

# 高程拟合在线性水利工程中的应用研究

桑颖葛, 熊军, 许伟

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川成都 610213)

**摘要:**通常,通过 GNSS 定位技术可以获得控制点的大地高。而在实际工程应用中,我国采用的是正常高系统。针对大地高与正常高转换问题,阐述了如何通过实测线性水利工程控制网数据,采用二次曲面拟合、样条函数拟合、泛克里金法进行高程拟合的过程,并将其结果与四等水准测量限差共同进行对比分析,研究出高程拟合替代四等水准测量的可行性。研究表明:在一定的条件下,GNSS 高程拟合可以取代四等水准测量。

**关键词:**引江济淮工程;GNSS 定位技术;高程拟合;二次曲面拟合;样条函数拟合;泛克里金;水利工程;应用研究

**中图分类号:**TV7;TV52

**文献标识码:**B

**文章编号:**1001-2184(2022)04-0047-04

## Application Research of Elevation Fitting in Linear Water-Conveyance Project

SANG Yingge, XIONG Jun, XU Wei

(Sinohydro Bureau 7 Co., LTD, Chengdu, Sichuan 610213)

**Abstract:** Generally, the geodetic height of the control point can be obtained through the GNSS positioning technology. However, in practical engineering applications, the normal height system is adopted in China. This paper elaborates the feasibility of elevation fitting to replace of the fourth-level leveling by quadratic surface simulation, spline function fitting, and universal kriging method, based on the actual surveyed data of linear control network in water conveyance project, and by comparison of the fitting results and the allowable tolerances of fourth-level leveling. The study shows that under certain conditions, GNSS elevation fitting can replace fourth-level leveling.

**Key words:** Yangtze-Huaihe diversion project; GNSS positioning technology; elevation fitting; quadratic surface fitting; spline function fitting; universal kriging; Water conveyance project; application study

## 1 概述

GNSS 为全球卫星导航系统的简称,泛指所有的卫星导航系统,包括全球、区域和增强的卫星导航系统,如美国的 GPS、俄罗斯的 Glonass、欧洲的 Galileo、中国的北斗卫星导航系统以及与其相关的增强系统。GNSS 接收机能够兼容多种卫星定位系统,增加了可见卫星的数量,提高了精度、速度和生产效率<sup>[1]</sup>。在控制测量中,相比传统测角测距的方法,GNSS 控制测量的优点为:定位精度高、测站间无需通视,操作简便,可全天候作业<sup>[2,3]</sup>。

在线性水利工程中,需要将控制点沿线路两侧布设,其测区呈狭长带状。结合线性水利工程的特点,GNSS 静态相对定位成为其控制测量作

业的首选方法。但 GNSS 测量得到的是以参考椭球为基准的大地高,而在实际生产应用中,地面点的高程采用的是正常高系统。由于正常高通常是以效率低、劳动强度大的水准测量进行确定,因此,如何将大地高转换为正常高是科研及生产单位不断探索的问题,而 GNSS 水准拟合法是目前最常用的一种方法<sup>[4]</sup>。

## 2 高程系统间的关系及转换方法

### 2.1 正常高与大地高的关系

高程系统不同则其高程基准不同,即高程起算面不同。高程系统主要包括正高系统、正常高系统、力高系统、大地高系统等。我国的高程系统采用正常高系统,其起算面为似大地水准面。而似大地水准面是由地面沿正常重力线向下量取正常高所得的点形成的连续曲面,其不是水准面,而

只是用于计算的辅助面。大地高系统是以地球椭球面为基准的高程系统,因为 GNSS 是以地球质心为原点直接测量得到的大地坐标,故其使用的亦为大地高系统。

测量外业的基准面为大地水准面,而测量内业的基准面则为参考椭球面,大地高与正常高之间的关系见图 1。大地高是以参考椭球为基准的高程系统,地面点 P 沿椭球面法线方向至参考椭球面的距离即为大地高  $H$ ,正常高是以似大地水准面为基准的高程系统,地面点 P 沿铅垂线至似大地水准面的距离为正常高  $h$ ,似大地水准面与参考椭球面之间存在相对较小的高差  $\xi$ ,被称为高程异常。因此,两高程系统之间的关系为  $H=h+\xi$ 。

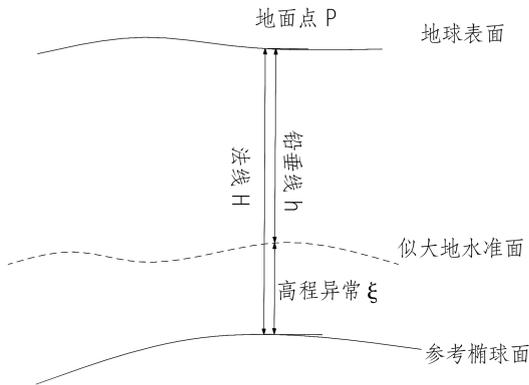


图 1 大地高与正常高之间的关系图

### 2.2 GNSS 水准高程的转换方法

将大地高转换为正常高的实质是求取地面点高程异常值  $\xi$ 。在工程测量应用中,求取高程异常的方法主要为 GNSS 水准拟合法<sup>[5]</sup>,该方法的实质是:在 GNSS 控制网中选择若干个公共点,采用几何水准法测出这些点的正常高,设点的高程异常值  $\xi$  与二维平面坐标存在函数关系,即  $\xi=$

$f(x,y)+\epsilon$ ,式中  $f(x,y)$  为高程异常  $\xi$  的趋势值; $\epsilon$  为其误差。将公共点的数据带入公式,求出  $f(x,y)$  未知系数,在拟合区域,只要知道任一点  $a$  的平面坐标,将其带入上式即可求出该点的高程异常值  $\xi$ ,进而求出其正常高  $h$ 。

不同的  $f(x,y)$  产生不同的拟合方法。此次研究使用 ARCGIS 地理信息软件,研究了样条函数、二次曲面、泛克里金三种拟合方法。样条函数拟合使用最小化整体表面曲率估计值生成恰好经过输入点的平滑曲面。二次曲面拟合以二次多项式函数定义平滑曲面,与输入公共点进行全局拟合。克里金法又称空间局部差值法,是以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对区域化变量进行无偏最优估计的一种方法<sup>[6]</sup>。泛克里金是克里金法当中的一种,当数据统计特征存在某种趋势或不平稳且未知时,采用泛克里金法进行研究。

### 3 研究区域与数据处理

引江济淮工程系由长江下游上段引水、向淮河流域中游地区补水,是一项以城乡供水和发展江淮航运为主、结合灌溉补水和改善巢湖及淮河水生态环境等综合利用的大型跨流域调水工程,是集供水、航运、生态等效益为一体的一项水资源综合利用工程。安徽引江济淮工程某标段全长约 16 km,地形特征为平原和丘陵,沿线路两侧已建立平面和高程共用的四等控制网,平面采用西安 80 高斯平面坐标系,高程采用 1985 国家高程基准,其控制测量成果满足相关测量规范要求。技术人员选取其中 8 km、共 18 个控制点进行试验,全部联测水准高程后计算出高程异常,已知高程异常数据成果见表 1。

表 1 已知高程异常数据表

点号	正常高	大地高	高程异常	点号	正常高	大地高	高程异常
CZ13	10.23	9.658 1	-0.571 9	ZA41	15.056	14.417 3	-0.638 7
ZA39	14.041	13.370 7	-0.670 3	YA43	11.233	10.666 1	-0.566 9
CH14	22.185	21.626 9	-0.558 1	ZA43	10.737	10.099 7	-0.637 3
ZA44	11.229	10.630 4	-0.598 6	YA45	16.917	16.341 6	-0.575 4
CH15	22.87	22.282 6	-0.587 4	ZA45	11.737	11.134 8	-0.602 2
ZA48	16.048	15.408 7	-0.639 3	YA46	14.488	13.894 4	-0.593 6
YA40	11.381	10.794 7	-0.586 3	ZA46	13.361	12.741 3	-0.619 7
ZA40	13.279	12.602 8	-0.676 2	YA47	14.043	13.435 3	-0.607 7
YA41	15.959	15.375 3	-0.583 7	ZA47	12.746	12.091 6	-0.654 4

GNSS 控制点分布情况见图 2。为了对比样条函数拟合、二次曲面拟合、泛克里金拟合求取高程异常的效果,选取 CZ13、ZA39、CH14、ZA44、CH15、ZA48 为拟合的公共点。由图 2 可知,这些点在带状测区的两端及中间部位,分布均匀,覆盖了整个区域。已知检核点至公共点的距离  $L$  (单位 km),依据规范中  $\pm 20\sqrt{L}$  计算四等水准测量限差,并与检核点拟合残差的绝对值进行对比,用以衡量拟合达到的精度。

三个拟合模型均在 ARCGIS 软件中实现,其

中,样条函数采用规则样条,二次曲面拟合采用趋势面拟合,泛克里金的半变异模型采用“与一次漂移函数呈线性关系”,将三种拟合方法得到的拟合结果与已知值相减得出差值,拟合残差与限差见表 2。为便于三种拟合方法之间的对比,特意制作了拟合残差与限差折线图(图 3)。在完成高程拟合计算后,通过软件可视化功能生成高程异常预测面,根据高程异常预测面还可生成直观的等值线图,以泛克里金拟合结果创建的高程异常等值线图见图 4。

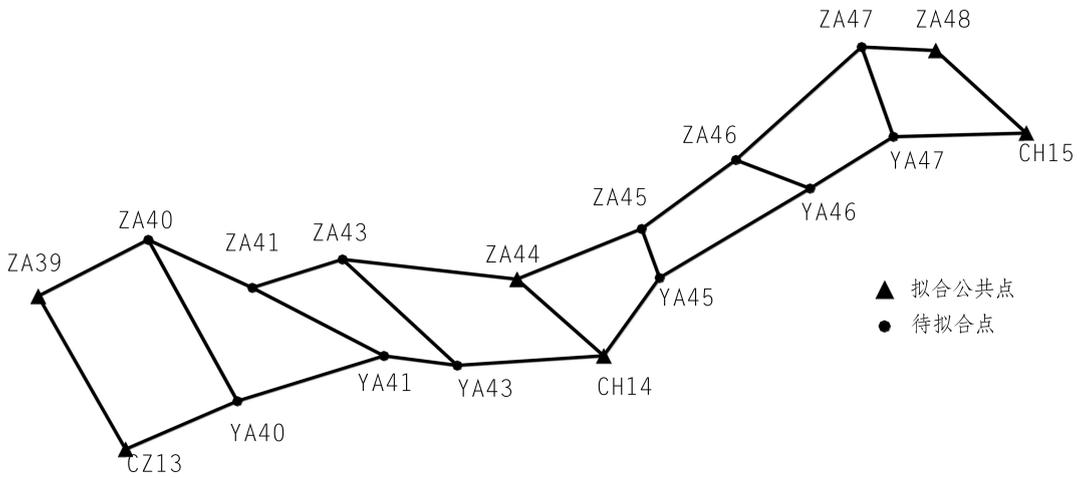


图 2 GNSS 控制点分布图

表 2 拟合残差与限差表

点号	与已知点距离 /km	已知高程异常 /m	样条函数		二次曲面		泛克里金		四等几何水准限差 /mm
			拟合值 /m	差值 /mm	拟合值 /m	差值 /mm	拟合值 /m	差值 /mm	
YA40	1.051	-0.586 3	-0.578 4	7.9	-0.580 3	6	-0.585 9	0.4	20.5
ZA40	1.068	-0.676 2	-0.678	1.8	-0.685 3	9.1	-0.675 1	1.1	20.67
YA41	1.895	-0.583 7	-0.579 8	3.9	-0.582 2	1.5	-0.583 7	0	27.53
ZA41	1.848	-0.638 7	-0.632 2	6.5	-0.635 9	2.8	-0.636 2	2.5	27.19
YA43	1.266	-0.566 9	-0.568 5	1.6	-0.569 7	2.8	-0.568 6	1.7	22.5
ZA43	1.514	-0.637 3	-0.631 4	5.9	-0.636 2	1.1	-0.635 8	1.5	24.61
YA45	0.829	-0.575 4	-0.583 7	8.3	-0.580 2	4.8	-0.578	2.6	18.21
ZA45	1.16	-0.602 2	-0.605 6	3.4	-0.603 4	1.2	-0.603 3	1.1	21.54
YA46	1.925	-0.593 6	-0.600 1	6.5	-0.596 3	2.7	-0.596 7	3.1	27.75
ZA46	1.966	-0.619 7	-0.622 3	2.6	-0.620 7	1	-0.620 9	1.2	28.04
YA47	1.147	-0.607 7	-0.608 5	0.8	-0.605 8	1.9	-0.607 7	0	21.42
ZA47	0.639	-0.654 4	-0.653 1	1.3	-0.655 7	1.3	-0.654 9	0.5	15.99

注:表中的差值和限差取绝对值。

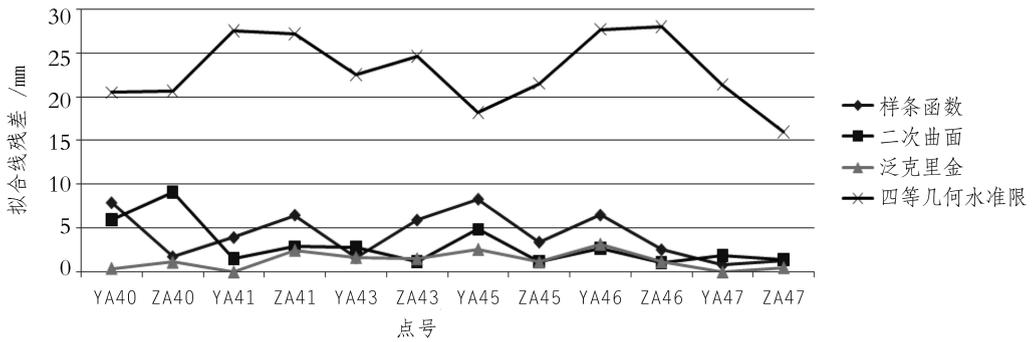


图3 拟合残差与限差折线图

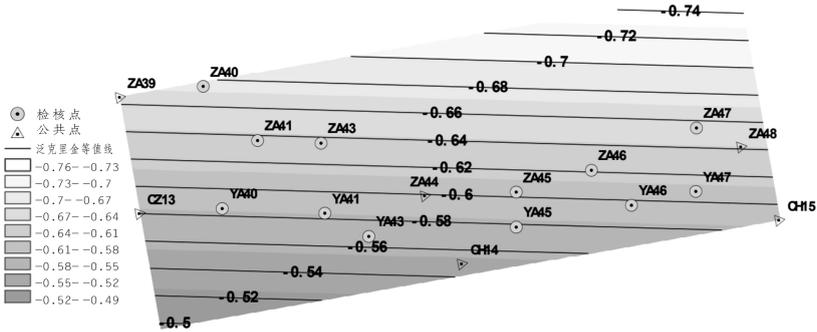


图4 高程异常等值线图(间距2 cm)

## 4 结语

详细阐述了大地高与正常高两个高程系统之间的关系以及两者相互转换的数学基础,根据线性水利工程的特点,研究了三种高程拟合模型,并以安徽引江济淮某标段的实测数据借助 ARCGIS 软件中的插值工具,实现了样条函数、二次多项式曲面、泛克里金三种方法的高程异常拟合,间接求得正常高。通过将检验点高程异常残差和四等水准测量限差进行对比得知:三种方法均满足四等水准测量精度要求,且以泛克里金法最优,二次曲面拟合次之,样条函数较差。研究结果表明:在一定条件下,GNSS 高程拟合可取代平原和丘陵地区线性水利工程中的四等水准测量,与传统水准测量相比其优势明显。此次研究取得的经验对类似工程具有一定的参考价值,但仍存在不足。

### 参考文献:

[1] 张正禄. 工程测量学(第二版)[M]. 武汉:武汉大学出版社,

2013.

- [2] 高哲. GNSS 高程拟合代替四等水准测量的应用分析[J]. 工程建设与设计, 2019, 67(16): 253-255.
- [3] 徐绍铨, 张华海, 杨志强, 王泽民. GPS 测量原理与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2008.
- [4] 郭杨. GPS 高程拟合替代三、四等水准测量的可行性研究[J]. 矿山测量, 2018, 46(6): 110-112, 116.
- [5] 孙昌瑜. GPS 高程拟合在水利工程测量中的应用[J]. 水利规划与设计, 2018, 31(9): 148-151.
- [6] 郭炳岐. 基于 Kriging 方法的 GPS 高程拟合模型及其应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.

### 作者简介:

桑颖葛(1991-),男,河南长葛人,项目技术质量部副主任,助理工程师,从事水利水电工程及市政工程测量技术与管理工

作;  
熊军(1995-),男,贵州遵义人,助理工程师,学士,从事水利水电工程及市政工程计量工作;

许伟(1992-),男,甘肃定西人,技术员,从事水利水电工程及市政工程测量工作。

(责任编辑:李燕辉)

## 枕头坝二级水电站首仓混凝土浇筑

2022年9月15日,四川省“十四五”重点建设项目——枕头坝二级水电站首仓混凝土浇筑。该电站由国能大渡河流域水电开发有限公司投资开发,中国电建水电七局承建,系大渡河干流调整规划的第22级电站,位于乐山市金口河区境内,为乐山市“挂图作战”重大项目,总装机容量300兆瓦,采用堤坝式开发,枢纽由左侧泄洪闸、右侧河床式厂房、两岸混凝土重力坝和鱼道等建筑物组成,最大坝高54米。水电七局项目部克服高温、疫情、征地拆迁、料源影响等困难,先后实现了一期围堰填筑、左岸防渗防护墙首仓浇筑、左坝肩灌注桩施工等节点目标,创下国内首例一次性成墙2米厚防渗防护墙工程的先例。电站建成后,每年可节约标煤45万吨,减少二氧化碳排放96万吨,为国家“双碳”目标和地方经济提供更有力的绿色能源。

(中国水电七局 供稿)