

二等水准联测技术在区域似大地水准面精化中的应用研究

廖志生

湖南省第一测绘院, 湖南 长沙

收稿日期: 2026年8月29日; 录用日期: 2026年9月21日; 发布日期: 2026年9月29日

摘要

二等水准测量是区域似大地水准面精化工作中不可或缺的外业环节, 该类观测工作技术门槛高、精度约束严格, 同时野外作业工作量大, 实施条件艰苦。如何在满足规范精度阈值的前提下优化作业模式、提升项目实施效率, 是开展似大地水准面精化项目时需要重点考量的现实问题。本文以某市似大地水准面精化工程为例, 对测区内现存三等水准控制点开展外业检测, 同步完成水准路线每千米偶然中误差验算。检测结果表明, 部分原有三等水准点各项指标均可达到二等水准技术条件。基于该前提, 将检测合格的三等水准点用作高程传递节点, 充分挖掘已有三等水准观测成果的价值, 参与二等水准网构网与整体平差解算。工程实践证明, 该技术手段能够有效压缩外业施测规模, 在保障成果质量的同时提升作业效率, 可为国内同类型似大地水准面精化工程项目提供实践参考。

关键词

二等水准测量, 区域似大地水准面精化, 高程传算, 现有测绘成果复用

Research on Application of Second-Order Leveling Joint Survey Technology in Regional Quasi-Geoid Refinement

Zhisheng Liao

Hunan First Surveying and Mapping Institute, Changsha Hunan

Received: August 29, 2026; accepted: September 21, 2026; published: September 29, 2026

Abstract

Second-order leveling is an indispensable field operation in regional quasi-geoid refinement, characterized by high technical requirements, stringent precision constraints, substantial field workload,

and harsh operating conditions. Optimizing operation modes and implementation efficiency while meeting specified precision thresholds is therefore a key practical concern in such projects. Taking a municipal quasi-geoid refinement project as an example, field inspections were conducted on existing third-order leveling control points, and the accidental mean square error per kilometer of leveling routes was verified through computation. Results show that some original third-order leveling points fully meet second-order leveling specifications. These qualified points were adopted as elevation transfer nodes and incorporated into the network formation and overall adjustment computation of the second-order leveling network. Engineering practice demonstrates that this approach effectively reduces field survey scale, improves efficiency while ensuring result quality, and provides practical references for similar domestic quasi-geoid refinement projects.

Keywords

Second-Order Leveling, Regional Quasi-Geoid Refinement, Elevation Transmission, Reuse of Existing Surveying and Mapping Results

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

C 级 GPS 控制测量、二等水准外业观测、似大地水准面模型解算共同构成区域似大地水准面精化的三大核心技术模块，二等水准观测是获取高精度高程异常控制点高程的关键外业手段。

似大地水准面精化领域已有大量关于水准网优化、多源数据融合、存量控制点复测等研究。在水准网优化设计方面，现有研究多聚焦于控制点空间分布、网形结构对整体可靠性与精度的影响，通过优化路线布设方案，在控制作业投入的前提下提升高程控制网几何强度与抗差能力[1]；在多源数据融合层面，行业内普遍采用“移去-恢复”技术路线，融合 GNSS 水准、重力、地形等多源信息构建高分辨率似大地水准面模型，重点解决不同来源观测数据的误差匹配与联合解算问题；而针对存量历史测绘成果，多数研究侧重于控制点复测、质量检验等[2][3]。但对于一等水准点稀少的测区，如何将检测合格的二、三等水准成果作为高程传算通道参与二等水准网联合平差，兼顾精度控制与外业降本增效，仍有待工程实践进一步探讨。

常规作业模式下，二等水准网以国家一等水准点作为高程起算基准，在城市测区范围内串联全部高程异常控制点，布设附和路线或者闭合环，组建完整的水准网，通过平差处理得到各控制点高程。再综合控制点平面坐标、高程信息与重力观测数据，解算得到高分辨率、高精度的区域似大地水准面模型。实际测绘生产中，测区内部国家一等水准控制点数量通常较为有限，二、三等水准控制点存量丰富。为增强水准网几何结构强度，提高网形整体稳定性与成果可靠性，路线设计阶段应尽可能联测区域内已有的二、三等水准控制点。需要注意，二、三等水准点不具备高程起算基准的资格，但可以通过外业检测评判点位稳定性与成果可靠性，检测合格的点位可用于高程传递。本文依托某市似大地水准面精化工程项目，围绕低等级水准点复用这一技术思路开展试验分析。实测结果表明，该作业方案技术可行，输出成果精度能够满足区域似大地水准面精化的技术指标[4]。

2. 项目概况与建设意义

2.1. 测区概况

某市地处湖南省中南部、湘江中游，地理坐标介于东经 110°32'16"~113°16'32"，北纬

26°07'05"~27°28'24",市域南北长约150 km,东西宽约173 km。本项目作业测区限定在东经112°25'~112°50'、北纬26°40'~27°10"。控制面积约1000 km²。项目主要工作包含C级GPS网观测、二等水准网布设施测、区域似大地水准面精化解算等内容。

2.2. 项目建设意义

本项目综合运用GNSS卫星定位、精密水准测量、重力观测资料与数字高程模型,坚持统一规划、整体设计、分步实施的建设原则,升级区域现有测绘基准,构建融合GNSS平面控制与精密水准高程的一体化控制网[2][3]。项目成果服务某市国民经济建设、国防建设、城乡规划等诸多领域,是数字城市地理空间框架的重要基础,对地方经济建设具备支撑作用。项目核心产出为区域似大地水准面模型,全域模型精度优于±1.5 cm。该成果可依托GNSS技术改变传统高程作业模式,替代部分三、四等水准测量工作,减少外业人力物力投入,满足大比例尺测图生产需求[5]。成果多形式输出,便于野外GNSS作业使用,适配多行业测绘工程应用,有助于提升区域测绘服务能力,具备良好科学价值、社会效益与经济效益。

2.3. 已有水准资料及点位检测

本项目二等水准以国家二期一等水准网复测成果作为高程起算依据。测区内分布I长衡线、I怀衡线、I衡荔线、I衡韶线共4条国家一等水准路线;经现场踏勘,标石保存完好的一等水准点共计6座:I03、I05、I08、I09、I13、I15。测区内同时存在华东华中大地水准面精化项目形成的III谭衡线、III郴衡线、III株衡线三条三等水准路线,踏勘确认III01、III04、III07、III08、III09、III10、III11共7个点位标石完好。对6个一等水准点开展外业检测,检测总里程101.2 km,检测表“见表1”。对比分析高差检测数据可知,6个一等水准点均可作为正式起算点。将7个完好的三等水准点按照二等水准规范开展外业检测,检测里程70.3 km。各项高差较差均控制在限差以内,点位标石稳定,原有成果可靠,可作为二等水准路线的高程传算点,检测表“见表2”。

Table 1. Inspection of starting benchmark points

表 1. 起算点检测表

序号	检测路线	距离(km)	检测高差(m)	原测高差(m)	高差之差(mm)	限差(mm)	检测方式
1	I03-I05	17.7	21.36254	21.35442	8.12	25.24	外业检测
2	I05-I13	24.8	19.26357	19.2712	-7.63	29.88	外业检测
3	I05-I08	16.5	30.75149	30.7569	-5.41	24.37	外业检测
4	I08-I15	20.6	-6.32584	-6.33236	6.52	27.23	外业检测
5	I08-I09	21.6	-15.24857	-15.25626	7.69	27.88	外业检测

Table 2. Inspection table of elevation transfer points

表 2. 传算点检测表

序号	检测路线	距离(km)	检测高差(m)	原测高差(m)	高差之差(mm)	限差(mm)	检测方式
1	I13-III01	11.8	15.26847	15.26124	7.23	20.61	外业检测
2	III01-III04	10.1	26.35698	26.35242	4.56	19.07	外业检测
3	I05-III07	8.6	-8.20145	-8.19251	-8.94	17.59	外业检测
4	III07-III08	9.2	7.63547	7.64472	-9.25	18.20	外业检测

续表

5	III08-III09	9.7	-6.23571	-6.24136	5.65	18.68	外业检测
6	I09-III10	11.5	-12.36572	-12.37206	6.34	20.34	外业检测
7	III10-III11	9.4	9.26571	9.27058	-4.87	18.39	外业检测

3. 外业观测实施

本项目二等水准外业工作开展时段为 2022 年 10 月至 2023 年 7 月，共计完成 25 条水准路线观测，路线总长度 638.6 km。外业严格执行《国家一、二等水准测量规范》[4]，全部路线采用单路线往返观测模式；观测设备选用天宝 DINI03 数字水准仪，配套条码式钢瓦标尺开展观测作业。测站观测参数、测站限差、往返测高差不符值、环闭合差、每千米偶然中误差、每千米全中误差均严格遵循 GB/T 12897-2006 规范的二等水准限值要求[6]。路线图“见图 1”。

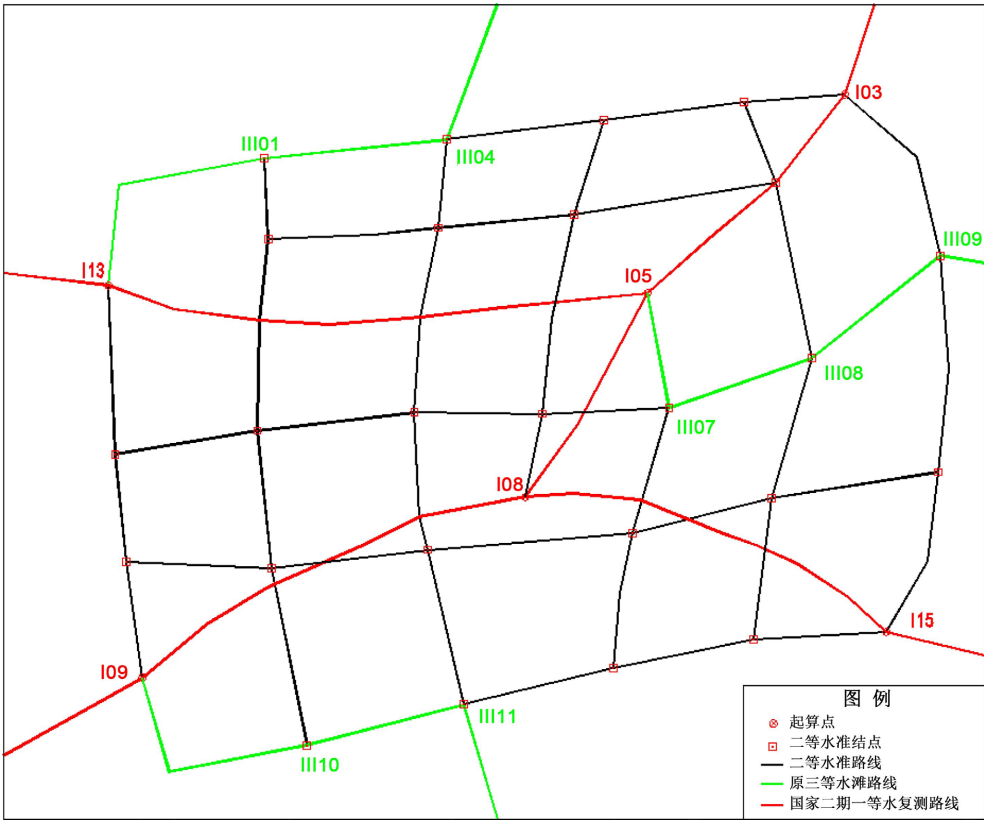


Figure 1. Route map
图 1. 路线图

4. 水准网数据处理

4.1. 数据处理流程

数据处理流程包括原始数据录入与分析、起算成果核对与分析、概略高程推算与高差各项改正数计算、闭(附)合差计算与检核、水准网平差与精度估算、成果表制作与数据报告编写、检查与归档。流程图“见图 2”。

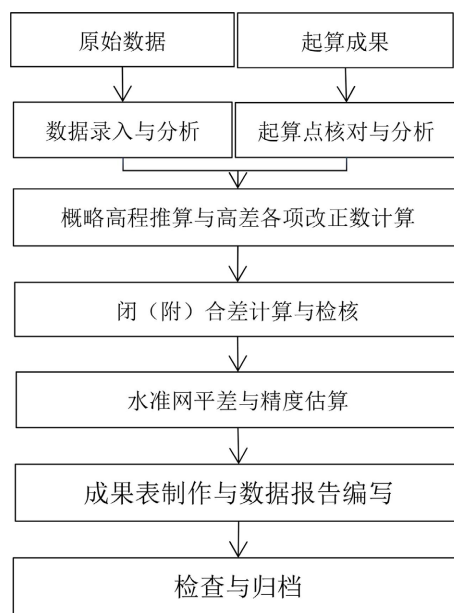


Figure 2. Flow chart

图 2. 流程图

4.2. 低等级水准成果过渡传算

部分新建二等水准路线未直接联测国家一等水准点，而是接测至前述 7 个经过检测合格的三等水准点(III01, III04, III07, III08, III09, III10, III11)。利用该 7 个三等水准点原有 7 个测段的高差观测成果作为高程过渡传算通道，传算路线总长 70.3 km；该段路线推算得到每千米偶然中误差为 ± 0.26 mm，优于二等水准规范限值，可以纳入整体水准网参与统一解算[7]。

4.3. 水准概算

水准概算环节完成观测数据一致性检核、控制点概略高程推算，并依次实施标尺长度改正、正常水准面不平行改正、重力异常改正以及固体潮改正，消除各类系统误差对观测高差的影响，为后续闭合差检核和平差计算提供预处理数据[6] [7]。

4.4. 误差计算

4.4.1. 偶然中误差计算

每千米水准测量偶然中误差计算公式：

$$M_{\Delta} = \pm \sqrt{[\Delta\Delta/R]/4n}$$

式中， Δ 为测段往返测高差不符值，单位为毫米； R 为测段长度，单位为千米； n 为测段数。

基于标尺长度改正后的测段往返高差不符值计算，得到本项目每千米偶然中误差为 ± 0.46 mm，优于二等水准 1.0 mm 的限差指标[4]。

4.4.2. 环闭合差与每千米全中误差计算

本项目二等水准网共构成 11 个闭(附)合环，其中闭合环 8 个，附合环 3 个；全部环线闭合差均未超限。闭合差计算“见表 3”。用经过各项改正后的环闭合差计算的水准测量每千米全中误差为 ± 1.24 mm，满足二等 ± 2.0 mm 的限差要求[4] [6]。

Table 3. Calculation table of misclosure for leveling loops
表 3. 水准环闭(附)合差计算表

环号	起点名	止点名	环长(km)	Wgc (mm)	Wzg (mm)	Wzl (mm)	Wq (mm)	限差(mm)
1	I03	I15	74.6	3.03	3.01	2.97	2.47	34.55
2	I15	I09	82.7	-14.47	-14.11	-13.98	-13.98	36.37
3	I09	I13	70.7	-13.29	-12.36	-12.54	-11.66	33.63
4	I05	I15	77.9	-16.71	-16.55	-16.54	-16.69	35.30
5	I03	I13	83.9	6.23	6.2	6.25	6.56	36.64
6	III01	III01	72.3	-0.04	-0.01	-0.02	0.29	34.01
7	III09	III09	75.3	9.24	8.78	9.12	9.33	34.71
8	III11	III11	67.6	3.61	3.54	3.52	3.55	32.89
9	C17	C17	57.8	-13.33	-13.58	-13.59	-14.29	30.41
10	C23	C23	56.7	-13.27	-12.65	-12.9	-11.16	30.12
11	C31	C31	49.2	8.17	7.86	8.43	8.56	28.06

4.5. 间接平差与精度评定

水准网采用间接平差模型，以完成全部改正后的往返测高差中数作为观测值，以待定结点高程作为未知数，以路线测站数定权开展结点平差；结点解算完成后，再以附和路线推算其余水准点高程[7]。本次平差共计 25 条水准路线、30 个水准结点，已知起算点 6 个，未知结点 24 个。平差后每千米中误差 ± 1.05 mm，网内最弱结点高程中误差 ± 4.36 mm。对总长度 638.6 km 的全部水准路线进行精密处理，输出全部控制点 1985 国家高程基准成果。偶然中误差、全中误差、结点高程中误差各项指标均满足二等水准以及似大地水准面精化的技术要求[1] [4]。

5. 结语

在某市似大地水准面精化项目实施过程中，充分复用测区内原有三等水准路线共 7 个测段、合计 70.3 km 的既有观测成果，由此显著减少外业实测工作量，节约 4 名作业人员共计约 15 天的野外测量工时。实践表明：在二等水准网布设中，若低等级水准点位标石稳固，经外业检测其路线精度能够达到二等水准规范，则可将其作为高程传算结点，借助原有低等级水准成果把新建二等水准路线衔接至国家一等水准起算点，共同组成整体水准网进行全网平差。该方法充分挖掘已有测绘成果价值，减少全网外业观测工作量，在保证成果精度的前提下有效提升生产效率，对测区一等水准点较为稀少的城市似大地水准面精化项目具备较好借鉴意义[1]-[3]。

参考文献

[1] 崔家武, 张兴福, 周波阳, 杜向锋, 魏德宏. 改进的 GNSS/水准点优化选择的逐步剔除法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1505-1510.

[2] 何书镜, 杜仲进, 郭坤伟. 三明市现代测绘基准体系的建立[J]. 地理空间信息, 2016, 14(3): 88-90, 9.

[3] 赵亮, 马万军, 沈吉宝. 天水市北斗时空基准系统建设关键技术研究[J]. 测绘技术装备, 2025, 27(4): 101-107.

[4] 国家测绘局标准化研究所. GB/T 12897-2006 国家一、二等水准测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[5] 常允艳, 陈志兰, 徐健, 等. 工程测量[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2016.

[6] 梁振英, 董鸿闻, 姬恒炼. 精密水准测量的理论和实践[M]. 北京: 测绘出版社, 2004.

[7] 孔祥元, 郭际明. 控制测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2006.