

普通高等教育测绘类规划教材

地下工程测量

DIXIA GONGCHENG CELIANG

赵吉先 吴良才 周世健 编

DIXIAGONGCHENGCELIANG
DIXIAGONGCHENGCELIANG
DIXIAGONGCHENGCELIANG
DIXIAGONGCHENGCELIANG
DIXIAGONGCHENGCELIANG

测绘出版社

TU198/40

2005

普通高等教育测绘类规划教材

地下工程测量

DIXIA GONGCHENG CELIANG

赵吉先 吴良才 周世健 编

测绘出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书结合作者多年教学、科研实践,较系统地介绍了地下工程测量的基本理论和基本方法,从而可以帮助读者提高分析问题和解决问题的能力。全书内容丰富,具有一定的深度和广度,充分反映了地下工程测量最新技术及其应用。

本书可作为测绘、地质、矿业、土建、交通、水电等院校的测绘工程专业的教材,也可供测绘相关专业教学人员和工程技术人员参考。

© 赵吉先 吴良才 周世健 2005

图书在版编目(CIP)数据

地下工程测量/赵吉先等编. —北京:测绘出版社,
2005.2

普通高等教育测绘类规划教材

ISBN 7-5030-1250-1

I. 地... II. 赵... III. 地下工程测量—高等学校
—教材 IV. TU198

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 005143 号

地下工程测量

赵吉先 吴良才 周世健 编

测绘出版社出版发行

地址:北京市西城区复外三里河路 50 号 邮编:100045

电话:(010) 68512386 68531558 网址:www.sinomaps.com

北京通州次渠印刷厂印刷

新华书店经销

开本:890 mm×1 240 mm 1/16 印张:9.75 字数:288 千字

2005 年 2 月第 1 版

2005 年 2 月第 1 次印刷

印数:0001—4000 册

ISBN 7-5030-1250-1/P·398

定价:23.00 元

如有印装质量问题,请与我社发行部联系

前 言

《地下工程测量》是普通高等教育测绘类规划教材，由全国高等学校测绘类专业教学指导委员会确定主编人选后编写的。

有专家指出，19 世纪是桥梁世纪，20 世纪是向空间发展的世纪，21 世纪将是向地下空间发展的世纪。地下工程测量就是适应这种发展趋势而形成的。随着世界人口的迅速增加，人类的活动不断向地下空间发展，最典型的是大中型城市，由于人口密集、道路狭窄，必须发展城市地铁、地下商城、地下娱乐中心，以及地下通道等工程。这些工程给测量工作者带来新的课题。在本书的编写过程中，作者参考了各种版本的《矿产测量》和相关的文献资料，吸取了最新的科学技术成果，力争在加强基础的同时，反映现代的科学技术和地下工程测量的新发展，为新一轮的教学改革创造有利条件。

全书共分八章，第一章绪论；第二章地面控制测量；第三章地下起始数据的传递和获取；第四章地下控制测量；第五章地下工程的施工测量；第六章贯通测量；第七章地下工程变形监测；第八章地下管线探测。其中，第四章由吴良才教授编写，周世健教授参加了第七章部分内容的编写，其他章节均由赵吉先教授编写。此外，赵吉先教授负责全书的统稿工作。

本教材在编写过程中始终得到宁津生院士的直接指导和全国高等学校测绘类专业教学指导委员会的关注，得到许多老师的热情帮助，他们提出了许多宝贵的意见和建议。在此谨致以衷心的感谢！由于水平有限，书中可能存在不足之处，恳请读者予以指正。

作 者
2004 年 2 月 于抚州

目 录

第一章 绪 论	(1)
§ 1.1 地下工程测量的任务和内容	(1)
§ 1.2 地下工程测量的特点和测量方法	(1)
§ 1.3 地下工程测量的发展	(1)
第二章 地面控制测量	(3)
§ 2.1 概述	(3)
§ 2.2 地面控制网的布设原则	(3)
§ 2.3 几种常用的地面控制网	(4)
§ 2.4 GPS 控制网	(6)
§ 2.5 几种典型的地面控制网	(10)
§ 2.6 地面控制网误差对地下工程精度的影响	(12)
第三章 地下起始数据的传递和获取	(16)
§ 3.1 概述	(16)
§ 3.2 地面近井点和井下定向基点的设置	(16)
§ 3.3 一井定向	(17)
§ 3.4 一井定向精度分析	(26)
§ 3.5 两井定向	(36)
§ 3.6 陀螺经纬仪的定向原理	(48)
§ 3.7 陀螺经纬仪的定向方法	(54)
§ 3.8 井下高程的传递	(59)
第四章 地下控制测量	(63)
§ 4.1 概述	(63)
§ 4.2 地下平面控制测量	(66)
§ 4.3 地下高程控制测量	(74)
§ 4.4 地下控制测量精度分析	(75)
第五章 地下工程的施工测量	(88)
§ 5.1 隧道施工测量	(88)
§ 5.2 竖井井筒施工测量	(95)
§ 5.3 地下车场及硐室施工测量	(102)
§ 5.4 竖井提升设备安装施工测量	(107)
§ 5.5 地下管道施工测量	(114)
第六章 贯通测量	(118)
§ 6.1 概述	(118)
§ 6.2 一井内巷道贯通测量	(119)
§ 6.3 两井间的巷道贯通测量	(121)
§ 6.4 竖井贯通测量	(122)

§ 6.5 贯通测量的施测 (123)

§ 6.6 贯通测量方案的选择与误差预算 (124)

第七章 地下工程变形监测 (131)

§ 7.1 概述 (131)

§ 7.2 施工过程中的变形监测 (132)

§ 7.3 运营中的变形监测 (134)

§ 7.4 自动化变形监测技术 (136)

第八章 地下管线探测 (143)

§ 8.1 概述 (143)

§ 8.2 地下管线的探测方法 (143)

§ 8.3 地下管线测绘 (146)

§ 8.4 地下管线信息系统简介 (148)

参考文献 (149)

第一章 绪 论

§ 1.1 地下工程测量的任务和内容

地下工程测量是工程测量的分支，是测绘学科在地下工程建设中的应用。工程测量学是研究各种工程建设中测量理论和方法的学科。主要研究工程和城市建设及资源开发等各阶段进行的地形和有关信息的收集、处理、施工放样，变形监测、分析与预报的理论和技术，以及与研究对象有关的信息管理和使用。地下工程测量是研究地下工程建设中的测量理论和方法。地下工程测量的主要任务包括地面控制测量、地下起始数据的传递、地下控制测量、贯通测量、地下工程施工测量、地下变形监测以及地下管线探测，为地下工程建设提供必要的的数据、资料、图件，为工程建设按设计施工和安全、有效的使用服务。地下工程测量的内容包括：铁路、公路、城市地铁和跨河跨海的隧道施工测量，大型贯通测量、矿山建设和井下采掘测量；大型地下建筑的建设测量、地下各种军事设施施工测量，以及各种非地面建筑物或封闭构筑的施工测量。

地下工程测量是为地下工程建设服务的，其工作程序从属于工程勘察设计、施工放样、竣工等三个阶段。地下工程测量的方法受工程特征和施工方法的影响。测量精度取决于工程的限差要求。

§ 1.2 地下工程测量的特点和测量方法

地下工程测量的工作环境主要在地下或封闭的空间，其作业方法、作业程序、使用的仪器设备与其他测量存在一定差别。地下工程测量的主要特点：

- (1) 测量空间狭窄，测量条件差，并存在烟尘、滴水，人员和机械干扰的可能；
- (2) 施测对象灰暗，一般无自然光，照度不理想；
- (3) 工程需要较高的精度，较短的测量耗时，而且需要现场提交成果；
- (4) 需要及时、准确地反映各种构筑物在静态或动态下的各种空间几何关系，因而测量工作具有渐进性和连续性；
- (5) 测量的网形受到条件限制，测量成果的可靠性要依靠重复测量来保证；
- (6) 测量控制点埋设受到环境和空间的制约，可能设在巷道的顶部或边上，同时这些点受地质构造和工程的影响，测量的检核工作量较大。

地下工程测量的环境和特点决定了地下工程测量的方法，不能完全按常规测量先高级后低级，先控制测量后碎部测量的方法和程序，可能会先局部控制、碎部（含施工放样）测量，再将局部控制延伸，再碎部（施工放样），最后进行全面控制测量；或者局部控制测量和碎部测量交替延伸，以保证工程施工按设计进行。地下工程测量一般采用导线测量，随着新技术发展，逐步使用结构光工程测量和结构光摄影测量等方法。采用测距仪和陀螺经纬仪，以及应用无标尺测距等新仪器新方法。

§ 1.3 地下工程测量的发展

地下工程测量是地下工程建设不可缺少的一部分，是重要的技术部门，对地下工程的施工和建设起着保证、监督作用，对安全生产起指导性作用。地下工程测量是随着地下工程的发展而发展起来的。地下工程测量起初是实践于采矿生产，早在公元前 2 千多年前，我国就开始开采铜矿，到了公元前 12 世纪，已普遍开采各种金属矿，规模都比较大，而且在开采过程中，很重视矿体形状，并使用矿产

地质图，以辨别矿产的分布。

在国际上，公元前 15 世纪意大利就有金矿巷道图；公元前 13 世纪埃及就有按比例缩小的巷道图；公元前 1 世纪希腊学者就有对地下工程测量和定向进行的论述；公元 1556 年德国已有著书对地下工程某些几何问题以及罗盘测量在地下巷道的应用进行了较全面的叙述。

20 世纪中叶以来，地下工程测量得到迅速发展，在地下军事设施、地下建筑物、地下采矿、地下水道、地下公路、铁路隧道，以及跨江、跨海隧道中得到广泛的应用，起到了其他任何技术不可替代的作用。如我国西安至安康线的秦岭铁路隧道长 18.448 km；京广复线大瑶山铁路隧道长 14.3 km；水电建设工程中的鲁布革电站输水隧洞长 9.4 km；北京地铁 1、2 号线，上海地铁 1 号线，广州地铁 1 号线均达十几公里以上；在国际上地下隧道工程也很多，如日本的清水隧道长 9.7 km，最有名的是穿越英法海峡的“欧洲隧道”长 50 km。

科学家们总结和预言，19 世纪是桥梁世纪，20 世纪是向空间发展的世纪，21 世纪将是向地下空间发展的世纪。随着全世界人口的迅速增加，住宅、城市、工业、厂房和交通道路占地迅速增长，加上环境的污染，人类有效的活动空间大幅度减少。最典型的是各大中城市，人口密集、道路狭窄，必须大力发展城市地铁和地下商城、地下娱乐中心，以及地下通道等地下工程。我国各大城市都有发展地铁网的规划。21 世纪人类将广泛开发地下空间，包括铁路、公路、水道、工厂、矿山、电站、街道、医院，以及各种军事设施和掩体。地下工程的发展必然会促进和推动地下工程测量的发展。可以预测，未来研究地下工程测量的新理论、新方法、新仪器、新技术将是测绘界关注的焦点，也是测绘界 21 世纪的主要课题之一。

第二章 地面控制测量

§ 2.1 概 述

地下工程测量地面控制网是为地下工程服务的，应在地下工程开始前完成。地面控制网的基本特点是：

(1) 控制网的大小、形状、点位分布，应与地下工程的大小、形状相适应，点位布设要考虑施工放样的方便，隧道控制网一定要保证隧道两端有控制点；

(2) 地面控制网的精度，不要求网的精度均匀，但要保证某一方向和某几个点的相对精度高，如隧道控制网要能保证隧道横向贯通的准确性；

(3) 投影面的选择应满足“控制点坐标反算的两点间长度与实地两点间长度之差应尽可能小”的要求。如隧道施工控制网一般投影到隧道贯通平面上，也可以将长度投影到定线放样精度要求最高的平面上；

(4) 坐标系应采用独立的建筑坐标系，其坐标线应平行或垂直于建筑物的主轴线。主轴线通常由工艺流程方向、运输干线或主要厂房的轴线所决定的。

地面控制网不但为施工放样服务，有可能为某些工程设计提供大比例地形图服务，有时可能还为地面建筑物变形监测服务。地面控制网在设计、施工时，应尽量考虑一网多用，避免重复建网，必要时可对控制网进行复测。

地面控制网的布设方法和步骤与一般工程控制网一样。首先是收集资料、了解情况。这项工作进行得好坏，直接影响到网形的选择、定位、观测，以及整个网的使用是否方便等。需要收集的资料很多，应首先收集地下工程所在地区的大比例尺地形图，地下工程设计图，地下各工程的相互关系图，以及地下工程施工的技术设计等。同时还应收集该地区现有地面控制点情况，以及气象、水文、地质、交通等方面的资料。

第二是现场踏勘。对所收集的资料进行初步的研究之后，为了进一步判定已有资料的正确性和实用性，必须对地下工程所穿越的地区进行详细的踏勘。这时一般沿地下工程的中线方向，了解地下工程两侧的地形、水源、居民地，以及道路的分布情况。接着，结合现场踏勘和工程要求，初步选点和确定控制网方案。控制网可根据现场地形、工程大小和要求以及现有的仪器设备，在确保工程质量的前提下，可选择测距导线网、测边网、边角网、GPS网等。

综上所述，地面控制测量的基本任务，就是根据地下工程特点和需要，在地面布设一定形状的控制网，并精密测定其地面位置。其目的是为地面的大比例成图、施工放样、变形观测和地下控制测量传递地面坐标，建立整体的控制基础。控制网的作用在于控制全局，限制测量误差的传递和积累，保障测量工作的相对精度。地面控制测量，首先应针对不同的地下工程，研究控制网的布设形式，图形与观测方案的优化设计，以及实施过程中的有关问题，这样才能建立一个坚强可靠的控制网。各种工程除了建立平面控制网外，还应建立高程控制网。几何水准测量，简单方便而精度可靠，因而成为高程测量的主要方法。只有在地形起伏大的地区才用测距三角高程测量代替水准测量。

§ 2.2 地面控制网的布设原则

为了确保地下大型工程建设和设备安装，必须首先建立地面控制网，然后将地面坐标传递到施工隧道内，指导隧道开挖和建立地下工程控制网。地面控制网是地下工程建设和设备安装的基础，也是地下工程质量的根本保证。因此，在布设地面控制网时，应遵循以下布网原则：

(1) 控制网的大小、网形主要取决于地下工程的形状、规模、施工方法，以及确保进洞附近有足够控制点。若是跨江跨海或山岭隧道工程，两端控制点相对密度大，中间过渡点相对少一些，但必须一次布网，统一平差。

(2) 控制网必须具备必要的精度。控制网的精度是根据地下工程要求所确定的。例如，地下大型贯通，要求在 x' 方向的平面允许误差为 $\pm 0.5 \text{ m}$ 。考虑到地面控制误差占整个贯通测量误差的十分之一，即 $m_{\text{地}}^2 = \frac{1}{10} m_k^2$ ，可得出地面控制网对贯通相遇点误差为 $\pm 0.079 \text{ m}$ 。由此，可根据此项精度要求和地面控制网的规模，确定控制网的布设精度。

地面控制网必要精度的另一个概念，是指各进洞附近的控制点相对误差应尽量小。

(3) 控制网投影面的选择应满足用控制点坐标反算两点距离与实地两点距离应尽可能相等，便于现场的施工与检查。

(4) 地面高程控制网是地下工程建设和设备安装的重要保证，尽可能采用几何水准，高程控制点可与平面控制点布设在一起，也可单独设置。

(5) 地面控制点点位设置要稳定、可靠，防止工程的影响和破坏，重要点位应采用强归心装置，确保点位长期可靠的使用。

§ 2.3 几种常用的地面控制网

地面控制网是保证地下工程，尤其隧道贯通工程的正确性的基础。隧道施工至少要从两个相对的洞口同时开挖。长隧道的施工需要通过竖井、斜井、平峒等多通道开挖，以增加工作面，加快施工速度。为了保证隧道最后正确贯通，必须在相应的开挖点建立控制点。由于地下工程的大小、长度、形状和施工方法不同，地面控制网的布设方案也有所不同，下面逐一进行讨论。

一、导线网

导线测量是地面控制的一种重要方法，随着测距仪（全站仪）精度的提高，给导线测量提供了十分方便的条件。导线测量相对于三角测量具有更大的灵活性，作业方便、计算简单，在隧道的地面控制中广泛应用。导线测量的不足之处就是检核条件远不如三角测量。为了解决此问题，在实际中一般都把导线布设成网形或闭合环形，单一导线很少使用。在特别困难地段布设导线，也至少布成主、副导线的形式，以主导线测距测角，而副导线上仅测定转折角，如图 2-1 所示，其中 α_0, β_0 为主、副导线之间的连接角。但导线平差计算后，可增加主导线的检核条件和进一步提高对横向误差的控制。

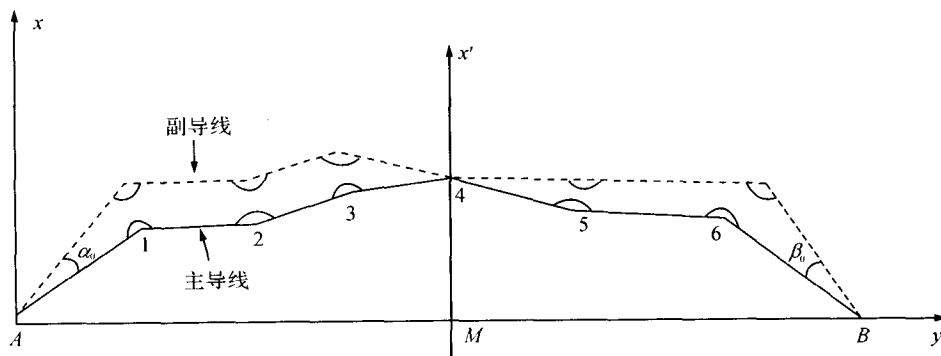


图 2-1 主、副导线的布设

对于直伸型或近于直伸型的隧道，如果以导线作为地面控制，为了减少导线量距误差对横向贯通误差的影响，应尽可能将主要导线点沿隧道中心线布设成直伸型，而导线点不宜过多。

二、三角锁

三角锁相对导线网而言，检核条件多、精度可靠。随着高精度的测距仪的广泛应用，不需用因瓦

基线尺丈量基线，大大减少了野外测量工作量。三角锁的布设最好在垂直于贯通面的方向直伸，图形最好以单三角形组成，宜简不宜繁。如果三角锁能沿垂直于贯通面的方向布成直伸形，这样传距角大小的限制可以放松，此时边长误差对横向贯通精度影响也大大减少。三角点不要布设在由于隧道开挖而可能产生地表变形的地区，以免在施工过程中三角点位置发生变动或丢失。在隧道的每一个入口处都要布设一个三角点，该点最好纳入同级网，与主网一起平差，如果无法纳入主网内，也可以是低一级的插点。洞口三角点设置便于引测进洞。三角锁形状与大小应与工程大小直接对应，如图 2-2 所示， A ， D 为洞口点。

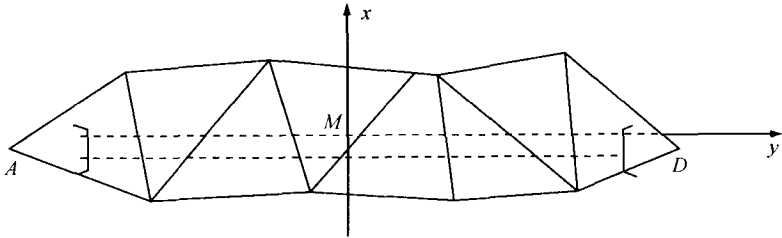


图 2-2 三角锁布设方案

隧道三角锁的观测精度，应根据横向贯通误差的允许值和布设图形确定。精度要求不宜太高，但应留有一定的余地。当经误差预计，地面控制网精度不能满足贯通的精度要求时，可加测边长，组成边角网。

地下工程较小时，地面控制可采用插点或插网的形式。当地下有重要工程时，一般不宜采用插点插网形式。由于条件关系，必须采用插点插网时，应与原网一起观测，一起平差，以防原网的误差影响。

三、环形控制网

一些特殊的工程，有时要布设形状特殊的控制网，这主要由工程对控制点的特殊要求所决定的。例如有些工程要求控制点近似在一条直线上，这些控制点可能会组成直伸导线或直伸三角网。在环形加速器工地上，地下隧道是环形的，由于隧道需要多方向开挖和便于坐标传递，在地面沿隧道的中心线或边线布设若干个控制点，由这些控制点可组成环网，如图 2-3 所示。

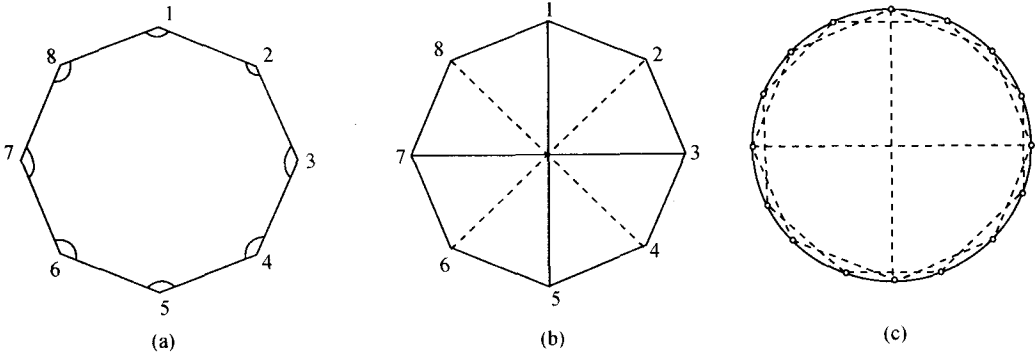


图 2-3 环形控制网

环形网可组成导线方案，如图 2-3 (b)，也可隔点相连组成交叉三角网，如图 2-3 (c)。环形网应与国家控制网连测，可组成各种形式的三角网（锁）。环形网是一种较为特殊的网形，一般布设大型环形工程的中心线上，如大型环质子同步加速器工程，大型正负电子对撞机工程，电子同步加速器的电子拉伸环工程等。

四、一种简便灵活的地面控制网

各种地下隧道工程，都要从地面向地下敷设支导线，若有两条支导线的地面起始点是互相通视或有高一级控制网的一条边（如图 2-4 所示），则较好。设 A 为平面坐标系的起始点， α_{AB} 为起始方位

角。A 点处地下导线的起始方位角为 α_{AB} ，而 B 点处的地下导线方位角为 α_{BA} 。这样不难看出，地面控制网对地下贯通的横向误差没有影响，只是地面控制网的 AB 长度对地下贯通的纵向误差有影响。这种布网方式很有实用价值，尤其适用于城市地铁的地面控制网。一般的城市地铁网可分解为一个个具体的贯通段，通常以车站划分。每个贯通段或每两个相邻车站间，利用这种方法布设地面控制网，可大大提高贯通的质量。

对于山岭隧道，很难使洞口附近的两个控制点之间直接通视。但可在中间山脊上设一个控制点 P，使它分别与 A、B 两点通视，或者使 AP、PB 为地面控制网中的两条边，如图 2-5 所示。只要水平角 $\angle APB$ 的精度足够高，AP、BP 两边的方位角相对误差就会很小。这样也可显著地减小地面控制网误差对贯通横向误差的影响。

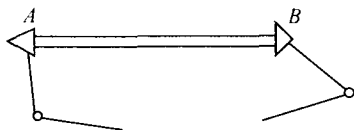


图 2-4

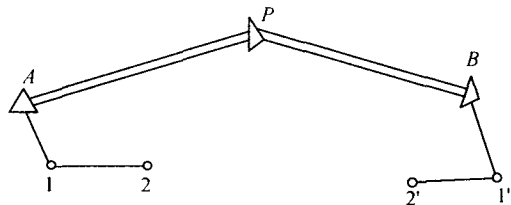


图 2-5

§ 2.4 GPS 控制网

GPS 测量的特点是对点间的边长没有限制，也不要求两点间通视，而且所测的点位精度均匀，与常规方法相比，具有很大的优越性和灵活性，适合各种地下工程的地面控制测量，尤其适合山岭地区大型隧道和跨河、跨海隧道的地面控制测量。

一、全球定位系统 (GPS) 的简介

1. GPS 的基本概念

GPS 是全球性的卫星定位和导航系统，能提供连续的、实时的位置，以及速度和时间信息。该系统是由美国国防部研究完成的，整个系统包括空间、地面、用户三部分。空间部分有 21 颗卫星和 3 颗备用卫星，分布于倾角为 55° 的近似圆形轨道上。轨道距地面高度约 2 万 km，卫星绕地球一周需要 12 h。这样，地球上任何地方，任何时刻都能收到至少 4 颗卫星信号。地面控制部分有一个主控站，其任务是计算星历表、卫星时钟改正、导航电文等；3 个地面天线，任务是向卫星注入导航电文和命令；5 个监测站作为数据收集中心及通讯系统。用户部分由天线、接收机、数据处理和输入输出设备组成。

GPS 测量有两种基本的观测量：伪距和载波相位。接收机测定调制码由卫星传播至接收机的时间，再乘上电磁波传播的速度便得到距离。由于所测距离受大气延迟和接收机时钟与卫星时钟不同步的影响，它不是几何距离，故称之为伪距。载波相位测量是把接收到的卫星信号和接收机本身的信号混频，从而得到拍频信号，再进行相位差测量。相位测量装置只能测量载波波长的少数部分，因此所测的相位可以看成是整波长数未知的伪距。由于载波的波长短 (L_1 为 19.05 cm, L_2 为 24.45 cm)，所以测量的精度比伪距高。

GPS 定位时，是把卫星看成是“飞行”的控制点，利用测量的距离进行空间后方交会，便可得到接收机的位置。卫星的瞬间坐标可利用卫星的轨道参数计算。

GPS 定位包括单点定位和相对定位两种方式。单点定位确定点在地心坐标系中的位置，相对定位利用两台以上的接收机同时观测一组卫星，然后计算接收机之间的相对位置，定位测量时，许多误差对同时观测的测站有相同的影响，因此，大部分相互抵消，从而大大提高了相对定位的精度。

2. GPS 卫星信号的组成

卫星发生的信号由一个基本频率 $F_0 = 10.23 \text{ MHz}$ 和两个载波频率分别为 $154F_0(L_1)$ 和 $120F_0(L_2)$ 组成。载波上有三种相位调制，载波的余弦波被频率为 F_0 的伪随机噪声码系列 $P(t)$ (即 P 码) 所调

制。载波的正弦波被频率为 $0.1F_0$ 的另一伪随机噪声码 $C(t)$ (称为 C/A 码) 所调制。此外, 正弦波和余弦波上都调制了 1 500 b 的数据率 $D(t)$ (称为导航电文), 数据串包括卫星的位置, 计时的改正、卫星本身的状态以及系统中的其他卫星的情况等。载波的正弦波和余弦波有不同的振幅 A_c 和 A_p , 正弦波比余弦波强 3~6 dB, 因此接收 C/A 码比接收 P 码容易。

GPS 卫星信号由下式 (2-4-1) 组成, 即

$$\varphi(f_1, f_2) = A_p P(t) D(t) \cos(2\pi f_1 + \varphi_p) + A_p P(t) D(t) \cdot \cos(2\pi f_2 + \varphi_p) + A_c C(t) D(t) \sin(2\pi f_1 + \varphi_c) \quad (2-4-1)$$

式中: f_1, f_2 —— 分别为 L_1, L_2 的频率;

$P(t), C(t)$ —— 分别为 P 码和 C/A 码;

$D(t)$ —— 数据串, 也称为导航电文;

A_c, A_p —— 分别为正弦波和余弦波的振幅;

φ_p, φ_c —— 分别为 P 码和 C/A 码信号的初相位。

3. GPS 接收机

GPS 接收机的种类很多, 根据其接收通道的工作原理可以分为调制码相关 (简称码相关)、调制码相位 (简称码相位) 和载波平方三种类型。每一种类型又有单频和双频之分。对于调制码相关型, 根据采用的调制码不同又分为 P 码相关型和 C/A 码相关型两种。目前 C/A 码只调制在 L_1 载波上, 因此 C/A 码相关型接收机只是单频机。

载波平方型接收机的基本原理是将接收到的 GPS 信号首先和接收机所产生的参考信号混频, 得到载波拍频信号 (频率低于原载波频率), 然后自乘, 得二次谐波。设载波拍频信号为 $Y = A(t) \cos(wt + \varphi)$, 由于调制码 $A(t)$ 为 +1 和 -1 系列, 因此, $Y^2 = A^2(t) \cos^2(wt + \varphi) = [1 + \cos(wt + \varphi)]/2$, 所得结果 Y^2 是一个没有调制的二次谐波。

调制码相关型接收机的基本原理是将接收到的 GPS 信号首先和接收机参考信号混频后得到一个较低的工作频率, 然后和接收机本身产生的编码 (P 码或 C/A 码) 通过锁延码路进行相关分析。当相关最大时, 一方面可得到两信号的延迟时间, 从而得到“伪距”和卫星信号发射的时间, 另一方面类似于“平方型”原理, 两信号相乘得到了拍频载波, 用于相位测量。

调制码相位型接收机的基本原理是将接收到信号和该信号延迟后相乘, 延迟时间是半个调制码周期 (对于 P 码为 49 ns, 对于 C/A 码为 487 ns), 相乘后的信号通过带通滤波器, 得到了频率等于调制码频率的正弦波, 然后再用它进行相位测量。

三种类型的接收机各有优缺点。码相关型接收机能提供最完全的观测数据, 包括伪距、载波相位和卫星的有关信息。但双频接收机须依赖 P 码, 而 P 码有时受到限制。 C/A 码相关型接收机只能用 L_1 信号, 因而是单频的, 单频接收机不能改正电离层信号延迟, 精度要低一些。码相位型和载波平方型接收机, 不需知道调制码, 因此又叫无码接收机, 可同时用 L_1 和 L_2 测量, 但是它们都不能解调卫星信号, 有关卫星的轨道参数需要用其他方法获得。

二、GPS 控制网布设的基本原则

GPS 控制网设计和布设时, 应考虑以下基本原则:

1. 网点密度按工程需要确定

这里所讲的 GPS 控制网不是国家级网, 而是地下工程的地面控制网。应根据工程的大小、范围、精度和点位密度的要求布设网点, 不过分地要求点位均匀, 平均边长从几百米到几公里不等, 以满足工程需要为原则。

2. 网点应满足一定的精度要求

合理地确定施测精度标准, 既能保证当前工程的需要, 又留有适当的余地, 同时考虑今后其他工程的可能需要, 以便节省人力、物力, 提高工作效益, 加快施测进度。

3. 遵循统一的测量规范、按等级标准设计和作业

GPS 测量定位速度快、相对定位精度高、工作时间短、效益好, 是现代化的测量方法, 必须遵循统一的测量规范, 按等级标准设计和作业。国家质量技术监督局 2001-03-05 发布的《全球定位系统 (GPS)

测量规范》中，GPS 测量按其精度划分为六个等级，如表 2-1 所示。

表 2-1 等级划分

级 别	固定误差/mm	比例误差系数
AA	≤ 3	≤ 0.01
A	≤ 5	≤ 0.1
B	≤ 8	≤ 1
C	≤ 10	≤ 5
D	≤ 10	≤ 10
E	≤ 10	≤ 20

工程控制网一般属 D 级或 E 级，相当于国家三等网和四等网。GPS 网布设时，除了联测测区内高级 GPS 点外，不必按常规测量方式逐级布网，可根据实际需要，采用相应的等级规定一次完成全网的布点和施测。当测区内无高级 GPS 点时，可与测区内或附近的国家大地控制点连测。

三、网形设计

GPS 网形设计是施测方案的基础，它侧重考虑如何检核 GPS 数据质量和保证点位精度。为了检核 GPS 数据质量，GPS 网应当构成闭合环状。闭合环有同步环和异步环之分。两台接收机同时观测相同的卫星，所得同步观测资料可以解算出两站之间的一条基线向量。将不同时段观测的各基线构成的闭合环叫做异步环。三台接收机同时观测相同的卫星，所得的同步观测资料解算出三个基线向量构成三角形同步环路，其中只有两条是独立的，一般用 k 台接收机同步观测时，可解算出 $k(k-1)/2$ 条基线向量，其中只有 $k-1$ 条是独立的。同样，由若干条独立基线构成的闭合环也叫异步环。同步环中由各基线向量构成的坐标闭合差之和应等于零，否则，基线解算结果有粗差。测量中通常用增加多条观测或附加条件的方法，采用最小二乘法进行平差，以提高点位的精度并增加其可靠性。由独立基线构成的异步环或增加观测的时段数都可产生多余观测。多余观测数 r 的计算是由独立基线数减去待定点数。设计中总的观测点为 m ，用 k 台接收机，在各点作 n 次观测，则同步观测的次数 $s = m \cdot n / k$ ，独立基线向量数 $b = (k-1)s = (k-1) \cdot m \cdot n / k$ 。

布设 GPS 网时应当由异步闭合构成区域性的子环路，然后由若干子环路再构成复盖整个测区的闭合的网环路。每个子环路可以作为施测方案分期观测的依据。每个子环路观测结束后便可及时评定 GPS 数据质量。

图 2-6 是一个由四台接收机进行同步观测构成的环形网，采用点连接方式。

图 2-7 为两端有高级点的附和路线形式，采用边连接方式，显然附和路线形式的多余观测数较少。

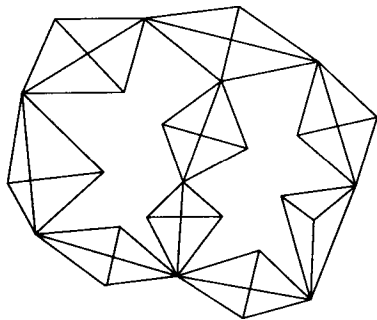


图 2-6 环形网

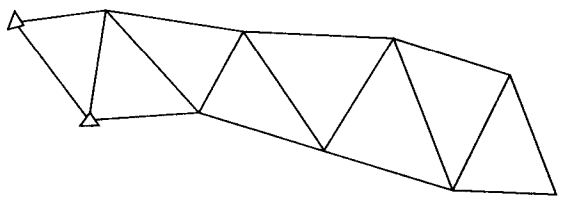


图 2-7 附和网

在 GPS 网设计时应进行时段设计。时段越长，越有可能选取图形强度较好的星组的观测数据。由于卫星的运动和测站随地球自动运动，卫星相对测站的几何图形在不断的变化，星组中卫星更替造成时段的自然分段，每一个时段称为一个子时段。为了使观测能处于最佳时段，在技术设计时，可根据

测站的概略坐标及卫星星历作外推预报, 计算出观测时一天的图形强度因子, 找出间隙区, 选择最佳观测时段。

在 GPS 网设计时, 应尽可能多与高级 GPS 控制点或国家测设的三角点、水准点进行连测, 以便提供数据处理的基准值和成果质量的外部检核。

四、保证 GPS 工程控制网质量的主要措施

GPS 测量所获空间弦长的精度用下式 (2-4-2) 表示, 即

$$m = \pm \sqrt{a^2 + (b \cdot D)^2} \quad (2-4-2)$$

式中: m —— 空间弦长的标准差, mm;

a —— 固定误差系数, mm;

b —— 比例误差系数, $\times 10^{-6}$;

D —— 相邻点间距离, km。

可见, 基线测量的误差源划分为固定误差和比例误差两部分。固定误差主要来源于天线相位中心的不稳定性、多路径效应、观测噪声及测站位置误差; 比例误差主要为星历误差、时钟误差、电离层及对流层影响的残余误差。其中天线相位中心变化、多路径影响和相对对流层延迟的影响, 是小于 5 km 短基线测量的主要误差来源。在 5 ~ 10 km 基线上, 对流层延迟误差逐步上升为主要误差, 随着基线长度的增加, 电离层延迟误差和卫星轨道误差将成为主要误差来源。GPS 的测量精度, 在 10 km 以内与目前最精密的测量方法相比较, 两者基本一致。随着地面测量长度的增大, GPS 将远远高于地面任何方法的测量精度。尽管 GPS 测量精度很高, 为了充分发挥仪器的作用, 根据 GPS 测量误差来源和影响规律, 在进行 GPS 工程控制网测量中, 应采取如下适当的措施, 保证 GPS 网的观测质量。

1. 减小天线相位中心变化和多路径的影响

在定位前, 天线要认真对中和定向。在同一测站上的不同时间段测量时, 尽量用不同的天线, 或者选用带有屏蔽罩的天线以减小误差影响, 从几个不同的方向量取天线仪器高并取中数。在选择测站时, 要注意避开周围有反射作用的物体, 以避免产生多路径效应。

2. 防止接收信号受到电干扰

任何强电磁场和强的无线电信号, 都会对来自卫星的信号产生干扰, 致使接收信号失锁和观测值噪声比降低, 影响 GPS 测量精度。因此, 应注意保持测站位置与变电站、强力辐射电台、电视台及微波站的距离大于 100 m, 防止接收信号受到强电的干扰。

3. 大气层折射影响的改正

当卫星信号穿过大气对流层和电离层时, 将会产生时间延迟, 如不改正, 会影响 GPS 测量精度。当基线小于 15 km 时, 在相位差观测中能较好地消除这种时间延迟的影响。对于更长的基线, 其对流层影响是通过测定观测时间段内的测站气象参数, 选择相应的模型予以改正的, 而电离层的影响, 与电离层中含的电容量有关, 但电容量具有一定的随机性, 不能完全改正。目前, 单频机这种改正效率仅有 50%, 而双频机的改正效率可达 98%, 因此, 测量长基线, 最好采用双频接收机, 利用单频接收机可在影响较小的夜间观测。

4. 保证卫星星座质量和不丢失卫星信号

卫星星座质量是用位置精度因子 PDOP 表示的, 其值越大实时单点定位精度越差, 时标精度越低。因此, 一般要求 PDOP 值不大于 8, 最好选择包含 PDOP 值有跳变的观测时间段观测, 以提高相对定位精度。

由于物体遮挡而造成的接收机丢失卫星信号的现象称为物理中断。低于地面 15° 角的卫星信号受大气层折射影响很大, GPS 网的测站要避开高于 15° 角的障碍物, 对于无法避开的障碍物, 可选择不受或少受其影响的时间段观测。

§ 2.5 几种典型的地面控制网

一、上海地铁 1 号线的地面控制网

上海地铁规划有 7 条线路构成地铁网，遍布全上海市。1 号线由上海火车站至锦江乐园，南北向贯穿市中心，全长约 20 km。控制网除了满足 1 号线使用，还留有一定余地，考虑其他线路的应用。整个控制网基本上覆盖了浦西大部分地区。

根据上海市建筑物密集、高大的特点，建立三等三角网，以相连的中心多边形构成，其中心点的连线接近 1 号线。如图 2-8 所示，三等网共 14 个点，最长边 4.62 km，最短边 2.72 km，平均边长 3.68 km。取城市二等网的一个点坐标和 2 个方向定向。本网为依附于城市二等网的三等边角网。外业观测按现行规范执行，边角同测。三等网的精度经平差确定，最弱点相对于起始点点位中误差小于 ± 5 cm。

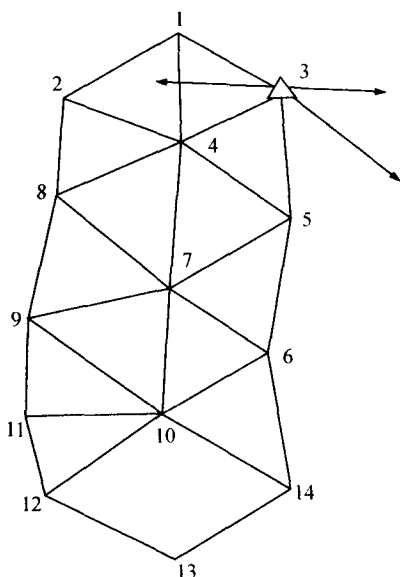


图 2-8

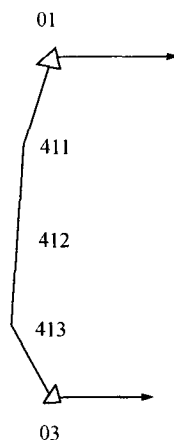


图 2-9

三等网以下布设四等空中导线，沿地铁 1 号线布设 5 条附合导线，共 15 个点，如图 2-9 所示。所谓空中导线，是因上海市建筑物高而密，无法在地面布设，将四等导线点均布设在高层建筑物顶台上，构成空中导线。导线点用水泥现场浇灌的水泥柱，柱高 1.3 m，外表成圆筒形，配备强制归心装置。用精密测距仪和 T_2 经纬仪测距、测角。四等空中导线是地铁施工直接使用的点。导线最弱边相邻点位中误差均小于 ± 2 cm。

高程控制系统，布设二等水准网，每个地铁车站设置 2 个水准点，全线共 26 个水准点。每公里高差测量中误差为 ± 2 mm。

因为地铁施工周期较长，而上海系软土地质，使高层建筑物有不同程度的下沉，需定期对平面和高程控制进行监测，确保点位精度和地铁工程的质量。

二、秦岭特长铁路隧道控制网

西安—安康线秦岭特长铁路隧道，是我国目前最长的铁路隧道，全长 18.448 km。隧道采用机械化最新方法开挖，全隧道仅中间一个贯通面，要求横向贯通中误差小于 ± 100 mm，远低于现行规范规定的 ± 250 mm 的要求。这种长隧道的开挖方法是国内首次，在国际上也不多见。这种方法的基本特点是精度要求高，可靠性强。由于测区内相对高差约 2 000 m，山陡林密，地形复杂，树木覆盖率达 90%，通视和交通条件极差，气候变化无常，昼夜温差悬殊，测量工作难度极大，不便于布设常规的

三角网或导线网，经反复论证，选用 GPS 网，按 B 级要求布设。全网由 12 个控制点组成，隧道两端各有六个控制点，如图 2-10 所示。

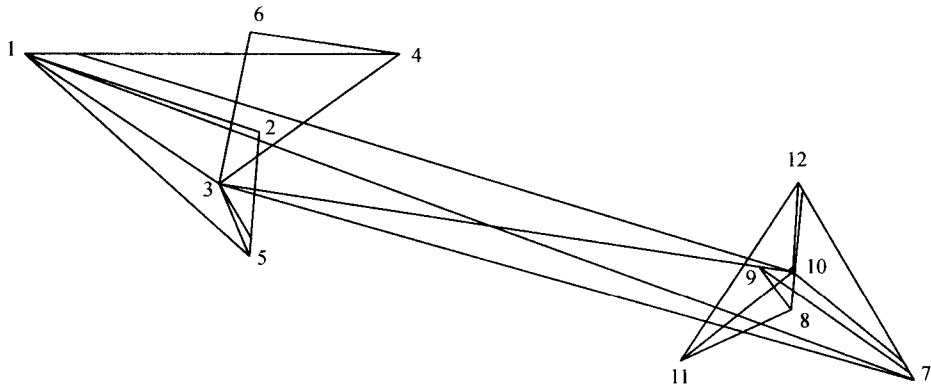


图 2-10 秦岭隧道控制网

观测采用三台 Wild200GPS 接收机，采用相对静态定位的方法。观测要求，如卫星高度角、图形强度 PDOP 及采样速率完全按《全球定位系统（GPS）测量规范》B 级网规定执行。所有控制点均采用异步环相连，并组成空间三角形和空间大地四边形以加强 GPS 网的几何强度。观测结果经数据处理后，均达到规范精度要求，满足隧道贯通工程的要求。

为确保隧道的正确贯通，高程采用一等精密水准测量。一等水准外业采用两台自动安平精密水准仪 Zeiss Ni002 及其配套的铟钢水准标尺，由两个外业小组同向进行。水准路线全长 120 多公里，所有测量工作严格按照规范要求进行。为了对外业观测高差进行重力异常改正，采用相对重力仪 Lacoste 对水准路线上每个水准点按加密重力点要求，分三条测线进行重力测量。

三、穿越英法海峡的“欧洲隧道”地面控制网

“欧洲隧道”横穿英法海峡海底，从英国的伏克斯顿到法国的科凯利，该隧道工程由两条行车隧道和一条辅助隧道及端点车站组成，隧道长达 50 km。“欧洲隧道”是单纯的铁路隧道，迄今无法解决公路隧道所存在的通风问题。年运输 3 000 万旅客和 1 500 万吨货物，高峰期每个方向每小时可通过约 20 列火车。

隧道由间距为 15 m 的三条平行管道组成，外侧两管道内径为 7.6 m，供行车用，中间的辅助管道内径 4.8 m，主要用于维修、通风和救援等，同时在行车隧道的正确贯通上亦起决定性作用。每隔 375 m 用横坑连通主、辅管道。由于列车的行驶速度每小时高达 160 km，将在隧道内形成“活塞效应”而产生巨大气流，故在两行车道之间，每隔 250 m 在隧道上部设置一根直径为 2 m 的通气管，用以平衡气压。为了确定隧道两端点之间的几个关系，通过入口井指导隧道掘进的平面位置、高度和方向，确保贯通的精度，必须有高精度的平面控制网和高程网。

1. 地面平面控制网

按常规方法布设地面控制网，采用电磁波测距仪进行观测，用最小二乘法作整体平差，所得隧道贯通面的纵向和横向标准差达 ± 16 cm，即限差达 ± 50 cm，显然不理想。为了提高平面控制网的精度，1987 年用 GPS 测量技术在海峡两岸同时使用双频接收机 TI4100 各测了三个控制点，将由 GPS 所测定的坐标差推算出的水平距离和方位角作为伪观测值参加到网的平差，平差在国际地球参考椭球体上进行，用高斯正形投影将地理坐标换算成直角坐标，坐标原点取北纬 $\varphi_0 = 90^\circ$ ，中央子午线为 $\lambda_0 = 1^\circ 30'$ 。由于引进高精度的 GPS 观测，控制网精度从原先的 $\pm 4 \times 10^{-6}$ 提高到了 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。这相当于隧道长度为 40 km 时，由地面控制测量所引起的纵、横向贯通误差为 ± 4 cm，若考虑入口点与控制点的连测误差，这项标准差估计为 ± 5 cm。

2. 地面上的高程连测

由于英法两国水准系统的基准不一致，尽管各国在两岸都布设有精密的水准网，但跨越英法海峡