

最新智能天线

设计与应用新技术指导手册



◎ 主 编: 张 斌

最新智能天线

设计与应用新技术指导手册



中国电力出版社

最新智能天线设计与应用新技术 指导手册

主编 张 斌

第
二
卷

科学技术出版社

第三章 辐射算法

第一节 概 述

本章讨论的辐射算法的任务是确定天线馈电点的激励电压产生的表面电流分布(如图 3-1 所示)。得到表面电流分布后,再用第二章的算法确定天线的辐射场。

与辐射天线有关的主要挑战在于天线馈电,它在脚本程序 `rwg4.m` 中编程实现。对接收天线的电磁研究来说,激励仅仅是入射平面波,但对于发射天线,激励一般是线或板形导体上的电压源。

按照传统,研究线天线时采用一维分段模型(数值电磁计算程序 NEC。NEC 背后的理论要求特殊的积分方程和一组特殊的基函数。必须使用两种不同的模型:一种模型用于导电面,另一种用于导线。线和面连在一起时会遇到许多问题。尽管 NEC 速度很快,使用两种不同的模型还是会带来诸多不便。

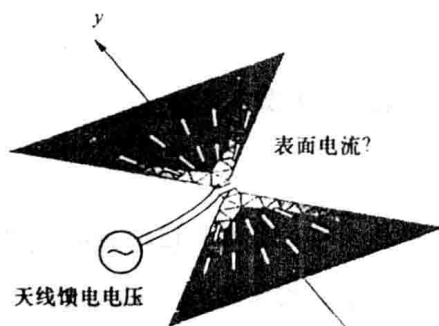


图 3-1 辐射算法的任务

为了避免开发两种相互独立的算法,必须研究 RWG 边元在建模线天线方面的潜能。导线可用细带模型来表征,该带沿其横向只有一个或两个 RWG 边元。这样得到的结果令人兴奋,结果表明偶极子和单极子天线的表面电流分布、输入阻抗和增益得到了真实再

现。因此。这里描述的面天线和线天线使用相同的数值方法——RWG 边元。

第二节 程序序列

天线计算所必需的连续数值步骤可以用很短的脚本程序 `rwg1.m ~ rwg5.m` 实现。除 `rwg4.m` 外,其他脚本程序都与第一章的相同,可以在本章的 Matlab 目录下发现它们。在阅读本章之前,可以先运行一下这些脚本程序。最后一个脚本程序会显示 1 V 馈电电压在半波偶极子上产生的表面电流分布。应在脚本程序 `rwg1.m` 中指定天线网格名。输入阻抗和辐射电阻的计算由脚本程序 `rwg4.m` 完成。

第一部分程序序列完成后,脚本程序 `efield1.m`、`efield2.m` 和 `efield3.m` 就可提供空间点的辐射信号、包括三维方向图和天线增益在内的天线辐射方向图。这些脚本与第二章的相同。当前的程序序列(图 3-2)适用于任意金属天线,而不仅仅是偶极子和单极子,本书后续部分都要用到它们。图 3-2 表明,完整的天线辐射算法正是第二章算法(经过修改天线馈电方式后)和第二章算法的直接组合。

第三节 细导线的带模型

就阻抗和辐射方向图来说,具有非圆柱截面的细带天线的特性就如同具有等效半径的圆柱天线一样,对于细带,等效的圆柱线半径为:

$$a_{\text{eqv}} = 0.25s$$

示的两个相邻边元能够沿带轴向形成均匀电流 J ,这就满足了细线理论的最重要假设。

可以使用子目录 `mesh` 下的 Matlab 脚本程序 `strip.m` 给任意长、任意宽的带生成均匀的三角化网格,生成网格时使用了德洛内三角化。可在 Matlab 命令窗口内键入 `strip` 观看结果。网格保存于二进制输出文件 `strip.mat` 中。实际上,脚本程序 `strip.m` 比 PDE 工具箱更为灵活,因为我们可以控制边界三角的个数。它奉献给读者第一个用解析法描述天线结构的例子。

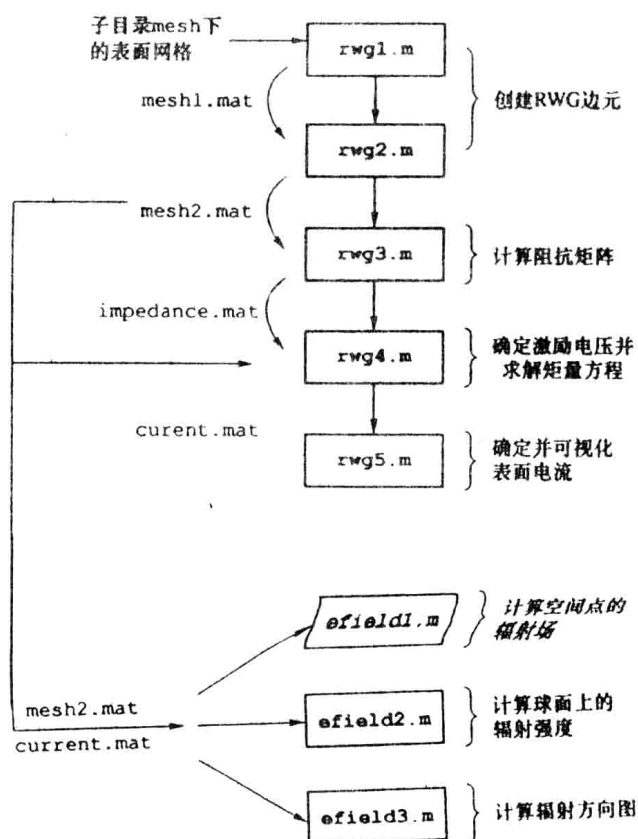


图 3-2 完整的辐射算法流程图

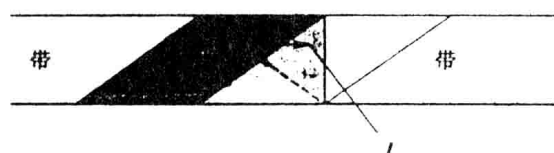


图 3-3 细带的离散化

不同的带网格显示于图 3-4。各网格的长宽比相同(100),但沿带轴向的离散精度不同;另外,网格 strip2.mat 末端的离散更精细。带网格可用函数“viewer 文件名”(如 viewer strip2)显示。

第四节 馈电模型

激励源由入射波变为电压源后,应将馈电模型引入天线结构中以便计入电压源的影

响。天线通常由传统的传输线通过两个靠近的端子馈电,这意味着将理想电压发生器跨接在天线的小间隙上,如图 3-5 所示。

有多种方法描述间隙内的场。最简单的(通常也是最不够精确的)办法是所谓的 δ 函数发生器法或边馈电模型法。对 RWG 边元来讲,这种方法很理想,简单地说,这种模型假设有一宽度可以忽略的间隙 Δ ,如果间隙上跨接的电压是 V (从正端指向负端),那么,间隙内的电场为(如图 3-5 所示):

$$E = -\nabla \varphi = \frac{V}{\Delta} n, \quad (3-2)$$

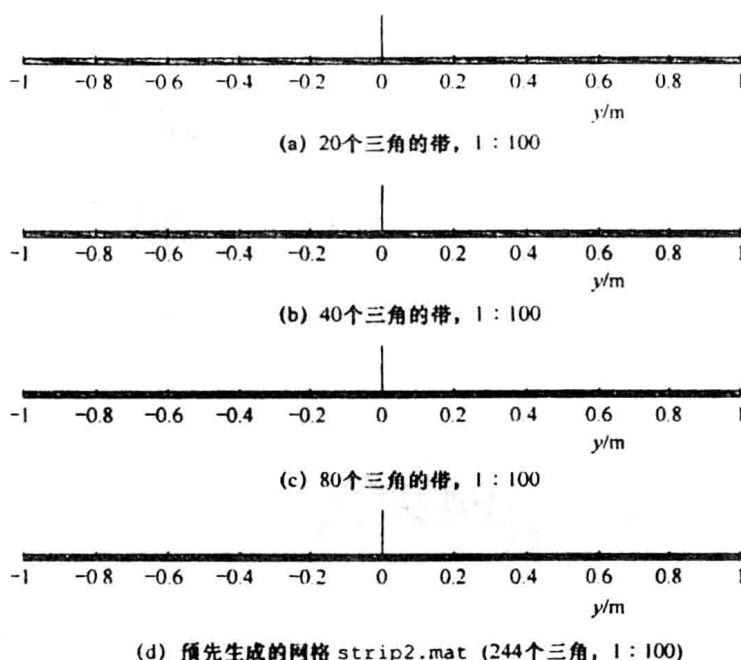


图 3-4 *strip.m* 的输出

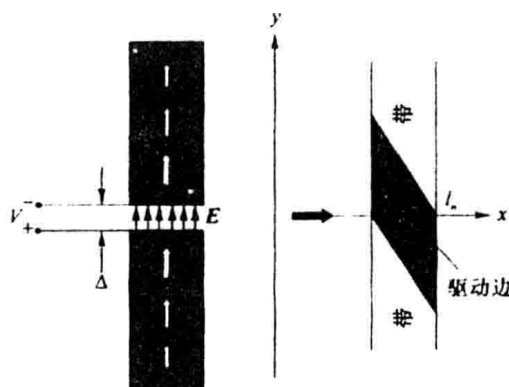
这里, φ 为电势。当 Δ 趋向于零时, (3-2) 式预测的间隙内场为无穷大, 即近似为 δ 函数:

$$E = V\delta(y)n_y \quad (3-3)$$

公式(3-3)说明, 电场沿间隙的积分等于施加的电压, 即:

$$\int E_y dy = V \quad (3-4)$$

很容易将间隙与边元结构的内部边 n 联系起来, 对应此内部边只有一个 RWG 边元(如图 3-5 所示)。这样, 除 RWG 边元 N 以外的其他地方, “入射”电场处处为零。



注：黑色箭头表示天线间隙内的电场方向；白色箭头表示天线面上的表面电流的方向。

图 3-5 天线馈电模型

我们将下式代替第章的公式(3-8)作为矩量方程的激励电压：

$$V_{m=n} = \int_{r_n^+ + r_m^-} E \cdot f_n dS = V \int_{r_n^+ + r_m^-} \delta(y) n_y \cdot f_n dS = l_n V \quad \text{对边元 } m = n$$

$$V_m = \int_{r_n^+ + r_m^-} 0 \cdot f_m dS = 0 \quad \text{其他情况} \quad (3-5)$$

公式(3-5)应用了以下事实： RWG 基函数 f_n 垂直子边的分量总等于1。在下面的讨论中，我们还假设馈电电压 V 等于1V。换句话说，馈电电压为时间的余弦函数，相位为零，强度为1V。

在第一章的命令行程序序列 `rwg1.m`; `rwg2.m`; `rwg3.m`; `rwg4.m`; `rwg5.m` 中，要计入(3-5)，只需要改变 Matlab 脚本程序 `rwg4.m` 即可，其他程序直接取自散射分析。Matlab 脚本程序 `rwg4.m` 总把最靠近原点的边当作馈电边(如图 3-4 所示)。

第五节 偶极子天线的电流分布

第四节末尾的命令行程序序列输出沿带的表面电流分布。它给出每个三角片的表面电流的强度。图 3-6 显示了结构 `strip2.mat` 在 5 个不同频率点的输出，起始频率对应于半波偶极子(偶极子总长度 2 等于半个波长)。对于我们所讨论的情况， $h = 1\text{m}$ ，5 个频率点分别为 75 MHz、150 MHz、225 MHz、300 MHz 和 375 MHz，沿偶极子可观察到周期性的电

流分布,频率较高时有多个极大点和极小点。对于偶极子和类似的谐振线天线来说,这种周期性电流分布是一种典型的分布。

在若干特定频率处的偶极子行为引人注目。这些频率对应于半波偶极子和其他长为半波长奇数倍的偶极子:

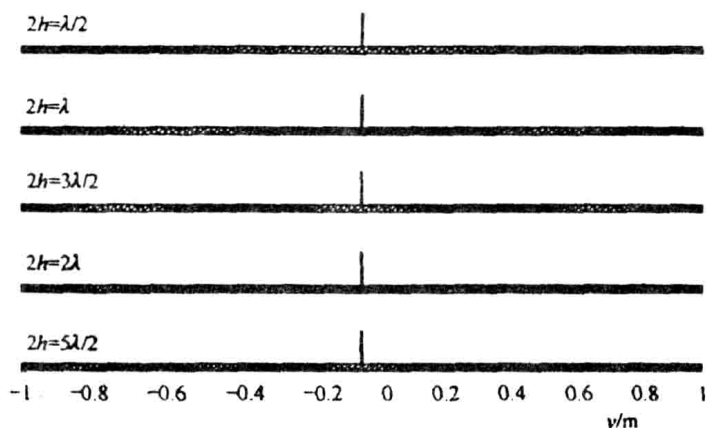
$$2h = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \dots$$

在这些频率点,偶极子阻抗主要呈电阻性。大小在 $50\Omega \sim 200\Omega$ 量级。因此,容易设计有效的匹配网络以使偶极子天线能被放大电路所驱动。到目前为止,半波偶极子仍是最流行的天线形式,特别是在无线通信领域。

同时,无限细偶极子在下面频率点却是毫无实际意义的天线:

$$2h = \lambda, 2\lambda, 3\lambda, \dots$$

在这些频率点,馈电点的电流几乎为零,输入阻抗变得很大且具有电抗性。这样就很难设计相应的匹配网络,然而,若偶极子半径为有限值(这对应于宽度有限的带),馈点电流总保持为有限值。图 3-6 表明,在 $2h = \lambda, 2h = 2\lambda$ 时,馈电电流在馈点呈现为较亮但窄的非零点。



注: 带的长度为 $2h$; 白色对应的电流强度较大; 馈电边(在中心)以长条形表示。

图 3-6 不同频率时沿带 *strip2.mat* 的表面电流强度

对于细导线或细带,我们期望电流沿带的纵向分量优于横向分量。补充脚本程序 *wg6.m* 可以进行相应的定量估计,沿带轴向(通常为,轴)引入均匀分布网格,对每下网格点可确定一最接近的三角片。此三角中心的表面电流(见脚本程序 *wg.5* 囊和第章的有

关叙述)被赋给相应的网格点。脚本程序 *rv6.m* 输出表面电流的轴向和横向分量。图 3-7 显示了结构 *strip2.mat* 在 75 MHz(半波偶极子)时对应的脚本程序输出。横向电流分量的最大强度比纵向分量强度约小 200 倍。此结果(对不同频率和不同结构都进行过测试)对随后的分析至关重要,这表明, *RWG* 边元支持沿带轴向的定向电流,即使沿带横向有 1 个或 2 个 *RWG* 元。因此,我们可用细带模型代替细导线模型,此时不会显著增加 *CPU* 时间。带模型的优点是,使关于导线另外独立使用的矩量方程变得毫无必要。

另一个正面效果是,带网格和金属接地面网格之间的耦合模型变得相对简单,本章后面在研究有限接地面上的底部驱动单极子例子时会考虑这种边耦合模型。

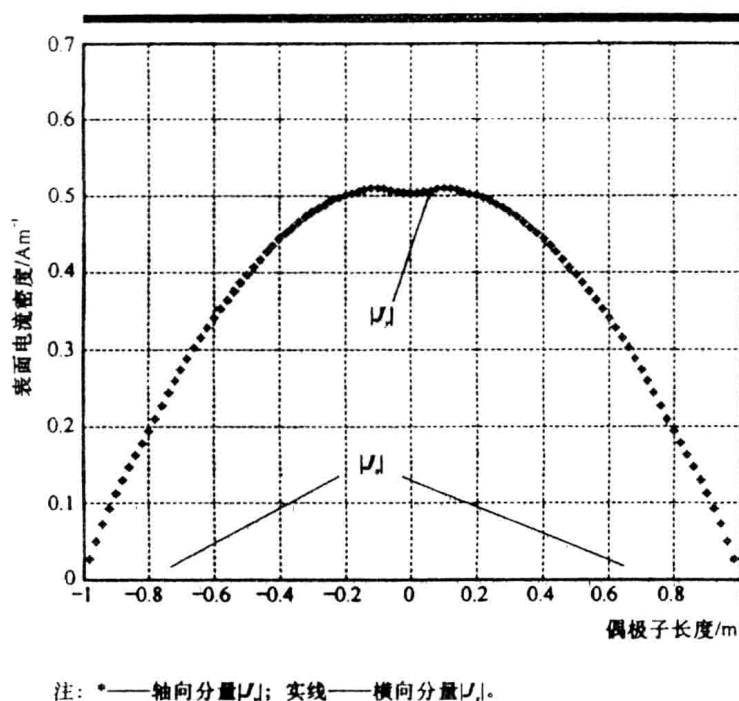


图 3-7 沿带的电流强度(75 MHz 时的 *strip2.mat*)

第六节 输入阻抗

输入阻抗是一个主要的天线参数。一旦知道了输入阻抗,其他的天线参数(如回路损耗)就容易求得。输入阻抗定义为天线在信号输入端子处的阻抗。或一对端子上的电压和流过电流的比,边馈模型决定了阻抗就是馈电电压($V = 1V$)与垂直馈边,1 的总电流之

比。把表面电流作为相应基函数的扩展系数,得到(第一章的(1-6)式):

$$J = \sum_{m=1}^M I_m f_m \quad (3-6)$$

只有基函数 $f_{m=n}$ 对阻抗计算有贡献,因为其他的基函数没有垂直于边 n 的法向分量。

而且。既然 RWG 基函数 f_n 垂直于边的分量总为 1,所以通过边的法向总电流为:

$$l_n I_n \quad (3-7)$$

这里, l_n 为边长。按照式(3-5),天线阻抗可简单表示为:

$$Z_A = \frac{V}{l_n I_n} = \frac{V_a}{l_n^2 I_n} \quad (3-8)$$

输入阻抗一般情况下为复数量,单位为 Ω 。实际上,根据馈边周围单位面积上的平均表面电流可得到更复杂的阻抗定义,但本章不再予以考虑。

脚本程序 `rwg4.m` 使用式(3-8)计算输入阻抗。相应的程序行就插入到矩量方程的电流扩展系数求解之后。表 3-1 给出了图 3-4 中所列的 4 种不同带网格在 75 MHz 时的输入阻抗,假设为中心馈电方式。这也就是相应半波偶极子的输入阻抗。为了比较,我们还提供了 NEC 导线模型获得的相似结果。计算时采用波印廷软件有限公司的 SuperNEC 和等效半径为 0.005 m 的 2 m 长线。该线分别分成 19 段和 39 段,使用选项“细线内核”。表 3-1 表明。输入阻抗符合得相当好,得到的报告数据还同 King 的测量数据非常接近。

表 3-1 带模型和导线模型求得的 2m 长半波偶极子在 75 MHz 时的输入阻抗

模型	输入阻抗/
Strip.m - 20 个三角	$88 + j \times 34$
Strip.m - 40 个三角	$88 + j \times 41$
Strip.m - 80 个三角	$87 + j \times 44$
Strip.m - 244 个三角	$88 + j \times 47$
分成 19 段的线(SuperNEC)	$90 + j \times 53$
分成 39 段的线(SuperNEC)	$92 + j \times 50$

注:带的宽度为 0.02m,等效线半径为 0.005m。WIPL-D 输出的仿真结果为 $85 + j \times 440$ (见文献 4 第一章)。

边馈必须为对称结构,以使“馈点左边的三角与右边的三角镜像对称”。我们测试了

对称和非对称三角,未发现有大的差异存在,这说明,对称馈电结构是受欢迎的,但或许并不是必须的,至少对细带或偶极子是如此。

值得注意的是,在 SuperNEC 中增加分段个数不能保证输入阻抗计算收敛。这与下面众所周知的事实是一致的:细导线模型对段长/半径比大致小于 10 的应用是无效的。对表 3-1 所列情况,此比值分别等于 21 和 10。说明是可以接受的。

第七节 单极子天线

有限或无限接地面上的半个偶极子形成单极子天线,单极子天线通常由穿过接地面的同轴电缆馈电。单极子的网格生成方式有多种,本章使用子目录 mesh 下的脚本程序 taonopole.m。此脚本程序使用板网格、鼠标输入和带网格生成有限接地面上的单极子。使用 Matlab 函数 ginput 获得鼠标位置。脚本程序还可以在任意位置输出单极子阵列、生成弯曲板上的单极子等。

作为第一个例子,我们在不改变代码的情况下运行脚本程序 monopole.m,产生的 Matlab 图形如图 3-8(a)所示。此图显示的是单极子天线的接地平面。我们接着执行下面的步骤:

1. 使用“十”字形 Matlab 鼠标和鼠标左键标记白色三角,像图 3-8(b)那样。这些三角将定义单极子的馈电边(两个三角的公共边)。

2. 按回车键。

按回车键后就会生成天线结构。在屏幕上的显示情况如图 3-9(a)所示。该结构是 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 接地面上的探针馈电的 1 m 高单极子天线。带宽度为 0.04 m ,整个带有 7 个矩形、14 个三角。

检查脚本程序 monopole.m 就会发现,它使用 Matlab 函数 delaunay 来生成接地面网格。步骤 1 中标记的两个三角的公共边为引入的探针馈电边,脚本程序 monopole.m 允许改变下面参数:

$L = 2.0;$ %板长度(沿 x 轴)

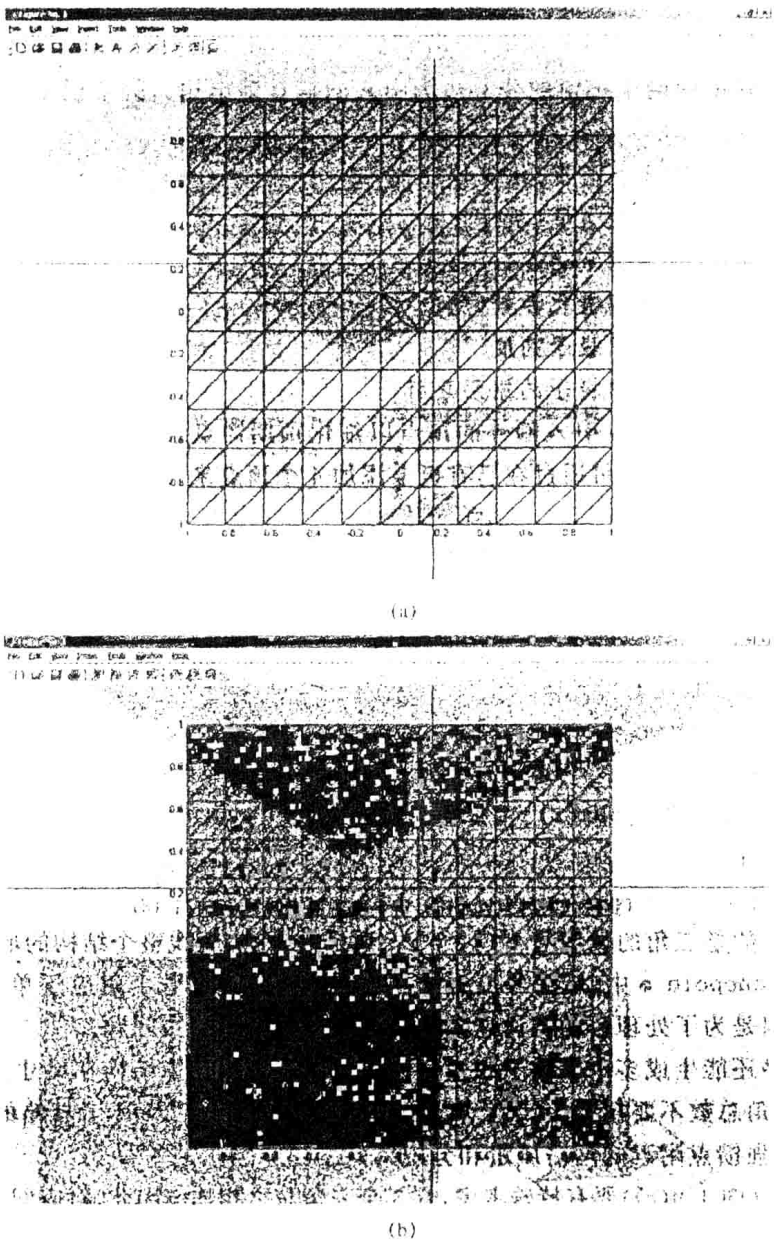


图 3-8 单极子天线生成的两个阶段(可以看见 Matlab“十”字形鼠标)

W = 2.0; %板宽度(沿 y 轴)
Nx = 11; %离散化参数(长度)
Ny = 11; %高散化参数(宽度)
h = 1.0; %单极子高度
Number = 7; %单极子的矩形数目

脚本程序 `aonopole.m` 引入额外的顶点以细化预期馈点附近的均匀网格 X 、 Y , 并控制单极子的粗细程度, 这可通过在已有板上添加 4 个顶点来完成, 添加的程序为:

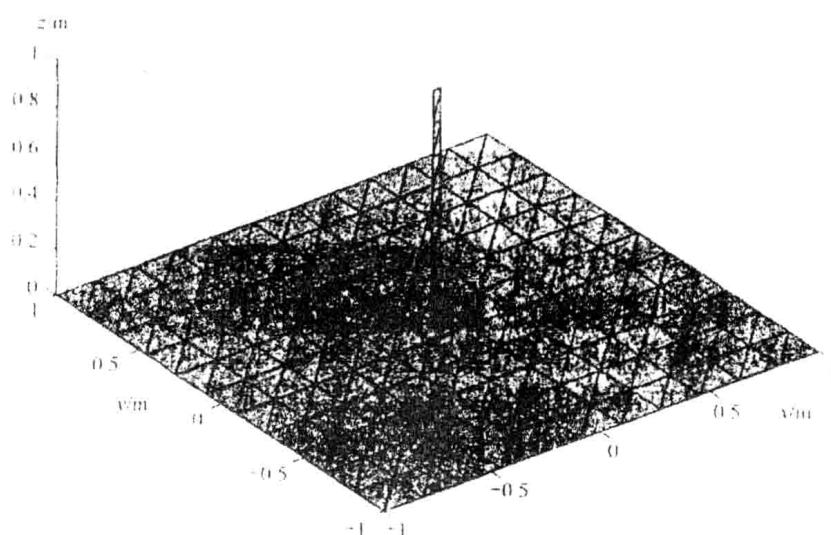
```
%确定探针馈电边
x = [-0.02 0.02];
y = [0 0];
x = [X x];
Y = [Y y];
C = mean(x);
xl = [C C];
yl = mean(y) + 2 * [max(x) - C min(x) - C];
X = [X xl];
Y = [Y yl];
```

另一点要注意的是三角的域编号 `t(4,:)`。到目前为止, 天线整个结构的域编号都是 1。在脚本程序 `JH0nopole.m` 中, 域编号 0 对应于板的三角, 域编号 1 对应于单极子的三角。这样做的原因是为了处理后面要讨论的单极子与板之间的连接问题。

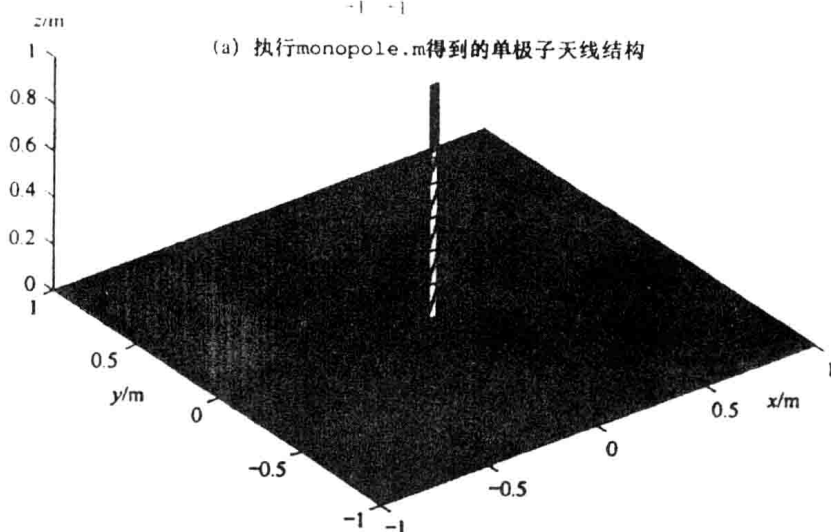
脚本程序还能生成多个单极子和多个馈点, 单极子天线的结构在尺寸上是不受限制的, 但建议三角总数不要超过 4 000。脚本程序可以引入来自 PDE 工具箱的非均匀板网格, 这样能增强馈点附近的网格质量和分辨率。

对接合边(图 3-9(c))要有特殊考虑。有 3 个三角与之相连, 因此, 对应同一个边会有两个 RWG 元。其中一个包含带上的第一个三角和板上在馈点左边的三角; 另一个包括带上的同一个三角和板上在馈点右边的三角(图 3-9(c))。本章的脚本程序 `rwgl.m` 自动识别这样的边, 为每个边生成两个不同的 RWG 元。单极子和板上三角的域编号必须相异。

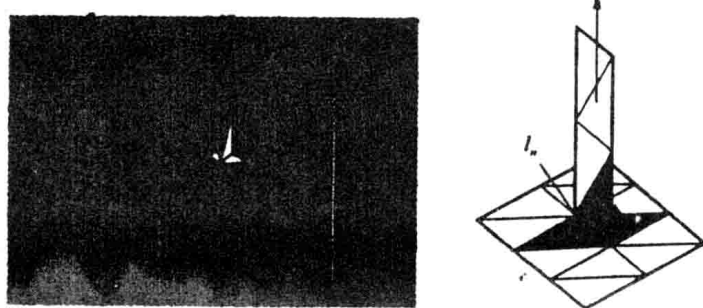
天线馈电边就是上面所述的接合边(对基驱动单极子)。使用与偶极子类似的 δ 函数发生器模型。要分开这两个 RWG 边元, 方便的做法是将接合边“加倍”, 即在网格程序中将其重复一次, 这在脚本程序 `rwgl.m` 中实现。要考虑全部两个边元的贡献, 公式(3-5)变为:



(a) 执行monopole.m得到的单极子天线结构



(b) 75 MHz时的表面电流分布 (白色对应较大的强度)



(c) 基驱动单极子模型

图 3-9 单极子天线模型

$$V_{n1} = l_{n1} V, V_{n2} = l_{n2} V, l_{n1} = l_{n2} \quad (3-9)$$

这里,下标 1 和 2 指接合处两个不同的 RWG 元。脚本程序 `rwg4.m` 中使用了公式(3-

9)。图 3-9(b)显示了频率为 75 MHz 时计算的表面电流分布(脚本程序 `rwg5.m`)。既然单极子高度选为 1.0 m,那么我们考虑一种最流行的组合——接地面上的 1/4 波长单极子。带表面上可观察到表面电流密度的量大值。

在脚本程序 `rwg4.m` 中,默认的馈电边是在 xy 平面上最靠近原点的那个。本例中有两个这样的边,这与只用一个边的偶极子相反。因此,脚本程序 `rwg4.m` 中引入两个不同的馈电模型,一个供偶极子用,另一个供单极子使用:

`Index = INDEX(1)` % 中心馈电——偶极子

`Index = INDEX(1:2)` % 探针馈电——单极子

这里,数组 `INDEX` 包含各边的编号,按离原点的距离从小到大编排。使用时必须注释掉其中一行程序(第一行或第二行)。

第八节 单极子天线的阻抗

将偶极子的输入阻抗公式(3-8)改写为:

$$Z_A = \frac{V}{l_{n1} I_{n1} + l_{n2} I_{n2}} \quad (3-10)$$

以计入流过馈电边的两个电流。天线阻抗计算仍在脚本程序 `rwg4.m` 中完成。流过馈电边的总电流为:

$$GapCurrent = sum(I(Index) * EdgeLength(Index));$$

这里, `Index` 为馈电边编号的数组。

从理论上讲,单极子安装在无限大的理想接地面上时,其阻抗和辐射特性可由自由空间中的 2 倍长偶极子导出。对基驱动单极子,输入阻抗等于中心驱动偶极子的一半,单极子在无限大接地面上方的辐射方向图也与相应偶极子的辐射方向图的上半部分相同。当接地面尺寸有限时,阻抗改变不大,但辐射方向图容易变。

既然接地面有限,就不能假设阻抗精确等于偶极子的一半。然而,相应的结果显得很相似。这从表 3-2 中可以看出。表 3-2 第一列指定了用于比较的两个不同模型。

表 3-2 75 MHz 时两个簾极子模型的输入阻抗

模型	输入阻抗/ Ω
当前计算模型	$28 + j \times 22$
$2m \times 2m$ 接地面上的单极子的分段绒模型 (<i>SuperNEC</i>)	$33 + j \times 32$

注:带的宽度为 $0.04m$,带的矩形数目为 7。等效线半径为 $0.01m$,线分段数为 7。*WIPL-D* 仿真给出的值为 $27 + j \times 22\Omega$ 。

在表 3-2 中,有限接地面上的单极子的 *SuperNEC* 模型用 $10 \times 10 = 100$ 个线段来建模 $2m \times 2m$ 的平面,因此,这可能太“透明”了以至于结果不够准确。

第九节 辐射强度、辐射功率和增益

第二章讨论了天线的远场参数,下面我们回顾一下这些参数的定义。脚本程序 *e-fieldl.m* 输出空间点的辐射电场/磁场。 $2m$ 长偶极子在其方位面上 $100m$ 处的辐射电场结果提供于表 3-3。

表 3-3 75 MHz 时,距偶极子 $100m$ 处(方位面上)的辐射电场

模型	电场/ $V \cdot m^{-1}$
<i>Strip2.mat</i> - 244 个三角	$0.0066 \exp(-j \times 2.30)$
39 段线模型 (<i>SuperNEC</i>)	$0.0062 \exp(-j \times 2.26)$

天线辐射场的辐射密度由波印廷矢量的时域平均给出

$$W(r) = \frac{1}{2} \text{Re}[E(r) \times H^*(r)] \tag{3-11}$$

单位为 W/m^2 。将第二章的公式(3-4)考虑进去,在远场可写为:

$$W(r) = \frac{1}{2\eta} |E(r)|^2 \frac{r}{r} \tag{3-12}$$

天线辐射的总功率在远场可写为: