

探测电路与导电介质对模拟静电场测绘的影响

陈 烨

(杭州应用工程技术学院 基础部 杭州 310012)

摘 要 通过理论推算与实际测量,分析与研究探测电路和导电介质的状况对模拟静电场测绘产生的影响,并对实验各环节进行改进,以减小其测绘误差。

关键词 探测电路 导电介质 模拟静电场 测绘误差

中图分类号 O441.1

在《模拟静电场》实验中,笔者原采用导电纸作为介质对静电场进行模拟测绘,其测绘误差较小.后因设备更新,导电纸难买到,所以使用水槽式静电场测绘仪,将水溶液作为导电介质进行模拟测绘,但随之而来的是其测绘结果与文献[1]所述的理论值有较大的误差.同时,笔者发现虽然文献[1]所述的理论值与导电介质的性能和状况无关,但由于实际测绘时探测线路的存在,使用不同导电介质对静电场模拟测绘有一定的影响,产生了不同的测绘误差.笔者通过理论推算与实际测绘,对此现象进行分析与研究,并对实验各环节进行改进,以减小其测绘误差。

1 理论推算

1.1 文献[1]所述

从电磁学理论可知:导电介质中的稳恒电流场与电介质(或真空)中的静电场所遵循的物理规律在相同的边界条件下,两者具有相同的数学形式.因此,可用稳恒电流场模拟静电场,如图1为同轴圆柱形电缆电场的模拟。

设定外圆电极 $U_b = 0$,则边界条件为:

$$r = r_a \text{ 时, } U = U_a$$

$$r = r_b \text{ 时, } U = U_b = 0$$

距中心 r 处的电位,无论是在电介质(或真空)的静电场还是在电阻率 ρ 厚度为 h 导电介质中的稳恒电流场中均为:

$$U_r = U_a \frac{\ln(r_b/r)}{\ln(r_b/r_a)} \quad (1)$$

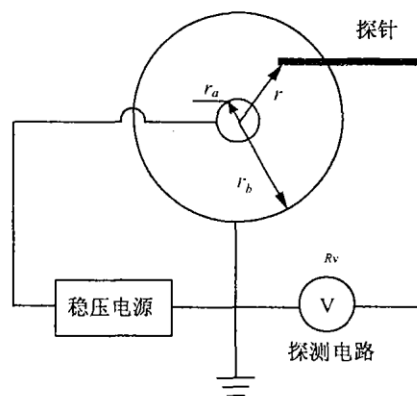


图1 模拟静电场实验原理图

从上所述,明显可知,导电介质的性能和状况对模拟静电场测绘的结果不产生任何影响.距中心 r 处的电位仅与 U_a 、 r 、 r_a 、 r_b 有关,与 ρ 、 h 无关.

1.2 实验理论推算

在实验测绘时,导电介质的性能和状况的改变确实对模拟静电场测绘的结果产生了一定的影响,这是因为实际测绘时探测线路电阻的存在;同时,导电介质的性能和状况的改变也引起测量段电阻的改变,两者共同作用造成的对测绘结果的影响.

(1) 未接入探测线路时,根据文献[1]所述,在导电介质内半径为 r 到 $r + dr$ 的径向电阻为:

$$dR = \frac{\rho}{2\pi h} \times \frac{dr}{r}$$

此时,在 r 处的电位 U_r ,可根据其等效电路图 2 所示进行计算:

$$R_{ar} = \int_{r_a}^r \frac{\rho}{2\pi h} \times \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{r}{r_a}$$

$$R_{rb} = \int_r^{r_b} \frac{\rho}{2\pi h} \times \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{r_b}{r}$$

$$R_{ab} = \int_{r_a}^{r_b} \frac{\rho}{2\pi h} \times \frac{dr}{r} = \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{r_b}{r_a}$$

$$U_r = \frac{U_a}{R_{ab}} \cdot R_{rb} = \frac{U_a}{\frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{r_b}{r_a}} \cdot \frac{\rho}{2\pi h} \ln \frac{r_b}{r} = U_a \frac{\ln(r_b/r)}{\ln(r_b/r_a)}$$

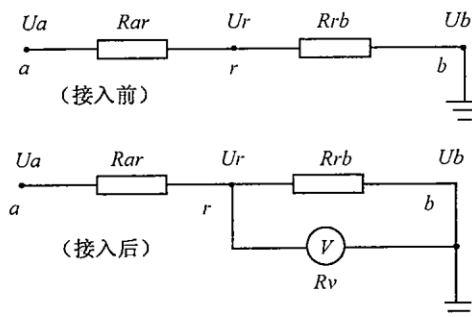


图2 接入探测线路前后的等效电路

此式与(1)式完全相同.由此可见:在未接入探测线路时,导电介质的性能和状况对测绘结果不产生影响.

(2) 接入探测线路时,设探测线路的总阻值为 R_v ,其等效电路见图 2.

此时 rb 两端的总阻值:

$$R'_{rb} = R_{rb} // R_v < R_{rb}, \quad U'_r < U_r$$

$$U'_r = \frac{U_a}{R_{ar} + R_{rb} // R_v} \cdot R_{rb} // R_v = U_a \left[\frac{\ln \frac{r_b}{r}}{\ln \frac{r_b}{r_a} + \frac{1}{R_v} \cdot \frac{\rho}{2\pi h} \cdot \ln \frac{r}{r_a} \cdot \ln \frac{r_b}{r}} \right]$$

其测量误差为

$$\Delta U = |U_r - U'_r| = U_a \left[\frac{\ln \frac{r_b}{r}}{\ln \frac{r_b}{r_a}} - \frac{\ln \frac{r_b}{r}}{\ln \frac{r_b}{r_a} + \frac{1}{R_v} \cdot \frac{\rho}{2\pi h} \cdot \ln \frac{r}{r_a} \cdot \ln \frac{r_b}{r}} \right] \quad (2)$$

由此可见,在接入探测线路时,探测线路的 R_v 值及导电介质的性能和状况对测绘结果产生影响. R_v 越大、 h 在允许范围内越大, ρ 在允许范围内越小,测绘结果越准确,误差越小.(只有当 $R_v = \infty$ 时, $U'_r = U_r$, $R_v \rightarrow \infty$, $\Delta U = 0$)

2 实际测量

2.1 用水槽式静电场描绘仪进行测量

(1) 用万用表测试其探测线路中 10V 量程的总阻值为 $R_v = 16K\Omega$

(2) 该模拟板 $r_a = 6.0\text{mm}$, $r_b = 45.0\text{mm}$, 测试在 $r = 30.0\text{mm}$, $h_{\max} = 8.0\text{mm}$ 处不同导电介质的电阻值、电位值及误差.

表1 水槽式静电场描绘仪对不同导电介质的测量误差

(测量液温: 20°C
 $U_a = 10\text{V}$)

导电介质	石墨导电纸	3% 硫酸铜溶液	自来水溶液
$R_{rb}/\text{K}\Omega$	1.8	21	24
R_v/R_{rb}	9	0.8	0.7
理论值 U_r/V	2.01	2.01	2.01
测量值 U'_r/V	1.9	1.6	1.5
测量误差	6%	21%	26%

(3) 测量误差分析: 此3种导电介质中, 石墨导电纸的电阻率远小于其它两种, 因此, 其测量误差最小. 但该水槽式静电场描绘仪探测线路的总阻值与3%硫酸铜溶液和自来水溶液的相比还小, 违背了文献[1]所要求的探测线路的总阻值需远大于介质总阻值的原则, 是造成测量误差大的主要原因.

2.2 伏特计替代静电场描绘仪的探测电路对不同导电介质的测量误差

(1) 万用表测试伏特计探测线路 10V 量程的总电阻值为 $R_v = 120\text{K}\Omega$

(2) 测试在 $r = 30.0\text{mm}$, 不同 h 值处不同导电介质的电阻值、电位值及误差.

表2 伏特计替代静电场描绘仪的探测电路对不同导电介质的测量误差

(测量液温: 20°C
 $U_a = 10\text{V}$)

导电介质	石墨导电纸	3% 硫酸铜溶液			自来水溶液		
介质厚度 h/mm	—	3.0	6.0	8.0	3.0	6.0	8.0
理论值 U_r/V	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01
测量值 U'_r/V	2.00	1.85	1.98	1.98	1.74	1.92	1.96
测量误差	0.5%	8%	1.5%	1.5%	14%	5%	3%

(3) 测量误差分析: 由上表可见, 在探测线路的总电阻值很大的情况下, 测量误差主要由导电介质的厚度造成的, 因为导电介质的电阻与其厚度成反比, 厚度的减小导致 R_v/R_{rb} 减小, 使测量误差增加.

2.3 晶体管毫伏表替量程档代静电场描绘仪的探测电路对不同导电介质的测量误差

(1) 万用表 $10\text{K}\Omega$ 测试晶体管毫伏表 10V 量程的电阻值为 $R_v = \infty$.

(2) 测试在 $r = 30.0\text{mm}$, 不同 h 值处不同导电介质的电阻值、电位值及误差, 除 $h = 3.0\text{mm}$, 在3%硫酸铜溶液和自来水溶液中有5%至7%的测量误差外, 其余的误差均在2%以内, 并且不同导电介质对测量结果影响很小.

3 对实验环节的改进

从上述实际测量结果不难发现: 对模拟静电场测绘产生影响的主要原因是探测线路的总阻值与导电介质总阻值之比, 而导电介质总阻值正比于电阻率 ρ , 反比于厚度为 h . 为此, 笔者对此实验环节作如下改进:

(1) 用新购的为《感应法测磁场强度》实验配套使用的晶体管毫伏表替代静电场描绘仪的探测

电路,原水漕式静电场描绘仪仅作稳压电源使用。

(2) 用实验室原有晶体管稳压电源和伏特计组成模拟静电场测绘线路,以增加实验套数。

(3) 在实验中液面尽可能保持在模拟板最高处,但不能淹没,否则会影响其测绘结果。

4 结束语

虽然石墨导电纸作为介质在模拟静电场实验中,其测绘误差最小,并且对探测电路的精度要求最低,但因其在实验中易被划破,更换与购买不方便,而逐渐不被采用。硫酸铜溶液虽然比自来水溶液测绘精度高一些,但需配制,同时其废液的处理不利于环保。将自来水溶液作为介质,只要探测电路的精度达到一定的要求,液面高度达到最大值,其测绘误差能控制在 3% 以内,并且,自来水溶液取之容易,使用后处理无污染,实验成本低,是模拟静电场实验中较理想的导电介质。

参 考 文 献

- 1 吴乃爵主编.大学物理实验教程.杭州:杭州大学出版社,1996.254~260

The effect of measurement in simulating electrostatic field made by plumb circuit and conducting dielectric

Chen Ye

(Department of Basic Courses, Hangzhou Institute of Applied Engineering, Hangzhou 310012)

Abstract By theoretical calculation and practical measurement, the author analyzes and researches the effect of measurement in simulating electrostatic field made by plumb circuit and conducting dielectric. The errors in measurement can be reduced with improvement of a serious of experiment way.

Key words plumb circuit conducting dielectric simulating electrostatic field the errors in measurement