

第 1 章 模拟电子技术实践基础知识

本章介绍模拟电子电路实验课的目的、意义、特点、基本要求和学习方法，以及电子电路的基本调试测试技术和数据处理方法，为较好地完成该课程的实践训练奠定良好的基础。

1.1 概 述

1.1.1 模拟电子技术实践的意义

模拟电子技术是电信类专业的一门实践性很强的专业基础课程，其对应的课程实践对学习和掌握该课程理论与技术有很重要的作用。模拟电子技术实验是根据教学、科研、生产的要求，培养学生掌握模拟电子电路的设计方法、安装与调测技术，它是将理论知识转化为实用电路或电子产品的过程。要想掌握好模拟电子技术，除了熟悉模拟电子电路的基本组成、基本原理及其分析方法外，还必须掌握模拟电子器件及其基本电路的应用技术。因此，模拟电子技术实践课是学习和掌握模拟电子技术不可缺少课程之一。

通过实践训练，促进掌握不同电子元器件构成功能电路的组成原则、电子元器件参数对模拟电路性能指标的影响规律，准确验证模拟电路理论和工程实用性，加深理解电子系统理论知识与体系结构；通过实践训练，促进掌握模拟电路的实验技术、测量技术、调试技术，进一步深化对模拟电路理论的条件性与局限性理解，促进形成解决新问题的新思路与创新意识。

信息技术的飞速发展，推动着电子信息技术高等教育的教学改革，侧重于验证性的传统模拟电子技术实验在帮助读者学习模拟电子技术基本理论、基本分析方法和基本实验技能方面发挥了重要作用，但不能满足 21 世纪对电信类宽口径、重工程实践、复合型技术人才的需求。为提高基于 CDIO（产品研发的构思 Conceive、设计 Design、实施 Implement 和运作 Operate）工程实践能力、综合实践能力和创新意识，本课程将分为验证性实验、设计性实验、系统设计性实验、EDA 仿真研究性实验几个层面。

1.1.2 模拟电子技术实践目的

通过模拟电子技术实践环节训练，旨在培养理论联系实际的优良作风、严谨求实的科学态度和勇于创新的工程素质，为成为合格的电子工程师奠定坚实的理论基础和实践能力。具体如下。

- (1) 熟悉并掌握基本电子实验仪器、仪表的性能、使用方法与测试技术。
- (2) 掌握模拟电子电路的调试方法、系统参数的测试和调整方法、应用方法。
- (3) 能够运用理论知识对实验现象、结果进行分析和处理，解决实验中遇到的问题。

(4) 熟悉并掌握 EDA-Proteus 工具及其在模拟电子电路仿真实验的应用。

(5) 熟悉模拟电子系统的组成与模块设计方法, 掌握单元模块电路的设计、拟定实验步骤。

(6) 能够综合实验数据, 分析研究实验现象, 撰写科学、严谨、求实的实验报告。

1.1.3 模拟电子技术实践要求

为取得良好的实验效果, 应做好如下几个环节。

1. 实验准备 (构思与设计)

实验准备即为实验的预习阶段, 是保证实验顺利进行的必要步骤。每次实验前都应先预习, 从而提高实验质量和效率, 避免在实验时不知如何下手, 浪费时间, 完不成实验, 甚至损坏实验装置。因此, 实验前应做到以下几点。

(1) 了解本次单元实验的目的, 预习本次实验内容, 掌握本次实验的电路原理和方法; 熟悉与本次单元实验相关的模拟电子技术理论知识, 必要时用 EDA 工具进行课外仿真。

(2) 写出预习报告, 其中应包括实验的电子元器件清单及器件引脚图、详细电路接线图、实验步骤、数据记录表格等。

(3) 按预习报告上的详细实验电子电路图在实验多功能板上合理布局电子元器件, 完成电路的初步安装。

(4) 熟悉实验所用的实验测试仪器、仪表的使用方法。

2. 实验过程 (实施与运作)

在完成实验准备环节后, 就可进入实验实施阶段。实验时要做到以下几点。

(1) 实验开始前, 检查预习报告, 预习报告合格者才能开展实验。

(2) 认真听讲, 要求熟悉本次实验使用的实验仪器仪表的功能与使用方法。

(3) 完善实验接线后, 在通电前, 借助于万用表, 对电路连接的正确性与可靠性进行必要的自查自纠, 主要内容如下。

① 合理布局实验板上的“电源”与“地”。

② 串联回路从电源的某一端出发, 按回路逐项检查各实验仪器仪表、电子器件的位置、极性等是否正确, 合理。

③ 并联支路则检查其两端的连接点是否可靠连接。

④ 距离较近的两连接端尽可能用短导线, 避免干扰。

⑤ 距离较远的两连接端尽量选用长导线直接连接, 避免多根导线过渡连接。

⑥ 自查完成后, 须经指导教师认可后方可通电实验。

(4) 实验时, 应按实验要求及步骤, 逐项进行实验和操作。改接线路时, 必须断开电源。实验中应观察实验现象, 应用理论知识分析判断实验现象是否正常, 实验测量数据是否合理, 实验结果与理论是否一致。若不一致, 分析解决问题。

完成实验内容后, 应请指导教师签字确认。实验过程结束后整理好实验仪器、仪表。

3. 实验总结

即整理实验数据、绘制波形曲线和图表、分析实验现象与数据结果、撰写实验报告。

实验报告的撰写应严肃认真、实事求是。如实验结果与理论有较大出入时，不得修改实验数据和结果，不得用凑数据的方法来向理论靠近，而是用理论知识来分析实验数据和结果，解释实验现象，找到引起较大误差的原因。

实验总结报告分一般性实验报告和设计性实验报告两类。格式如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 实验总结报告格式内容

一般性实验总结报告	设计性实验总结报告
一、实验目的	一、实验目的
二、实验仪器与器件	二、设计任务与要求
三、实验原理简介	三、电路总体方案设计
四、实验内容、步骤与测量数据	四、电路设计与元器件选择
五、实验数据整理与分析 (包括绘图、制表、误差分析)	五、实验仪器与器件
六、问答题	六、电路主要特性参数测试 (包括实验内容、步骤与测量数据)
七、总结	七、实验数据整理与分析 (包括绘图、制表、误差分析)
	八、问答题
	九、总结

1.1.4 模拟电子技术实践课程特点

与其他实验相比较，模拟电子电路实验有以下几个显著特点。

1. 理论性强

在模拟电路实验中，如果没有正确理论指导，就不可能设计性能稳定、符合技术指标要求的电路，也不可能拟定正确的实验方法和步骤，也不可能分析判断实验数据结果的正确性，更不可能有效分析和解决实验中发生的故障。因此，要较好地完成模拟电路实验，首先应学好模拟电路理论课程。

2. 工艺性强

即使有了成熟的实验电路方案，但由于电子元器件的布局、共地、装配工艺等不合理，也很难取得满意的实验结果，甚至会导致实验失败（尤其是电路处理高频信号较为突出），因此需要认真掌握电子电路工艺等技术。

3. 测试技术要求高

模拟电路功能模块电路多，不同功能电路有不同的性能指标，对不同性能指标又有不同的测试方法和测试仪器，因此应熟练掌握基本测量技术和各种测量仪器的使用方法。

1.1.5 模拟电子技术实验的学习方法

1. 掌握模拟电路实验课程的学习规律

实验课程是以实验为主体的课程，每个实验都有预习、实验、总结 3 个阶段。

(1) 预习：弄清实验的目的、实验电路、实验方法和注意事项，拟定实验步骤，绘出实验记录表格，理论估计实验结果，以便评估实验结果是否达到预期结果。只有充分预习，实验才能顺利完成并取得收获。

(2) 实验：按照预定的方案进行实验，其过程既是完成实验，也是锻炼实验能力、培养严谨实验态度的过程。在实验中，要善于动手、勤于动脑，做好原始数据的记录，用模拟电路理论知识解决实验中遇到的问题。

(3) 总结：实验完成后，通过整理实验数据，分析数据结果，撰写实验报告；通过实验数据误差分析，深刻理解理论知识的重要性，培养科学求实的实验作风和创新意识。

2. 应用模拟电路理论知识指导实践

在实验开始前，首先应从理论上研究实验电路的工作原理与功能特性，拟定出实验方案。在调测电路时，要用理论分析来评估实验数据的正确性与产生故障的原因，从而确定相应的调测措施。

3. 注意模拟电路实践经验的积累

模拟电路的实践经验需要长期积累。在实验中，应熟悉电子仪器和元器件的使用方法，熟悉实验中出现的正常现象与故障特征，熟练掌握模拟电路实验的操作步骤与电子测量技术，对实验过程中的经验教训进行总结。

4. 增强自觉提高实践工作能力的意识

要将实践工作能力的培养从被动转为主动。在实践中，通过单元模块电路实验和小型模拟电子系统实训项目培养自主学习能力，培养独立解决实验中的各种故障、困难、失败等问题，这是提高自己实践工作能力的最有效途径。

1.2 电子测量中的误差分析与测量数据处理

在电子测量中，被测量值有一个真实值，简称真值。测量的目的就是获取被测量真值，但由于受种种因素的影响，测量结果总是与被测量真实值不一致，即任何测量都不可避免存在测量误差。为减小和消除测量误差，需研究测量误差、测量不确定度及测量数据处理。

1.2.1 电子测量中的误差分析

电子测量是模拟电路实验的基础，它是用测量工具或仪器，通过一定的方法，直接或间接地得到所被测电参量的量值。

1. 有关量值的几个基本概念

1) 真值、理论真值和约定真值

真值是指在一定条件下,能够准确反映某一被测量值真实状态和属性的量值,是客观存在、实际具有的量值。真值有理论真值和约定真值两种。

理论真值是在理想情况下表征某一被测量值真实状态和属性的量值。理论真值是客观存在的,或是根据一定的理论所定义的。由于测量误差的普遍存在,一般情况下,被测量的理论真值是不可能通过测量得到的,但却是实际存在的。在模拟电路实验中,该值可用模拟电路理论分析方法估算。

约定真值就是指人们为了达到某种目的,按照约定的办法所确定的量值,通常为国际上公认的某个物理量的标准量值。例如,以高精度等级仪器的测量值约定为低精度等级仪器测量值的约定真值。

2) 实际值

在满足实际测量精度需要的前提下,其测量误差可以忽略测量结果,称为实际值。实际值在规定的精确程度内用以代替被测量的真值。例如,在标定测量仪表时,把高精度等级的标准器所测得的量值作为实际值。

3) 测量值和指示值

通过测量所得到的量值称为测量值。测量值一般是被测量真值的近似值。由测量仪表的显示部件直接显示出来测量值,称为指示值,简称示值。

4) 标称值

测量仪表上标注的量值称为标称值。因受制造、测量条件和环境变化的影响,标称值并不一定是被测量的实际值,通常在给出标称值的同时,也给出它的误差范围或精度等级。

2. 测量误差的定义

测量误差是测量结果与被测量的真值之间的差异,简称误差。

误差公理认为:在测量过程中,测量误差的产生不可避免,测量误差自始至终存在于测量过程中,一切测量结果都存在误差。随着科学技术的发展和认识水平的提高,可以将测量误差控制得越来越小,但测量误差的存在仍不可避免。

$$\text{误差} = \text{测量值} - \text{真值}$$

1) 误差的表示方法

误差常用的表示方法有三种:绝对误差、相对误差和引用误差。

(1) 绝对误差。

绝对误差 Δ 为被测量的测量值 x 与真值 L 之差,即

$$\Delta = x - L \quad (1.2.1)$$

绝对误差与被测量有相同单位。其值可为正,亦可为负。由于被测量的真值 L 往往无法得到,因此常用实际值 A 来代替真值,因此有

$$\Delta = x - A \quad (1.2.2)$$

用校准仪表对测量结果进行修正时, 常常使用的是修正值。修正值用来对测量值进行修正。修正值 C 定义为

$$C = A - x = -\Delta \quad (1.2.3)$$

修正值为绝对误差的负值。测量值加上修正值等于实际值, 即 $x+C=A$ 。通过修正使测量结果更准确。

用绝对误差表示测量误差往往不能准确地表明测量质量的好坏。

(2) 相对误差。相对误差 δ 为绝对误差 Δ 与真值 L 的比值, 用百分数来表示, 即

$$\delta = \frac{\Delta}{L} \times 100\% \quad (1.2.4)$$

实际测量中真值无法得到, 可用实际值 A 或测量值 x 代替真值 L 来计算相对误差。用实际值 A 代替真值 L 计算的相对误差称为实际相对误差, 用 δ_A 来表示, 即

$$\delta_A = \frac{\Delta}{A} \times 100\% \quad (1.2.5)$$

用测量值 x 代替真值 L 计算的相对误差称为示值相对误差, 用 δ_x 来表示, 即

$$\delta_x = \frac{\Delta}{x} \times 100\% \quad (1.2.6)$$

在实际应用中, 因测量值与实际值相差很小, 即 $A \approx x$, 故 $\delta_A \approx \delta_x$, 一般 δ_A 与 δ_x 不加以区别。

采用相对误差来表示测量误差能够较确切地表明测量的精确程度。

(3) 满度相对误差。绝对误差和相对误差仅能表明某个测量点的误差。实际测量仪表往往有一个测量范围, 通常有一个满刻度值 x_m 。用满刻度相对误差表示测量仪表的精确程度, 为绝对误差 Δ 与满刻度值 x_m 比值, 即

$$\gamma_m = \frac{\Delta}{x_m} \times 100\% \leq S\% \quad (1.2.7)$$

γ_m 不能超过测量仪表的准确度等级 S 的百分值 $S\%$ (S 分为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 5.0 共 7 级)。若仪表准确度等级为 S , 被测量真值为 L , 选满刻度测量 x_m , 则测量的相对误差为

$$\gamma = \frac{\Delta}{L} \leq \frac{x_m S\%}{L} \quad (1.2.8)$$

上式表明, 当仪表的等级 S 选定后, 测量值越接近于 x_m , 测量的相对误差越小。

2) 测量误差的来源

根据测量误差的来源, 测量误差归纳起来有如下几个方面。

(1) 测量环境误差。任何测量都有一定环境条件, 如温度、湿度、大气压、机械振动、电源波动、电磁干扰等。测量时, 由于实际的环境条件与所使用的测量仪表要求的环境条件不一致, 就会产生测量误差, 这种测量误差就是测量环境误差。

(2) 测量仪表误差。对测量中所使用的测量仪表性能指标有一定要求。由于实际测量所使用的测量仪表性能指标达不到要求, 或安装、调整、接线不符合要求, 或使用不当, 或因内部噪声、元器件老化等使测量仪表的性能劣化等, 都会引起测量误差, 这种测量误差就是测量仪表误差。

(3) 测量方法误差。由于测量方法的不合理或不完善,测量所依据的理论不严密等,也会产生测量误差,这种测量误差就是测量方法误差。例如,用电压表测量电压时,由于没有正确估计电压表内阻而引起的误差。

(4) 测量人为误差。由于测量操作人员操作经验、知识水平、操作不规范和疏忽大意等原因,也会产生测量误差。

3) 测量误差的类型

很多原因可以产生测量误差,按不同的角度进行分类。

(1) 系统误差、随机误差和粗大误差。根据测量误差的性质和表现形式,可分为系统误差、随机误差和粗大误差。

① 系统误差。在相同的条件下,对同一被测量物进行多次重复测量时,所出现的数值大小和符号都保持不变的误差,或者在条件改变时,按某一确定规律变化的误差,称为系统误差。其主要特征是固定不变或按一定规律变化的误差。

系统误差的产生原因比较复杂,它可能是一个因素在起作用,也可能是多个因素同时起作用。主要是由测量仪表误差(如测量仪表制造和安装的不正确,没有将测量仪表调整到理想状态等)、环境误差(如环境温度、湿度变化等)造成的。

由于系统误差产生原因比较复杂,对测量的影响不易发现,因此首先应对测量仪表、测量对象和测量数据进行全面分析、检查和判定。若存在系统误差,应找出系统误差的根源,并采取一定的措施来消除或减小系统误差。

分析产生系统误差的根源,一般可从以下5个方面着手。

- a. 所采用的测量仪表是否准确可靠;
- b. 所应用的测量方法是否完善;
- c. 测量仪表的安装、调整、放置是否正确合理;
- d. 测量仪表的工作环境是否符合规定条件;
- e. 测量操作人员的操作是否合乎规范。

消除或削弱系统误差的方法如下。

a. 从产生系统误差的根源上消除系统误差,这是最根本的方法。在测量之前,测量人员要详细检查测量仪表,并且调整到最佳状态。在测量过程中,应防止外界干扰,尽可能减少产生系统误差的环节。

b. 在测量结果中利用修正值消除系统误差。对于已知的系统误差,通过对测量仪表的标定,事先求出修正值,实际测量时,将测量值加上相应的修正值就可得到被测量的实际值,消除或减小系统误差。对于变值系统误差,设法找出系统误差的变化规律,给出修正曲线或修正公式,实际测量时,用修正曲线或修正公式对测量结果进行修正。此种方法不能完全消除系统误差,但系统误差会被大大削弱。

c. 采用能消除系统误差的典型测量方法。找出系统误差变化规律后,在测量过程中采用相应能消除或减小系统误差的方法进行测量,可以避免或减小系统误差。

② 随机误差。在相同的条件下,对同一被测量进行多次重复测量时,所出现的数值大小和符号以不确定方式变化的误差,称为随机误差。其主要特性是随机性。

在实际测量中,系统误差和随机误差之间不存在明显的界限,两者在一定条件下可以相互转化。如某项具体误差,在一定条件下为随机误差,在另一条件下可为系统误差,反之亦然。

随机误差是在测量过程中,许多独立、微小的随机因素对测量造成干扰而引起的综合结果。这些影响因素既有测量仪表因素,也有环境因素和人为因素。由于对这些影响因素很难把握,一般也无法控制。因而对随机误差不能用简单的修正值来校正,也不能用实验的方法来消除。

单个随机误差的出现具有随机性,即它的大小和符号都不可预知,但是,当重复测量次数足够多时,随机误差的出现遵循统计规律。由此可见,随机误差是随机变量,测量值也是随机变量,因此可借助概率论和数理统计原理对随机误差进行处理,做出恰当评价,并设法减小随机误差对测量结果的影响。

③ 粗大误差。明显偏离被测量真值的测量值所对应的误差,称为粗大误差。

粗大误差的产生,有操作人员的主观原因,如读错数、记错数、计算错误等,也有客观外界原因,如外界环境突然变化等。含有粗大误差的测量值称为坏值。坏值必然会歪曲测量结果。为避免或消除测量中产生粗大误差,首先要保证测量条件稳定,增强测量人员责任心并以严谨的态度对待测量任务。

对粗大误差的处理原则是:利用科学方法对可疑值做出正确判断,对确认的坏值予以剔除。

(2) 基本误差和附加误差

任何测量仪表都有正常工作所要求的环境条件。根据测量仪表实际工作的条件,可将测量所产生的误差分为基本误差和附加误差。

① 基本误差:测量仪表在规定使用条件下工作所产生的误差。

② 附加误差:在实际工作中,由于外界条件变化,测量仪表不在规定使用条件下工作,从而产生额外的误差。

在实际测量过程中,应尽量避免产生附加误差。

(3) 静态误差和动态误差

根据被测量随时间变化的速度,可将误差分为静态误差和动态误差。

① 静态误差:在测量过程中,测量误差稳定不变。

② 动态误差:在测量过程中,测量误差随时间发生变化。

在实际测量过程中,被测量往往是变化的。当被测量随时间变化很缓慢时,这时所产生的误差也近似可认为是静态误差。

3. 测量的精度

为了定性描述测量结果与真值的接近程度和各个测量值分布的密集程度,引入了测量的精度。测量的精度包含了准确度、精密度和精确度这3个概念。

1) 测量的准确度

测量的准确度表征了测量值和真值的接近程度。准确度越高则表征测量值越接近真值。准确度反映了测量结果中系统误差的大小程度,准确度越高,则系统误差越小。

2) 测量的精密度

测量的精密度表征了多次重复测量时,各个测量值分布的密集程度。精密度越高则表征

各测量值彼此越接近，即越密集。精密度反映了测量结果中随机误差的大小程度，精密度越高，则随机误差越小。

3) 测量的精确度

测量的精确度是准确度和精密度的综合，精确度高则表征了准确度和精密度都高。精确度反映了系统误差和随机误差对测量结果的综合影响，精确度高，则反映测量结果系统误差和随机误差都小。

对于具体测量，精密度高的准确度不一定高；准确度高的，精密度不一定高；但是精确度高的，精密度和准确度都高。

在应用准确度、精密度和精确度时，应注意它们都是定性概念，不能用数值作定量表示。

1.2.2 测量数据的处理

1. 直接测量数据的有效数字及近似数运算

在进行各种测量和数字计算时，大多数测量值和数字计算的结果均是近似数，其中包含有误差，应该用几位数字来表示测量值和数字计算的结果，这是一个有效数字的问题。在测量数据时，不能简单认为小数点后面位数越多就越准确。

1) 有效数字

当用一个数来表示某测量值时，若误差不超过其末位数字单位的一半，那么，从该数左起第一个非零数字起到最末一位数字止，都称为有效数字。

显然，在一个数的有效数字中，仅最末一位数字是欠准确的，其余数字都是准确的。

一个数的全部有效数字所占有的位数称为该数的有效位数。

对于“0”这个数字，可能是有效数字，也可能不是有效数字。“0”是否是有效数字的判定准则是：处于数中间位置的“0”是有效数字；处于第一个非零数字前的“0”不是有效数字；处于数后面位置的“0”则难以确定，这时应采用科学记数法。

例如，0.524mH、2.06V、98.7Hz、1.20mA、 $1.30 \times 10^{-3}\text{F}$ 均为 3 位有效数字。尤其是 1.20mA 和 $1.30 \times 10^{-3}\text{F}$ 的末位“0”不能随意删除。

有效数位不能因单位变化而变化。2.06V 不能记作为 2060mV，而应该记为 $2.06 \times 10^3\text{mV}$ 。

2) 数据的舍入规则

判定数据应取的有效位数后，就应把数据中的多余数字舍弃。为减小因舍弃多余数字引起误差，应按有效数字舍入原则进行舍弃。基本原则是 4 舍 6 入 5 凑偶，具体做法如下。

(1) 若判定应舍弃数字的第一位数字小于 5，则将应舍弃该舍弃数字（即 4 舍）；

(2) 若判定应舍弃数字的第一位数字大于 5，则将应舍弃该舍弃数字，并把应保留部分的末位数字加 1（即 6 入）；

(3) 若判定应舍弃数字的第一位数字是 5，则应按不同情况区别对待：

① 若 5 后面的数字不全是 0，则将应舍弃数字舍弃，并把应保留部分的末位数字加 1；

② 若 5 后面的数字全是 0 或 5 后面没有数字，则要看应保留部分的末位数字是奇数还是偶数。若为奇数，则将应舍弃数字舍弃，并把应保留部分的末位数字加 1，使有效数字末位

成为偶数；若为偶数，则将应舍弃数字舍弃，应保留部分的末位数字不加 1，使有效数字末位仍为偶数（即 5 凑偶）。

(4) 要一次性舍弃，不能逐位舍弃。

3) 有效数字的运算规则

在不同有效数字运算中，数据的有效位数应按以下几条准则来判定。

(1) 多项有效数字的加、减运算，应以数据中有效数字末位数的数量级最大者为准，其余各数均向后多取一位有效数字，项数过多时可向后多取两位有效数字，最终结果的有效数字末位数的数量级应该与有效数字末位数的数量级最大者一致。

例如，求 $987.5+0.2354\approx 987.5+0.24=987.74\approx 987.7$ 。

(2) 近似数进行乘、除运算，应以数据中有效位数最少者为准，其余各数多取一位有效数字，最终结果的有效位数应该与有效位数最少者一致。

例如，求 $15.235\times 4.52\approx 15.24\times 4.52=68.8848\approx 68.9$ 。

(3) 对一个有效数进行开方或乘方运算时，运算结果的位数应比原数的有效位数多 1 位。

(4) 进行近似数对数运算时，所取对数的位数应与原数的有效位数相等。

2. 间接测量的误差传递

在实际测量中，对于不能直接测量的量，采用间接测量的方法，即通过对与被测量有确定函数关系的几个量进行直接测量，然后将测量结果代入函数关系式，经过计算得到所需要的测量结果。由于直接测量的测量结果含有测量误差，则根据函数关系计算得到的测量结果中也有一定的误差。误差的传递实质上就是要解决间接测量的误差问题，即如何根据各直接测量量的误差来评定间接测量结果的误差。

在间接测量中，被测量和直接测量量之间的函数关系可以表示为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (1.2.9)$$

式中， y 是间接测量的被测量； x_j 是各个直接测量量。

由微分知识可得

$$dy = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} dx_m$$

用间接测量量 y 的误差 Δy 代替 dy ，用直接测量量 x_j 的误差 Δx_j 代替 dx_j ，则有

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_m} \Delta x_m = \sum_{j=1}^m \frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j = \sum_{j=1}^m f'_{xj} \Delta x_j = \sum_{j=1}^m D_j \quad (1.2.10)$$

该式称为间接测量误差传递的基本公式， $f'_{xj} = \frac{\partial f}{\partial x_j}$ 称为 x_j 的误差传递系数， $D_j = f'_{xj} \Delta x_j =$

$\frac{\partial f}{\partial x_j} \Delta x_j$ 称为 x_j 的部分误差。

如果将式 (1.2.10) 用相对的形式表示，则有：

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\partial f}{\partial x_1} \frac{\Delta x_1}{y} + \frac{\partial f}{\partial x_2} \frac{\Delta x_2}{y} + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \frac{\Delta x_n}{y} = \frac{1}{y} \sum_{j=1}^m f'_{xj} \Delta x_j = \frac{1}{y} \sum_{j=1}^m D_j \quad (1.2.11)$$

1.3 电子电路设计的基本方法

1. 电子电路设计的基本原则

电子电路设计是指根据设计任务、要求和条件,选择合适的方案,确定电路的总体组成框图,然后对各单元模块进行电路设计,最后得到满足功能和技术指标要求的完整电路过程。

通常,电路设计除了完全满足功能和技术指标要求外,还要求电路简单可靠,电磁兼容性好,性能价格比高,安装调试方便,另外,还可能同时要求系统集成度高,系统功耗小等。因此,电子电路设计需要综合考虑各项需求。

2. 电子电路设计的一般步骤

电子电路设计不是一个简单的、一次就能完成的过程,而是一个逐步改进电路性能的探索过程(图 1.3.1)。通常采用自顶向下的设计方法,下面介绍其基本步骤。

(1) 需求分析: 仔细分析技术指标要求和附加要求。

接到设计任务后,仔细分析任务的要求、各项性能指标的含义,明确电子系统要完成的功能与技术指标。

(2) 系统概要设计: 包括方案选择、系统总体框图设计、技术指标分配。

通过需求分析弄清系统的功能需求,然后进行总体方案设计。该过程可以通过网络或图书检索相关参考资料,可以参考一些与设计课题相近的电路方案,对于同一个课题,实现方案可能有多,通过方案的可行性对比分析,根据现有条件选择一种可行方案。

根据选择的方案,把系统要完成的任务按照功能划分为若个相互联系的单元模块,然后将技术指标和功能分配给各个单元模块,并画出一个能表示系统基本组成和相互关系的总体组成框图。

(3) 模块电路详细设计: 包括单元模块的电路设计、EDA 仿真验证和实验。

单元模块的电路设计可以参考一些典型的实用电路,或电路改进,或者几个电路巧妙结合实现某个功能。通常包括电路选择、元器件选择与参数计算、EDA 仿真验证和实验调试等步骤。在电路形式确定后,还要根据公式计算出各元件的参数,由于电子元器件标称规格分级且存在误差,

故元器件参数的计算常称为估算,估算的参数需要经过仿真验证或实验才能确定。特别指出,现代电子电路设计借助于 EDA 仿真实验可以提高电子电路的设计效率,避免连接硬件电路、重复测试的烦琐过程。

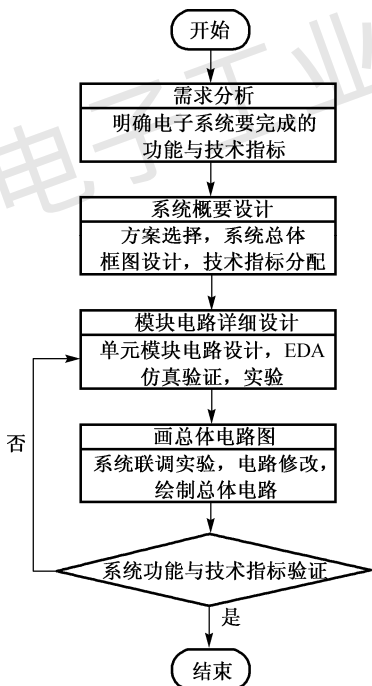


图 1.3.1 电子电路设计的一般流程

在设计单元电路时,在保证电路性能指标的前提下,要尽量减少元器件品种、规格,要尽量选用集成电路进行设计。在选择元器件时,要注意以下几点。

① 合理选择集成芯片。除了考虑集成电路的功能和性能指标外,还要注意芯片的供电电压、功耗、速度和价格等因素。

② 正确选择电阻和电容。电阻和电容种类繁多,设计时要根据电路的要求选择性能和参数合适的阻容元件,并要注意标称值、精度、功耗、工作频率、耐压范围、极性、损耗等是否满足要求。如电阻值大时,其误差和噪声会大,因此选择电阻时,其阻值一般不应超过 $10\text{M}\Omega$,并尽量选择阻值小于 $1\text{M}\Omega$ 的电阻。对于电容,如电解电容容值较大,而非电解电容容值较小,需要根据设计要求及电路工作情况选择电容种类,其数值应在常用电容器标称系列之内,选择非电解电容其容值最好在 $100\text{pF}\sim 0.1\mu\text{F}$ 。

(4) 画总体电路图。

在完成单元模块电路设计后,应画出能反映各单元模块连接关系的完整的电路原理图。该原理图是一个初步设计草图,还需要经过反复联调实验、修改、验证通过后,才能成为正式的总体电路图。绘制电路图时,要注意以下几点。

① 布局合理、排列均匀、图面清晰,便于读图和理解。对于比较复杂的电路,应尽量把主要电路绘制在一张图纸上,而把次要的或比较独立电路绘在其他图纸上,并在图的断口处做好标记,标识出信号不同图纸上引出点和引入点,以说明各图纸之间的电路边线的连接关系。

② 约定信号流向,一般从输入端或信号源画起,按信号流向由左到右或由上到下依次画出各单元电路,反馈通路信号流向与此相反。

③ 图形符号要符合国内或国际规定的通用符号。

④ 连接线画成水平线或垂直线,尽量减少交叉或拐弯。相互连通的交叉线应在交叉处用实心点表示。连接线可以根据需要加注信号名或标记,表示其功能或去向。

1.4 模拟电子电路的组装与调试技术

电子电路的组装与焊接在电子技术实验中具有非常重要的地位,它是将理论电路转换为实际电路的过程,要设计完善、可靠的电子电路,除了要具备扎实的模拟电子技术的基础知识外,安装调试也是很重要的实践环节,组装及焊接的优劣,不仅影响外观质量,还直接影响电路的性能。具体地说,在用面包板或电路实验板上组装调试中要注意以下问题。

1.4.1 电子电路的组装

1. 面包板

面包板是用于搭接电路的重要工具,了解面包板的结构和使用方法有利于提高实验效率,减少实验故障。面包板外观如图 1.4.1 所示,常见的最小单元面包板分上、中、下三部分,上、下部分一般是由一行或两行插孔构成的窄条,中间部分是由中间一条隔离凹槽和上下多列插孔构成的宽条。

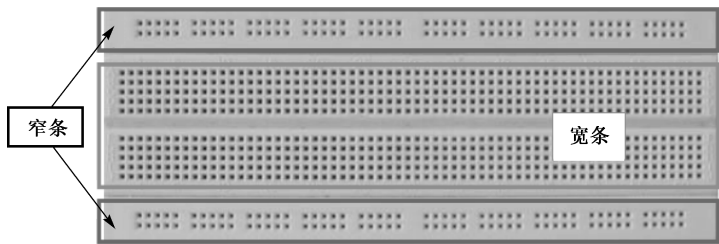


图 1.4.1 面包板结构示意图

窄条（图 1.4.2）上下两行之间电气不连通，每 5 个插孔为一组，通常的面包板上有 10 组或 11 组。组间的电气连接有 5-5、3-4-3 和 4-3-4 三种结构。例如，5-5 结构有 10 组，其中，左边 5 组内部电气连通，右边 5 组内部电气连通，但左右两边之间不连通，如图 1.4.2 所示。3-4-3 结构有 10 组，其中，左边 3 组内部电气连通，中间 4 组内部电气连通，右边 3 组内部电气连通，但左边 3 组、中间 4 组以及右边 3 组之间是不连通的。4-3-4 结构有 11 组，其中，左边 4 组内部电气连通，中间 3 组内部电气连通，右边 4 组内部电气连通，但左边 4 组、中间 3 组以及右边 4 组之间是不连通的。窄条一般用来布置电源和地线。

宽条（图 1.4.3）是布置元器件的地方，每列由上、下各 5 个插孔组成，上列 5 个插孔内部电气连通，下列 5 个插孔内部也是电气连通，但是列与列之间，凹槽上半部分和下半部分之间没有电气连通，由板子中央的一条凹槽隔断。



图 1.4.2 面包板窄条结构示意图

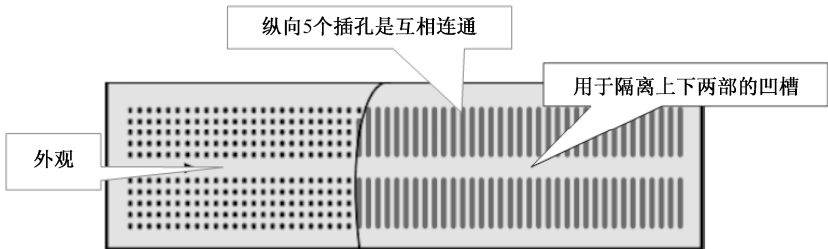


图 1.4.3 面包板宽条结构示意图

在面包板上搭接实验电路无须焊接，只要将元件插入孔中，连接少量的导线即可，使用方便。使用前应明确哪些元件引脚连在一起，再将要连接在一起的引脚插入同一组的 5 个小孔中。

2. 布局、安装

电子元器件的布局应尽量紧凑、合理，要便于检测、调试及维修。一般应遵循以下几条原则。

（1）按电路信号流向布置集成电路和晶体管等，避免输入输出、高低电平的交叉。

- (2) 与集成电路和晶体管相关的其他元器件应就近布置, 避免兜圈子与绕远。
- (3) 发热元器件应与集成电路和晶体管保持足够的距离, 以免影响电路的正常工作。
- (4) 元器件在电路板上的分布应尽量均匀、整齐, 不允许重叠排列与立体交叉排列。
- (5) 合理布置地线, 避免电路间相互干扰。
- (6) 在面包板上布局元器件不要扎堆放置在一起, 每列 5 个插孔也别占满, 以便于测试。

安装元器件需注意: 安装元器件前, 认真查看各元器件外观及标称值, 通过仪器检查元器件参数与性能, 确保电子元器件没有损坏; 用镊子等工具弯曲元器件引脚, 不得随意弯曲, 以免损伤元器件; 对所安装的元器件, 应能方便地查看到元器件表面所标注的重要参数信息; 有安装高度的元器件要符合规定要求, 同规格的元器件应尽量有同一高度面; 元器件安装顺序应先低后高、先轻后重、先易后难、先一般后特殊。

为防止集成电路芯片受损, 在插入和拔出芯片时要细心。插入时应与器件方向一致, 缺口朝左, 使所有引脚均对准插座板上的小孔, 均匀用力按下; 拔出时, 必须用专用拔钳, 夹住集成块两端, 垂直向上拔起, 或用小起子对撬, 以避免使其引脚因受力不匀而弯曲或断裂。

3. 布线

导线一般应选用直径为 $\phi 0.5 \sim 0.8\text{mm}$ 的单股导线, 长度适中, 两端绝缘皮剥去 $5 \sim 10\text{mm}$, 并剪成 45° 角。

电子电路因布线错误而引起故障占很大比例。为避免或减少故障, 要求布线合理和准确。布线应该遵循的基本原则如下。

- (1) 连接点越少越好, 每增加一个连接点就会增加故障概率。
- (2) 接线要牢靠, 松动的连接易造成接触不良, 造成断路故障。
- (3) 元器件和连线要排列整齐, 一般按电路顺序直线排列, 输入与输出线要远离。在高频电路中, 导线不宜平行, 以防止寄生耦合引起电路自激。元器件插脚和连线要尽量短而直, 以防止分布参数影响电路性能。
- (4) 布线时要在器件周围走线, 不允许导线在集成块上方跨过, 以免妨碍排除故障或调换器件。
- (5) 为使布线整洁和便于检查, 电路中不同功能导线应尽量采用不同颜色, 如电源线用红色, 接地线用黑色等。布线顺序是先布电源线和地线, 再布固定使用的规划线 (如固定接地线等), 最后再逐级连接其他信号线。必要时可以边接线边测试接线的连通性, 逐级进行。走线应尽可能避免遮盖其他插孔, 以免影响其他导线的插入。

1.4.2 电子电路的焊接

焊接是在电路板上进行电子电路的装配工艺, 它也是连接各电子元器件及导线的主要方式, 焊接质量直接影响电路的性能。焊接一般分为手工焊接与自动焊接。

1. 手工焊接

手工焊接是最常使用的焊接方法。手工焊接质量要求是: 焊接牢固, 焊点光亮、圆滑、饱满。焊接质量主要取决于焊接工具、焊料、焊剂和焊接技术。

1) 电烙铁

焊接晶体管、集成电路和小型元器件时,一般选用 15~30W 的电烙铁。新购电烙铁首次使用时,需将电烙铁加热后,用其融化松香焊锡丝,使电烙铁头部的表面附上一层焊锡,俗称上锡;烙铁头长期使用会使其头部表面氧化,俗称烧死,此时可先用锐器清除氧化层,然后重新上锡。

在使用中应保持烙铁头的清洁,尽量缩短电烙铁的通电时间,烙铁头的温度通常可通过改变烙铁头伸出的长度进行调节。

2) 焊料与焊剂

最常用的焊料是松香焊锡丝,又称为焊锡丝,其在管状焊料的内部灌满松香焊剂。最常用的焊剂是松香或松香酒精溶剂,松香是无腐蚀的中性物质,加热后可清除金属表面的氧化物,提高焊接质量。焊锡膏也是一种常用的助焊剂,由于其为酸性物质,用于去掉电子元器件引脚上的氧化层,使其便于上锡、焊接,但会腐蚀元器件。一般情况下,新的电子元器件引脚均有镀银层,引脚比较光亮,不需要使用助焊剂,可以直接进行焊接。

3) 焊接操作

焊剂加热后所挥发的物质可能对人体有害,焊接时焊点与口鼻的距离应大于 30cm。

电烙铁的手持方法,可根据电烙铁功率、焊接物的热容量及焊接物位置确定。对于电子电路一般采用类似于握笔的姿势,这样可做到拿得稳对得准。

在焊接前,要对焊接部位和元器件进行清洁处理。焊接后,清洁焊点、鉴别焊接质量,并检查是否虚焊、错焊与漏焊。

4) 焊接步骤

掌握好电烙铁的温度和焊接时间,选择恰当的烙铁头和焊点接触位置。焊接过程可分 5 个步骤。

(1) 准备施焊:左手拿焊丝,右手握电烙铁,进入备焊状态。

(2) 加热焊件:用电烙铁头部加热焊件连接处,尽量扩大焊件的加热面,以缩短加热时间,保护铜箔不被烫坏。

(3) 送入焊丝:焊件加热到一定温度后,焊丝从电烙铁对面接触焊件,使焊丝熔化并浸湿焊点。注意不要把焊丝送到烙铁头上。

(4) 移开焊丝:焊点浸湿后,及时撤离焊丝,以保证焊点不出现堆锡。

(5) 移开电烙铁。

为了能焊出高质量的焊点,焊接时还需注意:及时清除烙铁头上的残留物,随时保持烙铁头的洁净;及时清除元器件引脚表面的氧化层;在焊锡凝固前一定要保持焊件的静止,焊接后要检查元器件有无松动;焊接晶体管时,用镊子夹住引脚焊接可预防温度过高损坏晶体管;对特殊元器件焊接应按元器件焊接要求进行,如焊接 MOS 管时,要求电烙铁不带电焊接或电烙铁金属外壳加接地线。

5) 克服虚焊

虚焊会造成电子电路工作不稳定,造成虚焊的原因有元器件引脚表面氧化、焊接时焊锡丝未浸湿焊点等。

6) 拆焊操作

拆焊电路板上的元器件比焊接元器件困难,拆焊不当会损坏电路板焊盘与元器件。若引脚不多且每个引脚可相对活动,可用电烙铁直接进行拆焊;对引脚多的集成电路和贴片元器件通常采用专用工具进行拆焊,常用的有吸锡电烙铁、吸锡器、吸锡绳及排焊管等工具。

2. 贴片元件的手工焊接

手工焊接贴片元件的一般过程为施加焊膏、手工贴装、手工焊接、焊接检查等。

手工焊接静电敏感器件时,需要佩戴接地良好的防静电腕带,并在接地良好的防静电工作台上进行焊接。

焊装顺序为:先焊装小元件,后焊装大元件;先焊装低元件,后焊装高元件。

1) 用电烙铁焊接

若贴片元件引脚少,可采用电烙铁直接焊接,焊接前在电路板的焊盘上滴涂焊膏,将贴片元器件的焊端或引脚以不小于 $1/2$ 厚度浸入焊膏中,一般选用直径 $0.5\sim 0.8\text{mm}$ 的焊锡丝。然后用电烙铁蘸少量焊锡和松香进行焊接。

2) 用热风枪焊接

当贴片元件引脚多而密时,用电烙铁直接焊接就比较困难,此时一般采用热风枪焊接。热风枪焊接过程为置锡、点胶、贴片、焊接、清洗、检查等。

3) 贴片元件的手工拆焊

手工拆焊贴片元件一般采用热风枪或电烙铁。

热风枪拆焊:用热风枪吹元件引脚上的焊锡,使其熔化,然后用镊子取下元件。

电烙铁拆焊:用电烙铁加热贴片元件焊锡,熔化后用吸锡器或吸锡绳去掉焊锡,然后用镊子取下元件。

3. 焊接技术

1) 浸焊

浸焊是将插装好元器件的电路板放在熔化有焊锡的锡槽内,同时对印制电路板上所有焊点进行焊接。浸焊具有生产效率高、生产程序简单的特点。浸焊可分为手工浸焊和机器自动浸焊两种方式。

手工浸焊:将已插好元器件的印制电路板浸入锡槽进行焊点焊接。手工浸焊的过程为:锡槽加热→电路板前期处理→浸焊→冷却→检查。

机器自动浸焊:自动完成印制电路板上全部元器件的焊接。机器自动浸焊的过程为:待焊电路板涂焊剂→电路板烘干→电路板在锡槽中浸焊→用振动器振去多余的焊锡→切除多余引脚。

2) 波峰焊

波峰焊是将插装好元器件的电路板与熔融焊料的波峰相接触实现焊接。其具有焊接速度快、质量高、操作方便的优点,适用于大面积、大批量电路板的焊接,是电子产品进行焊接的主要方式,可用于贴片元件的焊接。

3) 回流焊

与波峰焊相比,回流焊在焊接过程中,元器件不直接浸渍在熔融的焊料中,所以元器件

受到的热冲击小；能在前道工序里控制焊料的施加量，减少了虚焊、桥接等焊接缺陷，所以焊接质量好，焊点一致性好，可靠性高。它广泛应用于贴片元件的焊接。

1.4.3 电子电路调试和故障的检查与排除

任何一台电子、电气设备组装完毕后，一般都要通过调试，才能达到规定的技术指标要求；另外，设备发生故障，需要维修。这些技术工作均离不开电子电路的调试工作。因此掌握电子电路调试技术十分重要。

调试包括测试和调整两部分。调试又可分为整机调试和电子电路调试。整机调试是对整机内可调元器件及与电气指标有关的机械传动部分等进行调整，同时对整机电气性能进行测试，使其性能参数达到规定值。调试过程中，应先进行电子电路调试，再进行整机调试。

1. 电子电路调试前的准备工作

1) 拟定调试方案

- (1) 根据测试电路的参数指标要求选定测试方法及步骤。
- (2) 根据测试电路的参数指标要求拟定测试所需的仪器仪表。
- (3) 根据调试步骤拟定必需的测量数据记录表格及其参照数据。
- (4) 测试条件与有关注意事项。
- (5) 调试安全操作规程。

2) 检查连线情况

实验电子电路安装完毕，不能急于通电。先要认真检查电路接线是否正确，包括错线，少线和多线。多线一般是因接线时看错引脚，这种情况在实验中经常发生，尤其在面包板上进行实验时更易发生。

接线检查通常采用以下两种方法：一种是按照电路图检查。把电路图中的连线按一定顺序在安装好的线路中逐一对应检查，这种方法较容易找出错线与少线。另一种是按照实际线路来对照电路原理图，把每一元件引脚连线去向一次查清，检查每个去处在电路图上是否存在，这种方法不但可查出错线和少线，还易查出多线。不论采用何种方法，一定要在电路图上将已查过的线做出标记，同时检查元器件引脚的使用端数是否与图样相符。

检查连线：最好用指针式万用表“ $\Omega \times 1$ ”挡或用数字万用表“ 蜂鸣 ”挡蜂鸣器测量，尽可能直接测元器件引脚，这样可发现引脚与连线接触不良的故障。注意“ $\Omega \times 1$ ”为大电流挡，不能用两表笔同时去碰接同一半导体器件的两引脚，以防过电流损坏半导体器件。

检查元器件：重点要查集成电路、三极管、二极管、电解电容等外引线与极性是否接错，以及外引线间是否短路，同时还须检查元器件焊接处是否可靠。这里需要指出，在焊接前，必须对元器件进行筛选，以免给调试带来麻烦。

检查电源：在通电前，还需用万用表检查电源输入端与地之间是否存短路，若有则须进一步检查其原因。在完成了以上各项检查并确认无误后，才可通电调试，此时还应注意电源的正、负极性不能接反。

3) 调试仪器仪表准备

调试前要做好调试用仪器仪表的选用准备工作。

- (1) 使用前检查仪器仪表是否调节方便、能否正常工作等。

(2) 量程和精度必须满足调试要求。

(3) 仪器仪表必须放置整齐，较大较重的放下部，较小较轻的放上部，经常用来监视信号的仪器仪表应放置在便于观察的位置上。

4) 注意调试安全措施

调试过程必须做到安全第一，确保人身和仪器设备的安全。调试时要采取以下安全措施。

(1) 仪器、设备的金属外壳都必须接地。一般设备的外壳可通过三芯插头与交流电网的地线连接。

(2) 不允许带电操作。如确需与带电部分接触，必须使用带有绝缘保护的工具进行操作。

(3) 注意强电的安全使用。

(4) 大容量滤波电容器、延时用电容器储有大量电荷，在调试或更换电路的元器件时，应先将其储存的电荷释放完毕后，再进行操作。

5) 调试工具准备

做好常用工具的准备工作。常用工具有剪刀、镊子、相应规格螺钉旋具等。

2. 电子电路的调试方法与步骤

电子电路调试包括测试与调整两个方面。测试是在安装后对电路的参数进行测量。调整是在测试的基础上，对电子电路参数进行修正，使之满足设计要求。

电子电路调试的方法有以下两种。

第一种是采用边安装边调试的方法。将复杂电子电路系统按功能分块进行安装和调试，在分块调试的基础上逐步扩大安装和调试的范围，最后完成整机调试。这种方法一般适用于新设计电路，以便及时发现问题并予解决。

第二种方法是整个电子电路安装完毕后，一次性调试。这种方法一般适用于定型产品和需要相互配合才能运行的产品。

电子电路包括模拟电路、数字电路和微机电路。一般不允许直接连接，因它们的输出电压大小和波形各异，且对输入信号的要求也各不相同，如盲目连接在一起，会造成不应有的故障，甚至损坏元器件。因而，一般情况下按设计指标先对各部分予以独立调试合格后，再加上接口电路进行整机电子电路联调。

以上是调试的基本原则，具体调试步骤如下。

1) 通电观察

在电路与电源连线检查无误后，方可接通电源。电源接通后，不要急于测量数据和观察结果，首先观察稳压电压源的指示是否正常，若电流过大或输出电压下降过大，说明电路有故障，应该立即切断电源，排除电路故障；电压源指示正常后，再观察电路有无异常现象，包括有无打火冒烟、是否闻到异常气味、手摸元器件、集成块是否发烫现象等。如发现异常，应立即切断电源，等排除故障后方可重新通电。然后测量各路总电源电压及各元器件引脚的工作电压，以保证各元器件正常工作。

2) 分块调试

分块调试是把电路按功能不同分成不同部分，把每部分看作一个模块进行调试，在分块调试进行过程中逐渐扩大范围，最后实现整机调试。

分块调试顺序一般按信号流向进行,这样可把前面调试过的输出信号作为后一级的输入信号,为最后联调创造有利条件。

分块调试包括静态调试和动态调试。一般应先进行静态调试,后进行动态调试。

(1) 静态调试是指无外加信号的条件下测试电路各点的静态电位并加以调整,达到设计值。静态调试的目的是保证电路在动态情况下正常工作,并达到设计指标。通过静态测试可及时发现已损坏和处于临界状态的元器件。

(2) 动态调试是在静态调试的基础上进行的,利用自身的信号或在输入端加入合适的测试信号,按信号的流向,逐级顺序检测检查功能块各测试点的输出信号,判断其各种动态指标是否满足设计要求(包括电压信号幅值、波形形状、频率、相位关系、放大倍数等),若发现不正常现象,应分析其原因,并排除故障,再进行调试,直到满足要求。

3) 整机联调

在分块调试的过程中,因是逐步扩大调试范围的,实际上已完成某些局部电路间的联调工作。在联调前,先要做好各功能之间接口电路的调试工作,再把全部电路连通,进行整机联调。

整机联调就是检测整机动态指标,把各种测量仪器测量出的参数指标与设计指标逐一核对。若不一致,找出问题,然后进一步修改、调整电路的参数,直至完全符合设计要求为止。

调试过程中,要始终借助仪器仪表观察,而不能凭感觉和印象。使用示波器时,最好把示波器信号输入方式置于“DC”挡,它是直流耦合方式。可同时观察被测信号的交直流成分。被测信号的频率应在示波器能稳定显示的范围内,如频率太低,观察不到稳定波形时,应改变电路参数后再测量。例如,观察只有几赫兹的信号时,通过改变电路参数,使频率提高到几百赫兹以上,就能在示波器观察到稳定信号并可记录各点的波形形状及相互间的相位关系,测量完毕,再恢复到原来参数继续测试其他指标。采取抗干扰措施是调试技术重要内容,即在电子产品试制过程和维修调试过程中,如有干扰存在,影响正常工作,需采用抗干扰措施,在调试中予以解决。详细内容参阅有关文献。

4) 整机性能指标测试

对整机装配调试质量进一步检查后,进行全部性能指标参数的测试,测试结果均应达到技术指标的要求。经过调试达标后,最后紧固调整元件。

5) 环境试验

有些电子设备在调试完成后,需要进行环境试验,以检查相应环境下的正常工作能力。环境实验有温度、湿度、气压、振动、冲击等试验。

6) 整机通电老化

大多数电子仪器设备在测试完成之后,均进行整机通电老化试验,这可提前暴露产品隐含的缺陷,提高电子仪器设备可靠性。

7) 参数复调

经整机通电老化后,产品的各项技术性能指标会有一定程度的变化,通常应进行参数复调,使出厂的产品具有最佳的技术状态。

8) 调试注意事项

在电子电路调试过程中应注意如下问题。

(1) 调试前, 应仔细阅读调试工艺文件, 熟悉整机工作原理、技术条件及性能指标。

(2) 调试用仪器设备, 一定要符合技术监督局规定, 定期送检。要注意测量仪器的输入阻抗必须远大于被测电路输入阻抗。测量仪器带宽应等于或大于被测电路带宽的 3 倍。调试前要熟悉各种仪器的使用方法, 并加以检查, 避免使用不当。

(3) 测量中所有仪器的地线应与被测电路地线连在一起, 使之建立一个公共参考点, 测量结果才能正确。

(4) 调试过程中, 发现器件或接线有问题, 需要更换修改时, 应先关断电源。更换完毕, 经认真检查后, 才可重新通电。

(5) 在信号比较弱的输入端, 尽可能使用屏蔽线连接。屏蔽线的外屏蔽层要接到公共地线上。在频率较高时要设法隔离(消除)连接线分布参数的影响。例如, 用示波器测量时应使用有探头的测量线, 以减小分布电容的影响。

(6) 要正确选择测量点, 用同一台测量仪器进行测量时, 测量点不同, 仪器内阻引起的误差大小将不同。

(7) 测量方法要方便可行。如在印制电路板(PCB)中测电流, 一般尽可能用测电阻两端电压而换算成电流, 若用电流表测电流很不方便。

(8) 调试过程中, 不但要认真观察和测量, 还要认真记录。记录观察的现象、测量的数据、波形及相位关系等, 必要时在记录中附加说明, 尤其是那些和设计不符的现象, 更是记录的重点。依据记录数据把实际观察现象和理论预计结果加以定量比较, 从中发现设计和安装上的问题, 加以改进, 进一步完善设计方案。

(9) 调试过程中自始至终要有严谨细致的科学作风, 不能存在侥幸心理。出现故障时认真查找故障原因, 仔细分析。在实践中, 切忌一遇故障、问题就拆掉线路重新安装。因重新安装线路仍可能存在问题, 原理上的问题不是重新安装就能解决的。

3. 电子电路故障排除

在电子电路的设计、安装与调试过程中, 不可避免地会出现各种各样的故障, 所以检查和排除故障是电子工程师必备的实践技能。面对一个整机电路, 要从大量的元器件和线路中迅速、准确地找出故障, 这确实不太容易, 而且故障又是五花八门, 这就需要掌握正确的方法。一般来说, 故障诊断过程是: 从故障现象出发, 通过反复测试, 作出分析判断, 逐步找出故障原因。下面在具体讨论排除故障方法之前, 不防先了解一些常见故障。

1) 常见故障

(1) 测试仪器仪表本身就有故障, 功能不灵或测试棒损坏使之无法测试; 还有可能操作者对仪器使用不正确引起故障, 如示波器旋钮选择不对, 造成波形异常。

(2) 电路元器件本身原因引起的故障。例如, 电阻、电容、晶体管及集成器件等特性不良或损坏。这种原因引起的故障现象是电路有输入而无输出或输出异常。

(3) 人为引起故障。例如, 操作者将连线接错或漏接、无接, 元器件参数选错, 三极管管型搞错, 二极管或电解电容极性接反等, 都可能导致电路不能正常工作。

(4) 电路接触不良引起的故障。例如, 焊接虚焊、插接点接触不牢靠、电位器滑动端接触不良、接地不良、引线断线等。这些原因引起的故障一般是间歇或瞬时, 或者突然停止工作。

(5) 各种干扰引起的故障。所谓干扰, 是指外界因素对电路有信号产生的扰动。

2) 电子电路干扰

干扰源种类很多, 常见的有以下几种。

(1) 接地处不当引进的干扰。例如, 接地线的电阻太大, 电路和各部分电流以流过接地线会产生一个干扰信号, 影响电路的正常工作。减少该干扰的有效措施是降低地线电阻, 一般采用比较粗的铜线。

(2) “共地”是抑制噪声和防止干扰的重要手段。所谓“共地”, 是将电路中所有接地的元器件都要接在电源的电位参考点上。在正极性单电源供电电路中, 电源的负极是电位参考点; 在负极性单电源供电电路中, 电源的正极是电位参考点; 而在正负双电源供电电路中, 两个电源的正负极串接点作为电位参考点。

(3) 直流电源滤波不佳引入的干扰。各种电子设备一般都是用 50Hz 电压经过整流、滤波及稳压得到直流电压源。可是此直流电压包含频率为 50Hz 或 100Hz 的纹波电压, 如果纹波电压幅度过大, 必然会给电路引入干扰。这种干扰是有规律性的, 要减少这种干扰, 必须采用纹波电压幅值小的稳压电源或引入滤波网络。

(4) 感应干扰。干扰源通过分布电容耦合到电路, 形成电场耦合干扰; 干扰源通过电感耦合到电路, 形成磁场耦合, 形成磁场耦合干扰。这些干扰均属于感应干扰。它将导致电子电路产生寄生振荡。排除和避免这类干扰的方法有: 采用屏蔽措施, 屏蔽壳要接地; 引入补偿网络, 抑制由干扰引起的寄生振荡, 具体做法是在电路的适当位置接入单一电容或电阻与电容相串联网路, 实际参数大小可通过实验调试来确定。

3) 检查排除故障的基本方法

(1) 直接观察法: 指不使用任何仪器, 而只利用人的视觉、听觉、嗅觉以及直接碰摸元器件来发现问题, 寻找和分析故障。直接观察又包括通电前检查和通电观察两个方面。

通电前主要检查仪器的选用和使用是否正确; 电源电压的数值和极性是否符合要求; 三极管、二极管和引脚以及集成电路的引脚有无错接; 电解电容的极性是否接反; 元器件间有没有互碰短路; 布线是否合理; 印刷板有无断线等。

通电后主要观察直流稳压电源上提电流指示值有否超出电路额定值; 元器件有无发烫、冒烟; 变压器有无焦味等。此法比较简单, 也比较有效, 可作为电路初步检查。

(2) 参数测试法: 借助仪器发现问题, 并应用理论知识找出故障。例如, 利用万用表检查电路的静态工作点就是测试法的运用。当发现测量值与设计值相差悬殊时, 就可针对问题进行分析, 直至解决。

(3) 信号跟踪法: 在被调试电路的输入端接入适当幅度与频率的信号(如在模拟电路中常用 $f=1\text{kHz}$ 的正弦波信号), 利用示波器, 并按信号的流向, 由前级到后级逐级观察电压波形及幅值的变化情况, 如哪一级异常, 则故障就在该级, 然后即可有的放矢地作进一步检查。这种方法对各种电路普遍适用。在动态调试中应用更为广泛。

(4) 对比法：怀疑某一电路存在问题时，可将此电路的参数与工作状态和相同的正常电路进行对比，从中分析故障原因判断故障点。

(5) 部件替换法：就是利用与故障电路同类型的电路部件、元器件或插件板来替换故障电路中怀疑部分，从而可缩小故障范围，以便快速、准确地找出故障点。

(6) 断路法：用于检查短路故障最有效。也是一种逐步缩小故障范围的方法。

在一般情况下，寻找故障的常规做法是：首先采用直接观察法，排除明显的故障；进而采用万能用表（或示波器）检查静态工作点；最后可用信号跟踪法对电路作动态检查。

电子工业出版社版权所有
盗版必究