本书获北京市优秀人才培养个人项目资助

非连续变形分析方法及其在地下工程中的应用

刘 军 李仲奎 萧 岩 著

地质出版社

本书获北京市优秀人才培养个人项目资助

非连续变形分析方法及其在地下工程中的应用

刘 军 李仲奎 萧 岩 著

地 质 出 版 社

·北 京·

内 容 提 要

岩体是由大量的结构面和由这些结构面切割而成的一系列大小不等、形状不一的岩块组成的，具有很强的不连续性，非连续变形分析方法（DDA）是合理地描述岩体不连续力学行为的一个有力工具。全书共分4章，阐述了非连续变形分析方法的基本原理，论述了结构面的一些基本特征，认为块体单元由随机性结构面和确定性结构面构成，并应用 Monte Carlo 方法解决了 DDA 方法中块体单元自动形成的问题；研究了结构面在块体系统中的力学行为，及其在实际工程中的应用。

本书可作为岩土工程专业本科生、研究生的教学参考书，也可作为水利水电、地下工程、采矿工程、铁道工程、公路工程等专业科技人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

非连续变形分析方法及其在地下工程中的应用/刘军等著．—北京：地质出版社，2006.7
ISBN 7-116-04928-2

Ⅰ．非…　Ⅱ．刘…　Ⅲ．地下工程－数值计算
Ⅳ．TU91

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 082292 号

责任编辑：孙亚芸
责任校对：王素荣
出版发行：地质出版社
社址邮编：北京海淀区学院路 31 号，100083
电　　话：(010)82324508（邮购部）；(010)82324569(编辑室)
网　　址：http://www.gph.com.cn
电子邮箱：zbs@gph.com.cn
传　　真：(010)82310759
印　　刷：北京长宁印刷有限公司
开　　本：787 mm×1092 mm 1/16
印　　张：8.5
字　　数：204 千字
印　　数：1—700 册
版　　次：2006 年 7 月北京第一版・第一次印刷
定　　价：26.00 元
ISBN 7-116-04928-2/P・2714

序

数值模拟分析作为解决岩体工程问题的有效手段，已越来越多地应用于岩体工程基本问题分析中。近年来，岩体力学数值计算得到了迅速发展，出现了各种方法，在这些方法中，非连续变形分析方法可以说是最具有应用前景的。非连续变形分析方法是近10年来发展起来的分析不连续介质力学的一种崭新的岩土工程数值模拟方法，是目前国际上研究的热点。该方法充分考虑了岩体的复杂性，将结构面所切割而成的块体作为分析单元，将动力学与静力学统一起来，用最小势能原理把块体之间的接触问题和块体本身的变形问题统一到矩阵中求解，理论严密，精度较高。

作者在充分地研究岩体中结构面的基础上，结合实际工程，运用Monte Carlo数值模拟技术形成非连续变形分析方法的分析单元，提出了划分确定性和随机性结构面的原则，提出了确定性块体单元和等效性块体单元；充分考虑了结构面充填厚度在块体系统中的作用，使得非连续变形分析方法更加符合实际、更加完善。作者所提出的块体单元的形成方法对离散元等其他非连续介质数值模拟方法单元的形成具有重要的意义，为进行三维非连续变形分析方法的研究奠定了一定基础。

总之，作者紧密联系工程实际，研究内容充实，创新点明确，所提出的研究方法及技术路线科学、合理，具有较强的理论研究和应用价值。目前，国内这方面的专著不多见，很欣慰作者的研究成果能在北京市优秀人才培养个人项目资助下出版，希望该书的出版能对非连续变形分析方法的进一步研究起到一定的促进与推动作用。

中国工程院院士 王思敬

2006年7月于清华园

前　言

笔者在清华大学做博士后期间，在中国博士后科学基金的资助下，对非连续变形分析方法进行了较为系统的研究，应用 Monte Carlo 方法解决了 DDA 方法中块体单元自动形成的问题，研究了结构面在块体系统中的力学行为，研究了岩体开挖过程中位移应力的变化特征，研究了锚杆支护的力学行为，充分考虑了预应力锚杆与围岩的粘结力，补充和发展了 DDA 方法，并在实际工程中获得应用。本书是在此基础上写就的。

具体研究内容为：

（1）在对结构面进行调查研究的基础上，划分出确定性的结构面和随机分布的结构面，确定划分原则；

（2）块体单元形成中，确定性的结构面构成确定性块体单元；随机分布的结构面应用 Monte Carlo 方法形成等效性块体单元，编制块体单元自动形成程序；

（3）应用弹性力学原理研究结构面对块体系统的影响，建立其由于变形而产生的势能及其对总体刚度矩阵的贡献；

（4）考虑锚固作用及预应力，研究锚杆支护在 DDA 方法中的应用；

（5）研究一些控制参数的取值问题；

（6）研究地下工程的开挖过程。

本书是在北京市优秀人才培养个人项目资助下出版的，作者深知自己水平有限，但由于目前这方面的书较少，才决定将这些不甚成熟的成果奉献出来。如果本书的出版，能使读者在研究非连续变形分析方法中获得一些启发，作者的目的便达到了。另外本书观点新颖，谬误之处在所难免，衷心希望读者批评指正。

作者在清华大学工作期间，曾得到徐千军副教授、李爱兰老师、王爱民老师、刘天云副教授、张明副教授，高政国、胡云进、王进廷、逯静洲、林鹏等博士后的关心与帮助，在此一并致以衷心的感谢。

作者

2006 年 6 月

目　　录

1 绪　　论

1.1 概　述

岩体力学主要有两种研究方法，即试验研究和理论研究。理论上，在处理具体岩体工程问题时，往往将其抽象为满足某种微分方程和一定边界条件的数学问题，但直接寻求其解析解非常困难，甚至是不可能的。电子计算机的发展，为各种数值模拟方法提供了许多发展契机，使得岩体力学的理论研究不断成熟和完善，所解决的岩体工程问题也更加广泛、深入，进一步深化了人们对岩体工程的理解[1]。

岩体是一种复杂的地球介质，应用数值模拟方法可考虑其各向异性、复杂的边界条件、不连续性及随时间变化等特性，因此数值模拟方法日益广泛地应用于岩体工程分析的各个方面。数值模拟方法的基本思路是将研究对象离散化，按照给定的本构关系，对单元进行力学、运动学分析，用所有单元的组合表达整体特性，在给定的边界条件下，用显式差分迭代或解联立方程组，求出变形和应力。目前，处理岩体工程的数值模拟方法可以分为两大类：一类是将岩体视为连续介质，主要有有限单元法、边界元法；另一类是将岩体视为非连续介质，充分考虑岩体结构特征，主要有离散单元法、刚性元法及非连续变形分析法。

1.1.1 有限单元法

有限单元方法（FEM）自20世纪50年代开始，已经在工程技术领域获得了极为广泛的应用，目前也成为处理岩土工程问题的有力工具；边界元方法是20世纪70年代兴起的一种数值方法，该方法具有降维作用，对于解决无限域或半无限域问题尤为理想[2]。有限单元方法以连续介质力学为基础，要考虑物质的连续性、介质物理力学性质的连续性及力学反应的连续性，将岩体在一定条件下视为连续介质或结合某种特殊单元（如节理单元）来模拟节理岩体的力学行为。

1.1.1.1 有限单元法的基本原理

有限单元法的基本原理用一弹性薄板为例来叙述说明，如图1.1所示。任意弹性薄板受到一定外力作用时，薄板内要产生相应的变形和应力，这种变形可用水平与垂直方向的位移分量 u、v 来表示，u、v 大小与位置（坐标）有关，即：

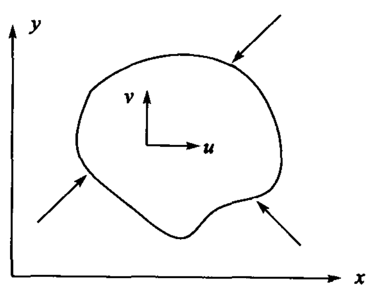

图1.1　任意弹性薄板

$$u = u(x,y)$$
$$v = v(x,y) \tag{1.1}$$

由于 u、v 与位置有关，故将 u、v 称为位移函数。

若求得上述的位移函数，则可由弹性力学的基本公式求得薄板中任一点的应变与应力，即：

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$$
$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \tag{1.2}$$
$$\gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$\sigma_x = \frac{E_0}{1-\mu^2}(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)$$
$$\sigma_y = \frac{E_0}{1-\mu^2}(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x) \tag{1.3}$$
$$\tau_{xy} = \frac{E_0}{2(1+\mu)}\lambda_{xy}$$

可见，若求得薄板中任一点的应力，必须先求得位移函数，这种通过位移函数求得应力的方法称为“按位移求解”。

1.1.1.2 有限单元法的基本方程

从数学角度来看，有限单元法是把求解域内的连续场函数转化为求解有限个离散点处的场函数值，显然这种离散化的处理是一种近似，因此当单元划分的适当时，才能保证求解精度。由于所划分的单元足够小，在一个微小的单元内，未知的场函数就可以采用十分简单的代数多项式来近似地表示，即

$$u = \sum_i^n N_i u_i \tag{1.4}$$

或

$$\boldsymbol{u} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \boldsymbol{N\delta}^e$$

式中：$\boldsymbol{N}$ 为行函数矩阵，$\boldsymbol{N} = [N_1,\ N_2,\ N_3,\ N_4]$，通常为坐标的函数；$\boldsymbol{\delta}^e$ 为单元的节点位移向量。

单元内的应变可由（1.2）式求得，即：

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{B\delta}^e = \sum \boldsymbol{B}_i\boldsymbol{\delta}_i \tag{1.5}$$

式中 $\boldsymbol{B}$ 为应变矩阵，直接用节点位移来表示：

$$\boldsymbol{B}_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

同样由（1.3）可求出单元应力矩阵：

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{E}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\delta}^{e} \tag{1.6}$$

式中 $\boldsymbol{E}$ 为弹性矩阵：

$$\boldsymbol{E} = \frac{E_0}{1-\mu^2}\begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}$$

单元能量泛函为：

$$\begin{aligned} \Pi^{e} &= \int_S \frac{1}{2}\boldsymbol{\varepsilon}^{T}\boldsymbol{\sigma}\,\mathrm{d}S - \boldsymbol{\delta}^{eT}\boldsymbol{f}^{e} \\ &= \frac{1}{2}\boldsymbol{\delta}^{eT}\int_S \boldsymbol{B}^{T}\boldsymbol{E}\boldsymbol{B}\boldsymbol{\delta}^{e}\,\mathrm{d}S - \boldsymbol{\delta}^{eT}\boldsymbol{f}^{e} \end{aligned} \tag{1.7}$$

根据最小势能原理，在所有可能的位移函数中，真实位移使结构体系的总势能有最小值，即：

$$\frac{\partial \Pi^{e}}{\partial \delta^{e}} = 0$$

因此有

$$\int_S \boldsymbol{B}^{T}\boldsymbol{E}\boldsymbol{B}\,\mathrm{d}S\boldsymbol{\delta}^{e} - \boldsymbol{f}^{e} = 0$$

令

$$\boldsymbol{k}^{e} = \int_S \boldsymbol{B}^{T}\boldsymbol{E}\boldsymbol{B}\,\mathrm{d}S \tag{1.8}$$

则

$$\boldsymbol{f}^{e} = \boldsymbol{k}^{e}\boldsymbol{\delta}^{e} \tag{1.9}$$

严格地说，岩体是非连续介质，为了能应用连续介质力学原理解决岩体工程问题而提出了各种准则，如尺度相对性准则、主应力差效应准则等[3]；孙广忠[4]认为完整结构岩体、断续结构岩体、散体结构岩体以及碎裂结构岩体在一定条件下可当作连续介质。随着对岩体的深入理解，逐步认识到岩体中包含的大量结构面对岩体力学特性和工程稳定起控制作用，并认为这是构成岩体和岩块力学与工程特性差异的根本原因。

1.1.2　离散单元法

离散单元法（DEM）[5]是由 Cundall 于 1971 年提出的，也像有限单元法一样将分析域划分成单元，即块体单元，但单元由于受结构面等不连续面的控制，在以后的运动中，单元之间可以相互接触也可以相互分离，在单元之间的约束下应用牛顿第二定律描述各单元的运动。它用显式解法，不用求解大型方程组，用中点有限差分方程近似地对运动方程进行积分计算，并假设块体在运动时动能转化为热能而耗散掉。计算中引入人工粘性阻尼系统达到平衡、运动趋于稳定。

1.1.2.1　离散单元法的基本原理

解决连续介质力学问题时，除了满足边界条件外，还必须满足 3 个方程，即平衡方程、变形协调方程、物理方程。对于离散单元法而言，一开始就假定各单元之间是不连续的，因此单元之间没有变形协调的约束，但平衡方程必须满足。

对于某个块体 B（图 1.2），其上有邻接块体通过边角作用于它的一组力。如果考虑自重，则还要加上重力。

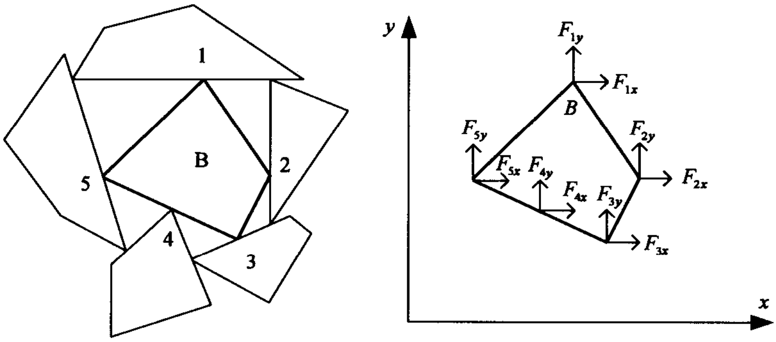

图 1.2　作用于块体上的力

1 ~5 为相邻块体

这一组力对块体的重心会产生合力 F 和合力矩 M。如果合力和合力矩不等于零，则不平衡力和不平衡力矩使块体按照牛顿第二定律运动，块体的运动不是自由的，会受到邻近块体的阻力。这种位移和力的关系相当于物理方程，它可以是线性的也可以是非线性的。计算按照时步迭代，遍历每一个块体，直到每一个块体都不出现不平衡力和不平衡力矩为止。

1.1.2.2　离散单元法的基本方程

假如块体之间的法向力 F_n正比于它们之间的叠合 u_n，则：

$$F_n = k_n u_n \tag{1.10}$$

式中 k_n为法向刚度系数。

块体运动中不仅要受到法向力还要受到剪切力（图 1.3），由于剪切力于与块体运动和加载历史及加载路径有关，因此用增量 ΔF_s来表示，即：

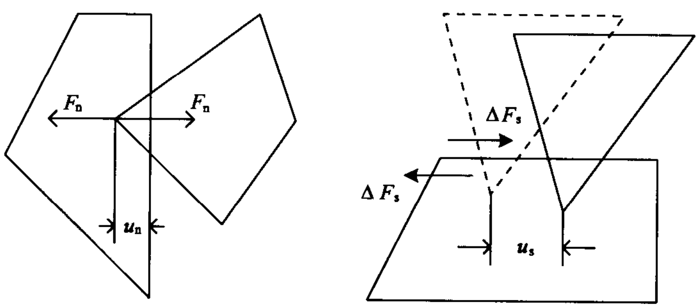

图 1.3　块体间的法向力与剪切力

$$\Delta F_s = k_s u_s \tag{1.11}$$

式中 k_s为切向刚度系数。

根据块体的几何形状与周围邻近块体的关系，可利用上述计算原理计算出作用在某一块体上的一组力，进而计算出合力与合力矩，并可根据牛顿第二定律计算出块体质心的加

速度与角加速度，以确定在时步 Δt 内的速度、加速度及位移、转动量。

例如，在 x 方向，有加速度：

$$\ddot{u} = \frac{F_x}{m} \tag{1.12}$$

式中：F_x为 x 方向的合力；m 为块体的质量。

对式（1.12）用向前差分格式进行数值计算，可以得到 x 方向的速度与位移：

$$\begin{aligned} \dot{u}_x(t_1) &= \dot{u}_x(t_0) + \ddot{u}_x(\Delta t) \\ u_x(t_1) &= u_x(t_0) + \dot{u}_x(\Delta t) \end{aligned} \tag{1.13}$$

式中：t_0为起始时间；Δt 为时步，且 $t_1 = t_0 + \Delta t$。

在 y 方向的计算，与 x 方向的类似。

离散单元法的优点是比较简单，不需要集成大型矩阵，但存在一些不确定因素，缺乏理论的严密性，计算中力系不能完全平衡，精度较差[6]。

另外，刚性元法[7]最初由 Kawai 提出，也是以块体作为分析单元，块体之间采用界面上的法向和切向弹簧连接，以块体形心位移为基本变量，不考虑块体本身的变形，用分片的刚体位移模式逼近实际整体位移场，以块体之间的弹簧反映结构内部的弹性，并用界面应力表征结构内部的应力。该方法大大减少了问题的自由度，提高了计算效率，计算结果精度较高，能估算出体系的极限荷载。但其无法模拟块体失稳后的运动过程，而且忽视了块体本身的变形。

1.1.3 非连续变形方法

非连续变形分析方法（DDA）是由美籍华人石根华[8][9]提出的一种新的数值模拟方法。该方法平行于有限元法，充分考虑了岩体的复杂性，将结构面所切割而成的块体作为分析单元，将动力学与静力学统一起来，用最小势能原理把块体单元之间的接触问题和块体单元本身的变形问题统一到矩阵中求解，具有完备的运动学理论、严格的平衡假定、正确的能量消耗。自 1986 年 DDA 方法问世以来，受到了国内外岩土工程界学者的广泛关注，其有效性已被国外学者证明[8]。

目前用于分析岩体非连续性的方法较多[10]，其中非连续变形分析方法（DDA）可以说是最有发展前景的方法。一般文献均将非连续变形分析方法归结为离散元法，但就其本质上来说更像有限元法，准确地说 DDA 方法是介于有限元法与离散元法之间的一种数值模拟方法（图 1.4）。DDA 方法求解的是有限元法类型的网格单元，未知数也为位移，具有与有限元法形函数类似的位移转换矩阵；二者总体平衡方程都可以由最小势能原理推导出，而且具有相同的格式，作者认为 DDA 方法具有以下 3 个显著的特征。

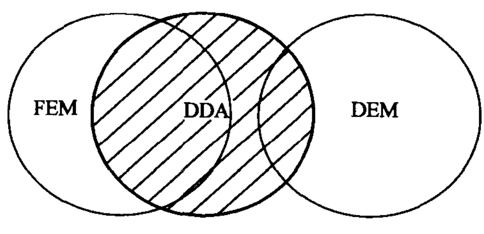

图 1.4　FEM、DEM 与 DDA 的关系

（1）单元形状的任意性：由于 DDA 方法是用单元的刚体位移、转动及变形作为未知

数，而不是用节点位移，因此其能处理任意形状的单元网格，这一点是有限元法无可比拟的。

（2）单元之间的接触关系：DDA 方法中一个重要问题就是单元接触关系的判断，这也是 DDA 方法的难点。一般来说，单元的接触具有两种类型，每一种类型都具有张开、滑动与锁定三种形式。接触判断具有距离接触准则和角度接触准则。单元之间的接触必须满足无拉力与无嵌入。库仑摩擦定律是能量消耗的主要原因。

（3）惯性力：惯性力是用来防止（刚体）块体的自由移动的。计算中引入了时间因素，即考虑变形有一时间过程。对动力问题及静力问题，荷载、位移均与时间有关，即位移具有速度和加速度。

1.2 非连续变形方法研究现状

国内外对非连续变形方法的研究主要集中在以下方面：块体应力场的描述、块体的接触判断、刚体 DDA 方法等方面，并在多个方面得到应用。

1.2.1 块体内应力场的描述

DDA 方法中，块体的位移模式为全一阶近似模式，因此每个块体内的应力应变为常数，块体较大时得不到块体内部精确的应力状态。为此，许多学者提出了各种提高块体内场函数值精度的方法。石根华[8][9]本人也注意到了这个问题，并提出了高价位移公式和级数位移近似，认为块体内任意点位移（x，y）可表示如下：

$$\begin{aligned} u &= \sum_{j=1}^{n} a_j f_j(x,y) \\ v &= \sum_{j=1}^{n} b_j f_j(x,y) \end{aligned} \tag{1.14}$$

式中：f（x，y）相当于位移转换矩阵；a、b 为变形变量。

C. Y. Koo 和 J. C. Chern[11]及 Y. M. Max 等[12]采用了三阶多项式作为块体的位移模式，得到如下表达式：

$$\begin{aligned} u &= d_1 + d_3x + d_5y + d_7x^2 + d_9xy + d_{11}y^2 + d_{13}x^3 + d_{15}x^2y + d_{17}xy^2 + d_{19}y^3 \\ u &= d_2 + d_4x + d_6y + d_8x^2 + d_{10}xy + d_{12}y^2 + d_{14}x^3 + d_{16}x^2y + d_{18}xy^2 + d_{20}y^3 \end{aligned} \tag{1.15}$$

该位移模式应用悬臂梁进行了验证，认为精确地描述了块体内的位移和应力状态，并可用于模拟材料的破坏。但该方法的未知项达到 20 个，每个子矩阵达到 20 × 20 阶，极大地增加了计算时间。

Kuokai Shyu（1993）[13]和 Chung Yue Wang（1994）[14]等对有限元和 DDA 方法进行了耦合分析，即用有限元方法描述块体内部的位移场和应力场，在块体内部剖分有限单元网格，该方法不仅提高了块体内应力场的计算精度，而且继承了 DDA 方法中块体运动学的理论，描述块体系统大位移、大变形的能力（图 1.5）。

B. Amadei 和 T. C. Ke[15][16]认为没有必要在块体内添加有限元网格，而提出了次块体理论，即在原来大的块体内又划分出小的块体，用以描述块体内的应力场及块体的破裂行为。

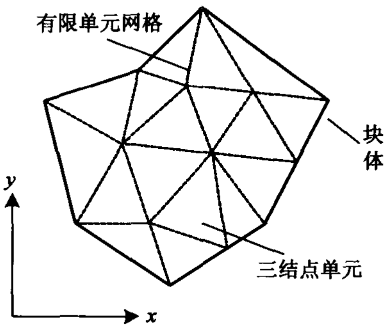

图 1.5 块体内部有限单元网格

T. C. Ke (1994)[16]在次块体理论的基础上提出了基于人工节理的非连续变形分析方法，其在块体单元内用假想的三角形或四边形将块体单元剖分，用“切割”、“粘贴”的方式研究块体系统的力学行为。

1.2.2 块体的接触判断

块体系统中块体之间的接触判断是一个很重要的问题。在接触问题上，石根华最早用罚函数来处理。这种方法有其优点，即总体平衡方程的方程数量不增加而且容易得到解答。B. Amadei 和 T. C. Ke[15][16]等认为该方法有三个缺点，即接触问题的解答精度与所选取的罚数关系密切；罚函数方法仅能近似地满足接触限制并且接触力必须先计算出来。为了克服这些缺陷，他们应用增广拉格朗日乘子法来代替 DDA 中的罚函数法进行接触处理。如图 1.6 所示。增广拉格朗日乘子法包含一个拉格朗日乘子 λ^* （代表接触力 λ） 和一个罚数（代表接触弹簧的刚度），接触力可以表示为：

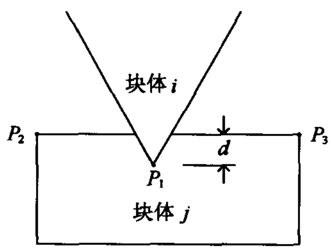

图 1.6 块体的嵌入接触

$$\lambda \approx \lambda_{k+1}^* = \lambda_k^* + pd \tag{1.16}$$

式中：p 为罚数，但不是一个很大的数；λ_k^* 为第 k 次迭代时的拉格朗日乘子，λ_{k+1}^*为修正过后的拉格朗日乘子；d 为嵌入距离。

在第 k 次迭代，由接触力引起的应变能为：

$$\Pi_S = \lambda_k^* d + \frac{1}{2}pd^2 \tag{1.17}$$

上式中包括两部分，第一项是由拉格朗日乘子引起的应变能，第二项是由惩罚因子引起的应变能。对该式求导使应变能最小化，便可得到它们在块体系统中的贡献。

Y. M. Cheng[17]提出用节理单元的概念来模拟块体的接触，认为块体之间允许有一定程度的嵌入 d （图 1.6），嵌入后所引起的势能为：

$$\Pi = \frac{1}{2}(k_n d_n^2 + k_s d_s^2) \tag{1.18}$$

式中 k_n，k_s，d_n，d_s 分别为法向和切向的刚度和嵌入量。这种方法类似于离散元法，需要确定法向和切向的刚度。

1.2.3 刚体 DDA 方法及块体转动误差校正

C. Y. Koo 和 J. C. Chern[18]认为块体系统的块体主要是滑动和转动，而其本身的变

形很小，可看作是刚体，提出了刚体 DDA 方法，认为块体的位移可表示为：

$$
\begin{aligned}
u &= u_0 + (x - x_0)(\cos r_0 - 1) - (y - y_0)\sin r_0 \\
v &= v_0 + (x - x_0)\sin r_0 - (y - y_0)(\cos r_0 - 1)
\end{aligned}
\tag{1.19}
$$

上式中符号意义同（1.1）式。当刚体的转动很小时，上式可简化为近似的线形位移函数：

$$
\begin{aligned}
u &= u_0 - (y - y_0)r_0 \\
v &= v_0 + (x - x_0)r_0
\end{aligned}
\tag{1.20}
$$

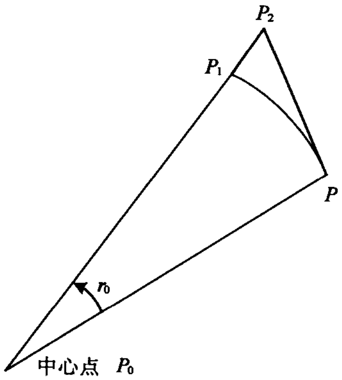

图 1.7　块体转动误差

该方法将未知数减少到 3 个，使所形成的总体平衡方程简化，从而节省了机时。但该位移场是不完全一次多项式，不具备完备性。

DDA 方法中由于采用的是线形位移函数，因此块体转动时会产生误差，而造成块体的膨胀（图 1.7）。P_1是 P 点绕 P_0点转动 r_0后的精确位置，而 P_2是 P 点绕 P_0点转动 r_0后采用线形位移函数的近似位置，$P_1 P_2$是所产生的误差，块体由 $P_0 P P_1$ 膨胀到 $P_0 P P_2$。为此，C. Y. Koo 和 J. C. Chern[18]提出了一种方法，采用线形位移函数式（1.20）来推导总体平衡方程，在每一个时步迭代后对块体的转动位置及时用精确函数式（1.19）去校对，使得在进行下一时步迭代时误差消除。

1.2.4　其他方面的研究

Kim Yong – Ⅱ 等（1996）[19]将 DDA 方法应用在水 – 块体的相互作用中；蔡永恩、梁国平等[20]采用拉格朗日乘子法和区域分解算法在 DDA 方法基础上提出了拉格朗日非连续变形方法（LDDA），用以描述块体系统动力下的变形分析；栾茂田、黎勇等[21]提出了基于接触单元的非连续变形力学模型；郑榕明等[22]研究了 DDA 方法与有限元方法的外部耦合，编制了相应的程序并在实际工作中得到了应用。

1.2.5　DDA 方法的应用

DDA 自问世以来已经获得极为广泛的应用。裴觉民等[23]将 DDA 方法应用在裂隙岩体边坡工程中，对原始边坡和开挖后的边坡进行了计算，并考虑了爆破作用对边坡稳定性的影响。T. C. Ke[24]应用 DDA 方法和极限平衡法研究了某边坡的稳定性，指出了 DDA 方法的优越性；Xuecheng Dong[25]将 DDA 方法应用在三峡船闸边坡的稳定性研究中；S. L. Zhao 等[26]、G. Q. Chen 等[27]将 DDA 方法应用在岩石边坡的稳定性分析中；Y. H. Hatzor[28]应用关键块体理论和 DDA 方法研究了 Masada 山脉某边坡的稳定性及破坏模式；周少怀等[29]基于 DDA 算法，补充和发展了 DDA 方法计算机程序，分析了边坡大位移问题和地下开挖引起地面变形的工程实例，并与离散元计算结果进行了比较研究。Kim Yong-

Ⅱ等（1996）[19]将DDA方法应用在地下工程的开挖及岩体支护设计中，认为所建立的算法可以模拟地下工程的开挖过程。首先要计算出开挖前岩体内的应力状态，其次根据第一次开挖步来确定新产生的应力分布，新产生的应力作为下一次开挖的初始应力，开挖过程结束以前一直进行这样的迭代计算。经过算例研究，认为岩体开挖的最终稳定性与开挖次序及相应的应力历史有关。另外，他们还进行了喷射混凝土和混凝土衬砌方面的研究，将喷射混凝土和混凝土衬砌处理成具有一定厚度和材料性质的单元进行分析研究。邬爱清等[30]根据已初步开发出的DDA模型计算程序，分别就某工程试验洞开挖和边坡明挖问题进行了计算，并与有限元结果进行了比较，结果表明，DDA模型计算结果在岩体开挖位移形态及位移量级上与有限元及实际位移监测结果都具有较好的可比性。

Kuokai Shyu等[13]应用DDA方法研究了在地震作用下Bartlett坝肩的稳定性；Shilong Zhao等[31]应用DDA方法研究了岩体的倾倒破坏问题；Lanbo Liu[32]应用DDA方法研究了大地构造学中的板块运动；Takeshi Sasaki等[33]应用有限元方法和DDA方法研究了裂隙岩体地基的稳定性，结果与解析分析极为吻合；C. J. Pearce等（1998）[34]将DDA方法应用在混凝土破裂行为模拟中；Y. I. Kim等[35]将DDA方法应用在混凝土坝基的稳定性分析中；S. M. Hsiung[36]等将DDA方法应用在地震荷载对地下工程的稳定性影响中；A. Mortazavi等[37]将DDA方法应用在矿山岩暴分析中；戴华阳等[38]提出了急倾斜煤层开采地表非连续变形的度量方法。

DDA方法主要是针对岩石介质的，T. C. Ke等[39]、P. A. Thomas等[40]、Yuzo Ohnishi等[41]、Kuokai Shyu等[42]将其应用在土力学中，给出了颗粒体介质DDA的算法；Y. N. Oh等[43]将DDA方法应用在海堤基础及地基土的相互作用中；L. K. Chien[44]等将DDA方法应用在海床的冲刷与回填稳定性分析中；张国新等[45]采用正多边形体代替圆形颗粒体来模拟土的应力－应变关系。

国内外学者对DDA的大量研究，使得该方法更加成熟、更加适合于岩体系统的变形分析。由于DDA方法具有完备的块体运动学理论，且将静力分析与动力分析统一起来，因此其具有处理结构工程、岩体力学以及材料分析等方面的能力。但也应该清晰地看到，DDA方法问世仅10余年，在具体应用上仍然存在一些不足。我们知道，DDA方法最初是用于解决岩体不连续变形问题的，其用实际结构面所切割的岩块作为分析单元，但目前国内外在研究与应用DDA方法中均忽略了对结构面的调查与研究，往往用假想的规则的块体单元或者考虑了规模比较大的实际结构面所形成的块体单元进行研究[46]，忽略了随机分布的较小规模的结构面，这样的单元仅能用于验证DDA的有效性，而不能用于实际工程中；另外目前的研究忽略了结构面的充填厚度，实际上结构面的充填物对岩体的稳定性具有重要的影响。从工程实践来看，结构面不论规模大小几乎都有一定程度的充填，结构面的充填物不能像文献[47]等那样简单地理解为软弱夹层，充填的是泥土、碎石土等，事实上，在新鲜岩体内结构面的充填物具有相当高的弹性模量，且充填厚度与结构面的规模成一定比例关系[48]。岩体变形包括结构体（块体）变形和结构面变形，因此块体系统的变形不仅发生在块体本身，也包括结构面的变形，而且块体本身的变形往往小于结构面的变形，因此要合理地描述整个块体系统的变形，应该研究结构面的变形对整个块体系统变形的贡献。

2 块体单元的形成

前已述及，非连续变形分析（DDA）最初是研究非连续块体系统不连续位移和变形的一种崭新的数值分析方法。与有限元方法类似，DDA 也首先要将分析域离散为小区域，即块体单元。这种块体单元，可按实际结构面生成，这就为数值模拟分析与实际工程的结合找到了一个切入点，使 DDA 在解决岩体稳定性问题上具有极为强大的生命力。目前 DDA 研究中忽视了构成块体的单元最基本层次——结构面的作用。研究表明，结构面是在长期的地质历史演化中形成的，经受了建造与改造过程，加之岩石材料本身的非均匀性，从而导致了岩体结构面分布的随机性、形态的多样性、分布的不均匀性和空间组合的复杂性，或者说所构成的块体单元也应该是随机的、形态多样的和复杂的。工程实践表明，结构面根据其规模可以分为若干级，较大的结构面一般来说是确定的，可以通过钻孔、勘探平洞及野外露头的调查获取较为精确的产状、出露位置等几何参数，如断层、层面等；而较小的结构面的分布往往是随机的，但反映岩体结构面分布特征的几何参数（间距、倾向、倾角等）则服从一定的统计规律。因此，对于较大的结构面应该按野外调查的实际情况输入计算机，形成大的块体单元，其形态是任意的；对于具有统计意义的结构面所形成的块体单元，则应该考虑其随机性，也就是说在确定性的大的块体单元中具有随机分布的较小的块体单元，可应用 Monte Carlo 方法形成，这种块体单元定义为等效块体单元。

2.1 结构面的基本特性

岩体具有一定的结构特征，它是由岩体中含有的不同类型的结构面及其在空间的分布和组合状况所决定的。结构面是岩体的本质特征，是在地质发展过程中在岩体内形成的具有一定方向、一定规模、一定形态和特性的面、缝隙以及带状的地质界面。结构面的存在，导致了岩体力学性能的不连续性、不均一性和各向异性，是岩体中力学性质相对薄弱的部位，对岩体在一定荷载作用下的变形破坏方式和强度特征起着控制作用。因此研究结构面的基本特征对于形成块体单元具有重要意义。

2.1.1 结构面分级

不同的学者对结构面的分级有不同的看法，谷德振[49]按照由远及近、由大到小的顺序，把区域稳定性、山体稳定性及工程具体部位岩体稳定性结合起来将结构面分为如下 5 级（表 2.1）。

Ⅰ级结构面：一般泛指对区域构造起控制作用的断裂带，延伸数十千米；