

# 三峡枢纽河段 CGCS2000 坐标系测量控制网布设方法研究

徐云航

(长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 对于三峡枢纽河段的航道测绘来说, 更高效率、更高精度、更高统一性的 CGCS2000 坐标系, 是加强测绘基础数据的安全性、提升地理信息数据表达的准确性和提高测绘成果互通的共享性的重要基础。本文从三峡枢纽河段航道测绘工作实际情况出发, 探讨了三峡枢纽河段航道测量控制网目前存在的问题, 研究了三峡—葛洲坝两坝间航道、枢纽航道、库区航道的 CGCS2000 坐标系测量控制网布设条件及方法。

**关键词:** 三峡枢纽河段; CGCS2000; 控制网; 测绘

**中图分类号:** TV6      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1006—7973 (2021) 10—0139—05

## 1 引言

随着社会的进步, 国防建设、社会发展、科学研究等对国家大地坐标系提出了新的需求, 迫切需要国家提供高精度、地心、动态、实用、统一的大地坐标系作为各项国防社会经济活动的基础性保障。采用 CGCS2000 坐标系, 有利于采用现代化的空间测绘技术, 对坐标系进行维护和快速更新, 测定高精度大地控制点的三维坐标, 提高测绘测图工作效率。

对于三峡枢纽河段的航道测绘来说, 更高效率、更高精度、更高统一性的 CGCS2000 坐标系, 是整个长航系统, 乃至整个交通系统层面, 加强测绘基础数据的安全性、提升地理信息数据表达的准确性和提高测绘成果互通的共享性的重要基础。因此, 在推进 CGCS2000 坐标系建设工作的过程中, 进行三峡枢纽河段 CGCS2000 坐标系测量控制网布设方法研究十分必要。



图1 三峡枢纽河段概况图

## 2 三峡枢纽河段航道测绘工作概述

自 2008 年以来, 三峡枢纽河段三峡水库 175 米蓄

水及三峡—葛洲坝两坝联合运行、葛洲坝大江下游河势调整工程完建, 河段内三峡大坝上游、三峡—葛洲坝两坝间和葛洲坝下游三段水域内的水下地形、水流流速、河流比降、波浪等通航条件, 与三峡大坝围堰发电前相比较存在一些较明显的变化。另外, 两坝间部分河段如石碑弯道、偏脑、喜滩和水田角等滩险, 河段内航宽较窄、岸线蜿蜒、水势湍急、流态紊乱, 具有山区天然河道的特性。

近年来, 通过三峡枢纽河段的船舶越来越多, 长江水运行业蓬勃发展的趋势和创建三峡枢纽河段一流水运通道、保障船舶航行安全的客观要求, 对三峡枢纽河段的航道维护管理工作提出了较高的要求。

表1 三峡枢纽河段航道近五年养护观测计划表

年份	测绘内容	观测次数	工作量 (换算 km <sup>2</sup> )	备注
2017	葛洲坝枢纽航道水下地形观测	25	1221.1	
	三峡枢纽航道水下地形观测			
	两坝间航道水文观测			
2018	葛洲坝枢纽航道水下地形观测	25	1584.18	
	三峡枢纽航道水下地形观测			
	两坝间航道水文观测			
2019	葛洲坝枢纽航道水下地形观测	26	1615.14	
	三峡枢纽航道水下地形观测			
	三峡大坝至中水门水下地形观测			
	葛洲坝枢纽水文观测			
2020	葛洲坝枢纽航道水下地形观测	27	1425.3	
	三峡枢纽航道水下地形观测			
	庙河至三峡大坝水下地形观测			
	两坝间航道水文观测			
2021	葛洲坝枢纽航道水下地形观测	26	1211.4	
	三峡枢纽航道水下地形观测			
	两坝间航道水文观测			

为了积累原型观测基础资料，进一步做好航道科研分析，促进三峡枢纽河段的通航事业发展，提高航道维护管理水平，三峡枢纽河段每年根据年度航道养护计划，安排实施葛洲坝枢纽大江航道水下地形观测、葛洲坝枢纽三江航道水下地形观测、三峡船闸引航道水下地形观测、三峡升船机引航道水下地形观测，同时根据实际工作需要安排实施航道水文观测、长河段水下地形观测等测绘工作。

### 3 三峡枢纽河段测量控制网现状

#### 3.1 航道测量控制网概述

航道测量控制网由地面上一系列点（称测量控制点）构成，控制点之间由边长、方向、高差或 GNSS 基线等观测测量连接并构成网型，点的空间位置可通过已知点的坐标及点之间的连接按一定方法计算得到。

航道测量控制网大体分为平面控制网和高程控制网。航道测量控制网主要应用于航道测绘、水位站水尺矫正等航道基础信息采集工作当中，高精度的测量控制网对于采集信息的准确性有较大影响。同时在航道工程中，测量控制网同样能够为工程提供平面坐标和高程基准，对于工程质量的控制有着重要作用。

#### 3.2 三峡枢纽河段航道测绘坐标系应用情况

目前三峡枢纽河段航道测绘成果使用的坐标系统有北京 54 坐标系、WGS-84 坐标系、葛洲坝大坝坐标系和三峡大坝坐标系。主要应用情况为：

- （1）葛洲坝枢纽航道测绘项目采用葛洲坝大坝坐标系；
- （2）三峡枢纽航道测绘项目采用三峡大坝坝轴坐标系；
- （3）辖区三峡、葛洲坝枢纽航道以外航道测绘项目采用北京 1954 年坐标系；
- （4）基层办事处进行航标维护时所用测量仪器采用 WGS-84 坐标系。

### 4 三峡枢纽河段 CGCS2000 坐标系控制网布设方法研究

#### 4.1 控制网布设要求

##### 4.1.1 精度要求

依据全球定位系统测量规范，控制网按照精度分为 A、B、C、D、E 五级，控制网的精度指标以网中相邻

点之间的距离误差来表示，其具体形式为：

$$\sigma = \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$$

$\sigma$ ：相邻点间的距离中误差（mm）；

a：固定误差（mm）；

b：比例误差（ppm 或 10-6）；

d：相邻点间的距离（km）。

表 2 控制网的等级精度表

级别	相邻点间的距离中误差		固定误差 (mm)	比例误差 (mm)	相邻点最小距离 (km)	相邻点最大距离 (km)	相邻点平均距离 (km)
	水平分量 (mm)	垂直分量 (mm)					
A	2	3	≤ 5	≤ 0.1	100	2000	300
B	5	10	≤ 8	≤ 1	15	250	70
C	10	20	≤ 10	≤ 5	5	40	10~15
D	20	40	≤ 10	≤ 10	2	15	5~10
E	20	40	≤ 10	≤ 20	1	10	0.2~5

根据长江三峡通航管理局数字航道升级改造项目规划对于三峡枢纽河段 C 级控制网布设的相关信息，该规划控制网属于首级控制网，依照 C 级控制网测量技术规范要求。由于部分规划控制点位置距离航道水线较远，且相互之间距离相隔 5~15km，因此需要进行次级控制网的加密，来满足实际航道测绘的作业需求。

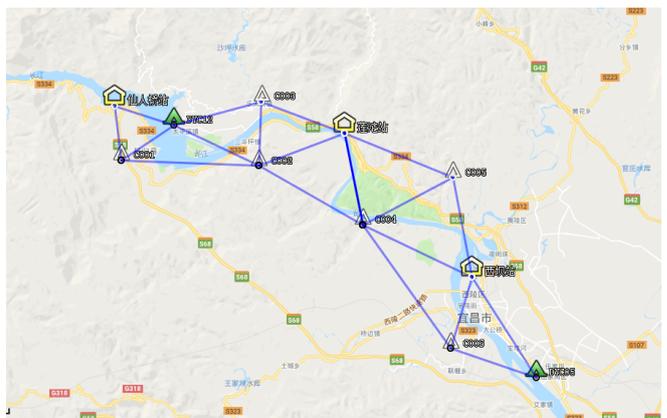


图 2 三峡枢纽河段数字航道升级改造项目拟建 C 级控制网示意图

在布设次级控制网时，应按照 D 级控制网测量技术规范要求，充分利用已有完整控制点位置，与 C 级控制网联测得到 CGCS2000 坐标系和高程的数据。

##### 4.1.2 选点要求

在控制网选点时，应沿航道左右两岸布设，点位不能离航道边线太远也不能离航道边线太近，离航道边线

太远时航道测量作业不方便,离航道边线太近时,会受到水位上涨影响冲蚀控制点基础。因此控制点选择应在航道边线附近,非陡峭地形,易于进行水准联测,且靠近航标处,后期便于维护。

同时,也应统筹考虑在控制网测量时使用的仪器,若使用全站仪,则要保证所有控制点之间,相邻2点必须要具备通视条件,且相邻网点间距离适中,不宜超过2km;若使用北斗GNSS测量仪器,则要视野要开阔,周围不能有遮挡。

## 4.2 两坝间航道 CGCS2000 坐标系控制网布设方法分析

### 4.2.1 两坝间航道控制网布设条件

受两坝间航道弯曲和岸线凹凸程度较大影响,控制点间会存在测量通视盲区,同时两坝间航道大多处于石林山壁之间,位置平坦处较少,因此不宜使用全站仪进行控制网的布设,北斗GNSS测量仪器较适合两坝间环境。

三峡枢纽河段两坝间航段北斗卫星信号测试结果显示,两坝间区域内北斗卫星信号数量均大于单测站至少4颗卫星的信号需求,并且接收到的卫星信号较强,满足北斗GNSS测量仪器在控制网布设中的使用环境。

### 4.2.2 两坝间航道控制网布设原则

受两坝间地理环境影响,在控制网选点时可遵循以下原则:

- (1) 充分利用原有保存较好的控制点位置;
- (2) 选择距离航道边线较近的地点,方便进行航道测量作业;
- (3) 选择最高通航水位以上基础稳固的地点;
- (4) 应选择交通便利、上点方便、靠近航标的地点,便于后期的使用和维护;
- (5) 避免障碍物遮挡,远离电磁波反射强烈的地形、地物。

### 4.2.3 两坝间航道 CGCS2000 坐标系控制网测量方法

#### 4.2.3.1 坐标系测量方法

使用北斗GNSS测量仪器进行控制网的坐标系测量,至少需要3个已知坐标控制点和1个待测坐标控制点进行静态联测。对于加密的D级航道控制网,可以根据长江三峡通航管理局已建的C级CGCS2000坐标系控制网进行静态联测,而C级控制网的测量,可以根据宜昌市国土部门布设的C级或更高等级的CGCS2000坐

标系控制点静态联测得到。

北斗GNSS测量的基本原理,是根据高速运动的北斗卫星瞬间位置作为已知的起算数据,采用空间距离后方交会的方法,确定待测点的位置。假设t时刻在地面待测点上安置北斗GNSS接收机,可以测定北斗卫星信号到达接收机的时间,再加上接收机所接收到的卫星星历等其它数据可以确定并解出以下四个方程式:

$$\sqrt{[(x_1-x)^2+(y_1-y)^2+(z_1-z)^2]}+c(V_{t1}-V_{t0})=d_1$$

$$\sqrt{[(x_2-x)^2+(y_2-y)^2+(z_2-z)^2]}+c(V_{t2}-V_{t0})=d_2$$

$$\sqrt{[(x_3-x)^2+(y_3-y)^2+(z_3-z)^2]}+c(V_{t3}-V_{t0})=d_3$$

$$\sqrt{[(x_4-x)^2+(y_4-y)^2+(z_4-z)^2]}+c(V_{t4}-V_{t0})=d_4$$

上述四个方程式中待测点坐标x、y、z和 $V_{t0}$ 为未知参数。

其中 $d_i=c\cdot\Delta t_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )。  $d_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )分别为卫星1、卫星2、卫星3、卫星4到接收机之间的距离。

$x_i, y_i, z_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )分别为卫星1、卫星2、卫星3、卫星4在t时刻的空间直角坐标,可由卫星导航电文求得。

$\Delta t_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )分别为卫星1、卫星2、卫星3、卫星4的信号到达接收机所经历的时间。

c为卫星信号的传播速度(即光速)。

在得到待定控制点的相对位置后,根据已知控制点上静态测量的相对位置及已知CGCS2000坐标系坐标,平差解算后就得到待定控制点的CGCS2000坐标系坐标。

#### 4.2.3.2 高程测量方法

在两坝间航道控制网的布设过程当中,控制点的选择基本都在航道左右岸靠近航道的地方,并且会利用原有保存较好的已知高程控制点。因此,在进行控制网的高程联测时,可使用符合水准路线的水准测量方式,利用航标艇或航道测量船运送测量人员到达现场,使用水准仪进行控制网的水准测量。

## 4.3 三峡坝上库区航道 CGCS2000 坐标系控制网布设方法分析

### 4.3.1 三峡坝上库区航道控制网布设条件

三峡坝上库区航道弯曲程度较小,航道较宽,但岸线仍呈“S”状连续密集小波浪型,再加上左右两岸支汊河口较多,因此同岸侧通视条件受影响程度较大,使

用全站仪进行控制网的布设具有很大难度，对控制网的密度要求较高，宜使用北斗 GNSS 测量仪器进行控制网的布设。

三峡枢纽河段三峡坝上库区航段北斗卫星信号测试结果显示，三峡坝上库区内北斗卫星信号数量均大于单测站至少 4 颗卫星的信号需求，并且接收到的卫星信号较强，满足北斗 GNSS 测量仪器在控制网布设中的使用环境。

#### 4.3.2 三峡坝上库区航道控制网布设原则

受三峡坝上库区地理环境影响，在控制网选点时可遵循以下原则：

- (1) 充分利用原有保存较好的控制点位置；
- (2) 选择距离航道边线较近的地点，方便进行航道测量作业；
- (3) 选择吴淞高程在 175.0m 以上基础稳固的地点；
- (4) 应选择交通便利、上点方便、靠近航标的地点，便于后期的使用和维护；
- (5) 避免障碍物遮挡，远离电磁波反射强烈的地形、地物。

#### 4.3.3 三峡坝上库区航道 CGCS2000 坐标系控制网测量方法

##### 4.3.3.1 坐标系测量方法

由于三峡坝上库区航道同岸侧通视效果较差，航道较宽，因此宜使用北斗 GNSS 测量仪器进行控制网的坐标系测量。测量方法同两坝间航道控制网测量方法一致，与 3 个已知控制点或高等级控制点进行静态联测，经过联合平差得到待定控制点的 CGCS2000 坐标系坐标。

##### 4.3.3.2 高程测量方法

在三峡坝上库区航道控制网的布设过程当中，控制点的选择基本都在航道左右岸靠近航道的地方，同时充分利用原有保存较好的已知高程控制点。三峡坝上库区航道两岸集镇较多，公路条件较好，因此，在进行三峡坝上库区航道控制网的高程联测时，可使用符合水准路线的水准测量方式，利用汽车运送测量人员到达现场，测量距离公路较远的控制点时，可用航标艇或航道测量船运送测量人员到达现场，使用水准仪进行控制网的水准测量。

#### 4.4 枢纽航道 CGCS2000 坐标系控制网布设方法分析

##### 4.4.1 枢纽航道控制网布设条件

葛洲坝枢纽航道和三峡枢纽航道上下游具有渠化航道条件，视野开阔，控制点布设基础布设条件较好。可以使用全站仪符合导线测量方法进行控制网的布设，同时，因为视野开阔，也可以使用北斗 GNSS 测量仪器进行控制网的布设。

由于枢纽航道的坝上坝下高差较大，葛洲坝枢纽上下游高差在 20m 以上，三峡枢纽航道上下游高差在 110m 以上，因此，在控制点的高程测量当中，会出现因为控制点间高程较大，在水准测量作业中测站较多带来累计误差，若枢纽航道控制网布设密度较大，则成本会进一步增大，因此在控制网的布设过程中宜使用“三角高程”法进行布网的优化。

##### 4.4.2 枢纽航道控制网布设原则

受枢纽航道地型影响，在控制网选点时可遵循以下原则：

- (1) 充分利用原有保存较好的控制点位置；
- (2) 选择距离航道边线较近的地点，方便进行航道测量作业；
- (3) 配置 1~2 处距离较近的坝上坝下控制点；
- (4) 应选择交通便利、上点方便、靠近航标的地点，便于后期的使用和维护；
- (5) 避免障碍物遮挡，远离电磁波反射强烈的地形、地物。

#### 4.4.3 枢纽航道 CGCS2000 坐标系控制网测量方法

##### 4.4.3.1 坐标系测量方法

在使用全站仪符合导线测量方法进行控制网的坐标测量时，需要 4 个已知 CGCS2000 坐标控制点进行观测，从 2 个已知控制点出发，测出中间若干待定点，最后再到另外 2 个已知控制点，形成一个折线。在设站时应选择地基稳固的地点，相邻两点之间必须通视良好，各点与前、后相邻点之间的距离尽量等长，在每测站中要严格对中整置仪器。

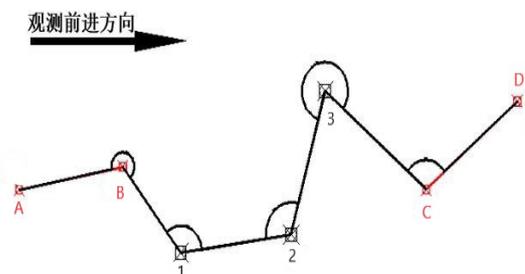


图 3 符合导线路线示意图

在设计好符合导线路线后，对导线上各点依次进行测回法角度测量和边长测量，将所得数据结合已知点坐标，通过坐标正算得到待定点的坐标，最后通过导线闭合差限差范围来检查所得数据。

表3 导线测量主要技术要求

等级	导线长度 km	平均边长 km	测角中 误差"	测回数		角度闭合差"	相对 闭合差
				DJ6	DJ2		
一级	4	0.5	5	4	2	$10\sqrt{n}$	$\frac{1}{15000}$
二级	2.4	0.25	8	3	1	$16\sqrt{n}$	$\frac{1}{10000}$
三级	1.2	0.1	12	2	1	$24\sqrt{n}$	$\frac{1}{5000}$

注：表中n为测站数。

若使用北斗 GNSS 测量仪器进行控制网的坐标系测量，测量方法同两坝间航道控制网测量方法一致，与3个已知控制点或高等级控制点进行静态联测，经过联合平差得到待定控制点的 CGCS2000 坐标系坐标。

#### 4.4.3.2 高程测量方法

对于布设在枢纽航道上游和下游的控制点，因其良好的地面基础条件、交通条件，可使用符合水准路线的水准测量方式进行高程联测。对于枢纽航道上游和下游的高程联测，可在枢纽船闸上合适位置处布设1处控制点，在船闸下游合适距离处布设1处控制点，两处控制点间使用“三角高程”法进行高程测量。

三角高程测量时通过测定测站 A 与待定点 B 之间的竖直角  $\alpha$ 、平距 D 或斜距 S，计算出两点之间高差进而求得 B 点高程的方法。这种方法比水准测量灵活、方便。受地形条件限制少且效率高，主要受大气折光影响较严重。因此，三角高程测量能够满足枢纽航道上下游高差较大的测量条件。

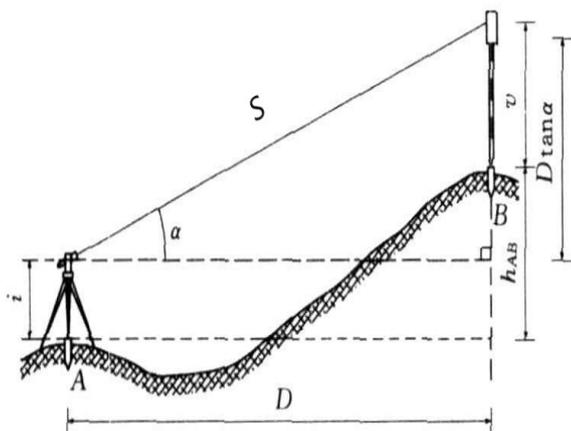


图4 三角高程测量原理图

三角高程测量的原理如上图所示：已知 A 点高程  $H_A$ ，欲求 B 点高程  $H_B$ ，则可在 A 点安置经纬仪或全站仪，量出 A 点至仪器横轴的高度  $i$ ，并用仪器望远镜照准 B 点觇标测得竖直角  $\alpha$ ，照准点至 B 点的高度  $v$  称觇标高。因此，B 点高程为

$$H_B = H_A + h_{AB} = H_A + (D \cdot \tan \alpha + i - v)$$

或

$$H_B = H_A + h_{AB} = H_A + (S \cdot \sin \alpha + i - v)$$

#### 5 结语

在三峡枢纽河段 CGCS2000 坐标系测量控制网布设方法研究过程当中，需要充分利用已有高等级控制点进行 CGCS2000 坐标系的转化，在已有控制点的基础上，选择合理的高程测量方式，统筹布设控制网，则能将控制网布设得效率提高，减小测量成本。

#### 参考文献：

- [1] 高井祥. 数字测图原理与方法 [M]. 江苏: 中国矿业大学出版社, 2010.
- [2] 李永树. 工程测量学 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.
- [3] 刘光明. CGCS2000 坐标转换 [M]. 北京: 测绘出版社, 2018.

