

文章编号:1005-4642(2022)02-0041-07

基础实验试题 B: 直流电路的研究

钱 钧^{a,b}, 惠王伟^{a,b}, 牛紫平^{a,b}, 孙海英^{a,b},
于 健^{a,b}, 王 瑾^{a,b}, 姚江宏^{a,b}, 孔勇发^{a,b}

(南开大学 a. 物理科学学院; b. 基础物理国家级实验教学示范中心, 天津 300071)

摘 要:介绍了第 7 届全国大学生物理实验竞赛基础实验试题 B 的实验内容, 给出了参考解答, 并分析了竞赛结果. 基础实验试题 B 为直流电路的研究, 试题包含电阻的测量、二极管的伏安特性曲线、直流单臂电桥、直流电源的输出特性和电学黑盒子等实验内容. 试题在常规实验的基础上, 进行了综合、扩展以及提升, 比较全面地考查了考生的电学基础知识、实验操作水平和利用所掌握的知识综合解决实际问题的能力.

关键词:直流电路; 电桥; 电学黑盒子

中图分类号: TM131.3

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2022.02.008

第 7 届全国大学生物理实验竞赛(教学赛)基础实验试题 B 为“直流电路的研究”. 试题共有 4 部分: 第一部分是基本的阻值测量, 包括测量电流表和电压表的内阻, 测量电阻的伏安特性曲线等; 第二部分是测量二极管的正向伏安特性曲线, 要求分别用伏安法以及在惠斯通电桥基础上设计电路(以消除电表内阻的影响)进行测量; 第三部分是未知直流电源特性的研究, 要求设计电路测量电源的输出特性曲线、开路电压和短路电流, 此直流电源在电学黑盒子中, 本题需要先判断直流电源的位置; 第四部分是电学黑盒子, 内有二极管、电容、电阻等, 要求判断黑盒子电路中的元件, 并测量电阻的阻值. 第一部分以及第二部分的前半部分(伏安法测量二极管的伏安特性曲线)属于常规实验内容, 第二部分的后半部分以及第三、第四部分则需要综合运用相关知识进行解答.

1 原理背景

直流电路是物理实验中重要的基础内容, 在日用电器、电子设备、发电与输电等领域中不可或缺. 在大学基础物理实验中^[1-4], 与直流电路相关的基础实验包括直流电源输出特性研究、线性与

非线性元件的伏安特性、直流单臂电桥、直流双臂电桥、电表改装、直流电位差计等实验内容. 通过这些实验, 学生可以学习电流表、电压表、电位差计等电学仪器仪表的使用方法, 并掌握直流电路中电阻、电压、电流等参量的测量方法.

试题 B 涉及了很多与直流电路实验相关的实验内容和测量方法. 比如在阻值的测量中, 需要用到半偏法和替代法测量电流表和电压表的内阻, 并熟练掌握伏安法测量电阻; 在电表的使用中, 需要考虑外接法和内接法导致的测量误差; 在二极管特性测量中, 需要运用电桥平衡法设计电路进行测量; 在直流电源开路电压和短路电流的测量中, 需要用补偿法原理设计电路. 学生只有熟练掌握并综合运用上述实验知识和方法, 才能较好地完成试题 B 的实验内容.

2 实验器材

- 1) 直流稳压电源 1 台, 固定输出 2 V.
- 2) 指针式电压表 1 台, 上海良表仪器仪表公司生产, C31-V 型, 选用 2 V 挡.
- 3) 指针式电流表 1 台, 上海良表仪器仪表公司生产, C31-mA 型, 选用 20 mA 挡.

收稿日期: 2021-10-15; **修改日期:** 2021-12-03

基金项目: 国家基础科学人才培养基金项目(No. J1210027); 2020 高等学校教学研究项目(No. DJZW202010hb); 教育部产学合作协同育人项目(No. 202101076008); 南开大学物理基地能力提高项目(No. J1103208)

作者简介: 钱 钧(1978—), 男, 辽宁沈阳人, 南开大学物理科学学院副教授, 博士, 主要研究方向为微纳光学. E-mail: qianjun@nankai.edu.cn

通讯作者: 惠王伟(1982—), 男, 山东日照人, 南开大学物理科学学院高级实验师, 硕士, 研究方向为仪器仪表、光学及超声成像. E-mail: hww@nankai.edu.cn

4) 微电流计 1 台, 选用 $2\ \mu\text{A}$ 挡, 可显示正负电流, 用于电路的平衡指示。

5) 实验箱 1 台, 内有电阻、电容、二极管、直流电源等元件及连接电路, 分为 A, B, C 3 个区域。

6) 电阻箱 2 个, 待测电阻 1 个, 定值电阻 2 个 (均为 $1\ 000\ \Omega$), 待测二极管 1 个。

7) 导线 12 根, 实验过程中可以利用导线的连接与断开代替开关。

3 实验任务

3.1 阻值测量(25 分)

1) 利用半偏法测量电流表 ($20\ \text{mA}$ 挡) 的内阻。此题限用器件: 电流表、电阻箱 (2 个) 和直流稳压电源。要求画出电路图。

2) 利用替代法测量电压表 ($2\ \text{V}$ 挡) 的内阻。此题限用器件: 电压表、电流表、电阻箱 (2 个) 和直流稳压电源。要求画出电路图。

3) 采用电压表外接法测量电阻 R_x 的伏安特性曲线。此题限用器件: 待测电阻 R_x 、电压表、电流表、电阻箱 (1 个) 和直流稳压电源。要求画出电路图, 并用作图法计算电阻的阻值。

注意: 在所有题目中, 不要求计算不确定度, 合理保留有效数字即可。

3.2 非线性元件及电桥(30 分)

1) 利用伏安法 (采用电压表外接法) 测量二极管的正向伏安特性曲线 (二极管正向电流不超过 $20\ \text{mA}$), 要求画出电路图, 测量数据并且作图。

2) 设计电路, 利用单桥电路测量二极管的正向伏安特性曲线 (二极管正向电流不超过 $20\ \text{mA}$), 要考虑消除电压表和电流表内阻对测量的影响。要求画出电路图, 测量数据并且作图。

此部分 2 条曲线图画在同一坐标系中。

此题限用器件: 电压表、电流表、微电流计、电阻箱 (2 个)、电阻 r_1 和 r_2 (均为 $1\ 000\ \Omega$)、待测二极管 D、直流稳压电源。

3.3 直流电源特性研究(25 分)

如图 1 所示, 在实验箱中, 1~4 接线端中有未知电源 E_x (输出电压小于 $2\ \text{V}$)、2 个未知电阻 ($R_a > R_b$) 和 1 个电容。此题限用器件: 稳压电源、电阻箱 (2 个)、电压表、电流表和微电流计。

1) 判断 4 个元件, 并写出判断依据, 画出内部电路连接图, 标出电源的正负极。判断元件时, 请勿连接外接电源。

2) 测量 2 个电阻的阻值。此题电流表选择 $5\ \text{mA}$ 挡, 内阻为 $2.4\ \Omega$ 。

3) 测量未知电源 E_x 的 $U-I$ 曲线。电流表选择 $20\ \text{mA}$ 挡。

4) 设计电路, 测量电源的开路电压。要求: 画出电路图, 简述测量原理。(待测电源 E_x 具有非线性内阻, 不适用 $U-I$ 曲线外推法测量)

5) 设计电路, 测量电源的短路电流。要求: 画出电路图, 简述测量原理。电流表选择 $20\ \text{mA}$ 挡。

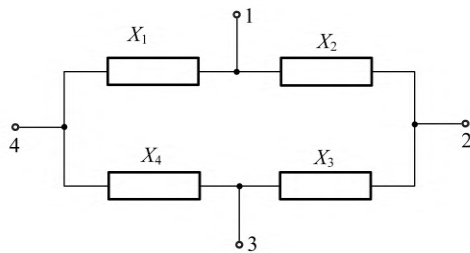


图 1 3.3 电学黑盒子示意图

3.4 电学黑盒子(20 分)

如图 2 所示, 在实验箱中有 A~D 4 个接线端, $Z_1 \sim Z_4$ 是连接在 4 个接线端之间的元件, 其中有 1 个支路是 2 个元件的并联。元件包括 1 个二极管、1 个电容和 3 个电阻, 已知电容不与其他元件并联。此题限用器件: 稳压电源、电阻箱 (1 个)、电压表、电流表 ($5\ \text{mA}$ 挡, 内阻为 $2.4\ \Omega$)。

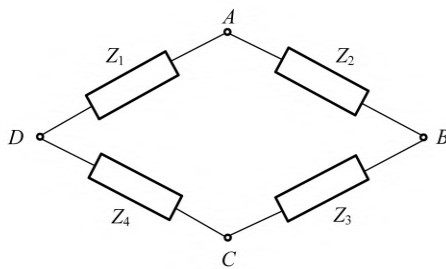


图 2 3.4 电学黑盒子示意图

1) 判断 Z_1, Z_2, Z_3 和 Z_4 分别是什么元件, 画出内部连接图, 写出判断依据。

2) 测量 3 个电阻的阻值。

4 试题解答

4.1 阻值测量

4.1.1 半偏法测量电流表内阻

由于限制了实验器件, 可按照图 3 连接电路^[5], R_1 和 R_2 为电阻箱。先将电流表接入电路中, 调节电阻箱 R_2 使电流表指针满偏; 再接入电

阻箱 R_1 , 调节 R_1 使电流表指针半偏 (由于并联 R_1 后总阻值变小, 所以要同时调节 R_2 , 以补偿总阻值), R_1 的值即为电流表内阻. 实验测得电流表内阻参考值 $R_A = 1.2 \Omega$.

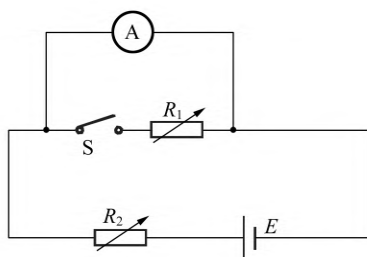


图3 半偏法测量电流表内阻电路

4.1.2 替代法测量电压表内阻

按照图4连接实验电路^[5], 将电压表接入电路中, 调节 R_2 , 使得电压表指针满偏, 记录此时电流表的示数; 断开电压表, 将 R_1 接入电路, 调节 R_1 , 使得电流表示数不变, 此时 R_1 的值为电压表内阻. 测得电压表内阻参考值 $R_V = 2\,000 \Omega$.

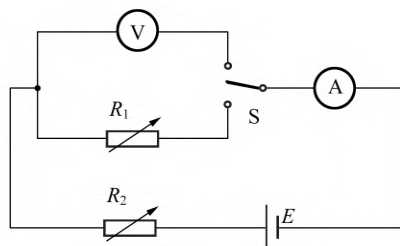


图4 替代法测量电压表内阻电路

4.1.3 测量电阻的伏安特性曲线

如图5所示, 根据题目要求, 用电压表外接法测量电阻 R_x 的伏安特性曲线^[1]. 测得电阻的伏安特性曲线如图6所示, 测量数据表略. 在曲线上选择相距较远的A和B点, 利用图解法得到电阻 $R_x = 101 \Omega$. 考虑对电流表内阻的误差修正, 可得 $R_x' = 100 \Omega$.

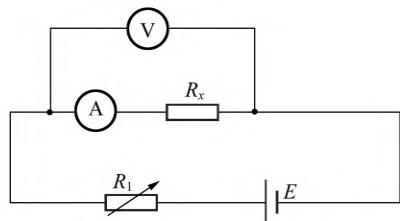


图5 伏安法测量电阻电路

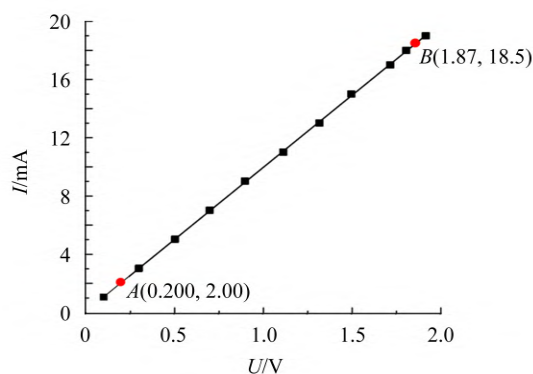


图6 电阻 R_x 的伏安特性曲线

4.2 非线性元件及电桥

根据题目要求, 采用伏安法 (电压表外接法) 测量二极管的正向伏安特性曲线^[1], 电路如图7所示.

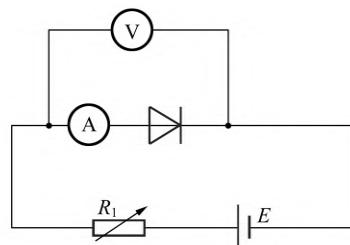


图7 伏安法测量二极管的伏安特性电路

设计电路, 利用电桥法测量二极管的伏安曲线^[6], 电路图如图8所示, 将待测二极管接入桥臂中, 调节 R_0 和 R_L , 使得微电流计 G 的示数为 0, 此时电桥平衡, 电压表和电流表显示的分别是二极管两端的电压和通过二极管的电流. 此时微电流计支路没有分流, 消除了电表内阻对测量的影响. 改变 R_0 和 R_L 的值可以得到不同电流下二极管的电压值. 图中桥臂电阻 $r_1 = r_2 = 1\,000 \Omega$.

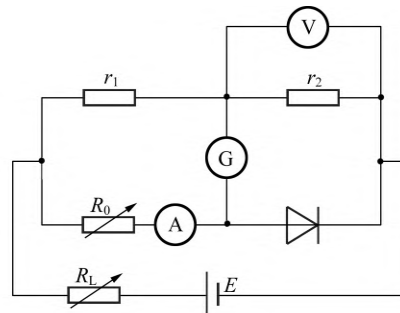


图8 单桥法测量二极管的伏安特性电路

2种方法测得二极管正向伏安特性曲线如图9所示. 由于单桥法更好地消除了电表内阻的

影响^[6], 相比于伏安法(电压表外接)的测量曲线(没有消除电流表内阻带来的测量误差), 在电流较大时, 电压表外接测得的电压值明显大于相同电流下单桥法测得的电压值。

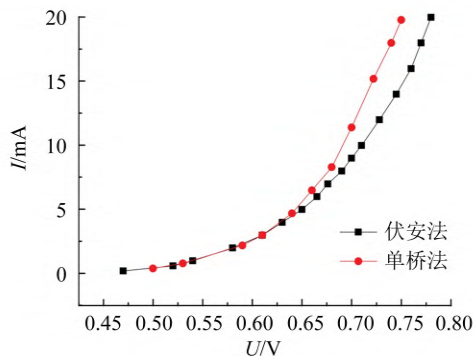


图 9 二极管的伏安特性曲线

4.3 直流电源特性研究

4.3.1 判断元件

可以判断图 1 中各元件: X_1 为电容, X_2 为 R_a , X_3 为电源, X_4 为 R_b . 内部连接方式如图 10 所示。

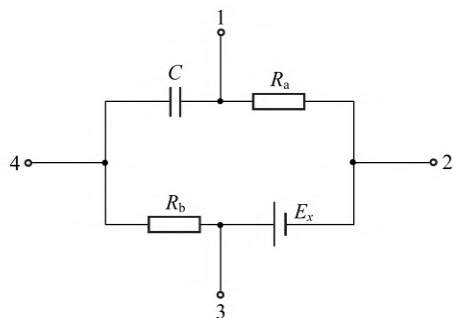


图 10 3.3 内部连接电路图

参考判断方法: 分别用电压表测 4 个接线端之间的电压: $U_{12}=0$, $U_{32}=1.02\text{ V}$, $U_{34}=0$, $U_{41}=0.37\text{ V}$, $U_{42}=0.70\text{ V}$, $U_{31}=0.44\text{ V}$. 3 和 2 接线端之间电压 U_{32} 最大, 所以 X_3 是电源, 由电压表可以判断 3 端为正极, 2 端为负极; 3 和 4 接线端之间无电压, 1 和 2 接线端之间无电压, 所以判断 X_2 和 X_4 是电阻; X_1 是电容. 由于 $U_{42} > U_{31}$, 故可以判断 X_4 电阻小于 X_2 电阻, 即 X_4 为 R_b , X_2 为 R_a .

4.3.2 测量 2 个电阻阻值

测量电路如图 11 所示. 用伏安法测量 R_a , 电源串联电阻箱(取 $R=200\ \Omega$), i 和 j 端口接 1 和 2 端, 并短接 2 和 4 端, 相当于 i 和 j 之间串联电

阻 R_a . 同理, 用 i 和 j 端口接 2 和 4 端, 并短接 1 和 3 端, 可以测得电阻 R_b . 考虑电流表内阻修正后, 测得 $R_a=2\ 991\ \Omega$, $R_b=998\ \Omega$.

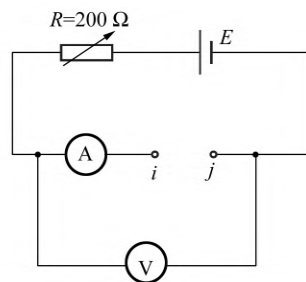


图 11 测量电阻电路

4.3.3 测量电源的 $U-I$ 曲线

如图 12 所示, E_x 为元件 X_3 , 从 1 和 3 端口接出, R_1 为电阻箱, 改变 R_1 阻值, 可以获得电源 E_x 的 $U-I$ 曲线. 实验所用电源是将直流电源串联二极管和电阻后的“改装”电源, 电源具有非线性内阻, 测得的 $U-I$ 曲线如图 13 所示。

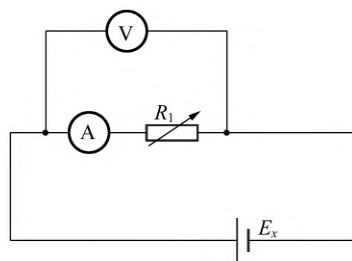


图 12 测量电源的 $U-I$ 曲线电路图

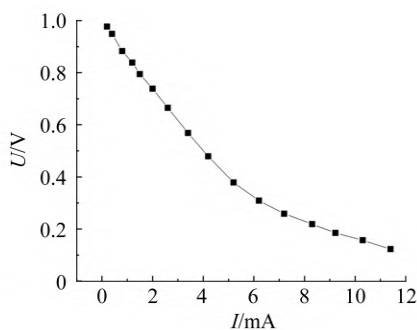


图 13 未知电源的 $U-I$ 曲线

4.3.4 测量电源的开路电压

外接电源 E , 利用电压补偿法^[1]测量未知电源 E_x 的开路电压, 如图 14 所示. R_1 和 R_2 为电阻箱, 通过调节 R_1 和 R_2 的阻值, 使得微电流计 G 的示数为 0, 此时电压表所示为 E_x 的开路电压. 实验测得电源 E_x 的开路电压为 1.64 V .

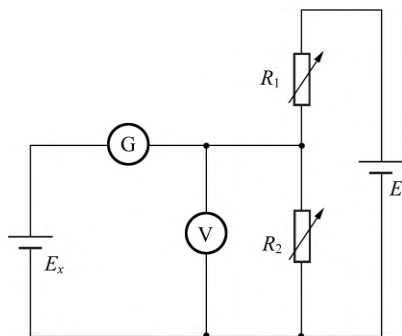


图 14 电压补偿法测量电源的开路电压电路

4.3.5 测量电源的短路电流

如图 15 所示,外接电源 E ,利用电流补偿法测量未知电源 E_x 的短路电流.通过调节 R_1 ,使得微电流计 G 的示数为 0,此时电流表所示为短路电流.实验测得短路电流为 18.2 mA.该方法常用于测量光电池的短路电流^[1],实验中所用电源内部有保护电阻,所以可以直接测量短路电流.

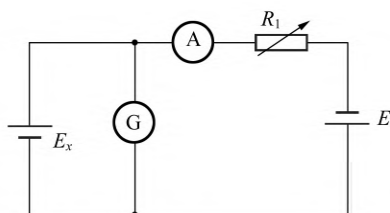


图 15 电流补偿法测量电源的短路电流电路

4.4 电学黑盒子

4.4.1 判断元件

通过判断,可知, Z_1 与 Z_3 是电阻, Z_2 是电容, Z_4 为电阻与二极管并联.电路连接见图 16.

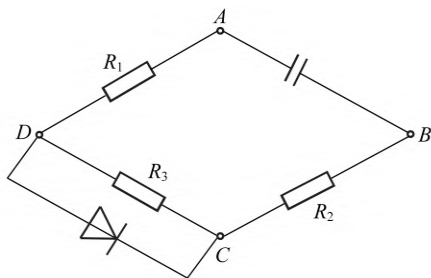


图 16 电学黑盒子内部的连接图

参考判断方法:用直流电源正向和反向(需要串接限流电阻,后同)连接 A 和 C 接口,用电压表分别测量 AB , BC , AD , DC 各接口间电压,发现只有 BC 之间的电压为 0,说明 AB 之间是电容(电容在直流电路中的作用相当于断路).

短接 AC ,分别用直流电源正向和反向连接 D 和 C 接口,用电压表测量 AD (CD)间电压,发现正反向连接时, AD (CD)间的电压发生变化(由 0.67 V 变为 1.34 V),说明 AD 间或者 CD 间有二极管,且 D 端口为二极管正极.

短接 AC ,分别用直流电源正向和反向连接 B 和 C 接口,再用电压表测量 AB (BC)间电压,发现正反向连接时, AB (BC)间的电压无变化(约 1.74 V),说明 AB 间和 BC 间无二极管.

短接 BD ,分别用直流电源正向和反向连接 B 和 C 接口,用电压表测量 BC (CD)间电压,发现正反向连接时, BC (CD)间的电压发生变化(由 0.68 V 变为 1.32 V),说明 BC 或者 CD 间有二极管,且 B 和 D 端口(等电位)为二极管正极.

综上所述,结合题目给出的已知条件,可知二极管在 CD 间,且 D 端为二极管正极. AD 和 BC 间是电阻,二极管和另外 1 个电阻并联.

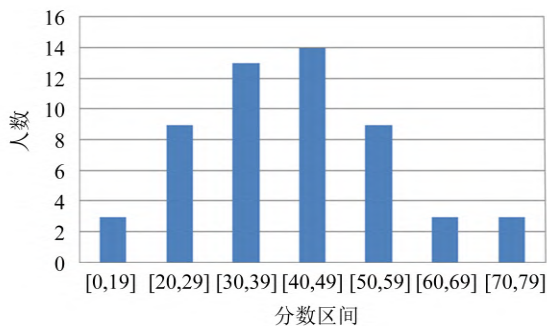
在试题的第三部分和第四部分中,都有关于电学黑盒子中元件判断的内容.所涉及的元件包括直流电源、电阻、电容、二极管等,在了解元件的基本特性(如电容对直流断路、二极管单向导通等)的基础上,可以搭建电路,通过测量不同元件两端电压进行判断.由于黑盒子内部元件各种组合的可能性比较复杂,往往需要测量多个元件两端电压后进行综合判断.也可以先用导线短接一些元件,对电路简化后再进行判断.

4.4.2 测量 3 个电阻阻值

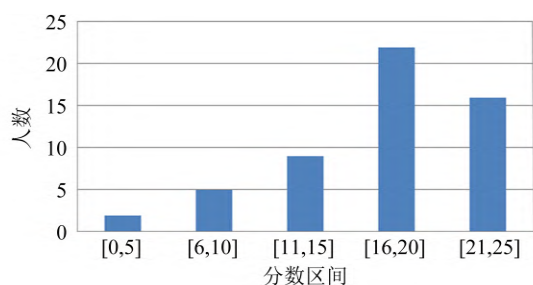
利用图 11 所示的测量电路,用 i 和 j 端口连接 AD 端口,可以用伏安法测得 AD 间的电阻 R_1 ;用 i 和 j 端口连接 BC 端口,可以用伏安法测得 BC 间电阻 R_2 ;用 i 和 j 端口连接 DC 端口(需要电源正极接 C 端口),可以用伏安法测得 DC 间电阻 R_3 .实验测得电阻的参考值为 $R_1=2\ 986\ \Omega$, $R_2=2\ 010\ \Omega$, $R_3=514\ \Omega$.

5 考试结果及评析

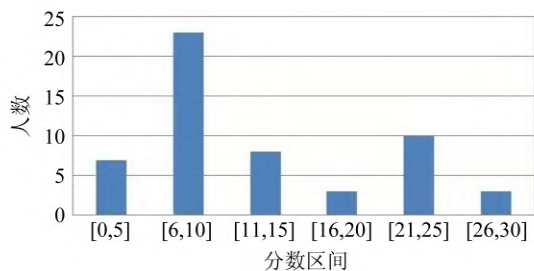
试题 B 总分 100 分,共 54 名学生参加考试,得分情况如图 17 所示.最高分为 79 分,70 分以上有 3 人.平均分为 41.3 分.从总成绩分布可以看出,成绩近似呈高斯分布,说明试题 B 具有较好的区分度.50 分以上的各分数段,随着分数提高,人数逐渐减少,表明试题 B 具有一定的难度,有很好的选拔性和竞赛性.



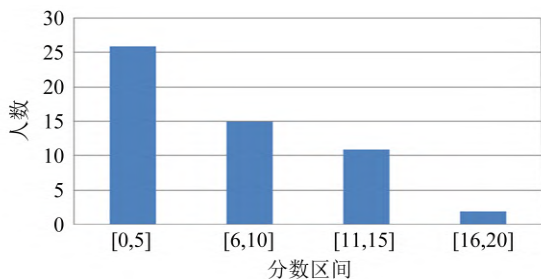
(a) 总成绩



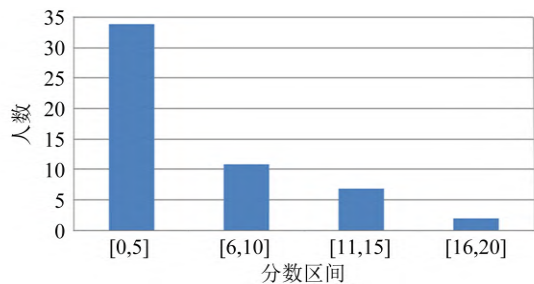
(b) 第一题



(c) 第二题



(d) 第三题



(e) 第四题

图 17 总成绩以及各题得分情况

第一题平均得分 16.9 分, 得分 15 分及以上的学生占整体的 72%。第一题是基础题, 考查了半偏法、替代法测量电表内阻, 以及伏安法测量电阻, 大部分学生完成较好。有一些学生可能由于实验课程设置原因对于半偏法和替代法不了解, 导致实验电路错误, 试题在背景知识部分对半偏法和替代法进行了介绍, 也间接反映出学生读题不仔细。还有一部分学生在列数据表格, 做直线拟合图, 以及图解法求斜率等步骤不规范而扣分。

第二题平均得分 12.6 分, 得分 15 分以上的学生占整体的 24%。伏安法测量二极管的正向伏安特性曲线, 做对的学生比较多。单桥法测量二极管的正向伏安特性曲线, 部分学生没有设计出正确的电路图, 部分学生由于单桥调节平衡操作难度比较大(同时调节 2 个电阻箱), 没有给出测量数据或者测量数据点太少而失分。

第三题平均得分 7.1 分, 得分 15 分及以上的学生占整体的 7%, 得分率偏低, 主要是题目后半部分需要设计补偿法电路测量电源的短路电流和开路电压, 很多学生没有设计出正确的电路。另外有些学生没有考虑电压表内阻, 导致在判断包含直流电源的电学黑盒子时, 出现判断错误。

第四题平均得分 4.6 分, 得分 10 分以上的学生占整体的 17%。该电学黑盒子题目元件位置判断比较困难, 少部分学生元件位置判断正确, 但由于实验时间不足, 导致没有完成后面测量 3 个电阻阻值的任务, 也有少数学生由于电阻阻值计算错误或者偏差较大而失分。

试题 B 的题量较大, 涉及的知识点较多, 在 4 h 的考试时间内, 只有少数学生能够完成全部实验内容。在电学基础知识掌握、基本仪器使用、实验动手操作能力、数据处理与作图规范以及利用所学知识综合解决问题的能力等方面, 试题 B 对考生进行了比较全面的考查。从考生解答的情况来看, 很多考生在基础实验知识和基本实验能力等方面存在不足, 利用所掌握的知识综合解决问题的能力还有待进一步提高。

参考文献:

- [1] 刘少杰, 于健. 大学基础物理实验(电磁学分册)[M]. 2 版. 天津: 南开大学出版社, 2008: 14-60.
- [2] 吕斯骅, 段家祗, 张朝晖. 新编基础物理实验[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2013: 15-36.

- [3] 杨述武,赵立竹,沈国土. 普通物理实验(电磁学部分)[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2007:12-46.
- [4] 谢行恕,康士秀,霍剑青. 大学物理实验(第二册)[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2005:40-50.
- [5] 钱钧,惠王伟,陈靖,等. 电表改装实验中校准曲线的应用[J]. 物理与工程,2018,28(S1):70-75.
- [6] 高伟. 电桥法测二极管的伏安特性[J]. 物理实验,1994,14(4):187-188.

Fundamental test B: Research on DC circuit

QIAN Jun^{a,b}, HUI Wang-wei^{a,b}, NIU Zi-ping^{a,b}, SUN Hai-ying^{a,b},
YU Jian^{a,b}, WANG Jin^{a,b}, YAO Jiang-hong^{a,b}, KONG Yong-fa^{a,b}

(a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education,
Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The test questions, solutions and result analysis of the fundamental test B of the 7th Chinese Undergraduate Physics Experiment Competition, the research of DC circuit were introduced. This part included the resistance measurement, volt-ampere characteristic curve of diode, Wheatstone bridge, output characteristics of DC power supply and electrical black box. The test was integrated, expanded and improved on the basis of conventional experiments. Besides, the students' basic electrical knowledge, experimental operation level and the ability of comprehensive solving practical problems were inspected.

Key words: DC circuit; electric bridge; electrical black box

[责任编辑:任德香]

(上接 33 页)

Fundamental test A-1: Timekeeping of water clock

WANG Jin^{a,b}, WEN Xiao-qing^{a,b}, LI Wen-hua^{a,b},
HUI Wang-wei^{a,b}, KONG Yong-fa^{a,b}

(a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education,
Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The test questions, solutions and result analysis of the fundamental test A-1 of the 7th Chinese Undergraduate Physics Experiment Competition, water clock timing were introduced. Students came to have the knowledge of the Bernoulli's equation based on the mass conservation and energy conservation by reading materials, and constructed the experimental setup using the simple house materials and investigated water clock timing. The test focused at the students' understanding of the theoretical analysis, random error, precision and accuracy, surface tension, Reynolds number and the laminar conditions of liquid individually. What's more, the students' ability to discover physical problems and solve problems from the normal life phenomenon was inspected.

Key words: fluid mechanics; Bernoulli's equation; surface tension; Reynolds number

[责任编辑:任德香]