

参数化交叉及网格划分失败问题解析

筑信达 郭晓通

几何建模与网格划分是岩土工程数值模拟中重要的一部分，尤其对于那些几何元素数量多、类型复杂的工程而言，几何模型绘制、网格划分的准确程度是该工程问题能否准确高效地分析成功的关键因素。

对 PLAXIS 3D 而言，由于采用全四面体的实体单元网格结构与全封装式的自动网格划分求解器，用户能够更真实地模拟包含复杂空间曲面与体积的岩土体或结构对象。但与此同时，有些工程师在建立复杂模型时，由于几何建模的精确度、规则度不足导致进行参数化交叉计算进入网格模式时出错或在网格模式下划分有限元网格失败，又由于几何对象复杂或数量庞大导致在模型检查、调整方面花费巨大时间或找不到调整的方向。

同时，参数化交叉及网格划分问题相对更依赖于工程师对于 PLAXIS 3D 的使用经验，其解决方案相较于其它问题也更抽象，本文希望给工程师们提供一个解决该问题的整体思路与方向。

1. 参数化交叉问题解析

1.1 参数化几何图形与交叉

在 PLAXIS 3D 程序中，由于几何图形是基于使用参数来描述几何特性的数学方程，我们将其称为参数化几何图形。大部分几何对象的内部结构由三角形组成，以一个矩形面与立方体为例，分别由 2 个和 12 个三角形构成，如图 1。用户可以通过在命令栏输入“_dumpparamobject+几何对象”命令来获取某个几何对象的参数化几何特性。如果用户输入“_dumpparamobject+几何对象+true”，程序还会输出详细的对象参数化组成。如图 2，我们可以获取一矩形面对象的内部组成信息。

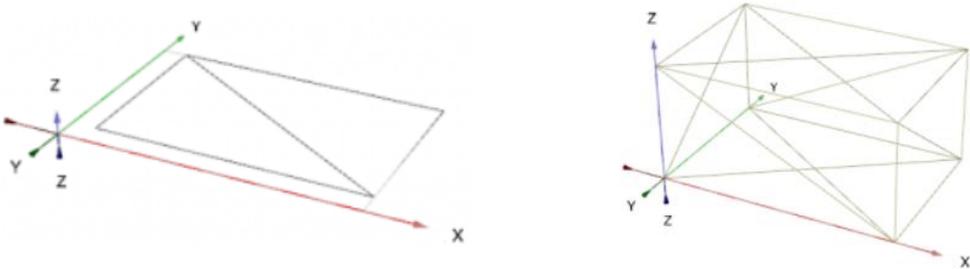


图 1 矩形面与立方体的三角形内部结构组成

```
__dumpparamobject Polygon_1 true
Type: WPolygon
Number of faces: 1
Number of triangles: 2
Area: 1188.0000000000000227374
Detailed face data:
Face 0000
Surface type: planar
Number of triangles: 2
Number of loops: 1
Loop 0000
Number of edges: 4
Edge 0000
Type: linear
Orientation: forward
Start: (75.0000000000000000 24.0000000000000000 -3.0000000000000000)
End: (52.0000000000000000 68.0000000000000000 -3.0000000000000000)
Length: 49.648766349225638805
Edge 0001
Type: linear
Orientation: forward
Start: (52.0000000000000000 68.0000000000000000 -3.0000000000000000)
End: (75.0000000000000000 78.0000000000000000 -3.0000000000000000)
Length: 25.0000000000000000
```

图 2 命令流获取几何对象参数化组成

当我们结束几何模型创建（土/结构模式）进入网格模式时，为了能够准确识别整个几何模型的某些部分，程序会将各几何对象做相互交叉运算，与结构模式下自带的“intersect and recluster”布尔运算工具类似，譬如通过交叉运算分离基坑、隧道模型中需要开挖掉的土体。

为了确保程序不会错误地更改几何对象，参数化交叉过程中组成几何对象的参数化三角形会被划分为若干部分，以分离相互切割后的几何体。在网格模式中，程序会使用最终参数化交叉计算完成后的几何体进行网格划分计算。

1.2 参数化交叉失败原因及解决方案

当两个几何对象的交集接近边缘时，就会变得复杂。以图 3 为例，一细长矩形面与另一矩形面相互穿插，且交线位置靠近细长矩形面的左边缘。参数化交叉计算时，组成细长矩形面的一个参数化三角形被另一个面切割成一个面积很小的三角形，当这个小三角形的尺寸低于 PLAXIS 3D 程序中使用的几何容差时，这个小三角形将会从整个几何图形中被过滤出来，导致交叉操作失败。同样的，如图 4，两条线之间的搭接，相互切割后可能会形成长度极小的线。亦或是两条线的端点之间的距离很近，但并未连接上，这都将会导致参数化交叉失败。

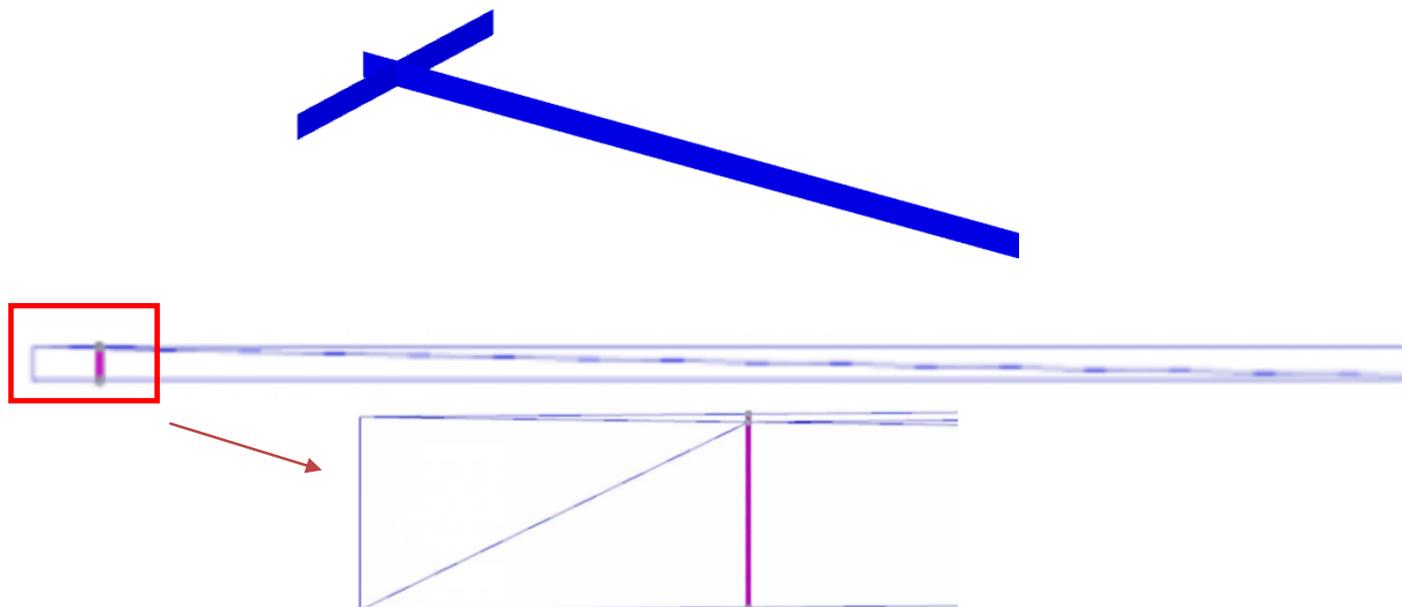


图 3 面与面的参数化交叉



图 4 线与线的参数化交叉

单纯的面与面、面与体、体与体之间的相交问题往往可以通过检查对象参考点的坐标来检查，或者在命令栏输入“tabulate+几何对象”命令获取几何对象的坐标信息。根据经验，更多的工程师遇到的是相邻几何对象距离过近的问题，且很多参数化

交叉问题都来源于外部几何对象的导入。这要求我们从外部导入模型时必须保证几何模型的精确度和不同对象间的连接性。那么，单独在 PLAXIS 3D 中如何检查并调整相邻对象的位置呢？

1、检查相邻对象及距离

在一个复杂的几何模型中，如何检查距离过近的几何对象？在最新版本的 PLAXIS CE V20 中，结构模式下竖排工具栏中提供了一个相邻对象的检查工具，用户可以直接点击获取。在之前版本中，用户可以输入“checkgeometry”命令，如图 5，程序会自动检查相邻的对象及距离。

```
checkgeometry
发现成对的相邻几何对象: 173
1.      Point_11      Line_140      1.3728249369970003E-10
2.      Point_12      Line_179      1.4551915228366851E-11
3.      Point_19      Line_155      1.6112591297908698E-9
4.      Point_22      Line_185      1.6445768191707341E-9
5.      Point_24      Line_9        1.9946776046218755E-11
6.      Point_27      Line_169      7.1659871913988198E-11
7.      Point_28      Line_3        1.4551915228366851E-11
8.      Point_29      Line_157      1.7032580087426506E-10
9.      Point_30      Line_104      2.9103830456733702E-11
10.     Point_31      Line_76       6.5078143306885312E-11
```

图 5 检查相邻的几何对象

2、量化的合并与捕捉

PLAXIS 3D 可以通过“选中对象→点击鼠标右键→合并相同对象/捕捉”操作来对模型中不精确的几何对象进行快速调整。许多 PLAXIS 3D 的用户在发生参数化交叉错误时也会尝试使用该功能。但该功能只针对距离在 0.001 内的对象，也就是说，如果两个对象的间距在 0.001 外，程序将不会识别。对此，PLAXIS 3D 提供了量化的捕捉与合并相同对象命令，用户可以通过输入“snap geometry+距离”命令来指定捕捉的最大对象间距，或是通过输入“mergeequivalents geometry+距离”命令来指定合并某距离内的相同对象。如图 6。

```
snap geometry 0.1
捕捉的 Point_19 到 Line_155
捕捉的 Point_20 到 Line_137
捕捉的 Point_24 到 Line_9
捕捉的 Point_28 到 Line_3
捕捉的 Point_31 到 Line_6

mergeequivalents geometry 0.1
已删除的 Point_180 (参照对象: Point_79)
已删除的 Point_230 (参照对象: Point_154)
已删除的 Point_232 (参照对象: Point_207)
已删除的 Point_265 (参照对象: Point_254)
已删除的 Point_337 (参照对象: Point_269)
```

图 6 定量捕捉与合并相同对象

此外，捕捉与合并相同对象命令可以对指定对象使用，如“mergeequivalents Point_1 Point_2 0.02”，意思是如果点 1 和点 2 距离在 0.02 范围内，则将点 1 合并至点 2。同样的，“snap point_1 line_1 0.01”，意思是把点 1 捕捉到线 1 上，公差为 0.01，“snap points lines”，意思是把所有点捕捉到线上。用户还可以通过“snap linear”命令来将一系列连接到线上的点捕捉到某个对象上，以此调整点和线的位置。

值得一提的是，捕捉与合并功能可以改变面和体对象的位置，但不会改变面和体的形状。由面和体的形状问题导致的距离过近须手动调整几何对象形状或进行重新建模。

2. 网格划分失败问题解析

当 PLAXIS 3D 网格生成器无法成功生成 3D 网格时，它将返回一个错误代码。通常，该错误代码是指 PLAXIS 3D 网格生成器内部过程中迭代过程无法成功创建 3D 网格的位置。同时程序一般会尝试提供一个提示，指明用户可以在何处优化几何体或调整局部网格的粗糙度，以便成功生成 3D 网格。用户在网格划分失败后，首先应查看错误提示内容，并对照提示查找模型中难以划分网格的位置或对象名称，进而进行网格密度或几何模型的调整。同时，随着版本更新，网格生成器的质量和稳定性在不断提高，许多老版本无法直接解决的网格划分问题可以通过新版本的网格生成器完成网格划分。

总体来讲，网格划分能否成功的主要因素是小的几何元素或密集与不规则的几何对象。

2.1 含小元素几何模型的网格划分

有时模型中包含非常小的几何元素。这些小元素通常会使网格生成过程变慢，甚至可能找不到好的网格解决方案。用户可以在网格模式下使用以下命令分别查找体积小于 1 或面积和长度小于 0.1 的单元：

```
tabulate Volumes "volume" "volume<1"
```

```
tabulate Surfaces "Area" "Area<0.1"
```

```
tabulate Lines "length" "length<0.1"
```

此外，网格模式菜单栏中的查看选项内提供了分离显示与归并工具，可以将几何体的各部分分开显示，我们可以使用该工具查找模型中存在的小对象及其形状特性。例如，图 7 所示的几何模型中包含了大量的小元素，设置分离显示后，我们通过框选其中的小元素并为其指定一个较小的网格粗糙度完成了该模型的网格划分。

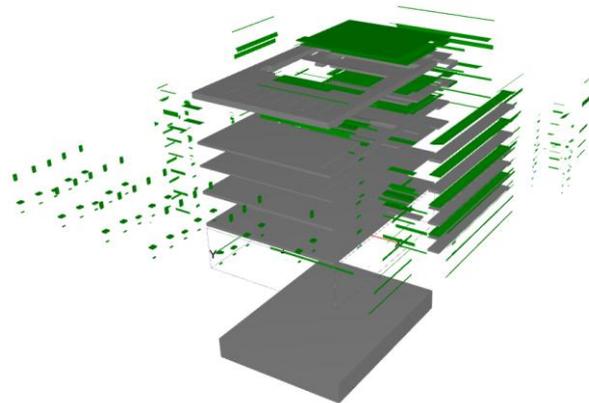
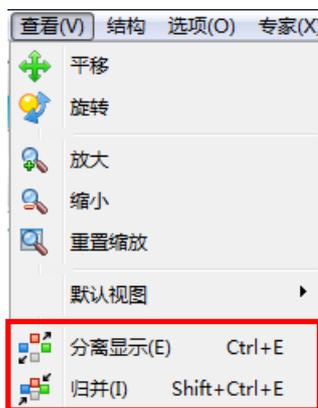


图 7 通过分离显示检查小对象

通常，对于含小的几何元素的模型，我们还需要查看小元素出现的原因。

如果是几何建模过程不精确导致的，我们需要重新返回结构模式进行几何模型的调整，确保几何对象间的连接与交叉不会导致小元素的继续出现，譬如锚杆与板单元并未连接上，虽然满足容差通过了参数化交叉的部分，但会造成网格划分的困难。如果小的几何元素是模拟某实际工程必须存在的，那么尽可能地把小元素的网格粗糙度调小，如果某元素面积或体积特别小，那么在为其单独指定一个小的粗糙度的同时，也须为与该元素连接的对象进行网格加密处理，以防止由于连接对象的网格密度差距导致的网格划分失败。

2.2 密集或不规则几何对象的网格划分

密集分布或形状不规则的体对象常常会引起网格求解器求解困难，例如空间中复杂的曲面围成的体，极薄或形状不规则的土层，某范围内的密集桩群等等。

这时候，我们可以通过创建辅助面的方式把几何对象密集的区域分块或把不规则的体对象切割来达到辅助求解器进行网格求解的目的。相比由小元素引起的网格划分失败问题，密集或不规则几何对象引起的网格划分问题往往具有多种解决方法，但思路与方向是大致相同的，就是通过辅助面的创建，将复杂不规则的对象切割简化，将密集的几何对象隔离分区。下面有几个典型的含密集或不规则对象的网格划分例子：

图 8 为一含不规则面的边坡体模型，其上表面为由地形资料转化建立的曲面模型，对于此类问题，网格求解器有时候很难直接得到网格划分方案，此时，我们在 X-Z 和 Y-Z 平面内均匀创建 10 个面对象，并与该体对象做交叉运算。将该不规则体对象切割，切割后的边坡体对象变成了 20 个小的体对象，如图 9。如果必要的话，可以为切割后体积较小或局部规则度差的单元单独指定一个网格粗糙度。此时模型便可以成功地完成网格划分。

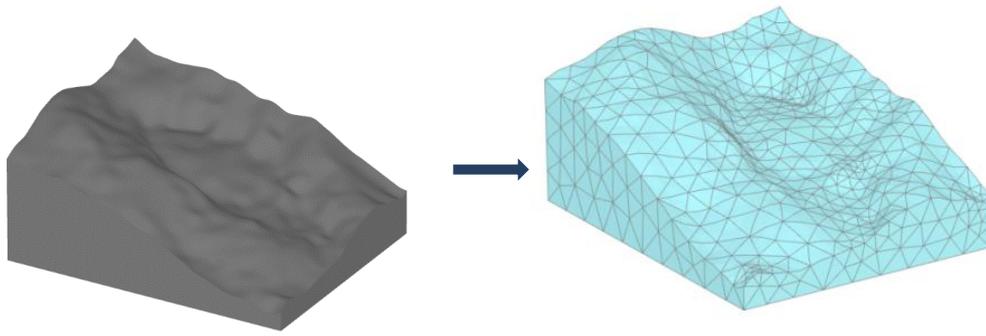


图 8 含复杂曲面的体对象

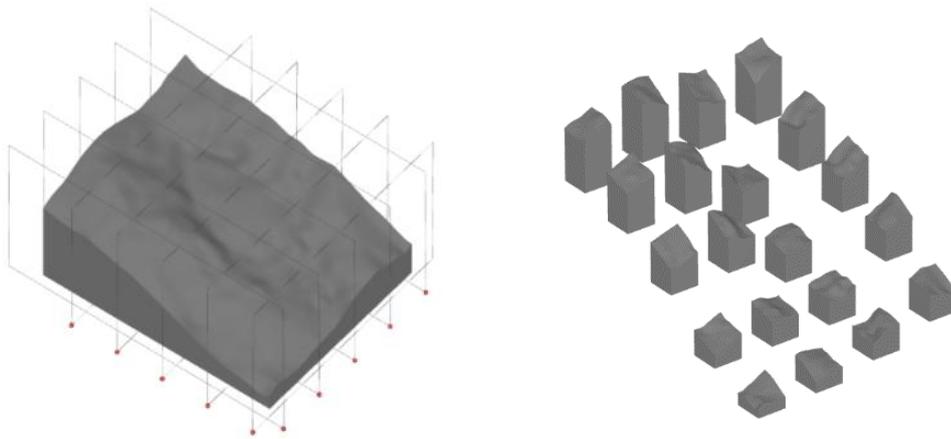


图 9 创建辅助面进行体对象切割

图 10 为土层内一长而细的柱形倾斜管道，管道左右两侧与土层边界完全贴合，模型看似较为简单，但在边界位置处倾斜的管道与土层参数化交叉后很容易形成小角度的三角单元造成网格划分困难，且细长的管道体对象本身便是不容易进行网格剖分的。与上一个模型类似，我们沿着该管道创建辅助面，然后将辅助面与管道面进行交叉运算将管道切割（如图 11），再为各节管道设置一个小的网格粗糙度，与模型边界相邻的管道两端的体对象网格粗糙度应该更小。做辅助面切割调整后，该模型便可以成功的划分网格。

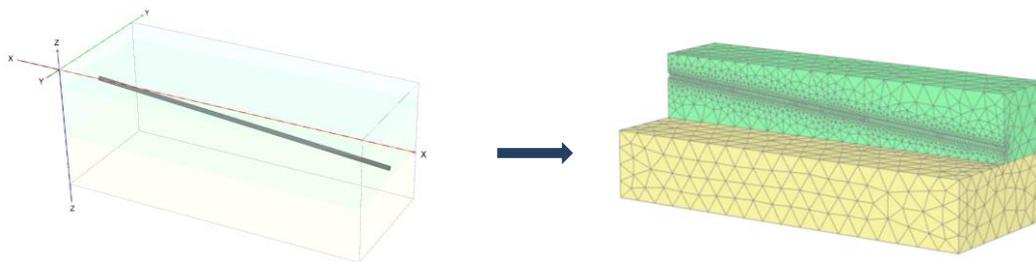


图 10 土体中的细长管道

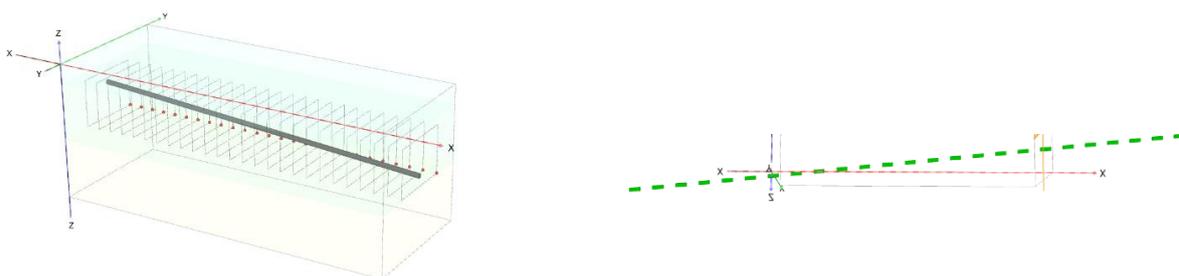


图 11 沿管线长度进行切割处理

图 12 为一基坑旁边的桩群模型，桩全部采用实体单元模拟，调整前无法进行网格划分。这时，我们可以首先创建四个面把密集的桩体围成一个区域，这个区域可以称为一个几何对象密集区，需要指定一个比周边区域更小的网格划分密度做网格划分尝试。接下来，倘若仍不能完成网格划分，我们可以创建与 X-Z 和 Y-Z 平面平行的几组面将该桩体密集区均匀切割（如图 13），再为每一个切割后的小块体指定一个更小的局部粗糙度。同时，内部桩体、桩体密集区、外部土体三者间的网格密度差不宜过大，以使各区域网格能平滑均匀地过渡。

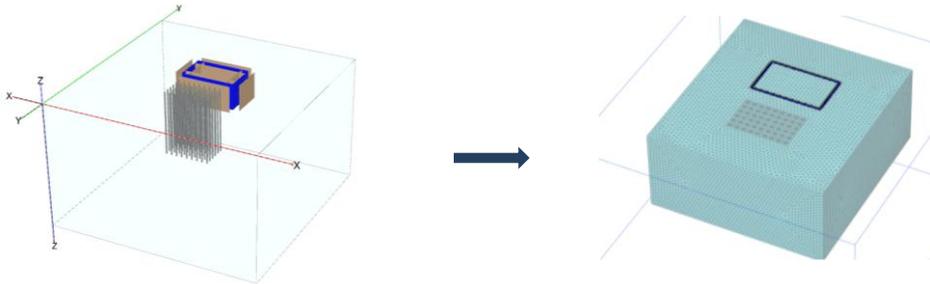


图 12 基坑周边群桩模型

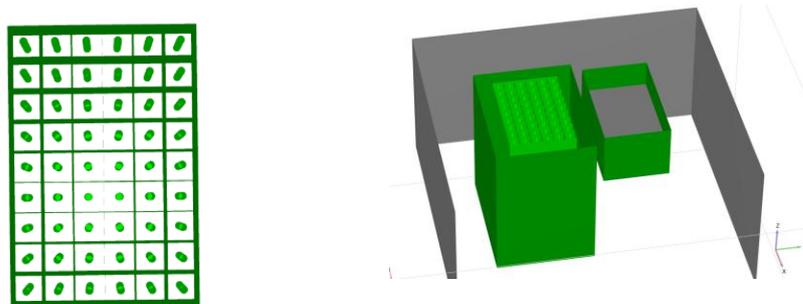


图 13 桩体密集区的切割分块

几何特征为线对象的结构单元的密集堆积一般可以通过指定局部区域粗糙度来完成网格划分，与上面密集群桩的方法类似，但密集结构单元的不规则空间分布状态有时候很难通过调整完成网格划分。常见的，一些工程师用梁单元模拟市政工程中密集交错的地下管线，如图 14。此时，我们最好针对该工程问题进行相应的简化处理，譬如相互之间无影响或影响小的管线，可以分批次建模计算，位置相近或受力状态接近的管线，可以合并作为一根管线进行研究。

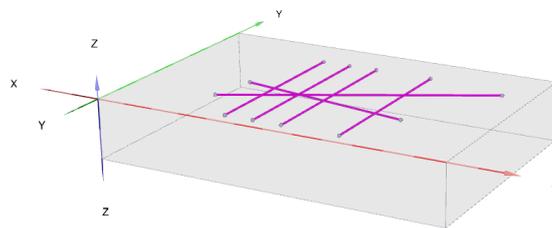


图 14 土体中交错分布的管线

3. 小结

参数化交叉与网格划分问题其实是相互关联的，参数化交叉是几何模型精确度的初步检验。在满足程序对于参数化交叉要求的基础上，在网格模式中进行有限元网格的处理与优化，从而得到更精确与高质量的有限元网格模型，快速精准地完成有限元分析计算。

用户在了解、学习本文中提到的一些技巧与思路的基础上，通过工程项目实践不断地积累软件操作经验，便可以熟练地掌握 PLAXIS 3D 中的几何模型调整与网格划分技巧，避免被参数交叉或网格划分失败问题影响工作效率。