

消除地球曲率对超大型导管架高程影响的方法

张士舰 杨青峰 杨现阳 刘春杰 宋国辉 李小红 秦 野 王智洪

海洋石油工程股份有限公司, 天津 300452

摘 要:超大型导管架尺寸巨大,坐标控制网分布更广,运用传统坐标控制网测量卧式建造超大型导管架高程时,地球曲率会带来较大的高程误差,不能保证超大型导管架尺寸精度。针对传统坐标控制网测量超大型导管架不能有效消除地球曲率带来的高程误差问题,提出一种基于一站式坐标控制网的三维坐标转换方法,该方法用高精度全站仪在一个位置测量全部站点坐标,在导管架卧式建造过程中通过站点三维坐标转换将被测点转换到一站式坐标系中,有效消除地球曲率对导管架高程的影响。超大型导管架高程测量实验结果表明,运用基于一站式坐标控制网的三维坐标转换方法,无论全站仪架设在任何位置,高程测量值都基本一致,消除了地球曲率导致的高程误差。基于一站式坐标控制网的三维坐标转换方法对于超大型导管架尺寸精度控制具有重要作用。

关键词:地球曲率;超大型导管架;自由设站;三维坐标转换;坐标控制网

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.01.021

Method to eliminate the influence of earth curvature on the elevation of super-large jacket

ZHANG Shijian, YANG Qingfeng, YANG Xianyang, LIU Chunjie, SONG Guohui,
LI Xiaohong, QIN Ye, WANG Zhihong

China Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin, 300452, China

Abstract: The super-large jacket is huge in size and the coordinate control network is more widely distributed. When using the traditional coordinate control network to measure the height of super-large jacket, the curvature of the earth will cause large error in elevation as the fabrication of the tall jacket is done while lying horizontally on the ground. As a result, the dimensional accuracy of the fabricated super-large jacket cannot be guaranteed. In the view of the fact that traditional jacket control network cannot effectively eliminate the error caused by the curvature of the earth, a three-dimensional coordinate transformation method based on a one-stop coordinate control network is proposed. A high precision total

收稿日期:2021-09-05

基金项目:国家重点研发计划课题资助项目“L485 高应变海洋管道环焊材料及工艺技术”(2018YFC0310305)

作者简介:张士舰(1980-),男,吉林榆树人,高级工程师,学士,主要从事海洋钢结构测量技术研究。E-mail:35326766@

qq.com

station is used to measure all station coordinates in one position. During the horizontal construction of the jacket, the measured points are converted into a one-stop coordinate system by the transformation of the three-dimensional coordinates of the station. So it can effectively eliminate the jacket elevation error caused by earth curvature. The experimental results show that the elevation measurement value is basically the same using the three-dimensional coordinate transformation method based on one-stop coordinate control network no matter where the total station is erected. Hence this approach can eliminate the error caused by the curvature of earth, which is of great significance to accurately control the dimension of super large jacket.

Keywords: Curvature of the earth; Super-large jacket; Free station; Three-dimensional coordinate transformation; Coordinate control network

0 前言

大型导管架长度一般超过 100 m,采用卧式建造,为保证建造精度一般使用传统坐标控制网进行尺寸控制^[1-6],其中平面控制网采用边角平差控制网,高程控制网采用水准平差网,测量导管架各个安装部件时常常采用自由设站法^[7-13],由于自由设站测量多个控制网站点并运用最小二乘法进行坐标转换,其测量精度高,对于尺寸不超过 150 m 的导管架,地球曲率对高程的影响不超过 2 mm^[14-15],可以忽略不计,因此传统的坐标控制网配合自由设站法可以很好地控制大型导管架尺寸。陆丰 15-1 FPP 导管架属超大型导管架,重达 3×10^4 t,长度接近 300 m,其控制网的最大边长超过 400 m,根据地球曲率对高程的改正计算公式^[14-15],地球曲率对陆丰 15-1 FPP 导管架高程造成的误差超过 14 mm,陆丰 15-1 FPP 导管架共有 12 层井口片,海洋平台建造规范中对井口导向要求为:井口导向不能超过导向的最佳拟合线 12 mm^[16],运用传统的高程控制网配合自由设站方法不能消除地球曲率引起的高程误差,无法保证导管架的井口共线度。不同于公路桥梁或者其他固定在地表的大型建筑物,固定在地表的建筑物需要与地球曲率相匹配,而卧式建造的超大型导管架建完后最终要直立安装在海中,因此超大型导管架必须考虑地球曲率对高程的影响,而传统的高程控制网配合自由设站方法不再适用。基于上述原因,本文提出一种基于一站式坐标控制网的三维坐标转换方法,在大型导管架建造前,首先利用高精度全站仪一站测量全部坐标控制点形成初始一站式坐标控制网,在超大型导管架后续建造过程中通过三维坐标转换使被测点转换到一站式初始坐标系中,这样就可以消除地球曲率对高程的影响,从而保证超大型导管架尺寸精度。

1 一站式坐标控制网的建立

为了消除地球曲率的影响,不再建立传统桩式导管架控制网,而是建立一站式坐标控制网。在超大型导管架建造前,首先使用高精度全站仪架设在通视良好的地方,以保证全站仪可以一站测量所有控制点,根据后期测量需要,在超大型导管架左右两侧、前后端部以及超大型导管架下方地面上布设若干坐标控制点,用全站仪分 3 次测量各个控制站点坐标再取平均值作为站点的最佳坐标。测量站点坐标的同时测量 2 个中央桁架两端共 4 点三维坐标,在 AUTOCAD 软件中移入超大型导管架模型,通过桁架上的 4 点三维坐标匹配超大型导管架模型中的设计点,使控制网中的各站点变换到超大型导管架模型的坐标系中,形成一站式控制网的最终坐标。以陆丰 15-1 FPP 导管架为例,一站式控制网站点布置见图 1。

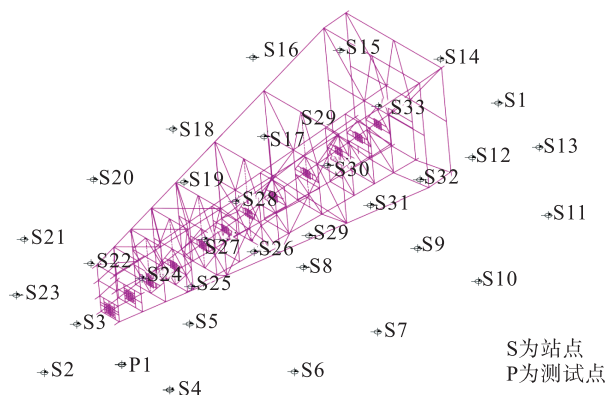


图 1 陆丰 15-1 FPP 导管架一站式坐标控制网控制点分布图

Fig. 1 Lufeng15-1 FPP jacket one-stop coordinate control network

2 三维坐标转换模型

全站仪测量一站式坐标控制网中的几个站点(大于

4 点),再测量超大型导管架安装部件被测点,设控制网几个站点的实测坐标为 (x_i, y_i, z_i) ,一站式控制网站点的理论坐标为 (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) ,控制网实测站点首先绕 z 轴旋转 α 角,然后,绕 x 轴旋转 β 角,再绕 y 轴旋转 γ 角,最

后分别沿 x 轴、 y 轴及 z 轴平移 (p, q, r) 到一站式控制网站点理论位置,通过这样变换后,实测站点集的坐标与理论站点集坐标的偏差为 (v_x, v_y, v_z) ,则坐标变换的矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \\ v_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & \sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \end{bmatrix} \quad (1)$$

设 $\cos \gamma = a, \sin \gamma = b, \cos \beta = c, \sin \beta = d, \cos \alpha = e, \sin \alpha = f$ 则式(1)变化为:

$$\begin{bmatrix} v_{xi} \\ v_{yi} \\ v_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ae + bdf & -af + bde & bc \\ cf & ce & -d \\ -be + adf & bf + ade & ac \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \end{bmatrix} \quad (2)$$

设坐标变换 9 个参数 $a, b, c, d, e, f, p, q, r$ 的初始值为 $a_0, b_0, c_0, d_0, e_0, f_0, p_0, q_0, r_0$,为计算初始值,引入 12 个临时参数 $G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R$,使 $P = p_0, Q = q_0, R = r_0, G = a_0 e_0 + b_0 d_0 f_0, H = -a_0 f_0 + b_0 d_0 e_0$,

$I = b_0 c_0, J = c_0 f_0, K = c_0 e_0, L = -d_0, M = -b_0 e_0 + a_0 d_0 f_0, N = b_0 f_0 + a_0 d_0 e_0, O = a_0 c_0$ 。

将式(2)省去误差项后简化为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x_{0i} \\ y_{0i} \\ z_{0i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_0 e_0 + b_0 d_0 f_0 & -a_0 f_0 + b_0 d_0 e_0 & b_0 c_0 \\ c_0 f_0 & c_0 e_0 & -d_0 \\ -b_0 e_0 + a_0 d_0 f_0 & b_0 f_0 + a_0 d_0 e_0 & a_0 c_0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_0 \\ q_0 \\ r_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & H & I \\ J & K & L \\ M & N & O \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可知,至少需要 4 组数据才可以计算 12 个临时参数 $G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R$,设此 4 点编号

分别为 $M1, M2, M3, M4$,把式(3)做如下变换:

$$\begin{bmatrix} x_{0p1} \\ y_{0p1} \\ z_{0p1} \\ x_{0p2} \\ y_{0p2} \\ z_{0p2} \\ x_{0p3} \\ y_{0p3} \\ z_{0p3} \\ x_{0p4} \\ y_{0p4} \\ z_{0p4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_{p1} & y_{p1} & z_{p1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p1} & y_{p1} & z_{p1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p1} & y_{p1} & z_{p1} \\ 1 & 0 & 0 & x_{p2} & y_{p2} & z_{p2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p2} & y_{p2} & z_{p2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p2} & y_{p2} & z_{p2} \\ 1 & 0 & 0 & x_{p3} & y_{p3} & z_{p3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p3} & y_{p3} & z_{p3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p3} & y_{p3} & z_{p3} \\ 1 & 0 & 0 & x_{p4} & y_{p4} & z_{p4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p4} & y_{p4} & z_{p4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{p4} & y_{p4} & z_{p4} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P \\ Q \\ R \\ G \\ H \\ I \\ J \\ K \\ L \\ M \\ N \\ O \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可计算出 12 个临时参数 $G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R$,根据这 12 个临时参数的等式推导出 9 个

参数坐标变换的 2 组初始值,结果如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_0 = \frac{O}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ b_0 = \frac{I}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ c_0 = \frac{J}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ d_0 = -L \\ e_0 = \frac{K}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ f_0 = \frac{J}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ p_0 = P \\ q_0 = Q \\ r_0 = R \end{array} \right. \quad \text{或} \quad \left\{ \begin{array}{l} a_0 = -\frac{O}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ b_0 = -\frac{I}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ c_0 = -\frac{J}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ d_0 = -L \\ e_0 = -\frac{K}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ f_0 = -\frac{J}{\sqrt{\frac{(K-J)(O-I) - L(O+I)(K+J)}{M+N+G+H}}} \\ p_0 = P \\ q_0 = Q \\ r_0 = R \end{array} \right. \quad (5)$$

在平差计算过程中,选择式(5)初始值中的任意一组都可以。

根据最小二乘原理 $\sum_{i=1}^n (v_{xi}^2 + v_{yi}^2 + v_{zi}^2) = \min$, 并且要满足 $a^2 + b^2 = 1, c^2 + d^2 = 1, e^2 + f^2 = 1$ 三组约束条件, 运用带约束条件的间接平差方法计算 9 个参数^[17-21]。将计算的 9 个参数再作为初始参数进行迭代计算出最终的最佳参数。在此基础上,根据式(2)(去掉误差项)就可计算出超大型导管架上被测点变换到一站式坐标系下的坐标值,该坐标值的高程是消除了地球曲率影响的。

3 实验数据及分析

以陆丰 15-1 FPP 导管架项目为实验对象,见图 2。

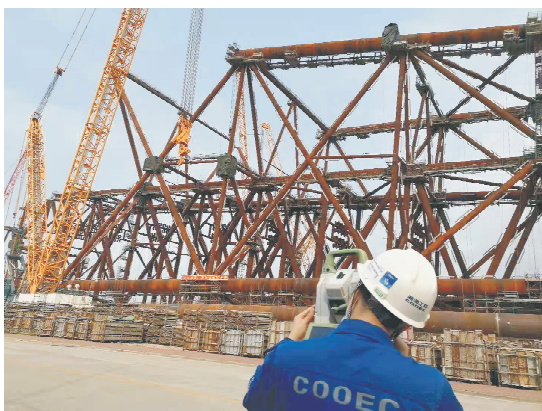


图 2 建造中的陆丰 15-1 FPP 导管架照片

Fig. 2 Lufeng 15-1 FPP jacket under construction

使用徕卡 TS60 全站仪建立一站式坐标控制网,徕卡 TS60 全站仪测角精度为 0.5 s,测距精度为 1 (固定误差) + 1.5×10^{-6} (比例误差),一站式控制网一共包括 33 个控制站点(S1 ~ S33),为了进行数据对比实验,全站仪测量一站式控制网各站点的同时,再测量超大型导管架前部附近地面测试点 P1 点(一站式控制网站点布置见图 1)。为了保证测量精度,选择的公共站点分布范围要尽量大于被测点所在位置范围,否则会因公共站点分布范围小而导致被测点误差放大。选择 5 个距离较远且分散的站点分别为 S1、S2、S6、S10、S29,全站仪分别架设在超大型导管架前部和尾部距离 300 m 左右的 2 个位置,全站仪调平后首先用自由设站的方法测量 5 个站点和测试点,设自由设站测量站点高程和一站式控制网高程值分别为 H_i 和 H'_i ,自由设站测量测试点高程为 H_p ,通过自由设站法计算的 P1 点最终高程值 $H'_p = H_p - \sum_{i=1}^n (H_i - H'_i) / n$,数据见表 1。

从表 1 数据计算可知,自由设站法第一位置测量的 P1 点高程值为 -5.505 9 m,与初始坐标系相差 -0.011 2 m,自由设站法第二位置测量的 P1 点高程值为 -5.519 6 m,与初始坐标系相差 +0.002 5 m,P1 点在第一位置和第二位置的高程差值达到 0.013 7 m,这是因为全站仪架设的第一位置距离初始位置的原点更远,受到的地球曲率影响更大,第二位置距离初始位置的原点较近,受到的地球曲率影响也较小。由此可以看出,自由设站在大范围测量同一点的高程因全站仪架设的位置不同而不同,自由设站法无法消除地球曲率的影响,不适合测量超大型导管架高程。

表 1 自由设站法站点及测试点高程数据表

Tab. 1 Elevation data of stations and test point with free station method

站点及测试点	一站式控制网站点及测试点高程值 /m	自由设站第一位置测量的站点及测试点高程值 /m	自由设站第一位置站点高程差值 /m	自由设站第二位置测量的站点及测试点高程值 /m	自由设站第二位置站点高程差值 /m
S1	-5.783 2	0.021 8	5.805 0	0.417 8	6.201 0
S2	-6.443 7	-0.618 6	5.825 1	-0.248 5	6.195 2
S6	-5.747 6	0.073 1	5.820 7	0.449 6	6.197 2
S10	-5.218 2	0.595 1	5.813 3	0.981 7	6.199 9
S29	-5.803 0	0.012 3	5.815 3	0.395 8	6.198 8
P1	-5.517 1	0.310 0	—	0.678 8	—

之后运用三维坐标转换方法计算 P1 点高程,全站仪同样架设在自由设站时的两个位置,关闭自动补偿功能,分别测量并存储站点 S1、S2、S6、S10、S29 及 P1 点,测量数据见表 2。

表 2 三维坐标转换法站点及测试点数据表

Tab. 2 Station and test point coordinates with 3D coordinate transformation method

站点及测试点	一站式控制网站点及测试点坐标 /m			全站仪第一位置测量站点及测试点坐标 /m			全站仪第二位置测量站点及测试点坐标 /m		
	x	y	z	x	y	z	x	y	z
S1	1.663 7	-95.666 0	-5.783 2	-116.999 7	-360.715 8	0.656 4	112.731 6	-25.715 9	0.156 7
S2	-3.874 5	361.550 0	-6.443 7	83.893 1	50.039 2	-0.436 3	-91.684 4	383.286 6	-1.951 8
S6	-127.312 4	237.175 9	-5.747 6	-82.317 1	-5.443 6	-0.234 8	-148.508 7	217.533 5	-0.179 0
S10	-142.531 2	68.178 9	-5.218 2	-171.996 3	-149.494 3	0.367 8	-88.484 5	58.827 9	0.977 7
S29	-18.409 6	112.652 6	-5.803 0	-41.137 0	-165.665 6	0.355 2	3.801 4	152.978 9	-0.429 1
P1	-36.509 1	316.971 4	-5.517 1	34.683 6	24.926 1	0.368 2	-101.602 4	328.946 3	-0.704 9

运用基于一站式坐标控制网的三维坐标转换方法分别对全站仪第一位置及第二位置的 5 个站点与一站式初始坐标系下的 5 个站点进行三维坐标匹配,可以准确计算出 9 个坐标转换参数,根据式(2)(去掉误差项)将第一位置及第二位置的 P1 点转换到初始坐标系中,2 个位置的计算数据偏差值见表 3~4。

表 3 全站仪第一位置站点及测试点坐标转换结果表

Tab. 3 Coordinates conversion results of the stations and test point at first position

站点及测试点	一站式控制网站点及测试点坐标 /m			第一位置测量的站点及测试点坐标转换后坐标 /m			第一位置测量的站点及测试点坐标转换后坐标偏差 /m		
	x	y	z	x	y	z	Δx	Δy	Δz
S1	1.663 7	-95.666 0	-5.783 2	1.664 5	-95.667 8	-5.783 5	0.000 8	-0.001 8	-0.000 3
S2	-3.874 5	361.550 0	-6.443 7	-3.876 9	361.549 4	-6.444 5	-0.002 4	-0.000 6	-0.000 8
S6	-127.312 4	237.175 9	-5.747 6	-127.311 0	237.179 6	-5.746 8	0.001 8	0.003 7	0.000 8
S10	-142.531 2	68.178 9	-5.218 2	-142.534 0	68.178 7	-5.219 0	-0.002 8	-0.000 2	-0.000 8
S29	-18.409 6	112.652 6	-5.803 0	-18.407 0	112.651 5	-5.801 8	0.002 6	-0.001 1	0.001 2
P1	-36.509 1	316.971 4	-5.517 1	-36.507 5	316.970 5	-5.519 2	0.001 6	-0.000 9	-0.002 1

表 4 全站仪第二位置站点及测试点坐标转换结果表

Tab.4 Coordinates conversion results of the stations and test point at second position

站点及 测试点	一站式控制网站点及 测试点坐标 /m			第二位置测量的站点及 测试点坐标转换后坐标 /m			第二位置测量的站点及 测试点坐标转换后坐标偏差 /m		
	x	y	z	x	y	z	Δx	Δy	Δz
S1	1.663 7	-95.666 0	-5.783 2	1.664 0	-95.663 2	-5.782 2	0.000 2	0.002 8	0.001 0
S2	-3.874 5	361.550 0	-6.443 7	-3.873 6	361.548 3	-6.443 5	0.000 8	-0.001 7	0.000 2
S6	-127.312 4	237.175 9	-5.747 6	-127.313 0	237.175 8	-5.746 5	-0.000 5	0.000 1	0.001 1
S10	-142.531 2	68.178 9	-5.218 2	-142.529 0	68.179 1	-5.219 0	0.002 1	0.000 2	-0.000 8
S29	-18.409 6	112.652 6	-5.803 0	-18.412 3	112.651 3	-5.804 5	-0.002 7	-0.001 3	-0.001 5
P1	-36.509 1	316.971 4	-5.517 1	-36.506 7	316.972 3	-5.518 8	0.002 4	0.000 9	-0.001 7

此次实验中,全站仪第一次与第二次架设位置距离超过 300 m,最远两站点 S1 与 S2 距离超过 450 m,此种情况下,自由设站法无法消除地球曲率对高程的影响,但从表 3~4 可以看到,全站仪两个位置观测的 P1 点经坐标变换后与初始坐标系下高程偏差都只有 2 mm 左右,第一次与第二次计算结果几乎相同,不受全站仪架设位置影响,说明基于一站式坐标控制网的三维坐标转换方法有效地解决了地球曲率对高程的影响,对超大型导管架高程精确控制起到了作用。

4 结论

1)基于一站式坐标控制网的三维坐标转换法测量超大型导管架,利用高精度全站仪建立一站式测量控制网,无需建立基桩式固定站点,只需设置或者埋设若干简易站点,成本低而且站点多,全站仪后期测量可以选择更多公共转站点。

2)基于一站式的三维坐标转换法,通过多个站点最小二乘法匹配,保证了平面及高程测量精度,有效地消除了地球曲率对超大型导管架高程的影响。

3)全站仪在后续测量过程关闭了自动补偿,省略了繁琐的调平过程,提高了测量效率。

4)由于地球曲率对超大型导管架高程测量精度影响较大,基于一站式坐标控制网的三维坐标转换法消除了地球曲率对高程的影响,目前像陆丰 15-1 FPP 这样的超大型导管架数量还比较少,但是随着深水海洋石油的开发,未来超大型深水导管架数量会大大增加,本文方法将得到广泛推广。

参考文献:

[1] 李景福,冯斌.番禺 34-1 油田导管架测量控制网的建立及应用[J].中国海上油气,2014,26(6):127-130.
LI Jingfu, FENG Bin. Establishment and application of

measuring control network in PY34-1 oilfield jacket construction [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26 (6): 127-130.

[2] 张志宽.大型导管架三维坐标控制网尺寸控制技术初步分析[J].中国造船,2012,53(2):86-91.

ZHANG Zhikuan. Preliminary analysis of huge jacket dimension control technology using three-dimensional coordinates control net[J]. Shipbuilding of China, 2012, 53 (2): 86-91.

[3] 刘荣坤,杨青峰,李家军,等.三维坐标控制网在大型模块尺寸控制中的应用[J].海洋工程装备与技术,2018,5(4):274-277.

LIU Rongkun, YANG Qingfeng, LI Jiajun, et al. Application of three-dimensional coordinate system to dimensional control of large-scale modules [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2018, 5 (4): 274-277.

[4] 刘春杰,张士舰,李小红,等.一种导管架整体尺寸检测方法[J].测绘工程,2014,23(2):39-44.

LIU Chunjie, ZHANG Shijian, LI Xiaohong, et al. A method of surveying jacket's whole dimensions [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2014, 23 (2): 39-44.

[5] 刘春杰,张士舰,孙云虎.三维坐标系下检测导管架各圆形杆件空间位置状态的方法:ZL201010115279. X. [P]. 2012-11-28.

LIU Chunjie, ZHANG Shijian, SUN Yunhu. A method of detecting the spatial position of circular members of jacket in three-dimensional coordinate system: ZL201010115279. X. [P]. 2012-11-28.

[6] 徐慧,刘远,熊国宝,等.导管架质量控制点的精度与误差椭圆[J].石油工程建设,2005,31(2):32-34.

XU Hui, LIU Yuan, XIONG Guobao, et al. Accuracy and error of jacket quality control points [J]. Petroleum Engineering Construction, 2005, 31 (2): 32-34.

[7] 李延山,彭仪普.全站仪中自由设站坐标解求和精度分析[J].铁路航测,2002,22(4):15-17.

LI Yanshan, PENG Yipu. The coordinate solution and precision analysis of free station positioning in ETS [J]. Railway Air Survey, 2002, 22 (4): 15-17.

- [8] 王 洪. 全站仪自由设站法精度分析及应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(4): 82-85.
WANG Hong. Free station of total station's accuracy analysis and research of its application [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2016, 39 (4): 82-85.
- [9] 王继刚, 赵保红. 自由设站的原理及应用[J]. 连云港化工高等专科学校学报, 2002, 13(4): 46-47.
WANG Jigang, ZHAO Baohong. Principle and application of free station [J]. Journal of Lianyungang College of Chemical Technology, 2002, 13 (4): 46-47.
- [10] 王继君. 全站仪自由设站测量技术应用及测量精度思考[J]. 机械管理开发, 2018, 33(11): 191-193.
WANG Jijun. Application of survey technology of free station of total station and consideration of measurement accuracy [J]. Mechanical Management and Development, 2018, 33 (11): 191-193.
- [11] 李怀海, 郭秋云. 全站仪自由设站法在地籍测量中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2018, 13(3): 180-184.
LI Huaihai, GUO Qiuyun. The application of total station freely set-station method for cadastral survey [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2018, 13 (3): 180-184.
- [12] 陈伟康, 何 巧. 自由设站法在变形监测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2014, 37(7): 197-199.
CHEN Weikang, HE Qiao. Application of freedom station in deformation monitoring [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2014, 37 (7): 197-199.
- [13] 罗旭佳, 高 飞, 胡小华, 等. 全站仪自由设站在测绘中的应用[J]. 勘察科学技术, 2010, 27(1): 44-45.
LUO Xujia, GAO Fei, HU Xiaohua, et al. Application of total station in free-station method for surveying and mapping [J]. Site Investigation Science and Technology, 2010, 27 (1): 44-45.
- [14] 翟 翊, 庞葆华. 也谈三角高程测量中地球曲率的改正[J]. 地矿测绘, 2006, 22(1): 8-9.
ZHAI Yi, PANG Baohua. Talking about earth-curvature correction in trigonometric leveling [J]. Surveying and Mapping of Geology and Mine, 2006, 22 (1): 8-9.
- [15] 骆帝骧. 浅谈三角高程测量的“两差”影响[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(8): 222-224.
LUO Dixiang. A brief analysis of the influence of “Earth Curvature” and “Vertical Atmospheric Refraction” of trigonometric leveling [J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2012, 35 (8): 222-224.
- [16] 张士舰, 杨青峰, 李小红, 等. 一种精确测量深水导管架井口导向位置的方法[J]. 石油工程建设, 2018, 45(1): 88-92.
ZHANG Shijian, YANG Qingfeng, LI Xiaohong, et al. A new method for accurate measurement of jacket's conductor guide [J]. Petroleum Engineering Construction, 2018, 45 (1): 88-92.
- [17] 陶本藻, 邱卫宁, 黄加纳. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
TAO Benzao, QIU Weining, HUANG Jiana. Error theory and measurement adjustment basis [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2003.
- [18] 樊功瑜. 误差理论与测量平差[M]. 上海: 同济大学出版社, 1998.
FAN Gongyu. Error theory and measurement adjustment [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1998.
- [19] 靳祥生. 测量平差[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2010.
JIN Xiangsheng. Measurement adjustment [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2010.
- [20] 朱建军, 左庭英, 宋迎春. 误差理论与测量平差基础[M]. 北京: 测绘出版社, 2013.
ZHU Jianjun, ZUO Tingying, SONG Yingchun. Error theory and measurement adjustment [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013.
- [21] 王解先, 季凯敏. 工业测量拟合[M]. 北京: 测绘出版社, 2008.
WANG Jiexian, JI Kaimin. Industrial measurement fitting [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008.

西气东输年输气量首超千亿立方米

据国家管网集团消息:西气东输管道系统 2021 年累计输送天然气超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这是此管道系统年输气量首次超过千亿立方米。

西气东输工程是实施西部大开发战略的标志性工程,也是国家管网集团运营管理的“全国一张网”骨干天然气管道。目前,我国干线天然气管网的一次入网量为每年 $1\,900 \times 10^8 \text{ m}^3$,西气东输管道系统输量占总量的 50% 以上。西气东输管道自投产以来,累计输送天然气超 $7\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,惠及我国西部、长三角、珠三角、华中等地区的 400 多个城市和 3 000 余家大中型企业及近 5 亿人口。据测算, $7\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气折合替代标煤 $9.32 \times 10^8 \text{ t}$,减少二氧化碳排放 $10.24 \times 10^8 \text{ t}$ 、粉尘 $5.08 \times 10^8 \text{ t}$ 。

(周 舟 摘编自中国石油新闻中心)