

高等教育“十二五”规划教材

# 高频/通信电子线路 实验指导

耿照新 编著



北京交通大学出版社  
<http://www.bjtu.cn>

高等教育“十二五”规划教材

# 高频/通信电子线路实验指导

耿照新 编著

北京交通大学出版社

• 北京 •

## 内 容 简 介

本书是电子与通信技术专业的一门实验课程教材,分成三个部分,介绍了高频/通信电子线路实验基础知识、高频实验内容和高频实验仪器的使用说明。每一个实验内容都系统介绍其实验原理、方法和步骤。

本书涵盖验证实验和开发性实验,主要实验内容包括:高频小信号放大器、高频功率放大器、正弦振荡器、中频放大器、调幅、检波与混频、角度调制与解调、反馈控制电路、锁相环路与频率合成器、脉冲计数式鉴频器、调幅发射与接收完整系统的联调、调频发射与接收完整系统的联调以及高频电路故障分析实验等,一共有16个实验。本书强调基本概念,注重实际应用,各个实验后附有相应的思考问题。

本书可以作为高等学校电子信息工程、通信工程等专业本科生实验教学用教材或参考书,也可以供相关专业工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

高频/通信电子线路实验指导 / 耿照新编著. — 北京: 北京交通大学出版社, 2015.5  
(高等教育“十二五”规划教材)

ISBN 978-7-5121-2231-4

I. ① 高… II. ① 耿… III. ① 高频-电子电路-实验-高等学校-教学参考资料 ② 通信系统-电子电路-实验-高等学校-教学参考资料 IV. ① TN710.2-33 ② TN91-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 064982 号

责任编辑: 吴嫦娥 特邀编辑: 李晓敏

出版发行: 北京交通大学出版社

电话: 010-51686414

北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编: 100044

印刷者: 北京时代华都印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印张: 10.25 字数: 256 千字

版 次: 2015 年 4 月第 1 版 2015 年 4 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5121-2231-4/TN·98

印 数: 1~1 000 册 定价: 36.00 元

---

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

# 前 言

实验是研究自然科学的一种重要方法，也是高等院校教学过程中一个极其重要的环节，实验教学的主要目的是通过实验来训练和培养学生理论联系实际和独立操作的能力。杰出的科学家门捷列夫说过：“没有测量，就没有科学。”电子信息科学是现代科学技术的象征，它的三大技术支柱是：信息获取技术（测量技术）、信息传输技术（通信技术）、信息处理技术（计算机技术），三者中信息获取是首要的，而电子测量是获取信息的重要手段。

“高频/通信电子线路实验指导”是与高等院校电子和通信类专业的“高频电子线路”课程相配套的实训系统。该实训系统通过对各种高频电路模块和收发系统的测量，培养学生具有高频电路和电子测量技术的基础知识和应用能力，加深学生对理论知识的理解，同时能够训练学生掌握正确的电子测量方法，全面掌握各种通用电子测量仪器的正确使用和操作。具体教学目标如下。

- 巩固和补充课堂讲授的高频电路和电子测量技术的理论知识，对于某些理论课程，可以结合实际在实验课中进行。
- 培养学生理解利用电子测量理论来分析实验中遇到问题的方法，更好地理论联系实际。
- 培养学生电子科学实验的基本技能和严谨的工作作风，为今后从事通信技术工作打下良好的专业基础。
- 培养学生具备电子测量实验电路的分析和计算的能力。
- 培养学生掌握常用电子测量仪器的工作原理、主要技术指标及正确的操作方法。
- 培养学生掌握高频电子线路测试技术及各种元器件参数的测试技能。
- 培养学生正确分析实验现象，检查与排除故障，正确记录和处理数据，总结实验结果，同时具备比较完善地编写实验报告的基本能力。

《高频/通信电子线路实验指导》是与实验箱配套的实验指导书。为了保证实验课程能够达到预期的教学效果，要求学生在每次做实验前必须仔细阅读实验指导书及相关资料，明确实验目的和要求，掌握实验的原理和测量方法。在实验过程中，每个学生要完成流程管理、实际操作、数据记录、质量检验等，使其能全面了解和得到实验训练的机会，提高独立动手的能力，以达到培养综合应用知识实践的能力和实事求是的科学作风。

编 者

2015年3月20日

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一部分 高频实验基础 .....            | 1  |
| 第二部分 实验 .....                | 11 |
| 实验 1 高频小信号单调谐与双调谐放大器 .....   | 11 |
| 1.1 概述 .....                 | 11 |
| 1.2 小信号调谐放大器的工作原理 .....      | 11 |
| 1.3 小信号调谐放大器的性能指标及测量方法 ..... | 14 |
| 1.4 实验参考电路 .....             | 16 |
| 1.5 实验目的 .....               | 17 |
| 1.6 实验内容与实验电路 .....          | 18 |
| 1.7 实验步骤 .....               | 19 |
| 1.8 实验报告 .....               | 22 |
| 1.9 知识要点与思考题 .....           | 22 |
| 实验 2 高频谐振功率放大器 .....         | 24 |
| 2.1 概述 .....                 | 24 |
| 2.2 基本原理 .....               | 24 |
| 2.3 主要技术指标及测试方法 .....        | 32 |
| 2.4 高频功率放大器的实验电路 .....       | 33 |
| 2.5 实验目的 .....               | 34 |
| 2.6 实验内容 .....               | 34 |
| 2.7 实验仪器 .....               | 34 |
| 2.8 实验步骤 .....               | 35 |
| 2.9 实验报告 .....               | 37 |
| 2.10 知识要点与思考题 .....          | 37 |
| 实验 3 正弦振荡器 .....             | 39 |
| 3.1 概述 .....                 | 39 |
| 3.2 正弦振荡器的工作原理 .....         | 39 |
| 3.3 正弦波振荡器的实验电路 .....        | 45 |
| 3.4 实验目的 .....               | 46 |
| 3.5 实验内容 .....               | 46 |
| 3.6 实验仪器 .....               | 47 |
| 3.7 实验步骤 .....               | 47 |
| 3.8 实验报告 .....               | 48 |

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 3.9 知识要点与思考题 .....        | 49 |
| 实验4 中频放大器 .....           | 50 |
| 4.1 中频放大器的基本工作原理 .....    | 50 |
| 4.2 中频放大器的实验电路 .....      | 50 |
| 4.3 实验目的 .....            | 51 |
| 4.4 实验内容 .....            | 51 |
| 4.5 实验器材 .....            | 51 |
| 4.6 实验步骤 .....            | 51 |
| 4.7 实验报告 .....            | 52 |
| 4.8 宽带中频放大电路设计(扩展篇) ..... | 52 |
| 实验5 振幅调制 .....            | 59 |
| 5.1 概述 .....              | 59 |
| 5.2 振荡调制的基本工作原理 .....     | 59 |
| 5.3 振幅调制的实验电路 .....       | 66 |
| 5.4 实验目的 .....            | 67 |
| 5.5 实验内容 .....            | 67 |
| 5.6 实验器材 .....            | 67 |
| 5.7 实验步骤 .....            | 68 |
| 5.8 实验报告 .....            | 71 |
| 5.9 知识要点与思考题 .....        | 71 |
| 实验6 振幅解调器 .....           | 73 |
| 6.1 振幅解调的基本工作原理 .....     | 73 |
| 6.2 振幅解调的实验电路 .....       | 76 |
| 6.3 实验目的 .....            | 77 |
| 6.4 实验内容 .....            | 77 |
| 6.5 实验步骤 .....            | 78 |
| 6.6 实验报告 .....            | 81 |
| 6.7 知识要点与思考题 .....        | 81 |
| 实验7 混频器 .....             | 82 |
| 7.1 概述 .....              | 82 |
| 7.2 三极管混频器的基本工作原理 .....   | 82 |
| 7.3 混频干扰及其抑制方法 .....      | 83 |
| 7.4 混频器的实验电路 .....        | 83 |
| 7.5 实验目的 .....            | 85 |
| 7.6 实验内容 .....            | 85 |
| 7.7 实验步骤 .....            | 85 |
| 7.8 实验报告 .....            | 86 |
| 7.9 知识要点与思考题 .....        | 86 |
| 实验8 频率调制 .....            | 87 |

|       |                 |     |
|-------|-----------------|-----|
| 8.1   | 频率调制的工作原理       | 87  |
| 8.2   | 频率调制的实验电路       | 92  |
| 8.3   | 实验目的            | 93  |
| 8.4   | 实验内容            | 93  |
| 8.5   | 实验步骤            | 93  |
| 8.6   | 实验报告            | 94  |
| 8.7   | 知识要点与思考题        | 94  |
| 实验 9  | 调频波的解调          | 96  |
| 9.1   | 调频波解调的工作原理      | 96  |
| 9.2   | 调频波解调的实验电路      | 97  |
| 9.3   | 实验目的            | 98  |
| 9.4   | 实验内容            | 98  |
| 9.5   | 实验步骤            | 98  |
| 9.6   | 实验报告            | 99  |
| 9.7   | 知识要点与思考题        | 99  |
| 实验 10 | 锁相环路与频率合成器      | 101 |
| 10.1  | 概述              | 101 |
| 10.2  | 锁相环的构成及工作原理     | 101 |
| 10.3  | 频率合成器           | 102 |
| 10.4  | 锁相环路与频率合成器的实验电路 | 103 |
| 10.5  | 实验目的            | 105 |
| 10.6  | 实验内容            | 105 |
| 10.7  | 实验步骤            | 106 |
| 10.8  | 实验报告            | 107 |
| 10.9  | 知识要点与思考题        | 107 |
| 实验 11 | 脉冲计数式鉴频器        | 109 |
| 11.1  | 脉冲计数式鉴频器的基本原理   | 109 |
| 11.2  | 脉冲计数式鉴频器的实验电路   | 110 |
| 11.3  | 实验目的            | 110 |
| 11.4  | 实验步骤            | 110 |
| 11.5  | 实验报告            | 111 |
| 实验 12 | 自动增益控制          | 112 |
| 12.1  | 自动增益控制基本原理      | 112 |
| 12.2  | 实验内容            | 113 |
| 12.3  | 实验步骤            | 113 |
| 12.4  | 实验报告            | 113 |
| 12.5  | 知识要点与思考题        | 114 |
| 实验 13 | 调幅发射与接收完整系统的联调  | 115 |
| 13.1  | 无线电通信概述         | 115 |

|       |                                   |     |
|-------|-----------------------------------|-----|
| 13.2  | 调幅发送部分联试实验                        | 117 |
| 13.3  | 调幅接收部分联试实验                        | 118 |
| 13.4  | 调幅发射与接收完整系统的联调                    | 119 |
| 13.5  | 实验报告                              | 120 |
| 实验 14 | 调频发射与接收完整系统的联调                    | 121 |
| 14.1  | 实验目的                              | 121 |
| 14.2  | 实验内容                              | 121 |
| 14.3  | 实验电路原理                            | 121 |
| 14.4  | 实验步骤                              | 122 |
| 14.5  | 实验报告                              | 122 |
| 实验 15 | 高频电路开发实验                          | 123 |
| 15.1  | 实验目的                              | 123 |
| 15.2  | 实验仪器和器材                           | 123 |
| 15.3  | 实验内容                              | 123 |
| 实验 16 | 高频电路故障诊断实验                        | 128 |
| 16.1  | 实验目的                              | 128 |
| 16.2  | 调幅收信系统的组成和基本原理                    | 128 |
| 16.3  | 无线通信系统的组成                         | 128 |
| 16.4  | 调幅收信系统各单元电路的基本原理、故障点的设置、故障现象及测试方法 | 129 |
| 16.5  | 高频电路故障诊断实验箱的故障设置及故障清除             | 133 |
| 16.6  | 高频电路故障诊断模块故障对应关系说明                | 139 |
| 16.7  | 高频电路故障诊断实验箱使用注意事项                 | 139 |
| 附录 A  | 实验仪器使用说明                          | 140 |
| 参考文献  |                                   | 154 |

# 第一部分 → → →

## 高频实验基础

### 1. 高频电路实验与测量概述

高频电路是通信与信息工程主干课程中的专业基础课。“高频”电路与“低频”电路之间很难划一个非常明确的界线。习惯上有两种划分方法：一种划分方法是以电路的工作频率划分，将工作频率低于音频（20 kHz）的电路划为低频电路，而将工作频率高于音频（20 kHz）的电路划为高频电路；另一种划分方法是按器件的内部电抗分量在电路中所产生的影响的大小来区分。当器件内部等效电抗对电路的工作特性不产生显著影响时划分为低频电路，否则划分为高频电路。本实验指导书中采用后者的划分法。

高频是一个相对量，它介于低频（20 Hz~300 kHz）和超高频（300 MHz 以上）之间，本实验教材的内容仅限于工作频率小于 300 MHz 而高于 300 kHz。

众所周知，在超高频段，电路元件中分布参数的作用开始突现，涉入微波频段后分布参数成了主导因素，而我们所讨论的高频电路组成，基本上采用集中参数元件，也就是由晶体二极管和三极管或集成电路与集中参数的电阻  $R$ 、电容  $C$ 、电感  $L$  所组成。又因为高频电路的工作频率较低频电路的工作频率高，元件的分布参数不能不考虑，所以其分析及测量均较低频电路要复杂一些。但是正因为与低频电路一样，高频电路采用集中参数元件组成，所以其分析测量的原理与低频电路十分相似。就分析方法而言，它们都是基于正弦分析原理，即研究在正弦激励源激励下电路的响应情况；其实验与测量也是在正弦信号激励下测量电路的幅度、相位及频率变换的情况。所以，模拟电子技术中所讨论的方法及原则都适用于高频电路。但因高频电路的频率较高，波长较短，所以也有它自身的特殊点，下面将分别介绍这几个方面，目的在于让同学们更多地了解一些高频条件下测量的知识，减小实验及测量数据的误差，提高分析问题的准确性。

### 2. 使用高频电子仪器的一般注意事项

高频电子仪器的类型很多，各有其使用特点。但下面的注意事项是普遍适用的，掌握这些知识，有助于减少测量中的误差，防止损坏仪器或被测电路。

（1）高频电子仪器的结构一般较为复杂，精密度和灵敏度较高而且功能也较多，在使用前一定要了解仪器的性能和使用条件。在实验室，在可能的条件下可先阅读有关仪器的技术说明书或有关仪器使用方法的说明资料。如在使用中发现有异常现象，应及时报告教师或实验室管理人员，并切断电源。

(2) 若需对实验数据进行高精度定量分析, 则应了解所用仪器的精度及是否有周期检定后的修正值, 如修正曲线、公式、数表等。若无周期性检定, 该仪器只能用作低精度的粗略测量。

(3) 在接通仪器电源前, 应先检查仪器的量程、功能、频段、衰减、增益、时基、极性、等旋钮及开关, 是否有松动、滑位、错位等现象, 并及时修复; 对于仪器上各功能旋钮及开关的置位, 应根据被测电路的要求来决定; 当对被测电路和要求不太清楚时, 一般情况下应将仪器的“增益”“输出”“灵敏度”“调制”等旋钮置于最低位置, 而将“衰减”“量程”等旋钮置于最高位, 测量中逐步降低测量挡位; 还要注意被测电路是否有直流高压, 以及该直流高压是否超出了仪器的耐压能力, 同时注意被测电路的直流成分是否会影响某些仪器的测量结果。因此, 在选择和使用仪器时要特别小心, 必要时可在仪器的输出端或输入端加接耐压及容量适当的隔直耦合电容器。

(4) 仪器接通电路前, 应仔细检查被测电路的连接线是否正确, 有无接错或短路现象。特别是地线的连接是否合理, 这对高频电路来说是相当重要的。尽管接有地线, 但接地点选择不当, 走线不合理都会造成测量数据的极大误差。测量数据时, 要先接地线, 然后再接高电位端, 而测量结束时, 应先去掉高电位端, 然后再去掉地线, 否则会造成常见的“打表”现象, 损坏仪器或降低仪器的精度。

(5) 高频电子仪器一般都必须经过足够的预热时间, 工作性能才能稳定。而仪器的技术指标需要在足够的预热时间后才有保证, 比如, 一般晶体管仪器就需 5~15 分钟的预热时间。高精度的仪器预热时间要更长些。通常, 在实验前有 10~30 分钟的预热, 测量结果就能满足精度的需要。

(6) 不少电子测量仪器在使用前均需调零处理。调零分机械调零和电气调零两种。调零应保证在无任何信号输入时进行(包括被测信号和外界干扰), 机械调零是指调整电表在开机前的指示零点, 而电气调零是在开机并充分预热后进行。应特别指出的是, 某些测量仪器有不同功能及量程, 所以改换功能或量程后还需进行调零。

(7) 若开机后发生保险丝熔断现象, 首先应检查电源电压和外部接线是否有误, 在排除故障后再换上相同容量的保险丝重新通电。切忌随意加大保险丝容量! 对于内部装有电风扇做强制通风冷却的仪器, 通电后应注意电风扇工作是否正常, 否则会损坏仪器。

(8) 有不少测量仪器内部都附有校准装置。利用内设的校准装置可以消除仪器因元器件老化或参数变化等因素造成的系统误差, 提高测量数据的精度。通过自校也可判断仪器各部分是否工作正常。所以, 凡有自校功能的仪器在开机充分预热之后, 都应先进行自校, 再投入使用。

(9) 有些高频测量仪器的附件, 如探头等, 其上面标有与主机序号相同的编号, 这是为方便与主机配套使用而专门设置的, 出厂时由厂家进行过严格配对调试。探头上的编号必须与主机的序号相符, 才能保证测量的精确度。严格来说, 在超高频条件下此类同型号的仪器之间的探头一般是不能互换或随便使用的。这只是高频条件下电子器件自身的分布参数的分散性及其影响在工程应用中的一个实例。

总而言之, 通过高频电路的实验, 我们一定要初步建立起有关分布参数的重要概念, 这在今后的工程实践中是十分有用的。

最后, 从安全角度出发, 作为一种职业习惯, 实验中应注意养成左单手操作的习惯。尤

其接触高压电路时更应注意，最好事先选择并接好参考点，然后用左单手去操作，避免通过人体形成回路而造成对人身伤害。实验中若出现放电打火、元器件冒烟或电解电容器爆炸（电源接反后发生）或其他意外事故时，应保持冷静，马上切断电源，然后再做检查和妥善处理。

### 3. 实验装置的组成

进行电路参数的测试时，往往需要用多台不同功能的测量仪器及辅助设备、附件等组成一套完整的测量装置。

一项实验究竟由哪些型号的仪器及设备来组成测量装置，这要根据实验任务的要求并结合实验室具体条件来决定。首先，要根据实验任务考虑被测对象的工作频率、电源供给要求、输入激励信号幅度及测量精度要求等来拟定由哪些仪器组成实验装置，即确定方案；其次，为了保证仪器的正常工作和一定的精度，应考虑如何布置和连接仪器设备。在现场布置和连线方面要注意：各仪器的布置应保证读取数据时视差小，眼睛不易疲劳，有利于观测和减小读测误差；应根据不同仪器面板上可调旋钮的分布情况来安排布局位置，使操作顺手，调节方便。

仪器放置要注意安全稳妥；注意不要造成短路；注意功率大、发热多的仪器的散热及对周围仪器的影响；仪器与被测网络之间，以及仪器与仪器之间的接线要尽可能短，避免信号输入与输出线靠近，而引起信号的串扰或产生自激现象。

实验装置一般是为了完成某种电子测量，而任何电子测量过程都是将某种被测信号经过一系列的变换、比较、调整及信息处理，最后得到与被测量有唯一确定关系的测量结果。而为了得到这种“唯一确定关系”，除了要求测量仪器本身稳定可靠外，还必须满足两个基本条件：一是测量结果仅仅反映被测量的大小；二是被测量不能经过任何非正常的通道去影响测量结果。

对于一般技术指标合格并在规定条件下使用的测量仪器，可以不考虑由仪器内部产生的噪声的影响。但对于来自设备及系统外部的无关信号干扰，却不能不考虑。通常干扰对测量过程的影响表现为仪器读数显著偏大或偏小、读数不稳、随机跳动，严重时甚至使仪器不能正常工作，以致损坏仪器。干扰的来源一般可以分为有源干扰及无源干扰两大类。

有源干扰主要包括以下几个方面。

- (1) 电气设备中电流的急剧变化及伴随的电火花，如交流接触器，电钻、电焊机、电梯、继电器及汽车、摩托车、轮船等内燃机的点火系统。
- (2) 高频电气设备的电磁辐射干扰，如高频感应炉、高频（微波）治疗仪、短波无线电台及电视台等。
- (3) 天电干扰，如天体的剧烈变化、太阳黑子的磁爆、天空的雷电等。
- (4) 工频干扰，是指由于 50 Hz 交流电网强大的电磁场所产生的干扰。
- (5) 气体电离干扰，主要来源于各种离子器件（如闸流管、充气稳压管、氖管等）及照明的日光灯、霓虹灯所产生的电离干扰。

无源干扰主要是指自然的大气电离程度的有规律变化及无规律随机起伏。干扰对实验装置影响的途径可分为寄生耦合及电磁辐射两大类。

- (1) 寄生耦合。

① 公共阻抗耦合——地电阻及电源内阻。

实验装置要求各仪器与实验底板间有公共参考点——接地点。由于接地点设置不当或接地点虚焊、氧化而形成一定的公共阻抗，如图 I-1 所示。

图 I-1 中， $R_g$  为接地电阻，其值取决于地线的电阻率、地线连接方式及工作频率等。当  $R_g$  阻值不可忽略时，一方面前级耦合至后级的信号要减少，另一方面由于外电磁干扰，如强大的 50 Hz 工频干扰，将在  $R_g$  上产生一个明显的干扰电动势，造成测量结果的误差。

当几个电路单元或实验底板共用一组直流电源时，如果直流电源内阻不够低，就会通过该内阻形成耦合，如图 I-2 所示， $R_s$  的存在可能造成实验装置系统的自激振荡或者信号串扰等。

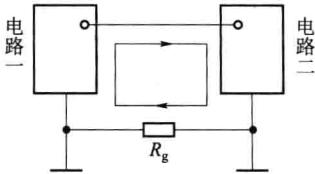


图 I-1 由接地电阻形成的耦合

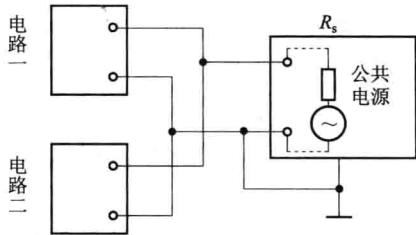


图 I-2 由电源内阻形成的耦合

② 分布电容耦合。

在实验装置中，仪器、实验底板、元器件、接线、大地、人体之间都存在极为复杂的分布电容。尤其是当系统工作在高频段时，这些分布电容的影响便不能忽略，它往往形成有害的第三回路。严重时，将影响系统的正常工作，造成测量结果的极大误差。常见的分布电容的影响如图 I-3 所示。

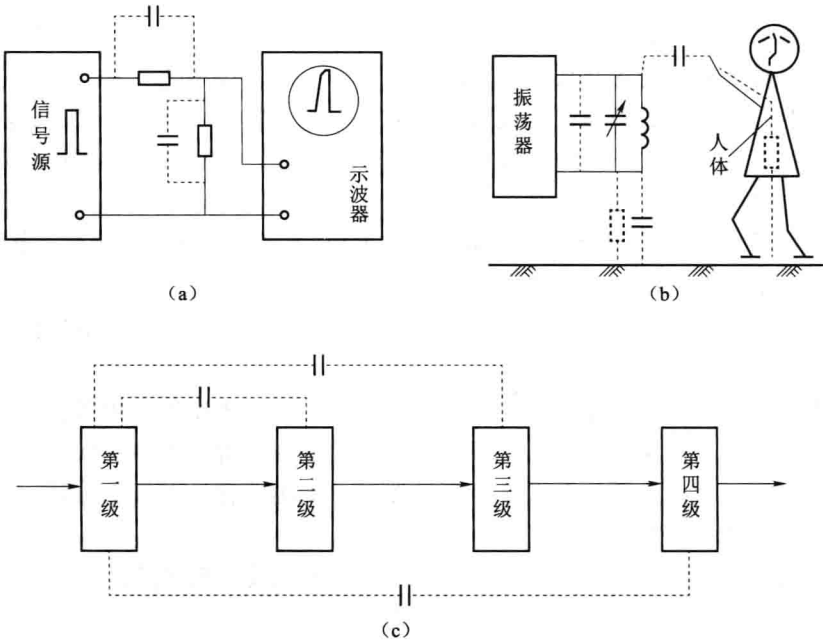


图 I-3 分布电容的影响

图 I-3 (a) 为分布电容的影响, 被观测到的波形产生了失真; 图 I-3 (b) 为人体靠近电路时分布电容的影响与远离时分布电容的影响, 造成了振荡频率的漂移; 图 I-3 (c) 中的多级放大级由于级间分布电容的影响, 容易造成放大器的自激。为了便于估计分布电容的影响程度, 给出几种典型的分布电容的实测数值, 见表 I-1。

表 I-1  几种典型分布电容的数值

| 类 别                            | 容 量            |
|--------------------------------|----------------|
| 编织隔离的直径 0.9 mm 的双绞导线           | 6.56 pF/100 mm |
| 高频隔离的直径 0.6 mm 的双绞导线           | 8.2 pF/100 mm  |
| 两根直径 1 mm, 相距 2 mm 的平行导线       | 2.0 pF/100 mm  |
| 两根直径 1 mm, 相距 10 mm 的平行导线      | 0.9 pF/100 mm  |
| 平行于机壳的直径 0.5 mm 导线与机壳间相距 1 mm  | 2.7 pF/100 mm  |
| 平行于机壳的直径 0.5 mm 导线与机壳间相距 10 mm | 1.4 pF/100 mm  |
| 1~2 W 碳质电阻的端到端                 | 1.5 pF         |
| 20 W 变压器初、次级间                  | 0.001 1μF      |
| 20 W 电烙铁芯与外壳                   | 40 pF          |
| 人站在绝缘体上对大地                     | 700 pF         |

③ 分布电感耦合。

一根导线在低频时可视为一根理想的导体, 但当工作频率提高时, 其分布电感的影响便不能忽略。图 I-4 是一根导线在高频工作时因分布电感及分布电容的影响不可忽略时的实际等效电路示意图。图中  $U_x$  为被测电压,  $U'_x$  为输入电压表的电压, 此两值的差异取决于分布参数的大小及工作频率的高低。由分析可知, 因为分布参数的影响而造成的测量误差量为  $(f/f_0)^2$ 。其中,  $f$  为工作频率;  $f_0$  为分布电感及电容所形成的固有频率。工作频率越高, 其误差越大; 分布参数越小,  $f_0$  越高, 误差越小。这里给出了几种导线的分布电感及在 100 MHz 时的感抗, 以及导线本身的电阻等值, 见表 I-2。

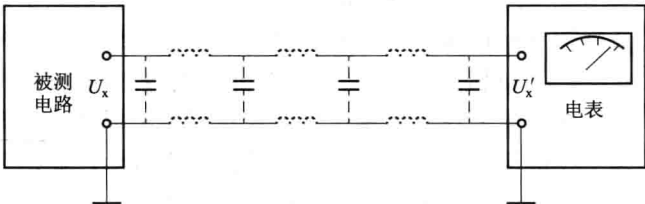


图 I-4  分布电感及电容的影响

表 I-2  几种导线的电阻、电感和感抗

| 导线直径<br>/mm | 50 mm     |          | 100 mm    |          | 200 mm    |          | 100 mm 导线电阻<br>/Ω |
|-------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-------------------|
|             | 电感<br>/μH | 感抗<br>/Ω | 电感<br>/μH | 感抗<br>/Ω | 电感<br>/μH | 感抗<br>/Ω |                   |
| 0.1         | 0.07      | 44       | 0.15      | 94       | 0.33      | 207      | 0.22              |
| 0.5         | 0.05      | 31       | 0.12      | 75       | 0.26      | 163      | 0.89              |
| 1.0         | 0.04      | 25       | 0.10      | 63       | 0.23      | 144      | 0.23              |
| 2.0         | 0.035     | 22       | 0.08      | 50       | 0.20      | 126      | 0.56              |

对于实验装置中的电感线圈、各类变压器、扼流圈,应特别注意阻止通过互感及电磁耦合形成非正常的信号传输通道。

## (2) 电磁辐射耦合。

电磁辐射耦合是当实验装置的工作频率较高时,如大于几百千赫以上时,信号传输线、控制线,输入、输出线等均会呈现出一定的天线效应,这种天线效应具有(发射和接收的)互易性。也就是说,通过这些导线不仅会将测试信号辐射至空中,构成一定强度的电磁场,形成一条非正常的信号传输通道,而且这些导线还会感应到其他非正常通道辐射出来的电磁波信号及各种干扰信号,从而造成测量误差。

由上述讨论可知,要完成一项实验任务,不仅要会正确选用仪器设备,而且要正确地连接和布置,避免干扰对实验测量的影响,如何才能减少干扰的影响呢?下面我们分别讨论。

## 4. 实验装置的接地与屏蔽

一般电子技术中的地或地线、地电位等有两种含义。第一种含义是指真正的大地,而且常常局限于所在实验室附近的大地。对于交流供电电网的地线,通常是指三相电力变压器的中线(又称零线),它是在发电厂接大地。第二种含义是指电子测量仪器、设备、实验底板等的公共连接点。它通常是与机壳直接连在一起或通过一个大电容(有时还并联一个大电阻)与机壳相连。所以,至少就交流意义而言,可以把一个测量装置中的公共连接点,即电路中的地线与仪器设备的机壳看做等效的。

对于接地的问题,在实验工作中要引起我们足够的重视。一般来说,由于仪器或设备的机壳面积较大,特别是因为绝大多数电子测量仪器都要使用电源变压器,因此,机壳与大地之间有一个较大的分布电容。接地包括为保证实验工作者人身安全的安全接地和为保证测量仪器正常工作的技术接地。

所谓安全接地,是指人体接触到实验装置中的仪器或设备的外壳时,不会因仪器设备的漏电造成触电,以防止伤害操作人员而设置的接地。我们知道绝大多数测量仪器都采用 220 V 单相交流电网供电。供电线路中,有一根中线已在发电厂用良导体接大地;另一根是相线(又称火线)。电网电压一般是加到电源变压器初级。变压器的铁芯及初级次级之间的屏蔽层均直接与机壳即电路的公共连接点相连接。变压器次级绕组的一端或中心抽头也与此点相连。于是在变压器的初、次级与机壳,机壳与大地间都存在分布电容。同时还存在阻值很大( $10\text{ M}\Omega$ 数量级)的绝缘电阻(或称漏电阻)。在正常情况下无论单相插头以什么方向插入电源插座中,人体接触仪器的外壳都不会触电。但如果仪器设备经常处于湿度较高的环境中使用或长期受潮、变压器质量低劣等,或者实验室未设置地线而多台仪器同时使用,则会出现机壳带电的现象。人体接触时会有触电感觉。一般可把单相电源插头换个方向插入电源插座中,即可削弱甚至消除漏电现象。

有条件的实验室应在地面上铺设绝缘材料的板料。另一个比较安全的办法是采用国家现行标准的三孔插头座,如图 I-5 所示。

三孔插座中间插孔应与本实验室的地线相接,左边插孔接 220 V 相线(火线),右边一个接电网的中线(零线)。插头的接线与插座相反,左是“中线”右是“相线”。

由于实验室地线与电网中线实际接地点不同,因此在此两点间存在一定的大地电阻  $R_g$ ,为此,不允许把中线与实验室地线相连。否则,中线电流就会在地电阻  $R_g$  上形成一个电位差。

同样道理,也不能用中线代替实验室地线。采用三孔电源插座和插头可保证机壳与大地始终相连,而且相线与中线不会接错,从而避免了触电事故。

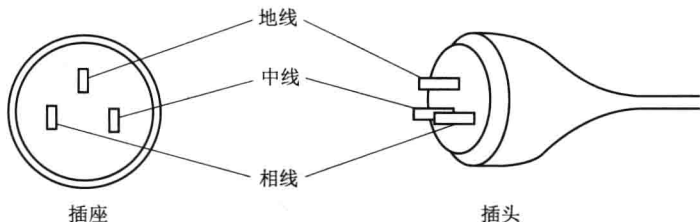


图 I-5 利用三孔插座和插头进行安全接地

所谓技术接地,是指保证电子测量仪器设备能正常工作所采取的一种必要措施。接地是否正确,是以对外界干扰信号的抑制能力为衡量标准。

技术接地点的正确选择与接地是否良好,直接影响着测试精度。比如,欲测回路的谐振电压,接地点应选择在高频的电位点而不能直接并接在回路两端,否则测试仪器的输入电容和接线分布电容将使回路失谐或被它短路。在设计高频实验电路板时,要求各电路单元及单元中的各级电路都要就近集中一点接地。然后按信号传输方向总的接地;接地线要短、粗或大面积,还要将不同频率、不同电平的接地线分开。有些工作频率很高的电子测量仪器,为了减小高频电缆接地电阻,配有接地专用的花瓣套筒,如图 I-6 所示,测量时应插牢。当用多台仪器组成测量系统,尤其对高频弱信号进行精密测量时,为避免因多点接地构成几个干扰回路的影响,可以将每台仪器的接地点分别用一条粗并尽可能短的地线连至同一点并与大地相接。

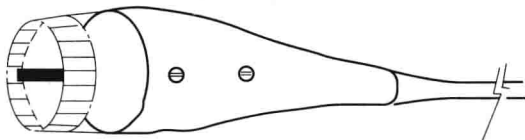


图 I-6 高频接地用的花瓣套筒

对于高灵敏度、高输入阻抗的电子测量仪器,必须养成先接好地线再进行测量的习惯。若接地不良,将感应大的干扰,造成仪器过荷,甚至损坏电表及器件的恶性事件。在实验过程中,当测量方法正确、被测电路及测量仪器工作状态正常,但仪器的读数却大大超过预计值时,这很可能就是地线接触不良造成的。有时,若怀疑仪器读数不正常,可尝试着用手去摸一下它的外壳,若发现仪器读数随之变化,这可能也是因接地不良所致。此外,应区别某些高频测量装置,即使接地良好但屏蔽较差,人体触摸外壳时,读数也会发生变化,但此时变化范围较小。

有时还会碰到被测信号两端都不允许接地的情况,这往往是一种典型的平衡电路结构,如图 I-7 (a)、(b) 所示。图 I-7 (a) 中,被测信号是 a、b 两端的电压。如果直接测量,无论地线怎样连接都会造成被测电路被  $C_1$ 、 $C_2$  分布电容串联后旁路。正确的办法是先分别测出 a、b 对地 (c 点) 的电压  $U_{ac}$  及  $U_{bc}$ , 然后求得  $U_{ab} = U_{ac} - U_{bc}$ 。

图 I-7 (b) 中的待测信号是电桥的输出电压  $U_{cd}$ 。显然,无论电压表怎样连接,电桥的一个臂都会被分布电容旁路。在这个例子中,也不能采用分别测量 c、d 电位然后求其差值的

办法。因为在两次测量中,电压表的输入阻抗将分别对电桥的不同臂产生影响。一种可行的测量方案如图 I-7(c) 所示,它是经过输出隔离变压器再接到电压表进行测量的。此时,被测电路与仪器的地线对电桥的工作状态不再产生影响。

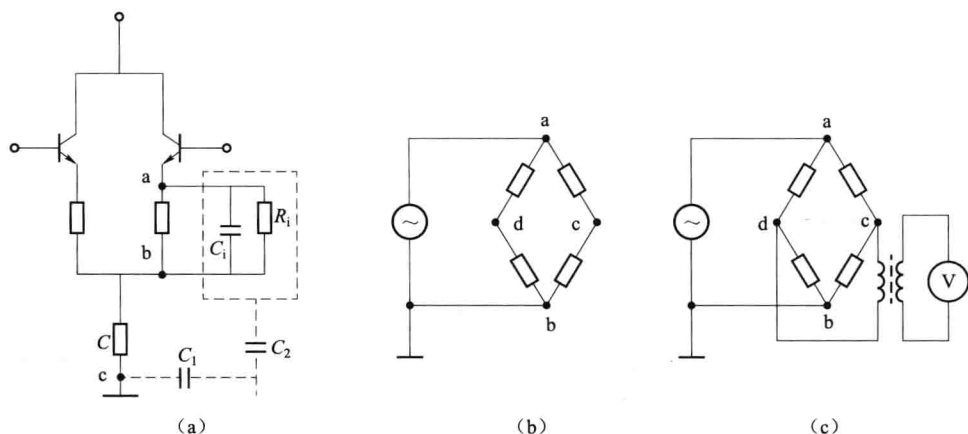


图 I-7 被测信号两端都不接地时的测量方法

为减小测量的误差,与接地同样重要的是要注意屏蔽。屏蔽有电场屏蔽与磁场屏蔽两类,屏蔽的目的:一方面是避免被测电路本身产生的电磁场辐射干扰其他电路工作;另一方面是为避免其他信号源产生的电磁场干扰被测电路的工作。若要电路的屏蔽有效,电路需要良好接地,否则不但屏蔽效果差,且会引起电路参数变化,造成测量误差。

对于微弱信号下的高精度测量和调试,必要时应在专门的电磁屏蔽室内完成。这种屏蔽室是用全金属板密闭结构或多层良导体金属丝网包裹的木框板块为构造单元,通过螺丝拼合而成的全封闭型工作间,其内部铺有绝缘地板,采用无干扰照明装置,并设有特殊的防止电磁波泄漏的通风波道窗、防护门装置。整个屏蔽室的金属外壳严格接地,引入屏蔽室内的电源及进线也采取了严格的专业级滤波措施。

## 5. 输入阻抗对测量精度的影响

电子技术实验中,仪器输入阻抗值的大小对测量精度及被测电路的工作状态有明显的影响。一般来说,我们总可以把电子测量仪器的影响用一个等效的输入阻抗来进行分析。由于除电流表以外,绝大多数仪器都是以并联的形式跨接在被测电路的两端,所以,可用输入电阻  $R_i$  与输入电容  $C_i$  的并联电路作为仪器输入阻抗的通用形式。

### 1) 输入电阻 $R_i$ 的影响

用电压表测量电阻  $R$  两端电压的示意图如图 I-8 所示。 $U_s$  信号源,  $R_s$  为信号源内阻,当信号频率不太高时,  $C_i$  影响可忽略不计。由图可见,电压表接入前,  $R$  上的电压为:

$$U = \frac{R}{R + R_s} U_s$$

电压表接入后,  $R$  上的电压变为:

$$U' = \frac{R'}{R' + R_s} U_s$$

式中,  $R' = \frac{R_i R}{R_i + R}$

由此可求出  $R_i$  引入后测量电阻  $R$  两端电压的理论误差为:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{U' - U}{U} = -\frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_s} + \frac{R_i}{R}}$$

由上式可见, 电压表输入电阻  $R_i$  越大, 或者被测电路的内阻  $R_s$  及负载电阻  $R$  越小, 理论误差就越小, 反之, 误差就越大。如果要将上述测量误差控制在 1% 左右,  $R_i$  至少要比被测电路的电阻  $R$  大 10~50 倍以上。

图 I-9 所示是测量直流电流的最简单的例子。设测量前被测电流为  $I$ , 则  $I = \frac{E}{R}$ , 被测电流变为:

$$I' = \frac{E}{R + R_i}$$

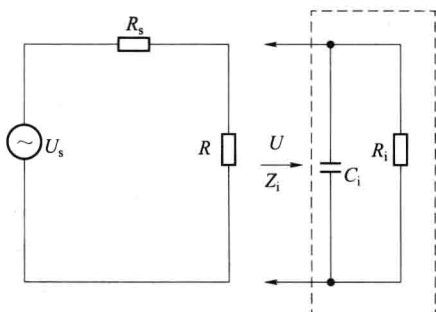


图 I-8 测量电阻两端  $R$  电压的示意图

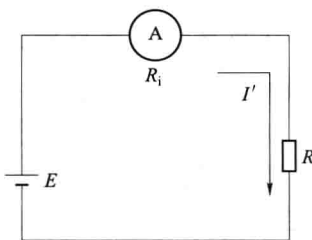


图 I-9 用电流表测量直流电流的示意图

此时测量直流电流的理论误差为:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{I' - I}{I} = \frac{R}{R + R_i} - 1 = \frac{1}{1 + \frac{R}{R_i}} - 1$$

由上式可知, 为使理论误差不超过 1%, 电流表的电阻应比被测回路的电阻小 100 倍。

从上述两个最简单测量的例子可知, 若测量仪器欲与被测电路并联, 为减小  $R_i$  的影响, 则要求测量仪器输入电阻要大; 同理, 若测量仪器串接于电路中, 则要求仪器的输入电阻要小。需要注意的是, 若被测电路需输入激励信号, 则要用信号源一类的仪器, 此时信号源虽然也与被测电路并联, 但被测电路的输入阻抗对被测电路有影响, 由上面推导公式可知, 信号源内阻越小越好。但是还应该注意: 在高频电路实验中, 因为信号源输出电阻小, 而被测电路输入阻抗与信号源阻抗不相等, 从而造成信号的反射导致波形失真。这不会导致被测电路工作失常, 而且会因阻抗不匹配造成激励功率减小。所以, 一般在高频电路实验中, 在信号源输出端与被测电路输入端都要加上一个阻抗匹配网络, 以使激励信号稳定, 被测网络正常工作。

在高频电路中, 广泛采用 LC 谐振回路作为选频网络和负载。在这种情况下, 测试仪器