

岩体稳定分析的赤平投影方法

石 根 华

摘 要

在岩体工程的施工中,如何准确地判断要塌方,这是岩体工程的设计与施工时十分注意的问题。本文根据地质力学原理将岩体的主要结构面分成若干组,使组内结构面大致互相平行。然后,用全空间赤平投影把每组结构面投影成一个圆,在投影面上研究空间结构面和临空面的相互切割关系,来分析塌方。

在隧洞、地下厂房及边坡等岩体工程的施工中,岩石塌方不仅影响施工进度,而且威胁施工人员的安全,并使工程造成很大的浪费。因此,如何防止塌方并给出一种能够准确地推断塌方的简便方法,作为设计和施工的依据,就成了岩体工程中经常碰到而又急需解决的问题。解决这一问题的关键是确定岩石采取什么样的模型。

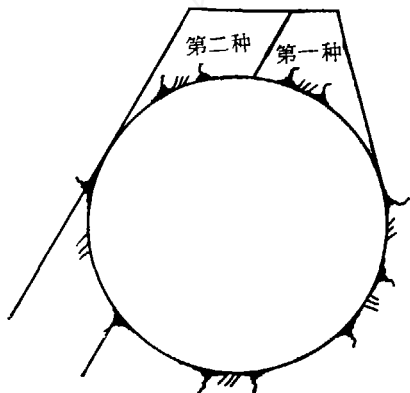


图 1

在岩体上开挖,塌滑体可分两种:一种是在临空面上直接可以发生塌滑的塌滑体,另一种必须在某个塌滑体先塌滑后,创造出新的临空面才能塌滑。因此把第一种塌滑体加固就可以保证整个岩体的稳定。就可以防止随着塌方临空面加大,而临空面的扩大又引起了新的塌方这种恶性循环的情况(见图1)。

本文的目的就是求出所有可能的第一种塌滑体的存在形式即塌滑形式,计算出相应的塌滑力,作为加固岩体的依据,进而讨论边坡方向、坡度的选择,地下厂房方向的选择,隧洞方向、断面的选择,使塌方尽量减少。

一、结构面的赤平投影表示

1. 坐标系 本文规定坐标系 $Oxyz$: x 轴向北, y 轴向东, z 轴铅直向上。记 u, v, w 分

本文 1974 年 8 月 30 日收到, 1976 年 7 月 17 日收到修改稿。

别为三个方向的单位向量。

2. 走向角和倾角 讨论岩体稳定时, 首先按地质编号录将结构面分组, 组内的结构面相互平行。对每一组结构面 P_i 规定: 它的倾角 α_i 是 P_i 指向上的法线与 z 轴的夹角, 走向角 β_i 是 x 轴正方向顺时针到 P_i 指向上的法向量在水平面的投影向量的夹角加 90° 。 α_i, β_i 可用罗盘在野外直接测得, 并唯一地决定了 P_i, P_i 的垂直向量为:

$$\pm [\sin \alpha_i \sin \beta_i, -\sin \alpha_i \cos \beta_i, \cos \alpha_i].$$

3. 赤平投影 向赤道平面上投影称赤平投影, 简称投影。先有一个以原点为中心, R 为半径的球面:

$$x^2 + y^2 + z^2 = R^2,$$

任一个由原点出发的向量 \mathbf{g} 交球面于一点, 该点与球极 $(0, 0, -R)$ 的连线交赤道平面 $z = 0$ 于一点 g , 即 \mathbf{g} 或 \mathbf{g} 的方向的投影。赤道平面的点与空间的方向通过投影建立了一一对应的关系。记 $-\mathbf{g}$ 的投影为 g' , 则有

$$R^2 = \overline{Og} \cdot \overline{Og'}, \quad \overline{Og} = R \tan \left(45^\circ - \frac{\alpha}{2} \right), \quad \overline{Og'} = R \tan \left(45^\circ + \frac{\alpha}{2} \right).$$

α 是 \mathbf{g} 的倾角(见图2)。把向量符号去掉(即将黑体改为普通体)表示它的投影, 加“'”时表示相反方向的投影。

4. 投影圆 一组结构面、一个临空面或其他平面的投影是把它们平移成过原点的平面 P , P 与球面交于一圆, 该圆诸点与球极 $(0, 0, -R)$ 的连线交赤道平面 $z = 0$ 于一圆周 (P 倾角 90° 时为一直线), 就是它们的投影。一个或一组平面 P_i 的投影圆简称 P_i 圆。下面求投影圆的中心和半径。

设 $(x, y, 0)$ 为赤道平面上任一点, 球极 $(0, 0, -R)$ 与 $(x, y, 0)$ 的连线交球面于点 $[xt, yt, (t-1)R]$, 并且

$$x^2 t^2 + y^2 t^2 + (t-1)^2 R^2 = R^2, \quad t = 2R^2 / (x^2 + y^2 + R^2).$$

设 P 的倾角为 α , 走向角为 β , 则 P 的方程是:

$$x \sin \alpha \sin \beta - y \sin \alpha \cos \beta + z \cos \alpha = S,$$

为了广泛起见, 这里 P 可以不过球心。由于 $(xt, yt, (t-1)R)$ 在平面 P 上, 所以有投影方程

$$\frac{2R^2 x \sin \alpha \sin \beta}{x^2 + y^2 + R^2} - \frac{2R^2 y \sin \alpha \cos \beta}{x^2 + y^2 + R^2} + \left(\frac{2R^2}{x^2 + y^2 + R^2} - 1 \right) R \cos \alpha = S.$$

当 $S + R \cos \alpha = 0$, 即 P 通过 $(0, 0, -R)$ 点时, 投影方程化为一直线:

$$x \sin \alpha \sin \beta - y \sin \alpha \cos \beta + R \cos \alpha = 0;$$

当 $S + R \cos \alpha \neq 0$, 投影方程化成一个圆方程:

$$\left(x - \frac{R^2 \sin \alpha \sin \beta}{S + R \cos \alpha} \right)^2 + \left(y + \frac{R^2 \sin \alpha \cos \beta}{S + R \cos \alpha} \right)^2 = \frac{(R^2 - S^2) R^2}{(S + R \cos \alpha)^2}.$$

在圆方程中令 $\beta = 0^\circ, S = 0$ 就是走向南北的平面的投影, 它的中心和半径是

$$(0, -R \tan \alpha), \quad R / \cos \alpha.$$

只要按走向角转动一下, 任何走向的平面的投影圆都可以根据这个公式作出来, 这时 $-R \tan \alpha$

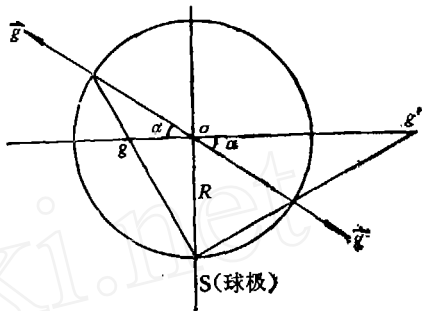


图 2

为投影圆的中心与球心的距离。

5. 赤平投影网 赤平投影网简称投影网。计算空间平面和直线间的角度关系通常用投影网。投影网是垂直于 x 轴的一族平面和过 x 轴的一族平面

$$x = R \sin n\delta, -y \sin n\delta + z \cos n\delta = 0, n = 0, \pm 1, \dots, \pm 90^\circ/\delta$$

(δ 取 $2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ 等)的投影,由投影圆、它们的中心和半径分别为:

$$(R/\sin n\delta, 0), R/\tan n\delta; (0, -R \tan n\delta), R/\cos n\delta.$$

第一族叫横向圆,第二族叫纵向圆。图 3 为 -10° 投影网赤道圆内部分。

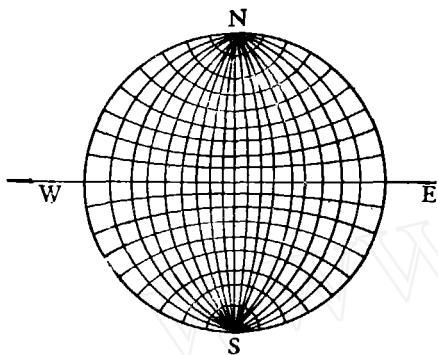


图 3

6. 半空间 结构面和临空面都看作平面。一个平面 P_i 把空间分成两个半空间,包含 w 向量的叫上盘,另一个叫下盘。半空间所有方向的投影就是它的投影。按投影圆, P_i 的上盘投影是 P_i 圆内部区域,下盘投影是 P_i 圆外部区域。 g_i 是 P_i 面上与 $-w$ 夹角最小的向量,叫倾向向量,在投影图上,从球心向 P_i 圆心引线,并延伸交 P_i 圆于一点 g_i ,即 g_i 的投影。 g_{ij} 是 P_i, P_j 面交线上指向下的向量,它的投影是 P_i, P_j 圆在赤道圆外的交点 g_{ij} (见投影图 1—3), g_i 和 g_{ij} 常作为滑动方向。

7. 凸体存在的投影条件 由结构面和临空面切割成的半空间的公共部分,如果有界叫凸体,凸体是否存在用投影判断:如果这几个半空间的投影(圆内或圆外区域)有公共点则公共部分无界;若无公共点,则公共部分有界并构成凸体。本文就是以这个判断方法为基础寻找塌滑体的。

二、塌滑体和塌滑力

首先声明,这里讨论的塌方只限于岩块的平行移动,但它概括了绝大多数塌方。对于重心落在支撑面外而造成的倾伏失稳,用本文的方法仅能求出切割孤立体,但倾伏力矩的计算要根据岩体的几何数据,在地下结构中,倾伏失稳是较少的而且一般不难加固。为了能用数学工具求出塌滑形式,我们给出塌滑体 U 的条件。

1. 塌滑体 U 所满足的条件 (1) 边界条件。 U 的表面由平面多边形组成,一种多边形暴露在临空面上叫做临空多边形;另一种属于结构面,它把 U 和 U 以外的母岩切割开来,叫切割多边形。由这个条件可见,一般必须三组结构面交汇才能塌方。因为边界面最少的是四面体,一个在临空面,另三个必然是在结构面上。例如,在片理仅有 1—2 毫米厚的薄层千枚岩中,同样能开挖出成形很好跨度达十几米的隧洞,这是因为层面仅是一组结构面。

(2) 相容条件。存在塌滑方向 g , U 中每一点沿 g 平行移动穿过 U 的表面时,只穿过临空多边形。这样,距临空面远的没有临空多边形的孤立体就不是塌滑体。

(3) 平衡条件。沿重力方向的向量 $-w$ 可以分解为对滑动面的垂直压力及与 g 方向一致的非零力。下面将通过一系列的讨论把这三个条件化成直接推断塌滑体的作图方法。

2. 塌滑体的构造 若 U 满足边界条件,由临空面和结构面切割成孤立体,则 U 满足相容条件的充分必要条件是, U 由有限个凸体组成。每个凸体是临空面和结构面切割的若干个半空

间的公共部分, 这些半空间中, 如果是临空面切割的, 半空间是临空面岩石所在的一侧, 如果是结构面 P_i 切割的, 半空间是 \mathbf{g} 指向的一侧. 以后把这种凸体称为凸块. 我们规定 P_i 的法向量 \mathbf{N}_i 永远指向凸块所在的一侧. 由于地质上的原因, 每组结构面 P_i 的摩擦角可取一样的, 记作 ϕ_i .

3. 塌滑方向 塌滑方向 \mathbf{g} 只有三种可能.

(1) 直接塌落(见图 4). U, \mathbf{g} 满足边界条件和相容条件, 向量 \mathbf{g} 不平行于 U 的任何切割面, 则 U, \mathbf{g} 满足平衡条件的充分必要条件是 \mathbf{g} 与 $-\mathbf{w}$ 方向一致, 即 \mathbf{g} 铅直向下. 此时, U 下落不接触任何结构面. 这种情况发生在隧洞的顶部, 比较危险, 应首先处理这种塌滑体. 我们称这种塌滑方式为直接塌落.

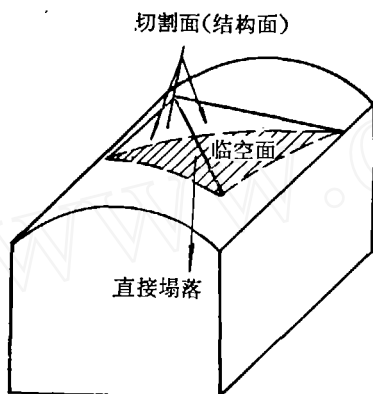


图 4

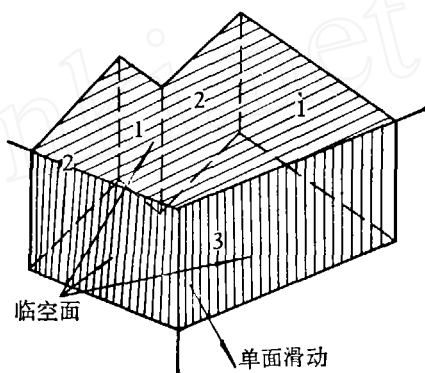


图 5

(2) 单面滑动(见图 5). U, \mathbf{g} 满足边界条件和相容条件, 向量 \mathbf{g} 只与一组切割面平行, 则 U, \mathbf{g} 满足平衡条件的充分必要条件是平行 \mathbf{g} 的一组切割面中有平面 P_i , \mathbf{g}_i 与 \mathbf{g} 的方向一致, $\mathbf{N}_i \cdot \mathbf{w} \geq 0$, 即 U 有在 P_i 上的切割多边形, U 在切割多边形的上盘. 此时, U 塌滑的接触面为 P_i 一组结构面. 我们称这种塌滑方式为单面滑动.

(3) 双面滑动(见图 6). U, \mathbf{g} 满足边界条件和相容条件, 向量 \mathbf{g} 与 U 的两组切割面平行, 则 U, \mathbf{g} 满足平衡条件的充分必要条件是平行 \mathbf{g} 的两组切割面中有 P_i, P_j 面, \mathbf{g} 与 \mathbf{g}_{ij} 的方向相同, $\mathbf{g}_i \cdot \mathbf{N}_i \leq 0, \mathbf{g}_j \cdot \mathbf{N}_j \leq 0$. 这就是说 \mathbf{N}_i 和 \mathbf{g}_i 的夹角, \mathbf{N}_j 和 \mathbf{g}_j 的夹角都在 90° 以上, 如果 U 沿 \mathbf{g}_i 下滑被 P_j 挡住, 沿 \mathbf{g}_j 下滑被 P_i 挡住, 所以只能沿二面交线 \mathbf{g}_{ij} 方向下滑. 此时 U 塌滑的接触面为 P_i, P_j 二组结构面. 我们称这种塌滑方式为双面滑动.

4. 塌滑力 根据力平衡条件求塌滑力. 首先将 U 所受的重力 G 分解成对滑动面的垂直压力和沿 \mathbf{g} 的力, 再将沿 \mathbf{g} 的力与垂直压力形成的, 方向为 $-\mathbf{g}$ 的摩擦力加在一起得出 U 的塌滑力 F (塌滑力为负时不会发生塌滑). 记 G 为 U 的自重.

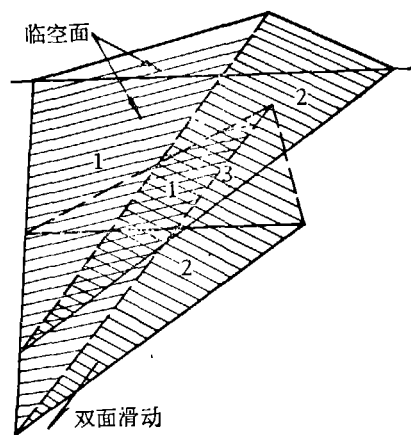


图 6

(1) 直接塌落的塌滑力 $F = G$.

(2) 单面滑动的塌滑力. P_i 是滑动面, U 沿 \mathbf{g}_i 滑动,

$$F = G[\sin \alpha_i - \cos \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i].$$

(3) 双面滑动的塌滑力. P_i, P_j 为滑动面, U 沿 \mathbf{g}_{ij} 滑动, 将重力方向的单位向量分解,

$$-\mathbf{w} = -T_1 \mathbf{N}_i - T_2 \mathbf{N}_j + T_3 \mathbf{g}_{ij}, \quad T_3 > 0, \quad T_1 \geq 0, \quad T_2 \geq 0.$$

则

$$F = G[T_3 |\mathbf{g}_{ij}| - T_1 |\mathbf{N}_i| \operatorname{tg} \phi_i - T_2 |\mathbf{N}_j| \operatorname{tg} \phi_j],$$

其中 $|\mathbf{g}_{ij}|, |\mathbf{N}_i|, |\mathbf{N}_j|$ 是相应的向量长度.

$$\mathbf{N}_i = [A_i, B_i, C_i] = [\sin \alpha_i \sin \beta_i, -\sin \alpha_i \cos \beta_i, \cos \alpha_i],$$

$$\mathbf{N}_j = [A_j, B_j, C_j] = [\sin \alpha_j \sin \beta_j, -\sin \alpha_j \cos \beta_j, \cos \alpha_j],$$

$$\begin{bmatrix} -A_i - A_j & B_i C_j - C_i B_j \\ -B_i - B_j & C_i A_j - A_i C_j \\ -C_i - C_j & A_i B_j - B_i A_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix},$$

可求出 T_1, T_2, T_3 , 再由前面的公式算出 F . 这里 $[G_x, G_y, G_z]$ 是 U 所受外力 \mathbf{G} (不包括接触面给 U 的力) 方向的单位向量. 如果 $[G_x, G_y, G_z] = [0, 0, -1]$, 即 U 只受重力作用时, 解方程得到:

$$\Delta = 1 - [\sin \alpha_i \sin \alpha_j \cos(\beta_i - \beta_j) + \cos \alpha_i \cos \alpha_j]^2,$$

$$T_1 = \frac{1}{\Delta} [-\sin \alpha_i \sin \alpha_j \cos(\beta_i - \beta_j) \cos \alpha_j + \cos \alpha_i \sin^2 \alpha_j],$$

$$T_2 = \frac{1}{\Delta} [-\sin \alpha_i \sin \alpha_j \cos(\beta_i - \beta_j) \cos \alpha_i + \cos \alpha_j \sin^2 \alpha_i],$$

$$T_3 |\mathbf{g}_{ij}| = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} \sin \alpha_i \sin \alpha_j \sin(\beta_i - \beta_j),$$

$$F = G \cdot [T_3 |\mathbf{g}_{ij}| - T_1 \operatorname{tg} \phi_i - T_2 \operatorname{tg} \phi_j].$$

三、塌滑方向和切割锥

有一个被临空面和结构面切割成的孤立体 U , 如果是塌滑体, 按第二节要有一个塌滑方向 \mathbf{g} . 一个孤立体在什么条件下可以形成塌滑体? 它是不是有唯一的塌滑方向? 下面来回答这个问题.

1. 切割锥 孤立体 U 的切割面为 $P_i, i = 1, 2, \dots, m$. 把 P_i 平移到坐标原点, P_i 切割的 \mathbf{N}_i 指向的 (P_i 的指向 U 的法线) 半空间的公共部分是一个以原点为顶点的棱锥, 如果它包含与 $-\mathbf{w}$ 夹角小于 90° 的方向, 就叫 U 的切割锥. 切割锥中有与 $-\mathbf{w}$ 夹角最小的方向, 叫切割锥的最低方向, 而且是唯一的.

2. 最低方向就是塌滑方向 可以证明, 孤立体 U 的切割锥的最低方向 \mathbf{g} 就是塌滑体 U 满足第二节 1 中所提条件的塌滑方向, 因此 \mathbf{g} 只能是一 \mathbf{w} 或 \mathbf{g}_i 或 \mathbf{g}_{ij} , 相应地 U 是直接塌落体或沿 \mathbf{g}_i 的单面滑动体或沿 \mathbf{g}_{ij} 的双面滑动体. 反之, 如果 U, \mathbf{g} 满足第二节 1 中的条件, 则 \mathbf{g} 为 U 的切割锥的最低方向. 这样, 一个存在切割锥的孤立体 U 就是沿切割锥最低方向的塌滑体. 塌滑方向、塌滑力是唯一的, 按第二节求的塌滑力是可靠的.

3. 切割锥的投影图 已知某岩体的结构面为 m 组, $P_i, i = 1, 2, \dots, m$. 不失一般性, 仅讨论下述情况: 即 m 组结构面中每一组都有 U 的切割面. 作所有 P_i 圆并标出 g_i, g_{ij} 点, 则由 P_i 的弧线把投影面分成若干个区域, 每个包含赤道圆外点的区域上唯一地包含 g_i 或 g_{ij} 或无穹远点($-w$ 的投影), 作为区域中距球心最远的点和塌滑方向. 不妨假定 $-w, g_i, g_{ij}$ 互不平行, 则所有 $-w, g_i, g_{ij}$ 的投影与包含赤道圆外点的所有区域在这种关系下形成一一对应. 具体地说, 由第二节的塌滑方向相应地有: (1) 以无穹远点作为最低方向的区域是所有圆以外的部分, 即所有结构面下盘投影的公共部分, 是直接塌落体的切割锥, 标以“ o ”. (2) 以 g_i 为最低方向的区域是沿 g_i 单面滑动切割锥的投影, 是如下区域的公共部分: P_i 圆内, 其他圆所分的 g_i 所在的圆内或圆外部分, 标以“ i ”. (3) 以 g_{ij} 为最低方向的区域是沿 g_{ij} 双面滑动切割锥的投影, 是如下区域的公共部分: P_i 圆所分两部分中 g_i 不在的部分, P_j 圆所分两部分中 g_j 不在的部分, 其他圆所分 g_{ij} 所在的圆内或圆外部分. 在这块区域上标“ ij ”. 这样刚好把包含赤道圆外点的区域标完, 而且标记互不重合(见图7, 9, 12中投影1—3).

4. 临空锥 由塌滑体的构造可知, U 由有限个凸块组成, 形成凸块的半空间是由临空面和结构面切割的. 记 q_1, \dots, q_r 为临空面, 把 q_i 平移到原点, 所有 q_i 切割的岩石所在的半空间的公共部分也是一个棱锥, 叫作临空锥. 作 q_i 的投影, 则凸块的临空锥也是由 q_i 圆的弧线围成的一个区域. 由于凸块是孤立体, 应用凸体存在的投影条件, 它的临空锥投影与切割锥投影没有公共点. 反之, 如果临空锥投影与切割锥投影没有公共点, 则存在这个切割锥的塌滑体, 它包含具有指定临空锥的凸块.

5. 塌滑形式 在一定临空条件下一个切割锥有塌滑体就叫一种塌滑形式, 方法是根据临空条件确定组成 U 的凸块的可能的临空锥. 如果临空锥投影与切割锥投影没有公共点的凸块可以形成给定临空条件下的塌滑体, 则存在塌滑形式, 否则就不存在塌滑形式.

四、平坡和折坡问题

1. 作切割锥 某岩体结构面如表1:

(1) 用第一节投影圆的公式先作 P_i 的投影 P_i 圆(见图7投影1). 例如, 作 P_3 圆时取方位角 $32^\circ-90^\circ$ 即 302° 的赤道圆的点, 再从球心 o 向该点的直线上取距球心 $R \tan \alpha_3 = R \tan 38^\circ$ 的点作中心, 以 $R/\cos \alpha_3 = R/\cos 38^\circ$ 为半径作圆就是 P_3 圆.

表 1

结 构 面	倾 角 α_i	走向角 β_i	$\tan \phi_i$
P_1	71°	262°	0.30
P_2	68°	333°	0.40
P_3	38°	32°	0.75
P_4	13°	73°	0.40

(2) 按第一节半空间的方法标出 g_i 和 g_{ij} . 例如, 由球心向 P_3 圆心连线并延长交 P_3 圆于 g_3 点, P_3, P_2 圆在赤道圆外的交点为 g_{23} . 用投影网求出 g_{ij} 的倾角即塌滑倾角.

(3) 按切割锥的投影图的方法求出所有切割锥. 例如直接塌落锥是所有 P_i 圆外标“ o ”的区域. 沿 g_3 的单面滑动锥是 P_3 圆内, P_2 圆内, P_1, P_4 圆外区域, 这是因为 g_3 在 P_2 圆内, P_1, P_4 圆外. 沿 g_{13} 双面滑动锥是 P_1, P_2, P_3 圆内, P_4 圆外的区域, 这因为 P_1, P_3 是滑动面, g_1 在 P_3 圆外所以切割锥在 P_3 圆内, g_3 在 P_1 圆外, 则切割锥在 P_1 圆内, g_{13} 在 P_2 圆内 P_4 圆外, 所以切割锥在 P_2 圆内 P_4 圆外.

(4) 按塌滑力的方法求出每个切割锥的塌滑力 F (见表2).

表 2

滑动方向	$-\omega$	g_1	g_2	g_3	g_4	g_{12}	g_{13}	g_{14}	g_{23}	g_{24}	g_{34}
塌滑倾角	90°	71°	68°	38°	13°	65°	27°	2°	37°	13°	11°
塌滑方位		172°	243°	302°	343°	214°	252°	261°	315°	328°	18°
F/G	1.0	0.85	0.78	0.02	-0.16	0.73	-0.31	-0.41	-0.10	-0.19	-0.47
塌滑范围	314° -355°	285° -330°	333° -105°	358° -133°		不存在					

2. 平坡问题 (见图 7 投影 1) 一般较平直的边坡都可当作平坡. 要在表 1 所示岩体中开挖走向角 30° , 倾角 60° 的边坡, 求塌滑形式. 把边坡当平面 q_1 作投影, 按塌滑体的构造, 在这种临空条件下塌滑体 U 的每个凸块都有 q_1 上的临空多边形, 而且凸块在 q_1 下盘. q_1 岩石所在的一侧, 即 q_1 圆外是判断区域, 相应的塌滑形式是与判断区域没有公共点的切割锥. 塌滑形式

是沿 g_3 单面滑动, 沿 g_{23} 和 g_{24} 双面滑动的切割锥. 由表 2 可见, 沿 g_{23} 和 g_{24} 滑动的 F 为负值, 沿 g_3 滑动 $F = 0.02G$, 所以实际上只可能出现沿 g_3 的单面滑动体. 由投影 1 可见, 倾角相同但走向角不同的边坡在同一岩体上的塌滑形式不同. 例如, 峡谷河流两岸的自然边坡坡度往往相差很大就是由于这个原因.

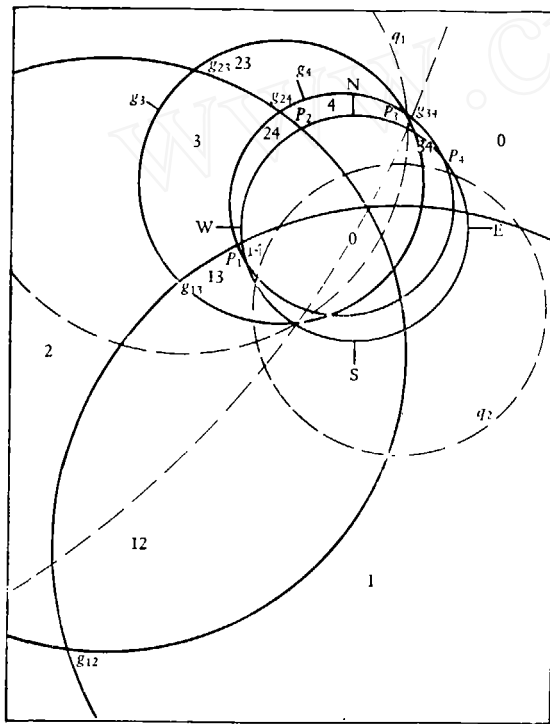


图 7 投影 1

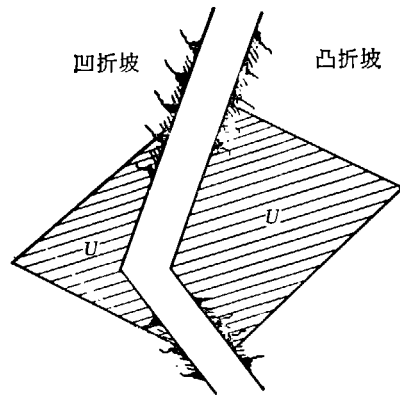


图 8

如果 q_1 的走向角不变, 倾角加大则在赤道圆外 q_1 圆加大, 判断区域减小, 容易发生切割锥与判断区域无公共点的情况, 即塌滑形式增多, 这是符合经验的. 所以岩体坡度的选择应以避免某些塌滑形式为准. 但“坡越缓越稳定”不是绝对的, 如果保持 q_1 的走向角, 将倾角加大时赤道圆内判断区域加大, 例如到 85° , q_1 变成 q'_1 平面, 则沿 g_{23} 的双面滑动锥已不是塌滑形式, 边坡剩了两个塌滑形式, 这在直观上是把塌滑体“削”掉了. 如遇这种情况, 采用陡坡, 既减少开挖又增加稳定.

3. 凸折坡 拱座, 凸出的山嘴, 洞口等可作凸折坡处理. 在表 1 的岩体上有一凸折坡, 两

个临空面 q_1 和 q_2 , q_2 倾角 40° 走向角 240° , 岩体在 q_1 , q_2 下盘的公共部分(见图 7 投影 1 和图 8). 凸折坡上的塌滑体是指同时具有在 q_1 , q_2 上的临空多边形的塌滑体. 按第二节塌滑体的构造组成这种塌滑体的凸块必须以 q_1 或 q_2 或 q_1 , q_2 同时作临空多边形. 这时判断区域是 q_1 , q_2 圆岩石所在一侧的公共部分, 即二圆的圆外部分. 塌滑形式是与判断区域无公共点的切割锥. q_1 , q_2 凸折坡的判断区域小于 q_1 平坡的判断区域, 所以塌滑形式多于 q_1 平坡. q_1 , q_2 凸折坡的塌滑形式有如下切割锥: 沿 g_3 单面滑动, 沿 g_{23} , g_{24} , g_{13} , g_{14} 双面滑动, 比 q_1 平坡多了两种塌滑形式.

4. 凹折坡 齿槽, 地下厂房的墙角等可作凹折坡处理. 在临空锥岩体上有一凹折坡, 岩体在 q_1 下盘, q_2 下盘合起来的部分(见图 7 投影 1 和图 8). 凹折坡上的塌滑体 U 是指同时具有在 q_1 和 q_2 上的临空多边形的塌滑体, 按塌滑体的构造, U 必须同时包括以 q_1 为临空多边形的凸块和以 q_2 为临空多边形的凸块. 它的判断区域是 q_1 , q_2 圆外部分之和. 如果切割锥与判断区域无公共点就是塌滑形式. q_1 , q_2 凹折坡的判断区域较 q_1 平坡大, 所以塌滑形式少, 比较稳定. 在 q_1 , q_2 凹折坡上没有塌滑形式.

五、地下结构的高侧壁问题

本节通过某工程实例说明高侧壁岩体稳定分析方法.

1. 已知条件 岩体中结构面共四组, 与第四节表 1 中不相同的是, $\beta_1 = 255^\circ$, $\beta_3 = 10^\circ$, $\alpha_1 = 45^\circ$, 首先作切割锥. 在此岩体上开挖一个矩形体地下结构, 四壁有长 47 米高 79 米的东侧墙和西侧墙, 长 12 米高 79 米的南端墙和北端墙. 侧墙倾角 90° , 走向角 28° , 端墙倾角 90° , 走向角 118° . 按第四节的方法作四组结构面和侧端墙的投影, 标出切割锥(见图 9 投影 2).

2. 侧墙 侧墙有东、西两个都是平坡, 东侧墙的岩体在它的东侧, 判断区域是侧墙投影直线的东侧, 塌滑形式是沿 g_3 的单面滑动和沿 g_{23} 的双面滑动锥. 西侧墙的判断区域是侧墙投影直线的西侧, 没有塌滑形式.

3. 端墙 端墙有南北两个, 都是平坡. 南端墙的判断区域是端墙投影直线的南侧, 塌滑形式是沿 g_4 单面滑动锥和沿 g_{23} , g_{34} 的双面滑动锥. 北端墙的判断区域是端墙线的北侧, 塌滑形式是沿 g_{12} 和 g_{13} 的双面滑动锥.

4. 墙角 地下结构有四个墙角, 东南角、东北角、西南角、西北角都是凹折坡. 如东南角的判断区域是侧墙线的东侧加上端墙线南侧, 区域很大, 因此只有沿 g_{23} 双面滑动锥一种塌滑形式, 而其他三个墙角都没有塌滑形式.

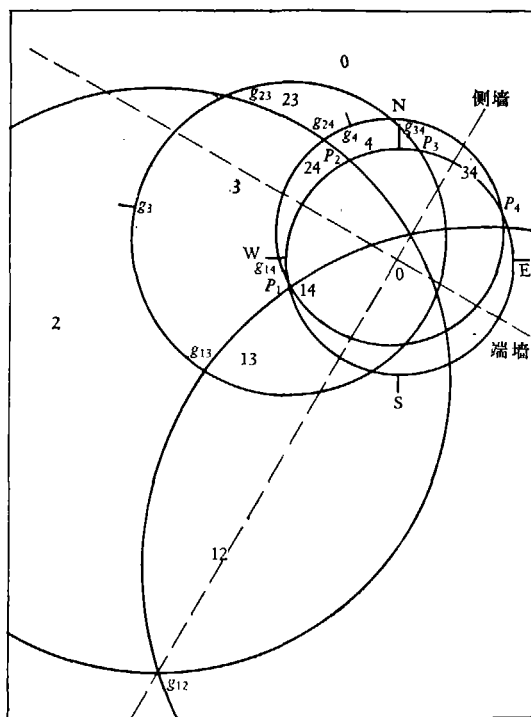


图 9 投影 2

5. 侧墙稳定分析和方向选择的一般原则 (1) 从结构面组合讲, 切割锥和判断区域张开的角度小则不容易有公共部分, 容易存在塌滑形式。

(2) 切割塌滑体的结构面密集, 则出现塌滑体的可能性大。由于结构面不可能绝对密, 求出的塌滑形式实际上不是都有塌滑体。

(3) 即使有塌滑体, F 值为负, 则不发生塌滑, F 值小则很容易加固。

(4) 塌滑体体积关系重大。结构面长、密、临空面大则可能产生很大体积的塌滑体。例如, 相似的凸块, 边长增加到 2 倍则体积增加到 8 倍, 相应的塌滑力也就增加到 8 倍。由于四个墙角几乎没有塌滑形式, 基本不存在同时在两壁下滑的塌滑体, 塌滑体最多只能以四壁的一壁作临空面, 所以可以分别讨论四壁上的塌滑体。根据地质情况, P_1, P_2 结构面延伸长, 基本上贯穿整个地下结构, 侧墙的临空面大, 可以产生巨大塌滑体。端墙宽度 12 米, 不可能产生宽度再大的塌滑体。侧墙是关键, 而沿 g_1, g_2 单面滑动和沿 g_{12} 双面滑动 F/G 值大, U 的体积大, 可以给开挖造成极大困难。选侧墙方向, 使侧墙线通过 g_{12} (见图 9 投影 2), 则东、西侧墙都无这三种最危险的塌滑形式, 因为相应的切割锥和判断区域至少以 g_{12} 为公共点。选方向的一般原则是使判断区域或侧墙的投影与最危险的切割锥尽量靠近。

6. 实践结果 该地下工程断层裂隙既长又多, 地质条件不好, 在侧墙上 P_1, P_2 结构面是平行的。因此按侧墙稳定分析和方向选择一般原则中, 要避免的三种塌滑形式在东西侧墙上均未出现。有塌滑体的塌滑形式是东侧墙沿 g_3 单面滑动体两块, 沿 g_{23} 双面滑动体一块。南端墙沿 g_4 单面滑动体一块, 沿 g_{34} 双面滑动体一块。在西侧墙出现高孤立体, 由 P_1, P_4 的上盘, P_2, P_3 的下盘构成。在投影 2 中可见, P_1, P_4 圆内, P_2, P_3 圆外的公共部分与侧墙线西侧无公共点, 所以这个孤立体能在投影 2 中找到。为了防止它倾伏失稳, 也作为塌滑体处理。上述塌滑形式都在前面预先求得了。在实际施工中是边开挖边作展开图边求塌滑形式, 划出危险区, 在塌滑体未完全暴露还不能塌滑时即进行锚喷。根据塌滑力, 大塌滑体用了深 12 米的锚杆, 其他用深 4 米的锚杆加固, 在广大开挖工人的努力下, 工程安全、快速地完成。

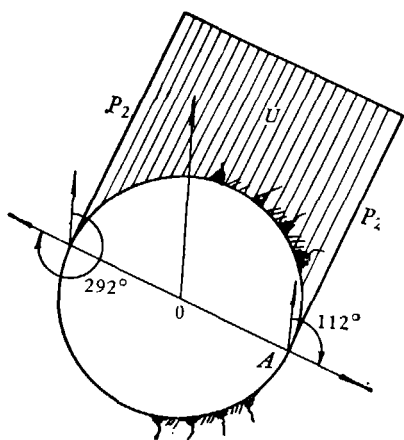


图 10

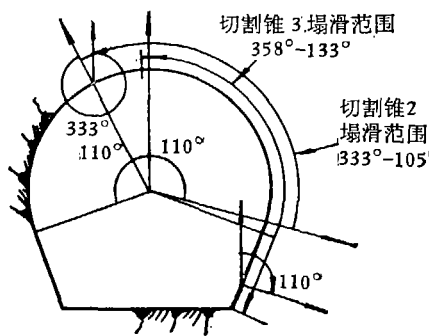


图 11

六、曲临空面和隧洞问题

圆形、方圆形、马蹄形、折线形断面的水平隧洞, 倾斜隧洞和竖井都是常见的地下结构, 断

面大体上是凸形,又都是曲临空面。为讨论塌滑体在隧洞周围出现的部位,用下述方法将洞周边界每一点给一个方位角。

1. 方位角 沿洞轴线选一个前进方向,对隧洞边界上任一点 A 作洞周切线的指向岩石的垂直向量叫该点的方位向量。从铅直向上的向量朝洞轴前进方向看顺时针到每一点的方位向量的夹角叫该点的方位角。方位角从 0° 到 360° (见图10,11)。

2. 塌滑范围 每一切割锥沿一个洞轴线前进方向对应一个塌滑范围,是一个小于 180° 的方位角区间。任一隧洞的任一切割锥的塌滑体,出现在该切割锥的塌滑范围内的洞边界上,如果结构面可以在指定位置上出现,则存在切割锥的占满塌滑范围的塌滑体。所以分析隧洞的岩石稳定,首先要求出每个切割锥的塌滑范围。

3. 求塌滑范围 先讨论水平隧洞,仍然是第四节中的四组结构面(见图12投影3),首先用作切割锥的方法在透明纸上作投影,并标出切割锥算出 F 值。其次作洞轴线前进方向投影标以“ D ”,以及相反方向投影 D' 。将透明纸和投影网(延伸到赤道圆外的)赤道圆心对准并转动,使透明纸的 D 点对准投影网上的 N 点,按投影网选取刚好把切割锥夹在中间的两个纵向圆 q_1, q_2 ,并读出它们的倾角 α_1, α_2 。例如,投影3中把沿 g_3 单面滑动锥夹在中间的两个纵向圆 q_1, q_2 的倾角 $\alpha_1 = 47^\circ, \alpha_2 = 2^\circ$ 。然后,用如下方法确定 q_1, q_2 对应的方位角:如果 q_i 的倾向向量的投影在 OD 的右侧取 α_i ,或 $180^\circ + \alpha_i$,在左侧取 $-\alpha_i$,或 $180^\circ - \alpha_i$,切割锥在 q_i 的下盘时取 $\pm \alpha_i$,上盘时取 $180^\circ \pm \alpha_i$,这样经过两次判断后,唯一地确定了 q_1, q_2 的方位角。再把两个方位角排个顺序,使从第一个方位顺时针到第二个方位小于 180° ,就是切割锥的塌滑范围。图12投影3中 q_1, q_2 的倾向向量投影都在 OD 的左侧,切割锥在 q_1 的上盘, q_2 的下盘, q_1, q_2 对应的方位角 $133^\circ, 358^\circ$,排顺序后的塌滑范围是 $358^\circ - 133^\circ$ 。

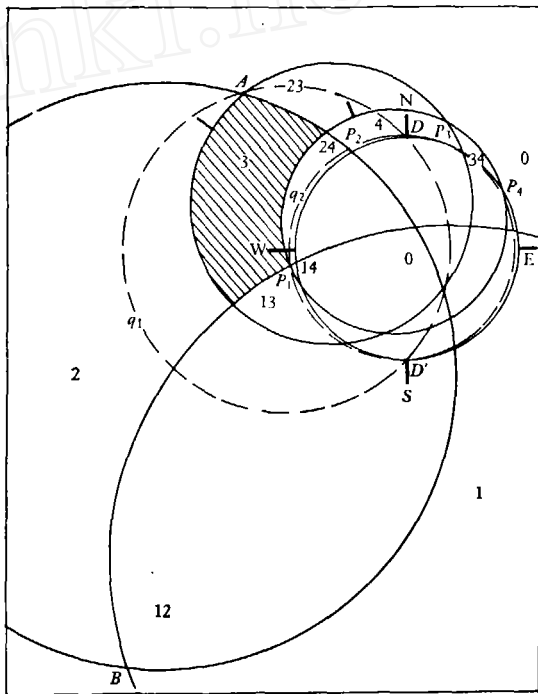


图12 投影3

4. 隧洞断面的形状 表2中给出了 $F > 0$ 的切割锥的塌滑范围。由表2可见,所有塌滑范围都在上、右两侧,这样最好选取不对称断面,让上、右部曲率大,使塌滑范围所占边长减小。即使是对称断面,采取不对称支撑也更经济合理(见图10,11)。

5. 轴线方向 投影3中 D' 点在沿 g_{12} 的双面滑动锥中,则切割锥不存在塌滑范围,在隧洞中不出现相应的塌滑体。一般说来,选轴线要与切割锥之间夹角小,使塌滑范围小,相应的塌滑体小,隧洞稳定。例如,在投影3中取洞轴线方向为正东,则沿 g_3 单面滑动切割锥的塌滑范围仅为 $345^\circ - 5^\circ$ 。

6. 夹在一组结构面间的塌滑范围 在投影3中,如果 P_2 是页岩层面,层面平直光滑并且层

面之间无显著挤压应力,则开挖隧洞中必须考虑夹在层面间的塌滑体. 这种塌滑体在 P_2 一个面的上盘,同时又在 P_2 另一个面的下盘,所以它的切割锥仅是 P_2 圆的一部分. 例如沿 g_2 单面滑动锥是 P_2 圆上 AB 之间的弧线. 在这种情况下,洞轴线选择十分重要,特别是洞轴线不能与层面平行. 例如,取洞轴线正方向为 P_2 点,即 P_2 面的走向,这时沿 P_2 单面滑动锥的塌滑范围是 $292^\circ-112^\circ$,为 180° 的最大区间. 如图 8,在圆形隧洞上的塌滑体占了整个上部. 这就是洞轴线平行层面时的一些隧洞塌方严重无法开挖的原因.

7. 倾斜隧洞和竖井 方法与水平隧洞基本相同. 只是洞线方向的投影 D 点不在赤道圆上. 求塌滑范围时透明纸要转动,在过 D 点的纵向圆中选取把切割锥夹在中间的二圆. α_i 则是 q_i 面沿洞轴线垂直面的倾角,仍用投影网求得. 在竖井情况下最简单: q_1, q_2 都是过 O 点的直线.

七、稳定区域、坝肩、坝基问题

1. 塌滑体受的力 前面讨论的是塌滑体受自重作用的情况,即使由地应力、渗透压力将 U 推动,当 U 移动微小距离后,作用在 U 上的渗压、地应力即消失, U 的稳定最终要取决于重力的作用. 但在一些情况下,必须考虑作用在 U 上的地应力、地震力、渗透压力、外部推力及预应力锚索的预应力. 这时,求出合力 G 后,可以重新选坐标系,使 z 轴方向与合力方向相反,以后的一切讨论和计算都适用.

下面谈到在投影上“作过两个点的圆”是求这两个方向决定的平面的投影,可以用投影网的纵向圆弧描出来,也可以按赤平投影的公式求出一个方向的反方向的投影点后过这三点作圆.

2. 求塌滑形式 在受力任意的情况下,也可以用切割锥的投影圆的方法在透明纸上作投影. 例如有第四节的 P_1, P_2, P_3 三组结构面,某拱坝肩上有一孤立岩体 U ,在 P_1 的下盘, P_2, P_3 的上盘,受合力为 G ,作投影 4. 不同的只是 g_i 是过 G 和 N_i 的圆与 P_i 圆两个交点中与 G 夹角小的一个,即 P_i 面上与 G 夹角最小的方向. g_{ij} 是 P_i, P_j 二圆两个交点与 G 夹角小的一个. 再根据切割锥的投影圆的方法标出切割锥. 例如,相应孤立体的 P_1 圆外, P_2, P_3 圆内是沿 P_1 单面滑动锥. 这里在计算求双面滑动的塌滑力时,需要解三元方程(图 13 投影 4 中, g_{ij} 是按划分方法标的).

3. 锥形 在投影 4 上,相应孤立体 U 的 P_1 下盘, P_2, P_3 上盘公共部分组成的棱锥叫 U 的锥形. 把锥形标在投影上,根据第三节,可以把投影面分两个区,一个叫组合稳定区,是所有与锥形夹角大于 90° 的方向的投影,合力落在这个区时,锥形不会成为切割锥. 另一个区叫切割锥区,即与锥形夹角小于 90° 的所有方向的投影. 切割锥可以分为互不重合的区域: (1) 直接塌落区,即锥形本身,标以“(o)”. 合力 G 落到锥形内时,塌滑力就是合力本身. (2) 围成锥形的每一段圆弧是某个结构面 P_i 的投影,对每段圆弧有一个沿 g_i 的单面滑动区,标以结构面的序号“(i)”,合力 G 落在这个区域时,锥形是沿 g_i 单面滑动锥. (3) 锥形投影每一角点 g_{ij} 有一沿 g_{ij} 双面滑动区,合力 G 落在这个区时锥形是沿 g_{ij} 的双面滑动锥,在这个区标“(ij)”. (4) 给定每组结构面 P_i 的摩擦角 ϕ_i ,可把标“(i)”或“(ij)”的区域分成两部分: 摩擦稳定区和不稳定区,如果合力 G 落在摩擦稳定区 F 值小于 0,不会塌滑. 如果合力 G 落到不稳定区,则 F 值大于 0 发生塌滑. 所有这些区都用下述方法在投影图 4 上划出来了.

4. 划分方法 继求塌滑形式在图 13 投影 4 上作图。把透明纸放在投影网上对准中心转动。锥形在 P_1 下盘 P_2 上盘, 则作 P_1 向上的法线 N'_1 , 作 P_2 向下的法线 N'_2 。作过 $g_{12}N'_1$, $g_{12}N'_2$, $N'_1N'_2$, $g_{13}N'_1$ 的圆弧, 则 g_{12} , N'_1 , N'_2 围成的区域是沿 g_{12} 的双面滑动区, g_{12} , g_{13} , N'_1 围成的区域是沿 g_1 的单面滑动区。由 O 向 N'_1 和 N'_2 引直线并延长, 按投影网在直线 ON'_1 上取与 N'_1 夹角为 ϕ_1 的两点, 以这两点为直径作圆交 N'_1g_{12} 弧于 M_{12} 点, 交 N'_1g_{13} 弧于 M_{13} 点, 同样对 N'_2 作圆交 N'_2g_{12} 弧线于 M_{21} 点。作过 $M_{13}M_{12}$, $M_{12}M_{21}$ 的圆弧, 则 g_{13} , g_{12} , M_{13} , M_{12} 围成的区域为沿 g_1 单面滑动不稳定区, g_{12} , M_{12} , M_{21} 围成的区域为沿 g_{12} 双面滑动不稳定区。同法可求沿 g_2 , g_3 单面滑动区和沿 g_{13} , g_{23} 双面滑动区及相应的不稳定区。所有切割锥区以外是组合稳定区, 与求塌滑形式方法一致, G 刚好在 P_1 的单面滑动区。

5. 合力方向的选择 欲使岩体稳定应使合力落在不稳定区外, 最好落在组合稳定区。例如, 加固上述拱坝的坝肩, 可用预应力锚索, 使合力落在不稳定区外。

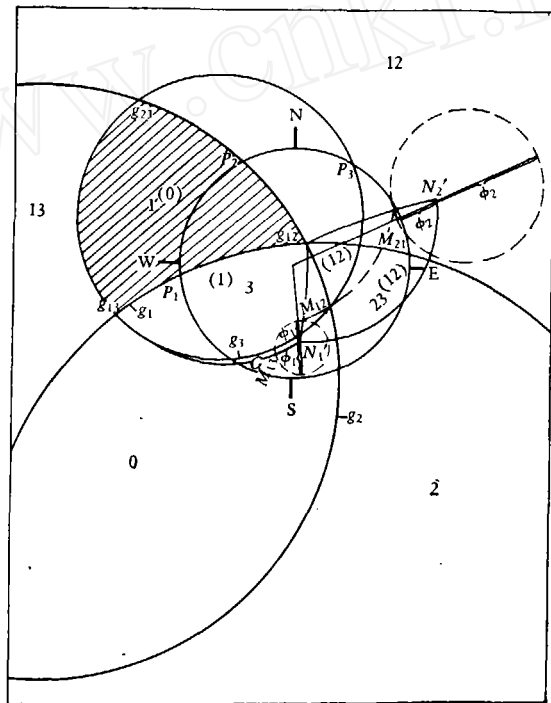


图 13 投影 4