

侧伏规律在岩质边坡结构面编录中的应用*

刘明 黄润秋 严明 巨能攀

(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 成都 610059)

摘要 理论上,据边坡设计坡面来编录展示结构面的迹线分布应与其在坡面内的侧伏交线一致。把握一定的侧伏规律,处以适当的素描技法,既可吻合实际情况,又可提高绘图效率和资料质量,对边坡结构模型的准确分析不无裨益。有鉴于此,经过现场观测总结,分析了结构面与坡面的各种交切关系及其迹线的侧伏特征。在侧伏规律公式推导的基础上,根据两者产状提出其特征三角形判别法,并编制相应的算图,可校核以及在适当条件下推测某一产状要素。讨论了实践中几类难以作图的特殊情况下侧伏规律的应用。

关键词 地质素描 侧伏角 结构面迹线 展示图 边坡结构模型

中图分类号:P624.5 文献标识码:A

APPLICATION OF PITCH RULES OF DISCONTINUITIES TO EXCAVATION SURFACE FOR ROCK SLOPE STRUCTURE MAPPING

LIU Ming HUANG Runqiu YAN Ming JU Nengpan

(State Key Laboratory of Geo-Hazard Prevention and Geo-Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

Abstract In theory, the extension of a discontinuity trace in revealing detailed map of the excavated surface by rock slope design must be in accordance with the pitch of the intersecting line of discontinuity and excavated surface on the latter. Grasping the pitch regularity and manipulating the appropriate sketch technique maybe not only make the trace map coincide with the in-site actual situation, but also increase drawing efficiency and data quality, without no avail of the accurate analysis for slope structure model. In view of this, by means of in-site observation and conclusion, relationships between discontinuity and slope surface and properties of discontinuities traces are analyzed. Based on formulas to express pitch rules, the discriminance of pitching by features triangle, which is inferred from both attitudes of discontinuity and slope surface, is proposed. Meanwhile, nomograph to determine pitch of discontinuity trace is drawn up. Under the proper condition, checking and concluding one of essentials of attitude by other one is discussed. Practical application of pitch regularity to a particular case, the trace of which is difficult to draw, is illustrated.

Key words Geological sketch, Angle of pitch, Discontinuity trace, Reveal detailed map, Slope structure model

* 收稿日期: 2010-04-16; 收到修改稿日期: 2010-09-21.

基金项目: 雅砻江水电开发联合研究基金重点项目(50539050), 教育部创新团队发展计划(IRT0812).

第一作者简介: 刘明, 工程地质专业. Email: 89478698@qq.com

1 引言

地质编录、岩体结构精细调查是边坡工程中坡体结构模型^[1]现场调查的主要手段。对坡面(岩体表面)结构面迹线的测绘是其中的一项基本内容。规范^[2,3]要求坡角大于30°的坡面编录应采用展示图编录其主要结构面,而边坡施工地质中岩体结构精细测量也主要是集中在坡面测绘,成图形式与展示原理一样。由于结构面迹线在理想的设计坡面内的延伸展布,与坡面交切的几何关系是具有内在联系的,而地质专业一般用“侧伏”这一术语来描述面内某线在该面内的产状方位^[4],因此结构面迹线在展示面内的斜率应与其侧伏角相匹配。分析认识结构面在坡面的侧伏展示规律,不仅有利于图件编制,而且也可利于数据校核及产状要素推测。

本文以现场编录草绘作图为本出发点,介绍力求使绘图记录资料正确、科学的结构面迹线侧伏规律及其实际应用。从 Park & West 讨论的精测取样所致的结构面方位偏差分析^[5],可以预见利用侧伏规律正确编录对岩体结构参数准确估计^[6]的促进意义。

2 问题的提出

以某水电工程拱肩槽边坡为例(图1)讨论不同产状结构面出露的方位特点。为了便于分析,选取代表走向一致,而倾角、倾向不同的贯通性结构面

来比较。

对比图1可以看出,对于不同倾向、倾角的结构面来说,其迹线的产状是不同的:侧伏向既可与结构面视倾向(顺坡走向剖面内)一致(如图1中的②③④),也可与其视倾向相反(如图中的①)。值得注意的是,仅倾角各异而同倾向结构面,其侧伏向也有差异,如上图中的①②,甚至迹线竖直(垂直坡面走向线,同上⑤)。这与直立剖面图内同倾向的各界面出露的视倾向均相同的特点明显不同。因此,坡面上迹线出露方位存在多样性。

除上述出露方位问题外,其具体的侧伏角度大小如何确定(特别是对未贯穿马道等缘故而不易卡距定位的结构面),也是编录时面临的问题。万禄进^[7]、唐俊才等^[8]对于斜井坑道编录的讨论中已述及部分相关方面的内容;中国水电顾问集团昆明院在小湾等工程中为确定边坡结构面迹线提出的“倾向-走向位移法”(笔者命名)也做出了很有价值的探讨与应用^[9]。基于这些研究成果的启示,以及笔者在小湾、锦屏等水电工程现场工作中的总结,本文着重从结构面迹线侧伏规律的角度来提出更为全面的迹线展示方位判别的方法。

为进一步分析,将图1中的各结构面在平面图中,聚合于同一走向线(图1),用以研究它们随倾角及倾向的变化而变化的迹线投影分布特点。从图1c所示的平面图上,可直观地看出3条较为特殊的迹线投影。其中,OP_⊥,OS线(结构面④⑤)将所有共端点、同走向的结构面的迹线可能出露的范围分为3大区域,图中OP₁,OP₂,OP₃所代表的迹线的前述侧伏特征就为各区的共同特点(详后)。

例如,据文献^[9]提出的观点,迹线投影OP₁,OP₂,OP₃所属的结构面,在过其上下端点的两边坡走向线间,其走向线沿边坡走向的偏移SP_⊥(走向位移 Δs , strike)均相同(因为走向不变);而结构面倾斜所致其上下走向线沿边坡走向的偏移(倾向位移 Δd , dip)P_⊥P₁,P_⊥P₂,P_⊥P₃,不仅大小不同,而且更主要的是位移方向也不同:

(1)区: $\Delta s > \Delta d$,且方向相反,两者大小之差为迹线偏移SP₁;

(2)区: $\Delta d > \Delta s$ 且反向,两者之差为迹线偏移SP₂;

(3)区: $\Delta s, \Delta d$ 同向,两者大小之和为迹线偏移SP₃。

可见三者是有明显区别的,但对一般的非贯穿结构面,走向位移、倾向位移在现场难以明确,且不

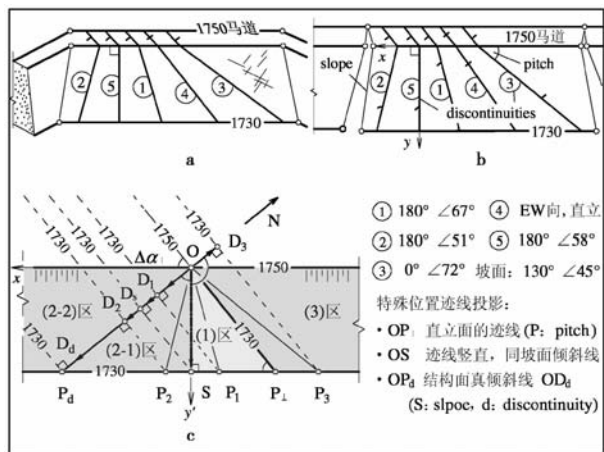


图1 结构面迹线侧伏分布示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the distribution of various discontinuities traces

a. 边坡立体示意图; b. 边坡编录展示图;
c. 结构面迹线出露平面投影图

如侧伏关系看得直观。

前面已指出,结构面出露侧伏的相关特点是由相对于坡面的几何关系所决定的。正如 Lemy 等许多作者为分析结构面(出露)特点而进行的分类那样^[10, 11],据此定义或限定相关的分类术语,以便表述这些特点。这是提出的问题之一。其二在此基础上,尚需建立统一的数学模型(公式),加以分析讨论。

3 相关术语及定义

3.1 相交面倾向关系-内倾、外倾

由图 1c 分析结构面相对边坡的倾向关系,当其倾向与边坡(斜坡总体)倾向夹角 $\Delta\alpha$ 为锐角时,统称为外倾结构面(图 1 中①②⑤),反之称内倾结构面(图 1 中③);特殊时, $\Delta\alpha = 0^\circ \pm$ 、且倾角大致相同时,可称顺坡结构面; $\Delta\alpha = 180^\circ \pm$ 时称反倾结构面; $\Delta\alpha$ 为直角 ($\Delta\alpha = 90^\circ \pm$) 可称直交(不同于两面垂直正交)。

通常对上述限定的理解,可以在边坡的横断面内清楚地看出内倾、外倾的区别:内倾结构面具有视倾向与边坡倾向相反的特点,相反外倾则视倾向与边坡一样,指向坡外(除非边坡倒悬)。这样与平常习惯称谓以及规范等定义层状边坡结构的“同向”、“反向”等术语^[11]相似且又不矛盾。

3.2 交线与两面倾向关系-同侧伏、反侧伏

为适合对更一般的结构面讨论,定义如下术语:在平面图(图 1)上,结构面在坡面的迹线投影(OP)及其过迹线上端点(O点)倾向线(OD)均位于过O点的边坡倾向线(OS)同侧时($\pm 180^\circ$ 内)称同(向)侧伏;反之位于异侧时,即称反(向)侧伏;特殊时,可将结构面与坡面倾角相等的同侧伏现象,称等(角)侧伏。另外,迹线水平时,仍记其侧伏角 δ 为 0° ;迹线竖直时,则记侧伏角 δ 为 90° 。上述定义对非贯穿性结构面来说,虽然更具普适性,但难以看出侧伏现象的直观特点,因此其理论分析意义更强。

从前述分析可以看出:同向侧伏结构面迹线具有视倾向(指边坡纵断面内)与侧伏向相同的特点,而反侧伏则相反。由此,可更为直观地理解“同侧伏、反侧伏”的概念。从图 1c 内的分布范围来看,同侧伏迹线主要分布在(2)区、(3)区,范围较广;而反侧伏迹线仅限于(1)区,可大致反映其出现的机

率应该相对较小。

对于调查展绘来说,仅是以上宏观的定性分析还远不能满足需要。因为,在现场为展绘那些不易定位的结构面迹线,还应知道确切的侧伏角度大小。

4 结构面迹线侧伏规律

4.1 计算公式

选图 1c 中某一结构面及其迹线,如图 2 在迹线

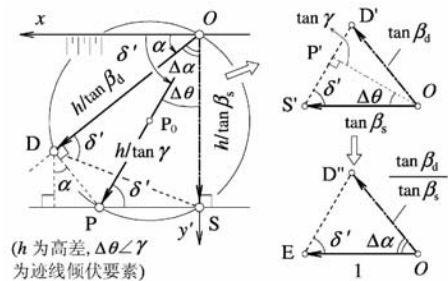


图 2 平面三角分析示意图

Fig. 2 Horizontal sketch for triangulation

(投影为 OP) 出露范围的高差 h 之内,边坡与结构面真倾斜线投影长度分别为

$$\begin{aligned} OS &= h / \tan \beta_s \\ OD &= h / \tan \beta_d \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\beta_s, \beta_d \in (0^\circ, 90^\circ)$ 为边坡和结构面的倾角。很明显 PS、PD 即平行于边坡和结构面的走向线,并且 OSPD 四点共圆,圆心即 OP 的中点 P_0 。

建立如图 1 所示的 Oxy' 坐标系,取结构面倾向(OD)、其迹线倾向(OP)与 x 轴的夹角分别为 α 、 δ' (图 2),两者的关系式可简单推导为

$$\begin{aligned} \tan \delta' &= \frac{y'_P}{x_P} = \frac{OS}{\pm SP} \\ &= \frac{\pm OS}{OD \cos \alpha - (OS - OD \sin \alpha) \tan \alpha} \\ &= \frac{\pm OS \cos \alpha}{OD - OS \sin \alpha} = \frac{\pm \cos \alpha}{\frac{\tan \beta_s}{\tan \beta_d} - \sin \alpha} \end{aligned} \quad (2)$$

同侧伏取正,反侧伏取负, δ' 即为结构面迹线侧伏角 δ (此时取图 1b 中展示面内的 Oxy 坐标系)的水平投影角,两者的关系式可表示为

$$\tan \delta = \frac{\tan \delta'}{\cos \beta_s} \quad (\beta_s \neq 90^\circ) \quad (3)$$

式(2)式(3)即为求侧伏角的解析解, δ', δ 的值可能为钝角或负角,实际上,侧伏角只取锐角^[4],因此,这里仅关注式(2)理论分析意义。

显然,由于坡面和结构面产状(倾向∠倾角)已知后,就可方便地求出两者倾向夹角 $\Delta\alpha$ 。由此,更为实际地考虑用两者相对关系 $\Delta\alpha$ 来表示式(2)。从图2中可以看出 $\alpha = 90^\circ \pm \Delta\alpha$,并代入式(2)得

$$\tan\delta' = \frac{\sin\Delta\alpha}{\tan\beta_s/\tan\beta_d - \cos\Delta\alpha}$$

$$\Delta\alpha \in (0^\circ, 180^\circ) \quad (4)$$

此时,上式已与坐标系 Oxy' 无关,可以定义 δ' 的解析值域为 $(0^\circ, 180^\circ)$,但后面将谈到,此式计算的 $\tan\delta'$ 为负值(即 δ' 值在上述值域内为钝角)时,应对 δ 值取反(或绝对值)才为侧伏角。实际上,理解式(4)的实际几何意义并编制相关图表(详后),更利于对结构面侧伏规律的分析和应用。

4.2 侧伏定理

在图2中,根据三角形正弦定理可知 $\angle OPS = \angle ODS = \delta'$ 。在 $\triangle OSD$ 中,已知两边 OD 、 OP 及夹角 $\Delta\alpha$,可由传统的地质《野外记录簿》所附的解三角形公式 $\tan B = b\sin C / (a - b\cos C)$ (一般数学手册未直接给出^[12]),求得

$$\tan\delta' = \tan\angle ODS = \frac{OS\sin\Delta\alpha}{OD - OS\cos\Delta\alpha}$$

$$= \frac{\tan\beta_d\sin\Delta\alpha}{\tan\beta_s - \tan\beta_d\cos\Delta\alpha} \quad (5)$$

可见式(5)与式(4)是等价的。顺便,式(5)也可以看作以边坡和结构面倾角的正切值 $\tan\beta_s$ 、 $\tan\beta_d$ 为两边, $\Delta\alpha$ 为夹角的 $\triangle OD'S'$ (图2)中,求 $\tan\beta_d$ 边(OD')的对角,即坡面上迹线侧伏角的水平投影 δ' ;再加推广, $\tan\beta_s$ 边(OS')的对角 $\angle OD'S'$ 即为迹线(交线)在结构面内的侧伏角水平投影。甚至,再将 $\triangle OD'S'$ 变换为它的相似三角形 $\triangle OD'E$ (图2), $\tan\beta_d/\tan\beta_s$ 边的对角就为结构面迹线侧伏角的水平投影角(确切地说为解析值 $\delta' \in (0^\circ, 180^\circ)$),因为,若为钝角尚需取其补角),这便是式(4)所表达的几何意义,在后文将谈及其应用。

这样,可将图2中 $\triangle OSD$ 、 $\triangle OD'S'$ 或 $\triangle OD'E$ 统称为判别两面交线侧伏性质的特征三角形;并且,可总结如下两面交线在各面内的侧伏定理。

定理:解特征三角形而得的两斜面交线在各面内侧伏角的水平投影解析值与两面倾向夹角之和为 180° 。

4.3 侧伏性质判别

实际编录工作中,上述定理不便直接应用,但根

据上述,可绘制特征三角形来总结结构面迹线侧伏的主要直观规律(可称三角判别法)。为此,结合图2(也可参考后文图3),对公式(4)分析进行讨论,其结果如表1所示,其中列出了结构面与坡面交切的关系的各种几何条件,及其迹线侧伏特征。

表1 结构面侧伏特征简易判别表

分区 分界*	判别式	相对坡面几何特征			判别图
		倾向	侧伏	坡度	
(1)区	$0 < \tan\beta_s/\tan\beta_d < \cos\Delta\alpha < 1$	外倾	反向	更陡	
线③	$0 < \tan\beta_s/\tan\beta_d = \cos\Delta\alpha < 1$	外倾	竖直	更陡	
(2-1)区	$0 < \cos\Delta\alpha < \tan\beta_s/\tan\beta_d$ 或 $\tan\beta_d/\tan\beta_s < 1$	外倾	同向	更陡或缓	
弧④	$0 < \cos\Delta\alpha = \tan\beta_d/\tan\beta_s < 1$	外倾	同向	更缓	
(2-2)区	$0 < \tan\beta_d/\tan\beta_s < \cos\Delta\alpha < 1$	外倾	同向	更缓	
线⑤	$\Delta\alpha = 90^\circ$	直交	同向	—	—
(3)区	$\Delta\alpha > 90^\circ$	内倾	同向	—	—
弧⑥	$\beta_d = \beta_s$	任意	等角	相等	—

注: *分界线指后文图3所标注的特殊线,分区号同图1、图3。

由表1及前述分析的总结,可大致得出以下定性的侧伏规律:

(1)迹线反向侧伏的结构面必为倾角陡于坡面之外倾结构面,且侧伏角必大于同走向直立面交于坡面的侧伏角 δ_\perp 。

(2)等角侧伏的两面交线,倾伏向平分两面倾向夹角,且在各面内的侧伏角 δ_e 相等:

$$\delta_e = \arctan\left(\tan\frac{\Delta\alpha}{2}\cos\beta_d\right)^{-1} \quad (6)$$

(3)内倾结构面迹线均为同向侧伏,且侧伏角必小于同走向直立面迹线的侧伏角 δ_\perp 。

交于坡面的直立面迹线的侧伏角由下式确定:

$$\tan\delta_\perp = \frac{\tan\delta'}{\cos\beta_s} = \frac{\tan\Delta\alpha_\perp}{\cos\beta_s} \quad (\beta_s \neq 90^\circ) \quad (7)$$

式中 $\Delta\alpha_\perp$ 为直立面与坡面的走向(锐)夹角; δ_\perp 为直立面在坡角为 β_s 的坡面上的侧伏角;侧伏向与其走向位移方向相同。上式与万禄进等提出的侧伏角公式是一致的^[7]。

将式(4)代入式(3)

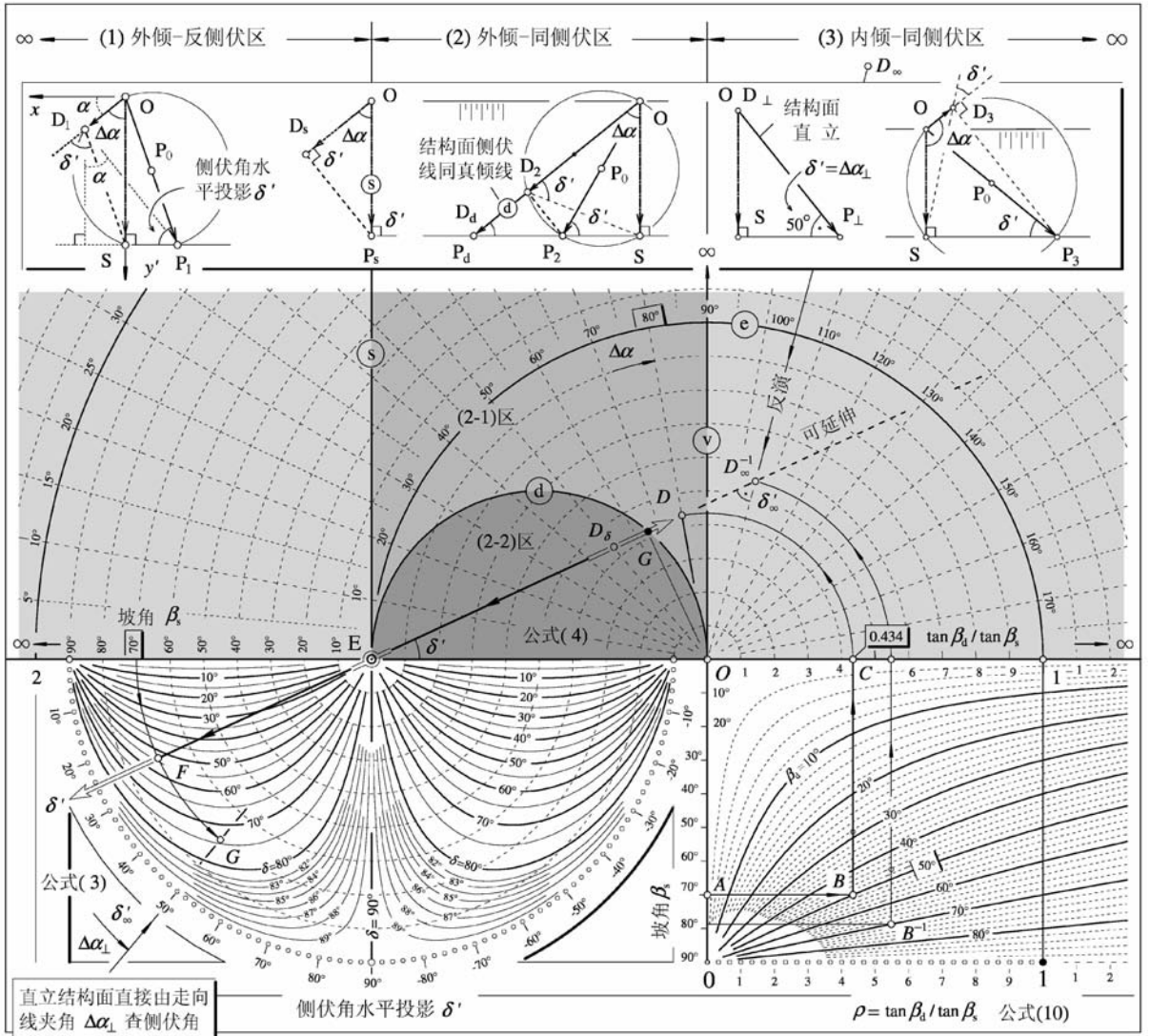


图3 侧伏角换算诺模图

Fig. 3 Nomograph to determine pitch of discontinuity trace

界线——⑤—— 竖直侧伏角=90° —⑥——走向直交,内外倾界线 —⑦—— 出露真倾线 —⑧—— 等角侧伏,β_d=β_s

例1: α_s∠β_s=28∠70, α_d∠β_d=308∠50; Δα=306-(308-28)=80, tanβ_d/tanβ_s=0.434, 经 ABCDEF 查得侧伏角 δ=53±(值 53.5°)

例2: 记出点为 D_∞ (如 α_d∠β_d=133.2∠78.7), 在右下图互换 β_s、β_d 值, 由 B⁻¹ 点查得 ρ⁻¹=tanβ_s/tanβ_d=0.548, 得其反演点 D_∞⁻¹, 则 δ'_∞=∠OD_∞⁻¹E=180-Δα-∠D_∞⁻¹EO=180-105.2-24.8=50° 并在左下图查得 G 点, δ=74±, 可克服图幅限制, 查询全域。

$$\tan \delta = \frac{\sin \Delta \alpha \tan \beta_d}{\sin \beta_s - \cos \Delta \alpha \cos \beta_s \tan \beta_d} \quad (8)$$

并令 β_s → 90° 得直立剖面内视倾角公式如下,

即

$$\tan \beta'_d = \lim_{\beta_s \rightarrow 90^\circ} \tan \delta = \sin \Delta \alpha \tan \beta_d \quad (9)$$

式中 β'_d 就为剖面上结构面的视倾角; Δα 为结构面与剖面的走向夹角。

以此为据, 可见直立剖面上的视倾角换算公式可看作侧伏角计算公式(8)的特例, Witke 著有相应的一种视倾角换算诺模图^[13]。

5 现场调查应用

5.1 侧伏角换算诺模图

侧伏角大小的计算虽然可以用公式及吴氏网赤平投影方便地求解^[13, 14], 但现场重复工作多, 更主要的是不易直观总结交线侧伏分布规律。因此, 为便于分析规律及现场应用, 如文献[13]那样, 可编制一套诺模图以供查询计算。

由公式(7)可知, 决定结构面迹线侧伏角 δ 的

因素有三个 ($\beta_s, \beta_d, \Delta\alpha$ 等), 编制单张曲线图或几个表格难以实现众多的数据组合。因此, 式(7)的结合推导过程及相关公式的几何含义, 可用分步骤, 多图结合的办法来编制图表形式。简要过程如下:

(1) 令 $\rho = \tan\beta_d / \tan\beta_s$, 则

$$\begin{aligned} \tan\beta_s &= f(\rho) = \tan\beta_d / \rho \\ \rho &\in (0, \infty) \quad \beta_d = \text{const} \end{aligned} \quad (10)$$

据式(9)可在 $\beta_s - \rho$ 直角坐标系中, 编制 $\beta_d = \text{const}$ 的等值线, 便于查询 $\rho = \tan\beta_d / \tan\beta_s$ 。

(2) 根据公式(3)及几何意义, 可以 $\Delta\alpha$ 为极角, ρ 为矢径、OE 为极轴建立极坐标系, 在其中形成判别三角形 $\triangle ODE$, $\angle OED$ 即为侧伏角的水平投影角。

(3) 根据公式(4)在以 δ' 为极角、 β_s 为极轴的极坐标系中(类似于极等角度赤平投影网)编制侧伏角 $\delta = \text{const}$ 的共点图(图3)。作 DE 延长线交于 β_s 值所在的圆弧于 F 点(DEF 共线原理), 再根据共点原理查侧伏角度大小。

上述编制方案形成的是一套共点-共线综合型的诺模图。它充分利用了特征三角形的性质, 由其内在的几何-三角关系来实现图表查询。其实, 在图3中的 $\Delta\alpha - \rho$ 半无限空间中, 可比表1更清楚地反映 δ' 的全场分布及一些明显、易记的特殊分界线; 有关结构面侧伏分布特征的分区结果已汇总于图中, 故了解 D 点所在大致区域, 就可大概了解结构面相对于坡面的几何特征。

根据图3中示例1, 已知坡面与结构面产状, 既可查得迹线侧伏角。但是如图3例2, 由于 $\rho = 1.83$ 、 $\Delta\alpha = 105.2^\circ$, 即图上 D_∞ 点。此时通过 D_∞ EG(共线)来查图就不方便了。但是, 可以在 $\beta_s - \rho$ 直角坐标系中, 互换 β_s 、 β_d 的值由 B^{-1} 点查得 ρ 的倒数 $\rho^{-1} = 0.548$, 可得 D_∞^{-1} 点, 据特征三角形的性质, 此时侧伏角的投影 δ'_∞ 为:

$$\delta'_\infty = \angle OD_\infty^{-1}E = 180^\circ - \Delta\alpha - \angle D_\infty^{-1}EO \quad (11)$$

其中 $\angle D_\infty^{-1}EO$ 可由 $D_\infty^{-1}E$ 延长线在量角弧尺上读得, 则由 G 点查得 $\delta = 74^\circ$ 。实际上, 由于 $O, D_\infty, D_\infty^{-1}$ 三点共线, 且

$$OD_\infty \cdot OD_\infty^{-1} = \rho \cdot \rho^{-1} = r^2 = 1 \quad (12)$$

根据数学手册中反演^[12]的概念, D_∞, D_∞^{-1} 点互为反演点, 其反演中心为 O 点、反演圆为圆弧 \odot 、反演半径为 $r = 1$ 。由此可见, 根据上述反演变换的操作, 可以克服 D_∞ 位于反演圆弧 \odot 以外的空间中, 受图幅限制而难以查图的缺陷, 同时也像吴氏网赤平

投影那样, 保证了在一定精度下得以查询所有可能方位结构面迹线的侧伏角。熟悉这些操作后, 可将 DEF 线看做一端(D 端)可适当延伸的绕 E 点转动的指针, 根据已知数据, 像旋转赤平投影网那样转动指针(可用直尺等代替)即可查询。

与图1c中相对应, 图3中 $\Delta\alpha - \rho$ 半无限空间同样可划分三个区域, 并由结构面及其迹线侧伏特征分别命名为:(1)外倾-反侧伏区、(2)外倾-同侧伏区、(3)内倾-同侧伏区。同时, 界线 $\textcircled{5}$ 与圆弧 $\textcircled{4}$ 互为关于圆弧 $\textcircled{3}$ 的反演, (1)区对应的反演区为半圆弧 $\textcircled{4}$ 之内, 即是说, 反演点 D_∞^{-1} 位于该区((2-2)区), 可知其迹线必反向侧伏。通过反演变换后, 可以看出自然界中, 结构面迹线发生反侧伏的概率 $P_{\text{反}} = \text{半圆弧}\textcircled{4}$ 的面积与半圆弧 $\textcircled{3}$ 面积的2倍之百分比 = 12.5%。所以正如前面指出, 同侧伏迹线更为常见(87.5%的机率), 而且, 同地质剖面上界线视倾向判断那样, 用以判断结构面大致倾向象限也就十分频繁, 也最为人们接受, 但需注意反侧伏所致干扰。

5.2 侧伏规律的应用

生产实践中, 难以对所有地质内容都用全站仪实测。通常, 对一般地质内容只用皮尺及罗盘丈量、素描的方法加以展示。具体绘图操作中, 一般以直线来快速抓住迹线的轮廓特征, 对于确有起伏等曲线变化的, 也应在总体(分段)直线轮廓的控制下, 再示以曲线起伏特征。因为直接用曲线勾绘“容易使注意力分散到局部的精确性上而忽略了大体”^[15]。对于一些特殊情况(比如: 坡面不平, 迹线不明), 根据其某一点位及产状来推测侧伏线, 方使上述思想得以具体实现。

对较容易定点、定位的迹线作图而言, 侧伏规律一般仅限于数据校核层次上的应用(迹线倾斜程度应与其侧伏角相匹配), 这些工作可在现场或室内进行, 不必详谈。下面主要就一些特殊现场情况、不易作图条件下的编录问题作一些侧伏规律的相关应用的介绍。

5.2.1 呈切割块体出露的交切节理

由于受多组节理切割的结构体影响, 坡面多起伏不平, 难以单条定位作图(有时同一面多次出现, 呈边缘式(edge)迹线^[10]而无从下手)。这时可根据各组节理的切割关系以其侧伏线示意表达。这时需注意各组节理位置的视间距问题, Wittke、Jason 等人的著作^[13]、^[11]值得借鉴。就简单草绘而言, 可在其

总体分布带内根据主要条数及相对疏密情况来控制线条,虽然每条线都不是精确定位,但正确把握了总体间距分布。同时归纳坡面裂隙的切割及组合模式(图4)及结构面特征,无论对岩体结构特征的认识,还是绘图效果来说,均可提高其资料的准确性以及信息的可交流性,增强实感而不至线条千篇一律、贫乏单调,也利于现场对比复核疏漏。

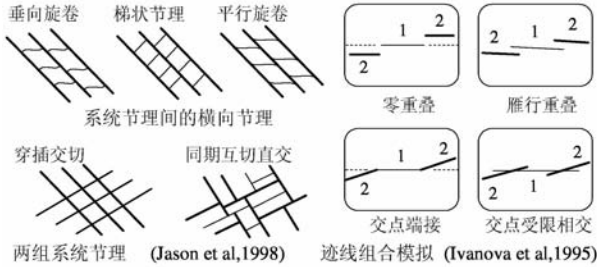


图4 结构面切割及组合的典型模式^[11, 16]

Fig. 4 Typical models of discontinuity trace cutting

5.2.2 跨转折线的结构面

对于跨相交坡面转折段的结构面,一般不仅要表示出结构面在两坡面内的侧伏线,而且对坡面转折(拐)线也要正确表达其交线(拐线)侧伏特征。

唐俊才的研究指出^[8],坑道斜面的转折比直立面的转折更为复杂,边坡开挖面亦是如此。根据现场观察及侧伏规律,一般转折部位的坡形,有如图5所示的几种情况。根据两坡面的产状等几何特征,确定其交线的侧伏角,正确绘出转折部位坡面的展示轮廓(可由设计图纸卡距 Δx , 计算坡面斜长 l 来预先画好)。对于跨转折线的结构面则由侧伏规律来正确绘制(如图5(a,d)中结构面①②)。这样在两坡面内的同一结构面迹线与其产状不会出入很大

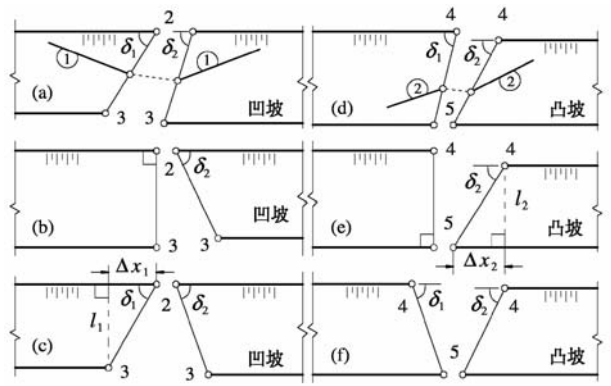


图5 转折坡形及结构面展绘

Fig. 5 Plotting of inflectional slope and discontinuity trace

以致矛盾。

5.2.3 呈光壁外露的结构面

一般顺坡结构面常呈面状出露,为了与构造“光面”相区别,这里用“光壁”一词。对结构面光壁可绘制圈闭边界(正投影)加以记录^[13]。有时其边界的一部分即为侧伏线。为了与线状出露的编号标识区别,这时可在线上光壁所在一侧用面状标识绘图,并附文字描述(注明面积、迹长、间距等)。

5.2.4 共棱线的结构面

两组结构面交线大致接近开挖面时,往往以较规则的结构体棱线出露(结构面也可出露)。这时可用反映两组结构面的侧伏线来区别(如图6中①②组结构面)。图线上一般靠其侧伏角的差异及间距疏密来区别两组面迹线;也可选取侧伏线与棱线近一致的那组结构面用迹线(或棱线)标识(圆弧编号,如图6c中①组),而另一组可用带圈闭正投影范围的同线面状标识(方框编号,同上②组)。若确实无法区别开,则用其它办法(比如:不同组结构面的

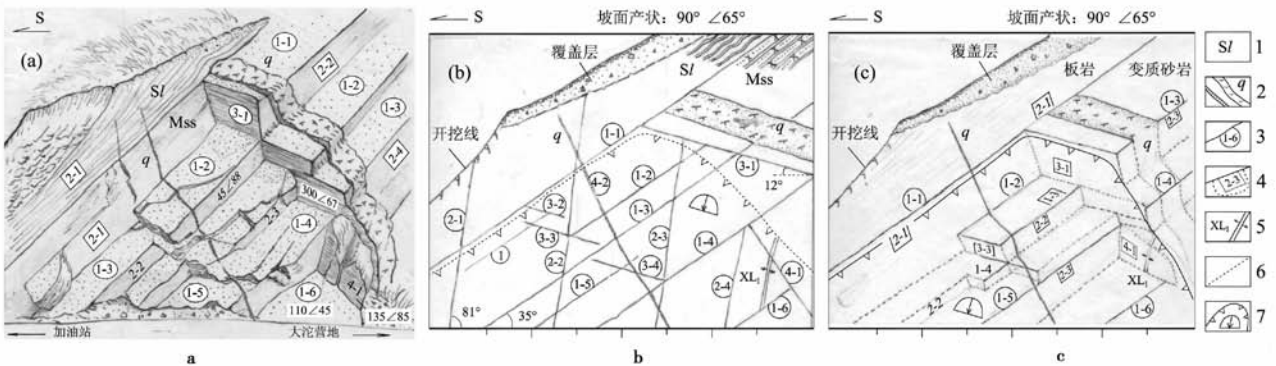


图6 边坡开挖岩体结构面编录示例(工程地质描述略)

Fig. 6 Illustration to mapping discontinuities of slope rock masses on exposed surface

a. 不平整坡面素描; b. 按侧伏线展绘(较抽象); c. 凹腔内外共棱光壁草绘

1. 岩石代号; 2. 石英脉(条带); 3. 线状标识结构面; 4. 面状标识结构面; 5. 卸荷裂隙; 6. 辅助识别线; 7. 滑塌空腔及范围

迹线平行侧伏时,可在迹线(棱线)两侧均用面状标识,再附相关文字说明)。

5.2.5 局部凹腔内的结构面

若坡面较平整时,滑塌、超挖等凹腔内的结构面原本不一定出露,而且一旦出露则多呈不同方位的光壁,有利于观测更多的岩体结构特征,但不便图示记录(图6)。此时根据的重点,可由包括上述侧伏规律应用在内的多种方法综合表达,并注明凹腔边界(投影);但同一内容的图件的形式可能不近一致,特别是边界内外同一结构面也有所区别。

综上,以忠实岩体结构特征为目的,配合文字描述,图示表达等结构面编录工作法无常法,在实践中选取哪种方法要灵活掌握。如图6b可用于一般编录统计,图6c更具实感,对破坏模式反映直观;需要更突出地表达某些典型的现象则可素描。

6 相关校核讨论

6.1 产状要素校核、反推

一般地,对那些非接触结构面迹线(坡顶高位、远距者)来说,通过 Sturzenegger & Stead、Lemy 等、Reid & Harrison 等介绍的坡面图形、图像处理以及 Bulut & Tüdes 报道的现场测绘等方法,所得其总体侧伏角信息是较可靠的^[17,10,18,19]。Kemeny & Post 还专门研究过由结构面迹线图中结构面方位的问题^[20]。施工地质数码影像等编录方法中(如刘新中等^[21])肯定也少不了现场的基本认识判断的配合。可见,无论现场还是室内的图形图像处理均要面临的问题之一就是校核、反推产状要素。现场校核判断可使数据更为可靠,而室内反推则使信息更为全面。这里主要谈谈从侧伏迹线复核、反推结构面某一产状要素的问题。

6.1.1 由 δ 及 $\Delta\alpha$ 求倾角 β_d

当结构面产状要素中倾向较可靠时,已知 $\Delta\alpha$, 由公式(7)变换得

$$\tan\beta_d = \frac{\sin\beta_s \tan\delta}{\sin\Delta\alpha + \cos\Delta\alpha \cos\beta_s \tan\delta} \quad (13)$$

由此复核所得的结构面倾角 β_d 单值,诺模图上也可求得唯一的 D 点,但要根据倾向判断是同向还是反向侧伏以决定 δ' 的正负。

6.1.2 由 δ 值及倾角 β_d 求倾向

根据公式(3)可得

$$\tan\delta' = \cos\beta_s \tan\delta \quad (14)$$

已知 δ' 、 $\tan\beta_d$ 、 $\tan\beta_s$, 通过解特征三角形有:

(1) 当 $\tan\beta_s \sin\delta' < \tan\beta_d$ 时, $\Delta\alpha$ 有两解; 一种情况是缓于坡面 ($\beta_d < \beta_s$) 的两同侧伏结构面。从图3例1来看,相当于从 F 点及 C 点反推 D 点,但 D_s 点也满足已知条件,但相应的 $\Delta\alpha_s$ 为 50° 左右,且均为外倾-同侧伏结构面; 在诺模图(图3)中的关系为 D、 D_s 点关于 DE 与弧④的交点中心对称,即

$$(\Delta\alpha + \Delta\alpha_s)/2 = 90^\circ - \delta' \quad (15)$$

尚需考虑的另一种情况是,两解之中一者为陡于坡面的同侧伏结构面,一者为反侧伏(因为 δ' 的符号未定,可能为钝角);

(2) 当 $\tan\beta_s \sin\delta' = \tan\beta_d$ 时, $\Delta\alpha = 90^\circ - \delta'$ (在诺模图(图3)中 D 点位于④弧);

(3) 当 $\beta_s = \beta_d$, $\delta' \neq 90^\circ$ 时, $\Delta\alpha = 180^\circ - 2\delta'$ (在图3中 D 点位于③弧); 若 $\tan\beta_s \sin\delta' > \tan\beta_d$ 时,说明数据矛盾无解。

总之,根据结构面倾角 β_d 来复核其倾向要复杂得多: 不仅 $\Delta\alpha$ 的解具多解性,而且其方向(相对于边坡倾向)也有两种可能,更无法判断是同向还是反向侧伏。这也是前面图1中选取共走向的结构面来分析的原因。

6.2 多解性所致误判

从上面的分析可顺便了解到由 δ 及结构面实测倾向 ($\Delta\alpha$) 来校核其倾角 β_d 更易操作,可见倾向的准确性具有重要的实际意义。同时还可看出,根据迹线侧伏角来校核孤立出露的外倾同侧伏结构面的总体产状时(光壁出露或跨转折端的迹线可通过多点拟合校核全部要素),如前所述,从诺模图(图3)上看, D 点越靠近半圆弧④也就存在越相近的 $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\alpha_s$ 都满足被校核的 β_d 值。也就是说,有一定的倾向误判(不是误差)可能会被误差覆盖是校核不出来的,隐蔽性很强。比如图中例1,现场测量误差姑且不计, $308^\circ \angle 50^\circ$, $338^\circ \pm 50^\circ$ 的两节理在 $28^\circ \angle 70^\circ$ 的展示面上均有相同角度的侧伏线。两节理倾向相差 30° , 在现场罗盘实测可能不会误判,对于非接触的孤立迹线进行判断时,可能就无能为力了,特别是进行图像图形解译反推其方位时应特别注意。若上述倾向相差更小恐怕罗盘实测也可能误判,而又检测不出来。从诺模图(图3)上看,其总的误判趋势在于其特征三角形的 D 点越靠近半圆弧④且越趋向于 E 点,越不易判断。

6.3 特征三角形反映的倾伏关系

将图2中直角 ΔOSP 同样地变换到 $\Delta OS'D'$ 中,

可以发现反映交线倾伏规律 OP 正好为 $S'D'$ 边的高 OP' , 且 $\angle P'OS'$ 夹角即迹线倾伏向与坡面倾向夹角 $\Delta\theta(\delta'$ 的余角), 并有如下关系

$$\tan\gamma = \sin\delta' \tan\beta_s = \cos\Delta\theta \tan\beta_s \quad (16)$$

式中 γ 为迹线倾伏角。

具体到图 3 的诺模图中 DE (含延长线) 与半圆弧 \textcircled{d} 的交点 G 即可反映倾伏要素, 而弧 \textcircled{d} 所在的圆周即反映了所有交切关系的倾伏规律。

总之, 在现场一定要对记录的结构面及其迹线方位判断准确, 对于那些外倾同侧伏及顺坡结构面校核实测的数据时, 也要注意多解性导致的误判。如 Hudson & Cosgrove 所建议的那样^[22], 构造地质知识及现场构造认识, 可以丰富方位判断的经验, 还可利用倾伏要素加以校核。

7 结 论

(1) 结构面迹线侧伏性质

结合交切关系, 结构面迹线在坡面的侧伏现象可分为同(向)侧伏、反(向)侧伏两种情况。反侧伏现象出现机率较小, 较为特别, 具有以下性质:

①侧伏向与结构面在边坡走向剖面内视倾向相反;

②均为倾角大于坡角的外倾结构面(必要条件);

③以两面倾向夹角 $\Delta\alpha$ 为顶角而 $\tan\beta_d, \tan\beta_s$ 为其两边的特征三角形中, 其 $\tan\beta_d$ 边的对角为钝角(充分必要条件);

④倾向位移 Δd 小于走向位移 Δs , 且方向相反;

⑤坡面倾向介于结构面倾向与其迹线倾伏向之间;

⑥迹线比同走向直立面迹线陡, 即侧伏角更大。

与之相区别的现象则为同向侧伏, 较为常见; 内倾结构面迹线均同向侧伏, 且倾向位移 Δd 与走向位移 Δs 方向相同, 其和就为迹线两端点在边坡走向上的平距, 故比同走向直立面迹线更缓, 即侧伏角更小; 等倾角的两面交线, 不仅在两面内都互为同向侧伏, 而且侧伏角也相等, 故称等(角)侧伏。外倾结构面迹线侧伏规律更富于变化, 需用特征三角形等方法加以判别。

(2) 根据产状要素的三角函数关系演化的特征三角形分析, 可简易判断迹线侧伏性质, 故称三角判别法; 再结合图 3 所示的诺模图可定量确定侧伏角度, 反演操作可克服图中图幅限制, 查询全域。

(3) 利用侧伏规律可以解决多组结构面呈光壁或共棱线等不规则露头的特殊情况绘图难题, 也可适当地由侧伏角反推结构面方位(注意由倾角校核、反推倾向时, 存在的多解性)。据相对特殊情况的侧伏陡缓关系, 利于简便而合理地勾绘迹线。

(4) 从坡面露头调查数据的资料检查、数据闭合及方位反推等意义上看, 结构面产状的倾向要素倍显突出, 应在现场全方面准确判断。

总之, 结合结构面相对边坡的倾向关系及其迹线在坡面侧伏特点, 可更为准确地描述其交切出露关系。以此为划分依据, 就有外倾-反侧伏、外倾-同侧伏、内倾(同侧伏)等常见的三类结构面。与其它不均维延展地质体(矿体)产状描述类似, 应用侧伏术语, 可在一定程度上客观地描述坡面揭露的最大延伸方向偏离其倾向的特殊非线性型(共棱、光壁等)结构面出露产状。

致 谢 在紫坪铺、小湾、锦屏一级等水电工程开挖期间, 现场得到相关业主、设计、施工等单位的便利协作, 丰富了本文的实践基础, 笔者在此谨示感谢。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国电力行业标准编写组. 水电水利工程边坡设计规范(DL/T 5353-2006) [S]. 北京: 中国电力出版社, 2007. Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Design Specification for Slope of Hydropower and Water Conservancy Project (DL/T 5353-2006) [S]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2007.
- [2] 中华人民共和国水利行业标准编写组. 水利水电工程施工地质勘察规程(SL 313-2004) [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005. Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Geological Code of Construction Period for Water Resources and Hydropower Project (SL 313-2004) [S]. Beijing: China WaterPower Press, 2005.
- [3] 中华人民共和国电力行业标准编写组. 水电水利工程施工地质规程(DL/T 5109-1999) [S]. 北京: 中国电力出版社, 2000. Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Geological Code of Construction Period for Hydropower and Water Resources Project (DL/T 5109-1999) [S]. Beijing: China Electric Power Publishing House, 2000.
- [4] R. H. Beckwith. Fault problems in fault planes. Bulletin of the Geological Society of America, 1947, **58**(1): 79 ~ 108.
- [5] H. J. Park, T. R. West. Sampling bias of discontinuity orientation caused by linear sampling technique. Engineering Geology, 2002, **66**(1-2): 99 ~ 110.
- [6] D. Marcotte, E. Henry. Automatic joint set clustering using a mix-

- ture of bivariate normal distributions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, **39**(3): 323 ~ 334.
- [7] 万禄进, 刘传侦, 冯德志. 倾向、倾角和倾伏向、倾伏角、侧伏向、侧伏角、侧余角的关系——以面理在斜井硐顶的迹线的描绘方法为例[J]. *地质与勘探*, 2000, **36**(3): 8 ~ 10.
Wang Lujing, Liu Chuanzhen, Feng Dezhi. Relations among dip direction, dip angle, pitch direction, pitch angle, rake direction and rake angle take the drawing method of planar joint track in inclined shaft roof as an example. *Geology and Prospecting*, 2000, **36**(3): 8 ~ 10.
- [8] 唐俊才. 关于倾斜坑道地质编录方法的讨论[J]. *四川地质学报*, 2005, **25**(3): 186 ~ 189.
Tang Juncai. A discussion on the methodology for geological logging of inclined gallery. *Acta Geologica Sichuan*, 2005, **25**(3): 186 ~ 189.
- [9] 国家电力公司昆明勘测设计研究院. 小湾水电站施工地质手册(试行)[R]. 昆明: 国家电力公司昆明勘测设计研究院, 2001, 56 ~ 58.
Kunming Hydroelectric Investigation Design and Research Institute under State @Power Corporation. *Geological Manual of Construction Period(Trail)*[R]. Kunming: Kunming Hydroelectric Investigation Design and Research Institute, 2001, 56 ~ 58.
- [10] F. Lemy, J. Hadjigeorgiou. Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2003, **40**(6): 903 ~ 917.
- [11] Jason C. Ruf, Kelly A. Rust, Terry Engelder. Investigating the effect of mechanical discontinuities on joint spacing. *Tectonophysics*, 1998, **295**(1-2): 245 ~ 257.
- [12] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
Compilation Group for Handbook of Mathematics. *Handbook of Mathematics*. Beijing: Higher Education Press, 1979.
- [13] Walter Wittke(Translated by Richard Sykes). *Rock Mechanics-Theory and Applications with Case Histories*. Berlin; New York: Springer-Verlag, 1990, 591 ~ 672.
- [14] Duncan C. Wyllie, Christopher W. Mah. *Rock Slope Engineering Civil and mining*(4th edition)[M]. New York: Spon Press or Taylor & Francis Group, 2004, 22 ~ 45.
- [15] 蓝淇锋, 宋姚生, 丁民雄, 等. 野外地质素描[M]. 北京: 地质出版社, 1979, 35 ~ 45.
Lan Qifeng, Song Yaosheng, Ding Minxiong, et al. *Field Geological Sketch*. Beijing: Geological Publishing House, 1979, 35 ~ 45.
- [16] Herbert H. Einstein. Risk and risk analysis in rock engineering. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, **11**(2): 141 ~ 155.
- [17] M. Sturzenegger, D. Stead. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*, 2009, **106**(3-4): 163 ~ 182.
- [18] T. R. Reid, J. P. Harrison. A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000, **37**(7): 1073 ~ 1089.
- [19] F. Bulut, S. Tüdes. Determination of discontinuity traces on inaccessible rock slopes using electronic tachometer; an example from the İkizdere (Rize) Region, Turkey. *Engineering Geology*, 1996, **44**(1): 229 ~ 233.
- [20] John Kemeny, Randy Post. Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. *Computers & Geosciences*, 2003, **29**(1): 65 ~ 77.
- [21] 刘新中, 李浩. 施工地质数码影像编录系统开发与应用[J]. *水文地质工程地质*, 2005, **40**(4): 93 ~ 96.
Liu Xinzhong, Li Hao. Development and application on construction geological digital image sketch system. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2005, **40**(4): 93 ~ 96.
- [22] J. A. Hudson; J. W. Cosgrove. Integrated structural geology and engineering rock mechanics approach to site characterization. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, **34**(3 ~ 4): 577 ~ 577.