内河水运工程测量平面坐标系的中央子午线确定方法探讨

黄勇清，王俊刚，卢军民，王萧寒，花　斌
（中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：针对长距离内河水运工程采用单一中央子午线设置时，两端投影变形超限，而采用多分带方案又造成坐标系统不统一和数据衔接困难的技术难题，以赣粤运河为研究对象，系统分析了预可研、可研、初设、施工图设计各阶段对投影变形精度的差异化需求，提出了“动态递进、分段优化”的中央子午线设置方法。采用高斯投影变形计算公式，结合赣粤运河江西段和广东段不同高程面的实测数据进行分段演算与验证。结果表明：预可研阶段采用 114°单带投影，变形约 1/8 800，可满足宏观选线需求；自可研阶段起，江西段采用 115°05′中央子午线，广东段采用 114°05′中央子午线，综合投影变形可优于 1/40 000，满足 JTS 131—2012《水运工程测量规范》对大比例尺测图和施工测量的精度要求，实现长距离线路从宏观选线到精密施工各阶段测量数据的有效衔接。该策略可为同类跨流域长距离水运工程提供技术参考。

关键词：内河水运工程；长距离；中央子午线；投影变形；分段优化；抵偿高程面；高斯投影
中图分类号：U612　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)10-0290-06

Methodology for determining central meridian of plane coordinate system in inland waterway engineering surveying

Huang Yongqing, Wang Jungang, Lu Junmin, Wang Xiaohan, Hua Bin
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: To address the technical challenge in long-distance inland waterway engineering: the adoption of a single central meridian causes excessive projection deformation at both ends of the route, while multi-zone schemes result in inconsistent coordinate systems and difficulty in data connection. Taking the Gan-Yue Canal as the research object, this paper systematically analyzes the differentiated accuracy requirements of projection distortion in the pre-feasibility study, feasibility study, preliminary design and construction drawing design stages, and puts forward a central meridian layout method named “dynamic progression and segmented optimization”. Using Gaussian projection deformation formulas and measured data from different elevation surfaces in the Jiangxi and Guangdong sections of the Gan-Yue Canal, segmented calculations and validations are carried out. The results demonstrate that during the pre-feasibility study stage, a single 114° projection zone yields a deformation of approximately 1/8, 800, which meets the requirements for macro-route selection. Starting from the feasibility study stage, the Jiangxi section adopts a central meridian of 115°05′ while the Guangdong section adopts 114°05′, achieving comprehensive projection distortion better than 1/40, 000. This satisfies the accuracy requirements of JTS 131-2012 *Specifications for Port and Waterway Engineering Survey* for large-scale topographic mapping and construction surveying, and realizes effective data connection from macro-route selection to precision construction for long-distance waterway engineering. This strategy can provide technical references for similar trans-basin long-distance waterway projects.

Keywords: inland waterway engineering; long-distance; central meridian; projection distortion; segmented optimization; compensated elevation plane; Gaussian projection

收稿日期：2026-04-10　　**录用日期：**2026-05-15

作者简介：黄勇清(1980—)，男，高级工程师，从事水运工程测量技术研究与管理工作。

在工程测量中，选择平面坐标系统是基础工作，坐标系统设计的核心内容是确定中央子午线。然而，长距离内河水运工程往往绵延数百公里，若采用统一的中央子午线，线路两端必然远离中央子午线，导致边长投影变形超限；若采用过多的分带，又会带来坐标系统不统一、数据衔接困难等问题，给设计、施工过程带来诸多不便。

针对投影变形问题，已有学者开展了相关研究。孔祥元等[1]系统阐述了高斯投影的基本理论及变形机理；杨志等[2]基于投影变形大小的量化分析，提出投影带和投影面的优化选择方法；刘志成[3]探讨了公路勘察测绘中抵偿面任意带高斯投影坐标系的建立方法；何婵军[4]对长线路工程坐标系的建立与应用进行了系统研究，指出长线路工程应综合考虑投影变形和施工衔接需求；丁林磊等[5]对线性工程测绘中投影变形进行综合分析，建立了完整的变形评估体系；徐建忠等[6]以引大济岷工程为例，研究分段抵偿投影面和投影带的合理选择方法，验证了分段投影在长距离引水工程中的适用性；杨宝宏[7]针对线性工程中独立坐标系的选择问题进行了应用研究，提出顾及工程阶段需求的坐标系优选策略；王腾军等[8]从现代测量学角度论述了不同投影方式的适用条件；张正禄[9]在工程测量学框架下对施工控制网的坐标系统设计进行了系统论述；李德仁等[10]从误差处理与可靠性角度，为投影变形控制提供了理论基础。上述研究多聚焦于公路、水利等线性工程，对水运工程特有的阶段性精度需求与坐标系统动态适配问题的探讨尚不充分，对不同设计阶段投影变形控制目标的差异化研究也较为薄弱。

为此，本文以赣粤运河工程为依托，分析内河水运工程各建设阶段对投影精度的差异化需求，提出“动态递进、分段优化”的中央子午线设置策略，并通过赣粤运河江西、广东两段的详细演算验证其合理性，以期为同类长距离水运工程提供技术参考。

1　投影变形分析

在工程测量中，投影变形通常由两部分变形叠加组成：1)地面实测边长归算至参考椭球面产生的长度变形(高程归化)；2)椭球面边长投影至高斯投影面产生的长度变形(高斯投影变形)。平面控制网测量中，解决长度变形问题的关键在于合理选择投影面与投影带。

1.1　实量边长归算至参考椭球面上的变形影响

$$\Delta S_1 = -\frac{H_m}{R}\cdot S \tag{1}$$

式中：H_m 为归算边高出参考椭球面的平均高程，m；R 为归算边方向参考椭球法截弧曲率半径(实际计算时取值 6 371 km)；S 为归算边长度，m；ΔS_1 为高程归化改正值，m。

由式(1)可见，ΔS_1 为负值，表明将地面实量长度归算到参考椭球面上之后，长度必然发生收缩，且高程越大，长度缩短越显著。

1.2　将参考椭球面上的边长归算到高斯投影面上的变形影响

$$\Delta S_2 = \frac{y_m^{\,2}}{2R_m^{\,2}}\cdot S_0 \tag{2}$$

式中：y_m 为归算边两端点横坐标平均值，km；R_m 为参考椭球面的平均曲率半径(实际计算中常取值 6 371 km)；S_0 为参考椭球面上的投影归算边长，m；ΔS_2 为高斯投影改正值，m。

由式(2)可见，ΔS_2 恒为正值，表明将椭球面上长度投影到高斯面上之后，长度必然增大。

1.3　综合投影变形

在实际计算中，取 $S\approx S_0$，$R\approx R_m=6\ 371$ km。地面上某条边实测长度投影到高斯面后的综合变形 ΔS 为两项变形之和：

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -\frac{H_m}{R}\cdot S + \frac{y_m^2}{2R^2}\cdot S \tag{3}$$

令综合变形为零，可得理论抵偿条件：

$$\frac{y_m^2}{2R} = H_{\mathrm{m}} \tag{4}$$

通常情况下，高程归化与高斯投影两项改正值一负一正，可以相互抵消，但两者随空间位置的变化规律不同，难以在全测区完全补偿，需结合具体地形条件进行分段优化。

2 规范要求

JTS 131—2012《水运工程测量规范》[11]对投影变形有明确规定，其对投影变形的控制要求见表 1。

表 1 JTS 131—2012《水运工程测量规范》对投影变形的控制要求

Tab. 1 Control requirements for projection distortion in JTS 131-2012 *Specifications for Port and Waterway Engineering Survey*

适用范围	允许变形值	备注
1∶500 地形测图、港口工程施工测量	≤1/40 000	测区距中央子午线距离大于 45 km 时可设任意带投影
规划和设计测量、水工建筑物及附属设施施工测量和比例尺不小于 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、航道检查测量	≤1/40 000	精度要求高
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、航道检查测量	≤1/20 000	精度要求相对较低

3 长距离水运工程各阶段测量精度需求分析

内河水运工程建设通常划分为预可行性研究(预可研)、工程可行性研究(工可)、初步设计、施工图设计及施工建设等阶段。各阶段对测量成果的精度要求和用途存在显著差异，因此对中央子午线的设置策略也应有所不同。

3.1 预可研及工可阶段

预可研及工可阶段的主要任务是进行线路方案比选、工程规模论证和投资估算，测量工作以中小比例尺地形图测绘为主(通常为 1∶5 000～1∶20 000)。其主要特点是：覆盖范围广，需对多条比选线路进行粗略测量，东西跨度可能达到上百公里。因此，该阶段宜采用统一的坐标系，以线路中央经度作为中央子午线，投影面可采用国家参考椭球面或测区平均高程面。

3.2 初步设计阶段

初步设计阶段需确定工程总体方案和主要建筑物布局，测量工作以大比例尺地形图[12]测绘为主(1∶2 000～1∶5 000)。其主要特点是：精度要求显著提高，投影变形需控制在 1/40 000 以内；线路基本确定，但局部方案仍可能调整。该阶段需对投影变形进行精细控制。

3.3 施工图设计及施工阶段

施工图设计阶段需确定建筑物的具体尺寸和位置，施工阶段则需进行现场放样。该阶段的特点是：局部控制为主，重点关注枢纽、船闸、桥梁等关键建筑物；衔接要求严格，不同标段之间、建筑物与渠道之间需精准对接。该阶段可采用更为精细的分带方案，必要时为大型建筑物建立独立的施工控制网。

4 赣粤运河工程实例分析

4.1 工程概况

赣粤运河是规划中的跨流域水运通道，北起江西赣州，南至广东韶关，连接长江水系与珠江水系。工程全长约 305 km，规划为内河Ⅱ级航道。工程沿线地形起伏较大，江西段平均海拔约 110～210 m，广东段海拔从约 250 m 逐渐降至 55 m。赣粤运河工程布置见图 1。

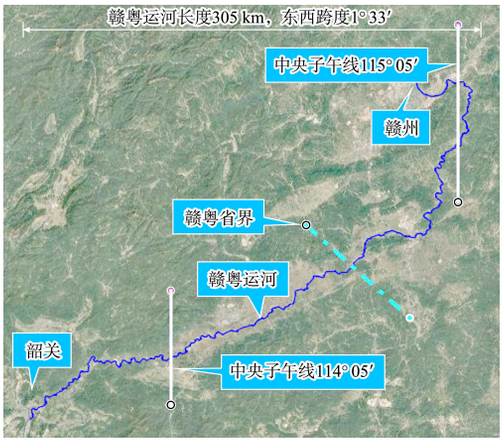

图 1 赣粤运河工程布置

Fig. 1 General layout of the Gan-Yue Canal project

4.2　投影变形评估

测区范围从北端(江西赣州)约 $Y=596$ km，到南端(广东韶关)约 $Y=458$ km。以中央子午线 114°计算，根据式(2)，取 $y_m=596-500=96$ km(江西段)和 $y_m=500-458=42$ km(广东段)，高斯投影产生的长度变形分别如下。

江西段：$\Delta S_2/S=y_m^2/(2R^2)=96^2/(2\times6\ 371^2)\approx 1/8\ 800$

广东段：$\Delta S_2/S=42^2/(2\times6\ 371^2)\approx1/46\ 000$

高程归化产生的变形：江西段平均高程约 150 m，根据式(1)，$\Delta S_1/S\approx-1/42\ 000$；广东段下游平均高程约 70 m，$\Delta S_1/S\approx-1/91\ 000$。

根据式(3)，江西段综合变形约为 1/11 000，超出规范 1/40 000 的限值；广东段综合变形约为 1/93 000，满足规范要求。因此，如采用单一的中央子午线设置，江西段投影变形不满足规范要求的 1/40 000，在设计和施工阶段需考虑采用更精细的“分段投影”和“抵偿高程面”技术，以控制长度变形。

4.3　中央子午线及投影面设置方案

基于前述理论分析及赣粤运河工程实际，考虑设计阶段用图方便和满足规范精度要求，同时考虑江西和广东不同省份划分不同标段施工，本文提出“动态递进、分段优化”的中央子午线设置策略。

1）以设计阶段划分。预可研阶段按 1 个投影带划分，中央子午线设置 114°，投影面默认选择参考椭球面。从工可阶段开始，总体变形控制目标 1/40 000，投影带 2～3 个为宜，投影面按各区段设置抵偿高程面。

2）以不同省份划分。江西段东西跨度不超过 45 km，可设置 1 个中央子午线；广东段东西跨度约 115 km，需结合投影带和投影面的综合影响来确定中央子午线。

4.4　投影参数选择

根据已有资料分析计算，江西段和广东段各选择一个中央子午线即可满足规范精度要求。

4.4.1　江西段

自东向西平均高程由 110 m 逐渐上升到 210 m，选择中央子午线 115°05′、投影面默认选择参考椭球面，即可满足规范 1/40 000 的精度要求。赣粤运河江西段投影变形的计算过程与结果见表 2，各测点综合投影变形变化趋势见图 2。

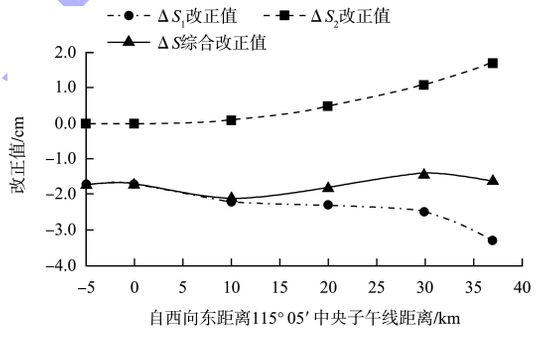

图 2　赣粤运河江西段任意带坐标系投影变形改正值

Fig. 2　Projection distortion correction values of the arbitrary-zone coordinate system in the Jiangxi section of the Gan-Yue Canal

表 2　赣粤运河江西段投影变形的计算过程与结果

Tab. 2　Calculation process and results of projection distortion for the Jiangxi section of the Gan-Yue Canal

序号	自西向东距离 115°05′ 中央子午线距离/km	方位说明	高出参考椭球面的平均高程/m	ΔS_1 改正值/cm	ΔS_2 改正值/cm	ΔS 综合改正值/cm	$\Delta S/S_0$
1	37	中央子午线以西	210	−3.3	1.7	−1.6	1/62 000
2	30	中央子午线以西	160	−2.5	1.1	−1.4	1/71 000
3	20	中央子午线以西	145	−2.3	0.5	−1.8	1/55 000
4	10	中央子午线以西	140	−2.2	0.1	−2.1	1/47 000
5	0	中央子午线	110	−1.7	0.0	−1.7	1/58 000
6	−5	中央子午线以东	110	−1.7	0.0	−1.7	1/58 000

注：$\Delta S/S_0$ 为综合投影变形。

由表 2 可知，江西段各测点综合投影变形最大为 1/47 000，最小为 1/71 000，全部优于 1/40 000 的规范限值。图 2 直观展示了各测点综合投影变形的分布情况，变形值均位于规范限值线以下，验证了 115°05′中央子午线在江西段全线的适用性。

4.4.2 广东段

自西向东平均高程由 220 m 逐渐下降到 55 m，选择中央子午线 114°05′、投影面默认选择参考椭球面，即可满足规范 1/40 000 的精度要求。赣粤运河广东段投影变形的计算过程与结果见表 3，各测点综合投影变形变化趋势见图 3。

表 3 赣粤运河广东段投影变形的计算过程与结果

Tab. 3 Calculation process and results of projection distortion for the Guangdong section of Gan-Yue Canal

序号	自东向西距离 114°05′中央子午线距离/km	方位说明	高出参考椭球面的平均高程/m	ΔS_1 改正值/cm	ΔS_2 改正值/cm	ΔS 综合改正值/cm	$\Delta S/S_0$
1	64	中央子午线以东	220	−3.5	5.1	1.6	1/62 000
2	60	中央子午线以东	250	−3.9	4.4	0.5	1/200 000
3	50	中央子午线以东	155	−2.4	3.1	0.7	1/140 000
4	40	中央子午线以东	140	−2.2	2.0	−0.2	1/500 000
5	30	中央子午线以东	130	−2.0	1.1	−0.9	1/110 000
6	20	中央子午线以东	120	−1.9	0.5	−1.4	1/71 000
7	10	中央子午线以东	100	−1.6	0.1	−1.5	1/66 000
8	0	中央子午线	100	−1.6	0.0	−1.6	1/62 000
9	−10	中央子午线以西	100	−1.6	0.1	−1.5	1/66 000
10	−20	中央子午线以西	90	−1.4	0.5	−0.9	1/110 000
11	−30	中央子午线以西	80	−1.3	1.1	−0.2	1/500 000
12	−40	中央子午线以西	65	−1.0	2.0	1.0	1/100 000
13	−50	中央子午线以西	55	−0.9	3.1	2.2	1/45 000

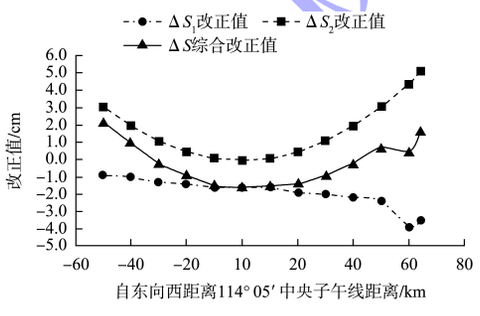

图 3 赣粤运河广东段任意带坐标系投影变形改正值

Fig. 3 Projection distortion correction values of the arbitrary-zone coordinate system in the Guangdong section of the Gan-Yue Canal

由表 3 可知，广东段各测点综合投影变形最大为 1/45 000，最小为 1/500 000，全部优于 1/40 000 的规范限值。图 3 直观展示了各测点综合投影变形的分布情况，变形值均位于规范限值线以下，验证了 114°05′中央子午线在广东段全线的适用性。

5 结论

1）长距离内河水运工程的中央子午线确定，应根据工程阶段的不同采取动态递进的策略：预可行性研究研阶段可采用统一带，强调系统统一；自工程可行性研究阶段，应兼顾精度与设计衔接，投影变形需满足 1/40 000 要求。

2）类似赣粤运河工程跨省份的长距离项目，应考虑不同省份实际地形和施工分区需求，设置便于省内施工衔接的中央子午线和高程投影面。

参考文献：

[1] 孔祥元, 梅是义. 控制测量学: 上册[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.

Kong Xiangyuan, Mei Shiyi. Control surveying: Vol. 1[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.

[2] 杨志, 覃辉, 文鸿雁, 等. 基于投影变形大小的投影带和投影面选择[J]. 公路工程, 2016, 41(1): 59-63.
Yang Zhi, Qin Hui, Wen Hongyan, et al. The selection of projection zone and plane is based on the size of projection distortion [J]. Highway Engineering, 2016, 41(1): 59-63.

[3] 刘志成. 公路勘察测绘中抵偿面任意带高斯投影坐标系的建立[J]. 北京测绘, 2016, 30(3): 50-52.
Liu Zhicheng. The establishment of Gauss projection coordinates system with arbitrary surface for highway surveying [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2016, 30(3): 50-52.

[4] 何婵军. 长线路工程坐标系的研究应用[J]. 测绘通报, 2013(增刊 1): 173-176.
He Chanjun. Research and application of coordinate system for long linear engineering [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(S1): 173-176.

[5] 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.
Ding Linlei, Ye Dazhong, Xiong Jianwei, et al. Research on projection deformation analysis in linear engineering surveying and mapping [J]. Sci-Tech & Development of Enterprise, 2023(1): 64-67.

[6] 徐建忠. 引大济岷工程分段抵偿投影面和投影带的合理选择[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(2): 67-72.
Xu Jianzhong. Reasonable selection of sectional compensation projection surface and belt for Dadu-Minjiang water diversion project[J]. Journal of Geomatics, 2022, 47(2): 67-72.

[7] 杨宝宏. 线性工程中优化选择独立坐标系的应用研究[J]. 城市勘测, 2022(4): 135-138.
Yang Baohong. Application of optimal selection of independent coordinate system in linear engineering[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2022(4): 135-138.

[8] 王腾军, 田永瑞. 现代测量学[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
Wang Tengjun, Tian Yongrui. Modern surveying [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.

[9] 张正禄. 工程测量学[M]. 3 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2020.
Zhang Zhenglu. Engineering surveying [M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2020.

[10] 李德仁, 袁修孝. 误差处理与可靠性理论[M]. 2 版. 武汉: 武汉大学出版社, 2012.
Li Deren, Yuan Xiuxiao. Error processing and reliability theory[M]. 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2012.

[11] JTS 131—2012　水运工程测量规范[S].
JTS 131-2012　Specifications for port and waterway engineering survey[S].

[12] GB/T 20257. 1—2017　国家基本比例尺地图图式 第 1 部分: 1∶500 1∶1 000 1∶2 000 地形图图式[S].
GB/T 20257. 1-2017　Cartographic symbols for national fundamental scale maps: part 1: specifications for cartographic symbols 1∶500 1∶1 000 & 1∶2 000 topographicmaps[S].

(本文编辑　赵娟)

(上接第 271 页)

[10] 唐锐, 李智杰, 李昌华, 等. 基于 BIM 与知识图谱的智能化审图系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 155-161, 169.
Tang Rui, Li Zhijie, Li Changhua, et al. Design and implementation of intelligent drawing review system based on BIM and knowledge graph [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(9): 155-161, 169.

[11] 牛作鹏, 邹艳春. BIM+GIS 数据融合在码头工程中的应用[J]. 水运工程, 2024(4): 138-144.
Niu Zuopeng, Zou Yanchun. Application of BIM+GIS data fusion in terminal engineering [J]. Port & Waterway Engineering, 2024(4): 138-144.

[12] 庞启秀, 李怀远, 辛海霞, 等. 海港智慧航道基础支撑平台架构与关键技术[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026, 54(1): 129-137.
Pang Qixiu, Li Huaiyuan, Xin Haixia, et al. Architecture and key technologies of basic platform for intelligent waterways in seaports [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(1): 129-137.

(本文编辑　王传瑜)

水运工程