引文格式：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. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.07.020

山区高速公路控制测量的应用分析

卢自来[1]，朱运权[1*]，刘超群[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：探讨了山区高速公路场景控制网构建关键制约因素，提出了一套控制测量技术方案。以四川省西部山区某高速公路为例，顾及现场环境、气候特征，从平面控制测量、高程控制测量和注意事项等角度阐述了潜在的问题与解决措施，合理组织工序，解决了控制点投影变形误差大、高程精度低等问题。该方案针对性强，参考价值高，可快速在类似工程场景下复用。

关键词：山区高速公路控制测量；中央子午线；抵偿投影面；三角高程测量
中图分类号：P217　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）07-0088-05

Application Analysis of Control Survey of Mountainous Highway

LU Zilai[1], ZHU Yunquan[1], LIU Chaoqun[1]
(1. Sichuan Transportation Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: We discussed key constraints on the construction of control networks for mountainous highway scenes, and proposed a set of control survey technology solutions. Taking a mountainous highway in western Sichuan Province for example, we elaborated potential problems and solutions from the perspectives of planimetric control survey, elevation control survey and precautions. Taking into account the site environment and climatic characteristics, we reasonably organized the process to solve problems such as large projection deformation errors of control points and poor elevation accuracy. The solution is highly relevant, has high reference value and can be quickly reused in similar engineering scenarios.

Key words: control survey of mountainous highway, central meridian, compensating projecting plane, trigonometric leveling

高速公路被誉为一个国家或地区走向交通现代化的重要标志，是发展现代交通业的必由之路。加快构建高速公路网布局与建设是我国“十四五”期间公路交通网建设的重要内容之一[1]。目前我国高速公路建设重点已从平原转战到山区，建造形式与组织方式更为复杂。山区高速公路地形起伏较大，水文地质条件复杂，隧道桥梁众多，相较于平原、丘陵地区，山区高速公路控制测量难度更大[2-3]。控制测量的平面坐标系统和高程系统都需要与国家坐标系建立联系[4]。目前国家高程系统已统一为1985国家高程基准；而国家平面坐标系统较多，分为6°带和3°带，根据中央子午线不同前者共有11个坐标系统，后者共有21个坐标系统，所有平面坐标系统的高程投影面都是0 m[5]。由于山区高速公路海拔高、高差大、路线长，在不考虑大型构造物时，采用国家平面坐标系，其投影变形精度大部分都不能满足公路施工的投影变形小于1/40 000的要求，因此在山区高速公路平面控制测量中需建立工程独立坐标系[6]。根据投影变形公式，想要满足投影变形小于1/40 000的要求，控制点偏离选定的中央子午线的最远距离为45 km，低于或高于选定的高程投影面的最大高差为159 m，因此当高速公路东西跨度超过90 km或高差大于318 m时，一个工程独立坐标系难以满足工程施工要求，需建立多个工程坐标系[7]。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[8-9]两个内容。众所周知，在投影变形中中央子午线的投影变形恒为正，即距离中央子午线越远投影变形越大，高程投影变形则有正有负。在山区高速公路控制测量中，需要建立多个工程独立坐标系时，最好选择同一个中央子午线，因为子午线收敛角相同，各坐标系之间不存在旋转问题，方便将不同坐标系统一到一个坐标系。通过投影高的变换使控制点的投影变形满足公路施工对不同公路构筑物投影变形精度等级的要求，即满足公路施工中路线对投影长度变形小于25 mm/km和大型

收稿日期：2023-02-15。
项目来源：四川省交通勘察设计研究院有限公司科技资助项目（232022015、232022016）。
第一作者简介：卢自来（1982—），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：454653012@qq.com。
通信作者：朱运权（1978—），本科，高级工程师，研究方向为工程测量，E-mail：zhuyunquan@scodi.cn。

构造物对投影长度变形小于10 mm/km的要求[10-11]。

1　工程控制网的布设

1.1　项目概况

四川省西部山区某高速公路是《四川省高速公路网规划（2014—2030年）》中8条纵线之一的重要组成部分。项目全线总长约为100 km，东西跨度约为15 km，南北跨度约为84 km，高差约为600 m；隧道长度大于6 000 m的隧道两座（隧道Ⅰ~Ⅱ），长度为3 000~6 000 m的隧道9座（隧道Ⅲ~Ⅺ），其余隧道长度均小于3 000 m；多跨桥梁总长为1 000~2 000 m的特大桥3座（特大桥Ⅰ~Ⅲ），单跨桥梁长度均小于150 m；桥隧比为78.6%，为典型的西部山区高速公路。

1.2　控制网布设

在保证控制点沿线路均匀布设、点位稳定可靠、视野开阔的基础上，全线共埋设80个平面控制点，其中隧道Ⅰ~Ⅱ共布设9个二等平面控制点；隧道Ⅲ~Ⅺ共布设40个三等平面控制点；其余为四等平面控制点。全线路共埋设80个高程控制点，与平面控制点共用同一控制点，其中隧道Ⅰ~Ⅱ共布设13个二等高程控制点（二等高程控制路线经过的控制点全部按二等高程控制点测量）；隧道Ⅲ~Ⅺ和特大桥Ⅰ~Ⅲ共布设52个三等高程控制点；其余为四等高程控制点，平面和高程控制点等级选用均满足规范要求。隧道Ⅰ、隧道Ⅱ附近的控制点网见图1。

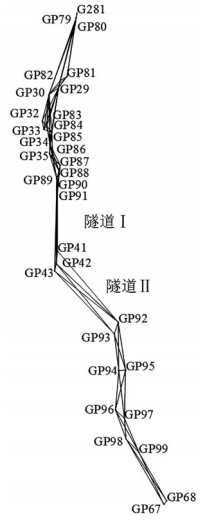


图1　部分控制点网图

2　平面控制测量

2.1　中央子午线与投影高程面的选取

工程独立坐标系中央子午线和投影高程面可根据工程要求灵活选取，但应满足投影变形四等小于1/40 000、三等小于1/70 000、二等小于1/100 000的要求[11]。按照投影变形的要求，项目中央子午线选取102°18′，投影高程面分别选取950 m、1 000 m、1 120 m、1 200 m、1 300 m、1 500 m，考虑方便设计和施工连贯性，通过公共点平移的方式确定一个抵偿投影面，最后确定项目的工程独坐标系统为CGCS2000椭球、中央子午线102°18′、抵偿投影高程面1 000 m。由于项目属于山区，控制点点位选择有时不能完全满足控制点等级对投影变形的要求，如表1所示，GP89、GP90、GP91、GP41、GP42、GP43为隧道Ⅰ二等控制点，其投影变形全部满足小于1/100 000的要求；GP41、GP42、GP43、GP92、GP93、GP94为隧道Ⅱ二等控制点，由于二等平面控制点点位高差较大，不能全部满足小于1/100 000的要求，此时就要根据隧道施工测量方法来选择最佳投影面。隧道施工全部在隧道内，不能接收GNSS卫星信号，隧道内放线只能采用全站仪极坐标测量，且本项目平面控制测量为同一中央子午线，控制点之间不存在旋转问题，因此只要靠近隧道进出口的两个控制点的投影变形小于1/100 000即可，即GP43和GP92（高程和出口路线设计高程一致）两点间的投影变形小于1/100 000，隧道Ⅱ高程投影面选择1 120 m，刚好满足GP43–GP92投影变形小于1/100 000。当项目的三等平面控制点投影变形不能全部满足小于1/70 000的要求时，也可按照该方法改进，以确保隧道的贯通精度。

2.2　控制点观测

观测方法采用以多个同步观测环为基本组成的网观测模式，同步环之间以边连接的方式构建行观测网。收集到测区附近国家C级及以上高等级控制点3个，基本均匀分布在测区范围，并同步联测这3个国家高等级控制点。GNSS观测时的卫星截止高度角、同时观测有效卫星数、有效观测卫星总数、观测时段数、时段长度、数据采样间隔均满足规范规定[12]。

2.3　控制网平差

控制网平差按平面控制点二、三、四等级分别平差，先进行全线路GNSS控制网平差，按四等进行平差，再进行二、三等GNSS控制网平差，按隧道和等级分别进行局部平差。GNSS控制网平差前需进行GNSS基线解算，参与平差的GNSS基线应全部满足规范要求；并根据实际需要选定起算数据和相应的地面坐标，对起算数据的可靠性和精度进行检查分析，满足规范要求后进行GNSS控制网平差[11]。平差时首先以一个点的WGS84坐标为起算依据进行无约束平差，

表1 隧道Ⅰ、Ⅱ控制点投影变形计算表

点号	经度/(° ′ ″)	高程/m	投影高/m	平面投影变形	高程投影变形	综合变形	平面等级
GP89	***.**50286	1 159	1 200	1/608 148	1/155 474	1/123 819	二等
GP90	***.**54028	1 189	1 200	1/618 793	1/578 064	1/298 868	二等
GP91	***.**52673	1 209	1 200	1/614 866	−1/695 523	1/5 302 117	二等
GP41	***.**52541	1 242	1 200	1/613 950	−1/152 233	−1/202 426	二等
GP42	***.**48795	1 254	1 200	1/603 125	−1/117 116	−1/145 337	二等
GP43	***.**42375	1 181	1 200	1/585 489	1/330 560	1/211 276	二等
GP41	***.**52541	1 242	1 120	1/613 950	−1/52 330	−1/57 206	二等
GP42	***.**48795	1 254	1 120	1/603 125	−1/47 440	−1/51 490	二等
GP43	***.**42375	1 181	1 120	1/585 489	−1/105 092	−1/128 083	二等
GP92	***.**17955	1 068	1 120	1/2 272 332	1/122 142	1/115 911	二等
GP93	***.**05047	998	1 120	1/2 029 087	1/52 158	1/50 850	二等
GP94	***.**18566	1 117	1 120	1/2 283 090	1/2 276 680	1/1 139 940	二等

剔除含有粗差的基线，GPS基线向量网本身的内符合精度和基线向量改正数绝对值满足规范要求，基线向量网无明显系统误差；然后进行约束平差，约束平差采用CGCS2000椭球、中央子午线102°、投影高程面0 m，输出坐标成果为标准3°带的CGCS2000成果。各等级控制网平差精度见表2，项目各等级控制网平差精度均满足规范要求。利用换带计算和高程投影计算公式将平差坐标分别换算到项目工程独立坐标系高程投影面950 m、1 000 m、1 120 m、1 200 m、1 300 m、1 500 m下，在高程投影面变化处应重复不少于两个控制点，如表1中的GP41、GP42、GP43，重合处的控制点在哪个投影面下的变形精度高，就用哪个坐标。首先利用公共点将投影高950 m的坐标平移到投影高1 000 m的坐标系下；再利用公共点依次将投影高1 120 m、1 200 m、1 300 m、1 500 m的坐标平移到投影高1 000 m的坐标系下，这样全线路的控制点就统一到一个坐标系下。本项目工程独立坐标系为：CGCS2000椭球、基本参数北向加常数0 m、东向加常数500 000 m、中央子午线102°18′、抵偿高程投影面1 000 m。由于项目的中央子午线唯一，不存在坐标旋转，因此在不同等级控制网和不同投影高程面的相邻处重复两个控制点（一个用于平移，一个用于检查精度），通过坐标平移即可将多个工程独立坐标系统一到一个工程独立坐标系下，既保证了控制点精度，又方便设计人员线路设计和施工单位施工。

表2 各等级控制网平差精度统计

网名	等级	无约束平差 单位权中误差/mm	约束平差 单位权中误差/mm	最弱相邻点的 边长相对中误差	最弱点 点位中误差/mm
全线路平面控制网	四等	17.8	4.5	1/46 167	16.1
隧道Ⅲ控制网	三等	8.3	3.6	1/90 883	13.2
隧道Ⅳ控制网	三等	9.6	4.1	1/86 547	14.8
隧道Ⅴ~Ⅵ控制网	三等	6.6	3.4	1/99 687	10.6
隧道Ⅰ~Ⅱ控制网	二等	5.6	2.9	1/203 614	6.9
隧道Ⅶ~Ⅺ控制网	三等	10.6	4.3	1/77 896	15.2
隧道Ⅺ控制网	三等	6.3	3.2	1/123 768	9.9

3 高程控制测量

3.1 高程控制测量方法

项目按二等、三等、四等顺序依次进行高程控制测量。二等高程控制测量采用附合路线方法，由于二等高程控制测量路线和项目高速公路线路重合，因此二等高程控制测量路线经过的控制点都按二等高程控制精度进行测量。按照规范要求，二等高程控制测量需进行一次往返测，项目采用水准结合光电测距三角高程测量的方法，即进行一次水准测量，再进行一次光电测距三角高程测量来完成二等高程控制测量的一次往返测。水准测量属于传统的测量方法，在此不做介绍，本文主要介绍采用光电测距三角高程方法进行二等高程控制测量。

3.2 二等高程控制测量

本次二等光电测距三角高程测量采用对向观测，观测时对距离进行气象改正，气温读数至0.1℃，气压读数至10 Pa；观测顺序为后—前—前—后；观测时

间为8:00—11:00、15:00—18:00，视线长度应小于600 m，最长不能超过1 500 m，视线离地不低于2 m；测角限差为同一照准目标垂直角互差小于等于4″，一测回指标差互差小于等于8″；测距限差为一测回读数间较差小于等于10 mm，测回中数间较差小于等于15 mm；测回数不少于4个；其余限差按二等水准限差要求进行[13-15]。

本次三角高程测量选择的全站仪是徕卡TS50，它是全自动高精度全站仪，测角精度可达0.5″，其自动观测目标可消除人为观测误差，提高测量精度。众所周知，三角高程测量需要照准目标（棱镜）来测距和测角，且目标高对测量精度影响较大，因此本次二等三角高程测量采用固定目标高控制脚架，以最大程度地削弱目标高对二等高程控制测量的影响。由于仪器高只能量取斜高，不能量取垂高，因此在内业处理时应对仪器高进行改正。测量工作开始前发现每天11:00—15:00全站仪的对向观测误差较大，基本上需进行重测，因此在这个时段停止光电三角高程测量作业。通过上述方法可极大提高三角高程测量精度，使其可满足二等高程控制测量的精度要求。

3.3　二等高程控制测量数据分析

本次二等三角高程测量共完成14段高差测量，换算成水准路线长度为44 km，全站仪完成144站测量，最短视距为9 m，最长视距为1 420 m，其中视距小于等于2 00 m的共52站、在200~600 m的共42站、在600~1 000 m的共37站、大于等于1 000 m的共13站。同样的线路采用水准测量共完成60.7 km二等高程控制测量。数据采集完成后，通过精密三角高程平差软件对三角高程和水准数据进行数据处理，结果表明，二等三角高程测量和二等水准测量的测段往返测高差不符值均满足规范要求，二者取均值后，其相互之间的测段高差不符值也满足规范要求（表3~5）。

表3　二等三角高程测量各测段往返测高差不符值统计表

起点	终点	测段高差/m		测段距离 L/km		测段高差不符值 Δ /mm	测段高差不符值限差 $4\sqrt{L}$ /mm
		往测高差	返测高差	往测距离	返测距离		
XS46-1	G33	21.212 3	-21.214 2	3.3	3.3	-1.9	7.3
G33	G85	8.596 5	-8.594 1	1.2	1.2	2.4	4.4
…	…	…	…	…	…	…	…
G92	G95	-87.331 1	87.334 4	5.5	5.5	3.3	9.4
G95	G393	41.939 9	-41.938 6	2.6	2.6	1.3	6.4

表4　二等水准测量各测段往返测高差不符值统计表

起点	终点	测段高差/m		测段距离 L/km		测段高差不符值 Δ /mm	测段高差不符值限差 $4\sqrt{L}$ /mm
		往测高差	返测高差	往测距离	返测距离		
XS46-1	G33	21.214 45	-21.214 50	2.4	2.4	-0.1	6.2
G33	G85	8.595 90	-8.594 88	1.4	1.4	1.0	4.7
…	…	…	…	…	…	…	…
G92	G95	-87.330 02	87.333 23	6.2	6.2	3.2	10.0
G95	G393	41.938 65	-41.937 76	3.1	3.1	0.9	7.0

表5　二等三角高程和二等水准测量各测段平均值的高差不符值统计表

起点	终点	测段高差/m		测段距离 L /km		测段高差不符值 Δ /mm	测段高差不符值限差 $4\sqrt{L}$ /mm
		三角高程测段高差	水准测段高差	三角高程测段距离	水准测段距离		
XS46-1	G33	21.213 25	21.214 48	3.3	2.4	-1.2	6.8
G33	G85	8.595 30	8.595 39	1.2	1.4	-0.1	4.6
…	…	…	…	…	…	…	…
G92	G95	-87.332 75	-87.331 63	5.5	6.2	-1.1	9.7
G95	G393	41.939 25	41.938 21	2.6	3.1	1.0	6.8

3.4　高程控制测量精度统计

根据上述分析，采用三角高程进行二等高程控制测量，精度能满足规范规定要求。二等高程控制测量采用三角高程变换仪器高的方法进行往返测，用时4 d完成外业测量工作；采用常规水准测量用时16 d才完成外业测量工作，可见光电测距三角高程测量方法的效率远高于水准测量方法。因此，二等高程控制测量完成后，项目的三、四等高程控制网施测全部采用光电测距三角高程测量方法。各等级高程控制测量平差后精度见表6。三角高程测量过程中，当视距小于

600 m时，对向观测精度较好，且不同时段控制点间高差值误差较小；当视距为600~1 000 m时，对向观测误差有时较接近限差，但不同时段控制点间高差值误差也不大；当视距大于1 000 m时，对向观测误差经常超限，且不同时段控制点间高差值误差也较大，经常需要重测。因此，在利用三角高程进行高等级控制测量时，视距应控制在1 000 m以内，最好效果是控制在600 m以内。

表6 各等级高程控制网平差精度统计表

路线名称	等级	路线长度/km	闭合差/mm	闭合差限差/mm	每公里高差中数偶然中误差/mm	每公里高差中数偶然中误差限差/mm
隧道Ⅰ~Ⅱ高程控制网	二等	53.6	13.6	29.3	±0.29	±1
隧道Ⅲ高程控制网	三等	15.7	−2.9	59.4	±0.55	±3
隧道Ⅳ高程控制网	三等	10.4	−0.9	48.4	±0.23	±3
隧道Ⅴ、特大桥Ⅰ高程控制网	三等	21.2	14.7	69.1	±1.68	±3
隧道Ⅶ、特大桥Ⅱ高程控制网	三等	23.2	−16.1	72.2	±1.22	±3
隧道Ⅺ、特大桥Ⅲ高程控制网	三等	10.8	9.3	49.3	±1.72	±3
四等高程控制网（1）	四等	13.7	12.9	74.0	–	–
四等高程控制网（2）	四等	3.5	1.2	37.4	–	–
四等高程控制网（3）	四等	8.1	−3.0	56.9	–	–

4 结 语

1）以四川省西部山区某高速公路控制测量为实例，详述了山区高速控制测量中央子午线和投影高程面的选取方法、注意事项、外业观测要求和平差方法等。高程控制测量采用三角高程测量和水准测量相结合的方法进行了两个超长隧道的二等高程控制测量平差，证明在山区高速公路高等级高程控制测量时采用三角高程测量方法能满足二等水准测量精度要求。

2）在平面控制测量过程中，要注意坐标系统、高程系统的一致性，起算数据引用的可靠性，外业验算资料、计算数据和平差计算方法的可靠性，计算成果质量和精度的可靠性。为大型构造物（如超长隧道）布设控制点时，点位应选择在路线设计的高程面上，若因地形原因不能保证全部控制点在路线的设计高程面上，则最少要确保进出口各有一个控制点在路线设计的高程面上，以满足大型构造物对投影变形的要求。在平面控制测量中，若同一条高速公路需要建立多个工程独立坐标系才能满足投影变形要求时，首先选择一个中央子午线，通过高程投影面的变换来保证投影变形的精度；再通过公共点进行平移；最后统一到一个抵偿高程投影面下，确保一条高速公路向业主、设计和施工单位提供一套平面坐标系统。

3）采用三角高程法进行高等级控制测量时，一定要避开大气折光差极度不稳定的时间段；目标高最好是固定高度；仪器高的量取一定要精确，且要将斜高改正到垂高，特别是控制点上的仪器高；视距尽量控制在200~600 m，最大不要超过1 000 m，视距太短会导致测站增加，从而降低高程精度和测量效率，视距太长也会显著降低高程测量精度。

参考文献

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报,2022,35(4):1-40

[2] 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

[3] 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

[4] 张正禄. 工程测量学[M]. 武汉:武汉大学出版社,2017

[5] 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,2008

[6] 吴迪军. UTM投影地区工程独立坐标系的建立方法[J]. 测绘工程,2020,29(4):7-10

[7] 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(21):148-149

[8] 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

[9] 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

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

[11] 公路勘测细则:JTG/TC10-2007[S].

[12] 全球定位系统(GPS)测量规范:GB/T 18314-2009[S].

[13] 刘浩,刘国建. 三角高程测量在高速公路控制测量中的应用研究[J]. 地理空间信息,2008,6(1):111-113

[14] 国家三角测量规范:GB/T 17942-2000[S].

[15] 国家一、二等水准测量规范:GB/T 12897-2006[S].