

基于圆柱坐标非均匀 FDTD 网格的图形可视化

周国祥, 侯整风, 郭 骏, 石 雷, 杨明武

(合肥工业大学计算机与信息学院, 合肥 230009)

摘 要: 基于非均匀 FDTD 网格的电磁场模拟是解决电磁场问题的一种有效方法。介绍一个柱坐标系下非均匀 FDTD 网格生成系统, 实现了网格图形的可视化。该系统能够快速、有效地生成一维、二维、三维 FDTD 网格图形和物体几何图形。这些图形不仅直观准确, 还具有动态和可调等特性, 从而为 FDTD 用户提供了丰富的可视化服务。

关 键 词: 计算机应用; 图形可视化; 非均匀 FDTD 网格; 网格图形; 圆柱坐标
中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号:** 1003-0158(2004)04-0067-05

FDTD (时域有限差分) 方法是一种为麦克斯韦方程提供数值求解的有效方法。它的优点在于能够有效地模拟电磁场的特征, 使求解的问题简化、减少了计算的数据量、降低了计算误差、大大提高了计算效率、加快了收敛速度^[1]。将 FDTD 方法应用于求解具体问题的关键是怎样将要解决的问题描述成 FDTD 能够处理的数据或数据文件, 即网格生成技术, 对计算域进行离散化, 为 FDTD 提供网格坐标。由于不同的物体其几何结构差异很大, 需要在各个坐标方向上划分出许多个子区间计算域, 而在每个子区间里又要划分出数目和间距恰当的非均匀网格, 在实际应用中就涉及到非常复杂而又繁重的计算, 不仅耗费大量的人力, 而且难以避免出现大的误差。因此模拟电磁场 FDTD 网格的可视化和生成网格坐标的自动化是 FDTD 用户有待解决的问题^[2], 笔者正是出于这一目标研究和开发出“圆柱坐标下非均匀 FDTD 网格生成系统”。该系统操作方便、交互性好、可视化程度高, 为 FDTD 用户提供多种需求, 是人们在实际应用中分析、研究电磁场问题的一种实用工具。对于任意一个电磁场

问题, 甚至其物理结构非常复杂, 只需用户输出相关原始数据文件, 系统就能按照人们的选项, 自动生成一维、二维、三维网格图形及几何结构图形, 直观而又准确地描述出物体内部结构和相互连接; 而用户又可和系统直接交互, 给出具体应用需求, 系统则会快速生成物体的网格坐标文件和介质文件。

首先给出生成非均匀 FDTD 网格的基本原理和相关算法, 然后以一实际结构为例介绍“圆柱坐标下非均匀 FDTD 网格生成系统”的网格图形及其特性。

1 网格生成原理

网络的描述应符合电磁场的变化, 如果在每个计算域中都采用稠密的网格来描述, 势必占用计算机的过多资源和较长的运行时间; 如果在每个计算域中采用稀疏的网格来描述, 则将会给 FDTD 的计算带来较大的误差, 为了解决这一矛盾, 通常采用非均匀 FDTD 法, 生成网格的基本原则是: 在电磁场强度变化大、结构比较复杂的

收稿日期: 2004-06-17

基金项目: 教育部科学技术研究重点资助项目 (03100); 安徽省自然科学基金资助项目 (01042102)

作者简介: 周国祥 (1956-), 男, 安徽合肥人, 副教授, 主要研究领域为计算可视化。

地方,采用高密度的网格;而在电磁场强度变化小,结构简单的地方使用相对密度较稀的网格^{[3],[4]}。显然,一般在两种不同介质交界处,电磁场强度变化大,则需要生成稠密的网格。而在同一种介质的中心处,电磁场变化较平缓,可用较稀疏的网格。另外,需要注意在 ρ, φ, z 方向上的任何一个计算域中,或相邻的子计算域中,任何两个相邻的网格尺寸是渐渐地、平滑地变大或变小,否则在 FDTD 的计算中引起的误差将加大。

2 网格生成算法

为 FDTD 法生成网格坐标文件和实现网格的可视化,则需要建立相应的数学模型对每个子

区间进行离散化。这里仅对一种“从密集到稀疏再到密集”的网格模型进行讨论。

假设在 ρ 方向上有子区间 (I, J, K) , 其长度为 $L_\rho(I, J, K)$, $\Delta \min$ 和 $R_\rho (\in [1, 1.3])$ 分别是 ρ 方向上初始的最小网格尺寸和任意两个相邻网格之间的长度比率。计算的网格尺寸最初将从长度为 $\Delta \min$ 的第一网格开始,网格将继续以恒定的增长比率 R_ρ 增加,在经过中间点以后,开始以 R_ρ 的比率减少,最后一个网格尺寸仍然为 $\Delta \min$ 。下面分两种情况来讨论网格生成的算法:

(1) 若子区间中间点网格的尺寸比 ρ 方向的通用最大值 $\Delta \max$ 小,子区间长度可推算得出

$$L_\rho(I, J, K) = 2\Delta \min + 2\Delta \min R_\rho + \cdots + 2\Delta \min R_\rho^{n-1} = \frac{2\Delta \min [R_\rho^{N_\rho(I, J, K)} - 1]}{R_\rho - 1} \quad (1)$$

设 $2N'_\rho(I, J, K)$ 是 ρ 方向子区间生成的网格数,则由此得出

$$N'_\rho(I, J, K) = \left\{ \frac{\ln \left[L_\rho(I, J, K) \frac{R_\rho - 1}{2\Delta \min} + 1 \right]}{\ln R_\rho} \right\} \quad (2)$$

INT 是整数函数,在计算出整数 $N_\rho(I, J, K)$ 以后,系统在误差允许范围内,反复地寻找同时满足方程 和方程 的 R_ρ 的新

值。由于 $\Delta \min$ 和 R_ρ 在分界面环境中被设置为可调节的,网格将自动地被生成,并且能够按照给定的精确度完成。

(2) 若在网格生成过程中,在当前网格到达分区的中间点之前,计算的网格大小就已经超过了 $\Delta \max$ 的值,则从当前网格到中间点网格之间的所有剩余网格尺寸都被设置为 $\Delta \max$ 。

$N_{\rho \text{fst}}(I, J, K)$ 表示从开始网格到第 1 个大小为 $\Delta \max$ 网格之间的网格数, $N_{\rho \text{rem}}(I, J, K)$ 表示子区间内剩余网格的网格数,分区网格总数为

$$N_\rho(I, J, K) = 2N_{\rho \text{fst}}(I, J, K) + N_{\rho \text{rem}}(I, J, K) \quad (3)$$

以及

$$N_{\rho \text{rem}}(I, J, K) = INT \left\{ \frac{L_\rho(I, J, K) - \frac{2\Delta \min [R_\rho^{N_\rho(I, J, K)} - 1]}{R_\rho - 1}}{\Delta \max} \right\} \quad (4)$$

显然,它们必须满足关系式

$$L_\rho(I, J, K) - N_{\rho \text{rem}}(I, J, K)\Delta \max = \frac{2\Delta \min [R_\rho^{N_\rho(I, J, K)} - 1]}{R_\rho - 1} \quad (5)$$

通过反复地寻找 R_ρ 的新值,直到满足方程 和方程 ,能够在这个子区间获得符合要求的网格模型^{[5],[6]},即“从密集到稀疏再到密集”。

同理,在 ρ, φ, z 方向上的所有子区间内

的网格均可应用上述算法实现。由于“均匀”、“从密集到稀疏”和“从稀疏到密集”的网格模型算法只是上述算法中特殊的 3 种简单情形,都可由此变换得出。

3 网格图形的可视化

基于上述网格生成算法和计算机图形学原理^{[7],[8]}, 笔者研制出柱坐标下非均匀 FDTD 网格生成系统“CylinMesh”。该系统主要由 7 个部分组成: CylinMesh menu、Input File Format、Z-Grid、Z-Plane、3D Grid、Grid Layer、3D Geometry, 每个部分均为用户提供了可视化服务和相应的功能。下面结合一个实例对系统生成的部分网格图形给予简述和演示。如图 1 所示, 这是一个“双层微带低通圆柱滤波器”的几何结构图。当向系统输入该滤波器的相关数据(包括各种介质参数和介质尺寸)后, “CylinMesh”就在 ρ 、 φ 、 z 3 个方向上自动生成 3 组缺省网格坐标, 并确定了 ρ 、 φ 和 z 方向上的子区间数目和每个子区间的范围, 从而为一维、二维、三维网格图形的可视化打下基础。

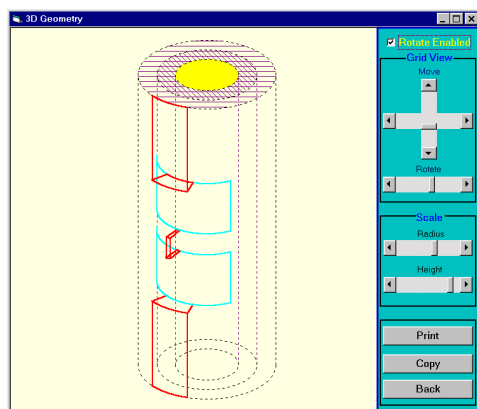


图1 双层微带低通圆柱滤波器几何结构

3.1 Z 方向上网格图示

用户通过点击 z 方向网格菜单或对应的图标后, 系统就会自动弹出 z 方向网格界面“Z-Grid”, 如图 2 所示。该界面精确的绘制出 z 方向各个子区间的网格, 并为用户提供选择“网格模式”和调整“网格大小”服务功能。

用户若想观察某个特定的分区网格, 则只要点击对应的“分区按钮”, 系统将自动以红色网格线显现出。并在相应的文本框里给出: 该分区网格数, 最小、最大网格尺寸及网格比例。用户也可以实现对区间网格进行放大、缩小、移动、打印。

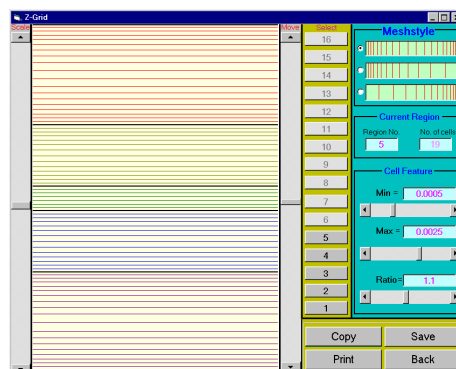


图2 z 方向网格界面

3.2 平面上的网格视图

系统“CylinMesh”为用户提供了一个“Z-Plane”界面, 可展示出圆柱体中任意一个高度的 ρ - φ 平面上的网格。它既可显示出 ρ 方向的网格, 又可显示出 φ 方向的网格, 用户通过使用“ ρ ”或“ φ ”选择按钮进行切换。对需要详细观察和调整的局部区间(ρ 方向上的或 φ 方向上的)网格, 用户只要按下对应“区间按钮”, 然后使用上面的滚动条就可以对该区间网格进行放大、移动和调整网格数目。同时界面会以特有的颜色显示该区间网格, 在文本框内给出当前区间的网格数目及相关的特性。用户还可通过对“选择框”的点击选择 ρ 方向或 φ 方向网格的格式, 即“网格从密到稀”或“网格从稀到密”或“网格从密到稀再到密”。

如图 3 所示, 这是一张“双层微带低通圆柱滤波器”底层的 ρ - φ 平面上的网格图。通过界面上的文本框可知: 在 φ 方向有 4 个子区间, 第 4 个区间内有 33 个网格; 在 ρ 方向有 2 个子区间, 第 2 个区间有 13 个网格, 当前选择的网格是 φ 方向上的, 网格格式是“密到稀再到密”。

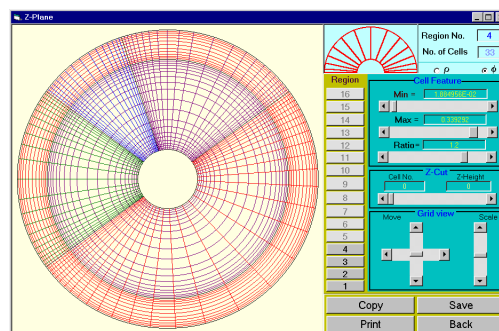


图3 双层微带低通圆柱滤波器底层平面网格

3.3 柱体网格视图

了解物体空间离散化模型和几何结构,在实际应用中是很有必要的。界面“Grid Layer”的设计正是为了满足 FDTD 用户这方面的需求,即实现三维网格图形的可视化。虽然三维网格(圆柱体网格)图形的生成非常复杂,但仍然是以 z 方向、 ρ 方向和 φ 方向的网格坐标为基础,综合应用了计算机图形学原理和消隐技术。

界面“Grid Layer”为用户提供了丰富的可视化服务,除了圆柱体网格图形可以左右、上下移动、放大和缩小,还可以动态的转动,以满足用户从任意角度去观察、分析物体空间网格的分布和几何结构。为了能够看到、了解物体内部任何一个柱面层和任何一个 ρ - φ 层上的网格和介质情况,在该界面上特设置了 2 个滚动条“Radius”和“Height”来控制,实现了将外层网格屏蔽。

如图 4 所示,这是上述“双层微带低通圆柱滤波器”在“Grid Layer”界面上展示出的三维(柱体)网格图形,体内的介质是用不同颜色的粗线条表示的,人们很容易辨别出体内不同的介质及其几何结构,从整体到局部可清楚地观察到网格的分布情况。

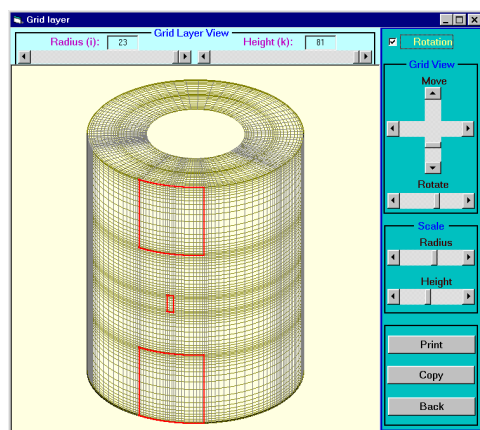


图 4 双层微带低通圆柱滤波器三维网格

4 结束语

笔者研究和开发的“柱坐标下非均匀 FDTD

网格生成系统”已经过了多次运行和各种参数的反复测试,实践验证这套系统网格图形可视化效果好,生成的网格坐标可靠、有效;并且,系统具有界面友好、操作简单、容易掌握等特点。是使用 FDTD 进行电磁场模拟的一种非常有用的工具。

参考文献

- [1] Yee K S. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1966, 14(3): 302~307.
- [2] Taflov A. Computational electrodynamics: The finite difference time domain method [M]. Artech house, Inc. 1995. 296~301.
- [3] Chen Y, Mittra R, Harms P. FDTD algorithm for solving Maxwell's equations in rotationally symmetrical geometries [J]. IEEE Trans. Microwave Theory and Tech, 1999, 44(6): 832~839.
- [4] Shen G, Zhou G X. Analysis and design of cylindrical Multilayered MICs using a unified Non-uniform FDTD algorithm [J]. Microwave Opt, Technol. Lett, 2002, 33(4): 254~262.
- [5] Zhou Guoxiang, Chen Yinchao. Efficient non-uniform orthogonal mesh generation algorithm for cylindrical finite difference time domain applications [J]. Chinese Journal of Electronics, 2001, 10(3): 292~295.
- [6] 周国祥, 杨明武. 在直角坐标系下一种快速有效产生 FDTD 网格的算法 [J]. 微波学报, 2002, 48(2): 181~185.
- [7] Yang M, Chen Y. AutoMesh: an automatically adjustable, non-uniform, orthogonal FDTD mesh generator [J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 1999, 41(2): 13~19.
- [8] Donald Hearn 著. 计算机图形学(第 1 版)[M]. 蔡士杰等译. 北京: 电子工业出版社, 1998. 13~15, 68~70, 112~115.

Based on Cylindrical Coordinate Non-Uniform FDTD Patterns Visualization

ZHOU Guo-xiang, HOU Zheng-feng, GUO Jun, SHI Lei, YANG Ming-wu

(School of Computer and Information, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The electromagnetic simulation based on Non-uniform FDTD mesh is a generalized and efficient method to solve many electromagnetic problems. In this paper a Non-uniform FDTD Mesh Generation System in Cylindrical Coordinate is introduced, which can visually generate FDTD grids. The system can quickly and efficiently generate 1D, 2D, 3D FDTD meshes and demonstrate object geometry patterns. These meshes are not only visualized and accurate, but also can be adjusted and modified dynamically. And it provides various visual functions for FDTD users.

Key words: computer application; pattern visualization; non-uniform FDTD; grid pattern; cylindrical coordinate