

DOI: 10.11779/CJGE201701013

# 多参数统计均质区划分——以马吉水电站为例

阮云凯, 陈剑平\*, 占洁伟, 曹琛, 宋盛渊, 孙东彦

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 引入秩和检验非参数统计方法, 建立不连续面岩体统计均质区评价模型。文中考虑了不连续面产状、迹长两个参数, 在随机数学的基础上提出了一种不连续面岩体统计均质区划分的新方法, 即利用秩和检验计算研究区样本之间的相关性, 从而合理划分不连续面岩体统计均质区。选取云南省马吉水电站左岸坝肩某两高程 4 个平硐作为研究对象, 首先将产状数据用其法向极点与单位圆上半球被划分为 100 个等面积四边形小方格的交点来表示; 其次, 根据迹长从小到大对落入小方格的极点进行编秩; 最后, 基于秩和检验来分析不连续面落入相应小方格的频率。研究结果表明: PD201 和 PD251 以及 PD251 和 PD253 不具有统计相似性, 而 PD241 和 PD253、PD201 和 PD241 在不同的比较区域下得到不同的均质区评价结果, 这说明统计均质区存在尺寸效应。较 Miller 仅考虑不连续面产状, 本文同时考虑了产状和迹长两个因子, 结果更加合理。此外, 该方法可以应用到小样本不连续面统计均质区划分中。

**关键词:** 统计均质区; 秩和检验; 迹长; 产状; 尺寸效应

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)01-0148-06

作者简介: 阮云凯(1989-), 男, 福建建阳人, 博士研究生, 主要从事岩体结构及其工程地质稳定性方面的研究。E-mail: ruanyunkai@163.com。

## Multivariate method for identifying structural domain boundaries: an example from Maji Hydropower Station in China

RUAN Yun-kai, CHEN Jian-ping, ZHAN Jie-wei, CAO Cen, SONG Sheng-yuan, SUN Dong-yan

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China)

**Abstract:** The Wilcoxon rank sum nonparametric statistical test is introduced to establish an evaluation model for identifying structural domain boundaries in jointed rock masses. A new method for identifying structural domain boundaries considering discontinuity orientation and trace length is proposed on the basis of random mathematics. The Wilcoxon rank sum test is used to calculate the correlation between samples collected from four adjacent adits at different elevations of Maji Hydropower Station at the left bank of Nujiang River in Yunnan Province of China so as to rationally divide statistical homogeneous areas of discontinuous rock masses. First, the Schmidt plots are divided into 100 windows with approximately equal areas. Second, the poles occurring in each corresponding window are arranged in ascending order with respect to their trace lengths. Finally, the Wilcoxon rank sum test is used to identify the homogeneity of structural populations by analyzing the discontinuity sequence. The results indicate that, PD201 and PD251, PD251 and PD253 are situated in different structural domains, while PD241 and PD253, PD201 and PD241 in different areas have different homogeneous area evaluation results, indicating that the statistical homogeneous area has size effect. The Miller's method only considers discontinuity orientation, while the new method is more reasonable becomes it considers both the orientation and the trace length. The other advantage of the new method is that it can be employed to evaluate statistically homogeneous regions with small sample sizes.

**Key words:** statistical homogeneity; Wilcoxon rank sum test; trace length; discontinuity orientation; size effect

## 0 引言

岩体可视为由不连续面和由不连续面切割的块体的集合体<sup>[1]</sup>。不连续面的空间分布是变化的, 其表现为不相同的两个地质单元之间的地质、地质力学和水文地质的性质存在差异<sup>[2]</sup>。统计均质区是指在统计上具有相似岩体结构和地质力学性质的区域<sup>[2-3]</sup>。在进行

三维不连续面网络建模时, 首先应当确定统计均质区, 以此来表征不连续面地质模型<sup>[2]</sup>。

传统的统计均质区划分是将产状投影到极点图上

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41330636); 吉林大学研究生创新基金项目(2016208)

收稿日期: 2016-04-22

\*通讯作者 (E-mail: chenjp@126.com)

进行优势分组, 进而视觉上判别<sup>[4]</sup>。但是当不连续面在投影图上分散或随机分布时, 很难准确划分<sup>[3]</sup>。

为了克服主观误差, 统计学的方法被应用到均质区划分中<sup>[3-5]</sup>。Miller<sup>[3]</sup>采用施密特图关联表法成功划分岩体统计均质区, 但方法具有一定局限性, 要求样本数量大于 150 且检验自由度大于 30; Mahtab 等<sup>[5]</sup>将产状数据用其法向极点与单位圆上半球被划分 100 个等面积四边形小方格的交点表示, 从而进行相似检验; Martin 等<sup>[4]</sup>基于 Mahtab 等方法, 用相关系数法进行均质区划分; 但相关系数法仅给出均质区的线性关系而未具体给出划分临界值。

此外, 一些学者在划分均质区的研究中并未考虑产状因素<sup>[6-8]</sup>。Kulatilake 等<sup>[6]</sup>考虑结构面密度和结构面尺寸分布划分统计均质区; 范留明等<sup>[7]</sup>基于不连续面密度进行西南某水电站岩体结构均质区划分。阮云凯等<sup>[8]</sup>基于 KS 检验考虑迹长进行统计均质区划分。

不连续面的产状不仅是分析岩体结构稳定性的必要因素, 而且是决定岩体结构中块体的形态、最危险滑动面的关键因素; 不连续面的大小是影响岩体结构稳定性的重要因素之一, 同时也是决定了岩体中块体大小的主要因素<sup>[9-10]</sup>。由于现场野外调查, 无法或者难以准确的获得不连续面的实际大小, 因此通常基于迹长的概率分布来估算不连续面的大小<sup>[11-12]</sup>。因此, 本文基于 Miller 等<sup>[3]</sup>、Martin 等<sup>[4]</sup>的研究成果, 考虑不连续面产状和迹长两个参数, 利用秩和检验来划分岩体统计均质区。具体步骤如下: ①将产状数据用其法向极点与单位圆上半球被划分为 100 个等面积四边形小方格的交点来表示; ②落入相应方格中的不连续面极点按照其迹长升序进行编秩; ③利用秩和检验分析待比较区域中落入方格中极点频率从而确定是否为同一个统计均质区。

## 1 研究方法

由于不连续面的产状是球状数据 (双变量数据)、迹长是单变量数据, 一般很难同时考虑。为了兼顾两种数据的特性。本文采用非参数检验方法中的秩和检验来划分岩体结构统计均质区。

### 1.1 秩和检验的基本原理

威尔科克森(F·Wilcoxon)于 1945 年提出 Wilcoxon 秩和检验<sup>[13-14]</sup>。它以样本观测值在两个比较样本中的秩序为基础, 用于描述两个统计样本之间的相似程度。

假设两个区域内分别有  $n_1$  和  $n_2$  个不连续面, 并且两个样本中的数据是相互独立的。具体步骤:

(1) 将两个区域 (假设样本 1 包含  $n_1$  个不连续面, 样本 2 包含  $n_2$  个不连续面) 调查的不连续面混合,

并根据其迹长大小进行升序编秩, 迹长值最小的秩次为 1, 最大的秩次为  $N$  ( $N = n_1 + n_2$ )。

(2) 当不连续面的迹长大小相等时, 对其求平均值并作为这些迹长的秩次。

(3) 将混合样本中的所有不连续面的秩次相加起来, 并将该值作为秩和检验的统计量  $T$ 。

(4) 确定置信水平  $p$  值: ①若  $n_1 \leq 10$ ,  $n_2 - n_1 \leq 10$ , 根据  $T$  值查表确定  $p$  值; ②若  $n_1 > 10$ ,  $n_2 - n_1 > 10$  时, 采用正态近似法:

$$u = \frac{T - n_1(N+1)/2}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (N+1)}{12} \left(1 - \frac{\sum t_j^3 - t_j}{N^3 - N}\right)}} \quad (1)$$

式中,  $t_j$  是有相同秩次的不连续面个数。根据正态分布的  $u$  值, 来计算  $p$  值。

(5) 取置信水平为 0.05。若求解的  $p$  值低于 0.05, 认为这两个区域不具有统计相似性, 不能划为一个均质区; 若求解的  $p$  值高于 0.05, 认为这两个区域在统计上可以划分为一个均质区。

需要指出, 笔者根据比较落入两个施密特图小方格的不连续面极点个数来评价比较样本之间的相似程度, 表 1 给出任意两个对比的施密特图中不连续面极点的编秩方格。

### 1.2 不连续面产状和迹长数据的处理

本文采用 Mahtab 等<sup>[5]</sup>方法对不连续面产状进行加工处理。该方法是将产状数据用其法向极点与单位圆上半球被划分为 100 个等面积四边形小方格的交点来表示 (如图 1), 而后统计落入每个方格中不连续面的极点数目并绘制 4 个平硐的不连续面产状极点图 (如图 2)。

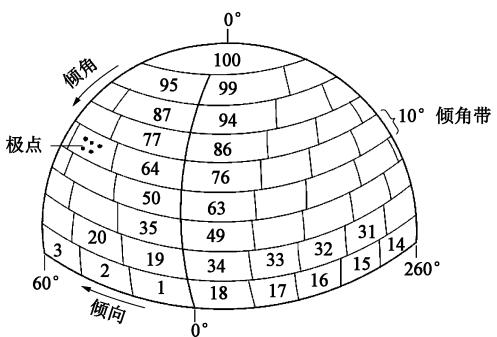


图 1 上半球被划分 100 个小方格方案

Fig. 1 Upper hemispherical surface divided into 100 windows

传统统计均质区划分都是通过比较落入网格中的概率从而确定<sup>[5]</sup>。Martin 等<sup>[4]</sup>认为当不连续面的产状投影到方格中有相似概率时, 认为在统计上是均质的。但是, 它们的迹长分布也许并不一致。因此, 笔者文中将收集到的 4 个平硐的不连续面按照 Mahtab 等<sup>[5]</sup>

表 1 施密特图中不连续面极点编秩表

Table 1 Fissure pole rank table in Schmidt plots

方格编号	施密特图 1	施密特图 2	总计	按迹长大小编秩	平均秩次
1	$n_{1,1}$	$n_{2,1}$	$t_1$	1, 2, $\cdots$ , $t_1$	$r_1$
2	$n_{1,2}$	$n_{2,2}$	$t_2$	$(t_1+1), (t_1+2), \cdots, (t_1+t_2)$	$r_2$
3	$n_{1,3}$	$n_{2,3}$	$t_3$	$(t_1+t_2+1), (t_1+t_2+2), \cdots, (t_1+t_2+t_3)$	$r_3$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
100	$n_{1,100}$	$n_{2,100}$	$t_{100}$	$\left(\sum_{j=1}^{99} t_j + 1\right), \left(\sum_{j=1}^{99} t_j + 2\right), \cdots, \left(\sum_{j=1}^{100} t_j\right)$	$r_{100}$

注:  $t_i = n_{1,i} + n_{2,i}$ ,  $1 \leq i \leq 100$ 。

方法投影到 100 格小方格中, 同时落入相应方格中的不连续面极点按照其迹长升序进行编秩 (如表 1)。

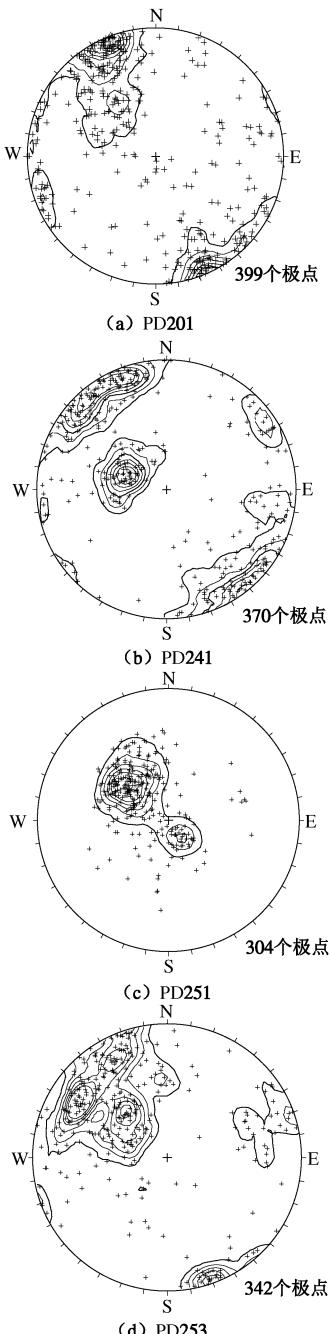


图 2 不同平硐的不连续面产状的上半球等面积极点图

Fig. 2 Upper hemisphere equal-area projections of discontinuity orientations collected from each adit

利用秩和检验分析待比较区域中落入方格中极点频率, 分别计算出统计量  $T$  和置信水平  $p$  值。若求解的  $p$  值低于 0.05, 认为这两个区域不具有统计相似性, 不能划为一个均质区; 若求解的  $p$  值高于 0.05, 则认为这两个区域在统计上可以划分为一个均质区。

## 2 工程概况

本文以云南省马吉水电站工程为依托, 选取怒江左岸某两高程 4 个平硐 (PD201, PD251, PD241 和 PD253) 中现场调查的不连续面作为研究对象。PD201 和 PD251 位于 1345 m 高程, PD241 和 PD253 位于 1425 m 高程。4 个平硐高和宽大约 2m, PD251、PD241 和 PD253 长为 200 m, PD201 长度为 196 m。拟建坝址为混凝土双曲拱坝, 设计坝高 300 m, 为世界级高坝。

工程区位于青藏高原东南部, 属滇西横断山系, 地势总体为北高南低。坝址区主要发育高山峡谷, 两岸分布的山脉高程在 3000~4000 m 以上, 相对高差 1500~2500 m, 属高山峡谷地貌单元。怒江总体流向大致为  $SE130^\circ \sim SE170^\circ$ , 两岸谷坡陡峻, 坡度一般  $45^\circ \sim 60^\circ$ , 多见悬崖峭壁, 呈较对称的“V”形 (如图 3)。区内地层较为发育, 从元古界到第四系均有出露, 地层变质变形差异较大, 岩性、岩相变化极为复杂。岩浆岩、变质岩、沉积岩均有出露。库区地下水主要有基岩裂隙水和松散岩类孔隙水两大类型, 以基岩裂隙水为主。通过现场调查, 从 4 个平硐中共测得 1415 个不连续面。

## 3 统计均质区划分

### 3.1 根据相邻平硐确定统计均质区

采用秩和检验对研究区中的 4 个平硐进行统计均质区划分, 并和 Miller 方法进行对比, 结果见表 2。

结果表明, 两种评价方法的结果大致相同。但 Miller 方法认为 PD241 和 PD253 拒绝检验, 而新方法接受检验。需要指出, Miller 方法具有一定的局限性, 它要求数据量大于 150 同时要求数据检验的自由度大于 30。尽管本次研究对象的数据量均大于 150, 但这

些数据在施密特图上比较集中(图3)而无法满足Miller方法的Lancaster准则。此外,表3和图4分别给出了平硐的迹长分布情况。PD241和PD253的迹长频率分布基本相似并且他们的平均迹长大小接近。因此,考虑了迹长和产状因素的新方法认为PD241和PD253在统计意义上是相似的,可以划分为一个均质区,不同平硐的统计均质区划分结果如图5。



图3 坝址区地形地貌

Fig. 3 Geomorphology and geology of dam site

表2 相邻平硐相似性评价结果

Table 2 Evaluated results of similarity between adjacent adits

方向	平 硐	秩和检验方法		Miller 方法	
		p 值	结果	p 值	结果
水平	PD201 和 PD251	$1.7 \times 10^{-56}$	拒绝	$2.5 \times 10^{-10}$	拒绝
	PD241 和 PD253	0.342	接受	$2.6 \times 10^{-9}$	拒绝
垂直	PD201 和 PD241	0.549	接受	0.6761	接受
	PD251 和 PD253	$2.3 \times 10^{-61}$	拒绝	$3.3 \times 10^{-8}$	拒绝

表3 各个平硐不连续面迹长统计表

Table 3 Statistical results of joint trace length in each adit

平 硐	裂隙总数/条	迹长/m		
		最小值	最大值	平均值
PD201	399	0.40	5.80	1.58
PD241	370	0.14	5.30	1.56
PD251	304	0.37	4.25	1.26
PD253	342	0.36	5.90	1.59

### 3.2 根据不同平硐相邻硐段确定统计均质区

结合野外现场调查分析,马吉水电站坝址的岩体靠近河谷临空面不连续面卸荷比较发育,随着水平硐

深的加深岩体越来越好。参考Huang等<sup>[15]</sup>对高边坡卸荷带变形机制的研究,将平硐划分为卸荷段、卸荷调整段和原岩应力段。

平硐各个硐段的参数见表4。图6反映了各个平硐上游壁不连续面迹长的发育特征。

采用秩和检验对不同平硐相应硐段进行相似性评价,结果见表5。计算结果得出,当岩体处于卸荷段内,只有PD241和PD253接受秩和检验,可以划分为一个统计均质区。当岩体处于卸荷调整段和应力原岩段时,只有PD201和PD241接受秩和检验,可以划分为一个统计均质区,其他平硐在相应硐段不具有统计相似性。

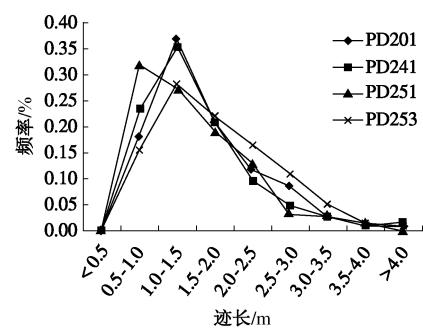


图4 不连续面的迹长分布

Fig. 4 Frequencies of discontinuity with trace leng collected from each adit

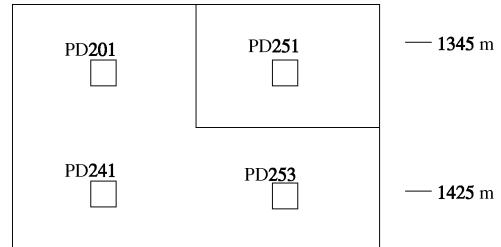


图5 相邻平硐统计均质区划分

Fig. 5 Structural domain boundaries between adjacent adits

### 3.3 统计均质区的尺寸效应

通过比较图5和图7的评价结果,不难发现PD201和PD251, PD251和PD253无论是整个平硐还是分硐段进行比较,它们都无法满足检验的置信水平。因此,这些平硐在统计上不具有相似性,不是一个统计均质

表4 各个平硐硐段信息

Table 4 Parameters of divided zones in each adit

平硐	卸荷段		卸荷调整段		原岩应力段	
	范围/m	不连续面个数	范围/m	不连续面个数	范围/m	不连续面个数
PD201	0~60	135	60~158	198	158~196	66
PD241	0~51	115	51~136	164	136~200	91
PD251	0~58	148	58~174	131	174~200	25
PD253	0~50	126	50~135	118	135~200	98



区, 进一步佐证了新方法的准确性。尽管表 2 中 PD201 和 PD241, PD241 和 PD253 在整个平硐划分中, 它们被划分为一个统计均质区; 但是单把平硐分硐段并单独考虑时, 其对应的各个硐段的岩体结构特征并不是相似的。

在表 5 中, PD201 和 PD241 的卸荷段不具有统计相似性, 说明这两个平硐在这一硐段的表生改造和卸

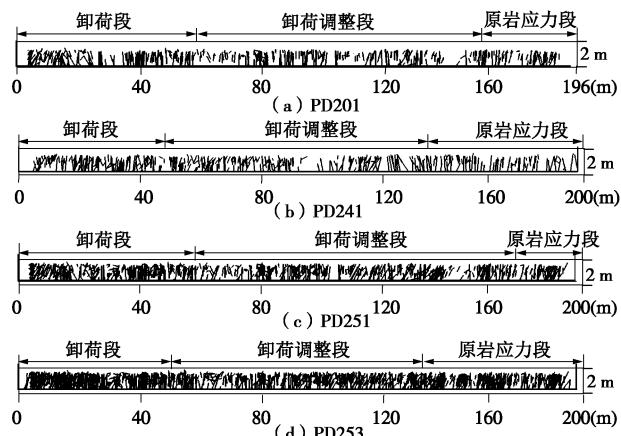


图 6 不同平硐各硐段二维迹线图

Fig. 6 Two-dimensional trace map in different zones along each adit

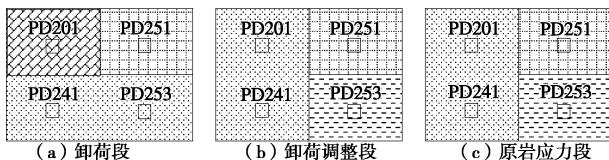


图 7 不同平硐对应硐段统计均质区划分

Fig. 7 Structural domain boundaries between corresponding zones of adits

表 5 相邻平硐相似性评价结果

Table 5 Evaluated results of similarity between corresponding zones of adits

方向	平硐	硐段	秩和检验	
			p 值	评价结果
水平方向	PD201 和 PD251	1	$5.4 \times 10^{-26}$	拒绝
		2	$2.4 \times 10^{-47}$	拒绝
		3	$8.0 \times 10^{-10}$	拒绝
	PD241 和 PD253	1	0.008	接受
		2	$6.3 \times 10^{-5}$	拒绝
		3	$3.2 \times 10^{-4}$	拒绝
垂直方向	PD201 和 PD241	1	0.024	拒绝
		2	0.371	接受
		3	0.665	接受
	PD251 和 PD253	1	$4.7 \times 10^{-30}$	拒绝
		2	$1.8 \times 10^{-14}$	拒绝
		3	$8.9 \times 10^{-7}$	拒绝

注: 1 表示卸荷段, 2 表示卸荷调整段, 3 表示原岩应力段。

荷作用不一样, 在卸荷调整段和原岩应力段划分为一个均质区。PD241 和 PD253 的卸荷段划分为一个均质区, 卸荷调整段和原岩应力段不是一个统计均质区。

通过改变均质区划分比较区域的尺寸, 而得到了不一样的统计均质区评价结果, 这说明统计均质区存在尺寸效应。因此, 选取合适的对比区域尺寸大小是划分岩体结构均质区的前提。对比区域的最小尺寸应该是表征单元体的尺寸, 但是, 均质区的尺寸应该大于或者等于表征单元体的尺寸。为了更好的划分的岩体结构均质区, 选取的比较区域的大小需要结合研究区现场的工程地质条件来综合确定。

## 4 结 论

本文基于 Miller 和 Martin 等<sup>[3-4]</sup>前人的研究成果, 考虑不连续面产状和迹长两个参数, 利用秩和检验建立了一种新的岩体统计均质区划分评价模型, 并应用于马吉水电站坝址区平硐均质区的划分中研究中, 初步得到如下结论与建议:

(1) 产状不是划分岩体结构均质区的唯一依据, 在实际工作中, 根据不连续面的发育规律及实际工程的需要, 合理的选取均质区的依据是必要的。笔者同时考虑了产状和迹长两参数应用于马吉水电站工程中, 验证了该方法的可行性。

(2) 秩和检验对样本的数量没有严格的要求<sup>[14]</sup>, 因此, 新的方法可以运用到小样本不连续面的统计均质区划分的研究工作中。

(3) 统计均质区的评价结果随着比较区域的大小的改变而不同, 这说明统计均质区存在尺寸效应, 选取合适的比较区域需要根据研究区的工程地质条件来确定。

(4) 笔者仅考虑产状和迹长, 但不连续面的张开、充填程度、粗糙度、含水情况等因素对统计均质区划分仍有一定影响, 如将这些因素综合考虑, 将会使划分结果更加合理可靠。

## 参 考 文 献:

- [1] 王良奎, 陈剑平, 卢 波. 样本窗口中不连续面体积密度的评价与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(3): 42 - 44. (WANG Liang-kui, CHEN Jian-ping, LU Bo. Estimation and application of volume density of discontinuities in sampling window[J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 30(3): 42 - 44. (in Chinese))
- [2] 陈剑平, 肖树芳, 王 清. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1995. (CHEN Jian-ping, XIAO Shu-fang, WANG Qing. Computer

- simulation principle of 3D network numerical modeling technique[M]. Changchun: Northeast Normal University, 1995. (in Chinese))
- [3] MILLER R S M. A Statistical method to evaluate homogeneity of structural populations[J]. *Journal of Mathematical Geology*, 1983, **15**(2): 317 – 328.
- [4] MARTIN M W, TANNANT D D. A technique for identifying structural domain boundaries at the EKATI Diamond Mine[J]. *Engineering Geology*, 2004, **74**(3/4): 247 – 264.
- [5] MAHTAB M A, YEGULALP T M. A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics[C]// Proceedings of the 25th US Symposium on Rock Mechanics. New York, 1984: 495 – 502.
- [6] KULATILAKE P H S W, FIEDLER R, PANDA B B. Box fractal dimension as a measure of statistical homogeneity of jointed rock masses[J]. *Engineering Geology*, 1997, **48**(3): 217 – 229.
- [7] 范留明, 黄润秋, 丁秀美. 一种基于结构面密度的岩体结构均质区划分方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22**(7): 1132 – 136. (FAN Liu-ming, HUANG Run-qi, DING Xiu-mei. Analysis on structural homogeneity of rock mass based on discontinuity density[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22**(7): 1132 – 1136. (in Chinese))
- [8] 阮云凯, 陈剑平, 曹琛, 等. K-S 检验在裂隙岩体统计均质区划分中的应用[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2015, **36**(10): 1471 – 1475. (RUAN Yun-kai, CHEN Jian-ping, CAO Cen, et al. Application of K-S test in structural homogeneity dividing of fractured rock mass[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2015, **36**(10): 1471 – 1475. (in Chinese))
- [9] HUDSON J A, PRIEST S D. Discontinuity and rock mass geometry[J]. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1979, **16**: 339 – 362.
- [10] KULATILAKE P H S W, WANG L Q, TANG H M, et al. Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses[J]. *Computers Geotechnics*, 2011, **38**(6): 846 – 860.
- [11] LI X J, ZUO Y L, ZHUANG X Y, et al. Estimation of fracture trace length distributions using probability weighted moments and L-moments[J]. *Engineering Geology*, 2014, **168**: 69 – 85.
- [12] 阮云凯, 陈剑平, 李严严, 等. 基于 WLSM 的多参数裂隙岩体统计均质区划分[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(7): 1277 – 1282. (RUAN Yun-kai, CHEN Jian-ping, LI Yanyan, et al. Evaluation of statistical homogeneity of jointed rock masses based on weighted least-square method[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(7): 1277 – 1282. (in Chinese))
- [13] JOHNSON R A, BHATTACHARYYA G K. *Statistics: principles and methods*[M]. 6th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.
- [14] LI Y Y, WANG Q, CHEN J P, et al. Determination of structural domain boundaries in jointed rockmasses: An example from the Songta dam site, China[J]. *Structural Geology*, 2014, **69**: 179 – 188.
- [15] HUANG R Q, LIN F, CHEN D J, et al. Formation mechanism of unloading fracture zone of high slopes and its engineering behaviors[J]. *Engineering Geology*, 2001, **9**(3): 227 – 232.