

基于三维节理网络模拟的坝基岩体结构分类研究

倪卫达^{1,2}, 单治钢¹, 刘 晓³

(1. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310014; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 中国地质大学(武汉) 教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 以金沙江白鹤滩水电站左岸坝基岩体为研究对象, 开展了基于三维节理网络模拟的坝基岩体结构分类研究。根据节理的分组分布和密度分布进行统计均质区分段, 以分段为单位建立基于统计学和概率论的三维节理网络模型。在三维节理网络模型的模型正面、模型侧面和模型顶面上分别沿形心等角度布置模拟测线, 将 3 个正交平面上 54 条模拟测线的 RBI 均值定义为三维等效岩体块度指数 RBI_{3D} , 以 RBI_{3D} 作为评价指标开展坝基岩体结构分类。结果表明: 左岸第 10 梯段坝基岩体的完整性相对较好, 其中整体块状占 53.3%, 块状占 26.7%, 次块状占 20.0%, 分析结果与实际地质情况相符。该方法充分考虑了节理分布的空间各向异性, 并采用单一定量指标作为岩体结构的分类依据, 兼顾了科学合理性和工程实用性。

关 键 词: 岩体力学; 坝基岩体; 网络模拟; 块度指数; 岩体结构

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)01-0287-10

Classification of rock mass structure of dam foundation based on 3D joint network simulation

NI Wei-da^{1,2}, SHAN Zhi-gang¹, LIU Xiao³

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, Zhejiang 310014, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Three Gorges Research Center for Geohazard, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Based on the 3D joint network simulation, the structure classification was carried out on the left bank dam foundation in Baihetan hydropower station on Jinsha River. Firstly, the dam foundation was separated into several statistical homogeneous subsections, according to the group distribution and density distribution of joints. Then, a 3D joint network model was established for each subsection by considering the statistics and probability theory. Secondly, uniform angle rotating measuring-lines were arranged on the positive, side and top surfaces of the model, respectively. Subsequently, a certain RBI value of each line and 3 rose diagrams for each orthogonal surface were obtained. Finally, the mean value of these RBI s from 54 measuring-lines was defined as 3D equivalent rock mass block index RBI_{3D} . Moreover, the RBI_{3D} , as an evaluation index, was used to classify the structure of dam foundation. Results showed that the integrity of No.10 bench in the left bank was relatively good. It was found that the ratios of the whole blocky structure, blocky structure and sub-blocky structure were 53.3%, 26.7% and 20.0%, respectively. The analytical results agreed well with the actual situation. Therefore, the presented method has been proven to be scientific rationality and engineering practicability, as the space anisotropy of joint distribution was fully considered and a single quantitative evaluation index was employed to determine the rock mass structure type.

Keywords: rock mechanics; dam foundation; network simulation; block index; rock mass structures

1 引 言

岩体结构是指结构面和结构体两大岩体结构单元在地质体内的排列组合形式, 是开展岩体质量评价和岩体稳定性分析的基础^[1]。目前, 岩体结构分类的定量指标主要有: 结构面间距 D 、完整性系

数 K_v 、岩石质量指标 RQD 和体积节理数 J_v 等, 但各类定量指标在实际工程运用中均存在一定问题。

结构面间距 D 是划分岩体结构类型最直接的定量指标, 但各岩体结构分类标准中, D 的取值方法和分类界限缺乏统一的标准及充分的论证^[2-3]; 完整性系数 K_v 是指岩体与岩石弹性纵波速度之比的

收稿日期: 2016-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41572279)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41572279).

第一作者简介: 倪卫达, 男, 1987 年生, 在站博士后, 主要从事岩土体稳定性评价方面的研究工作。E-mail: willyni@163.com

平方,可综合反映岩体的完整程度,但 K_v 的测试受节理发育程度以外的多种因素影响,且 K_v 与岩体节理发育程度不一定具有明显的相关性^[4-5];岩石质量指标 RQD 是描述岩体结构特性的传统指标,但其存在方向一维性和阈值单一性等缺陷^[6-9];体积节理数 J_v 的定义为 1 m^3 体积内节理的数量,实际工程运用时通过单位面积内实测的节理数量乘以系数 K 获得 J_v ^[10],因此该指标具有一定的经验性和不确定性,且目前尚无 J_v 与岩体结构类型的对应标准。

针对上述问题,国内外学者开展了大量有益的研究。徐伟^[6]、张文^[7-8]等通过节理网络模拟的方法进行 RQD 的计算,解决 RQD 方向一维性的缺陷;汪斌^[9]、张文^[11]等给出 RQD 最佳阈值的计算方法,克服 RQD 阈值单一性的缺陷;Kruhl^[12]、Yasrebi^[13]等根据节理化岩体的统计自相似性,采用分形理论研究岩体的结构特性;胡卸文^[14]、张世殊^[15]、黄润秋^[16]等提出岩体块度指数 RBI 的概念,并在二滩、锦屏 I 级和溪洛渡等大型水电工程中得到成功运用。

本文在上述研究的基础上,选择金沙江白鹤滩水电站左岸坝基岩体为研究对象,根据节理分组和节理密度的分布特征进行统计均质区分段,对各分段的节理参数开展数理统计,获取各组节理各几何要素的最优概率模型,采用 Monte-Carlo 法和三维可视化技术开展随机模拟,生成三维节理网络模型。以此为基础,在三维节理网络模型的正面、侧面和顶面上分别沿形心等角度布置模拟测线,统计获取 3 个平面上共计 54 条模拟测线的等效岩体块度指数 RBI 值,并将其均值定义为三维等效岩体块度指数 RBI_{3D} ,结合基于 RBI 的岩体结构分类标准实现坝基岩体结构分类研究,本文技术路线如图 1 所示。

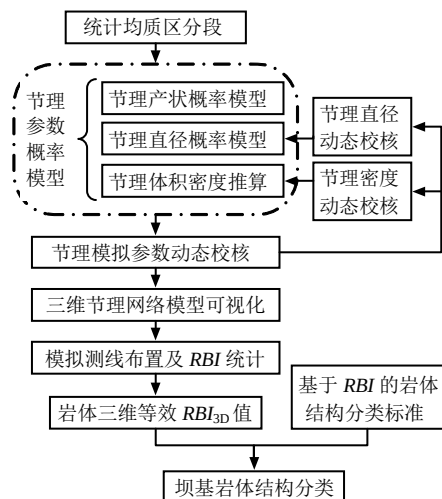


图 1 技术路线图

Fig.1 Technology roadmap

2 工程概况及统计均质区分段

2.1 工程概况

金沙江白鹤滩水电站总装机为 $1.6 \times 10^4\text{ MW}$,双曲拱坝坝高为 289 m。坝址区处于扬子地台西南缘与青藏高原东南缘的结合部位,坝基岩体主要为二叠系上统峨眉山组玄武岩,岩层产状总体较平缓,走向为 $N30^\circ \sim 50^\circ E$,倾向为 SE,倾角为 $15^\circ \sim 25^\circ$ 。

金沙江白鹤滩水电站左岸坝基岩体如图 2 所示,以坝基梯段为单位,沿每一梯段马道横向全长采用宽为 1.0 m 的测窗开展坝基岩体节理统计。左岸第 10 梯段(EL.750~740 m)坝基岩体揭露完整,以该梯段为例开展研究,该梯段共计测得 502 条节理,节理展布如图 3 所示。



图 2 金沙江白鹤滩水电站左岸坝基
Fig.2 Left dam foundation of Baihetan hydropower station

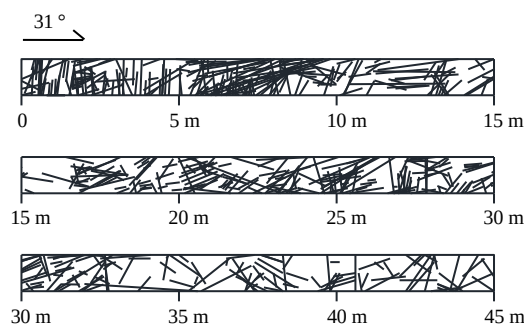


图 3 第 10 梯段坝基岩体节理展布图
Fig.3 Joint exhibition of No.10 bench dam foundation rock mass

2.2 统计均质区分段

根据 502 条节理的统计数据,生成节理极点等密度图,如图 4 所示。为便于开展统计均质区的分段,将上述节理细分为 8 组,节理分组情况见图 4,节理分组参数见表 1。

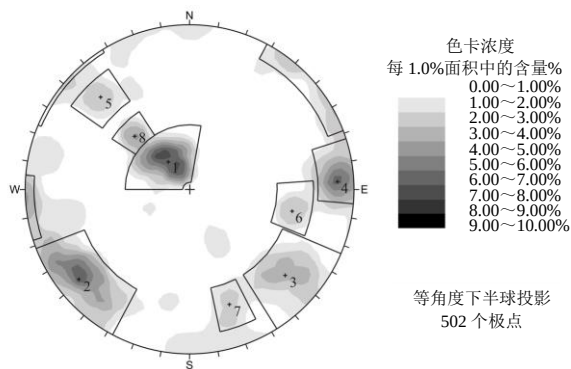


图 4 第 10 梯段坝基岩体节理极点等密度图
Fig.4 Joint pole isodensity map of No.10 bench dam foundation rock mass

表 1 第 10 梯段坝基岩体节理分组参数
Table 1 Joint grouping parameters of No.10 bench dam foundation rock mass

组别	数量 /条	倾向范围 /(°)	倾角范围 /(°)	优势倾向 /(°)	优势倾角 /(°)
1	133	100~176	12~40	142	24
2	85	36~68, 215~240	71~89	51	82
3	47	298~325	64~89	312	76
4	40	260~273	78~88	267	84
5	14	135~145	74~79	136	76
6	16	280~292	47~71	282	65
7	14	335~347	65~83	341	73
8	22	132~136	44~52	134	50

统计均质区分段是岩体节理参数统计和三维网络模拟的基础^[17]。分段的目的是确定相似结构岩体的边界,将岩体节理参数相似的区域划归同一段,使各段岩体具有相似的结构特征及力学特性。分段的原则为:①满足坝基岩体结构分类的尺度要求,合适的结构分类尺度有利于岩体质量评价及岩体支护设计;②满足统计分析样本的数量要求。研究表明^[18-19],每一分段的节理统计样本数在 100 条以上时,可获得可信的统计结果。

结合上述分段原则,根据该梯段坝基岩体的节理分组分布和节理密度分布进行统计均质区分段。该梯段坝基岩体节理分组分布如图 5 所示,节理密度分布如图 6 所示。

由图 5 和图 6 可看出,坝基岩体节理的分组和密度与该梯段桩号具有如下变化规律:①0~9 m 段,坝基岩体以第 2 组节理为主,平均占比 42.7%,节理密度相对最高,平均密度为 53.7 条/(3 m);②9.0~21.0 m 段,坝基岩体以第 1 组节理为主,平均占比 49.2%,节理密度相对较低,平均密度为 28.3 条/(3 m);③21.0~33.0 m 段,坝基岩体以第 1 组和

第 4 组节理为主,平均占比分别为 27.1%和 22.7%,节理密度相对较高,平均密度为 38.3 条/(3 m);④33.0~45.0 m 段,坝基岩体节理组成相对凌乱,主要以其他节理为主,节理密度相对最低,平均密度为 18.8 条/(3 m)。综合上述分析,将该梯段坝基岩体分为 4 段统计均质区,各段统计均质区的参数见表 2。

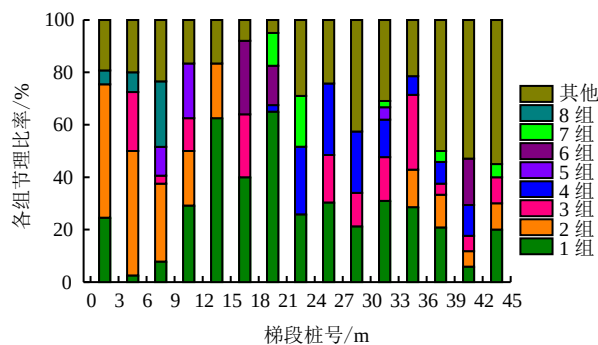


图 5 第 10 梯段坝基岩体节理分组分布
Fig.5 Joint grouping distribution of No.10 bench dam foundation rock mass

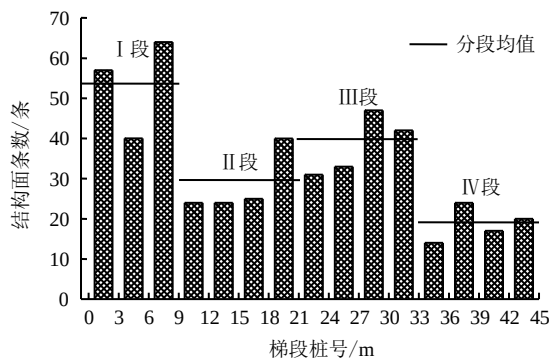


图 6 第 10 梯段坝基岩体节理密度分布
Fig.6 Joint density distribution of No.10 bench dam foundation rock mass

表 2 第 10 梯段坝基岩体统计均质区分段及参数
Table 2 Statistical homogeneous subsections and parameters of No.10 bench dam foundation rock mass

段号	起点 /m	终点 /m	长度 /m	节理数量 /条	平均密度 /(条/m)
I	0.0	9.0	9.0	161	17.9
II	9.0	21.0	12.0	113	9.4
III	21.0	33.0	12.0	153	12.8
IV	33.0	45.0	12.0	75	6.3

3 节理参数概率模型

以坝基岩体统计均质区分段为基础,对各分段的节理参数分别开展统计研究,获取各分段节理参数的概率模型。以第 I 段为例进行详细说明,根据

第 I 段节理统计样本的地质成因和节理极点等密度图, 将节理分为 3 组优势组, 分组参数见表 3。

表 3 第 I 段节理分组参数
Table 3 Joint grouping parameters of No.I subsection

组别	数量 /条	倾向范围 /(°)	倾角范围 /(°)	优势倾向 /(°)	优势倾角 /(°)
1	75	26~92	76~87	50	80
2	22	132~136	44~52	134	50
3	20	134~166	18~36	150	27

3.1 节理产状概率模型

采用测窗法进行节理统计时, 节理与测窗的产状关系决定了节理被统计的概率, 即统计过程中存在取样偏差^[20]。因此, 需要进行取样偏差修正, Kulatilake 等^[21]采用权系数的方法对节理的取样偏差进行修正, 根据节理倾向与测窗走向的组合关系, 权系数的计算公式为

$$W(\theta, \beta, D, h, w) = [(\cos^2 \theta \sin^2 \beta + \cos^2 \beta)^{1/2} + \frac{\pi D}{4 h} \cos \beta \sin \theta + \frac{\pi D}{4 w} \cos \theta]^{-1} \quad (1)$$

$$W(\theta, \beta, D, h, w) = [(\cos^2 \theta \cos^2 \beta + \sin^2 \beta)^{1/2} + \frac{\pi D}{4 h} \sin \beta \sin \theta + \frac{\pi D}{4 w} \cos \theta]^{-1} \quad (2)$$

式中: W 为权系数; θ 为节理的倾角; β 为节理与测窗的组合系数, 由节理倾向 α 与测窗走向 γ 决定; D 为节理直径; h 为测窗高度; w 为测窗长度。

第 I 段第 1 组节理的倾向统计分布如图 7 所示。根据图中取样偏差修正后倾向的统计分布直方图, 初步判断倾向可能服从正态分布或对数正态分布。首先, 根据取样偏差修正后的倾向数据, 采用概率图法对 2 种假设分布进行检验, 作 2 种假设分布的概率分布检验 P-P 图, 如图 8 所示。

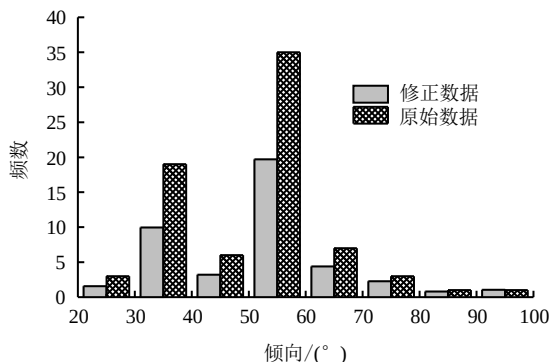
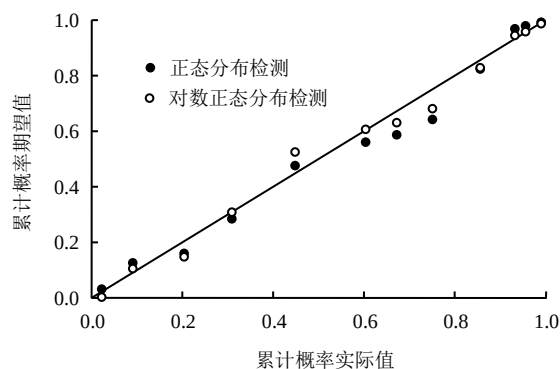
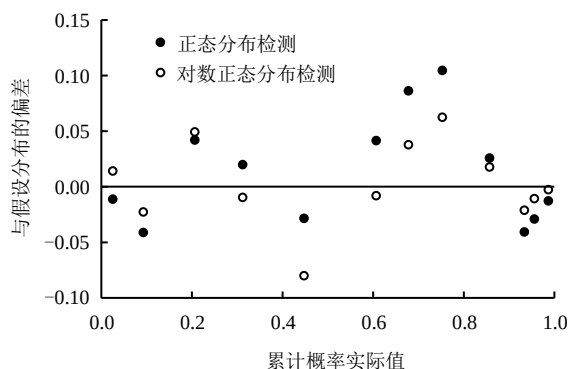


图 7 第 I 段第 1 组节理倾向统计分布
Fig.7 Statistical distribution of the 1st group joints' tendency in No.I subsection



(a) 倾向正态分布及对数正态分布检验 P-P 图



(b) 倾向趋势正态分布及趋势对数正态分布检验 P-P 图

图 8 第 I 段第 1 组节理倾向概率分布检验 P-P 图

Fig.8 P-P figures of normal and lognormal probability test for 1st group joints' tendency in No.I subsection

从图 8(a)和 8(b)中可看出, 对修正后的倾向数据, 2 种假设分布的拟合程度基本相近。因此, 需根据精确检验方法确定修正后倾向数据的最优概率分布, 采用非参数检验方法中的单样本 K-S 拟合优度检验对上述 2 种假设分布进行精确检验。对于修正后的倾向数据, 其正态分布的双侧渐进显著性 $P=0.17>0.05$, 故接受该概率分布假设; 其对数正态分布的双侧渐进显著性 $P=0.07>0.05$, 故也接受该概率分布假设。但正态分布的双侧渐进显著性大于对数正态分布的双侧渐进显著性, 故第 I 段第 1 组节理倾向的最优概率分布为正态分布, 其均值为 51.568° , 标准差为 13.957° 。

根据上述方法分别对第 I 段各组节理的倾向和倾角进行分析, 采用双侧渐进显著性最大的概率分布作为最优概率分布, 由此确定各组节理倾向和倾角的概率模型及其参数, 见表 4。

3.2 节理直径概率模型

Robertson^[22]提出的圆盘模型在理论研究和工程应用中得到广泛认可, 故采用该圆盘模型表达节理形态。

表 4 第 I 段坝基岩体节理各几何要素概率模型参数

Table 4 Joint geometric element probability model parameters of No.I dam foundation subsection

分组	倾向			倾角			直径			线密度	体密度	校正体密度
	分布形式	期望值/(°)	标准差	分布形式	期望值/(°)	标准差	分布形式	期望值/m	校正期望值/m	/(条/m)	/(条/m ³)	/(条/m ³)
1 组	正态	51.568	13.957	正态	80.523	4.146	负指数	1.171	0.644	5.489	2.547	7.641
2 组	对数正态	4.900	0.013	对数正态	3.909	0.058	负指数	5.526	2.763	9.027	0.188	1.034
3 组	正态	148.588	11.457	对数正态	3.275	0.198	负指数	1.388	0.694	4.039	1.335	4.005

注：对数正态分布期望和标准差分别为自然对数的期望和标准差。

Kulatilake 等^[23]给出了测窗法节理迹长的偏差修正方法，根据节理端点与测窗边线的关系，将节理分为包含、交接、切割 3 种关系，通过统计各类节理的数目及概率分布，应用点估计法计算平均迹长 $\bar{l}$ ：

$$\bar{l} = \frac{wh(1+R_0-R_2)}{(1-R_0+R_2)(wB+hA)} \quad (3)$$

其中：

$$A = \int_{\alpha_l}^{\alpha_u} \int_{\theta_l}^{\theta_u} \cos \theta_A f(\theta, \alpha) d\theta d\alpha \quad (4)$$

$$B = \int_{\alpha_l}^{\alpha_u} \int_{\theta_l}^{\theta_u} \sin \theta_A f(\theta, \alpha) d\theta d\alpha \quad (5)$$

式中： R_0 为切割类型的节理在测窗中出露的比率； R_2 为包容类型的节理在测窗中出露的比率； θ_A 为节理与测窗的交角； α_u 和 α_l 分别为该组节理倾向的上限值和下限值； θ_u 和 θ_l 分别为节理倾角的上限值和下限值。

Kendall^[24]、黄磊^[25]等推导了圆盘模型节理迹长的概率密度函数：

$$f(l) = \frac{l}{D\sqrt{D^2-l^2}} \quad (6)$$

式中： l 为节理迹长。

对式 (6) 进行如下积分，即可求得节理平均迹长 $\bar{l}$ 与直径 D 之间的关系：

$$\bar{l} = \int_0^D l f(l) dl = \int_0^D \frac{l^2}{D\sqrt{D^2-l^2}} dl = \frac{\pi}{4} D \quad (7)$$

假设节理直径 D 服从 $f_D(D)$ 分布，由式 (7) 可得

$$f_D(D) = \frac{\pi}{4} f\left(\frac{\pi}{4} D\right) \quad (8)$$

一般研究认为，岩体节理的迹长服从负指数分布^[26]，迹长服从负指数分布的密度函数为

$$f(l) = \mu e^{-\mu l} \quad (9)$$

式中： μ 为节理迹线中心点密度， $\mu = 1/\bar{l}$ 。

将式 (9) 代入式 (8)，即可求得节理直径 D 的分布函数：

$$f_D(D) = \frac{\pi}{4} \mu e^{-\frac{\pi}{4} \mu D} \quad (10)$$

故节理平均直径 $\bar{D}$ (期望) 的表达式：

$$\bar{D} = \int_0^\infty D f_D(D) dD = \int_0^\infty D \frac{\pi}{4} \mu e^{-\frac{\pi}{4} \mu D} dD = \frac{4\bar{l}}{\pi} \quad (11)$$

采用上述方法分析第 I 段各组节理的迹长数据，确定各组节理直径的概率模型及参数，见表 4。

3.3 节理体密度推算

节理体密度可由节理线密度推算确定。首先以正南方向为 X 轴正方向，正东方向为 Y 轴正方向，建立右手螺旋空间直角坐标系，则节理法线的方向向量 $\{k, m, p\}$ 为

$$\left. \begin{aligned} k &= \cos(180^\circ - \alpha) \sin \theta = -\cos \alpha \sin \theta \\ m &= \sin(180^\circ - \alpha) \sin \theta = \sin \alpha \sin \theta \\ p &= \cos \theta \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

将测窗的横向中线作为测线，则该测线的方向向量 $\{k', m', p'\}$ 为

$$\left. \begin{aligned} k' &= \cos(180^\circ - \xi) \sin(90^\circ - \varsigma) = -\cos \xi \cos \varsigma \\ m' &= \sin(180^\circ - \xi) \sin(90^\circ - \varsigma) = \sin \xi \cos \varsigma \\ p' &= \cos(90^\circ - \varsigma) = \sin \varsigma \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中： ξ 为测线的倾伏向； ς 为测线的倾伏角。

由式 (12) 和式 (13) 可得节理法线与测线夹角 φ 的余弦为

$$\cos \varphi = kk' + mm' + pp' \quad (14)$$

故该组节理的线密度 λ_d 为

$$\lambda_d = \frac{j_n}{L_0 |\cos \varphi|} \quad (15)$$

式中： j_n 为该组节理的数量； L_0 为测线长度， $L_0 = w$ 。

由于测线长度 L_0 有限, 必然有部分间距 d 大于 L_0 的节理无法测得, 从而导致估算间距偏小。因此, 需要进行截尾校正, Sen 等^[27]给出小于测线长度 L_0 的节理间距 d 的分布形式为

$$i(d) = \frac{\lambda'_d e^{-\lambda'_d d}}{1 - e^{-\lambda'_d L_0}} \quad (0 < d < L_0) \quad (16)$$

其均值 $\bar{d}$ 为

$$\bar{d} = \frac{1}{\lambda'_d} \left(1 - \frac{\lambda'_d L_0}{e^{\lambda'_d L_0} - 1} \right) \quad (17)$$

将测线长度 L_0 和实测的节理间距 d 代入式 (17) 中即可反算出截尾校正后的节理线密度 λ'_d 。

根据圆盘模型的假设, λ'_d 和节理体密度 λ_v 之间存在如下关系:

$$\lambda'_d = \frac{\pi \lambda_v}{2} \int_0^\infty R \int_R^\infty f_D(D) dD dR \quad (18)$$

将式 (10) 代入式 (18), 可得节理体密度 λ_v 的表达式:

$$\lambda_v = \frac{2\lambda'_d}{\pi D^2} = \frac{\pi \lambda'_d}{8l^2} \quad (19)$$

采用上述方法计算第 I 段各组节理的线密度和体密度, 计算结果见表 4。

4 基于三维节理网络的块度指标

4.1 三维节理网络模型

上述分析确定了第 I 段各组节理的产状、直径和体密度等几何要素的概率模型和参数, 以此为基础, 采用动态校核法^[19]对节理直径和节理密度的参数进行动态校核, 获得直径的校正期望和校正体密度, 见表 4。

根据第 I 段各组节理各几何要素的概率模型和校正参数, 采用 Monte-Carlo 法开展随机模拟, 数据产生区尺寸为 5 m×5 m×5 m, 共计生成节理 1 585 条, 在数据产生区内切割形成数据应用区, 尺寸为 3 m×3 m×3 m, 调整数据应用区的方位使其一面与坝基面走向一致, 最终采用三维可视化技术生成第 I 段三维节理网络模型, 见图 9。

如图 9 所示的三维节理网络模型, 严格根据第 I 段坝基岩体各组节理的统计规律生成, 因此该三维节理网络模型与第 I 段坝基岩体的实际节理分布具有相同的统计特征。

4.2 三维等效岩体块度指数 RBI_{3D}

以三维节理网络模型为基础, 开展坝基岩体结构分类研究。胡卸文等^[14]提出了岩体块度指数 RBI , 并在大型水电工程中得到了成功运用。 RBI 的定义为: 在平硐或钻孔中将实测岩芯长度按 3~

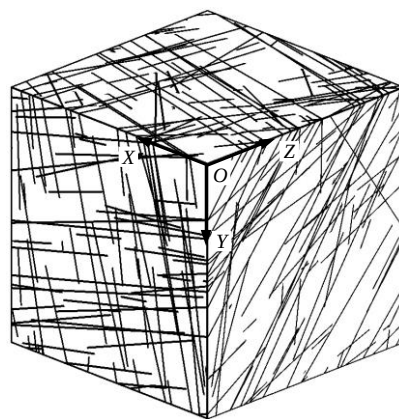


图9 第 I 段三维节理网络模型
Fig.9 3D joint network simulation model
of No.I subsection

10、10~30、30~50、50~100 cm 和大于 100 cm 的岩芯获得率作为权值, 与各自相应系数乘积的累计值, RBI 的计算公式为

$$RBI = 3C_{r3} + 10C_{r10} + 30C_{r30} + 50C_{r50} + 100C_{r100} \quad (20)$$

式中: C_{r3} 、 C_{r10} 、 C_{r30} 、 C_{r50} 和 C_{r100} 分别为岩芯长度 3~10、10~30、30~50、50~100 cm 和大于 100 cm 的岩芯获得率。

如图 9 所示, 将模型中与坝基开挖面平行的 XOY 面定义为模型正面, 与坝基开挖面竖向垂直的 YOZ 面定义为模型侧面, 与 XOY 面和 YOZ 面均垂直的 XOZ 面定义为模型顶面。选取模型正面、模型侧面和模型顶面这 3 个正交平面开展岩体结构特性研究, 3 个正交平面的节理分布情况如图 10 所示。在 3 个正交平面上布置模拟测线代表钻孔, 根据模拟测线与节理的交切情况, 采用式 (20) 计算该测线的 RBI 值。如图 11 所示, 在每个正交平面上, 分别沿形心以 10°为间隔等角度布置模拟测线, 每个正交平面布置 18 条模拟测线, 3 个正交平面共计布置 54 条 (图 11 中 Z01~Z54) 模拟测线。

根据每个正交平面 18 条模拟测线对应的 RBI 值绘制 RBI 玫瑰花图, 3 个正交平面的 RBI 玫瑰花图如图 12 所示。从图中可看出, 第 I 段坝基岩体的节理分布具有明显的各项异性, 不仅各正交平面上的 RBI 值分布各不相同, 每个正交平面上不同方向的 RBI 值也各有差异。图 12(a)表明, 模型正面的 RBI 值分布在 12.02~23.47 之间, 均值为 17.36, 标准差为 3.29, 总体分布均匀, 最小值在 40°方位, 最大值在 160°方位; 图 12(b)表明, 模型侧面的 RBI 值分布在 11.37~53.29 之间, 均值为 22.35, 标准差为 11.37, 各向异性明显, 较小值集中分布在 60°~80°之间, 较大值集中分布在 120°~150°之间;

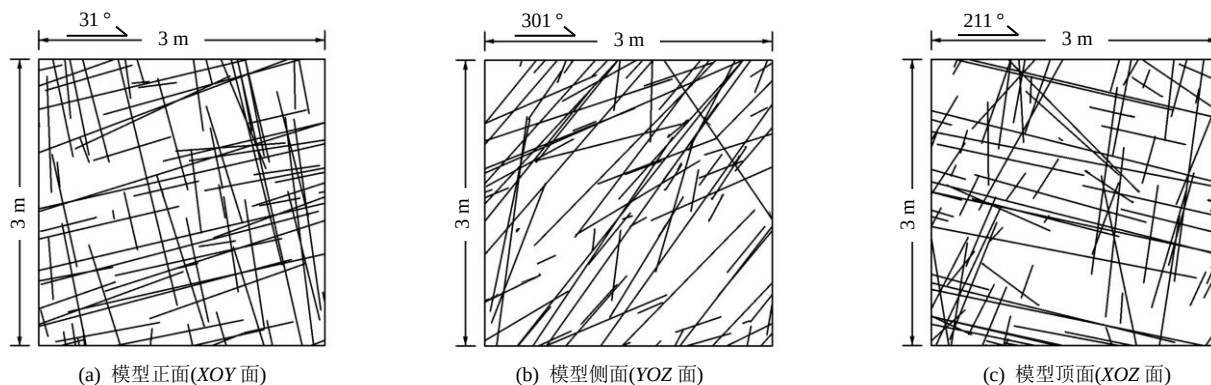


图 10 三维网络模型的 3 个正交平面

Fig.10 Three orthogonal planes of 3D joint network simulation model

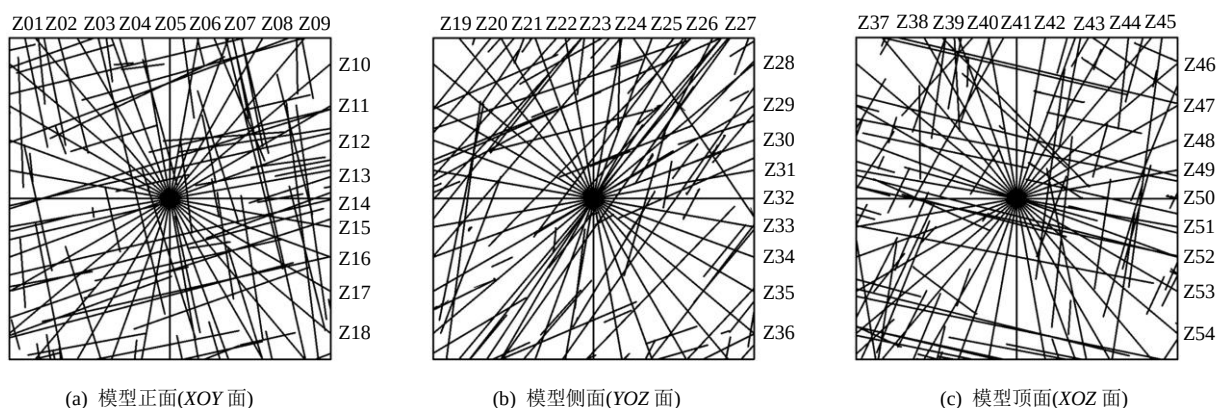


图 11 3 个正交平面的测线布置

Fig.11 Arrangements of measuring-lines for three orthogonal planes

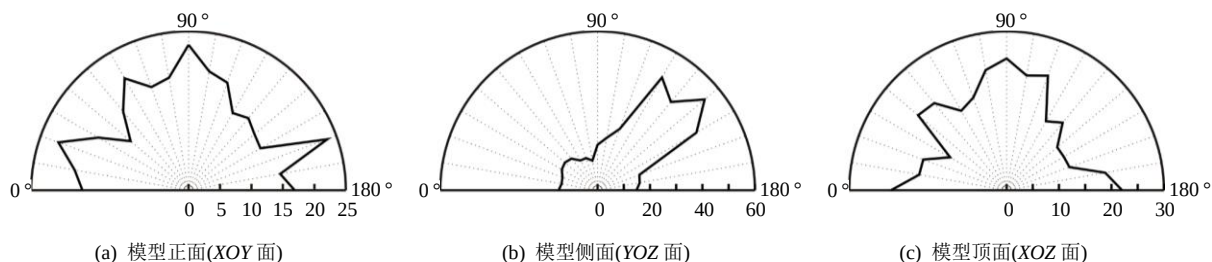


图 12 3 个正交平面的 RBI 玫瑰花图

Fig.12 RBI Rose diagrams for three orthogonal planes

图 12(c)表明,模型顶面的 RBI 值分布在 12.43~24.85 间,均值为 18.40,标准差为 4.09,总体分布相对均匀,最小值在 30° 方位,最大值在 90° 方位。

上述分析给出 3 个正交平面任意方向的 RBI 值,可精确分析该段坝基岩体的结构特性,但无法给出一个定量指标用以确定该段坝基岩体整体的结构类型。基于此,提出三维等效岩体块度指数 RBI_{3D} 的概念,其定义为:三维节理网络模型 3 个正交平面上共计 54 个 RBI 值的算术平均值。

采用 RBI_{3D} 作为确定坝基岩体结构类型的定量指标,根据 RBI_{3D} 的定义,计算得第 I 段坝基岩体

的 RBI_{3D} 值为 19.37。

4.3 有效性验证

沿第 I 段坝基岩体水平方向布置 1 条测线,实测该段坝基岩体的 RBI 值为 16.22,三维节理网络模型中模型正面水平方向对应的模拟测线为 Z14,该模拟测线的 RBI 值为 16.87,与实测值的绝对误差为 0.65,相对误差为 4.0%,误差在可接受范围内。由此说明,建立在统计学和概率论基础上的三维节理网络模型可准确地反映实际岩体的结构特性。

第 I 段坝基岩体的 RBI_{3D} 值为 19.37,与单测线实测 RBI 值的绝对误差为 3.15,相对误差为 19.4%。

RBI_{3D} 值与单测线实测 RBI 值相差较大, 说明由于岩体节理分布的各项异性, 仅采用坝基面上单方向的测量结果无法反映坝基岩体的真实结构特性。而 RBI_{3D} 综合了 3 个正交平面上 54 条不同方向模拟测线的 RBI 值, 充分考虑了节理分布各向异性对岩体结构的影响。因此, 采用 RBI_{3D} 作为定量评价指标用以确定坝基岩体的结构类型是合理且可行的。

4.4 岩体结构分类

张世殊^[15]以金沙江溪洛渡水电站坝基岩体为研究对象, 建立基于 RBI 的岩体结构分类标准, 见表 5。金沙江溪洛渡水电站与白鹤滩水电站均处于川滇峨眉山玄武岩东岩区, 坝基岩体的岩性及结构基本类似, 因此该分类标准具有较好的适用性。

表 5 岩体结构类型与块度指数 RBI 关系
Table 5 Relationship between rock mass structure and rock mass block index (RBI)

岩体结构类型	RBI	完整性	岩体结构类型	RBI	完整性
整体块状	40~100	完整	镶嵌碎裂	5~10	较破碎
块状	20~40	较完整	碎裂	1~5	破碎
次块状	10~20	中等			

采用本文基于三维节理网络模拟的 RBI_{3D} 计算方法, 对第 II 段、第 III 段和第 IV 段坝基岩体分别开展研究, 模拟获得各分段坝基的三维节理网络模型, 以三维节理网络模型为基础, 计算确定各分段坝基的 RBI_{3D} 值。采用 RBI_{3D} 值作为确定坝基岩体结构类型的定量评价指标, 结合表 5 所示的岩体结构分类标准, 确定第 10 梯段坝基各统计均质区分段的岩体结构类型, 计算结果及岩体结构分类结果见表 6。

表 6 各分段坝基岩体 RBI 值及岩体结构分类结果
Table 6 RBI calculation results and rock mass structure classification of each dam foundation subsection

分段	RBI 均值			RBI_{3D}	岩体结构类型
	模型正面	模型侧面	模型顶面		
I	17.36	22.35	18.40	19.37	次块状
II	37.90	34.26	61.08	44.41	整体块状
III	27.52	32.94	28.04	29.50	块状
IV	55.53	36.09	45.86	45.83	整体块状

如表 6 所示, 白鹤滩水电站左岸第 10 梯段坝基岩体的完整性总体良好, 岩体结构类型为整体块状至次块状, 对应的完整性为完整至中等。其中第 I 段坝基岩体的 RBI_{3D} 值为 19.37, 相对最低, 对应的岩体结构类型为次块状; 第 II 段和第 IV 段坝基岩体的 RBI_{3D} 值分别为 44.41 和 45.83, 相对较高, 对

应岩体结构类型均为整体块状; 第 III 段坝基岩体的 RBI_{3D} 值为 29.50, 相对稍低, 对应的岩体结构类型为块状。综合各分段长度, 计算得白鹤滩水电站左岸第 10 梯段坝基岩体整体块状占 53.3%, 块状占 26.7%, 次块状占 20.0%。

5 讨 论

建立在统计学和概率论基础上的三维节理网络模拟技术, 以节理各几何要素的统计规律为基础, 实现岩体结构的可视化再现, 在此基础上开展坝基岩体的结构特性研究, 克服了传统方法的诸多局限。例如, 传统的坝基岩体 RBI 计算, 一般在平硌或钻孔中沿单方向进行测量统计。而岩体节理的分布往往具有明显的各向异性, 采用单一方向的测量结果来评价岩体的整体结构特性, 有失准确。

需要指出的是, 三维节理网络模拟是一种概率模拟, 而非实体模拟, 仅在统计层面与实际岩体等效。三维节理网络模拟的核心基础是节理各几何要素的概率模型和参数, 对节理的原始统计数据进行合适的误差修正和动态校核, 可有效提高三维节理网络模型的精度, 使其能够准确地反映实际岩体的结构特性。

6 结 论

(1) 选择金沙江白鹤滩水电站左岸第 10 梯段坝基岩体为研究对象, 根据节理的分组分布和密度分布特征进行坝基岩体统计均质区分段。以此为基础, 对各分段的节理参数开展统计研究, 并通过一系列的误差校正和动态校核, 获取各分段节理参数的最优概率模型。

(2) 根据节理参数的最优概率模型, 采用 Monte-Carlo 法模拟建立各分段坝基岩体的三维节理网络模型, 模型与实际坝基岩体的节理分布具有相同的统计特征。在此基础上引入 RBI 的概念, 测量统计三维节理网络模型 3 个正交平面上不同方向的 RBI 值, 绘制 RBI 玫瑰花图, 直观地展示了坝基岩体的结构特性及其空间各向异性。

(3) 第 I 段坝基岩体的实测 RBI 值为 16.22, 三维节理网络模型对应方向的 RBI 值为 16.87, 两者绝对误差为 0.65, 相对误差仅 4.0%, 表明建立在统计学和概率论基础上的三维节理网络模型可准确地反映实际岩体的结构特性。本文提出的 RBI_{3D} 综合三维节理网络模型 3 个正交平面上 54 条不同方向模拟测线的 RBI 值, 充分考虑了节理分布的各向异性对岩体结构的影响, 因此采用 RBI_{3D} 作为确定坝

基岩体结构类型的定量指标是合理且可行的。

(4) 基于三维节理网络模拟的坝基岩体结构分类结果表明: 白鹤滩水电站左岸第 10 梯段坝基岩体的完整性总体良好, 岩体结构类型为整体块状至次块状, 对应的完整性为完整至中等, 其中坝基岩体整体块状占 53.3%, 块状占 26.7%, 次块状占 20.0%, 分类结果与实际地质情况相符。

参考文献

- [1] 孙广忠. 地质工程理论与实践[M]. 北京: 地震出版社, 1996.
SUN Guang-zhong. Theory and practice of geological engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 1996.
- [2] 韩爱果, 聂德新, 孙冠平, 等. 岩体结构研究中结构面间距取值方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2575—2577.
HAN Ai-guo, NIE De-xin, SUN Guan-ping, et al. Determination of spacing of structural plane in rockmass structure research[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.2): 2575—2577.
- [3] 刘树新, 张飞. 三维岩体质量的多重分形评价及分类[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1116—1121.
LIU Shu-xin, ZHANG Fei. Multifractal evaluation and classification of 3D jointed rock mass quality[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(7): 1116—1121.
- [4] 柳赋铮. 岩体基本质量和工程岩体分级[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(增刊 1): 55—63.
LIU Fu-zheng. Basic quality and engineering classification of rock mass[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 1991, 8(Supp.1): 55—63.
- [5] 张奇华, 边智华, 余美万. 采用全空间块体搜索技术初步研究岩体完整性[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 507—515.
ZHANG Qi-hua, BIAN Zhi-hua, YU Mei-wan. Preliminary research on rockmass integrity using spatial block identification technique[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(3): 507—515.
- [6] 徐伟, 胡新丽, 黄磊, 等. 结构面三维网络模拟计算 RQD 及精度对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 822—833.
XU Wei, HU Xin-li, HUANG Lei, et al. Research on RQD of rock mass calculated by three-dimensional discontinuity network simulation method and its accuracy comparison[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(4): 822—833.
- [7] 张文, 陈剑平, 牛岑岑, 等. 基于三维裂隙网络 RQD 的确定及最佳测线数量的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(2): 321—327.
ZHANG Wen, CHEN Jian-ping, NIU Cen-cen, et al. Determination of RQD and number of optimum scanlines based on three-dimensional fracture network[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(2): 321—327.
- [8] ZHANG W, CHEN J P, WANG Q, et al. Investigation of RQD variation with scanline length and optimal threshold based on three-dimensional fracture network modeling[J]. **Science China(Technological Sciences)**, 2013, 56(3): 739—748.
- [9] 汪斌, 唐辉明, 简文星, 等. 结构面三维网络模拟在岩体质量评价中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 594—596.
WANG Bin, TANG Hui-ming, JIAN Wen-xing, et al. Application of 3D network modeling rock mass discontinuities to evaluating rock mass quality for dam foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 594—596.
- [10] PALMSTROM A. The volumetric joint count—a useful and simple measure of the degree of rock mass jointing[C]//Proceedings of the 4th International Congress of International Association of Engineering Geology. New Delhi: [s. n.], 1982: 221—228.
- [11] 张文, 陈剑平, 苑晓青, 等. 基于三维裂隙网络的 RQD 尺寸效应与空间效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 31(7): 1437—1445.
ZHANG Wen, CHEN Jian-ping, YUAN Xiao-qing, et al. Study of size effect and spatial effect of RQD for rock masses based on three-dimensional fracture network[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 31(7): 1437—1445.
- [12] KRUEHL J H. Fractal-geometry techniques in the quantification of complex rock structures: a special view on scaling regimes, inhomogeneity and anisotropy[J]. **Journal of Structural Geology**, 2013, 46: 2—21.
- [13] YASREBI A B, WETHERELT A, FOSTER P, et al. Application of a density-volume fractal model for rock characterization of the Kahang porphyry deposit[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2014, 66: 188—193.

- [14] 胡卸文, 钟沛林, 任志刚. 岩体块度指数及其工程意义[J]. 水利学报, 2002, (3): 80—83.
HU Xie-wen, ZHONG Pei-lin, REN Zhi-gang. Rock mass block index and its engineering practice significance[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, (3): 80—83.
- [15] 张世殊. 坝基岩体块度特征研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 353—356.
ZHANG Shi-shu. The characteristics of rock mass block at dam foundation[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2001, 9(4): 353—356.
- [16] 黄润秋, 霍俊杰. 锦屏 I 级水电站坝基岩体块度指数量化取值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 449—453.
HUANG Run-qiu, HUO Jun-jie. Quantitative analysis of rock mass block index for dam foundation of Jinping I hydropower station[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(3): 449—453.
- [17] 阮云凯, 陈剑平, 李严严, 等. 基于裂隙产状和迹长划分岩体统计均质区研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2028—2032.
RUAN Yun-kai, CHEN Jian-ping, LI Yan-yan, et al. Identification of homogeneous structural domains of jointed rock masses based on joint occurrence and trace length[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 2028—2032.
- [18] 贾洪彪, 唐辉明, 刘佑荣, 等. 岩体结构面三维网络模拟理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
JIA Hong-biao, TANG Hui-ming, LIU You-rong, et al. Theory and engineering application of 3D modeling of rock discontinuity network[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [19] 陈剑平, 王清, 肖树芳, 等. 岩体结构统计均质区的划分[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(1): 19—24.
CHEN Jian-ping, WANG Qing, XIAO Shu-fang, et al. Evaluation of statistical homogeneity of rock mass structure[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1996, 7(1): 19—24.
- [20] FOUCHE O, DIEBOLT J. Describing the geometry of 3D fracture systems by correcting for linear sampling bias[J]. **Mathematical Geology**, 2004, 36(1): 33—63.
- [21] KULATILAKE P H S W, WU T H. Sampling bias on orientation of discontinuities[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1984, 17(4): 243—253.
- [22] ROBERTSON A M. The interpretation of geological factors for use in slope theory[C]//Symposium on Planning Open Pit Mines. [S. l.]: CRC Press, 1970: 55—71.
- [23] KULATILAKE P H S W, WU T H. Estimation of mean trace length of discontinuities[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1984, 17(4): 215—232.
- [24] KENDALL M G, MORAN P A P. Geometrical probability[M]. New York: Hafner Publishing Company, 1963: 92.
- [25] 黄磊, 唐辉明, 张龙, 等. 适用于半迹长测线法的岩体结构面迹长与直径关系新模型及新算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 733—745.
HUANG Lei, TANG Hui-ming, ZHANG Long, et al. New model of relation between rock discontinuities trace length and diameter for semi-trace scanline sampling and new algorithm[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(4): 733—745.
- [26] 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993.
WU Fa-quan. Theory of statistical rock mass mechanics[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993.
- [27] SEN Z, KAZI A. Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1984, 21(4): 203—212.