第三章

工程控制网布设的理论与方法

第三章 工程控制网布设的理论与方法

主要内容

- 工程控制网的作用和分类
- 工程控制网的基准和建立方法
- 工程控制网的质量准则
- 工程控制网的优化设计
- 典型工程控制网
- 控制点的埋石与标志
- 控制测量内外业一体化

重点

- 工程控制网的质量准则

3.1.1 测量控制网的分类

全球控制网

国家控制网

工程控制网

3.1.2 工程控制网的分类、作用和建网步骤

一、分类

按用途分：

测图控制网

施工（测量）控制网

变形监测网

安装（测量）控制网

3.1 工程控制网的分类和作用

按网点性质分：

一维网（或称水准网、高程网）

二维网（或称平面网）

三维网

3.1 工程控制网的分类和作用

按网形分：

三角网

导线网

混合网

方格网

3.1 工程控制网的分类和作用

按施测方法划分：

测角网

测边网

边角网

GPS网

3.1 工程控制网的分类和作用

按坐标系和基准划分：

附合网（约束网）

独立网

经典自由网

自由网

3.1 工程控制网的分类和作用

按其他标准划分：

首级网

加密网

特殊网

专用网（如隧道控制网、建筑方格网、桥梁控制网等）

3.1 工程控制网的分类和作用

二、作用

工程控制网也具有控制全局、提供基准和控制测量误差积累的作用。

三、建网步骤（略）

遵循大地测量学的原理，如：

要有坐标系和基准

要构成网

要逐级布设等。

3.1.3 测图控制网

作用：控制测量误差的累积；

保证图上内容的精度均匀；

相邻图幅正确拼接。

3.1.4 施工控制网

三角、边角网

导线网

建筑方格网

GPS网

GPS网与地面网相结合的混合网

3.1 工程控制网的分类和作用

特点：

1） 控制的范围较小，控制点的密度较大，精度要求较高；

2） 使用频繁；

3） 受施工干扰大；

4） 控制网的坐标系与施工坐标系一致；

5） 投影面与工程的平均高程面一致；

6） 有时分两级布网，次级网可能比首级网的精度高。

3.1.5 变形监测网

要点：

- 变形监测网由参考点和目标点组成；
- 变形监测网的坐标系和基准的选取原则；
- 对变形监测网应作同时顾及精度、可靠性、灵敏度以及费用进行监测网的优化设计；
- 对变形监测网都要进行重复观测。

3.1.6 安装测量控制网

特点：

- 通常是一种微型边角网，边长从几米至一百多米
- 整个网由形状相同、大小相等的基本图形组成
- 精度要求很高，其测量精度有时要达到计量级

3.2.1 工程控制网的基准

（1）约束网：具有多余的已知数据。

（2）最小约束网（经典自由网）：只有必要的已知数据。

（3）无约束网（自由网）：无必要的已知数据。

3.2 工程控制网的基准和建立方法

表3-1 各种工程控制网的基准秩亏和基准参数

维数	网型	观测值类型	基准秩亏	基准参数
1	高程网	高差	1	1 个平移
2	平面网	边长和方位角	2	X 和 Y 方向的 2 个平移
		边长或 边长和水平方向	3	2 个平移，1 个绕 Z 轴的旋转
		水平方向	4	2 个平移，1 个旋转，1 个缩放
3	三维网	边长和天顶角或边长和水平方向或边长、天顶角以及水平方向	4	3 个在 X、Y、Z 方向的平移，1 个绕 Z 轴的旋转
		水平方向和天顶角	5	3 个平移， 1 个旋转， 1 个缩放
		边长	6	3 个平移，3 个绕 X、Y、Z 轴的旋转
		在 d=6 时再加一个比例尺未知数	7	3 个平移，3 个旋转，1 个缩放

3.2.2 工程控制网基准的建立方法

测图控制网多为约束网，总是选国家或城市坐标系（含平面和高程）下的已知点坐标为其基准。

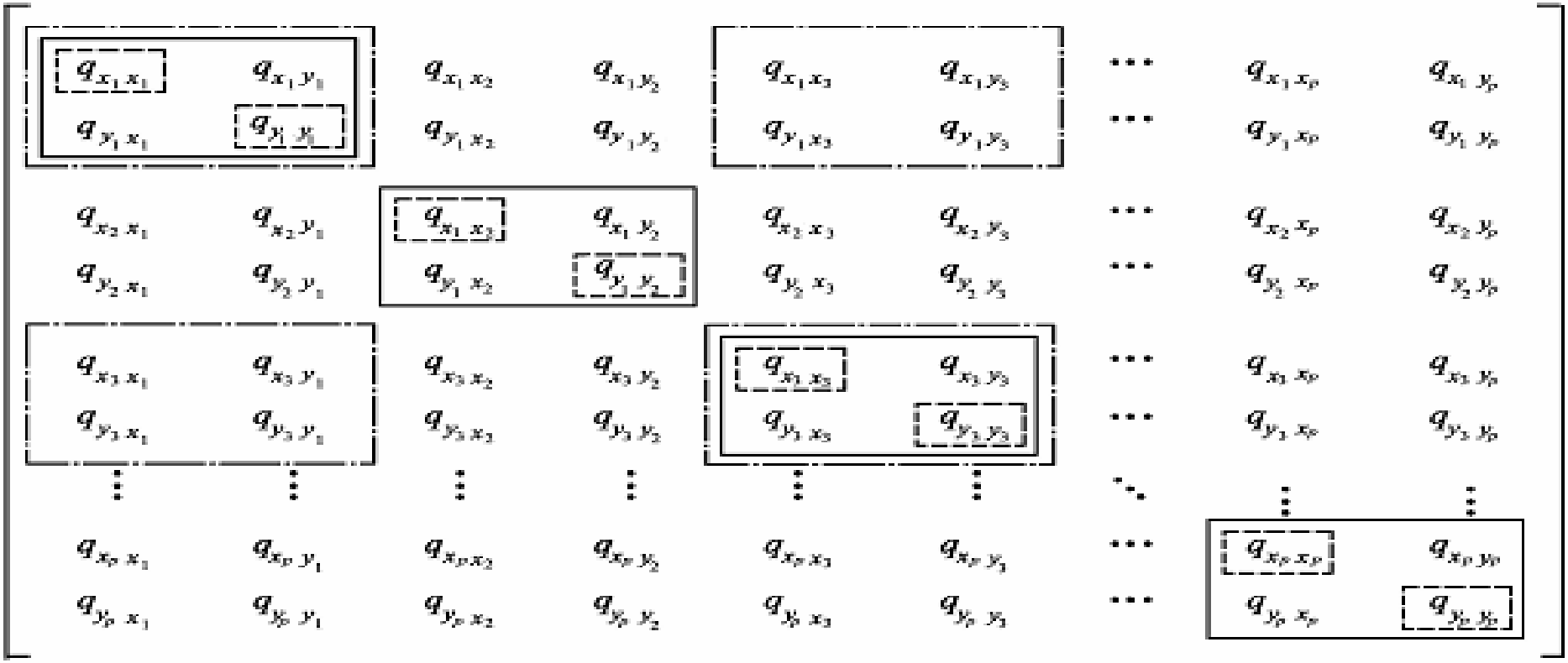
3.3 工程控制网的质量准则

- 精度准则
- 可靠性准则
- 灵敏度准则
- 费用准则

3.3.1.1 精度准则

一、总体精度准则

$$\sum_{xx}=\left[s_1 s_2 \cdots s_u\right]\begin{bmatrix}\lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_u\end{bmatrix}\begin{bmatrix}s_1^T \\ s_2^T \\ \vdots \\ s_u^T\end{bmatrix}$$



— 单个坐标的标准偏差

— 坐标的平均精度

— 误差椭圆

— 置信椭圆

— 点位误差

— 相对误差椭圆

— 相对置信椭圆

— 未知参数函数的精度

— 超置信椭球

— 雷莱关系

— 特征值准则

— 主分量分析

— 准则矩阵

3.3 工程控制网的质量准则

1. E准则

置信超椭球的最大半轴应尽可能地小

$$\lambda_{\max} = \min$$

2. 体积准则

置信超椭球的体积应尽可能地小

$$\det(\Sigma_{xx}) = \prod_{i=1}^{u} \lambda_i \Rightarrow \min$$

3.3 工程控制网的质量准则

3. 方差准则（A准则）

置信超椭球的半轴平方和应尽可能地小

$$tr(\Sigma_{xx}) = \sum_{i=1}^{u} \lambda_{ii} \Rightarrow \min$$

4. 平均精度准则

$$\sigma_x = \frac{1}{u} tr(\Sigma_{xx})$$

5. 均匀性和各向同性准则

$$\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}} \Rightarrow 1$$

$$\lambda_{max} - \lambda_{min} \Rightarrow \min$$

3.3 工程控制网的质量准则

二、 点位精度和相对点位精度

三、 未知数函数的精度

四、 主分量

五、 准则矩阵

3.3.1.2 可靠性准则

定义：

控制网发现（或探测）观测值粗差的能力（称内部可靠性）和抵抗观测值粗差对平差结果影响的能力（称外部可靠性）。

作用：

可靠性准则可以提供衡量控制网内部观测值相互控制、检核的量化数值和可能出现但不能被发现的最大模型误差值。

3.3 工程控制网的质量准则

提高实现质量的办法

- 对网进行第二次独立观测（复测）
- 布网时事先考虑用独立的附加观测值来控制网的结构（较常用）

3.3 工程控制网的质量准则

内部可靠性

内部可靠性是假设控制网中只有一个观测值 l_i 包含粗差 ∇_{li} 且观测值粗差主要由某种系统性影响或点的变动所引起的假设情况下导出的。

$$l' = l + \nabla_l$$

3.3 工程控制网的质量准则

$$\nabla_{vi} = -(Q_{VV}P)_{ii}\nabla_{li} = -r_i\nabla_{li}$$

r_i为矩阵$(Q_{VV}P)$主对角线上的元素

$$r = \sum_{i-1}^{n} r_i = n - u = tr(Q_{vv}P)$$

3.3 工程控制网的质量准则

称 r_i 为观测值 l_i 的多余观测分量，定义为观测值的内部可靠性。

r_i 反映控制网发现观测值 l_i 中粗差的能力。

r_i 愈大，通过统计检验，能发现该观测值中粗差的下界值 $\nabla_0 l_i$ 愈小；

3.3 工程控制网的质量准则

多余观测分量的特点：

1）$0 \leqslant r_i \leqslant 1$。

2）观测值的内部可靠性与其精度成反比。

对于一个确定的网和设计方案，观测值的精度愈高，则其可靠性愈低，愈不可靠；观测值的精度愈低，愈可靠。

3）多余观测数愈大，网的可靠性愈高，建网费用也愈高。

3.3 工程控制网的质量准则

4）对于独立网来说，观测值的内部可靠性是与基准的位置无关的不变量。

5）一个好的控制网，观测值的多余观测分量应大于0.3。

外部可靠性

未被发现的模型误差对于点位坐标或其函数的影响具有更大意义。对于观测值中只含一个粗差的情形，未被发现的粗差 $\nabla_o l_i$ 对未知数向量的影响可表为

$$\nabla_{xi} = Q_{xx} A^T P \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ \nabla_0 l_i \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\nabla x_i = Q_{XX} a_i^T p_i \nabla_0 l_i$$

3.3.1.3 灵敏度准则

对变形监测网，定义为在给显著水平α_0和检验功效 β_0下，周期平差结果统计检验时，能发现位移向量的下界值。灵敏度是一个相对概念，即对于不同的变形向量具有不同的下界值。

一般将变形向量用表示其大小的模 a 和表示其方向的单位向量 g 来表示，即

$$d = \| d \| \cdot g = ag$$

灵敏度用 a 来度量，它与单位向量 g（又称形式向量）有关。愈小a 灵敏度愈高。

3.3 工程控制网的质量准则

- 在变形监测网设计中，除考虑精度、可靠性和费用等准则外，要求所布设的网对需要监测的变形向量具有尽可能高的灵敏度。

- 灵敏度实质上是特殊方向上的网点精度的反映，网的灵敏度愈高，所要求的观测值的精度也愈高。

3.3.1.4 费用准则

- 控制网的费用一般包括用于设计、造标埋石、交通运输、仪器设备购置、观测、计算、检查等各项费用。
- 网的设计有两个原则：

  最大原则（费用一定，网的质量最好）

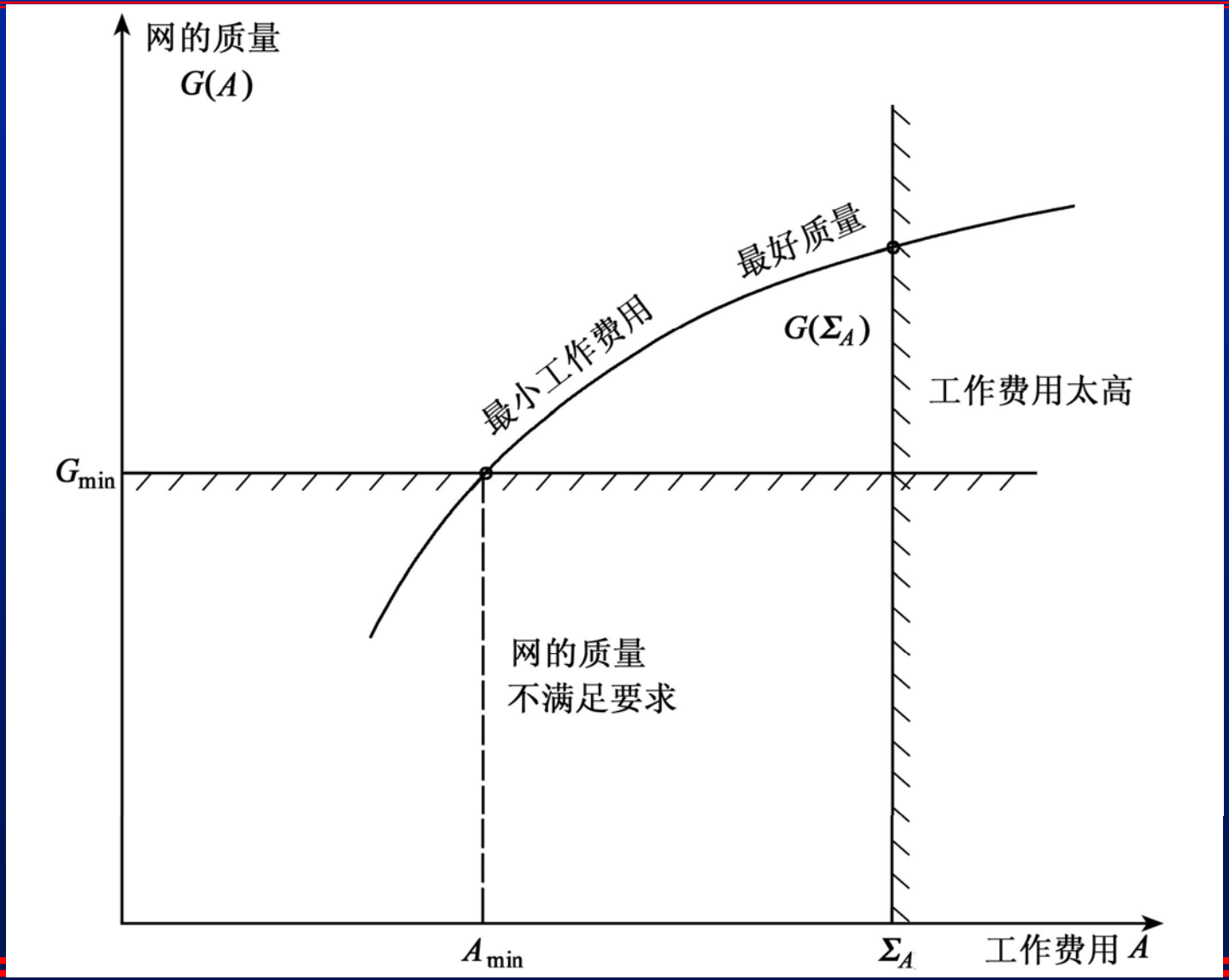
  最小原则（质量满足要求，费用最小）
- 建网费用常用观测值权的函数来度量，如

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = \min$$

3.3 工程控制网的质量准则

- 即用观测值的权的总和最小作为费用准则。据统计，网的测量费用于网的计算费用相比，后者不到8%。通过优化设计，增加微不足道的设计计算费用，可显著降低测量费用。
- 不难理解，精度愈高，观测值的权愈大，则建网费用愈高；同样，多余观测数愈多，网的可靠性提高，也要以增加费用为代价。

3.3 工程控制网的质量准则



3.4 工程控制网的优化设计

- 工程控制网的优化设计分类
- 优化设计的任务
- 工程控制网的优化设计方法
- 模拟法优化设计

3.4.1 工程控制网的优化设计分类

工程控制网的优化设计一般分为四类，各类设计的含义列于下表：

分　类	固定参数	待定参数	含　义
零类设计(ZOD)	A，P	Q_{xx}	基准设计
一类设计(FOD)	P，Q_{xx}	A	图形设计
二类设计(SOD)	A，Q_{xx}	P	观测精度设计
三类设计(THOD)	Q_{xx}，部分 A 和 P	部分 A 和 P	已有网的改进

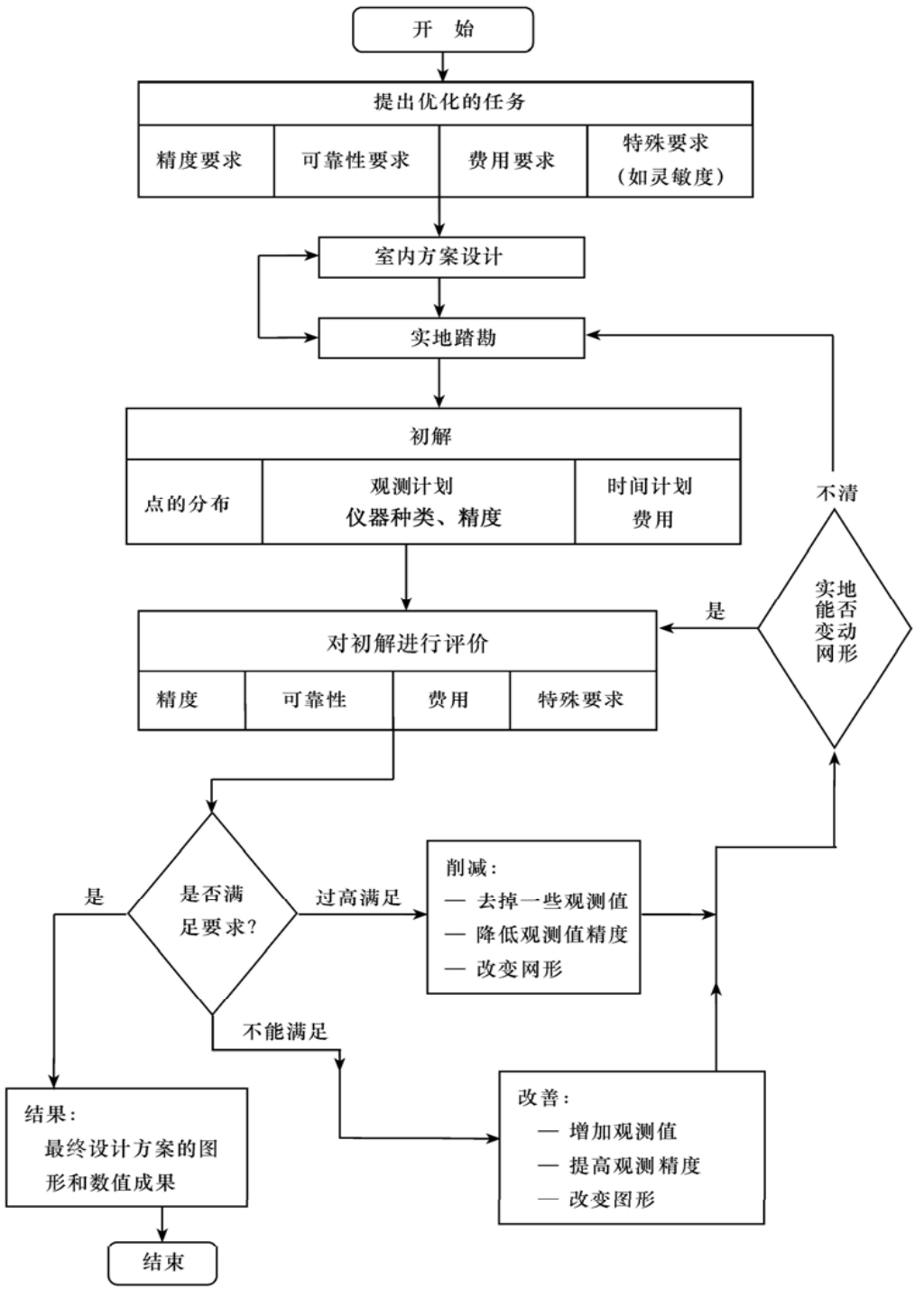
上述分类只是从概念上去理解，网的设计不一定完全按此思路，常常是几类设计同步进行。

3.4.2 优化设计的任务

网的优化设计是一个迭代求解过程，它包括以下内容（参见图3-2）：

- ✓ 提出设计任务；
- ✓ 制定设计方案；
- ✓ 进行方案评价；
- ✓ 进行方案优化。

图3-2 控制网优化的内容和流程



3.4.3 工程控制网的优化设计方法

网的优化设计方法有两种：

解析法：

通过数学方程用最优化方法求解。

模拟法：

根据经验和准则，通过计算比较、修改，得到最优方案。

3.4.3.1 解析法优化设计

- 最优化问题
  - 静态问题
    - 无约束问题
      - 一维问题
      - n 维问题
    - 约束问题
      - 线性规划
      - 非线性规划
  - 动态问题

3.4.3.2 模拟法优化设计

1. 模拟法优化设计过程：

① 设计网形、实地踏勘；

② 定初始方案，模拟观测值，网平差；

③ 观测修改；

④ 再作模拟计算，重复进行，直到满意。

⑤ 人机交互方式进行。

3.4.3.2 模拟法优化设计

2. 基于可靠性的模拟优化设计法

要点和步骤：

1）网的初始方案应对所有可能观测的边和方向进行全测，是一个“肥网”或“密网”。

2）观测值之间的精度相差不要太大，边角间的精度应基本匹配。

3）观测精度应选取仪器所能达到的最高精度，使优化时有降低的余地。

3.4.3.2 模拟法优化设计

4）模拟初始观测方案，进行平差计算，对精度、可靠性乃至灵敏度计算结果进行分析：观测精度是否合理，是否需作调整，基于观测值内部可靠性指标按从“肥”到“瘦”，从“密”到“疏”的策略进行网的优化设计。

GPS网也可看作是全边角网，故模拟法优化设计方法同样可以用于GPS网。

生成正态标准随机数；

人工生成一个观测方案文件：

网名·FA2，

自动生成平差所需的观测值文件：

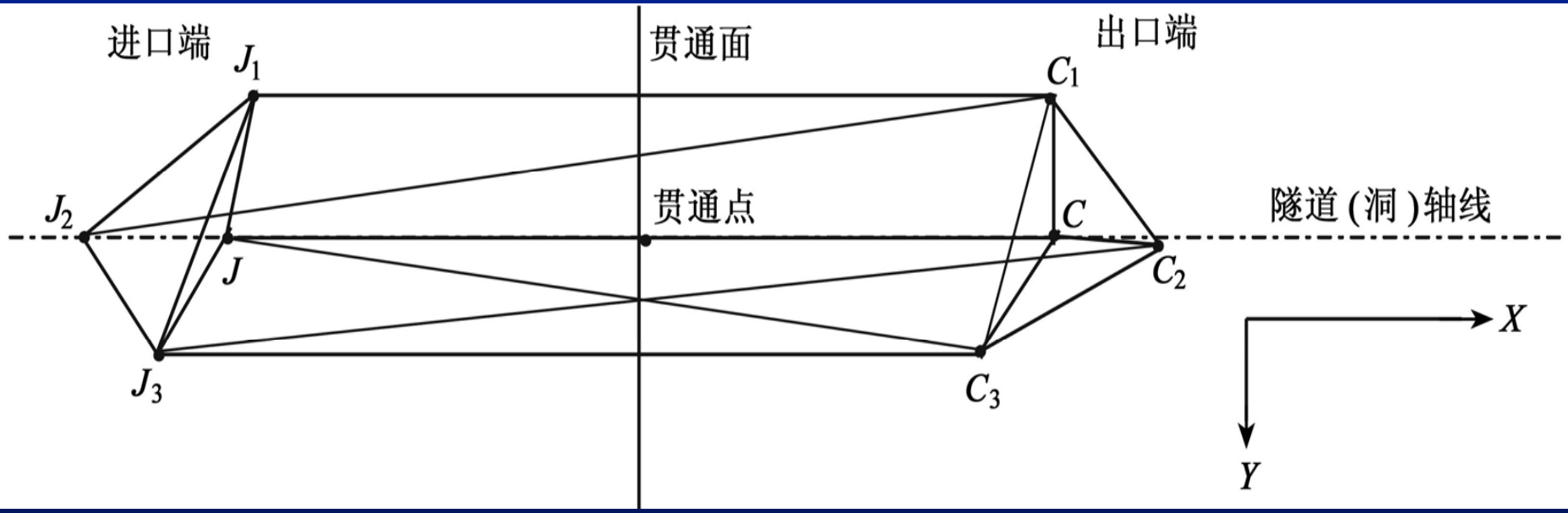
网名·IN2

平差计算：

根据精度和可靠性指标得到优化设计方案。

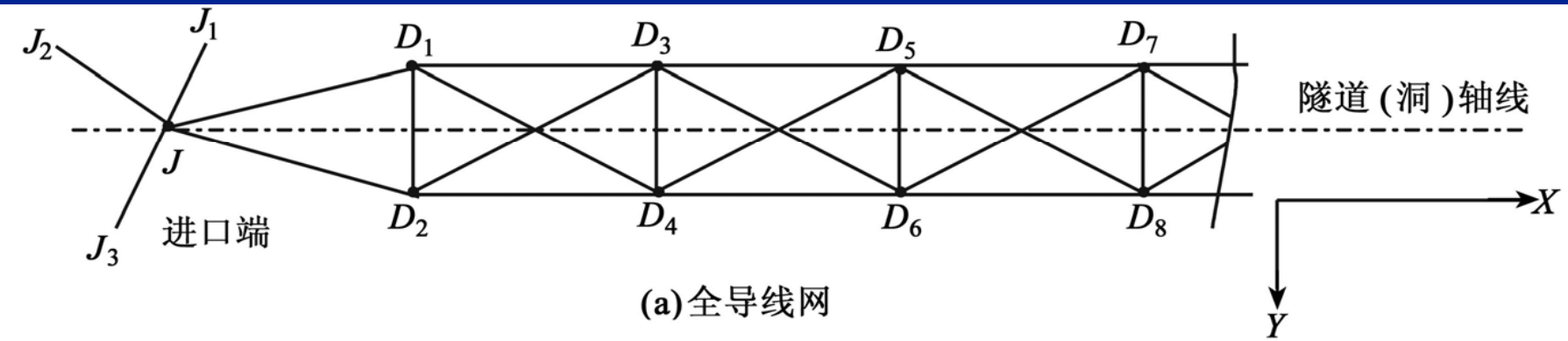
3.5 典型工程控制网

隧道（洞）洞外GPS平面控制网布设示意图

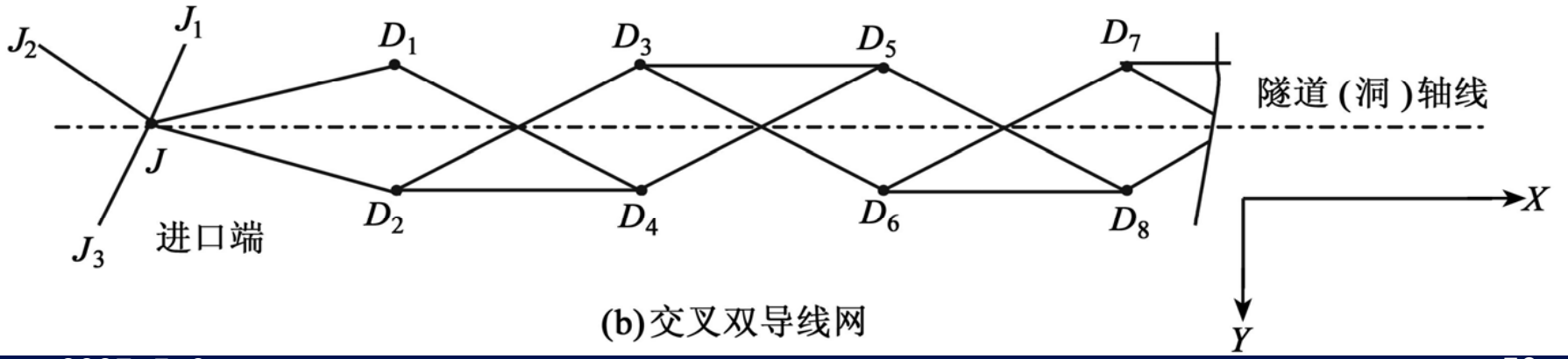


3.5 典型工程控制网

洞内导线网布设示意图

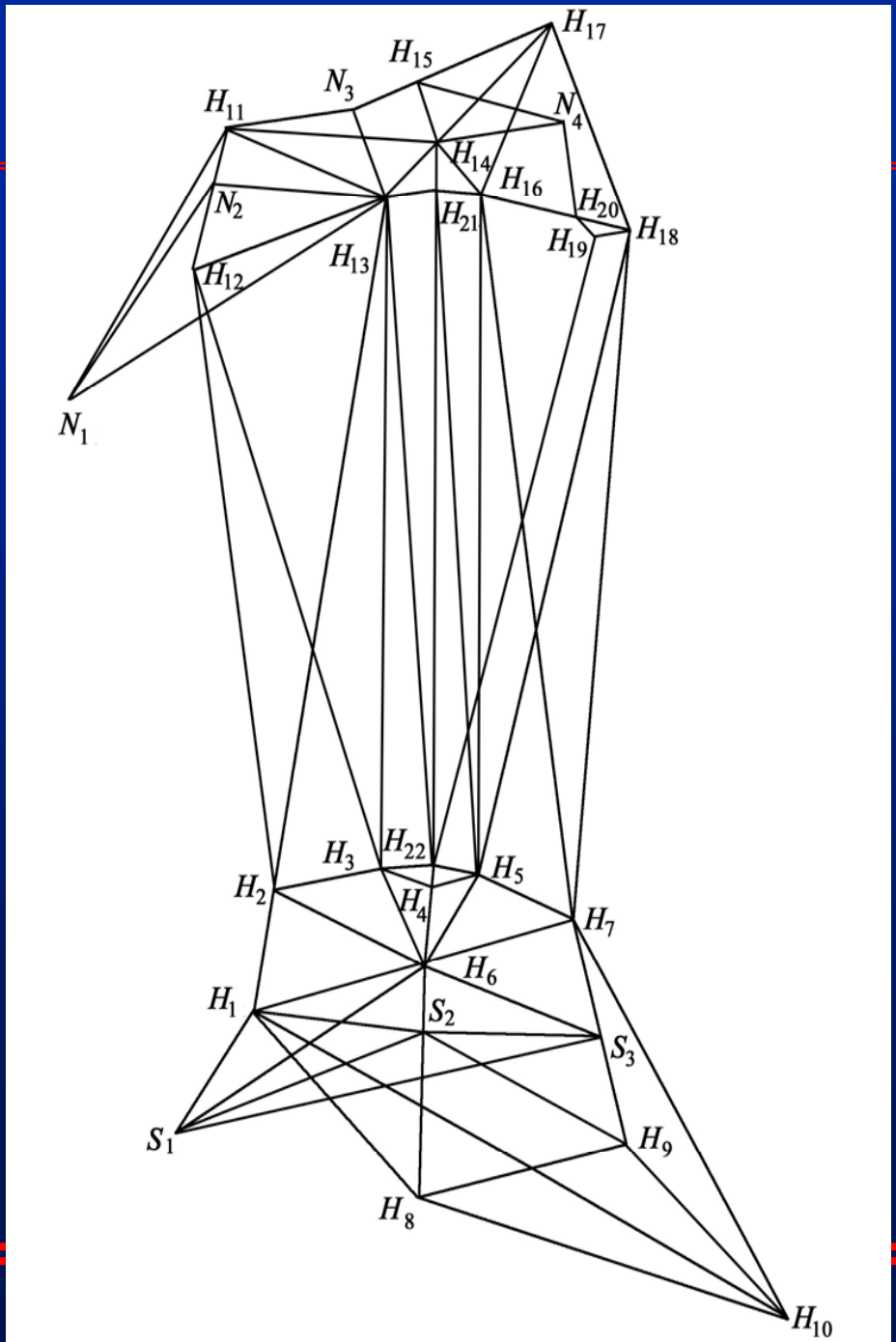


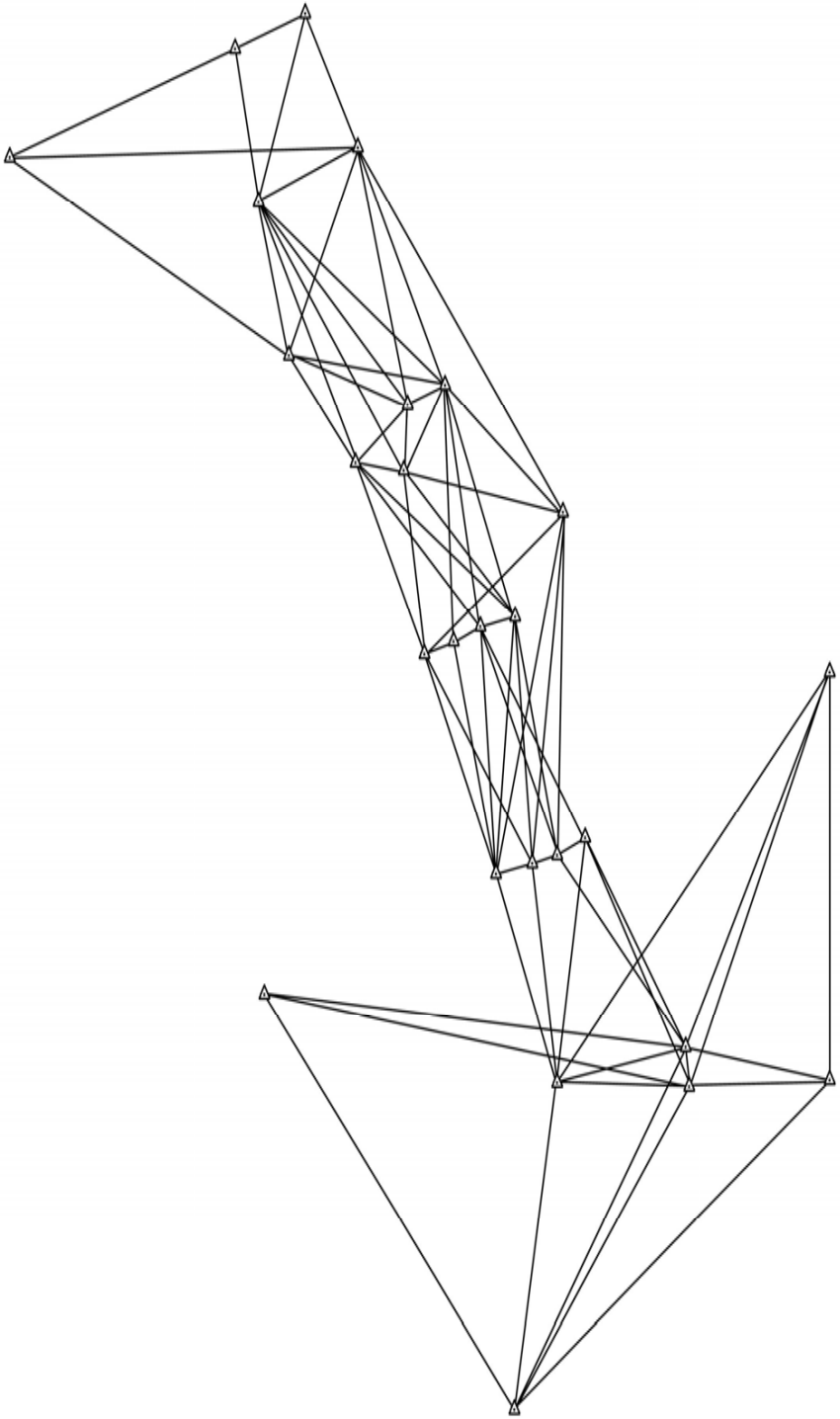
(a)全导线网



(b)交叉双导线网

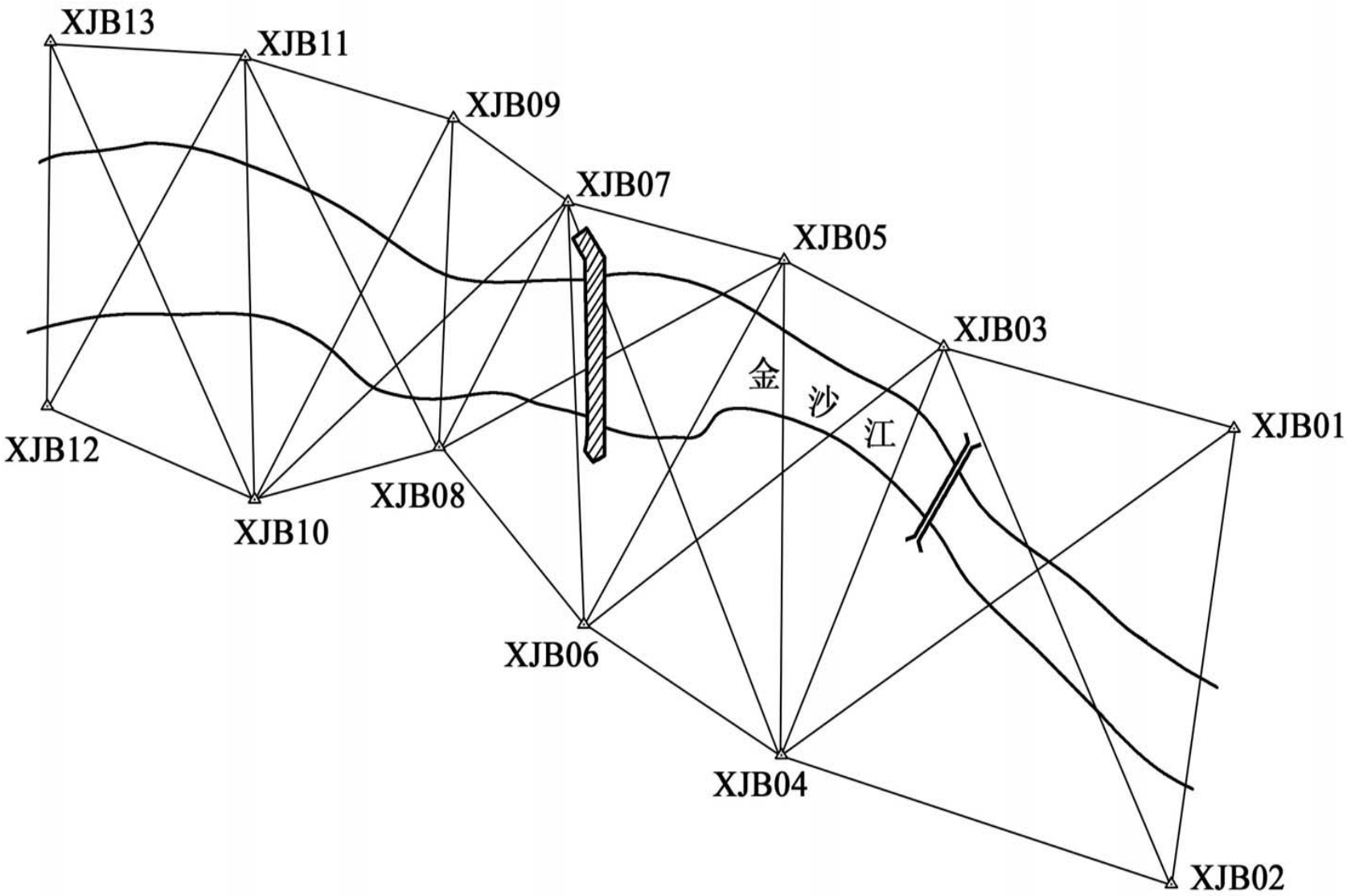
某大桥GPS首级平面控制网



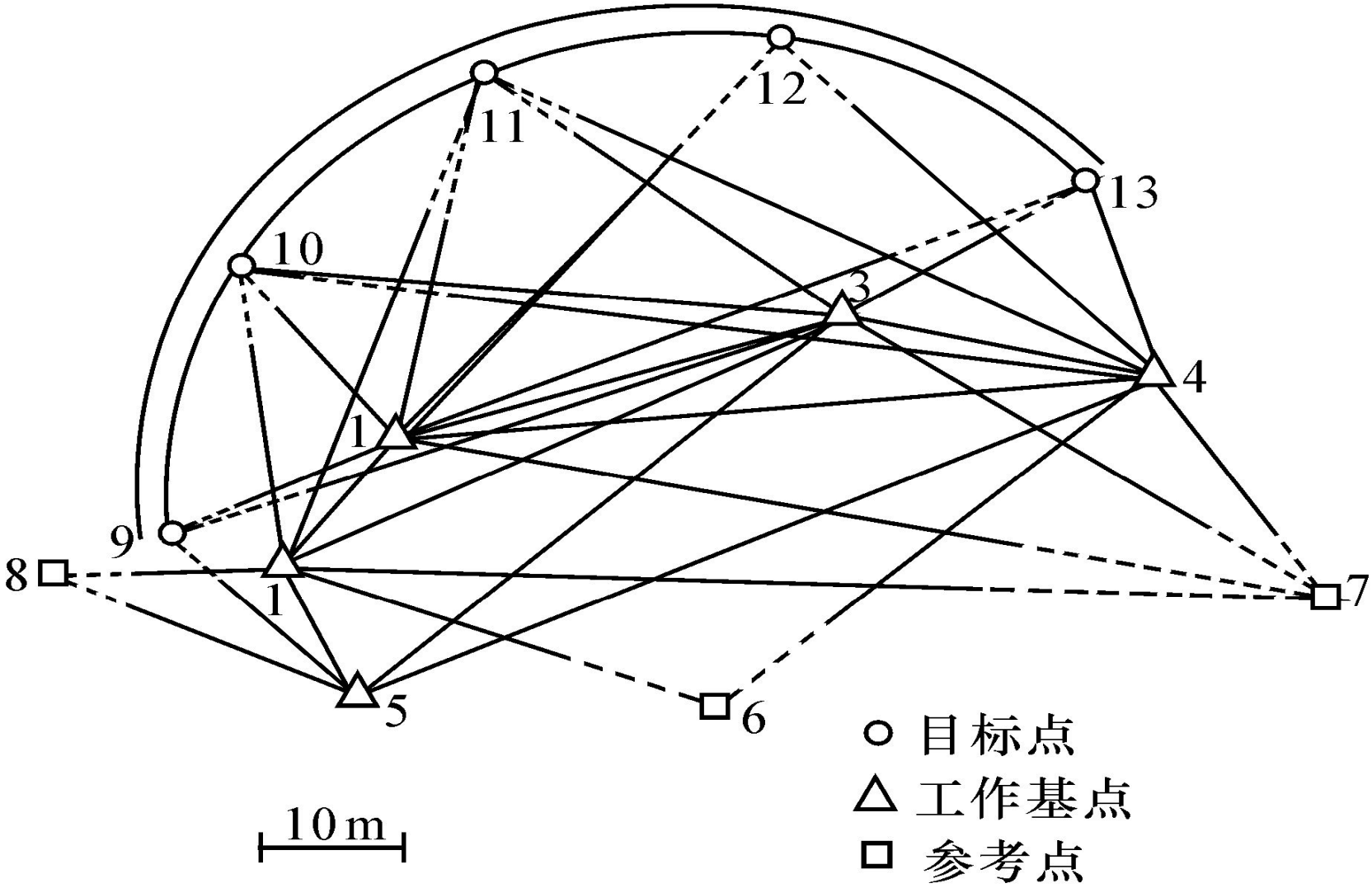


某大型水利枢纽工程施工控制网

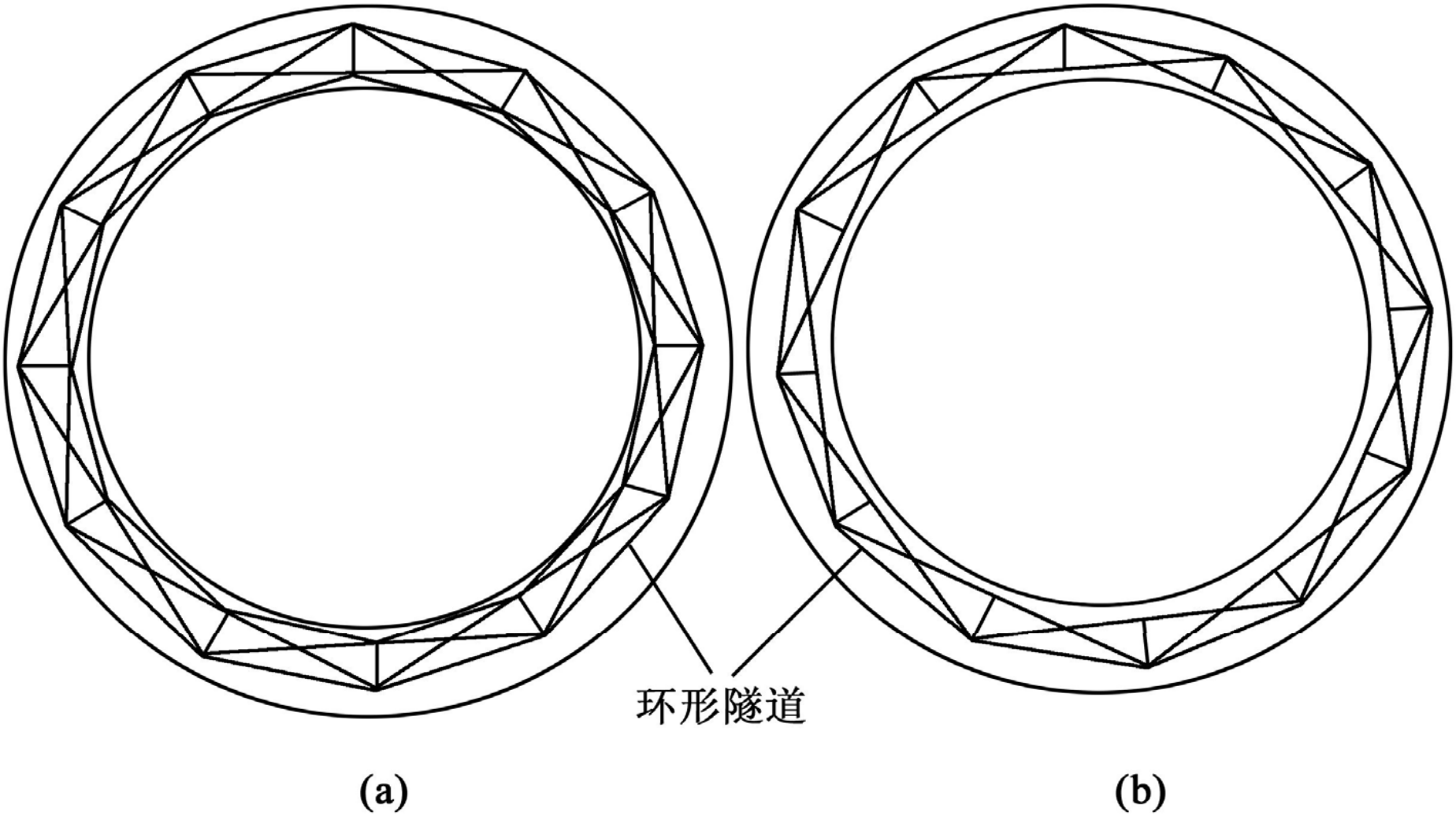
向家坝施工控制网图

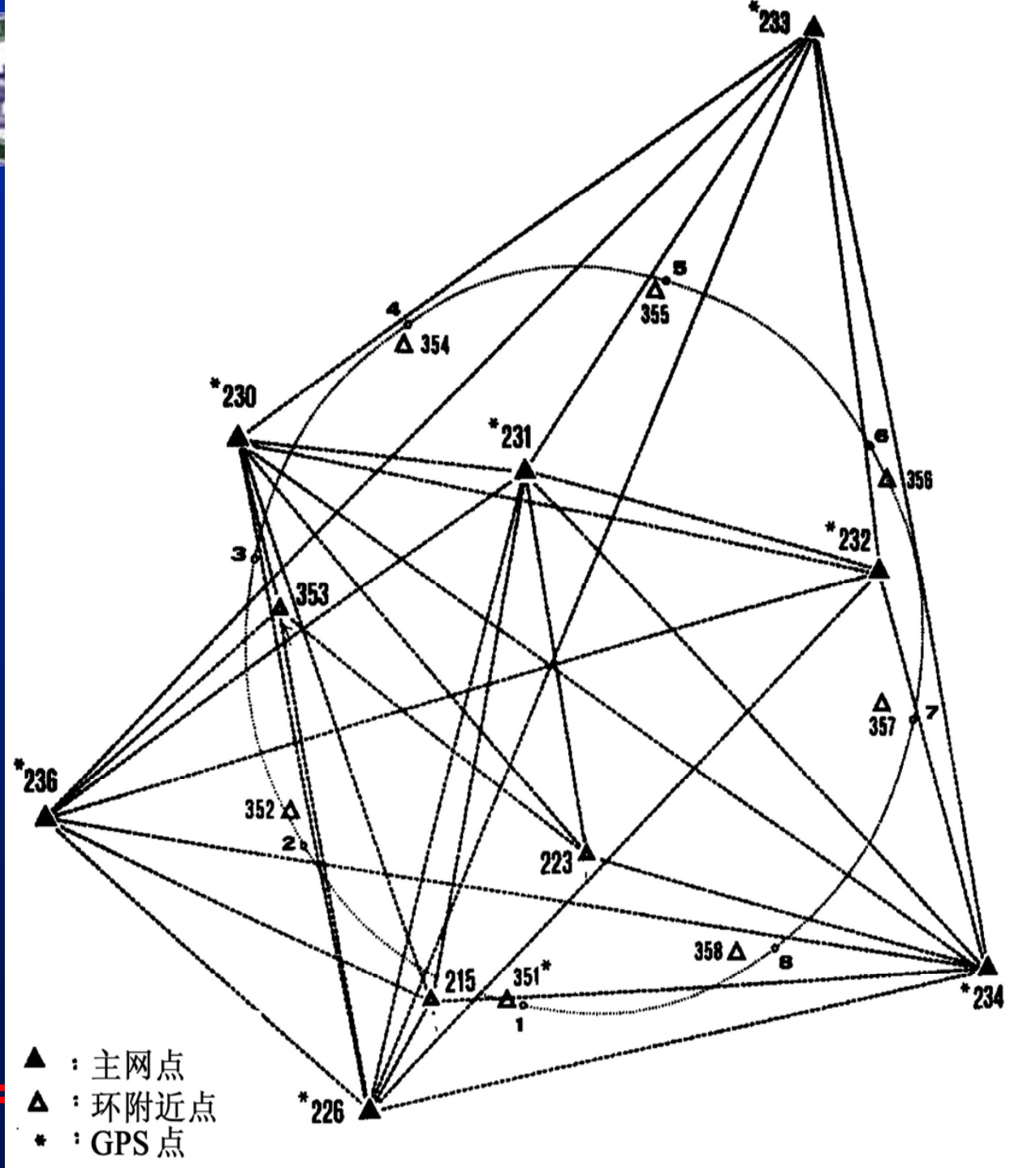

XJB13
XJB11
XJB09
XJB07
XJB05
XJB03
XJB01
XJB12
XJB10
XJB08
XJB06
XJB04
XJB02
金
沙
江

某拱坝变形监测网



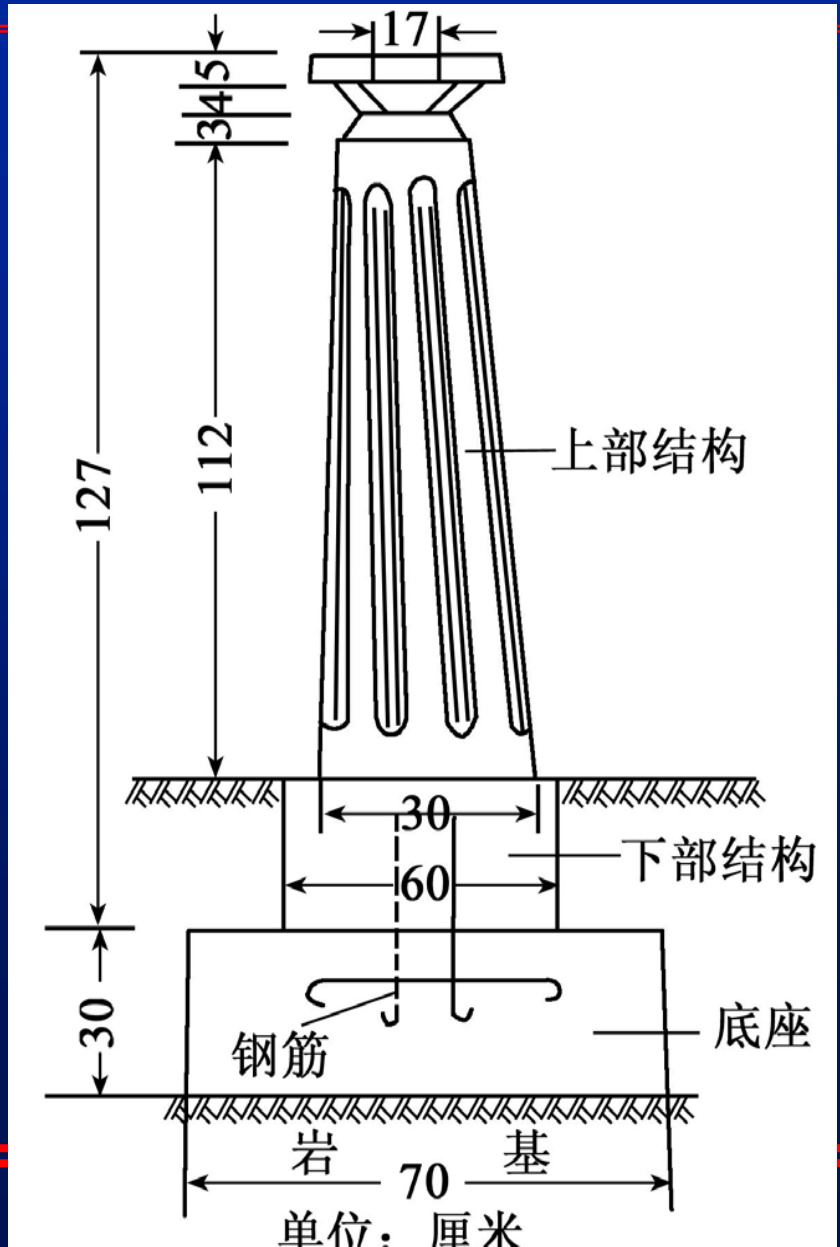
高能离子加速器安装测量控制网





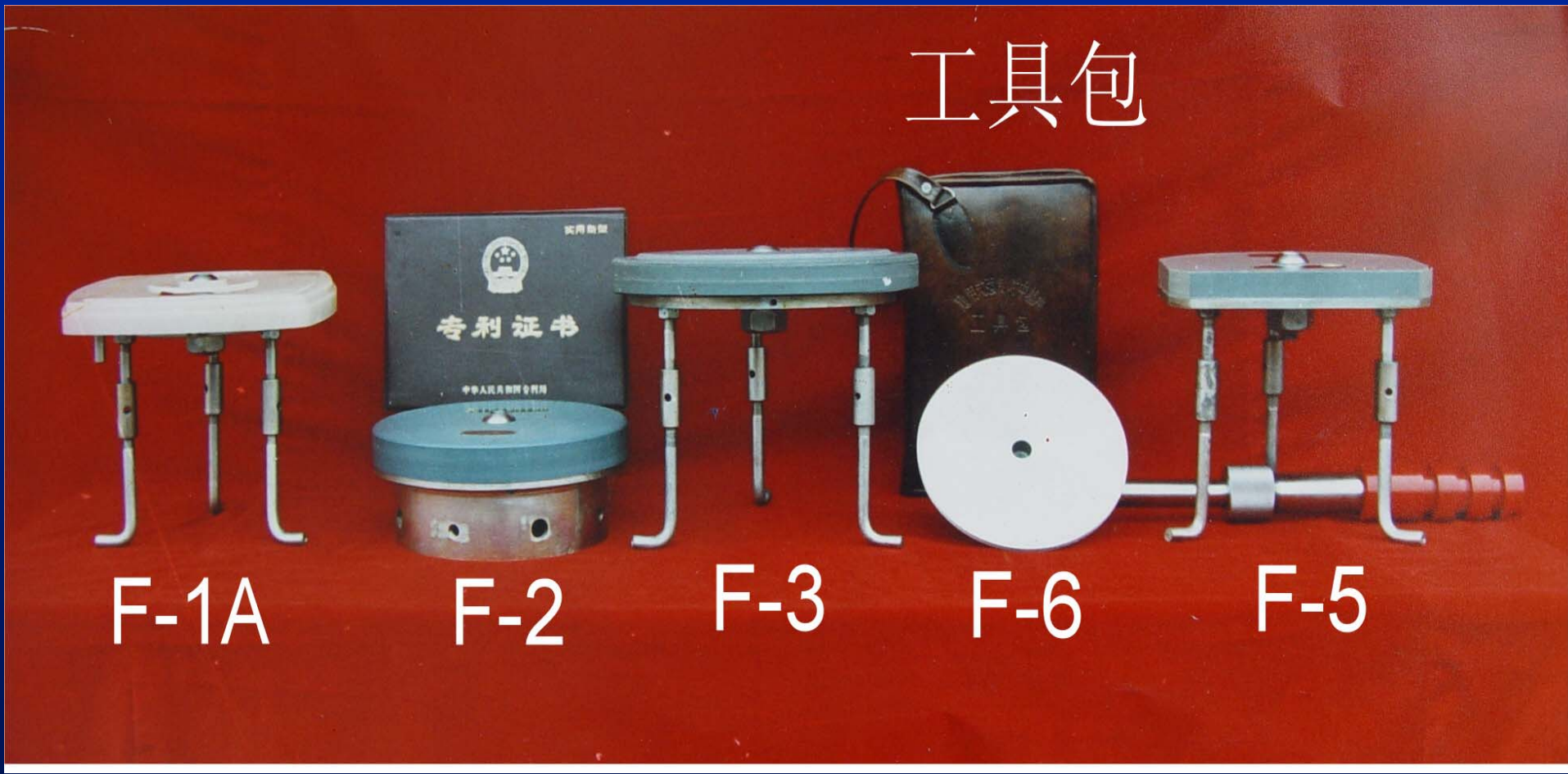
大型正负电子对撞机地面控制网

3.6 控制点的埋石与标志

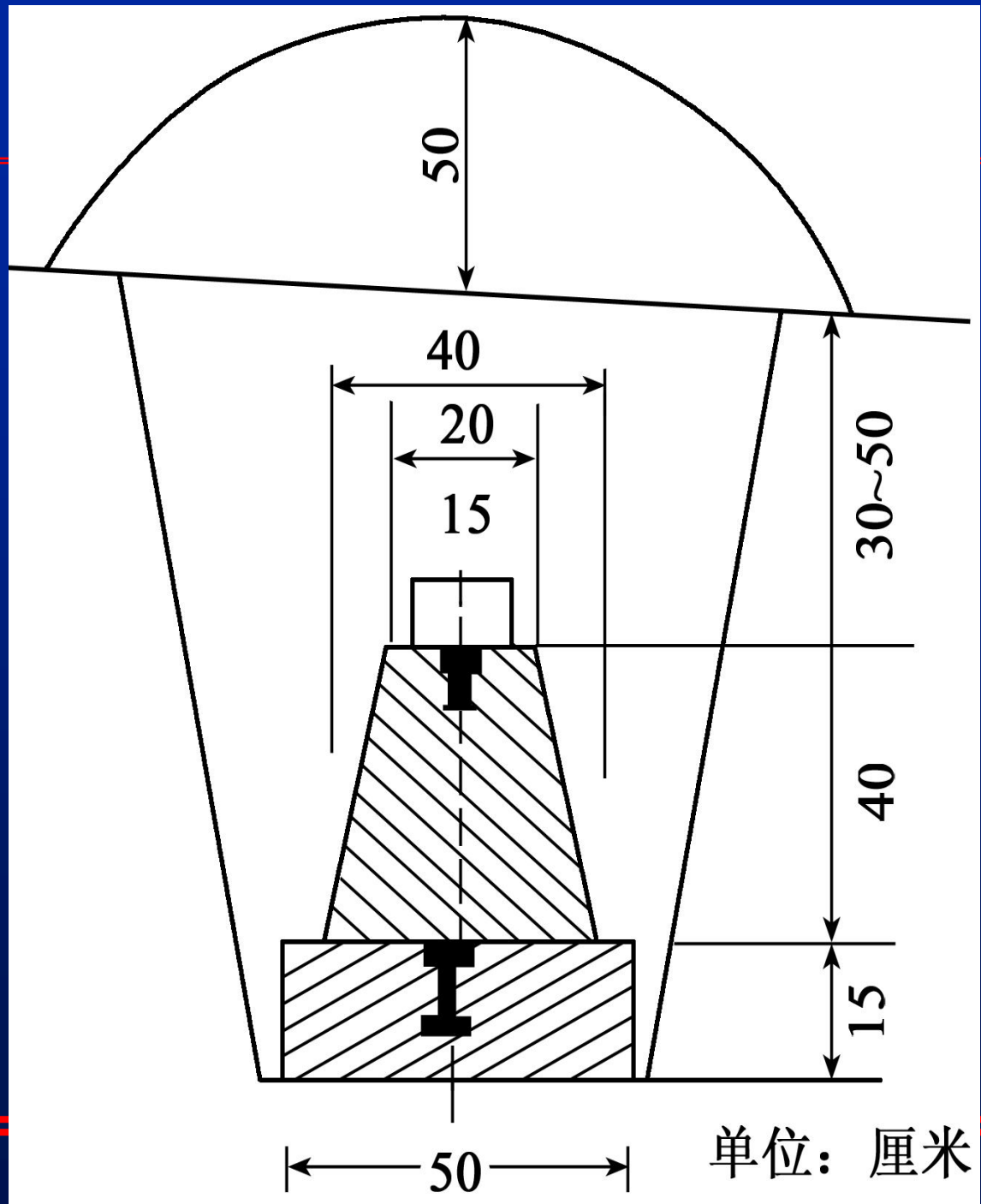


带强制对中装置的观测墩

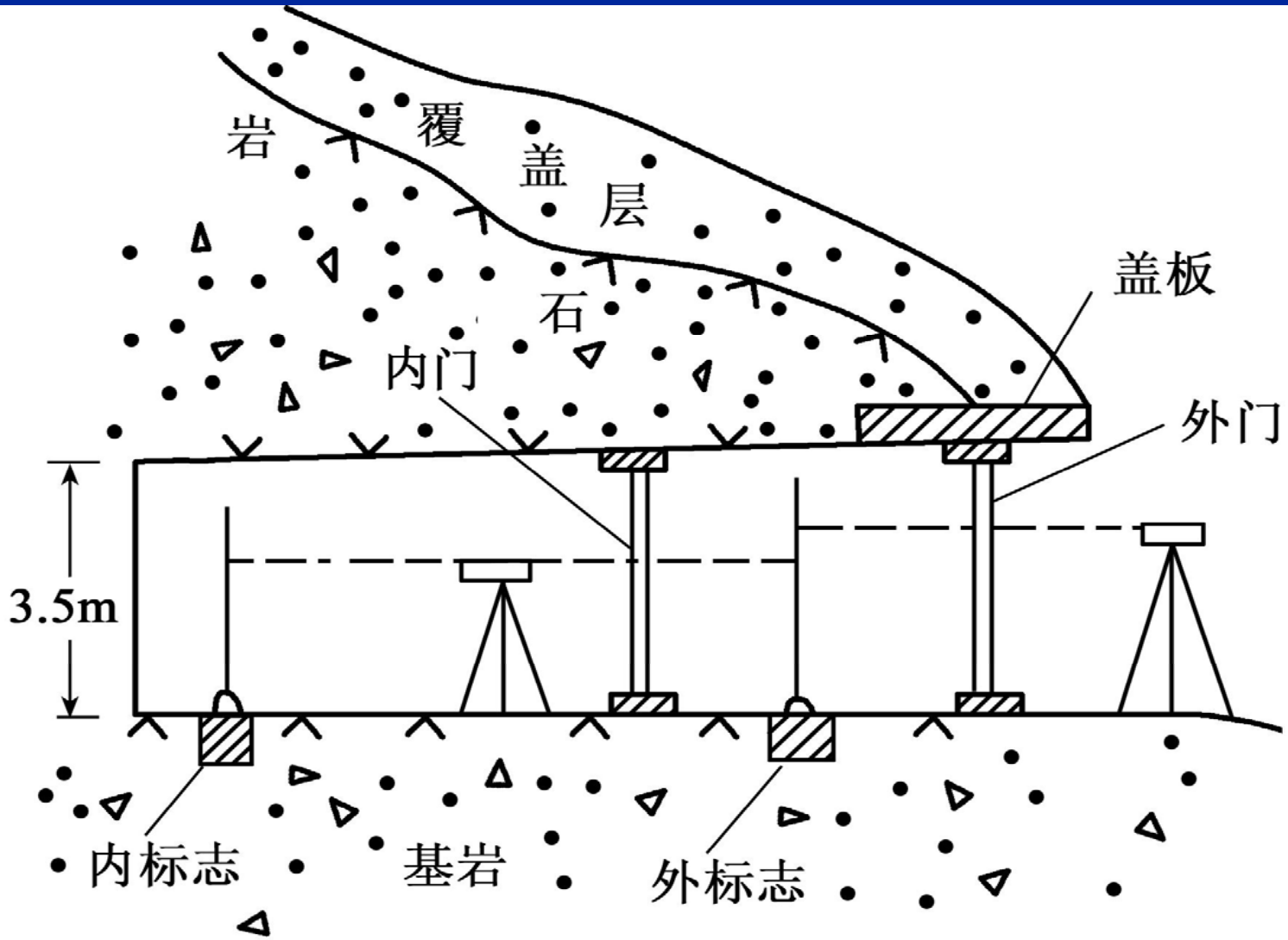
强制对中装置



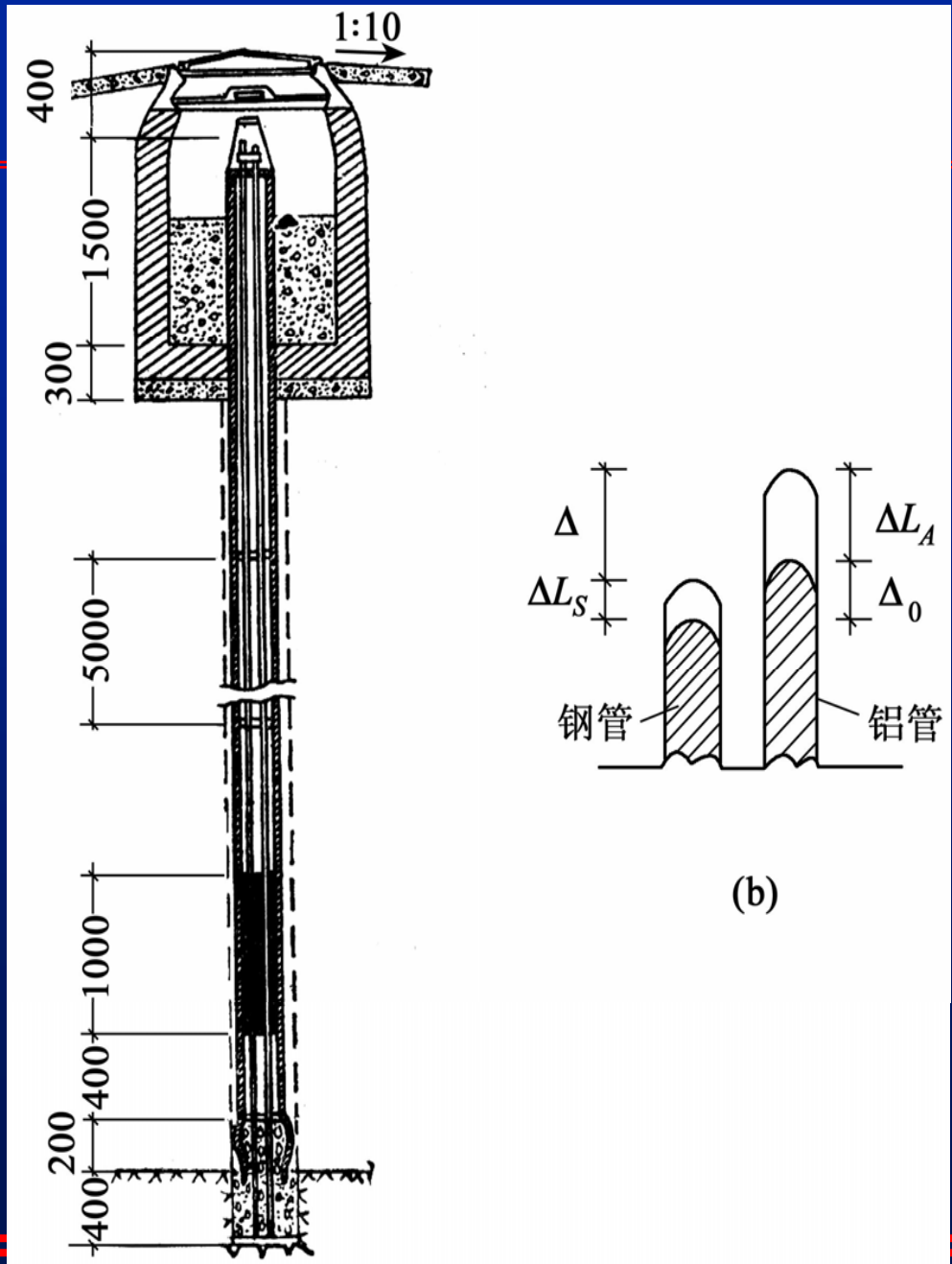
预制混凝土水准标石



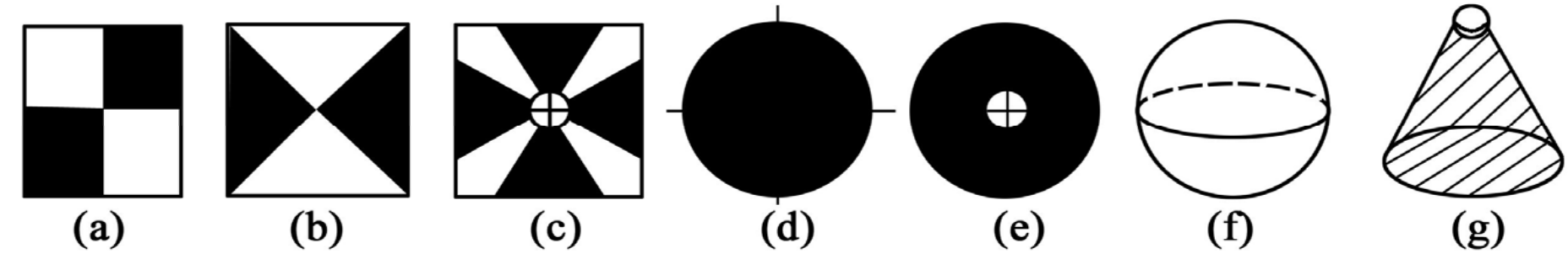
平硐岩石水准标石



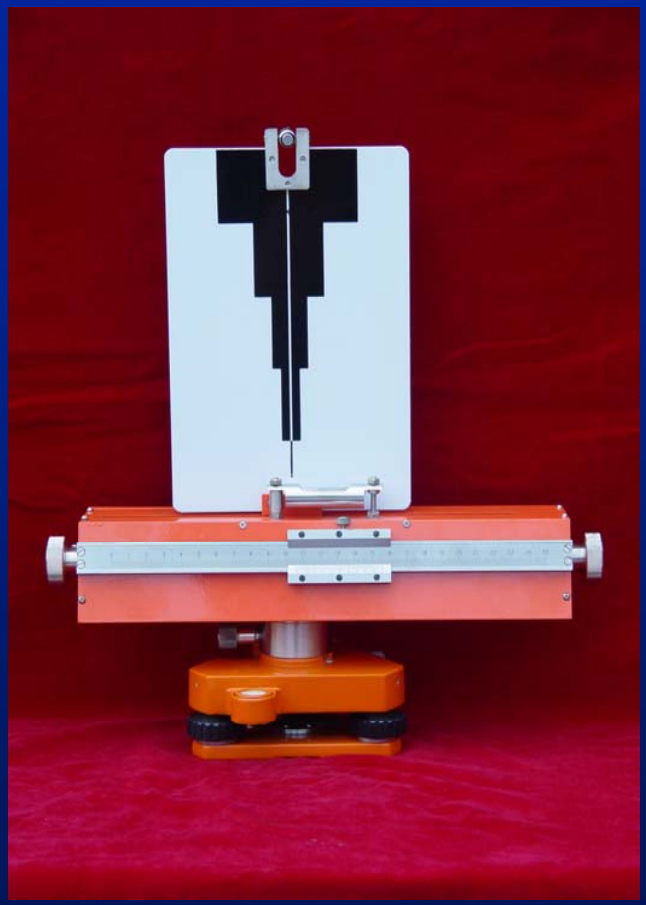
深埋双金属管水准标


1:10
400
1500
300
5000
1000
400
200
400
单位：毫米 (a)
Δ
ΔL_S
ΔL_A
Δ_0
钢管
铝管
(b)

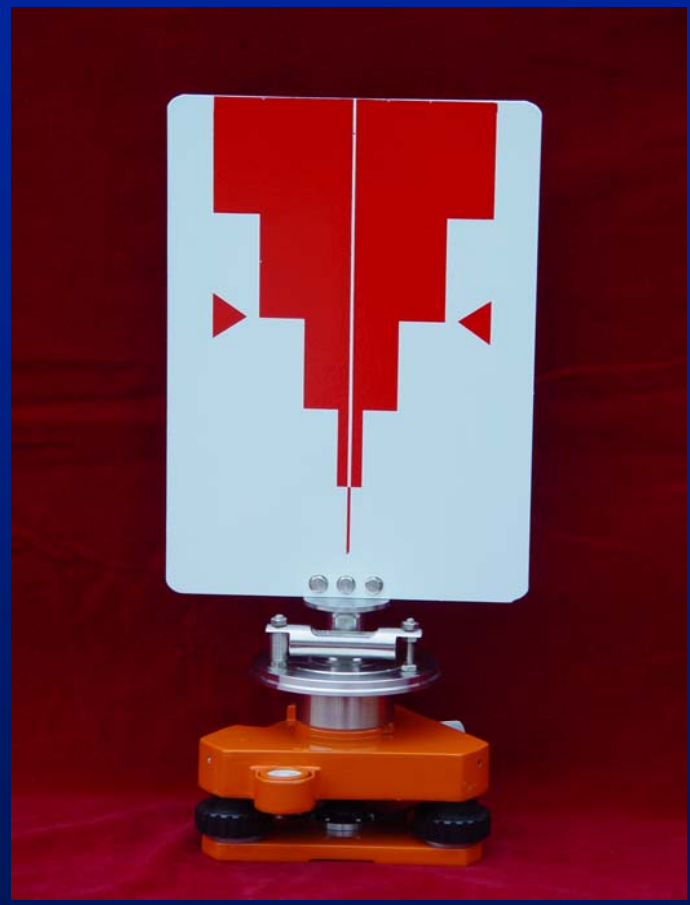
照　准　标　志



照 准 觇 牌

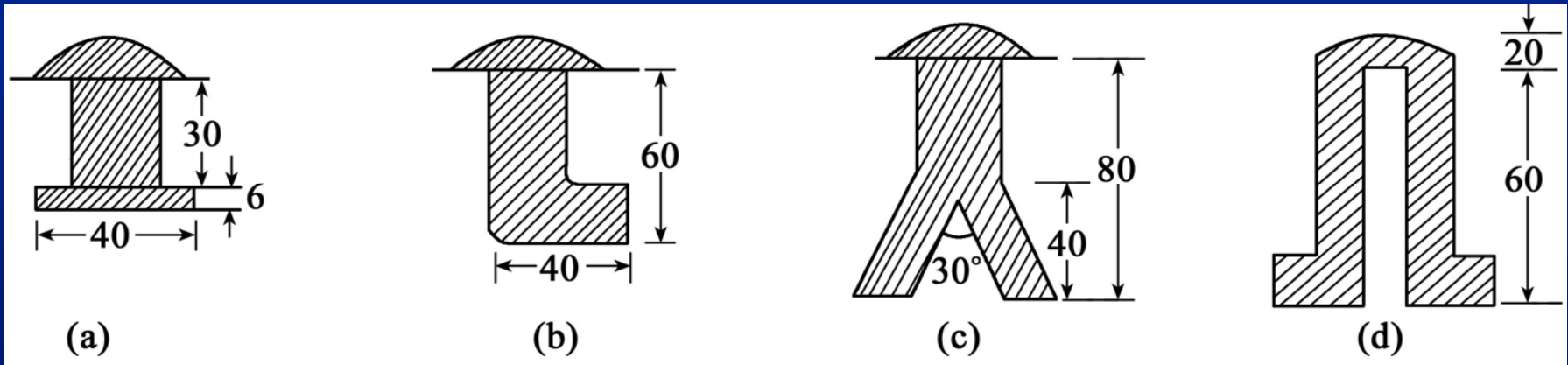


精密活动觇牌



精密固定觇牌

观 测 标 志



3.7 工程控制测量内外业一体化

3.7.1 何谓工程控制测量内外业一体化

- 控制测量内外业一体化是指主要的内外业工作连续一惯地完成。
- 需要考虑现有的仪器软、硬件功能，计算机的软、硬件发展，将大地测量学、测量平差、工程测量学以及数学的有关知识综合在一起，并且对用户的需求进行分析的基础上才能研制出一个好的控制测量内外业一体化软件系统。

3.7.2 工程控制测量内外业一体化系统

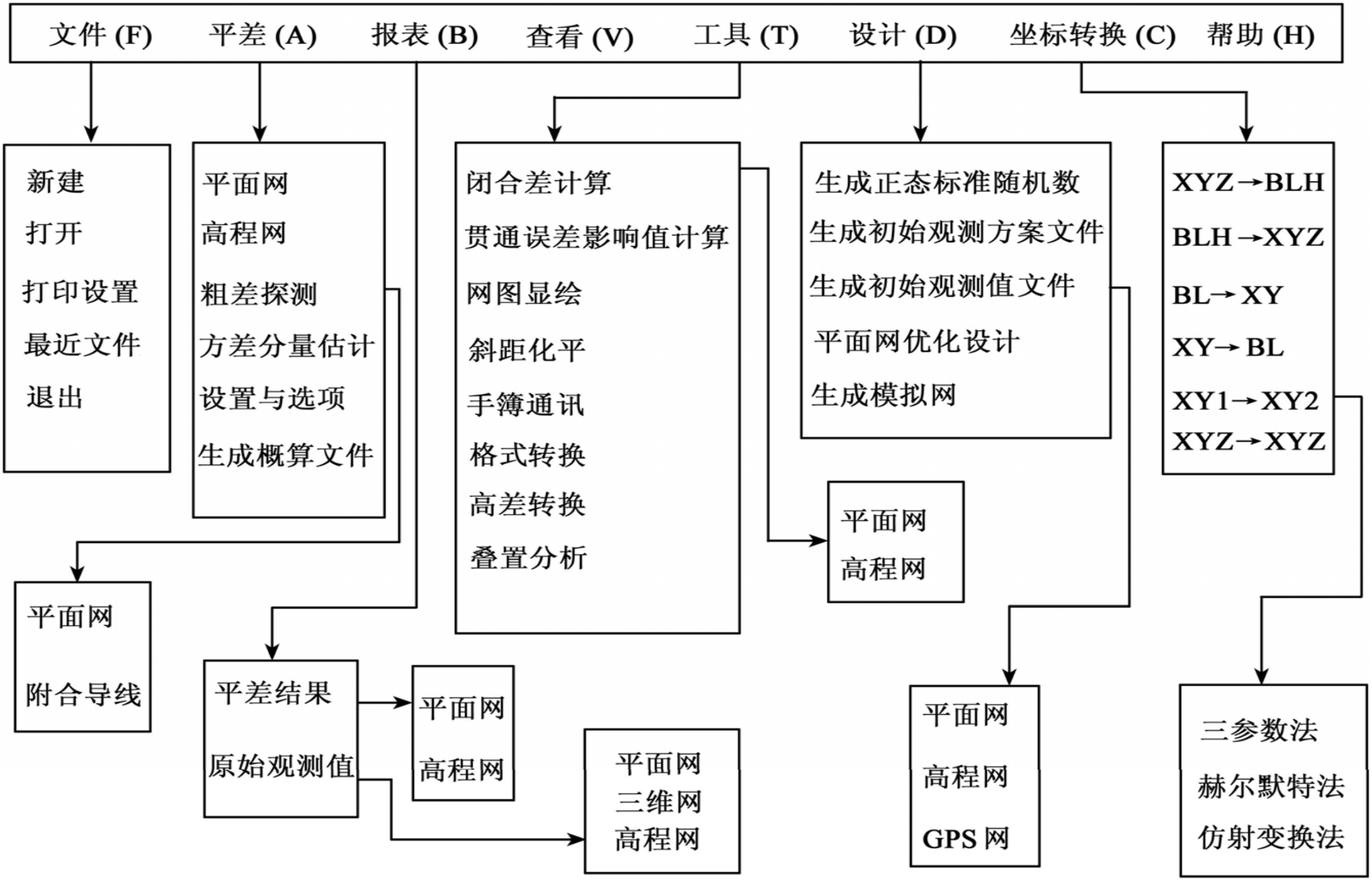
科傻系统(COSA)，意即用高科技集成的傻瓜式控制测量数据采集和处理系统。

1）“基于掌上型电脑的测量数据采集和处理系统”（简称EREPS或COSA_PDA）

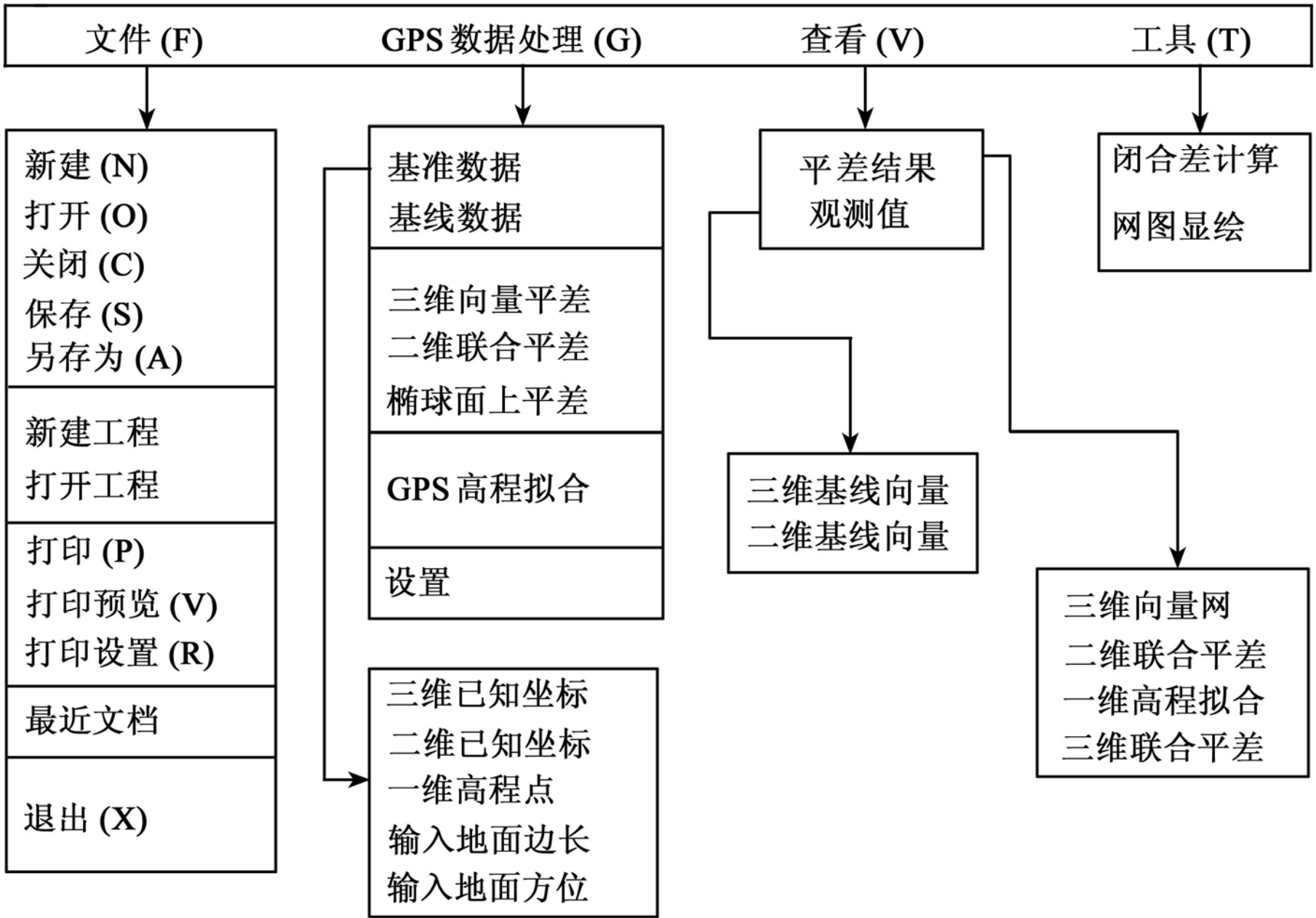
2）“地面测量工程控制测量数据处理通用软件包”（简称CODAPS或COSA_WIN）

3） “GPS工程控制网平差通用软件包”（简称COSA_GPS）

CODAPS 功能菜单框图



COSA_GPS功能菜单框图



谢 谢 大 家！