

岩石块体三维接触判断的侵入边法

陈文胜^{1,2} 郑宏^{2,3} 郑榕明⁴ 葛修润³⁽¹⁾长沙理工大学岩土工程研究所 长沙 410076) ⁽²⁾三峡大学土木水电学院 宜昌 443003)⁽³⁾中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) ⁽⁴⁾香港理工大学结构与土木工程系 香港)

摘要 在三维单元法、三维不连续变形分析法中,三维块体的接触判断是关键的问题之一。对三维凸多面体的所有接触形式进行了分类,提出了一种三维块体接触判断的侵入边法。给出了侵入边法的原理、方法实施步骤及识别接触形式的方法。通过论证和算例表明,所提出的方法计算工作量小、鲁棒性好,易于计算机实现。

关键词 岩石力学,数值方法,三维块体,接触判断,侵入边,离散单元法,不连续变形分析法

分类号 TU 441⁺.2

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)04-0565-07

DETECTION OF 3D ROCK BLOCK CONTACTS BY PENETRATION EDGES

Chen Wensheng^{1,2}, Zheng Hong^{2,3}, Cheng Yungming⁴, Ge Xiurun³⁽¹⁾ Institute of Geotechnical Engineering, Changsha University of Technology, Changsha 410076 China)⁽²⁾ College of Civil and Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443003 China)⁽³⁾ Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China)⁽⁴⁾ Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

Abstract Detection of contacts between 3D blocks is a key problem in 3D DDA(discontinuous deformation analysis)and DEM (discrete element method) analysis. In this paper, the limitations of the approaches commonly used to detect 3D block contacts are discussed. A new approach called penetration edges method is put forward for the detection of contacts in 3D blocks system, and the contacts between two 3D blocks are classified into seven types. The principle of this new approach is robust and can overcome the limitations of the commonly used methods. This new method can greatly reduce the amount of calculation and is easy to be coded for analysis.

Key words rock mechanics, numerical method, 3D blocks, contact detection, penetration edge (PE), discrete element method, discontinuous deformation analysis

1 引言

在有裂隙和断层的岩体结构中,用连续介质理论的数值分析方法往往有一定的局限性,而采用离散单元法(DEM)^[1]或不连续变形分析法(DDA)^[2]等

块体单元计算方法,则能获得更符合实际的结果。DDA,DEM方法在岩石力学计算分析中起到了很重要的作用。

由于真实的问题都是三维的,加上块体的空间特性特别显著,三维块体计算更受到重视。在三维DDA,DEM计算中,三维块体的接触判断是关键

2002年8月27日收到初稿,2002年10月22日收到修改稿。

作者 陈文胜 简介:男,1966年生,博士,1988年毕业于东北大学矿山建筑专业,现任副研究员,主要从事岩土工程及数值分析方面的研究工作。

的问题之一。首先,接触判断检索的正确与否,是三维块体数值分析方法计算结果正确与否的基础,不正确的判断结果,不仅会导致错误的计算结果,甚至会使计算系统崩溃而无法将计算进行下去;其次,三维块体接触检索方法和算法的效率,直接影响到三维块体数值计算方法的效率,这种影响是显著的,因为以块体为计算单元的数值方法,往往是以循环迭代逐渐来逼近收敛解,而在循环过程中,由于块体的几何位置可能有显著的变动,故其几何接触关系也发生了改变,从而要重新建立块体间的几何接触关系。在整个求解过程中,接触判断占用计算时间根据采用的接触检索算法不同而有很大差别,目前最常用的方法有公共面法和直接法。根据某些研究者的经验,采用直接法的计算工作是最无法忍受的;公共面法是目前三维 DEM 和 DDA 程序中最常用和有效的方法^[3],该方法使计算工作量显著减少而被广泛采用,但接触检索所耗时间仍然占用了整个计算时间的较大比例。

三维块体形状的复杂性及空间接触形式的多样性和复杂性,给三维块体接触检索带来了非常大的难度。三维块体接触计算不但计算工作量大,而且接触几何形式复杂,如何正确和快速地检索并描述出块体间的接触关系,已成为三维块体计算方法及其程序开发的一个难点。根据一些学者的工作及编程实践^[4-9],当前较常用的公共面法仍离开发者的期望有一些距离,对高效、准确的三维接触判断方法的研究仍是三维块体计算方法研究的一个目标^[10-12]。

2 主要的三维块体接触判断方法评述

2.1 直接法

直接法就是用解析几何的方法直接判断两块体之间的几何关系。

由于两块体间的接触形式比较复杂,构成块体的基本元素有点、边、面,两块体之间可能有任意点、边、面之间的接触,直接法判断就需要逐次对一块体中的各点、边、面与另一块体的点、边、面依次进行判别。这种判别方法是直接的,如果一块体(块体 A)有 V_A 个顶点、 E_A 条边、 F_A 个面,而另一块体(块体 B)有 V_B 个顶点、 E_B 条边、 F_B 个面,则两块体可能的接触组合有

$$N = (V_A + E_A + F_A)(V_B + E_B + F_B) \quad (1)$$

根据式(1),若是两个六面块体,就将会会有 676 种接触的可能,直接法判断时也将对这 676 种可能

的接触进行依次判断。

直接法计算量大,计算机实现困难,很少采用。

2.2 公共面法

公共面法是由 Cundall 等提出的、迄今为止最有效的三维块体接触判断方法。在用直接法判断时遇到很多不便,且计算量大,识别接触模式困难的情况下,Cundall 等引入了公共面的概念。

公共面是一假想的刚性无厚度的面,它位于两块体之间,若两块体发生接触,则两块体必然分别与它接触,从而使块体与块体的判断转化成了块体与公共面之间的判断。

公共面法判断接触虽然较直接法效率高,但由于在接触判断前,要在空间中确定出合理的公共面位置,而确定公共面位置是很困难的,一般要经过繁重的计算,从数学角度讲,空间平面方程由 4 个系数确定,故确定公共面位置是一个求 4 个参数的极值问题,直接求解这个极值问题有很大难度和很大计算量。文[3]中通过块体几何中心点先确定一初始面,再通过平移和增量旋转来求得。概括起来,文[3]确定公共面由如下步骤进行:

- (1) 将公共面最初定位在过两块体形心的连线的中点,并与连线垂直;
- (2) 分别求出块体到当前公共面的最小距离的点,平移公共面,使其到两个最小距离点的距离相等;
- (3) 以两个最小距离点连线与当前公共面的交点为基点,取当前公共面上相互垂直的两个正交向量作为旋转轴,在两个方向按小角度增量和扰动公共面,以求扰动后块体到当前公共面的最小距离得到最小值,此时的公共面就是最终的公共面。

在上述 3 个步骤中,此方法仍存在如下问题,值得进一步研究。

- (1) 由步骤(1)和(2)确定出了初始公共面,该初始公共面与两个最小距离点连线的交点是下一步旋转扰动的基点,这意味着该交点应是最终确定出的公共面上的点;然而,许多情况下并非如此。如图 1 所示的平面图可看作有厚度的空间问题,块体 A, B 在经过步骤(1), (2)后,确定的初始公共面分别为 CP_1, CP_2 , 其中, F_3 为初步确定的点,步骤(3)的旋转扰动将以 F_3 为参考点,这时, F_3 刚好在 P_2P_1 面上,可找到正确的公共面;若块体 A 形状稍改变,增加一角点 P_3 ,忽略形心的微小改变,此时 P_3 将为块体 A 到 CP_1 最小距离的点,从而按步骤得到的旋转扰动的基点将是 P_4 ,很显然, P_4 不会在公共面上。

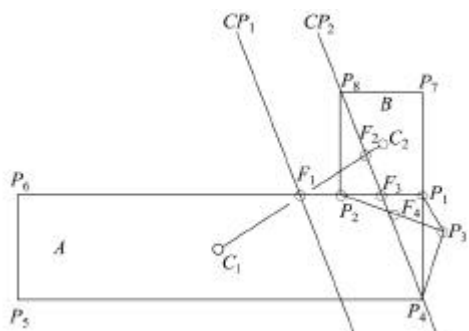


图1 两块体确定公共面示意图

Fig.1 Sketch for finding the common face between two blocks

(2) 公共面旋转是按增量迭代而逐渐逼近的，迭代计算的计算量无法估计，且迭代误差不可避免，从而增加了额外的计算误差；

(3) 按照文[3]的方法确定出的公共面是否是唯一的或正确的，并没有得到严格的证明。从数学角度讲，公共面的确定是一个优化问题，按照文[3]的方法显然是人为的，不能保证能得到正确的结果；

(4) 对于角-角、角-边等接触，满足条件的公共面有无数个，而一旦只确定一个公共面，从而使接触力按这一公共面的法向和切向施加，必然导致接触力施加的随意性(上述的角即角点，下同)。

总之，从上述 4 点看，公共面法仍值得进一步探讨。

值得提到的是，文[12]对公共面法作了一些改进，即采用直接法与公共面法相结合，使接触状态由面参与时(面-面、面-线、面-点接触)的检索效率有很大提高。

3 侵入边法判断块体接触的原理

3.1 三维块体接触的描述

在本文的方法中，主要针对的是直边凸多面体(凹多面体将另文介绍)。直边凸多面体是由若干个空间凸多边形构成的一个封闭实体。构成凸多面体的元素或描述一个凸多面体的方法是角点、由角点连成的直线段、由直线段构成的凸空间多边形。

判断两个空间块体的接触，可分为 2 个步骤：

(1) 两块体是否接触，也即设 $\{x_A\}$ ， $\{x_B\}$ 分别为块体 A，B 块的空间点集，两块体若接触，则有

$$\{x_A\} \cap \{x_B\} \neq \emptyset \quad (2)$$

否则，两块体不接触；

(2) 两块体若接触，则需识别其接触形式，在力学计算中，只有正确识别其接触形式，才能建立起块体之间的接触力学模型。

两个凸多面体在空间若接触，忽略微小的侵入，则可概括为如下几种形式：

(1) 角-角接触

两块体接触处仅在一角点上，有

$$\{x_A\} \cap \{x_B\} = X_P \quad (3)$$

X_P 同时为块体 A 和块体 B 的角点，如图 2 所示。

(2) 角-边接触

两块体的接触点为一个块体的边和另一个块体的角，式(3)中的 X_P 同时为块体 A 的角点和块体 B 某条边上的点，或同时为块体 B 的某个角点和块体 A 的某条边上的点，如图 3 所示。

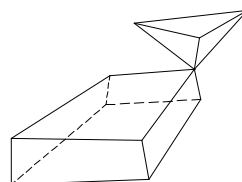


图 2 角-角接触

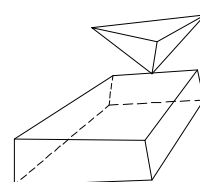


图 3 角-边接触

Fig.2 Vertex-to-vertex contact Fig.3 Vertex-to-edge contact

(3) 边-边接触

即两个块体的接触点均在两块体的一边上，式(3)中的 X_P 同时为块体 A，B 某条边上的点，如图 4 所示。

(4) 边-边重合接触

两块体的接触为一点集，该点集为一线段，该线段分别是两块体某边或其边的一部分，此类接触在系统处于初始状态时最常出现，如图 5 所示，

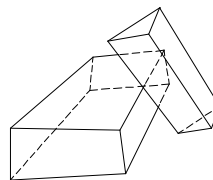


图 4 边-边接触

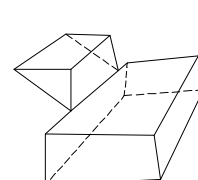


图 5 边-边重合接触

Fig.4 Edge-to-edge contact Fig.5 Edge-to-edge superposition contact

(5) 角-面接触

即一块体中一角点与另一块体的一个面接触，如图 6 所示。

(6) 边-面接触

即一块体的某一边或某边中的一段与另一块体的一个面接触，如图 7 所示。

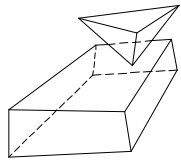


图 6 角-面接触

Fig.6 Vertex-to-face contact

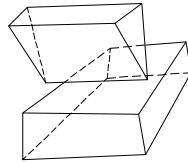


图 7 边-面接触

Fig.7 Edge-to-face contact

(7) 面-面接触

即接触处为一面(可证明，对于两凸多面体，如发生此类接触，接触处构成的多边形必为一凸多边形)，如图 8 所示。

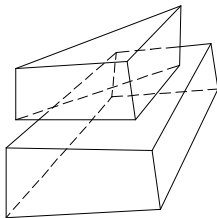


图 8 面-面接触

Fig.8 Face-to-face contact

对于 DEM, DDA 允许有微小的侵入时^[4]，可将所有的接触形式归纳为以上 7 种，并在力学计算时用允许误差对接触侵入量进行控制。

作为一种三维判断方法，有 2 点是最重要的：

(1) 可靠性和鲁棒性(robust)，即算法要稳定并能对可能出现的任意接触形式(即上述的 7 种接触形式)作出正确的判断；(2) 算法的效率或计算工作量。因为三维计算的工作量大，而三维接触判断会因算法不同而使计算工作量的多少有很大的变化，不好的算法能占用 50%甚至更多的整个三维计算时间，从而影响整个三维计算效率。

直接判断方法，虽然可靠性好，但效率很低，计算量大，很少被人采用；公共面法因效率较直接法高而被人采用。

3.2 侵入边的定义

两块体接触与否，可以通过几何判断获得两块体的公共部分或公共部分的一些信息，来判断两块体是否接触；若接触，再通过获得的公共部分的信息，来判别两块体的接触形式。

两块体接触，则式(2)成立，块体必有非空交

集，非空交集也可叫做两接触块体的侵入体。理想的刚性接触时，对于 3.1 节所归纳出的 7 种接触形式中，(1),(2),(3),(5)种接触的侵入体为一点，(4),(6)种接触的侵入体为一线段，(7)种接触的侵入体为一平面多边形。在 DEM, DDA 中，若计算时允许块体的小量侵入，则侵入体是一空间多面体。

侵入边定义为构成侵入体的边中所包含的构成原两块体的边的部分，它可能是原始边(构成空间块体的边)的一部分、原始边上的一点或原始边的全部，对应的原始边可称为该侵入边的母边。因为存在侵入边也就存在接触，侵入边也可叫做接触侵入边。

若两块体接触，可证明，必有若干个侵入边存在，这些侵入边是表达块体接触状态和形式的信息数据。为了判断块体间的接触形式，侵入边可分为表 1 中的 5 种类型。

表 1 侵入边类型表
Table 1 Types of penetration edges

类型编号	端点性质	长度性质
1	2 原始点	有长度
2	1 原始点, 1 截断点	有长度
3	1 原始点, 1 截断点	无长度
4	2 截断点	有长度
5	2 截断点	无长度

表 1 分类中，原始点是指构成该侵入边的母边的块体角点；截断点指由面切断的点；侵入边有长度表示该侵入边的几何长度大于某一给定小值，无长度表示该侵入边的几何长度小于某一给定小值，可视为零长度。

侵入边的性质和分类在本文的接触判断方法中有重要的意义，因为侵入边实质上代表了两块体间的接触信息数据。

3.3 侵入边的获取

由于空间中的任意 N 个面的凸面体有这样一个性质，设 F_i 为块体 B 的任一个面， n_i 为其外法向方向，P 为 F_i 上任一点，则若空间任意一点 Q 属于 B，则 Q 到 F_i 的距离 d 应满足：

$$d = \overrightarrow{QP} \cdot n_i \geq 0.0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

式中： n_i 为面 F_i 的外法向单位矢量。等号成立时，Q 刚好落在 F_i 面上。

根据上述性质,对于任意两个三维块体 A, B , 可获得两块体点集的交集 $\{x_A\} \cap \{x_B\}$, 可称为两块体的接触侵入体。

两块体的接触侵入体,若排除理想的点接触状态(理想的点接触状态在数值分析中是不存在的),应该是空间的一个多面体。找出这个公共多面体,在几何上完全可以做到,但必将导致较大的计算量,在进行三维块体力学分析时,并不需要准确地知道这个公共多面体,而只需要获得足以满足接触力学模型及力学计算所需要的接触信息,更具体地说,就是要回答两个问题,即是否接触和接触形式。

进一步的分析可以知道,在 DDA 和 DEM 中,块体间的侵入是不允许的或是很微小的,块体之间的接触全部包含在节 3.1 所列的 7 种形式的范围。在已知块体间的所有接触形式,并在能充分回答是否接触和接触形式这两个问题的前提下,只需求出两块体的侵入边,便能准确地对两块体的接触关系作出判断。从而使两块体的接触判断只需较简单的边-面判断,即只需求出侵入边。

设块体 A 有 F_A 个面、 E_A 条边,块体 B 有 F_B 个面、 E_B 条边,则获取块体 A, B 的接触侵入边的算法为依次对块体 A 的 E_A 条边,用 B 块体的 F_B 面去进行切割(或截留),从而求得以块体 A 的边为母边的侵入边。同理,可求得以块体 B 的边为母边的侵入边。

用求以块体 A 的边为母边的侵入边为例,整个过程如下:

设块体 A 的任一边 E_A^i 的两个端点为 V^1, V^2 , E_A^i 可记为 (V^1, V^2) , 块体 B 的某一个面 F_B^j 的外法向单位矢量为 n_j , 面上的任一点(可任取在此面上的一端点)为 V^B , 两块体接触成立的允许最大间距为 gap (gap 为一小值,其取值根据具体的模型而不同,一般与块体尺寸、每循环计算的位移等有关),则

(1) 对 i 循环,取 E_A^i , 即 (V^1, V^2) ;

(2) 对 j 循环,取 F_B^j ;

(3) 求 V^1, V^2 到 F_B^j 的距离:

$$d_1 = \overrightarrow{V^1 V^B} \cdot n_j - gap \quad (5)$$

$$d_2 = \overrightarrow{V^2 V^B} \cdot n_j - gap \quad (6)$$

(4) 若 $d_1 > 0, d_2 > 0$, 则此边相对于此面无截留部分,进入下一 E_A^i 循环;

(5) 若 $d_1 < 0, d_2 < 0$, 则 E_A^i 边对于 F_B^j 面的截留部分为 E_A^i 边的全部,该边仍为 (V^1, V^2) , 进入下一 F_B^j 循环;

(5) 若 $d_1 d_2 < 0$, 则 F_B^j 分割 E_A^i 边,分割点为

$$V^{cut} = V^1 + \frac{d_1}{d_1 - d_2} (V^1 - V^2) \quad (7)$$

E_A^i 边经 F_B^j 面截留后的截留部分为

$$\left. \begin{aligned} (V^{cut}, V^2) & \quad d_1 > 0 \\ (V^1, V^{cut}) & \quad d_2 > 0 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

此时,对于 E_A^i 边的判断在以后的循环中以截留部分代替,进行下一 F_B^j 循环。根据如上步骤,对 A, B 两块体的各边和各面循环截留后,便求得了 A, B 两块体的接触侵入边。

3.4 根据侵入边信息对接触和接触形式的判断

可以证明,对于任两块体 A, B , 其点集为 $\{x_A\}, \{x_B\}$, 其所有边上点的集合为 $\{x_{Ae}\}, \{x_{Be}\}$, 则 $\{x_A\} \cap \{x_B\} \neq F$ 的充分必要条件是

$$(\{x_A\} \cap \{x_{Be}\}) \cup (\{x_{Be}\} \cap \{x_{Ae}\}) \neq F \quad (9)$$

若考虑接触允许间距 gap 的扩展点集为 $\{x_A^{gap}\}, \{x_B^{gap}\}$, 则式(9)可写为

$$(\{x_A^{gap}\} \cap \{x_{Be}\}) \cup (\{x_{Be}^{gap}\} \cap \{x_{Ae}\}) \neq F \quad (10)$$

由上可知,两块体接触与否的判断,就是只需判断两块体的接触侵入边存在与否。若两块体无接触侵入边,则此两块体不接触;否则,两块体接触。

对于两凸多面体 A, B , 其可能的所有接触形式在 3.1 节中已列出。根据各种接触形式,其接触侵入边性质分别如表 1 所述,在接触形式判断中,可根据所得的侵入边信息而推断出接触形式。

接触形式判断之前还有一些重要数据需要统计,如 A, B 两块体侵入边中的原始点的数量为 $N_A^{original}, N_B^{original}$, 若干个侵入边中有共同原始点的只能算一个。获得了侵入边后, $N_A^{original}, N_B^{original}$ 是很容易得到的。

根据侵入边信息判断接触形式见表 2。表中, N_A^i 表示块体 A 编号 i 的侵入边的条数,其余类推。

表 2 所列的接触形式及其对应的侵入边性质,能够通过较少的计算量就可确定出接触的形式,且易于计算机程序的实现。

侵入边法在实际应用于 DEM 或 DDA 计算程序中,还涉及到接触力的施加、求接触面积以及用该方法对凹块体的接触判断等,将另文介绍。

3.5 鲁棒性和计算效率论述

侵入边法的鲁棒性由 2 方面决定:(1) 两块体接触判断的准确性;(2) 两块体接触形式识别的准确性。

表 2 接触形式及其对应的侵入边信息
Table 2 Contact types and corresponding penetration information

接触形式	侵入边性质
角-角接触	$N_A^{original} = N_B^{original} = 1$ $\begin{cases} N_A^i > 0, N_B^i > 0 & i = 3 \\ N_A^i = 0, N_B^i = 0 & i \neq 3 \end{cases}$
角-边接触	$N_A^{original} + N_B^{original} = 1$ $\begin{cases} N_A^3 > 0, N_B^5 = 1 & \text{若 } N_A^{original} = 1 \\ N_B^3 > 0, N_A^5 = 1 & \text{若 } N_B^{original} = 1 \end{cases}$
边-边接触	$\begin{cases} N_A^i = 1, N_B^i = 1 & i = 5 \\ N_A^i = 0, N_B^i = 0 & i \neq 5 \end{cases}$
边-边重合接触	$N_A^1 + N_A^2 + N_A^4 = 1$ $N_B^1 + N_B^2 + N_B^4 = 1$ $2 N_A^{original} + N_B^{original} = 4$
角-面接触	$N_A^{original} + N_B^{original} = 1$ $\begin{cases} \sum N_B^i = 0 & \text{若 } N_A^{original} = 1 \\ \sum N_A^i = 0 & \text{若 } N_B^{original} = 1 \end{cases}$
边-面接触	$N_A^1 + N_A^2 + N_A^4 + N_B^1 + N_B^2 + N_B^4 = 1$
面-面接触	$N_A^1 + N_A^2 + N_A^4 + N_B^1 + N_B^2 + N_B^4 = 3$

从侵入边法判断块体接触与否的步骤可知，两块体接触与否直接根据两块体侵入边存在与否来决定，而侵入边的存在与否在几何上求取是确定的，所以两块体是否接触的判断也是确定的。而块体接触形式的识别由表 2 可一一对应地确定，故其接触形式的识别也是确定的，从而可知该方法对于接触判断是鲁棒的。

侵入边法的计算效率同理可从其判断步骤知道。其对两块体的接触判断所要进行的计算量主要有 2 部分：(1) 获取侵入边的计算；(2) 识别接触形式的计算。

从 3.3 节可知，获取侵入边的计算循环步 *step* 为

$$step \quad E_A F_B + E_B F_A \quad (11)$$

而每循环步的计算量只需 2 或 3 个简单算式，即式(5)~(7)(若边与面相交)，从循环步数和每循环步的计算量看，其总计算量是很少的。而识别接触形式只需对所获得侵入边的一些性质与表 2 进行一简单判断，其计算量相对于整个过程几乎可忽略。

以文[12]对 2 个六面体单元的判断为例，确定公共面所需的计算次数分别为：公共面法：800 次；改进公共面法：48 次。

以效率高的改进公共面法为例，如上所述的每次计算，包含有 8 次(8 个角点)的求点到面的距离计

算，1 次确定公共面单位外法向量计算，实际所需最多运算算式数为：48 × 9 = 432 个。值得注意的是，该方法只对有面参与的接触形式才有效，即图 6~8 所示的接触形式。

本文方法所需最多运算算式数为：(12 × 6 + 12 × 6) × 3 = 432 个。但本文方法具有更普遍的意义。

4 算例

采用侵入边法对 3 个算例(图 9~11)进行了计算。图中所用程序为作者开发的三维块体系统分析程序。图中为一个 10 m × 10 m × 10 m 的立方体，设图中左下角端点坐标为：(0, 0, 0)，右上角端点坐标为：(10, 10, 10)。算例 1(图 9)中切割立方体的面的方程为 3 个：x=5, y=5, z=5，块体数为 8 个。算例 2(图 10)中切割立方体的面为 3 个：x+y=10, y+z=10, z+x=10，块体数为 8 个。算例 3(图 11)中切割立方体的面为 6 个：x=5, y=5, z=5, x+y=10, y+z=10, z+x=10，块体数为 26 个。

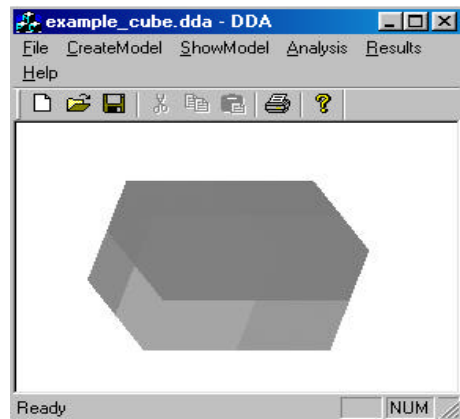


图 9 算例 1
Fig.9 Example 1

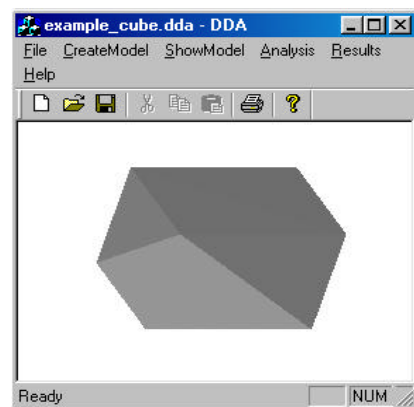


图 10 算例 2
Fig.10 Example 2

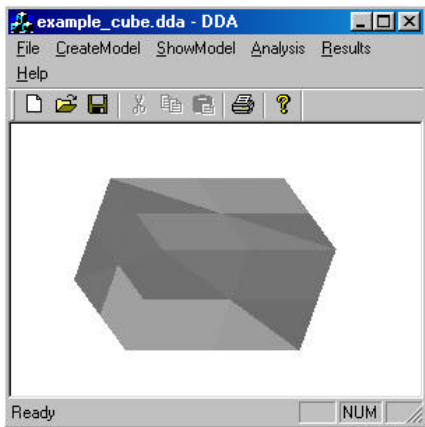


图 11 算例 3
Fig.11 Example 3

图 12 为算例 3 块体网格透视图。表 3 为所检索到的块体接触数和各接触形式的数目。读者可进行验证。

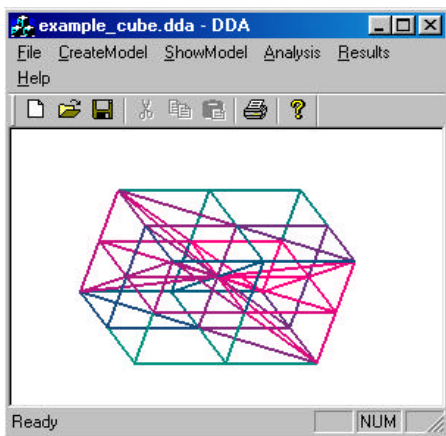


图 12 算例 3 块体网格透视图
Fig.12 Grid Scenograph of example 3

表 3 图 9~11 中块体接触检索结果
Table 3 Contacts for Fig.9~11

接触形式	图 9	图 10	图 11
角-角接触	4	4	205
角-边接触	0	0	0
边-边接触	0	0	0
边-边重合接触	12	4	78
角-面接触	0	0	0
边-面接触	0	0	0
面-面接触	12	20	42
总接触数	28	28	325

5 结 语

三维块体的接触判断问题一直是三维块体方法

(DEM、DDA 等)研究中的一个难点,本文先对三维接触问题及判断方法作了简要概括,对三维凸多面体的所有接触形式进行了分类,共提出了 7 种接触形式,使复杂的三维接触形式归纳为 7 种容易识别的接触形式。提出了三维接触判断新方法,即文中所述的侵入边法。文中详述了侵入边法的原理、方法和实施步骤,提出了侵入边获得的方法及通过侵入边识别接触形式的方法。本文所提出的方法计算工作量小、鲁棒性好且容易计算机实现。该方法已应用于有关程序的开发,并已得到理想的效果。

参 考 文 献

- 1 Cundall P A. A computer model for simulating progressive , large-scale movements in blocky rock systems[A]. In : Proc. of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics[C]. Nancy France : [s. n.] , 1971 , 1 : 11 ~ 18
- 2 Shi Genhua. Discontinuous deformation analysis—a new numerical model for the statics and dynamics of block system[Ph.D thesis][D]. Berkeley :Department of Civil Engineering , University of California , 1988
- 3 Cundall P A. Formulation of a 3-D distinct element model—part I. a scheme to detect and represent contacts in system composed of many polyhedral blocks[J]. Int. J. Rock Mech , Min. Sci. & Geomech. Abstr. , 1988 , 25(3) : 107 ~ 116
- 4 Cheng Y M. Advancement and improvements in discontinuous deformation analysis[J]. Int. J. Computational Geotechnics , 1998 , 22(2) : 153 ~ 163
- 5 O' Rourke J. Computational Geometry in C , 2nd ed[M]. Cambridge : Cambridge University Press , 1998
- 6 焦玉勇. 三维离散单元法及其应用[博士学位论文][D]. 武汉 : 中国科学院武汉岩土力学研究所 , 1998
- 7 姜清辉. 三维非连续变形分析方法研究[博士学位论文][D]. 武汉 : 中国科学院武汉岩土力学研究所 , 2000
- 8 姜清辉, 杨文柱, 吴益民等. 三维非连续变形分析方法中摩擦接触问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2002 , 21(增 2) : 2 418 ~ 2 421
- 9 郭易圆, 李世海. 离散元法在节理岩体爆破振动分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报 , 2002 , 21(增 2) : 2 408 ~ 2412
- 10 Caroline H. Shape representation and contact detection for discrete element simulations of arbitrary geometries[J]. Int. J. Engineering Computations , 1998 , 15(3) : 374 ~ 390
- 11 Liu X L , Lemos J V. Procedure for contact detection in discrete element analysis[J]. Int. J. Advances in Engineering Software , 2001 , 32(4) : 409 ~ 415
- 12 罗海宇, 焦玉勇. 对三维离散单元法中块体接触判断算法的改进[J]. 岩土力学 , 1999 , 20(2) : 37 ~ 40