

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2021 年 12 月 9 日 (09.12.2021)



(10) 国际公布号
WO 2021/243765 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 30/20 (2020.01) *G06F 119/14* (2020.01)
G06F 17/16 (2006.01) *G06F 119/08* (2020.01)
G06F 111/10 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2020/097584

(22) 国际申请日: 2020 年 6 月 23 日 (23.06.2020)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202010503940.8 2020年6月5日 (05.06.2020) CN

(71) 申请人: 南京大学(NANJING UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道
163号, Jiangsu 210023 (CN)。

(72) 发明人: 刘春(LIU, Chun); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。 朱遥(ZHU, Yao); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。 刘辉(LIU, Hui); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。 乐天呈(LE, Tiancheng); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。 施斌(SHI, Bin); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。 王宝军(WANG, Baojun); 中国江苏省南京市栖霞区仙林大道163号, Jiangsu 210023 (CN)。

(74) 代理人: 南京瑞弘专利商标事务所(普通合伙)(NANJING RUIHONG PATENT & TRADEMARK AGENCY (ORDINARY PARTNERSHIP)); 中国

(54) Title: DISCRETE ELEMENT FLUID-SOLID COUPLING NUMERICAL SIMULATION METHOD BASED ON GPU MATRIX, AND SYSTEM

(54) 发明名称: 基于GPU矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法及系统

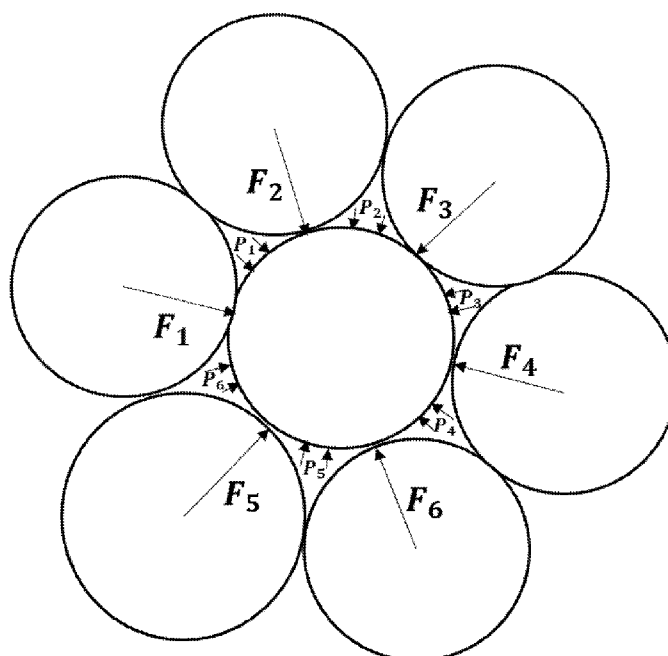


图9

(57) Abstract: Disclosed in the present invention are a discrete element fluid-solid coupling numerical simulation method based on a GPU matrix, and a system. The method comprises: establishing a pore network model; establishing a fluid unit migration model, wherein fluid units in pores are connected by means of pore throats among particle units, permeation of the fluid units obeys the Darcy's law, the flow of the fluid units is determined by rock and soil mass properties, diameters of the pore throat and the like, and water pressure, temperature and density have a function relational expression; and exerting a fluid-solid coupling effect, wherein pore water

江苏省南京市玄武区龙蟠路155号3幢
411室, Jiangsu 210000 (CN)。

- (81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。
- (84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

根据细则4.17的声明:

- 发明人资格(细则4.17(iv))

本国际公布:

- 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

pressure acts on the particles, and the particle movement changes the pore volume, so that the fluid-solid coupling effect is achieved. The present invention can implement dynamic simulation of a large-scale fluid-solid coupling system, and significantly improves the calculation speed and the calculation quantity of discrete element fluid-solid coupling numerical simulation.

(57) 摘要: 本发明公开了一种基于GPU矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法及系统, 包括建立孔隙网络模型。建立流体单元运移模型: 孔隙内的流体单元通过颗粒单元之间的孔喉相连接, 其渗透服从达西定律, 其流量由岩土体性质、孔喉直径等确定, 水压与温度以及密度有着一个函数关系式。流体固体耦合作用: 孔隙水压力作用于颗粒上, 而颗粒运动又改变孔隙的体积, 从而实现流固耦合作用。本发明可实现大规模流固耦合系统的动态模拟, 显著提高了离散元流固耦合数值模拟的计算速度以及计算数量。

基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法及系统

技术领域

本发明涉及一种颗粒离散元模拟，尤其是对二维离散堆积体的流固耦合数值模拟。

背景技术

岩土工程、地质工程和能源工程中的大量重要的工程问题均涉及到复杂流固耦合过程，如隧道突水突泥、注浆过程、砂基液化、地面沉降、水力压裂等。由于有限元法或者无单元法等常规的数值模拟方法无法充分考虑流体—固体的相互作用以及固体颗粒迁移流失后造成的孔隙率以及渗流的渐进变化，所以很难真实模拟流固耦合过程中渗流以及渗流破坏规律。

离散元能很好的解决该类问题，但目前常用的几种方法都存在一定的缺陷，如 DEM-LBM 计算量过大，难以进行大规模的数值模拟计算；DEM-SPH 在稳定性与精度上还有所欠缺；DEM-CFD 在孔隙尺度上的数值模拟计算量较大。在进行流固耦合的数值模拟时，一般都是在颗粒集合模拟固体的基础上创建流体网络，来模拟流体的流动。流体网络是以相互接触且能够形成环向闭合系统的颗粒集合为依托，颗粒的孔隙间充满流体。所以当固体颗粒由于外力作用发生迁移时，系统内的孔隙也在发生变化，此时如何在流固耦合这个动态的过程中获取离散元堆积体中所有的孔隙成为了一大难题。同时，如何实现计算规模的提高以满足大尺度的流固耦合要求，也是目前亟待解决的问题。

发明内容

发明目的：为了克服现有技术中存在的不足，本发明提供一种基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法及系统，实现大规模流固耦合系统的动态模拟。

技术方案：为实现上述目的，本发明采用的技术方案为：

一种基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法，包括以下步骤：

步骤 1，建立孔隙网络模型，包括建立网络编号矩阵：建立初步邻近颗粒数组，每个颗粒相对于其邻近颗粒为中心颗粒。在离散元计算中首先获得邻居矩阵 $\mathbf{N}$ ，将邻居矩阵 $\mathbf{N}$ 在行方向上按连接角度进行排序，并转化为连接矩阵 $\mathbf{C}$ 。利用连接矩阵 $\mathbf{C}$ 控制搜索算法：找出连接矩阵 $\mathbf{C}$ 的反连接索引矩阵 $\mathbf{CI}$ 以及下一个连接的索引矩阵 $\mathbf{CN}$ 。然后由初始连接出发，利用下一个连接的索引矩阵 $\mathbf{CN}$ 向前查找节点，直到回到原始点，获得堆积体的全部孔隙。

步骤 2，建立流体单元运移模型：

步骤 2.1，在初始模型中设定初始流体单元状态以及边界条件。

步骤 2.2，通过水压与温度以及密度关系式计算各流体单元的密度 ρ_i ， i 表示流体单元的编号。

步骤 2.3，计算各流体单元的质量 $M_i = \rho_i V_i$ ， V_i 为孔隙的面积。

步骤 2.4，计算模型中的孔喉渗透系数：孔喉渗透系数与通道长度以及宽度有关，孔喉渗透系

数:

$$k(d) = k * \frac{[L - (R_1 + R_2) + 0.05 \min R]}{l}$$

其中, $k(d)$ 表示孔喉渗透系数, k 为设定的数值, L 表示两颗粒圆心之间的距离, R_1 、 R_2 表示两颗粒的半径, $\min R$ 表示所有颗粒的最小半径, l 表示孔喉通道长度。

步骤 2.5, 计算单个流体单元的渗流量: 在离散元计算的一个时间步 dt 内, 某个流体单元 $pore_i$ 与周围流体单元 $pore_n$ 发生流体运移, 流体运移服从达西定律, 定义流体流入为正, 单个孔喉由于压力梯度导致体积渗流量:

$$q_i = K(d) * A * J * dT$$

$$J = (P_n - P_i) / \min(R_a, R_b)$$

其中, P_n 和 P_i 分别是流体单元 $pore_n$ 和 $pore_i$ 的压力, R_a 和 R_b 分别是组成该孔喉的两颗粒 a 和 b 的半径, q_i 表示渗流量, A 表示孔喉通道宽度, J 表示压力梯度系数, dT 表示时间步。

步骤 2.6, 计算总运移量: $pore_i$ 在一个时间步内与周围流体单元进行的运移总量为:

$$Q_n = \sum_{i=1}^n q_i \rho_i$$

其中, 各流体单元的密度 $\rho_i = \frac{M_i}{V_i}$, V_i 为孔隙的体积, M_i 为孔隙内各流体单元的质量。

步骤 2.7, 计算运移后流体单元质量: $pore_i$ 在第一个时间步后的总质量:

$$M'_i = M_i + Q_n$$

其中, M'_i 表示流体单元发生流体运移后的质量, M_i 表示运移前的质量, Q_n 表示总运移量。

步骤 2.8, 更新流体单元状态: 一个时间步 dt 后流体单元的密度 $P'_i = \frac{M'_i}{V_i}$ 。流体单元的压力通过函数关系式: $P'_i = f(\rho'_i, T_i)$ 进行更新, 其中, P'_i 表示, M'_i 表示。

步骤 3, 流体固体耦合作用: 孔隙水压力作用于颗粒上, 而颗粒运动又改变孔隙的体积, 从而实现流固耦合作用。

步骤 3.1, 固体颗粒重新平衡: 由于流体的运移, 各流体单元内的水压发生改变, 从而各流体单元对固体颗粒之间的力也发生改变, 颗粒受流体单元作用, 在一个时间步内的位移距离为:

$$x_i = \frac{\sum P_i l_i + \sum F_i}{2m_0} dt^2$$

其中, x_i 为在一个时间步内的位移距离, P_i 为流体单元的水压, l_i 为流体单元与中心颗粒的接触长度, F_i 为颗粒间的接触作用力, m_0 为固体颗粒的质量。

步骤 3.2, 孔隙体积更新: 由于固体颗粒的位置改变, 所以流体单元的体积发生了改变, V'_i 为固体颗粒改变之后孔隙的体积。

步骤 3.3, 流体单元状态更新: 计算孔隙体积变化后的流体单元密度, 在一个时间步后其密度 $\rho_i'' = \frac{M_i}{V_i'}$, V_i' 为固体颗粒改变之后孔隙的体积。压力为 $P_i'' = f(\rho_i'', T_i)$, 其中, ρ_i''

表示流体单元的密度, P_i'' 表示流体单元的压力。

步骤 3.4, 重复步骤 1 到步骤 3.3, 即可实现二维流固耦合数值模拟。

优选的: 步骤 1 中建立孔隙网络模型的方法:

步骤 1.1, 构建初始的颗粒离散元堆积模型, 颗粒总数为 m , 颗粒由 1 开始连续编号到 m 。

步骤 1.2, 在离散元计算中首先获得邻居矩阵 N , 邻居矩阵 N 记录了各编号颗粒周围与其相邻的颗粒编号, 由于每个颗粒单元的邻居颗粒单元数不同, 行长度不一致的地方则用总颗粒数加 1 来填充。

步骤 1.3, 输入最大孔径 D_{max} 计算获得实际连接颗粒, 基于邻居矩阵 N , 若相邻颗粒与中心颗粒的距离小于 D_{max} 则记为 1, 判断为连接。反否则为 0, 判断为不连接, 该连接则为两颗粒之间的孔喉通道。

步骤 1.4, 将颗粒作为颗粒单元, 在连接矩阵中根据每个颗粒单元与其邻近颗粒单元连接线相对于 x 轴正方向的角度 α 建立连接矩阵 C , 连接矩阵 C 按照各连接的角度大小依次排列。

步骤 1.5, 找到反连接的位置索引, 将连接矩阵 C 按行方向重新排列, 使得第一列的数字小于第二列的数字。

步骤 1.6, 为了连接矩阵 C 依次按顺序排列, 将连接矩阵 C 第一列的数乘以一个极大的正数加上其第二列的数, 把得到的数字之和从小到大将每一行向下排列, 使得成对连接相互紧邻, 即反连接在正连接的下一个, 并通过索引变化找出连接矩阵 C 中每一个连接对应的反连接的索引, 建立反连接索引矩阵 CI 。

步骤 1.7, 找到下一个连接的位置索引: 获得孔隙的某一连接的下一个连接, 只需得到其反连接角度减小的连接的索引, 即孔隙的某一连接的反连接的索引数减去 1, 该索引对应的连接就是下一个连接, 建立对应于连接矩阵 C 的下一个连接矩阵 CN , 这样就成功的找出下一个连接的位置索引。

步骤 1.8, 搜索孔隙: 从初始连接出发, 利用下一个连接索引 CN 向前查找颗粒单元连接, 回到直到回到初始颗粒单元, 获得了一个孔隙。

步骤 1.9, 从编号为 1 的颗粒单元开始, 各个连接以本连接为初始连接, 向前查找颗粒单元连接, 直至回到初始颗粒单元, 这样就成功描述了堆积体内的所有孔隙。

步骤 1.10, 删除重复的记录, 得到全部孔隙。

步骤 1.11, 根据搜索到的连接与孔隙, 建立孔隙网络模型。

优选的: 步骤 2.2 中水压与温度以及密度关系式: $P_i = f(\rho_i, T_i)$, 其中, P_i

表示流体单元的压力， ρ_i 表示各流体单元的密度， T_i 表示流体单元的温度。

一种基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟快速计算系统，包括输入模块、孔隙网络模型模块、流体单元运移模型模块、流固耦合作用模块，其中，

所述输入模块用于输入颗粒相关数据，在初始模型中设定初始流体单元状态以及边界条件。

所述孔隙网络模型模块用于根据颗粒相关数据建立网格编号矩阵；同时，用于建立初步邻近颗粒数组，每个颗粒相对于其邻近颗粒为中心颗粒；在离散元计算中首先获得邻居矩阵 **N**，将邻居矩阵 **N** 在行方向上按连接角度进行排序，并转化为连接矩阵 **C**；利用连接矩阵 **C** 控制搜索算法：找出连接矩阵 **C** 的反连接索引矩阵 **CI** 以及下一个连接的索引矩阵 **CN**；然后由初始连接出发，利用下一个连接的索引矩阵 **CN** 向前查找节点，直到回到原始点，获得堆积体的全部孔隙。

所述流体单元运移模型模块用于通过水压与温度以及密度关系式计算各流体单元的密度；计算各流体单元的质量；计算模型中的孔喉渗透系数；计算单个流体单元的渗流量；计算总运移量；计算运移后流体单元质量以及更新流体单元状态。

所述流固耦合作用模块用于计算颗粒受流体单元作用，在一个时间步内的位移距离；孔隙体积更新；计算孔隙体积变化后的流体单元密度，在一个时间步后其密度。

本发明相比现有技术，具有以下有益效果：

本发明实现所有的离散元流固耦合计算均基于 GPU 以纯矩阵计算形式完成，并巧妙的利用了反连接与下一个连接，成功提出了离散元孔隙搜索的方法，成功解决了在流固耦合的过程中由于孔隙在不断变化而造成的搜索孔隙难的问题，有利于进一步开展对于流固耦合的离散元模拟研究。并且提出了以孔隙流体单元来描述孔隙流体介质，为模拟孔隙介质的流固耦合提供了一种快速简洁的方法。该发明可实现大规模流固耦合系统的动态模拟，显著提高了离散元流固耦合数值模拟的计算速度以及计算数量。

附图说明

图 1 为建立孔隙网络模型流程图。

图 2 为建立流体单元运移模型。

图 3 为流固耦合过程示意图。

图 4 为颗粒堆积模型。

图 5 为孔隙网络模型。

图 6 为单个孔隙连接示意图。

图 7 为孔喉模型示意图。

图 8 为流体运移示意图。

图 9 为中心颗粒受力示意图。

具体实施方式

下面结合附图和具体实施例，进一步阐明本发明，应理解这些实例仅用于说明本发明而并不用于限制本发明的范围，在阅读了本发明之后，本领域技术人员对本发明的各种等价形式的修改均落于本申请所附权利要求所限定的范围。

一种基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法，包括以下步骤：

步骤 1，建立孔隙网络模型，包括建立网格编号矩阵，如图 1 所示：建立初步邻近颗粒数组，每个颗粒相对于其邻近颗粒为中心颗粒。在离散元计算中首先获得邻居矩阵 **N**，将邻居矩阵 **N** 在行方向上按连接角度进行排序，并转化为连接矩阵 **C**。利用连接矩阵 **C** 控制搜索算法：找出连接矩阵 **C** 的反连接索引矩阵 **CI** 以及下一个连接的索引矩阵 **CN**。然后由初始连接出发，利用下一个连接的索引矩阵 **CN** 向前查找节点，直到回到原始点，获得堆积体的全部孔隙。

步骤 10，构建初始的颗粒离散元堆积模型，颗粒总数为 m ，颗粒由 1 开始连续编号到 m 。

步骤 11，在离散元计算中首先获得邻居矩阵 **N**，邻居矩阵 **N** 记录了各编号颗粒周围与其相邻的颗粒编号，由于每个颗粒单元的邻居颗粒单元数不同，行长度不一致的地方则用总颗粒数加 1 来填充。

步骤 12，输入最大孔径 **Dmax** 计算获得实际连接颗粒，基于邻居矩阵 **N**，若相邻颗粒与中心颗粒的距离小于 **Dmax** 则记为 1，判断为连接。反否则为 0，判断为不连接，该连接则为两颗粒之间的孔喉通道。

步骤 13，将颗粒作为颗粒单元，在连接矩阵中根据每个颗粒单元与其邻近颗粒单元连接线相对于 x 轴正方向的角度 **Na** 建立连接矩阵 **C**，连接矩阵 **C** 按照各连接的角度大小依次排列，如表 1 所示：

cList	
1	2
1	3
1	6
1	5
1	15
1	16
2	11
2	4
2	3
2	1
2	16
2	17
2	10
3	4

表 1 连接矩阵

Na 记录每个单元与其邻近单元连接线相对于 x 轴正方向的角度（逆时针），至此已经对连接进行好了排序，接下来就是查找孔隙的步骤。

步骤 14，找到反连接的位置索引，将连接矩阵 **C** 按行方向重新排列，使得第一列的数字小于第二列的数字，如表 2 所示：

cList2	
1	2
1	3
1	6
1	5
1	15
1	16
2	11
2	4
2	3
1	2
2	16
2	17
2	10
3	4

表 2 连接矩阵按行方向重新排列

步骤 15，为了连接矩阵 **C** 依次按顺序排列，将连接矩阵 **C** 第一列的数乘以一个极大的正数（本

方法的数字采用 $1e7$) 加上其第二列的数, 把得到的数字之和从小到大将每一行向下排列, 就可以使得成对连接相互紧邻, 即反连接在正连接的下一个, 并通过索引变化找出连接矩阵 **C** 中每一个连接对应的反连接的索引, 建立反连接索引矩阵 **CI**。

步骤 16, 找到下一个连接的位置索引: 为了描述某一孔隙, 必须获得形成该孔隙的所有连接。所以需要得知任意一个连接对应于某一孔隙的下一个连接, 直至回到该连接, 这样就成功的描述了一个孔隙。

如图 6 所示, 1-2 连接的下一个连接为 2-3 连接, 2-3 连接为 1-2 连接的反连接 2-1 在 **C** 矩阵里的角度减小的上一个连接。

所以为了获得孔隙的某一连接的下一个连接, 只需得到其反连接角度减小的连接的索引, 即孔隙的某一连接的反连接的索引数减去 1, 该索引对应的连接就是下一个连接, 建立对应于连接矩阵 **C** 的下一个连接矩阵 **CN**, 这样就成功的找出下一个连接的位置索引。

步骤 17, 搜索孔隙: 从初始连接出发, 利用下一个连接索引 **CN** 向前查找颗粒单元连接, 回到直到回到初始颗粒单元, 获得了一个孔隙。

步骤 18, 从编号为 1 的颗粒单元开始, 各个连接以本连接为初始连接, 向前查找颗粒单元连接, 直至回到初始颗粒单元, 这样就成功描述了堆积体内的所有孔隙。

步骤 19, 删除重复的记录, 得到全部孔隙。

步骤 110, 根据搜索到的连接与孔隙, 建立孔隙网络模型。

步骤 2, 建立流体单元运移模型, 孔隙内的流体单元通过颗粒单元之间的孔喉相连接, 其渗透服从达西定律, 其流量由岩土体性质、孔喉直径等确定, 水压与温度以及密度有着一个函数关系式:

$P_i = f(\rho_i, T_i)$, 通过该函数的引入, 实现了密度差异—压力差异驱动孔隙流体运动, 如图 2 所示:

步骤 20, 初始模型需设定初始流体单元状态 (温度, 压力) 以及边界条件。

步骤 21, 经过试验, 水压与温度以及密度有着一个函数关系式: $P_i = f(\rho_i, T_i)$, 其中, P_i 表示流体单元的压力, ρ_i 表示各流体单元的密度, T_i 表示流体单元的温度。通过水压与温度以及密度关系式计算各流体单元的密度 ρ_i 。

步骤 22, 计算各流体单元的质量 $M_i = \rho_i V_i$, V_i 为孔隙的面积。

步骤 23, 计算模型中的孔喉渗透系数: 孔喉渗透系数与通道长度以及宽度有关, 如图 7 所示, 孔喉渗透系数:

$$k(d) = k * \frac{[L - (R_1 + R_2) + 0.05 \min R]}{l}$$

其中, $k(d)$ 表示孔喉渗透系数, k 为设定的数值, L 表示两颗粒圆心之间的距离, R_1 、 R_2 表示两颗粒的半径, $\min R$ 表示所有颗粒的最小半径, l 表示孔喉通道长度。

步骤 24, 计算单个流体单元的渗流量: 在离散元计算的一个时间步 dt 内, 某个流体单元 $pore_i$ 与周围流体单元 $pore_n$ (P_n 的数量为 P_i 相邻的流体单元数目) 发生流体运移, 如图 8 所示, 流体运移服从达西定律, 定义流体流入为正, 单个孔喉由于压力梯度导致体积渗流量:

$$q_i = K(d) * A * J * dT$$

$$J = (P_n - P_i) / \min(R_a, R_b)$$

其中, P_n 和 P_i 分别是流体单元 $pore_n$ 和 $pore_i$ 的压力, R_a 和 R_b 分别是组成该孔喉的两颗粒 a 和 b 的半径, q_i 表示渗流量, A 表示孔喉通道宽度, J 表示压力梯度系数, dT 表示时间步。

步骤 25, 计算总运移量: $pore_i$ 在一个时间步内与周围流体单元进行的运移总量为:

$$Q_n = \sum_{i=1}^n q_i \rho_i$$

其中, 各流体单元的密度 $\rho_i = \frac{M_i}{V_i}$, V_i 为孔隙的体积, M_i 为孔隙内各流体单元的质量。

步骤 26, 计算运移后流体单元质量: $pore_i$ 在第一个时间步后的总质量:

$$M'_i = M_i + Q_n$$

其中, 密度 $\rho_i = \frac{M_i}{V_i}$, V_i 为孔隙的体积, M_i 为孔隙内各流体单元的质量, M'_i 表示流体单元发生流体运移后的质量, M_i 表示运移前的质量, Q_n 表示总运移量。

步骤 27, 更新流体单元状态: 一个时间步 dt 后流体单元的密度 $P'_i = \frac{M'_i}{V_i}$ 。流体单元的压力通过函数关系式: $P'_i = f(\rho'_i, T_i)$ 进行更新, 其中, P'_i 表示流体单元的压力, M'_i 表示流体单元的质量。

步骤 3, 流体固体耦合作用, 如图 3 所示: 孔隙水压力作用于颗粒上, 而颗粒运动又改变孔隙的体积, 从而实现流固耦合作用, 通过这一步骤实现了流体单元与固体单元之间的交互从而实现流体与固体的耦合。

步骤 30, 固体颗粒重新平衡: 由于流体的运移, 各流体单元内的水压发生改变, 从而各流体单元对固体颗粒之间的力也发生改变, 颗粒受流体单元作用, 如图 9 所示, 在一个时间步内的位移距离为:

$$x_i = \frac{\sum P_i l_i + \sum F_i}{2m_0} dt^2$$

其中, x_i 为在一个时间步内的位移距离, P_i 为流体单元的水压, l_i 为流体单元与中心颗粒的接触长度, F_i 为颗粒间的接触作用力, m_0 为固体颗粒的质量。

步骤 31, 孔隙体积更新: 由于固体颗粒的位置改变, 所以流体单元的体积发生了改变, V'_i 为固体颗粒改变之后孔隙的体积。

步骤 32, 流体单元状态更新: 计算孔隙体积变化后的流体单元密度, 在一个时间步后其密度

$\rho_i'' = \frac{M_i}{V_i'}$, V_i' 为固体颗粒改变之后孔隙的体积。压力为 $P_i'' = f(\rho_i'', T_1)$, 其中, ρ_i'' 表示流体单元更新后的密度, P_i'' 表示流体单元更新后的压力。

步骤 33, 重复步骤 0 到步骤 32, 即可实现二维流固耦合数值模拟。

根据上述一种基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法构建的系统, 包括输入模块、孔隙网络模型模块、流体单元运移模型模块、流固耦合作用模块, 其中,

所述输入模块用于输入颗粒相关数据, 在初始模型中设定初始流体单元状态以及边界条件。

所述孔隙网络模型模块用于根据颗粒相关数据建立网格编号矩阵; 同时, 用于建立初步邻近颗粒数组, 每个颗粒相对于其邻近颗粒为中心颗粒; 在离散元计算中首先获得邻居矩阵 N , 将邻居矩阵 N 在行方向上按连接角度进行排序, 并转化为连接矩阵 C ; 利用连接矩阵 C 控制搜索算法: 找出连接矩阵 C 的反连接索引矩阵 CI 以及下一个连接的索引矩阵 CN ; 然后由初始连接出发, 利用下一个连接的索引矩阵 CN 向前查找节点, 直到回到原始点, 获得堆积体的全部孔隙。

所述流体单元运移模型模块用于通过水压与温度以及密度关系式计算各流体单元的密度; 计算各流体单元的质量; 计算模型中的孔喉渗透系数; 计算单个流体单元的渗流量; 计算总运移量; 计算运移后流体单元质量以及更新流体单元状态。

所述流固耦合作用模块用于计算颗粒受流体单元作用, 在一个时间步内的位移距离; 孔隙体积更新; 计算孔隙体积变化后的流体单元密度, 在一个时间步后其密度。

基于 matlab 矩阵计算, 通过把各个颗粒简化为点位, 将孔隙系统简化为各个颗粒构成的网络 (如图 4、5 所示) 从而建立孔隙网络模型, 从颗粒单元 1 出发, 1-2 连接、2-16 连接和 16-1 连接形成一个三角形。根据邻居矩阵 N 和单元坐标, 获取每个单元与邻居单元间连接角度的矩阵 Na ; 将连接的单元从 1 开始, 角度为连接与水平线的逆时针夹角, 从 0 度开始排序, 生成排序的连接数组 C 。连接具有方向, 在 C 中先确定每个连接的反连接位置索引, 如得到 1-2 连接的反连接 2-1 连接的位置, 然后再确定反连接 2-1 连接逆时针方向下一个连接, 即 2-16 连接。由 2-16 连接再往前查找, 又得到 16-1 连接, 最后沿顺时针方向得到了三角形 1-2-16。在计算时, 采用 $CI2$ 记录 C 连接 (如 1-2) 的反向连接索引 (如 2-1), 用 CN 记录 C 中连接的下一个连接 (2-16)。从设定的初始连接开始, 利用 CN 不断向前推算, 获得三角形, 四边形。最后将重复的记录去除, 得到所有的孔隙, 建立孔隙网络模型; 孔隙中的流体通过孔喉来运移, 其流量由岩土体性质、孔喉直径等确定; 根据孔隙的体积应变和体积模量来确定孔隙水压力; 孔隙水压力作用于颗粒上, 而颗粒运动又改变孔隙的体积, 从而实现流固耦合作用。

本发明显著提高了二维流固耦合数值模拟的运算速度, 为模拟孔隙介质的流固耦合提供了一种快速简洁的方法, 可实现大规模流固耦合系统的动态模拟。

以上所述仅是本发明的优选实施方式, 应当指出: 对于本技术领域的普通技术人员来说, 在不脱离本发明原理的前提下, 还可以做出若干改进和润饰, 这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

1. 一种基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法，其特征在于，包括以下步骤：

步骤 1，建立孔隙网络模型，包括建立网格编号矩阵：建立初步邻近颗粒数组，每个颗粒相对于其邻近颗粒为中心颗粒；在离散元计算中首先获得邻居矩阵 $\mathbf{N}$ ，将邻居矩阵 $\mathbf{N}$ 在行方向上按连接角度进行排序，并转化为连接矩阵 $\mathbf{C}$ ；利用连接矩阵 $\mathbf{C}$ 控制搜索算法：找出连接矩阵 $\mathbf{C}$ 的反连接索引矩阵 $\mathbf{CI}$ 以及下一个连接的索引矩阵 $\mathbf{CN}$ ；然后由初始连接出发，利用下一个连接的索引矩阵 $\mathbf{CN}$ 向前查找节点，直到回到原始点，获得堆积体的全部孔隙；

步骤 2，建立流体单元运移模型：

步骤 2.1，在初始模型中设定初始流体单元状态以及边界条件；

步骤 2.2，通过水压与温度以及密度关系式计算各流体单元的密度 ρ_i ， i 表示流体单元的编号；

步骤 2.3，计算各流体单元的质量 $M_i = \rho_i V_i$ ， V_i 为孔隙的面积；

步骤 2.4，计算模型中的孔喉渗透系数：孔喉渗透系数与通道长度以及宽度有关，孔喉渗透系数：

$$k(d) = k * \frac{[L - (R_1 + R_2) + 0.05 \min R]}{l}$$

其中， $k(d)$ 表示孔喉渗透系数， k 为设定的数值， L 表示两颗粒圆心之间的距离， R_1 、 R_2 表示两颗粒的半径， $\min R$ 表示所有颗粒的最小半径， l 表示孔喉通道长度；

步骤 2.5，计算单个流体单元的渗流量：在离散元计算的一个时间步 dt 内，某个流体单元 $pore_i$ 与周围流体单元 $pore_n$ 发生流体运移，流体运移服从达西定律，定义流体流入为正，单个孔喉由于压力梯度导致体积渗流量：

$$q_i = K(d) * A * J * dt$$

$$J = (P_n - P_i) / \min(R_a, R_b)$$

其中， P_n 和 P_i 分别是流体单元 $pore_n$ 和 $pore_i$ 的压力， R_a 和 R_b 分别是组成该孔喉的两颗粒 a 和 b 的半径， q_i 表示渗流量， A 表示孔喉通道宽度， J 表示压力梯度系数， dt 表示时间步；

步骤 2.6，计算总运移量： $pore_i$ 在一个时间步内与周围流体单元进行的运移总量为：

$$Q_n = \sum_{i=1}^n q_i \rho_i$$

其中，各流体单元的密度 $\rho_i = \frac{M_i}{V_i}$ ， V_i 为孔隙的体积， M_i 为孔隙内各流体单元的质量；

步骤 2.7，计算运移后流体单元质量： $pore_i$ 在第一个时间步后的总质量：

$$M'_i = M_i + Q_n$$

其中， M'_i 表示流体单元发生流体运移后的质量， M_i 表示运移前的质量， Q_n 表示总运移量；

步骤 2.8，更新流体单元状态：一个时间步 dt 后流体单元的密度 $\rho'_i = \frac{M'_i}{V_i}$ ；流体单元的压力通

过函数关系式: $P'_i = f(\rho'_i, T_i)$ 进行更新, 其中, ρ'_i 表示流体单元的密度, M'_i 表示流体单元的质量;

步骤 3, 流体固体耦合作用: 孔隙水压力作用于颗粒上, 而颗粒运动又改变孔隙的体积, 从而实现流固耦合作用;

步骤 3.1, 固体颗粒重新平衡: 由于流体的运移, 各流体单元内的水压发生改变, 从而各流体单元对固体颗粒之间的力也发生改变, 颗粒受流体单元作用, 在一个时间步内的位移距离为:

$$x_i = \frac{\sum P_i l_i + \sum F_i}{2m_0} dt^2$$

其中, x_i 为在一个时间步内的位移距离, P_i 为流体单元的压力, l_i 为流体单元与中心颗粒的接触长度, F_i 为颗粒间的接触作用力, m_0 为固体颗粒的质量;

步骤 3.2, 孔隙体积更新: 由于固体颗粒的位置改变, 所以流体单元的体积发生了改变, V'_i 为固体颗粒改变之后孔隙的体积;

步骤 3.3, 流体单元状态更新: 计算孔隙体积变化后的流体单元密度, 在一个时间步后其密度 $\rho''_i = \frac{M_i}{V'_i}$, V'_i 为固体颗粒改变之后孔隙的体积; 压力为 $P''_i = f(\rho''_i, T_i)$, 其中, ρ''_i 表示流体单元的密度, P''_i 表示流体单元的压力;

步骤 3.4, 重复步骤 1 到步骤 3.3, 即可实现二维流固耦合数值模拟。

2. 根据权利要求 1 所述基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法, 其特征在于: 步骤 1 中建立孔隙网络模型的方法:

步骤 1.1, 构建初始的颗粒离散元堆积模型, 颗粒总数为 m , 颗粒由 1 开始连续编号到 m ;

步骤 1.2, 在离散元计算中首先获得邻居矩阵 N , 邻居矩阵 N 记录了各编号颗粒周围与其相邻的颗粒编号, 由于每个颗粒单元的邻居颗粒单元数不同, 行长度不一致的地方则用总颗粒数加 1 来填充;

步骤 1.3, 输入最大孔径 D_{max} 计算获得实际连接颗粒, 基于邻居矩阵 N , 若相邻颗粒与中心颗粒的距离小于 D_{max} 则记为 1, 判断为连接; 反否则为 0, 判断为不连接, 该连接则为两颗粒之间的孔喉通道;

步骤 1.4, 将颗粒作为颗粒单元, 在连接矩阵中根据每个颗粒单元与其邻近颗粒单元连接线相对于 x 轴正方向的角度 α 建立连接矩阵 C , 连接矩阵 C 按照各连接的角度大小依次排列;

步骤 1.5, 找到反连接的位置索引, 将连接矩阵 C 按行方向重新排列, 使得第一列的数字小于第二列的数字;

步骤 1.6, 为了连接矩阵 C 依次按顺序排列, 将连接矩阵 C 第一列的数乘以一个极大的正数加上其第二列的数, 把得到的数字之和从小到大将每一行向下排列, 使得成对连接相互紧邻, 即反连接在正连接的下一个, 并通过索引变化找出连接矩阵 C 中每一个连接对应的反连接的索引, 建

立反连接索引矩阵 **CI**;

步骤 1.7, 找到下一个连接的位置索引: 获得孔隙的某一连接的下一个连接, 只需得到其反连接角度减小的连接的索引, 即孔隙的某一连接的反连接的索引数减去 1, 该索引对应的连接就是下一个连接, 建立对应于连接矩阵 **C** 的下一个连接矩阵 **CN**, 这样就成功的找出下一个连接的位置索引;

步骤 1.8, 搜索孔隙: 从初始连接出发, 利用下一个连接索引 **CN** 向前查找颗粒单元连接, 回到直到回到初始颗粒单元, 获得了一个孔隙;

步骤 1.9, 从编号 1 的颗粒单元开始, 各个连接以本连接为初始连接, 向前查找颗粒单元连接, 直至回到初始颗粒单元, 这样就成功描述了堆积体内的所有孔隙;

步骤 1.10, 删除重复的记录, 得到全部孔隙;

步骤 1.11, 根据搜索到的连接与孔隙, 建立孔隙网络模型。

3. 根据权利要求 2 所述基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法, 其特征在于: 步骤 2.2 中水压与温度以及密度关系式: $P_i = f(\rho_i, T_i)$, 其中, P_i 表示流体单元的压力, ρ_i 表示各流体单元的密度, T_i 表示流体单元的温度。

4. 一种基于权利要求 1 所述基于 GPU 矩阵的离散元流固耦合数值模拟方法的系统, 其特征在于: 包括输入模块、孔隙网络模型模块、流体单元运移模型模块、流固耦合作用模块, 其中,

所述输入模块用于输入颗粒相关数据, 在初始模型中设定初始流体单元状态以及边界条件;

所述孔隙网络模型模块用于根据颗粒相关数据建立网格编号矩阵; 同时, 用于建立初步邻近颗粒数组, 每个颗粒相对于其邻近颗粒为中心颗粒; 在离散元计算中首先获得邻居矩阵 **N**, 将邻居矩阵 **N** 在行方向上按连接角度进行排序, 并转化为连接矩阵 **C**; 利用连接矩阵 **C** 控制搜索算法: 找出连接矩阵 **C** 的反连接索引矩阵 **CI** 以及下一个连接的索引矩阵 **CN**; 然后由初始连接出发, 利用下一个连接的索引矩阵 **CN** 向前查找节点, 直到回到原始点, 获得堆积体的全部孔隙;

所述流体单元运移模型模块用于通过水压与温度以及密度关系式计算各流体单元的密度; 计算各流体单元的质量; 计算模型中的孔喉渗透系数; 计算单个流体单元的渗流量; 计算总运移量; 计算运移后流体单元质量以及更新流体单元状态;

所述流固耦合作用模块用于计算颗粒受流体单元作用, 在一个时间步内的位移距离; 孔隙体积更新; 计算孔隙体积变化后的流体单元密度, 在一个时间步后其密度。

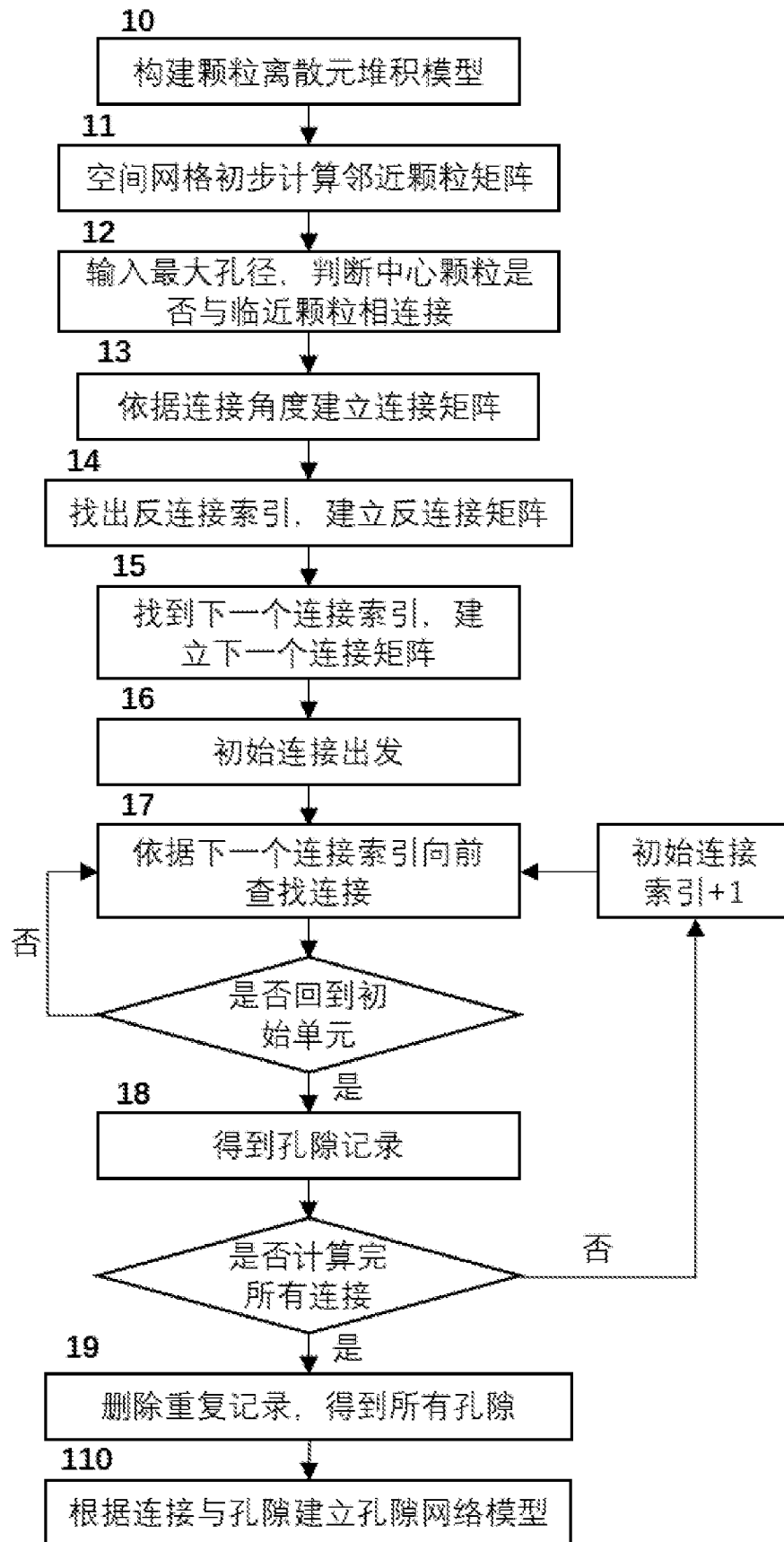


图 1

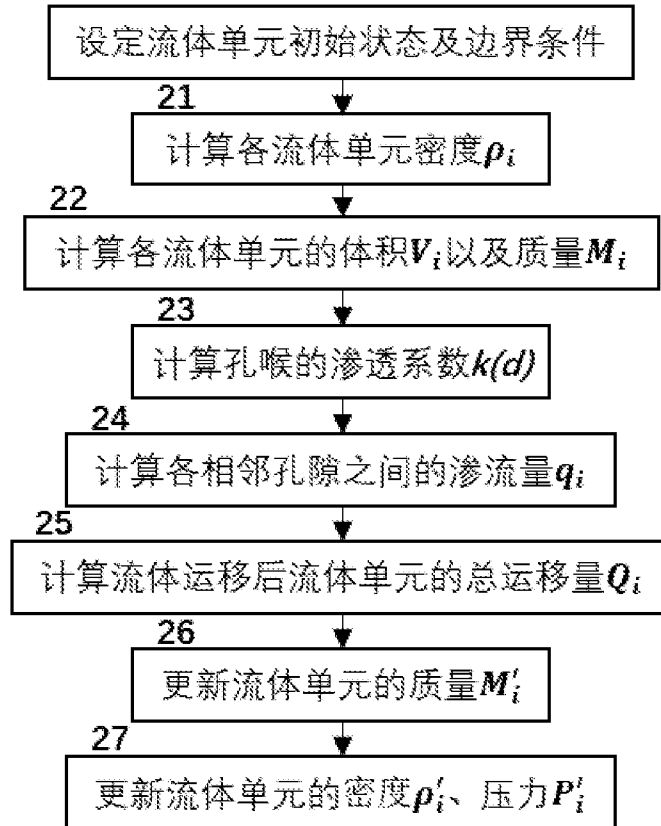


图 2

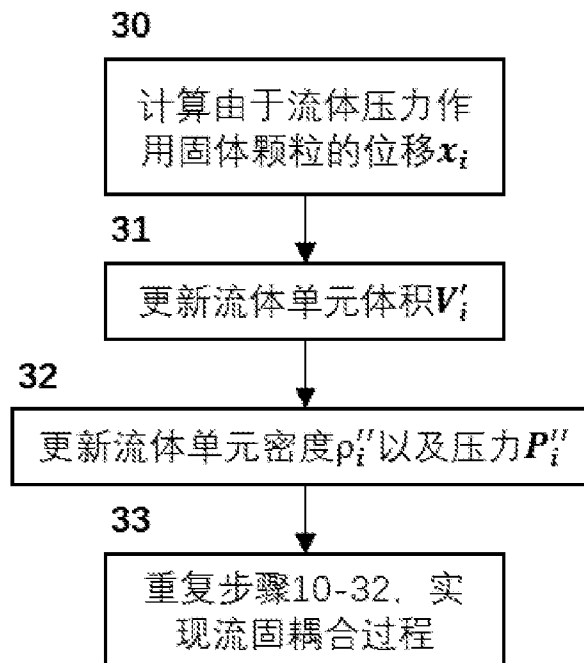


图 3

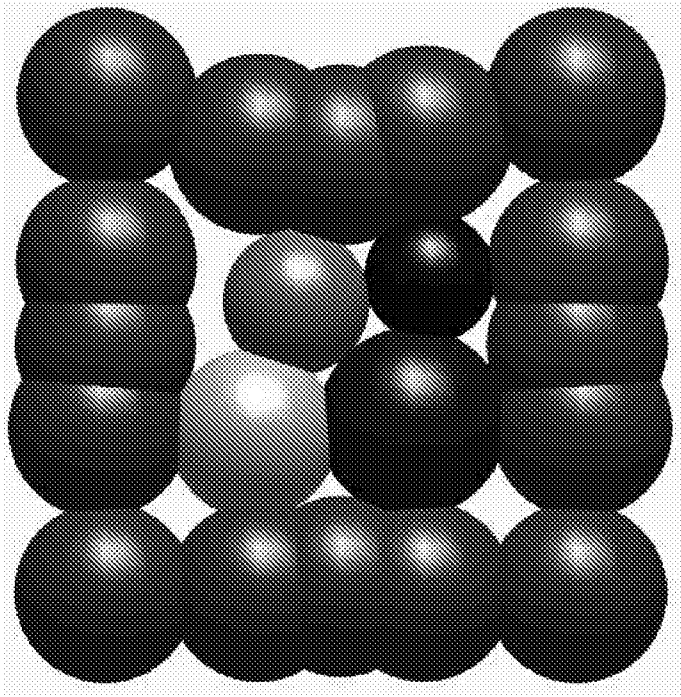


图 4

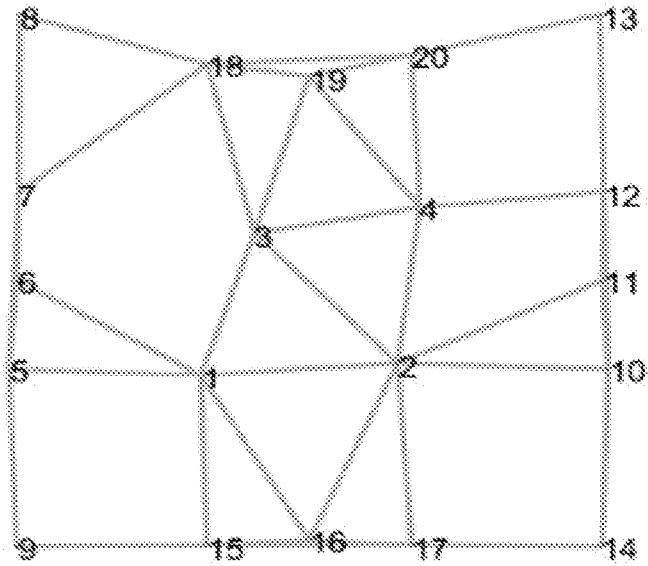


图 5

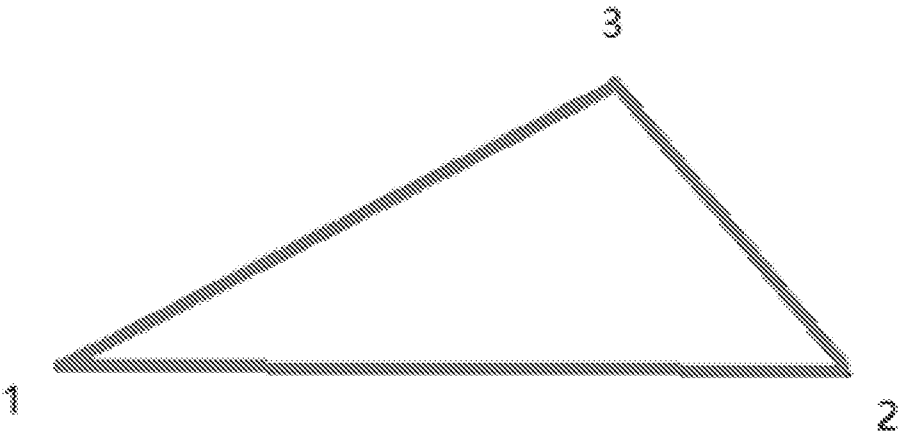


图 6

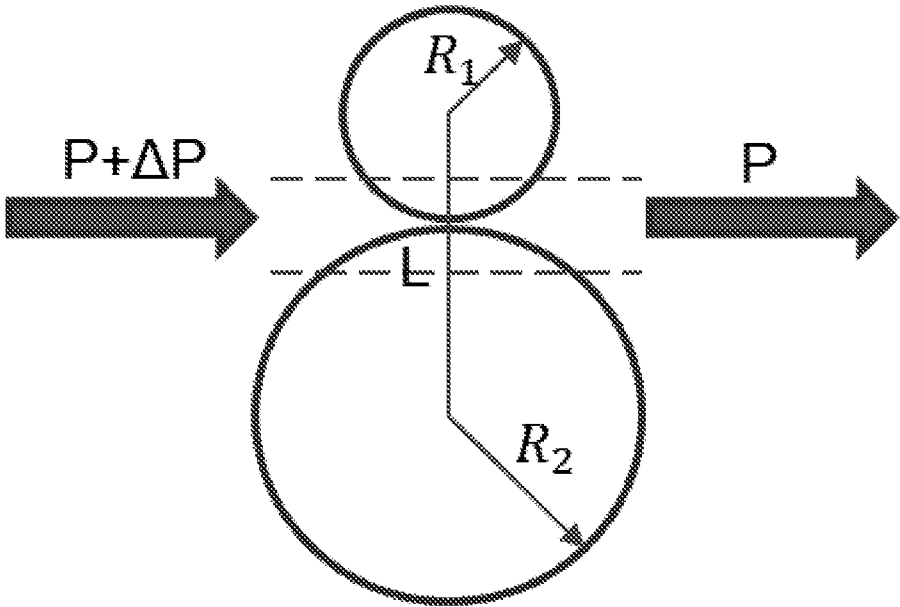


图 7

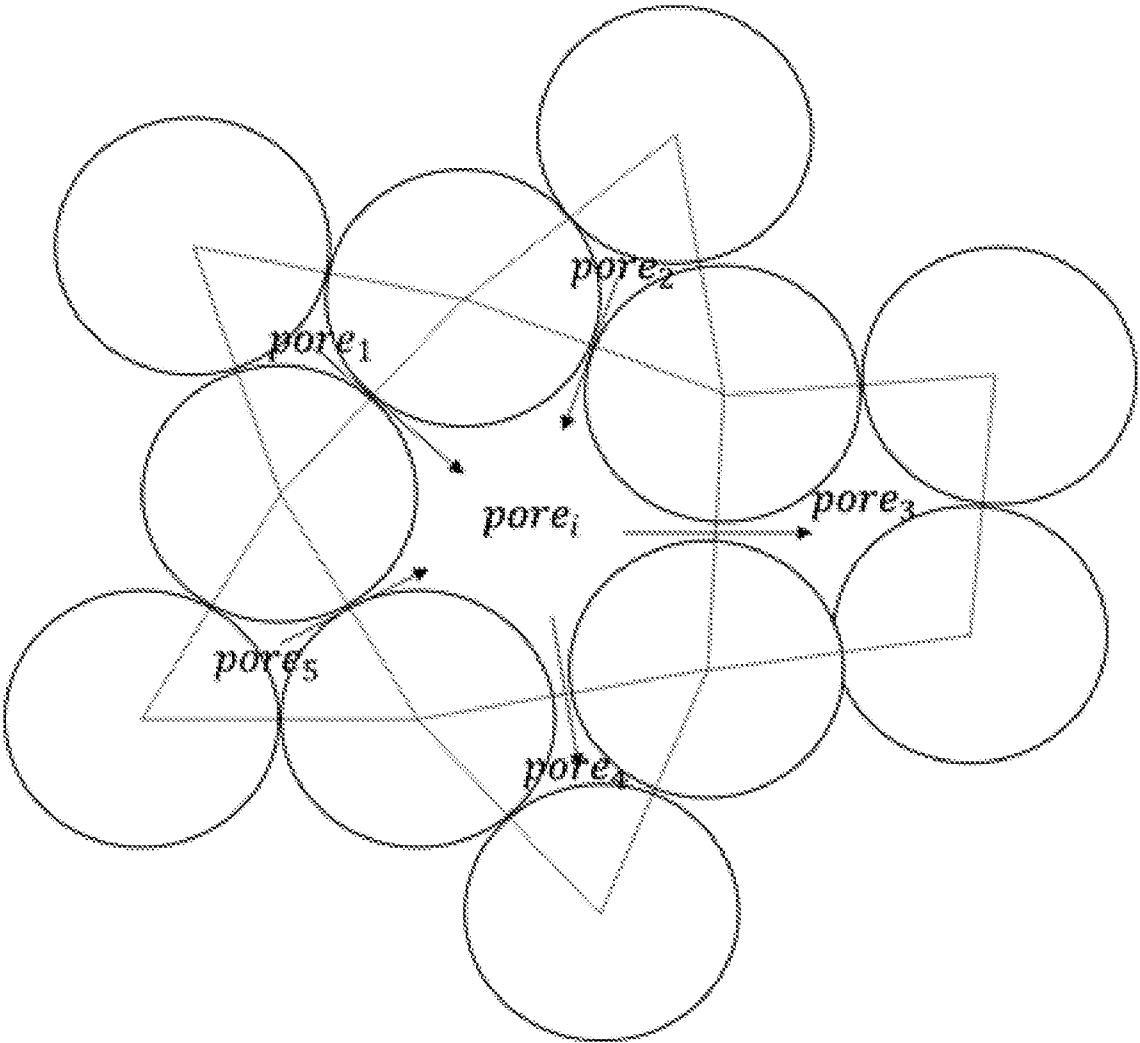


图 8

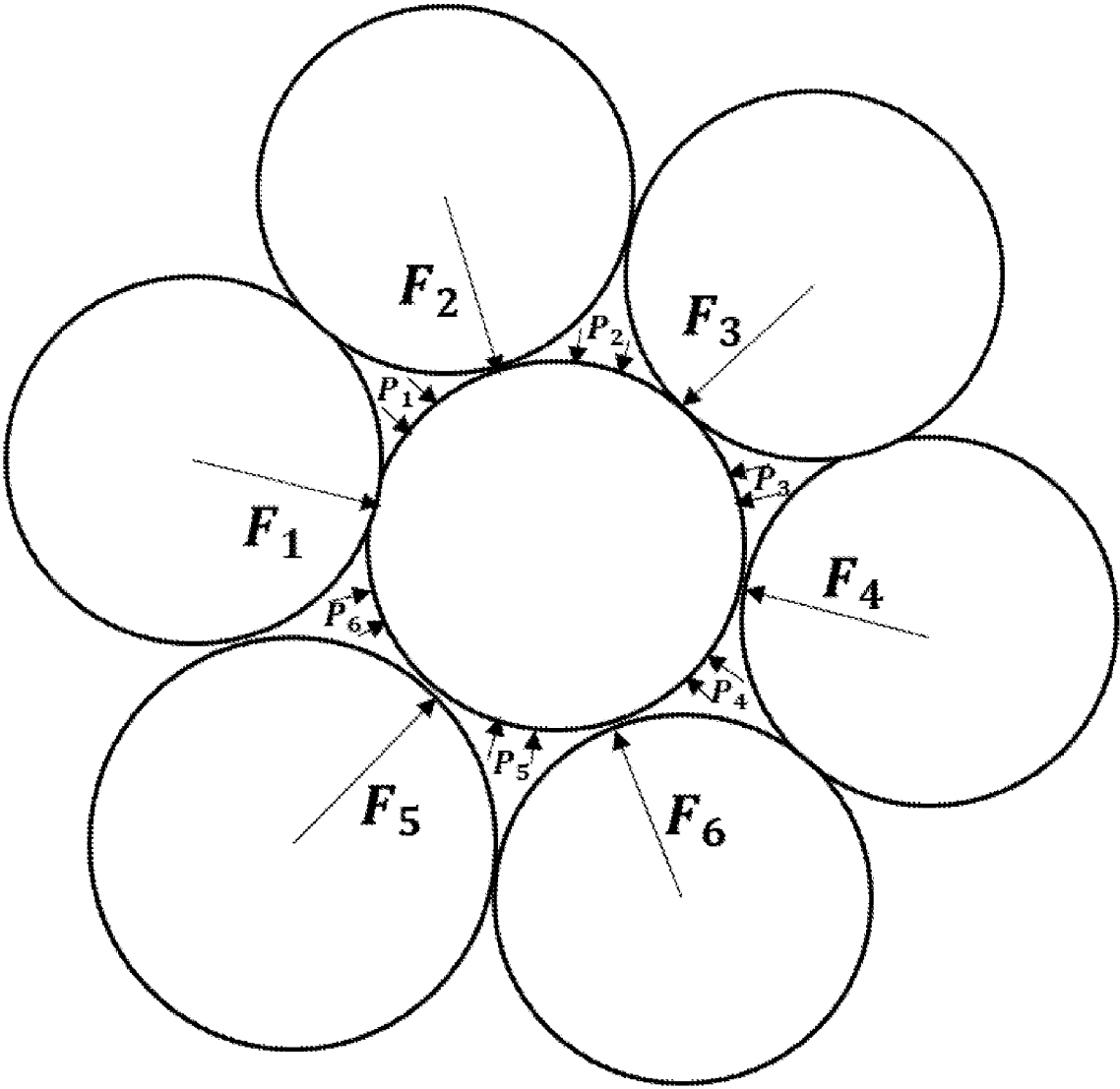


图 9

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2020/097584

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F 30/20(2020.01)i; G06F 17/16(2006.01)i; G06F 111/10(2020.01)i; G06F 119/14(2020.01)i; G06F 119/08(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNABS; CNTXT; CNKI; SIPOABS; DWPI; USTXT; WOTXT; EPTXT: 流, 固, 耦合, 孔隙, 矩阵, 离散, 数值, 模拟, 颗粒, 运移, 渗透, fluid, solid, structure, coupling, GPU, matrix, simulation, discrete

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	CN 109977505 A (NANJING UNIVERSITY) 05 July 2019 (2019-07-05) description, paragraphs [0004]-[0017]	1-4
A	CN 110263362 A (NANJING UNIVERSITY (SUZHOU) HIGH-TECH INSTITUTE) 20 September 2019 (2019-09-20) entire document	1-4
A	US 2018371874 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC.) 27 December 2018 (2018-12-27) entire document	1-4

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

15 January 2021

Date of mailing of the international search report

25 February 2021

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District, Beijing
100088
China

Facsimile No. (86-10)62019451

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2020/097584

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
CN	109977505	A	05 July 2019	None			
CN	110263362	A	20 September 2019	None			
US	2018371874	A1	27 December 2018	WO	2017155548	A1	14 September 2017

国际检索报告

国际申请号

PCT/CN2020/097584

A. 主题的分类 G06F 30/20(2020.01)i; G06F 17/16(2006.01)i; G06F 111/10(2020.01)i; G06F 119/14(2020.01)i; G06F 119/08(2020.01)i 按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和IPC两种分类														
B. 检索领域 检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号) G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNABS;CNTXT;CNKI;SIPOABS;DWPI;USTXT;WOTXT;EPTXT: 流, 固, 耦合, 孔隙, 矩阵, 离散, 数值, 模拟, 颗粒, 运移, 渗透, fluid, solid, structure, coupling, GPU, matrix, simulation, discrete														
C. 相关文件 <table border="1"> <thead> <tr> <th>类 型*</th> <th>引用文件, 必要时, 指明相关段落</th> <th>相关的权利要求</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A</td> <td>CN 109977505 A (南京大学) 2019年 7月 5日 (2019 - 07 - 05) 说明书第[0004]-[0017]段</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>CN 110263362 A (南京大学苏州高新技术研究院) 2019年 9月 20日 (2019 - 09 - 20) 全文</td> <td>1-4</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>US 2018371874 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES INC) 2018年 12月 27日 (2018 - 12 - 27) 全文</td> <td>1-4</td> </tr> </tbody> </table>			类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求	A	CN 109977505 A (南京大学) 2019年 7月 5日 (2019 - 07 - 05) 说明书第[0004]-[0017]段	1-4	A	CN 110263362 A (南京大学苏州高新技术研究院) 2019年 9月 20日 (2019 - 09 - 20) 全文	1-4	A	US 2018371874 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES INC) 2018年 12月 27日 (2018 - 12 - 27) 全文	1-4
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求												
A	CN 109977505 A (南京大学) 2019年 7月 5日 (2019 - 07 - 05) 说明书第[0004]-[0017]段	1-4												
A	CN 110263362 A (南京大学苏州高新技术研究院) 2019年 9月 20日 (2019 - 09 - 20) 全文	1-4												
A	US 2018371874 A1 (HALLIBURTON ENERGY SERVICES INC) 2018年 12月 27日 (2018 - 12 - 27) 全文	1-4												
☐ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。														
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件														
国际检索实际完成的日期 2021年 1月 15日		国际检索报告邮寄日期 2021年 2月 25日												
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局(ISA/CN) 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088 传真号 (86-10)62019451		受权官员 张琳 电话号码 (86-512) 88995827												

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2020/097584

检索报告引用的专利文件			公布日 (年/月/日)	同族专利	公布日 (年/月/日)
CN	109977505	A	2019年 7月 5日	无	
CN	110263362	A	2019年 9月 20日	无	
US	2018371874	A1	2018年 12月 27日	W0 2017155548 A1	2017年 9月 14日