

# 基于三维激光扫描的高陡边坡块体稳定性研究

高剑锋<sup>1,2</sup>, 白明洲<sup>1</sup>, 穆树怀<sup>2</sup>, 杜衍庆<sup>1</sup>, 易迪青<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;  
2. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊 430071)

**摘要:** 艰险山区工程建设中高陡边坡块体稳定性是安全与防灾的重要问题, 对艰险山区高陡边坡岩体结构面的调查是分析该问题的关键。以澜沧江某重大工程高边坡为研究对象, 应用三维激光扫描技术, 研究了远距离调查分析岩体结构的分析方法, 分析了该高陡边坡的岩体结构面空间分布状况, 统计分析了结构面的优势方向和岩石块体的分布状况, 以此为基础, 应用极限平衡分析方法, 研究了该高陡边坡的岩石块体稳定性。

**关键词:** 高陡边坡; 岩体结构; 三维激光扫描; 块体稳定性

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1674-4764(2012)S2-0077-05

## Study on high and steep slope stability Based on 3D laser scanning

GAO Jianfeng<sup>1,2</sup>, BAI Mingzhou<sup>1</sup>, MU Shuhuai<sup>2</sup>, DU Yanqing<sup>1</sup>, YI Diqing<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong, Beijing 100044, China;  
2. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, Hebei, China)

**Abstract:** Dangerous mountain construction projects block of high and steep slope stability is the important issue of security and disaster prevention, investigation on the surface of the dangerous mountain high and steep slope rock mass structure is the key to the analysis of the problem. The high slope of a major project of the Lancang River, the application of 3D laser scanning technique to study the long-distance survey analysis of rock mass structure analysis method to analyze the distribution of the surface space of the high and steep slope rock mass structure, statistical analysis direction of the advantages of the structure surface and the distribution of rock blocks, as the basis for the application of limit equilibrium analysis method to study the stability of rock blocks of the high and steep slope.

**Key words:** high and steep slope; rock structure; 3D laser scanning; the stability of the block

高陡岩石边坡稳定性研究中, 岩石块体稳定性是一个重要研究方向<sup>[1]</sup>, 大量的岩石高边坡案例表明, 高边坡岩石块体稳定性是重大工程的安全与防灾的关键问题。在高边坡潜在不稳定块体的确定中, 岩体结构面的空间分布是决定性因素<sup>[2]</sup>, 在艰险山区的高陡边坡工程中, 由于现场地形地貌条件的限制, 使得对于岩体结构面的测量成为非常困难的工作, 在地形险峻的条件下, 很多边坡往往无法直接在现场测量结构面的分布状况。

三维激光扫描是新兴的远程测量技术, 其工作过程, 实际上是不重复的数据采集和处理的过程。三维激光扫描技术可以广泛应用于工程建设中与物体三维测量相关的众多领域, 包括水利工程施工测量中可替代传统摄影测量方式进行大坝全区测图<sup>[3-6]</sup>; 大坝、地下厂房等大型建筑物测量维护与仿真、位移监控和外观结构三维建模, 设计与维护分析<sup>[7-8]</sup>; 水利工程开挖容积测量与应用; 高边坡变形监测与快速辅助地质编录, 稳定性分析计算的地形数据获取<sup>[9-16]</sup>; 隧道收方, 变形监测及其他数据源的复合<sup>[17-18]</sup>等。

三维激光扫描技术是目前国内外测绘领域的研究前

沿<sup>[8]</sup>, 将这一先进技术及时应用到高边坡块体稳定性研究中, 对工程建设具有很强的现实意义。本文在对三维扫描仪原理进行简单介绍的基础上, 结合工程实例, 阐述了应用该项技术解决高陡边坡调查中关于裂隙数据的提取、结构面以及潜在不稳定块体稳定性分析的原理与方法, 最终得出高陡边坡的稳定状态。由此可以看出, 该项技术在地质和岩土工程领域具有广泛的应用前景和很高的应用价值。

## 1 岩体结构三维激光扫描

### 1.1 激光扫描原理

激光扫描仪所采用的工作方式是脉冲激光测距的方法(基于激光时间漂移原理), 采用无接触式高速激光测量, 以点云形式获取扫描物体表面阵列式几何图形的三维数据。本文选用加拿大 Optech 公司的三维激光扫描仪(图 1)研究高陡边坡块体稳定性, 该仪器主要包括激光测距系统、扫描系统和支架系统, 同时集成数字摄影和仪器内部校正等系统。Optech 激光扫描仪主要采用 TOF(Time of Flight)脉冲测距法, 是一种高速激光测时、测距技术。该扫描仪获取扫

描目标点云坐标原理:根据内部精密的测量系统获取发射出去的激光光束的水平方向角度和垂直方向角度,以及由脉冲激光发射到反射被接收的时间计算得到扫描点到仪器的距离值 S,根据图 1 中公式可计算扫描目标点 P 坐标。

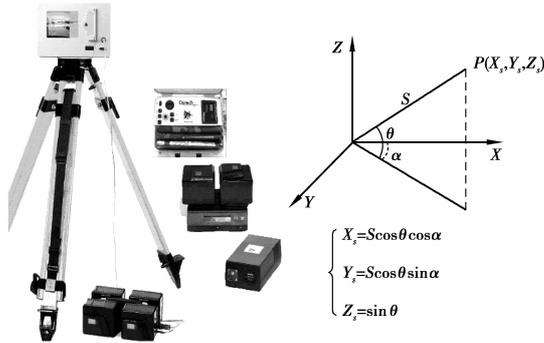


图 1 Optech 三维激光扫描仪及测量原理

1.2 澜沧江高边坡的激光扫描

三维激光扫描的对象为某管道工程跨越的澜沧江岸坡(图 2),场区上覆地层为第四系残坡积岩含碎石粉质粘土,下伏基岩为白云质灰岩(图 3)。由于工作场地属高山河谷地貌,地形陡峻,可架设仪器位置点不多,在尽可能获取扫描角度前提下,对此岸坡进行三维影像获取,坡面采样间距控制在 10 cm 内。为保证坐标转换精度,现场共设置坐标控制点 6 处。扫描面积 192 705 m<sup>2</sup>,获取边坡三维点云数据 8 574 527 个,如图 4 所示。

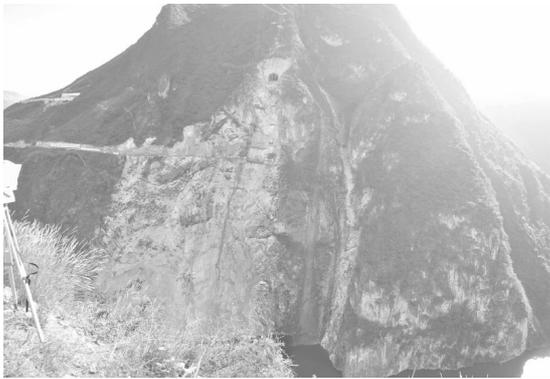


图 2 澜沧江高陡边坡

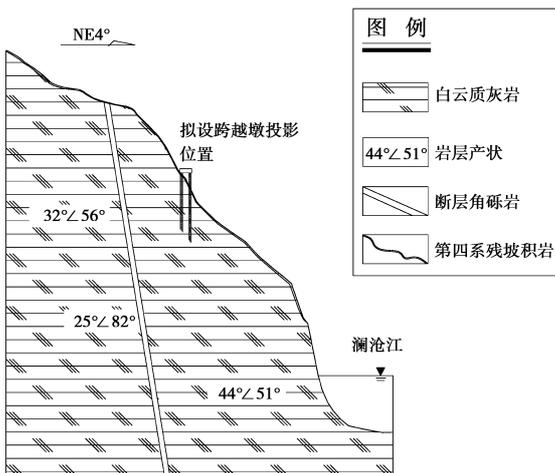


图 3 澜沧江岸坡地质剖面示意图

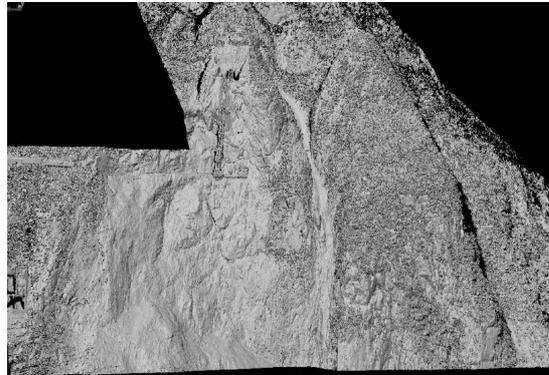


图 4 三维点云数据图

1.3 裂隙数据的提取

为使扫描数据与现场控制坐标相一致,本次扫描工作通过 6 个坐标控制点,对点云数据进行了坐标转换,坐标点转换精度分析结果见表 1,由表 1 可以看出,6 个控制点坐标统计分析 X、Y、Z 三个坐标值误差最大量为 0.319 m,经 6 个坐标点综合控制校正点云图像后,坐标转换精度为 0.1 m,可满足岩体结构调查要求。

表 1 控制坐标转换精度

点号	X	Y	Z	
1	535 132.946	2 798 043.371	1 353.618	
2	535 179.319	2 798 068.673	1 352.780	
大地坐标	3	535 179.629	2 798 072.749	1 352.325
控制点	4	535 195.518	2 798 071.168	1 352.509
5	535 230.808	2 798 073.361	1 354.662	
6	535 234.119	2 798 151.867	1 248.932	
1	535 132.733	2 798 043.399	1 353.640	
2	535 179.457	2 798 068.926	1 352.728	
扫描特	3	535 179.727	2 798 072.430	1 352.384
征点	4	535 195.688	2 798 071.208	1 352.460
5	535 230.720	2 798 073.306	1 354.595	
6	535 234.060	2 798 151.854	1 249.042	

室内采用该设备配套的软件 PolyWorks 对获取的点云数据进行后期处理,通过点云数据所包含的岩体结构面信息进行解译,获取边坡岩体结构相关地质信息。地质结构面解译图像如图 5 所示。

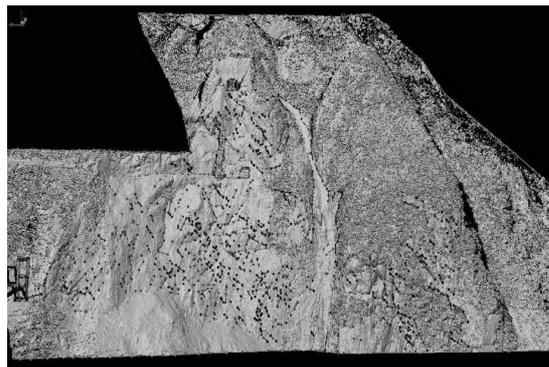


图 5 澜沧江高边坡点云数据解译图

根据点云数据结构面解译成果,对结构面进行分组、整理,并获取典型结构面产状,整理为边坡岩体结构面立面图

(素描图),见图 6。同时采用该软件切割面的功能对跨越轴线剖面地形线进行了校核,根据已知的全球坐标点,精确地将三维裂隙网络投放到了跨越区工程地质平面图上,这对研究岩体稳定具有重要的作用。

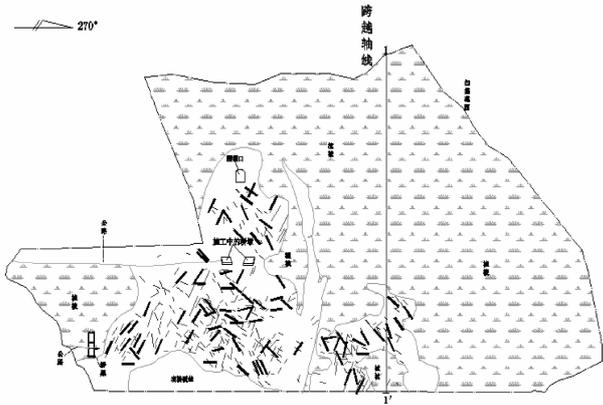


图 6 澜沧江高边坡岩体结构面立面图(素描图)

### 1.4 结构面统计分析

据澜沧江高边坡优势裂隙的解译,可得到边坡岩体中裂隙的优势方位(图 7 和表 2)。从图表中可以看出岸坡的优势裂隙以平面“X”裂隙为主,优势裂隙共 4 组,其中最为发育的为第 1 组,倾 SE、倾角在 60°以上;其次是第 2 组,陡倾坡内,倾向为 206°~254°,倾角为 45°~88°。另外两组为倾向 NE 的层面和 NW 的裂隙,第 3 组结构面(8°/37°)是外倾轴向边坡的,而第 4 组结构面(307°/66°)是外倾上游侧边坡的,这些外倾结构面是控制边坡的浅表层滑动的,不利于边坡的稳定。

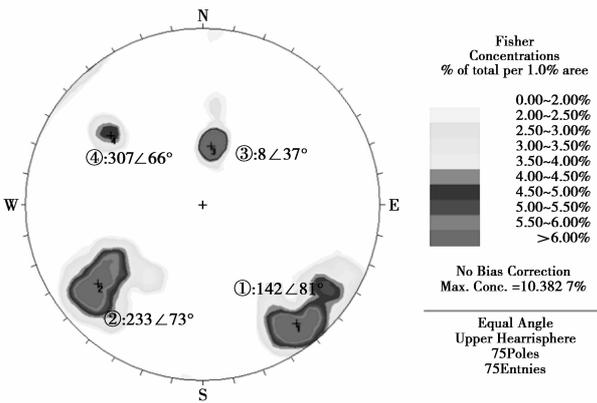


图 7 澜沧江高边坡裂隙等密图

表 2 澜沧江高边坡裂隙优势方位

组号	范围值		优势方位		备注
	倾向/(°)	倾角/(°)	倾向/(°)	倾角/(°)	
1	109-156	67-89	142	81	倾坡内
2	206-254	45-88	233	73	倾坡内
3	350-360-34	23-65	8	37	层面,倾坡外
4	298-315	55-75	307	66	斜交,倾向上游

## 2 潜在不稳定块体构成

边坡中各种长大结构面的发育情况以及在空间的展布位置是块体稳定性分析的基础,为了尽可能准确的确定各种长大结构面在空间的展布特征,作者在现场不仅对地表出露节理裂隙做了统计,而且还利用三维激光扫描仪对左右岸边坡表部的各种结构面进行了精确定点。将测量得到的全部结构面分组统计后与澜沧江高边坡进行赤平投影分析,如图 8 所示。从赤平投影图分析可知,对于轴向边坡,可构成块体的结构面不利组合为 1-3、2-3 以及 3-4;对于上游侧边坡,可构成块体的结构面不利组合为 1-4 和 2-3。

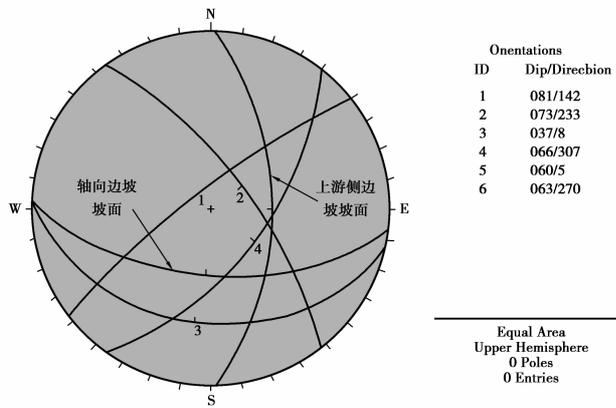


图 8 澜沧江高边坡结构面赤平投影图

## 3 块体稳定性分析

在对边坡主要结构面调查的基础上,运用以下方法对澜沧江高边坡的块体稳定性进行计算分析,方法如下:1)对澜沧江高边坡的结构面进行详细的调查、测量,包括结构面出露的位置、倾向、倾角、充填物质情况等基本信息;2)将调查获得的结构面与跨越边坡进行赤平投影分析,初步筛选出可能组合形成块体的边界结构面;3)将两两组合的结构面和获得的结构面参数进行计算,得到各组合块体的稳定性。

本次计算采用的结构面参数根据试验、相似工程类比及经验值获得,见表 3。

表 3 结构面参数建议值表

岩性	天然工况		暴雨饱和工况	
	内聚力/ (kPa)	内摩擦角/ (°)	内聚力/ (kPa)	内摩擦角/ (°)
白云质灰岩	0.32	32	0.28	30

将获得的组合块体的边界结构面和结构面的参数输入块体稳定性分析程序中进行计算,考虑以下几种工况:天然状态、暴雨状态、地震状态,其中地震状态下,水平地震峰值加速度  $a=0.2g$ 。计算的结果见表 4,边坡轴向边坡典型破坏块体的组合模式见图 9,边坡上游侧边坡典型破坏块体的组合模式见图 10。

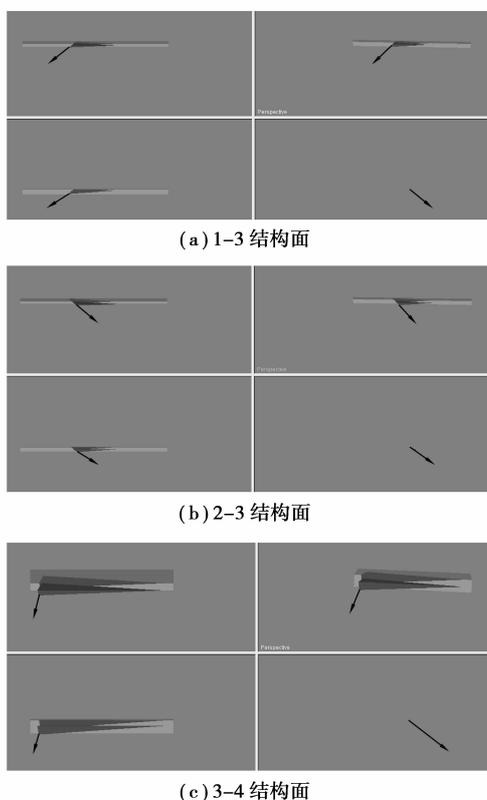


图9 轴向边坡典型破坏块体组合模式

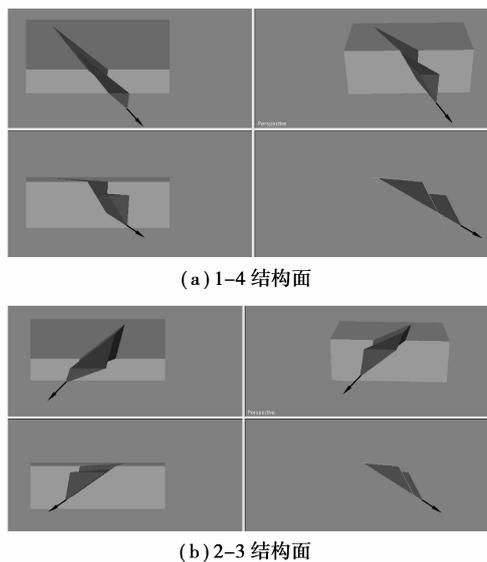


图10 上游侧边坡典型破坏块体的组合模式

表4 跨越边坡块体稳定性系数计算结果

边坡组合	结构面组合	块体体积/ m <sup>3</sup>	天然状态	暴雨状态	地震状态
轴向边坡	1-3	12 827.8	1.30	1.17	1.03
	2-3	19 623.8	2.04	1.89	1.38
	3-4	5 093.1	1.26	1.17	0.95
上游侧边坡	1-4	1207.25	4.72	4.36	3.14
	2-3	1922.26	2.06	1.90	1.38

根据表4可以得到以下结论:

1) 轴向边坡: 在天然状态下, 1-3、2-3、3-4 三组结构面组合块体的稳定性较好, 稳定系数均大于 1.8; 在暴雨状态下, 三种组合结构面组合块体的稳定性略有降低, 但仍在 1.1 以上, 处于基本稳定状态; 而在地震状态下, 稳定性系数有较大程度降低, 并且 3-4 组合块体的稳定性降低为 0.95, 组合块体将会出现失稳破坏。建议进行防护和加固, 并引起重视。

2) 上游侧边坡: 在天然和暴雨状态下, 1-4、2-3 两组结构面组合块体的稳定性较好, 均大于 2.0; 在地震状态下, 两组结构面组合稳定性系数均出现大幅度降低, 应注意在开挖过程中可能引起变形破坏。

## 4 结论

本文以澜沧江某重大工程高边坡为研究对象, 应用三维激光扫描技术, 研究了远距离调查分析岩体结构的分析方法, 得出边坡在天然工况下, 块体处于稳定状态, 在暴雨和地震工况下, 半数块体处于不稳定~基本稳定状态, 由于跨越墩在跨越边坡上游侧, 其可能会受到轴向和上游侧方向的块体下滑影响, 建议跨越墩位尽量靠近山体, 前缘坡表做部分削坡处理, 并对表层松动岩体进行清除以及设防护加固措施。目前的三维激光扫描技术正处在一个发展、更新阶段, 该技术在高陡边坡块体稳定性研究中的成功应用, 可为其他相似工程提供参考。

## 参考文献:

- [1] 许强, 黄润秋, 巨能攀, 等. 边坡岩体块体稳定性分析系统的开发与研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 796-801. (Xu Qiang, Huang Runqiu, Ju Nengpan, et al. Development and Study of Stability Analysis of Slope Blocks[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 796-801 (in Chinese))
- [2] 郭爱清, 丁秀丽, 卢波, 等. DDA 方法块体稳定性验证及其在岩质边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 664-672. (Wu Aiqing, Ding Xiuli, Lu Bo, et al. Validation for rock block stability and its application to rock slope stability evaluation on using DDA method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 664-672 (in Chinese))
- [3] 许强, 张登项, 郑光. 锦屏 I 级水电站左岸坝肩边坡施工期破坏模式及稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1183-1192. (Xu Qiang, Zhang Dengding, Zheng Guang. FAILURE MODE AND STABILITY ANALYSIS OF LEFT BANK ABUTMENT HIGH SLOPE AT JINPING I HYDROPOWER STATION [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1183-1192. (in Chinese))
- [4] 林孝松, 陈洪凯, 许江等. 山区公路高切坡岩土安全评价分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(3): 66-71 (Lin Xiaosong, Chen Hongkai, Xu Jiang et al. Safety Evaluation of High-cutting Slope along Highway in Mountainous Area [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(3): 66-71. (in Chinese))
- [5] 周钟, 巩满福, 雷承第. 锦屏一级水电站左坝肩边坡稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2298-2304. (Zhou Zhong, Gong Manfu, Lei Chengdi. RESEARCH ON STABILITY OF SLOPE AT LEFT ABUTMENT OF JINPING FIRST STAGE HYDROPOWER STATION [J]. Chinese Journal of

- Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2298-2304 (in Chinese))
- [6] 黄正加, 邬爱清, 盛谦. 块体理论在三峡工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 648-652. (Huang Zhengjia, Wu Aiqing, Sheng Qian. USAGE OF BLOCK THEORY IN THE THREE GORGES PROJECTS[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(5): 648-652 (in Chinese))
- [7] 吴海斌. 三峡永久船闸岩石高边坡工程稳定技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 21(2): 261-267. (Wu Haibin. STABILIZATION TECHNOLOGY ON THE HIGH-STEEP ROCK SLOPE IN THE THREE GORGES PROJECT SHIPLOCK [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 21(2): 261-267 (in Chinese))
- [8] 杨强, 朱玲, 薛利军. 基于三维多重网格法的极限平衡法在锦屏高边坡稳定性分析中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增2): 5313-5318. (Yang Qiang, Zhu Lin, Xue Lijun. Application of limit equilibrium method to stability analysis of Jinping high slope based 3D multi-grid method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp2): 5313-5318 (in Chinese))
- [9] 董秀军, 黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增2): 3629-3635. (Dong Xiujun, Huang Runqiu. APPLICATION OF 3D LASER SCANNING TECHNOLOGY TO GEOLOGIC SURVEY OF HIGH AND STEEP SLOPE [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp2): 3629-3635 (in Chinese))
- [10] HUANG R Q, DONG X J. Application of three dimensional laser scanning and surveying in geological investigation of high rock slope [J]. Journal of China University of Geosciences, 2008, 19(2): 184-190.
- [11] 娄国川, 赵其华. 基于三维激光扫描技术的高边坡岩体结构调查[J]. 长江科学院院报, 2009, 2(9): 58-61. (Lou Guochuan, Zhao Qihua. Investigation of Rock Structure in High Slope Based on 3-D Laser Scanning Technology [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2009, 2(9): 58-61 (in Chinese))
- [12] 刘宏, 董秀军, 向喜琼, 等. 用三维激光成像技术调查高陡边坡岩体结构[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2006, 17(4): 38-45. (Liu Hong, Dong Xiujun, Xiang Xiqiong, et al. Investigation of rock mass discontinuity by 3D laser imaging technique on a large and stiff slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 17(4): 38-45 (in Chinese))
- [13] 邢正全, 邓喀中. 三维激光扫描技术应用于边坡位移监测[J]. 地理信息空间, 2001, 9(1): 68-70. (Xing Zhengquan, Deng Kazhong. Application of 3D Laser Scanning Technology in Slope Displacement Monitoring [J]. Geospatial Information, 2001, 9(1): 68-70 (in Chinese))
- [14] 宋胜武, 巩满福, 雷承第. 峡谷地区水电工程高边坡的稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 226-234. (Song Shengwu, Gong Manfu, Lei Chengdi. STUDY ON STABILITY OF HIGH ROCK SLOPE IN HYDROPOWER ENGINEERING [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 226-234 (in Chinese))
- [15] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525-1544. (Huang Runqiu. GEODYNAMICAL PROCESS AND STABILITY CONTROL OF HIGH ROCK SLOPE DEVELOPMENT [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1525-1544 (in Chinese))
- [16] 朱杰. 岩质边坡的关键块体稳定性影响因素的敏感性研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(2): 249-252. (Zhu Jie. SENSITIVITY STUDY ON FACTORS INFLUENCING THE STABILITY OF KEY BLOCK OF ROCK SLOPE [J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(2): 249-252 (in Chinese))
- [17] 李建, 胡书桥, 邓增兵. 基于综合改进 ICP 算法的三维激光扫描技术在露天矿边坡测绘中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(1): 51-54. (Li Jian, Hu Shuqiao, Deng Zengbing. Application of open-pit mine slope mapping with 3D laser scanning technique based on comprehensive improved ICP algorithm [J]. Coal Geology & Exploration, 2012, 40(1): 51-54 (in Chinese))
- [18] 霍宇翔, 黄润秋, 巨能攀, 等. 爆破影响下岩质高边坡浅表层块体稳定性研究[J]. 工程地质学报, 2009, 17(6): 796-801. (Huo Yuxiang, Huang Runqiu, JU Nengpan, et al. Stability evaluation of surface rock blocks in high slope under blasting [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(6): 796-801 (in Chinese))

(编辑 张小强)