

电路实验指导书

北方工业大学
电路实验室
二〇〇〇年八月

目 录

一、实验要求	(1)
二、实验知识	(5)
1. 电测量仪表的一般知识	(5)
2. 误差分析和数据处理	(12)
3. 实验安全事项	(17)
4. 实验故障及一般排除方法	(21)
三、实验内容	(23)
1. 元件伏安特性的测量	(23)
2. 迭加定理和戴维南定理	(26)
3. 互易定理、替代定理、特勒根定理	(29)
4. 受控源	(31)
5. 一阶电路过渡过程	(34)
6. 二阶电路过渡过程	(36)
7. 交流参数测定和最大功率传输	(38)
8. 功率因数提高	(41)
9. RLC 串联电路频率特性	(43)
10. 互感	(45)
11. 三相电路中的电压与电流	(47)
12. 三相电路功率测量	(49)
13. 二端口参数测定	(51)
14. 回转器	(55)
15. 负阻抗变换器	(58)
16. 状态轨迹研究	(61)
17. 双 T 网络选频特性	(63)
18. 有源滤波器	(65)
19. 万用表组装	(68)
20. 直流稳压电源安装	(75)
21. 电冰箱保护器安装与调试	(78)
四、实验设备使用说明	(82)
1. DH1718 型双路跟踪稳流稳压电源	(84)
2. XD22 型低频信号发生器	(86)
3. HH4310/HH4311A 通用示波器	(90)
4. DA16-1 型晶体管毫伏表	(90)

一、实验要求

一、课前准备:预习实验讲义,要求做到:

1. 明确实验目的,了解实验原理(有关的理论部分),明确实验任务。
2. 知道实验线路,实验方法和步骤,对仪器设备性能、使用方法初步了解。
3. 知道实验中要测哪些数据,设计好记录表格。
4. 了解本实验注意事项。

上述各项均应从预习报告中反映出来,实验课前教师进行检查,没有进行准备和无预习报告的均不得进行实验。

二、实验进行

1. 必须按时到实验室做实验,并提前 5 分钟签到,实验中保持安静,不得到处走动。
2. 注意人身安全。做到:
 - a. 不得用手触及带电部分。
 - b. 不得带电操作,更改线路或拆除线路时,必须先断开电源。
 - c. 发生事故时,应立即拉闸,保持镇静,并向老师报告。
3. 注意设备安全。做到:

a. 接完线路后,必须经教师检查,才能合闸,实验中线路若有大的更改,也必须经过教师检查。

b. 注意仪器设备规格及操作规程,不了解性能用法时,不使用仪器。发生设备损坏,填写事故报告单,听候处理。

c. 搬动仪器时,轻拿轻放。

4. 注意科学作风的培养和实验技能的提高。

科学作风:

a. 接线要求整齐,先根据操作便利安排好仪器位置,然后接线,注意选择长短合适的线,利用颜色不同的线,以便检查。

b. 原始记录必须清楚,注意表格化,用复写纸记录,同组实验者每人一份(用十六开片艳纸),最后应经教师签字。记录时注意有效数字。原始记录格式见附录。

c. 非实验物品(书包、衣物)不要放在实验桌上。

实验技能:

- a. 注意接线能力及查线能力的提高,同组同学先互查,然后请教师检查。
- b. 注意仪器使用方法及注意事项。
- c. 注意曲线取点的方法。
- d. 学习检查数据的方法,边做实验,边检查数据。
- e. 注意同组同学的组织方式。
- f. 提高检查、分析、排除事故的能力。

三、实验报告内容及要求：

1. 数据整理. 将整理后的实验原始数据及计算结果列入表格, 表格下面应举一例说明是怎样计算的。

2. 曲线或矢量图。要求：

a. 曲线一律用 16 开格纸, 坐标比例尺应与实验数据精度相一致。

b. 做曲线一定要用曲线板, 曲线力求光滑, 并且要标注实验数据对应的点(见附录)。

c. 坐标轴上应写出物理量的符号及单位, 在方格纸上适当空白处, 写上曲线名称, 绘图者、绘图日期。

d. 矢量图要用直尺和量角器做出, 并注明矢量图名称。

3. 结论和讨论。必须根据实验结果做出相应结论, 无结论实验报告退回补做。同时可以将心得体会、问题、意见写入讨论一栏(没有可不写)。

4. 实验报告一律采用 16 开纸, 左侧装订, 次序为：

a. 封面: 格式见附录

b. 预习报告。

c. 数据整理。

d. 结论与讨论。

e. 曲线或矢量图。

f. 原始记录

5. 实验报告要求文理通顺, 简明扼要, 字迹清楚, 装订整齐, 按时上交, 教师批阅“重交”者, 应于修改后随同下次报告一同上交。

四、其它实验规则：

实验完毕, 必须经教师检查数据后, 方可拆线。拆完线路后, 必须将仪器、导线整理好, 然后再将原始记录交教师签字, 全部完毕, 方可离开实验室。

附录

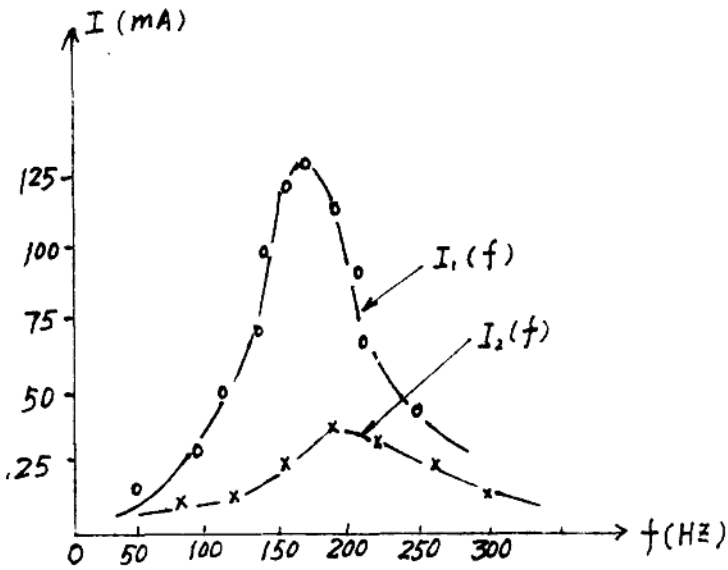
1. 实验报告封面格式(16开纸大小)

电 路 实 验 报 告		
实验名称	_____	
实验者	(班级)	(姓名)同组者 _____
实验日期	年	月 日
教师意见		
		教师签字 _____

2. 原始记录示例(16开纸大小)

原 始 记 录		
(实验名称)		
实验者:	_____	实验日期 _____
1. 白炽灯泡 U-I 特性测量		
U	(V)	
I	(A)	
2. 二极管 U-I 特性测量		
U	(V)	
I	(A)	
主要仪器编号及量程		
		(教师签字)

3. 曲线做法示例



RLL 串联电路谐振曲线

$I_1(f)$ —— $R = \times \times \Omega$ $L = \times \times \text{mH}$ $C = \times \times \mu\text{F}$

$I_2(f)$ —— $R = \times \times \Omega$ $L = \times \times \text{mH}$ $C = \times \times \mu\text{F}$

绘图者 $\times \times \times$

绘图日期 \times 年 \times 月 \times 日

二、实验知识

一、电测量仪表的一般知识

用来测量电量(电流、电压、功率、相位、频率、电阻、电容及电感等)的指标仪表,称电测量指示仪表。它不仅可以用来测量各种电量。经过相应变换器的变换,还可以间接测量各种非电量(如温度、湿度、速度、压力等)。由于电测指标仪表制造简单,成本低廉,稳定性及可靠性高,使用维修方便,所以被广泛用于科学技术领域及工程测量中。

1. 电测量指示仪表分类

1. 根据工作原理可分为磁电式、电磁式,电动式、整流式、感应式、静电式、热电式及电子式等。

2. 根据待测量不同可分电流表、电压表、功率表、欧姆表、电度表、频率表、相位表等。

3. 根据待测量性质不同可分为交流表、直流表及直交两用表等。

4. 根据使用方法可分为可携式及安装式。

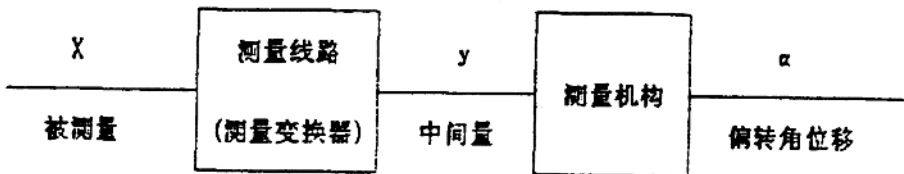
5. 据准确度等级可分 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 七级。

6. 据对外磁场御能力分 I、II、III、IV 四级。

7. 据仪表使用条件可分为 A(A₁)、B(B₁)、C(C₁) 三组

2. 电测指示仪表的基本结构

电测指示仪表通常由测量机构和测量线路两部分组成,其间关系如下



测量机构只能将电量 I 、 U 或 $I_1 \cdot I_2$ 转化成角位移指示出来,若待测量是其它量如功率,电阻等,则须加测量线路加以转换。

测量机构主要由四部分构成:

(1) 驱动部分:接受被测量后,产生驱动力矩驱动可动部分转动。据驱动力产生方式可分磁电式、电磁式、电动式、感应式。

(2) 控制部分:产生反作用力矩与驱动力矩相平衡,使得一定的驱动力矩对应一定的转角,反作用力矩可以由机械变形产生的反力或电磁力获得。后者称流比计,如兆欧表,相位表等。

(3) 阻尼部分:当指针摆动时产生阻尼力矩以抑制振荡减少达到平衡时间,阻尼力矩可以由空气阻尼器及磁感应阻尼器产生。

(4) 指示部分:指针和度盘或光标。

3. 电测量仪表的正确使用

1. 合理选择仪表

(1) 据被测量性质选择仪表类型

据被测量是直流还是交流选用直流仪表或交流仪表。

测交流时,要区分是正弦波还是非正弦波,如为正弦波可采用一种交流电表用以测出有效值。若为非正弦波,应区别是测量有效值,平均值还是最大值。有效值可用电磁式及电动式表;平均值用整流式表;最大值用峰值表测量。

测交流时,还要考虑被测量的频率,当频率高时,应选择频率范围与其相对应的仪表(如电子式仪表)。

(2) 据测量的实际要求,选择仪表准确等级。

0.1 和 0.2 级表作为标准表用于精确测量,0.5~1.5 级表用于实验室一般测量,1.0~5.0 级表用于工业测量。

(3) 据被测量的大小选择合适量限的表

量限的大小同样影响测量结果的准确度,故通常取被测量的 1.2~1.5 倍作为仪表的量限。

(4) 据被测对象有阻抗大小选择仪表内阻

对于电压表内阻越大越好,对于电流表内阻越小越好。

(5) 据使用场所工作条件选择仪表。

2. 保证仪表有正常工作条件

正常工作条件指:仪表处于规定的工作位置,环境温度为额定值,外界磁场小于规定值,电压、频率、 $\cos\varphi$ 为额定值等,在偏离正常工作条件下,仪表将产生附加误差。为保证仪表在基本误差范围内对于工作条件有着严格的规定。

3. 正确读数

(1) 明确仪表量限及仪表常数,所谓仪表常数就是每小格所代表的被测量大小。

(2) 读取数据时眼睛必须与刻度盘垂直,若有反光镜,则应使指针与其镜象相重合,以减小视差误差。

(3) 读数要正确反映指针示数的准确度,指针在二刻线之间时,估计一位数字。

4. 磁电式仪表

磁电式仪表用来测量直流量,因为它有准确度高,灵敏度高,消耗功率小,刻度均匀等优点,加变换器后也可测交流和一些非电量,如温度等,所以应用很广泛。

磁电式仪表表头的结构由固定部分和可动部分组成,固定部分主要由磁系统组成。可动部分包括铝框及绕在框上的线圈,指针等,线圈两端分别与上下两个游丝相连。游丝用来产生反作用力矩,同时又把电流引入可动线圈。

当有电流 I 通过线圈时,电流与磁场相互作用就有力矩产生,产生的转矩 M 与线圈通过的电流 I 成正比,在旋转力矩 M 作用下,可动部分将绕轴旋转,结果游丝(即弹簧)被扭紧,产生了反作用力矩 M_s ,在游丝的弹性范围内,它与可动部分的偏转角 α 成正比,即:

$$M_s = D \cdot \alpha$$

式中 D 为游丝的反作用系数。

当作用力矩 M 与反作用力矩 M_s 相等时即平衡,可动部分就停止运动,即:

$$M = M_s$$

$$KI = D \cdot \alpha$$

或

$$\text{所以 } \alpha = \frac{K}{D} I = KI \quad (2-2)$$

平衡时的偏转角 α 与线圈中的电流成正比,用偏转角的大小可以表示电流的大小,且刻度均匀。

磁电式仪表指针偏转方向与线圈中电流方向有关,当电流反向时,指针也反偏转。刻度线的零点在一端时,指针是不许反偏转的,即从“+”端流入从“-”端流出,指针就正向偏转。磁电式仪表有极性,使用时必须注意!

不能用磁电式仪表测交流。如果把 50HZ 交流加在表头上,可动部分的机械惯性很大,跟不上变化很快的交流,线圈中虽有电流通过,实际上可动部分仍然在静止,如果电流过大可能烧坏仪表!

用磁电式表头,通过并联分流电阻,串联分压电阻,即可构成电流及电压表。

5. 电磁式仪表

目前工程上测量交流电压和电流常用电磁式仪表,它的测量机构主要有排斥式和吸入式两种,以排斥为例,它的磁场由固定的线圈通过电流 i 产生,电流的磁场使固定于线圈上的定铁片及转轴上的动铁片磁化,二被磁化的铁片由于磁力而互相排斥,使可动部分转动。当固定线圈中的电流方向改变时,二铁片磁化方向同时改变,作用力仍为斥力,可见转动方向与线圈中的电流方向无关,故电磁式仪表无“+”“-”极性,可测直流亦可测交流。

二铁片间的斥力大小正比于其磁性强弱,在铁片未饱和时磁性又正比于线圈产生磁场,从而由于斥力产生的旋转力矩 m 正比于线圈内电流 i 的平方即 $m = ki^2$,平均力矩为

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = \frac{k}{T} \int_0^T i^2 dt = k I^2$$

I 为电流 i 有效值。

该力矩与游丝反力矩平衡时,偏转角度

$$\frac{k}{D} I^2 = k_0 I^2$$

即偏转角度与有效值平方成正比,所以电磁式仪表刻度不均匀。

电磁式机构可直接做成电流表,常用来测交流电流,改变固定线圈匝数可以改变电流量程。电流线圈可以有粗导线绕制,故过载能力强。用细导线绕制固定线圈(匝数多)再串入附加电阻,就得到电磁式电压表。

6. 电动式仪表

电动式仪表准确度高,可以交直两用。可用来测功率、相位角、频率等,是应比较广泛的一种仪表。

该仪表有两个固定线圈,平行排列,使两个固定线圈之间产生的磁场比较均匀。在两个固定线圈之间放上可动线圈,它固定在可以转动的轴上。在轴上还装有指针,两个游丝、阻尼片等。

当两个固定线圈通以电流后,在线圈间就产生磁场。可动线圈中的电流是通过两个游

丝流入。当动线圈内有电流时，与固定线圈产生的磁场相互作用就形成了转矩。瞬时转矩 m 与两线圈里的瞬时电流 i_1, i_2 的乘积成正比，即：

$$m = k i_1 i_2$$

设 i_1, i_2 是按正弦规律变化，且：

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi)$$

φ 为 i_1, i_2 之间的相位差，则瞬时转矩 m 为

$$m = k I_{1m} I_{2m} \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

由于可动部分的机械惯性，它的偏转角 α 与 m 在一个周期内的平均值有关，即决定于平均转矩。

$$M = \frac{1}{T} \int_0^T m dt = \frac{k}{T} I_{1m} I_{2m} \int_0^T \sin \omega t \cdot \sin(\omega t + \varphi) dt = k I_1 I_2 \cos \varphi$$

I_1, I_2 分别为固定线圈和可动线圈里的电流有效值。

在平均转矩 M 作用下，可动部分偏转，使游丝扭紧，产生反作用力矩 M_s ，同样 M_s 与偏转角 α 成正比，即：

$$M_s = D \cdot \alpha$$

当 M 与 M_s 相等时，指针停止转动，即：

$$D \cdot \alpha = k I_1 I_2 \cos \varphi$$

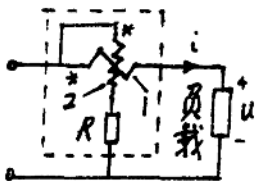
$$\text{所以 } \alpha = \frac{k}{D} I_1 I_2 \cos \varphi = K I_1 I_2 \cos \varphi$$

可见电动式测量机构的偏转角不仅与通过两圈中的电流有关，而且与两电流间相位差的余弦成正比。

电动式机构也可测直流，这时 $\varphi = 0$

电动式机构可以做成电压表，也可以做成电流表。下表着重讨论电动式功率表。

1. 电动式功率表原理



电动式功率表(简称瓦计)测负载功率时的接线如图，虚框内表示瓦计，水平画出的波折线表示固定线圈 1。垂直画出的波折线表示可动线圈 2。固定线圈与负载串连，负载电流全部通过固定线圈，所以又把它叫电流线圈。可动线圈与附加电阻 R 串联后与负载并联，可动线圈即与附加电阻一起承受整个负载电压 U 。所以可动线圈又叫电压线圈。

(1) 工作在直流电路

固定线圈中的电流 I_1 就是负载电流 I 。可动线圈里的电流为：

$$I_2 = \frac{U}{R_2}$$

式中 R_2 为电压线圈支路中的总电阻。

仪表偏转角 α 为

$$\alpha = KI_1 I_2 = KI \frac{U}{R_2} = \frac{K}{R_2} UI$$

可见偏转角与负载吸收的功率 $UI = p$ 成正比

(2) 工作在正弦交流电路

通过固定线圈中的电流 I_1 就是负载中电流的有效值 I 。动圈中的电流 I_2 与负载电流 U 成正比, 即:

$$I_2 = \frac{U}{Z_2}$$

式中 Z_2 为动圈支路中的阻抗的模, 如果忽略动圈支路的感抗(与附加电阻比较实际很小), 则 I_2 与 U 是同相的。

仪表偏转角为

$$\alpha = KI_1 I_2 \cos\varphi = KI \frac{U}{Z_2} \cos\varphi = \frac{K}{Z_2} UI \cos\varphi$$

可见仪表偏转角与负载吸收的功率 $P = UI \cos\varphi$ 成正比。

(3) 功率表一般做成多量程, 通常有两个电流量程, 两个或多个电压量程。

两个电流量程, 通过两个固定线圈串联或并联实现。如串联为 1 安, 并联就是 2 安。两个固定线圈有四个端子, 都安装在表的外壳上。改变电流线圈的量程就是选择两个固定线圈是串联还是并联。

不同的电压量程通过串以不同的附加电阻实现。电压量程的公共端标以符号“*”。

根据电流量程和电压量程来决定功率量程。如某一瓦计电流量程为 0.5~1A, 电压量程为 0~150~300V。根据被测负载电压和电流的大小选瓦计的电压量程为 300V, 电流量程为 0.5A, 则功率量程为 $p = 300 \times 0.5 = 150$ 瓦, 即指针偏转到满刻度是为 150 瓦。

2. 功率表的选择和正确使用

(1) 功率表量程的选择。选择功率表的量程实际上就是选择电流量程和电压量程。只要电流线圈和电压线圈不过载, 则功率量程就自然满足了。

例, 有一感性负载, 功率约为 80 瓦, 电压为 220V, 功率因数为 0.8, 用瓦计测量它的功率, 应怎样选择瓦计量程?

解: 因负载电压为 220V, 所以瓦计电压线圈的量程应选为 300V。负载电流估算为

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi} = \frac{80}{220 \times 0.8} = 0.454 \text{ 安}$$

瓦计电流线圈的量程应选为 0.5A。

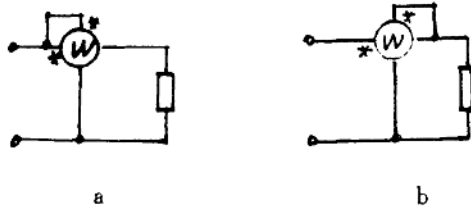
如果最后选定电压量程为 300V, 电流量为 0.5A 的瓦计, 其功率量程为 150 瓦。

(2) 瓦计“发电机端”接线规则。互计内部有两个独立支路, 一为电流支路, 一为电压支路。为了使接线不致发生错误, 通常在电流支路一端和电压支路一端标有“*、±”等特殊标记。一般称这些特殊标记为“瓦计发电机端”。

接线时应遵守如下原则:

对于电流线圈有“*”号的一端必须接在电源一端, 另一端接至负载。对一电压线圈有

“*”号一端可以接电流线圈的任一端,电压线圈的另一端应跨接到负载的另一端,参看下图。



(a)为前接法,电流线圈的电流与负载电流相等。电压线圈承受的电压应包括电流线圈两端的电压降。所以这种接法瓦计读数应包括电流线圈的损耗在内。

(b)为后接法。电压线圈承受的电压与负载端电压相等。电流线圈中的电流包括电压线圈中的电流。所以瓦计读数应包括电压线圈的损耗在内。

实际测量时采用哪种接法为好?要作具体分析,如果被测负载的电流总是变化的,而负载两端电压总是不变的,最好采用后接法。这时电压线圈引起的误差可以计算出来,即 $\Delta P_U = \frac{U^2}{R}$ 是个常量,从每次功率读数中减去固定数 ΔP_U 就是负载吸收的功率。如果电压电流都在变化,哪种方法引起的误差小就用哪种方法。按上述“发电机端”进行接线时,一般情况下瓦计应正向偏转。但也有例外。如 Φ 角大于 $\pi/2$ 时,瓦计仍然反转。这表示接线是正确的,反转表示功率本身是负值,负载不是吸收功率而输出功率。这时只要把电流线圈两个端子倒个头就可以了,但读数应记为负值!有些瓦计面板上装有倒向开关,就不用倒电流端头了,只要改变一下倒向开关,指针就会正向偏转。

(3) 瓦计的正确读数

瓦计的标度尺只标分格数(如 150 格等)而不标瓦数,这是由于功率表一般是多量程的,选用不同的电流量程和电压量程时每格代表的瓦数不同。每格代表的瓦数叫瓦计分格常数。在一般瓦计中附有一表格,标明了瓦计在不同电流、电压量程时的分格常数,供读数时查用。

如果瓦计没有分格常数表,也可以按下式计算分格常数 C :

$$C = U_m I_m \text{ (瓦/格)}$$

式中 U_m 为电压线圈的量程, I_m 为电流线圈的量程, a_m 为瓦计表盘上刻的总格数。

例,某一瓦计电压量程为 150/300V,电流量程为 0.5/1A,表盘上刻的总格数为 150 格,问不同量程时,瓦计分格常数各为多少。

解: 0.5A 150V $C_1 = \frac{0.5 \times 150}{150} = 0.5 \text{ 瓦/格}$

0.5A 300V $C_2 = \frac{0.5 \times 300}{150} = 1 \text{ 瓦/格}$

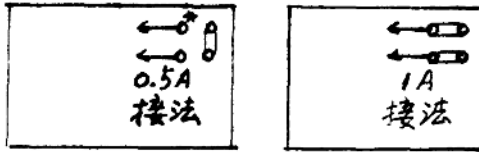
1A 150V $C_3 = \frac{1 \times 150}{150} = 1 \text{ 瓦/格}$

1A 300V $C_4 = \frac{1 \times 300}{150} = 2 \text{ 瓦/格}$

记录时,不仅要记录指针偏转的格数,而且要记录使用电流和电压的量程以及表盘总格数,以便算出或查出分格常数。

本实验室使用的 D75-W 型功率表主要技术规格:用于测量直流线路或频率为 50HZ 交流电路。电压量限 75-150-300-600V 共四档,采用波段开关转换。

电流量限 0.5-1A 共二档通过改变接触片与接线端纽的连接位置进行转换如下图。



使用前须使仪表水平放置并调正好机械零点,选择适当量程,通常把电流线圈的“*”端与电压线圈的“*”端接在一起。(前接法)

三、低功率因数瓦计

1. 低功率因数瓦计结构特点

交流电路的功率 $P=UI\cos\varphi$, 当 $\cos\varphi$ 很小时, 相应的功率也很小, 用普通瓦计进行测量时, 其偏转角很小, 不便读数。由于转动力矩小, 表中轴承和轴尖之间摩擦等等都会影响读数, 给测量带来不容许的误差。但是, 实际又需要测量功率因数很小的电路的功率。这就产生低功率因数瓦计。

低功率因数瓦计在结构上的特点是采取了特殊的消除误差措施, 以 D5-W 型低功率因数瓦计为例, 说明结构特点。

表游丝改为张丝, 减小了反作用力矩, 因此在小转矩下可以得到较大的偏转角。张丝结构取消了轴承和轴尖, 没有摩擦, 大大减少了误差。把指针改为光标, 延长指针长度, 使刻度线加长, 又减少了可动部分的重量, 使仪表功率消耗减少。

2. 低功率因数瓦计读数

低功率因数瓦计的接线和使用方与普通瓦计相同。区别是普通瓦计标度是按 $\cos\varphi_m=1$ 时刻的, 而低功率因数瓦计分格常数是按下式计算:

$$C = \frac{U_m I_m \cos\varphi_m}{a_m}$$

U_m 、 I_m 、 a_m 的意义与普通瓦计相同。 $\cos\varphi_m$ 的值标在表盘上。 $\cos\varphi_m$ 并不是负载的功率因数, 而是仪表刻度时, 使电流与电压均为满量程下使指针全偏转的功率因数, 又叫仪表额定功率因数。

例 2-5, 用 $\cos\varphi_m=0.1$, 电压量程为 300V, 电流量程为 0.5A, 总分格为 150 的低功率因数瓦计测某一负载消耗的功率, 读得格数为 70, 问该负载消耗的功率为多少瓦?

解: 低功率因数瓦计的分格常数为:

$$C = \frac{300 \times 0.5 \times 0.1}{150} = 0.1$$

负载消耗的功率为:

$$P = C \cdot a = 0.1 \times 70 = 7 \text{ 瓦}$$

式中 a 表示指针偏转的格数。

二、误差分析和数据处理

(一) 测量误差及其表示方法

被测量所具有的真实大小称该被测量的真值,在测量过程中,由于人们对客观事物认识的局限性,测量设备的不准确性,测量方法不完善以及测量工作中的疏忽,使测量不可避免地偏离真值,从而造成测量误差。

测量误差的表示方法分为绝对误差和相对误差,在连续刻度的仪表中还使用引用误差。

1. 绝对误差,测量值 x 与真值 A_0 之差,称绝对误差,表为

$$\Delta x = x - A_0$$

Δx 的大小和符号分别表示测量值偏离真值的大小和方向。由于在实际上真值 A_0 是得不到的,故采用更高一级准确度的仪表测得的值作为真值,称实际值 A ,所以普遍采用实际绝对误差(以后简称绝对误差)

$$\Delta x = x - A$$

2. 相对误差。由于绝对误差只能表示测得值偏离实际值的大小,不能表示测量的准确度,故引入相对误差。相对误差是绝对误差与真值之比(以百分数表示),基于同样原因,一般采用实际相对误差,即实际绝对误差与实际值之比。

$$\beta = \frac{\Delta x}{A} \times 100\%$$

3. 引用误差。在连续刻度的仪表中,用相对误差表示整个量程内仪表的准确程度,往往感到不便,因在一个量程内,被测量有不同数值,使得求得的相对误差随着改变。因此为了计算和划分电表准确度等级的方便,在计算相对误差时,取电表的满刻度值作为分母。则:

$$\beta_n = \frac{\Delta x}{X_m} \times 100\%$$

β_n 称引用相对误差。电表的满引用相对误差,决定了电表的准确等级。设某仪表的等级为 s ,测量值为 x 。的某电压(电流),其误差可以用引用误差估算为。

$$|\Delta x| \leq X_m \cdot S\%$$

$$|\beta| \leq \frac{X_m \cdot S\%}{x}$$

由上式可见,误差不仅与仪表精度等级有关,而且与量限有关,相对误差限正比于量限和被测值之比,被测值越接近于满度值,测量的相对误差越小。通常应使指针位于满度值的三分之二以上位置。

(二) 测量误差的来源和性质

1. 测量误差的来源

- (1) 仪表误差,由仪表本身及其附件引入的误差。
- (2) 影响误差。环境因素(如温度、湿度、电场、磁场等)与测量要求的条件不一致造成。
- (3) 方法误差和理论误差。由测量方法不合理以及用近似公式计算测量结果造成。

(4)人身误差。由测量人员的特性和习惯不同造成,特别是依靠人的眼睛和耳来判断测量结果时尤为突出。

2. 测量误差的分类:按误差的性质,测量误差分为系统误差、随机误差和疏失误差三类。

(1)系统误差在相同条件下测量同一值时,误差的绝对值和符号保持不变,或在条件改变时按一定规律变化的误差,称系统误差。系统误差由设备缺陷、测量仪器不准或使用不当,测量方法不完善及测量人员一些不正确习惯等造成。因具有一定规律性,可根据产生的原因采取一定技术措施加以修正。

(2)随机误差在相同条件下多次测量同一值时,误差的绝对值和符号皆以不可预知的方式变化。这种误差称随机误差,因为随机误差在测量次数足够多时服从统计规律,可以通过取多次测量结果的平均值的方法减少其对测量结果的影响。

(3)疏失误差在一定的测量条件下,测量值显著地偏离实际值,这种误差称疏失误差,它一般由测量人员的疏忽造成。也可能由外界条件(如电源电压)突然变化造成,该项测量数据应剔除不用。

(三)测量数据的处理

测量数据处理,指从测量得到的原始数据中求被测量的最佳估计值,并计算出其精确程度;必要时还包括把数据绘制成曲线或归纳为经验公式。以下我们仅对有效数字位数的确定加以讨论。在此之前,先介绍评定测量结果的两个术语。

1. 准确度。测量结果与被测量真值间的符合程度,反映系统误差大小”系统误差小,准确度高。

2. 精密度。重复测量中所得结果相互一致的程度,反映随机误差的影响。一切测量都应力求达到高准确度及高精密度,称为高精度测量。为了得到精确、可靠的测量结果,从数据读取、处理上要遵循一定的原则。

(1)测量数据的读取须遵守的原则:

- ①对仪表进行预热(如果要求的话)和调零,然后测量,以利减少系统误差。
- ②据被测量大小合理选择仪表量程。力求使指针偏转大于 $2/3$ 满度值。
- ③读数保持正确姿势,精神高度集中。
- ④当指针位置与刻度值不相重合时,在最小分度以下再估计一位欠准数字。
- ⑤按一定的误差准则对记录值进行有效数字位数的确定。

(2)有效数字确定原则:

①有效数字

一般情况下,测量结果中最后一位数字通常是估计出来的,称欠准数字,准确数字加上欠准数字称有效数字。若测量结果未标明测量误差,一般认为其误差的绝对值不超过末位单位有效数字的一半。

②有效数字的正确表示

a. 通常做测量记录时每个测量数据都应保留一位欠准数字,即最后一位前的数字都必须是准确的。

b. 有效数字与小数点的位置无关,所以对于“0”的使用要特别注意,例如 $0.036A$ 其

左边的“0”不是有效数字,所以可以表示成 36mA,含二位有效数字;而 1000mA 右边的“0”是有效数字,不能表示成 1A,只能表示成 1000mA,含四位有效数字。

c. 对于象 215000Ω 这样的数字,若百位数字是欠准数字。其有效数字为四位。为了表示出它的有效数字,把它写成 $2.150 \times 10^5 \Omega$ 。

d. 常数的有效数字位数是无限的。

③有效数字的修约规则

当实验记录数据的位数超过有效数字位数时,对于超出部分位数的数字要进行修约,规定是:“小于五舍,大于五入,等于五时取偶”,即若欠准数字后面一位数若小于五,则该位以后数字均舍去;若大于五,则该位以后数字舍去同时,欠准数字加 1;若等于五,则把欠准数字进成偶数(若原已为偶数,则不变。)

例 将下列各数按三位有效数字表示:

$$12.34 \rightarrow 12.3$$

$$12.36 \rightarrow 12.4$$

$$12.35 \rightarrow 12.4$$

$$12.45 \rightarrow 12.4$$

④有效数字的运算法则

a. 求三个串联电阻的总电阻 R,已知 $R_1=15.7\Omega$ 、 $R_2=3.147\Omega$ 、 $R_3=1.025\Omega$ 。

首先对加数进行修约,使各数修约到比小数点后面位数最少的那个数多一位小数:

$$R_1=15.7\Omega$$

$$R_2=3.15\Omega$$

$$R_3=1.02\Omega$$

进行加法运算

$$R_1+R_2+R_3=19.87\Omega$$

对结果进行修约,使小数点位数与小数点后面位数最少的那个数相同,即:

$$R=19.9\Omega$$

在二数相减情况下,若二数相差不多,则差的有效数字位数会减少,有时会减少到不能允许的程度,所以运算中应尽量避免这种情况。

b. 乘法运算

例 电阻 $R=50.37\Omega$ 中流过电流 $I=0.078A$,求电压 U。

首先进行修约,使各乘数有效数字位数比有效数字位数最小的那个数字多一位(不考虑小数点)

$$I=0.078A(2 \text{ 位有效数字})$$

$$R=50.4\Omega(3 \text{ 位有效数字})$$

进行乘法运算

$$RI=3.9312$$

对结果进行修约,使与有效数字最小的那个数字有效数字位数相同。

$$U=3.9V$$

c. 乘方与开方计算结果比原数多保留一位有效数字

例: $(15.6)^2 = 243.4$

d. 对数运算取对数前后有效数字位数相同

例 $\ln 5 \cdot 3 = 1.7$

③ 测量结果的误差估算

测量中由于存在各种误差,使得测量结果偏离真值。随机误差与系统误差相比较小,同时可以通过多次测量取平均值而排除,系统误差使测量结果单方向偏离真值,这就需要我们从不利的条件出发估算出最大系统误差。

a. 直接测量中的误差估计

直接测量是测量结果从一次测量的实验数据中得到的。如用电流表测电流,电压表测电压等。其结果误差是基本误差,附加误差及方法误差三者之和,基本误差由仪表本身引起,利用引用误差估计其误差限:

$$\Delta x_{\max} = \pm s\% \cdot x_m$$

$$\beta_{\max} = \frac{\Delta x_{\max}}{A}$$

其中 β_{\max} 为相对误差限, Δx_{\max} 为绝对误差限, A 为实际值, x_m 为量程。(GB771-76) 附加误差据使用条件与仪表正常工作条件的偏差值(温度、磁场、几何位置等)可以从国家标准(GB771-76)中查出附加误差的值。

方法误差 由测量方法及依据理论不严密造成,视具体情况予以分析。

b. 间接测量时最大系统误差估算

间接测量是通过测量几个与被测量有确切函数关系的量,然后据函数关系求出被测量大小,如用电流表,电压表测电阻等。

此时的误差用误差理论进行估算,即:

和与差的绝对误差限等于各参与运算的量的绝对误差限之和。

举几例说明之:

例 1. 用量限 25V 2.5 级电压表测得二电压为 $U_1 = 18V$, $U_2 = 16V$, 求总电压及其误差。

$$\text{总电压 } U = U_1 + U_2 = 34V$$

电压表最大引用误差作为测量结果的绝对误差限

$$\Delta U_{1\max} = \Delta U_{2\max} = \pm 0.25\% \times 25 = \pm 0.625V$$

和电压的绝对误差限

$$\Delta U_{\max} = 2\Delta U_{1\max} = \pm 1.35V$$

结果的相对误差限

$$\beta_{\max} = \frac{\Delta U_{\max}}{U} \times 100\% = \frac{\pm 1.35}{34} \times 100\% = \pm 3.68\%$$

例 2. 总电流为 $I = 120mA$, 分电流 $I_1 = 118mA$, 测量相对误差为 $\pm 0.5\%$, 求分电流 I_2 及其误差。

$$\text{分电流 } I_2 = I - I_1 = 2mA$$

$$\text{相对误差 } \beta_{\max} = \pm \frac{\Delta I_{\max}}{I_2} \times 100\%$$