

后方交会在海洋工程结构测量中的应用

夏嘉辉

北斗智云（天津）科技有限公司，天津 300192

[摘要] 后方交会是通过在未知点设站，测量相对于已知点的方向或距离以进行测站的定位与定向的方法。在高精度的工程测量中，后方交会的应用越来越普遍。文中讨论了在海洋工程结构测量中，后方交会法的应用以及后视点布局对交会结果的影响。

[关键词] 后方交会；后视点；布局；精度

DOI: 10.33142/ec.v5i7.6377

中图分类号: TU198+.2

文献标识码: A

Application of Resection in Offshore Engineering Structure Survey

XIA Jiahui

Beidou Zhiyun (Tianjin) Technology Co., Ltd., Tianjin, 300192, China

Abstract: Resection is a method of locating and orienting stations by setting stations at unknown points and measuring the direction or distance relative to known points. In high-precision engineering survey, the application of resection is becoming more and more common. This paper discusses the application of resection method in offshore engineering structure measurement and the influence of rear viewpoint layout on the intersection results.

Keywords: resection; rear viewpoint; layout; accuracy

1 介绍

在海洋工程结构建造过程中，为了进行尺寸控制，需要进行检验测量，以确保工程质量。一般情况下，建造公差要求较高，都为毫米级别。由此，测量精度就要达到较高等级。实践表明，在海洋工程结构建造测量过程中，后方交会（亦称自由设站）法是非常适用的测站定位定向的方式。依据观测量的不同，后方交会主要分为两种形式：角度后方交会和测边后方交会。当代主流品牌的全站仪，如徕卡与天宝系列，内置的后方交会程序多为测边交会。

2 测边后方交会

在未知点设站，通过观测相对于两个已知后视点的平距，应用正弦定理和余弦定理，即可解算出测站点的平面坐标，进而完成测站的定向，这种测站定位定向的方式，即为测边后方交会法。如果同时观测了相对于每个后视点的垂直角，那么，便可解算出测站点的三维坐标。

图 1a 所示为一个测边后方交会的实例。在未知点 P 上架设全站仪，通过观测相对于两个已知后视点 A (X_A, Y_A, Z_A)、B (X_B, Y_B, Z_B) 的距离与垂直角，解算出测站点 P 的三维坐标 (X_P, Y_P, Z_P)，进而完成测站的定向。测站点 P 三维坐标的解算步骤如下：

(1) 利用两点间距离公式及坐标方位角公式，求得平距 AB 与坐标方位角 Az_{AB} ：

$$AB = ((X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$Az_{AB} = \tan^{-1}((X_B - X_A) / (Y_B - Y_A)) + C \quad (2)$$

式 (2) 中，当分子与分母皆大于 0，则 $C=0^\circ$ ；如果分母小于 0，则 $C=180^\circ$ ；如果分子小于 0，分母大于 0，则 $C=360^\circ$ 。

(2) 根据测量的斜距 $P'A'$ 、 $P'B'$ 与垂直角 v_1 、 v_2 ，计算平距 $P'C$ 与 $P'D$ ：

$$P'C = P'A' \cos(v_1)$$

$$P'D = P'B' \cos(v_2) \quad (3)$$

(3) 根据余弦定理，计算水平角 $\angle DCP'$ ：

$$\angle DCP' = \cos^{-1}((AB^2 + P'C^2 - P'D^2) / (2(AB)(P'C))) \quad (4)$$

(4) 求得方向 AP' 的坐标方位角 $Az_{AP'}$ ：

$$Az_{AP'} = Az_{AB} + \angle DCP' \quad (5)$$

(5) 计算测站点 P 在 (X-Y) 平面内的坐标：

$$X_P = X_A + P'C \sin(Az_{AP'})$$

$$Y_P = Y_A + P'C \cos(Az_{AP'}) \quad (6)$$

(6) 确定高差 AC 与 BD：

$$AC = P'A' \sin(v_1) - hr_A$$

$$BD = P'B' \sin(v_2) - hr_B \quad (7)$$

式 (7) 中， hr_A 与 hr_B 分别为已知后视点上的棱镜高。

(7) 最后，计算测站点 P 的高程 Z_P ：

$$Z_{P1} = Z_A - AC - hi$$

$$Z_{P2} = Z_B - BD - hi$$

$$Z_P = (Z_{P1} + Z_{P2}) / 2 \quad (8)$$

式 (8) 中， hi 为测站点 P 处的仪器高。

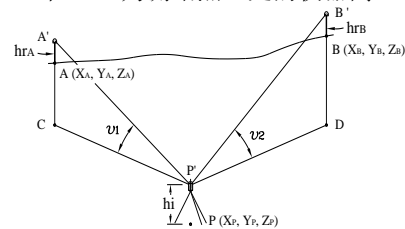


图 1 a 两点测边后方交会

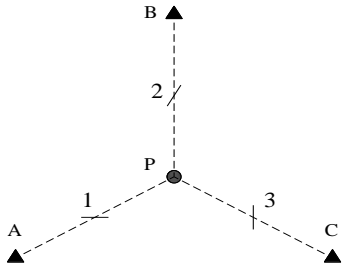


图1 b 三点测边后方交会

徕卡与天宝等主流品牌的全站仪,都内置了测边后方交会程序。当进行两点后方交会时,程序会自动完成测站的定位与定向。当后视点多于两个时,便会产生多余观测值,程序会计算出测站点的初始坐标,建立边长和高差观测误差方程和法方程,进行最小二乘平差解算,获得测站点三维坐标的最佳估值,同时给出三维精度指标,最终完成测站的定位与定向。图1b所示为一个三点后方交会的实例,在测站点P上,通过全站仪观测三个已知后视点A、B、C,根据水平距离和高差观测值,分别列出对应的观测误差方程,进行最小二乘解算,求得P点三维坐标的平差值。

3 应用

通常情况下,海洋工程各类结构中,除了大型导管架之外,其他结构三维尺寸基本都在几十米左右,结构上多装配有密集的容器和管线设备,建造公差要求较高。而海工建造场地内,各类结构布局比较密集,工料堆放比较随机,工程机械众多。在这种环境下进行测量,干扰因素多,需要变换多次测站才能完成一次测量任务。基于此,采用后方交会(自由设站)进行结构测量成为首要选择,理由为:后方交会设站自由,容易避开各种遮挡,测量精度可靠,作业效率高。

理论上,决定后方交会结果的因素包括:后视点的精度、后视点相对于测站点的几何布局、多余观测、后视点的对中精度、测量精度等。鉴于这些因素,常规的测量程序如下:①依据结构上需要测量的内容,结合周边环境情况,确定合适的观测位置并做出标记。选择测站的原则为:测站越少越好,多一次设站,就多一次交会误差;在确保观测视野合适(垂直角应小于 55°)的情况下,平距越小越好;每一测站周边要有足够数量的、布局和通视都良好的后视点,数量以3~4个为佳,太少则没有校核,太多则对交会精度无明显提升,且影响作业效率;②选择合适的位置,采用自由设站的方式进行后视点坐标测量,测量的原则为:所有后视点应一次性地测量完毕,避免在后续测量过程中,多次内插加密或外推补测,防止误差累积;观测位置尽量位于所有后视点区域的几何中心,以确保后视点的精度均匀可靠。后视点布局的原则为:后视点要覆盖整个测区和各测站位置;每一测站及该站要观测的区域周边要均匀地分布3~4个后视点,避免后视点距离测站过近,影响定向精度;③后视点坐标测量结束,开始进行

结构测量;④处理数据,形成测量报告。

实践表明,采用全站仪结合Mini型棱镜,以自由设站的方式,一次性地测完所有后视点的坐标,其精度与效率要远高于导线或其他边角网的测量模式。原因是,自由设站避免引入仪器对中误差;Mini型棱镜高较小,对中精度高。而采用任何一种边角网的形式建立控制点,都难免会引入仪器对中误差和棱镜光学对中器的对中误差,这种方式建立的控制点很难达到个位数的毫米级精度。

下面以一个实例,来说明后方交会的应用。图2所示为某场地建造完成的一座海洋风电结构的俯视图。A、B、C、D为四个直径 $\Phi=3480\text{mm}$ 、轴向长度为10米的圆柱形套筒,四个套筒中心构成边长为30米的正方形,四个套筒的最下端与结构的底层处于同一标高。连接每两个套筒的横梁中点的下方,都有支撑结构,使得整体结构处于水平状态,结构的底层连同四个套筒底端,距离地面的高度都为10米。项目要求检验四个套筒的相对空间位置、垂直度、及部分杆件的空间位置。为了显示清晰,结构图中删除了个别杆件,进行了适当简化。

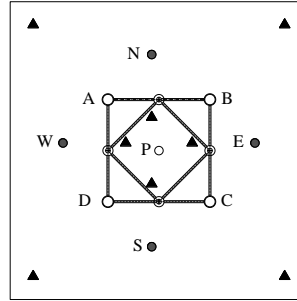


图2 测站点与后视点布局

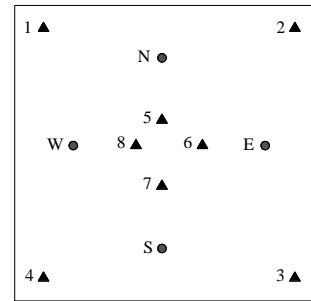


图3 测站点与后视点的关联

测量使用徕卡TS15全站仪与Mini型棱镜,采用后方交会(自由设站)的作业模式,通过圆柱拟合的方法解算套筒的空间位置与垂直度,拟合采用SpatialAnalyzer软件。

测站点选择的考虑因素:圆柱拟合需要拟合点在圆柱面上分布均匀,一个测站只能测量小于 $1/2$ 的圆柱面,要测量一个完整的圆柱面,至少需要两个测站,本例中,每个套筒的测量是在三个不同的测站上进行的,如A套筒的测量,就分别用到了N、P、W三个测站;又考虑到其他部位的测量,最终选择在N、S、E、W、P五点设站来完成本次测量;套筒顶端距离地面的高度为20米,为最高的测量位置,故五个点都选在距离套筒约20米左右的位置,确保最大观测垂直角小于 55° ;每个测站点要能够与即将布置的足够数量的后视点保持通视。

后视点选择的考虑因素:在P点完成所有后视点的测量较为合理,首先,P点位于整个结构的中心附近,也必然会在后视点所覆盖的范围的中心附近;其次,在P点测量完所有后视点之后,不需迁站,可以直接观测其他结构测量点(包括四个套筒临近该站的部分柱面),避免了一

次转站所导致的后方交会误差;在P点可以一次性地完成所有后视点的测量;每个测站与该站所对应的测量内容周边都均匀地分布着三个后视点,图3所示为测站与后视点的对应关系:N-127、S-345、E-238、W-164;P点距离最远后视点约为50米左右,测量点位误差小于1mm;每个测站距离最近的后视点约为35米左右,产生的定向误差小于1/17000。

4 后视点布局分析

后视点布局是至关重要的,对测站定位定向精度的影响是决定性的。下面通过类比的方式,从三个方面,来阐述一下后视点布局对后方交会精度的影响,以便能够形成一个非数值的图形画面。

4.1 GNSS 定位的观点

本质上,全球导航卫星系统(GNSS)伪距定位就是测边后方交会。只是,与常规测量后方交会所不同的是,GNSS卫星是动态的,常规测量中的后视点是固定的;GNSS接收机通过观测伪随机码进行时间比对来测距,常规测距仪通过测定电磁波相位差进行测距;GNSS卫星的载波相位差由接收机观测,测距仪发射的电磁波经反射回来后由自身观测。尽管如此,二者在原理上是相通的。

从GNSS卫星几何分布强度与定位精度之间的关系考虑,我们知道,当GNSS卫星在接收机观测视野内分布得越广,卫星的几何强度就越强,位置精度因子PDOP值就越小,解算出来的接收机的平面位置精度就越高。反之,如果GNSS卫星在接收机上空区域聚集的范围越小越狭长,则PDOP值就越大,卫星的几何强度就越弱,相应的接收机平面定位精度就越低。由此可知,GNSS卫星在(X-Y)平面内的投影分布得越广,水平定位精度就越高。GNSS定位的垂直位置精度之所以总是低于平面位置精度,最主要的原因就是:对点位竖直分量解算有贡献的卫星都分布在地平面以上,即都位于接收机的上空,而接收机下方的卫星都被地球遮挡了,无法在点位竖直分量解算中起作用。假设地球是一个同质量且体积无限小的质点,GNSS系统仍以同样的方式正常运转,那么,GNSS定位的垂直精度与平面精度将会趋于相同,且整体精度会大幅提高。

4.2 力学的观点

理论上,力学与测量学这两个学科之间是具有共通性的,联系二者之间的桥梁便是三角学。力的平衡与分解需要应用三角学求得力的分量,测量学中点位的纵向与横向精度的评定亦需要用到三角学。由此,通过力的平衡与分解来类比分析后视点布局与后方交会精度之间的关系是合理的。

图4所示为P点受到大小相同但方向不同的几个外力的作用,其中,F₁、F₂、F₃、F₄分别表示力矢量。从力学的角度看,若某点受到周边几个等大小的外力作用,外力在方向上分布得越均匀,则这几个力的合力就越是趋于

平衡,该点就越趋于稳定(图4a);若几个外力都作用在点的同一侧,则合力就会大于每一个分力,使得受力点产生加速运动(图4b);若偶数个外力对称地分布在受力点的两侧,每一侧的力都聚集在一个小范围内,即使合力为零,受力点达到平衡,在合力的垂直方向上,这种平衡状态也容易被破坏(图4c)。

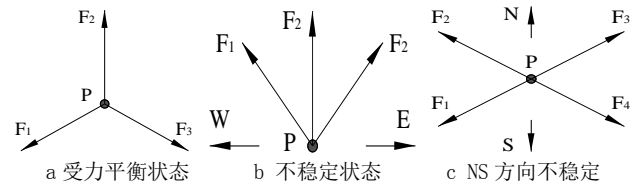


图4 受力状态图

进行边长测量,测量点的纵向精度得到增强。把精度类比为方向向量,若测边引起的点位精度越高,规定精度向量的模的数值越大,那么,进行测边后方交会,后视点的布局对测站后方交会的定位定向精度的影响,便可用方向向量的形式来可视化地表达。图5所示为三种后方测边交会的形式,其中,P点为测站点,A、B、C、D为已知后视点,r₁、r₂、r₃、r₄表示精度方向向量。

假设几个等精度的后视点,在测站周边径向方向和圆周方向分布的越均匀,那么,后方交会的精度就会很高(图5a);假设几个后视点都分布在测站的同一侧,则后方交会的精度只在边长观测的方向得到加强,在垂直方向上则存在着较大的不确定性(图5b);假设偶数个后视点对称地分布在测站的周围,但每一侧的后视点都聚集在小的范围内,则即使在测边方向上后方交会精度得到进一步加强,但在垂直方向上,仍存在较大的不确定性(图5c)。

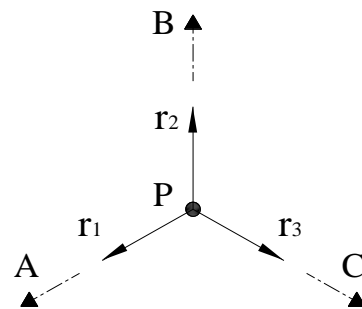


图5 a 精度可靠

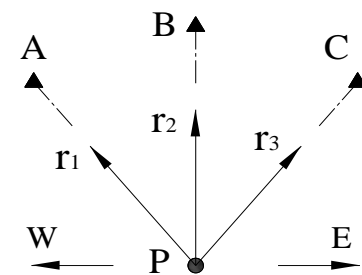


图5 b 精度不可靠

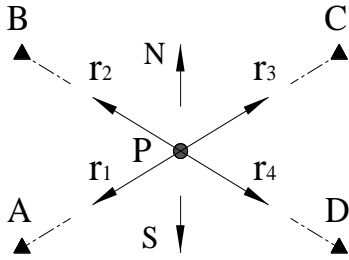


图5 精度不可靠

4.3 结构强度的观点

测量中,控制点与测量点通过观测值的关联而构成几何图形,称为观测网形。测量理论认为,观测网形中任何一个点的显著移动,相应地都会引起至少一个观测值的显著变化,则这个观测网形强度就较强,由此建立的未知点位精度就越高。对于后方交会而言,测站点与后视点通过边长观测值关联,也构成了观测网形,同理,后方交会观测网形强度越强,测站定位定向的精度就越高。

可以将后方交会观测网形类比为是一个销接结构。图6a所示的销接结构的强度较强,因为G点在垂直方向上任何数量的变形,都将导致杆件AG和BG必须伸长或缩短几乎相等数量的长度。相比之下,图6b所示结构的强度就较弱,因为G点在垂直方向上较大的引动,只会引起杆件AG和BG长度相对较小的变化。

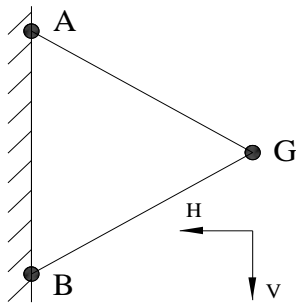


图6 a 稳定结构

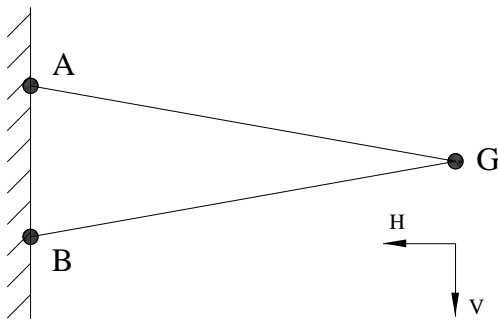


图6 b 不稳定结构

相应地,后方交会观测网形的强弱比较,如下面两个例图所示,图中P点为测站点,A和B为已知后视点,通过观测距离PA、PB进行测站P的定位。图7a所示的观测网形的强度较强,因为P点在任何方向上的显著移动,都

将导致PA、PB两个观测距离产生几乎同等数量的显著变化。反之,图7b所示的观测网形的强度就较弱,因为P点在南北方向上的显著移动,不会对两个距离观测值产生较大的影响。

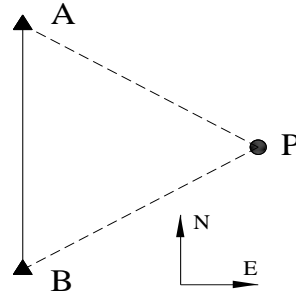


图7 a 网形强度高

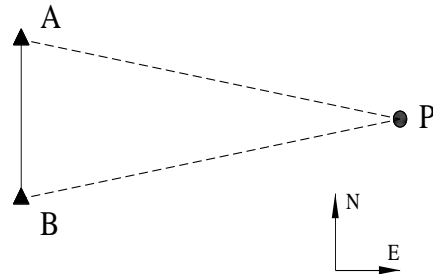


图7 b 网形强度弱

5 结束语

在海洋工程结构测量中,场地环境等因素,决定了后方交会法的优越性。在影响后方交会结果的众多因素中,后视点布局是最主要的。一个不好的布局是不稳定的,不可能产生可靠的后方交会结果,会使后续的测量趋向于产生平移和旋转。在进行测量作业之前,要清晰的规划好每个测站的位置,以及与该站相关联的后视点的数量,这些后视点在测量区域周边将如何分布,为了获得最可靠的测量成果,花费在这一方面的所有时间和精力都是值得的。当我们在规划后视点布局方面感到迷茫时,不妨根据学科之间的共同性,通过类比的方式,在GNSS定位方面,或力学或结构强度方面去寻找关联,这是可行且合理的。在海洋工程结构建造过程中,测量起着极其重要的作用,因为在结构建造的所有工序中,尺寸控制是最难实现的,鉴于此,就要尽量寻求最优的测量方法,力争达到完美的预期。

【参考文献】

- [1] 艾尔默·约翰逊. 平面与大地测量[M]. 泰勒: 弗朗西斯电子图书管, 2005.
 - [2] 查尔斯·D. 吉兰利. 工程测量[M]. 培生: 普伦蒂斯霍尔出版社, 2015.
 - [3] 查尔斯·D. 吉兰利. 平差计算[M]. 约翰威立: 国际出版公司, 2018.
- 作者简介: 夏嘉辉(1973.9-)男,天津,汉族,本科学历,工程测量中级工程师,从工程测量工作。