



普通高等教育“十二五”规划教材

电工电子技术实验 及课程设计

申永山 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

电工电子技术实验 及课程设计

主编 申永山

参编 高有华 龚淑秋

机械工业出版社

前 言

《电工电子技术实验及课程设计》作为普通高等教育“十二五”规划教材，是一本包括电工电子综合性实验和课程设计的实用教材，与“电工技术基础”、“电子技术基础”和“电工电子技术”课程相配套，同时，是“电子技术课程设计”课程的指导教材，可供高等理工院校本、专科机械类、材料类、化工类、计算机类和经济管理类专业的电工电子实验教学和电子技术课程设计使用。

随着电工电子技术的发展和教育教学改革的不断深入，电工电子技术不断出现新理论、新技术、新知识、新器件及新方法，这些必将推动电工电子技术课程的体系、内容以及教学方法和教学手段的全面改革。为了配合非电类理工科专业的大学本科、专科学生对电工电子技术课程的理论学习，提高实验教学和课程设计的质量，编者结合当前教学改革和教学体系建设的要求编写了本书。

本书推出了以先进的电子设计自动化技术为手段，以设计性、综合性、研究性实验为主体的软硬件结合的实验教学模式，将实验分为设计阶段和实际操作阶段，重在培养学生综合运用知识的能力、创新能力和工程实践素质。实验部分的讲义在校内试用后，受到了广大师生的欢迎和好评，在实验教学过程中发挥了不可替代的作用。同时，本书又加入了电子技术课程设计的指导内容，例举了大量电子技术课程设计实例，这些实例都是长期工作在教学第一线的编者进行教学工作和科学研究工作成果的结晶，包括一些在国内重要核心期刊以及学术会议上刊登和发表的论文内容，应用性强，方便广大师生和读者的学习和使用。

本书共分为4章。第1章，现代电工测量技术的基本知识和EDA软件EWB；第2章，电工技术实验；第3章，电子技术实验；第4章，电子技术课程设计指导。加“*”号的章节为选学。

本书由沈阳工业大学申永山副教授担任主编，并编写1.1~1.4节、2.4~2.6节、3.5节、3.7节、4.1~4.3节、4.4.1小节、4.6节、4.7节。高有华教授编写2.1~2.3节、2.7~2.9节、3.1~3.4节、4.5.5~4.5.9小节。龚淑秋教授编写3.6节、3.8~3.12节、4.4.2小节、4.5.1小节~4.5.4小节。沈阳工业大学电气工程学院的李忠波教授和袁宏教授对本书提出原则指导和要求，并对原稿进行了仔细审阅，提出许多具体意见和建议。电气工程学院基础实验中心的贺洪斌、邵岳、朱冬梅、翟惠萍、张锦辉和戴朝辉等老师对所有实验进行了实际操作，在此一并深表感谢并致以崇高的敬意。

限于编者的能力和水平，错误和不妥之处在所难免，恳请读者提出批评和改进意见，以便今后不断提高。

编 者

目 录

前言

第 1 章 现代电工测量技术的基本

知识和 EDA 软件 EWB 1

- 1.1 电工测量的基本知识 1
 - 1.1.1 电工测量的概念 1
 - 1.1.2 电工测量仪器仪表的分类 1
 - 1.1.3 直读式仪表的误差 2
 - 1.1.4 测量结果的数字处理 6
- 1.2 EWB 的工作界面 9
- 1.3 虚拟仪器的使用 13
- 1.4 电路的仿真过程 20

第 2 章 电工技术实验 23

- 2.1 元件伏安特性的测量 23
- 2.2 电路分析方法 26
- 2.3 受控源的研究 30
- 2.4 三表法测定交流电路参数 33
- 2.5 R 、 L 串联电路特性及其功率因数的提高 36
- 2.6 三相交流电路 40
- 2.7 三相交流电路功率的测量 43
- 2.8 一阶电路的响应 45
- 2.9 三相异步电动机运行控制电路 49

第 3 章 电子技术实验 52

- 3.1 常用电子仪器及设备的使用方法 52
- 3.2 单管交流电压放大电路 58
- 3.3 集成运算放大器的线性应用 62
- 3.4 三种波形产生电路 65
- 3.5 集成直流稳压电源 67
- 3.6 单相桥式晶闸管整流电路 69
- 3.7 组合逻辑电路的分析与设计 73
- 3.8 触发器 76
- 3.9 基于 74LS290 的计数译码显示的综合与分析 79
- 3.10 基于 74LS161 的计数译码显示的综合与分析 82
- 3.11 555 定时器应用电路的设计 85
- 3.12 D/A 转换器及其使用方法 92

第 4 章 电子技术课程设计指导 95

- 4.1 课程设计的目的与要求 95
- 4.2 电子技术课程设计的一般方法与步骤 96
 - 4.2.1 总体方案的设计与选择 96
 - 4.2.2 单元电路的设计、参数计算和元器件选择 97
 - 4.2.3 电路图的绘制 98
 - 4.2.4 电子电路的组装与调试 99
 - 4.2.5 电子技术课程设计报告要求 101
- 4.3 模拟电路的设计方法与实例 101
 - 4.3.1 模拟电路的设计过程 101
 - 4.3.2 设计实例——分立元器件的直流稳压电源与充电电源的设计 103
- 4.4 数字电路的设计方法与实例 109
 - 4.4.1 数字电路的设计过程 109
 - 4.4.2 设计实例——交通信号灯自动指挥系统 110
- 4.5 典型电子技术课程设计实例 116
 - 4.5.1 小功率直流稳压电源的设计 116
 - 4.5.2 多波形函数发生器 123
 - 4.5.3 光控照明电路 131
 - 4.5.4 教学楼热水箱水温控制系统 135
 - 4.5.5 音乐彩灯控制器 138
 - 4.5.6 无线防盗报警器 142
 - 4.5.7 脉搏测量仪 145
 - 4.5.8 数字式竞赛抢答器 149
 - 4.5.9 数字电子钟 154
- 4.6 电子技术课程设计课题选集 161
 - 4.6.1 模拟电路设计课题 161
 - 4.6.2 数字电路设计课题 163
- 4.7 EWB 的元器件库 164
 - 4.7.1 信号源库(Source) 165
 - 4.7.2 基本元器件库(Basic) 166
 - 4.7.3 二极管库(Diode) 168
 - 4.7.4 晶体管库(Transistors) 168
 - 4.7.5 模拟集成电路库(Analog ICs) 169

4.7.6 混合集成电路库(Mixe ICs)	169	4.7.11 控制部件库(Controls)	171
4.7.7 数字集成电路库(Digital ICs)	170	4.7.12 其他元器件库(Miscellaneous) ...	173
4.7.8 逻辑门电路库(Logic Gates)	170	附录 常用电工电子元器件图形	
4.7.9 数字器件库(Digital)	170	符号对照表	175
4.7.10 指示部件库(Indicators)	171	参考文献	178

第1章 现代电工测量技术的基本知识和 EDA 软件 EWB

1.1 电工测量的基本知识

随着科学技术的发展, 电工电子仪器仪表和测量技术已经进入数字化时代, 特别是虚拟仪器仪表和测量技术的出现, 为电工电子电路及其应用系统的设计、仿真和实践提供了新的手段。利用这些手段, 可以在集成一体化虚拟环境中, 快捷、高效地对电路进行设计、测量、调整, 并获得满意的仿真结果, 这不但为电路设计和实验提供了现代化的方法, 而且使实验教学向设计性、综合性、研究性的模式转变。可以说, 它是工科专业大学生以及从事电路设计的工程技术人员必须掌握的基本技能。

1.1.1 电工测量的概念

测量是人类通过一定的手段认识客观世界并取得数量概念的过程。电工测量是研究电学量(如电压、电流、电阻、频率、相位等)和磁学量(如磁通、磁感应强度、磁场强度、磁导率等)的测量仪器仪表及测量方法的科学。电工测量还包括各种非电量(如温度、压力、流量、速率等)的测量。

电工测量仪器仪表体积小、重量轻、使用方便; 测量准确度高、测量能力强、范围广; 容易实现遥测、遥控; 便于进行连续测量、自动测量和监控。它广泛应用于科学实验研究、工农业生产、工程建设、交通运输等领域。所以, 了解常用电工仪器仪表的原理、结构、功能及正确的使用方法, 掌握精湛的测量技术是十分重要的。

1.1.2 电工测量仪器仪表的分类

电工测量仪器仪表按测量方式和结构原理不同, 可分为直读式仪表、比较式仪表和数字电子式仪器仪表。数字电子式仪器仪表是测量仪器仪表的发展方向。

1. 直读式仪表

直读式仪表是可由仪表的指示机构直接读出被测量的测量结果的装置, 如电流表、电压表、功率表等均属此类仪表。一般直读式仪表除使用前应当调零外, 不需其他调整。因此直读式仪表测量迅速、使用方便, 是电工测量中仍然使用较多的仪表。

2. 比较式仪表

应用比较式仪表测量时, 将被测量与某些标准量进行比较而得到被测量的值, 如交、直流电桥和电位差计等即属此类仪表。比较式仪表的测量过程比较复杂, 仪表的价格较贵。但测量准确度高, 因而常用于精确测量场合。

3. 数字电子式仪器仪表

这种仪器仪表的核心是由电子电路构成的, 读数由数字显示器显示, 也可将其列入直读式仪表一类。数字电子式仪表的输入电阻高, 系统误差小, 测量结果直观准确, 便于联机联

网、遥控遥测，是电工仪表的发展趋势，广泛应用于各种测量技术中。例如，数字电压表、数字电流表、数字频率计、数字功率表、数字电子示波器等。

由于直读式仪表的价格便宜，使用安装方便，并能指示被测量的变化方向，属于常用仪表。常用直读式电工仪表表盘盖上的标记符号见表 1.1.2.1，这些标记符号反映了仪表的基本特征。

表 1.1.2.1 常用直读式电工仪表的标记符号

分类	符号	名称	分类	符号	名称	
电 流 种 类		直流	工 作 原 理		磁电系仪表	
		交流			整流系仪表	
		直流和交流			电磁系仪表	
测 量 对 象		电 流 表		工 作 位 置		电动系仪表
		电压表				磁电式比率计
		功率表			标尺位置为水平	
		电能表			标尺位置为垂直	
端 钮		正端钮	准 确 度 等 级		1.5	以标度尺量限的百分数表示
		负端钮			以指示值的百分数表示	
			公共端钮	绝 缘 试 验		绝缘强度试验电压 (或 2kV)
调 零 器		调零器				

1.1.3 直读式仪表的误差

1. 测量误差

任何测量，不论是直接测量还是间接测量，都是为了得到某一物理量的真值，即排除所有测量上的缺陷测得的准确值。但由于测量工具准确度的限制、测量方法的不完善、测量条件的不稳定以及经验不足等原因，任何物理量的真值都是无法测到的，测量所能得到的只是其近似值，此近似值与真值之差称为误差。

已测得的被测量值 A 与其实际值（即真值 A_0 ）之差值称为测量的绝对误差 ΔA ，即

$$\Delta A = A - A_0$$

但绝对误差 ΔA 不能说明测量结果的好坏。测量结果的好坏应看此绝对误差 ΔA 占实际值的比例大小，因此，一般用绝对误差 ΔA 与被测量的实际值 A_0 之比来表示，称为相对误差 γ ，即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0}$$

相对误差的数值一般用百分数表示。由于实际值在事先是不知道的，而测量值与实际值往往相差不大，因此上式中 A_0 可直接用 A 代替，即

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_0} \approx \frac{\Delta A}{A}$$

相对误差是实验报告中经常研究和分析的一项内容。

2. 误差分类及产生原因

根据误差的性质，测量误差可分为三大类：系统误差、偶然误差和疏失误差。

(1) 系统误差 指在相同条件下多次测量同一量时，误差的大小和符号均保持不变，在条件改变时，按某一确定规律变化的误差。这种误差是由于测量工具误差、环境影响、测量方法不完善或测量人员生理上的特点等造成的。根据产生误差的原因，系统误差又可分为如下几类：

1) 工具误差（基本误差）：由于测量工具本身不完善所致。

2) 附加误差：是由于测量时的条件与校正时的条件不同所致。如在 20℃ 校准的仪表在其他温度下使用，或者应“平”放的仪表测量时“立”放了等。

3) 方法误差：由于间接测量时所用公式是近似的，或测量方法的不完善而造成，如未考虑电表的内阻对测量的影响等。

4) 个人误差：是由于实验者的习惯或操作方法不正确所致，如读数不准确等。

系统误差越小，测量结果越准确，系统误差的大小可用准确度来反映。

(2) 偶然误差 也称随机误差，是由于某些偶然因素造成的，如电磁场微变、热起伏、空气扰动、大地微震、测量人员感觉器官的生理变化等。这些互不相关的独立因素产生的原因和规律无法掌握，因此，即使在完全相同的条件下进行多次测量，实验结果也不可能完全相同。否则，只能说明仪器的灵敏度不够，不能说明偶然误差不存在。

一次测量的偶然误差没有规律，但多次测量中偶然误差是服从统计规律的，因此可以通过统计学的方法来估计其影响。欲使测量结果有更大的可靠性，应把同一种测量重复多次，取多次测量值的平均值作为测量结果。

偶然误差的大小用精密度来反映，偶然误差越小，测量结果的精密度就越高。

(3) 疏失误差 是由于实验者的粗心大意造成的。此结果不可取用，应舍去。

综上所述，要进行精确测量，必须：①消除系统误差；②剔除含有疏失误差的无用值；③采用多次重复测量取平均值来消除偶然误差的影响。采取了这些措施，就能得到测量结果的最可信赖值。

3. 系统误差的消除方法

如前所述，系统误差有规律可循，而且在相同条件下进行测量时是不变的，因此可采用一些办法将此恒定因素的影响消除，保证测量结果的准确性。在工程上，当系统误差被减小到可以忽略时，通常可认为它已被消除。

消除系统误差的方法有以下几种：

1) 正负误差补偿法：进行两次测量，使测量结果中的系统误差一次为正、一次为负，取其结果的算术平均值，则此恒定的系统误差即可消除。例如，在测量通过直流电流线圈的磁场强度时，由于外界的恒定磁场（例如地磁场）叠加到被测磁场上，使测量结果产生了系统误差（附加误差）。如果将电流反向或将线圈转 180°，则被测量的符号改变，但由于外界恒定磁场不变，因此测量结果中系统误差将改变其符号，两次测量结果中的系统误差一次为正一次为负，取两次测量结果的算术平均值即可消除外界恒定磁场的影响。

2) 替代法: 用可变的“标准量”去置换被测量, 而使其产生的效果与置换前相同, 这样, 由已知“标准量”的数值便可求得被测量。置换时应使其他条件保持不变, 则由于装置特性而产生的误差即被消除。

3) 引入校正值: 若已知系统误差的特性和大小, 例如已知直读式仪表的校正曲线, 则可将相应的校正值引入测量结果中, 从而得到可靠的测量结果。

以上仅是常用的几种方法, 对于每个具体的测量问题, 只有在仔细分析其具体条件后, 才能采取相应的措施。另外, 在测量之前, 必须仔细检查全部测量仪表的调整和安放情况, 以便尽可能地消除产生误差的根源。

4. 直读式仪表的准确度

仪表存在着基本误差和附加误差。基本误差指仪表在规定的正常条件下测量时所具有的误差; 附加误差是由于工作条件不正常而产生的误差。

1) 引用误差: 当仪表在规定的正常条件下工作时, 仪表指示值的绝对误差 ΔA 与仪表量程 A_m 之比称为引用误差 γ_n , 一般用百分数表示, 即

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_m} \times 100\%$$

2) 仪表等级: 由于仪表标度尺各点的引用误差各不相同, 所以规定用全量程可能出现的最大引用误差 γ_{nm} 来表示仪表的准确度等级, 即

$$\gamma_{nm} = \frac{\Delta A_{\max}}{A_m} \times 100\%$$

我国国家标准规定, 机电系直读式仪表的准确度等级分七级, 见表 1.1.3.1。仪表的等级数就是其最大引用误差值 (它反映的是仪表的基本误差)。

表 1.1.3.1 仪表准确度等级

仪表等级	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.5	5.0
基本误差 (%)	± 0.1	± 0.2	± 0.5	± 1.0	± 1.5	± 2.5	± 5.0

0.1 和 0.2 级仪表通常作为标准表以校正其他仪表。实验室一般用 0.5 ~ 1.5 级仪表。生产部门做监视生产过程的仪表根据生产工艺要求一般为 1.0 ~ 2.5 级。

在校准仪表时, 最常用的方法是用被校准表和标准表同时测量某一个量 (电压、电流等), 标准表的读数认为是实际值, 被校准表的读数与标准表的读数之差值即为绝对误差 ΔA , 找出在全量程上绝对误差的最大值 $\Delta A_{\max}$, 从而可算出最大引用误差 γ_{nm} 。根据最大引用误差确定出被校表的准确度等级。

例 1.1.3.1 有一量程为 100V 的电压表, 用一只标准电压表与之相比较, 结果见表 1.1.3.2。

表 1.1.3.2 被校表与标准表读数

被校表读数/V	0	20.0	40.0	60.0	80.0	100
标准表读数/V	0	19.0	40.5	58.0	79.0	101

由表 1.1.3.2 可见, 60.0V 处的绝对误差最大, 表的量程为 100V, 故其最大引用误差为

$$\frac{2.0}{100} \times 100\% = 2.0\%$$

对照国家规定的标准, 这只表的等级属于 2.5 级。

例 1.1.3.2 有两只毫安表, 量程分别为 $I_{1m} = 100\text{mA}$, $I_{2m} = 50\text{mA}$, 两表均为 1.0 级, 用来测量 40mA 的电流, 求测量结果中可能出现的最大相对误差。

解 (1) 用量程为 I_{1m} 的毫安表测量时, 可能产生的最大绝对误差 ΔI_{1m} 为

$$\Delta I_{1m} = \pm 1.0\% \times 100 = \pm 1.0\text{mA}$$

故用此表测 40mA 电流时可能产生的最大相对误差为

$$\gamma_{1\max} = \frac{\pm 1.0}{40} \times 100\% = \pm 2.5\%$$

(2) 用量程为 I_{2m} 的毫安表测量时, 可能产生的最大绝对误差 ΔI_{2m} 为

$$\Delta I_{2m} = \pm 1.0\% \times 50 = \pm 0.5\text{mA}$$

故用此表测 40mA 电流时可能产生的最大相对误差为

$$\gamma_{2\max} = \frac{\pm 0.5}{40} \times 100\% = \pm 1.25\%$$

由以上计算结果可以看出, 用 100mA 的毫安表测 40mA 电流比用 50mA 的毫安表所测得的结果具有更大的最大相对误差。因此, 量程选择对测量结果的准确度有很大影响, 应尽量使被测量的值接近于满刻度值。一般应使被测量的值超过满刻度值的一半以上。

5. 系统误差的计算

测量中的误差不可能完全消除, 为了估计测量结果的准确程度, 往往要计算误差的大小。工程上的一般测量, 其误差主要指系统误差, 因为偶然误差对整个测量过程影响较小, 一般可忽略不计。

1) 直接测量: 在仪表的正常工作条件下, 测量结果中的误差即是所使用仪表本身的基本误差。可根据仪表的准确度等级计算。例如, 仪表测量时的读数为 A_x , 仪表量程为 A_m , 准确度等级为 K , 则测量结果可能出现的最大相对误差为

$$\gamma_{\max} = \pm \frac{K\% A_m}{A_x} \times 100\%$$

若测量条件不满足仪表的正常工作条件, 则需考虑附加误差。这时测量结果的最大误差应是仪表的基本误差和附加误差之和。

2) 间接测量: 需进行几次不同量或不同数值的测量, 然后根据它们所共同遵循的公式计算出最后结果。每次测量的误差, 都将对最后结果有所影响。

设被测量 y 与直接测量诸量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 之间的函数关系为

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

令 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 分别代表测量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 时的误差, Δy 代表由 $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ 引起的被测量 y 中的误差, 则

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n)$$

将上式右端按泰勒级数展开, 并略去高阶导数项后, 得

$$\begin{aligned} & f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) \\ & \approx f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n \end{aligned}$$

所以

$$\Delta y = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n$$

$$\text{令 } \Delta_1 = \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1, \Delta_2 = \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2, \cdots, \Delta_n = \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n$$

则 $\Delta_1, \Delta_2, \cdots, \Delta_n$ 分别代表各直接测量误差在测量结果中所引起的绝对误差。故有

$$\Delta y = \sum_{k=1}^n \Delta_k$$

在最不利的条件下, 结果中的各项误差同号, 因此可能出现的最大误差

$$\Delta y_{\max} = \pm \sum_{k=1}^n |\Delta_k|$$

1.1.4 测量结果的数字处理

1. 有效数字

(1) 有效数字的概念 测量所得到的数据都是近似数。近似数由两部分组成: 一部分是可靠数字, 另一部分是欠准数字。例如, 某仪表的读数为 106.5 (格), 从标尺上的刻度看, 共 150 格, 即只刻度到个位数, 十分位上是估计数。所以, 106 是可靠数字, 末位数 5 是估读的欠准数字。通常测量时, 只应保留一位欠准数字 (一般估读到最小刻度的十分位), 其余数字均为可靠数字。一个近似数字中的可靠数字和末位的欠准数字都是有效数字。例如, 上面的 106.5 均是有效数字, 其有效数字的位数是 4 位。

(2) 有效数字的正确表示

1) 有效数字的位数与小数点无关, 小数点的位置仅与所用单位有关。例如, 2468 Ω 与 2.468k Ω 都是 4 位有效数字。

2) “0” 只有在数字之间或在数字之后, 才是有效数字, 在数字之前则不是有效数字。

3) 若近似数的右边带有若干个零的数字, 通常把这个近似数写成 $a \times 10^n$ 形式, 而 $1 \leq a < 10$ 。利用这种写法, 可从 a 含有几个有效数字来确定近似数的有效位数。例如, 5.2×10^3 和 7.10×10^3 分别表示 2 位和 3 位有效数字; 4.800×10^3 表示 4 位有效数字。

在计算式中, 对常数 π 、 e 、 $\sqrt{2}$ 等的有效数字位数, 可认为无限制, 在计算中根据需要取位。

2. 数值修约规则

若近似值的位数很多, 则确定有效数字后, 其多余的数字应按下面的规则修约。

若以保留数字的末位为单位, 它后面的数字大于 0.5 单位者, 末位进一; 小于 0.5 单位者, 末位不变; 恰为 0.5 单位者, 则使末位凑成偶数, 即末位为奇数时进一, 末位为偶数时则末位数不变。

还要注意, 拟舍弃的数字, 若为两位以上数字, 不能连续地多次修约, 而只能按上述规则一次修约出结果来。

例如, 按上述修约规则, 将下面各个数据修约成 3 位有效位数:

拟修约数	修约值
32.6491	32.6 (5 以下舍)
472.501	473 (5 以上入)

4. 21500 4. 22 (5 前奇数进 1)

4. 22500 4. 22 (5 前偶数舍去)

3. 有效数字的运算规则

(1) 加减运算 各运算数据以其中小数点后位数最少的数据为准, 其余各数据修约后均保留比它多一位数。所得的最后结果与小数点后位数最少的位数相同。

例如, $13.6 + 0.0812 + 1.432$ 可写成

$$13.6 + 0.08 + 1.43 = 15.1$$

(2) 乘除运算 各运算数据以各数中有效位数最少的为准, 其余各数或乘积 (或商) 均修约到比它多一位数, 而与小数点位置无关。最后结果应与有效位数最少的数据位数相同。例如, $0.0212 \times 46.52 \times 2.07581$ 可写成

$$0.0212 \times 46.52 \times 2.076 = 2.05$$

4. 测量数据的记取

为了正确记取测量数据, 特提出直接读数 (简称读数)、示值和测量结果的概念, 表述如下:

(1) 直接读数 是指示仪表指针所指示的标尺值 (单位格值)。例如, 仪表指针所指示的标尺值分别为 0.6 格、9.5 格、84.3 格、106.5 格。

(2) 仪表常数 是用电测量仪表的标度尺每分格 (或数字仪表的每个字) 代表被测量的大小。用下式表示:

$$C_a = \frac{x_m}{a_m}$$

式中, x_m 为指示仪表量程; a_m 为指示仪表满刻度格数。

(3) 示值 指示仪表标度尺上的读数乘以仪表常数, 即

$$\text{示值} = \text{读数 (格)} \times \text{仪表常数 } (C_a)$$

示值的有效数字位数应与读数的有效数字位数相同。

例如, 仪表常数 $C_a = 150\text{mA}/150\text{div} = 1\text{mA}/\text{div}$ (注: div, 格)。直接读取与仪表指针所指示的标尺值分别为 0.6 格、9.5 格、84.3 格、106.5 格。对应四个位置的示值为 0.6mA、9.5mA、84.3mA、106.5mA。

若仪表常数 $C_a = 15\text{mA}/150\text{div} = 0.1\text{mA}/\text{div}$ 。则仪表指针所指示的标尺值分别为 0.6 格、9.5 格、84.3 格、106.5 格, 对应四个位置的示值为 0.06mA、0.95mA、8.43mA、10.65mA。

5. 测量结果的填写

测量结果是指由测量所得到的被测量值。在测量结果完整的表述中, 应包括测量误差和有关影响量的值。电路实验中, 对于最后的测量结果, 通常用测得值和相应的误差共同来表示。如以上例题中, 在 150mA 挡可能出现的最大绝对误差为 $\Delta I_m = \pm a\% \times I_m = \pm 0.5\% \times 150\text{mA} = \pm 0.75\text{mA}$ 。工程测量中误差的有效数字一般只取 1 位, 并采用的是进位法 (即只要后面该舍弃的数字是 1~9 都应进一位), 则 ΔI_m 应记为 $\pm 0.8\text{mA}$ 。所以最后结果应记为: $I_1 = (0.6 \pm 0.8) \text{mA}$, $I_2 = (9.5 \pm 0.8) \text{mA}$, $I_3 = (84.3 \pm 0.8) \text{mA}$, $I_4 = (106.5 \pm 0.8) \text{mA}$ 。

可见, 测得值的有效数字取决于测量结果的误差, 即测得值的有效数字的末位数与测量

误差末位数同一个数位。

6. 实验数据的列表表示法

列表是将一组实验数据中的自变量、因变量的各个数值依一定的形式和顺序相对应列出来。列表法的优点是简单易行，形式紧凑，数据便于比较，同一表格内可以同时表示几个变量的关系。一个完整的表格应包括表的序号、名称、项目、说明及数据来源。列表时，应注意以下几点：

- 1) 表的名称、数据的来源应做说明，使人对其内容一目了然。
- 2) 表格中项目应有名称单位，表内主项习惯上代表自变量，副项代表因变量。自变量的选择以实验中能够直接测量的物理量为好，如电压、电流等。
- 3) 数值的书写应整齐统一，并用有效数字的形式表示。
- 4) 自变量间距的选择应注意测量中因变量的变化趋势，且自变量取值应便于计算、便于观察、便于分析，并按增大或减小顺序排列。
- 5) 数值的书写应整齐统一，同一列的数值小数点上下对齐。

7. 实验数据的图形表示法

图形表示法可以更加形象和直观地看出函数变化规律，能够简明、清晰地反映几个物理量之间的关系。

图形表示法应分两个步骤：第一步是把测量数据点标记在适当的坐标系中；第二步是根据数据点画出曲线。做图时应注意以下几个问题：

(1) 合理地选用坐标 根据自变量的变化范围及其所表示的函数关系，可以选用直角坐标，单对数、双对数坐标等。最常用的是直角坐标。横坐标代表自变量，纵坐标代表因变量，坐标末端标明所代表的物理量及单位。

(2) 坐标分度原则

1) 在直角坐标系中，线性分度应用最为普遍。分度的原则是，使图上坐标分度对应的示值的有效数字位数能反映实验数据的有效数字位数。

2) 纵坐标与横坐标的分度不一定取得一样，应根据具体情况来选择。纵坐标与横坐标的比例也很重要，二者分度可以不相同，应根据具体情况适当选择。例如，图 1.1.4.1a 所示的比例较好，而图 1.1.4.1b 的选择则不当，变化规律不明显。

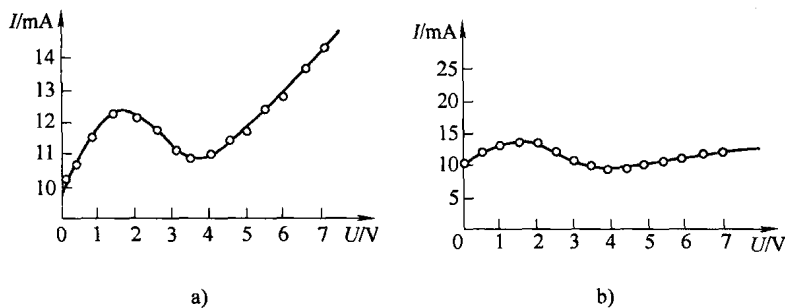


图 1.1.4.1 坐标比例的选择

3) 坐标分度值不一定从零开始。在一组数据中，坐标可用低于最低值的某一整数作起点，高于最高值的某一整数作终点，以使图形能占满幅坐标纸为适当。

(3) 根据数据描点 数据可用空心圆、实心圆、三角形等符号做标记，其中心应与测得

值相重合，符号大小在 1mm 左右。同一曲线上各数据点用同一符号，不同的曲线则用不同的符号。根据各点作曲线时，应注意到曲线一般应光滑匀整，只具少数转折点；曲线所经过的地方应尽量与所有的点相接近，但不一定通过图上所有的点。

1.2 EWB 的工作界面

使用电子设计自动化（EDA）软件和电子工作平台（EWB）进行电路设计与仿真，是现代电工电子实验教学和电子技术课程设计的重要手段。

启动 EWB5.0C，可以看到 Electronics Workbench 主窗口，它由菜单栏、常用工具栏、元器件选取栏和电路原理图编辑窗口组成，如图 1.2.1 所示。

由图 1.2.1 可以看到，EWB 模拟了一个实际的电子工作平台。主窗口的最上层是菜单栏，从中可以选择电路分析、实验与仿真等各种命令；第二层是常用工具栏，从中可以选择各种操作命令；第三层是元器件库栏，从中可以选取电路实验所需的各种元器件与测试仪器；下面最大的区域便是电路原理图编辑窗口，也可以称为电路工作区，在这里可以进行电路的连接、测试与仿真；最下层是电路描述框，用于电路说明。

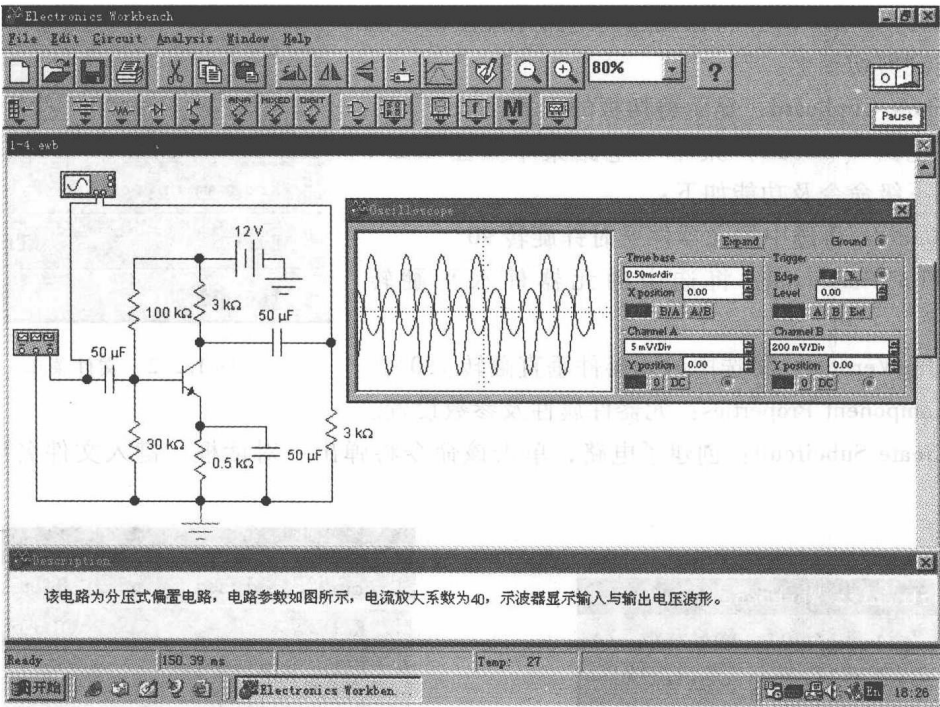


图 1.2.1 Electronics Workbench 主窗口

1. EWB 的菜单栏

EWB 菜单栏由文件、编辑、电路、分析、窗口和帮助等菜单组成。

(1) 文件（Eile）菜单 将鼠标指向图 1.2.1 中的文件菜单，单击即可打开图 1.2.2 所示的文件菜单。该菜单的下级命令及功能如下：

- 1) New：建立一个新文件。
- 2) Open：将已存盘的文件调入 EWB 并打开。

- 3) Save: 将已创建的电路原理图存入磁盘。
- 4) Save As: 将已创建的电路原理图换名存入磁盘。
- 5) Revert to Saved: 恢复原存储文件, 在此基础上的所有修改都将无效。
- 6) Import: 输入扩展名为 .NET 或 .CIR 的 Spice 网表文件并形成电路原理图。
- 7) Export: 将已创建的电路原理图以扩展名为 .NET、.CIR、.PCI、.SCR 和 .BMP 的文件存入磁盘, 以便其他软件使用。

8) Print: 打印, 当单击 Print 命令时, 将弹出打印菜单, 从中选择打印内容。

9) Print Setup: 打印设置, 其方法与 Windows 的打印设置相同。

10) Exit: 退出 EWB。

11) Install: 安装有关文件。

(2) 编辑 (Edit) 菜单 编辑菜单如图 1.2.3 所示, 其中的 Cut (剪切)、Copy (拷贝)、Paste (粘贴)、Delete (删除)、Select All (全选) 等命令及功能与 Windows 的相同, 所不同的命令与功能如下:

1) Copy as Bitmap: 将已创建的电路原理图以位图形式复制到剪切板上。

2) Show Clipboard: 显示剪切板的内容。

(3) 电路 (Circuit) 菜单 电路菜单如图 1.2.4 所示, 其下级命令及功能如下:

1) Rotate: 将选中的元器件逆时针旋转 90°。

2) Flip Horizontal: 将选中的元器件水平翻转 180°。

3) Flip Vertical: 将选中的元器件垂直翻转 180°。

4) Component Properties: 元器件属性及参数设置。

5) Create Subcircuit: 创建子电路, 单击该命令将弹出一对话框, 键入文件名后方可选择操作。

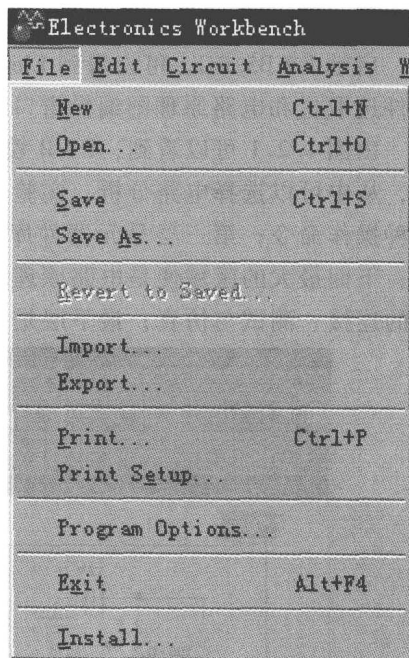


图 1.2.2 文件菜单

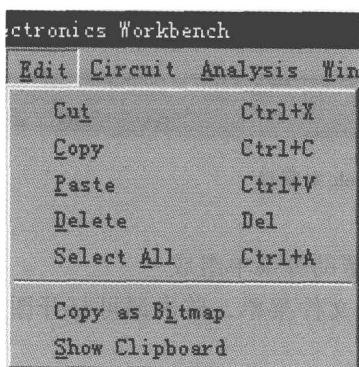


图 1.2.3 编辑菜单

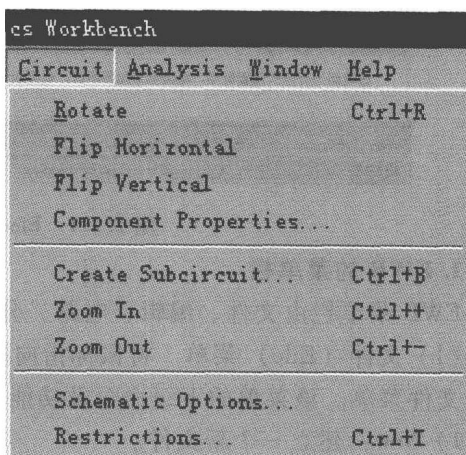


图 1.2.4 电路菜单

- 6) Zoom In: 按比例放大电路原理图编辑窗口。
- 7) Zoom Out: 按比例缩小电路原理图编辑窗口。
- 8) Schematic Options: 电路原理图显示选项。
- 9) Restrictions: 对电路组成与分析的限制。

(4) 分析 (Analysis) 菜单 分析菜单如图 1.2.5 所示, 其下级命令及功能如下:

1) Activate: 激活电路分析与仿真, 相当于接通电源开关。

2) Pause: 暂时停止电路的分析与仿真。

3) Stop: 停止电路的分析与仿真, 选择该命令相当于关闭电源开关。

4) Analysis Options: 电路分析选择项, 该命令包括 Global (通用设置)、DC (直流设置)、Transient (瞬态设置)、Device (元器件设置) 和 Instrument (仪器设置) 等选择项, 主要设置有关电路分析与仿真以及仪器与仪表使用方面的内容。一般电路分析与仿真时, 可选择默认值, 不需要设置; 而当分析中出现不收敛问题时, 需要根据情况重新设置。

5) DC Operating Point: 直流工作点分析, 并能显示直流工作点结果。

6) AC Frequency: 交流频率分析, 用于分析电路的频率特性。

7) Transient: 瞬态分析, 用于分析电路的时域响应。

8) Fourier: 傅里叶分析, 用于分析周期信号的直流分量、基波分量和谐波分量。

9) Noise: 噪声分析, 用于分析电路元器件的噪声对电路的影响。

10) Distortion: 失真分析, 用于分析电子电路中的各种失真。

11) Parameter Sweep: 参数扫描分析, 用于分析电路元器件参数变化对电路特性的影响。

12) Temperature Sweep: 温度扫描分析, 用于分析温度变化对电路特性的影响。

13) Pole-Zero: 极-零点分析, 用于分析电路中极点和零点数目及数值。

14) Transfer Function: 传递函数分析, 用于分析电路的传递函数。

15) Sensitivity: 灵敏度分析, 用于分析支路电流或节点电压对电路元器件参数变化的灵敏度。

16) Worst Case: 最坏情况分析, 用于分析某种因素导致电路特性变化的最坏可能性。

17) Monte Carlo: 蒙特卡罗分析, 用于分析电路元器件参数在误差范围内变化时对电路特性的影响。

18) Display Graphs: 图表显示窗口, 用于显示各种分析结果。不同的分析, 输出结果可

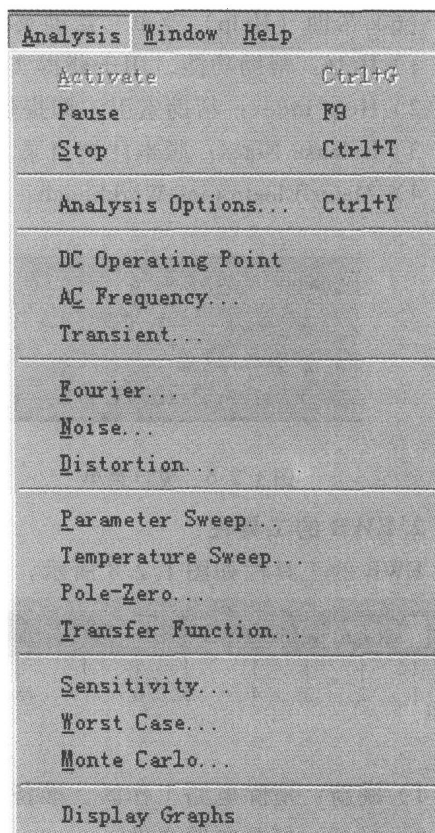


图 1.2.5 分析菜单

以是图形，也可以是数据。

(5) 窗口 (Window) 菜单 窗口菜单如图 1.2.6 所示，其下级命令及功能如下：

- 1) Arrange: 安排窗口，即重排窗口内容。
- 2) Circuit: 电路窗口，即显示电路编辑窗口内容。
- 3) Description: 描述窗口，即显示电路描述窗口内容。

(6) 帮助 (Help) 菜单 帮助菜单如图 1.2.7 所示，其下级命令及功能如下：

- 1) Help: 帮助功能，用于获得实时在线帮助。
- 2) Help Index: 帮助索引，即提供帮助目录。
- 3) Release Notes: 版本注解目录。
- 4) About Electronics Workbench: 版本说明。

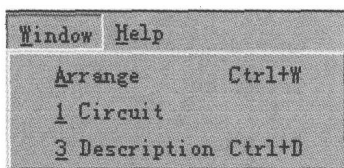


图 1.2.6 窗口菜单

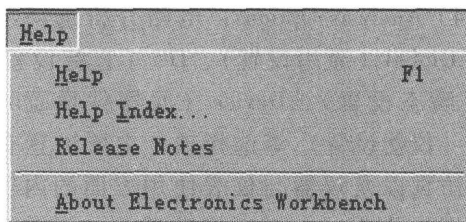


图 1.2.7 帮助菜单

2. EWB 的工具栏

EWB 的工具栏如图 1.2.8 所示，其中各按钮名称及其功能如下：

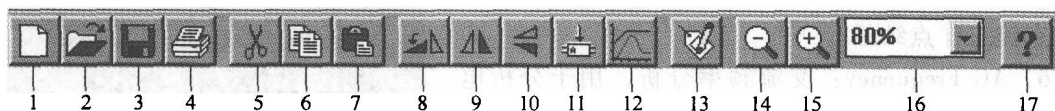


图 1.2.8 工具栏

- 1) 刷新: 清除电路工作区，准备生成新电路。
- 2) 打开: 打开电路文件。
- 3) 存盘: 保存电路文件。
- 4) 打印: 打印电路文件。
- 5) 剪切: 将选中的电路剪切至剪贴板。
- 6) 复制: 将选中的电路复制至剪贴板。
- 7) 粘贴: 将剪贴板内容粘贴至电路工作区。
- 8) 旋转: 将选中的元器件逆时针旋转 90° 。
- 9) 水平翻转: 将选中的元器件水平翻转 180° 。
- 10) 垂直翻转: 将选中的元器件垂直翻转 180° 。
- 11) 创子电路: 生成子电路。
- 12) 分析曲线: 调出曲线分析框。
- 13) 元器件特性: 调出元器件特性对话框。
- 14) 缩小: 将电路按一定比例缩小。
- 15) 放大: 将电路按一定比例放大。
- 16) 显示比例: 选择电路图的缩放比例。