

实验名称 静电场测绘

一. 目的与要求

1. 学习用模拟法测绘静电场的分布。
2. 加强对电场强度和电势的概念。

二. 实验原理

由于静电实验条件苛刻且不稳定，而稳恒电流的电场和相应的静电场的空间是一致的，在一定的条件下，可以用稳恒电流的电场来模拟测绘静电场。

静电场与稳恒电流场的对应关系为

静 电 场	稳 恒 电 流 场
导体上的电荷 Q	极间电流 I
电场强度 \vec{E}	电场强度 \vec{E}
介电常数 ϵ	电导率 σ
电位移 $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$	电流密度 $\vec{J} = \sigma \vec{E}$
无荷区 $\oint \epsilon \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$	无源区 $\oint \sigma \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$
电势分布 $\nabla^2 U = 0$	电势分布 $\nabla^2 U = 0$

根据上表中的对应关系可知，要想在实验上用稳恒电流场来模拟静电场，需要满足下面三个条件：

- (1) 电极系统与导体几何形状相同或相似。
- (2) 导电质与电介质分布规律相同或相似。
- (3) 电极的电导率远大于导电质的电导率，以保证电极表面为等势面。

以无限长同轴柱状导体间的电场为例，来讨论二者的等效性。设真空静电场中圆柱导体 A 的半径为 a ，电势为 U_a ；柱面导体 B 的内径为 b ，且 B 接地。导体单位长度带电 $\pm \lambda$ （即线密度）。根据高斯定理，在导体 A、B 之间与中心轴距离为 r 的任意一点的电场大小为

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} \quad (1)$$

电势为

$$U = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{r}$$

(2)

导体 A 的电势可表示为

$$U_a = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{b}{a}$$

(3)

于是在距中心 r 处

$$U_r = U_a \ln \frac{b}{r} / \ln \frac{b}{a}$$

(4)

此时的场强为

$$E_r = \frac{1}{r} \times U_a / \ln \frac{b}{a}$$

(5)

将 A、B 间充以电阻率为 ρ 、厚度为 δ 的均匀导电质，不改变其几何条件及 A、B 的电位，则在 A、B 之间将形成稳恒电流场。设场中距中心线 r 点处的电势为 U' ，在 r 处宽度为 dr 的导电质环的电阻为

$$dR = \rho \frac{dr}{s} = \rho \frac{dr}{2\pi r \delta}$$

(6)

从 r 到 b 的导电质的电阻为

$$R_r = \int_r^b dR = \frac{\rho}{2\pi\delta} \ln \frac{b}{r}$$

(7)

电极 A、B 间导电质的总电阻为

$$R = \frac{\rho}{2\pi\delta} \ln \frac{b}{a}$$

(8)

由于 A、B 间为稳恒电流场，则

$$\frac{U'}{U_a} = \frac{R_r}{R} \quad (9)$$

即

$$U' = U_a \ln \frac{b}{r} / \ln \frac{b}{a}$$

(10)

比较 (10) 和 (4) 式可知，电流场中的电势分布与静电场中完全相同，可以用稳恒电流场模拟描绘静电场。

根据 (4) 可以导出 $r = \frac{b}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{U_r}{U_a}}}$ 或

$$r = a^n \times b^{1-n} (n = U_r / U_a)$$

(11)

三. 实验仪器

静电场描绘仪，坐标纸。

四. 实验操作步骤

1. 测量长的同轴圆柱体间的电场分布。

(1) 按照实验面板提示，选择检流计法，调整好仪器，选 $U_a = 10V$ 。

(2) 移动探针，分别取测量电位 U_r 为 $1V$ ， $3V$ ， $5V$ 三个等势面，每组均匀分布 8 点等势点，测出各等势点的坐标，并列表记录，将数据输入电脑处理，得到测量半径 $r_{\text{测}}$ （对应有三个测量半径）。

(3) 将三个等势面的 r_i ，并与 (11) 式的理论值 $r_{\text{理}}$ 比较，并求百分误差。

2. 测量平行输电线间的电场分布

(1) 按照实验面板提示，选择电压法，调整好仪器，仍选 $U_a = 10V$ ；

(2) 移动探针，分别取测量电位 U_r 为 $1V$ ， $3V$ ， $5V$ ， $7V$ ， $9V$ 三个等势面，每组均匀分布 8 点等势点，曲率较大出取点应稍密。

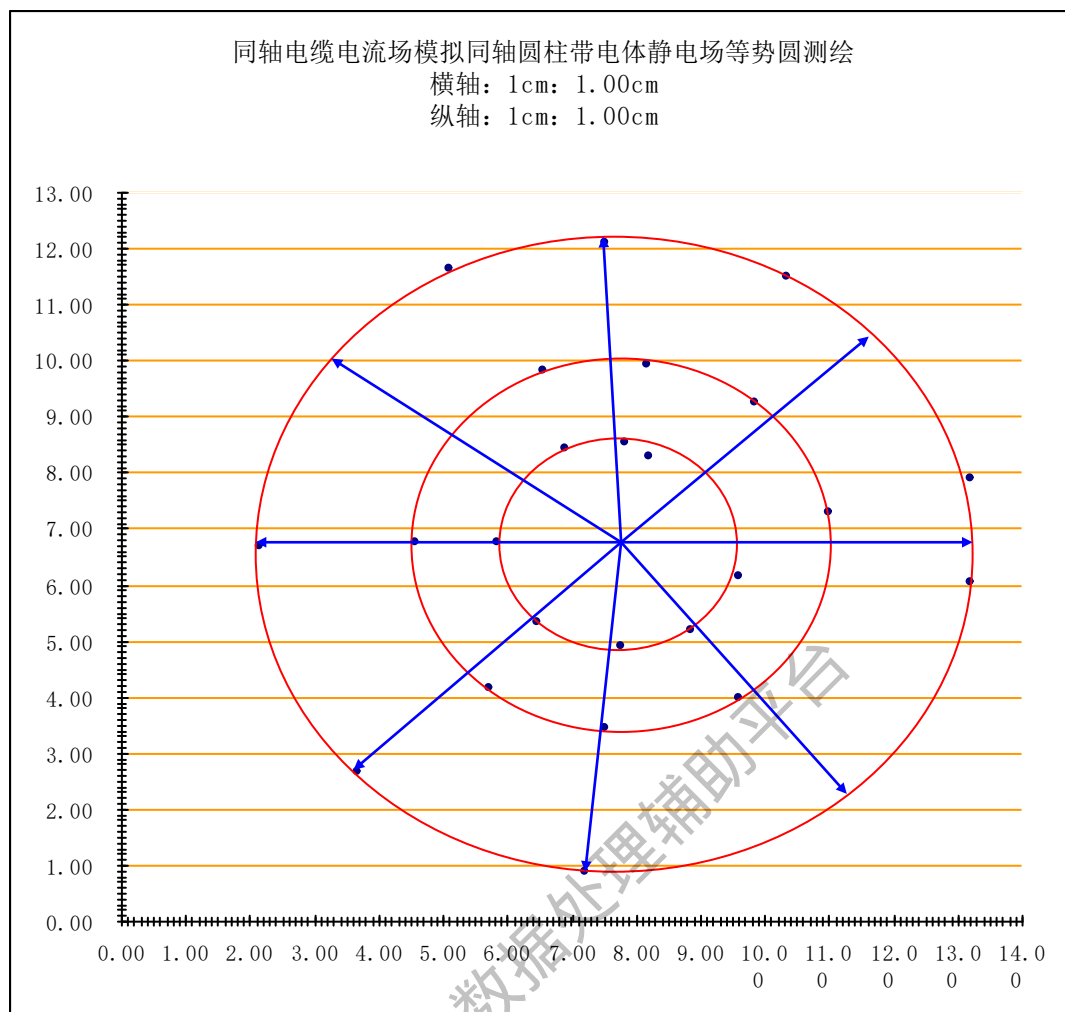
五. 数据记录

1. 同轴电缆电流场模拟同轴圆柱带电静电场等势圆测绘

(1) 电极半径：正极 $a = 5.00mm$ ，负极 $b = 75.00mm$

(2) 等势点坐标

坐标 序号	1V 等势点坐标		3V 等势点坐标		5V 等势点坐标	
	X_1 (cm)	Y_1 (cm)	X_2 (cm)	Y_2 (cm)	X_3 (cm)	Y_3 (cm)
1	2.13	6.70	4.55	6.75	5.85	6.75
2	3.65	2.66	5.70	4.15	6.45	5.35
3	7.20	0.90	7.50	3.45	7.75	4.90
4	13.18	6.05	9.60	4.00	8.86	5.20
5	13.20	7.89	11.00	7.30	9.60	6.15
6	10.35	11.50	9.85	9.25	8.21	8.30
7	7.50	12.10	8.15	9.95	7.82	8.55
8	5.10	11.65	6.54	9.83	6.90	8.45



各等势圆的圆心坐标和半径计算结果

电势值 (V)	1	3	5
X_0 (cm)	7.68	7.77	7.73
Y_0 (cm)	6.55	6.72	6.69
R_p (cm)	5.61	3.28	1.86

(3) 等势圆理论半径的计算及比较

根据 (11) 式 $r = \frac{b}{\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{U_r}{U_a}}}$ 及 $E = \frac{|r_{\text{测}} - r_{\text{理}}|}{r_{\text{理}}} \times 100\%$,

当 $U_r = 1V$ 时, $r_1 = 5.72\text{cm}$, $E = 1.9\%$;

当 $U_r = 3V$ 时, $r_3 = 3.33\text{cm}$, $E = 1.5\%$;

当 $U_r = 5V$ 时, $r_5 = 1.94\text{cm}$, $E = 4.1\%$;

2. 平行输电线电流场模拟等值异号点电荷静电场等势线簇测绘

六. 分析讨论题

1. 根据测绘的等势线和电场线的分布，试分析哪些地方场强较强，那些地方场强较弱？

答：根据（11）式，电场强度的大小 E 与半径 r 成反比，越靠近内电极 A，电场越强，电场线越密。

2. 对电极和导电纸的电导率各有什么要求，为什么？两者相互接触的要求对实验结果有什么影响，为什么？

答：导电纸的电导率应较小，而电极的电导率远大于导电纸的电导率，以保证电极表面为等势面，