

文章编号:1005-4642(2021)11-0025-07

基础实验试题 D:电桥及其应用

王立英^a,程利艳^a,冯列峰^a,王永祥^a,蒋学慧^b,许宝忠^b

(天津大学 a. 理学院 应用物理系 天津 300354;

b. 精密仪器与光电子工程学院,天津 300072)

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 D 的实验内容,给出了参考答案,并分析了实验竞赛结果. 基础实验试题 D 包含 3 部分:测量电源内阻,测量金属导体的电阻,测量待测物体的质量. 试题属于大学物理实验的基础实验,内容涉及单臂平衡电桥、双臂平衡电桥及非平衡电桥,重点考察学生将所学的电桥知识进行灵活运用和拓展,并与实际应用相结合的能力.

关键词:单臂平衡电桥;双臂平衡电桥;非平衡电桥;电阻;质量

中图分类号:O441.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.11.005

第 7 届全国大学生物理实验竞赛基础实验试题 D 为“电桥及其应用”,试题包含 3 部分,涉及知识点均为大学物理和大学物理实验的基础内容. 第 1 部分利用单臂平衡电桥测量电源内阻,主要考察学生是否能够灵活运用所学单臂电桥知识;第 2 部分利用双臂平衡电桥测量金属导体电阻,主要考察学生对基础实验的掌握和操作能力;第 3 部分利用非平衡电桥测量待测物体质量,主要考察学生利用所学知识解决实际问题的能力.

1 原理背景

电桥采用比较法,即通过将待测量和相应的标准量进行比较来确定待测量的值,具有测量精确、操作简便的特点. 就测量方式而言,电桥可以分为平衡电桥和非平衡电桥. 平衡电桥如惠斯通电桥、开尔文双臂电桥等,只能测量具有相对稳定状态的物理量;非平衡电桥是通过测量桥式电路中电学量的变化,再经过简单转化处理得到某待测物理量的变化信息,同时也能够实现对连续变化的非电学量的测量,因此非平衡电桥的应用更加广泛. 利用电桥不仅可对电阻、电容、电感等电学量进行测量,某些非电学量(例如温度、压力等)也可以借助传感器用电桥进行检测^[1-5]. 本实验

要求考生利用电桥实现对电源内阻、金属导体电阻和待测物体质量的测量.

2 实验器材

第 1 部分:待测电源 1 个(实验所用的待测电源为 1.5 V 的甲电池与 150 Ω 电阻串联组成),六钮电阻箱 3 个,滑动变阻器(总阻值约 500 Ω) 1 个,灵敏电流计 1 个,开关及导线若干.

第 2 部分:直流稳压电源(输出电压范围 0~32 V) 1 个,灵敏电流计 1 个,标准电阻(电阻值 $R_N=0.001 \Omega$) 1 个,滑动变阻器(总阻值约 500 Ω) 1 个,待测金属电阻 1 个,六钮电阻箱 4 个,开关及导线若干.

第 3 部分:直流稳压电源(输出电压范围 0~32 V) 1 个,弹性悬臂梁结构(粘贴电阻应变片) 1 个,金属板 2 块,垫片 2 块,直流数字电压表(测量精度 0.01 mV) 1 个,砝码(50, 100, 200 g 各 1 个),固定螺丝 2 个,待测物体 1 个,开关及导线若干.

3 实验任务及解答

3.1 测量电源内阻

3.1.1 实验要求

1) 自行设计测量电源内阻的电路图,画出电

收稿日期:2021-08-25;修改日期:2021-10-08

基金项目:天津大学校级重点教改项目(No. Z202122)

作者简介:王立英(1987—),女,河北邢台人,天津大学理学院应用物理系工程师,博士,主要从事物理实验教学,研究方向为自旋电子学材料. E-mail:liyong.wang@tju.edu.cn

通讯作者:程利艳(1985—),女,河北邯郸人,天津大学理学院应用物理系工程师,硕士,主要从事物理实验教学. E-mail:tjuchengliyan@163.com



路图,并给出测量电源内阻 R_E 的理论表达式.

2) 给出测量电源内阻 R_E 表达式的推导过程.

3) 根据 1)~2) 的实验设计,自行连接电路测量待测电源内阻.在答题纸上清晰地列出相关直接测量量,以及测量 R_E 理论表达式中包含的所有物理量的具体数值,并根据理论表达式计算出待测电源内阻值(电源内阻结果精确至 1Ω).

3.1.2 试题解答

1) 本实验基于单臂平衡电桥(惠斯通电桥)原理,其中被测内阻的电池 E 代替未知电阻的位置,灵敏电流计 G 采用外接法占有原来单臂电桥中电池的位置,测量电源内阻的完整实验电路图如图 1 所示.图 1 中,当桥路上的开关 K_2 接通和断开,通过滑线变阻器 R_0 的电流不变时,可推导出测量电源内阻 R_E 的理论表达式^[3]为

$$R_E = \frac{R_1}{R_2} R_3 \text{ 或 } \frac{R_E}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}.$$

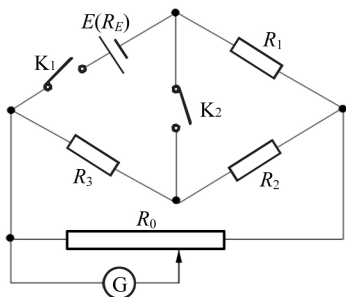


图 1 测量电源内阻 R_E 的完整实验电路图

2) 当 K_2 接通时,图 1 的等效电路如图 2 所示,此时有

$$IR_E + I_0 R_0 + I_0 \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) = E, \quad (1)$$

$$(I - I_0) R_3 + IR_E = E, \quad (2)$$

$$(I - I_0) R_3 = I_0 R_0 + I_0 \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right). \quad (3)$$

已知式(1)~(3)中的任意 2 个,即可得出通过滑动变阻器电流 I_0 的表达式.例如已知式(1)和式(2)时,由式(2)可得 $I = \frac{E + I_0 R_3}{R_3 + R_E}$,将电流 I 的表达式代入式(1),可得

$$I_0 = \frac{R_3 E}{R_0 (R_3 + R_E) + R_3 R_E + \frac{R_1 R_2 (R_3 + R_E)}{R_1 + R_2}}. \quad (4)$$

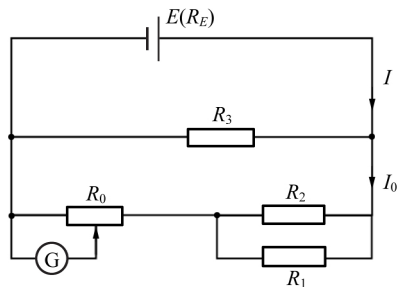


图 2 K_2 接通时,测量电源内阻的等效电路图

当 K_2 断开时,图 1 的等效电路图如图 3 所示,此时有

$$I' R_E + I' R_1 + I_0' R_0 = E, \quad (5)$$

$$(I' - I_0') (R_2 + R_3) + I' R_1 + I' R_E = E, \quad (6)$$

$$I_0' R_0 = (I' - I_0') (R_2 + R_3). \quad (7)$$

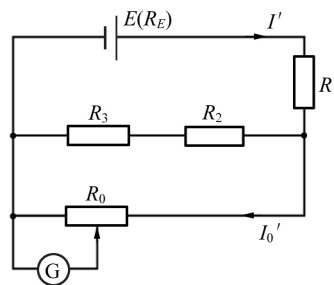


图 3 K_2 断开时,测量电源内阻的等效电路图

已知式(5)~(7)中的 2 个,即可得出通过滑动变阻器电流 I_0' 的表达式.例如已知式(5)和式(6)时,由式(6)可得 $I' = \frac{E + I_0' (R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_E}$,将电流 I' 的表达式代入式(5),可得

$$I_0' = \frac{E (R_2 + R_3)}{(R_2 + R_3) (R_E + R_1) + R_0 (R_1 + R_2 + R_3 + R_E)}. \quad (8)$$

当 K_2 接通或断开时,若灵敏电流计指针偏转情况无变化,即开关 K_2 前后通过滑动变阻器的电流不变,则有

$$I_0 = I_0'. \quad (9)$$

由式(4)和式(8)可得 $\frac{R_E}{R_3} = \frac{R_1}{R_2}$,即

$$R_E = \frac{R_1}{R_2} R_3, \quad (10)$$

其中 R_1/R_2 为电桥比率臂.因此,当比率臂一定时,调节 R_3 ,使灵敏电流计 G 指针无变化,即可根据式(10)求出电池内阻 R_E . (此题仅要求学生给

出主要过程表达式)

3) 测量数据及处理. 实验测得 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{100 \Omega}{100 \Omega}$,

$R_3 = 150 \Omega$, 由式(10)得电源内阻的测量结果为 $R_E = 150 \Omega$. (测量结果在给定范围内即可得分)

测量电源内阻的方法有很多,比如电位差计法、伏特计法等,本实验考核学生如何利用电桥法测量电源内阻. 实验证明,电桥法相比电位差计法的测量结果,相对偏差较小(1.0%)^[4],说明电桥法测量电源内阻的精度较高.

3.2 测量金属导体的电阻

3.2.1 实验要求

1) 自行设计测量金属导体电阻的电路,画出电路图.

2) 给出测量金属导体电阻的理论表达式及推导过程.

3) 根据 1)~2) 的实验设计,自行连接电路测量金属导体电阻,请在答题纸上清晰地列出相关直接测量量,以及 2) 理论表达式中包含的所有物理量的具体数值,计算出待测金属导体的电阻值. (要求写出计算过程)

3.2.2 试题解答

1) 惠斯通电桥桥臂上的导线电阻和接点处的接触电阻为 $10^{-3} \Omega$ 量级. 由于这些附加电阻与桥臂电阻相比小得多,故可忽略其影响. 但若用惠斯通电桥测 1Ω 以下的电阻时,这些附加电阻对测量结果的影响较为突出. 开尔文双电桥可用于测量 $10^{-6} \sim 10 \Omega$ 的电阻,有效地消减了附加电阻的影响.

本实验基于开尔文双臂电桥原理测量金属导体的电阻,完整实验电路如图 4 所示.

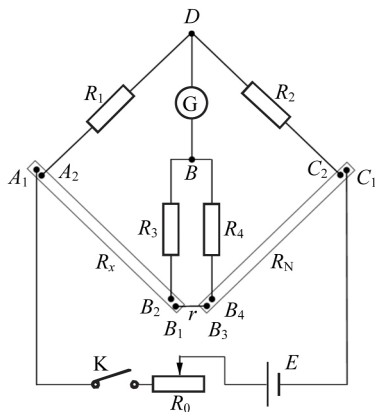


图 4 开尔文双臂电桥测电阻的电路图

2) 测量金属导体的电阻的理论表达式^[1]为

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N, \text{ 推导过程如下.}$$

调节双电桥平衡,即调节电阻 R_1, R_2, R_3, R_4 和 R_N ,使 B 和 D 处于等电位,灵敏电流计的电流 $I_g = 0$. 设 R_1, R_2, R_3, R_4 两侧串联的导线引起的附加电阻分别为 r_1, r_2, r_3, r_4, B_1 和 B_3 两接点间导线引起的附加电阻为 r ,考虑到 $R_1 \gg r_1, R_2 \gg r_2, R_3 \gg r_3, R_4 \gg r_4$,可列出方程

$$I_1 R_1 = I_3 R_x + I_2 R_3, \quad (11)$$

$$I_1 R_2 = I_3 R_N + I_2 R_4, \quad (12)$$

$$I_2 (R_3 + R_4) = (I_3 - I_2) r, \quad (13)$$

联立求解得

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N + \frac{r R_4}{R_3 + R_4 + r} \left(\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4} \right).$$

双电桥在结构上尽量做到使上式第 2 项满足

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (14)$$

故

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_N, \quad (15)$$

式(15)是双电桥的平衡条件. 所以,只要待测低电阻按四端接法接入测量,就可使用式(15)计算 R_x . (此题仅要求学生给出主要表达式)

3) 测量数据及处理. 以 $\frac{R_2}{R_4} = \frac{1000 \Omega}{1000 \Omega}$ 为例,

说明 R_x 的测量结果.

将表 1 中 R_1 的测量结果代入式(15),金属导体电阻的测量结果为 $R_x = 7.238 \times 10^{-3} \Omega$. (测量结果在给定结果范围内即可得分)

表 1 测量金属导体电阻的实验数据

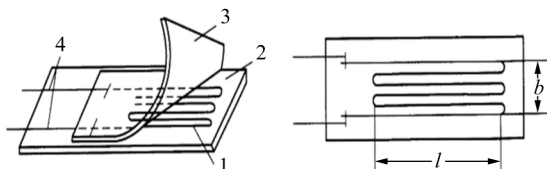
| R_2/R_4 | R_N/Ω | R_1/Ω |
|--------------------------------|--------------|--------------|
| 1 000 Ω /1 000 Ω | 0.001 | 7 238.0 |
| 100 Ω /100 Ω | 0.001 | 724.7 |

3.3 测量待测物体的质量

3.3.1 实验要求

电阻应变片是用于测量应变的元件,可将机械构件上应变的变化转换为电阻变化. 电阻应变片的结构如图 5 所示,一般由敏感栅、基底、粘合剂、引出线、覆盖层等组成^[1],其中 l 为应变片的标距或工作基长, b 为应变片的工作宽度, bl 为应变片的使用面积. 应变片的规格一般以使用面积

和电阻值来表示,如 $3\text{ mm}\times 10\text{ mm}, 350\ \Omega$. 敏感栅实际上是电阻元件,是电阻应变片感受构件应变的敏感部分,由直径 $0.01\sim 0.05\text{ mm}$ 高电阻系数的细丝弯曲成栅状. 用粘合剂将其敏感栅固定在基底上. 引出线的作用是将敏感栅电阻元件与测量电路相连接,一般由直径为 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$ 低阻镀锡铜丝制成,并与敏感栅两输出端相焊接,覆盖层起保护作用.



1. 敏感栅 2. 基底 3. 覆盖层 4. 引出线

图 5 电阻应变片的结构示意图

图 6 为弹性悬臂梁结构图,将 4 片电阻应变片分别粘贴在弹性平行梁 A 的上下表面的适当位置. $R_1\sim R_4$ 是 4 片电阻片,梁的一端固定,另一端自由(用于加载荷外力 F),若弹性梁受载荷作用而弯曲,则会引起悬臂梁上电阻应变片上电阻的变化.

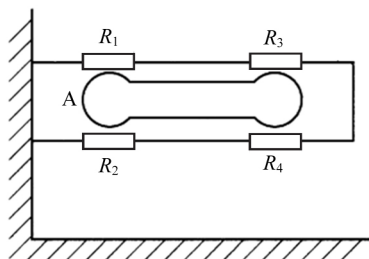


图 6 弹性悬臂梁的结构示意图

1) 结合给定实验器材,画出测量电路图.

2) 利用 1) 电路图,测量待测物体质量的直接测量量是什么? 简述如何得到待测物体质量.

3) 根据 1) 的设计,自行连接装置,测量待测物体的质量,在答题纸上清晰地列出相关直接测量量(自行设计表格,请至少测量 6 组数据),利用作图法计算出待测物体的质量.(测量结果精确至 1 g)

3.3.2 试题解答

1) 本实验采用非平衡电桥法测量待测物体的质量,实验完整电路如图 7 所示^[1].

2) 测量待测物体质量的直接测量量是输出电压(或电压,或 U). 测量过程为:

a. 将所提供的砝码依次施加于悬臂梁的自由端,在砝码重力作用下弹性梁受载荷作用而弯曲,从而引起悬臂梁上电阻应变片上电阻的变化;

b. 应变片上电阻的变化引起图 7 中 A 和 B 端输出电压 U_o 的变化;

c. 记录输出电压 U_o 和施加砝码质量 m 的关系数据;

d. 采用作图法得到待测物体的质量.(意思相近即可得分)

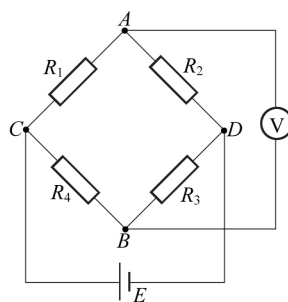


图 7 测量待测物体质量实验的电路图

3) 测量数据及处理. 输出电压 U_o 和施加砝码质量 m (或者受力 F) 的数据如表 2 所示,根据表 2 数据,在坐标纸上作出 U_o-m (或者 U_o-F) 关系图,如图 8~9 所示. 所做图线为直线,直线方程为

$$U_o = am + b.$$

在所做直线上选取相距较远的点 P_1 和 P_2 , 读取其坐标值 $P_1(80, 1.75)$ 和 $P_2(320, 2.23)$ 代入直线方程,可求得斜率 $a = 2.00 \times 10^{-3}\text{ mV/g}$,截距 $b = 1.59\text{ mV}$. 所以,输出电压 U_o 和施加砝码质量 m 之间的函数关系为

$$U_o = 0.002m + 1.59. \quad (16)$$

待测物体引起的输出电压值为 1.85 mV ,代入式(16),得待测物体的质量,测量结果为 130 g . (测量结果在给定结果范围内即可得分)

表 2 电源电压为 10.00 V 时,输出电压 U_o 和施加砝码质量 m 数据

| m/g | U_o/mV | m/g | U_o/mV |
|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| 0 | 1.59 | 200 | 1.99 |
| 50 | 1.69 | 250 | 2.09 |
| 100 | 1.79 | 300 | 2.19 |
| 150 | 1.89 | 350 | 2.29 |

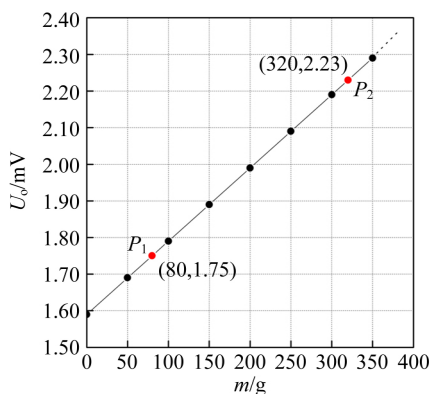


图 8 输出电压 U_0 和施加砝码质量 m 关系图

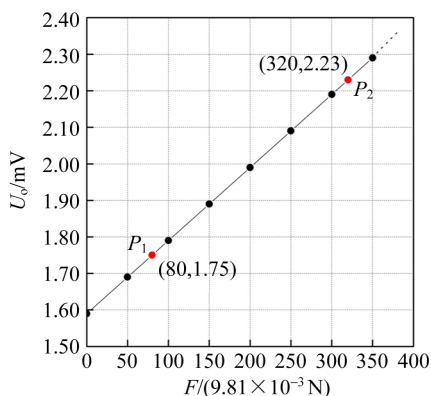


图 9 输出电压 U_0 和受力 F 关系图

4 考试结果及评析

本题以电桥实验为基础,实验内容较全面地考察了考生对单臂平衡电桥、双臂平衡电桥及非平衡电桥的理解和掌握情况。题目涉及的实验都是大学物理实验教学中的常规内容,实验相关内容在很多高校都有开设,但是参赛考生的完成率较低,得分率不高。

本次竞赛共包括 3 个大题,总分 100 分,共有 48 位考生参加了基础实验试题 D 的考试。图 10 为考生总得分分布情况,可以看出,总分分布情况接近高斯分布,区分度较高。但是考生总得分与预期存在较大偏差,40 分以上只有 2 位考生,说明考生对基础实验内容、基本实验技能和利用所掌握知识解决实际问题的能力等方面均有待于进一步提高。

第 1 题总分 35 分,得分大于 5 分有 13 人,27 人 0 分,平均得分只有 1.8 分,第 1 题得分分布如图 11 所示。本题考察利用单臂单电桥原理实现对电源内阻的测量。但是,48 位考生均不能自行

正确画出完整的实验电路图,其中 27 位考生申请提示卡 D-1(完整的实验电路图),然而大部分考生拿到提示卡后仍未能根据电路图推导出测量电源内阻的理论表达式,导致最终未能完成实验测量。根据阅卷情况分析,考生拿到提示卡后明白要用单臂电桥完成实验,但是认为需要通过灵敏电流计“指零”来判断电桥平衡,实际上本题是通过开关接通和断开时,灵敏电流计指针偏转情况无变化(分流不变)来得到电源内阻的理论表达式,考生存在灵敏电流计“指零”使用的定式思维,缺乏灵活运用所学知识和实验仪器解决实际问题的能力。本题提醒教师在以后的大学物理实验教学中,要重视实验内容的拓展性和延伸性,引导学生灵活运用所学知识。

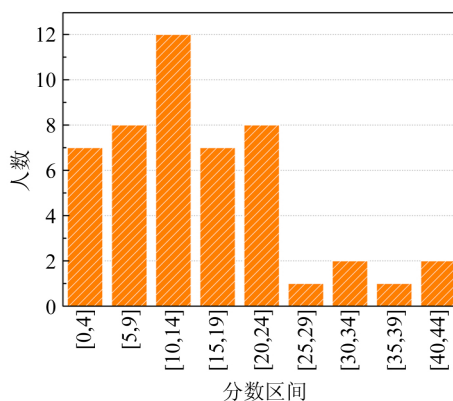


图 10 总分分布图

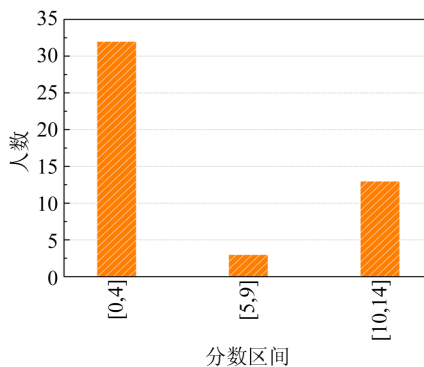


图 11 第 1 题得分分布图

第 2 题总分 30 分,最高分 22 分,26 人 0 分,平均得分只有 2.6 分,第 2 题得分分布如图 12 所示。本题考察利用双臂平衡电桥测量金属导体的电阻,是大学物理实验中常规的实验内容,大部分参赛高校开设了双臂平衡电桥(或称开尔文双桥)测电阻实验,本题考察内容基本为大学物理实验

原题,但仍有 26 位考生得 0 分. 主要原因是大部分高校开设的双臂平衡电桥实验均依托于“黑匣子”设备,所有电学元件均封装于黑匣子内,学生实际实验时并没有连接完整的双臂电桥实验电路,导致学生虽然做过实验,但是并未牢固掌握四端法测量电阻的原理和电路图,大部分考生未能正确画出本题第一步的完整实验电路图,而导致实验未能完成,得分普遍较低. 8 位考生申请提示卡 D-2(完整实验电路图),但是拿到提示卡的大部分考生仍不能正确推导或写出测量电阻的理论表达式. 另外,还有少部分考生设计利用单臂平衡电桥来测量金属导体的电阻(低电阻),未能理解单臂电桥和双臂电桥分别适用的测量电阻值范围. 本题得分情况说明,仅个别考生对基础实验掌握得较好(3 位考生得 20 分以上),考生普遍存在基础知识掌握不全面、不扎实的问题. 这也警示教师在以后的大学物理实验教学过程中,要突破“黑匣子”限制,改变“照葫芦画瓢”式的实验教学方式,提高学生的实验兴趣和动手能力.

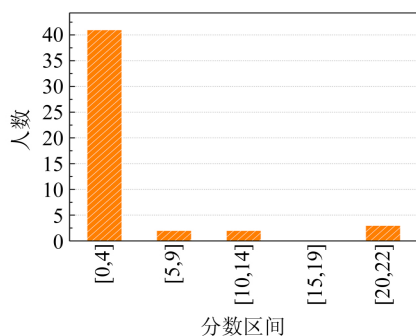


图 12 第 2 题得分分布图

第 3 题总分 35 分,最高分 30 分,4 人得 0 分,平均得分 10.4 分,第 3 题得分分布如图 13 所示. 本题得 0 分的考生主要是因为考试经验不足,时间安排不合理,没有作答本题. 本题考察非平衡电桥原理及其应用,非平衡电桥也是大学物理实验基础的实验内容,通常学生掌握的是利用非平衡桥式电路测量非平衡电压,本题要求考生将其进一步拓展,应用于测量物体的质量,重点考察学生利用所学知识解决实际问题的能力. 本题是 3 个题目中较简单的,得分情况好于前 2 题,除去得分较低的 9 分以下部分,其余得分情况区分度较好. 大部分考生明白利用非平衡电桥测量待测物体质量的原理,且直接测量量是桥式电路中

的非平衡电压 U ,因此简述测量原理部分得分情况较好,33 位考生得 5 分以上(满分 8 分),但是完全正确地画出电路图的考生只有 3 位,也说明考生需要进一步强化巩固基础知识. 仅 1 名考生完全规范地完成作图法处理实验数据,大部分考生均存在作图不规范问题,说明考生的数据处理能力比较欠缺,今后大学物理实验教学需要加强数据规范处理能力方面的训练.

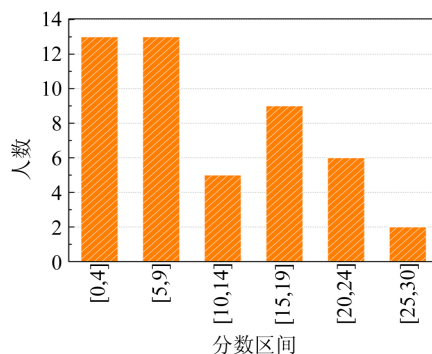


图 13 第 3 题得分分布图

基础实验试题 D 涉及的实验内容均为大学物理实验的基础内容,题目内容设计上全面涵盖了单臂平衡电桥、双臂平衡电桥和非平衡电桥的相关知识,考察层次上体现了基础理论与实际应用相结合. 在电学基础知识的掌握程度,灵活运用所学基础知识、实验操作技能、数据处理能力和利用所学知识解决实际问题的能力等方面对考生进行了全面的考察,考察结果也反映出考生的实验基础和动手能力不足等问题,也警示在今后的大学物理实验教学中,需要改变“照葫芦画瓢”式的实验模式和“黑匣子”式的实验内容,激发学生对大学物理实验的兴趣和主观能动性,让学生通过大学物理实验提高自身的综合能力.

参考文献:

- [1] 王永祥,耿志刚. 大学物理实验[M]. 北京:高等教育出版社,2016:137-138,149-150,180-183,259-261.
- [2] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学(上册)[M]. 北京:高等教育出版社,1985:268-275.
- [3] 沙振舜,周进,周非. 当代物理实验手册[M]. 南京:南京大学出版社,2012:167-170.
- [4] 李石玉,侯淑莲. 用电桥法测量电池内阻[J]. 物理实验,1998,18(5):42-43.
- [5] 韩春娟,芮法成. 用非平衡电桥测质量[J]. 吉林教育,2009(3):25.

Fundamental test D: Electric bridge and its application

WANG Li-ying^a, CHENG Li-yan^a, FENG Lie-feng^a,
WANG Yong-xiang^a, JIANG Xue-hui^b, XU Bao-zhong^b

(a. Department of Physics, School of Science, Tianjin 300354;
b. School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The experiment content, solutions and result analysis of the fundamental test D of the 7th Chinese Undergraduate Physics Experiment Competition were given and discussed. The fundamental test D consisted of 3 sections: measuring the internal resistance of a power source, measuring the resistance of a metal conductor, measuring the mass of an object. The experiment content contained single-arm balance electric bridge, double-arm balance electric bridge and unbalance electric bridge, which all were conventional experiments in college physics experiment. The experiment was designed to examine the students' ability to apply and expand the learned electrical knowledge flexibly, as well as the ability to solve practical problem.

Key words: single-arm balance electric bridge; double-arm balance electric bridge; unbalance electric bridge; resistance; mass

[责任编辑:任德香]

(上接 24 页)

Fundamental test C: Michelson interferometer and its application

LIAO Yi^a, QIN Zhu^a, FENG Lie-feng^a,
WANG Yong-xiang^a, JIANG Xue-hui^b, XU Bao-zhong^b

(a. Department of Physics, School of Science, Tianjin 300354;
b. School of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The experiment content, principle, solutions and result analysis of the fundamental test C of the 7th Chinese Undergraduate Physics Experiment Competition were given. The fundamental test C consisted of three physical parameters measured by the Michelson interferometer: air refractive index, thickness of thin glass sheet and liquid mass fraction. The related methods derivation for measuring these parameters was quite similar, and therefore the purpose was to guide students to select the reasonable experimental methods, derive formulas and design relevant experimental scheme after understanding the basic interference principle. Overall, the test was set from easy to difficult and was to examine students' ability to understand and apply basic interference theory knowledge, as well as the basic experimental operation ability.

Key words: Michelson interferometer; refractive index; zero light path difference; thickness; mass fraction

[责任编辑:任德香]