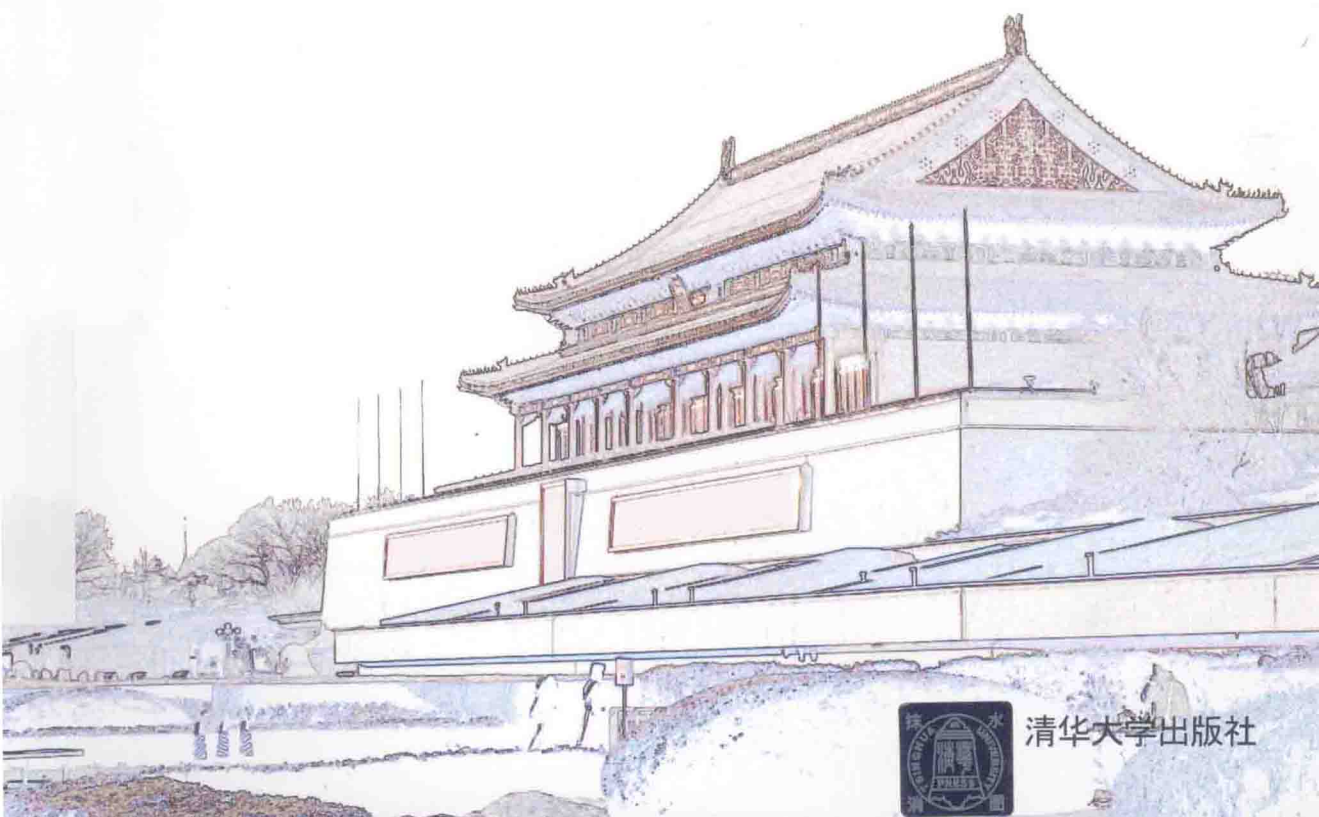


全国普通高校
电子信息与
电气学科
基础规划教材

电工学实验教程

(第2版)

吴根忠 李剑清 顾伟驷 余佩琼 编著



清华大学出版社

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

电工学实验教程

(第2版)

吴根忠 李剑清 顾伟驷 余佩琼 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书是为高等院校非电类专业开设电工学实验课而编写的。书中首先简要介绍了常用仪器仪表和Multisim 仿真软件的使用,然后详细讲述了15个实际操作实验;最后介绍了虚拟仿真实验,这些仿真实验基本与常用的实际操作实验相对应,可以方便学生在进行实际操作实验前进行仿真,对实际操作实验具有指导作用。

本书适用于高等学校理工科非电类各专业的“电工学实验”教学,也可作为高职高专、继续教育学院等工科相关专业的实验教程。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

电工学实验教程/吴根忠等编著.--2版.--北京:清华大学出版社,2014

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

ISBN 978-7-302-36686-7

I. ①电… II. ①吴… III. ①电工实验—高等学校—教材 IV. ①TM-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第117284号

责任编辑:曾 珊

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京市清华园胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14.25 字 数:343千字

版 次:2007年7月第1版 2014年10月第2版 印 次:2014年10月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00元

产品编号:059628-01

前言

本书第1版在2007年出版后,已历时7年,期间得到了许多老师和学生的指正。同时,根据电学实验教学的发展和目前对实验教学要求的提高,此次再版对本书内容进行了修订,具体的修改说明如下:

(1) 第1版中各个实际操作实验的内容基本保持不变,仅对个别地方进行了修改,主要是为了使实验线路图与实验台的实际线路更加一致。

(2) 由于机电类和化工类的学生对电学课程的要求有所提高,同时也为了适应教学改革的需要,使得学生的实验不受场地和时间的限制,在第2版中增添了虚拟仿真实验。这些仿真实验基本与常用的实际操作实验相对应,可以方便学生在进行实际操作实验前进行仿真,对实际操作实验也有指导作用。

(3) 对目前较为常用的 Multisim 仿真软件进行了简要介绍,使学生能基本掌握该软件的使用方法。

第2版增加的 Multisim 仿真软件使用说明(第2章)和虚拟仿真实验(第4章)由吴根忠执笔。在全书的编写过程中,得到了许多老师的大力支持和帮助,在此表示最诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2014年3月

绪论	1
第 1 章 常用仪器仪表使用说明	10
1.1 DF1641C 函数信号发生器使用说明	10
1.1.1 主要技术指标	10
1.1.2 工作原理	11
1.1.3 结构特性	12
1.1.4 使用与维护	12
1.2 GDM-8135 数字式万用表使用说明	15
1.2.1 产品介绍	15
1.2.2 产品规格	15
1.2.3 操作说明	17
1.2.4 安全注意事项	18
1.3 DF2170A 交流毫伏表使用说明	18
1.3.1 技术参数	18
1.3.2 工作原理	19
1.3.3 使用方法	19
1.3.4 维护和保养	21
1.4 GOS-6021 双通道示波器使用说明	21
1.4.1 产品介绍	21
1.4.2 技术规格	22
1.4.3 使用前的注意事项	24
1.4.4 面板介绍	25
1.4.5 操作方法	31
1.4.6 维护	40
1.5 MC1098 单相电量仪表板使用说明	41
1.5.1 产品介绍	41
1.5.2 面板布局	41
1.5.3 技术参数	42
1.5.4 使用说明	42
1.6 兆欧表使用说明	42
1.7 DM-6234P 数字式光电转速表使用说明	43
1.7.1 特性	43

1.7.2	测量方法	44
1.7.3	测量条件	44
1.7.4	低转速测量	44
1.7.5	存储显示按钮	44
第2章	Multisim 8 仿真软件使用说明	45
2.1	Multisim 8 基本界面	45
2.1.1	菜单栏	45
2.1.2	工具栏	50
2.1.3	快捷键栏	50
2.1.4	元件库栏	51
2.1.5	仪器仪表栏	52
2.1.6	其他	52
2.2	Multisim 8 基本操作	52
2.2.1	文件基本操作	52
2.2.2	元器件基本操作	53
2.2.3	文本基本编辑	53
2.2.4	图纸标题栏编辑	53
2.2.5	子电路创建	54
2.3	常用虚拟仪器的使用说明	54
2.3.1	数字万用表	55
2.3.2	瓦特表	55
2.3.3	函数信号发生器	56
2.3.4	示波器	57
2.4	基本分析方法	61
2.4.1	直流工作点分析	61
2.4.2	交流分析	63
2.4.3	瞬态分析	64
2.5	电路的搭建与仿真	66
2.5.1	元器件	66
2.5.2	编辑原理图	67
2.5.3	电路仿真	73
第3章	实际操作实验	75
3.1	直流电路	75
3.1.1	实验目的	75
3.1.2	实验原理概述	75
3.1.3	实验仪器设备	77

3.1.4	预习要求	77
3.1.5	实验步骤	78
3.1.6	实验总结	78
3.1.7	实验注意事项	79
3.2	正弦稳态交流电路相量的研究	79
3.2.1	实验目的	79
3.2.2	实验原理简述	79
3.2.3	实验仪器设备	81
3.2.4	预习要求	81
3.2.5	实验步骤	82
3.2.6	实验总结	82
3.2.7	实验注意事项	83
3.3	三相交流电路	83
3.3.1	实验目的	83
3.3.2	实验原理简述	83
3.3.3	实验仪器设备	85
3.3.4	预习要求	85
3.3.5	实验步骤	85
3.3.6	实验总结	86
3.3.7	注意事项	86
3.4	三相异步电动机及继电接触控制	87
3.4.1	实验目的	87
3.4.2	实验原理简述	87
3.4.3	实验仪器设备	91
3.4.4	预习要求	91
3.4.5	实验步骤	92
3.4.6	实验总结	93
3.4.7	实验注意事项	93
3.5	常用电子仪器的使用练习	93
3.5.1	实验目的	93
3.5.2	实验原理简述	93
3.5.3	预习要求	96
3.5.4	实验仪器设备	96
3.5.5	实验步骤	96
3.5.6	实验总结	98
3.5.7	注意事项	98
3.6	单管电压放大器	98
3.6.1	实验目的	98

3.6.2	实验原理简述	98
3.6.3	实验仪器设备	100
3.6.4	预习报告	101
3.6.5	实验内容	101
3.6.6	实验总结	103
3.7	直流稳压电源	103
3.7.1	实验目的	103
3.7.2	实验原理	103
3.7.3	实验仪器设备	105
3.7.4	预习要求	105
3.7.5	实验内容	106
3.7.6	实验总结	107
3.7.7	注意事项	107
3.8	集成运算放大器	107
3.8.1	实验目的	107
3.8.2	实验原理简述	107
3.8.3	实验仪器设备	111
3.8.4	预习要求	111
3.8.5	实验内容	111
3.8.6	实验总结	113
3.8.7	注意事项	113
3.9	RC 正弦波振荡器的研究	113
3.9.1	实验目的	113
3.9.2	实验原理简述	113
3.9.3	实验仪器设备	115
3.9.4	预习要求	115
3.9.5	实验步骤	116
3.9.6	实验总结	116
3.10	TTL 与非门和触发器	116
3.10.1	实验目的	116
3.10.2	实验原理简述	117
3.10.3	实验仪器设备	118
3.10.4	预习要求	119
3.10.5	实验步骤	120
3.10.6	实验报告	121
3.10.7	注意事项	122
3.11	计数、译码和显示	122
3.11.1	实验目的	122

3.11.2	实验原理简述	122
3.11.3	实验仪器设备	125
3.11.4	预习要求	126
3.11.5	实验步骤	126
3.11.6	实验总结	127
3.11.7	注意事项	127
3.12	步进电机控制电路的研究	128
3.12.1	实验目的	128
3.12.2	实验原理简述	128
3.12.3	实验仪器设备	136
3.12.4	预习要求	137
3.12.5	实验内容	137
3.12.6	实验总结	139
3.12.7	注意事项	139
3.13	可控硅调光电路	139
3.13.1	实验目的	139
3.13.2	实验原理简述	139
3.13.3	实验仪器设备	142
3.13.4	预习要求	143
3.13.5	实验步骤	143
3.13.6	实验总结	144
3.13.7	实验注意事项	144
3.14	自动开启延时照明电路	145
3.14.1	实验目的	145
3.14.2	实验原理简述	145
3.14.3	实验仪器设备	148
3.14.4	预习要求	148
3.14.5	实验步骤	149
3.14.6	实验总结	150
3.14.7	实验注意事项	150
3.15	单相变压器	150
3.15.1	实验目的	150
3.15.2	概述	150
3.15.3	实验仪器设备	152
3.15.4	预习要求	152
3.15.5	实验内容	152
3.15.6	实验总结	154

第4章 虚拟仿真实验	155
4.1 叠加定理的仿真研究	155
4.1.1 实验目的	155
4.1.2 实验原理简述	155
4.1.3 实验内容	155
4.1.4 实验总结	158
4.1.5 注意事项	158
4.2 戴维南定理和诺顿定理的仿真研究	158
4.2.1 实验目的	158
4.2.2 实验原理简述	158
4.2.3 实验内容	159
4.2.4 实验总结	160
4.2.5 注意事项	161
4.3 RC一阶电路的仿真研究	161
4.3.1 实验目的	161
4.3.2 实验原理简述	161
4.3.3 实验内容	162
4.3.4 实验总结	164
4.3.5 注意事项	164
4.4 正弦稳态交流电路的仿真研究	164
4.4.1 实验目的	164
4.4.2 实验原理简述	165
4.4.3 实验内容	166
4.4.4 实验总结	168
4.4.5 注意事项	168
4.5 三相交流电路的仿真研究	168
4.5.1 实验目的	168
4.5.2 实验原理简述	168
4.5.3 实验内容	169
4.5.4 实验总结	171
4.5.5 注意事项	171
4.6 单管电压放大器的仿真研究	172
4.6.1 实验目的	172
4.6.2 实验原理简述	172
4.6.3 实验内容	172
4.6.4 实验总结	175
4.6.5 注意事项	175
4.7 直流稳压电源的仿真研究	175

4.7.1	实验目的	175
4.7.2	实验原理简述	175
4.7.3	实验内容	176
4.7.2	实验总结	179
4.7.5	注意事项	179
4.8	集成运算放大器的仿真研究	179
4.8.1	实验目的	179
4.8.2	实验原理简述	180
4.8.3	实验内容	180
4.8.4	实验总结	184
4.8.5	注意事项	184
4.9	TTL 与非门和触发器的仿真研究	184
4.9.1	实验目的	184
4.9.2	实验原理简述	184
4.9.3	实验内容	185
4.9.4	实验总结	189
4.9.5	注意事项	189
4.10	计数、译码和显示电路的仿真研究	189
4.10.1	实验目的	189
4.10.2	实验原理简述	189
4.10.3	实验内容	190
4.10.4	实验总结	192
4.10.5	注意事项	192
4.11	可控硅调光电路的仿真研究	192
4.11.1	实验目的	192
4.11.2	实验原理简述	193
4.11.3	实验内容	193
4.11.4	实验总结	194
4.11.5	注意事项	194
附录一	实验报告样例	195
附录二	实验报告	200
参考文献		213

绪 论

实验须知

1. 实验的意义和目的

电工学实验是电工学课程重要的实践教学环节。实验的目的不仅仅是验证基本理论知识,更重要的是通过实验加强学生的实验手段和实践技能,培养学生分析问题、解决实际问题 and 应用知识的能力以及工程实践的能力,充分放手让学生自行设计、自主实验,真正培养学生的实践动手能力,全面提高学生的综合素质。学生通过实验可以掌握有关电路连接、测量和故障排除等技能,学会正确使用常见的仪器设备和仪表,掌握一些基本的测试技术、实验方法以及数据采集、处理与分析的方法。

2. 实验规则

实验是电工学课程重要的实践教学环节,实验的目的不仅是巩固和加深理解所学知识,更重要的是训练学生的实验手段和实践技能,培养实际动手能力,树立工程实际观点和严谨的科学作风。

(1) 根据电工学课程大纲的规定,电工学实验根据学生本学期实验情况综合评定,分数计入本课程期末成绩。

(2) 每位学生必须按规定完成实验课,因故不能参加实验者,课前应向指导教师请假。对所缺实验要在期末前的规定时间内补齐。

(3) 每次实验课前,必须做好预习,真正理解和明确实验题目、目的、内容、步骤和操作流程,写出实验预习报告,并接受指导教师的检查和提问。对既不写预习报告,又回答不出问题者,不准其做实验。

(4) 每次实验课,学生必须提前进入实验室,按要求找好座位,检查所需实验设备,做好实验前的准备工作。

(5) 做实验前,首先要确定实验电路所需电源的性质、极性、大小和测试仪表的量程等,了解实验设备的铭牌数据,以免出现错误和损坏设备。

(6) 不准任意搬动和调换实验室内设备,非本次实验所用的仪器设备,未经指导教师允许不得动用。

(7) 要注意测试仪表和设备的正确使用方法,对每次实验中所使用的设备,要了解其原理和使用方法。在没有掌握仪器设备的使用方法前,不得贸然通电使用,否则,损坏后果自负。

(8) 要求每位学生在实验过程中,必须具有严谨的学习态度和认真、踏实、一丝不苟的科学作风。无特殊原因,中途不得退出实验,否则本次实验无效。

(9) 实验过程中,如出现事故,应马上断开电源开关,然后向指导教师如实反映事故情况,并分析原因,如有损坏仪表和设备时,应马上提出,按有关规定处理。

(10) 实验室内要保持安静、整洁的学习环境,不得大声喧哗,不得随地吐痰和随地乱扔杂物。

(11) 每次实验结束之后,实验数据和结果一定要经指导教师检查,确认正确无误后,方可拆线,整理好实验台和周围卫生,然后离开实验室。

(12) 实验课后,每位学生必须按实验指导书的要求,独立写好实验报告。实验报告要及时交给指导老师批阅。

3. 实验预习要求

实验前应仔细阅读实验教材中的相关内容,了解本次实验的实验目的、实验原理、实验内容和注意事项等,并按要求写好预习报告,上实验课时应携带预习报告,交辅导教师审阅。

预习报告包括以下内容:

- (1) 实验目的。
- (2) 实验原理。
- (3) 实验线路图。
- (4) 本次实验所用仪器、设备的使用方法和注意事项。
- (5) 根据预习要求计算实验数据,分析实验现象。
- (6) 根据实验步骤和实验内容设计实验数据记录表格。
- (7) 实验注意事项。

4. 实验注意事项

(1) 实验的安全是实验过程中最为重要的,学生在做实验过程中必须始终牢记这一点。实验者做到在实验过程中不带电操作,在实验前做好充分的预习,对实验设备和实验内容充分理解以及规范的实验操作,都能提高实验的安全性。

(2) 在实验前对实验设备进行检查。按照实验指导书核对仪器、仪表及使用到的其他设备的类型、规格和数量。如果是设计性实验,则应按设计选定的设备进行核对。了解设备使用方法及线路板的组成和接线要求。

(3) 按照实验指导书给出的线路图或自己设计的线路图进行接线,实验电路走线、布线应简洁明了、便于测量,导线长短安排合理,不允许因为导线不够长而把两根导线对接后使用,否则很容易发生触电事故。

(4) 完成实验接线后,按电路逐项检查各仪表、设备、元器件的位置、极性是否正确。确定无误后,再请指导老师进行复查,经老师确认后方可通电进行实验。实验中严格遵循操作规程,改接线路和拆线一定要在断电的情况下进行,绝对不允许带电操作。如发现异常声音、气味或其他事故情况,应立即切断电源,报告指导教师检查处理。

(5) 实验时每组同学应分工协作,轮流接线、记录、操作等,使每个同学受到全面训练。测量数据或观察现象要认真细致,实事求是。使用仪器仪表要符合操作规程,切勿乱调旋钮、挡位。注意仪表的正确读数,记录数据时要注意有效数据的位数。

(6) 实验结束后,实验记录交指导教师查看并认为无误后,方可拆除线路。最后,应清理实验桌面,清点仪器设备。

(7) 未经许可,不得动用其他组的仪器设备或工具等物。爱护公物,发生仪器设备等损坏事故时,应及时报告指导教师,按有关实验管理规定处理。

(8) 自觉遵守学校和实验室管理的其他有关规定。

5. 实验总结

实验报告是培养学生科学实验的总结能力和分析思维能力的有效手段,也是一项重要的基本功训练,它能很好地巩固实验成果,加深对基本理论的认识和理解,从而进一步扩大

知识面。

实验报告是一份技术总结,应根据所得数据和所观察到的实验现象完成实验报告,要求文字简洁,语言通顺,内容清楚,图表数据齐全规范,一律用学校规定的实验报告纸认真书写。实验报告的重点是实验数据的整理与分析,报告内容应包括实验目的、实验原理、实验使用仪器和元器件、实验内容和结果以及实验结果分析讨论等,其中实验内容和结果是报告的主要部分,它应包括实际完成的全部实验,内容如下。

(1) 实验原始记录:实验电路(包括元器件参数)、电路原理的分析说明、实验数据与波形以及实验过程中出现的故障记录及解决的方法等,对于设计性课题,还应有整个设计过程和关键的设计技巧说明。原始记录必须有指导教师签字,否则无效。

(2) 实验结果分析、讨论及结论:对原始记录进行必要的分析、整理,包括实验数据与预算结果的比较,产生误差的原因及减小误差的方法,实验故障原因的分析等。数据整理和计算结果尽量以表格列出,物理量要写出单位,表格后面要有计算公式和计算过程。曲线用坐标纸画,先选好坐标,标上物理量及单位,曲线要求光滑,线条粗细均匀,写上曲线名称。

(3) 完成实验总结中指定的思考题。

(4) 总结本次实验的体会和收获,总结的内容一般应对重要的实验现象、结论加以讨论,以进一步加深理解,此外,对实验中的异常现象,可作一些简要说明,实验中有何收获,可谈一些心得体会。

在编写实验报告时,常常要对实验数据进行科学的处理,才能找出其中的规律,并得出有用的结论。常用的数据处理方法是列表和作图。实验所得的数据可分类记录在表格中,这样便于对数据进行分析 and 比较。实验结果也可绘成曲线,直观地表示出来。在作图时,应合理选择坐标刻度和起点位置(坐标起点不一定要从零开始),并要采用方格纸绘图。当标尺范围很宽时,应采用对数坐标纸。另外,在波形图上通常还应标明幅值、周期等参数。

预习报告在实验前完成,实验报告应在实验完成后一周内交给实验指导教师批阅。

6. 实验安全用电规则

安全用电是实验中始终需要注意的重要事项。为了做好实验,确保人身和设备的安全,在做实验时,必须严格遵守下列安全用电规则:

(1) 实验中的接线、改接、拆线都必须在切断电源的情况下进行,线路连接完毕再接通电源。

(2) 在电路通电情况下,人体严禁接触电路中不绝缘的金属导线和连接点带电部位,以免触电。一旦发生触电事故,应立即切断电源,保证人身安全。

(3) 实验中,特别是设备刚投入运行时,要随时注意仪器设备的运行情况,如发现有超量程、过热、异味、冒烟、火花等现象出现时,应立即断电,并请指导老师检查。

(4) 了解有关电器设备的规格、性能及使用方法,严格按照要求操作。注意仪器仪表的种类、量程和接线方法,保证设备安全。

(5) 实验时应精力集中,衣服、头发等不要接触电机及其他可以移动的电器设备,以防止安全事故发生。

实验基础知识

1. 有效数字

有效数字是指在分析工作中实际能够测量到的数字,即包括最后一位估计的、不确定的数字。通常把通过直读获得的准确数字叫做可靠数字;把通过估读得到的那部分数字叫做存疑数字。把测量结果中能够反映被测量大小的带有一位存疑数字的全部数字叫有效数字。

由于有效数字的最后一位是不确定度所在的位置,因此有效数字在一定程度上反映了测量值的不确定度(或误差限值)。测量值的有效数字位数越多,测量的相对不确定度越小;有效数字位数越少,相对不确定度就越大。可见,有效数字可以粗略反映测量结果的不确定度。

测量结果都是包含误差的近似数据,在其记录、计算时应以测量可能达到的精度为依据来确定数据的位数和取位。如果参加计算的数据的位数取少了,就会损害测量结果的精度,并影响计算结果的应有精度;如果位数取多了,易使人误认为测量精度很高,并且增加不必要的计算工作量。

由于有效数字中只应保留一位欠准数字,因此在记录测量数据时,只有最后一位有效数字是欠准数字。

1) 数字修约规则

我国科学技术委员会正式颁布的《数字修约规则》,通常称为“四舍六入五成双”法则,即,尾数 ≤ 4 时舍去,尾数 > 6 时进位;当尾数为5时,则应视末位数是奇数还是偶数而定——5前为偶数应将5舍去,5前为奇数应将5进位。

这一法则的具体运用如下:

(1) 将28.175和28.165处理成4位有效数字,则分别为28.18和28.16。

(2) 若舍弃的第1位数字大于5,则其前一位数字加1,例如28.2645处理成3位有效数字时,其舍去的第1位数字为6,大于5,则有效数字应为28.3。

(3) 若舍去的第1位数字等于5,而其后的数字全部为零时,则视被保留末位数字为奇数或偶数(零视为偶)而定进或舍,末位数是奇数时进1,末位数为偶数时不进1,例如28.350、28.250、28.050处理成3位有效数字时,分别为28.4、28.2、28.0。

(4) 若舍弃的第1位数字为5,而其后的数字并非全部为零时,则进1,例如28.2501,只取3位有效数字时,成为28.3。

(5) 若舍弃的数字包括几位数字时,不得对该数字进行连续修约,而应根据以上各条作一次处理。例如2.154546,只取3位有效数字时,应为2.15,而不得按以下方法连续修约为2.16:

2.154546 $\rightarrow$ 2.15455 $\rightarrow$ 2.1546 $\rightarrow$ 2.155 $\rightarrow$ 2.16。

2) 有效数字

有效数字就是一个数从左边第1个不为0的数字开始到精确的数位之内的所有数字(包括0,科学计数法不计10的 N 次方),称为有效数字。简单地说,把一个数字前面的0都去掉,从第1个正整数到精确的数位之内所有的都是有效数字了。

例如:0.0109,前面两个0不是有效数字,后面的109均为有效数字(注意:中间的0也

算); 3.109×10^5 中, 3、1、0、9 均为有效数字, 后面的 10 的 5 次方不是有效数字; 5200000000, 全部都是有效数字; 0.0230, 前面的两个 0 不是有效数字, 后面的 2、3、0 均为有效数字(后面的 0 也算); 1.20 有 3 个有效数字; 1100.120 有 7 位有效数字; 2.998×10^4 中, 保留 3 个有效数字为 3.00×10^4 。

对数的有效数字为小数点后的全部数字, 如 $\lg x = 1.23$ 的有效数字为 2、3, $\lg a = 2.045$ 的有效数字为 0、4、5, $\text{pH} = 2.35$ 的有效数字为 3、5。

3) 计算规则

对于加减法: 以小数点后位数最少的数据为基准, 其他数据修约至与其相同, 再进行加减计算, 最终计算结果保留最少的位数。

例如: 计算 $50.1 + 1.45 + 0.5812$ 时, 可以修约为 $50.1 + 1.4 + 0.6 = 52.1$ 。

对于乘除法: 以有效数字最少的数据为基准, 其他有效数修约至相同, 再进行乘除运算, 计算结果仍保留最少的有效数字。

例如: 计算 $0.0121 \times 25.64 \times 1.05728$ 时, 可以修约为 $0.0121 \times 25.6 \times 1.06$ 。计算后结果为: 0.3283456, 结果仍保留为 3 位有效数字。记录为 $0.0121 \times 25.6 \times 1.06 = 0.328$ 。

例如: 计算 $2.5046 \times 2.005 \times 1.52$ 时, 可以修约为 $2.50 \times 2.00 \times 1.52$ 。当把 1.13532×10^{10} 保留 3 个有效数字时, 结果为 1.14×10^{10} 。

运算中若有 π 、 e 等常数, 以及 $\sqrt{2}$ 、 $1/\sqrt{2}$ 等系数, 其有效数字可视为无限, 不影响结果有效数字的确定。

一般来讲, 有效数字的运算过程中, 有很多规则。为了应用方便, 本着实用的原则, 加以选择后, 将其归纳整理为如下两类。

(1) 一般规则。

① 可靠数字之间运算的结果为可靠数字。

② 可靠数字与存疑数字、存疑数字与存疑数字之间运算的结果为存疑数字。

③ 测量数据一般只保留一位存疑数字。

④ 运算结果的有效数字位数不由数学或物理常数来确定, 数学与物理常数的有效数字位数可任意选取, 一般选取的位数应比测量数据中位数最少者多取一位。例如: π 可取 = 3.14 或 3.142 或 3.1416……在公式中计算结果不能由于“2”的存在而只取一位存疑数字, 而要根据其他数据来决定。

⑤ 运算结果将多余的存疑数字舍去时应按照“四舍六入五成双”的法则进行处理, 即小于等于 4 则舍; 大于 5 则入; 等于 5 时, 根据其前一位按“奇进偶舍”处理(等几率原则)。例如, 3.625 化为 3.62, 4.235 则化为 4.24。

(2) 具体规则。

① 有效数字相加(减)的结果的末位数字所在的位置应按各量中存疑数字所在数位最前的一个为准来决定。例如:

$$\begin{array}{r} 30.4 \\ + 4.325 \\ \hline 34.725 \end{array} \qquad \begin{array}{r} 26.65 \\ - 3.905 \\ \hline 22.745 \end{array}$$

取 $30.4 + 4.325 = 34.7$, $26.65 - 3.905 = 22.74$ 。

② 乘(除)运算后的有效数字的位数与参与运算的数字中有效数字位数最少的相同。

乘方、开方后的有效数字位数与被乘方和被开方之数的有效数字的位数相同。

③ 指数、对数、三角函数运算结果的有效数字位数由其改变量对应的数位决定。

④ 有效数字位数要与不确定度位数综合考虑。

一般情况下,表示最后结果的不确定度的数值只保留1位,而最后结果的有效数字的最后一位与不确定度所在的位置对齐。如果实验测量中读取的数字没有存疑数字,不确定度通常需要保留两位。

但要注意:具体规则有一定适用范围,在通常情况下,由于近似的原因,如不严格要求,可认为是正确的。

对于乘方:乘方的有效数字和底数相同。例如: $0.34^2 = 1.16 \times 10^{-1}$

2. 测量数据的记录

1) 数字式仪表读数的记录

数字式仪表可直接读出测量值,读出值即可作为测量结果直接记录而不需要再经换算。但要注意的是,在用数字式仪表测量时,不同量程所测得结果的有效数字位数是不一样的,量程选用不当会减少有效数字,所以在实验过程中要合理选择数字式仪表的量程。例如,用某一数字式电压表测量一电压值,在不同量程时的显示值如表0-1所示。

表 0-1 数字式电压表的显示值

量程/V	2	20	200
显示值/V	1.568	1.57	1.6
有效数字位数	4	3	2

由表0-1可见,在不同量程时有效数字的位数是不同的,在此例中,选择“2V”这个量程才是最合适的。一般而言,在实际测量中,要求测量值小于量程,又要尽可能接近所选的量程,当还有比显示值更小的量程时,要选择更小挡的量程。

2) 指针式仪表读数的记录

和数字式仪表不同,指针式仪表的指示值一般不是被测量的值,而要经过换算才能得到所需的测量结果,换算公式如下:

测量值 = 读数(格) × 仪表常数(C_x) = 读数(格) × 仪表量程(x_m) / 满刻度格数(α_m)

式中,读数也就是指针式仪表的指示值,它是仪表指针所指出的标尺值,用格数表示;仪表常数(C_x)为指针式仪表每分格所代表的被测量的大小,也称为分格常数;仪表常数(C_x) = 仪表量程(x_m) / 满刻度格数(α_m)。

对于同一仪表,选择的量程不同,则分格常数也不同,在根据换算公式计算测量值时要注意,测量值的有效数字的位数应与读数的有效位数一致。

3. 测量误差

1) 指针式仪表的测量误差及准确度

在测量过程中,由于测量设备不准确、测量方法不完善等原因,都会不可避免地使测量结果与被测量的实际值大小产生差别。这种差别称为测量误差。测量误差的表示方法通常可分为绝对误差和相对误差两种。

绝对误差是被测量的测得值 A 与实际值 A_0 的差值。绝对误差 ΔA 可表示为

$$\Delta A = A - A_0$$