

# 获取实验证据 解构疑难问题

——以磁电式交流电压表测量示数探究为例

曹海奇

(杭州第二中学 浙江 杭州 311000)

(收稿日期:2021-02-20)

**摘要:**高中物理教材中,对磁电式交流电压表的工作原理和结构很少介绍,由此带来种种教学上的困扰以及解决问题中的困难.通过若干个自行设计的电路,对磁电式交流电压表测量示数等问题进行了探究.使用信号源向磁电式交流电压表输入多种形式的交流电(正弦交流电、方波交流电、三角波交流电、以及其他形式的交流电),再利用示波器同时显示多用表的“输入电压”“表头电压”,并与磁电式交流电压表的“示数”进行对比;得出:磁电式交流电压表测量交流电时,指针偏转角跟“单方向输入电压的平均值”成正比,即表头感知的是正弦交流电半波整流后的平均值,然后根据半波平均值与有效值之间的比例标定刻度.

**关键词:**磁电式交流电压表 半波整流 示波器 平均值 有效值

## 1 问题缘起

磁电式交流电压表是高中物理教学和实验中常见仪器,普遍认为交流电压表测量的数值是交流电压的有效值.在高中习题中,经常会出现关于交流电压表的示数问题,在此不少学生产生疑惑.如下是一典型例题:

**【例题】**一台理想变压器的原、副线圈的匝数比是5:1,原线圈接入电压为220 V的正弦交流电,各元件正常工作,一个理想二极管和一个滑动变阻器R串联接在副线圈上,如图1所示,电压表和电流表均为理想交流电表.则下列说法正确的是( )

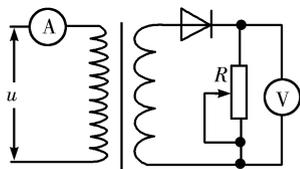


图1 例题图

- A. 原、副线圈中的电流之比为5:1
- B. 电压表的读数约为44 V
- C. 若滑动变阻器接入电路的阻值为20 Ω,则1 min产生的热量为2 904 J
- D. 若将滑动变阻器的滑片向上滑动,则两电表读数均增大

参考答案为C.

在本题中,A和D两个选项错误明显,根据有效值定义算出热量也是正确的,所以选项C正确.选项B是否正确呢?我们可以计算出滑动变阻器两端电压的有效值为 $22\sqrt{2}$  V,若认定电压表测量的是有效值,则选项B当然不正确.

但是在教学实践中,每次讲到交流电压表测量的是交流电压的有效值时,很多学生就提出疑问:电压表内部会发热吗?难道是表头有发热装置?但在拆解后发现交流电压表也是磁电式的,那么交流电压表是怎样测量有效值的呢?

关于这个问题,高中教材是这样说的:一般交流电压表测量的数值是有效值,有效值是根据电流发热(能量)来定义的<sup>[1]</sup>,磁电式电表的工作原理,指针是通过表头内线圈受到安培力产生的力矩而偏转的<sup>[2]</sup>.

也许是鉴于中学生知识面不够,教材并没有对此展开讨论.在此我们作如下分析:

(1)交流电压表是磁电式的,那么其指针的偏转必然是根据表头线圈受到的力矩而产生的<sup>[3]</sup>.

(2)交流电压表表头线圈受到的力矩应该跟交流电压的某一“特征值”有关,而这一“特征值”跟有效值有一定比例关系.

(3)如果通过线圈的是正弦交流电,那么在一个周期内,力矩产生的偏转效果应该为零.

(4)对于各种交流电,如正弦交流电、方波交流

电、三角波交流电,以及其他形式的交流电,交流电压表能感知的“特征值”与有效值的比例都相同么?交流电压表能测正弦交流电以外的其他交流电吗<sup>[4]</sup>?

## 2 交流电压表适用范围的初步界定

针对“交流电压表能否用来测量正弦交流电以外的交流电”这一问题,做了以下实验.实验中所用仪器为杭州电表厂生产的J0411万用表交流电压挡.

### 2.1 设计电路

如图2所示,将示波器(CH1)与交流电压表直

接并联,接入电路测量串联电路中AB两端的电压;当信号源提供不同形式的交流电时,观察电压表示数与输入电压(示波器观察可得)的理论有效值之间是否一致.

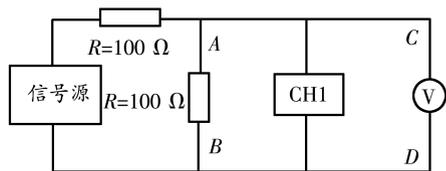


图2 交流表适用范围初步界定的设计电路

### 2.2 波形比较

现对几种波进行了测量,如表1所示.

表1 几种波形测量数据

信号源	正弦波	方波	其他波
AB两端波形			
有效值/V	1.20	1.70	某一数值
电表示数/V	1.20	1.88	0

### 2.3 结果分析

从上表中我们可以看出,当交流电压按正弦规律变化时,交流电表的测量值和正弦电压的有效值相等.但是当交流电压按上表中方波规律变化时,电表示数却大于有效值(最大值);当交流电压按上表中只加负向电压变化时,电表示数却为零,显然在后两种情况下,交流电压表测量的不是有效值,也就是交流电压表,不适合用来测量正弦交流电压以外的其他电压<sup>[5]</sup>.

## 3 窥探内部结构 细说工作原理

那么交流电压表测量的到底是什么值?交流电压表测量正弦交流电是准确的,测量其他交流电却不准.交流电压表“感知”的是正弦交流电的哪个特征值呢?

### 3.1 对表头进行改装

根据电表的改装原理,我们知道电表是由于表头所受电流的安培力的力矩而偏转的,自然我们可以设计实验将表头本身的电压(电流)显示出来.

如图3所示,现在表头上接出一根导线E,我们

可以用示波器连接在该导线和负极上,从而显示出表头两端的电压随时间的变化关系.并将改装以后的电路接入如下图4所示的测量电路.



图3 改装后的表头

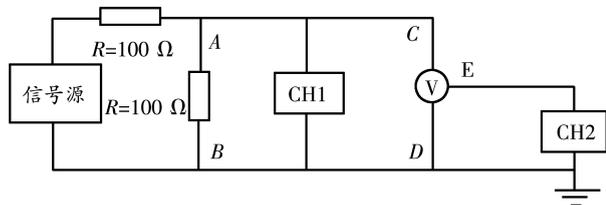


图4 利用示波器测量电压表输入电压与表头电压电路图

### 3.2 测量电路

如图4所示,信号源为一个可以发出各种波形的交流电源,将两个 $R=100\ \Omega$ 的电阻串联接在交

流电源的两端,用示波器的CH1接口直接测量AB两端的电压.用交流电压表的正、负接线柱C和D端与A和B端并联,这样示波器CH1端就可以和电压表的输入电压保持同步,将示波器的CH2端与表头上抽头E、交流电压表的负极D相连,则CH2与表头电压保持同步.我们可以通过CH1清楚地显示电表的输入电压,通过CH2清楚地看到表头电压.(注:以下所有实验使用的频率均为400 Hz,为了让两信号都能清楚显示,CH1和CH2所取标度不同)

现将信号源调为正弦波(图中只显示了1.5个周期),得到电压表输入电压与表头电压如图5所示(电表输入电压每大格0.5 V,表头输入电压每大格0.1 V).由图可看出,当电压表输入电压为负时,表头无电压,且表头电压约为电表输入电压的 $\frac{14}{170}$ 倍,故可猜测电表内部有二极管,还有一个较大电阻与表头串联,起到分压作用,如图6所示结构可满足要求.

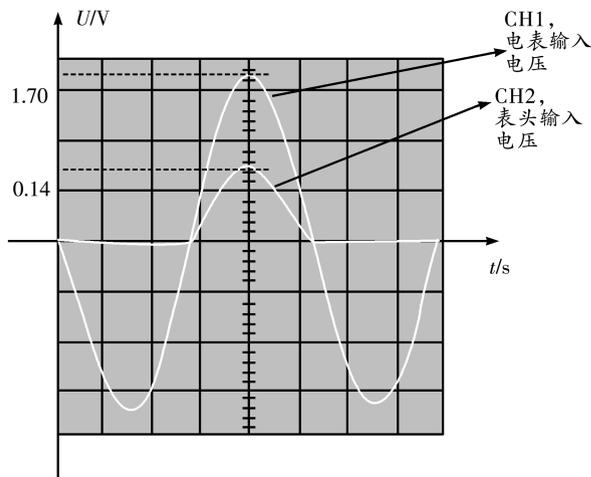


图5 输入正弦波及表头电压随时间的关系

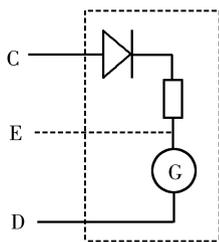


图6 电压表内部电路

### 3.3 对各种输入信号进行测量及验证

#### 3.3.1 对正弦输入信号进行测量并猜测表头感知规律

对波形如图5所示的正弦波分析,表头显示为

$$U = 1.20 \text{ V.}$$

(1) 电压表输入电压的有效值为

$$U_{\text{有效}} = \frac{1.70}{\sqrt{2}} \text{ V} \approx 1.20 \text{ V}$$

(2) 电压表输入电压的平均值为

$$U_{\text{平均}} = 0 \text{ V}$$

(3) 表头输入电压的有效值为

$$U'_{\text{有效}} = \frac{0.14}{2} \text{ V} = 0.070 \text{ V}$$

(4) 表头输入电压的平均值为

$$U'_{\text{平均}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} u' dt \text{ (其中 } u' = 0.14 \sin \omega t \text{)}$$

将上式积分可得

$$U'_{\text{平均}} = \frac{0.14}{\pi} \text{ V}$$

假设表头示数可用来反映上述4个量,且表头示数与这些量之间成正比关系:

若  $U = K_1 U_{\text{有效}}$ , 则  $K_1 = 1$ .

若  $U = K_2 U'_{\text{有效}}$ , 则  $K_2 = \frac{1.20}{0.070} = \frac{120}{7} \approx 17.1, U = 17.1 U'$ .

若  $U = K_3 U'_{\text{平均}}$ , 则  $K_3 = \frac{120\pi}{0.140} = \frac{60}{7}\pi \approx 26.9, U = 26.9 U'_{\text{平均}}$ .

对于正弦波而言,只要适当选择刻度盘的标度,可以做到(1)(3)(4)都能满足要求.

#### 3.3.2 对方波信号进行测量并验证表头感知量

现将信号源调为上下对称的方波信号,其波形如图7所示,表头显示为1.85 V.

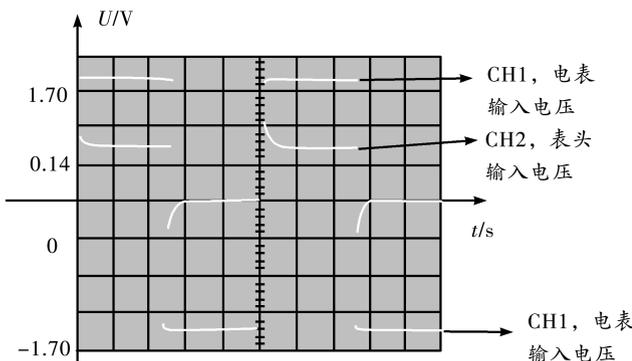


图7 输入方波及表头电压随时间的关系

由于1.80 V大于1.70 V,所以表头示数不可能反映方波信号的有效值.输入电压的平均值为零,因此,表头示数也不能反映输入电压的平均值.

(1) 按表头输入电压的有效值计算:  $\frac{U'_{\text{有效}}}{R} T =$

$\frac{0.14^2}{R} \frac{T}{2}$ , 可得:  $U'_{\text{有效}} = 0.9899$ , 转化成表头示数为

$$U = 17.1U'_{\text{有效}} = 1.69 \text{ V}.$$

(2) 按表头输入电压的平均值计算:  $U'_{\text{平均}} = \frac{1}{2} \times 0.14 \text{ V} = 0.07 \text{ V}$ , 转化为表头示数为  $U = 26.9 \text{ V}$ ,  $U'_{\text{平均}} = 1.88 \text{ V}$ , 在误差允许范围内, 满足电压表示数反映表头上电压平均值的要求.

### 3.3.3 利用三角波信号进一步验证表头感知量

将信号源调整为三角波信号, 其波形如图 8 所示, 表头示数为  $0.94 \text{ V}$ .

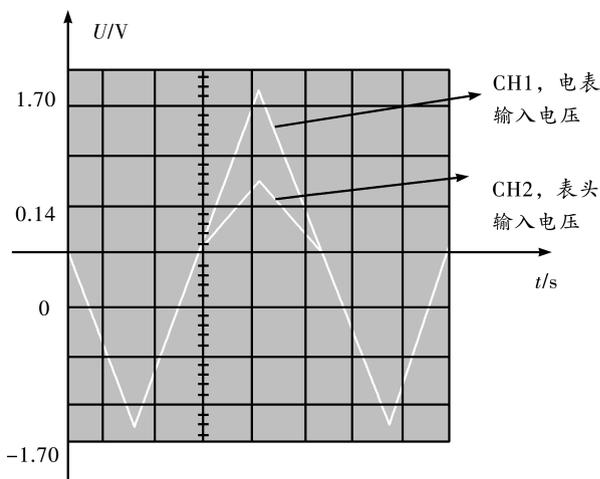


图 8 输入三角波及表头电压随时间的关系

#### (1) 按表头输入电压的有效值计算

$$Q = \int_0^{\frac{T}{4}} \frac{\left(\frac{0.56}{T}t\right)^2}{R} dt = \frac{(U'_{\text{有效}})^2}{R} \frac{T}{2}$$

计算可得

$$U'_{\text{有效}} = \frac{0.56}{8} \sqrt{\frac{2}{3}} \text{ V} \approx 0.05715 \text{ V}$$

$$U = 17.1U'_{\text{有效}} = 0.98 \text{ V}$$

#### (2) 按表头输入电压的平均值计算

$$U'_{\text{平均}} = \frac{0.14}{4} \text{ V} = 0.035 \text{ V}$$

$$U = 26.9U'_{\text{有效}} = 0.94 \text{ V}$$

## 4 问题解决

从以上叙述中可以看出, 高中学生用磁电式交流电压表在测量交流电压时, 是先通过半波整流电路, 去掉负电流, 流经表头线圈的电流产生安培力, 安培力产生的冲击平均作用使表头指针发生偏转, 表头感知的是平均电压, 并将这个平均电压乘以一

个系数(本实验用的电表约 26.9, 每个电表可能会不同)便是电表的示数. 在测量正弦电压时能满足示数即为有效值, 但在测量非正弦电压时, 示数一般不是其有效值.

回到文章初始问题, 对于该电路, 尽管二极管有单向导电性, 但是对于磁电式电压表而言, 进入磁电式电表表头线圈的电流已经是只有正向电流, 所以题中的二极管对电压表的示数没有影响, 这样看选项 B 也应是正确的. 对于高中生而言可以计算方波和正弦波或其他比较简单的信号电压的有效值, 但是应尽量回避利用交流电压表测量非正弦波状态下的有效值问题.

## 5 结束语

任何结论的成立都有其对应的条件, 不顾条件的结论只能是死结论. 不问条件套用结论, 可能得到完全错误的结果, 学生在学习中容易犯此类错误, 教师更应该在教学中做出表率, 设计实验、获取证据, 论证结论的条件及可靠性, 推动科学思维和科学探究的核心素养培育.

## 参考文献

- 1 人民教育出版社, 课程教材研究所. 普通高中课程标实验教科书选修 3-2[M]. 北京: 人民教育出版社, 2010. 35
- 2 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. 普通高中课程标准实验教科书物理选修 3-1 [M]. 北京: 人民教育出版社, 2010. 93
- 3 周启龙. 电功仪表及测量[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008. 4~43, 71~73
- 4 欧建雄. 交流电表的分析及其工作原理[J]. 物理教师, 2016(2): 86~89
- 5 于彭波. 磁电系电压表测量交流电压和整流系电压表测量直流电压的结果分析[J]. 仪表技术, 2009(8): 3~5

## 更正

物理通报 2021 年第 4 期第 62 页图 7 中左边第 1 条虚线, 应略向左平移至坐标  $x_1$  与  $x_2$  连线的中点位置, 特此更正.