

# 三维有限元模型的任意剖切及其等值线 与彩色云图生成的方法

杨晓松 顾元宪 李云鹏 关振群

(大连理工大学工程力学系工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

**摘要** 对三维有限元模型快速有效地生成任意剖面上等值线及彩色云图,是有限元计算后处理中的一个重要技术。该文在建立单元信息描述表的基础上,提出了一种适合于任意三维实体单元类型的通用剖切算法,和在剖切面及外表面生成等值线或高质量彩色云图的方法。

**关键词** 实体剖切 等值线 彩色云图

## 0 引言

有限元分析技术在工程结构与机械产品设计中已得到广泛应用。有限元分析通常产生出大量的输出数据,如何有效地分析和理解计算结果,从中提取出工程设计所需要的关键信息,例如应力场的分布和高应力区的位置等,是有限元计算后处理所面临的主要问题。

后处理技术在二维数据场的可视化方面已相当成熟,形成了诸如等值线、彩色云图等有效算法。三维数据场的可视化方法主要有三类:剖面图,等值面图,体绘制,这些方法的特征都是表达三维物体内部的数据分布。等值面与体绘制技术由于算法自身的特点,特别适合于三维数据场中存在比较大的数据突变情况,在有限元模型中数据连续分布的情况下显示效果不够直观清晰。剖面图技术来源于计算机图形学的裁剪算法,同样能够表示物体内部数据场并易于理解,目前已经成为有限元软件比较通用的三维数据场可视化技术。但国外著名的有限元软件,如 ANSYS、I-DEAS 等,对系统的配置往往要求都比较高,在目前国内普遍采用的微机平台上很难满足实时交互的要求。

本文在裁剪算法的基础上,结合有限元单元的

特点,提出了一种有效的有限元数据表达方法——单元信息描述表,并在此基础上提出了一种适用于任意实体单元类型的快速剖切算法和生成剖面上等值线与彩色云图的方法。本文在最后还给出了该算法的理论分析及其实验数据。本文方法已在有限元软件 JIFEX95<sup>[1]</sup> 的图形后处理子系统中实现。

## 1 单元信息描述表

在有限元分析中往往采用多种单元类型,图 1 给出了有限元分析中常用的三种实体单元,每一种单元类型的面、边、顶点的数目及相邻关系各不相同,在后处理中需要采取统一的表达方法。在传统的 CAD 系统中,通常采用体-面-环-边-顶点 5 层表示法来处理实体模型。但这种数据结构并不适用于有限元后处理。首先在有限元计算的结果数据中存在大量的非几何数据,如应力、位移、温度等,而传统数据表达方法却缺乏有效的表示非几何数据的方法;在有限元后处理系统中,有时要对特定单元或特定单元集进行某种操作,这在传统方法中也很难找到有效的操作算法。更为重要的是,在有限元后处理中算法效率是首要因素,过于庞大的数据结构必然对算法效率带来严重影响。以图 4 所示中等规模的结构为例,该结构由 6300 个顶点、5040 个单元组成,

\* 本研究受国家杰出青年科学基金资助项目(No. 19525206)和中科院现代制造 CAD/CAM 技术开放实验室基金课题资助  
收稿日期:1998-09-25; 收到修改稿日期:1999-04-13

其中含有 16360 个表面、4960 条边,采用上述的 5 层表示法将使数据结构中含有大量的冗余信息。例如相同单元集的单元类型相同,节点之间的拓扑关系完全一致。这里可采用一种紧凑的单元集表示方法,将同一单元集的单元顶点序号存在一个连续的数组中。但由于在这种单元集的代表法中不含有单元面边顶点的直接拓扑联系,传统的剖切算法并不适用。因此,为了有效地利用这种紧凑的数据表示形式实现剖切功能,我们采用了一种单元信息描述表的数据结构。为每一种单元类型生成一个单元拓扑结构描述表,记录单元点-线-面的拓扑关系,而在内存中仅保存单元列表、顶点列表、外表面列表。这样在图 4 结构的数据结构中约占 60% 存储

空间的边表和面表都可以去除,只是为了消隐图绘制方便,保留 2480 个外表面。三个列表都采用紧凑的数组表示。在剖切时根据这种单元拓扑结构描述表就可以从单元列表中快速建立单元拓扑结构,实现对实体模型的剖切。表 1 以 8 节点块体单元为例说明单元信息描述表的结构。

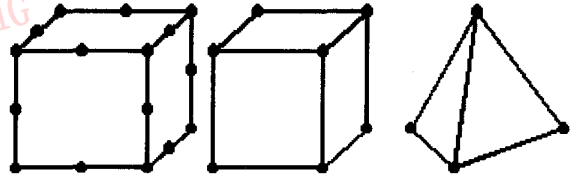


图 1 实体单元

表 1 8 节点块体单元类型描述表

单元名称	8 节点块体单元	
单元节点数	8	
单元边表	单元边数 12	边 1: 顶点 1—顶点 2    边 2: 顶点 2—顶点 3 边 3: 顶点 3—顶点 4    边 4: 顶点 4—顶点 1 边 5: 顶点 5—顶点 6    边 6: 顶点 6—顶点 7 边 7: 顶点 7—顶点 8    边 8: 顶点 8—顶点 5 边 9: 顶点 1—顶点 5    边 10: 顶点 2—顶点 6 边 11: 顶点 3—顶点 7    边 12: 顶点 4—顶点 8
单元面表	单元面数 6 单元面节点数 4	面 1: 边 1—边 2—边 3—边 4 面 2: 边 8—边 7—边 6—边 5 面 3: 边 9—边 5—边 10—边 1 面 4: 边 10—边 6—边 11—边 2 面 5: 边 11—边 7—边 12—边 3 面 6: 边 4—边 12—边 8—边 9

单元信息描述表的建立,不仅节省了大量的内存开销,而且使得有限元后处理软件的通用性得到提高。因为当用户选用新的有限元类型,只需修改单元类型描述数据,无须修改程序就可有效地处理新的单元类型,而且使得单元的描述得到统一,简化了后处理算法的复杂性。以下将依据单元信息描述表,具体地给出适用于任意单元类型的剖切算法。

## 2 剖切算法与实例

实体有限元模型的剖切算法往往针对每一个单元而论。从图 2 可见三维有限元模型剖切后绘制的图象主要由两类面组成,即原单元可见表面剖切后剩余部分和剖平面形成的剖面多边形。无论采用等值线还是彩色云图显示三维数据场在剖面上的分布情况,主要工作都集中于:

- (1) 剖面多边形的形成和剖面多边形顶点上的标量插值;
- (2) 剖面多边形的三角化;
- (3) 等值线与彩色云图的绘制。

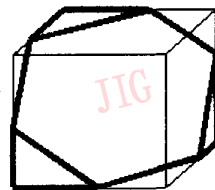


图 2 8 节点单元单一平面剖切

### 2.1 剖面多边形的形成

剖面多边形的生成算法如下:

- (1) 预处理

在处理单个单元之前,为整个模型中的每一个顶点确定一个仅占一位的标记,取值1或0,标记该顶点相对于剖切面的位置。如顶点位于剖切面的后面,即属于剖切后的保留部分,则标记为1;否则为0。

### (2) 交点计算

对于每一个单元,根据单元类型查询其单元信息描述表,逐个判断其中单元边表中的每一个边。如果边的两个顶点的标记不同,则该边与剖平面相交,计算交点的三维坐标与数据值。

### (3) 剖面多边形的形成

如果该单元不存在交点,则该单元不对剖面多边形提供任何贡献;否则存在交点,从单元信息描述表的边表中提取出第一个交点,作为剖面多边形的第一个顶点。然后依据边面的相关性,在描述表中找到与该交点所在单元边共面的另一个具有交点的边,将第二个交点作为剖面多边形的下一个顶点。以此类推,直至搜寻回到第一个顶点。容易证明只要有限元单元为凸多面体,这时形成的剖面多边形

只有一个,上述搜寻能够正确地形成剖面的完整形状,而这一点在有限元模型中是能够保证的。

### (4) 法矢方向的确定

剖面多边形的法矢方向应该依据剖面而定,因为剖面多边形的顶点自动搜寻的方向是任意的,所以搜寻的结果可能是剖面多边形的法向朝向物体内部,从而给消隐显示带来问题,因此需要对剖面多边形的顶点排列次序进行调整。

## 2.2 剖面多边形三角化与等值线、彩色云图的绘制

目前在有限元后处理中采用的等值线绘制方法基本上采用双三次 Hermite 插值或双三次 Bezier 插值。虽然能够得到比较光滑的等值曲线,但绘制时间往往比较长,无法满足实时交互的要求。采用双三次插值的原因,是由于某些情况下单元的尺寸相对于投影域而言比较大,直接采用双线性插值会产生明显的折线效果。本文采用了一种折衷方案,依据单元相对于投影域的比例分别采用中分法、Powell 剖分、Sibson 剖分法<sup>[2]</sup>,如图3所示。

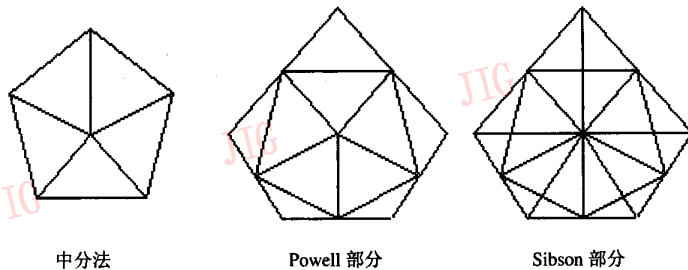


图3 多边形剖分

显然,Sibson 剖分对于大的单元会产生比较好的效果,但它产生的三角形比较多,同时也加大了系统的开销。由于前面的三角剖分是依据单元面在投影域上的尺寸而定的,因此在绘制等值线或彩色云图时,三角形都比较小,可以直接采用双线性插值用直线段逼近等值线。

## 2.3 多剖切平面的剖切

在存在多个剖切平面时,剖切方法与单一剖切平面基本相同:

### (1) 预处理

对于每一个剖切平面,为模型中的所有顶点建立一个标记数组,方法同上,用于标记顶点相对于剖切面的位置。

### (2) 外表面的剖切

对于所有预先提取出的外表面,首先对其节点标记进行判断,如果对于某一个剖切平面所有节点的标记皆为0,即该多边形被该剖切平面剖切掉,则无需进行进一步的判断;如果相对于所有剖切平面该多边形皆为1,即保留下来,直接加入绘制链表;否则将该多边形相对于各个剖切面逐一进行裁剪操作,形成裁剪后的绘制多边形。从实际运行情况看,这种预判将剔除大部分的外表面,剩下进行剖切操作的多边形一般在3%—5%。

### (3) 剖切面的形成

与上面相同,先对单元中的节点进行符号判别,剔除不相交的单元;对于相交单元,相对于每一个相交的剖切平面进行单一剖切面的剖切操作,将所得剖切面如同外表面剖切一样进行逐一剖切面的裁剪。

## 2.4 算法分析

有限元实体模型的剖切算法多针对于某一具体的单元类型,其中尤以基于 Marching Cube (MC)<sup>[3]</sup>思想的剖切算法最为典型。由于该算法把单元剖切情况归类为 14 种简单情况,通过一张查找表形成剖切多边形,算法效率非常高。本文提出的算法与 MC 方法相比,执行效率在同样数量级上,两者都是针对于每一个单独的单元进行处理,而且在处理每一个单元时都需要进行顶点相对于剖平面位置的判别以及交点三维坐标和标量场数据的插值运算,唯一不同的是剖平面的形成。MC 方法依据各个顶点的标记编码在剖切查找表中一次性查出对应的情况,将各个交点按照查出的次序形成剖面多边形;而本文方法在形成交点次序时同样采取查表的方法,只是查找表的次数等同于剖面多边形的顶点数,多于 MC 方法,但并不涉及多余的加减乘除法运算,算法时间开销基本相同。但是,本文方法具有以下优点:(1)算法通用性优于 MC 方法,MC 算法仅适用于 8 节点立体单元以及 4 面体单元,而本文所提算法只要能够正确地提供单元信息描述表,在算法不加修改的情况下就可处理新型单元;(2)MC 算法无法处

理多个剖切平面的情况,而本文方法则可实现多剖平面剖切。

图 4、5 及彩色图版 I 中的图 1—4 给出了应用本文的剖切算法在 JIFEX95 软件中进行剖切的实例。图 4、5 及彩色图版 I 中的图 1—2 所示结构由 5040 个 8 节点单元、6300 个节点组成,彩色图版 I 中的图 1—4 分别为两个剖切平面进行剖切的结果;剖切面及外表面的彩色云图;剖切面彩色云图的局部放大;所示结构由 3080 个四面体单元、1304 个节点组成。所有图形都是在 PentiumII 350 机器上产生的,分辨率为 800×600。在软件实现时,绘制部分采用了 OpenGL 绘制列表,并将绘制节点坐标作为数组一次性传递给 OpenGL,调用绘制命令时仅传递节点索引,大大提高了绘制效率,消隐图的绘制时间由原来的 0.14 秒减少到 0.024 秒。彩色云图的绘制由于三角面片的增多,绘制时间需要约 0.097 秒。而剖切操作需要 0.02 秒,绘制彩色图版 I 中的图 1 所示结构需要 0.117 秒,因此如果要生成剖切面旋转等动态剖切,可满足每秒约 9 帧的动画速度。而如果剖切面不变,则仅在第一次剖切时一次性生成绘制链表,以下的旋转操作则只消耗 OpenGL 的绘制时间。

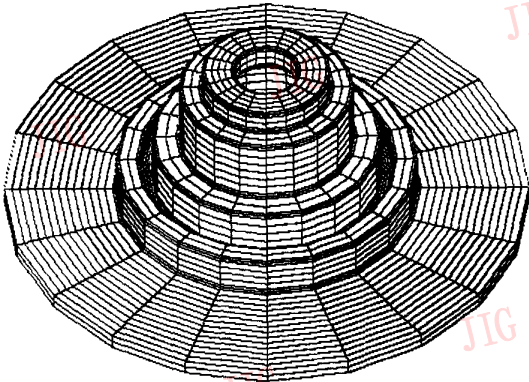


图 4 结构面消隐图

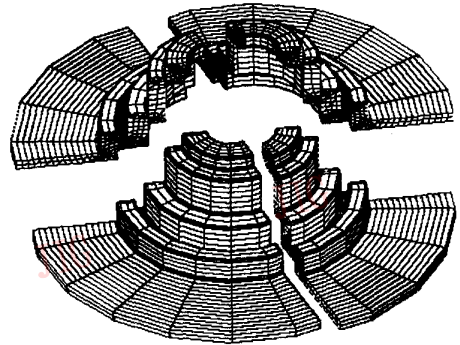


图 5 两个剖切平面的剖切结果

## 3 结论

本文所提出的三维有限元实体模型剖切算法比较简单实用,具有通用性,能够比较快速地显示出剖面上的数据场分布,但多个任意剖面的剖切算法在运行效率方面仍需要进一步改进。目前基于有限元模型的剖切算法,基本上都没有考虑到相邻单元的相关性进行算法的改进,如果能够有效地利用单元

相关性,将大大减少运算量。

### 参考文献

- 1 顾元亮,张洪武,关振群等. New development and applications of structural analysis/optimization package JIFEX95. In: Proc of CASC97, 1997, Sydney, Australia, 81~90.
- 2 石教英,蔡文立. 科学计算可视化算法与系统.
- 3 Lorensen W E, Cline H E. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. Computer Graphics, July 1987, 21(4): 163~169.



**杨晓松** 博士, 研究方向为可视化与图形学。



**顾元宪** 教授, 博士生导师, 研究方向为计算力学与 CAD。



**李云鹏** 助教, 研究方向为有限元及其前后处理。



**关振群** 讲师, 研究方向为 CAD 与有限元前后处理。

## Arbitrary Plane Cut and Contour Plotting of 3D Solid Finite Element Model

Yang Xiaosong, Gu Yuanxian, Li Yunpeng and Guan Zhenqun

(State Key Laboratory of Structure Analysis of Industry Equipment, Department of Engineering Mechanics  
Dalian University of Technology, Dalian 116024)

**Abstract** The contour plotting on arbitrary cut plane of 3D solid mesh is an important method in 3D data-field visualization of finite element computing post-processing. In this paper, based on an element-information table, a general cut algorithm which is suitable to various types of 3D finite elements is proposed. The method of contour plotting on cut-plane is also presented.

**Keywords** Solid cut, Contour plotting

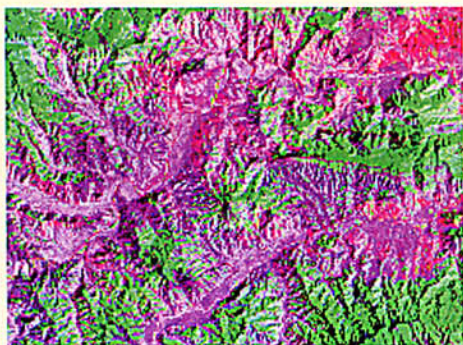


图1 原始波段 1, 4, 7 合成图

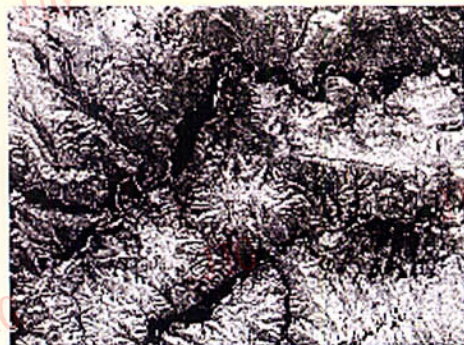


图2 植被丰度图

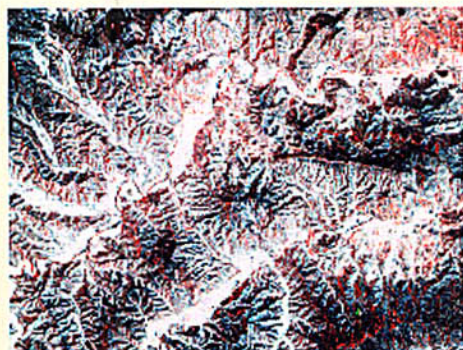


图3 减除植被贡献后 1, 4, 7 波段合成图

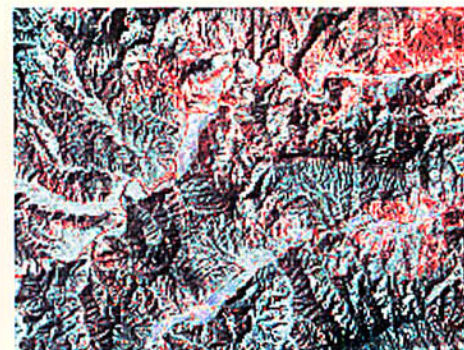


图4 补偿置换后 1, 4, 7 波段合成图  
(同时植被覆盖率在90%以上的象元被掩膜, 其中DN=0)

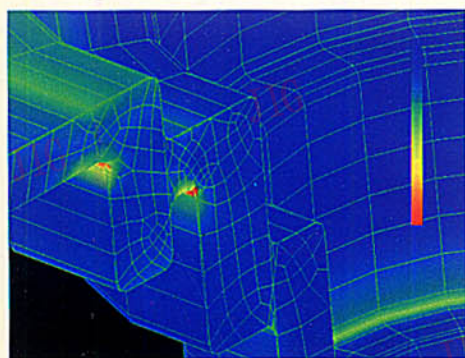


图1 剖切面及外表面的彩色云图

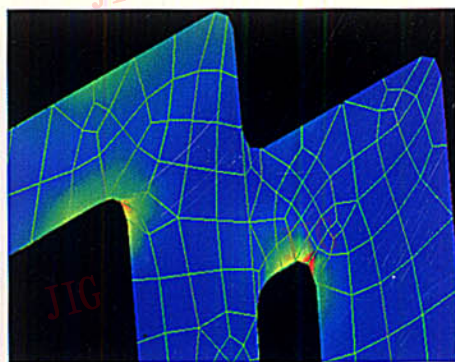


图2 局部放大的剖切面彩色云图

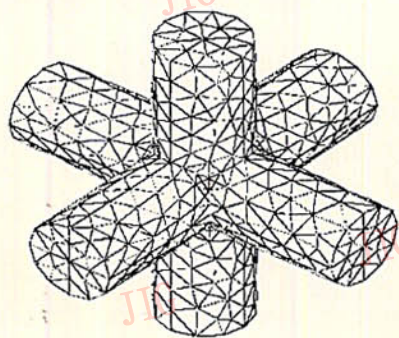


图3 四面体单元组成的结构

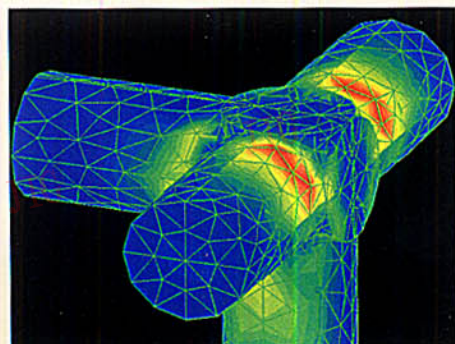


图4 两个剖切平面剖切的结果