

# 第一章 节理概论

## 第一节 结构面的成因及地质特性

岩体与一般介质的重大差别在于它是由结构面纵横切割而具有一定结构的多裂隙体，岩体中的结构面对岩体的变形和破坏起着控制作用，结构面的地质和力学特性与其成因及其形成过程密切相关，只有以地质成因研究为基础，认识结构面自然特性，才能掌握结构面的地质特点，从而研究其力学特性。

### 一、结构面的地质成因及其特性

结构面是岩石中没有或具有低抗拉强度的力学不连续面的总称<sup>[1]</sup>，它是节理、弱层面、片理面、弱面等很多类型结构面的总术语。岩体内结构面的地质成因类型有三种<sup>[2]</sup>：

(1) 原生结构面 主要指岩体形成过程中形成的结构面和构造面。如岩浆岩体冷却收缩时形成的原生节理面、流动面；与早期岩体接触的各种接触面；沉积岩体内的层理面、不整合面；变质岩体内的片理、片麻理构造面等。

(2) 构造结构面 它是在岩体形成后的地壳运动过程中在岩体内产生的各种破裂面，如断层面、错动面、节理面和劈理面等。

(3) 次生结构面 指在外营力作用下产生的风化裂隙面、卸荷裂隙面等。

构造结构面是岩体内最主要的结构面，它们彼此有一定的内在联系。

原生结构面除岩浆岩中的原生节理面外，一般多为非开裂式的，其结构面有一定的联结力。

次生结构面多为张裂隙，其结构面不平坦，产状不规则，大多为不连续的，它常使有效应力一致的一组或几组原生结构面和构造面显现为开裂式的，这种现象在边坡中极常见，但它发育的深度并不大。

### 二、节理的力学成因及其特征

根据构造地质学，岩石在断裂过程中产生的构造统称为断裂构造。凡断裂两侧的岩石沿断裂面没有位移或仅有微量位移的断裂，称为节理；如断裂两侧的岩石沿断裂面发生了较大位移，则称断层。断裂构造（节理和断层）是岩体中发育最广泛的一种地质构造。

任何节理都是在一定的条件下受了力的作用而产生的，从应力角度考察，直接形成节理的应力只有两种：一是剪应力，一是张应力。由此，根据节理的力学成因，可将其分为剪节理和张节理两种。

## 1. 剪节理

剪节理是由剪切面进一步发展而成，理论上，剪节理应成对出现，自然界里的实际情况也经常如此，不过，两组剪节理的发育程度可以不等。剪节理的峰值摩擦角一般为  $30^{\circ}\sim 50^{\circ}$  残余摩擦角一般为  $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 。剪节理具有如下主要特征：

(1) 剪节理产状较稳定，沿走向延伸较远，当穿过岩性差别显著的不同岩层时，其产状可能发生改变，反映岩石性质对剪节理方位有一定程度的控制作用。

(2) 剪节理面平直光滑，这是由于剪节理是剪破（切割）岩层面而不是拉破岩层面而形成的。在砾石、角砾岩或含有结核的岩层中，剪节理同时切过胶结物及砾石或结核，由于沿剪节理面可以有少量的位移，因此，常可借被错开的砾石确定其相对移动方向。

(3) 剪节理面上常有剪切滑动时流下的擦痕、摩擦镜面，但由于一般剪节理沿节理面相对移动量不大，因此，必须仔细观察才可察觉。擦痕也可以用来判断节理两侧岩壁相对移动的方向。

(4) 剪节理一般发育较密，即相邻两节理之间的距离较小，常密集成带，但节理间距的大小又同岩性与岩层厚度有着密切关系，硬而厚的岩层中的节理间距大于软而薄的岩层，同时，剪节理发育的疏密还与应力作用情况有关。

(5) 剪节理常呈现羽列现象，往往一条剪节理经仔细观察并非只有单一的一条节理，而是由若干条方向相同、首尾相接的小节理呈羽状排列而成。

(6) 剪节理两壁之间的距离（即张开度）较小，常呈闭合状，但后期的风化或地下水的溶蚀作用可以扩大节理的张开度。

擦痕是剪节理和断层两侧的岩壁相互滑动和摩擦留下的痕迹，擦痕常表现为一系列细而密的、较均匀且彼此平行的线条，或为一系列相间排列的擦脊和擦槽。它是剪节理和断层运动过程中由被压碎的岩石细屑在岩层面上碾磨刻划而成的。仔细观察，可以见到擦痕的一端粗而深，另一端细而浅。在硬脆岩石中，断层面被强烈摩擦后可以形成光滑的镜面，称摩擦镜面，其上常覆以炭质、硅质、铁质或碳酸盐质薄膜。

利用擦痕判断剪节理和断层两侧岩壁相对动向的方法很多，可用手摸，以较光滑方向指示对盘的动向，但仅靠手的感觉作出判断并不十分可靠；也可用以自粗而深的一端至细而浅的一端指示对盘的动向，但擦痕两端的粗细深浅有时并不明显。因此，比较可靠的方法是利用擦痕面上出现的阶步和反阶步。阶步是顺擦痕方向的局部阻力的差异或因剪节理和断层间隙性运动的顿挫而形成的垂直于擦痕的小台阶，其形态特征是将其放平后在剖面上呈不对称的缓波状曲线，宛如风成波痕，可用较陡坡的倾向指示对盘的相对动向。反阶步形态与阶步大致相仿，但二者的显著区别是反阶步的缓坡和陡坡并不是以圆滑曲线连续过渡，而是以开口的折线相连接的。

## 2. 张节理

张节理是由于在一个方向的拉应力超过了岩石的抗拉强度，因而在垂直于张应力方向上产生的裂割式的破裂面。张节理的峰值摩擦角一般为  $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$  残余摩擦角一般为  $30^{\circ}\sim$

45°。张节理具有以下主要特征：

(1) 张节理产状不甚稳定，往往延伸较短，单个节理短而弯曲，若干张节理则常以侧列关系出现。

(2) 张节理面粗糙不平，发育在砾岩中的张节理往往围绕砾石而过。在平面上观察张节理，虽可看出总的走向，但却明显呈不规则的弯曲状或规则锯齿状，后者是追踪先形成的两组共轭剪节理而形成的，故又称追踪节理。

(3) 张节理面没有擦痕。

(4) 张节理一般发育稀疏，节理间距较大，而且即使局部地段发育较多，也是稀疏不均，很少密集成带。

(5) 张节理两壁之间的距离较大，呈开口状和楔形，并常被岩脉充填。

## 第二节 节理的状态及其描述

### 一、节理面的结合和充填特征

节理面按其结合特征可分为闭合的、张开的和充填的（见图 1-1）三种。闭合节理又分为弱胶结的和压力愈合的两类，前者如层理、片理，常易开裂；后者常在高地应力作用下愈合成假胶结状态，因而又称隐节理，这些节理在风化、卸荷和振动等外力作用下又可开裂，成为显节理，例如，爆破法开挖隧洞和边坡时，洞壁和边坡的节理增加，河谷斜坡上常见的倾向河谷的缓倾角节理均是由于这一原因。

节理面的张开度是张开节理两岩壁间的垂直距离，介于两岩壁间的空间充满水或空气。两壁间含有充填物的节理称充填节理，充填节理两岩壁间的垂直距离称为充填节理面的宽度。国际岩石实验室和现场试验标准化委员会建议，按节理的张开度用表 1-1 所列的术语描述节理面的结合特征<sup>[1]</sup>。在研究节理的力学性质时，通常将节理分成耦合的和非耦合的两类如图 1-2 所示。

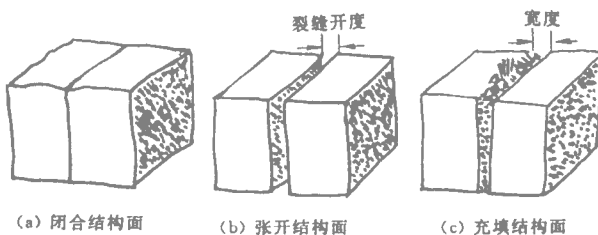


图 1-1 节理面的结合特征

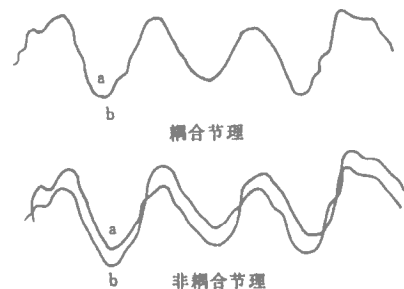


图 1-2 耦合节理与非耦合节理

表 1-1 节理面结合特征的术语及描述

节理张开度	描 述	结合特征
<0.10mm	很 紧 密	闭合节理面
0.10~0.25mm	紧 密	
0.25~0.5mm	部分张开	裂开节理面
0.5~2.5mm	张 开	
2.5~10mm	中等宽的	
>10mm	宽 的	张开节理面
10~100mm	很 宽 的	
100~1000m	极 宽 的	
>1000m	似 洞 的	

节理的充填特征主要是指节理的充填物性质和充填厚度等。节理内的充填物有胶结的和非胶结的两种。胶结充填节理的强度通常不低于岩体的强度，因此，它不属于软弱面，胶结充填分硅质、铁质、钙质和岩脉充填等类型。非胶结充填节理内的充填物主要是泥质材料，非胶结充填物中含膨胀性的不良矿物（如蒙脱石、高岭石、绿泥石绢云母、蛇纹石、滑石等）较多时，其力学性质最差；含非润滑性质的矿物（如石英和方解石等）较多时，其力学性质较好。充填物的性状主要是指充填物粒度或颗粒大小、含水量、渗透系数、超固结比等。充填物的厚度可分为以下四种类型<sup>[3]</sup>：

(1) 薄膜充填 它是节理面岩壁附着一层 2mm 以下的薄膜，由风化矿物和应力矿物等组成，如粘矿物、绿泥石、绿帘石、蛇纹石、滑石等。虽然很薄，但由于充填矿物性质不良，也明显地降低了节理面的强度。

(2) 断续充填 充填物的厚度小于节理面形态高差，充填物在节理内不连续，形成断续充填，其力学性质取决于节理面的形态及充填物和岩壁岩石的力学性质。

(3) 连续充填 充填物的厚度稍大于节理面形态高差，其力学性质取决于充填物和岩壁岩石的力学性质。

(4) 厚层充填 充填物厚度大到数十厘米到数米，形成一个软弱带，其破坏有时表现为岩体沿接触面的滑移，有时则表现为软弱带本身的塑流破坏。

## 二、节理面的形态特征及其描述

节理的表面形态是节理表面空间展布的几何属性，节理的表面形态可按其规模大小分为起伏度和粗糙度两类。起伏度表征大规模的起伏，有起伏度的节理面如果互相镶嵌和接

触，在发生剪切位移时，起伏度不致被剪坏，节理面就要产生膨胀。粗糙度表征小规模的不规则凹凸点，在发生剪切位移时，它们将被剪坏。但在节理面岩壁强度高或所施加的应力较低时，也可能不被剪坏而产生剪胀。起伏度可分为平面形的、波浪形的和台阶形的三种；粗糙度可分为粗糙的、平坦的和光滑的三级。天然节理面的表面形态是起伏度和粗糙度的不同组合。图 1-3 所示为国际岩石力学学会建议的三种起伏度与三级粗糙度组合而成的九类不同的节理表面形态<sup>[1]</sup>。

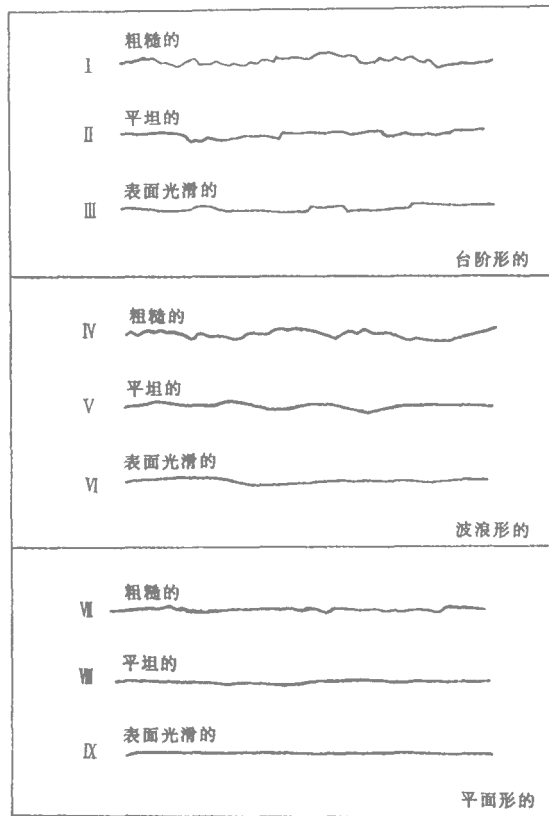


图 1-3 国际岩石力学学会建议的节理表面形态类型

节理的表面形态对其剪切强度等力学性质有极其重要的影响，对于没有发生位移和互相镶嵌的未充填节理，尤其如此。但节理的表面形态的重要性随节理张开度、充填物厚度、初始位移的增加而降低。

## 第二章 节理表面形态的测试仪器和测试方法

节理对岩体的力学性质起着主要的支配作用，而节理的表面形态与其力学性质密切相关。在节理的闭合和剪切的理论模型和经验公式中，只有包含节理表面形态参数才能正确反映节理的实际力学行为。因此，对节理表面形态进行精确测定，是研究节理变形和强度的力学机理、进而建立相应的模型的先决条件。

在工程上，对不同规模的节理及其不同级别的表面形态都感兴趣，因此，对不同规模节理的表面形态的测试方法都有报导<sup>[4]</sup>。总结各种表面形态测试手段，主要可分为光学方法和机械方法两种，前者可以测出表面的三维空间形态，但它高差量程小，且费时；后者只能进行剖面线测量，然而对一组剖面线测得的结果进行组合是可以描述节理的三维形态的<sup>[5]</sup>。

岩石表面形态起伏大，变化范围广，远比机械零件表面的形态复杂，所以，迄今没有公认的描述岩石表面形态特征的统一指标，这就要求岩石表面形态仪既能显示和记录通常的表面形态参数，也能较精确地记录岩石表面形态的剖面线，以便进一步分析研究。

### 第一节 节理表面形态的室内测试仪器和测试方法

#### 一、光学方法

##### 1. 立体显微镜<sup>[4]</sup>

对于手标本尺寸的节理试件，可使用立体显微镜测量其表面形态。测量时，将试件置于显微镜物镜下，上下移动显微镜光学系统中的浮标，同时，节理试件平行于参考面移动，以保持浮标在该表面上，用函数记录仪记录水平运动和垂直运动，即可获得节理表面形态的轮廓性。其放大倍数可为 0.5~20 倍，记录仪上记录的剖面线最长可达 25cm 当放大倍数为 10 倍时 记录精度优于 0.1mm。

##### 2. 激光形态仪<sup>[6]</sup>

该仪器由激光探头、连接部件、显示部件、横向移动悬臂梁、多伺服控制器、岩芯平台和微机组成。用该系统测量是对被测表面上一系列平行扫描线进行三维数值化，取  $x$  轴平行于扫描线方向 取  $y$  轴正交于  $x$  轴  $z$  轴垂直于被测表面的平面，即为高度方向。高度  $z$  是以激光探头的机械零点为原点的。测量时，先定好表面上的测量原点， $x, y$  方向的扫描线组和采样间隔；当探头沿  $x$  方向移动时，测量距表面的距离；测到一条扫描线的末尾时，在  $y$  方向步进一个位置，开始测量沿  $x$  方向的新扫描线，整个过程是自动的。扫描最大面积为 30cm×30cm 所用探头的量程为 20mm(±10mm) 分辨率为 5 $\mu$ m 在  $x, y$  方向的采样间隔均取 1mm。

由于激光形态仪采用半导体激光束的非接触式测量系统，测量时，对表面没有任何损害，也不存在探头被表面上突点卡住的现象，这是常规仪器所难于达到的。

### 3. 近距离摄影测量<sup>[7]</sup>

近距离摄影测量是采用一个与微机相连的摄像机，微机内需配备一块图像处理板，从 CCD 摄像机产生的图像通过图像处理板由微机进行处理。

用一个标有“+”号（控制点）的平板作为控制场，岩石节理试样放置在平板的上面。为了增强整个节理表面上明暗度的均匀性，以便于点之间的比较处理，将一个坐标方格网图案投射到节理表面上用 CCD 摄像机从两个不同的位置拍两个图像，节理表面上的空间坐标就能计算。近距离摄影测量的基本内容，如数据采集、数据还原、图像数值化处理等，近来已趋成熟，根据图像处理的需要可开发专用的程序。若采用 SonyXC-37 摄像机，CCD 板的尺寸是 6.8mm (V)×8.8mm(H) 像素尺寸为 14μm(V)×17μm(H) 因此 CCD 上的一个图像给出 480(V)×512(H) 个像素若整个像框测量 10cm 的节理试件 则其分辨率为 0.2mm。

## 二、机械触针式表面形态仪

机械触针式表面形态仪是机械工程中用于测量零件表面粗糙度的常用仪器，但一般行程和量程均较小。Tsan 在此基础上研制了机械触针式岩石表面形态仪<sup>[7]</sup> 其最大行程为 250mm，针尖在垂直方向的位移为 24mm 采样间隔 0.2mm 对于长 10cm 的剖面线，需测量 5min，采集到的信息被放大后通过 12 位 A/D 转换板输入微机。采样针尖的直径为 25μm，为了确保形态仪的分辨率，建议每测 20m 替换一根针尖。

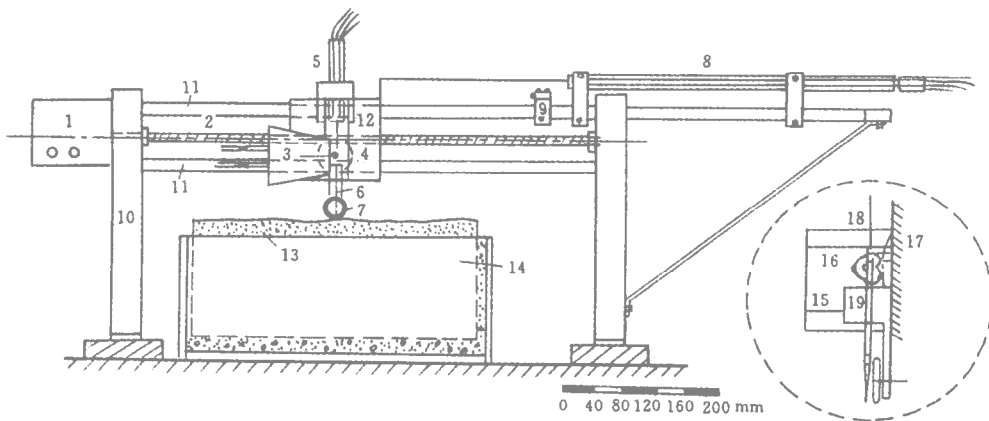


图 2-1 Weissbach 研制的表面形态仪

- 1—水平步进电机；2—精密丝杠；3—竖向步进电机；4—偏心轮；5—垂直位移传感器；6—触针；  
7—滚盘；8—水平位移传感器；9—限位开关；10—支架；11—导向杆；13—节理试件；  
14—剪切盒；15—滑块；16—偏心盘；17—偏心接触件；18—传感器头；19—套管

图 2-1 是 Weissbach 研制的表面形态仪结构图<sup>[8]</sup>，它由支架、两个位移传感器和两个步进电机和丝杠滑块机构组成。水平位移传感器用来记录采样点的水平位置，垂直位移传感器则用来记录节理表面的形态高度。水平步进电机用于驱动滑块及其上面的垂直位移传感器作水平移动，垂直步进电机通过偏心轮机构，在采样时使触针降下与岩石表面接触，在水平步进移动时，将触针提离岩石表面，从而避免其被较高的表面凸点卡住，因而采样不是连续而是间隙性的。采样间隔可为 0.03~0.5mm 可测量尺寸为 410mm×280mm 的节理表面。高差的测量精度则取决于传感器的精度。水平位移和垂直位移或被绘在函数记录仪上，或用数值记录器数字化在穿孔磁带上。

该表面形态仪由于采用了一个偏心轮机构和间隙性的升降触针，使其在水平移动过程中离开试件表面，从而解决了水平移动时触针被卡住的现象，但它结构较复杂，尤其是测试结果记录在函数记录仪上或用数值记录器数字化于穿孔磁带上，数据后处理复杂，其精度又受数据输出设备和记录设备的影响。

### 三、RSP-I 型智能岩石表面形态仪<sup>[9]</sup>

RSP-I 型智能岩石表面形态仪以机械触针式形态仪的原理和结构为基础，根据智能仪器的原理和设计思想，用微机作为形态仪控制、测试和记录的核心，既实现了微机对传感器水平移动和形态仪触针垂直运动的控制及采样间隔的软件选择，又实现了微机对形态仪信号的采集处理以及显示和记录。

#### 1. 形态仪的原理和结构

RSP-I 型智能岩石表面形态仪由机械结构、驱动、测试以及记录和数据处理等几部分组成。仪器的控制、测试及数据处理均由计算机辅助测试（CAT）系统及相应的软件来实现，其特点是通过触针针尖接触被测表面某一剖面上的高差起伏，如图 2-2(a)所示，当位移传感器在被测表面上沿给定方向水平移动时，其触针在被测表面上随着表面几何形态的起伏变化而在垂直方向作上下运动，由于传感器是被固定的，并沿一水平参考线移动，因此，在传感器水平移动过程中，触针针尖的运动轨迹即为节理表面的形态起伏。



图 2-2 RSP-I 型智能岩石表面形态仪原理及动作-采样周期图

形态仪的机械部分由升降导向机构、丝杠滑块机构和工作平台三部分组成，其结构简图见图 2-3，其中，升降导向机构由偏心轮机构和导向机构组成，它们均安装在滑板总成上。

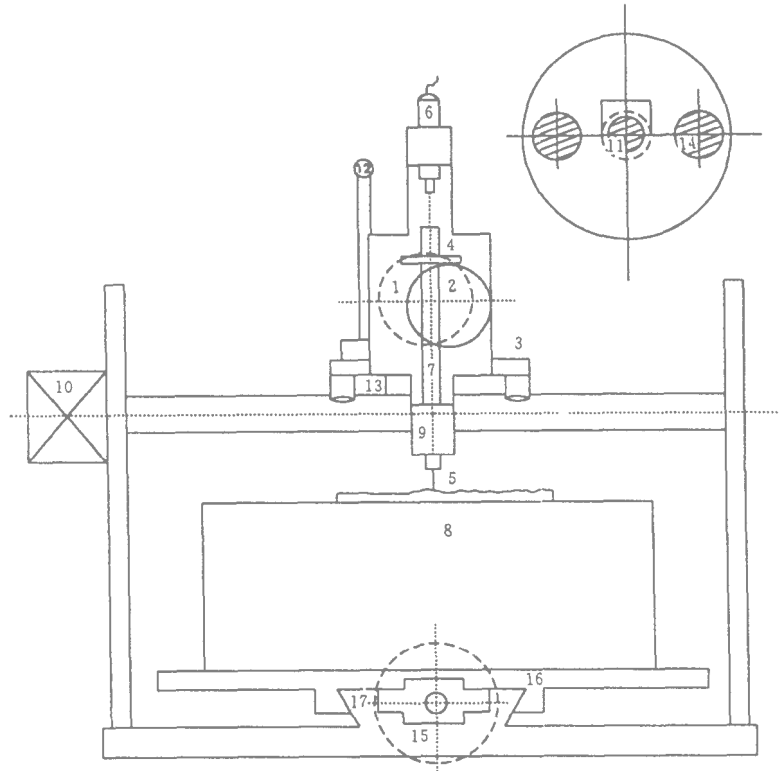


图 2-3 RSP-I 型智能岩石表面形态仪结构

- 1—升降步进电机；2—偏心轮；3—滑板总成；4—托盘；5—触针；6—位移传感器；7—导向杆；  
8—节理试件；9—导向套；10—丝杠驱动步进电机；11—精密丝杠；12—离合器操纵杆；  
13—离合器；14—水平导向杆；15—手轮；16—工作平台；17—燕尾槽导轨

形态仪机械部分的工作原理是：升降步进电机 1 的轴上安装有偏心轮 2 在滑板 3 水平移动前，升降步进电机驱动偏心轮推起托盘 4 使触针 5 离开被测试件表面，以避免在触针随滑板水平移动时被试件表面上较陡的起伏点卡住。水平移动完毕后，升降步进电机驱动偏心轮降下托盘，使触针针尖与被测试件 8 的表面接触，位移传感器 6 的触头与导向杆 7 的上端面直接接触，这样，被测表面的起伏由触针经导向杆传递到传感器触头，为使触针每次升降后针尖准确地落到预期的位置，触针上部与导向杆相连，导向杆在精密的导向套 9 中运动以达到导向的目的，触针的水平移动由步进电机 10 驱动精密丝杠 11 带动滑板水平移动来实现，滑板总成上的离合器 13 用来调节形态测量时滑板的起始位置，旋转离合器操纵杆 12 使离合器 13 处于与丝杠分离状态，这时，滑板可在两根水平导向杆 14 上自由地移动从而，方便地把触针调到待测剖面线的起点。工作平台总成用于安放被测试件和调节测试剖面线的位置，先将试件安放在触针对准第一条剖面线的位置，测完一条被测剖面线后，摇动手轮 15 使工作平台 16 在燕尾槽导轨 17 上前后移动，从而可把触针调到不同的测试剖面线，测试时的顺序前进是由控制部分来完成的。

## 2. 计算机辅助测试 (CAT) 系统

该形态仪 CAT 系统由控制部分、测量部分和微机组成 (如图 2-4)。控制部分包括两个步进电机及与其配套的一个控制箱和控制接口板; 测量部分包括模数转换板和位移传感器及位移变送器; 控制接口板和模数转换板均直接插于主机系统板上。计算机通过接口板和步进电机控制箱实现对形态仪步进电机的驱动和控制, 并按图 2-2(b)所示的周期协调地动作。每经历一个采样—升—移—降周期, 完成对被测表面上一个间隔的数据点的测量, 这样依次将表面形态的信息由位移传感器经位移变送器放大, 形成与被测剖面线高差起伏相应的模拟量, 模数转换板将该模拟量采样、保持并转换为数字量。每测完一条剖面线, 将其在屏幕上按一定纵、横向比例显示出来, 并将相应的数据按一定格式存入数据文件。

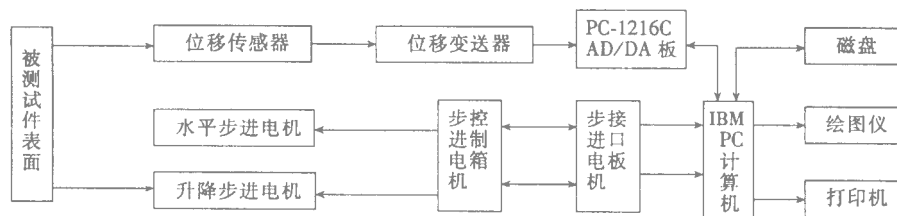


图 2-4 RSP-I 型智能岩石表面形态仪 (CAT) 原理框图

## 3. 形态仪 CAT 系统的软件开发

为方便地实现步进电机驱动和数据采集功能, 程序用宏汇编语言编制。它除主程序段外, 还有步进电机控制、采样滤波和屏幕画点等子程序段。为了避免采样时噪声干扰降低测试精度, 用五点平滑滤波对数据进行预处理。在运行程序后, 先依次输入被测节理的数据文件名和待测剖面线数目, 然后, 输入当前待测剖面线的长度和采样间隔, 按回车键即开始测试。测试到剖面线终点时自行停止, 将已测试好的剖面线在屏幕上按一定纵、横向比例显示出来, 并将相应的数据按一定格式存入数据文件。依次输入每条待测剖面线的长度和采样间隔并进行测试, 直到测完该节理面上的所有待测剖面线为止。

对被测节理的几条剖面线, 采用逐条存盘的方法依次存入同一数据文件, 这样, 当测试中出现问题而中断测试时, 只丢失正在测的剖面线的数据。在系统软件中包含有再现和打印程序、形态参数计算程序等, 以供初步的分析研究之用。典型的不同形态特征的节理表面剖面线测试结果见图 2-5。

## 4. 形态仪主要技术指标

为获得模数转换板的转换系数, 需对测试系统预先进行标定, 采用专门的标定程序和位移标定器在微机上直接标定, 对于量程为  $\pm 5\text{mm}$  的传感器, 标定结果为  $C_D = 2.44\mu\text{m/bit}$ , 线性误差不大于满量程的  $0.3\%$ 。

形态仪的实际精度取决于机械结构、位移传感器、位移变送器和模数转换板的综合精度, 经湖南省计量局计量器具监督检查站检测, RSP-I 型智能岩石表面形态仪主要技术指标

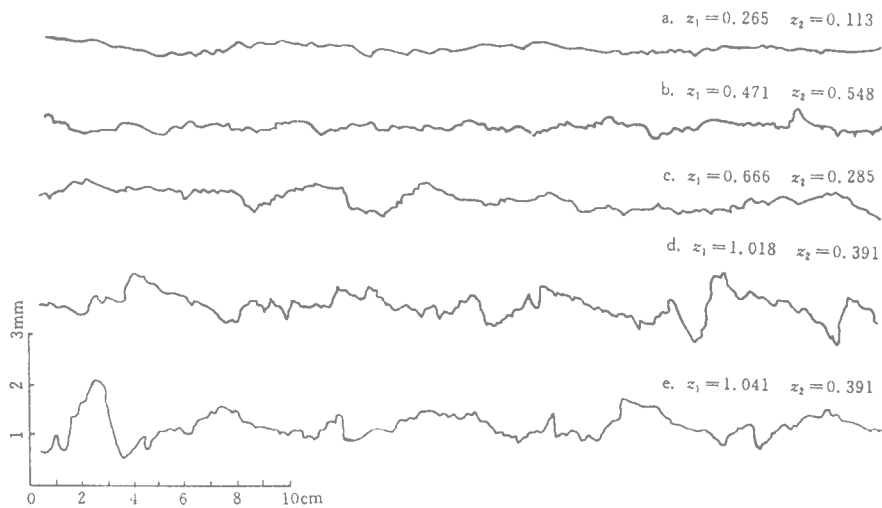


图 2-5 典型的具有不同形态特征的节理表面实测剖面线

如下：

- (1) 高差测试量程, 5mm;
- (2) 综合测试精度, 0.015mm( 相对精度 0.3%);
- (3) 高差测试灵敏度, 0.01mm;
- (4) 水平行程, 270mm;
- (5) 水平运动精度, 全行程误差不超过 0.005mm;
- (6) 采样间隔, 0.1~2.0mm, 20 档可调;
- (7) 采样周期, 3s/次;
- (8) 偏心轮机构行程, 12mm;
- (9) 外形尺寸(长×宽×高) 42mm×42mm×50mm。

高差测试量程取决于位移传感器的量程和偏心轮机构的行程, 通过变换位移传感器和偏心轮, 可以变换高差测试量程, 其测试精度也会相应变化。

在机械触针式形态仪基础上研制成的 RSP-I 型智能岩石表面形态仪是以计算机为核心的智能化仪器, 它的结构简单, 造价低廉, 性能稳定, 测试可靠。所配备的 CAT 系统和软件使用方便灵活, 测试结果以屏幕显示和数据文件的形式, 直观且易于处理和分析研究, 是既有较高测试精度和灵敏度、又具有较大量程和采样频率范围的适应性较强的智能岩石表面形态仪。

该仪器既可用于测试节理表面的形态特征, 也可测试岩石试件断口的形貌等<sup>[10]</sup>。

#### 四、测试方法和数据修正<sup>[11]</sup>

在计算表面形态参数时, 各测试点的数据必须相对于同一参考平面, 并要进行零均值处

理，由于在实际测试过程中，不可能使测试基准面与被测表面的名义平面刚好平行，故对所测得的形态数据须作适当修正。节理表面形态的测试常采用剖面线测量法，如图 2-6 所示，对于圆形试件，测量过圆心并相互成  $45^\circ$  角的四条剖面线，并以圆心作为修正时的参考点；对于非圆形试件，则在试件的待剪切方向按一定间距至少测三条平行的剖面线，再测一条过这几条平行剖面线中部并与它们相垂直的剖面线，作为坡度修正之用，见图 2-7。

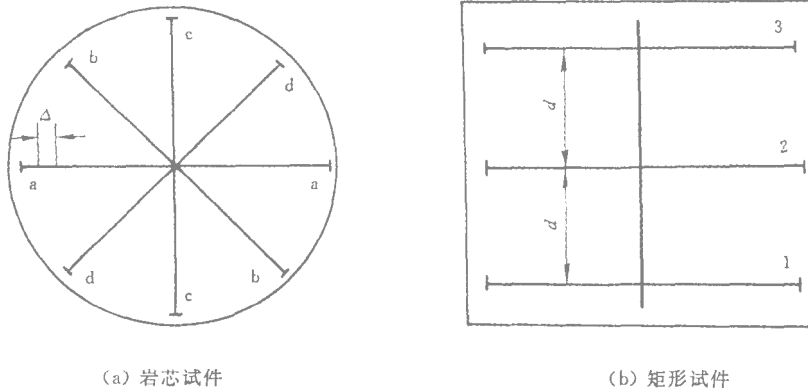


图 2-6 剖面线测试方法

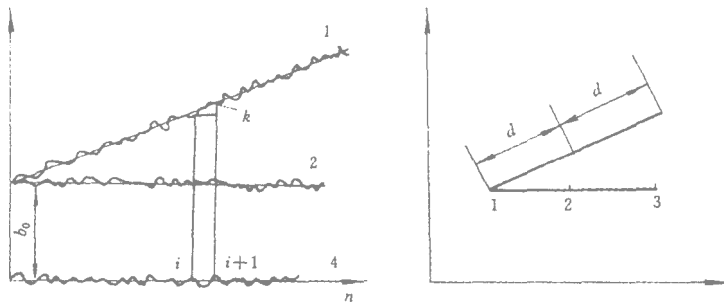


图 2-7 剖面线坡度修正方法

剖面线坡度修正根据最小二乘原理，其具体步骤如下：

(1) 用最小二乘法求各条剖面线（包括修正线）的中心线参数  $b_0, k$ ：

$$b_0 = \frac{2(2n+1) \sum_{i=1}^n z(i) - 6 \sum_{i=1}^n iz(i)}{n(n+1)} \quad (2-1)$$

式中  $b_0$ ——剖面线第一个数据点处中心线相对于测试基准面的垂直距离

$k$ ——为一个采样间隔内中心线的增量；

$n$ ——为一条剖面线的数据总量。

故中心线方程为

$$z_c(i) = b_0 + ki \quad (2-3)$$

(2) 以剖面线第一点为基点, 把它的中心线旋转到与参考线平行, 即作如下修正:

$$z(i) = z_c(i) - ki \quad (2-4)$$

(3) 根据修正剖面线的坡度  $k/\Delta$ , 把各条剖面线的中点移到过第一条剖面线中点且与参考平面平行的平面上, 即作如下修正:

$$z(i) = z(i) - \frac{dk}{\Delta} \quad (2-5)$$

式中  $d$ ——剖面线间的间距 (mm);

$\Delta$ ——采样间隔 (mm)。

对于圆心试件, 把各剖面线的中点 (圆心) 移到过第一条剖面线的中点 (圆心) 并与参考面平行的平面上, 即作修正:

$$z(i) = z(i) - z(im) \quad (2-6)$$

式中  $z(im)$  为第一条剖面线中点坐标, 也即圆心的坐标。

(4) 把经过上述修正的数据进行最小二乘修正, 并以中心线作为高度坐标参考线。

经此处理的数据序列, 其均值为零。

## 第二节 节理表面形态的现场测试仪器和测试方法

这里介绍国际岩石力学学会建议的节理表面形态的三种现场测试方法, 其中, 圆盘倾斜仪法和剖面线法是用来测量可以靠近的有潜在趋势的典型节理面, 而对于不能靠近的节理面, 可用摄影测量法。最后介绍当测试剖面线较长而进行分段测量时的分段测量方法。

### 一、圆盘倾斜仪法<sup>[12,13]</sup>

在现场用不同直径的圆盘放在节理面的不同位置, 量测其倾向和倾角, 得到不同基线长度下测量到的表面粗糙度。基线长度短时, 有效粗糙度的角度值就大, 而基线长度长时有效粗糙度的角度值就小 (图 2-8(a))。把所测得的倾向和倾角以极点形式画在等面积投影网上, 将距离中心最远的极点连接起来成为一封闭的极点等密线, 每个圆盘所测数据绘一个图, 这些封闭的极点等密线可以综合在一个等值线图上 (图 2-8(b))。沿着可能滑动的方向作一剖面, 与不同直径的圆盘量测所得的极点等密线相交, 以其交点的粗糙度角  $i$  与圆盘直径为纵、横坐标, 就可绘出圆盘直径与有效粗糙度角的关系曲线 (图 2-8(c))。

节理面面积必须至少是最大圆盘的 10 倍, 最大的圆盘至少应在 25 个不同位置上量测, 因圆盘的直径愈小, 量测的结果愈离散, 为改善量测的总灵敏度, 较小直径的圆盘应在更多的位置上量测记录。在清晰可见的被测节理面上放置一把 1m 长的尺进行拍照, 以取得表征最大、中等和最小粗糙度的照片。

对于给定的圆盘尺寸, 可以绘制任何可能滑动方向的最大粗糙度角。最大粗糙度角的正切乘以所给定的基线长度 (圆盘直径), 就可得到在剪切位移等于基线长度条件下的垂直

节理面方向的位移(剪胀)。用这种方法分析不同基线长度(圆盘直径)时的情况,就可得到剪胀曲线。在有效应力值较低时,节理在剪切过程中表面形态损坏极少,它将给出一个逼真的剪切过程图。因此,这种方法最适合于坚硬岩石节理的剪切情况。

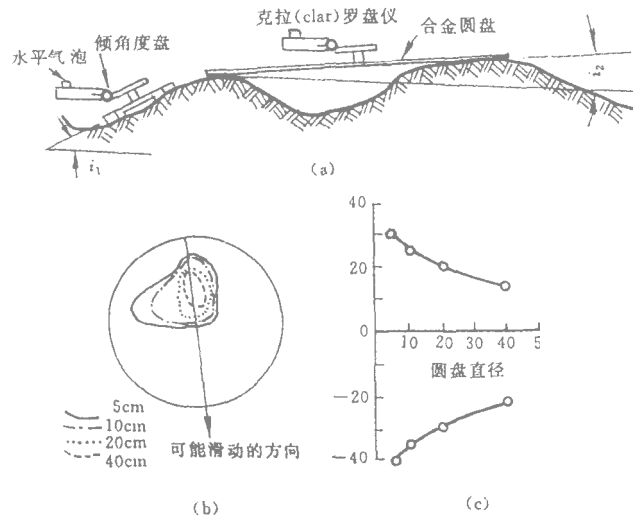


图 2-8 罗盘和圆盘倾斜仪法

## 二、摄影测量法<sup>[14]</sup>

对于不能靠近的节理,可以用地面摄影测量的方法得到节理表面上很多点的坐标。根据节理表面上各点的坐标,可以估计等高线图和表面形态的断面图。最小的等高线间隔将取决于摄影机底座到被测量节理的距离,通常选用 1cm 或 5cm,但最小可小到 1mm。如果可能的滑动面方位已知,那么,剖面图将按滑动方位绘制。常采用带有自动记录装置的立体摄绘仪或立体比测仪记录被测节理表面上有代表性点的坐标,最有用的图形是剖面图,可利用计算机画出表面形态剖面图,通常,垂直方向和水平方向采用相同的比例尺。

测量前,先选定需要观测的节理表面并设置标记,再选定通观岩面的相机摄影站,如图 2-9 所示,要考虑摄影岩面高度、精度的要求,以及相机水平像场角、竖直像场角和相机可俯视的角度。如果光轴大致垂直于岩面,则可更好地利用像对的重叠部分。

此外,对于大范围的边坡露头的节理面,还可用远距离摄影测量等地形图测量中的方法<sup>[14]</sup>。从距离三个被观测表面平均 75m 的一个测站测量到目标点的距离,这些目标点沿着被选择的垂直面与同一表面(节理面的交线上),选择一个合适的采样步长,用 10' 的倾角增量(对应于岩面交叉线 25cm 的线增量)从表面的顶部往底部测量。

## 三、剖面线法<sup>[1]</sup>

剖面线法如图 2-10 所示,将 2m 长的直尺放在节理面上,并取可能的滑动方向。它将节理面上包括最高点在内的许多点接触,该直尺即为剖面线的参考基线。沿直尺(作为  $x$

方向)按一定采样间隔逐点记录直尺到节理表面的垂直距离( $y$ ),一般精确到 $\text{mm}^{\circ}$ 。将 $x$ 和 $y$ 的数据并列记录下来,便得到一个剖面上表面形态的变化数据,将 $x$ 和 $y$ 的数据用相同的比例尺绘于图上,所有图中都要包含一个比例尺,并将剖面线参考基线(即直尺)的方位角和倾角记录在图上,它们并不一定与节理面产状 $\alpha/\beta$ 相同。通常,采用上述方法记录最小、最常见和最大的表面形态变化的标准剖面线图,并应画在同一页上,以便于比较。若这三个断面是从一个节理组的不同节理面上记录下来的,则它们可表征该节理组整体的表面形态特征;若这三个断面是从同一节理面上记录下来的,则可用于表征该节理面的表面形态特征。

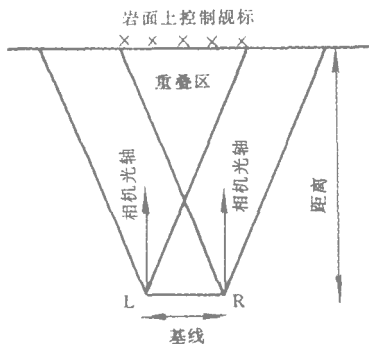


图 2-9 摄影测量法

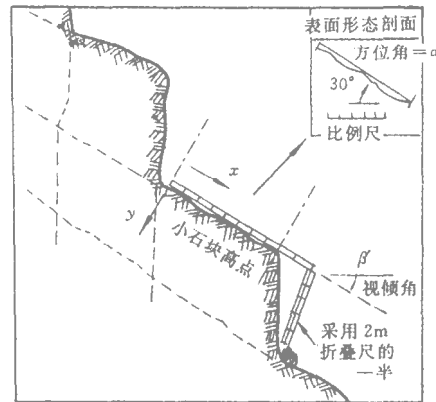


图 2-10 剖面线法

采样间隔的选择因测量长度和表面情况而异,因为,固定的采样间隔可能导致对剪切强度有意义的小台阶和凸点的遗漏,一般取总测量长度的 $2\%$ 就足以得出较好的节理表面形态全貌。用于测量垂直距离的尺应做成尖头,以便把表面形态的微小细部记录下来。当测量较大范围的节理时,也可用长度相应的拉紧拉直的金属线代替直尺。该方法在陡坡上测量时很花时间,并要特别注意安全。

剖面线法若配合采用纵剖面测绘仪<sup>[4]</sup>或针梳<sup>[15]</sup>等测量仪器,则可大大提高其测量精度和速度。纵剖面测绘仪是测量表面高度变化的机械仪器,当纵断面测绘仪的触头在岩石表面上移动时,通过机械机构将岩石表面粗糙度再生在记录纸上。记录在纸上的剖面线的长度按 $1:5$ 的比例缩短,而垂直方向的长度不变。

针梳是一种最简便的节理表面形态测试工具,它是由一组密集的直径为 $0.5\text{mm}$ 左右的钢针用两块金属板固定而成,中间衬以橡胶板,使钢针能在金属板中灵活地移动,但不致于滑出。测量时,将针梳置于测试线上并垂直于节理面,轻轻压下钢针使之与节理的表面形态完全接触,测定针梳金属板的倾角。将针梳的剖面线描在坐标纸上,并标上金属板中心线的位置,这样便得到相对于金属板中心线的剖面线。针梳既可用于测量实验室内节理试件的表面形态,也可用于现场节理表面形态的测量。

针梳虽然简单廉价,但精度低,测量费时,普通的触针仪往往因岩石表面形态起伏太大而难以测试,适合测试起伏幅值较大的轮廓的触针仪,又因较陡的起伏会阻止触针的水平运

动而使测量失败，当然，这个问题可通过增大触针半径和在触针尖端安装一个滚盘来解决，但它会滤掉一些有意义的高频分量而使测量效果变差。

测量大尺寸的节理表面形态时，可先测量一级起伏度<sup>[14]</sup>，在拉紧拉直的金属线上等间隔分成若干段，在每个分隔位置用尺测量其到节理表面的垂直距离，测得的高度给出了表面形态一级起伏度的信息，在每个分段内再进一步用纵剖面测绘仪或针梳等测量仪器进行测量。

用纵剖面测绘仪和针梳进行分段测量时，要保证各分段都以拉紧拉直的金属线为数据参考线是较困难的，但只要各分段测量线首尾相接，并测量记录各分段的倾角，就可以将各分段的测量数据都转换到相对于同一参考线，具体方法见后述。

用纵剖面测绘仪和针梳测量记录的剖面线可用数字化仪进行数值化<sup>[16]</sup>。作者曾采用有效数字化面积为  $50\text{cm} \times 30\text{cm}$ 、分辨率为  $0.1\text{mm}$  的 TG-1017 型数字化仪将剖面线数字化输入微机，数字化仪配备有专用的鼠标器，它设有可编程定义的四个键，可实现逐点按键输入和触发连续输入，定位精度高。程序中定义鼠标器的红键为终止输入工作，其他三键均为触发连续输入。采样由软件实现，采样间隔为  $1\text{mm}$ 。输入时，将描有剖面线的坐标纸用胶带纸粘贴在数字化仪的有效面板上，键入剖面线参考线的倾角（即针梳金属板的倾角），将鼠标的十字中心对准剖面线起点，按除红键以外的任一键，即开始对剖面线进行数字化，将鼠标的十字中心沿剖面线缓慢移动，到终点时，按动红键即终止数字化。一个节理面上的所有测试线及测试线上各分段的数据都存入一个数据文件，再按分段测量理论对数据进行变换，然后进行坡度修正并计算其表面形态参数。

#### 四、现场分段测量方法<sup>[16]</sup>

节理在现场往往延伸较长，而测试工具的量程总是有限的，因此，用剖面线法或其他方法在现场测量节理的表面形态时，只能进行分段测量。在表面形态参数计算时，各测量数据必须都是相对于同一参考线，而在分段测量时，很难保证这一点。在分段测量时，各分段的参考线是任意选定的，但可以测定它们相对于水平面的倾角，从而可计算它们之间的夹角。另一方面，前一分段的终点即为后一分段的起点，由此，不同分段间数据点的位置关系就能完全确定了，从而可根据各分段参考线之间的几何关系，把各分段的数据点转换成相对于同一参考线。为数据处理方便起见，可不失一般性地作如下处理：① 每个分段的参考线通过该分段的起始点；② 取过第一分段起始点，以所测全部分段参考线倾角的均值为起点的倾斜线作为节理表面形态数据点的总参考线。将数据进行转换后再作坡度修正，使之都相对于其最小二乘中心线。

设第  $j$  分段第  $i$  个数据点为  $z_j(i)$ ,  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ，则上述方法的程序实现步骤如下（图 2-11）：

(1) 使每一个分段的参考线通过该分段的起始点，即作如下计算：

$$z_j(i) = z_j(i) - z_j(1) \quad (2-7)$$

(2) 依前、后分段首尾相接，将数据修正到以过第一分段起始点所测的几个分段的参考线平均倾角为倾向的倾斜线  $O_1O'_1$  为平均参考线，即作如下计算：

$$z_j(i) = z_j(i) + (i-1)\Delta \tan(\theta_j - \bar{\theta}) + z_j(0) \quad (2-8a)$$

$$z_j(0) = z_{j-1}(n_j-1) \quad \text{并取} \quad z_j(0) = 0 \quad (2-8b)$$

式中  $\Delta$ ——采样间隔；  
 $\theta_j$ —— $j$  分段参考线的倾角；  
 $\bar{\theta}$ ——所测全部分段参考线倾角平均值。

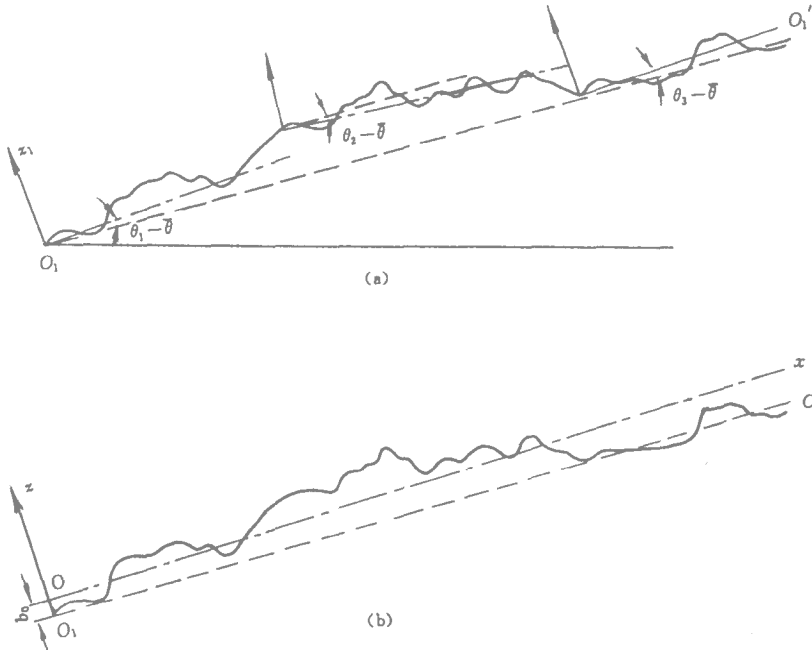


图 2-11 剖面线分段测量数据变换示意图

(3) 将数据修正到以全部数据的最小二乘中心线  $OX$  作为高度坐标的总参考线，即作如下计算：

$$z_j(i) = z_j(i) - b_0 - ki, \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2-9)$$

式中  $b_0$ ——平均参考线上第一个数据相对于总参考线  $O_1 O_1'$  的距离；  
 $k$ ——平均参考线在单位采样间隔内相对于总参考线的增量；  
 $n$ ——整条剖面线的数据总量。

经此处理后的数据序列，其均值为零。

在现场测量节理表面形态前，先量好待测节理面的产状，然后，在节理面上沿预定方向（一般为倾向、走向或可能滑动方向）画一条测试线，再按所采用的表面形态测试工具的长度将其分为若干段，依次首尾相接进行测量，并须测记每一分段参考线的倾角，以作修正用。