

第八章 GPS 测量的设计与实施

GPS 测量与常规测量相类似,在实际工作中也可划分为方案设计、外业实施及内业数据处理三个阶段。室内数据处理的详细内容将在第九章专门讲授。本章主要介绍 GPS 测量的技术设计及外业实施各阶段的工作。考虑到以载波相位观测量为依据的相对定位法是当前 GPS 测量中普遍采用的精密定位方法,所以在本章讲授中主要讨论区域性城市与工程 GPS 控制网的相对测量的工作程序与方法。

§ 8.1 GPS 测量的技术设计

GPS 测量的技术设计是进行 GPS 定位的最基本性工作,它是依据国家有关规范(规程)及 GPS 网的用途、用户的要求等对测量工作的网形、精度及基准等的具体设计。

8.1.1 GPS 网技术设计的依据

GPS 网技术设计的主要依据是 GPS 测量规范(规程)和测量任务书。

1. GPS 测量规范(规程)

GPS 测量规范(规程)是国家测绘管理部门或行业部门制定的技术法规,目前 GPS 网设计依据的规范(规程)有:

① 2001 年国家质量技术监督局发布的《全球定位系统(GPS)测量规范》,以下简称《规范》;

② 1998 年建设部发布的行业标准《全球定位系统城市测量技术规程》,以下简称《规程》;

③ 各部委根据本部门 GPS 工作的实际情况制定的其他 GPS 测量规程或细则。

2. 测量任务书

测量任务书或测量合同是测量施工单位上级主管部门或合同甲方下达的技术要求文件。这种技术文件是指令性的,它规定了测量任务的范围、目的、精度和密度要求,提交成果资料的项目和时间,完成任务的经济指标等。

在 GPS 方案设计时,一般首先依据测量任务书提出的 GPS 网的精度、密度和经济指标,再结合规范(规程)规定并现场踏勘具体确定各点间的连接方法,各点设站观测的次数、时段长短等布网观测方案。

8.1.2 GPS 网的精度、密度设计

1. GPS 测量精度标准及分类

① 对于各类 GPS 网的精度设计主要取决于网的用途。用于全球性地球动力学、地壳形变及国家基本大地测量的 GPS 网可参照《规范》中 AA、A、B 级的精度分级,见表 8-1;用于城市或工程的 GPS 控制网可根据相邻点的平均距离和精度参照《规程》中的二、三、四等和一、二级,

见表 8-2。

表 8-1 GPS 测量精度分级(一)

级别	主要用途	固定误差 $a(\text{mm})$	比例误差 $b(1 \times 10^{-6} \cdot D)$
AA	全球性的地球动力学研究、地壳形变测量和精度定轨	≤ 3	≤ 0.01
A	区域性的地球动力学研究和地壳形变测量	≤ 5	≤ 0.1
B	局部形变监测和各种精密工程测量	≤ 8	≤ 1
C	大、中城市及工程测量基本控制网	≤ 10	≤ 5
D,E	中、小城市及测图、物探,建筑施工等控制测量	≤ 10	$\leq 10 \sim 20$

表 8-2 GPS 测量精度分级(二)

等级	平均距离 (km)	a (mm)	b ($1 \times 10^{-6} \cdot D$)	最弱边相对中误差
二	9	≤ 10	≤ 2	1/12 万
三	5	≤ 10	≤ 5	1/8 万
四	2	≤ 10	≤ 10	1/4.5 万
一级	1	≤ 10	≤ 10	1/2 万
二级	<1	≤ 15	≤ 20	1/1 万

注:当边长小于 200m 时,以边长中误差小于 20mm 来衡量。

② 各等级 GPS 相邻点间弦长精度用下式表示

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (bd)^2} \tag{8-1}$$

式中, σ ——GPS 基线向量的弦长中误差(mm),亦即等效距离误差;

a ——GPS 接收机标称精度中的固定误差(mm);

b ——GPS 接收机标称精度中的比例误差系数(ppm);

d ——GPS 网中相邻点间的距离(km)。

③ 在实际工作中,精度标准的确定要根据用户的实际需要及人力、物力、财力情况合理设计,也可参照本部门已有的生产规程和作业经验适当掌握。在具体布设中,可以分级布设,也可以越级布设,或布设同级全面网。

2. GPS 点的密度标准

各种不同的任务要求和服务对象,对 GPS 点的分布要求也不同。对于国家特级(AA、A 级)基准点及大陆地球动力学研究监测所布设的 GPS 点,主要用于提供国家级基准、精密定轨、星历计划及高精度形变信息,所以布设时平均距离可达数百公里。而一般城市和工程测量布设点的密度主要满足测图加密和工程测量的需要,平均边长往往在几公里以内。因此,现行《规范》对 GPS 网中两相邻点间距离视其需要作出了如表 8-3 的规定。现行《规程》对各等级 GPS 网相邻点的平均距离也在表 8-3 作了规定。

表 8-3

GPS 网中相邻点间距离

单位: km

项 目 \ 级 别	AA	A	B	C	D	E
相邻点最小距	300	100	15	5	2	1
相邻点最大距	2000	1000	250	40	15	10
相邻点平均距	1000	300	70	15 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 2

8.1.3 GPS 网的基准设计

GPS 测量获得的是 GPS 基线向量,它属于 WGS-84 坐标系的三维坐标差,而实际我们需要的是国家坐标系或地方独立坐标系的坐标。所以在 GPS 网的技术设计时,必须明确 GPS 成果所采用的坐标系统和起算数据,即明确 GPS 网所采用的基准。我们将这项工作称之为 GPS 网的基准设计。

GPS 网的基准包括位置基准、方位基准和尺度基准。方位基准一般以给定的起算方位角值确定,也可以由 GPS 基线向量的方位作为方位基准。尺度基准一般由地面的电磁波测距边确定,也可由两个以上的起算点间的距离确定,同时也可由 GPS 基线向量的距离确定。GPS 网的位置基准,一般都是由给定的起算点坐标确定。因此,GPS 网的基准设计,实质上主要是指确定网的位置基准问题。

在基准设计时,应充分考虑以下几个问题:

1) 为求定 GPS 点在地面坐标系的坐标,应在地面坐标系中选定起算数据和联测原有地方控制点若干个,用以坐标转换。在选择联测点时既要考虑充分利用旧资料,又要使新建的高精度 GPS 网不受旧资料精度较低的影响,因此,大、中城市 GPS 控制网应与附近的国家控制点联测 3 个以上。小城市或工程控制可以联测 2 ~ 3 个点。

2) 为保证 GPS 网进行约束平差后坐标精度的均匀性以及减少尺度比误差影响,对 GPS 网内重合的高等级国家点或原城市等级控制网点,除未知点联结图形观测外,对它们也要适当地构成长边图形。

3) GPS 网经平差计算后,可以得到 GPS 点在地面参照坐标系中的大地高,为求得 GPS 点的正常高,可据具体情况联测高程点,联测的高程点需均匀分布于网中,对丘陵或山区联测高程点应按高程拟合曲面的要求进行布设。具体联测宜采用不低于四等水准或与其精度相等的方法进行。GPS 点高程在经过精度分析后可供测图或其他方面使用。关于 GPS 高程问题将在 § 9.5 中详细讨论。

4) 新建 GPS 网的坐标系应尽量与测区过去采用的坐标系统一致,如果采用的是地方独立或工程坐标系,一般还应该了解以下参数:

① 所采用的参考椭球;② 坐标系的中央子午线经度;③ 纵、横坐标加常数;④ 坐标系的投影面高程及测区平均高程异常值;⑤ 起算点的坐标值。

8.1.4 GPS 网构成的几个基本概念及网特征条件

在进行 GPS 网图形设计前,必须明确有关 GPS 网构成的几个概念,掌握网的特征条件计算方法。

1. GPS 网图形构成的几个基本概念

- ① 观测时段:测站上开始接收卫星信号到观测停止,连续工作的时间段,简称时段。
- ② 同步观测:两台或两台以上接收机同时对同一组卫星进行的观测。
- ③ 同步观测环:三台或三台以上接收机同步观测获得的基线向量所构成的闭合环,简称同步环。
- ④ 独立观测环:由独立观测所获得的基线向量构成的闭合环,简称独立环。
- ⑤ 异步观测环:在构成多边形环路的所有基线向量中,只要有非同步观测基线向量,则该多边形环路叫异步观测环,简称异步环。
- ⑥ 独立基线:对于 N 台 GPS 接收机构成的同步观测环,有 J 条同步观测基线,其中独立基线数为 $N-1$ 。
- ⑦ 非独立基线:除独立基线外的其他基线叫非独立基线,总基线数与独立基线数之差即为非独立基线数。

2. GPS 网特征条件的计算

按 R. A sany 提出的观测时段数计算公式:

$$C = n \cdot m / N \quad (8-2)$$

式中, C 为观测时段数; n 为网点数; m 为每点设站次数; N 为接收机数。故在 GPS 网中:

$$\text{总基线数: } J_{\text{总}} = C \cdot N \cdot (N-1) / 2 \quad (8-3)$$

$$\text{必要基线数: } J_{\text{必}} = n - 1 \quad (8-4)$$

$$\text{独立基线数: } J_{\text{独}} = C \cdot (N-1) \quad (8-5)$$

$$\text{多余基线数: } J_{\text{多}} = C \cdot (N-1) - (n-1) \quad (8-6)$$

依据以上公式,就可以确定出一个具体 GPS 网图形结构的主要特征。

3. GPS 网同步图形构成及独立边的选择

根据(8-3)式,对于由 N 台 GPS 接收机构成的同步图形中一个时段包含的 GPS 基线(或简称 GPS 边)数为:

$$J = N(N-1)/2 \quad (8-7)$$

但其中仅有 $N-1$ 条是独立的 GPS 边,其余为非独立 GPS 边。图 8-1 给出了当接收机数 $N=2 \sim 5$ 时所构成的同步图形。

对应于图 8-1 的独立 GPS 边可以有不同的选择(如图 8-2)

当同步观测的 GPS 接收机数 $N \geq 3$ 时,同步三角形闭合环的最少个数应为

$$T = J - (N-1) = (N-1)(N-2)/2 \quad (8-8)$$

接收机数 N 与 GPS 边数 J 和同步闭合环数 T (最少个数)的对应关系如表 8-4 所示。

表 8-4

N 与 J 、 T 关系表

N	2	3	4	5	6
J	1	3	6	10	15
T	0	1	3	6	10

理论上,同步闭合环中各 GPS 边的坐标差之和(即闭合差)应为 0,但由于有时各台 GPS 接收机并不是严格同步,同步闭合环的闭合差并不等于零。有的 GPS 规范规定了同步闭合差

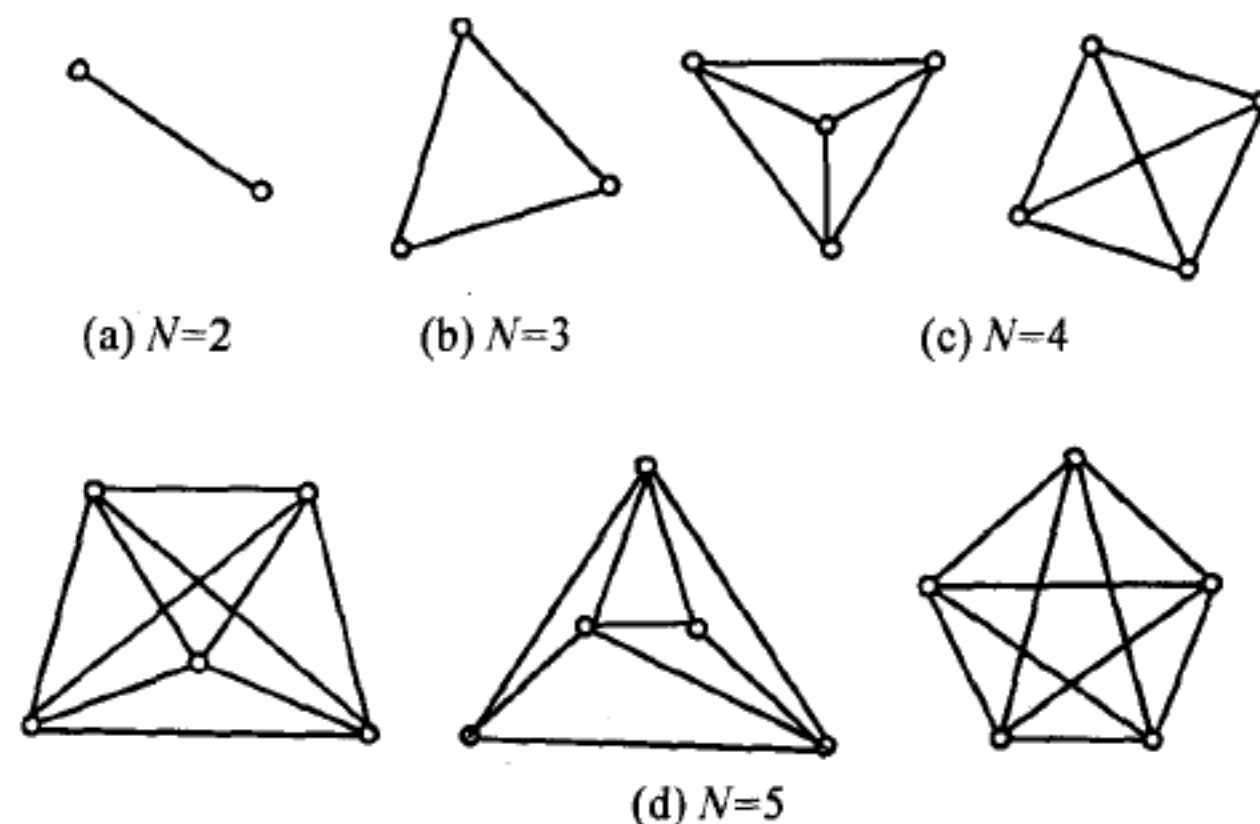


图 8-1 N 台接收机同步观测所构成的同步图形

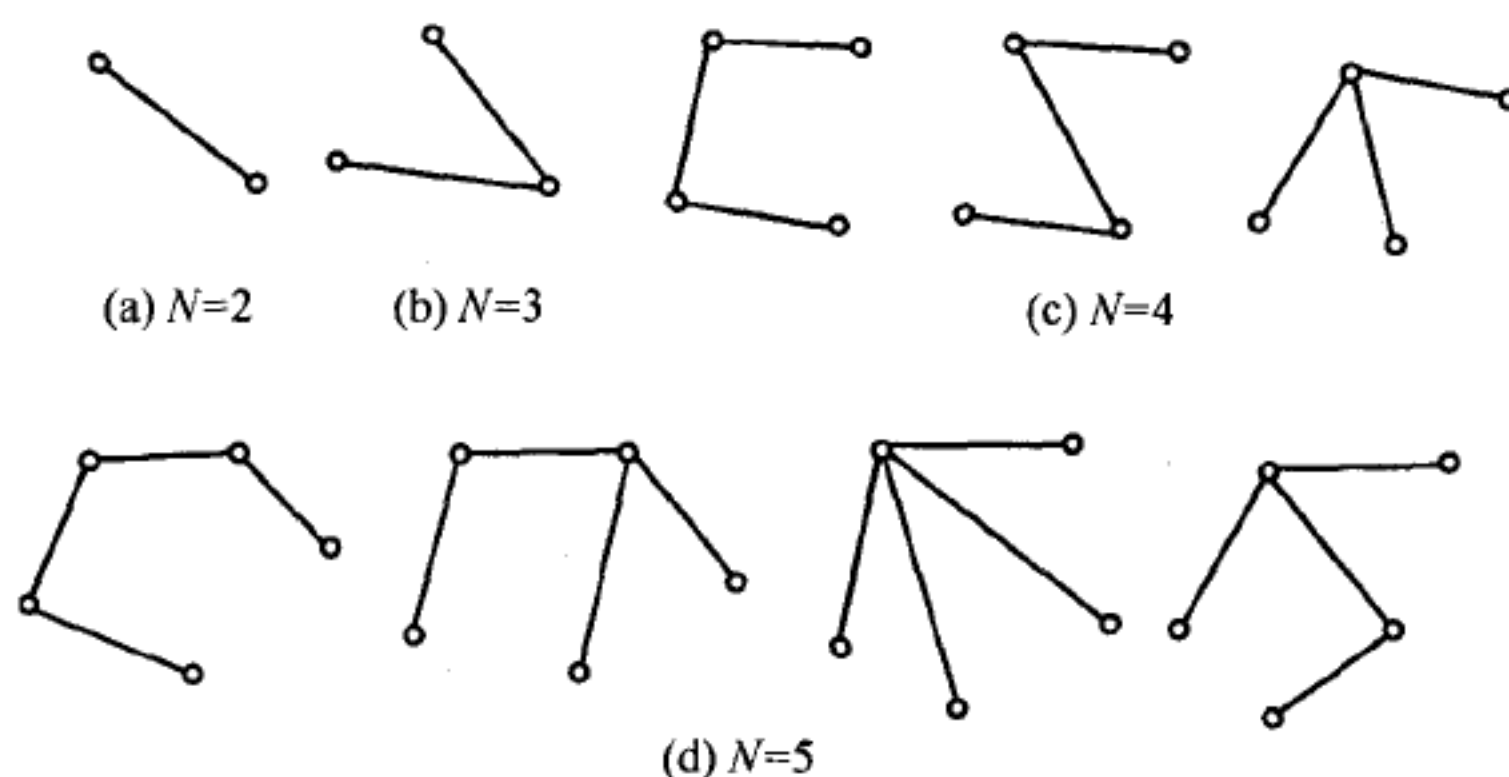


图 8-2 GPS 独立边的不同选择

的限差。对于同步较好的情况,应遵守此限差的要求;但当由于某种原因,同步不是很好的,应适当放宽此项限差。

值得注意的是,当同步闭合环的闭合差较小时,通常只能说明 GPS 基线向量的计算合格,并不能说明 GPS 边的观测精度高,也不能发现接收的信号受到干扰而产生的某些粗差。

为了确保 GPS 观测效果的可靠性,有效地发现观测成果中的粗差,必须使 GPS 网中的独立边构成一定的几何图形。这种几何图形,可以由数条 GPS 独立边构成的非同步多边形(亦称非同步闭合环),如三角形、四边形、五边形等。当 GPS 网中有若干个起算点时,也可以是由两个起算点之间的数条 GPS 独立边构成的附和路线。GPS 网的图形设计,也就是根据对所布设的 GPS 网的精度要求和其他方面的要求,设计出由独立 GPS 边构成的多边形网(或称为环形网)。

对于异步环的构成,一般应按所设计的网图选定,必要时在经技术负责人审定后,也可根据具体情况适当调整。当接收机多于 3 台时,也可按软件功能自动挑选独立基线构成环路。

8.1.5 GPS 网的图形设计

常规测量中对控制网的图形设计是一项非常重要的工作。而在 GPS 图形设计时,因 GPS 同步观测不要求通视,所以其图形设计具有较大的灵活性。GPS 网的图形设计主要取决于用户的要求、经费、时间、人力以及所投入接收机的类型、数量和后勤保障条件等。

根据不同的用途,GPS 网的图形布设通常有点连式、边连式、网连式及边点混合连接四种基本方式。也有布设成星形连接、附和导线连接、三角锁形连接等。选择什么样的组网,取决于工程所要求的精度、野外条件及 GPS 接收机台数等因素。

1. 点连式

点连式是指相邻同步图形之间仅有一个公共点的连接。以这种方式布点所构成的图形几何强度很弱,没有或极少有非同步图形闭合条件,一般不单独使用。

图 8-3 中有 13 个定位点,没有多余观测(无异步检核条件),最少观测时段 6 个(同步环),最少必要观测基线为 $n(\text{点数}) - 1 = 12$ 条,6 个同步图形中总共有 12 条独立基线。显然这种点连式网的几何强度很差,需要提高网的可靠性指标。

2. 边连式

边连式是指同步图形之间由一条公共基线连接。这种布网方案,网的几何强度较高有较多的复测边和非同步图形闭合条件。在相同的仪器台数条件下,观测时段数将比点连式大大增加。

图 8-4 中有 13 个定位点,12 个观测时段,9 条重复边,3 个异步环。最少观测同步图形为 12 个,总基线为 36 条,独立基线数 24 条,多余基线数 12 条。比较图 8-4 与图 8-3,显然边连式布网有较多的非同步图形闭合条件,几何强度和可靠性均优于点连式。

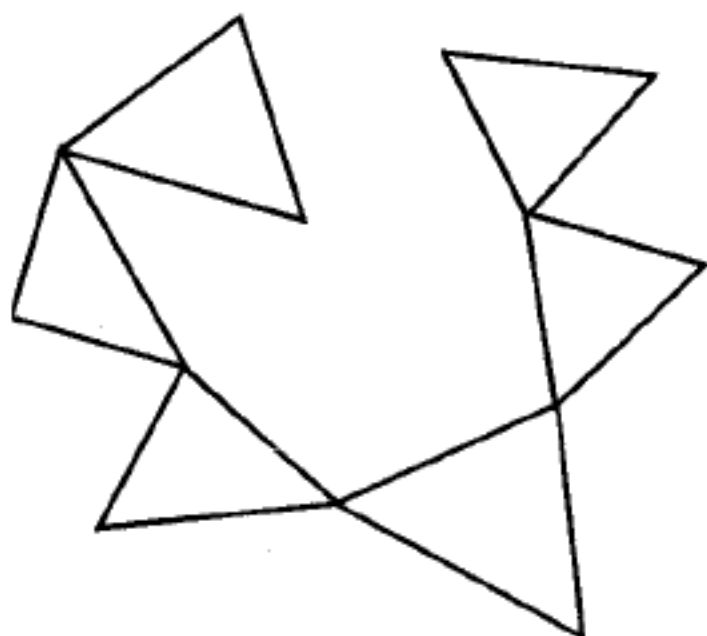


图 8-3 点连式图形

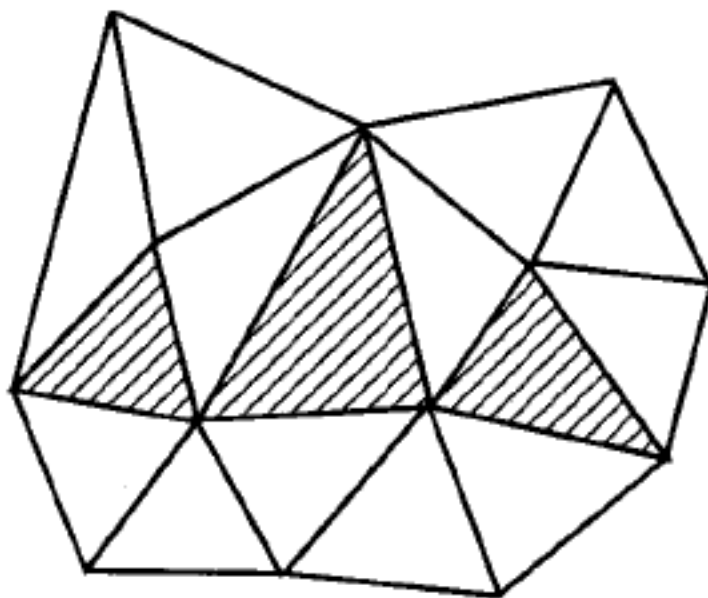


图 8-4 边连式图形

3. 网连式

网连式是指相邻同步图形之间有两个以上的公共点相连接,这种方法需要 4 台以上的接收机。显然,这种密集的布图方法,它的几何强度和可靠性指标是相当高的,但花费的经费和时间较多,一般仅适于较高精度的控制测量。

4. 边点混合连接式

边点混合连接式是指把点连式与边连式有机地结合起来,组成 GPS 网,既能保证网的几何强度,提高网的可靠指标,又能减少外业工作量,降低成本,是一种较为理想的布网方法。

图 8-5 是在点接式(图 8-3)基础上加测四个时段,把边连式与点连式结合起来,就可得到

几何强度改善的布网设计方案。图 8-5 所示 3 台接收机的观测方案共有 10 个同步三角形, 2 个异步环, 6 条复测基线边, 总基线数为 30 条, 独立基线数为 20 条, 多余基线数为 8 条, 必要基线数为 12 条。显然该图线呈封闭状, 可靠性指标大为提高, 外业工作量也比边连式有一定的减少。

5. 三角锁(或多边形)连接

用点连式或边连式组成连续发展的三角锁连接图形(见图 8-6), 此连接形式适用于狭长地区的 GPS 布网, 如铁路、公路及管线工程勘测。

6. 导线网形连接(环形图)

将同步图形布设为直伸状, 形如导线结构式的 GPS 网, 各独立边应组成封闭状, 形成非同步图形, 用以检核 GPS 点的可靠性。适用于精度较低的 GPS 布网。该布网方法也可与点连式结合起来布设(图 8-7)。

7. 星形布设

星形图的几何图形简单, 其直接观测边间不构成任何闭合图形, 所以其检查与发现粗差的能力比点连式更差,

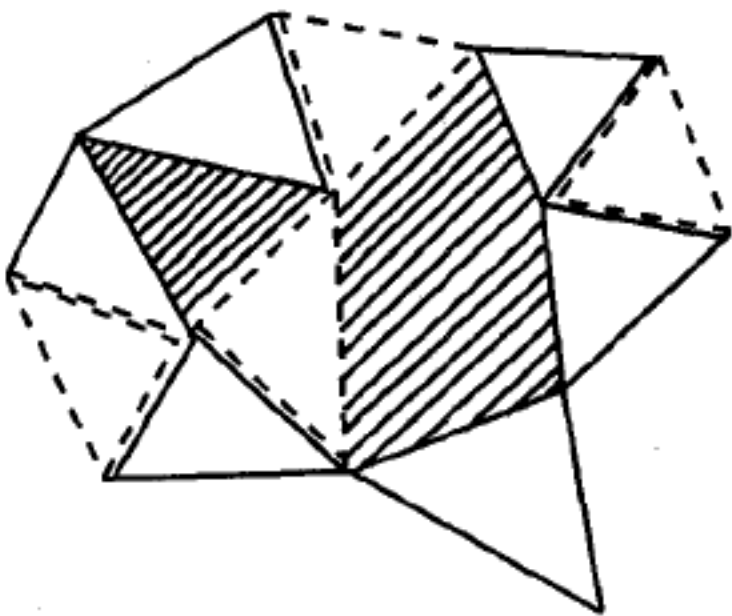


图 8-5 边点混合连接图形

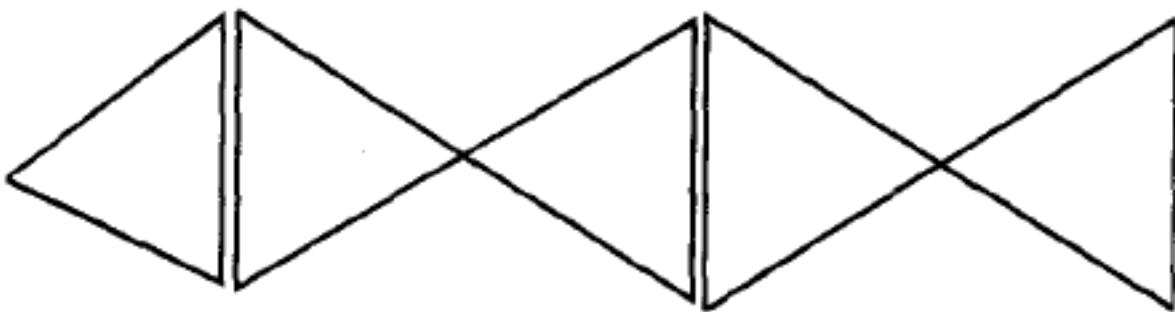


图 8-6 三角锁连接图形

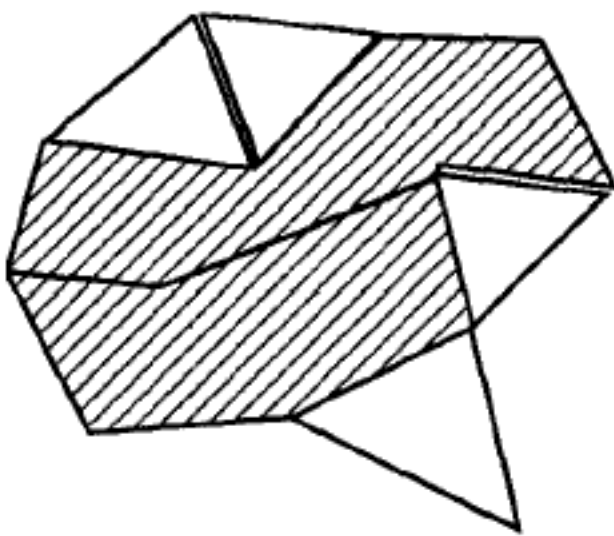


图 8-7 导线网式连接图形

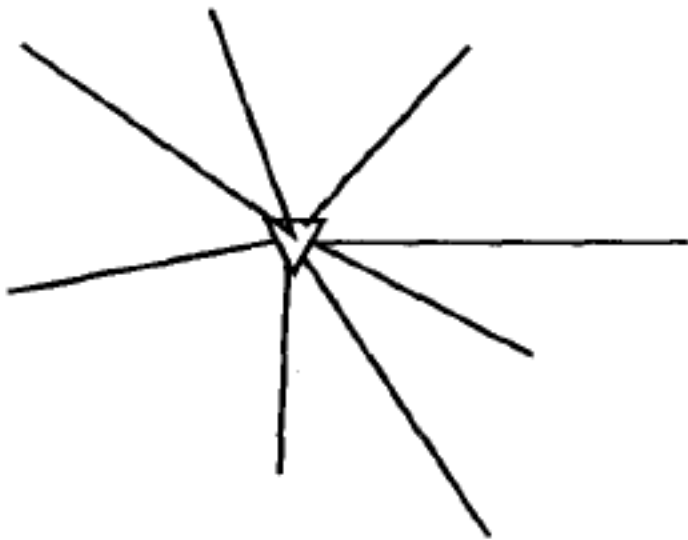


图 8-8 星形连接图形

但这种布网只需两台仪器就可以作业。若有三台仪器, 一个可作为中心站, 其他两台可流动作业, 不受同步条件限制。测定的点位坐标为 WGS-84 坐标系, 每点坐标还需使用坐标转换参数进行转换。由于方法简便, 作业速度快, 星形布网广泛地应用于精度较低的工程测量、地质、地球物理测点、边界测量、地籍测量和碎部测量等。星形网的几何图形, 如图 8-8 所示。

在实际布网设计时还要注意以下几个原则:

- ① GPS 网的点与点间尽管不要求通视, 但考虑到利用常规测量加密时的需要, 每点应有一个以上通视方向。

② 为了顾及原有城市测绘成果资料以及各种大比例尺地形图的沿用,应采用原有城市坐标系统。对凡符合 GPS 网点要求的旧点,应充分利用其标石。

③ GPS 网必须由非同步独立观测边构成若干个闭合环或附合线路。各级 GPS 网中每个闭合环或附合线路中的边数应符合表 8-5a 和表 8-5b 的规定。

表 8-5a 最简独立闭合环或附合线路边数的规定

级别	A	B	C	D	E
闭合环或附合线路的边数	≤5	≤6	≤6	≤8	≤10

表 8-5b 闭合环或附合线路边数的规定

等 级	二	三	四	一级	二级
闭合环或附合线路的边数	≤6	≤8	≤10	≤10	≤10

§ 8.2 GPS 测量的外业准备及技术设计书编写

在进行 GPS 外业工作之前,必须做好实施前的测区踏勘、资料收集、器材筹备、观测计划拟订、GPS 仪器检校及设计书编写等工作。

8.2.1 测区踏勘

接受下达任务或签订 GPS 测量合同后,就可依据施工设计图踏勘、调查测区。主要调查了解下列情况,为编写技术设计、施工设计、成本预算提供依据。

- ①交通情况:公路、铁路、乡村便道的分布及通行情况。
- ②水系分布情况:江河、湖泊、池塘、水渠的分布,桥梁、码头及水路交通情况。
- ③植被情况:森林、草原、农作物的分布及面积。
- ④控制点分布情况:三角点、水准点、GPS 点、多普勒点、导线点的等级、坐标、高程系统,点位的数量及分布,点位标志的保存状况等。
- ⑤居民点分布情况,测区内城镇、乡村居民点的分布,食宿及供电情况。
- ⑥当地风俗民情:民族的分布,习俗及地方方言,习惯及社会治安情况。

8.2.2 资料收集

根据踏勘测区掌握的情况,收集下列资料:

- ①各类图件:1: 1 万~1: 10 万比例尺地形图,大地水准面起伏图,交通图。
- ②各类控制点成果:三角点、水准点、GPS 点、多普勒点、导线点及各控制点坐标系统、技术总结等有关资料。
- ③测区有关的地质、气象、交通、通信等方面的资料。
- ④城市及乡村行政区划表。

8.2.3 设备、器材筹备及人员组织

设备、器材筹备及人员组织包括以下内容:

- 筹备仪器、计算机及配套设备;
- 筹备机动设备及通信设备;
- 筹备施工器材,计划油料,材料的消耗;
- 组建施工队伍,拟订施工人员名单及岗位;
- 进行详细的投资预算。

8.2.4 拟订外业观测计划

观测工作是 GPS 测量的主要外业工作。观测开始之前,外业观测计划的拟定对于顺利完成数据采集任务,保证测量精度,提高工作效益都是极为重要的。拟定观测计划的主要依据是:

- GPS 网的规模大小;
- 点位精度要求;
- GPS 卫星星座几何图形强度;
- 参加作业的接收机数量;
- 交通、通信及后勤保障(食宿、供电等)。

观测计划的主要内容应包括:

①编制 GPS 卫星的可见性预报图:在高度角大于 15° 的限制下,输入测区中心某一测站的概略坐标,输入日期和时间,应使用不超过 20 天的星历文件,即可编制 GPS 卫星的可见性预报图。

②选择卫星的几何图形强度:在 GPS 定位中,所测卫星与观测站所组成的几何图形,其强度因子可用空间位置因子(PDOP)来代表,无论是绝对定位还是相对定位,PDOP 值不应大于 6。

③选择最佳的观测时段:在卫星多于 4 颗且分布均匀,PDOP 值小于 6 的时段就是最佳时段。

④观测区域的设计与划分:当 GPS 网的点数较多,网的规模较大,而参加观测的接收机数量有限,交通和通信不便时,可实行分区观测。为了增强网的整体性,提高网的精度,相邻分区应设置公共观测点,且公共点数量不得少于 3 个。

⑤编排作业调度表:作业组在观测前应根据测区的地形、交通状况、网的大小、精度的高低、仪器的数量、GPS 网设计、卫星预报表和测区的天时、地理环境等编制作业调度表,以提高工作效益。作业调度表包括观测时段、测站号、测站名称及接收机号等。作业调度表见表 8-6。

⑥当作业仪器台数、观测时段数及点数较多时,在每天出测前采用表 8-7 的 GPS 测量外业观测通知单进行调度可能会更好一些。

8.2.5 设计 GPS 网与地面网的联测方案

GPS 网与地面网的联测,可根据测区地形变化和地面控制点的分布而定。一般在 GPS 网中至少要重合观测三个以上的地面控制点(尽量选择水准高程)作为约束点。约束点的选设

原则见本章 GPS 网基准设计部分。

表 8-6 GPS 作业调度表

时段 编号	观测 时间	测站号/名	测站号/名	测站号/名	测站号/名	测站号/名	测站号/名
		机 号	机 号	机 号	机 号	机 号	机 号
1							
2							
3							
4							

表 8-7 GPS 测量外业观测通知单

观测日期	年	月	日
组别:	操作员:		
点位所在图幅:			
测点编号/名:			
观测时段:1:	2:		
3:	4:		
5:	6:		
安排人:	年 月 日		

8.2.6 GPS 接收机选型及检验

GPS 接收机是完成测量任务的关键设备,其性能、型号、精度、数量与测量的精度有关, GPS 接收机的选用可参考表 8-8a 和表 8-8b。