

· 施工 ·



平陆运河工程施工控制网的建立

王萧寒, 花斌, 黄勇清, 卢军民, 王家文, 李建委, 王俊刚
(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 航道工程施工控制网是运河建设的重要课题。以平陆运河工程施工控制网的建立为例, 根据枢纽建筑物施工放样的精度要求, 确定平面控制网和高程控制网的等级。采用先进的测量仪器, 快速完成控制网的外业数据采集, 利用广西连续运行参考站 (GXCORS) 测量数据, 集中统一处理全球导航卫星系统 (GNSS) 数据。高效率完成了施工控制网技术设计、外业数据采集、内业数据处理、精度分析、成果提供等全部生产过程。

关键词: 平陆运河工程; 施工控制网; GXCORS; 精度

中图分类号: U612

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)04-0196-06

Establishment of construction control network for Pinglu Canal project

WANG Xiaohan, HUA bin, HUANG Yongqing, LU Junmin, WANG Jiawen, LI Jianwei, WANG Jungang
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: The construction control network of waterway engineering is an important issue in canal construction. Taking the establishment of Pinglu Canal construction control network as an example, we determine levels of horizontal control network and elevation control network based on the precision requirements of the construction layout of hub buildings. We quickly complete the field data collection of the control network by advanced measuring instruments, and use the measurement data of Guangxi continuous operating reference station (GXCORS) to centrally and uniformly process GNSS data, so as to efficiently complete the production processes of construction control network technology design, field data collection, internal data processing, accuracy analysis, and achievement provision.

Keywords: Pinglu Canal project; construction control network; GXCORS; precision

施工控制网是工程建设的基础, 其测量及数据处理的方法经历了 3 个阶段: 1) 在 20 世纪 90 年代以前, 外业采集数据的仪器是经纬仪和光学水准仪, 用计算器处理数据; 2) 20 世纪 90 年代—2000 年, 外业采集数据的仪器是全站仪, 有部分单位开始利用电子水准仪进行水准测量; 3) 2000 年以来, 平面控制网利用全球导航卫星系统(GNSS)接收机采集数据, 高程测量基本全部利用电子水准仪。最近几年, 随着各省市连续运行参考站(CORS)网的建设, 以及高分辨率似大地水准面精化的完善, 为长距离大型工程的控

制测量提供了技术迭代升级的条件。

根据相关文献, 程启明^[1]针对长距离的水利工程开展了施工控制网的实践研究; 宋高伟等^[2]在珠江三角洲水资源配置工程中, 对三等平高控制网建立与复测进行研究; 吴迪军等^[3]在港珠澳大桥首级控制网复测中, 对施工控制网 GNSS 测量的方法进行研究, 该工程在后期施工过程中还建设了专用的 CORS。前二者未利用当地 CORS 数据联合平差, 后者建立了专用的 CORS, 但成本较高。此外, 丁林磊等^[4]对线性工程测绘中投影变形进行分析研究。本文针对平陆运河工程的特点,

收稿日期: 2023-08-21

作者简介: 王萧寒 (1969—), 男, 高级工程师, 从事工程测量、工程检测等工作。

采用高精度仪器进行外业采集数据, 联合广西连续运行参考站(GXCORS)数据进行平差, 选择合适的中央子午线减小投影变形, 取得了较好的效果, 也极大提高了工作效率。

1 工程概况

平陆运河工程是西部陆海大通道的重要组成部分, 2021年国务院印发《“十四五”现代综合交

通运输体系发展规划》^[5]提出“研究建设平陆运河”, 国家发展改革委印发《“十四五”推进西部陆海新通道高质量建设实施方案》^[6]提出“研究建设平陆运河”, 世界瞩目。平陆运河起点位于西江干流西津库区南宁市平塘江口, 终点为北部湾钦州港海域, 总体线路划分成5个区段, 分别为沙坪河段、分水岭段、钦江干流段、钦江城区段和入海口近海段航道, 全长约135 km, 见图1。

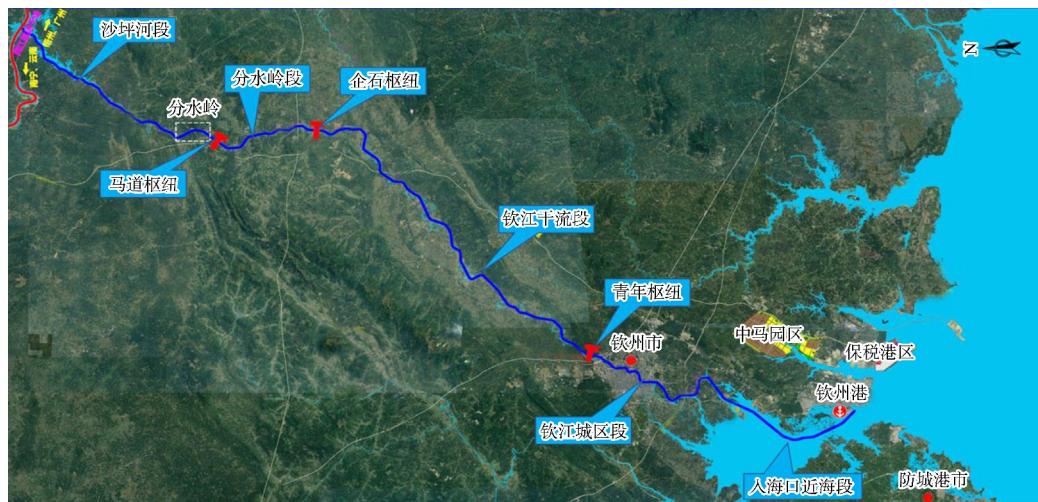


图1 平陆运河工程平面布置

工程按内河I级航道标准建设, 可通航5 000吨级船舶, 全航道落差约65 m, 设有马道、企石、青年3个航运枢纽, 通航建筑物为双线船闸。全航道纵断面见图2。平陆运河工程包括航道工程、

航运枢纽工程、水利设施改造工程、沿线跨河设施(含桥梁)、征地拆迁专项设计(含电力、通信、国防光缆、取水口等专项设计)及其配套工程等。

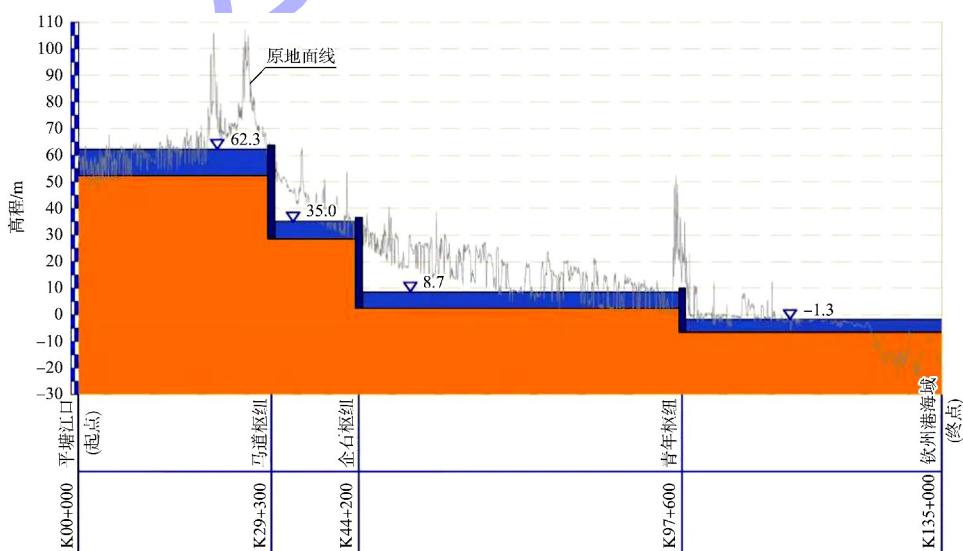


图2 平陆运河工程梯级纵断面

2 广西连续运行参考站 GXCORS

目前,广西建成了包含1个总运维控制中心和全区110座卫星导航定位基准站的广西连续运行参考站GXCORS,承担自治区自然资源及基础地理信息的数据管理,承担数字广西地理空间框架、广西地理信息公共服务平台、卫星定位连续运行参考站和卫星遥感影像统筹管理及相关技术服务。

3 施工控制网技术设计

3.1 控制网的数学基础

依据JTS 131—2012《水运工程测量规范》^[7]的相关规定,单位长度投影变形不应大于1/40 000,即25 mm/km。根据投影变形 Δs 的计算公式:

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 = -\frac{H_m}{R} s + \frac{y_m^2}{2R^2} s \quad (1)$$

式中: Δs 为每公里投影变形量,m; Δs_1 为实地测量的边长长度换算到椭球面上产生的变形,m; Δs_2 为椭球面上的长度投影至高斯平面上产生的变形,m; s 为实地测量的水平距离,m; H_m 为边长两端点的平均高程,m; R 为2 000国家大地坐标系框架下的地球曲率半径,m; y_m 为边长两端点横坐标的平均值,m。

根据以上计算,当 Δs 为25 mm时,工程区域左右最远点距离中央子午线应不大于45 km。平陆运河工程为东北→西南走向,其经度范围为108°27'32"E—109°04'32"E,东西向跨度约为68.6 km。当采用108°45'E为中央子午线时,工程区域左边最远点距离中央子午线为32.4 km,右边最远点距离中央子午线为36.2 km,均小于45 km,因此采用108°45'E为中央子午线符合规范要求。本文平面坐标系统采用CGCS2000国家大地坐标系,高程系统采用1985国家高程基准。

3.2 控制网技术设计原则

1)首先考虑整体性,以满足主体工程为主,兼顾附属及临建工程。

2)充分考虑地形的特征及施工的特点,点位的精度指标应能满足建筑物施工放样的要求;根据工程规模考虑布设密度,应方便放样及控制的

加密与扩展。

3)尽可能选择最佳布网方案,以保障必要的点位精度指标。结合本工程的特点和测区的实际情况,设计时点位精度应稍有储备,以便于个别点遭破坏时的恢复。

4)控制网布网的优化设计,保持控制网的坐标系统与勘测设计阶段的坐标系统一致;在满足放样对点位要求的前提下,尽量加强图形强度,使其具有一定的多余观测分量和良好的可靠性。

5)由于受工程区范围的限制,距离长、地形复杂,部分指标将不易满足现行规范的要求,因此需要采用多种技术和方法的组合弥补地形条件的影响。

3.3 平面控制网等级及精度设计

3.3.1 施工放样精度指标的确定

平面控制的精度指标主要是通过工程建筑物施工放样测量的精度指标和设计单位提出的具体精度要求确定。依据JTS 131—2012《水运工程测量规范》,混凝土建筑物轮廓点放样平面位置中误差 M 不大于±(20~30) mm。取 $M=±20$ mm,而 $M=±\sqrt{M_a^2+M_b^2}$ (其中 M_a 为起始误差, M_b 为测量误差),当最末级控制点的点位中误差 $M_{末}=M_a$ 且小于0.5 M 时,控制点对放样点的影响可以忽略不计,即 $M≈M_b$ 。因此,最末级控制点的点位中误差 $M_{末}=M_a$ 且不大于±10 mm^[8]。

3.3.2 施工控制网的精度指标

本施工控制网选择以点位精度作为主要控制性指标。按照规范要求最末级控制点的点位中误差 $M_{末}≤±10$ mm,本工程平面控制布设梯级按二级考虑,本施工控制网作为工程区域的首级控制,其点位精度指标 M 首应控制在0.5 $M_{末}$ 以内,即 $M_{首}≤±5$ mm,最弱点的点位中误差以 $M_p≤±5$ mm控制,可满足施工需要,符合规范要求。

3.3.3 精度指标的梯度

首级控制 $M_{首}≤±5$ mm,放样控制 $M_{末}≤±10$ mm,放样点 $M≤±20$ mm。该梯度符合JTS 131—2012《水运工程测量规范》规定的“各级网的点位精度以两倍比例递减”的原则,满足大型航电枢纽工

程首级平面控制网点位中误差控制在 $\pm(5\sim7)$ mm的精度要求。

综上所述, 本工程平面控制等级选择C级GNSS控制网是合适的, 结合各枢纽的布置情况, 沿线拟计划布设13个平面控制点。GNSS控制网精度应满足表1、2的要求^[9]。

表1 GNSS控制网基线解算精度要求

重复基 线较差	闭合环坐标分量闭合差			同步环	异步环
	x坐标	y坐标	z坐标	闭合差	闭合差
$\leq 2\sqrt{2}\sigma$	$\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma$	$\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma$	$\leq \frac{\sqrt{3}}{5}\sigma$	$\leq \frac{3}{5}\sigma$	$\leq 3\sqrt{3}\sigma$

注: $\sigma = \sqrt{a^2 + (bd)^2}$, 其中 σ 为基线长度中误差, mm; a 为固定误差, 取5 mm; b 为比例误差系数, 取1; d 为相邻点距离, km。

表2 GNSS控制网平差精度要求

无约束平差基线分量改正数			约束平差基线分量改正数较差			相邻点基线分量中误差/mm	
x坐标	y坐标	z坐标	x坐标	y坐标	z坐标	水平分量	垂直分量
$\leq 3\sigma$	$\leq 3\sigma$	$\leq 3\sigma$	$\leq 2\sigma$	$\leq 2\sigma$	$\leq 2\sigma$	10	20

3.4 精度设计及高程控制网等级

3.4.1 精度设计

根据JTS 131—2012《水运工程测量规范》关于工程建筑物施工放样测量的精度指标规定, 建筑物轮廓点放样, 相对邻近高程控制点的高程中误差 M 不大于 $\pm(20\sim30)$ mm。最末级高程控制点相对于首级高程控制点的高程中误差应小于 ± 10 mm。

由于本施工控制网的高程控制为一次同级布设完成, 若使建筑物轮廓点放样精度指标满足规范要求, 最弱点对本级起算点的高程中误差应小于 ± 10 mm, 即全航道水准点间的高程中误差应满足小于 ± 10 mm的要求。

3.4.2 水准线路及观测等级的确定

沿工程区域收集到三等及以上国家水准点8个。拟计划布设10段附合或闭合水准路线, 考虑到附属建筑物的布置, 中间布设节点符合于主水准路线上, 形成节点水准网, 连测所有平面控制点。设计水准网全长大约250 km。根据工程规模及拟定的水准路线长度, 按三等水准的精度指标进行观测, 满足高程中误差小于 ± 10 mm的精度要求。

4 施工控制网技术实施

4.1 平面控制网测量及数据处理

4.1.1 数据采集

在前期进行控制网技术设计时, 原计划在2种方式中选择: 1) 将测区周边的国家点与施工控制

网点连测, 以边连接或网连接的方式采集数据, 采用TBC软件进行基线解算、无约束平差、约束平差; 2) 在各控制点上架设GNSS接收机采集数据, 同时取得广西壮族自治区自然资源信息中心的GXCORS同步观测数据, 再联合平差, 解算成果。

从技术角度讲, 二者均可满足工程需要、满足规范要求。不同的是前者需要收集高等级国家控制点再进行采集、解算, 需进行外业数据采集的图形设计, 调配人员设备, 内外业工作量较大且周期较长; 后一种方法相对简单, 采用GNSS接收机在新设控制点上采集8 h的数据, 与GXCORS联合平差, 精度完全满足要求。这个方法的优点是可根据控制网图形结构任意选取周围的基准站数据, 数据量大, 图形结构有多种选择。故计划采用后一种方法, 同时对新设控制点外业数据进行无约束平差, 确保可靠性与准确性。

本工程GNSS-C级平面控制测量采用静态模式观测, 操作规程严格执行GB/T 18314—2009《全球定位系统(GPS)测量规范》。采用的仪器是南方银河GNSS双频接收机。

GNSS-C级点共13个, 点名为平陆01~13, 施工控制网见图3。采用双频GNSS接收机按长基线静态方式测量, 最短观测时间大于8 h, 与GXCORS系统基准站JZ05、JZ12、JZ19、KS03、KS07、LJHP、LJTS的同步观测数据组成GNSS控

制网。采用 TBC V5.0 解算软件与 COSAGPS V6.0 平差软件进行平差，基线向量解算精度、三维无约束平差、三维约束平差、成果精度检验均满足规范要求。

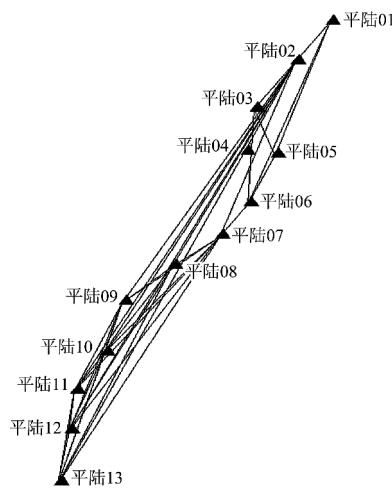


图 3 工程区 C 级 GNSS 控制网

4.1.2 数据处理及精度分析

1) 三维无约束平差。无约束平差的目的是进行粗差分析，发现观测向量中的粗差并剔除，并对整体网的内部精度进行检验和评估。选用 GXCORS 基准站 KS03 为起算点。平差精度见表 3、4。

表 3 三维无约束平差最弱点坐标精度

点名	坐标分量中误差 M/mm			M_p/mm
	x 坐标	y 坐标	z 坐标	
平陆 05	11.2	29.8	13.7	34.7

表 4 三维无约束平差最弱边精度

测边 名称	边长 S/m	边长 中误差 M_s/mm	相对边长 中误差 M_s/S	重复基 线较差 M_{pp}/mm
平陆 13—平陆 12	11 414.57	3.9	1/2 903 000	0.34

2) 三维约束平差。以 GXCORS 基准站 JZ05、JZ19、KS03、KS07、LJTS 的坐标为起算数据，进行三维约束平差计算，约束平差后，基线向量的改正数与无约束平差结果的同名基线相应改正数的较差均不超过 2σ ，满足规范要求。三维约束平差精度见表 5、6。

表 5 三维约束平差最弱点

点名	M/mm			M_p/mm
	x 坐标	y 坐标	z 坐标	
平陆 05	11.1	29.4	13.5	34.2

表 6 三维约束平差最弱边精度

测边名称	S/m	M_s/mm	M_s/S	M_{pp}/mm
平陆 12—平陆 13	11 414.57	4.0	1/2 885 000	0.35

3) 成果检验。为验证解算成果的精度，以 GXCORS 基准站 JZ12、KS05、LJHP 为检查点，与三维约束成果进行比较，误差满足 C 级 GNSS 控制网精度要求，见表 7。

表 7 平差结果检验

点名	平面坐标成果较差/mm		高程 较差/mm
	x 坐标	y 坐标	
JZ12	-3	-2	-6
KS05	1	1	-5
LJHP	6	1	-6

4.2 高程控制网测量及数据处理

4.2.1 数据采集

因工作量大、工期要求紧，故在策划阶段，即安排 5 个作业组。作业前进行技术交底，统一作业方案，制定数据处理统一标准，为后续的内外业工作打下了坚实的基础。实践证明，可以极大提高作业效率。

采用天宝 DiNi03 电子水准仪，按三等水准测量技术要求施测，高程控制网包含 1 个闭合环线、8 个附合路线，其中设 2 个节点。连测平面控制点平陆 01~12，从广西壮族自治区测绘地理信息档案资料馆收集到 8 个三等及以上水准点，各测段均以国家水准点为起点和终点。测站总长度 247.7 km，测站数 6 520 个。

4.2.2 数据处理及精度分析

各段水准路线闭合差及每公里偶然中误差 M_Δ 见表 8。全中误差为 0.17 mm(规范要求 $\leq 6.0 \text{ mm}$)，满足规范要求。

表8 三等水准路线闭合差及单位长度偶然中误差

测段起点号	测段终点号	测段距离/km	测段站数	闭合差/mm	闭合差限差/mm	$M_{\Delta}/(\text{mm} \cdot \text{km}^{-1})$	类型
平钦48	平钦48	28.4	1216	6.4	±63.9	0.21	闭合环线
平钦44	平钦48	16.3	434	-44.15	±48.4	0.22	附合路线
平钦37	平钦44	25.0	844	32.79	±60.0	0.23	附合路线
L272	L282	11.4	360	9.74	±40.5	0.45	附合路线
平钦37	平钦28	39.9	810	-7.68	±75.8	0.03	附合路线
平钦28	平钦14	49.8	1148	-21.92	±84.7	0.01	附合路线
D74	平钦12	21.3	560	9.88	±55.4	0.12	附合路线
平钦12	平钦4	30.5	616	29.97	±66.3	1.17	附合路线
平钦4	平钦1	25.1	532	19.85	±60.1	0.79	附合路线

5 结论

1) 对于大型工程, 特别是长距离航道, 应在研究阶段确定中央子午线, 从而保证规划、可行性研究、初步设计、施工图设计等各阶段资料的统一性, 避免由于中央子午线不同转换而出现的错误。

2) 平陆运河工程枢纽多、航道复杂、沿线干扰多, 控制网测量精度要求高, 首先应做好技术设计, 并进行沙盘演练。

3) 外业采集 GNSS 数据, 联合广西壮族自治区自然资源信息中心 GXCORS 的基准站测量数据融合平差, 精度高、成果可靠且效率高。

4) 利用广西似大地水准面精化模型将三维约束平差得到的大地高进行高程转换, 获取 GNSS 控制点的 1985 国家高程基准的高程成果, 可以在控制网正式成果提供以前, 及时提供给生产单位测量地形图使用, 同时也可作为水准外业测量可靠性检验的数据。

参考文献:

[1] 程启明. 引江济淮工程(安徽段)控制网设计与实施[J].

黑龙江水利科技, 2023, 51(4): 133-136.

- [2] 宋高伟, 刘良福, 刘剑波. 珠江三角洲水资源配置工程三等平高控制网建立与复测[J]. 水利规划与设计, 2022(9): 14-18.
- [3] 吴迪军, 熊伟, 郑强. 港珠澳大桥首级控制网复测方法研究[J]. 工程勘察, 2011, 39(9): 74-78.
- [4] 丁林磊, 叶达忠, 熊建伟, 等. 线性工程测绘中投影变形分析研究[J]. 企业科技与发展, 2023(1): 64-67.
- [5] 国务院.“十四五”现代综合交通运输体系发展规划[A]. 北京: 国务院, 2021.
- [6] 国家发展改革委.“十四五”推进西部陆海新通道高质量建设实施方案[A]. 北京: 国家发展改革委, 2021.
- [7] 中交天津航道局有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 水运工程测量规范: JTS 131—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [8] 杨海军, 王萧寒, 瞿明成. 琅琊山抽水蓄能电站施工控制网设计与实践[J]. 北京测绘, 2001(4): 34-37.
- [9] 国家测绘局测绘标准化研究所, 国家测绘局第一大地测量队, 国家基础地理信息中心. 全球定位系统(GPS)测量规范: GB/T 18314—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(本文编辑 王璁)

