

DOI: 10.11779/CJGE201603011

基于网格划分的全空间块体识别方法及其工程应用

张敏思^{1, 3}, 黄润秋², 王述红^{*4}, 杨 勇^{1, 3}

(1. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330013; 2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 东华理工大学建筑工程学院, 江西 南昌 330013; 4. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为了解决复杂几何边界条件下有限结构面的全空间块体识别问题, 提出有向面单元的几何建模概念, 并将网格划分思想引入块体理论中。首先利用空间正交网格将岩体离散为若干个小单元块体, 然后依次添加结构面, 对单元进行接触性判断及切割, 最后去除网格合并单元, 形成独立的空间块体。针对块体的切割, 给出了平面对任意形态块体的切割方法。针对单元块体的合并, 提出了以有向边合并为基础的块体合并方法, 将同向面、异向面合并方法统一。研究表明该方法具有可动态添加有限结构面、建立复杂几何模型、识别块体的形态数量不受限制、编程简单等优点。结合辽宁某隧道工程实例, 利用本研究成果识别出全空间内所有独立块体, 并进一步提供围岩周围关键块体的基本信息, 证明了其应用于复杂岩石块体识别的有效性和优越性, 为确保岩体工程的安全生产提供技术支持。

关键词: 网格划分; 块体识别; 单元; 块体合并; 结构面

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)03-0477-09

作者简介: 张敏思(1985-), 女, 讲师, 主要从事岩石力学方面的研究。E-mail: minsizhang@126.com。

Spatial block identification method based on meshing and its engineering application

ZHANG Min-si^{1, 3}, HUANG Run-qiu², WANG Shu-hong⁴, YANG Yong^{1, 3}

(1. Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China Institute of Technology, Nanchang, 330013, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. Faculty of Civil and Architectural Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China;
4. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to solve the issue of spatial block identification of finite structural planes under complex geometrical boundaries, the geometric modeling concept of sagittal planes is proposed and the meshing method is introduced to the block theory. Firstly, the rock mass is meshed into small independent elements. Then the structural planes are added orderly and the elements are cut after the contact judgment. Finally, the independent spatial blocks are formed when the mesh is removed and the elements are united. The cutting method of blocks with arbitrary configurations is given by planes. Based on the merger of directional edge, the merging method of the same direction and opposite surface is united aiming at block merging. The results show that it has good advantages for the dynamical appending of structural planes and the building of complex geometry model. Moreover, there is no limit to the form and number of block identification, and the programming progress is simple. The proposed method is further illustrated with its application to tunnel engineering in Liaoning Province. All of the independent spatial blocks are identified, and then the information of the key blocks is obtained. Its effectiveness and superiority in complex block identification is demonstrated through the engineering practice. It may provide technical support for the safety production of rock mass engineering.

Key words: meshing; block identification; element; block merging; structural plane

0 引言

地下工程施工过程中, 易发生岩体结构损伤, 有时甚至诱发工程灾害, 均与岩体结构内部破裂发展有关。因此, 对于开挖工作面周围岩体及其内部地质结

基金项目: 国家自然科学基金项目(51474050, 51179031); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室项目(SKLGP2014K011); 国家高端外国专家项目(GDT20142100008, GDW20142100050); 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室基金项目(RGET1517); 江西省科技支撑计划项目(2015BBG70004)

收稿日期: 2014-12-19

*通讯作者

构的准确把握至关重要。工程岩体开挖过程中, 在一定空间区域内由三维有限长的随机结构面和确定性结构面切割形成的块体识别问题是岩体力学非常重要的基础性研究课题。

块体理论是近年来发展和完善起来的一种岩体工程稳定性分析方法, 自 Shi 等^[1-3]正式提出块体理论以来, 一直深受广大专家学者们的重视。1992年, Ikegawa 等^[4]提出矢体概念, 成功地将凸体和凹体在概念上统一起来; 汪卫明等^[5]在此基础上提出了三维岩石块体系统的自动识别方法, 有效地解决了凹形体的识别问题; 卢波等^[6]提出了“有形即有限”理论, 实现了有限块体的自动搜索及其空间几何形态的判定; 张奇华等^[7-8]通过对凹形体的凹形区进行分类, 提出“块体加”和“块体减”的概念, 实现了复杂块体形态分析; 钟登华等^[9]在三维地质建模系统中, 实现曲面块体分析; 于青春等^[10]通过把岩体划分为几个子区, 采用结构面切割块体再合并子区的方法, 实现块体搜索。Wu 等^[11]基于 OOP 技术建立了一个面向对象的三维多块体系统计算机模型, 采用面向对象分析方法解读错综复杂的岩体结构。

到目前为止, 各研究成果都对块体理论的发展做出了重要贡献, 但均有其适用性。基于拓扑学原理的块体识别方法, 判断结构面与边界交线时只能采用简化方法; 利用结构面对岩体切割算法识别块体, 在程序计算之初, 模型体积较大, 无法限制结构面的大小, 且未实现平面对凹面体的切割; 将三维地质建模技术应用于块体理论, 建模过程复杂, 数据量大, 且主要工作量集中在块体识别的前期建模技术上。

针对以上问题, 本文提出基于有向面单元的岩体建模概念, 利用成熟的商业绘图软件, 建立以有向四边形为基本单元的三维模型。利用正交化网格将岩体模型离散为小单元块体, 将结构面对岩体的切割转化为对单元的切割, 合并单元形成独立块体(独立块体即与边界不相连通的块体), 有效地限制了结构面的尺寸。并将其与有向面单元建模方法结合, 简单有效地处理复杂边界问题。本研究可以动态地向模型中添加有限结构面以及识别块体的数量、形态不受限制。在计算过程中, 记录下所有块体的基本信息, 以便查询及分析。

1 基本思路

几何建模是各数值分析方法不可回避的问题, 也是一项最基本的研究, 不同的数值分析方法有着适于各自分析特点的建模方式。本研究提出基于有向面单元建模方法与网格划分的块体识别技术相结合, 可以

有效地解决复杂几何边界条件下的有限结构面块体识别问题, 研究思路如图 1 所示。块体识别主要分为两类方法, 一是基于拓扑学原理的交线回路分析^[7], 二是面向块体对象的空间切割算法^[10]。本研究正是基于空间切割的基本理论而提出的, 利用网格划分技术, 有效地限制了结构面的尺寸, 吸收了空间切割算法易于编程、容易实现的优点, 摒弃了无限结构面假设的弊端。

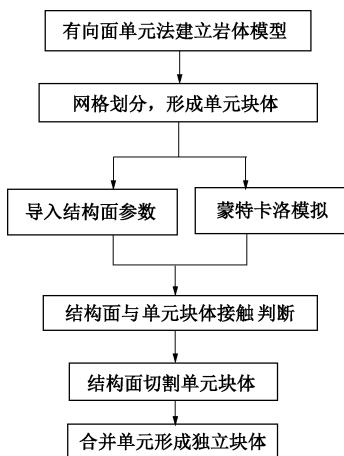


图 1 研究思路

Fig. 1 Flow chart of research approach

2 实现方法

2.1 基于有向面单元的岩体建模

建模即对研究对象所有元素进行数字表征的过程。块体理论分析存在的元素有岩体模型、工程结构面、虚拟结构面及由以上三种元素共同切割产生的块体。

(1) 结构面的数字表征

依据结构面的空间延伸范围将其分为两类: 一类为具有有限范围的结构面, 包括有限范围的确定性结构面和随机结构面。此种结构面可以采用圆盘形假设, 用倾向、倾角、半径及圆心的点坐标来表征。另一类可视为在工程研究范围内无限延伸性结构面, 如断层、贯通结构面及本研究所设置的虚拟结构面。可通过倾向、倾角及平面上任意一点的坐标来表征, 当有限结构面的半径取值为无穷大时, 两类结构面表达方式相同。

(2) 块体的数字表征

本研究中, 无论是复杂的岩体模型还是结构面间相互切割而形成的块体, 其数据存储格式都是相同的。都可用若干个有向多边形的集合来表示, 多边形的方向以指向块体内部的法向量为正。多边形是由若干个首尾相接的有向边组成, 其方向与边的方向遵循右手定则原理, 即

$$\vec{n} = \vec{n}_1 \times \vec{n}_2 , \quad (1)$$

其中, \vec{n} 为多边形方向向量, \vec{n}_1 , \vec{n}_2 为多边形内部任意一个凸角两边的方向向量。有向边由两个具有先后顺序的坐标点表示, 如图 2 (a) 所示。

值得说明的是, 带有空腔的多边形, 空腔采用与其方向相反的多边形表示。故带有空腔的多边形表示为若干个不同方向的多边形组合, 如图 2 (b) 所示。

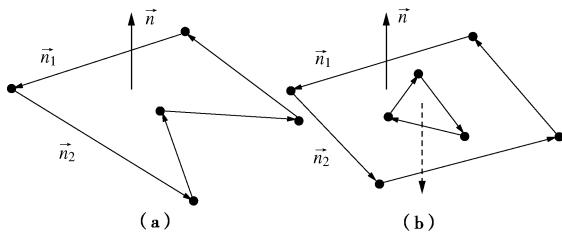


图 2 多边形面与边的方向

Fig. 2 Directions of surface and sides of polygon

(3) 岩体模型的建立方法

基于以上分析, 岩体几何模型的建立即对块体的数据结构进行赋初值。本研究采用简单的有向四边形单元来组成复杂的空间曲面, 用以建立岩体模型, 此方法称之为有向面单元法。现有的成熟工程制图软件中均提供了空间曲面的四边形单元生成功能, 且生成的四边形单元方向可以人为指定。任何复杂的空间曲面, 只要反映实际地质情况的样条曲线数量足够, 均能按此方法构建, 且可满足实际工程精度需求。工程制图软件生成的四边形单元, 是按照一定顺序(顺时针或逆时针)排列的四个顶点坐标, 将其数据格式转换为本研究所采用的多边形数据存储格式即可完成建模工作。

以图 3 中带有空间曲面的模型为例说明其构建方法。在图 3 中, 模型 A 面为一空间曲面, 可以由小的四边形单元构建; B 面为一条曲线和三条直线组成的曲边四边形, 可由条状的四边形单元构建; C 面为平面矩形, 则直接采用一个大的四边形单元即可。单元的方向与其所在面的方向相同, 图 4 为组成曲面的四边形单元的方向。

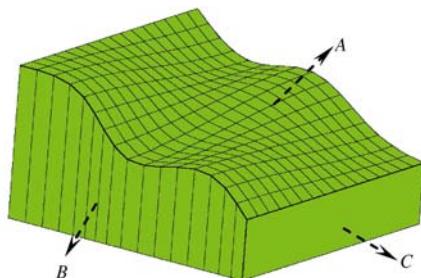


图 3 面单元构建的模型

Fig. 3 Surface element model

利用有向四边形单元构建曲面, 单元规则、数据简单、易于读取, 且在构建曲面的同时, 也确定了其方向, 在块体切割计算中, 可把方向继承下去, 将块体理论中判断面方向的问题避开。如图 3 所示, B 面为平面图形, 曲边本可由若干有向短直线构成, 采用条状单元构建后, 产生了多余的数据, 在后期的计算中会增加计算量。读取数据后, 可采用单元面合并的算法, 将其合并为 3 条长边与若干短边组成的多边形, 如图 5 所示。

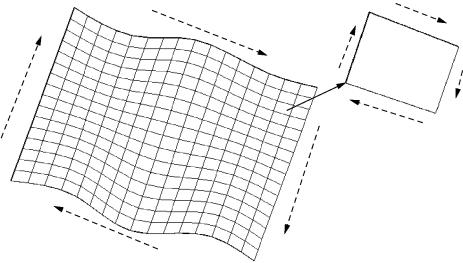


图 4 四边形单元的方向

Fig. 4 Directions of quadrilateral elements

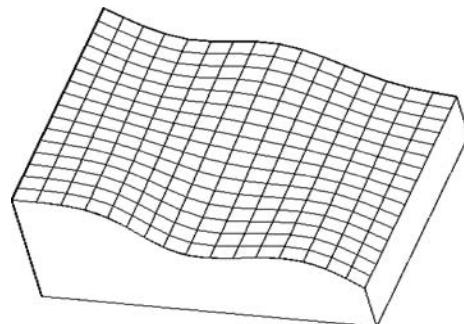


图 5 面单元合并后的模型

Fig. 5 Merging model for surface elements

2.2 网格划分

(1) 网格划分作用

结构面切割块体算法的假设是, 只要结构面与块体相交, 就将其完全切开。采用此种算法, 程序计算之出, 模型体积较大, 结构面就会被认为是贯通的。而将岩体模型利用虚拟结构面离散为若干个单元块体后, 结构面切割对象变为单元块体, 经过结构面与单元块体的相交性判断后, 与结构面不相交的块体将不会被切割, 这样就限制了结构面的计算尺寸。

以图 6 为例说明网格划分的作用。如图 6 (a), 存在 J1~J4 四条结构面, 采用切割算法时, 依次向岩体模型中添加结构面。添加 J1 后, J1 与岩体模型相交, 将其切割成 A1 和 A2 两个块体, 如图 6 (b) 所示。继续添加 J2, J3, J4 后, 形成 B1~B7 共 7 个块体, 见图 6 (c)。然而实际工程中, 四条结构面作用下不会形成块体, 故单纯地采用切割算法将放大结构面的尺寸, 且放大的尺寸无法预测。如图 6 (d) 所示, 在添加结构面之前, 利用虚拟结构面将岩体离散为小

单元块体，添加工程结构面后，工程结构面仅对阴影部分的单元块体进行切割，故所采用结构面的尺寸较为真实。当网格的尺寸足够小时，可以满足工程精度要求。

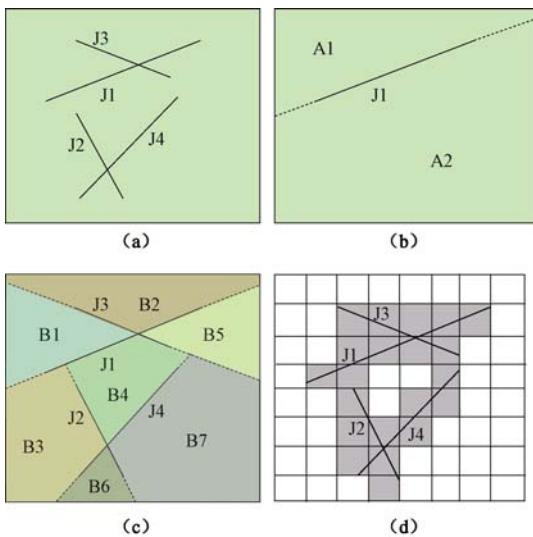


图 6 网格划分作用

Fig. 6 Mesh generation effect

(2) 网格划分原则

划分网格减小了计算中结构面尺寸增加值，且增加值可以根据网格尺寸来控制。网格各个方向间距小且均匀，则增加值就小。以图 7 为例说明，设置 J1~J7 共 7 条尺寸相同的结构面，分别对不同单元从不同角度进行切割计算，实线表示结构面的真实尺寸，虚线表示增加的尺寸。图 7 (a) 中的单元由正交且各组间距相等的网格切割而成，J1 和 J2 尺寸增加值相差较小；图 7 (b) 中的单元由正交但各组间距不等的网格切割而成，不同方向切入的结构面 J3 和 J4 增加的尺寸相差较大。图 7 (c) 中的单元由非正交且各组间距不等的网格切割而成，J5、J6 和 J7 从不同位置不同方向切入，结构面增加的尺寸均有不同，相差较大。故图 7 (a) 的网格划分方法较为合理。

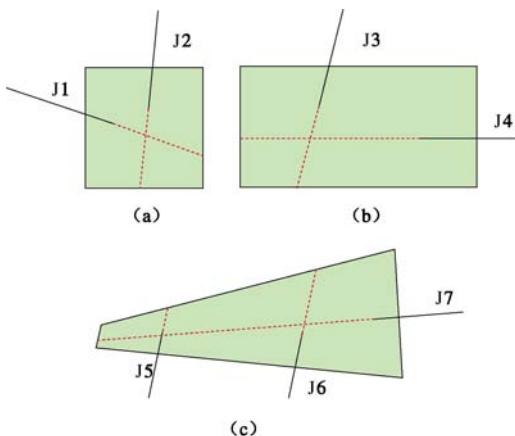


图 7 结构面切割单元方法

Fig. 7 Cutting element method for structural planes

通过以上示例可知，由虚拟结构面切割的单元块体，各个方向尺寸应均匀，且尺寸不易过大，由此可制定网格划分的原则。

- 用于离散岩体模型的 3 组虚拟结构面应正交。
- 组内结构面间距取值应根据工程结构面的尺寸确定。工程结构面尺寸大，则网格间距大，反之则小。如贯通结构面作用下，无需划分网格。
- 3 组虚拟结构面应尽量与模型边界面垂直，使其与边界面作用下产生的块体各个方向尺寸均匀。

(3) 网格划分方法

设置 3 组无限长空间正交虚拟结构面，对岩体模型进行切割，将岩体模型离散为若干个小单元块体，平面对块体（模型）切割的理论方法，详见 2.3 节所述。这里先对多条结构面切割块体的流程进行论述。

无论是虚拟结构面还是工程结构面，切割的算法及流程是相同的。多条结构面对块体切割的过程是动态的，程序之初，被第一条虚拟结构面切割的对象是所建立的岩体模型。依次加入虚拟结构面，每添加一个结构面，遍历一次现存的块体，判断相交性，如果相交就进行切割，把新形成的块体放入数据链的尾端，删除母体，继续判断下一块体，不相交则直接进入下一块体的判断。按此方法遍历所有虚拟结构面后，就完成了网格划分功能，即模型被离散为小单元块体。

图 8 即为利用 3 组正交结构面切割图 3 模型后生成的网格模型。图中曲面四边形单元的边线与虚拟结构面划分得到的网格线同时存在，互不干扰，网格的划分与模型边界情况无关，也不需要与构建曲面的单元面边界线吻合。本研究的网格划分方法是针对块体理论而产生的，不同于有限元的网格，其划分方式简单有效，适用性强，对任何复杂曲面无需做特殊处理，仅需利用平面对任意多边形的切割算法，计算量及产生的数据量小。

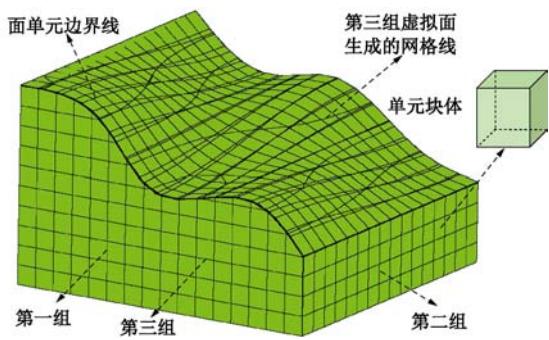


图 8 三维网格模型

Fig. 8 Three-dimensional mesh model

2.3 结构面切割单元块体

(1) 结构面切割块体方法

结构面对简单凸体的切割, 文献中较为多见, 而对凹体的切割却少有研究。本文实现了结构面对任意形态块体的切割, 其实质就是结构面所在平面分别对组成块体的多边形集合进行切割, 最后以面为单位根据多面体的封闭性原理重新组合为若干个新块体。

根据多边形与结构面所在平面的关系, 可以将多边形分为6类。I类多边形在平面以上, 包括以点的方式与平面接触的情况; II类多边形在平面以上且以边的方式与平面接触; III类多边形在平面以下, 包括以点的方式与平面接触的情况; IV类多边形在平面以下且以边的方式与平面接触; V类多边形在平面内, 即所有顶点均落在平面内; VI类多边形的顶点分布在平面两侧。令平面方程为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad , \quad (2)$$

多边形的顶点表示为 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ 。则当 P_i 满足下式时 P_i 在平面以上:

$$Ax_i + By_i + Cz_i + D > \Delta \quad , \quad (3)$$

当 P_i 满足下式时 P_i 在平面以下:

$$Ax_i + By_i + Cz_i + D < -\Delta \quad , \quad (4)$$

当 P_i 满足下式时 P_i 落在平面内:

$$|Ax_i + By_i + Cz_i + D| \leq \Delta \quad , \quad (5)$$

为处理计算中精确度所带来的问题, 取 $\Delta = 0.0001$ 。

在平面对多边的切割计算中, 对上述6类多边形区别处理。I类多边形完整的放入集合 U_A 中; II类多边形完整地放入集合 U_A 中, 且产生一条新边, 放入集合 U_C 中; III类多边形完整地放入集合 U_B 中; IV类多边形完整地放入集合 U_B 中, 且产生一条新边, 放入集合 U_C 中; V类多边形放入其方向向量所指向的一侧集合内; VI类多边形被切割为若干个 I、II类多边形后再分别放入 U_A , U_B 中, 且产生若干条新边放入集合 U_C 中。

在集合 U_C 中根据多边形的封闭性原理, 整理合并出若干个多边形, 即平面对块体切割后形成的新面(切口), 是集合 U_A , U_B 共有的部分, 应该分别放入两个集合中, 其方向分别指向所属的集合一侧。切割结束后, 根据多面体封闭性原则, 分别对 U_A , U_B 两个集合内的多边形进行整理, 即可得到新形成的块体。

(2) 结构面与多边形的交线

结构面切割第VI类多边形时, 会产生若干条新的边, 这就是平面与多边形的交线问题, 是平面切割块体的基本算法, 对其求解方法进行描述。

根据平面在多边形上的切入方式不同, 可将其分为五种情况。图9中J1代表平面, 对五种情况产生的交点分别加以规定。图9(a), 两边在平面 J1 同一侧,

产生两个交点, 均为点B; 图9(b), 两边在平面 J1 不同侧, 产生一个交点, 为点B; 图9(c), 平面 J1 与一条边相交, 产生一个交点, 为点C; 图9(d), AC边在平面 J1 上且另外两条边在 J1 同一侧, 若 $\angle A$ 、 $\angle C$ 均为凸角, 则产生两个交点, 为点A和点C, 若 $\angle A$ 、 $\angle C$ 均为凹角, 则产生4个点, 两个点A和两个点C; 图9(e), AC边在平面 J1 上且另外两条边在 J1 不同侧, 则产生3个交点, 若 $\angle A$ 为凸角, 三点分别为A, C和C, 若 $\angle A$ 为凹角, 则三点为A, A和C。

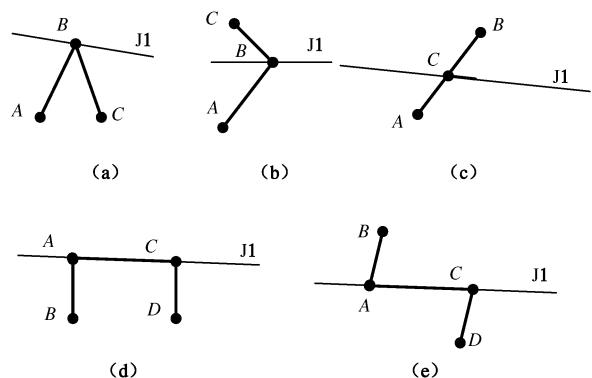


图9 平面切入多边形的方式

Fig. 9 Cutting way for polygon by surface

有了以上规定后, 可按照以下过程求解平面与任意多边形的交线。

a) 求出切割平面与多边形所在平面的交线 l ,

$$\begin{cases} x = x_0 + at \\ y = y_0 + bt \\ z = z_0 + ct \end{cases}, \quad (6)$$

其中 (x_0, y_0, z_0) 为直线上任意一点的空间坐标。

b) 求解 l 与多边形各边的交点参数 t , 并从小到大进行排序, $t_1 < t_2 < t_3 \cdots < t_n$, 每个 t 值带入式(6)中即为一个交点。

c) t_{2i-1} 和 t_{2i} 所代表的两点即为所形成的新边, 其中 $i=1, 2, 3 \cdots$ 。若 $t_{2i-1}=t_{2i}$, 则两点重合, 予以删除。

2.4 单元的合并及块体识别

块体的识别, 实质就是去除虚拟结构面导致单元块体间聚合, 从而形成独立块体的过程。

(1) 块体识别的主要过程

a) 遍历所有网格面, 依次判断每个小单元块体是否由此网格面切割而成, 若是, 则将此单元块体存入集合 U_A 中。

b) 在集合 U_A 中遍历每一个单元块体, 若两个单元块体分别位于网格面两侧, 且有交集(面的交集), 则将这两个单元块体合并为新的块体。循环搜索, 直至任何两个块体均不满足此条件为止。

c) 将合并形成的新块体编号存入数据链中。继续

遍历下一个网格面，重复(a)、(b)操作，直至结束即可完成块体识别的工作。

(2) 两块体间的合并方法

单元间的合并实质就是块体间的合并。块体合并不是本研究的关键技术，也是由简单凸体构建复杂几何模型的一种有效手段。块体是有向面的集合，面是有向边的集合，块体的合并就是将两个块体的所有面放在一起进行整理合并，形成新的面集合，对块体合并进行以下规定。

a) 合并条件。块体间合并的条件是，两个块体分别位于虚拟结构面两侧，且存在面的交集。两面合并的条件是两面存在线或面的交集。

b) 基本运算法则。面是有向边的集合，故块体及面的合并均是以有向边的合并为基础，在这里提出有向边合并的基本运算法则。法则中，有向边之间的关系仅存在以下两种情况：原则一、重合且方向相反的两边合并后等于0，将两边都删除。原则二，同向共线两边，首尾顺次相接，则合成一条边，由第一条边的起点，指向第二条边的终点。

c) 面面合并的优先级别。首先是两个重合但方向相反的子面优先合并，即删除此种情况的两个面。其次对原则一中所述情况合并，最后对原则二中所述情况合并。

d) 块体合并的过程。两多边形合并时，按照以下方法所述，任意需要合并的边均可转化为基本运算法则所规定的情况。两多边形分别表示为A和B，首先遍历A的所有边，判断是否与B面相交，若相交则用此边将B切割，最后形成的子面内边的方向不变。然后遍历B的所有边，同样的方法对A切割。切割完成后，按照合并的优先级别将所有子面相互间进行合并。这里需要指出的是，边对多边形的切割方法与面对多边形的切割方法相同，详见2.3节所述。

以图10异向两面为例阐释其合并过程。如图10(a)所示，在同一平面内异向两面A、B拥有交集。首先，遍历A的所有边，将B分割成 B_1 、 B_2 和 B_3 三个子面。然后遍历B的所有边，A被切割成 A_1 、 A_2 和 A_3 三个子面，见图10(b)。根据两面合并的优先级别，先对 A_2 与 B_2 进行合并，将两个子面删除。其他任何两面均无交集，不能合并，最后形成如图10(c)所示的 A_1 、 A_3 、 B_1 、 B_3 四个面。任何两面的合并均可采用此方法，故同向两面的合并这里不再赘述。

以有向边合并为基础，将块体间的合并转化为两块体间接触面的合并，并实现了同向两面、异向两面合并方法的统一，无需判断分类，易于程序实现。单元块体合并后形成独立的块体，即完成了块体识别的全部过程。对具有出露面的所有独立块体，依据现有

文献的研究成果^[11-12]进行可移性判断，搜索出关键块体。

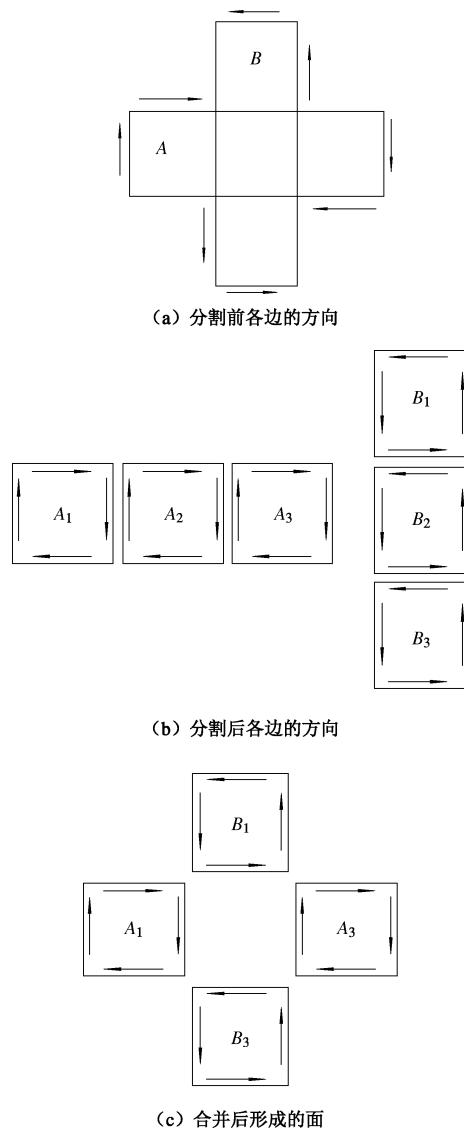


图 10 面的合并

Fig. 10 Merger of surfaces

3 工程实例

3.1 工程背景

某隧道位于辽宁省东南部，地形复杂，冲沟发育。山体总体呈近东西走向。最高海拔279.3 m，最低海拔132.1 m，相对高差147.2 m。洞口直径为10 m，洞线走向15°，K56+199—K56+99段节理发育。调查发现确定性贯通结构面有14条，其参数见表1。

采用三维不接触结构面数字识别系统对本工程随机结构面进行测量，得到其分布情况，如图11所示，其基本理论及研究方法可参考文献[13]。图中不同颜色代表不同的结构面。结构面产状（倾向和倾角）服从正态分布和均匀分布，迹长和间距服从负指数分布，随机结构面模拟参数见表2。

表1 确定性结构面参数

Table 1 Parameters of deterministic structural faces

编号	倾向/(°)	倾角/(°)
1	77	86
2	85	69
3	68	78
4	75	74
5	27	61
6	15	71
7	36	57
8	22	64
9	22	62
10	166	54
11	150	42
12	178	48
13	146	56
14	135	47



图11 现场测量所得结构面分布情况

Fig. 11 Distribution of structural planes by field measurements

表2 随机结构面模拟参数

Table 2 Parameters of structural planes in network simulation

组号	倾角		倾向		迹长 均值 /m	间距 均值 /m
	均值 (°)	标准差	均值 (°)	标准差		
1	85.78	3.30	42.30	6.52	1.59	0.56
2	39.75	8.07	226.8 ₄	18.26	1.64	1.18
3	36.65	7.08	35.59	11.80	1.34	1.03

3.2 建模及结构面模拟

基于网格划分的思想, 利用VC++及OpenGL自行开发了可视化程序GeoSMA-3D (geotechnical structure and model analysis) 对本工程进行分析, 此程序具有优秀的三维显示及数据查询功能^[14-15]。

根据工程需要, 建立洞口3~5倍的模型尺寸, 模型尺寸定为40 m×40 m×100 m, 洞口为圆形, 直径10 m。采用有向面单元法建立几何模型, 开挖面内表面由条状矩形单元组成, 带有开挖面的边界面由放射状四边形单元组成, 模型的其他边界面均由一个矩形单元表示, 图12为基于有向面单元方法所建模型。对模型进行网格划分, 网格间距采用1 m, 将模型离

散成小单元, 足以满足本工程的精度要求。结构面分为确定性贯通结构面和模拟的随机结构面两部分, 随机结构面利用蒙特卡洛方法进行模拟。

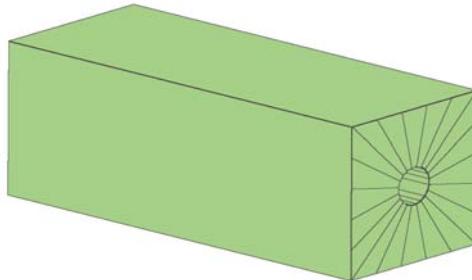


图12 有向面单元法建立模型

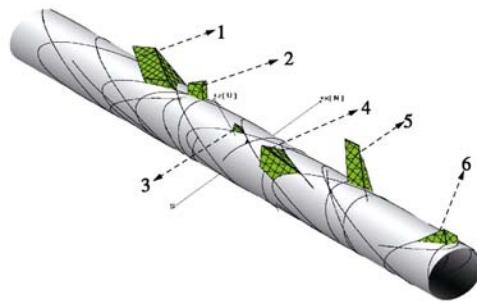
Fig. 12 Geometric model based on element method for sagittal planes

3.3 关键块体分析

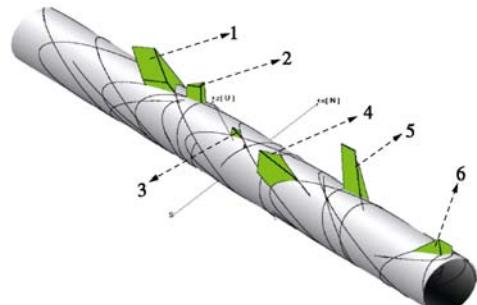
GeoSMA-3D可以根据结构面搜索出全空间内所有独立块体, 利用传统块体理论, 在仅考虑自重作用下判断出关键块体。首先根据确定的贯通结构面, 判断出确定的关键块体, 然后利用模拟的结构面, 定性的预测随机块体的分布情况。

(1) 确定性结构面关键块体分析

将14条贯通结构面逐一输入网格模型中, 经切割单元、合并单元等过程, 最终搜索出关键块体共6个, 将其与开挖面及开挖面上的迹线一起显示, 见图13。图13(a)为关键块体的单元显示, 图13(b)为单元合并后的关键块体显示。程序将关键块体的主要信息以文本形式输出, 见表3。



(a) 关键块体的单元显示



(b) 单元合并后的关键块体显示

图13 关键块体示意图

Fig. 13 Key blocks

表 3 关键块体信息

Table 3 Information of key blocks

编 号	体积 $/m^3$	面的 数量	Y 轴坐标 $/m$	形成块体的结构 面编号
1	59.44	5	23.19	1,3,7,9
2	2.50	4	13.59	4,8,12
3	1.35	4	0.35	8,10,13
4	23.82	5	-12.04	2,6,10,14
5	16.09	5	-21.59	5,9,10,13
6	6.59	4	-45.82	7,10,11

注：临空面按一个面计算

通过分析，得到确定结构面下的关键块体最大体积可达 $59.44 m^3$ ，位于 K56+199 处，与现场勘测结果吻合。

(2) 随机结构面下的块体识别

根据现场调查，本工程细小结构面比较多（见图 11）。在这些细小的随机结构面与贯通结构面的共同作用下，会产生很多随机分布的块体。采用统计学的手段，利用蒙特卡洛法模拟细小的随机结构面，然后将其与确定结构面一起输入模型。图 14 显示的是结构面的具体情况，从图中可看到所有结构面与模型边界的交线。

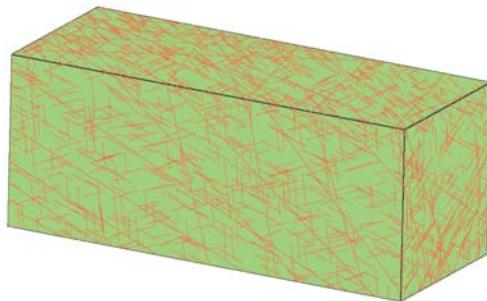
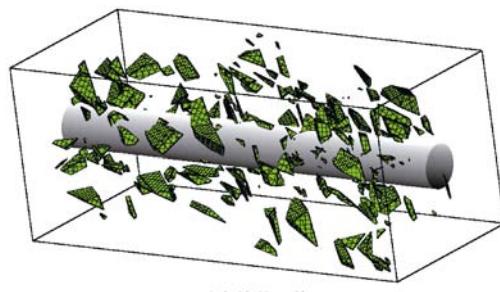


图 14 结构面显示图

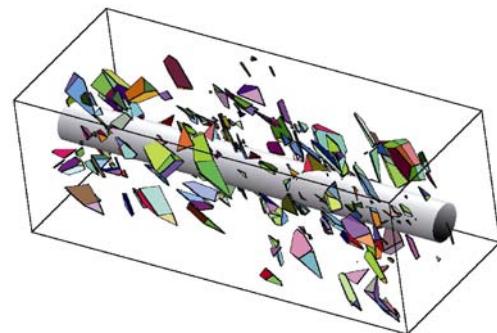
Fig. 14 Structural planes

经过块体搜索，可识别出工程研究范围内的所有全空间独立块体，如图 15 所示。图 16 显示的是随机结构面产生的关键块体，为了更直观地观察随机关键块体的分布，图中已将确定性结构面间形成的关键块体隐藏。本次模拟，在全空间范围内共产生了 832 个独立块体，关键块体的数量为 58 个（不含确定结构面间产生的 6 个块体），其中确定性结构面参与形成的关键块体有 39 个，占关键块体总数的 67%。关键块体体积最大为 $7.35 m^3$ ，平均体积为 $2.26 m^3$ ，主要集中在确定性结构面两侧的开挖面顶部。本工程关键块体数量较多，应引起足够重视，尤其是确定性结构面两侧的开挖面顶部，应重点勘测，及时有针对性地采取支护措施。采用该方法预测随机结构面的分布情况，

为确保岩体工程的安全生产提供技术支持。



(a) 独立块体网格显示



(b) 单元合并后的独立块体

图 15 全空间独立块体示意图

Fig. 15 Spatial independent blocks

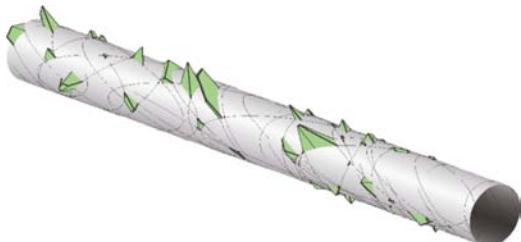


图 16 随机结构面产生的关键块体分布

Fig. 16 Distribution of key blocks of random structural planes

4 结 论

(1) 针对块体识别这一数值分析方法的特点，提出基于有向面单元的建模方法，利用现有成熟的工程制图软件，产生简单有向四边形单元，用以描述空间曲面，实现了复杂模型的建立，同时为其他计算方法的建模提供参考。

(2) 将网格划分思想引入块体理论中，利用正交化网格将岩体模型离散为小单元，把结构面对岩体的切割转化为对单元的切割，有效地限制了结构面的尺寸。此方法针对块体理论而产生，不同于有限元的网格，其划分方式简单，适用性强，对任何复杂曲面无需做特殊处理，计算量及产生的数据量小。

(3) 面面接触的两块体合并实质上是不同面间的合并，提出了以有向边合并为基础的面面合并方法，将同向、异向两面的合并方法统一，易于实现。

(4) 针对某隧道算例, 利用自行开发程序进行全空间块体搜索, 所得确定性结构面下的块体信息与实际情况相吻合, 并分析出随机结构面产生的关键块体, 多集中在确定结构面两侧的开挖面顶部。采用该方法预测随机结构面产生的关键块体分布情况, 为确保岩体工程的安全生产提供技术支持。

参考文献:

- [1] SHI G H, GOODMAN R E. Two-dimensional discontinuous deformation analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1985, **9**: 541 - 556.
- [2] GOODMAN R E, SHI G H. Block theory and its application to rock engineering[M]. Englewood Cliff: Prentice Hall, 1985.
- [3] BOYLE W J, GOODMAN R E, YOW J L. Field cases using key block theory[C]// Proceedings of the International Symposium on Large Rock Caverns. Helsinki, 1986: 88 - 95.
- [4] IKEGAWA Y, HUDSON J A. A novel automatic identification system for three-dimensional multi-block systems[J]. Engineering Computations, 1992, **9**(2): 169 - 179.
- [5] 汪卫明, 陈胜宏. 三维岩石块体系统的自动识别方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, **31**(50): 51 - 55. (WANG Wei-ming, CHEN Sheng-hong. Automatic identification method for three-dimensional rock block systems[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1998, **31**(50): 51 - 55. (in Chinese))
- [6] 卢 波, 陈剑平, 王良奎. 基于三维网络模拟基础的复杂有限块体的自动搜索及其空间几何形态的判定[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, **21**(8): 1232 - 1238. (LU Bo, CHEN Jian-ping, WANG Liang-kui. Automatic seeking for complex finite rock block and judgment of its spatial geometrical shape based on 3D network modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, **21**(8): 1232 - 1238. (in Chinese))
- [7] 邬爱清, 张奇华. 岩石块体理论中三维随机块体几何搜索[J]. 水力学报, 2005, **36**(4): 426 - 432. (WU Ai-qing, ZHANG Qi-hua. Geometric identification of stochastic block in block theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, **36**(4): 426 - 432. (in Chinese))
- [8] 张奇华. 基于块体加与块体减算法的岩石块体几何形态分析[J]. 水利学报, 2006, **37**(4): 418 - 424. (ZHANG Qi-hua. Morphological analysis of rock blocks by block adding subtracting method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(4): 418 - 424. (in Chinese))
- [9] 钟登华, 鲁文妍, 刘 杰, 等. 基于三维地质模型的地下洞室曲面块体分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(增刊2): 3696 - 3702. (ZHONG Deng-hua, LU Wen-yan, LIU Jie, et al. Surface-block analysis of underground cavern based on 3D geological modeling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(S2): 3696 - 3702. (in Chinese))
- [10] 于青春, 薛果夫, 陈德基. 裂隙岩体一般块体理论[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (YU Qing-chun, XUE Guo-fu, CHEN De-ji. General block theory for fractured rock mass[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. (in Chinese))
- [11] WU J, ZHANG Z X, KWOK C Y. Stability analysis of rock blocks around a cross-harbor tunnel using the improved morphological visualization method[J]. Engineering Geology, 2015, **187**: 10 - 31.
- [12] ZHANG Z X, LEI Q H. Object-oriented modeling for three-dimensional multi-block systems[J]. Computers and Geotechnics, 2013, **48**: 208 - 227.
- [13] 王述红, 杨勇, 王 洋, 等. 基于数字摄像测量的开挖空间模型及不稳定块体的快速识别[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(增刊1): 3432 - 3438. (WANG Shu-hong, YANG Yong, WANG Yang, et al. Spatial modeling and quick identification of unstable rock blocks based on digital photogrammetry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(S1): 3432 - 3438. (in Chinese))
- [14] WANG Shu-hong, HUANG Run-qiu, NI Peng-peng, et al. Fracture behavior of intact rock using acoustic emission: experimental observation and realistic modeling[J]. Geotechnical Testing Journal, 2013, **36**(6): 903 - 914.
- [15] WANG Shu-hong, NI Peng-peng, GUO Mu-dan. Spatial characterization of joint planes and stability analysis of tunnel blocks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, **38**: 357 - 367