

■ 高 等 学 校 教 材

电子测量技术 (修订本)

DIANZI CELIANG JISHU

杨龙麟 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等学校教材

电子测量技术

(修订本)

杨龙麟 编著

人民邮电出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

电子测量技术 (修订本) / 杨龙麟编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2006. 6

(高等学校教材)

ISBN 7-115-14459-1

I. 电... II. 杨... III. 电子测量—高等学校—教材 IV. TM93

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 006672 号

内 容 提 要

本书是电子测量技术的基础教材。全书共 8 章, 第 1、2 章是测量实验的基础知识、误差分析和数据处理。其后的章节讲述常用的测量技术和相关的测量仪表, 是本书的主要内容。第 8 章介绍测量系统中不可缺少的重要设备——信号源。

全书的阐述简明扼要, 深入浅出, 着重基本概念。书中含有测量的数字化和自动化方法, 较新的测量技术和相关电路分析。内容有一定的深度和广度, 适应性较强, 读者可以选读其中章节。本书可供高校工科电子类专业的师生之用, 也可作电子测量和仪表设计人员的参考书。

高等学校教材

电子测量技术 (修订本)

◆ 编 著 杨龙麟

责任编辑 滑 玉

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京艺辉印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 10.25

字数: 240 千字

2006 年 6 月第 1 版

印数: 1-3 000 册

2006 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-14459-1 / TN · 2726

定价: 15.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223

修 订 说 明

本教材初版于 03 年底印出之后，得到了兄弟院校的选用和读者的赞赏，使我感到很大鼓舞。此后在教学实践中，不断对初版进行修正和补充，精益求精，与时俱进。特别是在 05 年下半年对原书作了全面的审读，改正了发现的错误、含混不清、以及不确切的地方，尽量让本书便于教学和自学。最后完成了这个修订版本。

修订本删除了原书的第八章（观测动态电路的响应），而在其余各章中增补了很多重要的和有益读者的题材内容，例如，Kelvin 双臂电桥的证明，非等精度加权处理法，示波器的直流恢复电路，8038 函数发生器的详细分析，误差表示法的边界性、区间性和置信度，触发误差的分析计算，等等。虽然删除了（不必要的）一章，书的篇幅却是有所增大。

修订本更好地遵从了教学原则：讲述任一课题，总是由浅入深，深入浅出，启发读者思考；让读者不仅获得课程知识，更重要是学会整个问题的分析和解决方法；对问题和公式的引入，循序而自然，尽量不突如其来。所以各章节基本上都严谨而自成系统。因而有可能使本书趋向完善，更适合教学，自学阅读，和参考之用。

杨龙麟

2006 年 1 月

第一版前言

为了配合教学改革,提高教学质量,根据作者的一些教学实践经验和学习体会编写了本书。本书是针对高校工科电子类本/专科学生编写的,约30~60学时的测量技术基础教材。它与《电路分析》、《信号与系统》、《电子电路实验》、《电路与信号实验》等课程紧密相关,是一门理论性、综合性、实践性极强的课程。它的任务是使同学建立测量技术的理论基础,获得基本的测量实践知识与技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,以及学习严谨的科学态度。

本书是电子测量技术的基础教材。全书共9章,第1、2章讲述电子测量的基本知识和误差的基本理论;其后的章节是电子测量的基本方法和技巧,是本书的主要内容;最后一章介绍测量系统所使用的信号源。每章末均有若干思考与练习题,作为课文的练习和补充。

本书虽然是讲述电子测量的基本原理,但是,在内容的阐述方法和分析方法上,力求简明扼要,深入浅出,着重基本概念的讲述;尽量做到严谨,避免似是而非的解说。一些公式的推演和问题的思考更多是让读者自己去做(DIY)。当自学思考、解决问题、获得成功、得到乐趣和自信的时候,无形中增进了读者的治学能力,又能更好地解决问题、提高学习兴趣,形成良性循环。

编写本书的主要参考书是潘洪福等4人编著的《电子测量技术与仪表》(科技文献出版社重庆分社1991);朱锡仁等编著的《电路与设备测试检修技术及仪器》(清华大学出版社1997)。其中第一本书使我受益最大。在此对这些书的作者谨表感谢。在编写过程中得到我院教材委员会和教学服务中心教材科的大力支持和帮助,编者也在此致以感谢。由于编者水平所限,错误难于避免,希望广大读者、特别是使用本书的师生们提出宝贵意见,给以指正。

杨龙麟

2003年5月

目 录

第1章 基础知识	1
1.1 测量的重要性和特点	1
1.1.1 测量的重要性	1
1.1.2 电子测量的特点	1
1.2 测量实验的干扰抑制	2
1.2.1 干扰的来源和路径	2
1.2.2 场干扰的抑制	2
1.2.3 高频电磁场的屏蔽	2
1.2.4 干扰抑制电路举例	3
1.3 实验室的供电	3
1.3.1 三相四线制	3
1.3.2 重要事项	4
1.4 测量的内容和基本方法	5
1.4.1 测量的内容	5
1.4.2 基本测量方法	6
1.5 电子测量仪器概述	6
1.5.1 测量仪器的分类	7
1.5.2 主要技术指标	7
思考与练习题.....	8
第2章 误差分析和数据处理	9
2.1 误差的表示法	9
2.1.1 误差基本表示法	9
2.1.2 仪表的误差表示法	9
2.2 误差的来源和分类.....	10
2.2.1 误差的来源.....	10
2.2.2 误差的分类.....	11
2.2.3 评定测量结果.....	11
2.3 系统误差.....	11
2.3.1 削弱系统误差的方法举例.....	12
2.3.2 误差的合成.....	14
2.3.3 误差的分配.....	15
2.4 随机误差.....	16
2.4.1 随机变量的平均值和方差.....	16
2.4.2 误差的正态分布.....	17

2.4.3 n 次测量值的平均值	18
2.4.4 关于标准偏差的几个重要定理	19
2.4.5 测量结果的表示法和置信度	21
2.5 测量数据的处理	22
2.5.1 有效数字的处理	22
2.5.2 加权处理法	23
2.5.3 绘制曲线	24
思考与练习题	25
第3章 电流、电压的测量	27
3.1 万用表	27
3.1.1 万用表的表头	27
3.1.2 多挡电流表和电压表	28
3.1.3 交流电压表	30
3.1.4 欧姆表	32
3.1.5 测量误差	34
3.2 电流的测量	36
3.2.1 直流电流表	36
3.2.2 热电式电流表	36
3.2.3 交流电流表	38
3.3 电压的测量	39
3.3.1 模拟式交流电压表	39
3.3.2 高频电压的测量	45
3.3.3 双斜积分式模/数变换	46
3.3.4 数字式万用表	48
3.4 电平的概念	50
3.4.1 主观感觉的对数特性	50
3.4.2 电平计算公式	51
3.4.3 电平表	51
思考与练习题	52
第4章 电路元器件参数测量	56
4.1 基本元件的特性和测量	56
4.1.1 电阻、电容和电感	56
4.1.2 电桥法测量直流电阻	58
4.1.3 交流电桥	60
4.1.4 电桥法测量电感器	60
4.1.5 电桥法测量电容器	62
4.2 实用交流电桥举例	63
4.2.1 常用的交流电桥	63
4.2.2 实用交流电桥举例	64

4.3 谐振法参数测量	65
4.3.1 谐振回路的 Q 值	65
4.3.2 Q 表的基本结构	67
4.3.3 Q 表测量电感线圈	67
4.3.4 Q 表测量电容器	68
4.4 测量的数字化与自动化	70
4.4.1 阻抗测量的数字化	70
4.4.2 阻抗测量的自动化	71
4.4.3 Q 值测量的数字化	75
4.5 晶体管特性的图示法	76
4.5.1 特性图示仪的结构	76
4.5.2 晶体管输出特性的观测	77
4.5.3 晶体管输入特性的观测	77
4.5.4 大功率晶体管的图示法	78
4.5.5 电路举例	78
4.6 运放主要参数的测量	80
4.6.1 输入失调电压、偏置电流、失调电流的测量	80
4.6.2 共模抑制比 (CMRR) 测量	81
4.6.3 开环差模电压放大测量	82
思考与练习题	83
第 5 章 示波器及其应用	85
5.1 示波管显示原理	85
5.1.1 示波管的结构	85
5.1.2 偏转板原理	87
5.1.3 波形显示的基本方法	89
5.2 示波器的结构和原理	89
5.2.1 示波器的结构框图	89
5.2.2 Y 输入电路	90
5.2.3 多波形显示法	92
5.2.4 X 通道扫描发生器	92
5.2.5 A B 双扫描原理	95
5.3 示波器的一般应用	96
5.3.1 电压测量	96
5.3.2 时间测量	96
5.3.3 相位差测量	97
5.3.4 频率测量	99
5.3.5 观测电路的阶跃响应	100
思考与练习题	102
第 6 章 计数式测量法	105

6.1 通用计数器的应用	105
6.1.1 频率和周期测量	105
6.1.2 频率比和时间间隔测量	107
6.1.3 触发误差	107
6.2 提高计数器精度的方法	109
6.2.1 倒数计数法频率测量	109
6.2.2 游标法时间测量	110
6.2.3 时间扩展内插法	111
6.3 相位差的测量	112
6.3.1 瞬时值相位差测量	112
6.3.2 平均值相位差测量	113
6.3.3 用相锁环的相位差计	115
6.3.4 提高测量频率	115
思考与练习题	118
第7章 频率特性和波形参数测量	121
7.1 电路的频率特性	121
7.1.1 频率特性的概念	121
7.1.2 电路频率特性举例	121
7.1.3 用点频法测频率特性	126
7.1.4 扫频仪的原理	126
7.2 信号频谱分析	130
7.2.1 时域和频域的关系	130
7.2.2 周期性矩形脉冲的频谱	131
7.2.3 谐波分析仪(选频电平表)	132
7.2.4 频谱分析仪	133
7.3 已调波参数的测量	134
7.3.1 调幅(AM)波的测量	134
7.3.2 调频(FM)波的测量	135
7.4 非线性失真的测量	137
7.4.1 基波抑制法	138
7.4.2 交互调制法	139
7.4.3 白噪声法	140
思考与练习题	140
第8章 信号源	142
8.1 低频和高频信号源	142
8.1.1 文氏电桥型正弦信号发生器	142
8.1.2 函数发生器	144
8.1.3 高频信号发生器	149
8.1.4 脉冲信号发生器	149

8.2 频率合成信号源	150
8.2.1 直接合成法	151
8.2.2 间接合成法	152
8.2.3 频率合成器举例	153
思考与练习题	154

第1章 基础知识

1.1 测量的重要性和特点

1.1.1 测量的重要性

一般说来,任何科学的结论都是测量实验的结果。自从有了测量实验科学方法之后,近代自然科学才会真正形成并蓬勃发展。许多科学成果的取得,首先是来源于新的测量实验手段,所以科学家说“没有测量,就没有科学”。测量实验在科学技术和生产实践的任何部门都是非常重要的。

科学研究工作经常需要对一些事物进行试验、探测和证明。这些事的本身就是一系列的测量实验工作。很难想像,没有适当的测量方法和测量仪器,怎么能够进行复杂的科研和生产实践。实际上,测量技术的进步会大大提高科技发展的速度。反过来,科技的进步又会给测量理论水平的提高和测量技术的完善创造良好的条件。

测量实践的历史几乎与人类历史一样悠久。但是,测量形成一门科学技术还是近几百年的事。而电子测量与电子技术的发展也不过两百年历史,然而它们的发展速度却是非常之快。我们应当不断地提高测量技术水平,适应新的任务。国家的测量技术水平是衡量其先进程度的重要标志之一。

1.1.2 电子测量的特点

凡是利用电子技术的测量都称为电子测量。电子测量应用于电专业测量,例如,电信号传输特性的测量,电路设备的参数测量等。电子测量也广泛应用于非电专业的测量,例如,它通过各种类型的传感器、能量转换器把非电量(如热力学、光学、机械学的物理量)转换为电量(如电流、电压、频率等)进行测量研究,而后得出或反映出非电量的测量结果。这是用其他办法难以完成、甚至不能完成的测量任务。

电子测量除用于电专业测量外,还广泛用于科技和生产实践的其他各个领域,主要是因为电子测量有以下特点:电子测量有很大的灵活性和适应力;可以得到很高的精确度和灵敏度;响应速度极快;频率范围和量程范围大;动态范围大;容易实现遥控、遥测等智能测量,远距离的如导弹、星球探测等,近距离的如人体内的探测、原子反应堆内的探测等。

现代的电子测量仪器、仪表在技术和性能上已取得非常大的进展。最重要的原因是测量方法从模拟进入数字,利用微处理器,使得测量仪器、仪表进入数字化、自动化和智能化阶段。数字化测量,使得测量结果获得了极大的精确度。电子计算机和测量仪器结合起来,可组成很完美的测量系统。

1.2 测量实验的干扰抑制

1.2.1 干扰的来源和路径

在电子测量中,常会遇到各式各样干扰源的电磁辐射和阻抗耦合,使被测电路受到干扰而产生失真,使测量仪表工作不稳定,测量数据不可靠。严重的干扰甚至可使测量实验完全不能进行。干扰可以分为自然干扰和人为干扰两大类,自然干扰如宇宙辐射、雷电等大气放电,人为干扰就多了,如荧光灯和电焊机的辉光和弧光放电,继电器、开关等的火花放电,电设备的高压电路、电源电路,电路中脉冲电流/电压、振荡器、触发器等对邻近电路的干扰等。

为了减弱或消除干扰,弄清干扰源和干扰路径是很重要的。干扰路径大体有公共阻抗、电场耦合、磁场耦合和电磁场辐射。在两个或多个电路或设备之间,若有公共阻抗存在,任一电路的电流流经公共阻抗,就会对另外的电路产生干扰影响。所以,我们应当尽量减小电路之间的公共阻抗耦合。而对于电场耦合、磁场耦合和电磁场辐射干扰,一般都采用屏蔽/隔离方法,使电磁场不能进入被屏蔽的电路。

1.2.2 场干扰的抑制

抑制电磁场干扰的最有效的方法是对电路进行屏蔽。图 1-2-1 所示为电场屏蔽的原理,图中干扰源 A 和受扰 B 在没有屏蔽的情况下,电场电容设为 C_1 。加上接地的金属屏蔽板之后,它们之间的场电容改变成 C_2 。随着屏蔽板增大, C_2 会变小,从而抑制了电场干扰。图 1-2-1 (b) 中的分布电容 C_3 、 C_4 是屏蔽板的寄生电容, C_4 对干扰电流有分流作用。

而对于磁场的屏蔽,常用高导磁率的铁磁屏蔽盒套住易受干扰的元件,这些元件通常是线圈。线圈自己的磁场会有小部分沿经铁盒,而不会穿出铁盒进入有大磁阻的空间;铁盒外的干扰磁场沿经低磁阻的铁盒,而不会进入盒内的高阻空间。

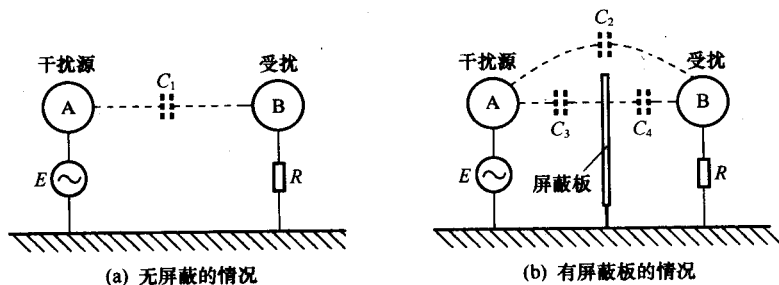


图 1-2-1 电场屏蔽原理

1.2.3 高频电磁场的屏蔽

铁磁材料盒适用于低频(100kHz 以下)电磁场的屏蔽。对于高频的电磁场,屏蔽盒通常是非磁性的良导体(如铜、铝等)金属盒,并且此盒具有良好的接地。高频磁场很难通过屏蔽盒起干扰作用,这是因为屏蔽盒会感应强涡流磁场、阻止干扰磁场。而高频电场

的干扰则由屏蔽盒短路到地，电场不会进入盒内。

1.2.4 干扰抑制电路举例

图 1-2-2 所示是一个多级放大器的电源配置图。用简单的 RC 低通滤波器来抑制电源公共阻抗的耦合干扰，这种电路常称为去耦合电路。放大器的前级信号弱小，对电源要求特严格，所以，图中的前级放大器有三级 RC 滤波器。滤波器的 R 会使前级电源电压有所降低，但是前级放大器的动态范围很小，电源电压降低是合适的。

图 1-2-3 所示是互感滤波器，常作为仪器、设备的电源的前置器件，一般放置在交流电源进线之后，整流器之前。这种滤波器可以抑制从交流电力线进入设备的大气放电和其他辐射干扰。注意，图中有两组线圈绕在同一磁芯上，它们的匝数相等，同名端子如图中黑点所示。对于交流电力的传输，线圈电感为零，无电抗作用。但是对于同时加到两线上的大气辐射脉冲干扰，两线圈呈现出大电感，它有很好的抑制干扰作用。

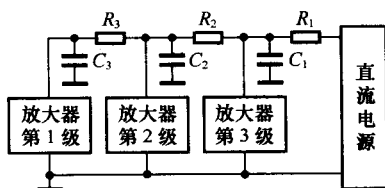


图 1-2-2 直流电源的去耦合电路

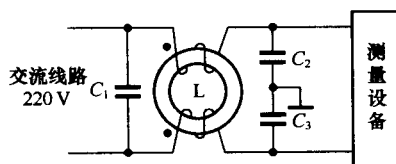


图 1-2-3 交流线路的干扰抑制

实际上，抑制杂波噪音就是要提高测量实验过程中的信/噪比率，所以我们必须知道提高信/噪比的一些基本方法。例如，我们用信号发生器发送信号给放大器，放大器需要几毫伏或更小的输入电压，而且信号发生器和放大器之间的连接线会引入一定的噪声干扰。在这个情况下，我们不应当直接发送弱小信号至放大器，而应送出一个较强的信号至线路，再在放大器入口处加接衰减器，满足放大器的小信号输入要求。这样，放大器可得到较高信/噪比的测试信号。

1.3 实验室的供电

1.3.1 三相四线制

一般实验室的供电是用电力网提供的三相四线制、50Hz 低压交流电。三相四线制就是把三个相角差互为 120° 的相等正弦电压源组合在一起，用四根导线传输电能的制式，如图 1-3-1 所示。火线和中线之间的电压叫相电压，有效值为 220V；而火线和火线之间的电压叫线电压，有效值为 380V。证明：例如 AB 线电压的瞬时值等于

$$\begin{aligned} u_{AB} &= u_{AN} + u_{NB} = u_{AN} - u_{BN} = 220\sqrt{2}\sin\omega t - 220\sqrt{2}\sin(\omega t - 120^\circ) \\ &= 220\sqrt{2} [2 \sin 60^\circ \cos(\omega t - 60^\circ)] = 380\sqrt{2}\sin(\omega t + 30^\circ) \end{aligned} \quad (1-3-1)$$

我们还可证明：三相四线制在负载平衡（ $Z_A = Z_B = Z_C = Z$ ）的情况下，中线的电流值等于零。为此，先设定相电流的参考方向是流入负载，中线电流是三相负载电流之和。于

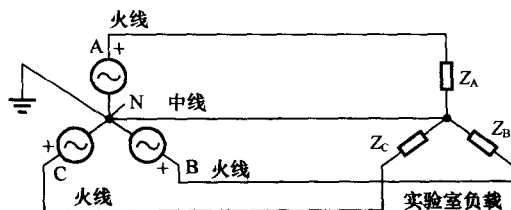


图 1-3-1 三相四线制供电

是，中线电流等于

$$I_N = \frac{\dot{V}_{AN}}{Z} + \frac{\dot{V}_{BN}}{Z} + \frac{\dot{V}_{CN}}{Z} = \frac{1}{Z}(\dot{V}_{AN} + \dot{V}_{BN} + \dot{V}_{CN}) = 0 \quad (1-3-2)$$

因为 3 个幅值相等、相角差 120° 的电压相量之和等于零。现在，再用瞬时值三角式证明之：

$$\begin{aligned} u_{AN} + u_{BN} + u_{CN} &= 220\sqrt{2} [\sin \omega t + \sin(\omega t - 120^\circ) + \sin(\omega t + 120^\circ)] \\ &= 220\sqrt{2} [\sin \omega t + 2\sin \omega t \cos(-120^\circ)] \\ &= 220\sqrt{2} [\sin \omega t - \sin \omega t] = 0 \end{aligned} \quad (1-3-3)$$

可见，相电流在中线之中有互相抵消的作用。即使三相负载不很平衡，中线电流也是不大的，所以中线可以使用较细的导线。对于直接使用三相电源的设备，由于其三相负载是一致的，更是完全不用中线。传输一定的电功率，可以使用较少的金属导线，这就是三相四线制供电的优点。

1.3.2 重要事项

(1) 三相电网电源输送电力到一个大实验室或一幢楼房的总配电板上，配电板必须尽量平衡分配各相负载量。配电板上一般安装有电度表、三相火线开关和保险丝。（热熔）保险丝的可靠性差，配电板上还应安装电磁限流断路器、双金属热变形断路器和漏电保护器等设备。注意，绝对不要在中线上安装保险丝或断路器，而且一定要保证中线与各相负载连接良好。因为一旦中线断开，在三相负载不平衡的情况下，相电压会大大超过 220V。例如，有一相负载极重（阻抗极小），则该重负载的相电压很低，其余两相电压很高，可能接近线电压 380V 而烧毁 220V 的电器。

(2) 漏电保护器是一种保护人身安全很有效的设备，它对于仪器机壳与电源漏电也能有效保护。图 1-3-2 所示是一种家用 30mA 漏电保护器的结构和原理图。在正常情况，从电源经开关至负载的两根导线（粗黑线）电流相等，方向相反，变流器检测线圈中无电流（关于变流器，参看 3-2-3 小节）。当电源线有漏电流时，例如，人触电时，一导线电流经人体直接漏电到地，不经另一导线回流。设流经人体的电流为 ΔI ，则穿过变流器铁芯的导线电流之差也是 ΔI 。故使检测线圈有电流 $\Delta I/n$ 。（ n 是检测线圈的匝数，而 ΔI 电流为 1 匝）。当电流 ΔI 超过 30mA，继电器动作，断开电源开关，人身获得保护。

注意，在图 1-3-2 的上边有一个测试（test）按钮，按下之后，铁芯中有一匝测试电流，等于 $220/5600 \approx 40\text{mA}$ 。这时电源开关立即断开，表明漏电保护器工作正常，处于备

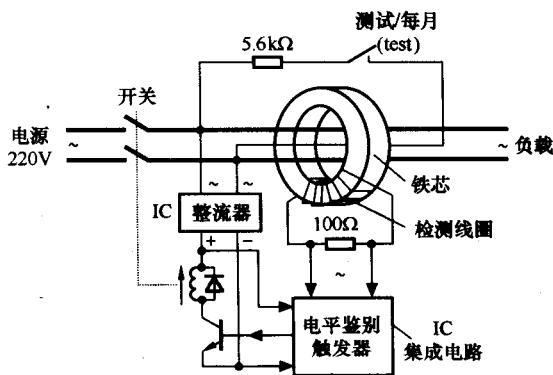


图 1-3-2 家用漏电保护器的结构和原理

用态。为了保证安全，应当定期测试漏电保护器。

(3) 在实验室和日常生活中，常用一种单相三孔电源插座。一般右孔是火线 L，左孔是中线 N，上孔是地线 G。这个地线称为保护地线，通过电源插头直接跟设备的金属外壳连接。例如，电烙铁外壳接地可保护人身安全，可避免焊接元件被漏电或感应电损坏；又例如仪器、仪表的外壳接地，除人身安全之外，还有电磁场屏蔽和抑制人体感应等作用。所以，电源插座的地线孔应当用专线、就近与大地良好连接。中线 N 虽然在发电厂和配电站已经连接大地（接地），在用户端的总配电板上中线也常再接地，但是在实验室和用户的三孔插座上，不能用中线代替保护地线。因为在三相负载不平衡的时候，中线中有较大电流，中线对地有较大电压，会使设备外壳带电。总之，不能让插座的地线孔直连中线，而应当用就近接地的专用地线。

除有连接大地的地线之外，我们在电路图上还会看到另一种“地”。它表示各个电路和信号的公共“零电位”参考点，常被称为信号地或参考地。

(4) 在测量实验过程中，必须注意人身安全并确保仪器、仪表工作正常。在仪器设备加电之前应先确定电源电压是否符合要求，加电之后如果出现异常现象，则首先应当切断电源。

最后，举一个单相自耦变压器（调压器）连接的例子：它有两个输入端子和两个输出端子。但是有一个输入端子跟输出的一个端子是直接连通的，因此输入跟输出直通的公共端子必须连接中线，另一输入端子连接火线。判定电源火线和中线的简单办法是使用（氖灯）验电笔，发出光亮的线是火线。

1.4 测量的内容和基本方法

1.4.1 测量的内容

测量的内容（包括电专业和非电专业）是极其庞大、繁多的，这里只对本书电路测量的内容做如下大略的举述：

- (1) 电能量的测量（电流、电压、功率、电磁场强度等）；
- (2) 电路参数的测量（电阻、电感、电容、阻抗、品质因数等）；

- (3) 信号参数的测量 (波形、频率、相位、调制系数、失真度等);
- (4) 设备性能的测量 (放大倍数、灵敏度、频带、噪声系数等);
- (5) 器件特性曲线的显示 (幅-频特性、伏-安特性等)。

1.4.2 基本测量方法

为了实现测量、获得测量结果,采用的各种手段和方式总称为测量方法。这些方法可以有多种分类法:例如,根据被测量的状态可分为静态和动态类测量法;根据测量的性质,可分为时域、频域测量法以及随机测量法;根据对测量结果精度的要求,可分为精确测量和工程测量;根据测量的手段,可分成直接测量法、间接测量法以及组合测量法等。最后一种是我们用得最多的基本分类法,现介绍如下。

直接测量法 是直接以被测的量为对象进行测量的方法。直接测量法常被使用,是间接法的基础。直接测量法又可分为直读式和比较式两种方法。直读式使用直读仪表,直接读出被测量值,所以测量操作简单快捷。除数字仪表外,一般模拟指示的直读仪表,其准确度都不很高,而用比较式测量则可获得较高的准确度。比较法是利用标准量与被测量进行比较。比较的方法可以是使两者的差值为零,或为微小值;也可以在相同测量条件下,用标准量代替被测量,调节标准量,使仪表的指示跟被测量的指示相同,于是被测量等于调节后的标准量。

间接测量法 不是直接测量被测量,而是测量与被测量有函数关系的其他量,然后利用函数等式计算出被测量。例如,用伏安法测量电阻 R : 先直接测量电流和电阻端电压,然后用欧姆公式 $R = V/I$ 计算出电阻 R 值。当被测量不能或不方便直接测量时,或者当用间接测量法会得出比直接测量法更为精确的结果时,采用间接测量法。

组合测量法 实际上是一种较复杂的间接测量法。举例说明如下:例如,已知导体电阻 R 与温度 t 的函数关系式是

$$R_t = R_{20} \{1 + \alpha(t - 20) + \beta(t - 20)^2\} \quad (1-4-1)$$

其中, R_{20} 是 20°C 下的电阻值; α 和 β 是导体的温度系数。为了求出我们需要的温度系数 α 和 β , 于是先测量出这个导体在 3 个温度下的电阻值 R_0, R_{20}, R_{50} , 代入式 (1-4-1), 得出下列联立方程:

$$\begin{aligned} R_0 &= R_{20} \{1 + \alpha(0 - 20) + \beta(0 - 20)^2\} \\ R_{50} &= R_{20} \{1 + \alpha(50 - 20) + \beta(50 - 20)^2\} \end{aligned} \quad (1-4-2)$$

从联立方程中可解出需要的温度系数 α 和 β 。

1.5 电子测量仪器概述

电子测量仪器在 20 世纪取得了重大发展。20 世纪初出现电子 (真空) 管, 快速发展了电信号的放大、变换和传输技术; 由于电子管仪器有放大器, 使仪器的灵敏度、频率特性和内阻抗等性能均有很大的提高。当时电子仪器的特征是体积大、笨重、能耗大。20 世纪 50 年代后的晶体管仪器基本淘汰了电子管仪器。20 世纪 70 年代后, 集成电路构成

新型数字式仪器, 以及微处理器应用于仪器中, 使电子测量仪器的性能不断改进和发展。现在电子测量技术和仪器正向着数字化、自动化、智能化和高性能方面发展。

1.5.1 测量仪器的分类

电子测量仪器的品种繁多, 一般分为**专用仪器**和**通用仪器**两大类。专用仪器是为某一个或几个专用目的而设计的仪器, 例如电视信号发生器, 专用来测试电视机, 一般不做它用。通用仪器是为测量元器件参量或一般设备性能而设计的仪器, 它能用于多种器件和设备的测量, 通用仪器包括示波器、频率计数器、电流/电压表等。

本书讲述基础测量技术, 所涉及测量仪器只是通用仪器。按照通用仪器的功能来分类, 可有如下一些类别。

(1) **信号发生器** 主要用来提供测量所需的各种信号, 故也称信号源。按频率高低分, 有超低频、音频、高频以及超高频信号发生器; 按信号波形差异分, 有调频和调幅信号发生器、脉冲信号和扫频信号发生器以及函数信号发生器等。

(2) **信号分析仪** 主要用来观测和分析各种电信号。按观测的显示方式分, 有时域分析仪和频域分析仪两大类。例如, 电子示波器是时域分析仪; 扫频仪和频谱分析仪是频域分析仪。

(3) **频率、时间和相位测量仪器** 这类仪器包括通用计数器和各种频率计、波长计、相位计以及时间、频率标准设备。

(4) **网络特性测量仪** 有阻抗、频率特性测试仪, 以及网络分析仪等。它们主要用来测量网络的各种参数和特性。

(5) **电子元件参数测量仪** 它包括晶体管和集成电路测试仪、RLC 元件测量仪、Q 表、阻抗电桥等仪器。

1.5.2 主要技术指标

测量仪器的技术指标也称性能指标, 说明仪器能实现何种测量功能, 以及完成这些功能的优劣程度。电子测量仪器的主要技术指标有工作频率范围、量程与分辨力、测量误差、响应特性、输入和输出特性、稳定性和可靠性以及工作环境条件等。这些指标反应出仪器的适应力和工作能力。

频率范围是对正弦信号而言的。如果被测信号含有许多谐波, 则仪器的频率范围应同时满足基波和高次谐波。

量程是仪器测量值的范围, 仪器常把一个大的测量值范围分成多个小量程挡来测量。

分辨力是仪器能分辨量值细微改变的能力, 一般在最小量程上仪器有最高分辨力。

测量误差在第2章讨论, 由于各仪器的设计原理不同, 常用适合自己特性的误差表示法。

响应特性是指仪器对信号响应的特性, 例如响应滞后时间、响应的波形, 交流表响应平均值、峰值或有效值等。

输入特性的指标有输入阻抗大小、有否频率补偿探头等; **输出特性**有输出阻抗、读数和显示方法以及跟其他设备的接口方式等。

仪器的**稳定性和可靠性**指标有电源波动范围、元器件性能的温度漂移、抗干扰能力和