

文章编号: 1008-2786-(2010)4-487-05

激光测距仪在高陡边坡结构面产状测量中的应用

李华东, 邓辉, 姜永玲

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室 四川 成都 610059)

摘要: 激光测距仪是利用激光对目标的距离进行准确测定的仪器, 被广泛的应用于光学和测绘领域中。而结构面产状通常是采用地质罗盘进行测量, 边坡高陡时往往难于测取。在对激光测距仪的功能进行简单介绍后, 分析了利用其测量结构面产状的原理, 并推导了产状计算的公式。通过实测产状数据与计算数据的对比及误差分析, 验证了计算结果的可靠性, 说明激光测距仪可用于高陡边坡结构面产状的测量和计算, 并将这一成果应用于结构面产状的量测中, 取得了较好的效果。这种非接触的测算方法是对传统地质工作中产状测量方式的一种改进和创新。

关键词: 激光测距仪; 高陡边坡; 结构面产状; 误差分析

中图分类号: P204 P62

文献标识码: A

高陡边坡结构面产状测量一直是困扰地质工作者的一个难题, 而地质体中结构面及其组合特征是控制岩体稳定性的最重要的因素之一, 因此, 这些结构面产状的量测对分析和评价边坡及危岩体的稳定性显得尤为重要。

为了更准确的获取高陡边坡上重要结构面的产状, 国内外许多学者也曾开展了一些研究工作, 主要方法有近景摄影测量和三维激光扫描。王树根、朱宜萱、邵巨良^[1-2]等人利用近景摄影方法获取目标岩体的立体像对, 记录摄影像片的姿态角 φ 、 ω 、 k 对像点坐标作适当改正后, 进行坐标转换, 获得结构面上点的空间坐标, 以这些点为基础拟合空间结构面的平面方程, 根据平面方程求出该结构面的倾向和倾角。河海大学李冬田^[3]还依据中心投影灭线和灭点的原理, 提出了灭线法和灭点推导法计算结构面的产状, 获得了较好的效果。但近景摄影测量方法需要有一个精度十分高的控制测量系统和一套完善的、适合处理节理面平度差的数据处理方法, 且操作较为复杂。成都理工大学董秀军及贵州大学刘

宏、向喜琼、高云河^[4-6]等人利用三维激光扫描获得边坡的点云数据, 在三维坐标系中, 设结构面的方程为 $z = b_0 + b_1x + b_2y$ 然后选取结构面上的若干点, 用回归分析的方法求得该方程的三个系数 b_0 、 b_1 、 b_2 因此, 该结构面的法向量为 $P(b_1, b_2, -1)$, 法向量的方向余弦为 (r, l, m, n) , 根据方向余弦与结构面倾向、倾角的关系, 计算出结构面的产状。中国水利水电科学研究院何秉顺、丁留谦、孙平^[7]等人根据三维激光扫描数据进行表面重建, 应用模糊聚类方法对结构面进行分组, 以 Fisher 分布的值作为判断聚类效果的指标, 通过去除边界点, 逐步迭代获得出露岩体结构面的优势方位。用三维激光扫描数据分析得到结构面产状的方法具有测量速度快、精度高等特点, 但是测量仪器昂贵且笨重, 数据处理也比较复杂, 仅用其进行产状测量, 有“大材小用”之嫌。

为了更简单、快速、准确地获取高陡边坡重要结构面的产状, 作者将常用于光学、电子和测绘领域的先进仪器——手持式激光测距仪引入到结构面产状的量测中, 取得了很好的效果。

收稿日期 (Received date): 2010-02-19 改回日期 (Accepted): 2010-05-28

基金项目 (Foundation item): 四川省杰出青年基金项目资助, 编号: 07JQ0065 [Supported by Sichuan Province Outstanding Youth Fund Project No. 07JQ0065.]

作者简介 (Biography): 李华东 (1984-), 男, 硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事岩土体稳定性及工程环境效应研究。 [Li Huadong (1984-), male postgraduate Geologica Engineering major in rock and soil stability and environmental effects Research.] E-mail: scdu@qq.com

1 激光测距仪简介^[8]

激光测距仪是利用激光对目标的距离进行准确测定的仪器,由于其重量轻、体积小、操作简便、准确迅速,被广泛应用于军事中的地形测量、战场测量、飞机和坦克对目标的测距等方面,在工业测控、矿山、港口等民用工程建设领域也有广泛的应用。

激光测距仪在工作时向目标射出一束很细的激光,由光电元件接收目标反射的激光束,计时器测定激光束从发射到接收的时间,计算出从观测者到目标的距离。同时它还集成了电子水平罗盘和倾角罗盘,能够自动获取观测线的方位角以及观测线的仰角(或俯角),它还能与GPS接收机联合作业,将实测数据准确无误的记录下来并传输到计算机中,大大的提高了工作效率和精度。

根据测量目的不同,激光测距仪有一维、二维和三维之分,本次测量采用的是KD2000手持高精度一维激光测距仪,见图1,其有效测量距离为3~1850 m,测距精度为0.1 m。



图1 KD2000高精度激光测距仪

Fig. 1 KD2000 high precision laser range finder

KD2000激光测距仪有10种测量模式:标准模式、2点测高模式、3点测高模式、水平距离测量、坡度测量、3点法测量垂度、物体间水平距离测量、物体间斜距测量、方形面积测量、任意形状的面积和周长的测量。为了获取结构面的产状,我们选择标准模式,测得测量仪器到被测物体间的斜距,倾斜角度和方位角。在浓雾、浮尘、雨雪等恶劣环境下,只要切换到“恶劣环境”模式就可以顺利测量。

2 产状测算原理及可靠性分析

测算原理

为了较为准确的获取某一结构面的产状,我们

在该结构面上任意选取不在同一条直线上的3个点,在R/B/模式,即标准模式下测量每个点的R(Range:测量点距被测点的实际距离)、B(Bearing:测量点与被测点连线的方位角)及I(Inclination:实测仰角或俯角)用90°减去即可获得测量点与被测点间的仰角或俯角*i*,仰角为负,俯角为正。

2.1.1 坐标换算

以测量点为原点建立三维坐标系,以Y轴为正北方向,X轴为正东方向,则B为测线在XY平面上的投影与Y轴正向的夹角,而I为测线与XY平面的夹角,见计算简图2。通过几何换算,我们可以由R、B、I计算出第*i*个点的空间坐标*x_i*、*y_i*、*z_i* (*i*=1, 2, 3)计算方法如下

$$\begin{cases} x_i = R_i \cdot \cos I_i' \cdot \sin B_i \\ y_i = R_i \cdot \cos I_i' \cdot \cos B_i \\ z_i = R_i \cdot \sin I_i' \\ I_i' = 90^\circ - I_i \\ i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (1)$$

式中 R_i 为测量点与第 i 个被测点间的实际距离; B_i 为测量点与第 i 个被测点连线的方位角; I_i 为实测测量点与第 i 个被测点间的仰角(或俯角); I_i' 为测量点与第 i 个被测点间的仰角(或俯角)。

2.1.2 结构面的平面方程及外法线的方向余弦^[4]

求得同一结构面上不共线3点的坐标: $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ 后,利用这3个点可以求解该平面的方程,设为 $Ax + By + Cz + D = 0$ 。

将这3组坐标组成4阶行列式

$$\begin{vmatrix} x & y & z & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (2)$$

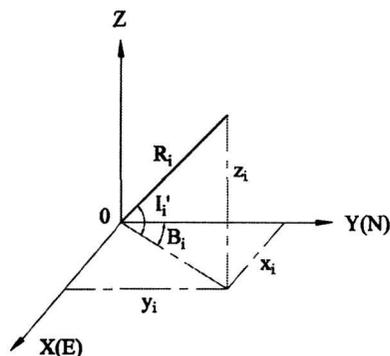


图2 几何换算简图

Fig. 2 Sketch of geometric conversion

根据线性代数及空间解析几何可知, 平面方程的 4 个系数 A B C D 分别为

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{pmatrix} y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \\ y_3 & z_3 & 1 \end{pmatrix} & B &= \begin{pmatrix} x_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & z_3 & 1 \end{pmatrix} \\
 C &= \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix} & D &= \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \quad (3)$$

由平面方程可得该平面外法线的方向余弦

$$l = \frac{A}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}, \quad m = \frac{B}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}, \quad n = \frac{C}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}} \quad (4)$$

式中 l m n 分别为结构面外法线与 x 轴、y 轴和 z 轴夹角的余弦值。

2.1.3 产状计算

设所测结构面的倾向为 α 倾角为 β 其法向向量 $n = (l, m, n)$ 与其产状的关系为

$$\begin{cases} l = \sin\beta \sin\alpha \\ m = \sin\beta \cos\alpha \\ n = \cos\beta \end{cases} \quad (5)$$

由外法线方向余弦可得所量测结构面的倾向 α 和倾角 β 计算式:

(1) 当选取的三个点在待测结构面上表面时

$$\alpha = \begin{cases} \frac{3\pi}{2} + \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleright 0, m > 0 \\ \frac{3\pi}{2} - \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleright 0, m < 0 \\ \frac{2\pi}{2} - \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleleft 0, m > 0 \\ \frac{2\pi}{2} + \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleleft 0, m < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{n}{\sqrt{l^2+m^2}}\right)$$

(2) 当选取的三个点在待测结构面下表面时

$$\alpha = \begin{cases} \frac{2\pi}{2} + \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleright 0, m > 0 \\ \frac{2\pi}{2} - \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleright 0, m < 0 \\ \frac{3\pi}{2} - \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleleft 0, m > 0 \\ \frac{3\pi}{2} + \arctan\left(\frac{m}{n}\right), & \triangleleft 0, m < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{n}{\sqrt{l^2+m^2}}\right)$$

测算结果可靠性分析

通过理论计算, 我们可以得到待测结构面的产状, 计算产状与实际产状是否吻合, 测算的误差有多大, 测算结果能不能应用于工程实践呢? 我们采取对比分析的方法, 即将激光测距仪测算结果与地质罗盘实测结果进行对比。通过实测大量结构面的 R/B/ 数据及其实际产状, 我们任选了 20 组数据进行误差分析, 见表 1。

表 1 结构面产状测算结果及误差分析
Table 1 Calculated attitudes and the error analysis

结构面	倾向 $\alpha(^{\circ})$		倾角 $\beta(^{\circ})$		绝对误差		相对误差	
	实测	计算	实测	计算	$\alpha(^{\circ})$	$\beta(^{\circ})$	$\alpha(\%)$	$\beta(\%)$
1	253	252.2	89	89.4	-0.8	0.4	-0.321	0.479
2	108	112.9	74	80.7	4.9	6.7	4.511	9.047
3	345	337.2	31	32.0	-7.8	1.0	-2.248	3.093
4	132	136.5	74	72.8	4.5	-1.2	3.378	-1.582
5	220	229.3	66	64.1	9.3	-1.9	4.250	-2.950
6	108	112.9	74	80.7	4.9	6.7	4.511	9.047
7	345	337.2	31	32.0	-7.8	1.0	-2.248	3.093
8	132	136.5	74	72.8	4.5	-1.2	3.378	-1.582
9	291	283.2	80	80.9	-7.8	0.9	-2.679	1.067
10	292	293.0	75	77.9	1.0	2.9	0.328	3.809
11	32	30.3	75	75.8	-1.7	0.8	-5.357	1.073
12	32	24.3	69	65.4	-7.7	-3.6	-24.075	-5.196
13	72	68.4	68	74.0	-3.6	6.0	-5.015	8.798
14	166	164.3	25	24.6	-1.7	-0.4	-1.045	-1.767
15	340	338.5	25	27.2	-1.5	2.2	-0.435	8.782
16	60	64.0	22	26.4	4.0	4.4	6.585	19.984
17	153	170.8	20	26.0	17.8	6.0	11.642	29.774
18	153	171.5	20	26.9	18.5	6.9	12.060	34.501
19	65	55.6	71	77.5	-9.4	6.5	-14.446	9.100
20	65	68.5	71	77.5	3.5	6.5	5.438	9.151

由表 1 可以看出, 倾向的绝对误差基本都在 $4^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 范围内, 部分可精确到 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$, 个别误差达到 $17^{\circ} \sim 18^{\circ}$; 倾角的绝对误差基本都在 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 范围内, 部分误差为 $4^{\circ} \sim 6^{\circ}$; 倾向的相对误差基本都在 $2\% \sim 4\%$ 范围内, 个别误差达到 24% ; 倾角的相对误差基本都在 $1\% \sim 3\%$ 范围内, 个别误差达到 34.5% 。

由此可见, 计算产状与地质罗盘实测产状基本吻合, 只有个别数据误差较大, 误差可能是由空气中粉尘、结构面的平整程度、植被等遮挡以及操作不当等原因引起。在激光测距仪工作过程中, 尽量避免这

些干扰因素时,产状计算结果基本能满足工程需要。

3 工程实例

某隧道进口边坡位于渝利(川)铁路 D8K164+190~D8K164+820m处,该边坡走向近南北,北高南低,坡前有公路通过,南侧距路面高差约 30 m,北侧距路面最大高差约 240 m,边坡上部为三叠系上统须家河组(T_3xj)灰白—浅灰色厚—巨厚层状长石英砂岩,砂岩底部为三叠系中统雷口坡组(T_2)灰—灰绿色薄—中层状泥质灰岩夹页岩,岩性较上部砂岩软,较易风化。边坡上、下部岩体的差异风化形成了目前的地貌特征:下部软岩风化形成凹腔后,上部被结构面切割成块状的硬岩掉落堆于坡脚形成岩堆,地貌上呈现出上陡下缓的特征,上部为砂岩裸露,下部为崩塌积物堆积。边坡岩体内节理裂隙较发育,且风化卸荷强烈,在上部砂岩陡壁上发育有大量危岩体,威胁着隧道施工的安全,见图 3。

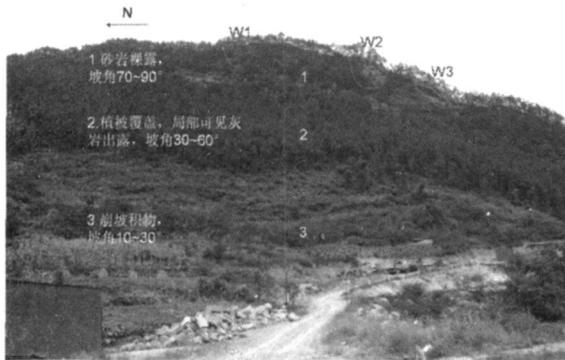


图 3 边坡全貌及危岩体发育特征

Figure 3 Picture of the slope and development characteristics of unstable rock masses

由于边坡相对高差大,且上部岩壁十分陡峭,给危岩体的调查带来了极大的困难。危岩体后部结构面的延伸情况及贯穿程度是危岩体稳定性的控制性因素,控制性结构面产状的准确量测对确定危岩体体积及规模具有十分重要的意义。

危岩体 W2(见图 3)是陡壁上的一个规模巨大且对铁路安全具有较大威胁的块体,该块体稳定性主要由后部结构面控制,该结构面为坡表岩体向坡外卸荷形成,较平直粗糙,陡倾坡外,张开约 20 m,无充填,见图 4。

为测得该控制性结构面产状,在该面上任意选取不共线的 3 点,测得其 R B 数据,见表 2。



图 4 W2后部控制性结构面

Figure 4 Key structural plane behind W2

表 2 结构面 R B 值

Table 2 R B I value of the structural plane

点号	R(m)	B(°)	I(°)
①	14.3	355.3	100.3
②	16.1	356.2	93.7
③	14.8	351.7	109.4

通过计算,该结构面产状为 $256.0^\circ \angle 69.4^\circ$,在切过 W2 的纵剖面上,按实际产状标出该结构面,由此可确定该危岩体的厚度,见图 5。

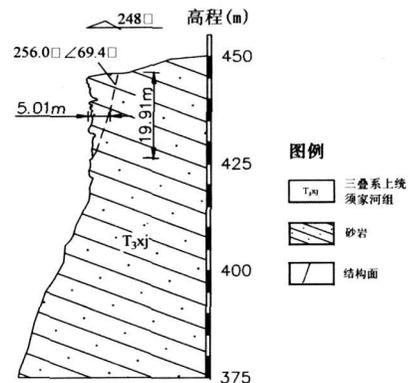


图 5 危岩体剖面图

Figure 5 Profile of the unstable rock mass

根据危岩体的高度、平均厚度及长度可估算该危岩体的体积。

4 结论

通过对测得的 20 余组结构面的 R B 值进行坐标变换、拟合平面方程及求解平面方程的外法线方向余弦,可以计算出结构面的产状,误差分析结果表明,计算产状与实测产状基本吻合,倾向绝对误差

基本都在 $4^{\circ} \sim 7^{\circ}$ 范围内, 相对误差基本都在 $2\% \sim 4\%$ 范围内; 倾角绝对误差基本都在 $1^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 范围内, 相对误差基本都在 $1\% \sim 3\%$ 范围内, 能够满足工程需要, 说明激光测距仪测量的 RB 数据能够用于计算结构面的产状, 且具有很高的精度。

利用激光测距仪测算产状是对传统地质工作中产状测量方式的一种改进和创新, 这种非接触式的测算方式在高陡边坡结构面产状测量中具有十分重要的意义, 它不仅提高了野外工作的效率, 而且也降低了测量风险, 同时也具有较高的精度。当然, 这种测算方式也有其弊端, 它要求结构面在坡表出露较好且较平直, 对于那种在坡面出露较小或线状出露的结构面不适用。

参考文献 (References)

[1] Wang Shugan, Zhu Yixuan. The method of using close range photogrammetry to determine the attitude of rock. *Bulletin of Surveying and Mapping* 1993, 5: 17~20 [王树根, 朱宜萱. 用近景摄影测量测定地质产状的作业方法[J]. 测绘通报, 1993, 5: 17~20]

[2] Zhu Yixuan, Shao Jiliang, Wang Shugan. Investigation of Determining the Appearance and Geometric Elements for Geological Structure Surface by Using Terrestrial Photogrammetry Method. *Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping* 1991, 16(3): 84~93 [朱宜萱, 邵巨良, 王树根. 地面摄影测量测定地质结构面产状和几何要素方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1991, 16(3): 84~93]

[3] Li Dongjian. Vanishing line method and vanishing point deduction method for photographic survey of strike-slip of structural surfaces [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources* 2005, 25(1): 21~24 [李冬田. 摄影方法量测结构面产状的灭线法和灭点推导法[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(1): 21~24]

[4] Liu Hong, Dong Xijun, Xiang Xifeng, et al. Application of 3D laser imaging technology to investigate the rock mass structure of high and steep slope. *The Chinese Journal of Geotechnical Hazard and Control* 2006, 17(4): 38~41 [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): 38~41]

[5] Dong Xijun. Research on application of 3D laser scanning technology in acquiring DEM with high accuracy and resolution. *Journal of Engineering Geology* 2007, 15(03): 428~432 [董秀军. 三维激光扫描技术获取高精度 DEM 的应用研究[J]. 工程地质学报, 2007, 15(03): 428~432]

[6] Dong Xijun, Huang Runqiu. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2006, 25(suppl 2): 3629~3635 [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(suppl 2): 3629~3635]

[7] He Bingshun, Ding Liujun, Sun Ping. The application of 3-D laser scanning technology in rock joint sets identification. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research* 2007, 5(1): 43~48 [何秉顺, 丁留谦, 孙平. 三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2007, 5(1): 43~48]

[8] Contour XLRic Operator's Manual [Z].

Applications of Laser Range Finder in the Measurement of the Attitude of Structural Planes in High and Steep Slope

LI Huadong, DENG Hui, JIANG Yongling

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Laser range finder is an apparatus which measures the distance of the target accurately by laser, and it has been widely used in the field of optics and surveying and mapping. The attitude of the structural planes are usually measured by compass, but on high and steep slopes are often difficult to take measurements. After a brief introduction of the instrument's features, this paper analyzed the principle of using this device to measure the attitude of the structural planes, and derived the formula of the occurrence calculation. By the contrast of the measured and calculated data and the error analysis, we can draw the conclusion that the calculation results is reliable, and the laser range finder can be used for the attitude measurement of structural planes in high and steep slope. And the achievements have been applied to the measurement of structural planes and have achieved good results. This non-contact measurement method is an improvement and innovation to the traditional geological work.

Key words: laser range finder, high and steep slope, the attitude of the structural planes, error analysis