

工程测量中的坐标转换与投影改正研究

陈毅 320902199610177012

摘要: 工程测量是基础设施建设、城市规划与自然资源开发的核心基础工作，测量成果的精度直接决定工程项目的设计质量与施工安全。在实际测量作业中，不同测量系统采用不同的坐标基准与投影框架，坐标系统之间的差异会产生系统性误差，影响测量成果的统一性与可靠性。本文围绕工程测量领域的坐标转换与投影改正问题展开研究，梳理常用坐标系统的基本框架，分析坐标转换的常用模型与精度影响因素，探讨高斯-克吕格投影下投影改正的计算方法与应用场景，结合工程实践总结坐标转换与投影改正的优化策略。研究表明，合理选择坐标转换模型、严格执行投影改正流程，能够有效降低工程测量中的系统误差，提升测量成果的精度，为各类工程建设提供可靠的测绘保障。

关键词: 工程测量；坐标转换；投影改正；测量精度

一、引言

随着我国基础设施建设规模不断扩大，高精度工程测量对项目全生命周期的支撑作用愈发凸显。工程测量作业中，测量人员通常会根据作业需求选用不同的测量设备与坐标基准，例如全球导航卫星系统（GNSS）直接获取的是 WGS-84 大地坐标，而我国工程建设普遍采用 2000 国家大地坐标系或者地方独立坐标系，部分老旧项目还保留着 1980 西安坐标系、1954 北京坐标系成果。不同坐标基准之间存在基准偏移、旋转与尺度差异，若不进行精准的坐标转换，会导致测量成果无法衔接，甚至引发设计与施工的偏差。同时，我国大部分工程测量采用高斯-克吕格投影将椭球面坐标转换为平面坐标，投影过程中会产生长度变形，当项目测区范围较大或者海拔较高时，长度变形会超出工程测量的精度允许范围，必须通过投影改正消除变形影响。

二、工程测量常用坐标系统概述

2.1 地心坐标系与参心坐标系

工程测量中常用的坐标系统分为地心坐标系与参心坐标系两类。地心坐标系以地球质心作为坐标原点，WGS-84 坐标系与 2000 国家大地坐标系（CGCS2000）都属于地心坐标系，其中 CGCS2000 是我国目前法定的官方坐标基准，广泛应用于各类国土测绘与工程建设项目。参心坐标系以参考椭球的中心为坐标原点，原

点与地球质心不重合，我国早期使用的 1954 北京坐标系、1980 西安坐标系都属于参心坐标系，这类坐标系是特定历史时期测绘成果的基准，在老旧工程改造、历史数据衔接中仍然需要使用。

2.2 地方独立坐标系

很多城市与大型工程为了降低投影长度变形，会建立适合本区域的独立坐标系，一般将坐标原点选在测区中心，采用自定义的中央子午线，将投影面设置在测区平均高程面上，以此减小投影变形对工程长度的影响。地方独立坐标系与国家坐标系之间没有统一的转换参数，需要通过公共点求解转换关系，才能实现成果的衔接。

三、坐标转换的常用模型与精度分析

3.1 三参数转换模型

三参数转换模型是坐标转换中最简单的模型，假设两个坐标系之间只存在原点的平移误差，不考虑旋转与尺度变化，转换公式为： $X_2=X_1+\Delta X$ ， $Y_2=Y_1+\Delta Y$ ， $Z_2=Z_1+\Delta Z$ ，其中 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 就是三个平移参数。三参数模型计算简单，对转换精度要求不高、测区范围较小的场景能够满足需求，但是由于忽略了旋转与尺度误差，当测区范围较大或者两个坐标基准差异较大时，转换误差会超出允许范围。

3.2 七参数转换模型

七参数布尔莎模型是目前三维坐标转换中精度最高的常用模型，除了三个平移参数之外，还包含三个旋转参数（绕 X、Y、Z 轴的旋转角 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z ）和一个尺度变化参数 k，能够全面反映两个坐标系之间的基准差异。七参数转换需要至少三个公共已知点求解参数，公共点的分布与精度直接决定转换结果的精度。在工程测量中，当需要进行不同基准之间的高精度转换时，普遍采用七参数模型，转换精度能够满足厘米级甚至毫米级工程测量需求。

3.3 平面四参数转换模型

平面四参数模型是工程测量中最常用的二维坐标转换模型，适用于同一个椭球基准下不同平面坐标系之间的转换，四个参数分别为两个平移参数 ΔX 、 ΔY ，一个旋转参数 α 和一个尺度参数 m。平面四参数转换只需要两个公共点就可以求解参数，若有多个公共点可以通过最小二乘法优化参数，提升转换精度。在地方

独立坐标系与国家坐标系之间的转换、同一测区不同时期测量成果衔接中，平面四参数模型应用十分广泛，计算简便且精度能够满足大多数工程需求。

四、投影改正的原理与工程应用

4.1 高斯-克吕格投影变形的来源

高斯-克吕格投影是一种等角横切椭圆柱投影，投影过程中保持角度不变，但是会产生长度变形，变形大小与点到中央子午线的距离和点的高程有关。长度变形主要来自两个部分：第一部分是椭球面边长归算到高斯投影平面产生的变形，离中央子午线越远，变形越大；第二部分是地面实测边长归算到参考椭球面产生的变形，点的海拔越高，归算变形越大。两项变形叠加之后，当测区离中央子午线超过 30km，或者平均海拔超过 1000m 时，长度变形会超出《工程测量规范》规定的 1/40000 精度要求，必须进行投影改正。

4.2 投影改正的计算方法

工程测量中常用的投影改正分为两步：首先对地面实测边长进行高程归化改正，将地面实际边长归算到参考椭球面上，改正公式为 $\Delta S_1 = -S \cdot H / R_a$ ，其中 S 为地面实测边长， H 为测区平均高程， R_a 为参考椭球面在该区域的平均曲率半径，改正后椭球面边长 $S_1 = S + \Delta S_1$ ；其次进行投影改算，将椭球面边长归算到高斯投影平面，改正公式为 $\Delta S_2 = S_1 \cdot y^2 / (2R_m^2)$ ，其中 y 为该边两端点横坐标的平均值， R_m 为该区域的平均曲率半径，改正后高斯平面边长 $S_2 = S_1 + \Delta S_2$ 。

五、工程实践中的优化策略

在实际工程测量作业中，为了提升坐标转换与投影改正的精度，可以从三个方面优化工作流程：第一，提前收集测区已有高精度控制点成果，尽量选择分布均匀、覆盖全测区的公共点，公共点数量不少于 3 个，对公共点进行外业复核，剔除存在粗差的控制点，保证转换参数的可靠性；第二，根据工程精度要求与测区实际情况选择合适的转换与改正模型，小范围市政工程可以采用平面四参数转换结合地方坐标系投影改正，大范围跨区域工程优先选用 CGCS2000 坐标系下的七参数转换，结合分带投影改正控制变形；第三，转换完成后对成果进行精度检核，选择不少于 2 个未参与参数计算的控制点进行比对，检查转换残差是否满足

六、结论

坐标转换与投影改正是工程测量中保障成果精度的核心环节，不同坐标基准之间的差异与投影变形会对工程建设产生系统性的误差影响，必须按照规范要求进行精准处理。本文研究表明，针对不同的转换场景选择合适的坐标转换模型，合理控制公共点的精度与分布，能够有效提升坐标转换精度；针对投影变形的来源，分步骤进行高程归化改正与投影变形改正，可以将投影变形控制在工程允许的精度范围之内。在实际工程中，严格执行坐标转换与投影改正的作业流程，做好成果检核，能够为工程设计、施工与运营提供高精度的测绘保障，提升工程建设的质量与安全性。

参考文献

- [1] 李征航. 大地测量学基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50026-2020 工程测量标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [3] 姜晨光. 工程测量中坐标转换方法的应用研究[J]. 测绘工程, 2018, 27(3): 41-45.