

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.08.017

地下工程岩体节理迹长统计下限值的确定方法

吴超, 李元辉, 徐帅, 戴星航

(东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 以山东某金矿为工程依托, 以实际获得的岩体节理信息为样本, 借助聚类分析方法及其指标, 采用全面实验法, 开展地下工程岩体节理迹长统计下限值的确定方法研究. 从节理迹长统计下限值的定义及特征入手, 借助 DBI 指标 (Davies-Bouldin index, DBI) 实现优势节理组的划分与最佳优势节理分组方案的确定. 取离散性系数 k 是否大于或等于 20 作为判别节理组能否作为优势节理组的条件, 采用离散性系数 k 及其概率分布指标 n 综合分析确定岩体区域节理迹长统计下限值, 构建在不同岩体条件下确定节理迹长统计下限值的方法, 旨在剔除随机节理, 优化节理样本数据, 精确获取岩体节理空间分布特征.

关键词: 地下工程岩体; 节理迹长; 统计下限值; 随机节理; 聚类评价指标; 节理数据优化

中图分类号: TP 20 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)08-1167-07

Method for Determining the Lower Limit of Statistical Joints Trace Length in Underground Engineering Rock Mass

WU Chao, LI Yuan-hui, XU Shuai, DAI Xing-hang

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Yuan-hui, E-mail: liyuanhui@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Taking the actual rock mass joint information from a gold mine in Shandong Province as samples, a method is studied to determine the lower limit of the statistical joints trace length in underground engineering rock mass by cluster analysis and its evaluating indicators with the full-scale test. Starting from the definition and characteristics of the lower limit, the DBI (Davies-Bouldin index) is used to divide dominant joint sets and determine the best setting scheme of dominant joints. The joint set can become the dominant one if the discrete coefficient k is greater than 20, and the discrete coefficient k with its probability distribution index n together is used to analyze and determine the lower limit value. Furthermore, the method of determining the lower limit value of the statistical joints trace length under different rock mass conditions is developed in order to eliminate random joints and optimize the sample data of rock mass joints, thus getting spatial distribution characteristics of rock mass joints.

Key words: underground engineering rock mass; joint trace length; statistical lower limit; random joint; cluster evaluation index; joint data optimization

岩体由结构面和岩块组成, 具有不连续性、非均质性和各向异性^[1]. 结构面控制岩体的地质力学特性和渗透性等物理力学性质, 对工程岩体的失稳破坏起重要作用. 受岩体形成及地质构造运动的影响, 岩体结构面的尺度从几厘米到几公里不等. 针对岩体结构面尺度及作用的不同, 以谷德振^[2]为代表的学者, 依据结构面的尺度及其影响

程度, 将其划分为不同的类别, 其中第 I ~ III 类岩体结构面尺度较大, 多为区域性断裂或构造, 对区域岩体稳定性起控制作用; 而 IV, V 类岩体结构面的规模较小但分布广泛, 一般将 IV 级和 V 级岩体结构面统称为节理. 岩体节理对地下岩体工程的稳定性起控制作用, 是地下岩体结构分布特征调查的主要部分.

收稿日期: 2019-09-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0604601); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N182608003, N180115010); 东北大学深部金属矿山安全开采教育部重点实验室开放基金项目(2017SMDM-KF-A01).

作者简介: 吴超(1993-), 男, 河北邢台人, 东北大学博士研究生; 李元辉(1968-), 男, 山东莱州人, 东北大学教授, 博士生导师.

当前地下工程岩体结构特征调查主要采用测线法和测窗法,这两种方法在节理量测时,均采用全样本信息采集方式,导致一些迹线长度过小且无实际意义的节理也被作为样本进行统计.由于当前的统计方法对不同迹线长度的节理赋予相同的权重,因此,当这类迹线长度过短的节理数量过多时,就会导致岩体结构特征调查结果的失真,影响对地下岩体工程稳定性的评估.针对这一问题,一些学者提出了相应的修正方法,陈剑平等^[3]建议在进行节理产状信息采集时,对于迹线长度过短无实际工程意义的节理应进行人工舍短.一些学者^[4-6]提出了节理迹长统计下限值的概念,并结合工程岩体的实际工况条件,根据经验给出了具体的节理迹长统计下限值.综上分析可以看出,当前节理迹长统计下限值的选取以经验为主,存在明显的主观性,且多针对某一具体工况,无实际推广意义,尚未提出针对不同岩体条件的节理迹长统计下限值的确定方法.

针对这一问题,本文以山东某金矿为工程依托,以实际获得的岩体结构信息为样本,采用聚类分析手段,开展地下工程岩体节理迹长统计下限值确定方法的研究.从节理迹长统计下限值的定义及特征入手,借助 DBI 指标(Davies - Bouldin index, DBI)实现优势节理组的划分和最佳优势节理分组方案的确定;基于离散性系数 k 及其概率分布指标 n 综合确定岩体节理迹长统计下限值.综合以上分析构建不同岩体条件下节理迹长统计下限值的确定方法.

1 节理迹长统计下限值

岩体中的节理按其分布规律可以划分为沿某一产状分布的优势节理和离散分布的随机节理两大类.随机节理离散性高,节理产状无规律,迹线长度较小,因此在统计岩体结构特征时,一般不进行量测.现场岩体结构特征分析主要量测沿某一产状特征分布的优势节理组,该类节理具有成组出现、组内节理产状相似的特征,对地下岩体工程失稳破坏形式的判别以及破坏机理的研究起到重要作用.图 1a 为包含随机节理的统计样本,图 1b 为不包含随机节理的统计样本.可以看出,大量随机节理的存在导致在分析岩体结构特征时难以判别优势节理产状,或判别得到的优势节理产状不能有效反映节理的空间分布特征,降低了优势节理组的划分精度.

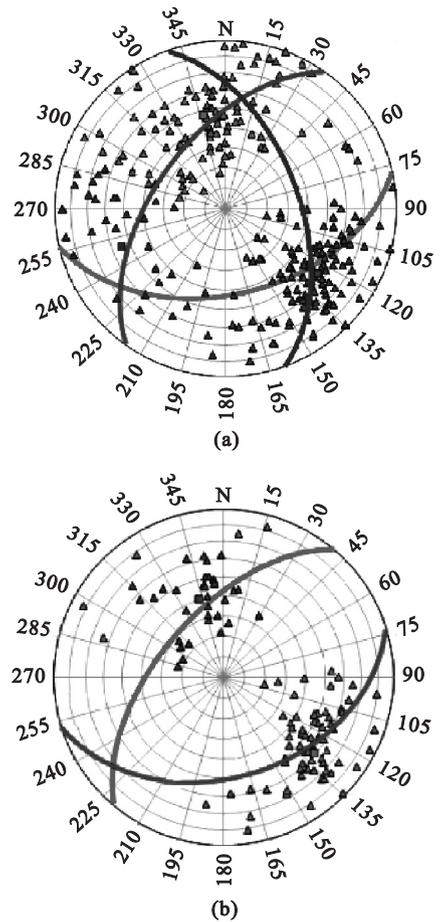


图 1 节理统计样本对比

Fig. 1 Comparison of statistical samples of joints
(a) — 包含随机节理; (b) — 剔除随机节理后.

研究^[7-8]指出,节理分组除受到倾向、倾角的影响外,还受到其他属性的影响;迹长作为岩体节理的基本几何要素之一,合理确定节理迹长统计下限值,才能保证获取最佳的节理样本数据,进而保证获取的节理空间分布特征具有代表性.但是在岩体节理信息量测时,无法事先判断随机节理和优势节理,因此,基于随机节理迹线长度较小这一特性,提出岩体节理迹长统计下限值这一评价指标,通过准确确定该指标值,剔除现场中迹长过短且无实际工程意义的节理.

节理迹长统计下限值不是一个固定的数值,而是随着不同的岩体条件呈现出较大的差异性:当岩体节理发育、破碎时,迹长下限值通常较小;而当岩体完整性较好时,迹长下限值通常较大.这是由于在同等开挖条件下,岩体节理裂隙发育时开挖更易导致节理的扩展和贯通,引起岩体的宏观破坏,影响地下工程岩体的稳定性.

因此,节理迹长统计下限值具有两个显著的特征:①该指标用于剔除随机节理以及一些迹长很小、无统计意义的优势节理,可以实现节理样本

的优化,提高优势节理组的划分精度;②该指标值并不是固定值,而是随着岩体质量条件的不同和节理发育情况表现出明显的差异性,岩体质量越好,该指标值越大。综上可知,节理迹长统计下限值是针对某一工程岩体条件,在进行岩体结构特征分析时,为剔除随机节理以及无实际统计意义节理的影响,而提出的一种临界迹线长度,随着岩体节理发育程度的不同而不同。

2 聚类分析评价指标

在分析岩体结构特征时,通过现场调查和量测可以获得大量的节理样本信息数据,这些节理样本的迹线长度、倾向、倾角各不相同,因此,需要采用统计学方法对节理样本数据进行分析,进而确定优势节理组的产状。当前主要采用的统计分析方法为聚类分析。基于聚类分析算法,本文采用

$$DBI = \frac{1}{N_w} \cdot \sum_{i=1}^{N_w} \max_{j=1,2,\dots,N_w, i \neq j} \left(\frac{\frac{1}{n_{W_i a=1(v_a \in W_i)}} \sum_{a=1}^b d(v_a, c_i) + \frac{1}{n_{W_j m=1(c_m \in W_j)}} \sum_{m=1}^n d(v_m, c_j)}{d(c_i, c_j)} \right). \quad (1)$$

式中: N_w 为优势组数目; n_{w_i}, n_{w_j} 为优势组内节理数目; c_i, c_j 为优势组 W 的产状中心向量; v_a, c_m 为优势组 W 内的任一节理产状向量; $d(v_a, c_i), d(v_m, c_j)$, 表示优势组 W_i, W_j 内任一节理产状向量与优势组产状中心向量间的距离; $d(c_i, c_j)$ 表示优势组 W_i 和 W_j 产状中心向量间的距离。

2.2 离散性系数 k

在确定优势节理组数后,对节理聚类效果进行有效性检验。大量实践证明,节理产状密度函数符合 Fisher 函数分布形式^[10],该函数中的离散性系数 k 用来表征节理产状的离散程度。因此,本文选取 k 对优势节理分组结果进行有效性检验。 k 值越大节理产状的聚类效果越优,表示优势节理组内的节理产状越接近。该指标通常采用极大似然法进行计算:

$$k \approx \frac{N}{N-R}. \quad (2)$$

式中: N 为优势组节理样本数量; R 为优势组所有节理产状单位向量的合矢量长度。

3 节理迹长统计下限值的确定

3.1 岩体节理样本的获取

以山东某金矿为工程依托,现场量测获取其深部区域的岩体节理信息。根据调查区域的范围,共布置 12 个测点。采用 Sirovision 岩体节理遥测

DBI 指标和离散性系数 k ,分析节理样本的聚类优劣程度,开展节理样本聚类效果的检验,进而确定优势节理组的产状特征。

2.1 DBI 指标

在进行节理样本统计分析时,首先要确定最佳优势节理组数。DBI^[9] 利用数据集内样本点到其聚类中心的距离来估计数据集内数据的紧致性,利用各个聚类中心之间的距离来表示数据集之间的分离性,DBI 的定义见式(1)。该指标认为数据集内数据越紧致,数据集之间越分离,聚类效果越好,即 DBI 越小,聚类效果越好。因该指标可以综合分析数据集内部以及数据集之间的紧致和分离特征,本文将该指标用于确定节理样本的优势节理组数。各个优势节理组构成自身的数据集,采用该指标分析各个优势节理组内数据的紧致性以及优势节理组之间的分离性。

分析系统,通过现场拍摄,建立原位岩体表面三维模型(如图 2 所示),实现岩体节理信息的获取。选取 10#测点的岩体节理信息作为本文分析的数据样本,10#测点共获取节理样本 255 条。



图 2 原位岩体表面三维模型及节理信息

Fig. 2 Three-dimensional model and joint information of in-situ rock mass surface

3.2 基于 DBI 指标的优势节理组划分

根据实测的节理样本数据信息,绘制节理产状分布特征图,如图 3 所示。由图 3a 可以看出,迹长大于 0.4 m 的节理样本仅占总样本数的 12.2%,且节理迹线越长,对岩体的破坏作用越强,导致对岩体稳定性的影响越大。根据节理迹线长度的分布特征,确定节理迹长统计下限值选取范围为 0, 0.1, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35 和 0.40 m;此外根据图 3b 节理样本的极点图分布特征,确定优势节理的分组数目为 2,3,4,5 和 6 组。

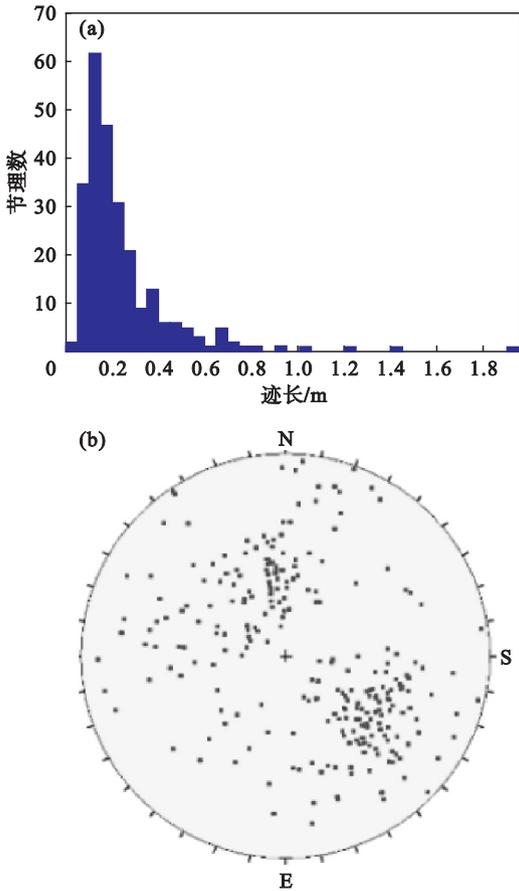


图 3 节理产状分布特征图
Fig. 3 Distribution of joint attitude
(a)—迹长分布图;(b)—极点图.

对节理迹长统计下限值选取方案和优势节理组分组方案进行组合,根据全面实验的要求,本文共设计 40 组实验方案,分别计算每一方案的 DBI,如图 4 所示.由图可知,尽管 DBI 在节理迹长统计下限值为 0.1 m 和 0.2 m 时表现出一定的波动性,但随着节理迹长统计下限值增大,DBI 整体呈下降趋势,即节理样本的聚类效果越来越好.DBI 随优势节理组数的变化规律不明显.

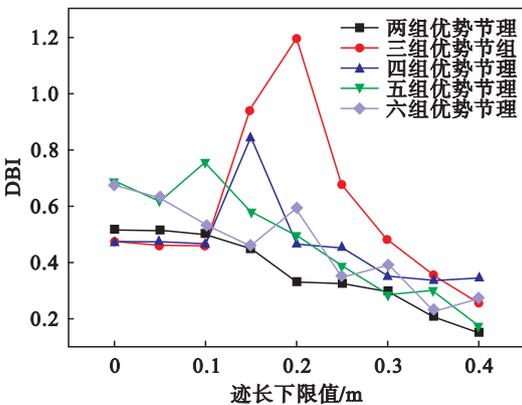


图 4 DBI 随迹长的变化曲线
Fig. 4 Variation curve of DBI with trace length

DBI 越小代表该数据的聚类效果越好,此外考虑到工程实际,经节理迹长下限值筛选的节理数据其不同优势组划分方案的 DBI 值接近时,取优势组数目较少的划分方案,因此,结合图 4 可知,当节理迹长统计下限值分别为 0,0.10,0.15,0.20,0.25,0.3,0.35 和 0.40 m 时,对应的最佳优势节理组数依次为 3,3,3,2,2,2,2 和 2.

3.3 基于离散性系数 k 的节理迹长统计下限值

由文献[11]可知,当岩体优势节理组的离散系数值 $k \geq 20$ 时,表示该优势节理组内节理样本的聚类效果较好;当 $k < 20$ 时,表示聚类效果较差.将 k 作为优势节理组聚类效果的评价指标.分别计算每一实验方案的离散性系数 k ,获取不同节理迹长统计下限值所对应的各节理组 k 值的分布特征,如图 5 所示.由图可知,随着节理迹长统计下限值的增大, k 值逐渐增加.当节理迹长统计下限值为 0,0.1 和 0.15 m 时 k 值基本处于 0~20 之间,而当节理迹长统计下限值超过 0.2 m 后,优势节理组 $k > 20$ 的比例逐渐增大.

为进一步研究节理迹长统计下限值的选取对 k 的影响,本文定义了 k 的概率分布指标 n .该指标表示不同节理迹长统计下限值条件下, k 大于或等于 20 的概率:

$$n = \frac{s}{z} \times 100\% \quad (3)$$

式中: s 和 z 分别为某一节理迹长统计下限值所对应的 k 大于或等于 20 的优势节理组数目和节理组总数.

n 值随节理迹长统计下限值的分布规律见图 6.可以看出,随着节理迹长统计下限值的增大, n 值也增大,即节理样本的聚类效果更好.当节理迹长统计下限值小于 0.2 m 时, n 值小于或等于 10%;当节理迹长统计下限值大于或等于 0.2 m 时, n 值均大于 40%, n 值急剧增大.根据 n 值随节理迹长统计下限值的分布规律,以 n 值突变点为依据,初步确定本文所采用的节理样本的节理迹长统计下限值应大于或等于 0.2 m.该突变点实现了迹长过短的随机节理的有效剔除,从而明显增强了节理组的聚集程度.

由 3.2 节分析可知,本文所用节理样本数据的最佳优势节理组数分别为 2 组或 3 组,其不同节理迹长统计下限值所对应的各优势节理组的离散性系数 k 如图 7 所示.可以看出,当节理迹长统计下限值小于或等于 0.3 m 时, k 均小于 20,节理样本的聚类效果差;当节理迹长统计下限值大于或等于 0.35 m 时, k 离散性系数均大于 20,节理

样本的聚类效果好. 因此, 当以不同节理迹长下限值筛选出的节理数据均为最佳优势节理组划分

时, 节理迹长统计下限值为 0.35 m, 满足其大于或等于 0.2 m 的条件.

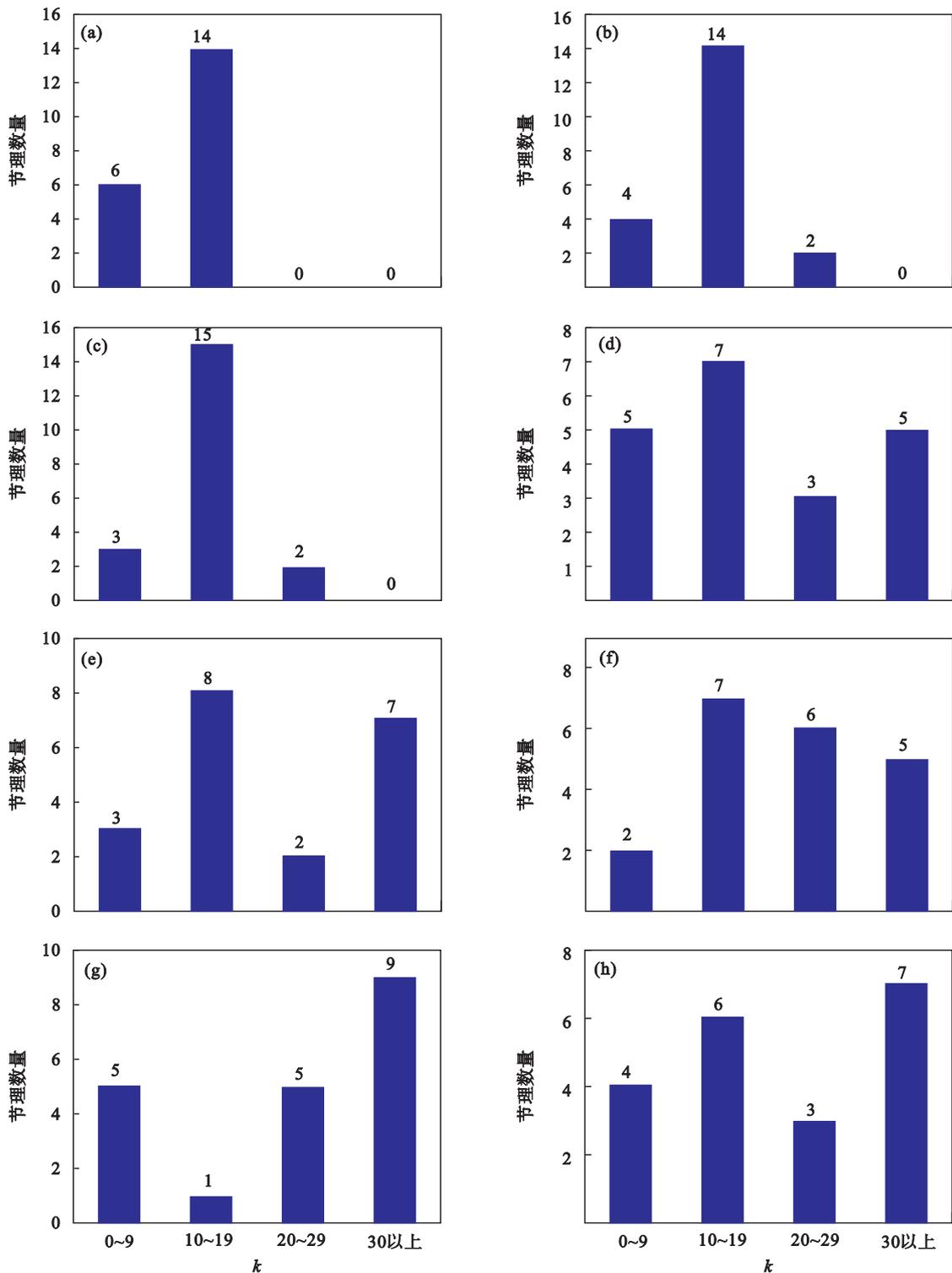


图 5 不同节理迹长统计下限值对应的 k 值分布特征

Fig. 5 Distribution of k under different statistical lower limits of joint trace length

(a)—0 m; (b)—0.1 m; (c)—0.15 m; (d)—0.2 m; (e)—0.25 m; (f)—0.3 m; (g)—0.35 m; (h)—0.4 m.

综上分析可知, 本文依托山东某金矿实测得到的岩体节理样本, 其节理迹长统计下限值为 0.35 m. 将全样本节理产状分布信息与通过节理

迹长统计下限值筛分后的节理产状分布信息进行对比, 结果如图 8 所示. 从图中可以看出, 筛分后的节理数据极大程度地降低了随机节理的影响.

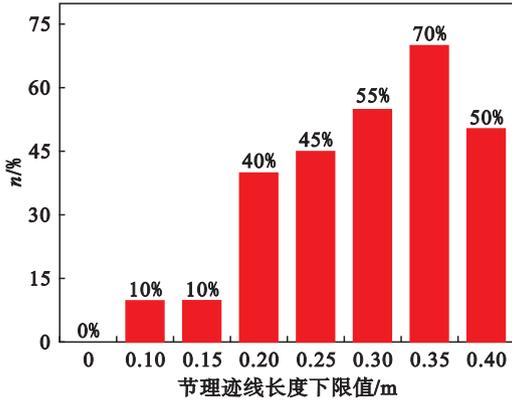


图 6 指标 n 的分布

Fig. 6 Distribution of index n

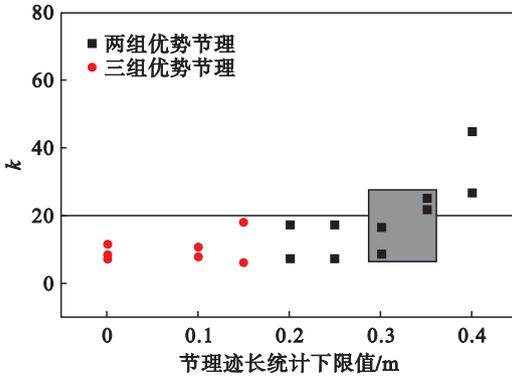


图 7 优势节理组 k 的分布规律

Fig. 7 Distribution of k of dominant joint groups

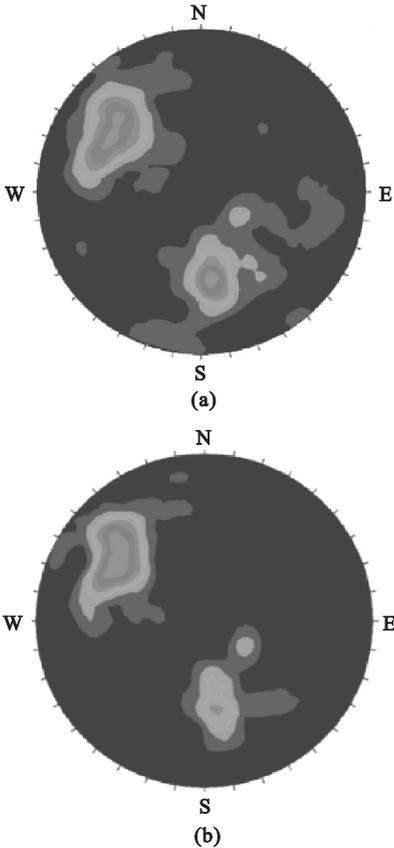


图 8 筛分前后节理产状分布图

Fig. 8 Contour map of original and optimized data of joints

(a)—原始节理数据等密图;(b)—筛分后节理数据等密图.

3.4 节理迹长统计下限值的确定方法

基于前文的分析结果,提出适用于不同岩体条件下的节理迹长统计下限值确定方法,其标准流程如图 9 所示:①根据调查区域的范围以及工程分布情况布置测区,开展节理信息采集工作.②基于获取的节理样本信息,分析其迹长分布特征,确定节理迹长统计下限值的选取范围;生成节理极点图,分析节理产状分布特征,确定优势节理组数的范围.③基于上述确定的节理迹长统计下限值方案和优势节理组分组方案,按照全面实验的要求,划分实验方案,并进一步计算每一方案的 DBI.④将 DBI 最小时的优势组划分方案视为最佳优势节理分组.⑤借助离散性系数 k 展开聚类有效性检验,计算获取所有实验方案内各优势组的 k 值.取 n 与 k 作为节理迹长统计下限值的判别条件.⑥取最佳优势节理分组条件下各优势组 k 均大于或等于 20 的临界迹长作为节理迹长统计下限值,以 n 发生突变的临界迹长作为节理迹长统计下限值的验证条件.当最佳优势节理分组条件下的节理迹长统计下限值满足验证条件时,将其作为节理迹长统计下限值;否则,取 n 对应的临界迹长为节理迹长统计下限值.⑦基于节理迹长统计下限值,优化样本测区节理数据,准确分析测区内岩体节理优势产状分布特征.

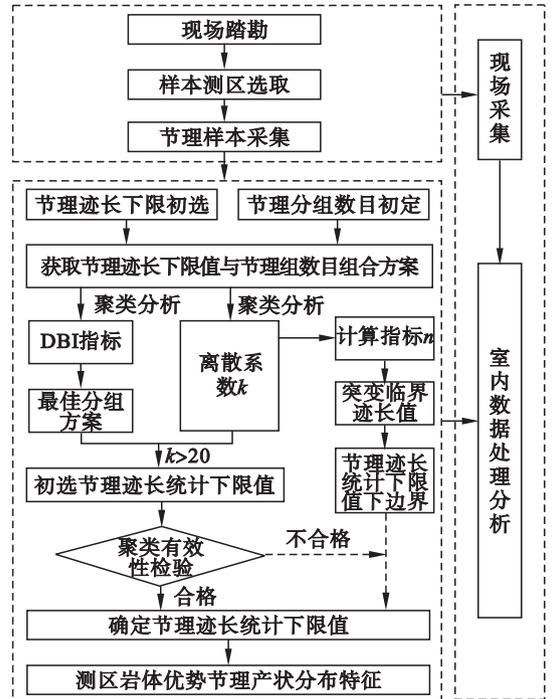


图 9 确定节理迹长统计下限值的标准流程

Fig. 9 Standard procedures for determining the lower limit of statistical trace length of joints

4 结 论

1) 依托山东某金矿节理样本数据, 分析表明节理迹长统计下限值的增大使得 DBI 整体呈下降趋势, 确定节理迹长统计下限值分别为 0, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35 和 0.40 m 时, 对应的最佳优势节理组数依次为 3, 3, 3, 2, 2, 2, 2 和 2。

2) 定义离散性系数 k 及其概率分布指标 n , 并对两者进行综合分析, 确定了节理样本数据的节理迹长统计下限值为 0.35 m。

3) 提出适用不同岩体条件的节理迹长统计下限值确定方法, 建立节理迹长统计下限值确定的标准流程, 可以为地下岩体节理调查统计提供指导。

参考文献:

- [1] Yarahmadi R, Bagherpour R, Taherian S G, et al. Discontinuity modelling and rock block geometry identification to optimize production in dimension stone quarries[J]. *Engineering Geology*, 2018, 232:22-33.
- [2] 谷德振. 岩体工程地质力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
(Gu De-zhen. Foundation of geomechanics of rock mass engineering[M]. Beijing: Science Press, 1979.)
- [3] 陈剑平, 石丙飞, 王树林, 等. 单测线法估算随机节理迹长的数值技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(10):1755-1759.
(Chen Jian-ping, Shi Bing-fei, Wang Shu-lin, et al. A numerical technique for estimating the trace length of random joints by single line method[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004(10):1755-1759.)
- [4] 梅涛. 岩体节理三维网络模拟优化及在甘肃北山茱萸槽岩块的应用研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2008.
(Mei Tao. Optimization of three-dimensional network simulation of rock mass joints and its application in Bletilla grooves in Beishan, Gansu Province[D]. Wuhan: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics), 2008.)
- [5] 张文丽. 裂隙迹长非确定性统计模型的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
(Zhang Wen-li. Study on the application of uncertain statistical model of fracture trace length[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.)
- [6] 雷光伟. 岩体节理几何特征研究及三维网络模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
(Lei Guang-wei. Study on geometric characteristics of rock mass joints and three-dimensional network simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.)
- [7] Tokhmechi B, Memarian H, Moshiri B, et al. Investigating the validity of conventional joint set clustering methods[J]. *Engineering Geology*, 2011, 118(3/4):75-81.
- [8] Ding Q, Huang R Q, Wang F Y, et al. Multi-parameter dominant grouping of discontinuities in rock mass using improved ISODATA algorithm [J/OL]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018 [2019-07-27]. <https://doi.org/10.1155/2018/5619404>.
- [9] van Craenendonck T, Blockeel H. Using internal validity measures to compare clustering algorithms [C]//AutoML workshop at ICML 2015. Lille, France, 2015:1-8.
- [10] Zheng J, Deng J, Yang X, et al. An improved Monte Carlo simulation method for discontinuity orientations based on Fisher distribution and its program implementation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2014, 61:266-276.
- [11] 倪春中, 刘春学, 张世涛. 从岩石露头裂隙迹线估算裂隙三维空间方向[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(1):102-106.
(Ni Chun-zhong, Liu Chun-xue, Zhang Shi-tao. Estimation of three-dimensional spatial direction of fracture from rock outcrop fracture trace[J]. *Oil and Gas Geology*, 2013, 34(1):102-106.)