

# 多普勒计程仪速度参照系统的误差分析

邹洪<sup>1</sup>, 向大威<sup>2</sup>, 许伟杰<sup>2</sup>, 景永刚<sup>2</sup>, 罗玉兰<sup>2</sup>

(1.上海航海仪器厂,上海 200129; 2.中国科学院声学研究所,上海 200032)

**摘要:**文章分析了一种多普勒计程仪速度参照系统的误差源,该系统由差分卫星定位仪和平台罗经所组成。载体动力与航向控制不稳定、流速不稳定、流向不稳定、差分卫星定位仪的定位误差以及平台罗经的定向误差构成了测速参照系统的误差源。文章还给出了计算机仿真分析结果,从而可以了解速度参照系统的测速误差与主要误差源之间的依存关系。

**关键词:**多普勒计程仪速度参照系统;速度参照系统的误差源;计算机仿真分析

**中图分类号:**TB565 **文献标识码:**A

## Error analysis of speed reference system for ADL

ZOU Hong<sup>1</sup>, XIANG Da-wei<sup>2</sup>, XU Wei-jie<sup>2</sup>, JING Yong-gang<sup>2</sup>, LUO Yu-lan<sup>2</sup>

(1. Shanghai Marine Instrument Factory, Shanghai 200129, China;

2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

**Abstract:** Error sources of the speed reference system for ADL are analyzed. The speed reference system is consisted of DGPS and a platform gyro. Unstable controls of the driving and steering of the vessel, instability of the ocean current velocity and directions, positioning error in the DGPS and direction error of the platform gyro are the error sources of the speed reference system. Computer simulation results are given. From these results, relations between the velocity measuring error of the reference system and main error sources can be obtained.

**Key words:** speed reference system for ADL; error sources of speed reference system; computer simulation analysis

### 1 多普勒计程仪的速度参照系统

#### 1.1 采用高精度多普勒计程仪

若有一台多普勒计程仪,其测速精度比被测的多普勒计程仪的测速精度高 10 倍,则就可将它当作速度参照系统。高精度多普勒计程仪与被测的多普勒计程仪装在同一个运动载体上,从高精度多普勒计程仪实时得到的速度测量值就是速度真值的近似值。当我们用这种方法来测定被测多普勒计程仪的测速精度时,就没有必要对速度参照系统的误差作进一步的分析了。但是,高精度多普勒计程仪的工作频率必须远离被测多普勒计程仪的工作频率,以免相互引入声干扰。由于两者的工作频率相距甚远,故两者允许的最大海区深度必定各不相同。一旦高精度多普勒计程仪的工作频率高于被测的多普勒计程仪的工作频率,则在深海区就无法进行测定。

#### 1.2 采用高精度差分卫星定位仪和高精度平台罗经

高精度差分卫星定位仪(DGPS)和高精度平台

罗经也可以组合成一个速度参照系统。我们从 DGPS 可以得到载体的航迹向 COG (course over ground) 以及航迹方向上的速度 SOG (speed over ground),从高精度平台罗经可以得到载体的航向 (Bearing),航迹向和航向均以真北方向作为参考方向。根据航迹向、航迹方向上的速度以及航向,可以很方便地算得速度参照系统的速度测量值:纵向速度(Y 向速度)和横向速度(X 向速度)。

但是,实际上 DGPS 所给出的 SOG 和 COG 均含有不可忽略的误差。以 SOG 为例,尽管 DGPS 利用卫星信号的载波得到 SOG,但是 SOG 的测量误差也在 0.1Kn 左右。即使是新型的 DGPS,例如 MX412DGPS,其 SOG 测量误差也有 0.05Kn。于是,这种系统就难以直接用作速度参照系统。

当载体严格地按匀速直线运动时,可以将一小段航程段的航迹向与平均航速当作该航程段中点的 COG 与 SOG,再利用航向算得速度参照系统所测得的纵向速度和横向速度<sup>[1~4]</sup>。

由于载体的动力、载体的航向、流速与流向不可能严格保持恒定,再加上 DGPS 的定位误差(DGPS 本身的定位误差和由于 DGPS 的天线摇摆而引入的附加误差)以及罗经的定向误差,因此当我们按上述

收稿日期:2003-03-19;修回日期:2003-05-18

作者简介:邹洪(1962-),男,江西南昌人,高级工程师,研究方向:导航。

方法用这种速度参照系统测定多普勒计程仪测速精度时,必须采用计算机仿真分析上述各种因素对测量精度的影响。

## 2 载体的纵向速度真值与横向速度真值

### 2.1 载体驱动速度的瞬时值

假设第  $i$  个测量点处,单纯由载体动力系统所产生的载体驱动速度的瞬时值(不计入海流的影响)为  $V-S(i)$ ,则:

$$V-S(i) = AV-V-S + \sigma-V-S \times g-V-S(i) \quad (1)$$

式中, $AV-V-S$  为  $V-S(i)$  的均值, $\sigma-V-S$  为  $V-S(i)$  的均方根误差, $g-V-S(i)$  是均方根值为 1 的随机高斯序列。

### 2.2 载体驱动航向的瞬时值

假设第  $i$  个测量点处,由载体操控人员所确定的载体驱动航向的瞬时值(参考方向:真北方向)为  $\theta-S(i)$ ,则:

$$\theta-S(i) = AV-\theta-S + \sigma-\theta-S \times g-\theta-S(i) \quad (2)$$

式中, $AV-\theta-S$  为  $\theta-S(i)$  的均值, $\sigma-\theta-S$  为  $\theta-S(i)$  的均方根误差, $g-\theta-S(i)$  是均方根值为 1 的随机高斯序列。

### 2.3 海流等效流速的瞬时值

假设第  $i$  个测量点处海流等效流速的瞬时值(影响载体运动的海流等效瞬时流速)表示为  $V-C(i)$ ,则:

$$V-C(i) = AV-V-C + \sigma-V-C \times g-V-C(i) \quad (3)$$

式中, $AV-V-C$  为  $V-C(i)$  的均值, $\sigma-V-C$  为  $V-C(i)$  的均方根误差, $g-V-C(i)$  是均方根值为 1 的随机高斯序列。

### 2.4 海流等效流向的瞬时值

假设第  $i$  个测量点处海流等效流向的瞬时值(影响载体运动的海流等效瞬时流向,参考方向:真北方向)表示为  $\theta-C(i)$ ,则:

$$\theta-C(i) = AV-\theta-C + \sigma-\theta-C \times g-\theta-C(i) \quad (4)$$

式中, $AV-\theta-C$  为  $\theta-C(i)$  的均值, $\sigma-\theta-C$  为  $\theta-C(i)$  的均方根误差, $g-\theta-C(i)$  是均方根值为 1 的随机高斯序列。

### 2.5 载体的正北向速度与正东向速度

上述 4 个量,即  $V-S(i)$ 、 $\theta-S(i)$ 、 $V-C(i)$  与  $\theta-C(i)$ ,决定了载体的正北向速度  $V-N(i)$  与正东向速度  $V-E(i)$ ,则:

$$V-N(i) = V-S(i) \times \cos(\theta-S(i)) +$$

$$V-C(i) \times \cos(\theta-C(i)) \quad (5)$$

$$V-E(i) = V-S(i) \times \sin(\theta-S(i)) +$$

$$V-C(i) \times \sin(\theta-C(i)) \quad (6)$$

## 2.6 第 $i$ 个小航程段以及该航程段的正北位移量与正东位移量

如果第  $i$  个测量点至第  $i+M+1$  个测量点构成了第  $i$  个小航程段,则第  $i$  个小航程段的正北位移量  $D-N(i)$  和正东位移量  $D-E(i)$  分别为:

$$D-N(i) = T \times \sum_{j=i}^{i+M} V-N(j) \quad (7)$$

$$D-E(i) = T \times \sum_{j=i}^{i+M} V-E(j) \quad (8)$$

式中, $M+1$  为小航程段内的测量点数,例如当  $M=10$  时每个小航程段包含了 11 个测量点, $T$  为相邻两测量点间的航行时间。

## 2.7 第 $i$ 个小航程段中点载体的纵向速度真值与横向速度真值

载体在第  $i$  个小航程段中点的纵向( $Y$ )速度真值与横向( $X$ )速度真值分别为:

$$V-Y(i) = V-S(i+M/2) + V-C(i+M/2) \times \cos(\theta-C(i+M/2) - \theta-S(i+M/2)) \quad (9)$$

$$V-X(i) = V-C(i+M/2) \times \sin(\theta-C(i+M/2) - \theta-S(i+M/2)) \quad (10)$$

## 3 由速度参照系统测得的载体纵向速度与横向速度

### 3.1 由速度参照系统测得的第 $i$ 个航程段的正北位移量与正东位移量

当采用速度参照系统中的 DGPS 来测量第  $i$  个小航程段的正北位移量  $D-N(i)$  和正东位移量  $D-E(i)$  时,由于 DGPS 的定位误差,则正北位移量的测量值与正东位移量的测量值分别为:

$$D-N-R(i) = D-N(i) + \sigma-N-GPS \times g-SP-N(i) + \sigma-N-GPS \times g-EP-N(i)$$

$$D-E-R(i) = D-E(i) + \sigma-E-GPS \times g-SP-E(i) + \sigma-E-GPS \times g-EP-E(i)$$

式中, $\sigma-N-GPS$  为 DGPS 南北向定位的均方根误差, $\sigma-E-GPS$  为 DGPS 东西向定位的均方根误差, $g-SP-N(i)$ 、 $g-EP-N(i)$ 、 $g-SP-E(i)$  和  $g-EP-E(i)$  是均方根值为 1 的随机高斯序列。在 4 个随机高斯序列中 SP 的含义是起点(START POINT),EP 的含义是终点(END POINT)。由于

决定一个航程段的位移量时,必须在起点与终点均进行定位,从而引入了两个随机定位误差项。

若  $\sigma-GPS$  为 DGPS 定位的均方根误差,则必存在:

$$\sigma-N-GPS \leq \sigma-GPS$$

$$\sigma-E-GPS \leq \sigma-GPS$$

因此  $D-N-R(i)$  和  $D-E-R(i)$  可以近似地表示为:

$$D-N-R(i) = D-N(i) + \sigma-GPS \times g-SP-N(i) + \sigma-GPS \times g-EP-N(i) \quad (11)$$

$$D-E-R(i) = D-E(i) + \sigma-GPS \times g-SP-E(i) + \sigma-GPS \times g-EP-E(i) \quad (12)$$

### 3.2 由速度参照系统测得的第 $i$ 个小航程段的对地速度与航迹向

由速度参照系统所测得的第  $i$  个小航程段的对地速度  $SOG-R(i)$  为:

$$SOG-R(i) = \frac{1}{MT} \sqrt{D-N-R(i)^2 + D-E-R(i)^2} \quad (13)$$

由速度参照系统所测得的第  $i$  个小航程段的航迹向  $COG-R(i)$  为:

$$COG-R(i) = \text{tg}^{-1} \frac{D-E-R(i)}{D-N-R(i)} \quad (14)$$

必须注意反正切函数时的主值区间。

### 3.3 由速度参照系统测得的第 $i$ 个小航程段中点的航向

由速度参照系统中的罗经所测得的第  $i$  个小航程段中点的航向测量值  $BRG-R(i)$  为:

$$BRG-R(i) = \theta-S(i+M/2) + \sigma-\theta-GYRO \times g-\theta-GYRO(i+M/2) \quad (15)$$

式中,  $\sigma-\theta-GYRO$  为罗经的均方根误差,  $g-\theta-GYRO(i+M/2)$  是均方根值为 1 的随机高斯序列。

### 3.4 由速度参照系统测得的第 $i$ 个航程段载体的纵向速度和横向速度

由速度参照系统所测得的第  $i$  个小航程段的载体的  $Y$  向速度和  $X$  向速度分别为:

$$V-Y-R(i) = SOG-R(i) \times \cos(COG-R(i) - BRG-R(i)) \quad (16)$$

$$V-X-R(i) = SOG-R(i) \times \sin(COG-R(i) - BRG-R(i)) \quad (17)$$

### 3.5 随机高斯序列的独立性

必须注意 9 个随机高斯序列  $g-V-S(i)$ 、 $g-\theta-$

$S(i)$ 、 $g-V-C(i)$ 、 $g-\theta-C(i)$ 、 $g-SP-N(i)$ 、 $g-EP-N(i)$ 、 $g-SP-E(i)$ 、 $g-EP-E(i)$  以及  $g-\theta-GYRO(i)$  是互相独立的,理由是它们所对应的事件体是独立的。

## 4 速度参照系统的测量均方根误差

若在整个航行过程中有  $N$  个测量点,则速度参照系统的测量均方根误差为:

$$ERROR-Y = \sqrt{\frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^{N-M} [V-Y-R(i) - V-Y(i)]^2} \quad (18)$$

$$ERROR-X = \sqrt{\frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^{N-M} [V-X-R(i) - V-X(i)]^2} \quad (19)$$

用来测定被测多普勒计程仪测速精度的速度参照系统必须有很小的  $ERROR-Y$  和  $ERROR-X$ , 它们必须分别远小于被测多普勒计程仪的  $Y$  向测速均方根误差和  $X$  向测速均方根误差。

## 5 计算机仿真分析

根据前面的分析内容和计算公式,编制了一个分析程序  $ERROR-ANALYSIS.m$ 。利用这个程序,可以分析各种因素对参照系统测速误差的影响,由于载体的动力易保持恒定而平台罗经定向均方根误差又较小,在分析时不再进行讨论。

分析结果详见下列各表。为了阅读方便,把表中符号的物理意义再重新叙述一遍:

$AV-V-S$ : 单纯由载体动力系统所产生的驱动速度的均值;

$\sigma-V-S$ : 单纯由载体动力系统所产生的驱动速度的均方根误差;

$AV-\theta-S$ : 由载体操控人员所确定的驱动航向的均值;

$\sigma-\theta-S$ : 由载体操控人员所确定的驱动航向的均方根误差;

$AV-V-C$ : 等效流速的均值;

$\sigma-V-C$ : 等效流速的均方根误差;

$AV-\theta-C$ : 等效流向的均值;

$\sigma-\theta-C$ : 等效流向的均方根误差;

$ERROR-Y$ : 速度参照系统  $Y$  方向的测速均方根误差;

$ERROR-X$ : 速度参照系统  $X$  方向的测速均方根误差。

假设恒定动力( $\sigma - V - S = 0$ ),罗经定向均方根误差为  $0.15^\circ$ , DGPS 定位均方根误差一般为  $0.5\text{m}$ , 相邻两测量点间的航行时间  $T$  为  $5\text{s}$ ; 每个小航程段包含了  $M+1$  个测量点, 若  $M$  为  $10$ , 则每个小航程段包含了  $11$  个测量点, 选取的总航程  $L$  为  $2$  海里, 总测量点为  $NUM$ 。表中的  $ERROR - Y$  和  $ERROR - X$  为经过了  $K(K=30)$  次重复计算的平均值。

### 5.1 由载体操控人员的驱动航向控制不稳定对速度参照系统测量精度的影响

表 1 是不同的恒定动力( $AV - V - S = 6\text{kn}, 8\text{kn}, 10\text{kn}, \sigma - V - S = 0$ )、严格或基本保持逆流航行( $AV - \theta - S = AV - \theta - C - 180^\circ = 38.2^\circ$ )、恒定等效流速( $AV - V - C = 2\text{kn}, \sigma - V - C = 0$ )以及恒定等效流向( $AV - \theta - C = 218.2^\circ, \sigma - \theta - C = 0$ )时, 由驱动航向控制不稳定而引起的驱动航向均方根误差  $\sigma - \theta - S$  对速度参照系统测量精度的影响。

表 1

$AV - V - S$ /kn	$\sigma - \theta - S$ /°	$ERROR - Y$ /kn	$ERROR - X$ /kn
6	0/3	0.0274	0.0317
6	0.2/3	0.0277	0.0320
6	0.5/3	0.0275	0.0355
6	1/3	0.0277	0.0458
8	0/3	0.0270	0.0336
8	0.2/3	0.0274	0.0344
8	0.5/3	0.0277	0.0402
8	1/3	0.0278	0.0552
10	0/3	0.0277	0.0359
10	0.2/3	0.0275	0.0372
10	0.5/3	0.0280	0.0448
10	1/3	0.0276	0.0674

由表 1 可知: 当载体动力系统所产生的不同的驱动速度均值  $AV - V - S$  在  $6\text{kn} \sim 10\text{kn}$  的范围内且  $\sigma - V - S = 0$ 、严格保持逆流航行( $AV - \theta - S$  恒定,  $\sigma - \theta - S = 0$ )、恒定等效流速( $AV - V - C$  恒定,  $\sigma - V - C = 0$ )以及恒定等效流向( $AV - \theta - C$  恒定,  $\sigma - \theta - C = 0$ )时, 则测速的均方根误差很小(不超过  $0.035\text{kn}$ )。误差主要由 DGPS 和平台罗经的误差引入。

当载体动力系统所产生的不同的驱动速度均值  $AV - V - S$  在  $6\text{kn} \sim 10\text{kn}$  的范围内且  $\sigma - V - S = 0$ 、基本保持逆流航行( $AV - \theta - S$  恒定,  $\sigma - \theta - S \approx 0$ )、恒定等效流速( $AV - V - C$  恒定,  $\sigma - V - C = 0$ )以及恒定等效流向( $AV - \theta - C$  恒定,  $\sigma - \theta - C = 0$ )时, 则由驱动航向控制不稳定而引起的驱动航向均方根误差  $\sigma - \theta - S$  对横向测速均方根误差的影响较大, 而对纵

向测速均方根误差的影响较小。测速的均方根误差主要由驱动航向均方根误差、DGPS 和平台罗经的误差引入。

表 2 是不同的恒定动力( $AV - V - S = 6\text{kn}, 8\text{kn}, 10\text{kn}, \sigma - V - S = 0$ )、严格或基本保持逆流航行( $AV - \theta - S = AV - \theta - C - 180^\circ = 38.2^\circ$ )、不稳定等效流速( $AV - V - C = 2\text{kn}, \sigma - V - C = 0.2/3\text{kn}$ )以及不稳定等效流向( $AV - \theta - C = 218.2^\circ, \sigma - \theta - C = 1^\circ/3$ )时, 由驱动航向控制不稳定而引起的驱动航向均方根误差  $\sigma - \theta - S$  对速度参照系统测量精度的影响。表 3 与表 2 的情况基本相同, 所不同的只是  $AV - \theta - S = 61.8^\circ, AV - \theta - C = 241.8^\circ$ 。

表 2

$AV - V - S$ /kn	$\sigma - \theta - S$ /°	$ERROR - Y$ /kn	$ERROR - X$ /kn
6	0/3	0.0684	0.0314
6	0.2/3	0.0689	0.0321
6	0.5/3	0.0687	0.0354
6	1/3	0.0695	0.0453
8	0/3	0.0690	0.0334
8	0.2/3	0.0687	0.0342
8	0.5/3	0.0697	0.0398
8	1/3	0.0690	0.0561
10	0/3	0.0682	0.0360
10	0.2/3	0.0698	0.0374
10	0.5/3	0.0695	0.0455
10	1/3	0.0683	0.0659

表 3

$AV - V - S$ /kn	$\sigma - \theta - S$ /°	$ERROR - Y$ /kn	$ERROR - X$ /kn
6	0/3	0.0684	0.0313
6	0.2/3	0.0689	0.0320
6	0.5/3	0.0696	0.0358
6	1/3	0.0684	0.0455
8	0/3	0.0686	0.0340
8	0.2/3	0.0684	0.0345
8	0.5/3	0.0696	0.0406
8	1/3	0.0692	0.0557
10	0/3	0.0698	0.0358
10	0.2/3	0.0695	0.0381
10	0.5/3	0.0700	0.0455
10	1/3	0.0695	0.0645

由表 2 与表 3 可知: 当载体动力系统所产生的不同的驱动速度均值  $AV - V - S$  在  $6\text{kn} \sim 10\text{kn}$  的范围内且  $\sigma - V - S = 0$ 、严格保持逆流航行( $AV - \theta - S$  恒定,  $\sigma - \theta - S = 0$ )、不稳定等效流速( $AV - V - C$  恒定,  $\sigma - V - C = 0.2/3\text{kn}$ )以及不稳定等效流向( $AV -$

$\theta - C$  恒定,  $\sigma - \theta - C = 1^\circ/3$  时, 则纵向测速的均方根误差与表 1 相比有所增加, 而横向测速的均方根误差变化不大。误差主要由等效流速的不稳定、等效流向的不稳定、DGPS 和平台罗经的误差引入。

当载体动力系统所产生的不同的驱动速度均值  $AV - V - S$  在  $6\text{kn} \sim 10\text{kn}$  的范围内且  $\sigma - V - S = 0$ 、基本保持逆流航行 ( $AV - \theta - S$  恒定,  $\sigma - \theta - S \approx 0$ )、不稳定等效流速 ( $AV - V - C$  恒定,  $\sigma - V - C = 0.2/3\text{kn}$ ) 以及不稳定等效流向 ( $AV - \theta - C$  恒定,  $\sigma - \theta - C = 1^\circ/3$ ) 时, 则由驱动航向控制不稳定而引起的驱动航向均方根误差 ( $\sigma - \theta - S$ ), 对横向测速均方根误差的影响较大, 而对纵向测速均方根误差的影响较小。测速的均方根误差主要由驱动航向均方根误差、等效流速的不稳定、等效流向的不稳定、DGPS 和平台罗经的误差引入。

表 4 是不同的恒定动力 ( $AV - V - S = 6\text{kn}, 8\text{kn}, 10\text{kn}, \sigma - V - S = 0$ )、严格或基本保持顺流航行 ( $AV - \theta - S = AV - \theta - C = 38.2^\circ$ )、不稳定等效流速 ( $AV - V - C = 2\text{kn}, \sigma - V - C = 0.2/3\text{kn}$ ) 以及不稳定等效流向 ( $AV - \theta - C = 38.2^\circ, \sigma - \theta - C = 1^\circ/3$ ) 时, 由驱动航向控制不稳定而引起的驱动航向均方根误差  $\sigma - \theta - S$  对速度参照系统测量精度的影响。

表 4

$AV - V - S$ /kn	$\sigma - \theta - S$ /°	$ERROR - Y$ /kn	$ERROR - X$ /kn
6	0/3	0.0688	0.0357
6	0.2/3	0.0689	0.0361
6	0.5/3	0.0680	0.0401
6	1/3	0.0681	0.0490
8	0/3	0.0691	0.0393
8	0.2/3	0.0685	0.0402
8	0.5/3	0.0703	0.0454
8	1/3	0.0679	0.0596
10	0/3	0.0692	0.0432
10	0.2/3	0.0679	0.0437
10	0.5/3	0.0690	0.0502
10	1/3	0.0686	0.0691

由表 4 得出的顺流情况下的结论与由表 2 得出的逆流情况下的结论相仿, 故不再重复。

### 5.2 不稳定海流的等效流速均值对速度参照系统测量精度的影响

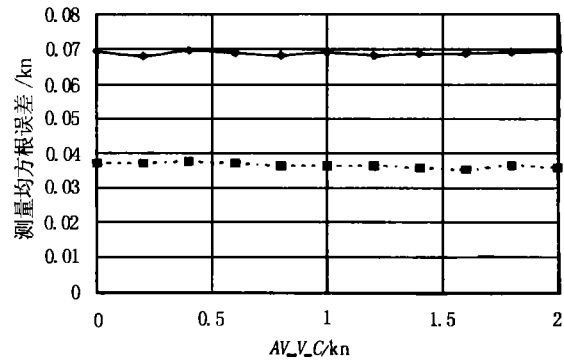
表 5 是恒定动力 ( $AV - V - S = 10\text{kn}, \sigma - V - S = 0$ )、严格保持逆流航行 ( $AV - \theta - S = AV - \theta - C - 180^\circ = 38.2^\circ, \sigma - \theta - S = 0$ )、不稳定海流的等效流速均值均为  $AV - V - C = 2\text{kn}$  以及不稳定等效流向 ( $AV - \theta - C = 218.2^\circ, \sigma - \theta - C = 1^\circ/3$ ) 时, 不稳定海流的等效流速均方根误差  $\sigma - V - C$  对参照系统测速精度的影响。

效流向 ( $AV - \theta - C = 218.2^\circ, \sigma - \theta - C = 1^\circ/3$ ) 时, 不稳定海流的等效流速均值  $AV - V - C$  对速度参照系统测量精度的影响。

由表 5 可知, 当载体动力系统所产生的驱动速度均值  $AV - V - S$  为  $10\text{kn}$  且  $\sigma - V - S = 0$ 、只要严格保持逆流航行 ( $AV - \theta - S$  恒定,  $\sigma - \theta - S = 0$ )、不稳定海流的等效流速的均方根误差  $\sigma - V - C$  保持恒定, 并且不稳定海流的等效流向的均值  $AV - \theta - C$  与均方根误差  $\sigma - \theta - C$  保持不变, 则不稳定海流的等效流速均值  $AV - V - C$  的变化, 对测速均方根误差的影响不大。

表 5

$AV - V - C$ /kn	$ERROR - Y$ /kn	$ERROR - X$ /kn
0	0.0695	0.0372
0.2	0.0681	0.0373
0.4	0.0696	0.0377
0.6	0.0691	0.0373
0.8	0.0683	0.0364
1.0	0.0693	0.0364
1.2	0.0684	0.0365
1.4	0.0687	0.0359
1.6	0.0688	0.0354
1.8	0.0693	0.0365
2.0	0.0694	0.0359



实线:  $ERROR - Y$ ; 虚线:  $ERROR - X$

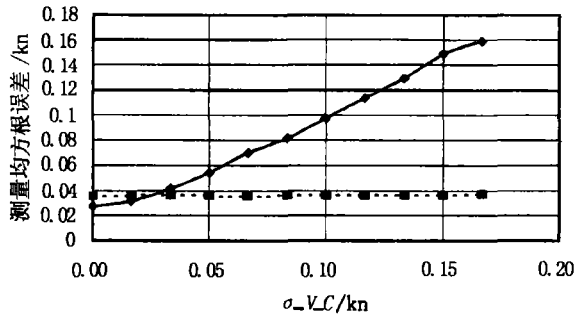
图 1  $AV - V - C$  对速度参照系统测量精度的影响

### 5.3 不稳定海流的等效流速均方根误差对速度参照系统测量精度的影响

表 6 是恒定动力 ( $AV - V - S = 10\text{kn}, \sigma - V - S = 0$ )、严格保持逆流航行 ( $AV - \theta - S = AV - \theta - C - 180^\circ = 38.2^\circ, \sigma - \theta - S = 0$ )、不稳定海流的等效流速均值均为  $AV - V - C = 2\text{kn}$  以及不稳定等效流向 ( $AV - \theta - C = 218.2^\circ, \sigma - \theta - C = 1^\circ/3$ ) 时, 不稳定海流的等效流速均方根误差  $\sigma - V - C$  对参照系统测速精度的影响。

表 6

$\sigma - V - C$ /kn	ERROR - Y /kn	ERROR - X /kn
0/3	0.0275	0.0355
0.05/3	0.0321	0.0353
0.10/3	0.0418	0.0359
0.15/3	0.0542	0.0360
0.20/3	0.0698	0.0357
0.25/3	0.0819	0.0363
0.30/3	0.0975	0.0361
0.35/3	0.1133	0.0360
0.40/3	0.1294	0.0364
0.45/3	0.1488	0.0362
0.50/3	0.1589	0.0366



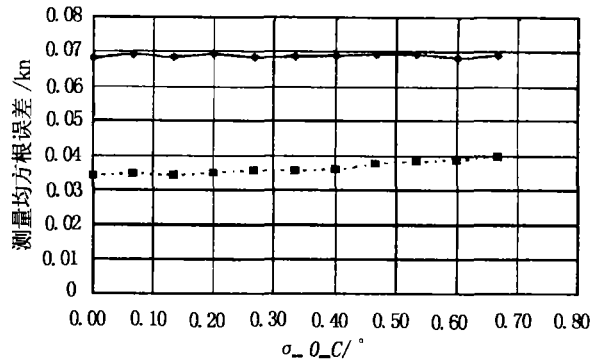
实线:ERROR - Y; 虚线:ERROR - X

图 2  $\sigma - V - C$  对速度参照系统测量精度的影响

由表 6 可知,当载体动力系统所产生的驱动速度均值  $AV - V - S$  为 10kn 且  $\sigma - V - S = 0$ ,即使严格保持逆流航行( $AV - \theta - S$  恒定,  $\sigma - \theta - S = 0$ )、不稳定海流的等效流速均值  $AV - V - C$  保持不变,并且不稳定海流的的等效流向均值  $AV - \theta - C$  与等效流向的均方根误差  $\sigma - \theta - C$  保持不变,则不稳定海流的等效流速均方根误差  $\sigma - V - C$  的变化,对纵向测速均方根误差的影响较大,而对横向测速均方根误差的影响较小。

表 7

$\sigma - V - C$ /°	ERROR - Y /kn	ERROR - X /kn
0/3	0.0682	0.0342
0.2/3	0.0691	0.0349
0.4/3	0.0683	0.0344
0.6/3	0.0693	0.0350
0.8/3	0.0684	0.0357
1.0/3	0.0687	0.0358
1.2/3	0.0688	0.0361
1.4/3	0.0693	0.0379
1.6/3	0.0694	0.0385
1.8/3	0.0684	0.0390
2.0/3	0.0691	0.0399



实线:ERROR - Y; 虚线:ERROR - X

图 3  $\sigma - \theta - C$  对速度参照系统测量精度的影响

#### 5.4 不稳定海流的等效流向均方根误差对速度参照系统测量精度的影响

表 7 是恒定动力( $AV - V - S = 10kn, \sigma - V - S = 0$ )、严格保持逆流航行( $AV - \theta - S = AV - \theta - C - 180^\circ = 38.2^\circ, \sigma - \theta - S = 0$ )、不稳定等效流速( $AV - V - C = 2kn, \sigma - V - C = 0.2/3kn$ )以及不稳定海流的等效流向均值均为  $AV - \theta - C = 218.2^\circ$  时,不稳定海流的等效流向均方根误差  $\sigma - \theta - C$  对速度参照系统测量精度的影响。

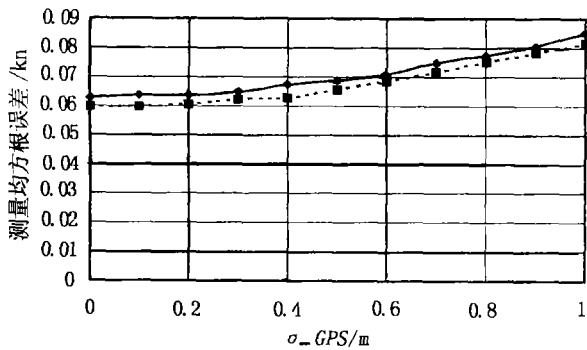
由表 7 可知,当载体动力系统所产生的驱动速度均值  $AV - V - S$  为 10kn 且  $\sigma - V - S = 0$ ,只要严格保持逆流航行( $AV - \theta - S$  恒定,  $\sigma - \theta - S = 0$ )、不稳定海流的等效流速均值  $AV - V - C$  保持不变、不稳定海流的等效流速均方根误差  $\sigma - V - C$  不大且保持不变以及不稳定海流的的等效流向均值  $AV - \theta - C$  保持不变,则不稳定海流的等效流向均方根误差  $\sigma - \theta - C$  对测速均方根误差的影响不大。

表 8

$\sigma - GPS$ /m	ERROR - Y /kn	ERROR - X /kn
0	0.0629	0.0598
0.1	0.0638	0.0597
0.2	0.0637	0.0607
0.3	0.0648	0.0624
0.4	0.0676	0.0630
0.5	0.0690	0.0658
0.6	0.0708	0.0686
0.7	0.0749	0.0718
0.8	0.0775	0.0752
0.9	0.0805	0.0782
1.0	0.0852	0.0815

#### 5.5 DGPS 的定位均方根误差对速度参照系统测量精度的影响

上文的仿真结果都是立足于 DGPS 的定位均方



实线: ERROR - Y; 虚线: ERROR - X

图4  $\sigma$ -GPS 对参照系统测速精度的影响

根误差为 0.5m。DGPS 的定位均方根误差对参照系统测速精度的影响,如表 8 所示。仿真时我们假设:恒定动力( $AV-V-S=10\text{kn}$ ,  $\sigma-V-S=0$ )、基本保持逆流航行( $AV-\theta-S=AV-\theta-C-180^\circ=38.2^\circ$ ,  $\sigma-\theta-S=1^\circ/3$ )、不稳定等效流速( $AV-V-C=2\text{kn}$ ,  $\sigma-V-C=0.2/3\text{kn}$ )和不稳定等效流向( $AV-\theta-C=218.2^\circ$ ,  $\sigma-\theta-C=1^\circ/3$ )。为直观起见将表 5~表 8 中的数据分别绘于图 1~图 4。

$\sigma$ -GPS 中包括 DGPS 本身的定位误差和由于 DGPS 的天线摇摆而引入的附加误差。由 DGPS 的天线摇摆而引入的附加误差应小于 DGPS 本身的定位误差。当载体存在纵倾角  $\phi$  与横摇角  $\theta$  时,就会带来  $H\sin\phi$  和  $H\sin\theta$  位置误差半径,  $H$  为 DGPS 的天线与多普勒计程仪基阵的高度差。若不利用纵倾角和横摇角进行修正,则高度差  $H$  不应太大,同时试验海区应有较低的海况,以保证有较小的纵倾角  $\phi$  与横摇角  $\theta$ 。当 DGPS 本身的定位误差为 0.5m 而  $H$  为 10m 时,纵倾角  $\phi$  与横摇角  $\theta$  应小于  $2.5^\circ$ 。

## 6 结 论

根据前面的计算机仿真结果可以看到:当采用定位均方根误差为 0.5m 的 DGPS 以及定向均方根误差为  $0.15^\circ$  的平台罗经,并选择在海流速度与海流流向比较稳定的海区中进行测定试验时,只要舵手有较高的操舵水平,使载体的动力严格保持恒定并保证载体航向均方根误差小于  $1^\circ/3$  (最大误差小于  $1^\circ$ ),则速度参照系统的纵向测速误差和横向测

速误差还是可以容忍的。根据航海经验,当流速不为 0 时,采用逆流航行比较容易保持航向。当舵手的操舵水平不高时,此时载体不再作匀速直线运动,从而会引起某些航次无效。

一般而言,  $\sigma$ -GPS 中 DGPS 本身的定位误差和载体与 DGPS 基站的间距有关。当间距增大时,时空相关性减弱,定位精度下降,定位均方根误差  $\sigma$ -GPS 增大。因此试验海域应当尽量靠近 DGPS 基站。在试验航向选取时,还必须保证载体与基站的间距变化为最小。由于 DGPS 白天的定位精度优于夜晚的定位精度,因此试验时间应尽量安排在晴朗的白天。为了减少 DGPS 天线摇摆而引入的附加误差,若不利用纵倾角和横摇角进行修正,试验海域的浪级应较低。

采用实时运动学技术 (real-time-kinematic technology) 的 DGPS 可以同时进行航向测定和定位,这样就不再需要罗经了。当载体上没有高精度平台罗经时,RTK 卫星定位系统可能就是一个最好的速度参照系统。美国 TRIMBLE NAVIGATION LIMITED 的 MS860 就具有这种功能。当具有 RTK 基站时,航向均方根误差小于  $0.03^\circ$ ,水平定位均方根误差可小至 2cm,垂直定位均方根误差可小至 3cm。这时,速度参照系统的定位和定向精度均可以大大地提高。但是特别需要指出的是:采用 RTK 技术时,测量点与基站的间距最好保持在 10km 以内。

在小航程段选取时,应保证  $\sigma$ -GPS 的定位误差远小于小航程段的航程。

在总航程选取时,应保证在该航程中有足够多的航程段。

### 参考文献:

- [1] 邹洪,向大威,宣志芬等.多普勒计程仪测速精度的测定[J].声学技术,2002,(4):188-191.
- [2] 潘琪祥.《航海学》下册[M].大连:大连海事大学出版社,1999.307-311.
- [3] 潘琪祥.《航海学》上册[M].大连:大连海事大学出版社,1999.151-155.
- [4] 董绪荣.导航应用中的大地主题解算[J].导航,1988,(2):103-108.