

# 基于RTK放样的投影变形工程尺度效应分析与防控对策

王玉珍

新疆疆海测绘科技有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2423

**[摘要]** 文章基于投影变形双重构成机制,分析尺度效应主导因子演化规律,通过三类典型工程试验明确各尺度变形特征,进而构建针对性防控体系。小尺度工程采用基准面优化法可将变形量控制在5mm/km内,中尺度通过双因子协同调整使平均变形量降至6.7mm/km,大尺度运用动态投影带技术实现变形量 $\leq 25$ mm/km。该防控体系可精准匹配不同尺度工程需求,有效保障RTK放样精度,为工程建设质量提升提供技术支撑。

**[关键词]** RTK放样; 投影变形; 工程尺度效应; 防控对策

中图分类号: F407.9 文献标识码: A

## Analysis of Engineering Scale Effect and Prevention-Control Countermeasures of Projection Deformation Based on RTK Setting Out

Yuzhen Wang

Xinjiang Jianghai Surveying and Mapping Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** Based on the dual formation mechanism of projection deformation, this paper analyzes the evolution law of dominant factors of the scale effect. Three typical engineering tests are adopted to clarify the deformation characteristics at various scales, and then a targeted prevention-control system is constructed. For small-scale projects, the datum plane optimization method can control the deformation within 5 mm/km. For medium-scale projects, the dual-factor collaborative adjustment reduces the average deformation to 6.7 mm/km. For large-scale projects, the dynamic projection zone technology realizes a deformation of  $\leq 25$  mm/km. The prevention-control system can accurately match the requirements of projects at different scales, effectively guarantee the accuracy of RTK setting out, and provide technical support for improving the quality of engineering construction.

**[Key words]** RTK setting out; projection deformation; engineering scale effect; prevention and control countermeasures

### 引言

RTK技术凭借高效、便捷的优势,已成为工程放样的核心技术手段。投影变形始终是制约RTK放样精度的关键因素,其影响程度随工程尺度变化呈现显著差异。小尺度工程中投影变形常被忽略,中尺度工程变形开始显现,大尺度及线性工程变形累积后易超出规范限值。工程建设对测量精度的要求不断提高,传统统一化防控方法难以适配不同尺度工程的变形特征。明确投影变形的工程尺度效应机理,建立针对性防控体系,成为保障各类工程放样精度的迫切需求,对提升工程建设质量具有重要现实意义。

### 1 RTK放样投影变形的尺度效应机理

#### 1.1 投影变形的构成与计算模型

RTK放样中的投影变形源于两次关键转换过程,形成双重变

形叠加效应。第一重变形是地面实测边长向参考椭球面归算产生的变形,其数值大小与测区平均高程呈正相关,归算公式为 $\Delta S_1 = S \cdot H/R$ ,其中S为归算边长度,H为边两端相对投影面高程平均值,R为边长地区平均曲率半径。该变形使实测距离缩短,且平均高程越高,缩短效应越显著。

第二重变形是椭球面上的边长向高斯投影面转换产生的变形,计算公式为 $\Delta S_2 = (y/R)^2 \cdot S_0/2$ ,其中y为边两端点横坐标平均值, $S_0$ 为投影归算边长。此变形始终使长度被拉长,且变形量与到中央子午线距离的平方成正比,远离中央子午线时变形急剧增大。

总变形量为两重变形的代数和,即 $\Delta S = S \cdot [(y/R)^2/2 - H/R]$ 。当参考椭球面低于归算边平均高程面时,两部分变形可相互抵消,为尺度化防控提供了理论基础。

### 1.2 工程尺度的分级标准与效应特征

依据投影变形的演化规律,结合工程实践场景,将工程尺度划分为三类。小尺度工程指平面跨度小于5km、平均高程差小于100m的项目,如小型建筑场地、局部管网铺设等,其投影变形以高程主导,总变形量通常较小,多在5mm/km以内。

中尺度工程平面跨度介于5-30km、平均高程差100-500m,涵盖工业园区、城市片区开发等,变形特征表现为高程与中央子午线偏移双重影响,变形量多在5-25mm/km之间,部分区域可能接近规范限值。

大尺度工程平面跨度超过30km、平均高程差大于500m,典型代表为高速铁路、跨区域公路等线性工程,变形以中央子午线偏移主导,且变形量随跨度累积呈非线性增长,易出现超限情况<sup>[1]</sup>。

### 1.3 尺度效应的主导因子演化规律

不同尺度工程中,投影变形的主导因子存在显著差异,且随工程尺度变化呈现明确的演化规律。

小尺度工程中,高程因素对变形的贡献率可达78%,中央子午线偏移的影响占比仅22%。当平均高程低于100m时, $\Delta S_1$ 绝对值较小,总变形量通常可满足常规精度要求;若位于高海拔区域,如平均高程500m的山地建筑场地, $\Delta S_1$ 每千米可达78.5mm,即使 $y$ 较小,总变形量也可能超出允许范围,此时高程成为绝对主导因子。

中尺度工程的主导因子随跨度和高程差变化呈现动态转换特征。当测区靠近中央子午线( $y < 30$ km)时,高程仍为主要影响因素,变形量随高程差增大而显著上升;当 $y$ 超过30km后,中央子午线偏移的影响逐渐占据主导地位,双重因子的耦合作用使变形分布呈现明显空间分异。例如某工业园区跨度18km,平均高程230m,测区东部 $y=22$ km,高程贡献率为61%,西部 $y=48$ km,中央子午线偏移贡献率升至59%,变形量差异达15.1mm/km。

大尺度工程中,中央子午线偏移成为绝对主导因子,贡献率达83%以上。随着跨度增加, $y$ 值的平方项作用凸显, $\Delta S_2$ 的增长速率远超过 $\Delta S_1$ 的抵消能力,导致总变形量持续增大。对于长距离线性工程,变形量沿线路呈现非线性累积趋势,距离中央子午线每增加10km,变形量平均增长32%,若不采取有效防控措施,将严重影响工程施工精度。

## 2 不同尺度工程的投影变形特征试验

### 2.1 试验设计与参数设置

选取三类典型尺度工程场景开展对比试验,统一采用CGCS2000坐标系,RTK设备选用Trimble R10接收机,数据采样率设置为1Hz。小尺度试验区域选取城市建筑场地,跨度3km,平均高程85m;中尺度试验区域为工业园区,跨度18km,平均高程230m;大尺度试验区域为跨区域公路,跨度65km,平均高程580m。

试验通过RTK放样关键点位,采用全站仪实测边长进行对比,计算不同区域的投影变形量,分析尺度因子与变形量的相关性。同时记录测区平均高程、到中央子午线距离等参数,建立变形特征数据库<sup>[2]</sup>。

### 2.2 小尺度工程变形特征

小尺度试验区域的投影变形量普遍较小,实测变形值在1.2-3.8mm/km之间,平均变形量2.5mm/km,均满足《工程测量标准》中25mm/km的限值要求。变形分布相对均匀,同一区域内不同点位的变形差异小于0.5mm/km,这一特征与小尺度工程变形以高程主导且 $y$ 稳定的规律一致。

试验数据显示,当平均高程从85m增至300m(保持 $y=15$ km不变)时,平均变形量从2.5mm/km增至7.8mm/km,变形量与高程呈显著正相关,进一步验证了高程在小尺度工程中的主导作用。当 $y$ 从15km增至30km(保持平均高程85m不变)时,平均变形量从2.5mm/km增至4.2mm/km,增长幅度较小,表明小尺度工程中 $y$ 变化对变形的影响有限。

对于高海拔小尺度区域的补充试验表明,当平均高程达到500m( $y=15$ km)时,平均变形量增至12.7mm/km,虽未超出规范限值,但已接近城市快轨15mm/km的严格要求,需采取简单的防控措施即可满足精度需求。

### 2.3 中尺度工程变形特征

中尺度试验区域的投影变形呈现明显的空间分异特征,变形量在8.5-23.6mm/km之间,平均变形量15.8mm/km。靠近中央子午线的区域变形量较小,边缘区域变形量接近规范限值25mm/km。

变形主导因子出现分化,测区东部( $y=22$ km)高程贡献率为60%~65%,西部( $y=48$ km)中央子午线偏移贡献率升至55%~62%。变形量的空间波动幅度显著增大,最大差值达15.1mm/km,表明中尺度工程需针对不同区域的主导因子采取差异化防控。

### 2.4 大尺度工程变形特征

大尺度试验区域的投影变形呈现显著累积效应,变形量在28.3-112.5mm/km之间,平均变形量65.7mm/km,远超规范限值。变形曲线呈非线性增长趋势,距离中央子午线每增加10km,变形量平均增长32%。

中央子午线偏移对变形的贡献率达83%,成为绝对主导因子。在测区最西端( $y=95$ km),单公里变形量突破110mm,若直接采用常规RTK放样,将导致实地点位与设计位置偏差超过1m,完全无法满足工程要求<sup>[3]</sup>。变形的累积性和主导因子的单一性,决定了大尺度工程需采用系统性防控方案。

## 3 基于尺度效应的投影变形防控对策

### 3.1 小尺度工程防控方案: 基准面优化法

小尺度工程的防控核心是削弱高程主导的变形影响,采用施工基准面优化策略即可实现有效控制,该方案操作简便、成本低廉,无需复杂的坐标转换和设备调整。

对于一般小尺度工程(平均高程 $< 100$ m),直接采用施工场地平均高程作为投影基准面,替代传统参考椭球面,使 $\Delta S_1$ 趋近于零,从而简化总变形计算。实施过程中,只需在RTK设备中输入测区平均高程数据,设备将自动完成变形改正,无需额外测量工作。该方案可将变形量控制在3mm/km以内,完全满足常规工程精度要求<sup>[4]</sup>。

对于高海拔小尺度工程(平均高程 $\geq 100$ m),通过计算最优抵偿高程面实现变形控制,抵偿高程面计算公式为 $H_0 = \Delta h - y_0^2 /$

(2R)。式中 $\Delta h$ 为测区平均正常高, $y_0$ 为测区中心横坐标, $R$ 为地球平均曲率半径(取6371km)。例如某高海拔小型厂区平均高程500m, $y_0=15$ km,计算得最优抵偿高程面为478m,采用该基准面后,变形量从12.7mm/km降至3.2mm/km,满足高精度工程要求。

### 3.2中尺度工程防控方案:双因子协同调整法

中尺度工程需同时应对高程和中央子午线偏移的双重影响,采用抵偿高程面与中央子午线微调相结合的协同策略,通过双重因子的精准调控,实现全区域变形控制。

抵偿高程面采用单位长度变形最小法( $\max\{|\Delta S_i|\}=\min$ )确定,该方法能使投影范围内各边的最大变形值最小化,变形分布更均匀。对于投影范围位于中央子午线一侧的中尺度工程,抵偿高程面计算公式为 $H=H-(y_{ax}^2+y^2)/(4R)$ ;对于跨越中央子午线的工程,计算公式为 $H=H-\max\{y_{ax}^2,y^2\}/(4R)$ 。与传统方法相比,该方法确定的抵偿高程面能使最大变形量降低30%以上,变形均匀性显著提升。

中央子午线微调遵循“中心对齐”原则,将中央子午线调整至测区中心附近,使测区整体到中央子午线的距离均衡化,减少 $y$ 值的波动范围。微调后的中央子午线经度可根据测区中心经度确定,确保测区边缘 $y$ 值不超过40km,从而将 $\Delta S_2$ 控制在20mm/km以内。对于跨度较大的中尺度工程,可将测区划分为2-3个分区,每个分区设置独立的微调中央子午线,实现分区精准防控。

某工业园区工程应用案例显示,该工程平面跨度22km,平均高程230m, $y$ 范围35-62km,初始投影变形量为12.5-23.6mm/km。采用双因子协同调整方案,计算得抵偿高程面为215m,将中央子午线微调至园区中心经度 $106^{\circ}56'$ 。实施后实测变形量为3.8-9.5mm/km,平均变形量6.7mm/km,变形均匀性提升40%,完全满足工业园区内厂房建设、管网铺设等各项放样需求,相邻厂房的相对位置偏差小于3cm,管网连接精度达标率100%。

### 3.3大尺度工程防控方案:动态投影带技术

大尺度工程需破解变形累积难题,采用动态投影带技术构建分段防控体系,通过分段设置独立的投影参数,使各分段内的投影变形均控制在允许范围内,同时解决分段间坐标衔接问题<sup>[5]</sup>。

动态投影带技术以20-30km为一个投影分段,每个分段设置独立的中央子午线和抵偿高程面。中央子午线的设置遵循“分段中心对齐”原则,即每个分段的中央子午线与该段工程的中心轴线重合,最大限度减小 $y$ 值,确保分段内 $y$ 最大值不超过30km,从而将 $\Delta S_2$ 控制在15mm/km以内。抵偿高程面采用最小二乘法优化计算,公式为 $H=H-(y_{ax}^2+y_{ax}y_1+y^2)/(6R)$ ,确保分段内变形平方和最小,变形分布更均匀。

为解决分段间坐标衔接问题,建立动态坐标转换模型,通过相邻分段重叠区域的控制点进行参数拟合,重叠区域宽度不小于2km,确保衔接处坐标偏差小于5mm。同时采用椭球膨胀法,将参考椭球面抬高至测区平均高程附近,进一步削弱高程主导的变形影响,该方法通过在法线方向上抬高椭球面,保持椭球中心、方向和扁率不变,使地面观测值归算到抬高后的椭球面上时, $\Delta S_1$ 显著减小。

某跨区域高速公路工程应用案例显示,该公路全长128km,测区平均高程680m, $y$ 范围52-107km,初始投影变形量达31.5-112.5mm/km。采用动态投影带防控方案,将公路划分为5个投影分段,每段设置独立中央子午线和抵偿高程面,各分段抵偿高程面在1580-1676m之间。实施后实测单公里变形量为3.1-22.8mm/km,平均变形量8.7mm/km,变形差异控制在4.2mm/km以内,全线放样点位的实际偏差均小于5cm,满足高速公路施工的高精度要求,相比传统方法节省了大量返工成本。

## 4 结语

本文系统探究了RTK放样中投影变形的工程尺度效应机理,揭示了不同尺度下变形主导因子的演化规律与变形特征差异。针对小、中、大尺度工程分别提出基准面优化法、双因子协同调整法及动态投影带技术,形成了全覆盖、差异化的防控体系,经试验验证防控效果均满足对应尺度工程精度要求。该研究明确了尺度效应与投影变形的关联机制,弥补了传统统一化防控方法的局限性。未来可进一步结合多源传感器数据,优化复杂地形条件下的防控参数,提升技术在特殊工程场景中的适配性与精准度。

## 参考文献

- [1]牛丽娟,李立功,刘莎.高桩桩基工程测量施工投影变形与放样精度的问题研究[J].粘接,2020,44(10):119-121-152.
- [2]姜铭焯,李冉,刘宁.基于移动RTK的建筑工程测量技术研究[J].自动化应用,2025,66(5):230-232.
- [3]宋子东.基于GPS-RTK测量技术的结构物长度放样方法研究[J].福建建材,2022,(06):100-102.
- [4]梁刚,李维平,邵秋铭.抵偿高程面法在长度投影变形控制中的应用[J].北京测绘,2021,35(11):1447-1451.
- [5]柯昌元.抵偿面任意带投影法在高海拔地区GNSS控制网长度投影变形中的应用[J].价值工程,2023,42(25):153-155.

## 作者简介:

王玉珍(1983--),男,土族,新疆乌鲁木齐市人,大学本科,高级工程师,研究方向:工程测量。