








第八章

工业设备的安装和检校测量



第八章 工业设备的安装和检校测量

学习要点

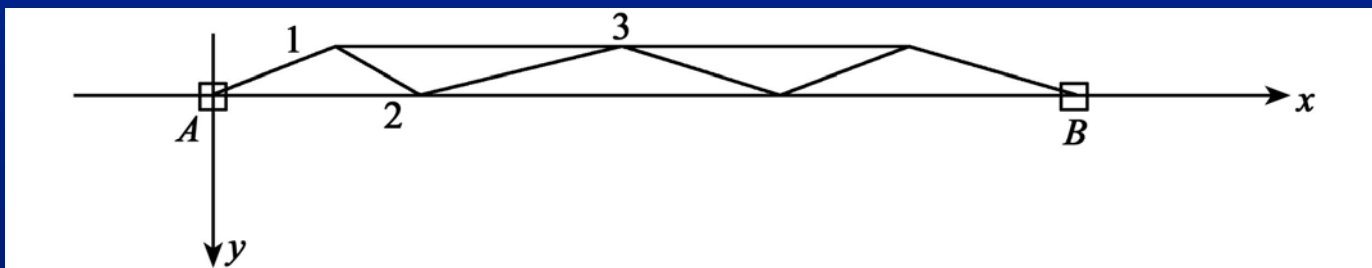
- 精密微型安装测量控制网的建立 
- 设备安装和检校测量仪器与方法 
- 精密定线、短边方位传递和姿态准直 
- 三维工业测量系统 
- 大型天线安装测量实践 



8.1 精密微型安装测量控制网的建立

一、直伸三角形网

在线状设备的安装，可建立直伸边角测量网



$$V_{ij}^S = -\cos \alpha_{ij}^0 dx_i - \sin \alpha_{ij}^0 dy_i + \cos \alpha_{ij}^0 dx_j + \sin \alpha_{ij}^0 dy_j + l_{ij}^S$$

$$V_{ij}^D = -d\xi_i + \frac{\sin \alpha_{ij}^0}{S_{ij}^0} dx_i - \frac{\cos \alpha_{ij}^0}{S_{ij}^0} dy_i - \frac{\sin \alpha_{ij}^0}{S_{ij}^0} dx_j + \frac{\cos \alpha_{ij}^0}{S_{ij}^0} dy_j + l_{ij}^D$$



8.1 精密微型安装测量控制网的建立

二. 环形控制网

- ◆ 测高环形三角网
- ◆ 大地四边形环锁

1. 测高环形三角网

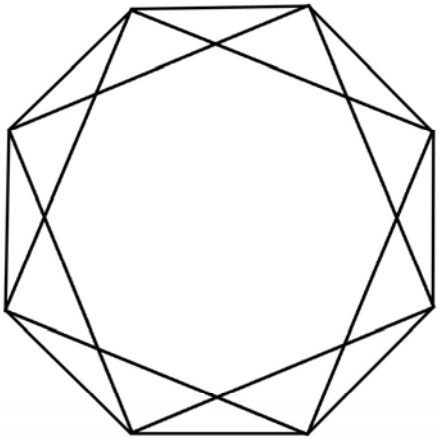


图 8-2 环形三角网图

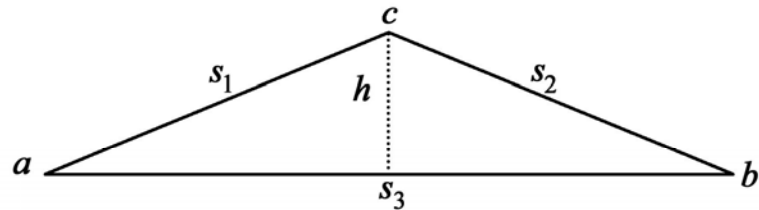


图 8-3 测高三角形



8.1 精密微型安装测量控制网的建立

二. 环形控制网

- ◆ 测高环形三角网
- ◆ 大地四边形环锁

2. 大地四边形环锁

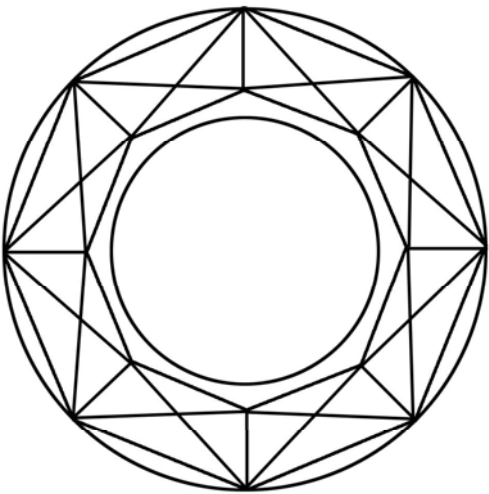


图 8-4 四边形环锁

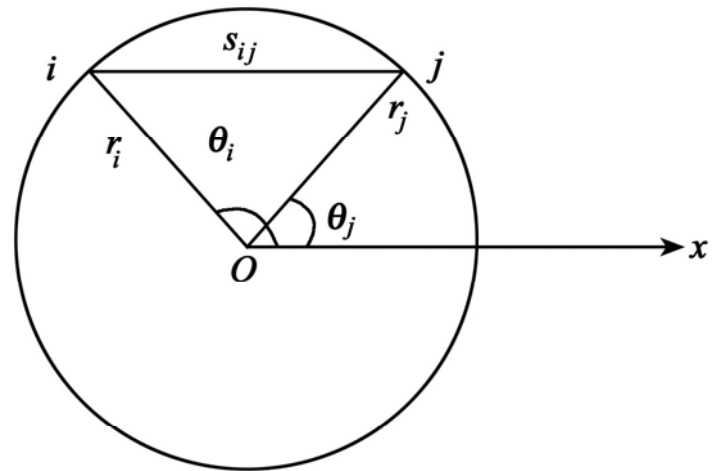


图 8-5 极坐标系



8.1 精密微型安装测量控制网的建立

三、3维控制网

采用全站仪/激光跟踪仪可以同时获得精度相匹配的斜距、水平角、天顶距等观测元素，经过三维网整体平差可一次性得到网中各待定点的三维坐标（ x 、 y 、 z ）。

意义：避免了二次布网、观测和平差的繁琐工作；也避免了一些相关元素分开处理在精度上、时间上和信息上带来的损失，理论上更加完善。

四、高程控制网

安装测量的高程控制网一般仍布设成水准网的形式





8.2 设备安装和检校测量仪器与方法

一、传统的测量方法

主要有机械测量法、光学测量法和电学测量法等。

机械测量法是用机械的方法对天线进行检测，主要有样板法（旋转样板法和固定样板法）和数控机床法两种，至今还为天线行业所应用；

光学测量法主要有双五棱镜法、经纬仪钢带尺法和五棱镜带尺法等；

其他测量方法还有钢丝测距法、激光测距法、微波测距法和小车测量法等。



8.2 设备安装和检校测量仪器与方法

二、射电全息法

是利用天线的远场复方向图与天线口面上的场分布间的傅立叶变换关系，由远场方向图的测量来反推天线口面上的场分布（振幅和相位分布），并由天线口面上场的相位分布，用光线追迹得到天线表面相对于理想抛物面偏差的信息。

测量误差：接收机噪音、指向和跟踪误差、大气闪烁、天线馈源的相位响应和信号源的偏振效应等。

在测量小口径天线时的测量精度要低于光学测量系统。



8.2 设备安装和检校测量仪器与方法

三、三坐标测量机

测量原理：将被测物置于三坐标测量机的测量空间，可获得被测物上各点的坐标位置，根据这些点的空间坐标值，经过数学运算，求出被测物的几何尺寸、形状和位置。

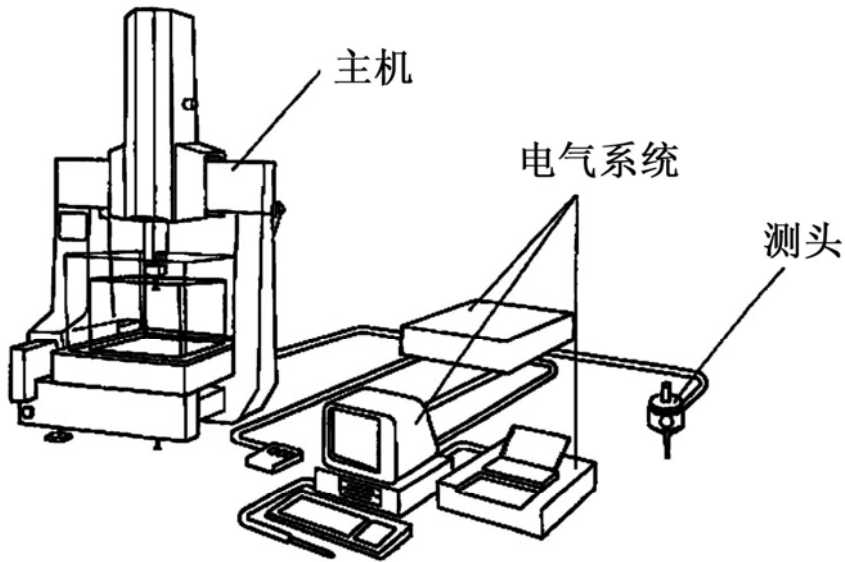


图 8-10 三坐标测量机的组成

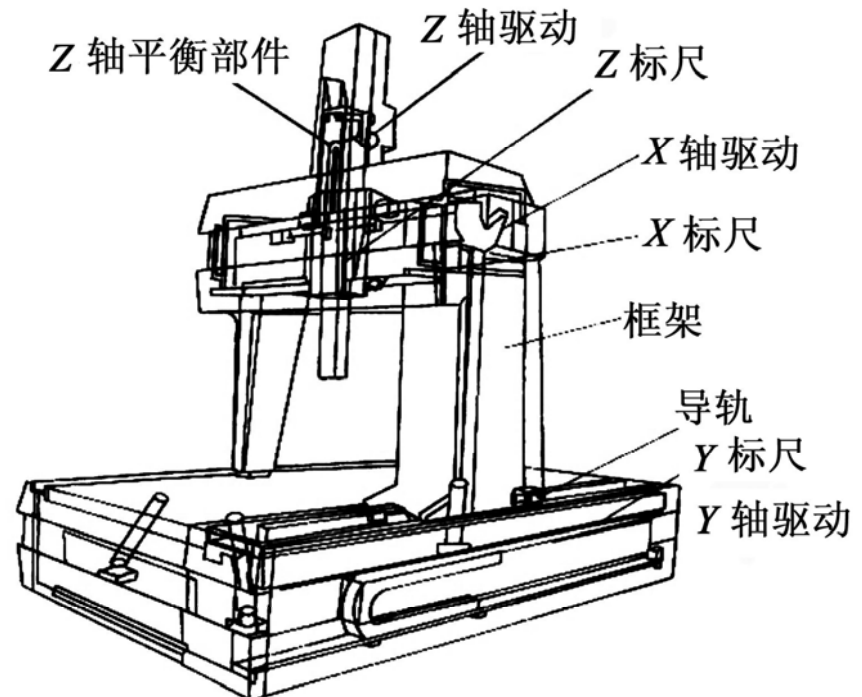


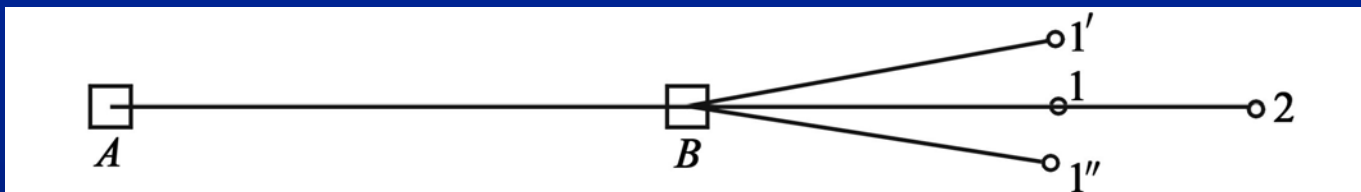
图 8-11 三坐标测量机主机结构



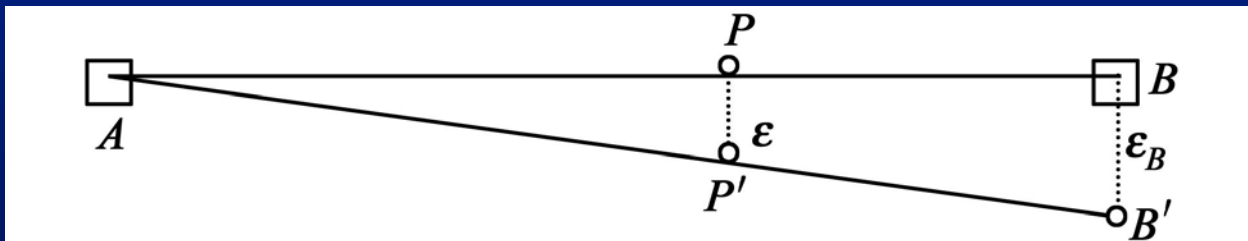
8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量

一. 精密定线的方法

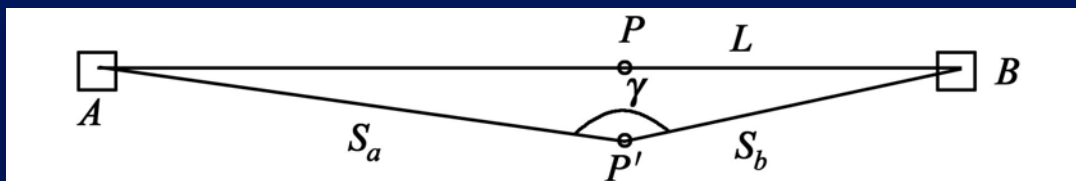
外插定线:



内插定线:



归化法定线:



$$\epsilon = \frac{S_a S_b}{S_a + S_b} \cdot \frac{\Delta\gamma''}{\rho''}$$

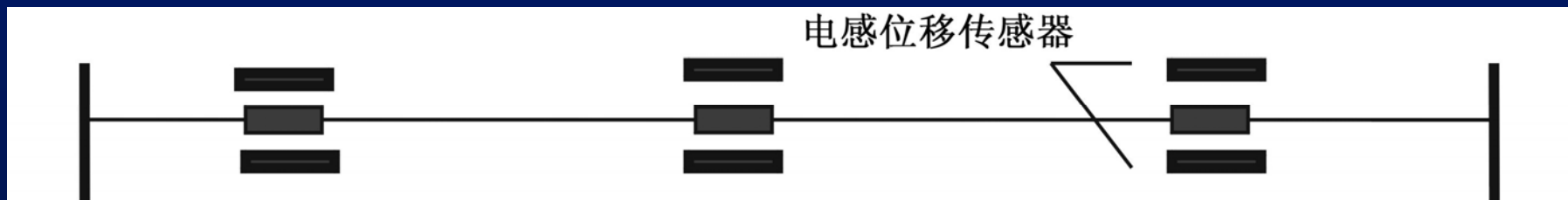


8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量

一. 精密定线的方法

机械法准直测量：是在二个给定的基准点间吊挂一条引张线，利用垂直投影仪测量各中间点偏离该引张线的偏离值，所以机械法准直也称为引张线法准直。

如果在测点处安装位移传感器（如电感位移传感器），也可实现引张线测量的自动化：





8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量

二、短边方位传递

主要误差来源及对策：

- ◆ 仪器和目标对中误差

采用强制对中

- ◆ 望远镜调焦误差

(1) 互瞄十字丝

(2) 互瞄内觇标

- ◆ 经纬仪垂轴倾斜误差

(1) 加入垂直轴倾斜改正

(2) 在各测回之间，重新调整仪器气泡居中

(3) 双轴补偿功能对垂直轴倾斜进行自动改正



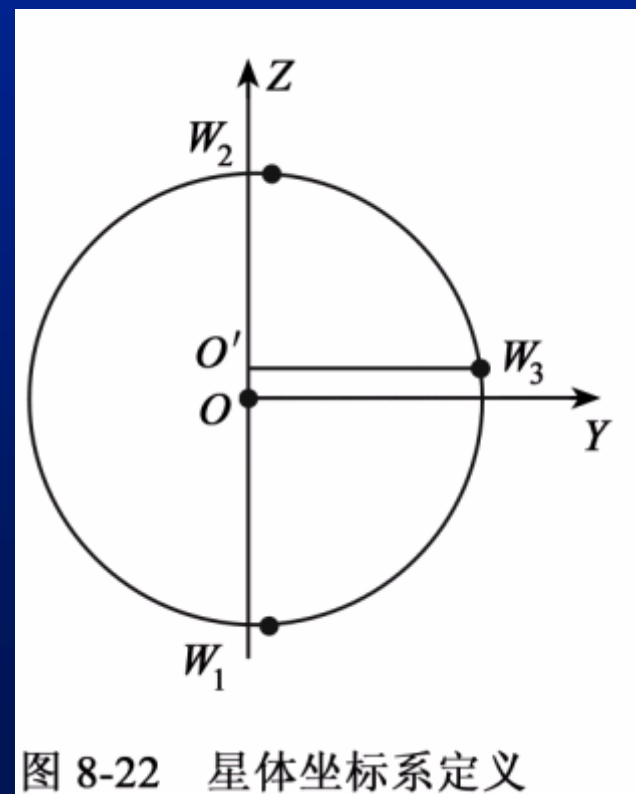
8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量

三、卫星安装姿态准直测量方法

(一) 准直测量中各坐标系的定义:

1、星体坐标系

由转台上的定位销 w_1 、 w_2 、 w_3 确定。坐标系原点为三个定位销所确定的空间圆之圆心 O ， w_1 、 w_2 的连线确定某一轴线方向，一般为 Z 轴正向； w_3 到该连线的垂线方向确定另一轴线方向，一般为 Y 轴正向；按照右手规则确定第三轴线方向。





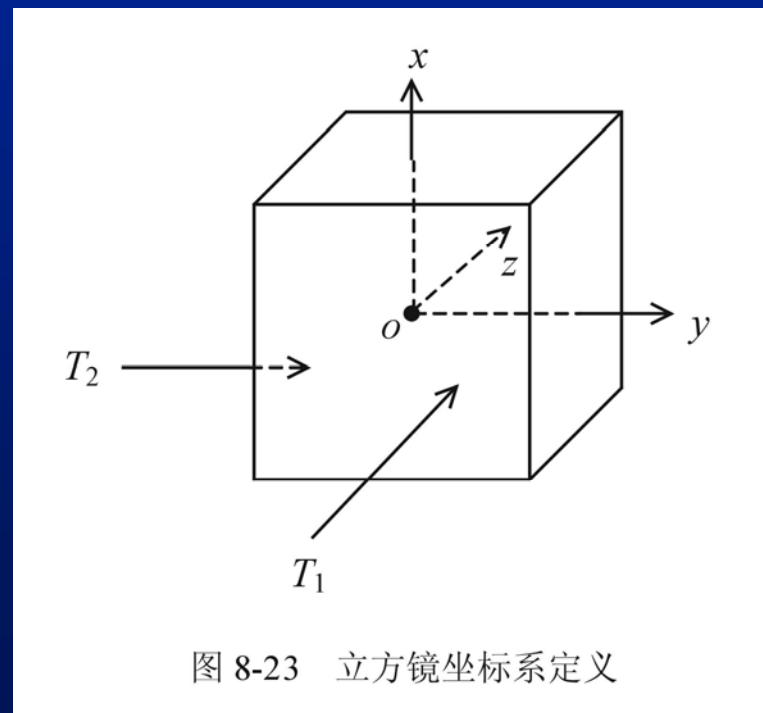
8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量

三、卫星安装姿态准直测量方法

(一) 准直测量中各坐标系的定义：

2、立方镜坐标系

由立方镜几何中心及表面法线确定，坐标系原点为立方镜几何中心，以其中两个相互垂直的表面法线确定某两个坐标轴方向，右手规则确定第三轴。立方镜正面法线确定轴正向，左侧面法线确定轴正向。





8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量

三、卫星安装姿态准直测量方法

(二) 准直测量方法：

准直测量方法基于三台或三台以上的高精度电子经纬仪测量系统，通过系统定向和角度准直测量，依据数学解算获取星体坐标系和立方镜坐标系的转换关系。

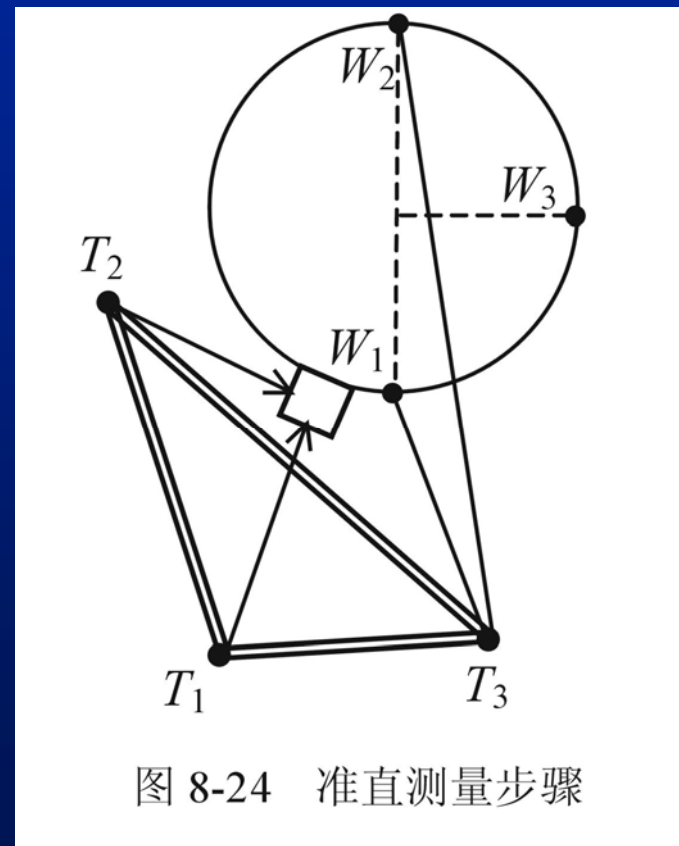


图 8-24 准直测量步骤



8.3 精密定线、短边方位传递和姿态准直测量

三、卫星安装姿态准直测量方法

(三) 立方镜坐标系的建立

(四) 星体坐标系建立

(五) 立方镜坐标系与星体坐标系的转换





8.4 三维工业测量系统

一、极坐标测量系统

测量原理

$$X = S \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta$$

$$Y = S \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta$$

$$Z = S \cdot \sin \beta$$



图 8-26 TDA5005 全站仪

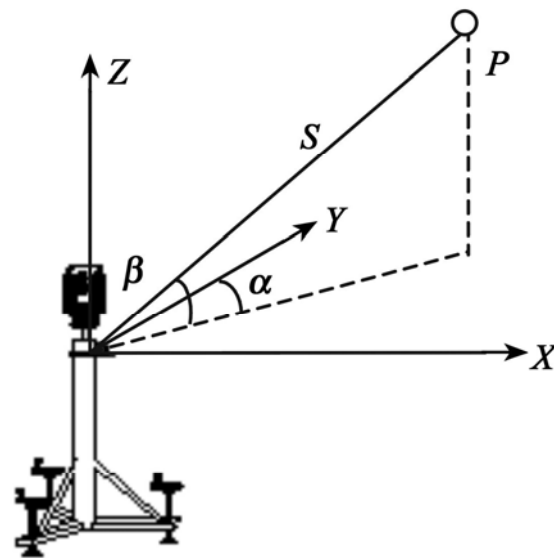


图 8-27 极坐标测量原理图



8.4 三维工业测量系统

二、经纬仪交会测量系统

1、测量原理

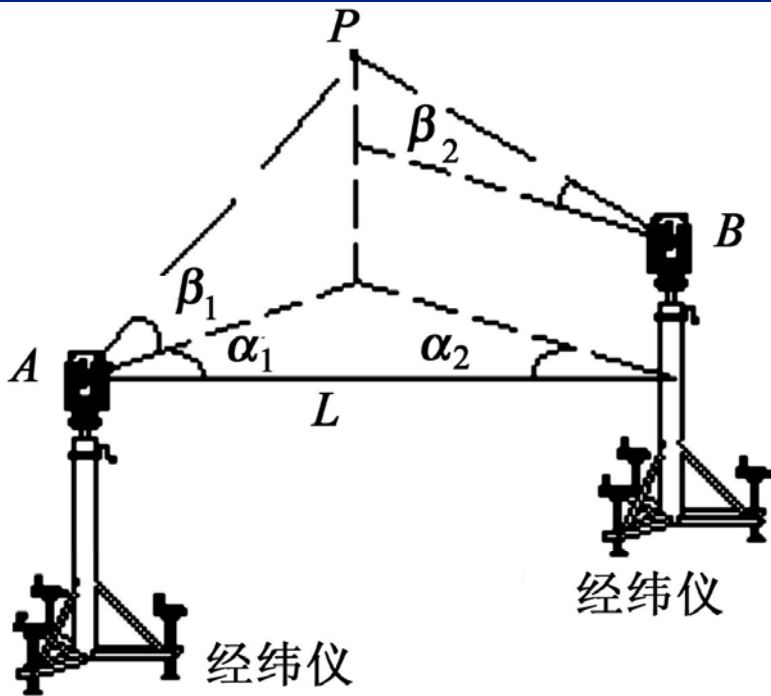


图 8-32 经纬仪坐标测量原理图

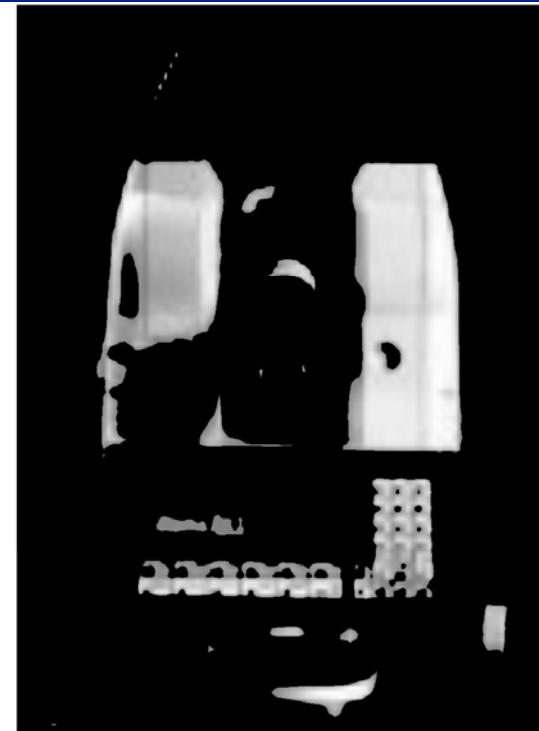


图 8-33 TM5100A 电子经纬仪



8.4 三维工业测量系统

二、经纬仪交会测量系统

2、系统构成

硬件主要由两台以上T2000/T3000/TM5100电子经纬仪、多路串口转换卡、T-LINK、基准尺、工业测量用脚架、联机电缆、激光目镜、照准标志、台式微机或便携机等组成，目前的主流仪器是TM5100A马达电子经纬仪。

3、系统作业模式探讨

4、提高系统精度的措施

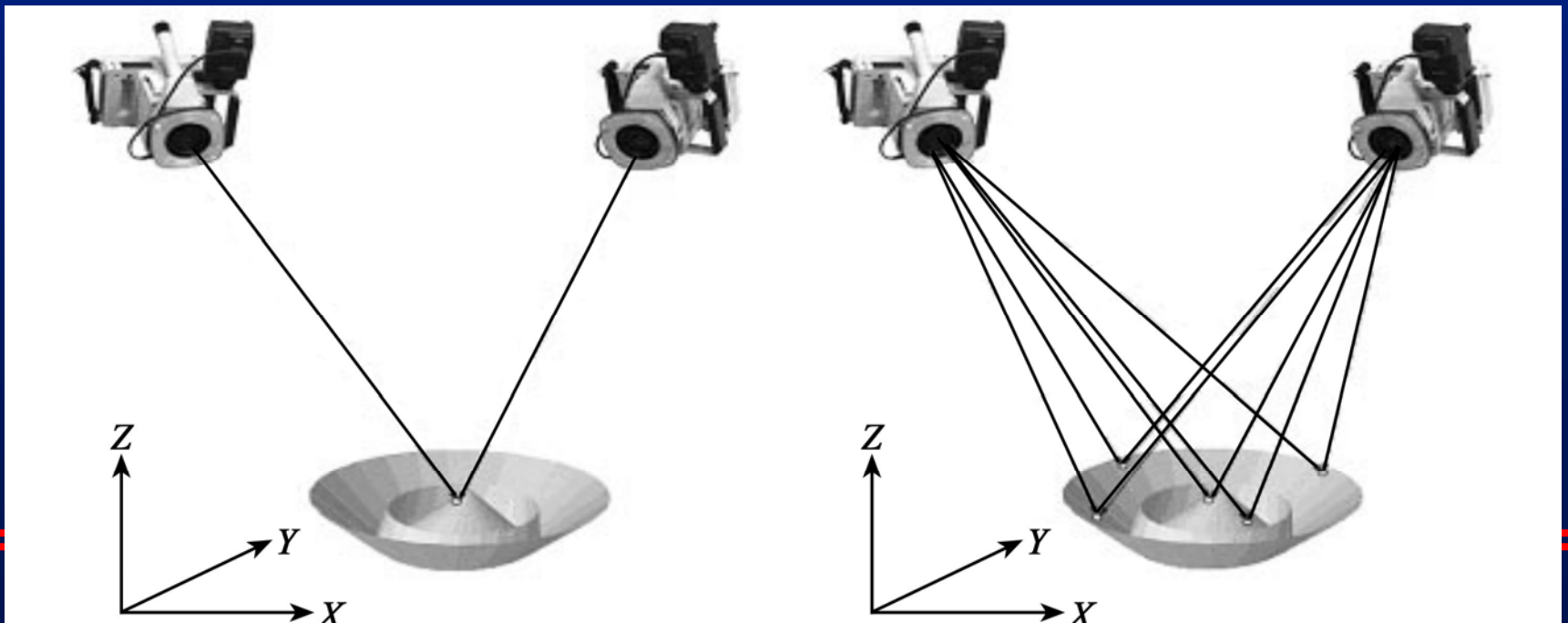


8.4 三维工业测量系统

三、近景摄影测量系统

1、测量原理

近景摄影测量原理如图，通过二台高分辨率的相机对被测物同时拍摄，得到物体的2个二维影像，经计算机图像匹配处理后得到精确的三维坐标。





8.4 三维工业测量系统

三、近景摄影测量系统

2、系统构成

脱机测量系统可采用单台数字相机，在二个或多个位置对被测物进行拍摄，然后将图像输入计算机即可进行图像处理。

多台相机联机测量可以实时得到待测点的三维坐标。



图 8-4-11 脱机测量系统



图 8-38 联机测量系统



8.4 三维工业测量系统

四、距离交会测量系统

1、测量原理

原理同样是解三角形，首先考虑平面定位的原理。其次是多台仪器空间距离交会。

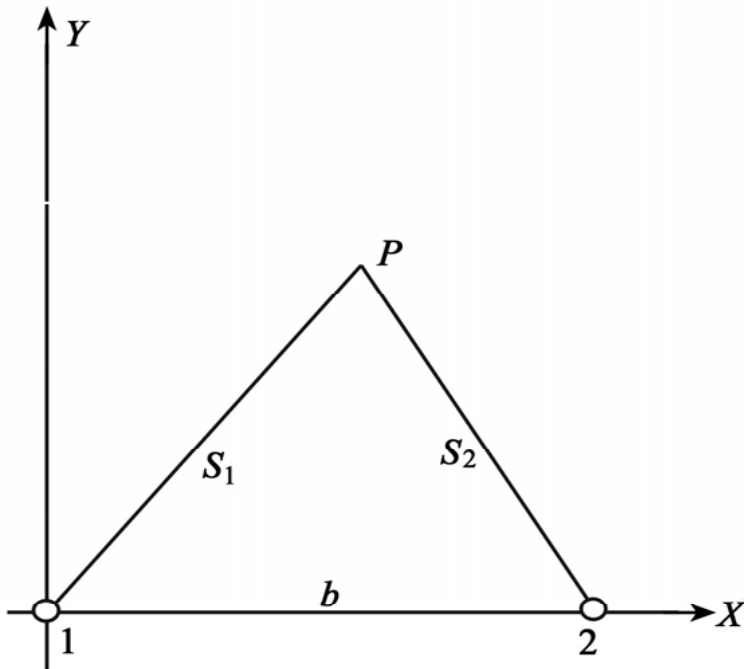


图 8-43 平面距离交会测量原理

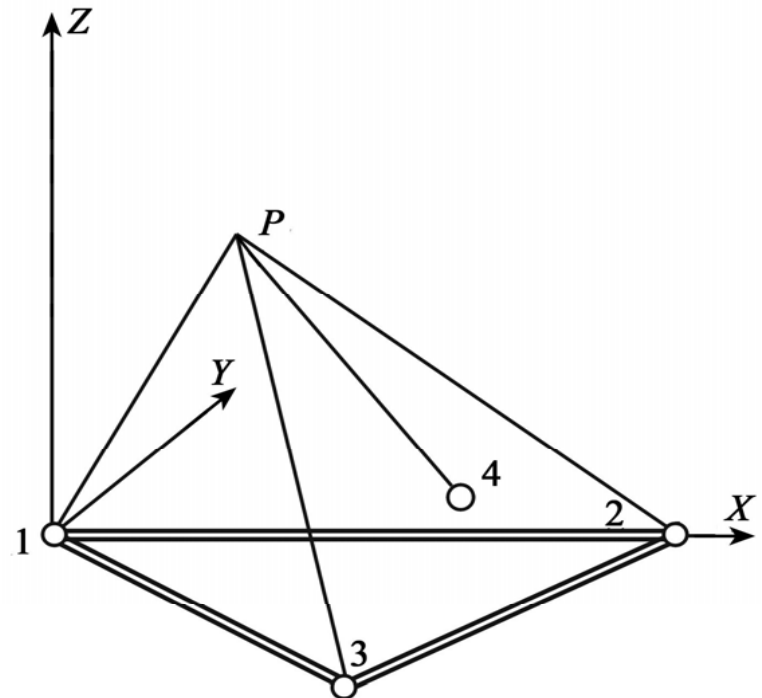


图8-44 空间距离交会测量原理

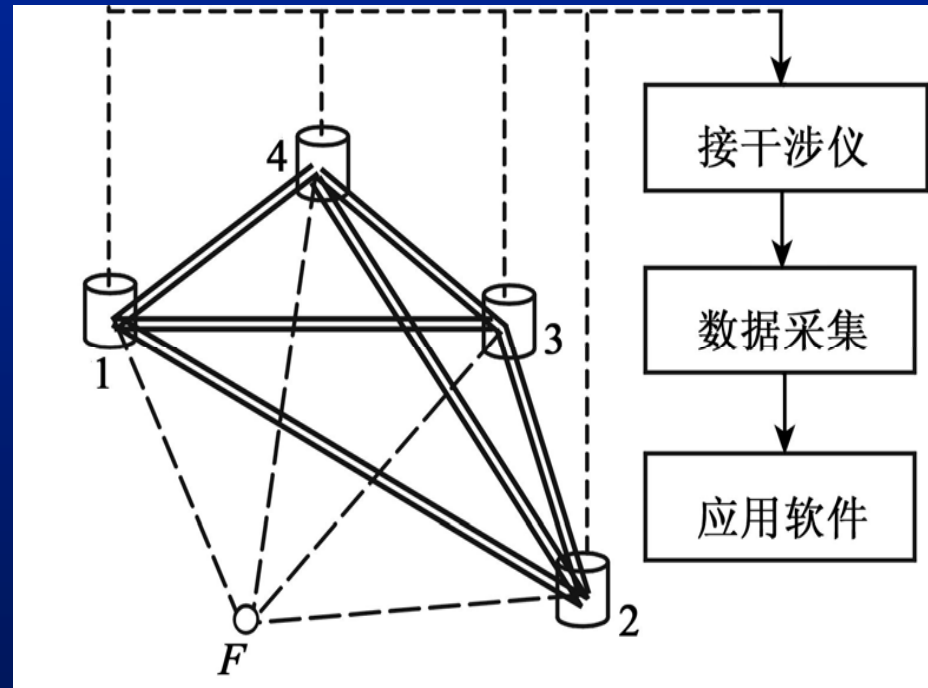


8.4 三维工业测量系统

四、距离交会测量系统

2、系统构成

整体式有多杆式或超声式坐标测量机，多杆式是通过杆的伸长或缩短来测量距离，超声式则通过超声波发射和接收来测量距离。





8.4 三维工业测量系统

组合式系统用三台以上距离传感器（测距仪、全站仪或激光干涉仪）组成距离交会系统，通过系统定向方法确定每台仪器的三维坐标，就可以建立起测量系统。



图 8-46 室内 GPS 传感器

图 8-47 手持式测头



8.4 三维工业测量系统

四、距离交会测量系统

3、系统应用

以天线测量为例，美国GBT天线主面安装就采用了距离交会测量系统，三台测距仪（2台TC2002和1台TDM5005）安置在馈源支撑结构上，其自身位置通过距离后方交会（观测地面上一系列已知点）获得，然后三台仪器对主面上的目标进行距离测量，可以得到待测点的三维坐标，测量精度优于 $\pm 1\text{mm}$ ，测量范围在100 m左右。

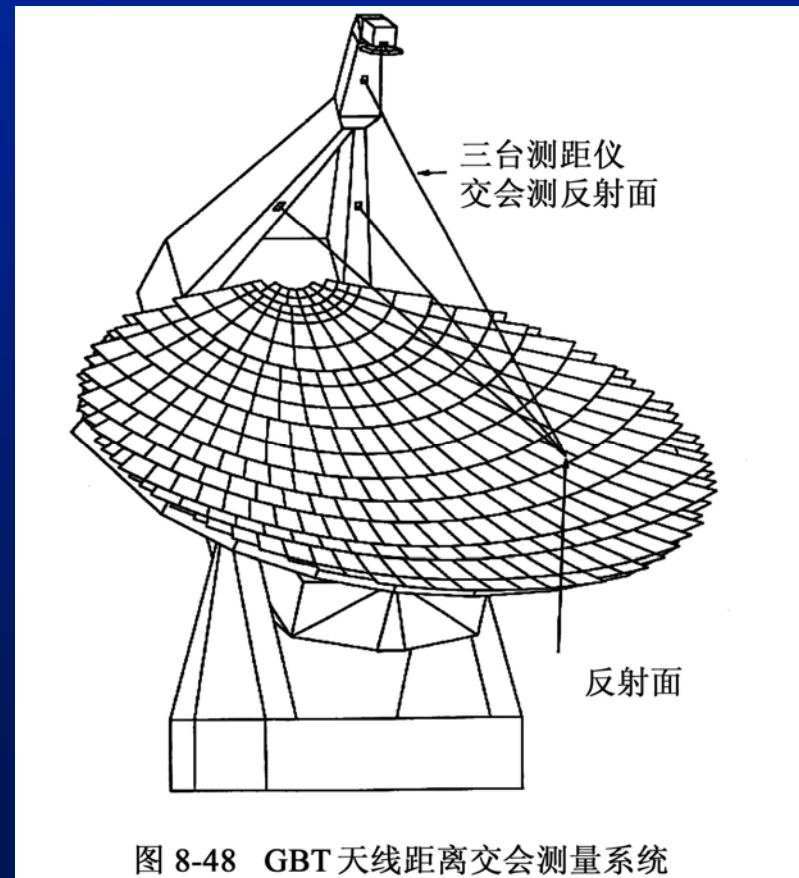


图 8-48 GBT 天线距离交会测量系统



8.4 三维工业测量系统

五、关节式坐标测量机

1、测量原理

利用空间支导线的原理实现三维坐标测量。



图 8-49 Faro 关节式坐标机

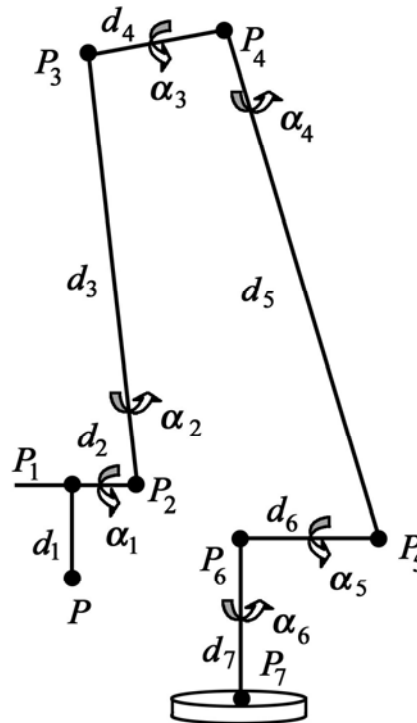


图 8-50 空间支导线测量原理图

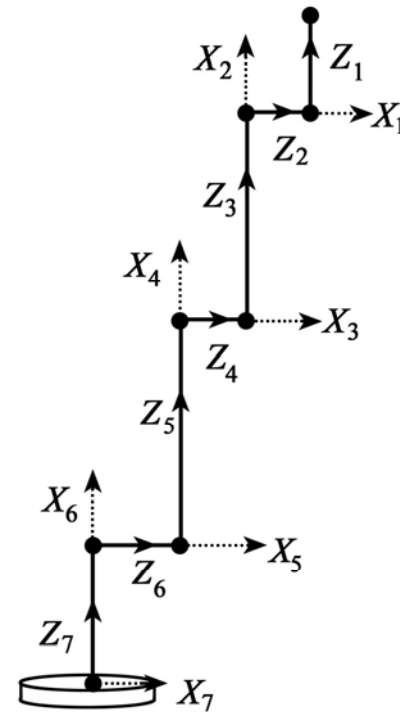


图 8-51 各坐标系示意图



8.4 三维工业测量系统

五、关节式坐标测量机

2、系统构成

是一种便携的接触式测量仪器，对空间不同位置测量点的接触实际上模拟人手臂的运动方式。仪器由测量臂、码盘、测头等组成，各关节之间测量臂的长度是固定的，测量臂之间的转动角通过光栅编码度盘实时得到，转角读数的分辨力可达 $\pm 1.0''$ 。

3、提高系统精度的措施

4、系统应用



8.4 三维工业测量系统

六、工业测量系统软件

系统功能主要包括以下九个方面内容：

- (1) 设备联机与控制
- (2) 系统定向
- (3) 坐标测量
- (4) 近距加常数修正
- (5) 数据管理及编辑
- (6) 坐标系的生成与转换
- (7) 测量数据分析与计算
- (8) 数据的输入、输出
- (9) 测量数据的可视化





8.5 大型天线安装测量实践

一、 天线的基本设计参数及曲面方程

1、 基本设计参数

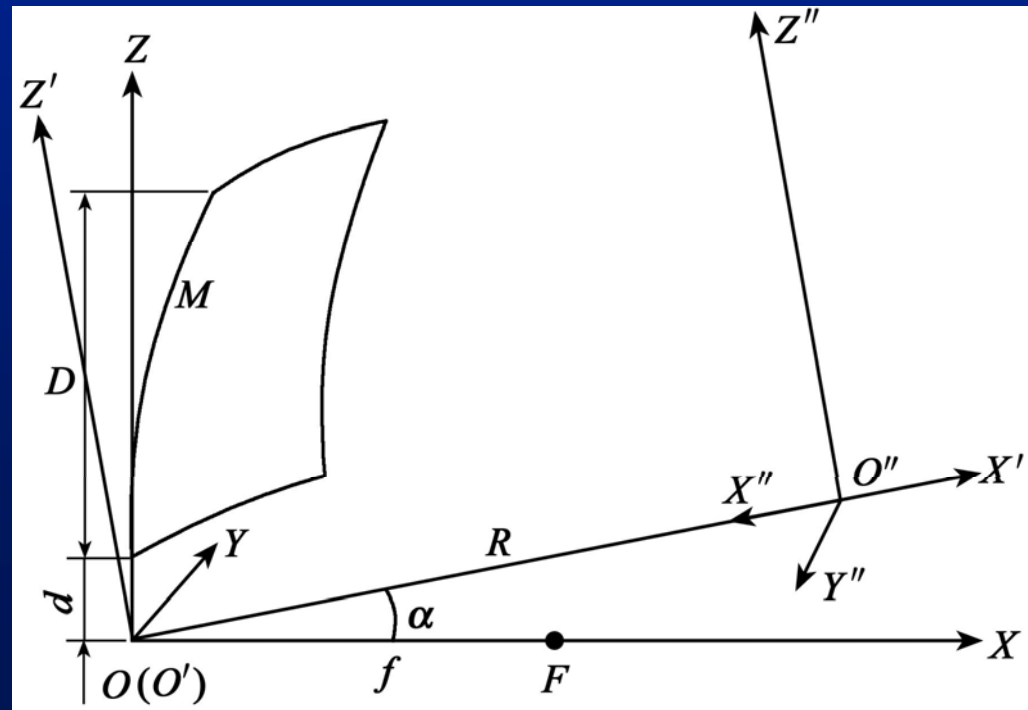
抛物环面天线的几何结构如图，M为坐标系 xoz 中的标准抛物线，F为焦点。抛物环面天线是抛物母线M以R为旋转半径、并绕与其焦轴成 $\pi/2+\alpha$ 夹角的轴线（即 Z'' 轴）旋转而成的。

主要参数：

f（焦距）

R（旋转半径）

α （偏转角，天线的生成轴与波束辐射方向之间的夹角）





8.5 大型天线安装测量实践

一、 天线的基本设计参数及曲面方程

2. 曲面方程

$$\left(\left(R - \sqrt{x''^2 + y''^2} \right) \cdot \sin \alpha + z'' \cdot \cos \alpha \right)^2 = 4f \left(\left(R - \sqrt{x''^2 + y''^2} \right) \cdot \cos \alpha - z'' \cdot \sin \alpha \right)$$



8.5 大型天线安装测量实践

二、安装测量所用坐标系及其相互关系

1、设计坐标系和结构坐标系

设计坐标系：0-XYZ是抛物母线M所在的坐标系，用以描述天线的辐射特性，将其定义为设计坐标系。

结构坐标系：坐标系0'-X'Y'Z' 是天线结构设计的坐标系，在该坐标系中其数学模型和几何特征比较简单，定义为结构坐标系，与设计坐标系的关系如下（式中 α 为偏转角）：

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{\text{设计}} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{结构}}$$



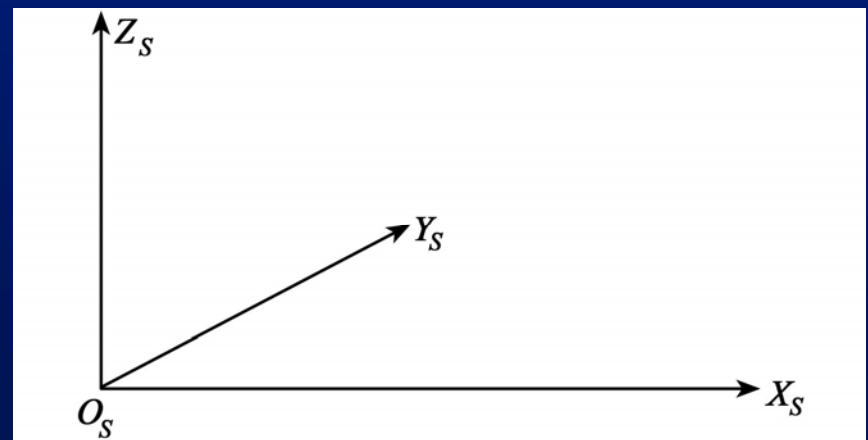
8.5 大型天线安装测量实践

二、安装测量所用坐标系及其相互关系

2、施工坐标系

施工坐标系 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 服务于天线的现场施工，如图，施工坐标系的原点 O_S 为设计给定，可在实地选出， $X_S O_S Y_S$ 平面为水平面， Z_S 为铅垂线的反方向， X_S 方向为天线中心波束的指向在水平面的投影， Y_S 轴与 X_S 垂直并按右手坐标系定出。

该坐标系主要用于放样馈源楼、测量墩及天线座架基础等土建施工工作。



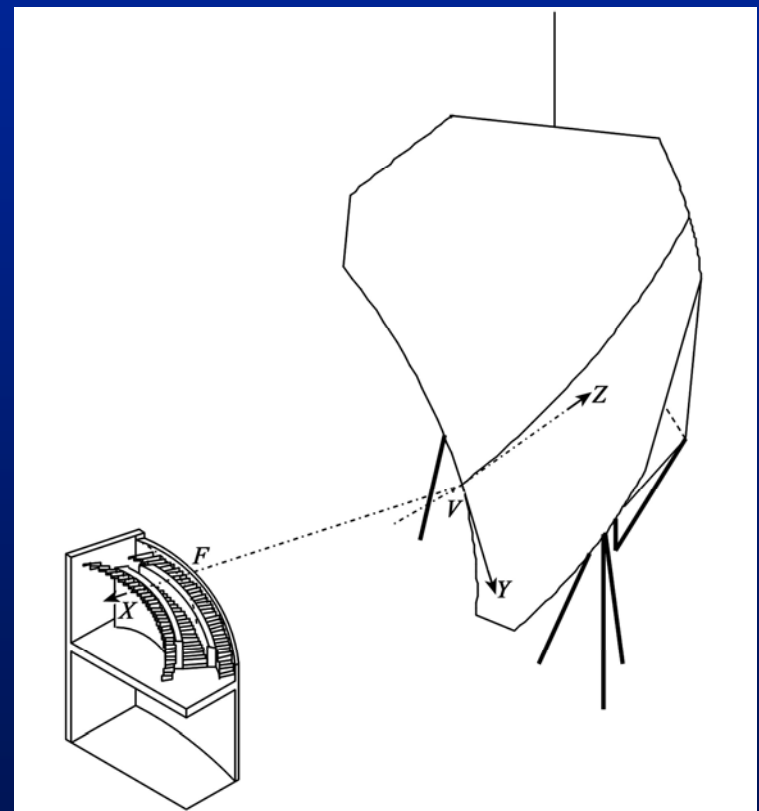


8.5 大型天线安装测量实践

二、 安装测量所用坐标系及其相互关系

3、 设计坐标系的工作姿态

在工作姿态下，天线的设计坐标系的原点为 V ， X 轴（焦轴）的大地方位角为 A ，俯仰角（焦轴与水平面的夹角）为 $-\varepsilon_Y$ ，姿态倾斜角（ Y 轴与水平面的夹角）为 θ 。

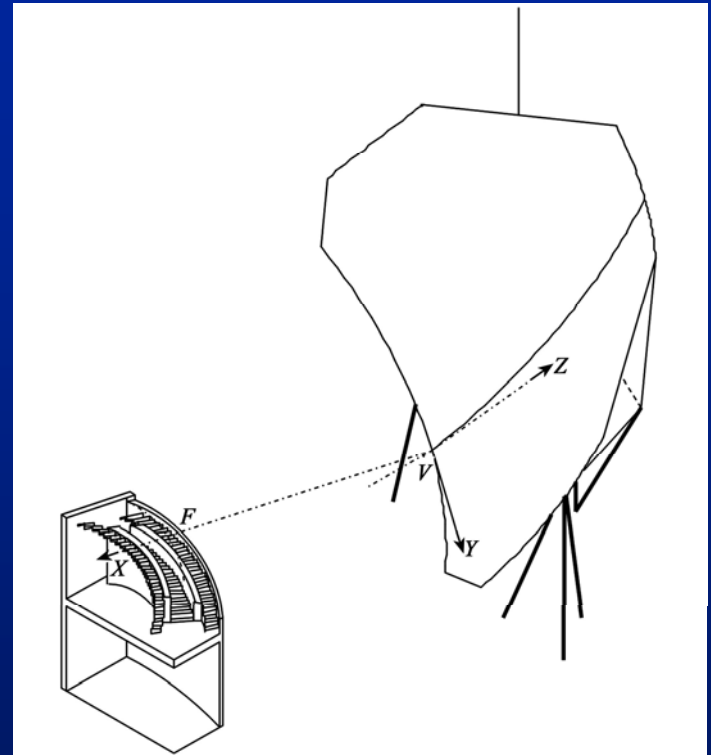




8.5 大型天线安装测量实践

与施工坐标系的关系：在工作姿态下，天线原点V在施工坐标系下的坐标为 (X_V, Y_V, Z_V) ，将施工坐标系平移到V点后，按坐标转换方法可以将施工坐标系转换到天线的工作姿态下：

- (1) 绕 Y_S 轴旋转 ε_Y 使 X_S 与 X 轴重合；
- (2) 绕 X 轴旋转 ε_X 使 Y_S 与 Y 轴重合。



$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_Y & \sin \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y & \cos \varepsilon_X \sin \varepsilon_Y \\ 0 & \cos \varepsilon_X & -\sin \varepsilon_X \\ -\sin \varepsilon_Y & \sin \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y & \cos \varepsilon_X \cos \varepsilon_Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{设计}} + \begin{bmatrix} X_V \\ Y_V \\ Z_V \end{bmatrix}$$



8.5 大型天线安装测量实践

二、安装测量所用坐标系及其相互关系

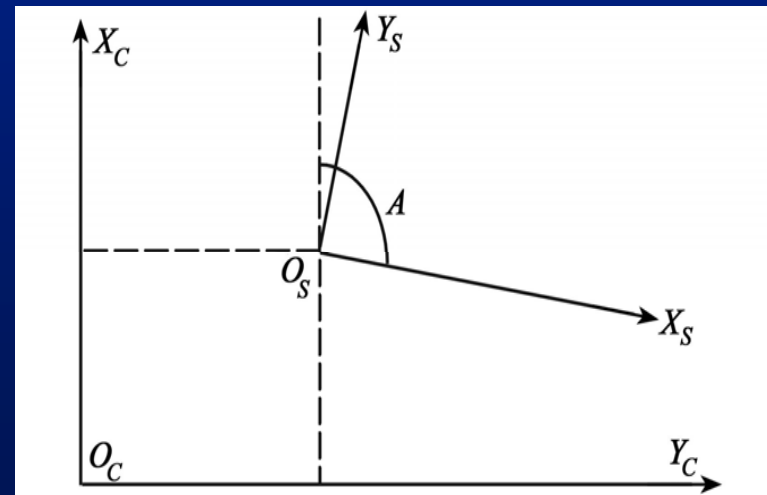
4、测量坐标系

测量坐标系是建立天线施工控制网而采用的坐标系，其原点 O_C 可以任意选取， $X_C O_C Y_C$ 平面为水平面， Z_C 为铅垂线的反方向， X_C 方向为真北方向， Y_C 轴与 X_C 垂直并按左手坐标系定义定出。

与施工坐标系的关系 如图8-60所示，公式为：

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ \sin A & -\cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

式中： X_0 、 Y_0 为 O_S 在测量坐标系中的平面坐标， Z_0 为土建施工零点的高程值， A 为天线的天文方位角。



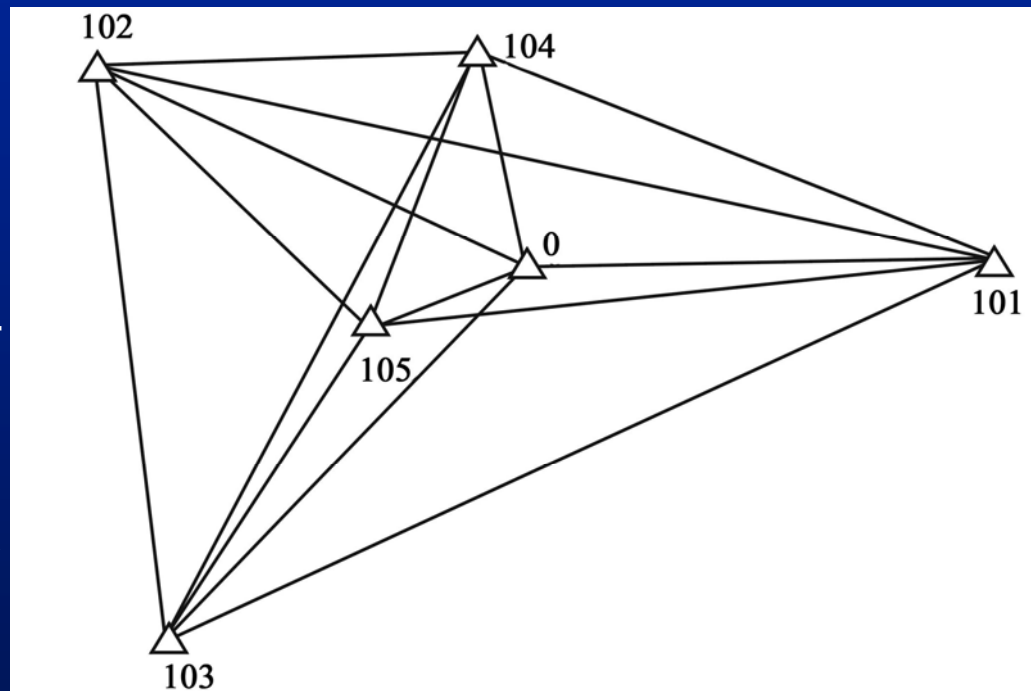


8.5 大型天线安装测量实践

三、测量控制网的布设

1、大地测量控制网

为了精确获得天线原点的大地坐标（用于计算到卫星的方位和俯仰角）和方位基准，需要在施工现场确定天线的原点，然后布设大地控制网进行定位和定向测量。





8.5 大型天线安装测量实践

2、施工测量控制网

目的：是为座架地脚螺栓的放样、馈源楼的放样及天线安装测量控制网的施工放样服务，分为平面网和高程网。

(1) 平面网——边角网

(2) 高程网

联测到国家大地水准网点上，施工高程网中的4个水准点形成局部水准网。

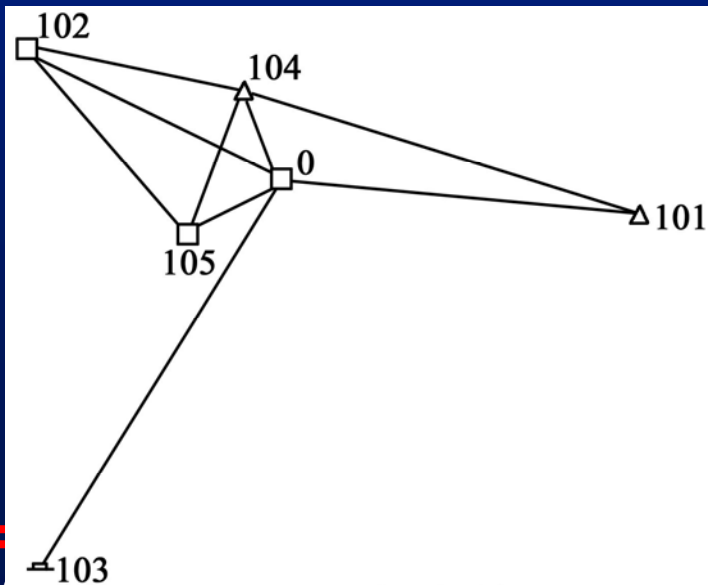


图 8-62 施工控制网

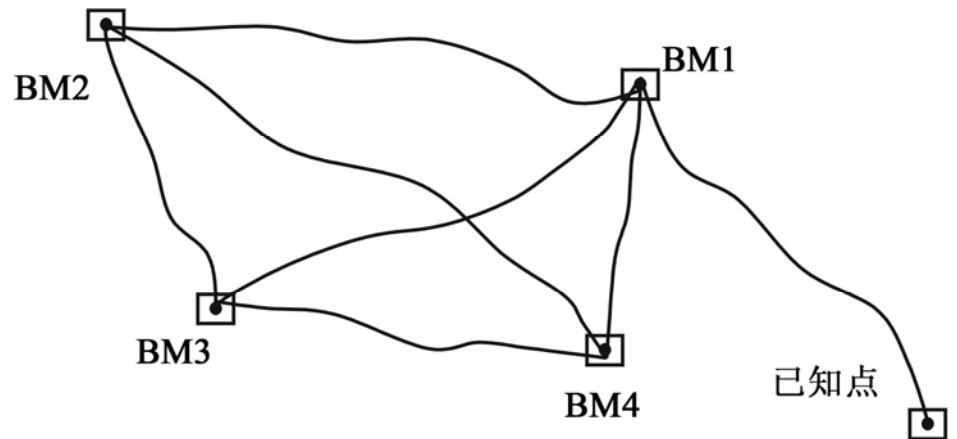


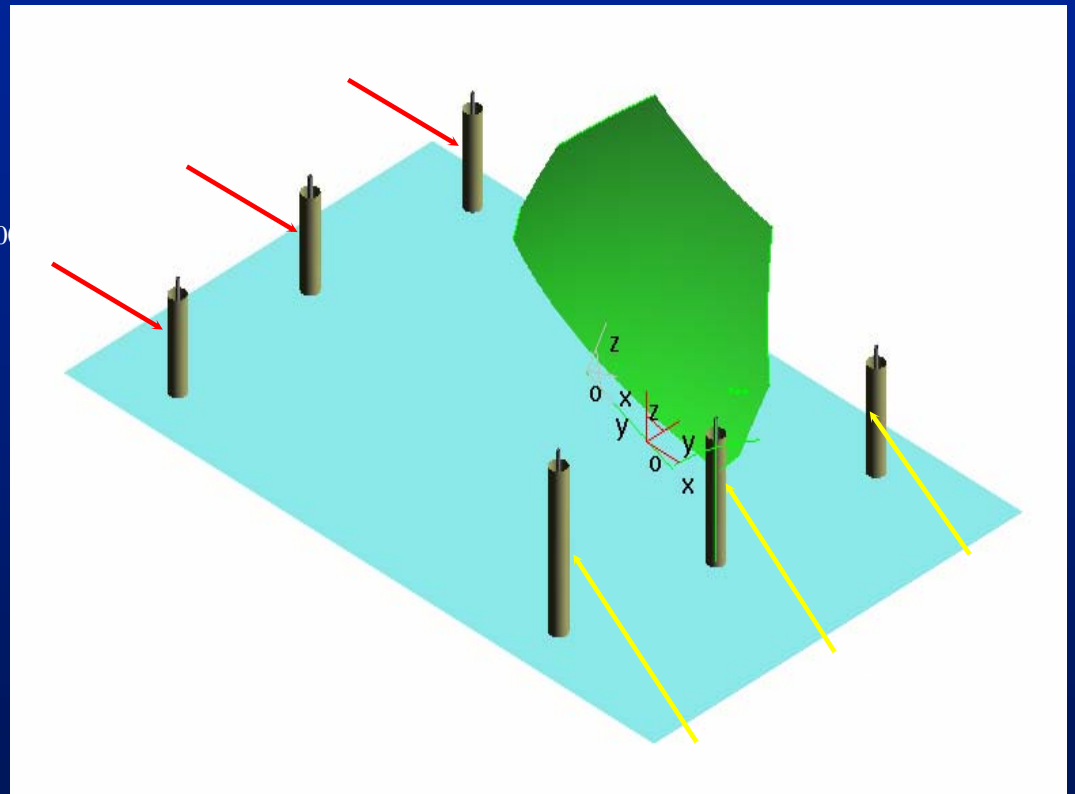
图 8-63 高程控制网



8.5 大型天线安装测量实践

3、安装测量控制网

安装测量控制网主要为天线安装工作服务，包括背架组装及测量、面板水平拼装、座架测量与调整、天线工作姿态下测量与调整以及馈源轨道安装调整等。





8.5 大型天线安装测量实践

四、天线面板水平拼装

1、面板调整方案

- (1) 直接三维放样
- (2) 只调整法向偏差

2、水平拼装精度

精度为 ± 1 mm左右

3、水平拼装方法

水平拼装分两步：

- (1) 平面到位
- (2) 调法向偏差

4、拼装工作流程及结果

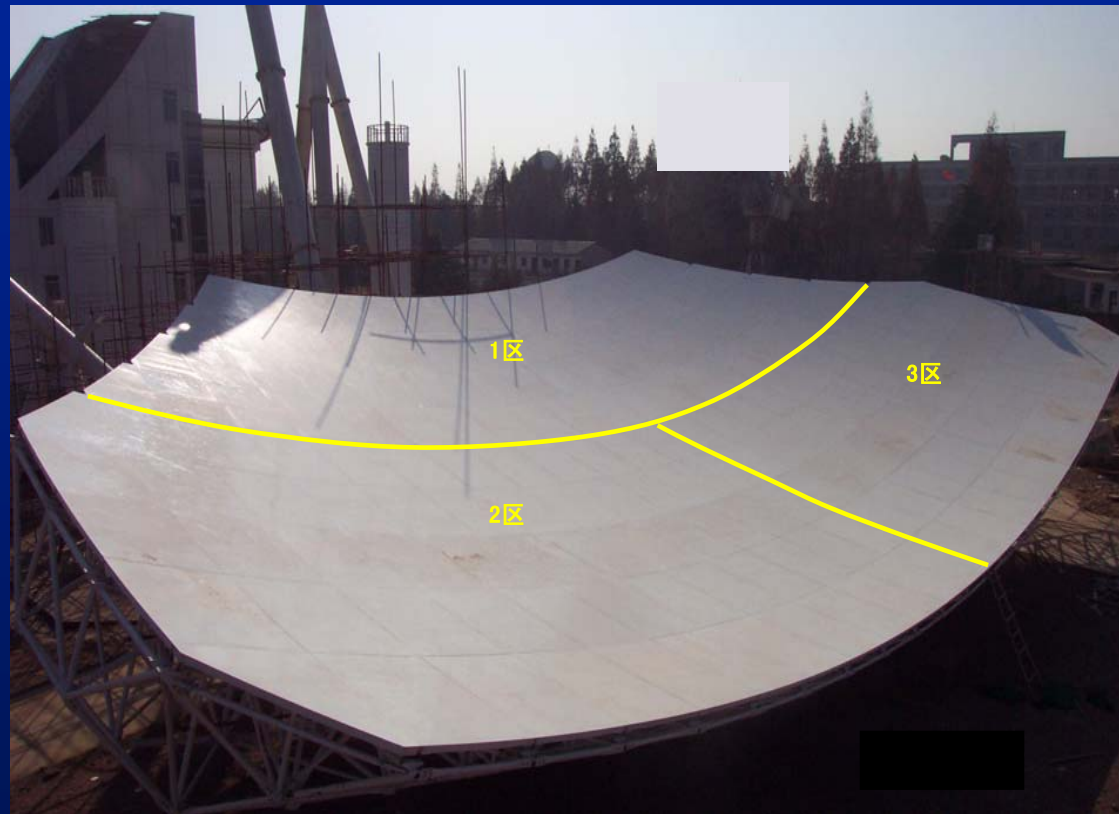


图8-66 天线水平拼装后全图及分区情况

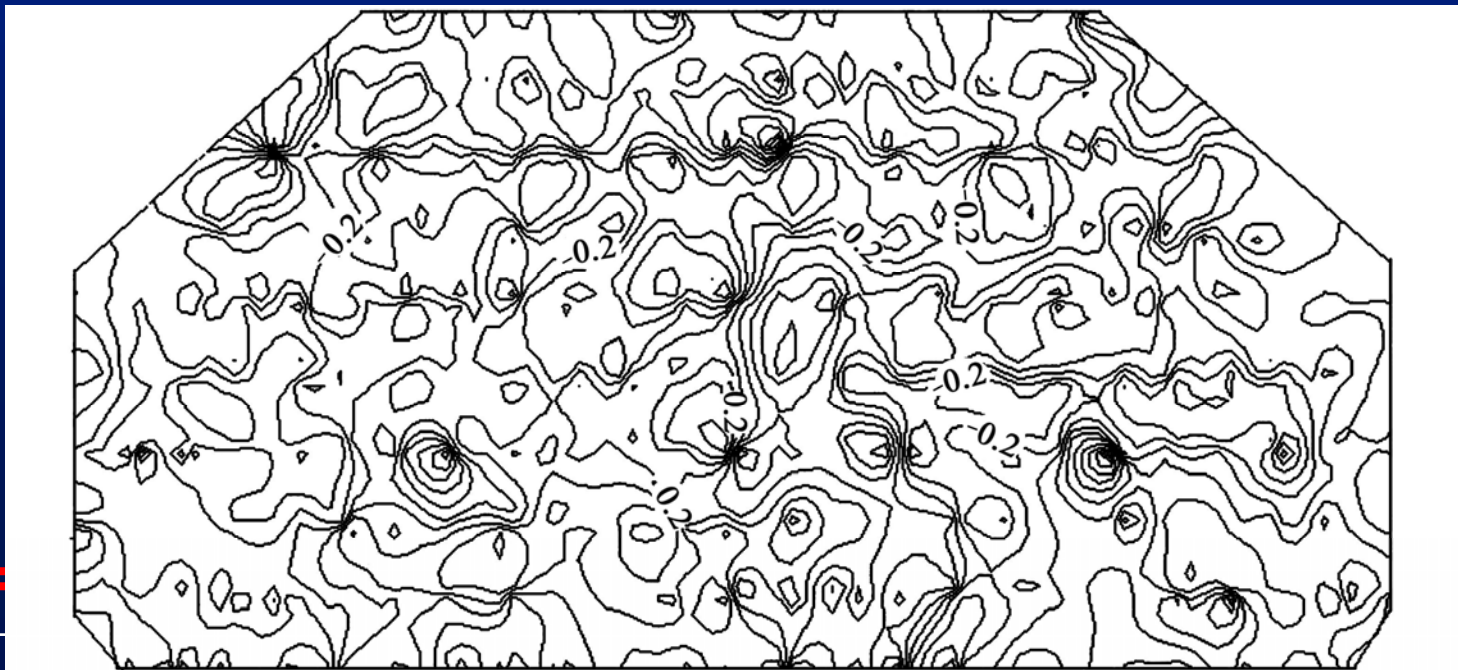


8.5 大型天线安装测量实践

五、工作姿态下测量与调整

- 1、 天线吊装后变形观测
- 2、 测量与调整

在工作状态下，经过几次的调整，表面精度已优于 ± 0.5 mm，且天线的姿态也满足设计提出的整体精度要求。





谢谢大家!