

接地网的计算

一、关于接地网的基本知识。

在电力系统中，为了保护设备和人身的安全，接地现象是非常常见的。将电气装置、设施该接地部分经接地装置与大地做良好的电气连接称为**接地**。接地根据用途可以分为工作接地、保护接地、防雷接地和防静电接地。接地装置由**接地体和接地线**两部分组成。埋入地中并且与大地直接接触的金属导体称为**接地体**；把电气装设施该接地部分经接地体连接起来的金属导体称为**接地线**。接地体又分为**人工接地体和自然接地体**。兼作接地体用的直接与大地接触的各种金属构件、非可燃气体的金属管道、建筑物中的钢筋、电缆外皮、电杆基础上的避雷线和中性线等都是自然接地体；为满足接地装置接地电阻要求而专门埋设的接地体称为**人工接地体**。我们所研究的接地网就是一种人工接地体，接地网由**水平接地体和垂直接地体**，接地网的材料一般有钢管、角钢、圆钢、扁钢和铜带，接地网祈祷的作用有**泻放电流和均压**作用。

不同形状接地体周围土壤电位分布演示。

电流经接地体流入大地，在大地表面形成分布电位。接地体和大地零电位点间的电压称为接地装置的**对地电压（或对地电位）**。接地线电阻和接地体的对地电阻（**电流自接地体向外散流所遇到的电阻，又称散流电阻或扩散电阻**）之和成为接地装置的**接地电阻**。接地线电阻基本上很小，所以可以认为接地电阻就等于扩散电阻。接地电阻数值上等于对地电位与从接地体流入大地电流的比值。按流过接地体的电流是工频电流求得的电阻称为**工频接地电阻**；按流过接地体的电流是冲击电流求得的电阻称为**冲击接地电阻**。接地电阻和土壤电阻率、接地体规格有关。所以改变接触电阻的主要手段就是改变土壤电阻率和改变接地体敷设。土壤的电阻率大小主要取决于土壤中导电离子的浓度和水分含量。干燥的土壤是不导电的，有时候为了降低土壤电阻率还会采用降阻剂。

评估接地网是否满足要求的指标除了接地电阻和对地电位外，还有接触电压和跨步电压。人站在地面上离设备水平距离**0.8米**处手触到设备外壳、构架离地面**1.8米**处，加于人手与脚之间的电压称为**接触电压**；人在分布电位区域中沿散流方向行走，步距为**0.8米**时两脚间的电压称为**跨步电压**。在大接地短路电流系统中接触电压和跨步电压应满足：

$$U_c < \frac{250 + 0.25 p_b}{\sqrt{t}} ;$$

$$U_{st} < \frac{250 + p_b}{\sqrt{t}} .$$

原创力文档

max.book118.com

找文档就上原创力文档，下载高清无水印

上式中 t 表示接地短路电流持续时间，采用主保护动作时间和相应短路器的动作时间。在小接地短路电流系统里发生单相故障时不会立即切除故障，因此不存在 t ，对应的接触电压和跨步电压应满足：

$$U_c < 50 + 0.5 p_b$$

$$U_{st} < 50 + 0.2 p_b$$

一个接地网只有一个接地电阻，通过接地网入地的电流不同对地电位也不同，对于同一个接地网和同一个入地电流接地网表面个点的接触电压和跨步电压都与同，通常只需要最大的点不超过允许值。

不同形状接地体工频接地电阻的计算：

单根垂直接地体：
$$R_2 = \frac{p_b}{2\pi l} \left(\ln \frac{8l}{d} - 1 \right) \quad \text{欧姆；}$$

l ——垂直接地体长度

d ——垂直接地体外径

不同形状的水平接地体：
$$R_2 = \frac{p_b}{2\pi l} \left(\ln \frac{L^2}{hd} + A \right) \quad \text{欧姆；}$$

L ——接地体总长度

h ——水平接地体埋设的深度

d ——水平接地体外径或等效外径

A ——水平接地体形状系数，不同形状对应不同的 A 值

接地网：
$$R_2 = \frac{\sqrt{\pi}}{4} + \frac{p_b}{\sqrt{s}} + \frac{p_b}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{1.6hd} \times 10^4 \quad \text{欧姆}$$

S ——接地网总面积；

L ——接地体（水平接地体和垂直接地体）总长度

h ——水平接地体埋设的深度

d ——水平接地体外径或等效外径

二、 ETAP 接地网算法,IEEE Std 80-2000 标准算法。

1、经接地网入地的电流计算。

$$I_g = I_{fg} \times S_f \times C_p$$

S_f ——故障电流经接地网入地系数；

C_p ——未来发展系数；

I_{fg} ——故障电流由用户指定或来自短路计算。

2、土壤建模

在不同深度和用不同方法测量得到的土壤电阻率可能不同，计算时用平均值。

3、人体允许的最大接触电压和最大跨步电压。

(1) 人体允许通过的最大电流 (I_B) 和电流的持续时间 (t_s) 有关，持续时间在

0.03—3.0S 间它们的关系式为： $S_B = (I_B)^2 \times t_s$

S_B 是一常数，0.03S < t_s < 3.0S 时， $S_B = 0.0135$

$$I_B = \frac{\sqrt{S_B}}{\sqrt{t_s}} = \frac{K}{\sqrt{t_s}}$$

人体重为 50kg 时， $K=0.116$ ；人体重为 70kg 时， $K=0.157$ 。

(2) 人脚与地面的接触电阻：

$$R_f = \frac{\rho}{4b}$$

ρ ——土壤接触电阻率；

b ——人脚等效直径，一般取 0.08m。

(3) 人体电阻： $R_B = 1000 \Omega$ 。

(4) 人体允许的最大接触电压计算：

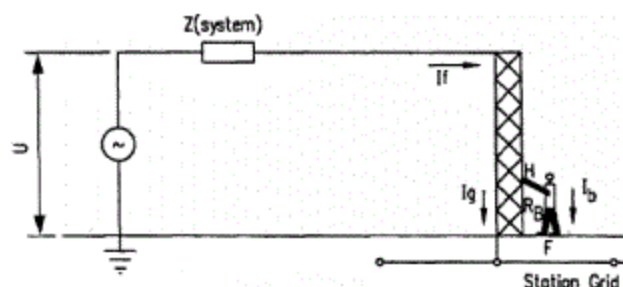


图 1 接触电压示意图

当人去触摸设备时流过人体的电流是人体允许通过的最大电流时，加在人体上的电压就是人体允许的最大接触电压。这时候人的两脚都着地，相当于两脚和地的

接触电阻并联，人体实际与地面的接触电阻为 $R_f/2$ 。

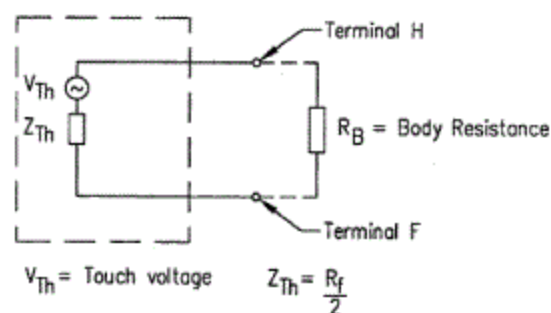


图2 接触电压示意电路图

计算公式： $E_{touch} = I_B(R_B + 1.5\rho)$

(5) 人体允许的最大跨步电压计算。

下图是一幅跨步电压示意图：

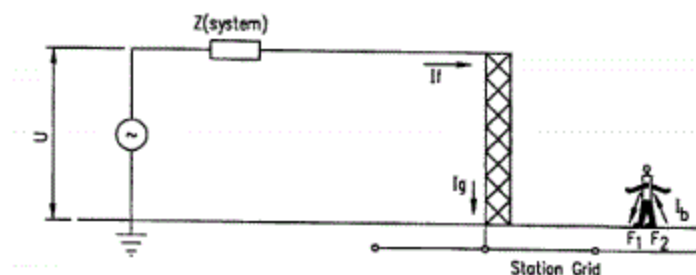


图3 跨步电压示意图

当人在接地网上表面行走时流过人体的电流是人体允许通过的最大电流时，加在人两腿上的电压就是人体允许的最大跨步电压。这时候人的两脚都着地，相当于两脚和地的接触电阻串联，人体实际与地面的接触电阻为 $2R_f$ ，电路图为：

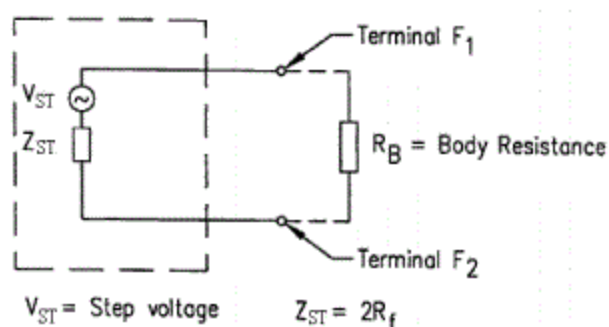


图4 跨步电压示意电路图

计算公式为： $E_{step} = I_B(R_B + 6.0\rho)$

4、接地电阻计算

接地网总接地电阻：
$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m}$$

R_1 水平接地网接地电阻;

R_2 所有垂直接地体的接地电阻; π

R_m 水平接地网和垂直接地体组的公共接地电阻。

$$R_1 = \frac{1}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{a'} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \rho$$

ρ 土壤电阻率;

L_c 所有水平接地体的长度;

$2a$ 水平接地体直径;

a' 对于埋在 h 深度的导体 $a' = \sqrt{2ah}$, 对于在表面的导体 $a' = a$;

A 水平接地网面积;

k_1, k_2 形状系数。

$$R_2 = \frac{1}{2\pi n_r L_r} \left[\ln \left(\frac{4L_r}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_r} - 1)^2 \right] \rho$$

L_r 每根垂直接地体的长度;

$2b$ 垂直接地体的直径;

n_r 水平接地体数目。

$$R_m = \frac{1}{\pi L_c} \left[\ln \left(\frac{2L_c}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_c}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \rho$$

5、形状系数确定：方行为 1，Y 形为 0。表格

6、接触电压和跨步电压计算

接触电压： $U_{th} = V_{th} - V_{0.8}$;

跨步电压： $U_{st} = V_1 - V_2$ 。

7、地面电位升（GPR）计算： $GPR = R_g \times I_g \times S_f \times C_p$

三、 ETAP 接地网模块应用



图5 编辑工具条

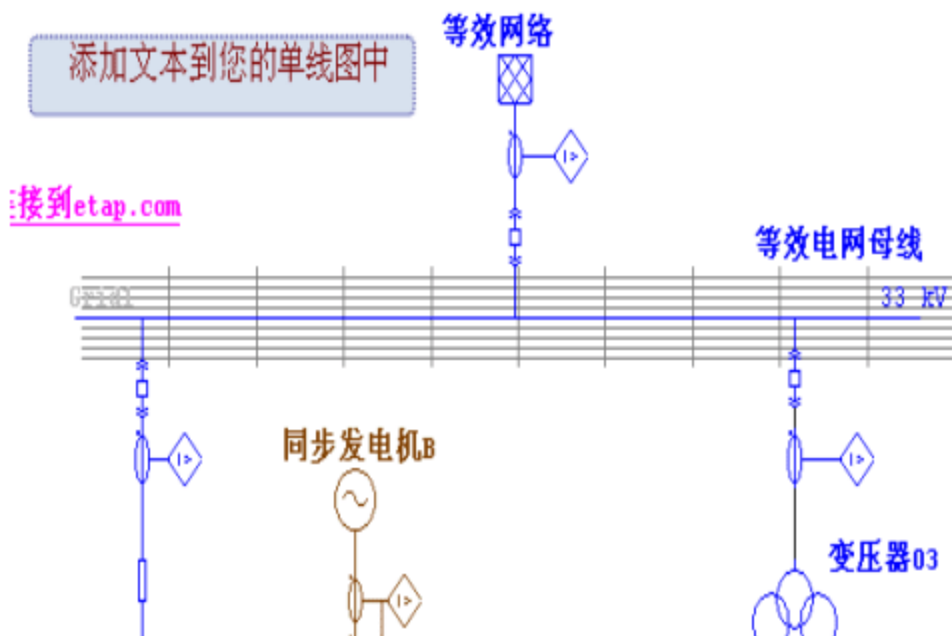


图6 接地网与母线关联

打开 ETAP 软件，打开工程。在编辑模式下添加一个接地网元件，（如图 5 所示）。可以把元件和相关设备（母线）关联起来，直接把接地网元件放到相关设备（母线）上面就可以了。如果接地网和母线相关联，可以把母线的短路电流（单相接地故障的对称初始值）更新到接地网里，如果一个接地网和多条母线关联取短路电流最大一个。这样在接地网设计计算时就直接用这个短路电流计算，否则需要人工输入一个短路电流值。

选择接地网元件，右击，在弹出的菜单里选择“更新故障电流”。

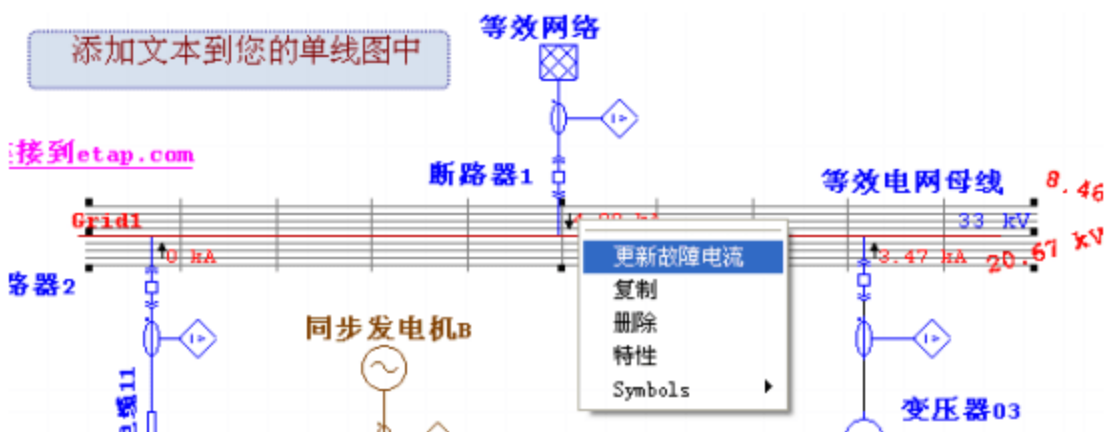


图7 更新短路电流 1

在跳出的“更新接地网短路电流”对话框里点击“确定”。



图 8 更新短路电流 2

这样就完成了把短路电流更新到了接地网编辑器里，供后面的计算用。双击接地网元件，进入 ETAP 接地网设计模块，开始设计接地网。对于一个没有编辑过的接地网，先跳出分析方法选择对话框，要求选择设计分析方法。如图 9 所示，有两中方法可以选，IEEE 方法和有限元法。IEEE 方法有三个计算：1 确定好接地体计算接触电压、跨步电压、接地电阻和对地电压；2 确定好垂直接地体优化水平接地体，计算接触电压、跨步电压、接地电阻和对地电压；3 优化水平和垂直接地体，计算接触电压、跨步电压、接地电阻和对地电压。

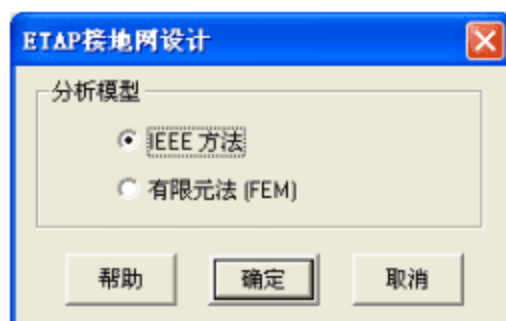


图 9 选择设计分析方法

选择 IEEE 方法在分析方法选择对话框里点击确定，打开接地网系统，界面如图 10 所示。界面的主要部分分为三个小窗口：三维视图窗口、剖面视图窗口、编辑和表面视图窗口。三维视图窗口可以从各个角度看接地网；剖面视图窗口可以查看接地网剖面；编辑和表面视图窗口可以设计编辑接地网和看到表面视图。工具条里列了一些可供选择的接地网布置形状。

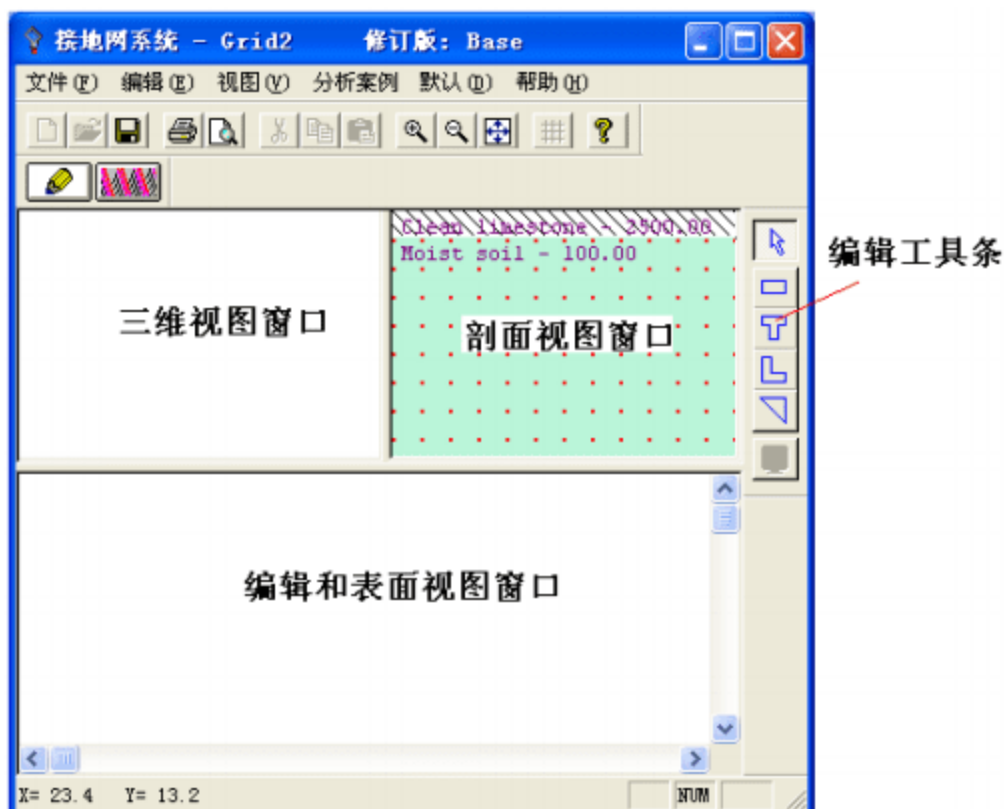


图 10 选择设计分析方法

从工具条中选择需要的接地网布置模式，添加到编辑和表面视图窗口。调整好大小后，双击它，打开编辑器对它进行编辑。在这里可以设置接地体的实际尺寸、深度、数量、成本和选择接地体材料。ETAP 库里录入了一些常用接地体材料类型，选择了之后相应的材料参数从库里提取出来。

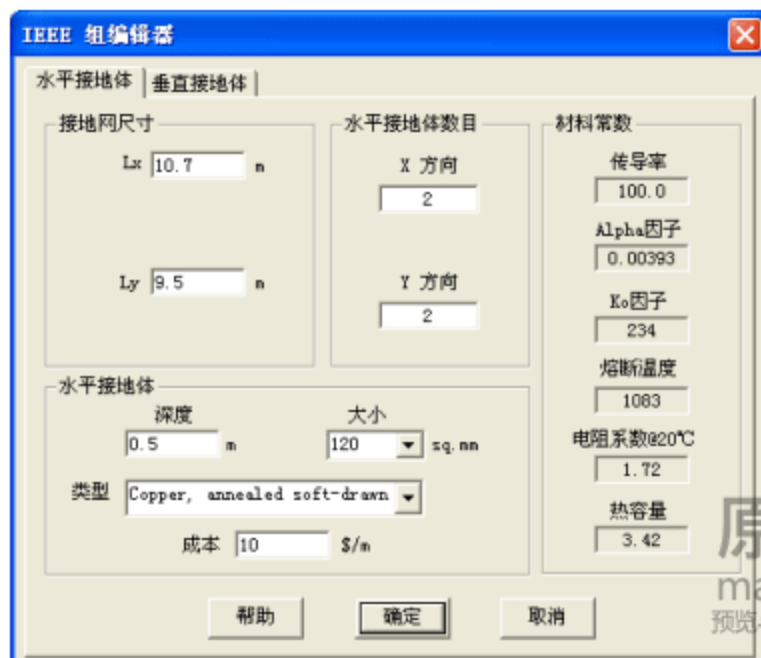


图 11 IEEE 水平接地体编辑器

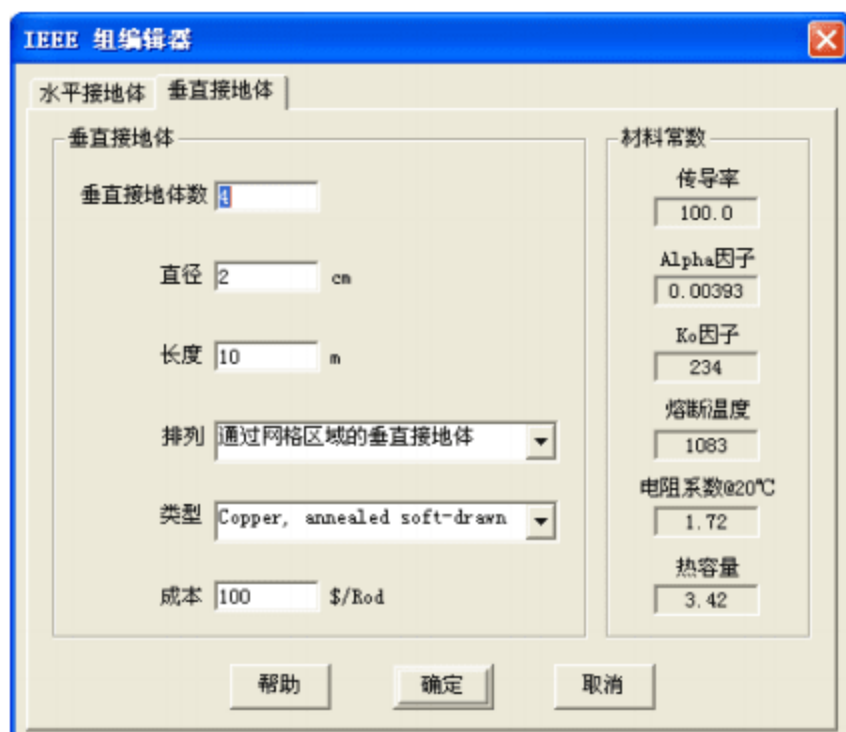


图 12 IEEE 垂直接地体编辑器

接地体编辑好后，三维视图窗口和剖面视图窗口都会自动把接地体的相应视图添加上去。在剖面视图窗口双击，跳出土壤编辑器窗口，如图 13 所示。编辑土壤，土壤分三层，为每层土壤选择土壤类型和填写厚度。ETAP 软件库里已经录入了一些常用的土壤类型及其电阻系数，选择好土壤类型后相应的电阻系数会从库里去出，如果库里的数据不能满足需要可以手工填入。



图 13 土壤编辑器

编辑好接地体和土壤后按下接地网分析按钮进入接地网分析模式，如图 14 所示。

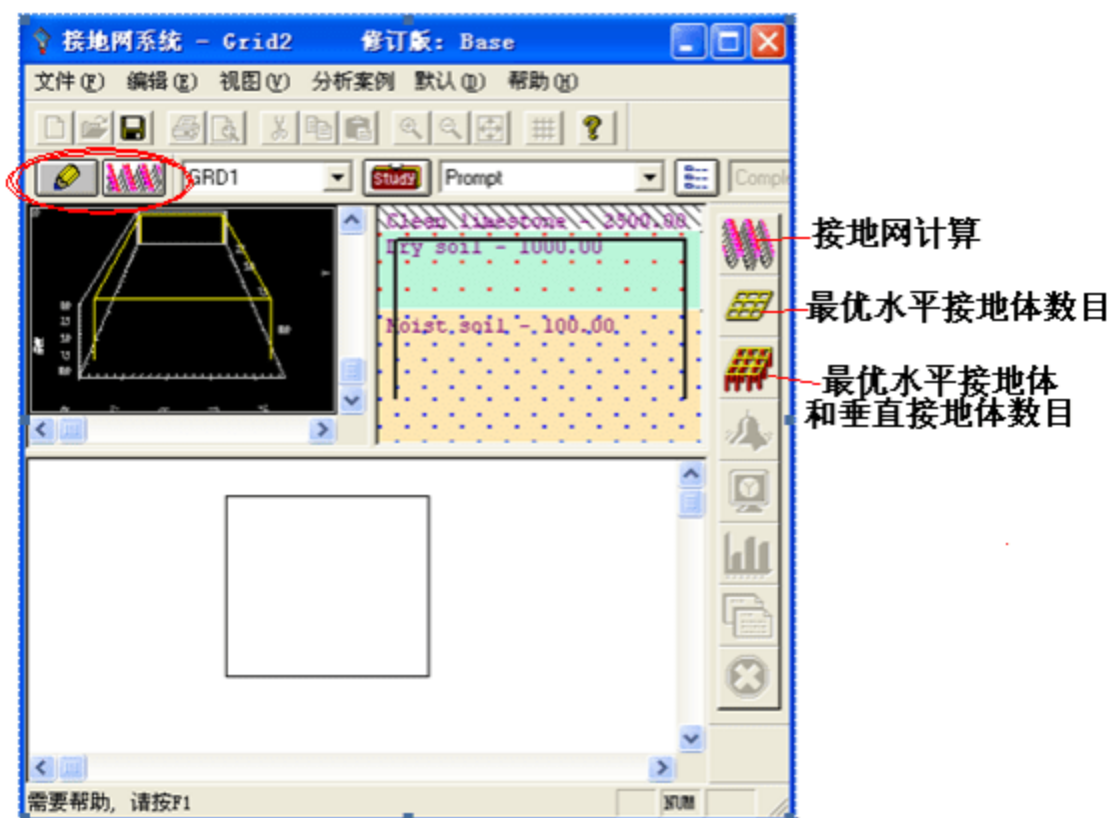


图 14 接地网分析模式

在接地网分析模式下，接地网分析工具条上面有分析案例工具条，如图 15 所示。软件默认有一个分析案例生成，如果需要多个分析案例时可以通过菜单栏的分析案例菜单新建和删除。如图 16 所示。

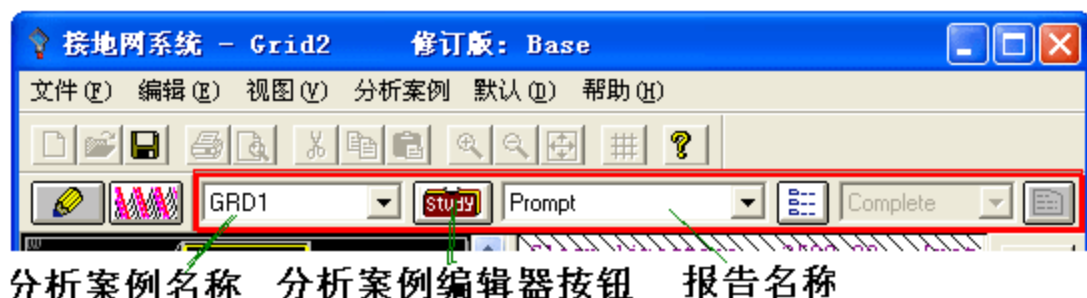


图 15 分析案例工具条



图 16 分析案例菜单

每一个分析案例都有一些不同的设置，这些设置在分析案例编辑器里完成。点击分析案例编辑器按钮，跳出分析案例编辑器，如图 17 所示。分析案例设置注意点：

选项：选择用于计算的人体平均体重和填写环境温度。

更新：这只对于 IEEE 方法的优化算法有用，选择了更新把优化算法的计算结果（接地体设计方案）更新到接地体编辑器里。

故障持续时间： T_s —故障电流持续时间，电流消耗因子； T_c —故障电流持续时间，用于最小截面计算（接地体热稳定校验）； T_f —冲击电流持续时间，用于计算可能出现的最大人体接触电压和跨步电压，三个一般都填一样的值。

接地短路电流：用户指定——人工指定一个值用于接地网计算；来自短路分析——把所关联的母线的单相接地电流初始有效值填到这里用于计算。

接地网电流因子： S_f ——接地网的分流因子，通过接地网入地的故障电流占总故障电流的百分数。 C_p ——增长因子，考虑电网未来发展短路电流是目前短路电流的百分比。



图 17 接地网分析案例编辑器

在接地网分析模式下，右边会出现接地网分析工具条。前三个按钮分别对应三中不同的计算方法，至上而下分别是：接地网计算、最优水平接地体数目、最优水平接地体和垂直接地体数目，如图 14 所示。分析案例设置好后，点击有边的分析工具条，软件开始接地网计算，计算完成后都会给出响应的计算结果，如果是优化计算还有优化结果。

1、接地网计算：根据前面编辑的接地体、土壤计算接触电压、跨步电压、接地电阻、对地电位，以及允许的接触电压和跨步电压。

2、最优水平接地体数目：在前面编辑的土壤和垂直接地体的条件下，计算出最优化的水平接地体数目和在最优化的水平接地体数目情况下的接触电压、跨步电压、接地电阻、对地电位。

3、最优水平接地体和垂直接地体数目：在前面编辑的土壤条件下，计算出最优化的水平接地体和垂直接地体数目和在这最优化情况下的接触电压、跨步电压、接地电阻、对地电位。

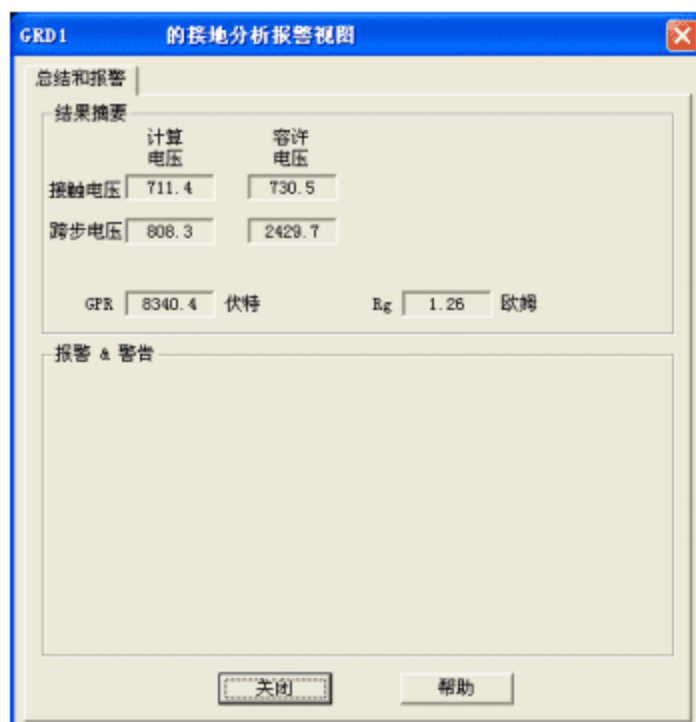


图 18 接地网计算结果

接触电压和跨步电压计算值是人在接地网区域内工作可能出现的最大接触电压和跨步电压；容许电压是人体允许承受的最大接触电压和跨步电压值；GPR 是接地体的绝对电位；Rg 是接地体的接地电阻。如果接触电压和跨步电压计算值大于容许值,或接地网接地电阻超过相关规程中规定的值都会用红色在“报警&警告”里提示。

选择有限元法

设置跟 IEEE 方法相似，只是在计算方法上有所区别。有限元法确定定好水平接地体和垂直接地体数目，计算接触电压、跨步电压、接地电阻和对地电位。有限元法没有优化算法。有限元法可以计算出整个接地网区域内的各点的接触电压和跨步电压值，并画出三维图，用不同颜色区分接触电压和跨步电压等级。

编辑接地体各参数与 IEEE 方法相同。