



·建模与数值模拟·

用于高功率微波器件粒子模拟的三维柱 坐标系共形网格生成技术*

张 磊, 翁 明, 王 玥, 蒋 铭

(西安交通大学 电子科学与工程学院 电子物理与器件教育部重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 基于面向对象的 C++ 语言研制三维柱坐标共形网格生成程序, 对束-场相互作用器件作共形网格剖分, 为粒子模拟算法提供积分线元、面元。通过定义三维柱坐标网格体系如网格步长、网格索引、守护网格层、包围盒等数据, 使模型的空间信息能转换成柱坐标网格信息。将轴上网格单元作特殊处理, 使粒子模拟算法形式在轴上网格和在非轴上网格上保持一致。利用射线跟踪法得到属于模型子面、模型棱边的离散边界点, 接着通过拓扑关系获得模型的顶点, 保存上述三类离散边界点的拓扑信息和网格信息。将构建的基础网格元与边界点信息耦合, 在离散网格体系中重构模型。用该共形网格剖分技术对相对论磁控管进行剖分, 能够识别该磁控管的透明阴极、阳极和谐振腔等结构。

关键词: 粒子模拟; 三维柱坐标; 网格剖分; 射线跟踪; 共形技术

中图分类号: O411.3; TN815

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230299

Three-dimensional cylindrical coordinate conformal grid generating technology for particle-in-cell simulation of high-power microwave device

Zhang Lei, Weng Ming, Wang Yue, Jiang Ming

(Key Laboratory for Physical Electronics and Devices of the Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the object-oriented C++ language, a 3D cylindrical coordinate conformal grid generation program is developed. The conformal grid generation of beam-field interaction(BFI) device discretizing is performed, providing integral line and face elements for Particle-in-Cell simulation algorithm. By defining the basic elements of the three-dimensional cylindrical coordinate grid system, including grid step-size, grid index, guardian grid layer and bounding box, the spatial information of the model can be converted into the information of the cylindrical coordinate grid information necessary for numerical calculation. The grid cells on-axis should be specially treated so as to maintain the consistency of the particle-in-cell algorithm between the axial grid and the non-axial grid. The discrete boundary points on the model subsurface and on the model edge were attained by ray-tracing algorithm. Meanwhile, the vertices of the model were obtained by topological relations. Topological information and cylindrical coordinate grid information of the two types of boundary points and model vertices were recorded, then the basic grid elements were coupled with the boundary point information, finally the model was reconstructed in the discrete grid system. Taking the relativistic magnetron for example, using the conformal grid generation technique proposed in the paper to discretize the model, the transparent cathode, anode, and resonant cavity structures of the magnetron can be identified.

Key words: particle-in-cell simulation, three-dimensional cylindrical coordinate system, grid generation, ray-tracing, conformal technique

束-场相互作用器件内部发生的物理过程具有非线性、强耦合的特征, 实验观测和理论分析困难。基于第一性原理的粒子模拟算法(Particle-in-Cell, PIC)直接求解麦克斯韦方程组和牛顿-洛伦兹方程组, 可得到器件内部物理量的数值近似解^[1-2]。作为 PIC 算法的前处理模块, 几何模型的构建和网格剖分为后续场推进算法和粒子推进算法提

* 收稿日期: 2023-09-06; 修订日期: 2023-11-17

基金项目: 国家青年科学基金项目(12005165); 国家自然科学基金项目(12175176)

联系方式: 张 磊, 3121353004@stu.xjtu.edu.cn。

通信作者: 翁 明, wengming@xjtu.edu.cn。

供空间离散网格单元,且网格剖分的质量直接影响 PIC 算法的数值稳定性和准确性。粒子模拟算法中传统的网格剖分方法得到的 Yee 网格^[3]在弯曲边界处采取阶梯近似,导致边界处的电磁场的数值解只能保一阶精度,并且阶梯边界使粒子初始发射状态与实际有较大的误差。共形技术^[4-7]可以克服上述缺陷,但是需要对应的共形网格剖分技术为其提供离散网格单元。Jurgens 和 Taflove 于 1992 年提出了 CPFDTD(Contour Path FDTD)^[8],将弯曲边界处的局部填充面元进行组合,该方法可以避免小面元出现,但是合并情况繁多进而导致实现复杂;Mittra 提出了一种适用于 Dey-Mittra 共形时域有限差分(CFDTD)法的共形网格生成方法^[9],实现了理想导体(PEC)模型的建模,给出了不同介质实体的处理,却无法准确识别 PEC 导体和介质实体同时存在的情况。随着共形网格剖分技术的发展,国内研究人员提出基于射线交叉算法且针对 PEC 实体的共形网格建模的技术^[10];胡晓娟于 2010 年基于投影求交算法实现了涂覆层的共形网格建模^[11-12];而陈伶俐等提出了将切片-线扫描法引入到电磁几何建模中,实现了同时识别 PEC 实体和介质实体^[13],西安交通大学王玥基于计算机辅助设计函数库 OpenCasCade 实现了复杂器件建模,并且基于该库中的射线跟踪算法实现模型的共形网格剖分^[14-15],研制出全三维电磁模拟软件。大部分产生 TM 模式的束-场相互作用器件的主体通常具有旋转对称结构,采用柱坐标系进行网格剖分相较于直角坐标系下的剖分具有网格数少的优势。目前国内几乎没有三维柱坐标系共形网格生成的研究。

本文提出了一种三维柱坐标系下的共形网格剖分技术,在全电磁三维粒子模拟软件中,可以描述器件内部的支撑杆和弯曲边界,为数值积分提供计算所需的电磁场边界和粒子边界。该技术通过射线跟踪法获取模型的离散边界点,将离散边界点的拓扑信息与网格体系耦合,对模型边界处的网格进行局部填充,基于边界表示法实现模型在三维柱坐标离散网格体系中的重构。该技术还提供了轴上网格的特殊处理方法,解决了粒子模拟算法在轴上网格和非轴上网格的形式不统一的问题。值得一提的是,该技术能够准确识别模型内部的薄层结构。

1 三维柱坐标网格体系的建立

本文的网格生成算法流程为:(1)读入模型 xml 文件;(2)基于边界表示法解析模型的拓扑信息;(3)定义三维柱坐标网格体系;(4)求得模型离散边界点;(5)完成模型重构。整体算法流程如图 1 所示。该算法在解析完模型的结构后,基于模型的空间信息建立三维柱坐标离散网格体系,包括模型的计算区域,原点、网格步长、守护网格层包围盒等信息。紧接着给出对轴上网格作特殊处理的方法。

1.1 三维柱坐标网格参数定义

建立三维柱坐标网格体系描述实体模型和网格元素的空间位置信息,将实体模型的空间坐标信息与网格信息提供

相互转换的桥梁。定义网格体系的原点作为空间坐标系基准点,可以指定任意位置作为网格生成的原点;根据物理问题的最高工作频率确定电磁波波长,接着定义一个波长的网格个数,从而定义径向和轴向的网格步长;角向网格步长由用户根据模型结构在角向的分布设定,使网格线尽量穿过模型的复杂结构处。网格步长是粒子模拟算法在空间尺度上作一次推进的参数。根据 Courant 稳定性条件,网格步长的设定决定了算法中时间步长的设定,即时间间隔必须小于或等于电磁波以光速通过 Yee 元胞对角线长度的三分之一。

由网格步长求得第 k 个网格点在各个方向上离原点的距离,通过该距离快速定位粒子所处空间位置和网格位置。图 2 展示了不同方向上网格点离原点距离,由于角向网格具有周期性,所以在 2π 处取极限近似处理,防止在射线跟踪算法中得到角向为 0 和 2π 不同的值,但是几何和物理意义上是相同的点,从而保证角向网格上边界点的唯一性。空间坐标通过该距离和网格步长可转化为网格元素在网格体系中的矢量索引,即每个方向的索引组成的矢量。将矢量索引作降维处理转换为标量索引。实现了模型在空间上的位置信息到网格信息的转换。标量索引可连续存储在计算机中,查询速度快。计算机进行数值模拟时,使用标量索引代替坐标可以提高计算速度。

1.2 守护网格层定义

在计算区域边界处向外扩展若干个层守护网格,存储物理区域边界处的电磁场的所需的外层网格上物理量的初始值。守护网格层的层数由粒子模拟推进算法在空间上的离散阶数决定。不同方向的守护网格层数不同,如图 3 所示,径向具有非负性特征,守护网格层只需要在径向最大值处向外扩展;角向具有周期性,没有守护网格层;

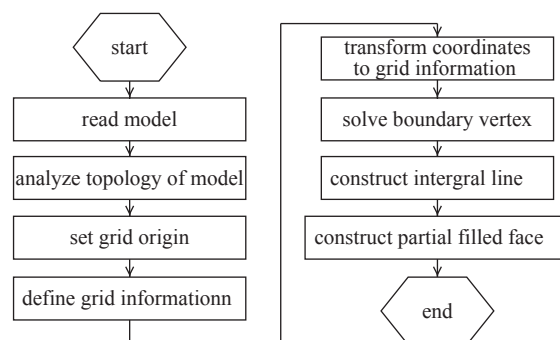


Fig. 1 Grid generation algorithm flowchart

图 1 网格生成算法流程图

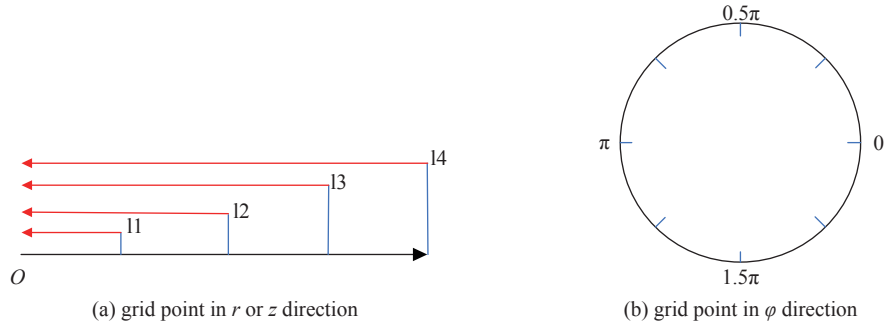


Fig. 2 Schematic diagram of grid point definition

图 2 网格点定义示意图

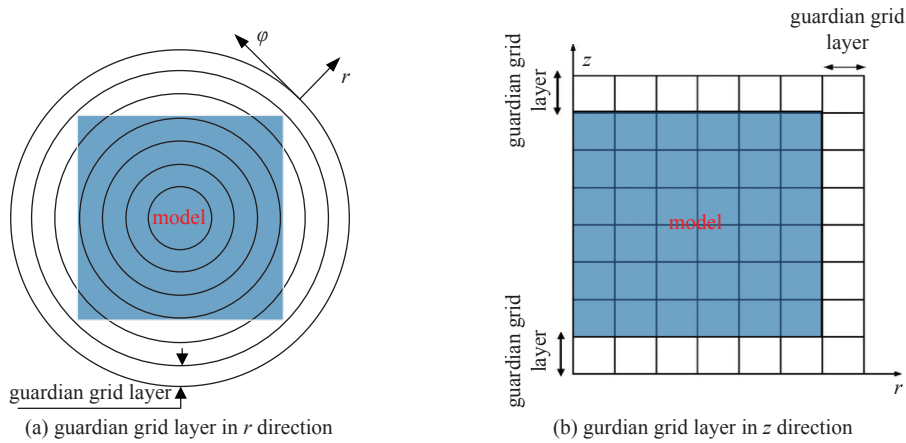


Fig. 3 Schematic diagram of r or z direction guardian grid layer

图 3 径向或轴向守护网格层示意图

轴向在最小值、最大值处皆设置守护网格层。物理区域和守护网格层共同确定了计算区域。根据计算区域定义包围盒,其作用是将实际的电磁场辐射问题和散射问题中的无穷大的空间进行截断,实现用有限的计算机内存模拟无限空间的电磁场问题。

1.3 轴上网格处理

柱坐标网格体系中,轴上网格元胞 1 与远离轴的网格元胞 2 形状不同。如图 4 所示,轴上元胞比非轴上元胞少 3 条网格边,1 个网格面。导致粒子模拟算法的物理量在这两种网格上计算形式不统一。本文提出将元胞 1 中轴上网格边抽象为面积为 0 的网格面,使轴上网格和非轴上网格的物理量计算方式统一。

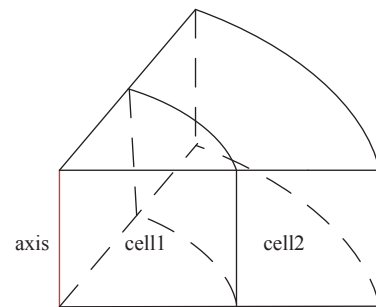


Fig. 4 Grid cells on axis and grid cells away from the axis

图 4 轴上网格元胞与远离轴的网格元胞

当角向剖分数为 n 时,轴上存在 n 个面积为 0 的网格面,每个网格面的起点都对应一个 φ 值,维持粒子模拟算法体系的一致性。

2 三维柱坐标网格线生成及模型边界点构造

模型离散边界点是模型重构的关键数据。存储在网格边的边界点、存储在网格面上的边界点的拓扑信息与几何信息共同描述模型在离散网格体系中的边界。这两类边界点通过射线跟踪法求解。射线跟踪算法是射线从其端点出发,沿着其方向向前推进,直到与空间某处的物体相交。通过计算求得射线与该物体表面的交点,并且检查该交点的属性是进入模型还是离开模型。本文将射线根据网格点或者模型棱边的顶点限定为有限长线段,即本文利用的射线跟踪算法实际上是线段求交算法。网格边上的边界点通过网格线与模型子面求交得到,在网格体系中描述模型子面的几何和拓扑信息;网格面上的边界点由模型的棱边作为射线与网格面求交得到,此类边界点描述了共享同一棱边的多个子面的拓扑关系与几何信息;第三类边界点为模型本身的边界顶点,其存储于网格元胞上,该类边界点描述共享该顶点的多个模型子面间的拓扑关系。网格线由上述三维柱坐标网格体系中的参数定

义。自适应地将模型完全从内到外包括。不同方向的网格线交织构成网格面。图5展示了自适应地为圆柱与六面体的组合模型所生成的网格线。

利用生成的网格线与模型子面求交所得边界点、网格线构成的网格面和模型棱边求交所得边界点以及模型顶点这三类边界点的拓扑信息可以构建一维、二维的共形网格元素,从而实现模型的三维重构。

3 模型重构

根据离散边界点的信息进行模型重构,准确描述器件模型的弯曲边界和薄层结构,从而给出电磁场推进所需要的等值积分面、环路积分线所对应的离散单元—局部共形填充面和共形网格边。而模型重构基于边界表示法(Boundary Representation, B-Rep)。边界表示法是几何造型中成熟且无二义性的表示法,其内涵如下:实体通过一组封闭的面组成;每一个面由其所在的曲面的定义加上其边界表示,该边界为一组边的并集;边又是由点表示。边界表示法的信息由几何信息与拓扑信息构成。拓扑信息描述实体上的面、边、点的连接关系,而几何信息定义了实体、面、边和顶点的在三维坐标中的信息。边界按照体-面-边-点的几何维度层次,完整地记录了几何体的所有几何元素以及几何元素相互连接的拓扑关系。模型重构是用所有离散网格单元连接起来的复合几何体来描述实体模型。使用边界表示法可以记录离散网格单元之间相互连接的拓扑信息,从而直接有效地在离散网格中重构模型。

3.1 初始网格与局部共形网格

图6给出了初始网格元(规则网格)和局部共形网格(非规则网格)的定义。图6(a)展示了按照维度升序的原则定义的网格点、网格边、网格面、网格元胞。基于边界表示法定义网格元素间的拓扑关系:点作为边的边界,边作为面的边界,面作为三维实体的边界。根据网格元之间的拓扑关系基于边界表示法实现模型重构。

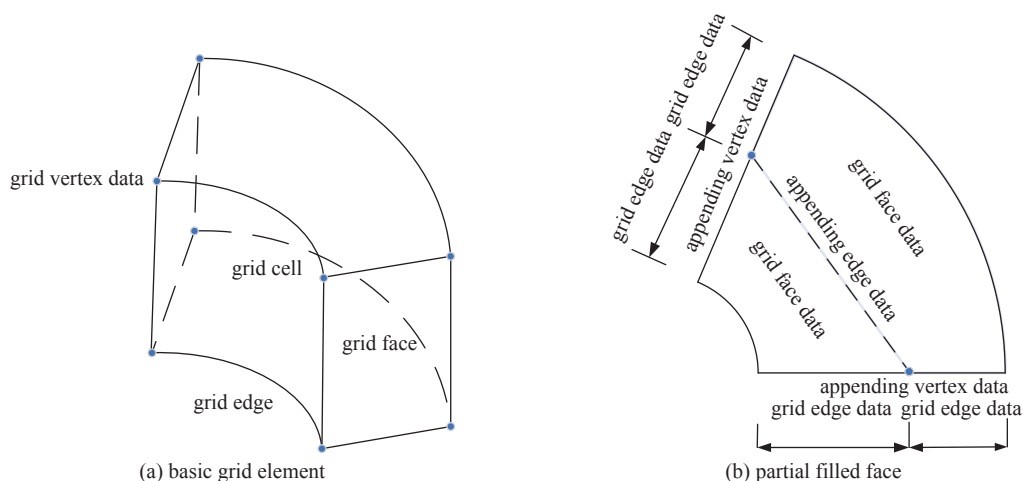


Fig. 6 Schematic diagram of conformal grid elements

图6 共形网格元示意图

如图6(b)所示,基于初始网格元和网格边上的边界点,构建共形网格边 grid face data。共形网格边以边界点为截断原则进行组合;基于共形网格边和网格面上的边界点构建局部共形填充面 grid face data。而图7展示了两实体子面重合时,该技术可以给出两个重合边界点,而非一个点。这两个重合边界点的拓扑属性不同:前一个边界点离开其所属于的模型,后一个边界点进入其所属于的模型,从而能够出区别有重合面时,距离重合面很近的区域具体属于哪个实体。

3.2 构建共形网格边与局部共形填充面

边界点在模型边界处将初始网格边截断,模型内部的线段即为共形网格边。该方法可以准确识别模型的弯曲边界和模型内部中的薄层结构。如图8所示,共形网格边(绿色实线)以网格点和边界点作为边界,将整个计算区域分为模型内部和模型外部两个区域。在含有边界线的网格上,边界线可将网格面划分成一个或多个不规则的局部共形填充面。基于右手螺旋法则遍历初始网格面上的共形网格边和存储在网格面上的边界点,可以构建原始网

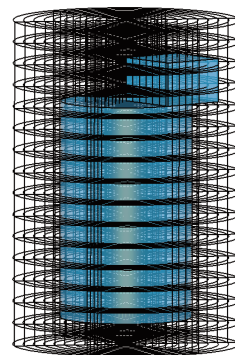


Fig. 5 Adaptive grid line generation

图5 自适应网格线生成

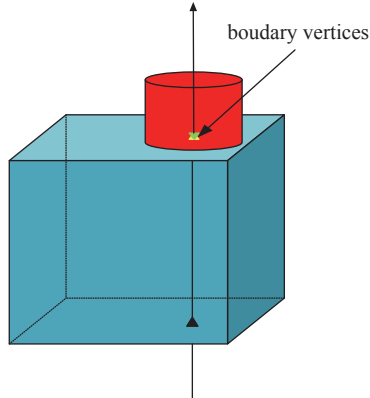


Fig. 7 Coincident boundary points on two real weight coincident planes

图 7 两个实体重合面上的重合边界点

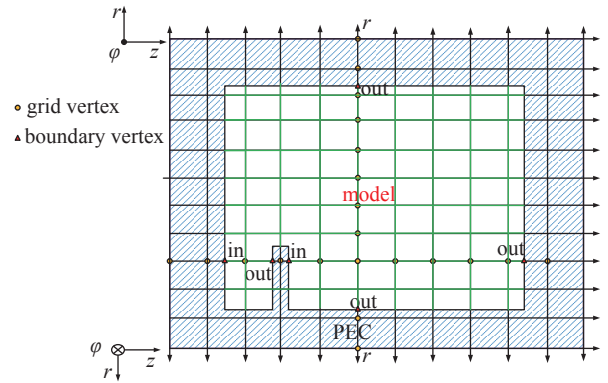


Fig. 8 Schematic diagram of grid edge data for conformal grid edges

图 8 共形网格边 grid edge data 的示意图

格面上的所有局部共形填充面。共形网格边和局部共形填充面即为数值模拟计算的积分线元和积分面元。共形网格边和局部共形填充面的方向由定义好的坐标方向确定,而二者的相对定向由拓扑关系描述,带有方向的线元和面元可方便地对麦克斯韦方程组进行推进。作环路积分时,若共形网格边的方向与坐标轴定义的单个网格边的方向相反时,其相对定向记为-1;当二者相同时,相对定向记为+1,电场的环路积分便可转化为在组成封闭环路的若干条离散网格边上的积分的代数和。针对薄层结构,基于边界点的拓扑属性能够将其识别出来:当沿着网格边方向的第一个边界点是射线离开模型的交点,而第二个边界点为射线进入模型的交点,说明这两个边界点之间的部分不属于模型内部,即在模型内部插入了理想导体薄层结构。该技术可以识别模型内部的支撑杆结构。

3.3 网格剖分实例

相对论磁控管是一种具有高功率输出、紧凑型外加磁场的束-场相互作用器件。其阴极、阳极各自关于磁控管轴线对称排列。阳极半径大于阴极半径,一组形状、尺寸相同的谐振腔沿着角向均匀排列,谐振腔数目与谐振频率点的分布有关。采用文献 [16] 所提供的带有透明阴极的相对论磁控管进行三维建模与共形网格剖分。图 9 为 A6 相对论磁控管的示意图,该磁控管采用阶梯型腔体轴向输出,所以含有 6 个扇形谐振腔,而该磁控管进行网格剖分的困难部分在于其含有 6 个在角向均匀分布的透明阴极。该磁控管结构参数阳极半径 $R_a=2.11$ cm, 阴极半径 $R_c=1.02$ cm, 谐振腔半径 $R_v=4.11$ cm。

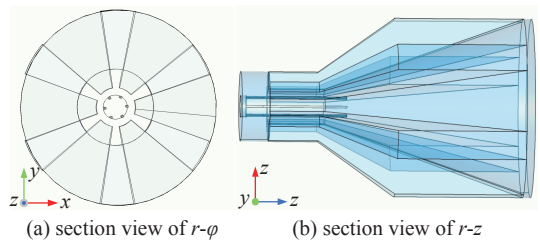


Fig. 9 Diagram of the engine of RBWO

图 9 相对论磁控管示意图

如图 9 所示,该器件的透明阴极和谐振腔各自沿着角向交错排列,所以是非完全对称器件。其物理过程无法使用 2 维或 2.5 维粒子模拟软件进行模拟,只能使用 3 维粒子模拟软件进行求解。针对该器件,用本文提出的剖分方法和 Magic 程序的三维柱坐标网格剖分进行对比,结果如图 10 到图 13 所示。图 10 和图 12 是本文方法对该磁控管进行三维柱坐标共形剖分的截面图,径向网格数 123,角向网格数 48,轴向网格数 62;图 11 和图 13 是用 Magic 程序中对该器件进行三维柱坐标剖分的截面图。

在图 10 中展示了 $\phi=0^\circ$ 和 $\phi=90^\circ$ 截面的网格剖分图,准确地剖分了透明阴极、阳极和谐振腔,用局部填充网格元描述了模型的边界,可见该技术剖分模型的边界处的网格是非规则网格元,而不是一个完整的网格;图 11 为

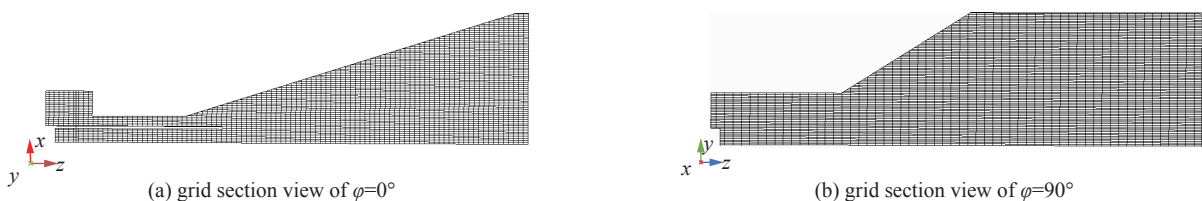
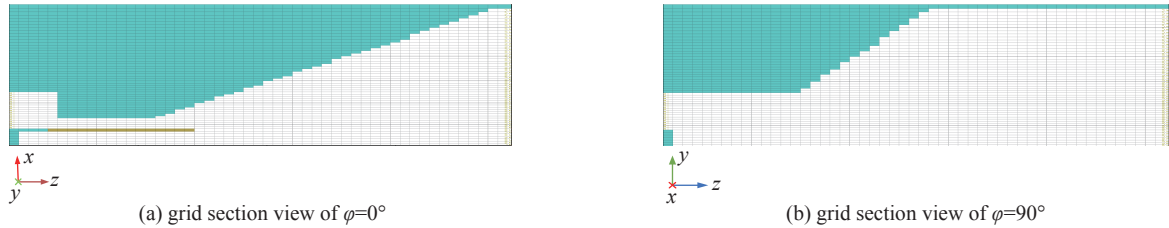
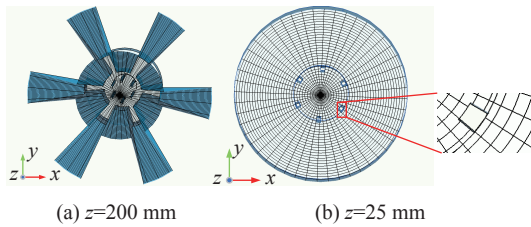
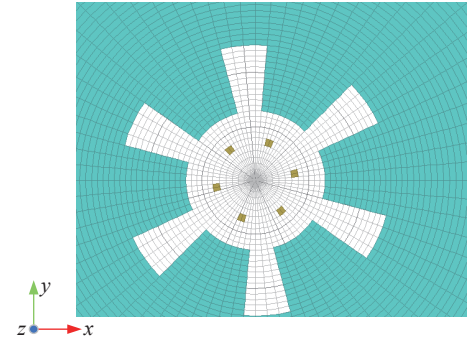


Fig. 10 Conformal grid profile of relativistic magnetron in $r-z$ cross section

图 10 相对论磁控管模型 $r-z$ 方向的共形网格剖面图

Fig. 11 Grid profile of relativistic magnetron in r - z cross section by Magic图 11 Magic 程序剖分相对论磁控管模型 r - z 方向剖面图Fig. 12 Grid profile of relativistic magnetron in r - ϕ cross section图 12 相对论磁控管 r - ϕ 截面网格剖分剖面图Fig. 13 Magic programmed relativistic magnetron grid division profile in r - ϕ cross section图 13 Magic 程序相对论磁控管 r - ϕ 截面网格剖分剖面图

Magic 三维柱坐标程序剖分该模型, 网格阶梯近似描述模型边界, 同时剖分了模型内部介质区域和模型外部的导体。另外, 本文给出的方法只需剖分模型内部的介质区域, 而进行电磁场计算时往往不需要模型外部的理想导体部分的网格元, 能够减少计算量。

图 12 为本文技术对相对论磁控管的网格剖分 r - ϕ 截面图。该图展示了角向的网格线能够剖分角向分布的谐振腔以及透明阴极结构, 并且可以看出, 柱坐标网格在径向较大处其网格元尺寸大, 相较于直角网格数少。图 13 为 Magic 程序在该器件进行剖分的 r - ϕ 截面图。不难看出, Magic 程序在弯曲边界处的网格是依然遵循整网格阶梯近似原则; 而本文采取的局部填充技术能在弯曲边界处克服整网格近似, 提高了描述弯曲边界的精确度。关于透明阴极结构, Magic 程序至少需要两个整网格单元才能识别透明阴极, 而本文的剖分方法只要求网格尺寸比透明阴极尺寸较小, 即可准确识别透明阴极结构。

4 结 论

本文首先给出三维柱坐标网格体系中原点、网格步长、网格点离原点距离、网格索引、守护网格层、包围盒的定义方式, 完成三维柱坐标网格体系的定义; 接着对轴上网格作特殊处理, 使电磁场推进算法在离散网格上的形式保持一致。定义完三维柱坐标网格体系后, 在网格体系中描述模型, 步骤如下: 1) 基于射线跟踪法原理, 分别以柱坐标系网格线为射线与模型子面求交、模型棱边为射线与网格面求交, 求得的交点作为模型边界点, 同时记录模型边界点的拓扑信息和网格信息; 2) 利用所求得的边界点的网格信息, 可将模型边界上的离散边界点用三维柱坐标网格体系进行表述; 3) 根据模型内部点和边界点的网格信息构建共形网格边, 根据共形网格边之间的拓扑关系和相对定向构建局部共形填充面, 得到电磁场推进算法所需要的积分线元和积分面元。

该网格剖分技术能够在三维柱坐标系下实现模型重构, 精确剖分模型的边界, 识别模型内部的薄层结构。由于角向网格线是圆弧线, 网格元胞的体积随着径向尺寸的增加而变大, 所以该技术适用于主体为旋成体的束-场相互作用器件。对于该类器件, 柱坐标系下的剖分网格数比直角坐标系下的剖分网格数少, 减少了计算量。与粒子模拟软件 Magic 的三维柱坐标网格剖分技术相比, 在剖分相同的磁控管结构时, Magic 的剖分是阶梯锯齿型近似, 只能保一阶精度, 当网格尺寸不大于阴极尺寸的一半时才能较为准确地描述透明阴极; 而本文提出的方法在柱坐标系下采用共形技术, 网格尺寸要求不像 Magic 程序那般苛刻, 便可以更精确地描述该磁控管的边界和透明阴极。并且本文提出的方法只剖分了介质区域, 相较于 Magic 程序减少了计算所需的内存和时间。然而, 该工作未能实现自适应剖分, 即无法作局部加密的网格剖分, 会造成计算资源的浪费。

参考文献:

- [1] Hockney R W, Eastwood J W. Computer simulation using particles[M]. New York: Taylor & Francis, 1988.
- [2] Birdsall C K, Langdon A B. Plasma physics via computer simulation[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [3] Birdsall C K. Particle-in-cell charged-particle simulations, plus Monte Carlo collisions with neutral atoms, PIC-MCC[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1991, 19(2): 65-85.
- [4] Dey S, Mittra R. A locally conformal finite-difference time-domain (FDTD) algorithm for modeling three-dimensional perfectly conducting objects[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1997, 7(9): 273-275.
- [5] Cary J R, Abell D, Amundson J, et al. Petascale self-consistent electromagnetic computations using scalable and accurate algorithms for complex structures[J]. *Journal of Physics:Conference Series*, 2006, 46(1): 200-204.
- [6] Nieter C, Ovtchinnikov S, Smithe D N, et al. Self-consistent simulations of multipacting in superconducting radio frequencies[C]//Proceedings of 2007 IEEE Particle Accelerator Conference. 2007: 769-771.
- [7] Smithe D, Stoltz P, Loverich J, et al. Development and application of particle emission algorithms from cut-cell boundaries in the vorpal EM-FDTD-PIC simulation tool[C]//Proceedings of 2008 IEEE International Vacuum Electronics Conference. 2008: 217-218.
- [8] Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302-307.
- [9] Jurgens T G, Taflove A, Umashankar K, et al. Finite-difference time-domain modeling of curved surfaces (EM scattering)[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1992, 40(4): 357-366.
- [10] 牛朴, 侯新宇. 任意三维物体 FDTD 共形网格生成算法[J]. *计算机仿真*, 2009, 26(7): 236-239. (Niu Pu, Hou Xinyu. A conformal FDTD grid generation algorithm for arbitrary three-dimensional geometric object[J]. *Computer Simulation*, 2009, 26(7): 236-239)
- [11] 胡晓娟, 葛德彪, 魏兵, 等. 基于目标三角面元模型生成 FDTD 共形网格的方法[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(8): 1333-1337. (Hu Xiaojuan, Ge Debiao, Wei Bing, et al. Conformal FDTD mesh-generating technique for objects with triangle-patch model[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(8): 1333-1337)
- [12] 胡晓娟, 卢兆林, 葛德彪, 等. 基于三角面元的涂层目标 FDTD 共形网格生成技术[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(9): 1884-1888. (Hu Xiaojuan, Lu Zhaolin, Ge Debiao, et al. Conformal FDTD mesh-generating scheme for coated targets based on triangle-patch[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(9): 1884-1888)
- [13] 陈伶俐, 廖成, 常雷, 等. 基于切片-线扫描的共形网格剖分技术研究[J]. *电波科学学报*, 2014, 29(1): 47-54. (Chen Lingli, Liao Cheng, Chang Lei, et al. Conformal mesh generator based on slice-line scanning method[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2014, 29(1): 47-54)
- [14] 王玥, 付梅艳, 陈再高, 等. 用于全电磁粒子模拟的复杂建模及网格生成技术[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(11): 2994-2998. (Wang Yue, Fu Meiyuan, Chen Zaigao, et al. Technique of complex geometry modeling and grid generation for fully electromagnetic particle simulation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(11): 2994-2998)
- [15] 王玥, 李永东, 蒋铭, 等. 三维共形电磁粒子模拟技术研究[J]. *真空电子技术*, 2019(6): 12-22. (Wang Yue, Li Yongdong, Jiang Ming, et al. Three-dimensional conformal electromagnetic particle-in-cell code[J]. *Vacuum Electronics*, 2019(6): 12-22)
- [16] 刘美琴, 刘纯亮, 王洪广, 等. A6 相对论磁控管模式切换射频信号馈入方法[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(10): 2636-2642. (Liu Meiqin, Liu Chunliang, Wang Hongguang, et al. RF input technology in A6 magnetron with diffraction output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2636-2642)