

# 机械零部件表面网格自动剖分 及结果正确性检查\*\*\*

张德贤 陈日曜 李欣生 侯伯杰

(华中理工大学)

(郑州工学院)

**摘 要:** 本文在具体研究了机械零部件结构特点的基础上,对表面三角形网格自动剖分方法进行了分析和研究,给出了有效、可靠的节点及单元形成规则,并提出了网格剖分结果正确性检查的具体方法。最后给出了两个具体计算实例。

**关键词:** 机械零部件, 表面网格, 自动剖分

**中图分类号:** O242

结构表面网格自动剖分在工程数值计算及有关图形处理中具有重要的地位,因此是目前国内研究的热点之一。

由于机械零部件的结构一般比较复杂,同时在工程数值计算中对单元的要求也比较多。如需将表面上局部区域网格加密等,因此,为了便于处理,将所研究的机械零部件表面近似地分解成由若干个平面、柱面、锥面及球面等形状的子区域对待,这样就可以根据各子区域对风格的具体要求而具体处理,然后将各子区域合成为整体区域,以满足工程数值计算及有关图形处理的具体要求,本文基于这种算法思想,针对机械零部件的结构特点,给出了空间结构表面三角形单元网格剖分时所涉及的节点及单元形成的有关规则和方法,并提出了计算机自动检查网格剖分结果正确性的具体方法。典型计算实例计算结果表明,本文所提出的算法具有计算速度快,剖分结果可靠等特点。

## 1 节点的形成

将所研究的机械零部件表面化分成若干个子区域后,根据各子区域对网格的具体要求而分别形成节点及单元,为了便于处理,各子区域在网格剖分前应进行适当的坐标变换,对于平面子区域应作旋转变换使其法向矢量和Z轴方向平行,从而可按二维处理,对于柱面及锥面形状的子区域则需作平移和旋转变换使其轴线与Z轴重合,而球面则仅需作

---

\* 国家自然科学基金资助项目

\*\* 收稿日期: 1994-06-08

平移变换, 这样处理将大大简化这些区域的网格剖分工作, 下面以平面形状的子区域为例讨论其坐标变换及节点的形成方法, 其它形状的表面可采用类似的方法处理。

求出子区域边界顶点后, 为了控制各单元的节点编号顺序, 将外边界顶点按逆时针方向排列, 空洞边界(或内边界)顶点按顺时针方向排列, 对这些顶点坐标作适当的坐标变换使它们所决定的平面的法向矢量与 Z 轴方向平行, 具体坐标变换公式如下。

$$\{x, y, z, 1\} = \begin{bmatrix} l^2 + (1-l^2)\cos\theta & lm(1-\cos\theta) + ns\sin\theta & ln(1-\cos\theta) - ms\sin\theta \\ lm(1-\cos\theta) - ns\sin\theta & m^2 + (1-m^2)\cos\theta & mn(1-\cos\theta) + ls\sin\theta \\ ln(1-\cos\theta) + ms\sin\theta & mn(1-\cos\theta) - ls\sin\theta & n^2 + (1-n^2)\cos\theta \\ \Delta x & \Delta y & \Delta z \end{bmatrix}$$

上式中,  $x, y, z$  是变换前点的坐标,  $x_l, y_l, z_l$  是变换后点的坐标,  $l, m, n$  是旋转轴的单位轴向矢量,  $\theta$  是旋转角,  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  是平移量。

对于平面子区域, 设其法向矢量为  $\pi = (n_x, n_y, n_z)$ , 旋转变换的放置轴为  $u$ , 则有  $w = \pi \times z$ , 其中  $z$  为沿 Z 轴方向的单位矢量, 从而有  $u = (n_y / \sqrt{n_x^2 + n_y^2}, -n_x / \sqrt{n_x^2 + n_y^2}, 0)$ 。平面线  $u$  的旋转角应为

$\theta = \arccos(n_z / \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2})$ 。因此求出平面的法向矢量  $\pi$  后, 可由  $u$  及  $\theta$  通过 (1) 式作旋转变换, 以达到变换的要求。

变换后的平面子区域可按二维处理, 分别求出子区域的边界上的节点与区域内部的节点, 边界上的节点根据围成子区域各边的分段数通过顶点坐标插值而形成, 而内部节点形成则需按照一定的节点形成模型先形成节点的候选点, 然后按照一定的准则选择候选点使其作为内部节点, 节点形成模型有许多种<sup>[2]</sup>。图 1 为节点形成模型的一种, 其中  $l_1$  为子区域的外边界,  $l_2$  为内部边界,  $r$  为单元密度, 各园点为节点的候选点, 各候选点坐标可按一定公式求出<sup>[1]</sup>。候选点能否作为节点应满足以下二个准则。

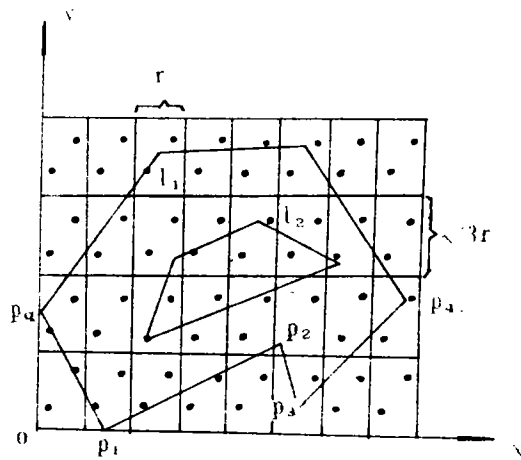


图 1 节点形成模型

① 该点应在子区域外边界的内部; 同时又在各内部边界的外部, 文献<sup>[1]</sup>采用候选点与各边界顶点之间的角度关系来判断点与边界的关系, 尽管这种判别方法是一种稳健可靠的方法, 但它所需的计算量较大, 本文给出了一种比较简便的方法。

对于外边界, 令  $x_{\min} = \min\{x_j\}$ ,  $x_{\max} = \max\{x_j\}$ ,  $y_{\min} = \min\{y_j\}$ ,  $y_{\max} = \max\{y_j\}$ , 其中,  $x_j, y_j$  为外边界的顶点坐标,  $j=1, 2, \dots, q$ ,  $q$  为边界顶点个数, 假设现在处理图 1 中的任一候选点 A, 其坐标为  $(x_0, y_0)$ , 首先判断该候选点坐标是

否满足下二式

$$\begin{aligned}x_{\min} < x_0 < x_{\max} \\ y_{\min} < y_0 < y_{\max}\end{aligned}$$

若不满足, 表明该点在边界之外, 应剔除, 否则由组成外边界的各顶点坐标求出直线  $y=y_0$  与外边界的交点, 将交点的  $x$  坐标从小到大排列, 即  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,  $n$  为交点的个数, 其心为一偶数, 然后判断候选点的  $x$  坐标  $x_0$  是否满足

$$x_{2i-1} < x_0 < x_{2i} \quad (i=1, 2, \dots, \frac{n}{2})$$

中的任一个, 若满足则表明候选点在区域内部, 否则则在区域外部。

若候选点在外边界的内部, 则应判断其是否在各内部边界的外部, 具体方法和上述类似。

② 该点和边界的最小距离应大于一个规定值  $d$ 。

$$d = \varepsilon r$$

其中  $\varepsilon$  为一常数,  $r$  为单元密度。现在讨论常数  $\varepsilon$  的取值原则, 当距候选点最近边界上相邻节点间距离与单元密度  $r$  相等时, 为了形成尽可能为等边三角形的单元, 易推出  $\varepsilon$  值应为 0.866 左右。因此, 边界上相邻节点的距离大于  $r$  时,  $\varepsilon$  值应取大些, 否则应取小些, 实际计算表明,  $\varepsilon$  的常用取值范围大致在 0.5—1.5 之间。

满足上二准则的候选点则可作为内部节点, 上述的节点形成方法将容易推广到其它表面形状子区域的内部节点形成。

## 2 单元的形成

为了使所形成的单元间不发生干涉, 重复, 首先形成边界上的单元, 然后再形成区域内部的单元。

各内部边界及外边界上的单元应分别形成, 对于各边界, 首先以边界上的第一个节点  $j_1$ , 第二个节点  $j_2$  为底边在所有节点中寻找节点  $j_m$  使顶角  $\angle j_1 j_2 j_m$  为最大, 从而形成以  $j_1, j_2, j_m$  三节点所组成的单元, 并以所寻找节点与第二个节点  $j_m$  为底边, 再寻找节点  $j_n$  使得顶角  $\angle j_2 j_m j_n$  为最大。从而形成以  $j_m, j_2, j_n$  三节点组成的单元, 然后以边界上的第二个节点  $j_2$  及第三个节点为底边重复以上步骤。

在边界上单元形成过程中应注意二个问题, a. 为保证沿边界上的相邻节点的能形成单元, 若边界上相邻节点与顶角最大的节点所组成的单元和已形成的单元发生干涉, 则应再寻找顶角次大的点以形成单元。b. 若以边界上相邻节点  $j_{k1}, j_{k2}$  为底边所寻找的顶角最大的点  $j_m$  为节点  $j_{k2}$  的相邻边界节点, 则应不再以  $j_m, j_{k2}$  为底边而寻找其它点。

对于各内部节点, 采用下述方法处理, 假设开始处理第  $i_1$  内节点。先寻找在该子区域内与  $i_1$  节点最接近节点  $i_2$ , 以  $i_2, i_1$  为底边寻找一点  $j_m$  使顶角  $\angle i_2 i_1 j_m$  为最大, 为使各单元节点均按一定顺序排列, 节点  $i_m$  应满足下面要求, 对于平面子区域, 应使向量  $\overrightarrow{i_2 i_1} \times \overrightarrow{i_2 i_m}$  的  $Z$  轴坐标大于零, 对于圆柱面, 球面等表面形状的子区域应使  $(i_2 i_1 \times i_2 i_m) \cdot i_2 c$

小于零, 其中  $C$  点为在表面轴线上与  $i_2$  等高的点, 形成以  $i_2, i_1, i_m$  三节点组成的单元后, 再以  $i_m, i_1$  为底边重复以上步骤, 直至所寻找的节点与  $i_2$  相同为止。

再形成一个单元后判断单元是否可接受, 具体判断准则如下。

① 若所形成单元和以前形成的某个单元三个节点编号相同, 表明单元重复, 则此单元为不可接受。

② 形成边界上单元时, 若所形成单元和以前形成的某个单元有两个相同的相邻边界节点, 则此单元为不可接受, 形成内部节点单元时, 若所形成单元有边界上两个相邻节点, 则此单元为不可接受。

③ 在形成内部单元时, 若所形成单元  $e_1$  和以前形成的某个单元  $e_2$  有二个节点编号相同, 则再判断此二单元是否各与第三个单元  $e_3$  有二个节点编号相同, 若无单元  $e_3$  存在, 则此单元为可接受, 否则应再判断新产生单元  $e_1$  和第三单元  $e_3$  的两个相同节点是否与第二单元  $e_2$  和第三单元  $e_3$  的两个相同节点相同, 若不相同则  $e_1$  为可接受, 否则为不可接受。

### 3 网格剖分结果正确性检查

所剖分的网格应满足单元不能漏掉, 不能与其它单元重复或发生干涉, 因此很有必要在各子区域单元剖分后及在所有子区域合成后对单元的剖分结果进行检查。

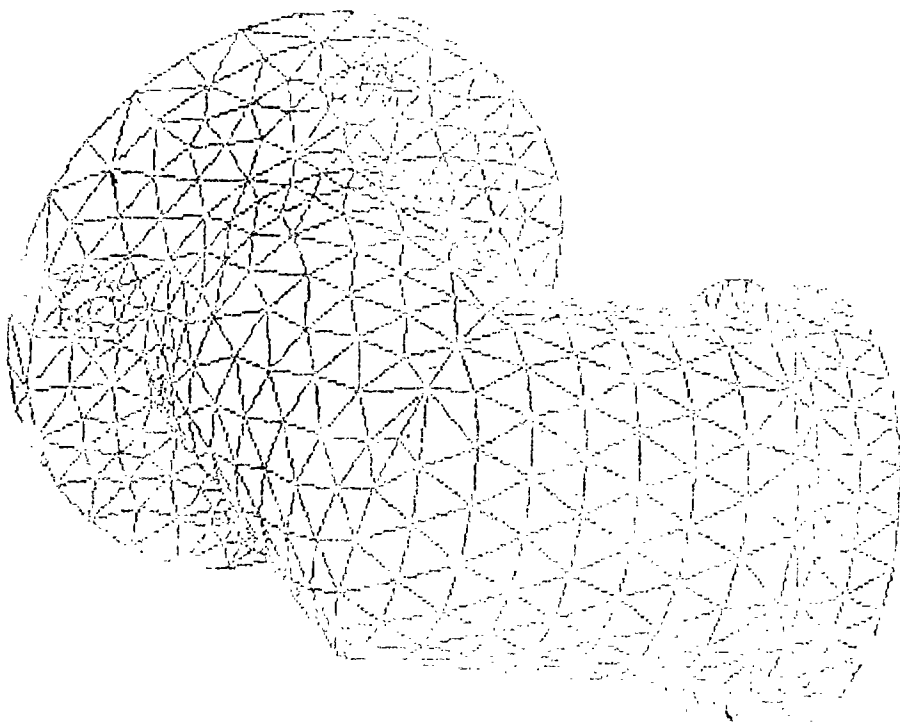


图 2 计算实例 1

对于封闭表面区域, 每个单元的每个边必须且只能与一个单元共边, 可由单元的节点编号进行判断, 若某个边的共边单元多于一个或没有共边单元, 则表明在这个单元的附近区域单元剖分结果有误, 对于非封闭表面区域, 边界上的单元的边界上的边则不能有共边单元。

各子区域单元剖分后, 若检查出单元剖分结果有误, 则产生的原因可能为①.区域内节点太少, ②.边界顶点坐标输入有误。检查无误后, 对该子区域的所有节点进行坐标变换, 使区域返回到原来的位置, 然后与已剖分的其它区域进行合成, 所谓合成就是根据该区域节点是否和以前已剖分区域的节点重合而适当调整该子区域内节点的编号。



图3 计算实例2

在整体区域表面单元剖分完成后, 若检查出单元剖分结果有误, 则造成的原因可能为子区域的边界顶点坐标或边界上节点个数输入有误。

图2、图3为采用本文所给出的方法所剖分的二个典型实例, 从计算结果可以看出, 本文所述方法有效、可靠且便于使用。

## 参 考 文 献

- 1 张德贤等. 三维边界元单元自动剖分的一种新算法. 华中理工大学学报. 1994. 22 (2); 78-81.
- 2 奥田敏. 有限要素解析のためのパターン発生による任意平面領域の自动要素分割. 精密机械. 1985. 51

(4): 802-808.

## Automatic Generation of Mesh and Check of Result Correctness for Surface of Machine Parts

Zhang Dexian   Chen Riyao   (HuaZhong Univesity of science and Technology)

Li Xinsheng   Hou Bojie   (Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, based on the concrete investigation of structure peculiarity of machine parts, the algorithm of automatic generation of mesh is made a thorough study. Effective and reliable rules relating to generate nodes and elements are presented. A method of checking up result correctness is also given. Two typical examples are employed to illustrate the algorithm.

**Keywords:** machine parts, Surface mesh, automatic generation

(上接 18 页)

### 参 考 文 献

- 1 周鸿钧等. 黄河小浪底水利枢纽2号明流洞进水塔结构静动力分析研究. 郑州工学院应力分析及抗震研究室. 1991. 12
- 2 袁明武等. 微机上的结构分析通用程序使用说明. SAP84, V3.1. 北京大学力学系
- 3 陈厚群等. 黄河小浪底水利枢纽进水塔群结构安全动态分析研究. 北京水利水电科学研究院. 1991. 6
- 4 张伯艳. 杨佳梅. 小浪底3号进水塔的静动力分析. 土木工程学报. 1993. 1

## Static and Dynamic Analysis for the Revising Scheme of the Tower of NO.2 in Xiao Lang Di Project

Zhou Hongjun   Hu Liangming

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, 8—21 node solid elements are used to divide the Xiao Lang Di No.2 Intake Tower. In consideration of 6 different schemes, the static and dynamic analysis is presented. The stress state of the flow tunnel and the safety of the tower stability are evaluated. Some useful conclusions are given, which might be used as the basis of designing.

**Keywords:** Intake Tower, Finite Element Method, Static and Dynamic Analysis