

## 第七章

# GPS控制测量设计与实施



# 主要内容

- 7.1 基本概念
- 7.2 控制测量设计基础
- 7.3 控制网设计(图形, 密度, 基准)
- 7.4 控制测量准备
- 7.5 控制测量实施
- 7.6 高程测量



卫星控制测量是高精度测绘常用的作业方式，按其工作性质可以分为外业观测和内业数据处理两方面。

介绍对控制测量设计涉及的基本概念与基本内容

对控制测量中提前准备工作进行介绍

重点阐述了控制测量实施过程的具体要求和过程



# 7.2 控制测量设计基础

## 7.2.1 GPS网的特征条件

### 1. 理论最少观测时段：

若某GPS网由 $n$ 个点组成，要求每点重复设站观测 $m$ 次，若采用 $N$ 台GPS接收机来进行观测，则该网的理论最少观测时段数为 $S_{\min}$ ：

$$S_{\min} = \text{ceil}(n \cdot m / N)$$

式中， $\text{ceil}()$ 是对实数进行向上取整，即得出绝对值比自变量绝对值大的最小整数。



由于GPS测量规范中对于不同精度等级网的重复设站次数有明确规定，因此在进行GPS网的设计时，根据网的精度等级、规模及作业单位计划投入的接收机数量，就可计算出完成GPS网的外业观测所需的理论最少观测时段。



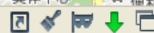
- 2.设计时段数

- 按照设计的外业观测方案完成GPS网的观测所需的观测时段数，称为设计时段数。

。







# 7.2 控制测量设计基础

## 3.基线总数

在一个时段中用 $N$ 台接收机进行同步观测时可以获得同步观测基线  $\frac{N(N-1)}{2}$  条。

若完成GPS网的外业观测用了 $S$ 个时段，则所得的基线总数（含非独立基线） $B_A$ 为：

$$B_A = S \times \frac{N(N-1)}{2}$$





# 7.2 控制测量设计基础

## 4. 独立基线数

每个观测时段所测得的独立基线数均为 $N-1$ 条，所以在该网中，独立基线的总数 为 $B_l$   $B_l = S \times (N - 1)$

在选取独立基线向量构网时，可在保证所选取的基线向量质量合格的前提下，尽可能选取使图形结构良好的基线向量。



# 7.2 控制测量设计基础

## 5. 必要基线数

指的是建立网中所有点之间相对关系所必须的基线向量数。在由 $n$ 个点组成的GPS网中，只需要有 $n-1$ 条基线向量就可以建立起所有点之间的相对关系。

$$B_N = n - 1$$

## 6. 多余基线数

GPS网中实际测定的独立基线向量数为：

$$B_l = S(N - 1)$$

故GPS网的多余基线数为：

$$B_R = B_l - B_N = S(N - 1) - (n - 1)$$



## 7.2控制测量设计基础

GPS网特征条件计算示例：

某GPS网由100个站组成，现有5台GPS接收机用于观测，每站规定设站次数5次，则全网的理论最少观测时段数为：

$$S_{\min} = \text{ceil}(n \cdot m / N) = \frac{(100 \times 5)}{5} = 100$$

全网共有基线向量数为：

$$B_A = S \times \frac{N(N-1)}{2} = 100 \times \frac{5(5-1)}{2} = 1000$$

其中，独立的基线向量数为：

$$B_I = S \times (N-1) = 100 \times (5-1) = 400$$



## 7.2控制测量设计基础

必要基线数为:

$$B_N = n - 1 = 100 - 1 = 99$$

多余基线数为:

$$B_R = B_l - B_N = 400 - 99 = 301$$



# 7.2控制测量设计基础

## 7.2.2 卫星可见性预报

GPS野外观测工作主要是接收GPS卫星信号，由于GPS定位精度与可观测卫星几何分布及可见卫星数目密切相关，而野外作业效率与所选用的接收机数目、观测的时间、观测的顺序密切相关。

因此在进行GPS外业观测之前要拟定观测调度计划。制定观测计划前，应根据测区的概略坐标与观测时间进行卫星可见性预报，以便选择最佳时段进行野外观测。





# 7.2控制测量设计基础

在卫星星座精度因子预测中，卫星可见数是一项重要指标，**可见卫星数与截止高度角直接相关，降低截止高度角，可见卫星数也会随之增加。**当观测卫星数少于4颗，PDOP值的计算是无意义的。

以某软件为例，输入2015年1月15日的广播星历，测区概略坐标为东经 $117^{\circ} 8'$ ，北纬 $34^{\circ} 13'$ ，观测时间为2015年1月20日2:00—22:00。设置仪器参数：高度截止角为 $15^{\circ}$ ，采样间隔为5 s；设置采样条件：卫星数大于4，PDOP值小于4，最少观测时间为60 min。布图如图10-1所示：

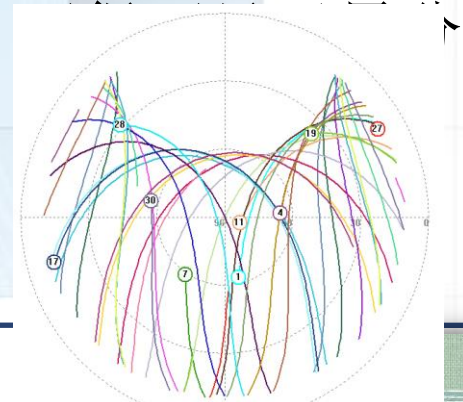


图10-1 卫星分布图

# 7.2控制测量设计基础

各时刻可见卫星数如图10-2所示：

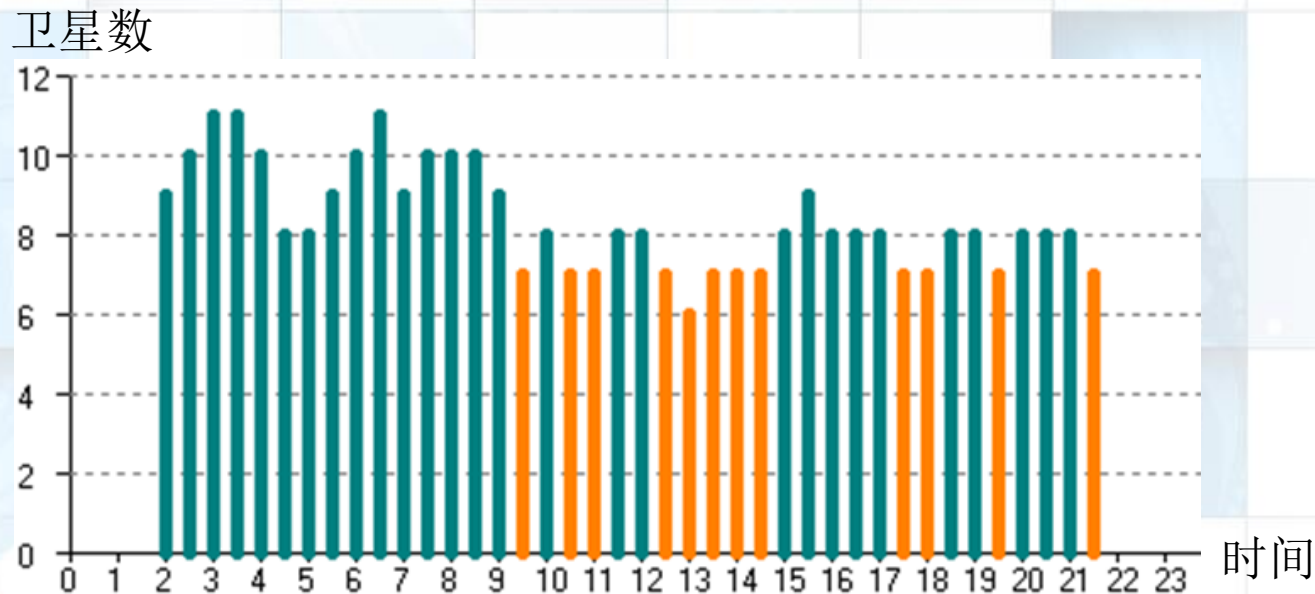


图10-2卫星数量图

## 7.2控制测量设计基础

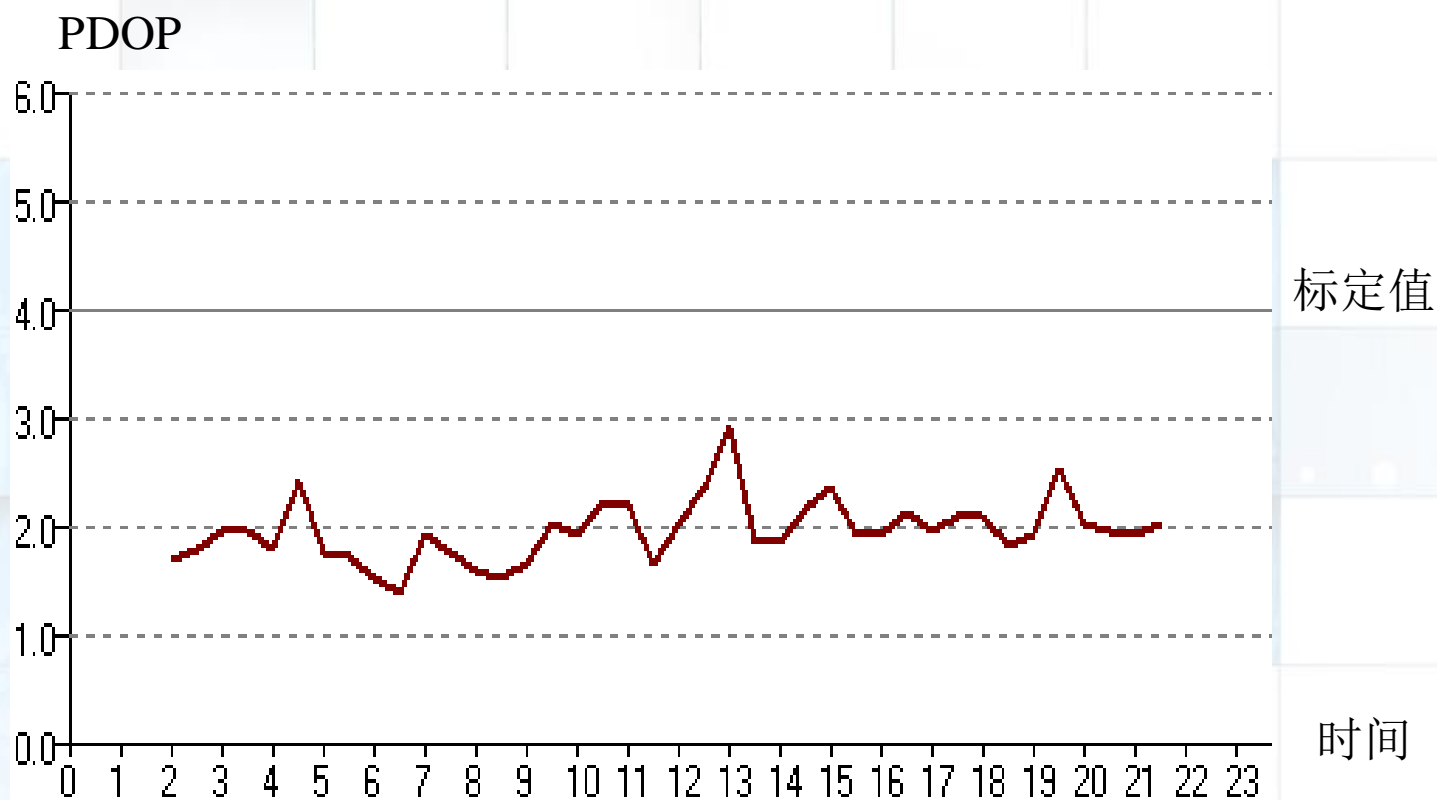


图10-3 PODP值

## 7.2控制测量设计基础

由图可知，一天内的各时刻可见卫星数均大于6颗，最大可见卫星数为11，观测条件较好，其中，在2:00-9:00、15:00-17:00、20:00-21:00各时段内可观测卫星数在8颗以上，可作为接收机参考工作时间；

各时刻卫星空间几何分布的PDOP值如图10-3所示，各时刻PDOP值均小于软件标定值4，可知卫星几何分布结构较好，定位精度较高。



# 7.2控制测量设计基础

## 7.2.3 数据质量控制指标

- ① 复测基线长度较差
- ② 同步环检验
- ③ 异步环检验
- ④ 基线重复性检验
- ⑤ 坐标分量闭合差
- ⑥ 环闭合差





# 7.2控制测量设计基础

## ① 复测基线长度较差

根据GB/T 18314-2009要求，B级GPS网基线外业预处理和C、D、E级基线处理，复测基线的长度较差 $ds$ 应满足下式

$$ds \leq 2\sqrt{2}\sigma$$

式中， $\sigma$ 为基线测量中误差，单位为毫米（mm），

$d_s = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$  式中  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ ，为复测基线的分量较差； $\sigma$ 为对基线测量中误差的要求，B、C、D、E级GPS网基线测量中误差 $\sigma$ 采用外业测量时使用的GPS接收机的标称精度。计算时边长按实际平均边长计算。



# 7.2控制测量设计基础

## ② 同步环检验

同步环闭合差不超限，不能说明环中所有基线质量合格；

同步环闭合差超限肯定表明闭合环中至少有1条基线向量有问题。



# 7.2控制测量设计基础

## ② 同步环检验

根据GB/T 18314-2009，应对所有三边同步环进行检验，闭合差应满足如下要求

$$W_x \leq \frac{\sqrt{3}}{5} \sigma$$

$$W_y \leq \frac{\sqrt{3}}{5} \sigma$$

$$W_z \leq \frac{\sqrt{3}}{5} \sigma$$

式中， $\sigma$ 为对基线测量中误差的要求（按网的实际平均边长计算）。对于四站或更多站同步观测而言，应用上述方法检查一切可能的三边环闭合差。



# 7.2控制测量设计基础

## ③ 异步环检验

当异步环闭合差不满足限差要求时，则表明组成异步环的基线向量中至少有1条基线向量的质量有问题。

根据GB/T 18314-2009，B、C、D、E级GPS网外业基线处理结果，其独立环或附合路线坐标闭合差应满足：

$$W_X \leq 3\sqrt{n}\sigma \quad W_Y \leq 3\sqrt{n}\sigma \quad W_Z \leq 3\sqrt{n}\sigma \quad W_S \leq 3\sqrt{3n}\sigma$$

式中， $n$ 为闭合环边数； $\sigma$ 为对基线测量中误差的要求（按网的实际平均边长计算）。



# 7.2控制测量设计基础

## ④ 基线重复性检验

A、B级GPS网基线处理后应计算基线向量的分量及边长的重复性，还应对各基线边长、南北分量、东西分量和垂直分量的重复性进行固定误差与比例误差的直线拟合，作为衡量基线精度的参考指标。重复性的定义为

$$R_c = \left[ \frac{\frac{k}{k-1} \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(C_i - C_m)^2}{\sigma_{C_i}^2}}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{\sigma_{C_i}^2}} \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中，k为同一基线的总观测时段数； $C_i$ 为一个时段的基线某一分量或边长； $\sigma_{C_i}$ 为该时段i相应于分量 $C_i$ 的方差； $C_m$ 为各时段的加权平均值。

其中，对边长分量、北分量和东分量的重复性还需进行固定误差和比例误差的拟合，以作为衡量基线精度的参考指

标





## 7.2控制测量设计基础

### ⑤ 坐标分量闭合差

B级GPS网同一基线和其各分量不同时段较差应满足下式（10-15），式中同一基线和其各分量R值按公式（10-14）计算

$$\left. \begin{aligned} d_{\Delta x} &\leq 3\sqrt{2}R_{\Delta x} \\ d_{\Delta y} &\leq 3\sqrt{2}R_{\Delta y} \\ d_{\Delta z} &\leq 3\sqrt{2}R_{\Delta z} \\ d_s &\leq 3\sqrt{2}R_s \end{aligned} \right\}$$

B级GPS网基线处理后，独立闭合环或附和路线的坐标分量闭合差应满足下列条件

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Wx}^2 &= \sum_{i=1}^r \sigma_{\Delta x(i)}^2 \\ \sigma_{Wy}^2 &= \sum_{i=1}^r \sigma_{\Delta y(i)}^2 \\ \sigma_{Wz}^2 &= \sum_{i=1}^r \sigma_{\Delta z(i)}^2 \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} W_x &\leq 2\sigma_{Wx} \\ W_y &\leq 2\sigma_{Wy} \\ W_z &\leq 2\sigma_{Wz} \end{aligned} \right\}$$

其中，

式中， $r$ 为环线中的基线数， $\Delta x(i), \Delta y(i), \Delta z(i)$  为环线中第 $i$ 条基线分量的方差，由基线处理时输出。



# 7.2控制测量设计基础

## ⑥ 环闭合差

环线全长闭合差满足

$$W \leq 3\sigma_W$$

$$\sigma_W^2 = \sum_{I=1}^r W D_{b_i} W^T$$

$$W = \begin{pmatrix} \frac{W_{\Delta x}}{W} & \frac{W_{\Delta y}}{W} & \frac{W_{\Delta z}}{W} \end{pmatrix}$$

$$W = \sqrt{W_{\Delta x}^2 + W_{\Delta y}^2 + W_{\Delta z}^2}$$



## 7.3 控制网图形设计

针对不同测量工作的需要和精度指标、进度需求、任务时间以及经费限制等因素，GPS网可以设计为不同图形。本节将按照布网的形状，逐一讨论各种构网方式的优劣，并给出了GPS控制网图形设计的基本要求。

GPS网一般由“三角形”、“多边形”、“附和导线”、“支导线”等基本图形组成，构成三角形网、多边形网、附和导线网和星形网等基本网型，常见的GPS网形只有三角形网和多边形网两种。



# 7.3 控制网图形设计

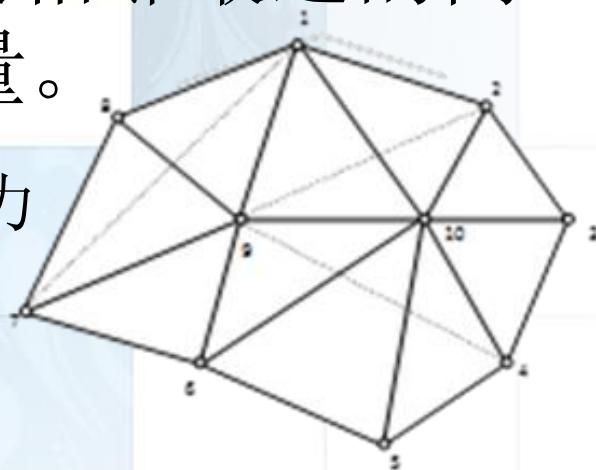
## 7.3.1 网的基本图形设计

### ➤ 1. 三角形网

- 定义：以三角形作为基本图形所构成的GPS网（如图），其特点是相邻最近的两个控制点之间形成基线向量。

优点：网的几何强度高，抗粗差能力强，可靠性高，由于网中多余观测多，平差后成果的精度相对提高；

缺点：观测作业时工作量大。



三角形网

## 7.3 控制网图形设计

如图10-4中由10个控制点组成的GPS网，如采用三角形作为基本图形来布网时需测定19条独立的基线向量。如有必要，我们还能在三角形网的基础上继续加测一些对角线，以进一步提高图形强度。





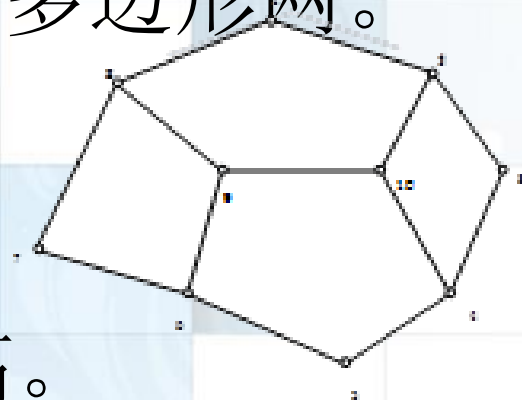
# 7.3 控制网图形设计

## ➤ 2. 多边形网

- 定义：以边数不小于4条的多边形作为基本图形所构成的GPS网，其特点是相邻控制点之间形成互不交叉的多边形网。

优点：观测作业工作量小、  
观测效率高；

缺点：是图形几何强度不高。



多边形网

# 7.3 控制网图形设计

## 7.3.2 控制网等级确定

### 1. 级别划分

在国标中将GPS测量划分为5个等级，它们分别是A级、B级、C级、D级和E级。采用英文字母来表示GPS测量的等级可避免与国家大地测量中的I、II、III、IV等相混淆。需要说明的是，GPS测量所属的等级并不是由用途来确定的，而是以其实际的质量要求来确定的。

### 2. 主要用途

- A. 用于建立国家一等大地控制网，进行全球性的地球动力学研究、地壳形变测量和精密定轨等的GPS测量，应满足A级GPS测量的精度要求。
- B. 用于建立国家二等大地控制网，建立地方或城市坐标基准框架、区域性的地球动力学研究，地壳形变测量、局部变形监测和各种精密工程测量等的GPS测量，应满足B级GPS测量的精度要求。
- C. 用于建立国家三等大地控制网，建立区域、城市及工程测量的基本控制网等的GPS测量，应满足C级GPS测量的精度要求。



# 7.3 控制网图形设计

## 7.3.2 控制网等级确定

- D. 用于建立国家四等大地控制网的GPS测量应满足D级GPS测量的精度要求。
- E. 用于中小城市、城镇以及测图、地籍、土地信息、房产、物探、勘测、建筑施工等的控制测量等的GPS测量，应满足D、E级GPS测量的精度要求。



# 7.3 控制网图形设计

## • 7.3.3 图形设计的基本原则

- (1) 各级GPS网一般逐级布设，在保证精度、密度等技术要求时可跨级布设。
- (2) A级、B级GPS网应布设成连续网，C、D、E级GPS网可布设成多边形或附和导线
- (3) 各级GPS网最简异步观测环或附和路线的边数应满足表10-1的规定。

表10-1对闭合环或附和导线边数的规定

等级	A	B	C	D	E
闭合环或附和导线的边数	$\leq 5$	$\leq 6$	$\leq 6$	$\leq 8$	$\leq 10$

对多边形网进行内业处理时，如发现某一基线向量超限，而将此基线向量丢弃后新构成的多边形边数并未超限时，允许将此基线向量剔除而不必返回现场返工。



# 7.3 控制网图形设计

因此，在进行技术设计时最好能留有余地，这样，一旦在内业数据处理时发现某些问题，还有可能在规范允许的范围内通过修改图形来加以弥补，不一定要重新返工。

(4) A、B级GPS点应与参加过全国天文大地网整体平差A级的三角点，导线点及一、二等水准点重合。

(5) 各级GPS网点位应均匀分布。

(6) 新布设的GPS网应与附近已有的国家高等级GPS点进行联测，联测点数不得少于3个。

(7) 为求定GPS点在某一参考坐标系中的坐标，应与该坐标系中的原有控制点进行联测，联测的总点数不应少于3个。

(8) 为求得GPS点的正常高，应进行高程联测。

(9) A、B级网点的高程联测精度应不低于二等水准测量精度；C级网点则不低于三等水准测量精度；D、E级网点则按四等水准或与其精度相当的方法进行高程联测。





## 7.3 控制网图形设计

(10) B、C、D、E级网布设时，测区内高于施测级别的GPS网点均应作为本级别GPS网的控制点（或框架点），并在观测时纳入相应级别的GPS网中一并施测。

(11) 在局部补充、加密低等级的GPS网点时，采用高等级GPS网点数应不少于4个。

(12) 各级GPS网按观测方法可采用基于A级点、区域卫星连续运行参考基站网、临时连续运行基准站网等的点观测模式，或以多个同步观测环为基本组成的网观测模式。网观测模式中的同步环之间，应以边连接或点连接的方式进行网的构建。

