

用 AutoCAD 开发环境研制 有限元平面问题的前处理系统

陈水生

(土木工程系)

摘 要 本文提出了用矢量点乘及叉乘搜索极小封闭区域的算法,把每个极小封闭区域作为一个超单元,采用双线性插值方法,把每个超单元转化为局部坐标系下的规则正方形,按等分的方法对正方形进行网格的自动划分,同时记录局部坐标系下的结点及单元信息,然后又采用双线性插值的方法,把局部坐标系下的单元及结点信息转化为整体坐标系下的信息¹⁹。约束、荷载及材料参数均采用交互方式输入,用户不需填写任何数据文件,做到真正的图数一体化¹⁹。

关键词 AutoCAD;超单元;有限元;前处理

分类号 TV 318.01

0 引 言

随着计算机的日益发展及有限单元方法的出现,使解决复杂的力学问题成为可能,各种用于解决力学问题的有限元程序也不断出现,然而填写有限元程序所需要输入的数据文件却困惑着广大的力学工作者¹⁹。为此,90年代初国外学者做了不少工作,也出现了各种有限元前后处理软件,然而它们有一个共同的缺点:前处理的输出数据文件只适用于特定的有限元分析程序,用户无法用于自己研究的问题所开发的程序¹⁹。因为,每个力学课题所研究的问题不一致,所以,它们所需的输入数据文件的格式可能不一致,更因为每个人自己开发的程序风格各异,所以,至今没有为大家接受的标准的输入数据格式¹⁹。

市面上现有的前处理软件多采用自己开发的图形界面,独立性较强,然而,却耗费了大量的人力、财力,而且开发出来的界面有较大的局限性,功能较弱,约束较多¹⁹。而 AutoCAD 是当今公认的适合各行各业优秀图形制作与开发平台,功能强大,日趋成熟,尤其 AutoCAD 的 ADS 开发环境为广大的科技工作者提供了二次开发的广阔天地,国内有不少学者已认识到并组织了人员进行 ADS 的开发工作¹⁹。本文采用 AutoCAD 的 ADS C 语言环境研制了有限元的前处理程序,输出数据文件采用可读的文本文件¹⁹。

1 用矢量的点乘和叉乘搜索结构的极小封闭区域

1.1 矢量的点乘和叉乘

设有三维矢量 $A = (ai + bj)$, $B = (ci + dj)$,

$$A \cdot B = \cos \theta |A| |B| = ac + bd, \quad \theta \text{ 为 } A, B \text{ 两矢量的夹角}^{(13)}$$

$$\text{故 } \theta = \arccos[(ac + bd) / (|A| |B|)], \quad \theta \in [0, 180^\circ]$$

$$A \times B = adk - cbk = (ad - cb)k^{(13)}$$

即 若 $ad - cb > 0$, 则 A 矢量按右手螺旋逆时针旋转到 B ,

如图 1 示的 $A_1 \times A_2^{(13)}$

若 $ad - cb < 0$, 则 A 矢量按右手螺旋顺时针旋转到 B ,

如图 1 示的 $A_3 \times A_1^{(13)}$

若 $ad - cb = 0$, 则表示 A, B 两矢量是平行的⁽¹³⁾

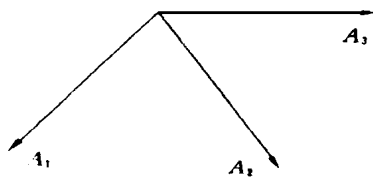


图 1 矢量的点乘与叉乘

1.2 矢量的点乘和叉乘在结构的极小域搜索中的应用

所谓极小域的搜索即在多个封闭的区间找到所有的极

小面积的闭合区域⁽¹³⁾如图 2 示有三个区域是我们希望找到的, 由 1, 2, 3, 4 结点组成的区域, 由 3, 4, 5, 6 结点组成的区域, 由 3, 6, 7, 8 结点组成的区域⁽¹³⁾而 4, 5, 7, 8 结点组成的闭合区域却是我们不愿意找到的⁽¹³⁾同时, 它们有这样的共性, 如果是按顺时针方向搜索, 后一条边矢量与前一条边矢量叉乘的 K 方向的值均为负值, 如果是按逆时针方向搜索, 后一条边矢量与前一条边矢量叉乘的 K 方向的值均为正值⁽¹³⁾设 Z 轴垂直纸面向外⁽¹³⁾

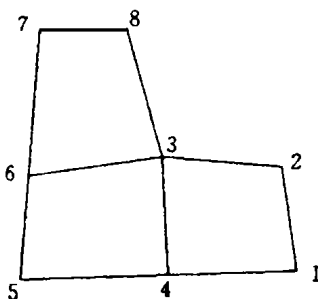


图 2 搜索极小闭合区域

如图 2 示, 从 1 点开始搜索到 2 点, 沿 2 点搜索到 3 点, 此时首先求出矢量 A_{23} 与 矢量 A_{21} 的叉乘的 K 方向值的正负号⁽¹³⁾从图 2 可以判断此方向为正值⁽¹³⁾此时 3 点的邻点有 8, 6, 4 三点, 按以上的分

析知道需要找的点 N 与 3 点组成的矢量 A_{3N} 与 A_{32} 的叉乘的 K 方向值也必须是正值, 故较快的判断 8 点不满足需要可以排除, 而 4, 6 两点均满足, 然后用矢量点乘求出矢量 A_{34} 与 A_{32} 及 A_{36} 与 A_{32} 之间的夹角, 比较它们的大小⁽¹³⁾当然, 与前一条边的夹角越小, 则越有可能构成极小封闭域, 故 4 点是我们需要的⁽¹³⁾

但是, 在搜索之前根本无从知道是逆时针还是顺时针搜索, 对此, 在开始搜索之前, 我们并不确定搜索方向, 当找到了第 3 点时, 依三点的顺序组成的两矢量便可以求当前的搜索方向, 然后按此方向搜索⁽¹³⁾如果找不到满足要求的点, 则返回第一个有多个邻点处, 改变搜索方向, 直到搜索成功, 可以归纳为以下算法步骤:

- (1) 对结构的所有结点编号并记录它们的坐标, 并标记为 0;
- (2) 任找一个标记为 0 的点, 记为 N_1 , 如果找不到这样的点, 则转步骤(7);
- (3) 任找 N_1 的一个相邻点记为 N_2 ;

4. 查 N_2 点是否有多个相邻点, 若有则记下此点号及坐标, 任找 N_2 的一个相邻点, 记为 N_3 ;

- 计算 $A_{N_2 N_3} \times A_{N_2 N_1}$ 的 K 方向的值的正负,从而确定当前的搜索方向是顺时针还是逆时针;
- (5) 以 N_3 点为始点,搜索 N_4 点,使得 $A_{N_3 N_4} \times A_{N_3 N_2}$ 的 K 方向正负号与步骤(4)相同⁽¹³⁾若没有这样的点,则返回第一个有多个邻点的点处,改变搜索方向;若有多个这样的点,则选择与前一条边夹角较小者;
- (6) 当前找到的点是否为 N_1 ?
- Yes:记录此轮搜索的所有点,做为构成一个极小域的点,并将其标记为 1,转步骤(1);
- No:重复步骤(4)
- (7) 结束⁽¹³⁾

2 有限元网格的自动划分

2.1 概述

有限元网格自动划分就是根据结构的几何特征,通过极小量的输入信息,自动形成有限元程序所必需的单元及结点坐标信息⁽¹³⁾在有限元网格的各种划分方法中,从形成网格的区域来说可以分为整体法和分区法,从形成网格的坐标空间来说可分为直接法和变换法⁽¹³⁾本文首先将结构按分区法分为若干子区域(极小域),然后对各子区域用变换法求出规则区域网格结点的局部坐标,然后通过坐标变换求出结点的整体坐标⁽¹³⁾

2.2 平面超单元的变换划分法

根据结构的几何外形、内部材料,按本文 1 节提供的算法求出所有极小封闭区域,总可以通过添加直线段的办法,使每个极小域由四个结点唯一确定,每个极小闭合域即为一个超单元⁽¹³⁾

2.2.1 网格结点的局部坐标及整体坐标

如图 3 示,超单元的几何外形可以用 4 点唯一确定⁽¹³⁾假定相对边上生成的结点数相等,

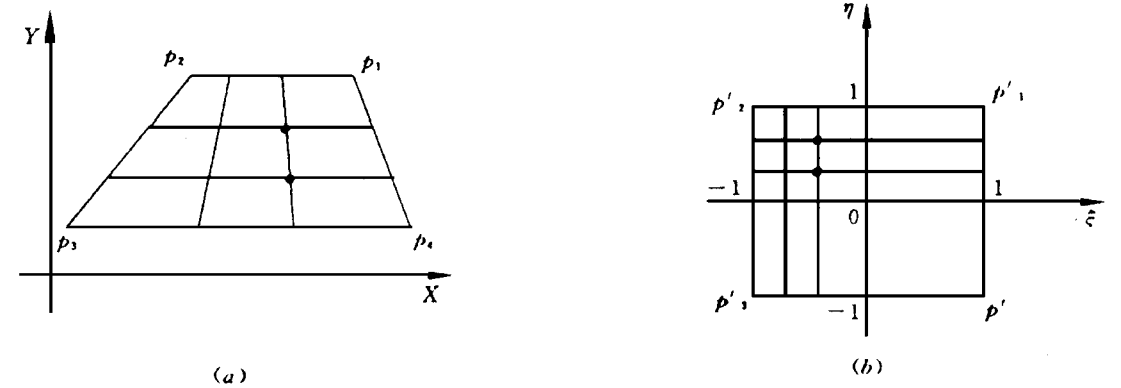


图 3 整体坐标系与局部坐标系的对应关系

将超单元变换为规则正方形,其局部坐标如图 3(b) 示,这时超单元的 $p_1 p_2$ 、 $p_2 p_3$ 、 $p_3 p_4$ 、 $p_4 p_1$ 、边分别对应正方形的 $p'_1 p'_2$ 、 $p'_2 p'_3$ 、 $p'_3 p'_4$ 、 $p'_4 p'_1$ 边,假定 n 为 $p_1 p_2$ 边即正方形的 ξ 方向要生成的结点数, m 为超单元的 $p_2 p_3$ 边即正方形的 η 方向要生成的结点数⁽¹³⁾为了求出超单元中各网格结点的整体坐标,首先必须求出正方形中对应网格结点的局部坐标 ξ, η 正方形中任意一点 p_{ij} 的局部

坐标为

$$\left. \begin{aligned} \xi &= -1 + (i-1) \frac{2}{n-1}, \\ \eta &= 1 - (j-1) \frac{2}{m-1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m$ (13)

而超单元中对应网格结点的整体坐标为:

$$\left. \begin{aligned} x &= \sum_{a=1}^4 \Phi(\xi\eta) x_a, \\ y &= \sum_{a=1}^4 \Phi(\xi\eta) y_a \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\Phi = \frac{1}{4}(1 + \xi\xi)(1 + \eta\eta)$, $a = 1, 2, 3, 4$ 为坐标插值函数; ξ, η 为对应网格结点的局部坐标; x_a, y_a 为超单元的四个已知结点坐标 (13)

当结构的外形呈二次曲线形状时, 则由 4 个结点难于唯一确定 (13) 详情请参阅文献 5 (13)

2.2.2 结点、单元编号及单元信息的定义

在超单元变换法中, 网格的结点编号、单元编号及单元信息均可以在局部坐标系下的规则正方形内定义 (13) 在程序设计中, 一般先求出局部坐标系下的网格结点坐标, 再变换到整体坐标 (13) 对生成不同的单元类型, 定义的方式不同 (13) 本文以生成八结点四边形单元为例说明 (13)

假定结点及单元的自动编号均从 $\eta = 1$ 到 $\eta = -1$, 再从 $\xi = -1$ 到 $\xi = 1$, 那么网格内任一点的编号为

$$N_{ij} = \left[\left[\frac{n}{2} \right] + (n+1) \left(i - \left[\frac{i}{2} \right] - 1 \right) + j, \quad i = 1, 3, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \right. \\ \left. n \cdot \frac{i}{2} + \left[\frac{n}{2} \right] + 1 \left(\frac{i}{2} - 1 \right) - \left[\frac{j}{2} \right] + j \right] \quad (13) = 2, 4, \dots, m-1; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中 m, n 分别为超单元对应 η, ξ 方向的划分结点数, 只可能是奇数, 符号 $[]$ 表示取整 (13)

如图 4 示, 设 $n = 9, m = 7$, 当 $i = 3, j = 4$ 时有:

$$N_{3,4} = \left[\left[\frac{9}{2} \right] + 9 + 1 \left(3 - \left[\frac{3}{2} \right] - 1 \right) + 4 \right] = 18$$

如果假定单元的自动编号顺序和结点编号

顺序一致, 则网格内任一单元的编号为

$$M_{k,l} = \left[\frac{n}{2} \right] (k-1) + l, \quad (4)$$

$$(k = 1, 2, \dots, \left[\frac{m}{2} \right]; l = 1, 2, \dots, \left[\frac{n}{2} \right])$$

对应的相关结点编号

1	3	5	7	9
①	② 19	③ 20	④ 21	
⑤	⑥ 26	⑦ 27	27	
	33	34	35	

图 4 单元及结点编号

$$\begin{matrix} E_{k,l} = & (N_2(k-1) + 3, 2(l-1) + 3) & (N_2(k-1) + 2, 2(l-1) + 3) \\ & (N_2(k-1) + 1, 2(l-1) + 3) & (N_2(k-1) + 1, 2(l-1) + 2) \\ & (N_2(k-1) + 1, 2(l-1) + 1) & (N_2(k-1) + 3, 2(l-1) + 1) \\ & (N_2(k-1) + 3, 2(l-1) + 1) & (N_2(k-1) + 3, 2(l-1) + 1) \end{matrix}$$

(5)

由式(5),当 $k = 2, l = 3$ 时, $M_{2,3} = 7$,对应的单元信息为: $E_{2,3} = (35, 27, 21, 20, 19, 26, 33, 34)$

3 程序的实现

3.1 算法的实现

依据以上算法,编制了相应的计算机程序 FEMPRE, 在 SGI 工作站,AutoCAD R12.0 ADS 环境下调试通过运行良好,算法流程如图 5 示⁽¹³⁾

3.2 交互界面的实现

对于一个有限元程序的输入数据文件,有一些参量是必须预先输入,例如高斯积分点数、单元结点灵数、应力分量个数等⁽¹³⁾本程序全部采用交互方式输入控制参数,运用 ADS 的 DCL 对话框控制语言实现,在界面输入的数据可以即刻对磁盘文件进行修正,用户不必直接与数据文件交流,避免了繁琐的数据文件的填写,减少了错误⁽¹³⁾

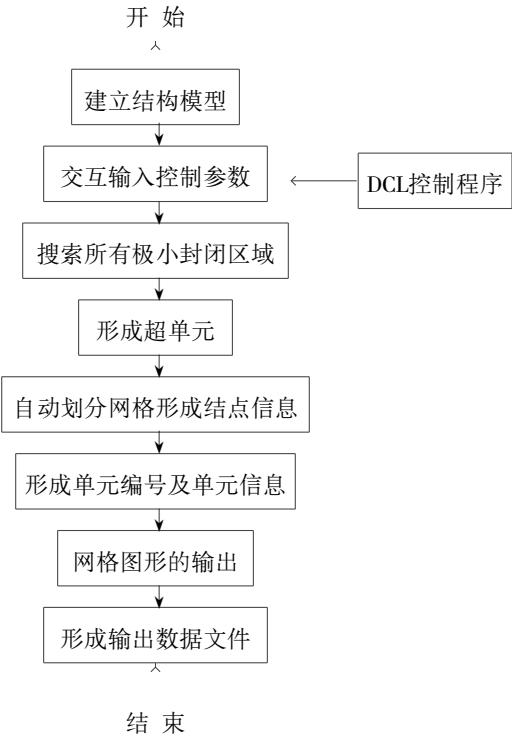


图5 算法流程图

4 结束语及展望

运用本文开发的程序 FEMPRE,成功地分析铁路道床变形的有限元程序提供输入数据文件¹⁹图 6 是经过 FEMPRE 处理了的输出网格图形,限于篇幅,数据文件从略¹⁹.

值得指出的是,本文的工作只停留在平面问题的处理上,是本研究项目的阶段性报告¹⁹.

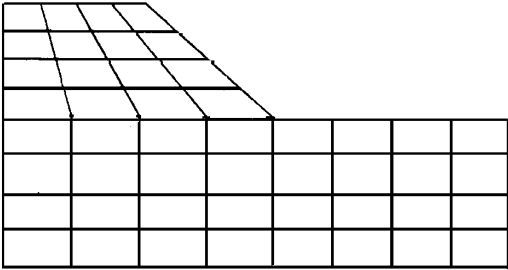


图 6 铁路道床截面有限元网格

参 考 文 献

- 1 杨凤翔,陆君良编¹⁹数值分析¹⁹天津:天津大学出版社,1985
- 2 方铁编著¹⁹AutoCAD C 语言高级编程¹⁹北京:清华大学出版社,1995
- 3 KLAUS-JÜRGEN BAJHE· Finite element procedures in Engineering Analysis· Prentice-Hall, inc., Englewood cliffs, New Jersey, 1982
- 4 雷晓燕,陈水生¹⁹用无拉应力模型分析道床变形¹⁹中国铁道科学,1996,17(3)
- 5 陈和群,彭宣茂编著¹⁹有限元微机程序与图形处理¹⁹南京:河海大学出版社,1992

Researching the Pre-process System of the Finite Elements Method Advanced Developing System Included in AutoCAD

Chen Shuisheng

(Civil Engineering Departement)

Abstract An algorithm is presented to search the min-closed-region with the vectors dot product and cross product· Every min-closed-region is regarded as a superelement and every superelement is changed into a ruled square under the local coordinate system by double linear interpolation· While the ruled square is divided into equal element meshes automatically, the information of the nodes and elements is recorded at the same time· Then with double linear interpolation, the information of the nodes and elements under the local coordinate system are changed into that under the global coordinate system· According to the above method, a computing program is developed· As all the information of the constrain, load and properties of the material inputs interactively, users do not need to fill any data files·

Key words AutoCAD; superelement; finite element; pre-process