

电子元器件是高频电子电路的基本组成部分,是电路的基本单元。电子元件的选型及参数选择对通信电子线路的电气性能、可靠性、寿命周期等技术指标有很大的影响。因此,能正确有效地选择和使用电子元件是提高电子产品可靠性水平的重要工作。能正确地使用测量仪器,定性观察电路的动态过程,定量测量各种电参数,直接观察和真实显示被测信号波形,能正确处理实验测量中的大量数据等,是通信电子线路的实践基础,是从事电子信息科学研究和工程实践的基础。

1.1 通信电子线路基础元器件的选型及参数选择

1.1.1 高频电容器

1. 高频电容器的类型

高频电容器按材质划分,可分为云母电容器、纸介电容器、陶瓷电容器和薄膜电容器等类型。

1) 云母电容器

一般是用金属箔和云母片交叠而成。新工艺上也有将铝或银粉喷涂在云母上,叠好,再在外面用胶木、塑料或瓷质等纯绝缘材料压紧、封固。这种电容器的优点是:容量比较准确,漏电损耗小,温度稳定性好,绝缘电阻高,频率特性好,可用于中频、高频及要求耐压高的电路。缺点是:价格较贵,容量范围小。

2) 纸介电容器

用两条长条形铝箔和两张条形绝缘纸交替叠好,卷成圆柱形,接出引线,经过浸蜡等工艺封固而成。这种电容器的优点是:容量范围大,从几微法到几百微法都有,耐压程度一般也可满足要求,价格比较低廉。缺点是:易损坏,使用年限较短。适用于频率小于 0.5MHz 的电路。

3) 陶瓷电容器

陶瓷电容由特殊陶瓷制成,分低介电常数型(I型)、高介电常数型(II型)和半导体型(III型)3种。I型容量不能做得太大,温度变化时容量也跟着线性变化,可以做成多种多样的温度系数;容量偏差小,容量稳定;绝缘电阻极高;耐热,寿命长,体积小。II型和III型介电常数高,易做成容量大、体积小的产品。II型、III型与I型特性基本相同,只不过它们没有温度系数线性和容量偏差小的特点。I型产品主要用于对温度稳定性要求比较高的电路,如晶振、A/D转换和V/F转换电路的积分电容等,还可以用做温度补偿电容。II型和III型体积小,容量大,适宜作为高频滤波电容。

4) 薄膜电容器

介质用特殊塑料做成,如聚苯乙烯电容器、涤纶电容器。优点是:耐压高、介质损耗小、绝缘电阻高、电容量比较稳定,可用于高、中频电路。缺点是:不耐高温。

除了上述高频电容以外,在通信电子线路中也会用到铝电解电容器、钽电解电容器等。

2. 高频电容器的应用

1) 高频电容器的等效

由介质隔开的两导体即构成电容。片状电容在高频电路中的应用十分广泛,可以用于滤波器调频、匹配网络、晶体管的偏置等很多电路中。电容的高频等效电路如图 1.1 所示,其中 L_c 为引线的寄生电感,描述介质损耗用一个并联的电阻 R_c 。

由于存在介质损耗和有限长的引线,电容显示出与电阻同样的谐振特性。一个典型的 1pF 电容阻抗绝对值与频率的关系如图 1.2 所示。

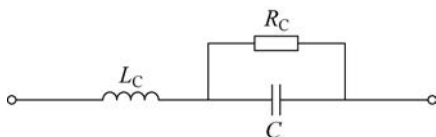


图 1.1 电容的高频等效电路

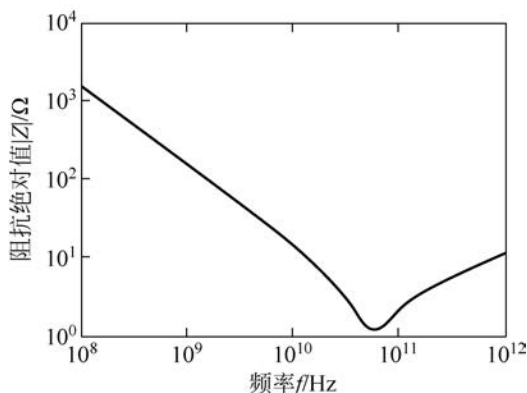


图 1.2 典型电容阻抗绝对值与频率的关系

在高频时,电容中的电解质产生了损耗,造成电容器呈现的阻抗特征只有低频时才与频率成反比。

2) 旁路退耦电容器

旁路电容是把输入信号中的高频成分作为滤除对象。退耦电容是把输出信号的干扰作为滤除对象。退耦电容和旁路电容都是起到抗干扰的作用,只是电容所处的位置不同。高频旁路电容一般比较小,根据谐振频率一般是 $0.1\mu\text{F}$ 、 $0.01\mu\text{F}$ 等,而退耦电容一般比较大。

在退耦网络的谐振频率之下,两个最重要的条件是:①具有足够的电容以提供所需的瞬态电流;②提供一个足够低的阻抗以短路 I_C 所产生的噪声电流。

通过使用多电容网络,高频阻抗显著减小,低频阻抗没有减小,只是谐振下降的慢。实际上,在低频时,单一电容网络谐振时,使用多个电容时的阻抗通常高于使用单一电容时的阻抗。这是因为在 0.1pF 的情况下,总电容没有足够大到使网络呈现低阻抗。因此,使用大量等值电容是一个使低阻抗退耦网络在宽频带范围内实现的一个有效方法。这个方法在对大的 I_C 退耦时非常有效。另外,不同值的

多个电容,基于大电容将提供有效低频退耦,而基于小电容将提供有效高频退耦,有时建议用两个不同值的退耦电容。

为了减少器件产生的噪声干扰,退耦电容的取值根据退耦频率来确定,即

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中, L 为电路的分布电感;高速芯片内部开关操作可能高达几吉赫,退耦电容同样需要有很好的高频特性。

3) 谐振回路电容器

谐振电容器是一种谐振电路元器件,往往是电容和电感并联或串联。当电容器放电时,电感开始产生一个逆向的反冲电流,电感充电;当电感的电压达到最大时,电容放电完毕,之后电感开始放电,电容开始充电,这样的往复运作,称为谐振。而在此过程中电感由于不断地充放电,于是就产生了电磁波。在含有电容和电感并联的电路中,在某个很小的时间段内,电容的电压逐渐升高,而电流却逐渐减少;与此同时,电感的电流逐渐增加,电感的电压却逐渐降低。而在另一个很小的时间段内,电容的电压逐渐降低,而电流却逐渐增加;与此同时,电感的电流逐渐减少,电感的电压却逐渐升高。电压的增加可以达到一个正的最大值,电压的降低也可达到一个负的最大值,同样电流的方向在这个过程中也会发生正负方向的变化,此时称为电路发生电的振荡。

谐振电容器选择,一般用于 10MHz 以上的电路,谐振电容器的取值一般小于 $0.01\mu\text{F}$ 。通过电容阻抗公式:

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

工作频率越高、电容值越大,电容的阻抗越小。根据谐振频率,得

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

在谐振电路中,电容一般可以取 $10\text{pF} \sim 0.01\mu\text{F}$ 。由于引线和 PCB 布线的参数原因,实际上电容器也可以等效为电感和电容的并联电路。在 LC 并联谐振回路中,当工作频率大于谐振频率 f_0 时, LC 并联回路呈容性;当工作频率小于谐振频率 f_0 时, LC 并联回路呈感性;当工作频率等于谐振频率 f_0 时, LC 并联回路呈

电阻性。

1.1.2 高频电感器

1. 高频电感器的类型

高频电感器可分为天线线圈、振荡线圈和扼流线圈等类型。

1) 天线线圈

天线线圈是在磁棒上绕两组彼此不连接的线圈,构成了高频性质的变压器。作用是将空中的无线电波转换成高频电流传送到接收机的输入端,或将发射机的高频电流传送到发射天线辐射出去,具有选频、传送、匹配阻抗等作用。

2) 振荡线圈

振荡线圈分为中波振荡线圈、短波振荡线圈。振荡线圈的整个结构装在金属屏蔽罩内,下面有引出脚,上面有调节孔,磁帽和磁芯都是由铁氧体制成的。线圈绕在磁芯上,再把磁帽罩在磁芯上,磁帽上有螺纹,可在尼龙支架上旋上旋下,从而调节了线圈的电感量。

3) 共扼流线圈

将传输电流的两根导线按照图 1.3 的方法绕制。这时,两根导线中的电流在磁芯中产生的磁力线方向相反,并且强度相同,刚好抵消,所以磁芯中总的磁感应强度为 0,因此磁芯不会饱和;而对于两根导线上方向相同的共模干扰电流,则没有抵消的效果,会呈现较大的电感。由于这种电感只对共模干扰电流有抑制作用,而对差模电流没有影响,因此叫共模扼流圈。

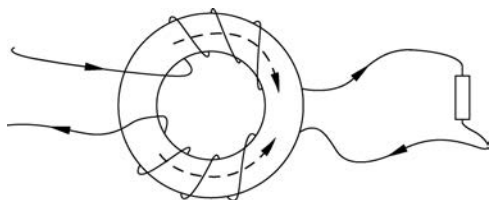


图 1.3 共模扼流圈

2. 高频电感器的应用

1) 高频电感器的等效

电感通常由导线在圆导体柱上绕制而成,主要用于晶体管的偏置网络或滤波器中。电感除了考虑本身的感性特征,高频时还需要考虑导线的电阻以及相邻线圈之间的分布电容。电感的等效电路模型如图 1.4 所示。

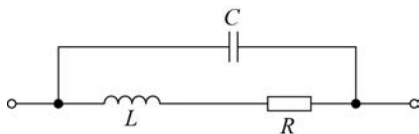


图 1.4 电感的高频等效电路

电感的高频特性与理想电感的预期特性不同,其电抗特性如图 1.5 所示。当频率接近谐振点时,高频电感的阻抗迅速提高;当频率继续提高时,寄生电容 C 成为主要的影响,线圈阻抗逐渐降低。

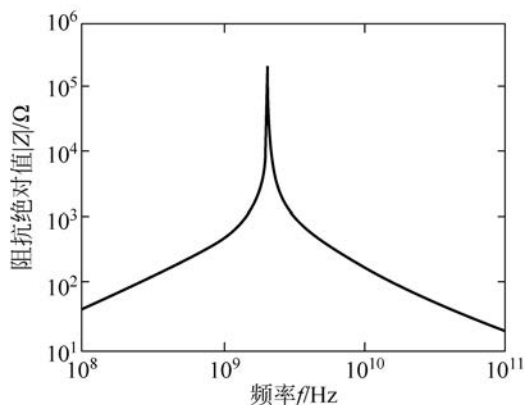


图 1.5 电感阻抗绝对值与频率的关系

在低频时电感的阻抗响应随频率的增加而呈线性增加。达到谐振点前开始偏离理想特征,最终变为呈电容性。

2) 高频电感的应用电路

在分频电路中,电感器与电容器组成分频网络,对高、低音进行分频,以改善频响效果。在接收机选频电路中,天线线圈与电容组成并联谐振网络,对磁棒天线接

收到的无线电信号进行选频；在振荡电路中，振荡线圈与电容组成振荡回路；振荡信号与接收信号在晶体管内进行混频。混频后的信号从晶体管集电极输出，并由中频变压器送往中频放大器；在电视接收机中，行振荡线圈与行振荡管组成振荡回路，经过自动频率控制电路，以达到行同步的目的。

图 1.6 所示是一种较典型的并联谐振回路匹配电路，在甚高频或大功率输出级，广泛利用 LC 变换网络来实现调谐和阻抗匹配。这种电路形式很多，就其结构来看，可概括为 L 形、T 形、 π 形三类。图中 R_L 是负载电阻， R_S 是信号源输出电阻。当电路用作级间匹配网络时， R_L 是下一级放大器的输入电阻， R_S 是前一级放器的输出电阻。当电路用在输入级或输出级时， R_S 、 R_L 的具体含义视工作情况确定。

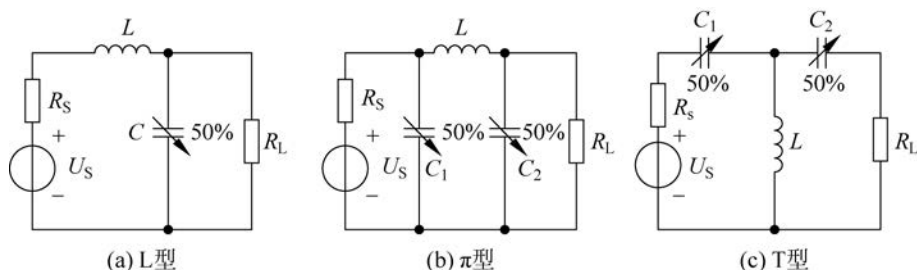


图 1.6 并联谐振回路匹配电路

1.1.3 高频二极管

1. 高频二极管的类型

1) 快恢复二极管

快恢复二极管的内部结构与普通二极管不同，它是在 P 型、N 型硅材料中间增加了基区 I，构成 P-I-N 硅片。由于基区很薄，反向恢复电荷很小，不仅大大减小了反向恢复时间 T_{rr} 值，还降低了瞬态正向压降，使管子能承受很高的反向工作电压。快恢复二极管的反向恢复时间一般为几百纳秒，正向电流是几安至几千安，反向峰值电压可达几百到几千伏。超快恢复二极管 SRD 在快恢复二极管基础上发展而成的，其反向恢复时间 T_{rr} 比 FRD 更短，是极有发展前途的电力、电子半导体器件。

2) 肖特基二极管

肖特基二极管是肖特基势垒二极管的简称。肖特基二极管是利用金属与半导体接触形成的金属-半导体结原理制作的。因此,肖特基二极管也称为金属-半导体(接触)二极管或表面势垒二极管,它是一种热载流子二极管。SBD 的结构及特点使其适合在低压、大电流输出场合用作高频整流,在非常高的频率下(如 X 波段、C 波段、S 波段和 Ku 波段)用于检波和混频,在高速逻辑电路中用作钳位。

3) 检波二极管

检波二极管又分为峰峰值检波二极管和平方律检波二极管,是用于把叠加在高频载波上的低频信号检出来的器件,它具有较高的检波效率和良好的频率特性。选用时,应根据电路的具体要求来选择工作频率高、反向电流小、正向电流足够大的检波二极管。检波和整流的原理是一样的,而整流的目的是为了得到直流电,而检波则是从被调制波中取出信号成分(包络线)。高频电路中,检波二极管的结电容一定要小,通常为点接触二极管。为提高检波效率,要求正向电压降 V_F 要小,所以通常采用正向压降比较低的锗材料。

4) 开关二极管

利用其单向导电特性使其成为一个较理想的电子开关。开关二极管导通时相当于开关闭合(电路接通),截止时相当于开关打开(电路切断),所以二极管可作开关用。开关二极管是专门用来做开关用的二极管,它由导通变为截止或由截止变为导通所需的时间比一般二极管短。开关二极管具有良好的高频开关特性(反向恢复时间较短),被广泛应用于各类高频电路中。

5) PIN 型二极管

这是在 P 区和 N 区之间夹一层本征半导体(或低浓度杂质的半导体)构造的晶体二极管。PIN 中的 I 是“本征”含义的英文缩略语。当其工作频率超过 100MHz 时,由于少数载流子的存储效应和“本征”层中的渡越时间效应,其二极管失去整流作用而变成阻抗元件,并且,其阻抗值随偏置电压而改变。在零偏置或直流反向偏置时,“本征”区的阻抗很高;在直流正向偏置时,由于载流子注入“本征”区,而使“本征”区呈现出低阻抗状态。因此,可以把 PIN 二极管作为可变阻抗元件使用。它常被应用于高频开关(即微波开关)、移相、调制、限幅等电路中。

2. 高频二极管参数选择

1) 最大整流电流

二极管在长期稳定工作时,允许通过的最大正向平均电流。因为电流通过 PN 结会引起管子发热,电流太大,发热量超过限度,就会使 PN 结烧坏,所以在实际应用时工作电流通常小于 I_{FM} 。

2) 最大可重复峰值反向电压

指所能重复施加的反向最高峰值电压,通常是反向击穿电压 V_{BR} 的一半。击穿时,反向电流剧增,二极管的单向导电性被破坏,甚至因过热而烧坏。

3) 反向恢复时间

当工作电压从正向电压变成反向电压时,电流不能瞬时截止,需延迟一段时间,延迟的时间就是反向恢复时间。 T_{rr} 直接影响二极管的开关速度,在高频开关状态时,通常反向恢复时间越小越好。大功率开关管工作在高频开关状态时,此项指标尤为重要, T_{rr} 越小管子升温越小,效率越高。

4) 结电容

结电容包括势垒电容和扩散电容的总效果,它的大小除了与本身结构和工艺有关外,还与外加电压有关。在高频电路中,由于结电容的存在,随着信号频率的增高,其阻抗下降;若结电容过大,就相当于在其两端并上一个可观的电容。由于电容的旁路作用,将降低二极管的高频响应。

5) 正向电压降

二极管通过额定正向电流时,在两极间所产生的电压降。通常硅材料的二极管 $V_F > 1V$,锗材料、肖特基二极管为 $0.5V$ 左右,根据需求进行选择。

6) 反向电流

指管子击穿时的反向电流,其值越小,则管子的单向导电性越好。反向电流 I_R 与温度有密切联系,温度越高,反向电流 I_R 会急剧增加,所以在使用二极管时要注意温度的影响。

1.1.4 高频三极管

1. 高频三极管的类型

高频三极管一般应用在 VHF、UHF、CATV、无线遥控、射频模块等高频宽带低噪声放大器上,这些使用场合大都用在低电压、小信号、小电流、低噪声条件下,其功率最大 2.25W,集电极电流最大 500mA。

高频三极管按照材质划分,可分为硅管材质的三极管和锗管材质的三极管。按照结构划分,可分 NPN 型三极管和 PNP 型三极管。按照功能划分,可分为开关管、功率管、达林顿管、光敏管等。按照功率划分,可分为小功率管、中功率管、大功率管。按照工作频率分,可分为高频管、超频管。按照结构工艺分,可分为合金管、平面管。按照安装方式分,可分为插件三极管、贴片三极管。

1) 普通高频三极管

普通高频晶体管一般用于小信号处理(例如,图像中放、伴音中放、缓冲放大等)电路中。

2) 超高频低噪声功率管

超高频低噪声功率管是一种基于 N 型外延层的晶体管,具有高功率增益、低噪声的功率特性以及大动态范围和理想的电流特性。主要应用于 VHF、UHF、CATV、无线遥控、射频模块等高频宽带低噪声放大器。

3) 中功率高频三极管

中功率高频三极管应用于彩色电视机中的行推动管,应选用中功率的高频晶体管。其耗散功率应大于或等于 10W,最大集电极电流应大于 150mA,最高反向电压应大于或等于 250V。

4) 大功率高频三极管

大功率高频三极管应用于输出级,如彩色电视机中使用的行输出管属于高反压大功率晶体管,其最高反向电压应大于或等于 1200V,耗散功率应大于或等于 50W。

2. 高频三极管的参数选择

1) 电流放大系数

晶体管集电极电流 I_C 与基极电流 I_B 的比值称为电流放大系数, 一般用 β 表示。当晶体三极管工作在低频段时, 电流放大系数可以看成是常数 β_0 ; 但是工作在高频段时, 晶体管的电流放大系数是频率的函数, 随着工作频率的增加电流放大系数下降。

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}$$

其中, $f_\beta = \frac{1}{2\pi C_{b'e} r_{b'e}}$ 。

高频电路的放大系数与特征频率、截止频率有关。 f_T 为特征频率, 即 β 值下降到 1 的频率, 是表征晶体管在高频时放大能力的一个基本参量。 f_β 为截止频率, 即共射放大电路中保持输入信号的幅度不变, 改变频率使输出信号降至最大值的 0.707 倍, 用频响特性来表述即为 -3dB 点处即为截止频率。

2) 耗散功率

耗散功率也叫集电极最大允许耗散功率 P_{CM} , 是晶体管参数变化不超过规定允许值时的最大集电极耗散功率。它与晶体管的最高允许结温和集电极最大电流有密切关系, 晶体管使用时, 其实际耗散功率不允许超过 P_{CM} 值, 否则晶体管会因过载而损坏。 $P_{CM} < 1W$ 的叫小功率晶体管, $1W < P_{CM} < 5W$ 的叫中功率晶体管, 大于 5W 的是大功率晶体管。

3) 频率特性

晶体管的放大系数和工作频率有关, 如果超过了工作频率, 则会出现放大能力减弱甚至失去放大作用。晶体管的频率特性主要包括特征频率 f_T 和最高振荡频率 f_M 等。最高振荡频率 f_M 是晶体管的功率增益降为 1 时所对应的频率, 通常高频晶体管的最高振荡频率低于共基极截止频率 f_α , 而特征频率 f_T 则低于共基极截止频率 f_α , 高于共射电极截止频率 f_β 。

4) 集电极最大电流

是晶体管集电极所允许通过的最大电流, 当晶体管的集电极电流 I_C 超过 I_{CM}

时,晶体管的 β 值等参数将发生明显变化,影响其正常工作,甚至发生损坏。

5) 最大反向电压

最高反向工作电压指晶体管在工作时允许施加的最高工作电压,包括集电极-发射极反向击穿电压、集电极-基极反向击穿电压和发射极-基极反向击穿电压。集电极-发射极反向击穿电压指晶体管基极开路时,集电极与发射极之间的最大允许反向电压,表示临界饱和时的饱和电压,用 V_{CEO} 或者 BV_{CEO} 表示。集电极-基极反向击穿电压是发射极开路时,集电极与基极之间的最大允许反向电压,用 V_{CBO} 或 BV_{CBO} 表示。发射极-基极反向击穿电压指晶体管的集电极开路时,发射极与基极之间的最大允许反向电压,用 V_{EBO} 或 BV_{EBO} 表示。

6) 反向电流

反向电流包括集电极-基极之间的反向电流 I_{CBO} 和集电极-发射极之间的反向击穿电流 I_{CEO} 。 I_{CBO} 也叫集电结反向漏电流,是当晶体管的发射极开路时,集电极与基极之间的反向电流。 I_{CBO} 对温度较敏感,该值越小,说明晶体管的温度特性越好。 I_{CEO} 也叫穿透电流。反向电流值越小,说明晶体管的性能越好。

1.2 通信电子线路实验测量及数据处理

1.2.1 实验数据测量

实验测量是通信电子线路实验的重要内容。借助仪器仪表获取被测对象量值,从而获得反映研究对象特性的信息,有助于认识事物,掌握事物发展变化的规律,探寻解决问题的方法。借助科学的测量方式、方法和先进的仪器设备,可以使通信电子线路的实验误差更小,能够极大地提高实验质量。

1. 测量方式

测量可分为直接测量、间接测量、组合测量三种方式。表 1.1 列举了三种方式的基本测量思想和测量特点。

表 1.1 测量方式的思想 and 特点

测 量 方 式	思 想	特 点
直接测量	利用仪器仪表直接测量获得测量结果的方式,如使用万用表直接测量电压、电流、电阻等	简单方便
间接测量	利用被测量数值与几个物理量之间存在的某种函数关系,直接测量这些物理量的值,再由函数关系计算出被测值。如测量调谐放大器的电压放大倍数 K ,一般是分别测量电路输出电压 U 和输入电压 U ,通过放大倍数公式计算出 K	常用于不便直接被测量,或者间接测量的结果比直接测量更为准确的场合
组合测量	综合利用直接测量和间接测量获得测量结果的方式,将被测量和另外几个量组成联立方程,通过求解方程得到被测量的大小	用计算机求解比较方便

2. 测量方法

测量方法有直读法、比较测量法、时域测量法、频域测量法等。直接从仪器仪表上读数得到测量值的方法称为直读法。例如,用万用表测量电压、电流、电阻,用功率表测量功率等。在测量过程中,将被测量与标准量直接进行比较获得测量结果的方法称为比较测量法,例如,电桥利用标准电阻对被测量进行测量。比较测量法的特征是标准量直接参与被测量过程,测量准确、灵敏度高,适合精密测量,但是测量过程比较麻烦。需要注意的是,测量方式与测量方法在概念上有区别。用万用表或功率表直接测量的方法,既是直接测量方式,也是直读法。但是,用电桥测量电阻是直接测量方式,属于比较测量法。

3. 测量误差

在通信电子线路实验中,为准确获取被测量值,必须准确测量。需要选用合适的仪器设备,借助一定的实验方法,以获取实验数据,并针对这些实验数据进行一定的计算、误差分析与数据处理。被测量有一个真实值,它由理论计算得出,我们将其定义为真值。实际测量时,由于受测量仪器精度、测量方法、环境条件、测量者能力等的限制,实际测量值与真值之间不可避免地存在差异,这种差异表现在数值上称为误差。误差可以被控制得越来越小,但是误差自始至终存在于所有实验中。



1) 测量误差的来源

测量误差主要来源及产生原因如表 1.2 所示。

表 1.2 测量误差主要来源及产生原因

误差来源	产生原因
仪表误差	由于仪表的电气或机械性能不完善产生的误差
方法误差(理论误差)	由于使用测量的方法不完善,理论依据不严密,对某些经典测量方法做了不适当的修改或简化产生的误差。例如,利用伏安表测量电阻时,直接以电压表示值与电流表示值之比作为测量结果,而不计电表本身内阻的影响,这样就会引起误差
操作误差(使用误差)	在使用仪表过程中,因安装、调节、布置、使用不当引起的误差
人身误差	由于人的感觉器官和运动器官的限制造成的误差
影响误差(环境误差)	由于温度、大气压、电磁场、机械振动、声音、光照、放射性等因素造成的误差

根据误差的性质和特点,测量误差可分为系统误差、随机误差(偶然误差)和疏失误差(粗大误差)三类。

2) 系统误差

实验时,在规定条件下对同一被测量进行多次测量,如果误差的数值保持稳定,或者按照某种规律变化,则称这类误差为系统误差。系统误差产生的原因:测量仪器不准确;测量设备安装、放置不当;测量时的环境条件与仪器要求的环境条件不一致;测量方法不完善或所依据的理论不严格,采用了不适合的简化和近似;测量人员读数不准确,习惯性偏于某一方向或滞后读数等。系统误差的产生原因是多方面的,针对上述原因,可以适当采取相应措施消除或减小系统误差:定期对测量仪器采用高级的标准仪器进行鉴定和校准,求出其修正值,对测量结果进行校正;仪器的放置位置、工作状态、使用环境条件,以及附件的连接和使用要符合规定;实验者要善于正确操作所使用的仪器仪表,提高实验水平,增强责任心,改变不正确的习惯;采用数字式仪器仪表代替指针式仪器仪表。

3) 随机误差(偶然误差)

在规定条件下,对同一被测量进行连续多次测量,若误差数值发生不规则变化,则这种误差称为随机误差。随机误差多由互不相关的诸多因素造成。随机误差产生的原因:电路热噪声、外界干扰、电磁场变化、大地微震等。随机误差无法预知,但是多次测量时,随机误差的绝对值不会超过一定界限,绝对值相等的正负误差出现的概率相同,如果测量次数足够,则随机误差的均值趋于0。因而,在实验中,若发现在相同条件下,某一被测量的测量结果不同,则应在同条件下多次重复测量,取全部实验数据的平均值作为测量结果,这样能够减小随机误差。

4) 疏失误差(粗大误差)

在一定测量条件下,测量结果显著地偏离真值,这种误差称为疏失误差。疏失误差产生的原因:测量者缺乏经验、操作不当等造成测错、读错、记错或算错测量结果的情况;此外,仪器有缺陷、测量方法错误、电源电压不稳、机械冲击等情况也会造成这种误差。疏失误差明显歪曲了测量结果,含有疏失误差的测量数据称为坏值,一经确认应该删除不用。

5) 测量误差的表示方法

(1)绝对误差。

被测量的仪器读数(实验数据) X 与真值(理论数据) A 之间的差值称为绝对误差 ΔX , $\Delta X = X - A$, ΔX 是具有大小、正负和量纲的数值,其大小和正负表征测量结果偏离真值的程度和方向。

(2)相对误差。

绝对误差 ΔX 与被测量真值之比(用百分数表示)称为相对误差 γ ,即

$$\gamma = \left(\frac{\Delta X}{A} \right) \times 100\%$$

1.2.2 数据处理及实验报告格式

1. 实验数据处理

实验数据处理是指对实验测量所得数据的计算、分析和整理,有时还要归纳成一定的表达式,或者画出表格、曲线图等。数据处理是建立在误差分析的基础上,

通过分析来得到正确的科学结论。数据处理的方法包括有效数字及数字的舍入、非等精度测量与加权平均、最小二乘法回归分析等。

1) 有效数字

当实验数据存在误差,计算无理数需要近似时,数值采用有效数字表示。利用有效数字记录数据结果时,需要注意以下几点。

有效数字的表示。有效数字是指从数据左边第一个非零数字开始,直到右边最后一个数字为止所包含的数字。例如,0.08702A,有效数字为8、7、0、2,左边的两个“0”不是有效数字,中间的“0”为有效数字。

有效数字的取舍。有效数字的末位数字与测量精度有关,因而当末位数字为0时,不能随意舍弃。例如,0.840A,表明测量误差不超过0.0005A,而0.84A则表示测量误差不超过0.005A,测量精度不同。有效数字的取舍应该与实验数据的误差要求保持一致。

有效数字的位数不应因为单位的不同而变化。如,2A等同于 $2 \times 10^3 \text{ mA}$,不等同于2000mA,因为两者对应的测量精度不同。2.000A等同于2000mA,二者有效数字位数相同,对应的测量精度一致。

2) 有效数字的取舍

保留有效数字时,为减小累积误差,实验数据的取舍规则一般不采用只舍不入、四舍五入等规则,而采用“小于5舍,大于5入,等于5偶”规则进行取舍。若第 $n+1$ 位及其后面的数字小于第 n 位单位数字的一半,则舍弃;若大于第 n 位数字的一半时,则第 n 位数字进1;若第 $n+1$ 位及其后面的数字恰好等于第 n 位单位数字的一半,当第 n 位数字为偶数或为零时,则舍弃后面的数字;当第 n 位数字为奇数时,则第 n 位数字进1。采用这些规则对测量数据或计算结果的多余位数进行处理,实际上是从不确定处对齐截断,这样做既能正确反映被测量的真实和可信程度,又可以使数据的表达避免冗长和累赘。

3) 实验数据的整理

实验过程中记录的原始测量数据需要进行整理,再通过分析、评估给出切合实际的实验结果和结论。通常将原始数据按序排列,剔除坏值和偏差较大的值,补测缺损数据。

4) 实验数据的表示方法

经过整理的实验数据采用列表或图形的方式表示出来,体现实验规律和结果。列表法是常用的实验数据表示方法,其特点是形式紧凑,方便数据的比较和检验。图形法则更加直观、形象,能够清晰地反映出变量之间的函数关系和变化规律。

5) 实验报告格式

实验报告格式参考附录 C。

1.3 高频电路设计制作要点

高频电路基本上是由无源元件、有源器件和无源网络组成的。高频电路中使用的元器件与低频电路中使用的元器件频率特性是不同的。高频电路中无源线性元件主要是电阻(器)、电容(器)和电感(器)。高频电路中的无源组件或无源网络主要有高频振荡(谐振)回路、高频变压器、谐振器与滤波器等,它们完成信号的传输、频率选择及阻抗变换等功能。

1.3.1 高频电子电路设计的一般原则

对于高频线路,走线的合理性直接影响到电路的性能。在高频电路线路的设计中(尤其对 10MHz 以上的频率),为了能够得到应有的高频电路特性,必须注意以下几点。

1. 地的高频阻抗值

应尽量将地的高频阻抗值降低,在低频电路中常采用一点接地,使各接地点成为同电位。在高频电路中也同样必须使电路的各接地点电位相同。但是在高频电路中往往由于走线较长,要达到一点接地较为困难。因此,如何使地的阻抗值降低,使各接地点的电位尽量相同是相当重要的。

2. 走线所产生的电感成分

应将走线所产生的电感成分尽量降低。在高频电路中,连接各元件的走线具有电感量成分。配线愈长电感量成分愈高,会使频率特性恶化(由电感成分和杂散

电容形成低通滤波器),也可能发生振荡(由于电感成分使相位偏离)。

因此,原则上走线要粗短,元件的排布要按此原则进行。且插脚式晶体管、电阻、电容等元件的端子具有电感成分,当频率很高时不可以忽略不计。因此,元件的端子也应该尽量缩短。最好在高频电路中采用贴片元件以减少元件端子的电感量。

3. 电路间的高频耦合

防止电路间的高频耦合,信号频率越高、波长越短,便越容易成为电磁波发射到空中。因此,对于几十兆赫上的信号,大多应采用铜片或镀锡铁片将电路全体隔离,以防止电路内部和外部高频的耦合。在同一电路内,为了防止电路内部的耦合,也可采用隔离方式处理,并将隔离罩接地,亦可降低接地电阻抗。另外,在电源供给线上串联电感或磁环,并可加入贯穿电容,以防止高频经电源线耦合。步骤如下:①收集资料、消化资料;②选择原理电路,分析并计算电路参数;③绘制电路原理图;④挑选合适的元器件型号,绘制元件明细表;⑤设计印制电路板。

1.3.2 高频电路 PCB 设计一般原则

1. 布线技术

多层板布线,高频电路往往集成度较高,布线密度大,采用多层板既是布线所必需,也是降低干扰的有效手段。在 PCB 分层阶段,合理地选择一定层数的印制板尺寸,能充分利用中间层来设置屏蔽,更好地实现就近接地,并有效地降低寄生电感和缩短信号的传输长度,同时还能大幅降低信号的交叉干扰等,所有这些方法都对高频电路的可靠性有利。高速电子器件管脚间的引线弯折越少越好,高频电路布线的引线最好采用全直线,需要转折可用 45° 折线或者圆弧转折。这种要求在低频电路中仅仅用于提高铜箔的固着强度,而在高频电路中,满足这一要求却可以减少高频信号对外的发射和相互间的耦合。

高频电路器件管脚间的引线越短越好。信号的辐射强度是和信号线的走线长度成正比的,高频的信号引线越长,它就越容易耦合到靠近它的元器件上去。所以,对于诸如信号的时钟、晶振、DDR 的数据、LVDS 线、USB 线、HDMI 线等高频信号线都是要求走线越短越好。高频电路器件管脚间的引线层间交替越少越好。

所谓“引线的层间交替越少越好”是指元件连接过程中所用的过孔越少越好。据测,一个过孔可带来约 0.5pF 的分布电容,减少过孔数能显著提高速度和减少数据出错的可能性。

高频电路布线要注意信号线近距离平行走线所引入的“串扰”,串扰是指没有直接连接的信号线之间的耦合现象。由于高频信号沿着传输线是以电磁波的形式传输的,信号线会起到天线的作用,电磁场的能量会在传输线的周围发射,信号之间由于电磁场的相互耦合而产生的不期望的噪声信号称为串扰。PCB 板层的参数、信号线的间距、驱动端和接收端的电气特性以及信号端接线方式对串扰都有一定的影响。

所以为了减少高频信号的串扰,在布线的时候要求做到以下几点:①在布线空间允许的条件下,在串扰较严重的两条线之间插入一条地线或地平面,这样可以起到隔离的作用而减少串扰;②当信号线周围的空间本身就存在时变的电磁场时,若无法避免平行分布,可在平行信号线的反面布置大面积“地”来大幅减少干扰;③在布线空间许可的前提下,加大相邻信号线间的间距,减小信号线的平行长度,时钟线尽量与关键信号线垂直而不要平行;④如果同一层内的平行走线无法避免,在相邻两个层,走线的方向务必相互垂直。

在数字电路中,通常的时钟信号都是边沿变化快的信号,对外串扰大。所以在设计中,时钟线宜用地线包围起来并多打地线孔来减少分布电容,从而减少串扰。对高频信号时钟尽量使用低电压差分时钟信号并包地方式,需要注意包地打孔的完整性。闲置不用的输入端不要悬空,而是将其接地或接电源(电源在高频信号回路中也是地),因为悬空的线有可能等效于发射天线,接地就能抑制发射。实践证明,用这种办法消除串扰有时能立即见效。集成电路块的电源引脚增加高频退耦电容每个集成电路块的电源引脚就近增加一个高频退耦电容。增加电源引脚的高频退耦电容,可以有效地抑制电源引脚上的高频谐波形成干扰。

高频数字信号的地线和模拟信号地线做隔离模拟地线、数字地线等接往公共地线时要用高频扼流磁珠连接或者直接隔离并选择合适的地方单点互联。高频数字信号的地线的地电位一般是不一致的,二根地线常常存在一定的电压差,而且高频数字信号的地线还常常带有非常丰富的高频信号的谐波分量,当直接连接数字信号地线和模拟信号地线时,高频信号的谐波就会通过地线耦合的方式对模拟信

号进行干扰。

各类高频信号走线尽量不要形成环路,若无法避免则应使环路面积尽量小。必须保证良好的信号阻抗匹配。信号在传输的过程中,当阻抗不匹配时,信号就会在传输通道中发生信号的反射,反射会使合成信号形成过冲,导致信号在逻辑门限电压附近波动。

消除反射的根本办法是使传输信号的阻抗良好匹配,由于负载阻抗与传输线的特性阻抗相差越大反射也越大,所以应尽可能使信号传输线的特性阻抗与负载阻抗相等。同时还要注意 PCB 上的传输线不能出现突变或拐角,尽量保持传输线各点阻抗连续,否则在传输线各段之间也将会出现反射。

保持信号传输的完整性,防止由于地线分割引起的“地弹现象”。

2. 接地原则

对于工作频率较高的电路和数字电路,由于各元器件的引线和电路的布局本身的电感都将增加接地线的阻抗,因而在低频电路中广泛采用一点接地的方法。若用在高频电路容易增加接地线的阻抗,而且地线间的杂散电感和分布电容也会造成电路间的相互耦合,从而使电路工作不稳定。

为了降低接地线阻抗并减少地线间的杂散电感和分布电容造成电路间的相互耦合,高频电路采用就近接地,即多点接地的原则,把各电路的系统地线就近接至低阻抗地线上。一般来说,当电路的工作频率高于 10MHz 时,应采用多点接地的方式。由于高频电路的接地关键是尽量减少接地线的杂散电感和分布电容,所以在接地的实施方法上与低频电路有很大的区别。

1.4 常用实验仪器

1.4.1 岩崎 SS-7804 型双踪示波器

岩崎 SS-7804 型示波器前面板如图 1.7 所示。

1. 岩崎 SS-7804 型示波器的性能指标

显像管: 6 英寸(1 英寸=2.54 厘米)、方形 $8 \times 10\text{DIV}$ ($1\text{DIV}=10\text{mm}$)。