



# 山区河流GPS-RTK水深测量姿态改正研究

宋六华

(长江重庆航运工程勘察设计院, 重庆 401147)

**摘要:** 针对GPS-RTK水深测量时测船姿态对测量精度的影响, 结合山区河流大比例尺测图的特殊情况, 通过对GPS天线船体坐标系VFS、换能器船体坐标系VFS与地理坐标系GRF的转换等测船姿态改正的数学模型分析研究, 为正确认知、应用GPS-RTK水深测量姿态误差改正提供一些有益的结论。

**关键词:** GPS-RTK水深测量; 测船姿态改正数学模型; 山区河流姿态改正应用

中图分类号: U 612.23

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)10-0107-04

## Pose rectification of GPS-RTK bathymetric survey for rivers of mountainous area

SONG Liu-hua

(Changjiang Chongqing Harbour and Waterway Engineering Investigation and Design Institute, Chongqing 401147, China)

**Abstract:** For the influence of ship's pose on measurement accuracy in bathymetric survey with GPS-RTK, considering the special situation of the mountainous river's large scale mapping, this paper analyzes the pose correction mathematical model with the transformation of the GPS antenna hull coordinate system VFS, the hull transducer coordinate system VFS and the geographic coordinates GRF. It provides some useful conclusions for correct understanding and pose error correction when using GPS-RTK.

**Key words:** GPS-RTK bathymetric survey; pose rectification model of survey ship; application of pose rectification for mountainous river

由于GPS-RTK能提供测点的瞬时高精度三维解, 通过配置的回声测深仪, 组成水深测量<sup>[1]</sup>系统, 从而得到测点的瞬时三维坐标。这使水深测量变得高效、经济, 安全, 并大大降低了测量人员的工作强度。

但是, 在GPS-RTK测量<sup>[2]</sup>实际应用中, 比较注重通过时延、姿态等改正来获得回声测深换能器处瞬时高精度三维解的过程、各项误差及改正, 而对回声测深过程产生的误差及其消除或削弱研究不够。例如: GPS-RTK水深测量的姿态改正, 其数学模型充分考虑了测船为回声测深换能器提供准确的三维基准, 而未顾及到测船姿态对测深换能器产生影响, 最终对测深结果产生

影响, 这在山区河流大比例尺测图时表现更为突出。

### 1 姿态改正的数学模型分析

GPS-RTK水深测量姿态改正, 主要考虑的是在船体坐标系VFS (Vessel Frame System) 下利用姿态参数实现各个传感器瞬时船体坐标的确定, 以及顾及方位实现VFS向地理坐标系GRF (Geographic Reference Frame) 的转换。即考虑的是船姿对GPS天线处的三维定位解和向换能器处的归位计算, 为回声测深换能器提供准确的三维基准。如图1所示。

1) 首先将GPS天线的VFS系 $(x_G, y_G, z_G)_{VFS}^{SGPS-ant}$ 姿

收稿日期: 2012-08-02

作者简介: 宋六华(1974—), 男, 工程师, 主要从事工程勘察设计研究等方面的工作。

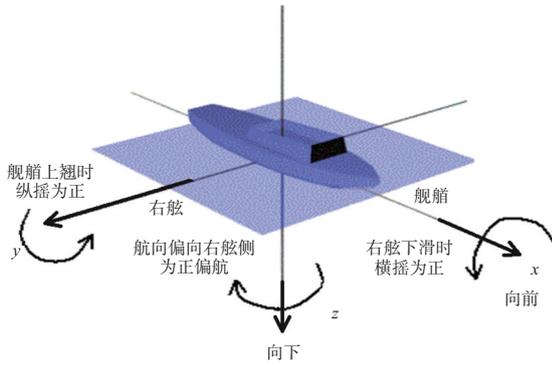


图1 船体坐标系VFS

态改正到GRF系的数学模型如下:

$$R_3(A) = \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_2(p) = \begin{bmatrix} \cos p & 0 & -\sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_1(r) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{GRF}^{GPS-o} = R_3(-A) \times R_2(-p) \times R_1(-r) \times \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix}_{VFS}^{GPS-o} \quad (4)$$

根据上式,可以得到将GPS天线处坐标归位到VFS系原点处的归算精度 $\sigma_x^{GPS-o}$ ,  $\sigma_y^{GPS-o}$ 和 $\sigma_z^{GPS-o}$ 。若VFS下 $(x_G, y_G, z_G) = (5\text{ m}, 5\text{ m}, -7\text{ m})$ , 测量误差 $(dx_G, dy_G, dz_G)$ 为 $(0.01\text{ m}, 0.01\text{ m}, 0.01\text{ m})$ ;

若姿态最大取 $r=7^\circ$ ,  $p=7^\circ$ , 其观测误差取 $dr=0.1^\circ$ ,  $dp=0.1^\circ$ 。方位 $A$ 的观测精度取 $0.1^\circ$ , 则可得表1的航向与定位精度之间的关系。

2) 再将换能器船体标 $(x, y, z)_{VFS}^T$  姿态改正到地理坐标系GRF的数学模型如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}_{GRF}^{T-o} = \begin{bmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos p & 0 & -\sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos r & \sin r \\ 0 & -\sin r & \cos r \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix}_{VFS}^T \quad (5)$$

表1 航向与定位精度

$A/(^\circ)$	$\sigma_x^{GPS-o}/\text{m}$	$\sigma_y^{GPS-o}/\text{m}$	$\sigma_p^{GPS-o}/\text{m}$	$\sigma_z^{GPS-o}/\text{m}$
0.00	0.018 7	0.016 6	0.025 0	0.017 5
15.00	0.019 4	0.015 8	0.025 0	0.017 5
30.00	0.019 6	0.015 6	0.025 0	0.017 5
45.00	0.019 3	0.015 9	0.025 0	0.017 5
60.00	0.018 6	0.016 7	0.025 0	0.017 5
75.00	0.017 6	0.017 7	0.025 0	0.017 5
90.00	0.016 6	0.018 7	0.025 0	0.017 5
105.00	0.015 8	0.019 4	0.025 0	0.017 5
120.00	0.015 6	0.019 6	0.025 0	0.017 5
135.00	0.015 9	0.019 3	0.025 0	0.017 5
150.00	0.016 7	0.018 6	0.025 0	0.017 5
165.00	0.017 7	0.017 6	0.025 0	0.017 5
180.00	0.018 7	0.016 6	0.025 0	0.017 5

注: 归算引起的平面定位精度 $\sigma_p^{GPS-o}$ 最大为 $\pm 0.025\text{ m}$ , 垂直方向 $\sigma_z^{GPS-o}$ 最大为 $\pm 0.018\text{ m}$ 。

采用误差传递法, 将VFS系原点 $o$ 处三维坐标归算到换能器处的归算精度 $\sigma_x^{o-T}$ ,  $\sigma_y^{o-T}$ 和 $\sigma_z^{o-T}$ 。

3) 三维定位的综合影响为:

$$(\sigma_p^{ATT})^2 = (\sigma_p^{GPS-o})^2 + (\sigma_p^{o-T})^2 \quad (6)$$

$$(\sigma_z^{ATT})^2 = (\sigma_z^{GPS-o})^2 + (\sigma_z^{o-T})^2 \quad (7)$$

根据前述计算结果: $\sigma_p^{GPS-o} = \pm 0.025\text{ m}$ ,  $\sigma_z^{GPS-o} = \pm 0.018\text{ m}$ ;  $\sigma_p^{o-T} = \pm 0.017\text{ m}$ ,  $\sigma_z^{o-T} = \pm 0.012\text{ m}$ 。则: $\sigma_p^{ATT} = 0.031\text{ m}$ ,  $\sigma_z^{ATT} = 0.020\text{ m}$ 。

从上述模型和分析可见, 通过GPS-RTK提供的测点瞬时高精度三维解, 对GPS天线处的三维定位解和向换能器处的归位计算, 是完全能够满足为回声测深换能器提供准确的三维基准需要。但未顾及到测船姿态对回声测深换能器产生倾斜, 进而影响到测点三维定位的最终结果。

## 2 测船姿态对测深结果的影响

换能器是固定安装在测船上的, 当测船的姿态发生变化时, 换能器 $(z$ 轴)发射(接收)声波的角度也发生变化。特别是山区V型河床, 河底坡面变化很大, 当测船的姿态发生正交于水流方向的航向变化时, 换能器倾斜对水深测量的影响非常显著, 见图2。

1) 对平面位置的影响。

以换能器不同倾斜角 $a$ 和不同实测水深 $h$ 计算的测点平面位移量 $s$  ( $s = h \sin a$ ) 见表2。引起的平

面坐标位置  $\Delta x=scosa$  和  $\Delta y=ssina$  见表3。

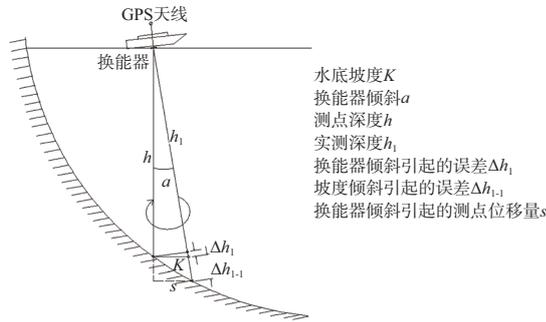


图2 测船姿态与换能器发射（接收）角示意图

表2 不同水深、不同换能器倾角条件下的

测点平面距离位移				m	
水深/m	$a=3^\circ$	$a=7^\circ$	$a=15^\circ$		
3	0.157	0.365	0.776		
6	0.314	0.731	1.553		
10	0.523	1.219	2.588		
15	0.785	1.828	3.882		
20	1.047	2.437	5.176		

表3 不同水深、不同换能器倾角条件下的

测点坐标位移							m	
水深/m	$a=3^\circ$		$a=7^\circ$		$a=15^\circ$			
	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta x$	$\Delta y$		
3	0.157	0.008	0.362	0.044	0.750	0.201		
6	0.313	0.016	0.726	0.090	1.500	0.402		
10	0.522	0.027	1.210	0.149	2.500	0.670		
15	0.784	0.041	1.814	0.223	3.750	1.005		
20	1.046	0.055	2.419	0.297	5.000	1.340		

由此造成实测深度与测点应测深度的差即：

$$h_1 \neq h。$$

2) 对测深深度的影响。

由换能器倾斜 $a$ ，使测深点由垂距变成斜距，在不同水深 $h$ 时，测深误差 $\Delta h_1$ 见表4。

由换能器倾斜 $a$ ，使测点位移 $s$ 后，造成不同水深 $h$ 和不同河底坡度变化 $K$ （最大取 $30^\circ$ ）的测深误差 $\Delta h_{1-1}$ 见表5。

由换能器倾斜 $a$ 和河底坡度变化 $K$ 的综合影响以及相同 $a$ 不同 $K$ 时的综合影响见表6。

表4 不同水深、不同换能器倾角条件下的

测点深度误差				m	
水深/m	$a=3^\circ$	$a=7^\circ$	$a=15^\circ$		
3	0.004	0.022	0.106		
6	0.008	0.045	0.212		
10	0.014	0.075	0.353		
15	0.021	0.113	0.529		
20	0.027	0.150	0.706		

表5 换能器倾角、测点位移影响下不同水深、

河底坡脚产生的测深误差						m
水深	$K=3^\circ$	$K=7^\circ$	$K=15^\circ$	$K=20^\circ$	$K=30^\circ$	
3	0.004	0.022	0.106	0.192	0.464	
6	0.008	0.045	0.212	0.385	0.928	
10	0.014	0.075	0.353	0.642	1.547	
15	0.021	0.113	0.529	0.963	2.320	
20	0.027	0.150	0.706	1.283	3.094	

注：水深 $h$ 不同，位移量 $s$ 不同。

表6 测船姿态变化引起的综合深度误差

水深/m	m				
	$a=3^\circ, k=3^\circ$	$a=7^\circ, k=7^\circ$	$a=15^\circ, k=15^\circ$	$a=7^\circ, k=15^\circ$	$a=7^\circ, k=30^\circ$
3	0.008	0.044	0.212	0.128	0.486
6	0.016	0.090	0.424	0.257	0.973
10	0.028	0.150	0.706	0.428	1.622
15	0.042	0.226	1.058	0.642	2.433
20	0.054	0.300	1.414	0.856	3.244

可见，测船姿态发生变化引起换能器倾斜时的深度误差，则随倾斜角 $a$ 、深度 $h$ 、坡度 $K$ 增大而呈线性增大。在山区河流大比例尺水深测量时的深度，一般小于10 m，但水底坡度的变化常常远大于 $30^\circ$ ，这个误差不容忽视。

若在 $da$ 内的变化为 $d_{h1}$ ，则换能器倾斜引起测深误差为：

$$d_{h1} = \Delta h_1 \tag{8}$$

若在 $dK$ 内的变化为 $d_{h1-1}$ ，则河底坡度倾斜引起测深误差为：

$$d_{h1-1} = \Delta h_{1-1} \tag{9}$$

由此得到：

$$d_h = \Delta h_1 + \Delta h_{1-1} \tag{10}$$

$$h = h_1 + d_h \tag{11}$$

### 3 结语

1) 测船姿态变化会引起换能器倾斜变化，显然，这个误差是姿态改正未能顾及的。所以，不能有了测船姿态改正就忽视了测深系统换能器倾斜引起的误差。应根据测量比例尺、水底坡度、换能器安装情况等，综合考虑测船姿态对三维定位的影响。

2) 换能器倾斜引起测点平面坐标位移量，对一般水深测量定位点的精度影响较小；通过水深改正将其纠正。

3) 测船姿态变化引起换能器倾斜带来的深度误差广泛存在,并在等深线正交方向上影响最大。

4) 当换能器倾斜 $a$ 达到 $15^\circ$ ,水深 $h$ 在3 m,水底坡度 $K$ 在 $15^\circ$ 时,测点的深度误差就会大于现行规范的规定( $\pm 0.15$  m)。对山区V型河床,由于大流速水流的作用使河床主流位置最低,两岸则逐渐呈V型升高,河底坡度变化剧烈,达到 $15^\circ$ 以上非常普遍。同时,山区河流航道等级低(航道窄,曲率半径小,保证水深在2.9~3.0 m,大多为卵石等硬底质河床),当航道保证水深在2.8 m或3.0 m附近时,如果测深误差大于 $\pm 0.15$  m,不仅不能满足现行测量规范的精度要求,还会给船舶通航运输、管理决策等带来巨大影响。

5) 测船姿态变化引起换能器倾斜产生的误差,是能够消除或削弱的,也可以后处理。

换能器倾斜对等深线正交方向上影响最大,而测深线的布设根据现行规范是与等深线正交。因此,安装换能器时应注意与测船轴线的正交,并通过试验获得测船在一定速度上测深时,换能

器能与测船轴线保持正交,并在测深完成后对其是否保持正交进行检查。实施测深时严格按照试验船速进行测量,特别是山区河流大比例尺GPS-RTK水深测量。

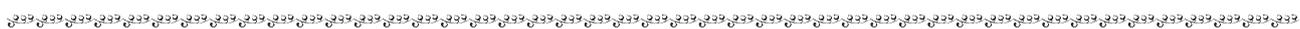
其次,对坡度变化剧烈的重点区域测点,采用与等深线正交方向上的往返测,根据不同深度求取深度改正数。将测深时记录的测点姿态改正数进行对比分析改正。

6) GPS-RTK水深测量是一个综合测量系统,它的时延误差、姿态误差、基准站和流动站设置误差、GPS-RTK误差、测深误差等,正被人们逐步深入的认知,使水深测量变得高效、经济,应用技术也越来越成熟。

参考文献:

- [1] JTJ 203—2001 水运工程测量规范[S].
- [2] CH/T 2009—2010 全球定位系统实时动态测量(RTK)技术规范[S].

(本文编辑 武亚庆)



· 消 息 ·

### 三峡船闸转为五级不补水运行

2012年,三峡水库在前期调洪的基础上开始蓄水,逐步抬升水位,原则上9月30日蓄水位按165.0 m控制,10月底或11月份争取蓄至175.0 m。至9月14日8时,三峡坝上水位已达到164.69 m,按照设计运行要求,三峡船闸由五级补水运行转换为五级不补水运行。结合三峡船闸上下游水位组合计算的门槛最小水深情况,长江三峡通航管理局决定自9月14日将三峡船闸允许过闸船舶的最大吃水由之前的4.0 m调整到4.2 m。允许过闸船舶的最大吃水提高到4.2 m以后,5 000吨级标准船舶可以满载过闸,为航运企业营运效益提升创造有利条件。

摘编自《中国交通报》