试仪等。

电压测试仪器:如电压表、电平表、毫伏表、微伏表、数字电压表、矢量电压表、脉冲电压表、多用表等。

信号波形测试仪器:如通用示波器,记忆示波器,取样示波器、超低频示波器、多束示波器等。

频率、时间测试仪器:如数字频率计、电子计数器、石英钟、原子钟等。

2. 按频率范围分类:超低频($0.001\text{Hz}\sim 1\text{kHz}$);低频($20\text{Hz}\sim 200\text{kHz}$);高频($100\text{kHz}\sim 30\text{MHz}$);超高频($>30\text{MHz}$)。由于频率范围不同,即使功能相同的仪器,其电路结构、测量原理、使用方法是截然不同的。对于同样的一个被测信号或元件,用不同频率范围的仪器来测量其结果差别很大。

3. 按工作原理分类:可分为模拟式和数字式两大类。

模拟式电子测量仪器:是用来测量随时间连续变化的电信号或由其它各种参数转换成的电信号。测量时把这些连续变化的量用仪器的指针偏转或用图像的形式表示出来。如晶体管繁用表,示波器等均属模拟式电子测量仪器。

数字式电子测量仪器:是把被测的模拟信号通过模—数转换变成离散的数字量来进行测量。例如数字电压表,数字频率计,数字繁用表等。

4. 按测量准确度分类:标准计量仪器,用作计量标准传递的;精密测量仪器,用于科研和实验室工作方面的;简易测量仪器,用于一般生产现场的等。

5. 其它分类法:按仪器结构特点分类:如袖珍式(又叫手握式)、便携式、台式、面板式、插件式、组合式等。按仪器操作方式分类,有手动式、程控式和自动式等。

第三节 电子测量仪器的技术性能

电子仪器的技术性能(或称技术指标)是用以标志仪器的功能和质量的参数。一般包括三部分内容:

(1)是电气特性:如测量的量程、频率范围、准确度、分辨力、稳定性、输入输出阻抗;

(2)是一般特性:如电源、尺寸、重量、可靠性等;

(3)是工作条件:如温度、湿度、大气压、安装等。而决定仪器质量的主要是电气特性,它是设计、制造、使用、维修的依据。上述各指标的含义分述如下:

一、量程:电子测量仪器在满足误差要求的情况下,能够测量被测量的最大值与最小值之差。这个差值大小就称做仪器的量程。量程范围愈宽、仪器的通用性就愈强。为了覆盖足够宽的量程,通用电子测量仪器往往要分档,一般按1-2-5或1-3或10进位序列来划档级。

二、频率范围：对信号源（即信号发生器）而言，是指该信号源能产生信号的最低频率和最高频率。对测量仪器而言，在满足误差要求的情况下，它能工作的最低频率和最高频率。为了覆盖足够宽的频率范围，将频率范围分成可以连续衔接的频段，并用刻度盘来指示相应的数值。

三、准确度：是指在规定的条件下，用仪器来测量某个量时，其读数（又叫仪器的指示值）与被测定的实际值偏差的程度。其偏差值愈小，则测量的准确度愈高，反之，偏差值愈大，准确度愈低。把这个偏差值定义为误差。根据国家（或部颁）标准试行草案规定，仪器（包括仪表，电工量计等）的准确度，是以仪器在规定的条件下不应超过的最大误差，即“允许误差”来表征的。它规定了仪器最大误差的界限，而仪器生产厂是以仪器的基本误差来保证不超过允许误差的范围，即

$$\gamma_M = \pm \frac{\Delta X_M}{X_M} \times 100\%$$

式中： X_M ——仪器的满量程读数（即量程上限读数与量程下限读数之差）

$\Delta X_M = X - A$ = 仪器标尺一点上可能出现的最大绝对误差值。

X ——仪器标尺上任意一点的读数

A ——被测信号的实际值（真值）。由于人们对客观事物认识的局限性，真值难以得知，所以一般只能用比测量仪器高一级或数级的标准仪器或基准器具的相应标称值来代替真值。例如0~500 mV的电压表，在规定的条件下（环境温度为 $20^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $65 \pm 15\%$ ，大气压为 $1 \times 10^6 \pm 4 \times 10^3$ 帕斯卡，交流电源电压为 $220\text{V} \pm 2\%$ ），测试时，标尺某处出现最大绝对偏差值 $\Delta X_M = 5\text{mV}$ ，则此电压表的基本误差为：

$$\gamma_M = \pm \frac{\Delta X_M}{X_M} \times 100\% = \pm \frac{5}{500} \times 100\% = \pm 1\%$$

此值就是该表的准确度（又叫满度百分误差），如将 $\pm 1\%$ 去掉%号及 $\pm$ 号，只剩下数字1，称为该仪表的准确度等级，用S表示，此表 $S=1$ ，即1级表。

如果仪器工作在非正常工作条件下，尚会产生温度、频率、电源波动等附加误差。

四、分辨力：是指测量仪器能够检测出被测参量最小变化的能力。能够检测出的变化量愈小，其分辨能力就愈高。对于数字式仪器，其分辨力是指显示数码管的最后一位读数的一个字，对于模拟式仪器是显示读数标尺的最小刻度的一半。亦即小于该仪器的最大绝对误差值的一半。一般高准确度的仪器其分辨力亦高，反之，分辨力高的其准确度不一定高。

五、稳定性：是指在工作条件恒定的情况下，在规定的时间内，仪器能够保持其指示值不变的能力。它只是与时间变化有关，不包括其它影响因素（如温度、频率、电源电压等因素的变化）造成的误差。对于电子仪器稳定性所规定的时间间隔通常为：15分、30分、1小时、3小时、7小时、24小时；对于标准计量仪器规定为10天、30天、3个月、6个月、1年或更长的时间间隔。对于没有给出稳定误差的电子仪器，一般也规定了开机通电预热的时间为5~10分钟。

六、输入输出阻抗：电子仪器的输入阻抗是以输入端的并联等效电阻和等效电容表示的。由于容抗与频率成反比，所以输入阻抗随着频率增高而降低。输入阻抗对被测信号有分流作用，其阻抗高低直接影响被测电路工作的正常状态，要求尽量提高电子仪器的输入阻

抗。

输出阻抗对信号发生器而言,要求与负载匹配,即要求信号源输出端连接与其输出阻抗等值的负载电阻。其数值由输出衰减器来决定。可按具体的信号发生器要求来选择。如果阻抗不匹配,将使信号发生器的输出衰减不准确,输出信号的波形和额定输出功率亦受到影响。

本章思考题

- 1—1 简述电子测量仪器的主要特点和具有这些特点的原因。
- 1—2 电子测量仪器的使用范围。
- 1—3 按功能和频率范围给电子测量仪器分类。
- 1—4 电子测量仪器的基本性能指标及其含意是什么?

第二章 信号源

第一节 概述

一、信号源的用途

信号源亦称信号发生器，是能产生频率及幅度可调的不同波形信号电子仪器。作为测试无线电及电子线路的各种参数（电压、电流、阻抗等），性能（频率响应，失真度、增益等），各种电子元件参数（电阻R、电容C、电感L、晶体管T、集成电路IC等）的激励信号，以及为调试和维修无线电设备、电子仪器等必要的信号。

二、信号源的分类

由于信号源应用广泛，种类繁多，除专用的信号发生器（如调试电视机用的电视信号发生器、编码用的脉冲信号发生器、频谱信号发生器、噪声信号发生器、微伏发生器等）以外，用得最多的是通用信号发生器，如正弦波信号发生器，函数信号发生器，脉冲信号发生器等。其中正弦信号发生器的使用尤为广泛，这是由于正弦波形不受线性电路或线性系统的影响，因此在正弦信号的激励下，线性电路内各点电压、电流彼此之间除幅度和相位有差异外，都具有同一频率的正弦波。这样便于对线性电路或系统进行频率特性分析。其次函数发生器较多的作为自动控制系统过渡过程状态分析的激励信号。因此，本章重点讨论低频正弦波信号发生器和函数信号发生器。

三、信号发生器的技术性能

1. 有效频率范围：是指在各项性能指标得以证保时的频率范围。从使用角度而言，希望信号发生器提供频率范围尽可能宽。目前生产的低频信号发生器从1Hz到1MHz，某些专用的信号源可达10MHz以上；高频信号发生器从100KHz到30MHz；超高频标准信号发生器为4~300MHz；对于脉冲信号发生器没有一定的准标。在有效频率范围内，频率调节可以是连续的，也可以是断续的、由于频率范围宽，一般皆分成若干频段，例如XD-1A型信号发生器频率范围为1Hz~1MHz，共分成六个频段（参看技术性能说明），其他类型的信号发生器类似，也分成若干频段。

2. 频率准确度：是指频率刻度盘的误差（准标值与标称值之差，这里误差定义是对供给量的仪器而言。一般频率准确度约在 $\pm(1\sim10)\%$ 的范围内，准标信号发生器小于 $\pm1\%$ 。

3. 频率稳定度：是指在工作条件恒定的情况下，在规定的时间内，发生器提供的频率保持不变。如果没有足够的稳定度，就不能保证足够的精确度。一般要求稳定度优于 $10^{-2}\sim10^{-4}$ ，作为精密测量，要求高达 $10^{-8}\sim10^{-7}$ 。

4. 非线性失真: 对于正弦波信号发生器要求输出的波形应尽量接近正弦波, 其谐波分量尽可能地小。一般低频信号发生器的非线性失真度不应超过 $1\sim 3\%$, 电压输出的失真度一般小于 0.1% , 功率输出的失真度一般小于 0.5% 。

对于高频和超高频信号发生器, 由于LC谐振回路的滤波作用, 对于失真度无严格要求。

对于脉冲信号的波形, 用前后沿的上升时间、下降时间及脉冲宽度指标来表示。

5. 输出电压和功率: 信号发生器输出工作频率的信号电压, 根据测量的需要均连续可调。通过一系列的衰减器, 可以从毫伏调到输出的最高电压。有的信号发生器(如XD-1A型)还可以输出功率。

6. 输出阻抗: 视不同类型的发生器而异, 如低频信号发生器, 通过输出变压器的匹配可以有几种不同的输出阻抗(如 50Ω 、 75Ω 、 600Ω 、 $5K\Omega$), 高频信号发生器只有一种输出阻抗 50Ω (或 75Ω)。

第二节 低频正弦信号发生器

低频信号发生器是多用途的正弦波信号发生器, 其频率范围在 $1\text{Hz}\sim 200\text{KHz}$, XD-1A低频信号发生器的频率上限可达 1MHz 。下面以此型号为例讨论它的工作原理及其使用。

一、整机原理框图

如图2-2-1所示, 整机由振荡器(即具有不同频率的正弦波产生器)、幅度衰减器、功率放大器及衰减器, 还有输出阻抗匹配、电源等几部分组成(图中 K_0 为粗调)。各部分工作原理如下:

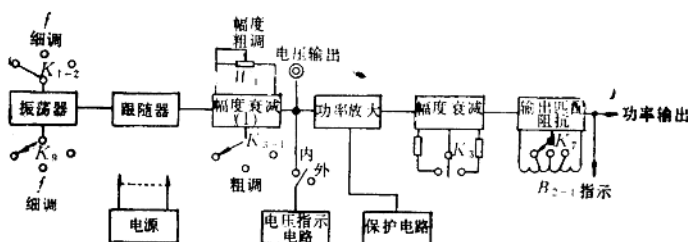


图2-2-1 XD-1A型低频信号发生器原理框图

二、RC串并联正弦振荡器

振荡器是一种自动地将直流电源的能量变换成一定波形的交变振荡能量的装置。正弦波振荡器由一个具有选频特性的选频网络和放大器组成, 如图2-2-2所示。一般高频(1MHz 以上)信号源常用LC元件组成谐振式选频网络; 低频信号源(1MHz 以下)常采用RC元件组成谐振式选频网络, 其谐振频率连续可调、电路简单、造价低。

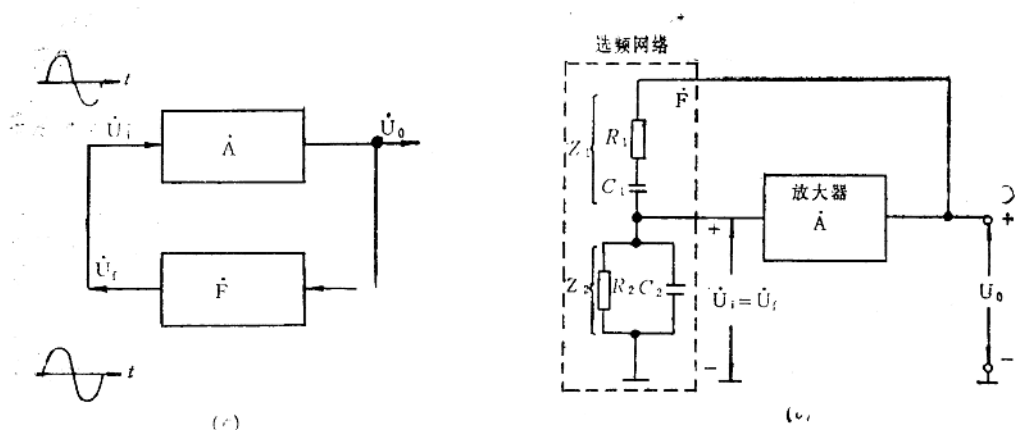


图2-2-2 RC桥式正弦振荡原理图

1. 正弦振荡器电路原理图

如图2-2-2所示, 图(a)为原理框图, 由放大 $\dot{A}$ 和反馈网络兼作选频网络 $\dot{F}$ 组成, 选频网络由图(b)中 R_1C_1 串联和 R_2C_2 并联组成,

2. RC串并联合网络的选频特性

图(a)中 $\dot{F}$ 是振荡器中正反馈和选频网络, 对它的要求是在其输入电压 U 幅度恒定时, 其输出电压 $\dot{U}_f$ 在任意频率 f 下有最大值, 并要求在任意频率 f 下输出电压 U_f 与输入电压 U 保持同相位(即无相移), 以保持振荡器的正常工作。如何满足上述要求呢?

令 $Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$ —— R_1C_1 串联阻抗

$$Z_2 = R_2 // C_2 = R_2 \cdot \frac{1}{j\omega C_2} / R_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \text{ —— } R_2C_2 \text{ 并联阻抗}$$

设 $R_1 = R_2 = R$; $C_1 = C_2 = C$, 代入上式
则反馈系数

$$\dot{F} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{j\omega RC}{(1 - \omega^2 R^2 C^2) + j3\omega RC} \quad (2-1)$$

令 $\omega_o = \frac{1}{RC}$, 代入(2-1)式

$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)} \quad (2-2)$$

由此可得RC串并联选频网络的

$$\text{幅频特性} \quad F = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)^2}} \quad (2-3)$$

相频特性

$$\varphi_F = -\arctg \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}{3} \quad (2-4)$$

当

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

或

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

代入 (2-3) 及 (2-4) 式, 则

$$F = F_{max} = \frac{1}{3}$$

$$\varphi_F = 0$$

即信号经过反馈、选频网络后, 输出幅度为输入幅度的 $1/3$, 反馈系数 F 达到最大值, 此时相位差 φ 为 0 , 即输出与输入为同相位。

上述条件符合振荡器正常工作的幅值和相位条件, 否则振荡器不能正常工作, 如图 2-2-3 所示。这是因为: 当 $\omega < \omega_0$ 较多时, 容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C} \gg R$, 则 Z_1 中 R 可忽略, Z_2 中容抗 C 的

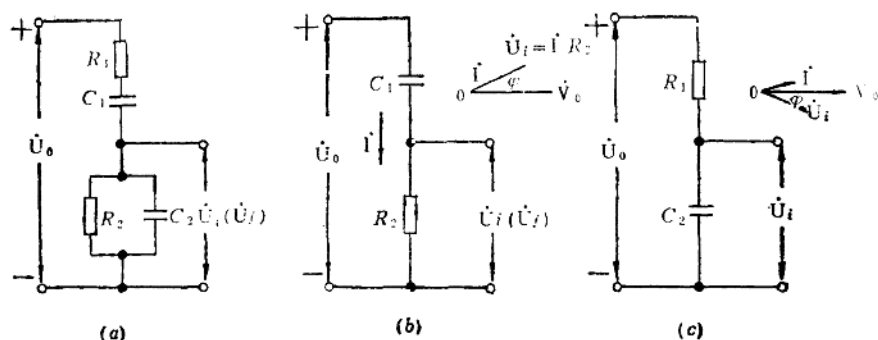


图 2-2-3 RC 串并联选频网络

作用可以忽略, 网络等效成图 (b), U_1 与电流 I 同相位, 超前输入电压 U_0 相角 φ 。 ω 愈小相角 φ 大, 则 U_1 也就愈小, 不能维持振荡; 当 $\omega > \omega_0$ 较多时, 容抗 $X_C = \frac{1}{\omega C} \ll R$, 与上述情况相反, U_1 滞后 U_0 相角 φ , 如图 (c) 所示, ω 愈高, φ 角越大, U_1 也就越小, 仍不能维持振荡。因此, 只有在 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$, 时 $\varphi = 0$, $U_1 = \frac{1}{3} U_0$, 振荡器才能维持正常工作。

由上分析可知, ω_0 是由网络中 R 、 C 的参数决定的, 改变 R 、 C 参数, 就可以获得不同的频率 f 。其中 C 用于改变频率范围 (将频率分档或分段) 实现组调, R 是在某一频段 (或档) 上进行频率细调。图 2-2-4 (a) 为实际的 XD-1A 型发生器的 R 、 C 串并联选频网络, 图 (b)

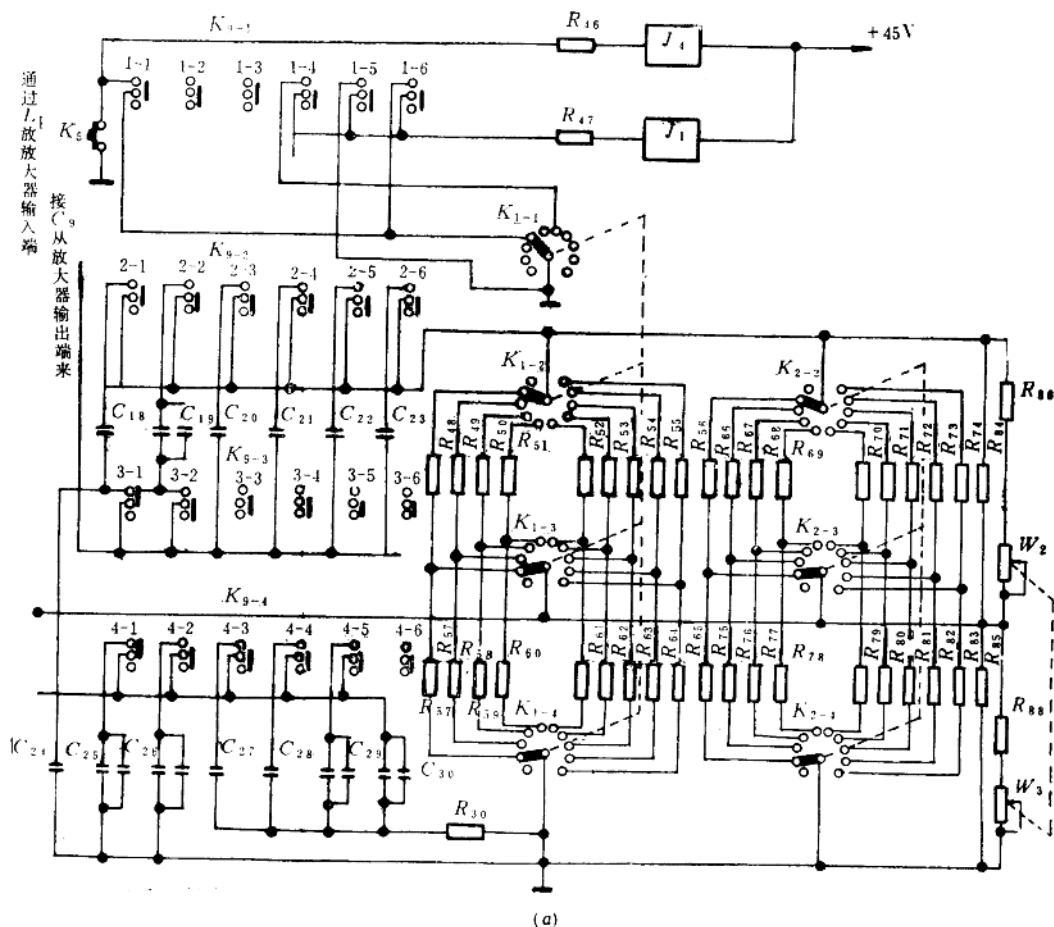
为简化网络、共分六个频段，用琴键开关 $K_{0-1} \sim K_{0-4}$ 来控制频段选择，用切换开关 $K_{1-1} \sim K_{1-4}$ ， $K_{2-2} \sim K_{2-4}$ 和电位器 W_2 、 W_3 来实现每个频段范围内的频率细调。图中电容 $C_{18} \sim C_{23}$ 分别与电阻 $R_{48} \sim R_{74}$ 以及 R_{84} 、 R_{86} 、 W_2 进行串联； $C_{25} \sim C_{30}$ 分别与 $R_{57} \sim R_{83}$ 以及 R_{86} 、 R_{88} 、 W_3 进行并联。图(c)就是各档开关打在如图(b)所示位置时，各元件之间串、并联的情况，其作用如图2-2-3的分析。

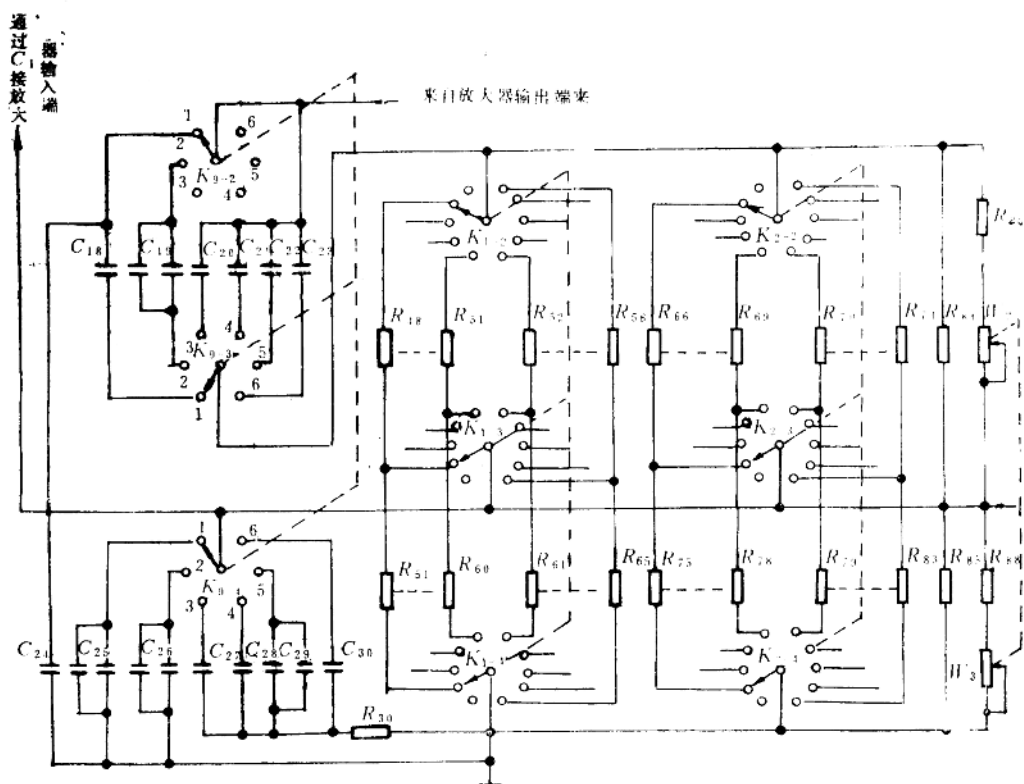
3. 放大器

(1) 对放大器的要求

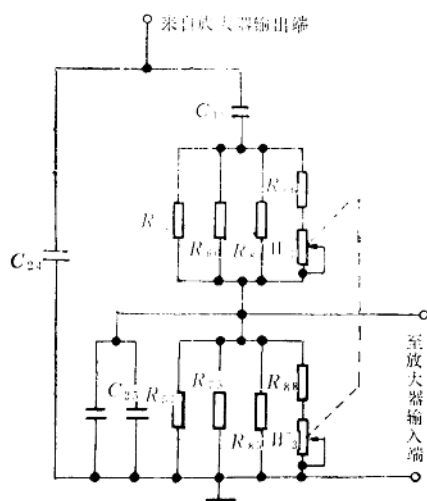
放大器(含电源)作为补充选频网络能量损耗的装置，必须与RC网络协调工作，因此要满足以下几点要求：

① 放大器要有足够宽的频率范围，保证在全部工作频率范围内无相移。这样实际的振荡频率才能由RC网络来决定，即 $f = \frac{1}{2\pi RC}$ 。





(b)



(c)

图2-2-4 XD-1A型RC串并联选频网络