

教育部新世纪高等教育教学改革工程课题研究成果

电 路

实验教程

李书杰 侯国强 主编

冶金工业出版社

教育部新世纪高等教育教学改革工程课题研究成果

电路实验教程

李书杰 侯国强 主编

北 京

冶金工业出版社

2004

内 容 简 介

本书是根据电类专业电路课程对实验要求编写的,旨在帮助学生用学过的理论解决实际问题,巩固、消化基本理论,获得实验技能和科学研究的方法。

全书共分5章,内容主要包括:实验综述;28个典型电路实验,包括基尔霍夫定律与电位图、叠加原理和替代定理、电路元件的伏安特性、交流电路电压、电流相位图、串联谐振电路、三相交流电路、负阻抗变换器、电路瞬态计算机辅助分析等,各实验均附有思考题;电路测量的基本知识;电工仪器、仪表;电路元件、数字式仪表及电子设备的使用。书末还附有GDS高级电工系统实验装置使用说明。

图书在版编目(CIP)数据

电路实验教程 / 李书杰,侯国强主编. —北京:
冶金工业出版社,2004.5

高等学校教学用书

ISBN 7-5024-3478-X

I. 电… II. ①李… ②侯… III. 电路—实验
IV. TM13-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 013280 号

出版人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷39号,邮编100009)

责任编辑 方茹娟 美术编辑 王耀忠

责任校对 卿文春 李文彦 责任印制 李玉山

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2004年5月第1版,2004年5月第1次印刷

170mm×227mm; 12印张; 228千字; 178页; 1-3000册

19.00元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街46号(100711) 电话:(010)65289081

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

高等教育教学改革实验教材 编委会

主 任	张玉柱		
副主任	李福进	李昌存	谭 靖
委 员	崔恩良	王志江	阚连合
	梁英华	贾晓鸣	侯国强
	艾立群	郭立稳	封孝信
	邹继兴	富 立	刘廷权
	韩润春		

序

21 世纪是信息时代,是经济大发展的时期,时代要求培养更多的高素质、高能力、有开拓进取精神的创新型人才。高等院校培养这种新型人才,实验教学是不可或缺的重要手段。实验教学是培养学生能力的重要途径,不仅要使学生通过实验来掌握基本实验手段,更重要的是要使学生具备应用这些手段从事科学研究的独立工作能力。在实验教学中,仅仅传授实验技术是不够的,必须注重学生能力的培养,使学生在知识和能力方面得到全面发展。古人云:“授之以鱼,只供一饭之需;教人以渔,则终生受用无穷。”培养能力无异于给学生一把开启知识之门的钥匙,有了这把钥匙才能使他们在知识的海洋里泛舟冲浪。21 世纪的高等教育要求彻底改变实验教学的地位。要想从根本上解决问题,应该根据培养能力的要求,建立实验教学的体系,打破实验教学依附于理论教学、为理论教学服务的传统观念,以全面培养学生综合素质,培养学生科学研究思维方法、开发应用工程技术的综合能力、创新思维和分析问题解决问题的能力为主线,构建与理论教学平行并存、相辅相成的实验教学的新体系。

按教育部新世纪高等教育教学改革工程的要求,我们组织教师编写了这套实验教材,力求立意新颖,框架结构、章节层次安排合理,重点、难点处理得当,符合教学规律。此外,还要求具有以下特点:一是处理好与理论课的关系,建立独立的实验教学体系;二是设计性、综合性和创新型实验占有相当比例,并大多自成章节;三是对实验理论和实验方法均有比较系统的论述,有利于学生整体科研素质的培养和提高;四是对实验中常用的仪器,尤其是新型仪器设备的原理、构造、操作规程有较详尽的介绍,且附有一些常用的国标、图表和数据,使学生既可以学习掌握查找文献、数据的方法,又可在今后的工作中将本书作为参考书使用。

系统地编写实验教材,我们才刚刚起步,书中不成熟、不完善之处在所难免。愿编者在以后的教学实践中,不断积累经验、不断完善,使教材更加丰满成熟;愿更多的教师和实验技术人员关心和参与实验教材的编写工作;愿实验教材的百花园中再添奇葩。

河北理工大学校长

张 玉 柱

河北省高校实验室工作研究会副理事长

前 言

实验教学是高等教育的基本教学内容,是帮助学生巩固、消化基本理论、获得实验技能和科学研究方法的重要环节。

本书是根据电类专业电路课程对实验的要求,吸收了多所院校在电路实验教学方面的经验,并配合综合性、数字化的新型实验教学平台编写的。

全书共分两大部分,第一部分是实验部分(共 28 个),由基本实验、综合设计性实验及计算机电路辅助分析三部分组成;第二部分是实验基本知识及仪器仪表,内容包括测量的基本知识,电工测量仪器、仪表,数字仪表及电子设备的使用等。

本书由李书杰、侯国强主编,参加编写的还有张善姝、都会敏、李志刚等。

在编写过程中,参考了国内《电路》、《电工学》等教材及相关实验,并得到了浙江大学方圆公司技术科同志们的帮助,在此表示感谢。

作 者
于河北理工大学

目 录

0 实验综述	1
0.1 电路实验课的目的	1
0.2 电路实验课的要求	1
0.3 电路实验课的注意事项	3
1 实验	4
1.1 基本电工仪表的使用与测量误差计算	4
1.2 减小仪表测量误差的方法	9
1.3 基尔霍夫定律与电位图	15
1.4 叠加原理和替代定理	20
1.5 戴维南定理、诺顿定理、互易定律及特勒根定理	23
1.6 电路基本元件的伏安特性	27
1.7 电压源与电流源及其等效转换以及最大功率传输的条件	31
1.8 受控源特性测试 I (VCCS 及 VCVS)	36
1.9 受控源特性测试 II (CCCS 及 CCVS)	40
1.10 交流电路电压、电流相量图	42
1.11 电路元件交流阻抗频率特性	46
1.12 交流电路元件参数的测量 I (电压表、电流表法)	50
1.13 交流电路元件参数的测量 II (功率表法)	53
1.14 互感电路	55
1.15 荧光灯功率因数提高实验	61
1.16 变压器特性测试	64
1.17 感应式仪表——电能表的校验	70
1.18 串联谐振电路实验测试	76
1.19 双口网络实验测试	81
1.20 RC 网络幅频特性测试	86
1.21 一阶电路瞬态响应	90

1.22	二阶串联电路瞬态响应	96
1.23	三相交流电路电压、电流的测量	99
1.24	三相电路中有功、无功功率的测量 I	103
1.25	三相电路中有功、无功功率的测量 II	107
1.26	负阻抗变换器(综合性实验)	111
1.27	波形变换器的设计与测试(设计性实验)	115
1.28	电路瞬态计算机辅助分析	117
2	测量的基本知识	121
2.1	测量的基本概念	121
2.2	测量的误差	123
3	机电式仪表及电路元件	126
3.1	常用的电路元件	126
3.2	机电式仪表	130
3.3	磁电式仪表	136
3.4	整流式仪表	143
3.5	电动式仪表	146
3.6	电磁式仪表	151
3.7	电测量比较式仪表	154
4	数字式仪表及电子设备的使用	160
4.1	晶体管毫伏表	160
4.2	DT-830 型数字万用表	161
4.3	交流电桥	162
4.4	信号发生器	164
4.5	电子示波器	166
4.6	SR8 型双踪示波器	169
附录	GDS-2 高级电工系统实验装置使用说明	171

0 实验综述

实验是为了认识世界或事物,为了检验某种科学理论或假定而进行的操作或活动。任何自然科学理论都离不开实践。科学实验是研究自然科学极为重要的环节,也是科学技术得以发展的重要保证。

对于电路课程来说,在系统学习了本学科理论知识的基础上,还要加强基本实验技能的训练,实验课即为这种技能训练的重要环节。电路实验是工科院校教学过程的基本组成部分,是电类专业学生的主要实验课之一,它属于专业基础实验课。实验质量的高低将直接影响学生实际能力的高低,而实际能力则关系到学生今后的工作与发展。所以对于实验课应该给予足够的重视。

0.1 电路实验课的目的

- (1) 通过实验,巩固、加深和丰富电路理论知识。
- (2) 学习正确使用电流表、电压表、功率表、调压器、变阻器等常用仪表和设备;掌握直流稳压电源、信号发生器、示波器等常用电子仪器的操作方法。
- (3) 掌握一些基本的电工及电子测试技术。
- (4) 训练学生选择实验方法、整理实验数据、分析误差、绘制曲线、判断实验结果、编写实验报告的能力。
- (5) 培养学生实事求是、严肃认真、细致踏实的科学作风和独立工作的能力。

0.2 电路实验课的要求

一般实验课分为课前准备、进行实验和课后完成实验报告三个阶段,各个阶段的要求如下:

0.2.1 课前准备

- (1) 阅读实验指导书,明确实验的目的、实验的任务与要求,了解完成实验的方法和步骤;并结合实验原理复习相关的理论知识,完成必要的理论估算;设计好实验数据的记录表格,认真思考并解答预习思考题。
- (2) 理解并牢记指导书中提出的注意事项,了解仪器、仪表的使用方法,防止实验过程中损坏仪器仪表。
- (3) 完成预习报告,报告中应有实验目的、所用仪器设备、原理图及数据记录表格,课前交指导教师检查后才能进行实验。

(4) 做计算机应用实验,应该预先完成程序的编制。

0.2.2 进行实验

(1) 实验者应按预先安排好的顺序到相应的实验台上做实验。先了解仪器、设备的规格、量程和性能等,检查仪器、设备是否齐全、完好,如发现问题应及时提出。

(2) 合理布局。合理安排仪器、仪表的位置,使之符合安全、方便、整齐的原则。还要连线清晰、调节顺手、读数方便。

(3) 在连接实验线路时,可以按照“先串后并”,“先主后辅”的原则接好无源部分,后接电源部分;接电源的时候应该将电源开关处于断开状态,并将可调设备的旋钮、手柄、触头等置于最安全或者要求置放的位置。还应注意正确连接电子仪器的接地线。整个实验线路要求走线整齐,线路松紧适当,接线点不要过于集中于一点。

(4) 实验进行中要胆大心细,一丝不苟。对实验中出现的现象和所得数据应做好记录。随时分析、研究实验结果的合理性,如果发现异常现象,应及时查找原因,如遇到事故发生,应立即切断电源,并报告指导教师。

(5) 为了测取准确的数据,在选择测试点时应注意使其分布合理。如曲线的弯曲段应多取几个测试点;读数前要认清仪表量程值与标尺刻度值,合理选择量程。读数时要眼、针、影成一线;记录的数据应是依所选量程经换算后的值,应合理地读取有效数据(最末一位数为估计的存疑数)。每测试完一项任务,暂不要拆线,分析判断一下数据是否正确,若有错误可重新进行测试。要求对测量的数据,测前有预见,测后有判断。

(6) 实验内容全部完成后,原始记录经教师审查后方可拆除实验线路。拆线前应先切断电源,拆完线后将仪器设备复归原位,清理好导线,经教师验收后才可离去。

0.2.3 编写实验报告

(1) 编写实验报告是将实验结果进行归纳总结、分析与提高的阶段。实验报告应文理通顺、简明扼要、字迹端正、图表清晰、分析与论证得当。写实验报告应采用学校统一的实验报告纸,画曲线、波形应采用坐标纸。

(2) 实验报告应包括以下内容:

实验目的:填写实验的目的和意义。

实验仪器设备:填写实验实际使用的设备名称、型号和数量。

实验原理图:绘制实验原理电路图及实验线路图。

实验内容:填写必要的实验步骤,实验方法,列表记录实验数据,写出必要的数据处理过程。

总结:对实验现象、数据进行分析处理,得出结论。实验中若有故障发生,应分

析故障的原因,简述排除故障的方法。回答问题,总结本次实验的心得体会并提出有关建议。

0.3 电路实验课的注意事项

0.3.1 人身安全

实践证明,人体触电时,通过的电流为 50mA 就有生命危险,通过 100mA 则能致人于死地。电工实验的电源电压有 220V 及 380V,均非安全电压,人触电有生命危险。同时,有些设备在实验中需要运行旋转,如有不慎,就有可能发生触电、受伤和损坏仪器设备的严重事故。因此,在实验中要求切实遵守实验室的各项安全操作规程,严肃认真,细致踏实,确保实验的顺利完成。实验过程中应注意下列几点:

(1) 不得擅自接通电源,接通电源或启动运转类设备时,应先告知全组同学。

(2) 通电后,不允许人体触及任何带电部位。严格遵守“先接线后通电”、“先断电后拆线”的操作顺序。不得带电操作,以防发生触电事故。

(3) 实验前应检查各种设备是否放好,设备运转时,要防止人体碰到旋转部分。要当心衣角、围巾、辫子等不要被旋转部分绞入。不要用手或脚去直接制动设备,以免发生危险。

0.3.2 仪器设备的保护

(1) 实验课时认真听取指导教师讲解仪器仪表的使用方法及注意事项,对实验台加倍爱护。这样既能保证实验课的正常开设,也培养了个人爱护公共财产的品德。

(2) 取、放电工实验模块时要小心,移动仪器设备时要轻拿轻放。电器设备应按铭牌上规定的额定值使用。使用仪表时应选择适当的量程。使用电子仪器时应阅读有关说明书,熟悉使用方法,了解各旋钮的作用。

(3) 在实验过程中应注意仪器设备的运行情况,随时注意有无异常现象。例如短路、过热、绝缘烧焦发出异味、声音不正常、电源保险熔断发出响声或合上电源而不工作等。出现上述情况时不要惊慌失措,应立即拉开总电源开关,防止事故扩大,保持现场,报告实验老师共同分析原因,排除故障。如果实验仪器和设备损坏,应如实填写事故报告单,以便处理。

(4) 不得脚踏或坐在设备上,不得用粉笔在仪表和实验台上写字,不得将导线和工具乱扔乱抛,也不要擅自取用其他电工实验台上的实验模块和仪器设备。

(5) 导线、工具及其他仪器设备不要靠近运动物体,如电动机,以免发生意外。

1 实验

1.1 基本电工仪表的使用与测量误差计算

1.1.1 实验目的

- (1) 熟悉常用基本电工仪表的使用与注意事项。
- (2) 熟悉电压源、电流源的使用与注意事项。
- (3) 掌握电压表、电流表内电阻的测量方法。
- (4) 熟悉电工仪表测量误差的计算方法。

1.1.2 实验原理

(1) 实验中经常要测量电路各部分的电压、电流或功率,通常采用各种类型的直读式指示仪表与被测电路作适当连接就可读出被测的量。

电压表在测量电路中某两节点之间的电压时应与该两节点并联连接;电流表在测电路中某一支路中电流时应与该支路串联连接;同样,功率表在测量某一负载中消耗的电功率时,它的电压回路应与负载两端并联,它的电流回路应与负载串联。

为了较准确地测量出电路中实际的电压、电流或功率值,首先必须保证仪表接入电路后不会改变被测电路的原来状态。

这就要求电压表的内阻无限大;电流表的内阻为零;功率表电压回路内阻为无限大,电流回路的内阻为零。

实际使用的电工仪表一般都不可能满足上述要求,它们都具有一定值的内电阻。因此当仪表接入电路时都会对电路原来状态产生变化,使被测量的读数与电路原来实际值之间产生测量方法引入的测量误差。

(2) 上述测量误差的大小与仪表内阻大小密切相关,因此在测量前熟悉所使用的仪表的内电阻对提高测量结果的准确度有重要意义。

电工仪表内阻的表示形式有如下几种。

对于电流表:

- 1) 直接标明每个量限的内电阻值。
- 2) 间接标明每个量限指针满度时的电压降,然后根据标度电流值由欧姆定律计算出该量程时的内电阻值。

对于电压表：

1) 直接标明每个量限的内电阻值。

2) 间接标明每个量限单位电压时的内电阻值,该量限的总内阻值可根据计算得出。单位电压的内电阻(Ω/V)称为电压表的灵敏度。

测量电工仪表的内电阻的方法较多。本实验中测量电流表内阻采用“分流法”,如图 1.1-1 所示。图中 A 为被测内阻的电流表; R_A 为其内电阻; R 为可调电阻(用 GDS-07 挂箱); R_1 为固定电阻(用在 GDS-06 挂箱自由接插板上预先接插电阻,也可选用阻值 $20\Omega \pm 0.5\%$ 电阻或在 GDS-06A 挂箱上选择相近阻值电阻)或可调电阻(GDS-07 挂箱); K 为单刀开关(用 GDS-06B 上的旋钮开关)。

测试时先打开 K ,调节电流源(GDS-03 挂箱)输出电流使万用表电流为 20mA 挡的满标值,然后保持电流源输出电流 I 不变,并合上开关 K 。调节电阻 R 的阻值使电流表的读数为半标值。

这时由于 $I = I_{AM}$, I_{AM} 为电流表是某一量程的满标电流值,所以有:

$$I_A = I_S = \frac{1}{2} I_{AM}$$

由于图中两支路并联,所以流过电流相同时,两路的电阻值一定相等,即可测得电流表的内阻 R_A 为:

$$R_A = \frac{RR_1}{R + R_1}$$

R 及 R_1 并联。且 R_1 选用小电阻,以接近万用表 20mA 挡的内阻为宜, R 选用较大电阻,则阻值调节可比单只电阻箱本身更细微平滑。

测量万用表电压挡的内电阻也可用“分压法”,如图 1.1-2 所示。图中 $\textcircled{V}$ 为被测内阻的电压表; R_V 为其内电阻; R 为可调电阻箱; R_1 为固定电阻,以接近万用表 20V 挡的内阻为宜。测量时先将开关 K 闭合,调节电压源输出电压使被测电压表显

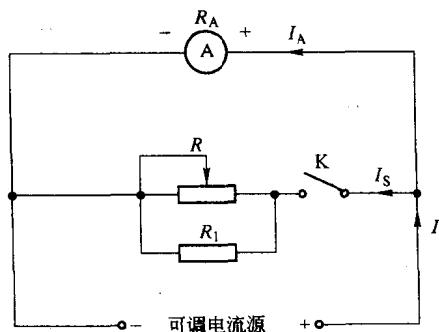


图 1.1-1 用“分流法”测量电流表内阻

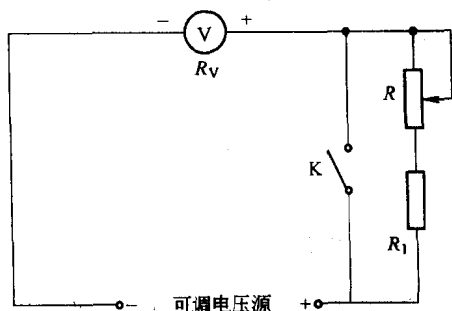


图 1.1-2 用“分压法”测量万用表电压挡的内阻

示某一量程挡的满标值。然后打开 K, R 及 R_1 串联后再与电压表串联, 电压源输出电压保持不变, 调节 R 使电压表指示值为 $U_1/2$, 根据串联电阻回路中电压降与电阻值成正比的原理可知 $R_V = R + R_1$, 电压表的灵敏度为: $S = R_V/U_1 (\Omega/V)$ 。

(3) 由于测量仪表存在内阻, 所以仪表的测量误差除了仪表本身构造上引起的误差(通常称仪表基本误差)外, 还必须注意由于仪表内阻不理想而引入的测量误差(一般称方法误差)。如果现在暂不考虑仪表基本误差, 以下的电路来说明方法误差的计算:

图 1.1-3 电路中, 两个电阻 R_1 及 R_2 串联后接至稳压电源, 如调节稳压电源的输出电压为 U , 则 R_1 上的电压应为

$$U_{R_1} = \frac{R_1}{R_2 + R_1} U \quad (1.1-1)$$

现用一内阻为 R_V 的电压表来测量 U_{R_1} , 当电压表与 R_1 并联后, A、B 两点间电阻变为

$$R_{AB} = \frac{R_1 R_V}{R_1 + R_V}$$

用电压表测到的 R_1 上电压变为

$$U_{R_1'} = \frac{R_{AB}}{R_2 + R_{AB}} U = \frac{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1}}{R_2 + \frac{R_V R_1}{R_V + R_1}} U \quad (1.1-2)$$

仪表的读数 $U_{R_1'}$ 显然偏离了实际值 U_{R_1} , 偏离的程度一般与被测电路元件参数和仪表内阻相对大小有关。若 R_V 与 R_1 相差不大, 会给测量结果带来极大的误差。

绝对误差 $\Delta U = U_{R_1'} - U_{R_1}$ 将式 1.1-1、1.1-2 代入, 化简后得:

$$\Delta U = \frac{-R_1^2 R_2}{R_V (R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2) + R_1 R_2 (R_1 + R_2)}$$

相对误差

$$e = \frac{U_{R_1'} - U_{R_1}}{U_{R_1}} \times 100\%$$

综上所述, 为了准确测量出实际电压、电流和功率, 必须研究下列两方面内容:

- (1) 必须测量出仪表本身的内电阻。
- (2) 必须研究各种减小仪表内阻引入误差的测量方法。

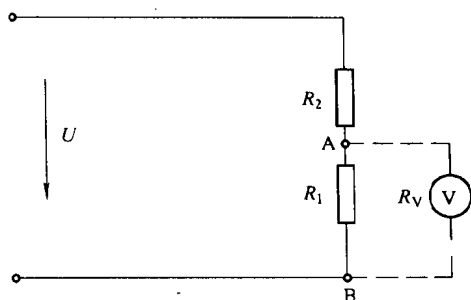


图 1.1-3 测试电路

1.1.3 仪表设备及选用挂箱(见表 1.1-1)

表 1.1-1 仪表设备及选用挂箱

名 称	数 量	备 注
稳压、稳流源(GDS-03)	1	
常规负载 GDS-06	1	或直流电路实验(GDS-06A)
全智能精密负载(GDS-07)	1	
直流电压、电流表(GDS-10)	1	
万用表(500 型)	1	

1.1.4 实验任务及步骤

1.1.4.1 电流表内阻测量

根据分流法实验原理测量出万用表 20mA 电流挡的内电阻:

(1) 按图接好实验电路,将万用表置直流毫安表 20mA 挡(或 GDS-10 上直流电流表 20mA 挡)。

(2) 断开单刀开关 K,将 GDS-03 上可调直流电流源的电流微调旋钮(预先必须置零)由零缓慢按顺时针方向调节至输出电流显示 20mA,且万用表指针满偏(或 GDS-10 上直流电流表显示 20mA)。

(3) 保持电流源输出电流 I ,合上开关 K,调节 GDS-07 上电阻 R 的阻值,使万用表指针半偏(或显示 10mA),将数据记入表 1.1-2,并计算出电流表内阻 R_A 。

1.1.4.2 电压表内阻测量

根据分压法实验原理测出万用表直流电压 20V 挡(或 GDS-10 上直流电压表 20V 挡)内电阻。

将万用表置直流电压 20V 挡(或 GDS-10 上直流电压表 20V 挡),测 20V 挡内阻:

(1) 按图 1.1-2 接好实验电路。

(2) 合上单刀开关 K,调节 GDS-03 电压源输出电压:先调电压粗调旋钮,再调电压微调旋钮(预先必须置零)缓慢按顺时针方向调节至输出电压显示 20V,且万用表指针满偏(或 GDS-10 电压表显示 20V),即 $U_1=20V$ 。

(3) 保持电压源输出电压不变,断开 K,调节 GDS-07 上电阻 R 的阻值,使万用表指针半偏(或 GDS-10 电压表显示 10V),即 $U_1/2=10V$ 。将数据记入表 1.1-3。可以计算出电压表 20V 挡内阻。

1.1.4.3 电表内阻产生的测量误差

(1) 按图 1.1-3 接好实验线路,电路中 $R_1=1k\Omega$, $R_2=510\Omega$, R_1 , R_2 均由 GDS-06A 中电阻提供。

(2) 外加电压 $U=10V$,由 GDS-03 上可调直流电压源输出,调节方法同

1.1.4.2 中(2)的方法。

(3) 用万用表直流电压 20V 挡(或 GDS-10 电压表 20V 挡)测 R_1 两端电压读数记入表 1.1-4,并计算出绝对误差和相对误差。

1.1.5 实验结果

表 1.1-2 电流表内阻测量

被测电流表量程	K 打开时电流 I_A	K 闭合时电流 I_A	R	R_1	R/R_1	R_A
万用表 20mA						
GDS-10 直流电流表 20mA						

表 1.1-3 电压表内阻测量

被测电压表量程	K 闭合时电压表读数	K 打开时电压表读数	R	R_1	$R_V = R + R_1$
万用表 20V					
GDS-10 直流电压表 20V					

表 1.1-4 电表内阻产生的测量误差

被测电压表量程	电源电压 U	R_2	R_1	R_V	计算值 U_{R_1}	实测值 U_{R_1}'	绝对误差 $\Delta U = U_{R_1}' - U_{R_1}$
万用表 20V							
GDS-10 直流电压表 20V							
相对误差 $\Delta U/U \times 100\%$							

1.1.6 注意事项

(1) 电压源(稳压源)和电流源(稳流源)在 GDS-03 上,输出电压(电流)均可通过粗调旋钮和细调旋钮控制。输出电压或电流大小可分别通过 GDS-03 上方电压表和电流表粗略观察。

(2) 电压输出端不允许短路使用,如实验中偶然短路会造成保险丝管中熔丝烧断。

(3) 电流源输出端可长期短路使用,理想电流源不允许断开输出电路,否则将会产生过大电压,实际电流源可以开路。

(4) 电压源和电流源使用前应使输出电压为零,实验时缓慢增加输出:具体的就是 GDS-03 上电压(电流)调节旋钮置 0,微调旋钮到最左侧。

(5) 电压表与电路并联使用。电流表与电路串联使用,并且均要防止超量限。