

对电压表直读法测绘静电场的讨论

贾山林 袁升兴

(数理力学系)

提 要: 本文对电压表直读法测绘静电场所存在的系统误差的现象和规律进行了讨论, 并提出了减小和消除这种误差的方法。

关键词: 电压表, 电场, 系统误差

1 条件及存在问题

任何静止的带电体都将在它的周围空间产生静电场, 其分布规律除极简单的情况外, 大都不能求出它们的数学表达式, 若用实验方法直接测量也是相当困难的事情, 所以模拟法是研究静电场的基本方法, 用模拟场来代替静电场时, 必须是这两场所遵从的物理规律在数学形式上相似, 从理论上说, 恒稳电流场与静电场虽然是两个截然不同的场, 但它们所遵从的物理规律却相同, 例如两个场都可以引入电位 U , 且 $\vec{E} = -\nabla U$; 都遵守高斯定理: 对静电场则有 $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$ (面内无电荷), 对恒稳电流场则是 $\oint \vec{j} \cdot d\vec{s} = 0$ (面内无电荷变化) 等, 在相同的边界条件下, 其解的形式也是相同的, 故在实验上常用恒稳电流场来模拟静电场的研究。但是在具体实验中如果测量方法或选用仪器不当, 对测量结果影响很大, 从而会改变恒稳场的分布, 失去模拟的意义。目前有些厂家生产的用电压表直读法测绘静电场的仪器, 由于电压表的内阻不是很高, 使测量结果产生较大的系统误差。例如我们实验室所用的 QE-2 型静电场描绘仪就是如此, 经测试其电压表的内阻 5 伏档为 $50K\Omega$, 10 伏档为 $100K\Omega$ 属于普通内阻的电压表。用它来测量电流场中之电位时, 由于电压表的分流作用显著, 使所描绘之等位线畸变很大, 其畸变特征是随电极组态不同而异。对两个点电极在均匀导电介质中所形成的电流场来说, 畸变的主要特征是在两电极附近等位线的分布不对称。下面我们从电流场的等效电阻分布入手, 来讨论由于电压表的分流作用所引起的系统误差, 并与电位差计指零法所测结果进行比较, 分析引起电场分布畸变现象的规律。

2 测试结果的比较与分析

2.1 待测电极间等效电阻值的分布。当导电纸一定并与两电极接触良好时, 电极组态不同, 其等效电阻的分布也不同。现以两根相距为 8.0cm 长直平行带电线的模拟电极为例来进行讨论, 经测试在两电极间的连线上, 其等效电阻值的分布情况填入下表。由此表看出, 两电极间的等效电阻值为 $2.4K\Omega$, 而两电极间的阻值分布为三部分: 第一是在 $0 \sim 0.1$ 厘米段,

等效阻值从0上升到1.2K Ω ，变化较快；第二是在0.1~7.9厘米段，等效阻值从1.2K Ω 上升到3.2K Ω ，基本上是线性增加；第三是7.9~8.0厘米段，等效阻值从3.2K Ω 突然降至2.4K Ω 。反过来测量，所得阻值数据也倒置，这说明在两极附近阻值的变化是跃迁的，而两极间等效阻值的变化基本上是均匀的。

测试点位置(cm)	0.0	0.1	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	7.9	8.0
等效电阻值(K Ω)	0.0	1.2	1.8	2.1	2.3	2.5	2.7	2.9	3.0	3.2	2.4

2.2电压表直读法与电位差计指零法所测结果的比较。我们仍以上述模拟电极为例，分别用电压表直读法和电位差计指零法对该电极间的电位分布进行测量和描绘，电压表所描绘之等位线如图1所示，电位差计指零法所描绘之等位线如图二所示。由两图比较看出：图2中的等位线基本上是以两电极间之中垂线为对称轴镜像分布的；图1中之等位线显然不满足这个对称关系。其主要表现是：（1）低电位电极附近的等位线分布比较正常，而高电位电极附近的等位线向该电极趋近，致使本来不应闭合的4.0伏等位线闭合起来，造成高电位电极附近等位线的密度变大；（2）在两电极之间等位线的变化基本上是线性，但在两电极附近由于电场强度较大，即电位梯度较大，使测量等位线的数值很不稳定，很难测定出来。对于同轴柱面电极间的电位分布，在电场强度较大的轴线电极附近也有类似情况，即在轴线电极附近由于电位梯度较大，等位线比较密集而难以测定。

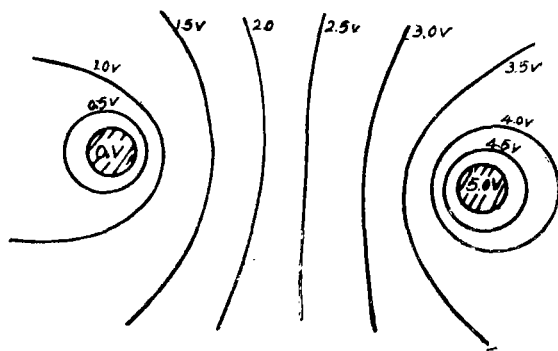


图 1

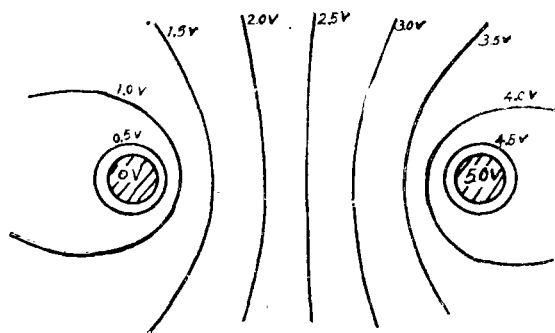


图 2

2.3对等位线不对称分布的分析，我

们所研究的静电场，实际上是两个点电极在导电纸中所形成的电流场的电位分布，在该电流场中，由于导电性均匀且是恒稳电流，所以电流密度的大小显然是在两电极附近较大，而在两电极连线的中点最小，并且是以该连线的中垂线为对称轴作镜像分布，当然与其相应的电场强度值

$|\vec{E}| = \left| \frac{\vec{j}}{\sigma} \right|$ ，式中 σ 为导电介质的电导率对同一材料来说是个恒量，或单位长度上

的电压降 $|\vec{E}| = \left| -\frac{dU}{dr} \hat{r} \right|$ 也应该是镜像分布的。但两电极间的等效电阻值却是由接地的零电位向高电位电极逐渐增大的，对一定量程的电压表来说，其内阻不变，所以当用电压表直接测量两电极间不同位置的电位时，由于等效电阻不同，使电压表的分流效果也不同，并且是随着等效电

（下转40页）

$$1^{\circ} \frac{\|X - X^*\|_a}{\|X\|_a} \leq \|A\|_a \|A^{-1}\|_a \left(\frac{\|B - B^*\|_a}{\|B\|_a} + \frac{\|A^{-1}\delta\|_a}{1 - \|A^{-1}\delta\|_a} \frac{\|B^*\|_a}{\|B\|_a} \right)$$

$$2^{\circ} \frac{\|X - X^*\|_a}{\|X\|_a} \leq \frac{\|A\|_a \|A^{-1}\|_a \|B - B^*\|_a}{\|B\|_a} + \frac{\|A^{-1}\delta\|_a}{1 - \|A^{-1}\delta\|_a} \times \\ (1 + \frac{\|A\|_a \|A^{-1}\delta^*\|_a}{\|B\|_a})$$

keywords: matrix norm; vector norm; operator norm; disturbance vector; disturbance matrix.

(上接90页)

阻的增大而增大,另外电压表所分流的实际上是测量点附近电流线上的电流,因而使分流效果就更加显著,分流的结果使测量的电位值比实际电位值偏小,例如图一中4.0伏之等位线,实际上却为4.1伏之电位。如果4.0伏之等位线不应该闭合的话,那么4.1伏之等位线就不一定也不闭合了,因而它与1.0伏之等位线在外形上就不会对称了。另外,又由于电压表在高电位电极附近的读数值比实际值偏小,所测之等位线向高电位电极趋近,结果使该处的等位线本来就密的情况下更加变密,从而造成两电极附近等位线在密度上的不对称。同时也揭示出在高电位电极附近等位线更难测定的原因,显然是由于在该电极附近等位线的密度值比正常值更大的缘故。对于同轴柱面电极,在高电位的轴线电极附近等位点难以测定的原因也是如此。

4、在电压表直读法测绘静电场中,由于电压表的分流作用而存在一定的系统误差,由上面的讨论可知,若减少该误差的影响,就必须选用高内阻的电压表进行测量,例如选用电子管繁用表的电压档等,也可得到较满意的效果。

三、小 结

从以上分析看出,在“模拟法测绘静电场”的实验中,比较理想的测试方法就是电位差计指零法。因为从理论上来说,当测量平衡时没有电流从检流计通过,不影响原来电流场的分布。从实验上也得到了证实,另外用电位差计指零法所测出的等位线是百分比,可以通用。如要确定其绝对值也不难,只要把精密型金属膜电阻串联成电压等分器就可实现,电压等分器的总阻值约等于所测两电极间的电阻值为宜。总之,我们认为,在用电压表直读法测绘静电场时,绝对不能选用内阻比较低的电压表来进行测量,因为它不但不能模拟原来场的分布规律,反而会使学生对模拟法的正确性产生怀疑,造成不良后果。