

文章编号：0258-0926(2017)03-0126-06；doi:10.13832/j.jnpe.2017.03.0126

中子学栅格程序 KYLIN-II 可视化图形建模方法研究和工具开发

涂晓兰，潘俊杰，柴晓明*，吴文斌，陈树，尹强，芦韡

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术国家级重点实验室，成都，610213

摘要：基于 AutoCAD 软件，采用网格自动识别算法、基于嵌套式的属性编辑模式、模块化的建模方式等先进技术，开发形成支持先进中子学栅格程序的可视化图形界面软件 KYEYE。该软件支持多种几何描述方式，目前支持 KYLIN- 程序的点线描述方式和 HELIOS 的几何输入方式，经过充分地测试和验证，该软件能够准确且快速地建立各种复杂问题。

关键词：KYLIN- ；KYEYE；中子输运；图形建模；网格识别

中图分类号：TL349 **文献标志码：**A

Research and Development of Visual Graphic Modeling for Advanced Neutron Transport Lattice Code KYLIN-II

Tu Xiaolan, Pan Junjie, Chai Xiaoming*, Wu Wenbin, Chen Shu, Yin Qiang, Lu Wei

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, NPIC, Chengdu, 610213, China

Abstract : Based on the AutoCAD software, this paper proposes the advanced grid automatic recognition algorithm, nested attribute editing mode, modular modeling methods and other advanced technologies, and develops the visual graphic modeling software KYEYE. The software supports multiple geometric description, currently supports KYLIN- software and HELIOS program. Adequate test and verification show that the software can accurately and quickly establish a variety of complex problems.

Key words: KYLIN- , KYEYE, Neutron transport, Graphic modeling, Mesh recognition

0 引言

KYLIN-^[1] 是中国核动力研究设计院 (NPIC) 自主开发的具有自主知识产权的中子学栅格程序，该程序采用特征线方法 (MOC)^[2] 进行复杂几何中子输运计算，采用子群方法进行共振处理，并利用采用广义粗网格有限差分加速方法 (GCMFD)^[3] 来加速中子输运求解流程，采用基于改进预估修正临界-燃耗迭代方法 (PPC) 的切比雪夫方法求解复杂燃耗链，并综合应用了循环射线布置及追踪技术以及反向延长追踪技术^[2]，使 KYLIN- 程序输运计算适用于复杂几何。

但是输入文件涉及复杂的几何描述、网格划分、材料属性设定、温度属性设定、边界条件设定、编辑输出区域设定、加速用粗网格设定等，使得 KYLIN- 程序的输入文件异常复杂，手工输入也会异常的复杂，限制了 KYLIN- 程序对复杂几何的适用性。

为了消除输入对几何的限制，实现 KYLIN- 程序对复杂几何的适用性，本文充分利用 AutoCAD^[4] 几何描述的强大功能，提出网格自动识别算法、嵌套化的属性描述方法、模块式的建模方式，开发了支持先进中子学栅格程序的图形

收稿日期：2017-02-22；修回日期：2017-03-06

作者简介：涂晓兰（1983—），女，高级工程师，现从事核反应堆物理堆芯计算程序的开发工作

*通讯作者：柴晓明，E-mail：chaixm@163.com

界面软件 KYEYE。

1 基于 AutoCAD 的几何和网格构建方法

生成 KYLIN- 程序输运计算所需的几何输入信息，关键是构建复杂的几何图形以及网格的划分，同时还需考虑用户使用的方便性。在复杂几何图形的构建方面，由于 AutoCAD 具有强大的几何描述能力，可以绘制各种复杂的几何图形。因此，基于 AutoCAD 进行图形的绘制，用户可以通过 AutoCAD 提供的直线、圆、圆弧等功能交互绘制任意形状的几何。

AutoCAD 可以绘制任意复杂的几何图形，但不具备根据交点将直线或者曲线断开的功能，而网格是由根据交点断开后的基本的边构成的，因此 AutoCAD 不具备识别网格功能。KYLIN- 程序输运计算需要网格的信息，若由手动识别网格与边的关系，其过程非常繁琐同时网格大规模数量级时编辑容易出错，因此本文提出了网格自动识别算法。

在用户使用的方便性方面，根据常规反应堆的特点，形成若干快速建立特定几何凸形、修改几何图形和网格划分功能，并形成填充和拼接技术，用户可以快速准确地建立几何图形并进行网格划分及几何修改。

1.1 网格自动识别功能

根据实际分析计算需求在 AutoCAD 绘图系统绘制特定形状的网格，然后由计算机自动识别网格，将网格形成一个完整的拓扑结构，从而避免人工识别网格的繁琐过程并解决网格大规模数量级时网格编辑容易出错的问题。网格自动识别分为 2 步：首先对模型中的几何元素进行预处理，根据其相交性，将几何图形离散成网格边。为提高网格预处理效率，本文采用四叉树提高图形预处理的效率；将离散的网格边，根据其在相交点的位置，形成完整的网格拓扑结构。

1.1.1 基于四叉树的相交线图形预处理 预处理需对图形中的所有几何元素进行两两相交计算并进行图形打断处理；为了提高图形预处理效率，按四叉树的方式重新组织图形中的几何元素。通过将图形最大包围盒的长方形区域不断四分的方法，将图形中的所有元素插入到对应的四叉树节点中，相交计算时只需对该节点所在的子树中进行两两求交计算即可，从而避免图形的几何元素

与所有的几何元素进行相交计算。这种方式可以大幅减少图形相交计算的次数，特别是对已生成网格的并重新修改图形的几何模型，可大幅提高计算效率。

四叉树结构建立是将平面中的几何图形按照空间象限的位置递归划分为不同层次的树结构，每个象限位置分成 4 个相等的子空间，如此递归下去，直至树的层次满足当前节点对象小于设定值的时候停止分割。四叉树的结构比较简单，并且当空间数据对象分布比较均匀时，具有很高的相交计算效率。

1.1.2 网格自动识别算法 网格识别首先是构建点边拓扑关系，然后在此基础上识别图形中的环，并构建网格拓扑结构。与三维实体中的 BREP 表达^[5-6]类似，在环的基础上形成网格，相邻的多个网格构成物理分析所需的区域或粗网格。

在点边拓扑结构基础上，系统可自动识别出环，其识别方法如下：

(1) 任选一条边作为初始边，以该边的起点到终点为方向，搜索下一条边，且与该边在顺时针方向上夹角最小，然后再以该边为搜索边并按搜索到该边的方向继续搜索，直至搜索到最初的起始边为止。

(2) 为了避免对边的重复搜索，使用标记记录是否搜索过当前方向。正向搜索 1 次搜索标记+1；反向搜索 1 次，搜索标记+2；当搜索标记为 3 时，则该边不再参与搜索。搜索标记可以确保所有方向都遍历搜索 1 次。

(3) 当所有的边的搜索标记为 3 时，停止搜索，环的自动构建过程完成。

根据上述搜索方式得到的环是有向环，有向环分为内环和外环（图 1）。

环的识别完成后，根据外环和内环以及相互之间的关系，自动识别成网格。

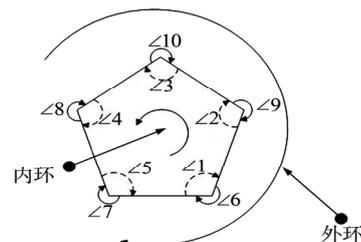


图 1 内环与外环判断示意图
Fig. 1 Inner Ring and Outer Ring Judgment

根据网格只会存在一个外环,可能存在多个内环的规律,只需要判断出内环属于哪些外环,并找出内环的所属外环的最小环。外环及所属的内环就构成了一个封闭区域,即一个网格。

1.2 几何图形修改和网格划分功能

用户在描述中子输运问题时,需要实际情况调整几何结构或网格划分。调整网格划分可以采用放射线绘制、同心圆绘制、平行线绘制、直线平移、圆弧半径修改、图形整体旋转、图形整体缩放等方法。

(1) 放射线绘制方法:用户指定圆心,将快速的画出给定数量的放射线,放射线第1点和第2点之后就会生成圆形放射状的放射线(图2a)。

(2) 同心圆绘制方法:将快速的画出一个圆的给定直径的同心圆(图2b)。

(3) 平行线绘制方法:将快速的画出1条直线的给定个数平行线(图2c)。

(4) 直线平移方法:用于将选择的直线集合按给定向量平移,圆弧半径修改方法用于将选择的圆弧半径集合按给定的直径变化。

(5) 图形整体旋转:将整体图形逆时针旋转给定旋转角度。如图2d所示的2个图形,只需要建立一次模型。

(6) 图形整体缩放:将整体图形按给定的缩放因子进行缩放。

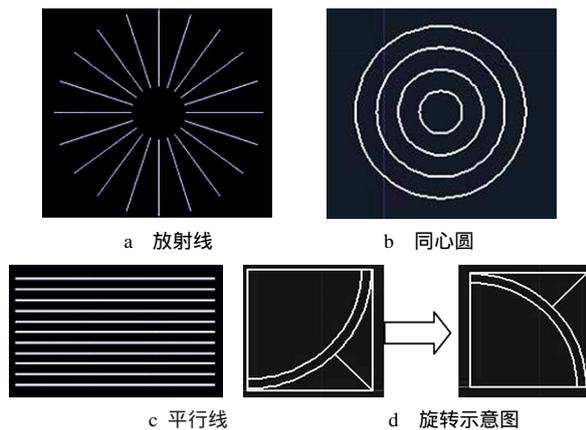


图2 灵活的几何修改功能
Fig. 2 Flexible Geometry Modification

1.3 快速的几何建模功能

由于反应堆组件形状通常都是规则的几何图形,因此对于规则几何图形需要为用户提供快速的几何建模能力。支持快速几何建模的方法有:

填充技术、拼接技术、四边形网格快速绘制、六边形网格快速绘制等。

(1) 四边形网格快速绘制:用于快速绘制四边形网格,根据用户给定的行数、行高、列数和列高,即可生成四边形网格(图3a)。

(2) 六边形网格快速绘制:用于快速绘制六边形网格,根据用户给定的小六边形边长和数量,即可生成六边形网格(图3b)。

(3) 填充技术:首先建立栅元几何图形,再结合四边形网格快速绘制方法和六边形网格快速绘制方法绘制组件框架,最后应用填充技术将栅元几何插入到图形中。图3c所示为四边形网格插入部分栅元后图形。

(4) 拼接技术:用于将2个图形进行外部拼接。图3d所示为2个六边形栅元拼接。

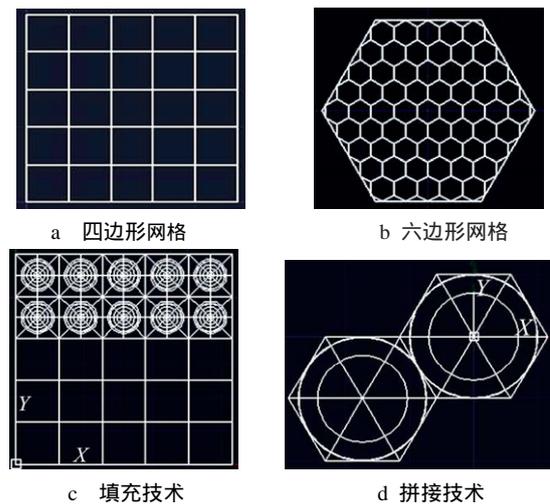


图3 快速的几何建模功能
Fig. 3 Fast Geometric Modeling

2 网格属性输入和编辑方式

除几何信息外,网格属性信息(如材料属性、温度等)、GCMFD使用的粗网格信息等是中子输运方法所需要的信息,为了方便输入和编辑网格属性信息,使用嵌套化的属性描述方法,可以大大提高用户描述网格属性效率。

2.1 嵌套化的属性描述

中子输运计算需要每个网格的属性信息,在描述网格属性过程中有2个难题:若将组件几何图形和网格全部构建完成后对每个网格进行属性填写,当网格数目较大时对用户来说非常困难;当用户修改网格属性时,如果存在大量的

网格属性需要修改，那么用户修改的工作量非常大。一般情况下，问题中网格的属性集（由网格的所有属性组成的集合，包括网格材料类型、温度、密度等）类型数目较少，大量网格的属性是一致的。为此，采用 2 层嵌套化的属性描述方式，在几何描述过程中定义“区域”这一特殊的网格层次。“区域”由若干同等属性的网格组成，仅仅用来供图形界面描述和维护属性信息，而在输出形成中子输运程序的输入文件中，仍采用网格为单位来描述属性信息。

由于“区域”的尺度更大，因此“区域”的数目比网格的数目少的多。“区域”的使用大大减少用户维护网格属性信息的工作量，如一个燃料棒是一个区域，那么燃料棒中细分的网格都将继承燃料棒区域的属性，如果修改燃料棒区域的属性，那么所有燃料棒中的网格属性都将改变，这样的模式会大大节省用户描述网格属性的工作量。在用户描述几何过程中，用户可能需要更改“区域”包含的网格情况，如燃料棒中不同径向层的温度不同，那么属性集就不同，为此用户需要将燃料棒径向分为若干个“区域”。为此，开发了一系列支持“区域”操作的功能，如新建区域功能、合并区域功能、删除区域功能、按单个网格生成区域功能、按边界生成区域功能、区域中添加网格功能、区域中移除网格功能；利用这些功能，即可方便地维护“区域”网格信息。

在建模过程中，用户可以先进行几何描述和网格划分，然后将相同属性的网格选择后形成一个“区域”，然后填写属性信息；也可以在几何描述完成后，先将不同几何结构定义为不同的“区域”，然后再进行网格细分，细分后的网格将继承“区域”的属性。这 2 种操作模式都会大大降低属性的填写工作量，结合“区域”的 7 大操作功能，便可以方便用户的灵活填写和修改各类属性。如图 4 所示，问题包含 80 个网格，3 种属性信息，若用户网格构建过后，直接对网格属性信息填写，将填写 80 次，即需要填写图形包含的网格数目相同的次数；而如果应用本文提供的“区域”设定属性功能，将具有相同属性的网格合并为同一个区域（如图所示将合并成 3 个区域），针对区域来进行属性填写，用户只需要填写 3 次即可。嵌套化属性描述方法能有效地提升用户填写属性的效率。

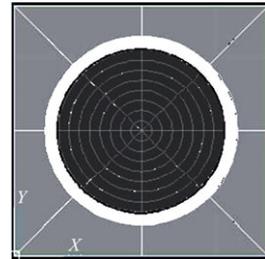


图 4 区域划分示意图

Fig. 4 Sketch of Regional Division

2.2 各类编辑输出网格管理

KYLIN- 程序输运计算采用 GCMFD，GCMFD 加速计算的对象为粗网格，粗网格一般由一个或多个连通的网格构成。基于可视化图形界面来进行设定粗网格，为方便用户灵活快捷的设定粗网格，KYEYE 中使用了 7 个功能来灵活的进行粗网格设定，分别是：新建粗网格功能、合并粗网格功能、删除粗网格功能、按单个网格生成粗网格功能、按边界生成粗网格功能、粗网格中添加网格功能、粗网格中移除网格功能。

KYLIN- 程序将为不同的堆芯计算程序提供均匀化参数，目前为先进节块法堆芯三维少群中子学计算软件 CORCA-3D 提供每个栅元的均匀化参数，因此将涉及到栅元输出区域的编辑，类似于粗网格，KYEYE 软件同样提供 7 个类似功能来灵活的进行栅元输出区域的设定。

3 模块式的建模

对于网格数量较大且规则的反应堆几何图形，若在 AutoCAD 软件中采用“直接交互绘制出所有的边的方式”构建几何、网格、以及属性设定，对用户的工作量非常大，且容易出错，因采用模块式的建模方式（图 5）。首先提炼出单个规则的几何图形，先建立单个的模型，对于重复的结构只需要建立一次，然后应用填充技术或拼接技术组合成最终的模型。在模块式的建模过程中，提供了网格属性自动继承功能。当用户将单个模型的网格属性填写完整，拼接后将自动继承拼接之前的属性信息，减少用户后期网格属性填写的工作量。同时，程序提供了粗网格和栅元输出区域自动继承功能；当用户对单个模型构建了完整的粗网格信息和栅元输出区域，那么拼接后将自动继承拼接之前的粗网格信息和栅元输出区域，提高用户粗网格和栅元输出区域构建效率。

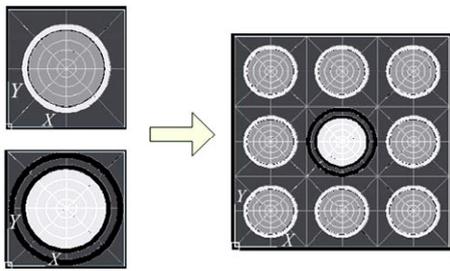


图5 模块式的建模方式示意图
Fig. 5 Modular Modeling Method

模块式的建模方式将大大提高大规模重复结构的组件几何建模效率。

4 KYEYE 软件的开发和测试

采用前述的网格自动识别算法、基于嵌套式的属性编辑模式、模块化的建模方式等技术，基于 AutoCAD 平台完成了面向反应堆中子学栅格计算软件的可视化图形建模工具软件 KYEYE 研发。KYEYE 软件的研发严格按照软件规范进行。KYEYE 开发完成后，进行了 3 轮功能覆盖性测试，对软件的 7 个大功能模块(含 76 个功能点)进行了详细的测试，测试结果表明，KYEYE 软件实现了需求分析报告中所有的功能点，图形界面友好，具备良好的人-机交互能力和快速的建模能力。

由于 KYEYE 软件是基于 AutoCAD 系统进行开发，具备完整的几何信息，因此，该软件能够支持多种几何的描述，目前 KYEYE 软件支持 KYLIN- 程序的点线网格结构的几何描述方式同时也支持 HELIOS 程序的基本结构组合方式的几何描述。

5 软件验证与确认

为了验证 KYEYE 软件建模的正确性，选取典型的压水堆 AFA3G 燃料组件^[1]问题和国际原子能机构 (IAEA) 基准例题^[7]进行建模，生成 KYLIN- 程序输入文件，通过 KYLIN- 程序计算结果的正确性来验证 KYEYE 软件建模的正确性。

对于栅元例题，几何图形如图 4 所示，应用 KYLIN- 程序计算，与手动建模计算结果一致。应用 KYEYE 软件分别建立 AFA3G 净组件、含硼组件和含钆组件类型，图 6 所示为应用 KYEYE

软件建立的 AFA3G 净组件示意图。应用 KYLIN-

对 KYEYE 软件生成的 3 种组件进行计算，由于此 3 个例题涉及的点、线、网格、粗网格数据量非常大，手工输入比较困难，因此采用 APOLLO2-F 程序对其进行对比验证，计算结果见符合较好(表 1)。对于 IAEA 基准题，应用 KYEYE 软件进行建模，KYLIN- 程序对无限增殖系数 (k_{inf}) 进行计算，与美国阿贡国家实验室 (ANL)、澳大利亚反应堆研究所 (ASTRA)、阿根廷国家原子能委员会 (CNEA)、APOLLO2-F 软件的比较，零燃耗时刻 k_{inf} 计算结果吻合较好(表 2)。

对于图 6 所示的 AFA3G 净组件例题，其网格规模为 4103，采用模块式方法进行建模，应用填充技术插入图形时间为 4 s，生成 KYLIN- 程序所需的输入文件为 1 s，图形综合检查时间为 3 s，满足工程实用性。

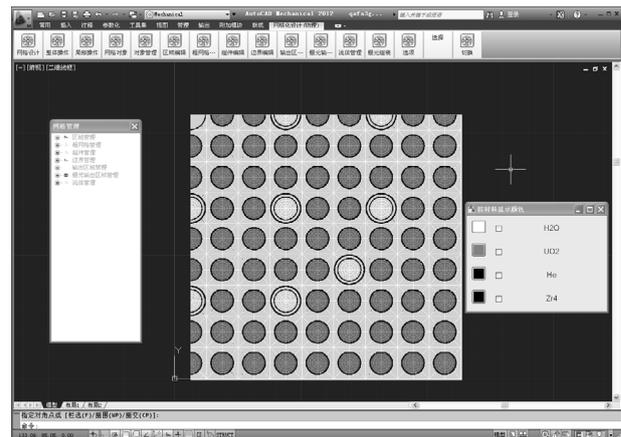


图6 利用 KYEYE 工具图形化建立 AFA3G 净组件问题
Fig. 6 KYEYE Interface to Create AFA3G Assembly Problem

表 1 KYLIN- 程序与 APOLLO2-F 计算结果对比
Table 1 Comparison between KYLIN- Program and APOLLO2-F Calculation Results

例题	KYLIN-	APOLLO2-F	相对偏差
AFA3G 净组件	1.24582	1.24445	0.11%
AFA3G 含硼组件	1.08876	1.08584	0.27%
AFA3G 含钆组件	1.1402763	1.13925	0.09%

表 2 IAEA 板型基准题 k_{inf} 计算结果及相对偏差
Table 2 k_{inf} Results and Relative Deviation of IAEA Plate Problem

KYLIN- k_{inf}	与 ANL 偏差	与 ASTRA 偏差	与 CNEA 偏差	与 APLLO2 偏差
1.65948	0.29%	0.15%	0.42%	0.24%

6 结束语

本文介绍了可视化图形建模工具软件 KYEYE 的关键技术和建模过程，充分利用 AutoCAD 几何描述的强大功能绘制几何图形，利用本文提出的网格自动识别算法、嵌套化的属性描述方法、模块式的建模方式，填充技术和拼接技术等先进技术能够准确且快速地建立各种复杂问题。对 KYEYE 软件进行了功能性覆盖测试，采用 KYEYE 软件建立若干压水堆燃料组件问题和 IAEA 基准题，应用 KYLIN- 程序对其进行了正确性测试，表明该软件能够准确且快速地建立各种复杂问题。

参考文献：

[1] 柴晓明，涂晓兰，郭凤晨，等. 先进中子学栅格程序 KYLIN-2 的开发与初步验证[J]. 强激光与离子束，

2017, 29(1).

- [2] 柴晓明，涂晓兰，芦蕻，等. 先进中子学栅格程序 KYLIN-2中特征线模块的开发与验证[J]. 核动力工程，2016, 37(4):154-159.
- [3] 柴晓明，求解三维中子输运问题的特征线方法研究[D]. 北京：清华大学博士论文，2010.
- [4] 张巍屹，王曙光，元买青. AutoCAD 2007 中文版标准教程[M]. 北京：清华大学出版社，2008.
- [5] 张居峰. 实体建模技术及其应用研究[D]. 西安：西安电子科技大学硕士论文，2014.
- [6] 孙家广. 计算机图形学新版[M]. 北京：清华大学出版社，2003.
- [7] Guidebook I. Research reactor core conversion from the use of highly enriched uranium to the use of low enriched uranium fuels guidebook[R]. IAEA TECDOC-233.1980.

(责任编辑：刘 君)