

用恒定电流场模拟静电场

静电场是由电荷分布决定的。给出一定区域内的电荷及电介质分布和边界条件求解静电场分布，大多数情况下求不出解析解，因此要靠数值解法求出或用实验方法测出电场分布。直接测量静电场的电位分布通常是很困难的，因为将仪表（或其探测头）放入静电场，总要使被测场发生一定变化，除静电式仪表之外的大多数仪表也不能用于静电场的直接测量。因为静电场中无电流流过，对这些仪表不起作用。如果用恒定电流场模拟静电场，即根据测量结果来描绘出与静电场对应的恒定电流场的电位分布，从而确定静电场的电位分布，这是一种很方便的实验方法。

模拟法本质上是用一种易于实现、便于测量的物理状态或过程模拟不易实现、不便测量的状态和过程，只要这两种状态或过程有一一对应的两组物理量，并且这些物理量在两状态或过程中满足数学形式基本相同的方程及边值条件。例如传热学中一定边界条件下求热流矢量场的稳定导热问题，流体力学中不可压缩流体在一定边界条件下的速度场求解问题，它们都可以通过用恒定电流场模拟的方法来解决。此外，先放大或缩小某些已知量，再测出与所求量成一定数学关系的未知量，进而算出所求量来，也是模拟法的一种类型。以小模型模拟大构件来测量应力分布，用的就是这种方法。

【实验目的】

1. 学习用模拟法研究静电场。
2. 加深对电场强度和电势概念的理解。
3. 描绘平行导线电极的等位线和电场线。
4. 学习用 CCD 摄像机进行空间定位以及软件描绘静电场的方法。

【实验原理】

1. 用恒定电流场模拟静电场

静电场和恒定电流场（见图 1）可以用两组对应的物理量来描述，这两组物理量遵循着数学形式上相同的物理规律。

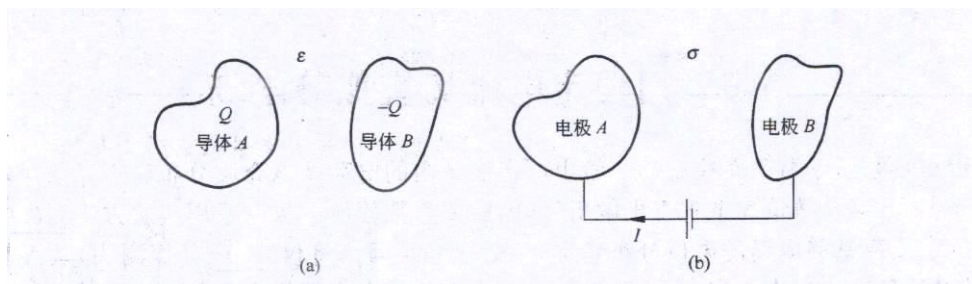


图 1 静电场 (a) 和恒定电流场 (b) 的比较

上述两种场的电位分布在介质（媒质）内服从相同的偏微分方程。电极通常由良导体制成，同一电极上各点电位相等，因而这两种场在边界面上也满足相同类型的边界条件。当导体 A、B 间的电位差等于电极 A、B 间的电位差时，运用电磁场的理论可以证明：像这样具有相同边界条件的相同方程，其解也相同（两个电位的解可能相差一个常数）。因此，我们可以用恒定电流场来模拟静电场，通过测量恒定电流场的电位来求得所模拟的电位分布，这是一种模拟测量方法称为模拟法。

2. 无限长带电直导线的静电场

两根无限长带电导线相距 $oo' = l$ ，其半径分别为 R_1 和 R_2 。在它们形成的静电场中，在 oo' 上，距 o 为 r 的一点上的场强为

$$\vec{E} = \left(\frac{K}{r} + \frac{K}{l-r} \right) \vec{e}_r \quad (1)$$

中 \vec{e}_r 是沿 oo' 方向的单位矢量。

$$V_r - V_{R_2} = \int_r^{l-R_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = K \ln \frac{(l-R_2)(l-r)}{R_2 r} \quad (2)$$

当 $r = R_1$ 时，可得

$$K = \frac{V_{R_1} - V_{R_2}}{\ln \frac{(l-R_1)(l-R_2)}{R_1 R_2}} \quad (3)$$

如果 $V_{R_2} = 0$ ， $V_{R_1} - V_{R_2} = V_0$ ，则可以得到

$$K = \frac{V_0}{\ln \frac{(l-R_1)(l-R_2)}{R_1 R_2}} \quad (4)$$

用稳恒电流场模拟两根无限长平行直导线所产生的静电场的装置如下，在导电玻璃上相距一定距离 l ，用螺钉将两个半径为 R_1 和 R_2 的带孔柱形电极分别固定到导电玻璃上，并使电极与导电玻璃保持良好的接触，用导线将电极与直流电源相连，接通电源后，则在两个电极间形成了一个稳恒电流场。如果实验中我们取 $l=106\text{mm}$ ， $R_1=R_2=10\text{mm}$ ， $V_0=10\text{V}$ ，则 $K=2.21\text{V}$

$$V_r = 2.21 \ln \frac{9.6(10.6-r)}{r} \quad (5)$$

【实验装置】

FD-EFL-A 型微机型静电场描绘实验仪主要由实验主机（含导电玻璃、CCD 摄像系统、采集系统等）、激光探测笔和实验操作软件组成。实验主机如图 2 所示。另外实验时需要配一台电脑，通过串行通讯与实验主机相连采集测量电压，并通过 USB 连接线将 CCD 摄像机采集到的光斑位置信号采集入电脑，通过软件确定某一位置的电压值来描点确定等位线和电场线。

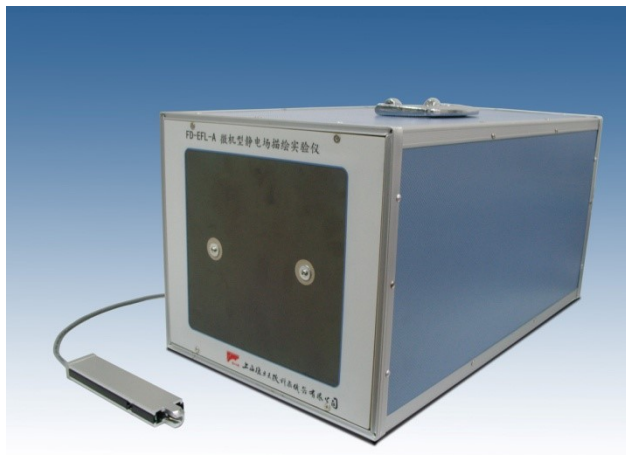


图 2 微机型静电场描绘实验仪主机

【实验内容】

1. 仪器连接：将激光笔的五芯航空插头与主机后面板“接探头”的航空插座连接，用 USB 连接线将主机后面板“摄像采集”与电脑任一 USB 口连接，通过串行通讯转 USB 连接线将主机后面板“数据采集与电脑的任一 USB 口连接。插上电源线，打开电源开关。
2. 检查设备：1) 由于摄像系统是免驱动的，当连接至电脑后，可以在“我的电脑”看到“扫描仪和照相机”中看到“USB 视频设备”，（注意电脑要求 USB2.0），双击打开后可以看到 640*480 像素的图像（因为无外界光照，故全黑，如有亮光，说明导电玻璃镀层有漏）。2) 此时激光笔接通电源点亮，用激光笔照亮导电玻璃，可以在采集图像中看到红色亮点。3) 串行通讯转 USB 连接后，插入光盘安装驱动，具体安装过程见软件操作动画，注意此时通过设备管理器中观察是哪一个端口（后面采集软件中要求选择）。
3. 电极定位：打开采集分析软件，单击“开始采样”按钮，用激光笔照射接触导电玻璃，可以看到有红色光斑和电压变化，首先进行定位，以确定导电玻璃上各点的坐标位置，方法是首先用激光笔照射左电极（即负电极）水平右侧（左右电极连线与左电极外圆交点），要求激光正入射，

探针接触电极，此时按下激光笔上的按键，左电极定位完成，同样方法定位右电极，定位完成后右端静电场描绘坐标图中只要激光照射导电玻璃即可以看到响应的定位点，探针接触导电玻璃，可以显示电压，并且从左电极到右电极大约从 1V 增加至 9V。

4. 描绘等位线和电场线：根据电压值和定位点，可以描绘出 3V、5V、7V 等电压值的等位线，根据等位线软件可以自动画出电场线。具体操作见软件操作动画说明。

【注意事项】

1. 注意保护导电玻璃。
2. 注意避免激光直射入眼睛。
3. 激光笔探针注意避免弯折变形。

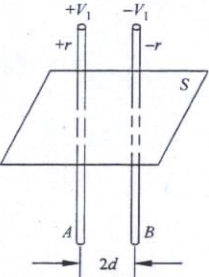
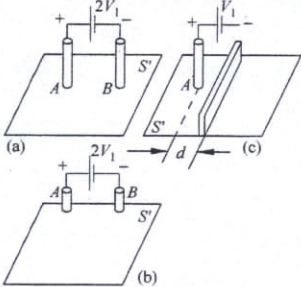
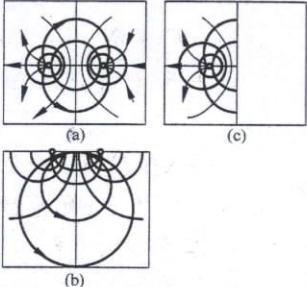
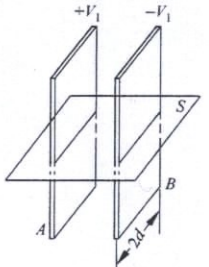
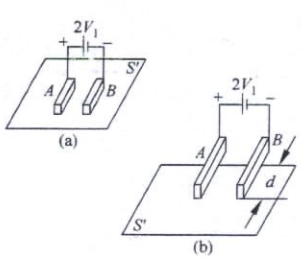
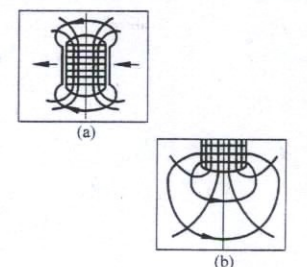
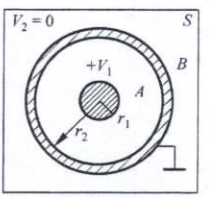
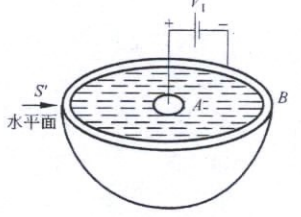

【思考题】

- 1) 用电流场模拟静电场的条件是什么？
- 2) 如果电源电压增加一倍，等位线和电力线的形状是否发生变化？电场强度和电位分布是否发生变化？为什么？
- 3) 测量电场有时会产生畸变，试分析其原因。

(20101215 修订)

【附录】

静电场模拟举例

电极组态, 模拟面 S	模拟模型	S' 面的模拟场
<p>长平行导线(输电线)</p> 		
<p>长平行板(电容器)</p> 		
<p>同心球</p> 		
<p>示波管聚焦电极</p> 