

第 3 章 信号发生器

本章要点

- 信号源的功用、种类和主要性能指标
- 通用低频、高频信号发生器的组成原理、特性和应用
- 合成信号源的组成原理、特性和应用
- 频率合成技术的发展状况

3.1 信号发生器概述

3.1.1 信号发生器的功用

测量用信号发生器,通常称为信号源。在研制、生产、使用、测试和维修各种电子元器件、部件及整机设备时,都需要信号源提供激励信号,由它产生不同频率、不同波形的电压和电流信号,并加到被测器件、设备上,然后用其他测试仪器观测其输出响应,如图 3.1 所示。信号发生器可提供符合一定电技术要求的电信号,其波形、频率和幅度都是可以调节的,并可准确读出数值。在电子测量中,信号发生器是最基本、应用最广泛的测量仪器。其功用主要包括以下 3 方面。

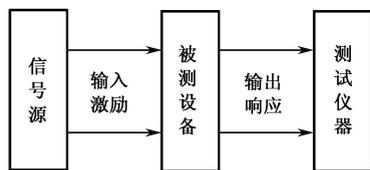


图 3.1 信号源的功用

① 激励源。作为某些电气设备的激励信号源。

② 信号仿真。在设备测量中,常需要产生模拟实际环境特性的信号,如对干扰信号进行仿真。

③ 校准源。产生一些标准信号,用于对一般信号源进行校准(或比对)。

3.1.2 信号发生器的分类

信号发生器应用广泛,种类型号繁多,性能各异,分类方法也不尽相同,下面介绍几种常见的分类方法。

1. 按频率范围分类

信号源输出频率范围很宽,表 3.1 列出了其分类。国际上规定,30kHz 以下为甚低频、超低频段,30kHz 以上每 10 倍频程依次划分为低、中、高、甚高、特高、超高等频段。在微波技术中,按波长 $[\lambda(\text{m})=300f(\text{MHz})]$ 划分为米波、分米波、厘米波、毫米波等波段。在一般电子技术中,把 20Hz~10MHz 称为视频,30kHz 至几十 GHz 称为射频。当然,这些只是一个大致的划分。

表 3.1 中频段的划分,不是绝对的。例如,在电子仪器的门类划分中,“低频信号发生器”指 1Hz~1MHz 频段,波形以正弦波为主,或兼有方波及其他波形的信号发生器;“射频信号发生器”则指能产生正弦信号,频率范围部分或全部覆盖 30kHz~1GHz(允许向外延伸),并且具有一种或一种以上调制功能的信号发生器。可见,这两类信号发生器频率范围有重叠,而所谓“射频信号发生器”包含了表 3.1 中视频以上各类信号发生器。就是完全按照表 3.1 中频段术语进行的分类,频率范围也有不尽相同的划分。

2. 按输出波形分类

根据使用要求,信号发生器可以输出不同波形的信号,表 3.2 列出了各种波形示意图及其主要特性。

表 3.1 频段的划分

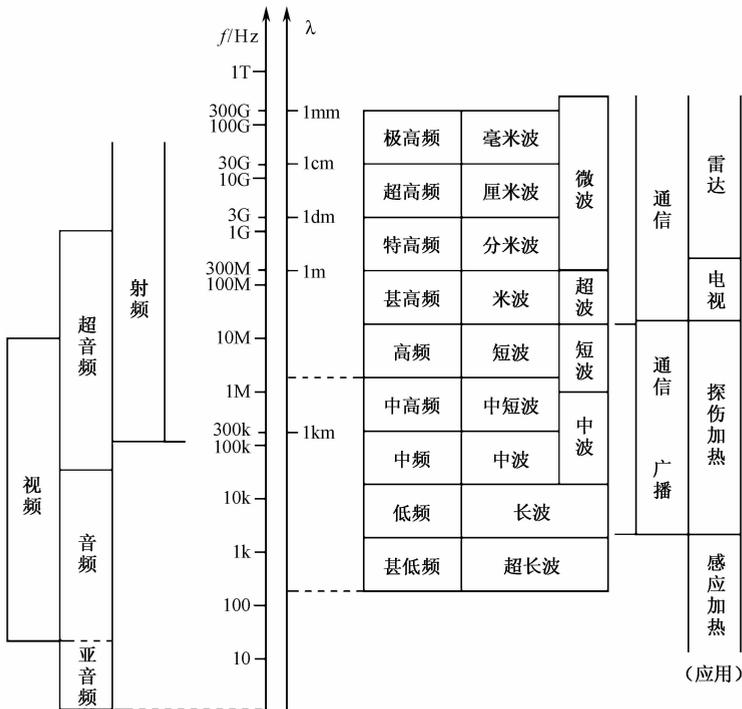
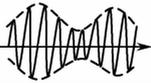
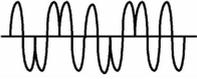


表 3.2 各种信号源产生的典型的信号波形及其主要特性

名称	波形示意图	主要特性
正弦波信号		正弦波是电子系统中最基本的测试信号,频率从几 μHz 至几十 GHz。大多数信号源都具备正弦波输出
函数信号		通常包含正弦波、方波、三角波三种波形,有的还包含锯齿波、脉冲波、梯形波、阶梯波等波形,频率从几 Hz 至上百 MHz
扫频信号		频率在某区间有规律地扫动,多用锯齿波进行线性扫频。多数扫频源的输出波形为正弦波、方波、三角波,还有非线性的对数扫频
脉冲信号		输出的脉冲信号可按需要设置其重复频率、脉冲宽度、占空比、上升及下降时间等参数。脉冲信号有的还有双脉冲输出
数字信号		可按编码要求产生 0/1 逻辑电平(多为 TTL 或 ECL 电平),也称数据发生器、图形或模式发生器。通常具备多路数字输出
噪声信号		提供随机噪声信号,具有很宽的均匀频谱,常用于测量接收机的噪声系数或调制到高频、射频载波上作为干扰源
伪随机信号		是一串 0/1 电平随机编码的数字序列信号,因其序列周期相当长(在足够宽的频带内产生相当平坦的离散频谱),故有点类似随机信号
任意波形		能产生任意形状的模拟信号,例如,模仿产生心电图、雷电干扰、机械运动等形状复杂的波形

名称	波形示意图	主要特性
调制信号		将模拟信号或数字信号调制到射频载波信号上,以便于远程传输。常用的调制方式有:调幅、调频、调相、脉冲调制、数字调制等
数字矢量信号		通过正交调制(I-Q调制),可以同时传递幅度和相位信息,故称为数字矢量信号源。该内容将在3.4节中介绍

3. 按信号发生器的性能分类

按信号发生器的性能指标,可分为一般信号发生器和标准信号发生器。前者是指对其输出信号的频率、幅度的准确度和稳定度及波形失真等要求不高的一类发生器;后者是指输出信号的频率、幅度、调制系数等在一定范围内连续可调,并且读数准确、稳定,屏蔽性良好的中、高档信号发生器。

还有其他的分类方法,例如,按照使用范围,可分为通用信号发生器和专用信号发生器(如调频立体声信号发生器、电视信号发生器及矢量信号发生器等);按照调节方式,可分为普通信号发生器、扫频信号发生器和程控信号发生器;按照频率产生方法,又可分为谐振信号发生器、锁相信号发生器及合成信号发生器等。

上面所述仅是几种常用的分类方式,而且是大致的分类。随着电子技术水平的不断发展,信号发生器的功能越来越齐全,性能越来越优良,同一台信号发生器往往具有相当宽的频率覆盖范围,以及输出多种波形信号的功能。例如,国产 EE1631 型函数信号发生器,频率覆盖范围为 $0.005\text{Hz}\sim 40\text{MHz}$,跨越了超低频、低频、视频、高频到甚高频几个频段,可以输出正弦波、三角波、方波、锯齿波、脉冲波、调幅波、调频波及 TTL 波等多种波形的信号。

3.1.3 正弦信号发生器的性能指标

在各类信号发生器中,正弦信号发生器是最普通、应用最广泛的一类,几乎渗透到所有的电子学实验及测量中。其原因除了正弦信号容易产生,容易描述,是应用最广的载波信号外,还由于任何线性双端口网络的特性,都可以用它对正弦信号的响应来表征。由于信号发生器作为测量系统的激励源,被测器件、设备各项性能参数的测量质量将直接依赖于信号发生器的性能。通常用频率特性、输出特性和调制特性(俗称三大指标)来评价正弦信号发生器的性能,其中包括 30 余项具体指标。不过,由于各种仪器的用途不同,精度等级不同,并非每类每台产品都用全部指标进行考核。另外,各生产厂家出厂检验标准及技术说明书中的术语也不尽一致。这里仅介绍信号发生器中几项最基本、最常用的性能指标。

1. 频率范围

频率范围是指信号发生器所产生信号的频率范围,在该范围内既可连续又可由若干频段或一系列离散频率覆盖,在此范围内应满足全部误差要求。例如,国产 XD1 型信号发生器,输出信号频率范围为 $1\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$,分 6 挡,即 6 个频段,并且,为了保证有效频率范围的连续,两相邻频段间有相互衔接的公共部分,即频段重叠。又如德科技(安捷伦)MXG 微波信号发生器 N5183B 产生的正弦信号的频率范围为 $9\text{kHz}\sim 40\text{GHz}$,频率分辨率为 0.001Hz 。

2. 频率准确度

频率准确度是指信号发生器度盘(或数字显示)数值与实际输出信号频率间的偏差,通常用相对误差表示

$$\alpha = \frac{f - f_0}{f_0} = \frac{\Delta f}{f_0} \times 100\% \quad (3.1)$$

式中, f_0 为标称值(度盘或数字显示数值, 也称预调值), f 为输出正弦信号频率的实际值, $\Delta f = f - f_0$ 为频率绝对误差。

频率准确度实际上是输出信号频率的工作误差。用度盘读数的信号发生器的频率准确度为 $\pm(1\% \sim 10\%)$, 精密低频信号发生器频率准确度可达 $\pm 0.5\%$ 。例如, 调谐式 XPC-6 型标准信号发生器的频率准确度优于 $\pm 1\%$, 而一些采用频率合成技术带有数字显示的信号发生器的输出频率具有基准频率(晶振)的准确度, 若机内采用高稳定度晶体振荡器, 则输出频率的准确度可达到 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ 。

3. 频率稳定度

频率稳定度指标要求与频率准确度相关, 频率准确度是靠频率稳定度来保证的。频率稳定度是指在其他外界条件恒定不变的情况下, 在规定时间内, 信号发生器输出频率相对于预调值变化的大小。按照国家标准, 频率稳定度又分为短期频率稳定度和长期频率稳定度。

短期频率稳定度定义: 信号发生器经过规定的预热时间后, 信号频率在任意 15 分钟内所发生的最大变化, 表示为

$$\delta = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_0} \times 100\% \quad (3.2)$$

式中, f_0 为预调频率, f_{\max} 和 f_{\min} 分别为任意 15 分钟内信号频率的最大值和最小值。

长期频率稳定度定义: 信号发生器经过规定的预热时间后, 信号频率在任意 3 小时内所发生的最大变化, 表示为

$$x \times 10^{-6} + y \text{ Hz} \quad (3.3)$$

式中, x, y 是由厂家确定的性能指标值。也可以用式(3.2)表示频率长期稳定度。需要指出, 许多厂商的产品技术说明书中并未按上述方式给出频率稳定度指标。例如, 国产 HG1010 信号发生器和美国的 KH4024 信号发生器的频率稳定度都是 $0.01\%/h$, 含意是: 经过规定预热时间后, 两种信号发生器每小时(h)的频率漂移($f_{\max} - f_{\min}$)与预调值之比为 0.01% 。有些则以天(d)为时间单位表示稳定度, 例如, 国产 QF1480 合成信号发生器频率稳定度为 $5 \times 10^{-10}/d$ 。而 QF1076 调谐信号发生器(频率范围 $10 \sim 520\text{MHz}$)频率稳定度为 $\pm 50 \times 10^{-6}/5\text{min} + 1\text{kHz}$, 是用相对值和绝对值的组合形式表示稳定度的。又如, 国产 XD-1 低频信号发生器, 通电预热 30 分钟后, 第 1 小时内频率漂移不超过 $0.1\% \cdot f_0(\text{Hz})$, 其后 7 小时内不超过 $0.2\% \cdot f_0(\text{Hz})$ 。通常, 通用信号发生器的频率稳定度为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$, 用于精密测量的高精度高稳定度信号发生器的频率稳定度应高于 $10^{-6} \sim 10^{-7}$, 而且要求频率稳定度一般应比频率准确度高 1~2 个数量级, 例如, XD-2 型低频信号发生器的频率稳定度优于 0.1% , 频率准确度优于 $\pm(1\% \sim 3\%)$ 。

4. 失真度与频谱纯度

在理想情况下, 正弦信号发生器的输出应为单一频率的正弦波, 但由于信号发生器内部放大器等元器件的非线性, 会使输出信号产生非线性失真, 除了所需要的正弦波频率外, 还有其他谐波分量。

通常, 用信号失真度来评价低频信号发生器输出信号波形接近正弦波的程度, 并用非线性失真系数 γ 表示

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \times 100\% \quad (3.4)$$

式中, U_1 为输出信号基波有效值, U_2, U_3, \dots, U_n 为各次谐波有效值。由于 U_2, U_3, \dots, U_n 比 U_1

小得多,为了测量上的方便,也用下面公式定义 γ 。

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \cdots + U_n^2}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + \cdots + U_n^2}} \times 100\% \quad (3.5)$$

一般低频正弦信号发生器的失真度为 $0.1\% \sim 1\%$,高档正弦信号发生器失真度可低于 0.005% 。例如, XD-2 低频信号发生器电压输出时的失真度小于等于 0.1% ,而 ZN1030 的非线性失真系数小于等于 0.003% 。对于高频信号发生器,这项指标要求较低,作为工程测量用仪器,其非线性失真小于等于 5% ,即以眼睛观察不到明显的波形失真即可。

对于高频信号发生器的失真度,常用频谱纯度来评价,要求输出频谱纯净的信号。频谱纯度不仅要考虑高次谐波造成的非线性失真,还要考虑由非谐波干扰噪声而造成的正弦波失真。

频谱纯度通常要求

$$20\lg \frac{U_s}{U_n} = (80 \sim 100) \text{ dB} \quad (3.6)$$

式中, U_s 是信号幅度, U_n 是高次谐波及干扰噪声的幅度。

5. 输出阻抗

输出阻抗的概念在“电路”或“电子电路”课程中都有说明。信号发生器的输出阻抗视其类型不同而异。低频信号发生器电压输出端的输出阻抗一般为 600Ω (或 $1\text{k}\Omega$)。功率输出端依输出匹配变压器的设计而定,通常有 50Ω 、 75Ω 、 150Ω 、 600Ω 和 $5\text{k}\Omega$ 等几挡。高频信号发生器一般仅有 50Ω 或 75Ω 挡。

当使用信号发生器时,要特别注意与负载阻抗的匹配,因为信号发生器输出电压的读数是在匹配负载的条件下标定的。若负载与信号源输出阻抗不匹配,则信号源输出电压的读数是不准确的。

6. 输出电平

输出电平指的是输出信号幅度的有效范围,即由产品标准规定的信号发生器的最大输出电压和最大输出功率在其衰减范围内所得到输出幅度的有效范围。输出幅度可用电压(V, mV, μV)或分贝表示。例如, XD-1 低频信号发生器在 $1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 范围内,最大电压输出大于 5V ,在 $10\text{Hz} \sim 700\text{kHz}$ (50Ω 、 75Ω 、 150Ω 、 600Ω) 范围内,最大功率输出大于 4W 。

在信号发生器的输出级中,一般都包括衰减器,其目的是获得从微伏级(μV)到毫伏级(mV)的小信号电压。例如, XD-1 型信号发生器最大信号电压为 5V ,通过($0 \sim 80$)dB 的步进衰减输出,可获得 $500\mu\text{V}$ 的小信号电压。在信号发生器的性能指标中,包括“衰减器特性”这一指标,主要指衰减范围和衰减误差,例如,上述 XD-1 型信号发生器的衰减器特性为:电压输出,在 $1\text{Hz} \sim 1\text{MHz}$ 范围内,衰减小于 $(80 \pm 1.5)\text{dB}$ 。

与频率稳定度指标类似的还有输出信号幅度稳定度及平坦度指标。幅度稳定度是指信号发生器经规定时间预热后,在规定时间内输出信号幅度对预调幅度值的相对变化量,例如, HG1010 信号发生器幅度稳定度为 $0.01\%/h$ 。平坦度是指温度、电源、频率等引起的输出幅度变动量。使用者通常关心输出幅度随频率变化的情况,像用静态“点频法”测量放大器的幅频特性时就是如此。现代信号发生器一般都有自动电平控制电路(ALC),可以使平坦度保持在 $\pm 1\text{dB}$ 以内,即幅度波动控制在 $\pm 10\%$ 以内。例如, XD8B 超低频信号发生器的幅频特性为小于等于 3% 。

7. 调制特性

高频信号发生器在输出正弦波的同时,一般还能输出一种或一种以上的已被调制的信号,

多数是调幅信号和调频信号,有些还带有调相和脉冲调制等功能。当调制信号由信号发生器内部产生时,称为内调制;当调制信号由外部加到信号发生器进行调制时,称为外调制。这类带有输出已调波功能的信号发生器,是测试无线电收发设备不可缺少的仪器。例如,XFC-6 标准信号发生器就具备内、外调幅,内、外调频,进行内调幅时同时进行外调频,同时进行外调幅与外调频等功能。而像是德科技(安捷伦)E8663D 模拟信号发生器同时具有调幅、调频、调相、脉冲调制等多种调制功能。

实际上,评价信号发生器性能的指标不止上述各项,这里仅对最常用、最重要的项目做了概括介绍。由于使用目的、制造工艺、工作机理等不同,各类信号发生器的性能指标相差很悬殊,因而价格相差也就很大,所以在选用信号发生器时(选用其他测量仪器也是如此),必须考虑合理性和经济性。以对频率的准确度要求为例,当测试谐振回路的频率特性、电阻值和电容损耗角随频率的变化时,仅需要有 $\pm 1 \times 10^{-2} \sim \pm 1 \times 10^{-3}$ 的准确度,而当测试广播通信设备时,则要求 $\pm 1 \times 10^{-5} \sim \pm 1 \times 10^{-7}$ 的准确度。显然,两种场合应当选用不同档次的信号发生器。

3.2 模拟信号发生器

本节介绍的模拟信号发生器是指一些常用的传统信号发生器,与后面介绍的合成信号发生器有区别。所谓传统信号发生器,是指以单元模拟电路为主组成的仪器,如低频信号发生器、函数发生器、高频信号发生器及脉冲信号发生器等。这类仪器性能指标不是很高,但价格便宜,且能满足一般实验测试的要求,在模拟电子线路与系统的设计、测试和维修中获得广泛应用,仍然是当前大量使用的信号发生器。

由于在专业基础课中都学过振荡器、放大器等单元模拟电路,故本节只介绍各种信号发生器组成的框图原理、特点及实例。

3.2.1 低频信号发生器

几乎所有的电子实验和测量都需要低频信号发生器。事实上,“低频”就是从“音频”(20Hz~20kHz)的含义演化而来的,由于其他电路测试的需要,因此频率向下、向上分别延伸至超低频段和高频段。现在一般“低频信号发生器”是指1Hz~1MHz频段,输出波形以正弦波为主,或兼有方波及其他波形的发生器。

1. 低频信号发生器组成原理

通用低频信号发生器的组成框图如图3.2所示,图(a)为波段式,图(b)为差频式。波段式信号发生器输出频率由主振器确定,通常由RC振荡器产生低频正弦波,经电压放大达到电压输出幅度的要求,由电位器和衰减器调节输出。这种信号发生器带负载能力弱,只能提供电压输出。当需要功率输出时,可选用后面加功率放大器的信号发生器。

由于RC振荡器的频率覆盖范围小,故波段式信号发生器通常做成多波段的。

差频式信号发生器由可变频率振荡器 f_1 和固定频率振荡器 f_2 通过混频器产生两者差频信号 $f_0 = f_1 - f_2$,经过低通滤波器滤除混频器输出中含有的高频分量,再经放大衰减输出,得到所需要的低频信号。其最大优点是频率覆盖范围大,容易做到整个低频段内频率可连续调节而不用更换波段,且输出电平也比较平稳。

频率覆盖范围大小通常用频率覆盖系数表示

$$k = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (3.7)$$

以通信中常用的某电平振荡器(实际上就是低频信号发生器)为例, $f_1 = 3.3997 \sim$

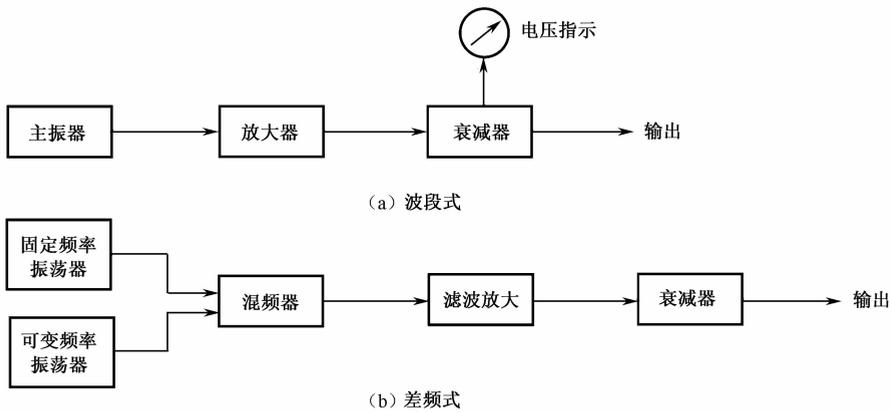


图 3.2 低频信号发生器组成框图

5. 1000MHz , $f_2 = 3.4000\text{MHz}$, 则 $f_0 = 300\text{Hz} \sim 1.7000\text{MHz}$ 。比较一下, 频率覆盖系数为

$$k_0 = \frac{1.7000\text{MHz}}{300\text{Hz}} \approx 6 \times 10^3$$

而可变频率振荡器(相当波段式中一个波段)的频率覆盖系数为

$$k_1 = \frac{5.1000}{3.3997} = 1.5$$

可见, 差频式信号发生器的频率覆盖范围大得多。

2. 主振荡器的特点

低频信号发生器中的主振荡器大多都采用文氏桥式振荡器, 其特点是频率稳定, 易于调节, 并且波形失真小和易于稳幅。

文氏桥式振荡器是典型的 RC 正弦振荡器。其振荡频率取决于 RC 式反馈网络的谐振频率, 表达式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.8)$$

在低频信号发生器中为何不采用较熟悉的 LC 振荡器呢? 这是因为 LC 振荡器的频率取决于下式

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \quad (3.9)$$

当频率较低时, L 、 C 数值大, 相应的体积、重量也相当大, 分布电容、漏电导等也都相应很大, 品质因数 Q 值降低很多, 谐振特性变坏, 频率调节也困难。而在 RC 振荡器中, 频率降低, 增大电阻容易做到, 且功耗也可减小。

另外, 还有一个原因, 在 LC 振荡器中, f_0 与 \sqrt{LC} 成反比, 因而同一波段内频率覆盖系数很小。例如, L 固定, 调节电容 C 改变振荡频率, 设电容器调节范围为 $40 \sim 450\text{pF}$, 则频率覆盖系数为

$$k = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \sqrt{\frac{C_{\max}}{C_{\min}}} = \sqrt{\frac{450}{40}} \approx 3$$

而用 RC 振荡器, 由式(3.8)可知, f_0 与 RC 成反比, 频率覆盖系数为

$$k = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{450}{40} \approx 11$$

在一个波段内有较大的频率覆盖系数。

3. 低频信号发生器的主要技术特性

目前,低频信号发生器主要技术指标的典型数据大致如下。

频率范围:1Hz~1MHz分频段,均匀连续可调

频率稳定度:优于0.1%

非线性失真:小于0.1%~1%

输出电压:0~10V

输出功率:0.5~5W连续可调

输出阻抗:50Ω, 75Ω, 600Ω, 5kΩ

输出形式:平衡输出与不平衡输出

XD系列低频信号发生器是国内常用的电子测量仪器,其主要型号和性能如表3.3所示。

表 3.3 部分低频信号发生器主要性能

型号	频率范围	输出幅度	说明
XD22	1Hz~1MHz	正弦 $U > 5V$, 脉冲 $U < 10V$	输出正弦波、脉冲
XD7	20Hz~20kHz	$U > 5V, P > 0.5W$	音频
XD7-S	1Hz~1MHz	正弦 $U > 5V$, 脉冲 $U < 10V$	输出正弦波、脉冲
XD12A	10Hz~1MHz	正弦 $U > 5V, P > 5W$	带数字频率计
XD-11	1Hz~1MHz	正弦 $U > 5V$, 脉冲 $U < 10V$	输出正弦波、脉冲等7种波形
XD-12	1Hz~1MHz	正弦 $U > 5V$, 脉冲 $U < 10V$	

4. 使用方法

低频信号发生器型号很多,但是它们的基本使用方法是类似的。

① 输出频率调节与指示:使用时,先将频率范围置于相应的挡位,按所需的频率调节频率度盘于相应频率点上。在通常情况下,频率微调旋钮置于零位。

② 输出阻抗的配接:信号发生器要求负载与其输出阻抗相匹配,使输出信号失真小,功率大。

③ 输出电路选择:根据外接电路的输入方式,选择相应的平衡或不平衡输出。

④ 输出电压的调节和测读:调节输出电压旋钮,可以连续改变输出电压的大小。在使用衰减器(除0dB衰减的其他挡位)时,输出电压的大小需要根据指示电压表的读数来换算,换算关系为

$$\text{输出电压} = \text{指示值} / \text{电压衰减的倍数}$$

例如,信号发生器指示电压表的读数为20V,衰减分贝数为60dB时,输出电压为 $20V/1000 = 0.02V$ (60dB的电压衰减倍数为1000)。当信号发生器平衡工作时,电压表的读数为实际电压值的一半。

3.2.2 高频信号发生器

高频信号发生器是指能够供给等幅正弦波和调制波信号的信号发生器,通常分为调幅和调频两种。其工作频率一般在100kHz~35MHz范围内,输出幅度能在较大的范围内调节,并具有输出微弱信号的能力,可以适应测试接收机的需要。测试各类高频接收机灵敏度、选择性等工作特性是高频信号发生器最重要的用途之一。因此,在电路的结构上,高频信号发生器与高频发射机很相似。

1. 高频信号发生器的组成原理

如图3.3所示是高频信号发生器的基本原理方框图。它包括主振级、缓冲级、调制级、输出

级、内调制振荡器、可变电抗器、监测器和电源等部分。其各部分的工作特点说明如下。

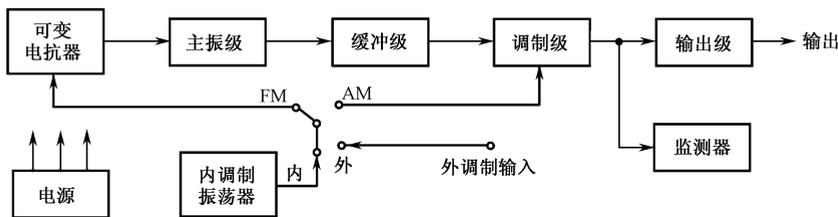


图 3.3 高频信号发生器基本原理框图

1) 主振级

主振级通常是 LC 三点式振荡电路,产生具有一定工作频率范围的正弦信号。信号发生器输出频率的准确度、稳定度、频谱纯度主要由它确定,它是信号发生器的核心。此外,输出电平及其稳定度和调频工作性能在很大程度上也是由主振级决定的。因此,要求主振级的频率范围宽,有较高的准确度(优于 10^{-3})和稳定度(优于 10^{-4})。主振级的电路结构简单,输出功率不大,一般在几毫瓦到几十毫瓦的范围内。

高频信号发生器主振级的 LC 振荡器,通常通过固定电感 L ,改变电容 C 来调整振荡频率。但这时频率覆盖范围是有限的,可通过下式进行估算

$$k = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\min}}}}{\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\max}}}} = \sqrt{\frac{C_{\max}}{C_{\min}}} = 2 \sim 3$$

通常,可变电容 $C_{\min} = 5 \sim 30\text{pF}$, $C_{\max} = 100 \sim 500\text{pF}$,故一个振荡回路的频率覆盖系数 k 为 $2 \sim 3$ 。若要扩大频率范围,必须变更电感 L ,可以像收音机那样用多波段工作方式,如图 3.4 所示。如何进行波段划分呢?下面通过一个实例来说明。

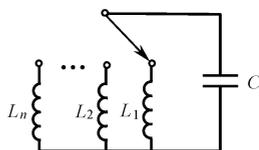


图 3.4 LC 回路

【例 3.1】 XFC-6 型高频信号发生器 $f = 4 \sim 300\text{MHz}$,试问应划分为几个波段?

解: $k_{\Sigma} = \frac{300}{4} = 75, \quad k_{\Sigma} = k^n, \quad \lg k_{\Sigma} = n \lg k$

$$n = \frac{\lg k_{\Sigma}}{\lg 0.9k} = \frac{\lg 75}{\lg 1.8} = \frac{1.87}{0.254} \approx 7.36 \approx 8 \quad (3.10)$$

上式中, $0.9k$ 的含义是让单回路覆盖系数取小一些,这里取 $k=2$,以保证各波段能衔接覆盖。由例 3.1 计算出 $n=8$,即要划分 8 个波段。这时相邻波段的电感值可按下式计算

$$\frac{L_{n-1}}{L_n} = k^2 \quad (3.11)$$

2) 缓冲级

缓冲级主要起阻抗变换作用,用来隔离调制级对主振级可能产生的不良影响,以保证主振级工作的稳定。在某些频率较高的信号发生器中,还可以采用倍频器、分频器或混频器,使主振级输出频率的范围更宽广。

3) 调制级

正弦信号经缓冲级输出到调制级,进行幅度调制和放大后输出,并保证一定的输出电平调节和输出阻抗。内调制振荡器供给符合调制级要求的音频正弦调制信号。可变电抗器与主振级的谐振回路耦合使信号发生器具有调频功能。监测器用来监测输出信号的载波和调制系数。电源

供给各部分所需的直流电压。

为了测试各种接收机的灵敏度和选择性等性能指标,必须用已调制的正弦信号作为测试信号,这个任务在调制级中完成。调制的方式主要有调幅、调频和脉冲调制。调幅多用于 $100\text{kHz}\sim 35\text{MHz}$ 的高频信号发生器中。高频信号发生器中的调幅,一般采用正弦调制。调频主要用于 $30\sim 1000\text{MHz}$ 信号发生器中,脉冲调制多用于 300MHz 以上的微波信号发生器中。

4) 输出级

输出级主要由放大器、滤波器、输出微调(连续衰减电路)、输出倍增(步进衰减电路)等组成,如图 3.5 所示。输出级可进一步控制输出电压的幅度,使最小输出电压达到 μV 数量级。对输出级的主要要求是,输出电平的调节范围宽,衰减量应能准确读数,有良好的频率特性,在输出端有准确且固定的输出阻抗。

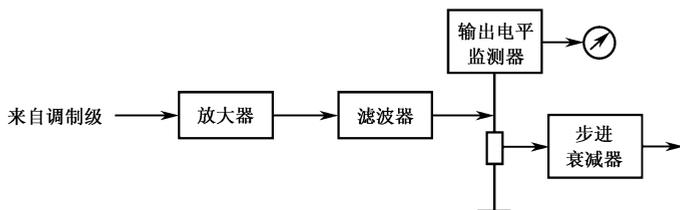


图 3.5 高频信号发生器的输出级

2. 高频信号发生器的使用

信号发生器是向外提供激励信号的仪器,使用比较简单容易。它主要调节输出频率和幅度。关键是注意其使用说明书上输出幅度是如何标定的,然后才能正确读数。

1) 输出频率的读数

上面已述高频信号发生器主振器大多为 LC 振荡器,是通过更换电感 L 来更换波段,通过调节电容来改变输出频率的。由于可变电容器是通过机械齿轮减速来转动动片的,调节频率时来回转动齿轮的回差会给频率读数带来误差,因此这种模拟式高频信号发生器的频率准确度不太高,通常只有 $\pm 1\%$ 左右。

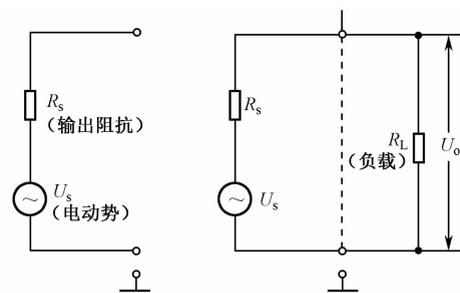
2) 输出幅度的读数

信号源的输出端可以等效为如图 3.6(a)所示等效模型,从输出端向信号源内部看,可以视为一个电动势(交流信号电压源) U_s 与一个输出阻抗 R_s 相串联。从图上可以看出, U_s 实际上就是信号源输出的开路电压,输出阻抗尽可能做成纯电阻。

输出电阻常取 $50、75、150、600\Omega$ 等数值,有的信号源还备有几种输出电阻可以切换,用户可根据需要进行选择。当信号源外部负载等于它的输出电阻时,称为阻抗匹配。信号源的很多技术指标都是在阻抗匹配的条件下给出的。例如,通常

信号源输出电压的标称值,包括有些面板上的输出电压显示值均为阻抗匹配时信号源输出端的电压。如果阻抗不匹配,信号源的实际输出电压一般不等于设置的标称值,其面板上显示的输出电压往往不准确,需要用电压表进行实际测量或用如图 3.6(b)所示的等效电路计算。

在图 3.6 中,信号源的两个输出端均未接仪器机箱地,称为信号源的输出端是浮置的。如果



(a) 信号源等效模型 (b) 加载等效电路

图 3.6 信号源模型及加载等效电路

输出端有一端接至机箱地,并接至电源地线,则称为接地输出。很多信号源能提供浮地输出或接地输出两种方式供用户选择,并且只需通过开关或跳线就可以在两种方式中任意切换。输出是否需要接地与应用条件有关。若用信号源激励双端均浮地的电路,例如差分电路,则信号源必须使用浮地输出。

高频信号发生器的输出幅度读数通常有两种形式:一种采用电压值 V 、 mV 、 μV 表示;另一种采用分贝电平 dBm (分贝毫瓦)、 dBV (分贝伏)表示。使用时,要查阅面板或使用手册上的说明。

电压值表示时,按国际及国家标准输出电压的读数是在匹配负载(通常为 50Ω)的条件下按正弦波有效值标定的。但也有用信号源电动势,即开路电压标定的,通常以正弦波有效值设置,也有用峰值设置的。

分贝电平表示时,通常又分功率电平: $101g(p/p_0)$ dB, $p_0 = 1mW$,采用 dBm (分贝毫瓦)表示;电压电平: $201g(U/U_0)$ dB, U_0 有时用 $1V$,在通信领域常用 $1mW$ 功率在 600Ω 负载上的电压 $U_0 = 0.775V$ 作为参考值。

输出幅度标称值的准确度常用输出幅度的绝对误差与标称值之比来衡量,也可把这个比值转化为用 dB 表示。

3) 输出阻抗变换器

当使用信号发生器时,要特别注意与负载阻抗的匹配。信号发生器只有在匹配的情况下才能正常工作。如果负载阻抗不等于信号发生器的源阻抗(即仪器内衰减器的特性阻抗),会引起信号被反射甚至在输出电路中出现驻波,使衰减系数产生误差,还可能影响前级电路的工作,降低信号发生器的功率。

同时,信号发生器输出电压的读数是在匹配负载的条件下按正弦波有效值标定的,若负载与信号源输出阻抗不相等,则信号源输出电压的读数是不准确的。

因此,在实际应用中遇到失配的状态时,应在信号发生器的输出端与负载之间加一个阻抗变换器,如图 3.7(a)所示。由于对称的四端网络具有阻抗变换作用,故常用它作为阻抗变换器。现通过一个应用实例进行说明。如图 3.7(b)所示,信号源输出电阻 $R_s = 50\Omega$,而被测设备的输入电阻,即信号源的负载电阻 $R_L = 75\Omega$,如何设计一个阻抗变换器?

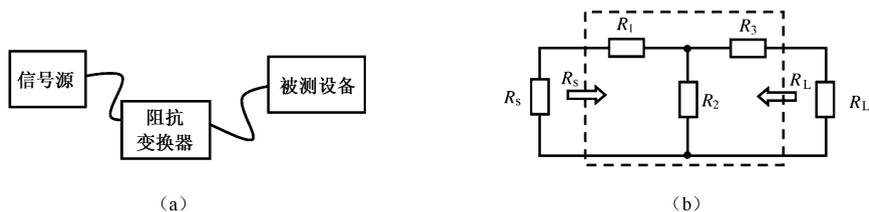


图 3.7 阻抗匹配

设计原则为:第一,要满足两端匹配,为此选用 T 型四端网络,如图 3.7(b)中虚线框内所示,图中各电阻值的计算公式可由四端网络的基本理论推导出来;第二,阻抗变换器本身的衰减量 N 应为确定值,以便扣除信号在其上的损失,通常设 $N = 3.16$,正好电压衰减 $10dB$ 。结果如下。

$$R_2 = \frac{2}{N} \sqrt{R_s R_L} \left(1 + \frac{1}{4N}\right) = 41.8 \Omega$$

$$R_1 = R_s \sqrt{1 + \frac{R_2^2}{R_s R_L}} - R_2 = 18.7 \Omega$$

$$R_3 = R_L \sqrt{1 + \frac{R_2^2}{R_s R_L}} - R_2 = 49 \Omega$$

$$\beta = 20\lg N = 20\lg 3.16 = 10 \text{ dB}$$

为确保性能满足要求,应精选电阻并置于屏蔽盒中,两端用屏蔽电缆连接,如图 3.7(a)所示。

3. 高频信号发生器实例

选用高频信号发生器应根据测量要求的频率范围、调制方式、输出电平及输出阻抗等主要技术指标来进行选择。这里介绍两种常用的高频信号发生器的技术性能。

1) XFG-7 型高频信号发生器

XFG-7 型高频信号发生器是一种既能产生等幅波又能产生调幅波的高频信号源,它可以方便地用来测量高频放大器、调制器及滤波器的性能指标,特别适用于测试无线电接收机的性能指标。其主要的技术指标如下。

频率范围:100kHz~30MHz,分 8 个波段;频率刻度误差 $\pm 1\%$ 。

输出电压与输出阻抗:在接分压器的电缆“0V~0.1V”插孔,并且接点“1”时,输出电压为 $1\mu\text{V}\sim 100\text{mV}$,分为 5 挡,每挡可以微调,输出阻抗为 40Ω ;当接点“0.1”时,输出电压为 $0.1\mu\text{V}\sim 10\text{mV}$ 。而在接分压器的电缆“0V~1V”插孔时,输出电压为 $0\sim 1\text{V}$,连续可变,输出阻抗约为 40Ω 左右。

调制频率:内调幅分 400Hz 和 1000Hz 两种,外调幅为 $50\sim 8000\text{kHz}$ 。

调幅范围: $0\%\sim 100\%$ 连续可调。

2) XFC-6 型标准高频信号发生器

XFC-6 是一种产生高频载波和调幅信号、调频信号及调幅调频信号的标准高频信号发生器。XFC-6 主要用于测试、调试及维修各种无线电接收设备,其输出载波的频率范围为 $4\sim 300\text{MHz}$,分 8 挡;频率稳定度优于 $2\times 10^{-4}/10\text{min}$;输出载波电压为 $0.1\mu\text{V}\sim 100\text{mV}$,可低至 $0.05\mu\text{V}$;输出阻抗 75Ω ;调幅波的调幅范围为 $0\%\sim 80\%$;调频波的频偏为 $0\sim 100\text{kHz}$ 。

3.2.3 脉冲信号发生器

脉冲信号发生器通常是指矩形窄脉冲发生器,它广泛用于测试和校准脉冲设备和宽带设备。例如,测试视频放大器和其他宽带电路的振幅特性、过渡特性,逻辑元件的开关速度,集成电路的研究,以及对电子示波器的检定等都需要脉冲信号发生器提供测试信号。脉冲信号发生器是时域测量的重要仪器。

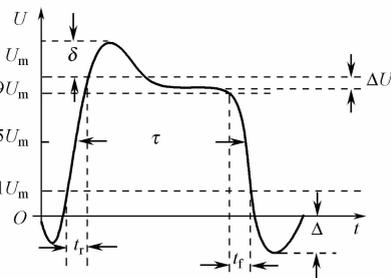


图 3.8 矩形脉冲的参数

1. 矩形脉冲的参数

实际的矩形脉冲如图 3.8 所示。其主要参数如下。

重复频率 f : 每秒内脉冲出现的个数。

脉冲幅度 U_m : 从 0 上升到 $100\%U_m$ 所对应的电压值。

脉冲宽度 τ : 电压上升到 $50\%U_m$ 至下降到 $50\%U_m$ 所对应的时间间隔。

上升时间 t_r : 电压从 $10\%U_m$ 上升到 $90\%U_m$ 的时间。

下降时间 t_f : 电压从 $90\%U_m$ 下降到 $10\%U_m$ 的时间。

占空系数 τ/T : 脉冲宽度 τ 与脉冲周期 T 的比值,称为占空系数或占空比。

上冲量 δ : 上升超过 $100\%U_m$ 部分的幅度。

反冲量 Δ : 下降到 0 以下部分的幅度。

平顶落差 ΔU : 脉冲顶部不能保持平坦而降落的幅度。

偏移 E : 矩形脉冲通常以水平零轴为基准,有些脉冲发生器的输出脉冲可在零轴上下平移,

其平移的幅度称为偏移(图中未画出)。

2. 脉冲信号发生器的组成原理

脉冲信号发生器的基本组成包括主振级、延迟级、(脉宽)形成级、整形级、输出级等部分,如图 3.9 所示。各部分的工作原理说明如下。

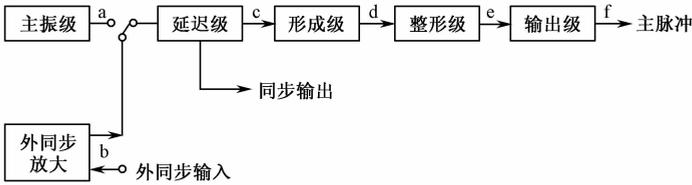


图 3.9 脉冲信号发生器的组成原理框图

1) 主振级

主振级可采用自激多谐振荡器、晶体振荡器或锁相振荡器产生矩形波,也可将正弦振荡信号放大、限幅后输出,作为下级的触发信号。因此,希望主振级具有较好的调节性能和稳定的频率,但对其输出波形的前、后沿等参数要求不是很高,要求波形的一致性要好,并具有足够的幅度。也可以不使用仪器内的主振级,而直接由外部信号经同步放大后作为延迟级的触发信号。同步放大电路将各种不同波形、幅度、极性的外同步信号转换成能触发延迟级正常工作的触发信号。可见,主振级是用来调节脉冲重复周期 T 的,如图 3.10 中(a)、(b)所示。

2) 延迟级

延迟级电路通常由单稳电路和微分电路组成。在很多场合下,要求脉冲信号发生器能输出同步脉冲,并使同步脉冲导前于主脉冲一段时间,如图 3.10(c)所示。这个任务由延迟级完成。主振级输出的未经延时的脉冲称为同步脉冲。对延迟级的要求是在全波段内获得一定的延时量 t_d ,并满足触发下一级电路所需的输出幅度。

3) 形成级

形成级电路通常由单稳态触发器等脉冲电路组成。它是脉冲信号发生器的中心环节,要求产生宽度准确、波形良好的矩形脉冲,且脉冲的宽度 τ 可独立调节,并具有较高的稳定性。

4) 整形级与输出级

整形级与输出级的电路一般由放大、限幅电路组成。整形级具有电流放大作用,输出级具有功率放大作用,还具有保证仪器输出的主脉冲幅度可调、极性可切换,以及良好的前、后沿等性能的作用,如图 3.10(e)、(f)所示。

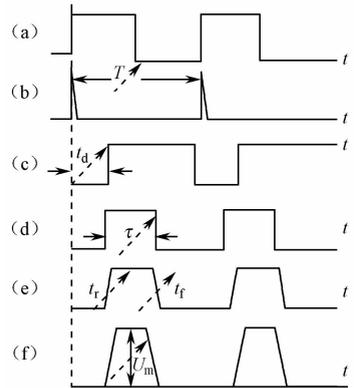


图 3.10 脉冲信号发生器各级输出波形图

3. 脉冲信号发生器的主要性能

脉冲信号发生器的主要工作特性:能输出同步脉冲及与同步脉冲有一定延迟时间的主脉冲;延迟时间可调;主脉冲的频率可调,脉宽可调,极性可切换,且具有良好的上升时间、下降时间,以及较小的上冲量。

有的脉冲信号发生器还能输出双脉冲,如 XC-16 型脉冲信号发生器。双脉冲是指在每一个周期中,前脉冲与后脉冲相继发生的一种脉冲波形。在双脉冲中,前脉冲宽度应小于延迟时

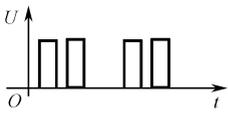


图 3.11 双脉冲的波形

间,前后脉冲宽度之和应小于脉冲周期。如图 3.11 所示的是双脉冲的波形。

XC-16 型和 XC-16B 型等脉冲信号发生器具有双脉冲输出功能,其中 XC-16 的主要性能指标为:频率范围为 $10\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$,脉冲宽度为 $0.1\sim 1000\mu\text{s}$,前后沿小于 30ns ,双脉冲后补时间为 $0.3\sim$

$3000\mu\text{s}$ 。

应当指出,以前的脉冲信号发生器多为模拟电路或中小规模数字电路设计的产品,性价比较低。现在石家庄数英仪器有限公司生产的 SU5000 系列信号发生器采用了直接数字频率合成技术,产品性能大为改善,脉冲宽度为 $10\text{ns}\sim 10\,000\text{s}$ 、重复周期为 $20\text{ns}\sim 10\,000\text{s}$ 、幅度范围为 $\pm(0.5\sim 10)\text{V}$,并具有同步脉冲、单脉冲、双脉冲输出;配有 TFT 彩屏显示,中英文菜单操作;还可选配 GPIB、RS-232 及 USB 接口。

顺便指出,还有一类快速(广谱)脉冲发生器,用于数字通信、雷达、时域特征测试等场合。通常用高速开关管(雪崩晶体管、阶跃恢复二极管及隧道二极管)产生脉冲,例如,某种隧道二极管脉冲发生器能产生脉冲前沿上升时间快达 15ps 的脉冲,其可用频谱可达 30GHz 。

3.2.4 函数信号发生器

函数信号发生器是一种宽带频率可调的多波形发生器,它可以产生正弦波、方波、三角波、锯齿波等。由于其输出波形均可用数学函数描述,故得名函数信号发生器。现代函数信号发生器一般具有调制和 VCO 控制的功能。它是一种不可缺少的通用信号发生器,可以用于生产测试、仪器维修和实验,应用领域十分广泛。

函数信号发生器的构成方式很多,通常以某种波形为第一波形,作为主振器,然后利用第一波形导出其他波形。根据主振器的性质和特点,我们将函数信号发生器的构成方式分为三种类型:正弦式、脉冲式和三角式。下面简要介绍前两种类型的基本原理。

1. 正弦式函数信号发生器

如图 3.12(a)所示为正弦式函数信号发生器的基本原理方框图。它包括正弦振荡器、缓冲级、方波形成、积分器、放大器和输出级等部分。其工作过程如下。正弦振荡器输出正弦波,经缓冲级隔离后,分为两路信号,一路送至放大器输出正弦波,另一路作为方波形成电路的触发信号。方波形成电路通常为施密特触发器。后者也输出两路信号,一路送放大器,经放大后输出方波;另一路作为积分器的输入信号。积分器一般是密勒积分电路。积分器将方波积分形成三角波,经放大后输出。三种波形的输出由放大器中的选择开关控制。

XD-11 型函数信号发生器采用上述方案。其主要指标有:频率范围为 $1\text{Hz}\sim 1\text{MHz}$,输出电压的峰值大于 5V ,正弦波失真度优于 0.1% ,输出正弦波、脉冲波、尖脉冲、锯齿波等波形。

2. 脉冲式函数信号发生器

脉冲式函数发生器的组成原理框图如图 3.12(b)所示,它包括脉冲发生器、施密特触发器、积分器和正弦波转换电路等部分。其工作过程如下。在触发脉冲的作用下,施密特触发器产生方波,积分器将方波积分形成三角波,正弦波转换电路将三角波转换成正弦波;放大器选择三个波形输出,可单独输出一个波形,也可同时输出三个波形。

这类函数信号发生器有 XD8B 型、XD-17 型等。其中, XD8B 型属于超低频信号发生器,它的主要性能有:频率范围为 $0.01\text{Hz}\sim 100\text{kHz}$,最大输出电压为 15V ,正弦波失真及三角波非线性均小于 1% ,能输出正弦波、方波、三角波、锯齿波等 7 种波形。XD-17 型为宽带函数信号发生器,其性能指标主要有:频率范围为 $0.0001\text{Hz}\sim 1.1\text{MHz}$,最大输出电压峰值为 20V ,能输出正

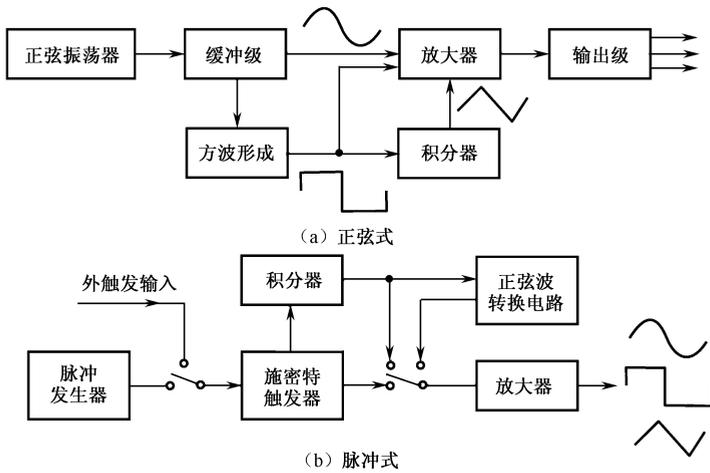


图 3.12 函数信号发生器的组成原理框图

弦波、三角波和方波三种波形,正弦波失真小于 3%,三角波非线性小于 1%。

随着微电子技术的发展,现代函数发生器可用单片集成电路(如 5G8038 属三角式函数发生器,输出频率范围为 1mHz~300kHz)和直接数字合成(DDS)技术来产生,在函数信号发生器及任意信号的产生方面有了很大的发展。例如,是德科技(安捷伦)用 DDS 技术设计的 33621A 型函数/任意波发生器能提供 17 种标准波形,频率可达 120MHz;可使用 64MSa/s(兆采样点每秒)的采样率来设置任意波形;具有 AM、FM、PM、FSK、BPSK、PWM 等多种调制方式。

3.2.5 噪声发生器

噪声是指元器件、电路、仪器设备或电子系统中出现的非预期的电信号。由噪声所造成的不良效应称为干扰。噪声使信号失真、测试的性能(稳定度、可靠性、灵敏度等)下降,对测量造成危害。但是,作为一种客观的现象,既要避免其危害性,又要利用其有利的一面。在电子测量中,利用噪声作为测试信号具有重要的意义。一方面,噪声能够模拟许多实际系统的工作状态;另一方面,用噪声信号代替正弦信号进行测试时,能够收集到被测系统动态特性的有关数据,从而可以对被测系统做出全面的评价。

噪声发生器能提供在特定频率范围内足够高的输出电平,并具有一定统计参数的噪声信号。噪声发生器主要由噪声源、变换器及输出电路等组成,如图 3.13 所示。

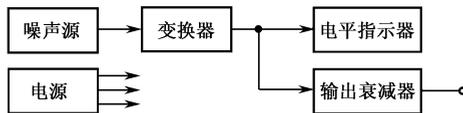


图 3.13 噪声发生器的结构

噪声源是噪声发生器的核心,可以提供在一定频率范围内足够高的电平、频谱分布均匀的白噪声。变换器主要由放大器、非线性变换电路、滤波器等组成,它将噪声源的输出变换为具有一定输出功率和一定统计参数的噪声。通常用衰减电路作为输出级。

常用的噪声源有:电阻噪声源、二极管噪声源及气体放电管噪声源等。例如,用气体放电管制成的噪声发生器在极宽的频率范围内具有均匀的频谱密度,能在微波波段用于噪声系数的测量。

3.3 合成信号发生器

随着科学技术的发展,对信号频率的稳定度和准确度提出了越来越高的要求。例如,在手机

通信系统中,信号频率稳定度的要求必须优于 10^{-6} ;在卫星发射中要求更高,必须优于 10^{-8} 。同样,在电子测量技术中,如果信号源频率的稳定度和准确度不够高,就很难对电子设备进行准确的频率测量。因此,频率的稳定度和准确度是信号源的一个重要技术指标。

在以 RC、LC 为主振级的信号源中,频率准确度只能达到 10^{-2} 量级,频率稳定度只能达到 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级,远远不能满足现代电子测量和无线电通信等方面的要求。另一方面,由石英晶体组成的振荡器日稳定度优于 10^{-8} 量级,但是它只能产生某些特定的频率。为此,需要采用频率合成技术。该技术通过对一个或几个高稳定度频率进行加、减、乘、除算术运算,得到一系列所要求的频率。采用频率合成技术制成的频率源称为频率合成器,用于各种专用设备或系统。例如,通信系统中的激励源和本振,或者做成通用的电子仪器,称为合成信号发生器(或称合成信号源)。频率的加、减通过混频获得,乘、除通过倍频、分频获得,也可运用锁相技术来实现频率合成。采用频率合成技术,可以把信号发生器的频率稳定度、准确度提高到与基准频率相同的水平,并且可以在很宽的频率范围内进行精细的频率调节。合成信号源可工作于调制状态,可对输出电平进行调节,也可输出各种波形。它是当前用得最广泛的性能较高的信号源。

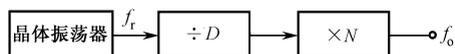
频率合成的方法很多,但基本上分为两大类:直接合成法和间接合成法。在具体实现中可分为下面三种方法:

- 频率合成的方法
 - 直接模拟频率合成法(DAFS, Direct Analog Frequency Synthesis)
 - 直接数字频率合成法(Direct Digital Frequency Synthesis, DDFS, 通常简称为 DDS)
 - 间接锁相式合成法

实际上,在一个信号源中可能同时采用多种合成方法。下面分别介绍这三种合成方法的基本原理与特点。

3.3.1 直接模拟频率合成法

利用倍频、分频和混频及滤波技术,对一个或多个基准频率进行算术运算来产生所需频率的方法,称为直接合成法。由于大多采用模拟电路来实现,所以又称为直接模拟频率合成,这样正好与下面介绍的直接数字频率合成相对应。



1. 固定频率合成法

如图 3.14 所示为固定频率合成法的原理电路。

图 3.14 固定频率合成法的原理电路
图中石英晶体振荡器提供基准频率 f_r , D 为分频器的分频系数, N 为倍频器的倍频系数。如图 3.14 所示电路的固定频率合成法输出频率 f_o 为

$$f_o = \frac{N}{D} f_r$$

在上式中, D 和 N 均为给定的正整数,而输出频率为定值,所以称为固定频率合成法。

2. 可变频率合成法

可变频率合成法可以根据需要选择各种输出频率,常见的电路形式是连续混频分频电路,如图 3.15 所示。在该合成电路中,首先使用基准频率 f_r ($=5\text{MHz}$) 在辅助基准频率发生器中产生各种辅助基准频率: 2MHz , 16MHz , 2.0MHz , 2.1MHz , \dots , 2.9MHz , 然后借助混频器和分频器进行频率运算,实现频率合成。图 3.15 中的频率选择开关的作用是,根据所需输出频率 f_o 的值从 2.0MHz , 2.1MHz , \dots , 2.9MHz 中选择相应数值分别作为 $f_1 \sim f_4$ 。图中纵向的混频分频电路组成一个基本运算单元。这里有 4 个相同的单元,它们所产生的输出频率依次从左向右传递,并参与后一单元的运算。例如,从左边的第一单元开始,首先 f_{i1} (2MHz) 和 F (16MHz) 进行混频,其结果再与辅助基准 f_1 进行混频,两次混频得

$$f_{i1} + F + f_1 = [2 + 16 + (2.0 \sim 2.9)]\text{MHz} = 20.0 \sim 20.9\text{MHz}$$

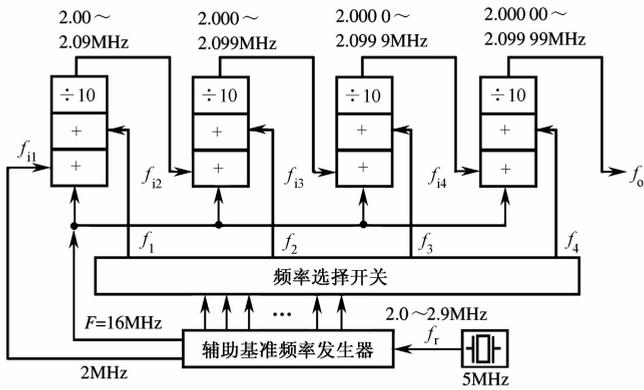


图 3.15 十进连续混频变频电路

经 10 分频得 $2.00 \sim 2.09 \text{MHz}$ 。再以该频率作为第二单元的输入频率 f_{i2} 继续进行运算。从左至右经过 4 次运算,最后得输出信号的频率 f_o 为

$$f_o = 2.00000 \sim 2.09999 \text{ MHz}$$

根据频率选择开关的状态,可以输出 10 000 个频率,频率间隔 $\Delta F=10 \text{Hz}$,即如图 3.15 所示合成器的频率分辨率。如果串接更多的合成单元,就可以获得更小的频率间隔,以进一步提高频率分辨率。

直接模拟合成技术在 20 世纪 60 年代就已成熟并付诸实用,它具有如下一些特点。

1) 频率分辨率高

从原理上来说,频率分辨率几乎是无限的。从图 3.15 可知,增加一级基本运算单元就可以使频率分辨率提高一个数量级。

2) 频率切换快

合成单元由混频器、分频器及滤波器组成(有时也用倍频器、放大器等电路),其频率转换时间主要由滤波器的响应时间、频率转换开关的响应时间及信号的传输延迟时间等决定。一般来说,转换开关时间在微秒量级,传输延迟时间亦在微秒量级,所以只要输出电路中滤波器的通带不是太窄,就能得到很快的转换速度,通常其转换时间为微秒量级。这比采用锁相环的间接合成法要快得多。间接合成的转换时间为毫秒量级。

3) 电路庞大、复杂

由于采用混频等电路会引入很多寄生频率分量,带来相位杂散,因此必须采用大量滤波器以改善输出信号的频谱纯度。这些将导致电路庞大、复杂、不易集成,这是直接模拟合成法的一大弱点。相比之下,在间接合成中,由于采用锁相环电路,它本身就相当于一个中心频率能自动跟踪输入基准频率的窄带滤波器,因此具有良好的抑制寄生信号能力。而且锁相环电路便于数字化、集成化,且便于在微机控制下工作。尽管锁相合成技术出现在直接模拟合成之后,但是它一出现就受到人们的重视,而且还在继续发展中。

3.3.2 直接数字频率合成法

模拟频率合成方法是指通过对基准频率人为地进行加、减、乘、除算术运算得到所需的输出频率。自 20 世纪 70 年代以来,由于大规模集成电路的发展及计算机技术的普及,开创了另一种信号合成方法——直接数字频率合成法(DDS)。它突破了模拟频率合成法的原理,从“相位”的概念出发进行频率合成。这种合成方法不仅可以给出不同频率的正弦波,而且还可以给出不同初始相位的正弦波,甚至可以给出各种任意波形。这在前述模拟频率合成方法中是无法实现的。

这里先讨论正弦波的合成问题,关于任意波形将在后面进行讨论。

1. 直接数字合成基本原理

在微机内,若插入一块 D/A 转换卡,然后编制一段小程序,如连续进行加 1 运算到一定值,然后连续进行减 1 运算回到原值,再反复运行该程序,则微机输出的数字量经 D/A 转换成小阶梯式模拟量波形,如图 3.16 所示。再经低通滤波器滤除引起小阶梯的高频分量,则得到三角波输出。若更换程序,令输出 1(高电平)一段时间,再令输出 0(低电平)一段时间,反复运行这段程序,则会得到方波输出。实际上,可以将要输出的波形数据(如正弦函数表)预先存在 ROM(或 RAM)单元中,然后在系统标准时钟(CLK)频率下,按照一定的顺序从 ROM(或 RAM)单元中读出数据,再进行 D/A 转换,就可以

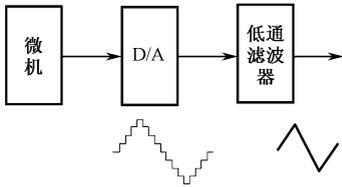


图 3.16 直接数字合成原理图

得到一定频率的输出波形。

得到一定频率的输出波形。

现以正弦波为例做进一步说明。在正弦波 1 周期(360°)内,按相位划分为若干等份 $\Delta\phi$,将各相位所对应的幅值 A 按二进制编码并存入 ROM 中。设 $\Delta\phi=6^\circ$,则 1 周期内共有 60 等份。由于正弦波对 180° 为奇对称,对 90° 和 270° 为偶对称,因此 ROM 中只需存储 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内的幅值码。若以 $\Delta\phi=6^\circ$ 计算,在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间共有 15 等份,其幅值在 ROM 中占 16 个地址单元。因为 $2^4=16$,所以可按 4 位地址码对数据 ROM 进行寻址。现设幅值码为 5 位,则在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内编码关系如表 3.4 所示。

表 3.4 正弦函数表(正弦波信号相位与幅度的关系)

地 址 码	相 位	幅度(满度值为 1)	幅 值 编 码
0000	0°	0.000	00000
0001	6°	0.105	00011
0010	12°	0.208	00110
0011	18°	0.309	01010
0100	24°	0.407	01101
0101	30°	0.500	10000
0110	36°	0.588	10010
0111	42°	0.669	10101
1000	48°	0.743	10111
1001	54°	0.809	11001
1010	60°	0.866	11011
1011	66°	0.914	11100
1100	72°	0.951	11101
1101	78°	0.978	11110
1110	84°	0.995	11111
1111	90°	1.000	11111

2. 信号的频率关系

在图 3.17 中,时钟 CLK 的频率为固定值 f_c 。在 CLK 的作用下,如果按照 0000,0001,0010, ..., 1111 的地址顺序读出 ROM 中的数据,即表 3.4 中的幅值编码,其输出正弦信号频率为 f_{o1} ;如果每隔一个地址读一次数据(即按 0000,0010,0100, ..., 1110 顺序),其输出信号频率为 f_{o2} ,且 f_{o2} 将比 f_{o1} 提高 1 倍,即 $f_{o2}=2f_{o1}$;其余类推。这样,就可以实现直接数字频率合成器的输出频率的调节。

上述过程是由控制电路实现的,由控制电路的输出决定选择数据 ROM 的地址(即正弦波的