

轴对称电子光学系统空间的自动网格划分*

赵国庆** 王文祥

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

【摘要】提出了一种轴对称电子光学系统空间子午面上的网格自动划分方法，开发了自适应边界网格划分处理程序，可以对任意边界形状的封闭轴对称电子光学系统区域自动以较小网格间距划分，得到空间区域的网格点各参数，为进一步用计算机数值计算求解拉普拉斯方程或泊松方程(五点法)打下基础，简化了电子光学系统边界资料的输入及简化调整边界形状和网格间距过程，通过计算、修改，得到较好的结果参数。

关键词 电子光学；泊松方程；数值计算；网格划分

中图分类号 TN124

研究电子光学系统的实质是求解电子在静电、磁场中的运动。为了定量研究、设计各类电子光学系统，必须求解场和轨迹。各种静电磁场应满足相应的拉普拉斯方程或泊松方程^[1,2]，因此，求解静电、磁场实质上是求解给定边界条件的拉普拉斯方程或泊松方程。通常，求解场的方法有解析法、数值计算法和实验法。求解电子运动的轨迹是求解二阶线性微分方程的问题，也可用上述几种方法处理。

解析法虽然很精确，但在实际的电极系统中，因边界条件的复杂性难以用微分方程求解，而实验法的精度又不高。目前最为流行和最有前景的方法是数值算法。原则上，数值算法可以达到任意要求的精度。随着计算机的发展和在各个领域的广泛应用，利用数值算法求解位场与轨迹已经日益广泛。

差分法是一种常用而有效的数值计算方法，对于轴对称系统，其基础是将空间区域的子午面划分为分离的正方形网格或矩形网格(网格法)。将被研究区域中的连续点用不连续点代替

$$\begin{cases} z = 0, \pm h, \pm 2h, \dots, \pm mh \\ r = 0, \pm h, \pm 2h, \dots, \pm nh \end{cases}$$

式中 m, n 为正整数(假设为正方形网格)。用点阵将 z, r 平面划分为很多网格，如用相邻网格点的差分代替欲求的方程中的偏微分，则拉普拉斯微分方程或泊松微分方程变成了相应的差分方程(即采用五点法计算某网格点电位)，然后再用线性代数的方法来求解^[3]。但是，对于以坐标点描述的电子光学系统区域，任意给定横向、纵向网格间距后(更普通的是矩形网格划分)，要由计算机确定出该空间的内区域与边界点的坐标与臂长等参数极为困难，因而不少相关设计程序直接要求用户手动计算、输入给定某一网格间距后的边界点数据，如EGUN程序，将导致繁琐的工作量，且边界形状发生一点改变或网格间距发生改变，都需重新计算输入边界点数据。国内不少设计程序中采用了一些特殊的处理技术，导致设计软件仅能局限于特定形状的电子光学系统或者仅能由软件设计人员使用，难以推广。本文提出了自适应边界网格划分处理方法，能对由坐标点描述的电子光学系统区域，任意指定网格间距大小，自动进行空间区域的网格划分，并自动求出边界点参数，给出了所有网格点参数数据文件。

2001年9月20日收稿

* 信息产业部预研基金资助项目

** 男 29岁 硕士 讲师

1 网格划分处理

网格划分是用计算机进行数值计算求解拉普拉斯方程或泊松方程的基础, 主要包括以下内容: 对于任一轴对称电子光学系统空间区域的子午面, 需由计算机自动确定空间内区域; 在任意网格间距下每条水平网格线段(或垂直网格线段)的确定(边界上点的确定); 对于每条网格线段, 确定该网格线段上每一个网格点是否为内点(采用五点法计算某网格点电位时, 要利用到该网格点垂直与水平方向相邻4个网格电位资料, 若相邻4个网格点均在空间区域内, 则为内点), 若不是, 则为边界点, 这时则需确定与该边界点相邻的边界上点间的臂长等参数。图1为子午面上的多级降压收集极电子光学系统(假设已划分好网格), 左端为收集极入口处, $n=0,1,2,3,4$ 表示收集极的第几级电极。图中, 在垂直与水平方向上和点 P_0 相邻的4个网格点均在空间区域内, 为内点, 而对于 P_1 点, 在垂直方向上, 有一相邻网格点在空间区域外, 则为边界点。

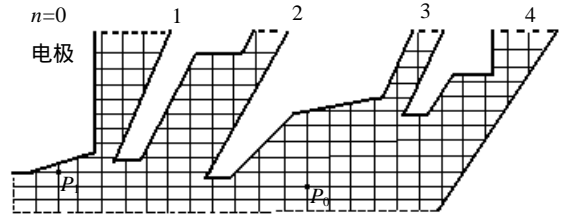


图1 某特殊行波管收集极内的网格划分

1.1 向量法确定内区域

对于边界以坐标点描述的电子光学系统区域(每一边界坐标点描述内容包括该点的 z 坐标、 rr 坐标、由该坐标点与前一坐标点构成的边界连接形状属性值等表示。规定若连接属性值为0, 表示连接为直线段; 若连接属性值为非0值, 表示为圆弧, 该值的绝对值为圆弧半径; 若属性值大于0, 表示圆心在内区域, 小于0, 表示圆心在空间区域外), 程序设计所关注的网格点在该系统所包围的区域内, 即内区域。这里以收集极边界形状为例, 如图1所示, 左端为收集极入口, 以收集极入口处边界端点为起点的连续向量线段来表示边界形状, 向量线段与对称轴围成的封闭区域(或向量线段向右旋转的区域)即为收集极的内区域, 区域内的每一个网格点坐标及臂长等参数是为网格划分计算时所关注的。以向量法确定内区域, 对内区域网格线段、圆弧边界的处理, 以及反射电子、真二次电子的发射处理等能带来极大的方便。

1.2 区域内水平网格线上边界上点的确定

对于内区域的网格点, 必然位于某条水平网格线段上(或者某条垂直网格线段上), 若能够自下而上(或自上而下)以垂直方向网格间距的 n 倍确定内区域的每条网格线段, 进而能确定网格线段上的每一个网格点(坐标及臂长等相关参数), 则能完成区域的网格划分描述。由向量法描述空间区域的边界形状知识可知, 向量边界线段向右(顺时针方向)旋转的范围为内区域范围, 假设以某一径向网格间距画一条水平网格线, 网格线与封闭空间区域的边界的交点为边界上点, 端点数目必为偶数个, 空间区域内的网格线段的左端点一定在方向向上(即第1, 2象限的向量线段)的向量边界线段上, 右端点一定在方向向下(第3, 4象限的向量线段)的向量边界线段上。由于边界形的复杂性, 在某些水平网格线上可能有多条网格线段。因此, 关键在于确定网格线与边界线段的交点(边界上点), 作为网格线段的端点。

1.3 边界点的确定

对于每一条被径向网格线划分的水平网格线段, 若得到所有网格点(边界点或内点)的参数, 则完成电子光学系统的网格划分描述。对于每一个网格点, 须检查它与相邻的4个网格点的关系, 只要其中有一个相邻网格点在收集极区域外, 则该点为边界点, 否则为内点。对于边界点, 由于有一个或多个相邻网格点在收集极区域外, 就不能用矩形网格计算该点电位, 只能用不等间距计算, 如图2所示。在图2中, 水平网格线段 AB 上有一 P_0 网格点, 其相邻的4个网格点中, 网格点1、2、4在收集极内区域, 但3网格点在收集极区域外, 不能用3点的网格点电位、臂长来计算 P_0 的

电位, 而应该利用 AB 水平网格线与边界线段的交点 A (边界上点) 的电位及臂长来计算该点电位, 即用不等间距差分公式进行计算。

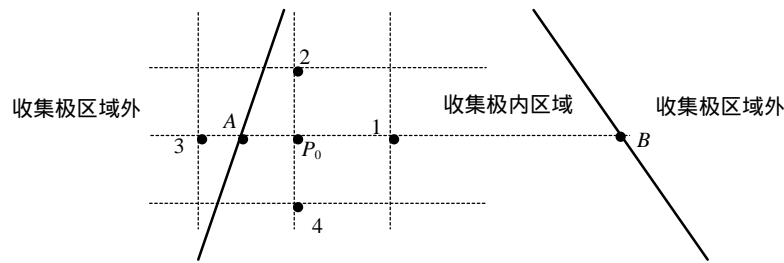


图2 边界点确定

1.4 圆弧边界的处理^[4]

圆弧边界为电子光学系统构成不可缺少的部分, 复杂的曲线边界可由多段或连续的圆弧表示。自适应边界网格划分处理程序包含对圆弧边界的处理, 以弦端点坐标、半径描述圆弧边界(若半径值为正, 圆心在空间内区域; 若半径值为负, 圆心在空间区域外)。在程序中, 对圆弧的描述还须作一些限制: 一个圆弧只能位于一个象限内, 若一个圆弧位于相邻的多个象限中, 则分成多个圆弧来表示; 连续的多个象限的圆弧构成一个符合实际的复杂的圆弧。

与直线段边界求边界上点处理类似, 为了求得圆弧边界线与网格线的交点, 必须先把以弦端点坐标、圆弧半径表示的圆弧转化为以圆心坐标、半径表示的圆弧轨迹方程, 如图3所示。

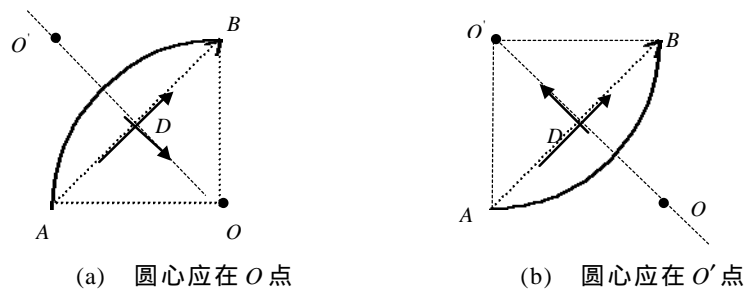


图3 圆弧边界的处理

转换过程如下:

步骤1 求出弦线段 AB 的中点 D 的坐标。

步骤2 求出以弦 AB 及圆的半径描述圆弧可能的两个圆心 O 、 O' 点坐标。

步骤3 当半径值为正时, 由前面的描述, 圆心应在空间内区域, 当半径值为负时, 圆心应在空间区域外。由“向量法确定内区域”描述可知, 假设有向量线段 AB , 若半径值为正, 由弦、半径的关系, 向量线段 DO 与 AB 的关系为向量 DO/AB 的角度等于 $-\frac{\pi}{2}$; 类似地, 若半径值为负, 由弦、半径的关系, 向量线段 DO' 与 AB 的关系为向量 DO'/AB 的角度等于 $\frac{\pi}{2}$ 。由此, 可判别圆弧的圆心, 并由圆心、半径可写出圆弧轨迹方程。

步骤4 同直线段边界的处理, 可分别求出圆弧边界线与网格线的交点(边界上点)、每条水平网格线上的边界点和内点、每个边界点的非网格间距臂长等。

采用上述技术, 对于以坐标点描述的任意边界形状的电子光学系统, 都能自动进行任意网格间距大小的网格划分, 结果给出各网格点参数, 以方便进行拉普拉斯方程或泊松方程等的计算。

2 计算实例

本文利用空间网格划分处理技术开发了多级降压收集极CAD软件(工作站版、微机版)、磁控注入电子枪设计等程序, 在进行程序的试用、设计过程中, 软件都能对以坐标点描述的任意边界形状的电子光学系统区域, 以较小的网格间距进行划分, 从而能极大方便地进行边界形状的输出、反复调整电子光学系统边界形状和网格的大小, 并通过计算, 设计出符合要求、较佳的电子光学系统。

利用在自动网格划分处理程序的基础上开发的多级降压收集极CAD软件, 对一些在实际器件中使用的行波管收集极进行了试算, 计算结果与实验值较好吻合, 图4、图5分别是计算不同型号行波管收集极所得到的电子运动轨迹图形。

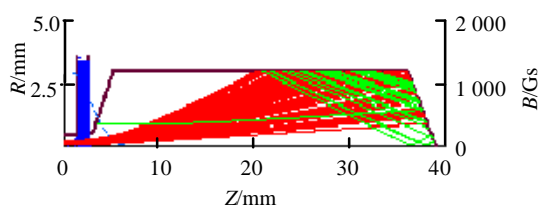


图4 某收集极电子运动轨迹图形

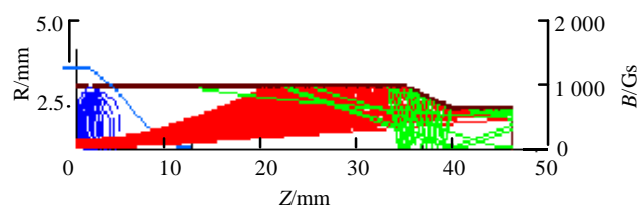


图5 某收集极电子运动轨迹图形

参 考 文 献

- 1 李家胤, 王华军, 周晓岚等. 三次谐波回旋管电子枪的设计. 电子科技大学学报, 1996, 25(增1): 72-75
- 2 李家胤, 熊祥正, 周晓岚等. 多级降压收集极的计算机辅助设计. 电子科技大学学报, 1996, 25(增1): 48-52
- 3 赵国骏. 电子离子光学. 北京: 国防工业出版社, 1994, 261-268
- 4 赵国庆. 宽带大功率行波管多级降压收集极设计程序研究:[硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2001

A Mesh-autodivising Method for Space of Electronic Optical System

Zhao Guoqing Wang Wenxiang

(Institute of Physical Electronics, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract A new method of mesh-autodivision for space of electronic optical system is presented in this paper. And basing it, a program of “auto-adapting mesh-division for boundary of electronic optical system” is developed. With this program, the mesh-autodivision with small mesh pitch and the parameters of each mesh point for the close area of electronic optical system with arbitrary boundary can be achieved. Thus, the data-in of the system boundary and the modification of the boundary outline and the mesh pitch can be simplified and the designing of electronic optical system can be rapidly completed.

Key words electronic optics; Poisson equation; numerical computation; mesh division