



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110688767 B

(45) 授权公告日 2021.04.06

(21) 申请号 201910956581.9

(22) 申请日 2019.10.09

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110688767 A

(43) 申请公布日 2020.01.14

(73) 专利权人 浙江大学
地址 310058 浙江省杭州市西湖区余杭塘路866号

(72) 发明人 郑俊 王炯超 吕庆 刘铁新
郭吉超 王潇弘 孙红月

(74) 专利代理机构 杭州中成专利事务所有限公
司 33212
代理人 周世骏

(51) Int. Cl.
G06F 30/20 (2020.01)

(56) 对比文件

CN 103713332 A, 2014.04.09

CN 108509711 A, 2018.09.07

CN 107507168 A, 2017.12.22

CN 106991244 A, 2017.07.28

WO 2014055171 A1, 2014.04.10

US 2019011600 A1, 2019.01.10

李明超等.基于岩体三维裂隙网络模型的随机块体稳定分析.《天津大学学报(自然科学与工程技术版)》.2018,

郑俊等.不连续面产状Fisher分布拟合度检验方法的改进.《岩石力学与工程学报》.2015,

Peyras, ET AL. Modeling the spatial variability of the shear strength of discontinuities of rock masses: Application to a dam rock mass.

《Engineering Geology》.2017,

审查员 徐灿

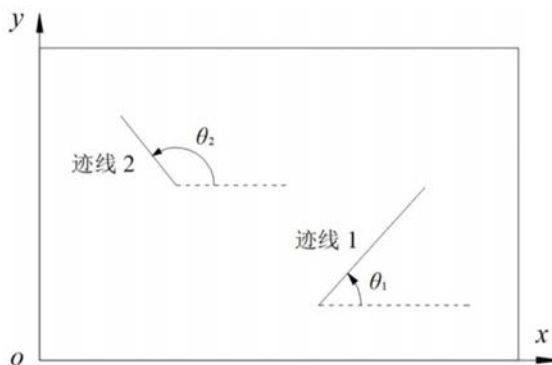
权利要求书3页 说明书8页 附图3页

(54) 发明名称

一种评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度的方法

(57) 摘要

本发明涉及岩体裂隙网络评价技术,旨在提供一种评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度的方法。该方法包括:获取迹线图;获取迹线信息;计算形状差异度;计算位置差异度;计算大小差异度;计算综合差异度,评价模型精度,选择最优模型。本发明从形状、位置、大小三个方面的判断实测迹线图与模拟迹线图之间的差异,避免了传统图像评价方法只从单方面评价的片面性与传统统计评价方法容易产生误差的缺陷。根据这种综合差异度指标,可以定量准确的从诸多模拟模型中选择与真实岩体最为相似的最佳模型。用于指导建模人员进一步的对最佳模型进行调整,以得到更为优良的模型。



1. 一种评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度的方法,其特征在于,包括以下步骤:

(1) 获取迹线图

使用与实测迹线图相同的矩形测窗,测量岩体裂隙网络模型的迹线,作为模拟迹线图;如果有n个矩形测窗,则一共获得n幅实测迹线图与n幅模拟迹线图;

(2) 获取迹线信息

根据测窗在对应的迹线图上建立局部坐标系,其中以矩形测窗的一个端点为原点,将长边和短边分别设置为x轴和y轴;根据局部坐标系,得到如下数据:测窗端点坐标、迹线数量、迹线长度、迹线角、迹线的特征点坐标;

(3) 计算形状差异度

根据第i个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的两个特征点集,分别计算模拟迹线图与实测迹线图的计盒维数 BD_{si} 和 BD_{ri} ,则这两幅迹线图之间的相对形状差异度为:

$$RSD_i = \frac{|BD_{si} - BD_{ri}|}{BD_{ri}} \times 100\%$$

根据第i个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的迹线角数据,分别计算模拟迹线的平均迹线角 MA_{si} 与迹线角标准差 SA_{si} ,以及实测迹线的平均迹线角 MA_{ri} 与迹线角标准差 SA_{ri} ;则这两幅迹线图之间的方向差异度为:

$$DD_i = \frac{\frac{|MA_{si} - MA_{ri}|}{MA_{ri}} + \frac{|SA_{si} - SA_{ri}|}{SA_{ri}}}{2} \times 100\%$$

当 $|MA_{si} - MA_{ri}|$ 大于 90° 时,用 $180^\circ - |MA_{si} - MA_{ri}|$ 代替 $|MA_{si} - MA_{ri}|$;

则第i个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图之间的形状差异度为 $SD_i = \frac{RSD_i + DD_i}{2}$;

同理,计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的形状差异度,则真实岩体

与该岩体裂隙网络模型形状差异度为 $SD = \frac{\sum_{i=1}^n SD_i}{n} \times 100\%$;

(4) 计算位置差异度

根据第i个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的两个特征点集,计算这两个点集之间的Hausdorff距离 HD_i ,以及该测窗的对角线长度 HD_{imax} ;则这两幅迹线图之间的极端位置差异度为 $ELD_i = \frac{HD_i}{HD_{imax}} \times 100\%$;

以实测迹线图的四个端点 $(0_{i1}, 0_{i2}, 0_{i3}, 0_{i4})$ 与中心点 (0_{i5}) 这五点为圆心,分别画五个圆;当每个圆内都包含半数的迹线特征点时,记录此时五个圆的半径为 $R_{ri1}, R_{ri2}, R_{ri3}, R_{ri4}$ 和 R_{ri5} ;同理,获得模拟迹线图五个圆的半径 $R_{si1}, R_{si2}, R_{si3}, R_{si4}, R_{si5}$;则第j个圆的半点数

量差定义为 $HRD_{ij} = \frac{|R_{sij} - R_{rij}|}{R_{rij}} \times 100\%$;

则这两幅迹线图之间的整体位置差异度为 $OLD_i = \frac{\sum_{j=1}^5 HRD_{ij}}{5} \times 100\%$;

将 ELD_i 和 OLD_i 的平均值作为这两幅迹线图之间的位置差异度 LD_i ;

同理, 计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的位置差异度, 则真实岩体

与该岩体裂隙网络模型的位置差异度为 $LD = \frac{\sum_{i=1}^n LD_i}{n} \times 100\%$;

(5) 计算大小差异度

根据第 i 个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的迹线长度数据, 计算模拟迹线的总长度 SL_{si} 、平均长度 ML_{si} 、长度标准差 SDL_{si} 、实测迹线的总长度 SL_{ri} 、平均长度 ML_{ri} 和长度标准差 SDL_{ri} ; 则第 i 个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图之间的大小差异度为:

$$ZD_i = \frac{\frac{|SL_{si} - SL_{ri}|}{SL_{ri}} + \frac{|ML_{si} - ML_{ri}|}{ML_{ri}} + \frac{|SDL_{si} - SDL_{ri}|}{SDL_{ri}}}{3} \times 100\%$$

同理, 计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的大小差异度; 则真实岩体

与该岩体裂隙网络模型的大小差异度为 $ZD = \frac{\sum_{i=1}^n ZD_i}{n} \times 100\%$;

(6) 计算综合差异度, 评价模型精度, 选择最优模型

将形状差异度 SD 、位置差异度 LD 和大小差异度 ZD 的平均值作为真实岩体与该岩体裂隙网络模型的综合差异度 CD ; 综合差异度 CD 越低, 代表该模型的精度越高, 与真实岩体越相似; 同理, 计算所有备选模型与真实岩体的综合差异度 CD , 选择综合差异度 CD 最低的模型作为最佳模型。

2. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 在所述步骤(2)中的局部坐标系中, 将迹线的方向向量定义为从 y 值较小的端点指向 y 值较大的端点的向量; 将迹线角定义为迹线的方向向量与 x 轴的正方向的夹角, 其范围为 0° 到 180° , 包括 0° 但不包括 180° ; 如果某条迹线的方向向量 n_i 与平均迹线角的方向向量 n_m 的夹角大于 90° , 且这条迹线的迹线角 θ_i 大于 90° , 则用 $\theta_i - 180^\circ$ 代替 θ_i ; 当这条迹线的迹线角 θ_i 小于 90° 时, 用 $\theta_i + 180^\circ$ 代替 θ_i 。

3. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 在所述步骤(2)中的局部坐标系中, 每条迹线的特征点的数量为 $k+2$, 其中 k 为整数且与迹线的长度成正比, 所有特征点沿迹迹均匀分布。

4. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 该方法进一步包括步骤(7)寻找最佳模型缺陷:

根据形状差异度 SD 、位置差异度 LD 和大小差异度 ZD 三个指标判断最佳模型与真实岩体之间的差异; 如果形状差异度 SD 比较高, 代表该模型在不连续面产状与半径方面与真实岩体的差异比较大; 如果位置差异度 LD 比较高, 代表该模型在不连续面位置方面与真实岩体的差异比较大; 如果大小差异度 ZD 比较高, 代表该模型在不连续面半径方面与真实岩体的差异比较大; 将形状差异度 SD 、位置差异度 LD 和大小差异度 ZD 三个指标的结果作为进一步

改良最佳模型的参照。

一种评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度的方法

技术领域

[0001] 本发明涉及岩体裂隙网络评价技术,具体涉及一种评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度的方法。

背景技术

[0002] 岩体是由岩石和不连续面组成的。“不连续面”是一个通用术语,是对大多数类型的节理、弱层理面、弱片理面、软弱带和断层的统称。岩体的不连续发展在很大程度上决定了岩体的变形特征和应力应变模式,对岩体工程的稳定性和安全性有着重要的影响。因此,在岩体研究和工程实践中,有必要定量描述岩体的不连续面的发育程度。由于在自然界的岩体中,不连续面是隐藏的,所以不可能在三维空间中直接测量所有的不连续面。针对这一问题,目前采用较为广泛的方法是:通过沿采样线的一维测量和二维的自然露头推测裂隙的三维特征,从而构建三维岩体裂隙网络模型。

[0003] 由于岩体裂隙网络模型均是基于概率统计学知识与一些假定,使用计算机模拟生成的,因此必然与真实的岩体存在一定程度的差别。因此,评价诸多模拟模型的建模精度,选择最接近真实岩体的最佳模拟模型尤为重要。如上所述,岩体中隐藏着真实的不连续面,因此只能通过比较同一采样窗口中真实岩体与模拟岩体迹线的差异性来进行建模精度评估。针对岩体裂隙网络模型的模拟效果及该如何选择的问题,需要探寻出一种根据迹线图差异性评价岩体裂隙网络模型精度的方法。

发明内容

[0004] 本发明要解决的技术问题是,克服现有技术中的不足,提供一种评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度的方法。

[0005] 为解决技术问题,本发明的解决方案是:

[0006] 提供一种评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度方法,包括以下步骤:

[0007] (1) 获取迹线图

[0008] 使用与实测迹线图相同的矩形测窗,测量岩体裂隙网络模型的迹线,作为模拟迹线图;如果有n个矩形测窗,则一共获得n幅实测迹线图与n幅模拟迹线图;

[0009] (2) 获取迹线信息

[0010] 根据测窗在对应的迹线图上建立局部坐标系,其中以矩形测窗的一个端点为原点,将长边和短边分别设置为x轴和y轴;根据局部坐标系,得到如下数据:测窗端点坐标、迹线数量、迹线长度、迹线角、迹线的特征点坐标;

[0011] (3) 计算形状差异度

[0012] 根据第i个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的两个特征点集,分别计算模拟迹线图与实测迹线图的计盒维数 BD_{si} 和 BD_{ri} ,则这两幅迹线图之间的相对形状差异度为:

$$[0013] \quad RSD_i = \frac{|BD_{si} - BD_{ri}|}{BD_{ri}} \times 100\%$$

[0014] 根据第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的迹线角数据,分别计算模拟迹线的平均迹线角 MA_{si} 与迹线角标准差 SA_{si} ,以及实测迹线的平均迹线角 MA_{ri} 与迹线角标准差 SA_{ri} ;则这两幅迹线图之间的方向差异度为:

$$[0015] \quad DD_i = \frac{\frac{|MA_{si} - MA_{ri}|}{MA_{ri}} + \frac{|SA_{si} - SA_{ri}|}{SA_{ri}}}{2} \times 100\%$$

[0016] 当 $|MA_i - MA_{ri}|$ 大于 90° 时,用 $180^\circ - |MA_i - MA_{ri}|$ 代替 $|MA_i - MA_{ri}|$;

[0017] 则第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图之间的形状差异度为

$$SD_i = \frac{RSD_i + DD_i}{2};$$

[0018] 同理,计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的形状差异度,则真实

岩体与该岩体裂隙网络模型的形状差异度为

$$SD = \frac{\sum_{i=1}^n SD_i}{n} \times 100\%;$$

[0019] (4) 计算位置差异度

[0020] 根据第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的两个特征点集,计算这两个点集之间的Hausdorff距离 HD_i 。由于该测窗的对角线长度就是这两个点集之间的最大可能

Hausdorff距离 HD_{imax} ,定义这两幅迹线图之间的极端位置差异度为

$$ELD_i = \frac{HD_i}{HD_{imax}} \times 100\%;$$

[0021] 以实测迹线图的四个端点($O_{i1}, O_{i2}, O_{i3}, O_{i4}$)与中心点(O_{i5})这五点为圆心,分别画五个圆;当每个圆内都包含半数的迹线特征点时,记录此时五个圆的半径为 $R_{ri1}, R_{ri2}, R_{ri3}, R_{ri4}$ 和 R_{ri5} ;同理,获得模拟迹线图上的五个圆的半径 $R_{si1}, R_{si2}, R_{si3}, R_{si4}$ and R_{si5} ;则第*j*个圆

的半点数量差定义为

$$HRD_{ij} = \frac{|R_{sij} - R_{rij}|}{R_{rij}} \times 100\%;$$

[0022] 则这两幅迹线图之间的整体位置差异度为

$$OLD_i = \frac{\sum_{j=1}^5 HRD_{ij}}{5} \times 100\%;$$

[0023] 将 ELD_i 和 OLD_i 的平均值作为这两幅迹线图之间的位置相似度 LD_i ;

[0024] 同理,计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的位置相似度,则真实

岩体与该岩体裂隙网络模型的位置差异度为

$$LD = \frac{\sum_{i=1}^n LD_i}{n} \times 100\%;$$

[0025] (5) 计算大小差异度

[0026] 根据第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的迹线长度数据,计算模拟迹线的总长度(SL_{si})、平均长度(ML_{si})、长度标准差(SDL_{si})、实测迹线的总长度(SL_{ri})、平均长度(ML_{ri})和长度标准差(SDL_{ri});则第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图之间的大小相似

度为:

$$[0027] \quad ZD_i = \frac{\frac{|SL_{si} - SL_{ri}|}{SL_{ri}} + \frac{|ML_{si} - ML_{ri}|}{ML_{ri}} + \frac{|SDL_{si} - SDL_{ri}|}{SDL_{ri}}}{3} \times 100\%$$

[0028] 同理,计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的大小相似度;则真实

$$\text{岩体与该岩体裂隙网络模型的大小差异度为 } ZD = \frac{\sum_{i=1}^n ZD_i}{n} \times 100\%;$$

[0029] (6) 计算综合差异度,评价模型精度,选择最优模型

[0030] 将形状差异度SD、位置差异度LD和大小差异度ZD的平均值作为真实岩体与该岩体裂隙网络模型的综合差异度CD;综合差异度CD越低,代表该模型的精度越高,与真实岩体越相似;同理,计算所有备选模型与真实岩体的综合差异度CD,选择综合差异度CD最低的模型作为最佳模型。

[0031] 本发明中,在所述步骤(2)中的局部坐标系中,将迹线的方向向量定义为从y值较小的端点指向y值较大的端点的向量;将迹线角定义为迹线的方向向量与x轴的正方向的夹角,其范围为 0° 到 180° ,包括 0° 但不包括 180° ;如果某条迹线的方向向量 n_i 与平均迹线角的方向向量 n_m 的交角大于 90° ,且这条迹线的迹线角 θ_i 大于 90° ,则用 $\theta_i - 180^\circ$ 代替 θ_i ;当这条迹线的迹线角 θ_i 小于 90° 时,用 $\theta_i + 180^\circ$ 代替 θ_i 。

[0032] 本发明中,在所述步骤(2)中的局部坐标系中,每条迹线的特征点的数量为 $k+2$,其中 k 为整数且与迹线的长度成正比,所有特征点沿轨迹均匀分布。

[0033] 本发明中,该方法进一步包括步骤(7)寻找最佳模型缺陷:

[0034] 根据形状差异度SD、位置差异度LD和大小差异度ZD三个指标判断最佳模型与真实岩体之间的差异;如果形状差异度SD比较高,代表该模型在不连续面产状与半径方面与真实岩体的差异比较大;如果位置差异度LD比较高,代表该模型在不连续面位置方面与真实岩体的差异比较大;如果大小差异度ZD比较高,代表该模型在不连续面半径方面与真实岩体的差异比较大;将形状差异度SD、位置差异度LD和大小差异度ZD三个指标的结果作为进一步改良最佳模型的参照。

[0035] 发明原理描述

[0036] 本发明中,使用一种综合差异度方法评价岩体裂隙网络模型与真实岩体之间的差异度。由于在自然界中,岩体的不连续面是隐藏在岩体内部的,因此无法直接对其进行测量。可以直接测量得到的只有岩体露头处的表面迹线,因此,对于岩体裂隙网络模型的精度评价,本质上是评价在相同测窗内真实岩体的迹线图与模拟模型的迹线图之间的差异。评价图形之间的差异,应该从形状、位置和大小三个方面综合评价。另外,由于迹线图是由一组或多组迹线构成的,本质上是一种二值化图形,而评价二值化图形之间的差异可以将这两个图形转化为点集进行考虑。因此首先要将迹线图上的点提取出来,然而将迹线图上的所有点全部提取出来是不可能的,因此选择提取一些迹线上的特征点作为代表。建议每条迹线的特征点数量为 $K+2$, K 与迹线的长度成正相关(例如当迹长四舍五入后为整数 d ,可以取 K 为 $2d$), K 的取值越大,结果越精确,但需要的时间也更长。

[0037] 在形状差异度方面,根据模拟迹线图与实测迹线图的特征点集,可以使用分形维数中的计盒维数来评价模拟迹线图与实测迹线图之间的相对形状差异度。由于计盒维数不

能判断图形的方向,而岩体的不连续面的方向对岩体的力学性能和渗透性有很大的影响。因此使用迹线角的均值和标准差这两个指标来评价模拟迹线图与实测迹线图之间的方向差异度。

[0038] 在位置差异度方面,由于计盒维数与迹线角不能判断迹线在测窗中的位置,因此根据模拟迹线图与实测迹线图的特征点集,使用Hausdorff距离来评价模拟迹线图与实测迹线图之间的极端位置差异度。由于Hausdorff距离容易受杂点的影响,因此提出了一种半点数量差指标,评价模拟迹线图与实测迹线图之间的整体位置差异度,用于弥补Hausdorff距离的缺陷。

[0039] 在大小差异度方面,迹线的大小实际上是指迹线的长度,因此使用迹线的总长度、平均长度、长度标准差三个指标评价模拟迹线图与实测迹线图之间的大小差异度。

[0040] 将形状差异度、位置差异度和大小差异度的平均值作为综合差异度,作为评价模型精度的指标。如果综合差异度越低,说明该模型的精度越高,与真实岩体越相似。在根据综合相似度选出精度最高的最佳模型后,利用该模型与真实岩体的形状差异度、位置差异度和大小差异度三个指标,可以进行进一步的分析,获得该模型与真实岩体的主要差别在哪些性质上,用于指导建模人员进一步的对最佳模型进行调整,以得到更为优良的模型。

[0041] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0042] 1. 本发明将图像识别中的计盒维数与Hausdorff距离等概念与传统评价方法中的迹线长度、迹线角等概念相结合,提出了一种综合差异度指标,从形状、位置、大小三个方面综合的判断实测迹线图与模拟迹线图之间的差异,避免了传统图像评价方法只从单方面评价的片面性与传统统计评价方法容易产生误差的缺陷。根据这种综合差异度指标,可以定量准确的从诸多模拟模型中选择与真实岩体最为相似的最佳模型。

[0043] 2. 利用形状相似度、位置相似度、大小相似度三个指标,可以对最佳模型进行进一步分析,获得该模型与真实岩体的主要差别在哪些性质上,用于指导建模人员进一步的对最佳模型进行调整,以得到更为优良的模型。

附图说明

[0044] 图1为迹线角示意图;

[0045] 图2为特殊迹线角的修正示意图;其中(a)为迹线角与平均迹线角的差值大于 90° 并且迹线角大于 90° 的情况,(b)为迹线角与平均迹线角的差值大于 90° 并且迹线角小于 90° 的情况;

[0046] 图3为迹线图的特征点提取示意图;其中(a)为迹线图举例,(b)为迹线图特征点;

[0047] 图4为第*i*个测窗中模拟迹线图的五个半径 R_{si1} 、 R_{si2} 、 R_{si3} 、 R_{si4} 和 R_{si5} 举例。

[0048] 图5为长河坝3号溢洪道隧洞边坡的第四测窗。

具体实施方式

[0049] 下面结合附图,对本发明做进一步的详细说明。以下的具体实施步骤可以使本专业技术领域的技术人员更全面的了解本发明,但不以任何形式限制本发明。

[0050] 首先需要说明的是,使用计算机模拟生成三维岩体裂隙网络模型属于现有技术,本发明的技术方案用于评价相关模型的精度,将涉及大量现有技术已广泛使用的符号或代

号,其定义或概念已属于本领域技术公知或熟练掌握的内容。因此,除非有特定含义本发明作出特别说明,其它与现有公知含义一致的,本发明不再一一表述。

[0051] 本发明所述评价岩体裂隙网络模型精度的综合差异度的方法,包括以下步骤:

[0052] (1) 获取迹线图

[0053] 使用与实测迹线图相同的矩形测窗,测量岩体裂隙网络模型的迹线,作为模拟迹线图。如果有n个矩形测窗,则一共获得n幅实测迹线图与n幅模拟迹线图。

[0054] (2) 获取迹线信息

[0055] 根据测窗在对应的迹线图上建立局部坐标系,其中以矩形测窗的一个端点为原点,将长边和短边分别设置为x轴和y轴。根据局部坐标系,得到如下数据:(a) 测窗端点坐标,(b) 迹线数量,(c) 迹线长度,(d) 迹线角,(e) 迹线的特征点坐标。

[0056] 其中,对迹线角与特征点进行如下说明:

[0057] 迹线的方向向量定义为从y值较小的端点指向y值较大的端点的向量。迹线角定义为迹线的方向向量与x轴的正方向的夹角,其范围为 0° 到 180° (包括 0° ,不包括 180°)。如图1所示, θ_1 和 θ_2 分别为迹线角1和2。需要注意的是,如果某条迹线的方向向量 n_i 与平均迹线角的方向向量 n_m 的交角大于 90° ,且这条迹线的迹线角 θ_i 大于 90° (图2(a)),用 $\theta_i - 180^\circ$ 代替 θ_i ;当这条迹线的迹线角 θ_i 小于 90° (图2(b)),用 $\theta_i + 180^\circ$ 代替 θ_i 。

[0058] 在评价模型精度的过程中,需要将迹线图转换为一个点集。显然,不可能记录迹线图上所有的点,因此选择用一些特征点来表示迹线图。建议每条迹线的特征点数量为 $k+2$,其中k为整数,与迹线的长度成正比。所有特征点沿迹线均匀分布特征点个数越多,计算精度越高,但计算时间越长。如图3所示,当k为两倍的迹线长度(取整)时,可以看出特征点很好地反映了迹线图的基本特征。

[0059] (3) 计算形状差异度

[0060] 根据第i个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的两个特征点集,分别计算模拟迹线图与实测迹线图的计盒维数 BD_{si} 和 BD_{ri} 。计盒维数的计算方法如下:

[0061] 假设迹线图的尺寸为 $b \times h$,计算b和h的所有公因数,分别记为 $d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$,并将整个迹线图用边长为这些公因数的方格进行划分。当方格边长为 d_i 时,方格总数为 $(b \times h) / d_i^2$ 。计算包含特征点的方格的数量,并将其记录为有效方格。将有效方格数表示为 $N(d_i)$,则可以得到一系列 $(d_i, N(d_i))$ 。对 $(d_i, N(d_i))$ 序列进行处理,得到 $(\log(1/d_i), \log(N(d_i)))$ 序列。用最小二乘法拟合一系列的 $(\log(1/d_i), \log(N(d_i)))$,得到拟合直线。拟合直线的斜率就是迹线图的计盒维数。

[0062] 则这两幅迹线图之间的相对形状差异度为 $RSD_i = \frac{|BD_{si} - BD_{ri}|}{BD_{ri}} \times 100\%$ 。

[0063] 根据第i个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的迹线角数据,分别计算模拟迹线的平均迹线角 MA_{si} 与迹线角标准差 SA_{si} 和实测迹线的平均迹线角 MA_{ri} 与迹线角标准差 SA_{ri} 。则这两幅迹线图之间的方向差异度为:

$$[0064] \quad DD_i = \frac{\frac{|MA_{si} - MA_{ri}|}{MA_{ri}} + \frac{|SA_{si} - SA_{ri}|}{SA_{ri}}}{2} \times 100\%$$

[0065] 注意,当 $|MA_i - MA_{ri}|$ 大于 90° 时,用 $180^\circ - |MA_i - MA_{ri}|$ 代替 $|MA_i - MA_{ri}|$ 。

[0066] 则第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图之间的形状差异度 $SD_i = \frac{RSD_i + DD_i}{2}$ 。

同理,计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的形状差异度,则真实岩体与该

岩体裂隙网络模型的形状差异度为 $SD = \frac{\sum_{i=1}^n SD_i}{n} \times 100\%$ 。

[0067] (4) 计算位置差异度

[0068] 根据第*i*个测窗内的实测迹线图的特征点集 $A = [a_1, a_2, a_3, \dots, a_n]$ 与模拟迹线图的特征点集 $B = [b_1, b_2, b_3, \dots, b_m]$, 计算这两个点集之间的Hausdorff距离 HD_i 。Hausdorff距离的计算方法如下:

[0069] 对于*A*中第*i*个点 a_i ($i=1$ to n), 计算 a_i 与*B*中的所有点之间的距离, 并记录最小距离 d_{aibmin} 。对所有的 d_{aibmin} 进行排序, 并选择最大值作为*A*到*B*的单向Hausdorff距离 $h_i(A, B)$ 。使用相同的方法获得*B*到*A*的单向Hausdorff距离 $h_i(B, A)$ 。将 $h_i(A, B)$ 与 $h_i(B, A)$ 进行比较, 选择较大的一个作为 HD_i 。

[0070] 另外记录该测窗的对角线长度, 作为该测窗下的迹线图之间的最大Hausdorff距离 (HD_{imax}), 则这两幅迹线图之间的极端位置差异度为 $ELD_i = \frac{HD_i}{HD_{imax}} \times 100\%$ 。

[0071] 以实测迹线图的四个端点 ($0_{i1}, 0_{i2}, 0_{i3}, 0_{i4}$) 与中心点 (0_{i5}) 这五点为圆心, 分别画五个圆。当每个圆内都包含半数的迹线特征点时, 记录此时五个圆的半径为 $R_{ri1}, R_{ri2}, R_{ri3}, R_{ri4}$ 和 R_{ri5} 。同理, 可以获得模拟迹线图上的五个圆的半径 $R_{si1}, R_{si2}, R_{si3}, R_{si4}$ and R_{si5} , 如图4

所示。则第*j*个圆的半点数量差为 $HRD_{ij} = \frac{|R_{sij} - R_{rij}|}{R_{rij}} \times 100\%$ 。

[0072] 则这两幅迹线图之间的整体位置差异度为 $OLD_i = \frac{\sum_{j=1}^5 HRD_{ij}}{5} \times 100\%$ 。

[0073] 将 ELD_i 和 OLD_i 的平均值作为这两幅迹线图之间的位置相似度 LD_i 。同理, 计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的位置相似度, 则真实岩体与该岩体裂隙网络模

型的位置差异度为 $LD = \frac{\sum_{i=1}^n LD_i}{n} \times 100\%$ 。

[0074] (5) 计算大小差异度

[0075] 根据第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图的迹线长度数据, 计算, 模拟迹线的总长度 (SL_{si})、平均长度 (ML_{si})、长度标准差 (SDL_{si}) 和实测迹线的总长度 (SL_{ri})、平均长度 (ML_{ri})、长度标准差 (SDL_{ri})。则第*i*个测窗内的实测迹线图与模拟迹线图之间的大小相似度为

$$[0076] \quad ZD_i = \frac{\frac{|SL_{si} - SL_{ri}|}{SL_{ri}} + \frac{|ML_{si} - ML_{ri}|}{ML_{ri}} + \frac{|SDL_{si} - SDL_{ri}|}{SDL_{ri}}}{3} \times 100\%$$

[0077] 同理,计算得到其他测窗内实测迹线图与模拟迹线图之间的大小相似度,则真实

$$\text{岩体与该岩体裂隙网络模型的大小差异度为 } ZD = \frac{\sum_{i=1}^n ZD_i}{n} \times 100\%。$$

[0078] (6) 计算综合差异度,评价模型精度,选择最优模型

[0079] 将SD、LD和ZD的平均值作为真实岩体与该岩体裂隙网络模型的综合差异度CD。CD越低,代表该模型的精度越高,与真实岩体越相似。同理,计算所有备选模型与真实岩体的CD,选择CD最低的模型作为最佳模型。

[0080] (7) 寻找最佳模型缺陷

[0081] 根据SD、LD和ZD三个指标判断最佳模型与真实岩体之间的差异。如果SD比较高,代表该模型在不连续面产状与半径方面与真实岩体的差异比较大;如果LD比较高,代表该模型在不连续面位置方面与真实岩体的差异比较大;如果ZD比较高,代表该模型在不连续面半径方面与真实岩体的差异比较大。根据SD、LD和ZD三个指标的结果,可以针对性的对最佳模型进行进一步改良。

[0082] 具体实施例子:

[0083] 长河坝是位于中国四川省的一座堆石坝,其泄水系统由三条导流隧洞、一条泄水隧洞和三条溢洪道隧洞组成。利用三维摄影测量系统对3号溢洪道隧道边坡上的迹线分四个测窗进行了测量。该边坡主要由中粗粒花岗岩和石英闪长岩构成,分为两个竖直面。两个竖直面的倾角方向分别为 283° 和 13° 左右。该边坡倾角范围为 $78^\circ \sim 84^\circ$,边坡高度为500-600m。由于该地区多期构造运动,边坡岩体中的不连续面发育良好,且没有充填。本专利以3号溢洪道隧洞边坡第四测窗(如图5所示)为例,该测窗的倾向为 102.6° ,倾角为 83.1° ,尺寸为 $30\text{m} \times 10\text{m}$ 。根据迹线的方向将测窗内的迹线分为三组。由于第四测窗的上、下区域的迹线很少,不宜以整个第四测窗为研究对象。因此,选取该测窗中y坐标范围为2~9的区域作为研究区域,即真实迹线图的尺寸为 $30\text{m} \times 7\text{m}$ (图5中的虚线窗口)。

[0084] 根据所测量的迹线数据,采用蒙特卡罗模拟方法,建立了5个尺寸为 $30\text{m} \times 30\text{m} \times 10\text{m}$ 的不连续面圆盘模型。不连续面的尺寸是由张国强等人提出的估算直径分布的解析方法得到的,不连续面的位置服从均匀分布,不连续面的产状服从Fisher分布。利用与真实迹线图相同的测窗,得到了5种模型的模拟迹线图。由于无法知道测窗在模型中的具体位置,所以选取(15,15,5)、(15,15,3)、(15,15,7)、(15,13,5)和(15,17,5)这五个点分别作为测窗的中心点对每个模型的迹线进行5次测量。计算每个模型的5个模拟迹线图与真实迹线图之间的综合差异度,取这5个综合差异度的均值作为模型与真实岩体之间的最终综合差异度。五个模拟模型的最终综合差异度分别为11.10%、14.61%、10.52%、11.85%和12.02%。其中模型3的最终综合差异度最小,为10.52%,因此选择模型3作为最佳模型。对于模型3,它与真实岩体的形状差异度、位置差异度和大小差异度分别为4.29%、8.99%、18.27%。说明该模型对不连续面尺寸的估计和模拟还有很大的改进空间,需要进一步改善。

[0085] 需要注意的是：本发明的实际保护范围不仅包括上述所公开的具体实施例，还包括在权利要求书之下实施或者执行本发明的所有等效方案。

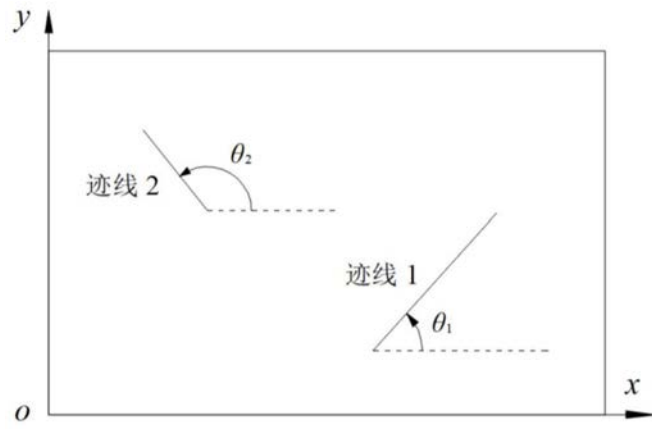
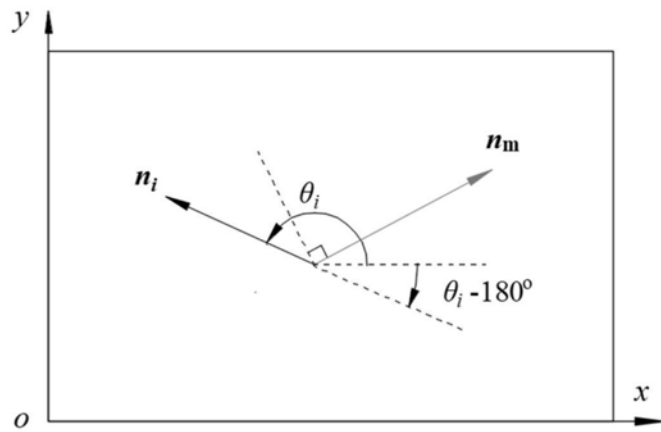
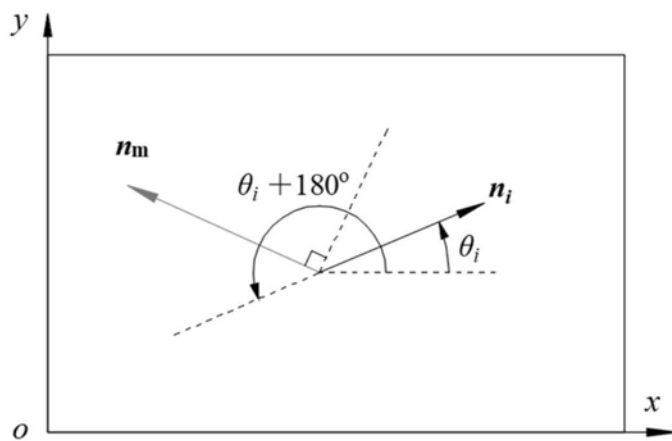


图1



(a) $\theta_i > 90^\circ$



(b) $\theta_i < 90^\circ$

图2

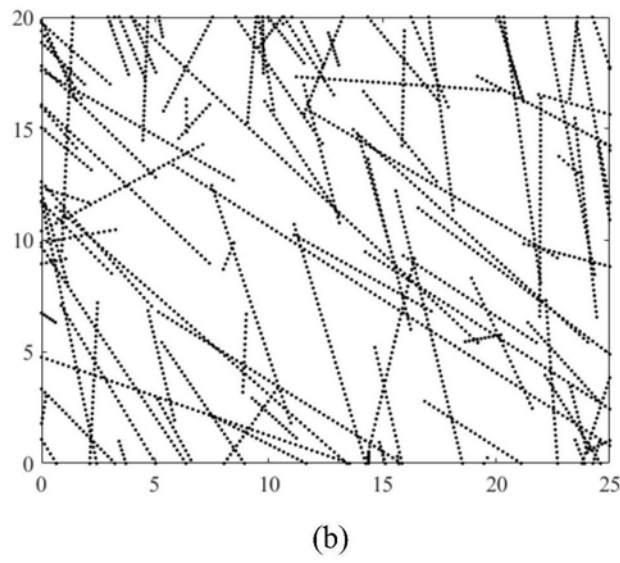
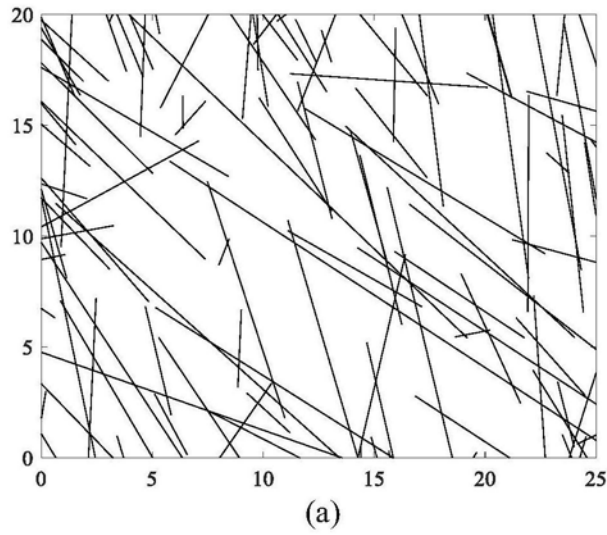


图3

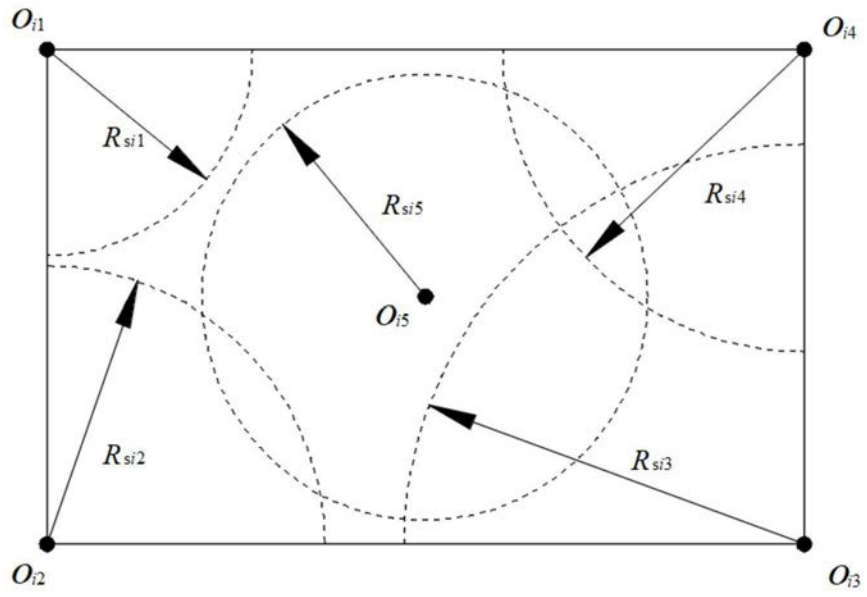


图4

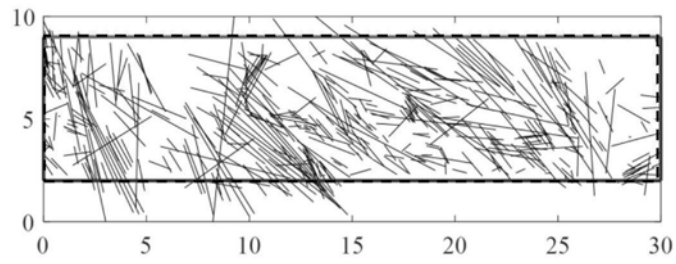


图5