

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.04.019

水电工程数值模型快速查错方法研究

王秀菊

(南京交通职业技术学院, 南京 211188)

摘要: 针对土木工程领域的地质模型构建了基于六面体连续数值模型的快速查错方法。该方法首先进行六面体有限分割, 得节点及单元索引信息, 再将每个单元拆分为6个空间面元结构, 分为公用面元与独享面元两类, 利用单元的节点坐标、网格拓扑关系进行自检索, 将可能存在错误的独享面元输出至 AutoCAD 中进行可视化显示。案例分析表明: 该方法效率高, 可使模型中的错误一次性显现, 然后对照错误出现位置在模型中进行一次性修改, 达到省时省力的目的。研究的方法是连续数值模拟前处理的有效补充, 可避免因几何联结不当引起的计算结果失真。

关键词: 连续数值模型; 六面体单元; 3DFACE; 查错与纠错

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)04-0092-04

Rapid Error Checking Method of Continuous Numerical Model of Hydropower Project

WANG Xiuju

(Nanjing Communications Institute of Technology, Nanjing 211188, China)

Abstract: A rapid error checking method of geological model in civil engineering is proposed based on hexahedral finite elements. Firstly the node and element index information of each unit is split into six space surfaces, then it is divided into common surface element and special surface element, by means of the coordinates of nodes and topological relation errors is self-checking and all special surface element is written to AutoCAD by 3DFACE in order to locate the errors. The case analysis shows that the method is in high efficiency, which can make the model errors appearing at the same time, then help to modify the geometry location in numerical model. This method can cost little time and avoid the calculation distortion caused by improper connection results, and is a effective tool for pretreatment of continuous numerical simulation.

Key words: continuous numerical model; hexahedron element; 3DFACE; error searching and error modification

有限单元法^[1]、有限差分法^[2]等连续数值计算是复杂土木工程分析的重要工具, 在力学计算与分析中有举足轻重作用。在复杂条件下如大坝坝肩、大型地下洞室、复杂构件的模型构建中, 由于构筑

物的复杂几何条件、结构面空间交切关系影响, 稍有不慎即可能导致模型出现错误, 使计算结果失真, 甚至无法计算^[3]。为了搞清错误的来源, 常规的方法是从点-线-面建模历程中进行检查, 且要按照一定的顺序进行遍历, 如沿着模型的坐标轴方向逐点、逐线、逐面检查; 若模型存在多处错误需逐项排除, 多次反复, 对于简单的有限元模型相对容易, 若有限元几何图元较多, 模型节点、单元数目上万甚至几十万、上百万, 采用人工遍历的模型查错方法就显得力不从心, 不仅耗费大量的时间, 多次的返工还会造成研究工作者失去耐心^[4-6]。

对于复杂几何模型, 将这些由于操作失误导致的错误显示出来以便于修改与纠错, 是十分困难的

收稿日期: 2015-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(No. 51309089)“基于细观特征分析的冰水堆积体渐进破坏机理多尺度研究”; 江苏省基础研究计划(自然科学基金)(No. BK20130846, “高速公路层状软弱岩质边坡水弱化灾变演化机理研究”)联合资助。

作者简介: 王秀菊(1981), 女, 山东蓬莱人, 副教授, 硕士, 主要从事土木工程领域的数值分析理论与实践研究(e-mail) wangxiujuhf@126.com。

事情。本文基于六面体连续数值模型，基于数据索引结构，建立了一种快速寻找错误，利用 Autocad 进行错误显示的方法，并通过案例进行了有效性验证，是现有连续数值模型前处理的有效补充。

1 连续数值模型的数据索引结构

连续数值模型(三维)是将复杂的几何地质体，通过共用二维图元划分为多个区域，然后对每个区域进行有限网格划分，赋予不同属性后模拟外力作用下的系统响应。本文建立的模型查错方法是基于已划分好的有限网格信息，故需对地质体采用六面体(或退化的六面体、四面体)进行网格剖分。

对已剖分网格的数值模型信息进行归类，得到节点信息和单元结构信息，包括节点(np)和单元数目(ne)，节点坐标，单元结构形状，由节点编号构筑成的单元索引信息等。

连续数值模型通过节点坐标，单元索引信息，使得各单元间进行力的传递与作用，其中如图 1 所示六面体单元是最常见的一种单元形式，每个 6 面体 8 节点有限元网格对象可画出如图 1 所示空间单元体，规定编号顺序遵循先下后上和逆时针顺序，则单元结构由局部节点编号构筑可写为：12345678，并由单元节点的全局编号得其空间位置；该单元有可以有多种退化形式，退化单元通过重复节点仍由 8 节点构成，如图 2 所示三棱柱单元 34、78 共节点，因此网格结构可退化为 12335677。图 3 所示四面体单元 34 节点重合，5678 四点重合，其网格结构退化为 12335555。其它类型的六面体退化单元以此类推。

每个体单元可视作由 6 个面元构成，对图 1 中 6 面体单元结构进行拆分可得 6 个空间面元结构，对每个面元按照顺序编号可写为：①1234，②1562，

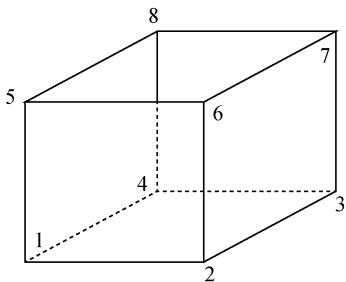


图 1 六面体单元

Fig. 1 Hexahedron element

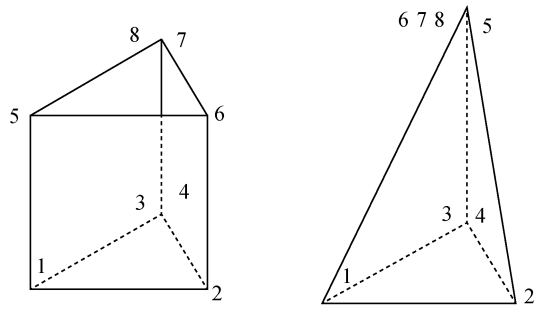


图 2 三棱柱单元

图 3 四面体单元

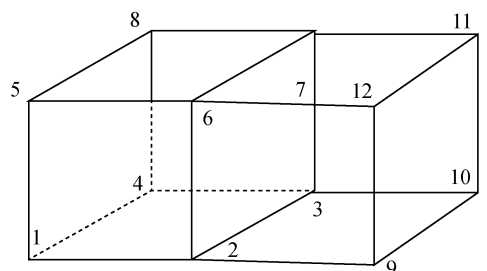
Fig. 2 Triangular prism element Fig. 3 Tetrahedral element

③2673，④1485，⑤3784，⑥5876，逆时针或顺时针顺序均可。如图 2、图 3 所示退化三棱柱单元、四面体单元等形式，也可采用以上方法表示。则 ne 个单元可划分为 $6 * ne$ 个面元。

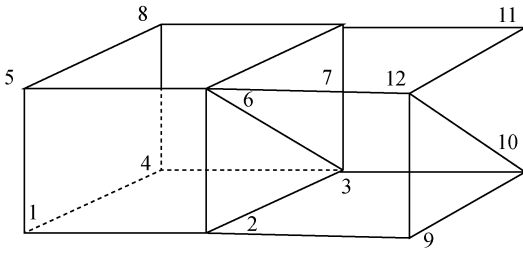
在 $6 * ne$ 个面元中首先进行面积检索，找到面积为零的面元(即退化为直线或点的面元)，设为 n_0 个，标记不参加查错。

根据空间节点坐标矩阵，搜索出 x 方向最小、最大边界坐标 $xmin, xmax$ ， y 向最小、最大边界坐标 $ymin, ymax$ ， z 向最小最大边界坐标 $zmin, zmax$ 。设置一较小容差($tol \approx 0.01$)，在 $6 * ne - n_0$ 个剩余面元中进行检查，若面元上 4 个节点的坐标与 $xmin$ 之差小于容差，表明该面元为模型左边界，相似得出右边界、前边界、后边界及模型底边界，若 z 向正方向非自由表面也可得出上边界。设符合边界检索的面元数目为 n_1 个，标记不参加查错。

在剩余的 $6 * ne - n_0 - n_1$ 个面元中，若某一面元被两个及以上单元公用，如图 4(a)所示，2376 面元为两单元公用，则该面元为单元间正常连接，不需参与下一步查错。若某一四边形面元与两三角形面元属性相同，如图 4(b)所示，则也可视为正常连接(这在数值模拟中是允许的)。分析每个面元的属性，若该属性为两个及以上单元共有，则该面元的属性无错误，不需参与查错；



(a) 两单元公用连接



(b) 四边形面元与两三角形面元连接

图4 正确的单元联结关系

Fig. 4 Element connection of correct elements

CAD 中,对错误进行归类、定位,依据错误修改模型。3DFACE 是 AutoCAD 软件中的一种空间图元^[7],它由 4 个点的坐标构成,4 点顺序可逆时针或顺时针,也可相邻点坐标相同退化为 3 点。如图 1 所示的实体单元,可视为 6 个面元围成,因此将任意面元按照 AutoCAD 软件规定的格式写成文件,即可实现数值网格中面元的可视化显示。

2 错误几何索引特征与显示

通常,在数值建模过程中,最容易出现的错误可分为如下五类:

- 1) 建模时体和体之间不共面。
- 2) 某一体未划分网格。
- 3) 模型单元手动编号时,单元节点编号不合有限元规则。
- 4) 边界条件不平齐一致。
- 5) 非节理位置出现类似节理面分布的面元。

在这些错误中,第一类错误将会在各面间产生一系列独享面元,第二类错误则会在未划分体的边界上产生独享面元,第三类错误由于规则不同,面元属性与正常连接不同产生独享面元,第四类错误则会造成部分边界面元缺失、或部分独享面元的某个坐标不在边界上,而第五类错误会在相邻几何体接触边界上产生独享面元,如其非预设的节理单元应视为错误。以上五类问题均会产生独享面元,因此只要将独享面元的位置进行定位,根据这些独享面元属性,提示单元错误原因,即可进行归类。完整的独享面元搜索技术路线如图 5 所示。

3 实例研究

某水电站调压井工程区复杂结构三维有限元模型^[8]查错分析,模型包括微新岩体、弱风化下层岩体、弱风化上层岩体、强风化岩体、断层 F20、F21、F22 等岩层,地下构建筑物包括 3 个调压井、3 条尾水隧道、9 条尾水隧洞、连通上室等,示意图如图 6 所示。在初次建模完成后采用数值软件试算无法通过,系统提示局部变形过大,疑似模型存在问题。

采用本文建立的模型查错流程,首先将有限元网格信息归类为节点信息和单元结构信息,包括节点和单元数目,节点坐标,单元结构形状,由节点编号构筑单元结构的信息;总节点数目为 38 954 个,总单元数目为 184 336 个。

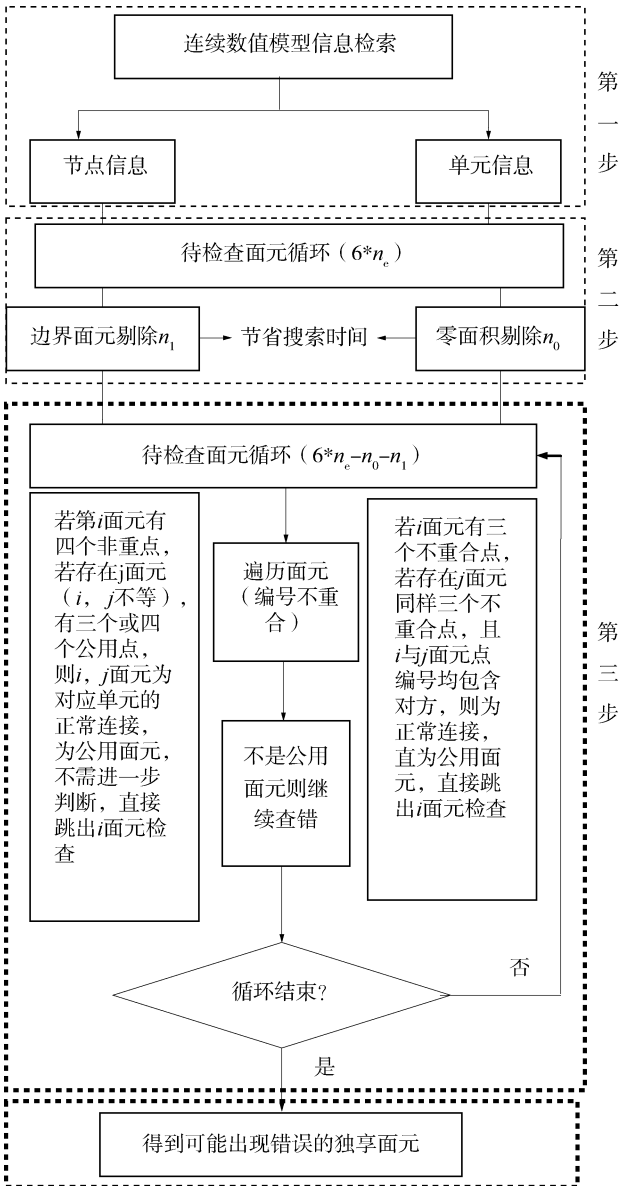


图5 独享面元搜索流程

Fig. 5 Procedure of error searching

面元遍历完成后,所有公用面元与独享面元即被区分开。检查独享面元的分布并输出到 AUTO-

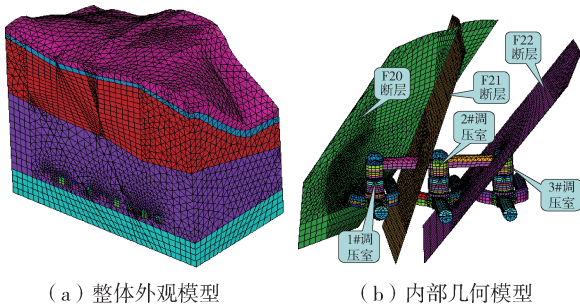


图6 拟建数值模型

Fig. 6 The proposed numerical model

将四面体单元、三棱柱单元均转化为六面体8节点单元形式。将每个六面体8节点单元拆分为6个空间面元，分析每个面元的属性，并剔除具有明显特征的面元(零面积及边界面元)。

进行网格自检索。并将所有独享的面元写到AutoCAD文件中3DFACE中，为方便显示，隐去前后边界上的面，显示模型内部独享面元信息出现如图7所示独享面元，经检查为建模时材料交界面存在误差，两种材料间产生了0.1 m左右的孔隙，划分网格时不共面引起。

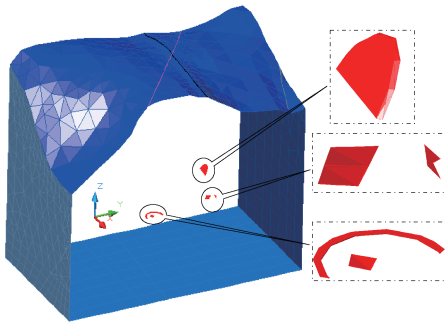


图7 检查出现错误的模型

Fig. 7 The 3DFACE of a model with errors

对模型修改，将原模型产生独享面元位置的空间面坐标进行校核，使交界面网格共面，修改后重新采用本文所提方法进行查错，得到无错误信息的检查结果如图8所示。查错共耗时35 min。

4 结论

本文针对土木工程领域的地质模型，首先进行有限分割，得到其节点及单元信息，再利用网格结构，通过单元的节点坐标、网格结构关系进行自检索，使可能出现错误的位置列出，从而可在模型中进行一次性修改，可省事省力地对连续数值模型进行错误自检索。

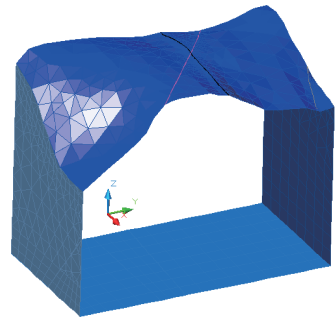


图8 修正后正确模型查错信息

Fig. 8 The 3DFACE of a model without errors

经本文检查无错误的网格，在计算后不会因几何模型错误造成计算结果失真，保证了力学分析计算与材料力学特性、网格质量等相关，而不受人工建模误差影响。采用该方法对连续数值模型查错的优点在于：

1) 对地质模型进行有限分割，然后基于网格结构信息自动检索，克服了人工查错容易犯错的困难。

2) 可省略人工由点-线-面-体逐个排查几何错误的工序，从而节约时间，模型越复杂，节约时间越多。

3) 确保数值计算无单元联结不当情况，保证了连续数值方法计算结果的正确性，如果是非连续数值模型，只要确保是预先设置的结构面，也同样可以采用本文方法进行几何错误检查。

参考文献：

- [1] 王勖成. 有限单元法 [M]. 北京：清华大学出版社，2003：5-100.
- [2] Itasca consulting group inc. Fast lagrange analysis of continua in 3 dimensions: user's manual [K]. Rev. 3, U. S. A: Itasca Co., Ltd., 2005: 5-100.
- [3] 魏刚，李子琼. 如何查找有限元模型中的错误 [J]. 机械设计与制造，1998(6)：12-13.
- [4] 马长年，徐国元，江文武，等. 复杂开挖过程FLAC3D力学仿真代码生成系统研究 [J]. 岩土力学，2012，33(8)：2536-2542.
- [5] 罗周全，吴亚斌，刘晓明，等. 基于Surpac的复杂地质体FLAC3D模型生成技术 [J]. 岩土力学，2008，29(5)：1334-1338.
- [6] 刘晓明，罗周全，杨彪，等. 复杂矿区三维地质可视化及数值模型构建 [J]. 岩土力学，2010，31(12)：4006-4011.
- [7] 李晨. 用VC实现基于DXF文件的AutoCAD数据共享接口 [J]. 工业控制计算机，2010，23(4)：76-77.
- [8] 聂卫平，郑文棠. 基于地质和监测资料的地下洞室数值仿真核型概化分析 [J]. 南方能源建设，2016，3(4)：96-101.