

# 伏伏法测电阻的方法研究

何述平 张雯婷

(西北师范大学教师教育学院 甘肃 兰州 730070)

(收稿日期:2022-08-05)

**摘要:**研究了伏伏法测电阻的实验原理方法和数据处理方法,结果表明:原理方法有内接式和外接式,数据处理方法有图像法和平均法;给出了结合实测数据运用方法的实测结果,结果表明:标配电压表和基本器材构成的内、外接式测量电路均可行;讨论了测量特点、匹配条件、教学价值,深化了伏伏法测电阻的认识。

**关键词:**伏伏法;电阻;原理方法;数据处理方法;匹配条件

## 1 引言

伏安法测电阻是普通高中物理基本内容<sup>[1]</sup>,亦是历年物理高考热点;依据测电阻的实验原理方法,伏安法为基本方法<sup>[2]</sup>,伏伏法为拓展方法.然而,伏伏法测电阻的相关分析:

(1) 侧重实验原理,未涉及数据处理<sup>[3-6]</sup>,呈现两电压表匹配实例<sup>[4-6]</sup>.

(2) 基于一电压表量程远大于另一电压表的假设(此假设与实例中两电压表量程5 V、2 V不符,更与实验实际不符)、电压表读数的相对误差,分析认为伏伏法测电阻内接式更精确<sup>[4]</sup>;此分析逻辑上欠严谨(不合理假设作前提)、结论上欠合理(电压表读数不同时相对误差不同,但最大绝对误差一定;实质是待测电阻、电压表匹配问题)。

(3) 未呈现实测数据及实测结果<sup>[3-6]</sup>,从而不明伏伏法测电阻实践上是否可行(尽管理论上可行)。

就此进行相应研究,以期明确伏伏法测电阻的原理方法、数据处理方法,提供实测结果的证据支撑,明晰待测电阻、电压表的匹配条件,为一线教师合理设计教学奠定基础。

## 2 原理方法

“类比”伏安法测电阻电路,伏伏法测电阻有电压表内、外接两种电路连接方式。

### 2.1 内接式原理方法

伏伏法测电阻的内接式电路如图1:待测电阻 $R_x$ 、电压表 $V_1$ (内阻 $R_{V_1}$ )串联,再与电压表 $V_2$ (内阻 $R_{V_2}$ )并联;滑动变阻器 $R_0$ 接成分压式(多次测

量,减小误差);闭合开关S,移动滑片P,电压表 $V_1$ 、 $V_2$ 示数分别为 $U_1$ 、 $U_2$ .依据电阻概念、串并联电路规律, $R_x$ 测得值为

$$R_{x_i} = \frac{U_2 - U_1}{\frac{U_1}{R_{V_1}}} \quad (1)$$

由式(1)得

$$U_2 = \frac{R_{V_1} + R_{x_i}}{R_{V_1}} U_1 \quad (2)$$

式(2)表明: $U_2$ 与 $U_1$ 呈正比函数关系( $R_{V_1}$ 、 $R_{x_i}$ 恒量).运用线性函数的数据处理方法( $R_{V_1}$ 已知量, $R_{x_i}$ 待测量)可确定 $R_{x_i}$ .

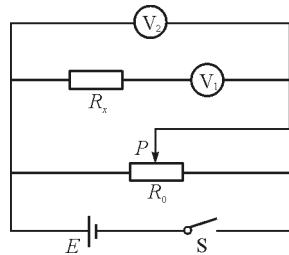


图1 伏伏法内接式电路

### 2.2 外接式原理方法

伏伏法测电阻的外接式电路如图2:待测电阻 $R_x$ 、电压表 $V_1$ (内阻 $R_{V_1}$ )并联,再与电压表 $V_2$ (内阻 $R_{V_2}$ )串联;滑动变阻器 $R_0$ 接成分压式(多次测量,减小误差);闭合开关S,移动滑片P,电压表 $V_1$ 、 $V_2$ 示数分别为 $U_1$ 、 $U_2$ .依据电阻概念、串并联电路规律, $R_x$ 测得值为

$$R_{x_e} = \frac{U_1}{\frac{U_2}{R_{V_2}} - \frac{U_1}{R_{V_1}}} \quad (3)$$

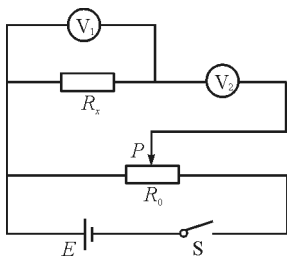


图2 伏伏法外接式电路

由式(3)得

$$U_2 = \frac{(R_{V_1} + R_{x_e})R_{V_2}}{R_{V_1}R_{x_e}}U_1 \quad (4)$$

式(4)表明: $U_2$ 与 $U_1$ 呈正比函数关系( $R_{V_1}$ 、 $R_{V_2}$ 、 $R_{x_e}$ 恒量).运用线性函数的数据处理方法( $R_{V_1}$ 、 $R_{V_2}$ 为已知量, $R_{x_e}$ 为待测量)可确定 $R_{x_e}$ .

比较式(2)和式(4)可知,内接式需知 $R_{V_1}$ ,外接式需知 $R_{V_1}$ 、 $R_{V_2}$ ;因此,内接式原理方法较外接式简洁.

### 3 数据处理方法

图像法、平均法是物理实验数据处理的基本方法,也是解决拟合直线时方程数多于变量数的方法<sup>[7]</sup>.据此简要推证伏伏法测电阻数据处理的图像法、平均法.

#### 3.1 图像法

##### 3.1.1 内接式图像法

由测得的 $n$ 组数据 $U_{1j}$ 、 $U_{2j}$ ( $j=1,2,\dots,n,n\geq 6$ ),作 $U_2-U_1$ 图像(通过原点的直线),得斜率 $k_i$ ;再由式(2)得

$$R_{x_i} = (k_i - 1)R_{V_1} \quad (5)$$

式(5)为伏伏法内接式图像法确定的待测电阻表达式.

##### 3.1.2 外接式图像法

由测得的 $n$ 组数据 $U_{1j}$ 、 $U_{2j}$ ( $j=1,2,\dots,n,n\geq 6$ ),作 $U_2-U_1$ 图像(通过原点的直线),得斜率 $k_e$ ;再由式(4)得

$$R_{x_e} = \frac{R_{V_1}R_{V_2}}{k_e R_{V_1} - R_{V_2}} \quad (6)$$

式(6)为伏伏法外接式图像法确定的待测电阻表达式.

#### 3.2 平均法

##### 3.2.1 内接式平均法

依据物理实验数据处理的平均法<sup>[2,7]</sup>,将测得

的 $n$ 组数据 $U_{1j}$ 、 $U_{2j}$ ( $j=1,2,\dots,n,n\geq 6$ )代入式(2),得 $n$ 组线性方程;再求和,可得

$$\frac{R_{V_1} + R_{x_i}}{R_{V_1}} = \frac{\sum_{j=1}^n U_{2j}}{\sum_{j=1}^n U_{1j}} \quad (7)$$

简化式(7),有

$$\frac{R_{V_1} + R_{x_i}}{R_{V_1}} = \frac{\overline{U_2}}{\overline{U_1}} \quad (8)$$

式中 $\overline{U_1} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{1j}$ , $\overline{U_2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_{2j}$ ;式(8)表明了平均法取平均效果的意义,进而得

$$R_{x_i} = \left( \frac{\overline{U_2}}{\overline{U_1}} - 1 \right) R_{V_1} \quad (9)$$

式(9)为伏伏法内接式平均法确定的待测电阻表达式.

##### 3.2.2 外接式平均法

将测得的 $n$ 组数据 $U_{1j}$ 、 $U_{2j}$ ( $j=1,2,\dots,n,n\geq 6$ )代入式(4),得 $n$ 组线性方程;再求和,可得

$$\frac{(R_{V_1} + R_{x_e})R_{V_2}}{R_{V_1}R_{x_e}} = \frac{\sum_{j=1}^n U_{2j}}{\sum_{j=1}^n U_{1j}} \quad (10)$$

简化式(10),有

$$\frac{(R_{V_1} + R_{x_e})R_{V_2}}{R_{V_1}R_{x_e}} = \frac{\overline{U_2}}{\overline{U_1}} \quad (11)$$

其中 $\overline{U_1}$ 、 $\overline{U_2}$ 的表达式同前,式(11)表明了平均法取平均效果的意义,进而得

$$R_{x_e} = \frac{R_{V_1}R_{V_2}}{\frac{\overline{U_2}}{\overline{U_1}}R_{V_1} - R_{V_2}} \quad (12)$$

式(12)为伏伏法外接式平均法确定的待测电阻表达式.

## 4 测量实例

### 4.1 测量数据

#### 4.1.1 内接式测量数据

由中学物理实验标配电表、基本器材[电压表 $V_1$ (直流伏特计J0408型,2.5级;3V挡, $R_{V_1}=3\text{ k}\Omega$ ),电压表 $V_2$ (同前;15V挡, $R_{V_2}=15\text{ k}\Omega$ );学生电源(J1201-1型,2~16V,2V进步值),滑动变阻器(J2356型,1.5A,200 $\Omega$ ),电阻箱(J2361型,0.2级,0~9999 $\Omega$ );待测电阻9k $\Omega$ ]构成伏伏法测电

阻内接式电路图1,实测数据如表1(注:校准两电压表是获得准确数据的关键)。

表1 内接式  $U_1$  和  $U_2$  数据

$U_1/V$	0.00	0.80	1.20	1.60	2.00	2.40	2.80
$U_2/V$	0.0	3.2	4.8	6.4	8.0	9.7	11.3

#### 4.1.2 外接式测量数据

由中学物理实验标配电表、基本器材(同前内接式)构成伏伏法测电阻外接式电路图2,实测数据如表2(注:校准两电压表是获得准确数据的关键)。

表2 外接式  $U_1$  和  $U_2$  数据

$U_1/V$	0.00	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	2.10
$U_2/V$	0.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	13.9

### 4.2 测量结果

#### 4.2.1 内接式测量结果

##### (1) 图像法结果

由表1数据、Excel程序<sup>[8]</sup>得内接式  $U_2 - U_1$  图像及表达式,如图3所示。

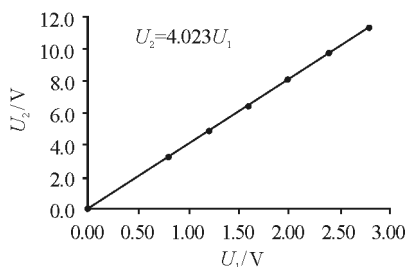


图3 内接式  $U_2 - U_1$  图像

$U_2 - U_1$  图像表明: $U_2$  与  $U_1$  成正比函数关系;由斜率4.023、式(5)得  $R_{xi} = 9.07 \text{ k}\Omega$ 。

##### (2) 平均法结果

由表1数据、式(9)得  $R_{xi} = 9.06 \text{ k}\Omega$ 。

#### 4.2.2 外接式测量结果

##### (1) 图像法结果

由表2数据、Excel程序<sup>[8]</sup>得外接式  $U_2 - U_1$  图像及表达式,如图4所示。

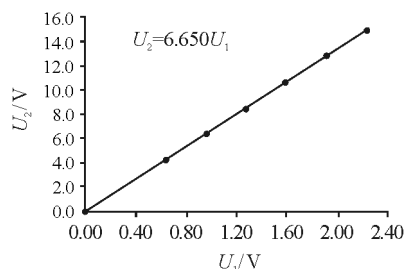


图4 外接式  $U_2 - U_1$  图像

外接式  $U_2 - U_1$  图像表明: $U_2$  与  $U_1$  成正比函数

关系;由斜率6.650、式(6)得  $R_{xe} = 9.09 \text{ k}\Omega$ 。

##### (2) 平均法结果

由表2数据、式(12)得  $R_{xe} = 9.07 \text{ k}\Omega$ 。

实测结果表明:伏伏法测电阻内、外接式不仅合理、准确,而且可行。内接式相对误差:图像法0.8%,平均法0.7%;外接式相对误差:图像法1.0%,平均法0.8%;内、外接式谈不上孰优孰劣。

## 5 讨论

### 5.1 测量特点

图1伏伏法内接式电路,电压表  $V_1$  测自身两端的电压,可等效为测通过  $R_{xi}$  的电流;电压表  $V_2$  测  $R_{xi}$ 、 $R_{V_1}$  串联的总电压;或者,  $V_1$ 、 $R_{xi}$  串联,可等效为扩量程电压表  $V_{1e}$ :量程  $U_{1me} = \left(1 + \frac{R_{xi}}{R_{V_1}}\right) U_{1m}$ ,内阻  $R_{V_{1e}} = R_{V_1} + R_{xi}$ 。

图2伏伏法外接式电路,电压表  $V_1$  测  $R_{xe}$  两端的电压,同时测通过自身的电流;或者,  $V_1$ 、 $R_{xe}$  并联,可等效为同量程电压表  $V_{1e}$ :量程  $U_{1me} = U_{1m}$ ,内阻  $R_{V_{1e}} = \frac{R_{V_1} R_{xe}}{R_{V_1} + R_{xe}}$ ;电压表  $V_2$  测自身两端的电压,可等效为测通过  $R_{xe}$ 、 $R_{V_1}$  并联的总电流。

比较伏安法测电阻可知:伏伏法测电阻内、外接式均没有测量的系统误差[式(1)、(3)],仅有电表的读数误差(随机误差);因此,伏伏法可准确测得电阻。伏安法测电阻内、外接式均既有测量的系统误差,又有电表的读数误差(随机误差);因此,伏安法可近似测得电阻,且要依据系统误差大小,选择内或外接式,进而相对准确测得电阻<sup>[2]</sup>。

### 5.2 匹配条件

#### 5.2.1 内接式匹配条件

由式(2)可得

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_i = 1 + \frac{R_{xi}}{R_{V_1}} \quad (13)$$

式(13)表明了伏伏法内接式  $\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_i$  与  $R_{V_1}$ 、 $R_{xi}$  的定量关系,亦是伏伏法内接式待测电阻、电压表的匹配条件。例如:(1)若  $U_1 = 2.80 \text{ V}$ ,  $R_{V_1} = 3 \text{ k}\Omega$  ( $V_1$  参量同前),  $R_{xi} = 9 \text{ k}\Omega$ ,由式(13)可得  $U_2 = 11.2 \text{ V}$ ,表明电压表  $V_2$  (参量同前)可以匹配(表1实测数据可作为实例、支撑);即由式(13)可估算给定待测电阻、一电压表时的另一电压表参量,进而选取匹配的电

压表;(2)若 $U_1=2.80\text{ V}$ , $R_{V_1}=3\text{ k}\Omega$ , $U_2$ 为 $10.0\sim 14.0\text{ V}$ ,由式(13)可得 $R_{x_i}$ 为 $8\text{ k}\Omega\sim 12\text{ k}\Omega$ ;即由式(13)可估算给定电压表时的待测电阻值,进而选取匹配的待测电阻。

### 5.2.2 外接式匹配条件

由式(4)可得

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_e = \frac{R_{V_2}}{R_{V_1}} + \frac{R_{V_2}}{R_{x_e}} \quad (14)$$

式(14)表明了伏伏法外接式 $\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_e$ 与 $R_{V_1}$ 、 $R_{V_2}$ 、 $R_{x_e}$

的定量关系,亦是伏伏法外接式待测电阻、电压表的匹配条件.例如:(1)若 $U_1=2.10\text{ V}$ , $R_{V_1}=3\text{ k}\Omega$ ( $V_1$ 参量同前), $R_{V_2}=15\text{ k}\Omega$ , $R_{x_e}=9\text{ k}\Omega$ ,由式(14)可得 $U_2=14.0\text{ V}$ ,表明电压表 $V_2$ (参量同前)可以匹配(表2实测数据可作为实例、支撑);即由式(14)可估算给定待测电阻、一电压表时的另一电压表参量,进而选取匹配的电压表;(2)若 $U_1=2.00\text{ V}$ , $R_{V_1}=3\text{ k}\Omega$ , $U_2$ 为 $11.0\sim 14.0\text{ V}$ , $R_{V_2}=15\text{ k}\Omega$ ;由式(14)可得 $R_{x_e}$ 为 $30\text{ k}\Omega\sim 8\text{ k}\Omega$ ;即由式(14)可估算给定电压表时的待测电阻值,进而选取匹配的待测电阻。

### 5.3 教学价值

伏伏法测电阻实验呈现了真实性、思维性、探究性问题,提供了运用知识(电阻概念、串并联电路规律)、方法(伏伏法、图像法、平均法,电压表使用方式的并联式 $\rightarrow$ 串联式)解决实际问题的实例;梳理实验过程,伏伏法测电阻可提升的物理学科核心素养为:科学思维之模型建构(内、外接式电路)、科学推理(电压 $U_2$ 与 $U_1$ 呈正比函数关系及其图像,数据处理的图像法、平均法,待测电阻、电压表的匹配条

件)、科学论证(实验原理的合理性,实验方法的可行性)、质疑创新(测电阻的伏安法 $\rightarrow$ 伏伏法,电压表使用方式的并联式 $\rightarrow$ 串联式);科学探究之问题(内、外接式原理方法、数据处理方法,匹配条件)、证据(实测数据,实测结果)、解释(运用图像法、平均法处理数据,基于相对误差评估实测结果、得出准确、可行的合理结论)。

鉴于上述教学价值,伏伏法测电阻可作为伏安法的有益拓展实验项目,即不仅明确实验原理方法、匹配条件,而且运用操作方法、数据处理方法,获得合理测量结果;或许只有亲自经历了,方可有感受,才可理解,进而内化核心素养。

### 参考文献

- [1] 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.普通高中教科书·物理必修3[M].北京:人民教育出版社,2019:65.
- [2] 何述平.伏安法测电阻的方法研究[J].物理通报,2020(1):65-68.
- [3] 蒋守培.“伏安法测电阻”的重点、难点剖析[J].物理教师,2014,35(2):42-44.
- [4] 林贵.异类“双电表”伏安法测电阻[J].物理教师,2012,33(11):41-42.
- [5] 闫培新.“伏安法”测电阻的电路设计实验拓展[J].中学物理教学参考,2018,47(4):67-70.
- [6] 汪松元.核心素养培育导向的进阶式问题驱动教学探索——以“伏安法测电阻”教学为例[J].中学物理教学参考,2018,47(12):12-16.
- [7] 龚镇雄.普通物理实验中的数据[M].西安:西北电讯工程学院出版社,1985:132,124-130.
- [8] 何述平.图像法处理打点纸带的研究[J].物理教师,2013,34(1):57-60.

## Study on the Method of Measuring Resistance by Volt-volt Method

HE Shuping ZHANG Wenting

(College of Teacher Education, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070)

**Abstract:** The experimental principle method and data processing method of measuring resistance by volt-volt method are studied, and the results show that the principle method includes internal connection and external connection, and the data processing method includes image method and average method. The measured results of applying the methods combined with measured data are given, and the results show that the internal and external measuring circuits composed of standard voltmeter and basic equipment are feasible. The measuring characteristics, matching conditions and teaching value are discussed, and the understanding of measuring resistance by volt-volt method is deepened.

**Key words:** volt-volt method; resistance; principle method; data processing method; matching condition