

沱江航道整治控制测量中的技术亮点与效果分析

卢自来, 刘超群, 马学良, 冯玉全

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 成都 610017)

摘要: 针对山区河流流经区域地理条件复杂、导致航道整治控制测量难度大等问题, 结合沱江自贡段航道整治控制测量的实施情况, 分析控制点布设、坐标系统选择以及平面和高程控制测量方法的选用。根据山区航道的特征, 提出最优的平面坐标系统布测方法。研究成果可为后续山区长河道航道整治控制测量提供参考和借鉴, 推动山区长航道整治工作的顺利开展。

关键词: 沱江; 坐标系统; 平面控制; 高程控制; 测量方法; 精度分析

中图分类号: TV221 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)05-0029-06

近年来,“一带一路”建设和长江经济带的发展已成为中国推动外向型经济、低碳区域经济和扩大对外开放的重要抓手,是新时期强国战略的重要组成部分^[1-3]。水运作为一种便捷且低能耗的水上交通方式,有助于减少陆路交通所产生的温室气体排放,为实现低碳经济发展提供了有力支持。此外,内河航运在运输矿石、煤炭等大宗或重特大件货物方面具有独特的优势,难以被其他交通方式所替代。在适航地域,水运不仅具有重要的经济意义,还承载着重要的国防战略价值,其抗破坏能力远高于陆路交通^[4]。加大内河水运的发展力度有助于加速降低能源资源消耗,推动低碳经济的发展,减少污染物排放,符合建设资源节约型、环境友好型社会的总体要求,对于加速转变经济发展方式具有重要现实意义^[5-6]。

当前,山区航道的通航能力仍显不足,尤其是高等级航道的比例相对较低,迫切需要对山区河道进行升级改造,从而提高通航能力。在航道整治的过程中,基础资料的测绘工作显得尤为至关重要,其中包括控制测量、地形图测绘、水文测验等^[6-8]。控制测量作为所有基础资料测绘的核心,其准确性直接关系到整个项目基础测绘资料的精准度,从而对后续航道整治施工的精度产生深远影响^[9]。因此,在航道整治项目中,控制测量具有不可替代的

重要地位。本文以四川省沱江自贡段航道为研究对象,深入探讨山区特长河道控制测量中平面和高程坐标测量系统的布设原理与方法,以为类似特长河道整治项目的控制测量提供参考。

1 工程实施与效果分析

1.1 项目概况

四川省内河水运建设的目标是建立长江、岷江、嘉陵江、金沙江、渠江为骨干,沱江、涪江为补充的“5+2”通道通畅航道体系和优化泸州、宜宾、广元、南充、广安、乐山 6 个重要港口的结构,建成一批专业化、集约化、规模化的港口码头,因地制宜推进达州、凉山、攀枝花、眉山、遂宁、自贡 6 个港口的建设工作,形成结构优化、枢纽互通的“6+6”现代化港口体系。沱江作为长江上游的重要一级支流,在“5+2”航道体系中具有举足轻重的地位。沱江自贡段航道全长 111.5 km,整治范围涵盖从大安区牛佛镇至富顺县长滩镇的 103.9 km 河段,坐标经度范围为 $104^{\circ}57' \sim 105^{\circ}15'$,纬度范围为 $28^{\circ}56' \sim 29^{\circ}23'$,测区高差为 240~280 m。本工程包括 4 个库区的航道整治及相关支持保障系统工程。该测区水面比降较大,且沿程分布极为不均,大部分落差集中在局部河段。此外,河床上存在急弯、石梁、卡口等障碍物,导致显著的横向比降。河流流态异常复杂,常出现回流、泡水、漩涡、跌水、水跃、剪刀

收稿日期: 2024-09-19

基金项目: 四川省交通勘察设计研究院有限公司科技项目(232022015)

作者简介: 卢自来(1982—),男,河南沈丘人,正高级工程师,研究方向为内河航道及公路工程测量;通信作者刘超群(1989—),男,湖南娄底人,硕士,高级工程师,研究方向为 3S 集成原理及应用;马学良(1982—),男,内蒙古赤峰人,高级工程师,研究方向为山区河流的航道测量、公路工程测量;冯玉全(1985—),男,四川绵阳人,高级工程师,研究方向为公路与航运工程勘察测绘。

水和横流等现象,给水上交通带来了严重威胁。测量工作内容涵盖控制测量、地形图测绘以及水文测验等多个方面。

1.2 控制点布设

控制点布设方案结合项目技术设计进行。控制测量的技术方案是先进行首级全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)控制网测量,再进行加密控制测量,且加密平面控制测量采用导线观测法,高程控制测量采用光电测距三角高程测量方法,因此根据导线及光电测距三角高程测量原理及项目需求。控制点布设遵守以下几个原则。①控制应满足最低高程要求,布设在 4 个枢纽电站正常蓄水位以上,并避免远离河道,如图 1 所示,具体高程要求为:么滩至银蛇溪段应在 246 m 以上,银蛇溪至黄葛浩段应在 252.5 m 以上,黄葛浩至黄泥滩段应在 263 m 以上,黄泥滩以上段应在 271.5 m 以上;②控制点布设保证前后通视,间距控制在 600~800 m 范围内,最长不超过 1 000 m,有利于后续导线及三角高程观测;③沱江是天然河道,存在多处回头弯,在回头弯处布设首级 GNSS 控制点,每组 GNSS 控制点均分布在沱江两岸,成四边形网;④选点的地面基础稳定,尽量选择在基岩上埋设,便于点位的长期保存,并远离大功率发射塔和高压输电线;⑤点位现场视野开阔,障碍物高度低于接收天线的高度,保证 GNSS 接收机有足够的高度角。按以上要求本项目共布设 19 组(38 个)首级 GNSS 控制点,95 个加密控制点。

控制点布设方案技术总结与成效分析如下。

(1)本项目的控制点布设方案与技术设计紧密结合,采用了分阶段的测量方法,首先进行首级 GNSS 控制网测量,随后开展加密控制测量。

(2)加密平面控制测量采用导线观测法,高程控制测量则使用光电测距三角高程测量方式。

(3)布设控制点时遵循以下原则。①测区最低高程要求;②通视条件:控制点间距控制在 600~800 m;③地形适应性:在沱江回头弯处布设首级 GNSS 控制点,确保每组控制点均匀分布于河道两岸,形成四边形网;④地面基础条件与开阔视野要求。

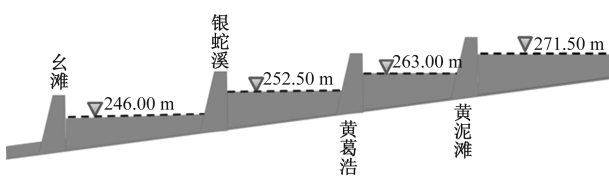


图 1 4 个梯级电站正常蓄水位

1.3 坐标系统的选择

航道整治工程中,坐标系统的选择十分重要,它既关系到整个工程项目的测量精度,也关系到后续施工的方便快捷。由于地球是个球体,而航道整治的设计文件是在平面上进行的,测绘航道整治基础资料时,需要通过一定关系把球面上的数据投影的平面上,中国基本比例尺地形图除 1:100 万以外均采用高斯-克吕格投影把球面上数据投影到平面上。高斯-克吕格投影即等角横切圆柱投影,假想用一椭圆柱横切于地球椭球体的某一经线上,这条与圆柱面相切的经线,称中央经线,以中央经线为投影的对称轴,将东西各 3°或 1°30'的两条子午线所夹经差 6°或 3°的带状地区按数学法则、投影法则投影到圆柱面上,再展开成平面。高斯-克吕格投影^[10-11]特点是:①中央子午线是直线,长度保持不变,其他子午线是凹向中央子午线的勺弧线,中央子午线为对称轴;②赤道线是直线,但有长度变形,其他纬线为凸向赤道的弧线,并以赤道为对称轴;③经线和纬线投影后仍然保持正交;④离开中央子午线越远,变形越大。

通过对投影变形计算公式的分析可以得出,高斯投影的长度变形在偏离中央子午线时始终为正,而在偏离投影高程面时则表现出正负之分。因此,可以通过调整高程来控制投影变形,以满足施工和规范要求。根据《水运工程测量规范》(JTS 131—2012)的规定,对于比例尺小于 1:1 000 的航道、港池、泊位及吹填区的施工测量、航道基本测量和航道检查测量,投影变形不应超过 1/20 000,这意味着每公里的投影变化不得超过 0.05 m。在本次航道整治工程中,采用 1:2 000 的比例尺,首级 GNSS 控制点 CGCS2000 坐标系的投影变形均能控制在 5 cm 以内,选用 3 度带的 2000 国家大地坐标系控制点,其投影变形完全符合要求。然而,本项目还包括新建么滩和银蛇溪两个枢纽,以及改造黄葛浩枢纽和黄泥滩船闸。根据《水利水电工程施工测量规范》(SL 52—2015),大型水利水电工程的首级平面控制需采用二等,投影变形不应超过 1/150 000,即每千米投影变化不应超过 0.006 7 m。从电站建设的角度来看,选择 3 度带的 2000 国家大地坐标系的控制点,投影变形无法满足这一要求。尽管本项目的航道整治工程未直接涉及电站建设,但考虑到后续电站建设和本项目坐标系统的统一性,最终选择了一个独立的工程坐标系(中央子午线为 105°15',投影高程面为 250 m)。此选择不仅满足了

航道整治的要求,也为后续4个枢纽电站建设提供了必要的投影变形精度支持。经统计,投影变形在 $0\sim\pm 0.002\text{ m}$ 的有11个控制点, $\pm 0.002\sim\pm 0.004\text{ m}$ 的有5个, $\pm 0.004\sim\pm 0.006\text{ m}$ 的有5个,充分证明了该坐标系的有效性和精确性。

对坐标系统的选取及其实施技术进行总结与成效分析如下。

(1)在山区河流航道整治中,应优先采用3度带的2000国家大地坐标系,以适应基本农田和林地等规划图纸的坐标系统,从而减少坐标转换,提高勘察设计与施工效率。当测图比例尺为1:2000,投影变形不超过1/20000时,应选择该整治河流位于2000国家大地坐标系某中央子午线附近,且控制点高程应高于库区蓄水水位(或洪水水位)。

(2)在偏离中央子午线的情况下,如长江岷江段,尽管高程会逐渐增加,但仍可通过计算选择35度带的2000国家大地坐标系。如3度带的变形无法满足要求,则需建立独立的坐标系统,该系统包括一个中央子午线和一个高程投影面,适用于高差在300 m以内的航道整治工程,确保测图比例尺为1:2000时投影变形符合标准要求。

(3)在特殊情况下,如确需两套参数时,可采用同一中央子午线,通过调整高程投影面以满足投影变形要求,这样既有利于坐标系统的统一,也能保持精度。

1.4 平面控制测量

平面控制测量有3种方法可以选择,分别是:①全部采用静态GNSS观测方法;②首级控制网采用静态GNSS观测方法,加密控制网采用导线观测方法;③首级控制网采用静态GNSS观测方法,加密控制网采用网络实时动态定位技术(real-time kinematic, RTK)观测方法。本项目平面控制测量采用第②种方法。因为高程控制测量采用光电测距三角高程测量方法,两者可以同步观测,节约观测时间。首级控制网采用4台合众思壮接收机,以边连接方式进行数据观测,组成四边形网。数据采样间隔10 s,每站观测时间大于1 h,卫星高度截止角 15° ,搬站时要求未移动的两台接收机进行开关机设置,整个控制网观测时段数达到1.96,并在测区上、中、下游各选区1个高等级国家控制点分两个时段进行联测,观测时间150 min以上。内业数据处理采用天宝TBC数据处理软件,同步环、异步环、重复基线等精度满足规范限差要求,GNSS控制网的无约束平差在WGS-84坐标系下进行,约束平差在国

家坐标系下进行,最后输出3度带的2000国家大地坐标系下坐标,再通过坐标转换公式转换到工程独立坐标系下,控制点平面精度最大为点号G042,其最大误差为7.2 mm;加密控制网平面采用导线观测方法进行,测量仪器采用徕卡TS30测量机器人,测距精度达到 $0.6\text{ mm}+1\times 10^{-6}$,测角精度达到 $0.5''$,其自动观测目标可消除人为观测误差,提高测量精度。导线测量角度闭合差、测角中误差、导线全长相对闭合差以及最大点位误差全部满足规范及测图要求。

本项目平面控制测量实施技术总结与成效分析如下。

(1)在GNSS接收机数量不足且工期紧迫的情况下,通过布设首级控制网和加密控制网的方式,可确保测量工作的顺利进行。

(2)加密控制网部分控制点的精度偏低,主要是由于导线测量的检核条件较少,导致某些测段的导线点离起算点越远,误差椭圆逐渐增大。为提升测量精度,在加密控制网的平面测量中可采用高效高精度的测量机器人,并结合导线观测方法进行操作。这种方式不仅提高了测量效率,也有效降低了误差。此外,还加强了对每个测段的质量控制,通过定期审核测量数据或采用网络RTK观测来校核,确保每个控制点的精度符合要求。

(3)在实施过程中,还应注意不同环境条件对测量结果的影响,要采取有效的措施来适应变化的外部条件。

1.5 高程控制测量

在高程控制测量中,有4种可供选择的方法:①全部采用光电测距三角高程测量方法;②全部采用水准测量方法;③首级采用光电测距三角高程测量或水准测量方法,加密控制点采用网络RTK观测方法;④全部采用静态GNSS测量方法。本研究采用了第②种方法进行高程控制测量。首先,如果采用水准测量,由于跨河水准较为复杂,水准路线只能在两岸分别进行,导致观测路线增加一倍且两岸控制点无法交叉进行高程测量,这不仅增加了外业测量时间,还无法保证两岸控制点的相对精度。采用三角高程测量方法,可与导线观测同时进行,即同时观测距离、水平角和垂直角,节约外业测量时间,提高作业效率,同时确保两岸控制点的相对精度。

根据《水运工程测量规范》(JTS 131—2012),在

困难地区的内河航道测量中,按四等水准控制要求进行往返观测,附和路线长度不超过 50 km,最弱点高程中误差可放宽至 30 mm。本项目的最弱点高程中误差控制在 30 mm,每千米高差中误差控制在 10 mm。在选择控制点时,考虑到采用三角高程测量方法,点间距经过合理控制,测量机器人实现自动观测,确保垂直角互差、指标差互差及对向观测高差互差均符合规范要求。本项目的高程控制测量路线共分为 4 段,最大路线长度为 48.336 km,各段平差精度结果完全符合规范要求,其中最大闭合差为 -32 mm,最大最弱点高程中误差为 13.8 mm,每千米高差最大中误差为 3.4 mm,精度统计见表 1。

高程控制测量的技术特点与成效分析如下。

(1)项目采用水准测量与跨河三角高程测量相结合的方法,旨在在节约时间的同时,克服复杂环境带来的挑战,确保河道整治的高程精度。

(2)加密点的平面控制测量与高程控制测量可通过测量机器人进行三角高程测量来同步完成。测量机器人实现了自动观测,极大提升了测量效率,并有效减少了人为误差。

2 精度分析

2.1 平面控制测量

首级 GNSS 控制网精度分析采用全站仪实测控制点距离与 GNSS 控制网平差投影距离进行比较,精度按每千米坐标差值进行统计:①GNSS 控制点 CGCS2000 投影距离与实测距离最小差值为 -0.026 m,最大差值为 -0.048 m;②GNSS 控制点工程独立坐标投影距离与实测距离最小差值为 -0.001 m,最大差值为 0.012 m。

部分加密导线的平面精度较低,采用了网络 RTK 方法对所有平面和高程控制点进行了分析。网络 RTK,也称为基准站 RTK,由基准站网、数据处理中心和数据通信线路组成^[12-14]。基准站按照规定的采样率进行连续观测,并通过数据通信链实时将观测资料传送给数据处理中心。数据处理中心依靠流动站发送的近似坐标(通过伪距法单点定

位获得)确定流动站所在的基准站三角形区域。然后,根据这 3 个基准站的观测资料计算流动站的系统误差,并将修正信息发送给流动用户,以获得精确结果。基准站与数据处理中心之间的数据通信采用数字数据网(DDN)或无线通信,而流动站则通过移动电话网络(如 GSM)进行双向通信。网络 RTK 是近年来基于常规 RTK 和差分 GNSS 的新技术,原理是在较大区域内均匀布设多个基准站,借鉴广域和局域差分 GNSS 的原理,消除系统误差,从而获得高精度定位结果。

为验证网络 RTK 测量的高程精度,同时进行平面和高程控制测量。选取 7 个平面控制点和 19 个高程控制点进行参数解算,并采用曲面拟合方式进行高程拟合。由于每测站用时约 10 min,133 个控制点在 2 d 内完成测量。平面差值统计如图 2、图 3 所示,首级网络 RTK 测量的平面坐标与 GNSS 静态平差结果的差值均 2 cm 以内,加密控制点网络 RTK 测量与导线测量差值均 8 cm 以内,表

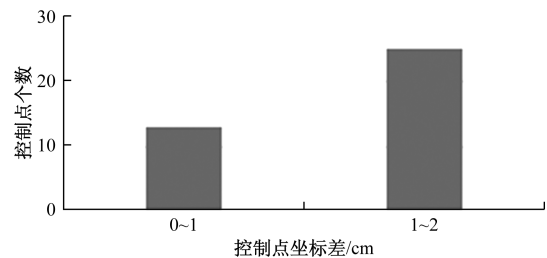


图 2 首级 GNSS 控制点网络 RTK 测量与静态测量差值统计

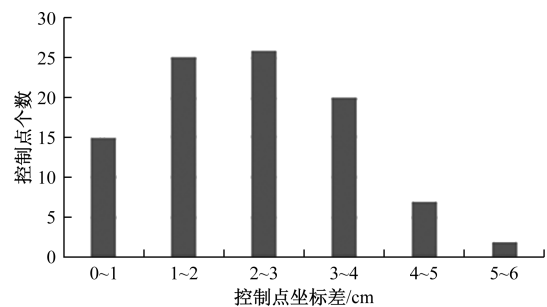


图 3 加密控制点网络 RTK 测量与导线测量差值统计

表 1 高程控制测量精度统计

起点	终点	路线形式	测段距离/ km	闭合差/ mm	闭合差限差 闭合差/mm	最弱点高程 中误差/mm	每千米高差 中误差/mm
20(09)	20(09)	闭合路线	29.578	23.00	±108.77	13.8	3.4
20(09)	18(09)	附和路线	26.268	7.00	±102.50	7.5	1.6
18(09)	11(09)	附和路线	48.336	-32.00	±139.05	12.6	3.3
11(09)	G456	附和路线	43.450	-12.00	±131.83	9.3	2.2

明其平面精度较高。然而,部分加密控制点的网络 RTK 平面坐标与导线平差平面坐标差值较大,反映出导线测量由于检核条件不足,无法确保所有控制点精度符合规范要求。因此,为确保高程精度,本项目的加密控制点均采用网络 RTK 测量结果。

2.2 高程控制测量

为确保光电测距三角高程的测量精度,在沱江两岸分别选择 6 个控制点,采用四点水准测量方法测量其高差,共组成 10 段高差,按每公里高差差值均在 1 cm 以内,发现光电测距三角高程与水准测量精度相当,能满足航道整治高程控制测量精度要求。

本项目高程控制测量采用三角高程测量,在进行一级导线测量精度分析时采用网络 RTK 测量全测区控制点平面和高程,通过比较两者之间的高差,分析在航道整治项目测量中采用网络 RTK 进行高程控制测量的精度。首先通过三角高程测量的首级 GNSS 控制点的正常高和 GNSS 的大地高求出测区高程异常变化情况,发现测区高程异常值变化较均匀。在 GNSS 网平差中按照高程异常值的变化情况加入控制点的正常高重新进行平差,在 GNSS 网平差中按高程异常变化情况加入控制点正常高后得出的控制点高程精度满足规范要求。采用网络 RTK 进行高程测量时按每组 GNSS 控制点选择 1 个,拟合方式采用曲面拟合,采用网络 RTK 方式与三角高程方式测量的控制点高程差值比较统计见表 2。网络 RTK 测量和三角高程测量的控制点高程差值均在 ± 3 cm 内,未发现超过 ± 3 cm 的,在高程异常值变化均匀的河段采用网络 RTK 测量控制点高程的方法可行。

表 2 网络 RTK 与三角高程测量控制点高程差区间统计

精度区间/cm	数量	占比/%
$0 < \Delta H \leq \pm 1$	40	30.08
$\pm 1 < \Delta H \leq \pm 2$	72	54.14
$\pm 2 < \Delta H \leq \pm 3$	21	15.79

3 结论

(1)在控制点位选择时,应依据项目实施方案,确保点位高程高于常年蓄水位。对于采用三角高程测量方法的情况,应保持前后点位通视,且控制点间距应介于 600~800 m。如果有大型水电建设项目,点位高程需高于电站正常蓄水位。

(2)在航道整治工程,特别是长距离山区河流

项目中,选择项目坐标系时需确保控制点投影变形符合大型水电建设的精度要求,以减少后续坐标系之间的转换。优先使用符合规范的 3 度带 2000 国家大地坐标系,或根据实际情况建立独立的工程坐标系。

(3)平面控制测量可采用静态 GNSS 测量或结合静态 GNSS 测量与网络 RTK 的方式。全面使用静态 GNSS 测量可获得最佳精度;而先使用静态 GNSS 测量,再用网络 RTK 测量加密点,既能确保精度,又能节省工期和经费。不推荐导线测量方法,因为其精度较低,且在某些情况下无法满足规范精度要求。

参考文献

- [1] 周兵,李玉凤.长江经济带经济高质量发展:测度、时空演变与障碍因子诊断[J/OL].长江流域资源与环境,1-23[2024-08-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20240914.1516.004.html>.
- [2] 夏晓君,邵俊岗.区域低碳创新系统综合评价研究:以长江经济带为例[J].科技和产业,2016,16(3):46-49,53.
- [3] 任思洁.“双循环”新格局下“一带一路”高质量发展全球发展战略对接长效机制研究[J].经济师,2023(4):39-40.
- [4] 靳廉洁,孙颖,陈正勇,等.“十四五”期双循环新发展格局构建下我国水运发展思路[J].水运工程,2022(12):7-11,24.
- [5] 郝岭,王静.川渝水运一体化融合发展建议[J].水运管理,2024,46(8):1-3.
- [6] 刘长俭,黄川,耿志鑫,等.我国低碳港口建设发展路径探讨[J].可持续发展经济导刊,2023(S1):42-45.
- [7] 卢自来,朱运权,刘超群,等.山区河流航道整治原型观测方法及应用[J].水运工程,2024(7):96-103.
- [8] 韩亚民,江木春.江乌航道整治工程水文泥沙原型观测方法与实践[J].海洋测绘,2023,43(4):42-46.
- [9] 孔祥元,梅是义.控制测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2002.
- [10] 熊辉,刘伟,钟发轱.高斯-克吕格投影与 UTM 投影差异及相互转换工程实践[J].江西测绘,2023(1):5-7.
- [11] 焦晨晨,李松林,张晓平,等.高斯投影变形优化[J].测绘科学,2022,47(2):39-46,94.
- [12] 韦建成,义琛.网络 RTK 定位性能分析[J].现代导航,2023,14(1):5-8.
- [13] 王剑,孙凯悦,姜维,等.基于 GPS/BDS 组合的网络 RTK 列车定位方法研究[J].铁道学报,2023,45(2):75-83.
- [14] 祝会忠,路阳阳,徐爱功,等.长距离 GPS/BDS 双系统网络 RTK 方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(2):252-261.

Technical Highlights and Effect Analysis in the Control Measures of the Tuo River Waterway Regulation

LU Zilai, LIU Chaoqun, MA Xueliang, FENG Yuquan

(Sichuan Transportation Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Aiming at the complex geographical conditions of the mountainous rivers flowing through the region, which leads to the difficulty of the control measurement of waterway improvement, combined with the implementation of the control measurement of waterway improvement in Zigong section of Tuo River, the layout of control points analysis, selection of coordinate systems, and selection of methods for plane and elevation control measurement were conducted. Based on the characteristics of mountainous waterways, the optimal method for layout and measurement of plane coordinate systems is proposed. The research results can provide important references and inspirations for the subsequent control measurement of long river channel regulation in mountainous areas, which will promote the smooth implementation of long river channel regulation in mountainous areas.

Keywords: Tuo River; coordinate system; plane control; elevation control; measurement method; precision analysis