引文格式：郑涛,卢自来. 川西山区公路工程坐标系的建立方法研究与实现[J]. 地理空间信息, 2025, 23(10):125-128. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.10.027

川西山区公路工程坐标系的建立方法研究与实现

郑　涛[1]，卢自来[1*]
（1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司，四川 成都 610017）

摘　要：针对我国川西山区公路高差大的特点，分析了测区工程投影变形的变化规律，并总结了高斯投影变形的特性。利用中央子午线和高程投影面的最佳选取方法及相应计算模型，有效控制了高斯投影的长度变形。探讨了在不同地形条件下建立平面坐标系的方法，结合抵偿坐标系和任意带坐标系的优势，建立多个抵偿任意带坐标系，随后通过公共点实现坐标系的平移拼接，解决了地形高差大且跨度大的带状测区工程坐标系的建立与统一问题。测量控制网的布设和工程独立坐标系的建立是公路工程建设中不可或缺的一部分，其成果对测图、勘察设计等环节具有重要意义。

关键词：川西山区公路；高斯投影；工程独立坐标系；投影变形；坐标统一
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）10-0125-04

Research on the Establishment Method and Implementation of Highway Engineering Coordinate System in the Mountainous Area of Western Sichuan Province

ZHENG Tao[1], LU Zilai[1]
(1. Sichuan Transportation Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of large elevation difference of highway in the mountainous area of western Sichuan Province, we analyzed the change laws of projected deformation in the survey area and summarized the characteristics of Gaussian projected deformation. We used the best selection method of central meridian and elevation projection surface and the corresponding calculation model to control the length deformation of Gaussian projection effectively. Then, we discussed the establishment method of plane coordinate system under different terrain conditions, and combined the advantages of offset coordinate system and arbitrary band coordinate system to establish multiple offset arbitrary band coordinate system. Finally, we realized the translation and splicing of coordinate system through the common point, which could solve the establishment and unification of engineering coordinate system of band measurement area with large terrain elevation difference and large span. The laying of measurement control network and the establishment of engineering independent coordinate system are indispensable parts of highway engineering construction, and their results are of great significance for mapping, survey and design.

Key words: highway in the mountain area of western Sichuan Province, Gaussian projection, engineering independent coordinate system, projection deformation, coordinate unification

国家标准大地坐标系（CGCS2000）可以通过换带计算的方法进行方便的转换[1-3]，但在大多数区域并不能满足投影变形的需要，尤其是高海拔地区或者远离标准中央子午线远的区域[2-6]。因此，可以利用高斯平面投影和高程抵偿投影来综合分析投影变形的影响[7]。通过选择适当的测区中央子午线和对投影高进行调整，使控制点的投影变形满足公路施工对不同公路建（构）筑物投影变形精度等级的要求，即保证公路施工中路线对投影长度变形小于 25 mm/km，以及大型构造物对投影长度变形小于 10 mm/km 的要求[8-9]。

1　研究区概况

川西山区位于中国四川省西部，地形复杂多样，是青藏高原东缘的重要组成部分。区域内主要包括横断山脉、邛崃山脉和岷山等多条山脉，海拔高度变化显著，最高峰贡嘎山海拔达 7 556 m。由于地处青藏高原和四川盆地的过渡地带，该地区地形陡峭，山高谷深，河流切割剧烈，形成了众多深谷和峡谷。川西山区气候多样，垂直气候分布显著，从山麓的亚热带气候到高山的寒带气候不等，植被丰富多样。复杂的地形和气候条件为公路控制测量带来了极大挑战。

项目来源：四川省交通勘察设计研究院有限公司科技项目（232022015、232022016）。
第一作者简介：郑涛（1988—），本科，高级工程师，研究方向为内河航道及公路工程测量，E-mail：522759949@qq.com。
通信作者：卢自来（1982—），本科，正高级工程师，注册测绘师，研究方向为内河航道及公路工程测量，E-mail：454653012@qq.com。

为了应对这些挑战，工程独立坐标系的精确建立和应用至关重要，它不仅有助于准确定位和测绘，还能为工程施工和管理提供可靠的基础数据支持。

2 高斯投影和投影变形的控制措施

2.1 高斯投影

2.1.1 高斯投影长度变形和高程归化

高斯投影是一种等角横切椭圆柱投影，由德国数学家高斯提出，并由德国大地测量学家克吕格加以补充完善，故又称“高斯—克吕格投影”，简称“高斯投影”。根据高斯投影公式，平面投影变形的大小与距离中央子午线的横坐标值相关，计算公式：

$$\frac{\Delta S}{S}=\frac{y_m^2}{(2R^2)} \tag{1}$$

式中，$\frac{\Delta S}{S}$ 为长度相对误差；y_m 为边两端点的平均横坐标值；R 为地球曲率半径。该值即为东西方向长度变形（恒为正）。

根据测区高差范围，将某一边长由边长施测高程面（即边长两端点高程的平均值）投影到某一归算高程面时，边长归算计算公式为：

$$D_1=D_2-\frac{H_1-H_2}{R}\times D_2 \tag{2}$$

式中，D_1 为归算高程面的平距边长；D_2 为施测高程面的平距边长；H_1 为施测高程面高程；H_2 为归算面高程；R 为归算高程面相应纬度的地球曲率径。（参考椭球相应纬度地球曲率半径加上归算面高程）由上式知，当要求：

$$\frac{D_1-D_2}{D_2}=-\frac{H_1-H_2}{R}\leqslant\frac{1}{40\,000} \tag{3}$$

2.1.2 综合形变

由上可知，高斯平面投影和高程投影是会同时存在并发生作用，根据已知的公式原理可推出：横向 Y 坐标方向的长度变形（恒为正）与高差的投影长度变形（若归算高程面低于施测高程面时为负，反之为正）。当归算面低于施测面时，高程投影变形可抵消高斯投影变形。在总变形量固定下，优化两变形值，设计最优工程独立坐标系，减少坐标系数量，确保变形精度。

综合影响计算公式：

1）按 $\frac{1}{T}=\frac{y_m^2}{(2R^2)}$ 计算东西方向长度变形（恒为正）；

2）按 $\frac{1}{T'}=\frac{(H_{归}-H_{测})}{R}$ 归计算高差的投影长度变形（当归算面低于施测面时负）；

3）计算二者的联合影响的公式为：

$$\frac{1}{T}=\frac{1}{T}+\frac{1}{T'} \tag{4}$$

为了使投影变形不大于1/40 000，即是公式（4）的值不大于1/40 000，即是高斯投影长度变形和高程归化的综合影响。

2.2 投影变形的控制措施

从图1和2可以看出，测区与中央子午线的距离（y_m）及其平均大地高（H_m）对投影变形有显著影响。具体而言，随着 y_m 的增加，H_m 也呈现上升趋势。按照公式（1）反算，工程独立坐标系的带宽应为45 101 m即57′，以满足工程测量投影变形不大于1/40 000的规范要求[10]。进一步观察显示，H_m 的阈值159 m成为影响测区长度变形范围的关键因素。建立工程独立坐标系包括选择工程独立坐标系的中央子午线和确定投影高程面[11-12]。

直接采用国家3°带坐标系：对于距离中央子午线不超过45 km（即$|y_m|\leqslant$45 km）且平均大地高不超过159 m（$H_m\leqslant$159 m）的测区，可直接采用国家标准的3°带平面直角坐标系，无需额外转换。

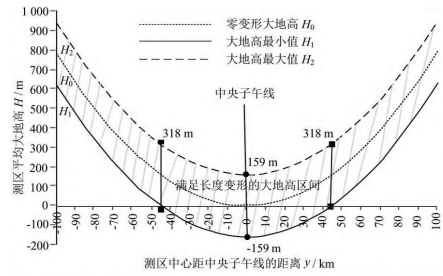


图1 满足长度变形的大地高与测区范围分布图1

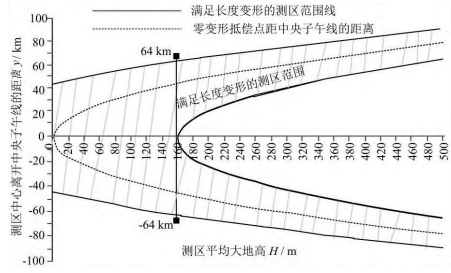


图2 满足长度变形的大地高与测区范围分布图2

建立抵偿坐标系：抵偿坐标系的关键在于选择与国家3°带中央子午线一致的中央子午线。当测区位于中央子午线两侧45 km内但平均大地高超过159 m（H_m>159 m）时，虽然投影改正较小，仍需通过调整 H_m 来建立抵偿坐标系，以减少投影变形。当 H_m 超过159 m时，满足长度变形要求的测区范围会随着 y_m 的增加而逐渐缩小，且这些测区倾向于远离中央子午线。

抵偿坐标系尤其适用于平均大地高较高（H_m>159 m）且东西边界距中央子午线不超过64 km的测区。建立抵偿坐标系亦是通过优化 H 值（即测区平均高程面与高程抵偿面之间的高差），旨在使测区中心位置的投影变形趋近于零，同时确保测区边缘地区的长度变形也控制在规定的合理范围内，参考公式（1）。

建立任意带坐标系：此类坐标系统采用国家坐标系的参考椭球面作为投影面，但其中央子午线并不遵循国家标准的3°带划分，而是根据实际需要自定义。对于距离中央子午线超过45 km（y_m>45 km）但平均大地高不超过159 m（H_m≤159 m）的测区，可通过调整 y_m 选择更合适的中央子午线来建立任意带坐标系。这种坐标系适用于平均大地高较低且东西跨度不超过90 km的测区，有助于减少因远离中央子午线而产生的投影变形，参考公式（3）。

建立抵偿任意带坐标系：结合高程抵偿面与自定义中央子午线的双重优势，通过同时调整抵偿高 H 和新设定的中央子午线位置来综合抵消由投影和高程归化引起的变形影响。对于距离中央子午线较远（y_m>45 km）且具有较高平均大地高（H_m>159 m）的测区，需同时调整 H_m 和 y_m 来建立抵偿任意带坐标系。此类坐标系适用于平均大地高超过159 m且东西跨度在90 ~128 km之间的测区。

一般公路工程线路跨度比较大，属于带状测区，为了便于后期施工，需要将几个抵偿任意带坐标系统一到一个坐标系，每相邻坐标系重合一对控制点，该控制点满足相邻2个坐标系的投影变形需求。再利用相邻坐标系重合的公共点朝同一方向进行旋转和平移，合并为一个工程独立坐标系，可以理解为“拼接坐标系”，接下来，本文将通过3个不同场景的实例来具体阐述工程独立坐标系的建立方法。

3　实例应用

3.1　建立并“拼接”多个抵偿任意带坐标系

以G7611线昭通（川滇界）至西昌段高速公路A1标段四等平面控制网的建立为例。本项目是《四川省高速公路网规划（2008—2030）》的第5条东西横线中的一部分，包含11座隧道，其中金阳超长隧道长度达12 072.5 m、特长隧道4座，总长18 727 m，长隧道6座，总长9 151.0 m。无中短隧道，隧道长度占路线总长度的55.42%；全段桥隧比82.44%，是典型的四川西部山区高速公路。测区长75.8 km，东西跨度36.2 km，南北跨度50.3 km，地形高差约为1 300 m。测区范围较大，控制点的选择应方便其他测量手段进行扩展与联测，尽量选择在交通便利的地区，以提高作业效率[13]。

根据对控制点变形情况的分析（见表1），由于测区经度跨度大且高差超过318 m，单一的中央子午线和投影高无法满足全路段控制点的投影变形要求，因此需建立多个抵偿任意带坐标系。为此，将工程坐标系中央子午线设为测区平均经度103°，设置抵偿高程投影面为900、1 200 、1 400、1 700 、2 000 m，从而建立5个独立的抵偿任意带坐标系。根据国家有关规范要求，在大、中型工程测量中，其控制网必须与国家控制点联测[14]，本项目联测了3个国家控制点，以此计算出控制点的国家3°带坐标。

表1　公共控制点投影变形计算简表

点号	拟定中央子午线	距拟定中央子午线距离	投影高（高程）	平面投影变形	高程投影变形	综合变形
GP23	103.00	−1 223	2 000	54 364 689	45 131	45 094
GP24	103.00	−766	2 000	138 533 773	42 103	42 090
GP23	103.00	−1 223	1 700	54 364 689	−47 995	−48 038
GP24	103.00	−766	1 700	138 533 773	−57 124	−57 148

通过坐标换带计算，将控制点国家3°带坐标转换成以103°为中央子午线，5个投影高的抵偿任意带坐标系的坐标。相邻坐标系的公共控制点需为2个（一个用于平移，一个用于检查误差），投影变形都不大于1/40 000。如表1显示，控制点GP23和GP24为一组通视的控制点，2个点在设置投影高为2 000、1 700 m时，综合投影变形均满足不大于1/40 000的要求，因此选择其中一个点作为2个坐标系的公共点。通过相邻独立坐标系重合的公共点进行旋转和平移操作，将5个抵偿任意带坐标系“拼接”在一起。具体来说，将以900、1 200、1 700、2 000 m为投影高的抵偿任意带坐标系依次平移，合并到以1 400 m为投影高的坐标系上，从而形成以103°为中央子午线，1 400 m为投影高的统一独立坐标系。

3.2　选择国家3°带坐标系作为工程独立坐标系

在实际工程建设中，为满足工程测量的精度要求，对于偏离中央子午线不远且地面平均高程不大的地区，通常采用国家统一3°带高斯正形投影平面直角坐标系[15]。在此投影条件下，测区东西向的长度变形恒为正，而当归算面低于施测面时，高差的投影变形为负，两者相互抵消，满足公式（4）中的变形控制要求，即投影变形小于1/40 000。

以S208西充县罐垭（南部界）至车龙（嘉陵界）段改建工程初步勘察设计测量控制网建立为例。该测

区长度51 km，经度范围105°41′~105°46′，路线整体呈南北走向，因此经差比较小，且测区内的高程差异不大。通过对测区控制点的投影变形分析可见，本项目若直接选择国家3°带坐标系，则高斯投影的综合变形值正好满足小于1/40 000的精度要求，如表2所示。

根据上表综合变形的情况，直接选择国家3°带坐标系作为工程独立坐标系是可行的。在公路勘察设计工作中，常常需要用到基本农田和林地类的规划图，而这类图通常采用国家3°带坐标系，将设计直接基于国家3°带坐标系的地形图，有助于与这些规划图无缝拼接，同时也便于应用国土部门的标准坐标系，减少坐标转换时的误差。这不仅提高了工作效率，还保障了设计过程中的精度要求。

表2 控制点投影变形计算简表

点号	拟定中央子午线	距拟定中央子午线距离	投影高（高程）	平面投影变形	高程投影变形	综合变形
GP01	105.00	67 278	0	17 975	−15 186	−97 877
GP02	105.00	66 496	0	18 401	−15 321	−91 549
GP03	105.00	66 430	0	18 437	−15 066	−82 405
…	…	…	…	…	…	…
GP66	105.00	74 194	0	14 780	−19 528	60 795

3.3 提升测区大型建（构）筑物平面控制网精度

川西地区泸定至石棉高速路控制网同样具有代表性，该项目测区涵盖多条长隧道和桥梁，部分控制点的平面等级要求更高。根据规范要求，测区因长隧道和桥梁的GPS平面等级分别有二等、三等、四等控制点，变形精度要求分别为1/100 000、1/70 000、1/40 000。GPS平面等级二等要求的建（构）筑物为隧道Ⅰ和隧道Ⅱ，2个隧道相邻且隧道口控制点平均高程为1 000 m，建（构）筑物附近中央经线为102°18′。首先建立各个任意带高程抵偿坐标系，满足四等GPS平面精度要求（投影变形小于1/40 000），然后利用相邻独立坐标系重合的公共点进行平移，控制点全部往隧道Ⅰ和隧道Ⅱ区域平移，合并得到一个以中央子午线102°18′，投影高1 000 m的工程独立坐标系，使全部控制点达到GPS平面四等精度要求。根据测量规范要求，对需要提升平面等级的隧道或桥梁的控制点进行单独布网（施测时进行相应等级要求的静态测量），并根据每个控制网的中央子午线和投影高条件，分别进行平差计算，得到每组控制点的平面坐标。然后，以每组控制点中的一个公共点为基准，将各组控制点坐标移至满足GPS四等精度的工程独立坐标系，最终获得各个局部独立控制网的平差成果，实现隧道平面等级的提升，确保全线控制点满足不同投影变形精度需求。

4 结 语

本文探讨了复杂地形下公路工程控制测量的坐标系选择和应用策略。结果表明，通常情况下应优先采用CGCS2000坐标系，若不满足投影变形要求，可建立抵偿坐标系或多坐标系拼接。大型工程应选用区域中央经线与平均高程作为参数，以提高精度，适应复杂工程需求。

参考文献

[1] 卢立. 基于CGCS2000的宜昌2000坐标系建立方法[J]. 地理空间信息,2022,20(9):148-151

[2] 宁津生,陈俊勇,李德仁,等. 测绘学概论[M]. 武汉:武汉大学出版社,2016

[3] 郭迎钢,李宗春,刘忠贺,等. 工程测量平面控制网计算基准面选定方法[J]. 测绘科学报,2020,37(3):232-238

[4] 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,2024,48(7):96-103

[5] 屈文强. 关于山区高速公路控制测量网建立方法的探究[J]. 现代测绘,2020,43(4):19-22

[6] 吴迪军,曹诗荣,鹿星亮. 山区高速公路控制测量技术研究[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(2):1-4

[7] 卢自来,朱运权,刘超群. 山区高速公路控制测量的应用分析[J]. 地理空间信息,2024,22(7):88-92

[8] 王怀念. 最佳抵偿投影面的理论推导[J]. 测绘通报,2004(10):18-19

[9] 中交第一公路勘测设计研究院. 公路勘测细则:JTG/T C10-200 [S].

[10] 卢自来. 工程独立坐标系的建立与统一[J]. 中国新技术新产品,2015,22(21):148-149

[11] 谭文专,汤阳城. 公路设计与施工测量中独立坐标系的建立[J]. 地理空间信息,2014,12(6):110-112

[12] 胡万兵,刘祖强,贾进科,等. 顾及高程变化的公路控制测量坐标系选择研究[J]. 地理空间信息,2007,5(6):106-108

[13] 张雪峰,韩树祥,石雪峰,等. GNSS静态观测技术在石油勘探坐标转换中的应用[J]. 地理空间信息,2023,21(3):133-135

[14] 吴国荣,章冬保,陈龙邦. 投影于抵偿高程面上的坐标计算方法及其公式推导[J]. 科技创新导报,2007,34(3):39

[15] 范忠德,朱兆砥. 适用于带状区域施工测量的独立平面坐标系[J]. 能源技术与管理,2009,33(1):68-69