

· 物理电子学 ·

## 时域有限差分电磁仿真的网格自动剖分

张秋菊, 王秉中

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**以AutoCAD为图形支撑平台,应用AutoCAD的Visual Basic for Applications,并结合AutoCAD的图形交换文件,开发了用于时域有限差分电磁仿真的三维网格自动剖分软件。在AutoCAD的绘图区绘制仿真结构,通过Visual Basic for Applications程序对此进行网格剖分,剖分后的所有图形信息以DXF文件格式保存,后续Fortran程序从中提取出每个网格点的位置坐标和电磁参数,将这些数据送给时域有限差分程序进行电磁仿真。以一个微带馈电金属贴片的例子验证了该软件的正确性和实用性。

**关键词** 网格自动剖分; 图形交换文件; 时域有限差分法; 电磁仿真  
中图分类号 TN929.5 文献标识码 A

### Auto Dissection of Entity with Grid for FDTD Electromagnetic Simulation

ZHANG Qiu-ju, WANG Bing-zhong

(School of Physical Electronics, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of china Chengdu 610054)

**Abstract** Supported by AutoCAD, Visual Basic for Applications and Drawing Exchange Files are used to develop a software of auto dissection with three-dimensional grid for the finite-difference time-domain electromagnetic simulation. Firstly, simulation structures are plotted in AutoCAD drawing district. Then these structures are dissected by a program of Visual Basic for Applications. And these messages are saved as DXF format. Locations and electromagnetic parameters of each grid are extracted by a Fortran program. Finally, these data are sent to a finite-difference time-domain program for electromagnetic simulation. Correctness and practicability of the software are validated through an example of microstrip feed metal patch.

**Key words** auto dissection; drawing exchange file; finite-difference time-domain method; electromagnetic simulation

时域有限差分(Finite-Difference Time-Domain, FDTD)法以差分原理为基础,在一定体积内和一段时间上对连续电磁场的的数据取样,直接从Maxwell方程出发,将其转换为差分方程组<sup>[1]</sup>。用FDTD方法研究目标的电磁散射特性时,必须描述目标的几何和物理参数,并按照FDTD要求进行网格化离散。能否给出适合于FDTD要求的网格单元,并彻底摆脱大量繁杂的手工操作是仿真系统走向实用化的技术关键。AutoCAD的优点是三维实体造型功能全,编辑、修改三维实体较方便,它能旋转任意视角显示模型,且图形维护功能较好,因而在建立复杂三维实体时很方便。在AutoCAD 14版中,Autodesk首次包括了Microsoft 的(Visual Basic for Applications, VBA),

它提供了一些用来创建图形用户界面(GUI)的可拖拉工具和用来与AutoCAD对象交互的编程语言<sup>[2]</sup>。使用VBA,许多重复执行的任务只需一次或两次的鼠标单击就可以完成,避免了繁琐的手工操作,从而节省了许多时间。本文结合这些特点,以AutoCAD的三维实体造型作为工具,成功地完成了微机上以AutoCAD为支撑环境的三维网格自动剖分软件。

### 1 总体设计

为了实现计算机绘图和科学计算的一体化,需要掌握AutoCAD与高级语言的接口技术。AutoCAD与高级语言最常用的接口形式是采用命令组文件(SCR文件)和图形交换文件(DXF文件)。DXF文件具

收稿日期:2005-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60371008);教育部科学技术研究重点项目(104166)

作者简介:张秋菊(1978-),女,硕士,主要从事无线电物理方面的研究;王秉中(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事无线电物理、电磁场与微波技术方面的研究。

有专门格式的ASCII码文本文件。它具有可读性好、处理速度快、通用性强等优点,易于被其他程序处理,是实现高级语言与AutoCAD接口的最常用的方法之一<sup>[3]</sup>。鉴于此,本文用Fortran语言对DXF文件进行提取,从而得到了AutoCAD中所有的图形信息。软件的总体流程如图1所示。

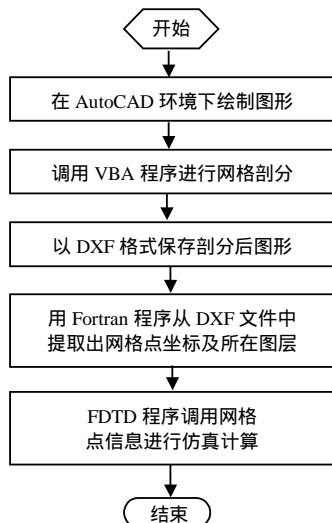


图1 软件总体流程图

## 2 网格剖分

所谓的剖分,就是在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向,按照一定的规律,确定空间中一点的性质。通常计算机识别图形是靠坐标和颜色来识别的<sup>[4]</sup>。在AutoCAD中,将不同材质的物体绘制在不同的图层上,可以很方便地识别物体的性质,并且剖分后物体的图层并不发生变化。

数值计算要求将计算域划分成微小的单元,在有限差分法中常采用六面体单元。有限差分网格剖分是利用一系列相互直交的面剖切实体而得到的<sup>[4]</sup>。本文研究的网格自动剖分器的主要功能是通过读取剖分区域及网格步长,自动对不同材质进行识别,并生成用于三维差分计算的六面体网格单元。根据实体的结构特点,在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴方向上分别确定剖分步长 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$ ,计算机自动计算出 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的网格数目 $N_x$ 、 $N_y$ 、 $N_z$ 以及切割平面,剖分后单元的物理属性(如金属、介质、空气等)保持不变,从而实现网格的自动剖分。AutoCAD提供了切割三维实体的命令:Slice。Slice命令可以将一个三维实体图形切成两半,该命令在VBA中也有相同的方法-SliceSolid方法。该方法允许让一个三点定义的平面将三维实体对象切割成两部分。

网格剖分器实现网格自动剖分的具体方法为:

(1) 通过读取剖分区域及网格步长,计算出用于确定

每个剖分面的三个点的坐标;(2)应用SliceSolid方法沿着每个剖分面对所有实体进行切割。从几何角度看,剖分可以是任意的。图2所示是使用宏代码来进行网格剖分过程的流程图。

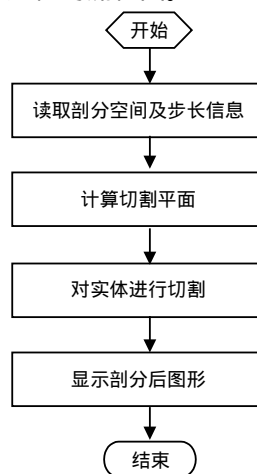


图2 网格剖分流程图

## 3 数据提取

网格剖分完成后,将图形炸开,使之以点、线、弧、圆等的形式存放,最后通过AutoCAD的DXFout命令将所有图形的信息记录在DXF文件中。DXF文件包含了AutoCAD图形文件的所有内容。一个完整的DXF文件由四个大段和一个文件结束标记组成,表1所示是DXF接口文件的组成,它是文本形式记录了整个图形信息,因而便于用户的观察和利用其他高级语言对图形进行分析<sup>[5]</sup>。

表1 DXF文件的组成

段名	内 容
首段	AutoCAD版本号、绘图极限、尺寸线作图参数等
表段	表段分为若干子段、线型子段、字型子段等
块段	所有画图中所有块的定义及相应信息
实体段	描述实际图形的各个因素(基本图形)

图形中有用的信息都记录在实体段内,如点(Point)、线(Line)、圆(Circle)等,这样在对图形有用信息进行提取时,都在这一段内进行。图形的点、线、折线、弧、圆等的信息均记录在实体段(Entity)内。表2所示为DXF的实体段结构。

表2 实体段结构表

实体名	实体段信息
线	线的层名、颜色、起点、终点
点	点的层名、点的颜色
弧	弧的层名、颜色、起点、终点、半径
圆	圆的层名、颜色、中心坐标、半径

DXF文件的每一段的开始部分由四行组成：即DXF的组代码0，段标记SECTION，组代码2和段名各占一行，中间部分是段的实际内容。在对实体段(Entity)内的直线信息进行读取时，需要用到直线组码信息。直线组码信息如表3所示。

表3 直线组码

组 码	说 明
100	子类标记(AcDbLine)
39	厚度(可选, 缺省值=0)
10	起点(在WCS中)。DXF: X值; APP: 三维点
20,30	DXF: 起点的Y和Z值(在WCS中)
11	终点(在WCS中)。DXF: X值; APP: 三维点
21,31	DXF: 终点的Y和Z值(在WCS中)
210	拉伸方向, DXF: X值; APP: 三维矢量

使用Slice命令对三维实体用一系列相互直交的面剖切实体后，原来的三维实体被切割成多个微小的单元，然后使用Explore命令对所有图形进行炸开，将每个六面体单元炸开成十二条线段，线段的图层、颜色、起点和终点等信息记录在DXF文件的实体段内，因而，可以用Fortran语言，在实体段内提取这些信息。图3所示是用Fortran语言提取实体段内点、线等的计算框图。

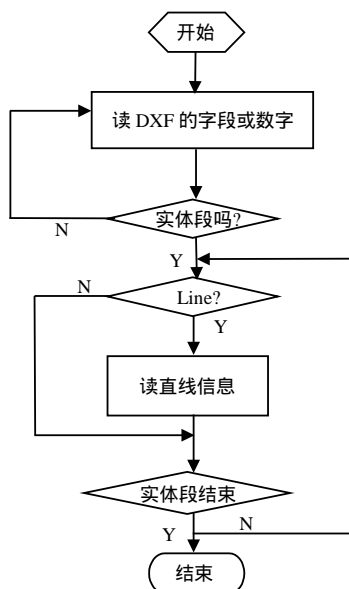


图3 实体提取流程

从DXF文件中提取所有线段端点的坐标及所在图层，这些点包括了所有的有限差分网格点的坐标及所在图层，将此保存到另一个中间文件中。流程图如图4所示。最后，将有限差分网格点的信息提供给FDTD计算程序，即可进行FDTD仿真计算。

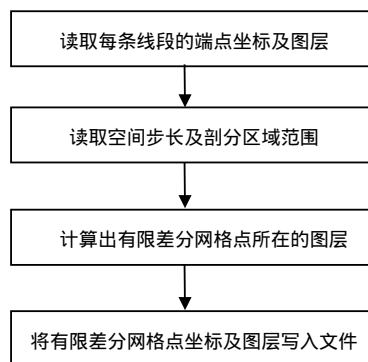


图4 网格点信息提取流程图

## 4 测试例子

通过应用以上方法，对文献[6]给出的微带线结构实现了FDTD建模和仿真测试。以一个微带馈电金属贴片问题为例，仿真结构如图5所示。其中，衬底厚度 $d=0.7925\text{ mm}$ ，衬底介电常数 $\epsilon_r=2.2$ ，导带宽度 $2.46\text{ mm}$ ，金属贴片尺寸如图6a所示。微带上方的仿真空间区域的高度 $h=0.7925\text{ mm}$ ，整个FDTD仿真空间宽度 $a=14.782\text{ mm}$ 、长度 $b=36$ 。取网格大小为 $\Delta x=0.1585\text{ mm}$ ， $\Delta y=0.389\text{ mm}$ ， $\Delta z=0.40\text{ mm}$ 。仿真空间边界均为完全匹配层吸收边界。激励源的种类为高斯脉冲，幅度为 $1\text{ V/m}$ ，脉冲宽度 $T=20\times 10^9\text{ s}$ 。本文软件仿真结果如图6b所示，与文献[6]的结果吻合得很好。

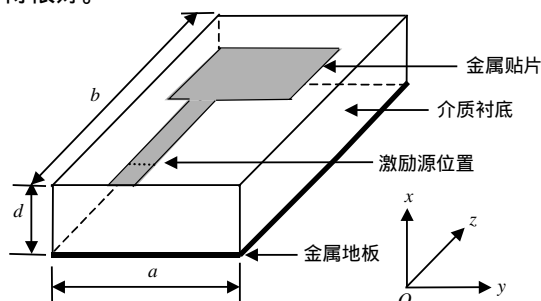
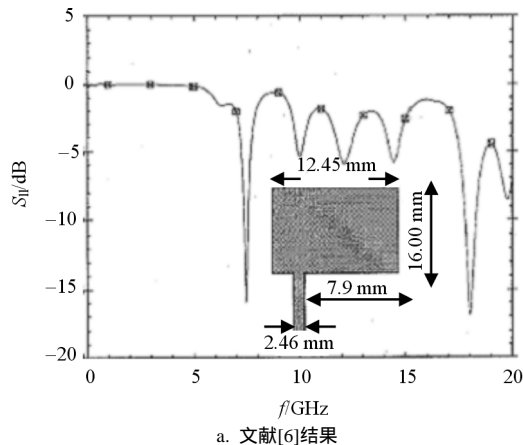
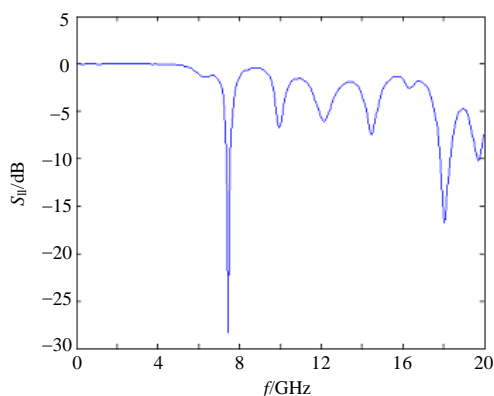


图5 微带馈电金属贴片结构图



a. 文献[6]结果



b. 本软件仿真结果

图6 微带馈电金属贴片端口特性

## 5 结束语

本文介绍了开发的三维实体有限差分网格自动剖分系统,给出了网格剖分的主要思想及计算机流程,实现了多材质自动识别、复杂实体的三维差分网格自动剖分,并用实例验证了其正确性和实用性。本研究结果表明:(1)利用AutoCAD作为FDTD三维数值模拟前处理是目前微机上一一种很有效的方法;(2)利用AutoCAD的二次开发工具VBA,方便、准

确地实现了三维网格自动剖分及显示;(3)利用DXF接口文件分析AutoCAD实体,对图形中有用的信息进行提取,可供其他程序调用;(4)三维网格自动剖分软件,可以实现多材质的复杂铸件或其他实体的三维网格自动剖分;(5)在与FDTD计算程序结合后,可以计算微带线传输特性、复杂目标的电磁散射特性等。

### 参 考 文 献

- [1] 王秉中. 计算电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 12.
- [2] COTTINGHAM M. AutoCAD VBA从入门到精通[M]. 孔祥丰, 译. 北京: 电子工业出版社, 2001: 1.
- [3] 吉晓民. AutoCAD12.0绘图软件包的使用与二次开发技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997: 253-266.
- [4] 吴士平. 凝固数值模拟中铸件三维实体造型及三维网格自动剖分的研究[J]. 铸件技术, 1995, (6): 10-12.
- [5] 吴士平, 林汉同. Auto CAD下的铸件三维网格自动剖分[J]. 铸造设备研究, 1996, (5): 25-26.
- [6] GEDNEY S D. An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices[J]. IEEE Transactions Antennas and Propagation, 1996, 44(12): 1630-1639.

编辑 孙晓丹

(上接第46页)

时域门技术提高了测试系统的准确度。采用所建立的测试系统对多种电介质材料进行了实测,其结果与国内外相关文献提供的介电常数参考值进行比较,吻合较好。因此,本文的测量方法和建立的测试系统测量电介质材料的复介电常数具有较好的准确性,且具有实用价值。

### 参 考 文 献

- [1] 曹江. 介质材料电磁参数测量总述[J]. 宇航计测技术, 1994, 13(3): 30-34.
- [2] 杨勇, 羊恺, 罗正祥. 基于反射和传输方式的误差网络校准方法[J]. 实验科学与技术, 2006, 4(5): 11-13.
- [3] GHODGAONKAR D K, VARADAN V V, VARADAN V K. A free space method for measurement of dielectric constants

and loss tangents at microwave frequencies[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 1989, 37(3): 789-793.

- [4] VARADAN V V, HOLLINGER R D, GHODGAONKAR D K, et al. Free-space, broadband measurements of high-temperature, complex dielectric properties at microwave frequencies[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 1991, 40(5): 842-846.
- [5] GHODGAONKAR D K, VARADAN V V, VARADAN V K. Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies[J]. IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 1990, 39(2): 387-394.
- [6] 陈国强, 李琦, 刘金亮. HP8510C非同轴系统TRL校准技术[J]. 微波学报, 1998, 14(3): 238-243.
- [7] 廖承恩. 微波技术基础[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.

编辑 漆蓉