

# “海工工程GPS打桩定位系统”在抵偿高程面投影坐标系中的应用

宋封斌

中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波

收稿日期: 2023年6月5日; 录用日期: 2023年7月19日; 发布日期: 2023年7月26日

## 摘要

沉桩定位是海工工程建设中的重要技术环节。为适应海上工程建设发展的需要, 我单位在国内率先研发了服务于各类海工工程沉桩定位的“海工工程GPS打桩定位系统”。其沉桩定位的基本原理是, 首先以RTK GPS (包括GNSS, 下同)作为定位和定向仪器对打桩船进行定位定向, 在此基础上, 再采用测距仪对施打桩进行精确定位, 系统定位精度高, 同时大大提高了施工效率。“海工工程GPS打桩定位系统”目前已有功能完全满足将RTK GPS输出的大地坐标向国家坐标系或各类通过正常的高斯投影建立的平面坐标系的转换, 但对一些通过特殊方法建立的平面坐标系的转换功能尚未实现。温州液化天然气(LNG)接收站配套码头工程沉桩工程, 设计采用了-850 m作为抵偿面的平面坐标系统, 以抵偿直接采用该高斯投影产生的投影形变, “海工工程GPS打桩定位系统”无法直接将RTK GPS输出的大地坐标转换到该抵偿面的平面坐标系统。本文以该项目为例, 采用投影换带计算方法建立新的平面坐标系统, 并在保证新旧坐标系统在施工区域内投影形变满足要求的前提下, 求取新旧坐标系的转换关系对旧坐标系坐标进行转换, 将新坐标系统应用到“海工工程GPS打桩定位系统”中, 成功克服了定位系统无法直接采用高程抵偿面上的坐标系统的问题, 成功完成了项目的沉桩定位任务。

## 关键词

投影抵偿面, 高斯投影换带计算, 海工工程, GPS打桩定位系统

# The Application of “Marine Engineering GPS Piling and Positioning System” in the Compensation Elevation Plane Projection Coordinate System

Fengbin Song

Ningbo Branch of China Communications Third Navigation Engineering Bureau Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Received: Jun. 5<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 19<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2023

文章引用: 宋封斌. “海工工程 GPS 打桩定位系统”在抵偿高程面投影坐标系中的应用[J]. 测绘科学技术, 2023, 11(3): 286-293. DOI: 10.12677/gst.2023.113033

## Abstract

Pile sinking positioning is an important technical link in marine engineering construction. In order to meet the needs of the development of offshore engineering construction, our unit has taken the lead in developing the "Marine Engineering GPS Piling Positioning System" that serves various types of offshore engineering pile sinking positioning in China. The basic principle of pile sinking positioning is to first use RTK GPS (including GNSS, the same below) as a positioning and orientation instrument to locate and orient the pile driving vessel. On this basis, a distance measuring instrument is used to accurately position the pile driving. The system has high positioning accuracy and greatly improves construction efficiency. The "Marine Engineering GPS Piling and Positioning System" currently has functions that fully meet the conversion of RTK GPS output geodetic coordinates to national coordinate systems or various planar coordinate systems established through normal Gaussian projection. However, the conversion function for some planar coordinate systems established through special methods has not yet been realized. The pile sinking project of Wenzhou Liquefied Natural Gas (LNG) Terminal Supporting Terminal Project adopts a plane coordinate system of -850 m as the compensation surface to compensate for the projection deformation directly generated by the Gaussian projection. The "Marine Engineering GPS Pile Driving Positioning System" cannot directly convert the geodetic coordinates output by RTK GPS to the plane coordinate system of the compensation surface. This article takes the project as an example and establishes a new plane coordinate system using the projection strip replacement calculation method. On the premise of ensuring that the projection deformation of the new and old coordinate systems in the construction area meets the requirements, the transformation relationship between the new and old coordinate systems is obtained to convert the coordinates of the old coordinate systems. The new coordinate system is applied to the "Marine Engineering GPS Piling and Positioning System", to successfully overcome the problem of the positioning system not being able to directly use the coordinate system on the compensation surface, and successfully complete the pile sinking positioning task of the project.

## Keywords

Projection Compensation Surface, Gaussian Projection Band Swapping Calculation, Marine Engineering, GPS Pile Driving Positioning System

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

中交第三航务工程勘察设计院有限公司与中交第三航务工程局有限公司联合体承建的温州液化天然气(LNG)接收站配套码头工程项目,主要建设一座可靠泊8~26.6万方LNG船舶的码头,主力设计船型为17.5万方LNG船舶,同时建设一座2000吨级工作船码头。该项目设计及相关图纸上的坐标系统采用了具有高程抵偿面的平面坐标系统,在我局研制的“海工工程GPS打桩定位系统”(以下简称“定位系统”)中不具备直接应用这一坐标系统的功能。为此需要开展对这一问题研究工作,在满足施工定位精度和不改变设计图纸的前提下,解决“定位系统”的正常应用问题[1]。

## 2. 解决方法

### 2.1. 基本思路

通过对设计院采用的高程抵偿面坐标系统进行分析,设计时采用投影高程抵偿面的目的是由于施工

区域与国家坐标系的投影分带的中央子午线距离较大,由此引起的投影形变已超出工程施工对投影形变的限差,因此,在建立坐标系中加入了高程抵偿面修正,以减小投影形变[2][3][4]。

在工程实践中,减小投影形变还可以采用投影换带计算方法,选择适当的中央子午线进行换带计算,可以将投影形变控制在工程需要的范围内。但是换带计算将带来原设计平面坐标系中点的坐标产生较大的变化的问题。为了消除这一变化,可引进一组平面转换参数,以原设计坐标系控制点为公共点,在换带计算得到的同名点结果与原设计坐标系中的坐标之间求取转换参数,利用求得的转换参数将换带计算后点的平面坐标重新转换到原设计坐标系中。

通过理论分析和实践验证,采用这一方法,在一定的施工区域内,可以保证最终计算得到的施工区域内的点、方向、投影形变均能控制在相应工程测量规范要求的范围内。从而解决了在不改变设计坐标、不对“定位系统”软件进行修改的前提下,可将原设计图纸坐标系中桩位坐标直接输入到“定位系统”进行使用的问题。

## 2.2. 投影引起的形变

根据高斯投影理论,高斯投影可以产生长度形变。在一个较小的区域内,可采用近似公式计算长度形变,计算公式为:

$$m = 1 + \frac{l^2}{2R^2} \cos^2(B) = 1 + \frac{y^2}{2R^2} \quad (1)$$

式中, $m$ 为投影形变, $l$ , $B$ , $y$ , $R$ 分别为测点或测线平均位置与中央子午线的经度差、纬度值、投影后的 $y$ 坐标和参考椭球的平均曲率半径。

由以上公式可以看到,在纬度 $B$ 变化不大的小区域内,选择不同的中央子午线 $l$ 值会有较大的不同,投影形变 $m$ 也随之变化。

## 2.3. 抵偿面引起的形变

抵偿面引起的形变的计算公式为:

$$k = 1 + \frac{H}{R} \quad (2)$$

式中, $k$ 为测线归化到抵偿面引起的长度形变, $H$ 为抵偿面高程,当 $H$ 为负时 $k$ 小于1,与 $m$ 总是大于1相反。这也说明可以采用适当的高程抵偿面能抵消投影形变。

## 2.4. 换带计算引起的坐标值变化

由高斯投影原理可知,换带前后控制网中所有点位的坐标均会有较大的变化。实际上换带计算可以视作在控制网范围内建立了一个新的平面坐标系。为了不改变原设计图纸上各元素的坐标值,避免重新修改设计图纸,只需要将这个新坐标系与原设计坐标系之间建立平面转换关系,求取一组平面转换参数,重新将换带后新平面坐标转换到原设计坐标系中。而“定位系统”也具有任意带投影后,再进行平面转换的计算功能。这样就可以实现在不改变原设计坐标和不对“定位系统”进行修改的前提下,输入原设计坐标,进行精确打桩定位。

换带后的新坐标系与原设计坐标系之间的平面转换参数可以采用平面四参数模型解算。数学方程可表述为:

$$\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{pmatrix} = \rho \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_N \\ Y_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中,  $(X_0 \ Y_0)^T$  为原设计坐标系坐标,  $(X_N \ Y_N)^T$  为换带计算后的新坐标系坐标,  $(\Delta X \ \Delta Y)$  为转换参数的平移量,  $\alpha$ ,  $\rho$  分别为转换参数的旋转量和尺度。

从上式中可以看到, 计算平面转换四参数最少需要 2 个控制点, 当选用更多个控制点时, 需要将上式转换成误差方程, 并进行最小二乘最优解计算。

### 3. 实际项目应用

#### 3.1. 工程背景

温州液化天然气(LNG)接收站位于温州港大小门岛港区, 地处洞头县小门岛东侧, 地理位置约东经  $121^\circ 04' 50''$ 、北纬  $28^\circ 00' 39''$ 。工程项目沉桩总数 209 根, 分为直桩、仰桩和俯桩。工期紧、工程质量要求高、施工受到风浪、潮汐影响大。

对桩基定位要求:

直桩桩身位置偏位  $\leq 15$  cm、斜桩桩身位置偏位  $\leq 20$  cm, 高程控制要求为 0~100 mm。

业主提供的已有成果为 CGCS2000 椭球, 高斯投影中央子午线经度  $120^\circ$ , 抵偿面高程为 -850 m。首级控制测量成果见表 1。

**Table 1.** First level control pile handover results table

**表 1.** 首级控制在原设计坐标系中的成果表

点号	坐标成果		高程	备注
	$X$ (m)	$Y$ (m)	$H$ (m)	
GPS1	3098913.239	605629.795	56.227	四等
GPS2	3100027.508	605428.735	6.984	
WL1	3099761.372	606199.688	13.519	
WL3	3099563.680	606184.192	35.286	

经复测比较, 业主提供的首级控制测量成果与复测结果一致。首级控制点位见图 1:



**Figure 1.** First level control network plan

**图 1.** 首级控制网平面图

### 3.2 原设计坐标系长度形变

原坐标系成果为参考椭球采用 CGCS2000 椭球, 高斯投影中央子午线经度 120°, 抵偿面高度为-850 m。由此可计算相应的各项形变结果见表 2。

Table 2. Analysis of deformation in the original coordinate system

表 2. 原坐标系形变分析

点名	X	Y	高斯投影形变	归化到抵偿面形变	综合形变
GPS1	3098913.239	605629.795	1.0001375	0.999866562	1.000004031
GPS2	3100027.508	605428.735	1.0001370	0.999866562	1.000003509
WL1	3099761.372	606199.688	1.0001390	0.999866562	1.000005519
WL3	3099563.680	606184.192	1.0001389	0.999866562	1.000005478

根据《工程测量标准》(GB50026-2020)要求, 平面控制网应满足测区投影长度形变不大于 25 mm/km, 根据表 2 结果, 其高斯投影形变为 137.0~139.0 (mm/km), 远超过《工程测量标准》要求。为了保证最终的长度形变能满足要求, 首级控制网坐标系统采用了高度为-850 m 的高程抵偿面作为最终归算面, 表 2 中抵偿面归化计算后的形变为-133.4 (mm/km), 综合两者后的形变影响为 3.5~5.5 (mm/km), 满足了相关标准的形变限制要求。

### 3.3. 控制网投影换带后的长度形变

首级控制网点 CGCS2000 坐标系中的大地坐标:

GPS1 L = 121°04'26.52698" B = 28°00'13.65549"

GPS2 L = 121°04'19.52672" B = 28°00'49.90867"

WL1 L = 121°04'47.65939" B = 28°00'41.04265"

WL2 L = 121°04'47.02816" B = 28°00'34.62533"

换带投影的高斯投影中央子午线经度为 121°04', 抵偿面高度为 0 m, 因此, 换带后的控制点坐标及形变(只有投影形变)的计算结果见表 3。

Table 3. Coordinate and deformation analysis of each control point in the control network after belt replacement

表 3. 换带后控制网中各控制点坐标及形变分析

点名	X	Y	高斯投影变形
GPS1	3098862.129	500724.764	1.000000006
GPS2	3099978.108	500533.455	1.000000004
WL1	3099705.242	501302.048	1.000000021
WL2	3099507.694	501284.824	1.000000002

根据表 2 结果, 经过换带计算后, 控制网范围内的高斯投影形变为 0.004~0.021(mm/km), 满足《工程测量标准》的形变限制要求。

### 3.4. 平面转换计算

通过比较表 2、表 3 中换带前后的控制点坐标, 可以发现, 换带后的新坐标系控制点坐标与原坐标

系中坐标有较大的变化。选择 4 个控制点作为公共点，采用最小二乘法进行参数最优估计，结果见表 4。

**Table 4.** Parameter calculation results

**表 4.** 转换参数计算结果

平移参数(m)	$\Delta X = 53.156$	$\Delta Y = 104899.330$
旋转角( $^{\circ}$ )	$\alpha = 0.5010014$	
尺度	$\rho = 1.000004949$	

表 4 中尺度  $\rho = 1.000004949$ ，与原坐标系综合形变平均值比较接近，考虑到换带后的投影形变较小，因此，平面转换参数中尺度反映了原坐标系综合形变。

采用以上参数，将换带后的新坐标系坐标转换到原设计坐标系结果及差值见表 5。

**Table 5.** Plane conversion results of control points and their differences from the original coordinate system coordinates

**表 5.** 控制点的平面转换结果及与原坐标系坐标差值

点名	平面转后坐标		与原坐标差值	
	X (m)	Y (m)	X (mm)	Y (mm)
GPS1	3098913.23912	605629.79544	-0.12	-0.44
GPS2	3100027.50817	605428.73462	-0.17	0.38
WL1	3099761.37187	606199.68800	0.13	0.30
WL2	3099563.67984	606184.19194	0.16	0.06

由表 5 看到，采用换带投影并再次进行四参数平面转换方法得到的最终结果，可以在整个控制网范围内，点位坐标与原设计坐标系坐标的偏差为  $-0.44 \sim 0.38$  (mm)，完全满足工程要求。

### 3.5. 实测点验证

选取加密控制网中其他 3 个加密控制点，用 RTK GPS 分别采集并输出大地坐标，计算换带后的高斯投影坐标和平面转换，得到新平面坐标系坐标，并与原控制网坐标系的坐标进行比较，结果见表 6：

**Table 6.** Verification of the measured results of encrypted control points

**表 6.** 加密控制点实测结果验证

点号	原控制网坐标系坐标		新平面坐标系坐标		差值	
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	$\Delta X$ (m)	$\Delta Y$ (m)
H1	3099984.208	500604.372	3099984.212	500604.370	0.004	-0.002
Z2	3099622.142	501208.234	3099622.148	501208.237	0.006	0.003
Z4	3099452.256	501613.003	3099452.259	501613.008	0.003	0.005

从表 6 可以看到，实测检核结果，3 个加密控制点上实测的新平面坐标系坐标与原控制网坐标系坐标差值均小于 6 mm (包括测量误差)，满足工程要求。

### 3.6. 应用于“定位系统”后打桩定位结果检核

在“定位系统”中选定输入 CGCS2000 坐标系椭球参数、换带后的中央子午线经度、新平面坐标系

向原控制网坐标系的平面转换参数，桩位坐标采用原设计坐标。RTK GPS 作为定位仪器，自动计算桩中位置坐标。

与此同时，岸上搭设测量观测室，埋设强制观测墩并设置 2 台全站仪，按照常规打桩定位方式测量并计算桩中位置在原控制网坐标系中坐标。首桩定位检核较差值见表 7。

**Table 7.** Poor positioning detection of the first pile  
**表 7.** 首桩定位检测较差

桩号	桩别	斜率	“定位系统”		全站仪定位		差值	
			横向偏移量(mm)	纵向偏移量(mm)	横向偏移量(mm)	纵向偏移量(mm)	$\Delta X$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)
2-X-6	仰	5:1	20	15	30	23	10	8

按不同地质条件、涨落潮最大潮差等因素，选取了部分典型沉桩偏位数据，见表 8。

**Table 8.** Typical construction conditions sinking pile deviation detection results  
**表 8.** 典型施工条件下沉桩偏位检测结果

序号	沉桩编号	仰/俯	坡比	平面扭角	偏位值(mm)	
				(°)	$\Delta X$	$\Delta Y$
1	2-X-6	仰	5:1	50	10	20
2	2-X-7	俯	5:1	30	80	-40
3	2-X-1	俯	5:1	50	-90	30
4	3-X-6	仰	5:1	50	-70	40
5	3-X-3	俯	5:1	50	-60	-30
6	1-X-7	俯	5:1	0	80	-50
7	4-X-4	仰	5:1	15	-30	0
8	4-X-5	俯	5:1	40	30	10
9	4-K-9	俯	6:1	10	50	20
10	4-K-5	仰	5:1	30	0	-40
11	3-K-1	俯	5:1	-60	60	40
12	3-K-3	俯	8:1	40	-40	60
13	3-K-6	俯	5:1	0	70	10
14	3-K-9	俯	6:1	0	-20	50
15	4-K-8	仰	5:1	15	50	0
16	3-K-7	仰	5:1	-15	-60	30
17	3-K-2	俯	8:1	-40	40	-60
18	3-K-4	俯	6:1	55	80	-20
19	4-K-6	俯	5:1	25	-30	50
20	1-K-9	俯	6:1	30	0	40

## 4. 结论

“定位系统”具有将 RTK GPS 定位输出的大地坐标直接转换到经正规高斯投影和平面转换方法建立的平面坐标系的功能,但没有转换到经抵偿面归化的平面坐标系。

在温州液化天然气(LNG)接收站配套码头工程项目的施工实践中,工程设计中采用的平面坐标系正是采用了经抵偿面归化的平面坐标系。为了在不修改软件的同时能够直接采用原设计坐标,项目部采用了换带投影后再进行平面转换方法,通过适当选取换带投影的中央子午线和精确求解平面转换参数,做到了在施工区域内,位置坐标计算和长度形变控制与原设计一致。经理论验证和实测检测,证明这一方法简单、有效,结果正确、可靠,这一方法也得到了监理、业主及项目设计方的认可。这一方法对其他类似工程具有一定的参考意义。

## 参考文献

- [1] 喻守刚,李志鹏,余青容,等. 国外工程中抵偿高程面确定方法的研究[J]. 城市勘测, 2018(6): 101-104.
- [2] 赵国强. 几内亚 BOFFA 铝土矿开发 UTM 投影坐标系的建立[J]. 资源信息与工程, 2018, 33(6): 136-137. <https://doi.org/10.19534/j.cnki.zyxygc.2018.06.063>
- [3] 王礼强. 韩城市经济技术开发区 1:2000 地形图测绘投影坐标系的选择[J]. 陕西煤炭, 2017, 36(6): 67-70.
- [4] 雒养社,韩红太,张魁. 使用抵偿高程面建立地方坐标系[J]. 中州煤炭, 2004(3): 19-21.