文章编号:1000-3630(2002)04-0188-04

多普勒计程仪测速精度的测定

邹　洪[1]，　向大威[2]，　宣志芬[2]，　张　串[2]
(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:文章介绍多普勒计程仪测速精度的两种测定方法,实时法与准实时法。在实时法中,载体的航迹向与对地速度的真值均取自差分卫星定位仪。在准实时法中,利用差分卫星定位仪给出的地理坐标,根据中分纬度法、墨卡托法或波林法算得航迹向与对地速度的真值。两种方法所需的航向均取自于平台罗经。

关键词:测速精度;实时测定;准实时测定;中分纬度法;墨卡托法;波林法
中图分类号:TB565　　　　**文献标识码**:A

Speed-precision measurement for ADL

ZOU Hong[1], XIANG Da-wei[2], XUAN Zhi-fen[2], ZHANG Chuan[2]
(1. Shanghai Marine Instrument Factory, Shanghai 200129, China;
2. Acoustics Institute Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

Abstract: Two speed-precision measurement methods, real-time and quasi-real-time method, are described. For real-time method, the real-values of COG and SOG are got from DGPS. For quasi-real-time method, the real-values of COG and SOG are calculated by Mid-Latitude, Mercator or Bowring sailing method, the geographic coordinates obtained from DGPS are taken as the original datum of the three sailing methods. The bearings used by both two method are got from platform- gyrocompass.

Key words: speed-precision; real-time measurement; quasi-real-time measurement; mid-latitude sailing method; Mercator sailing method, Bowring sailing method

1　引　言

多普勒计程仪能实时地给出载体的对底速度,即纵向速度 U_{YL} 与横向速度 U_{XL}。由于使用时不需要其它设备的辅助,因此,可以用作自主式的导航设备。多普勒计程仪的测速精度很高,一般可以达到 0.1kn(或 1%)以下。正因为它能实时地给出精确的对底速度,因此,有必要对多普勒计程仪测速精度的测定方法进行分析。

多普勒计程仪测速精度的测定一般均在海上或者其它宽广的水域中进行。测定时载体的航行方式大多为匀速直线运动,同时应保证:在试验海区中有较低的海况和较小的海流。在测定航次中每隔 Δt 的时间间隔读取一对速度值,在整个航次中共读得了 N 对数据,$U_{YL}(i)$ 与 $U_{XL}(i)$ $i=1,2\cdots\cdots N$。若在读取速度测量值的同时又能获得速度的真值 $U_Y(i)$ 与 $U_X(i)$ $i=1,2\cdots\cdots N$,就可以得到多普勒计程仪的测速精度。

在测量过程中,往往会遇到一些突发的干扰,从而在测量值中可能存在着一些"野点",因此有必要在数据分析前进行去野点处理。

在去野点处理时,我们首先计算从多普勒计程仪中得到的原始数据的平均值:

$$AVR\_UYL = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_{YL}(i)$$

$$AVR\_UXL = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} U_{XL}(i)$$

进而计算出原始数据的均方根值:

$$RMS\_UYL = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[U_{YL}(i) - AVR\_UYL]^2}$$

$$RMS\_UXL = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}[U_{XL}(i) - AVR\_UXL]^2}$$

若满足:

$$U_{YL}(i) - AVR\_UYL \geqslant 3 \times RMS\_UYL$$

或者满足:

$$U_{XL}(i) - AVR\_UXL \geqslant 3 \times RMS\_UXL$$

则我们认为该组数据为野点,并应当从原始数据中剔除。在剔除时必须同时剔除 $U_{YL}(i)$、$U_{XL}(i)$、$U_Y(i)$ 和 $U_X(i)$。去野点处理后只留下了 $K \leqslant N$ 组数据,将它们命名为 $V_{YL}(i)$、$V_{XL}(i)$、$V_Y(i)$ 和 $V_X(i)$。

在能获得速度真值的前提下,我们就可以算得表征测速精度的均方根速度误差:

$$RMS\_VYL = \sqrt{\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}[V_{YL}(i) - V_Y(i)]^2} \quad (1)$$

收稿日期:2001-09-28;修回日期:2002-05-31
作者简介:邹洪(1962-),男,江西南昌人,高级工程师,研究方向:导航。

$$RMS\_VXL = \sqrt{\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}[V_{XL}(i) - V_X(i)]^2} \quad (2)$$

2 实时法

我们不可能实时地得到不存在误差的速度真值。如果有一种设备能实时地得到速度真值的近似值,而近似值的精度又比多普勒计程仪的测速精度高得多,我们就可以把这种设备的测量结果近似地看作速度真值,进而利用前面所述的方法就可算得均方根速度误差。

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 3～10 倍,则就可将它当作测速参照设备。

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地得到的速度测量值 $U_{YR}(i)$与 $U_{XR}(i)$就是速度真值的近似值:

$$U_Y(i) \approx U_{YR}(i) \quad (3)$$

$$U_X(i) \approx U_{XR}(i) \quad (4)$$

为了保证实时性,在实时数据处理时不再进行去野点处理。因此:

$K = N$

$V_{YL}(i) = U_{YL}(i), \quad V_{XL}(i) = U_{XL}(i)$

$V_Y(i) = U_Y(i), \quad V_X(i) = U_X(i)$

利用式(1)及式(2),就可以得到均方根速度误差。

高精度多普勒计程仪的工作频率必须远离被测的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,因此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,则在深海区就无法进行测定。

高精度平台罗经和高精度差分卫星定位仪(DGPS)也可以组合成一个测速参照系统。我们从高精度平台罗经可以得到载体的航向(bearing) $BRG_R(i)$。从 DGPS 可以得到载体的航迹向(course over ground) $COG_R(i)$以及航迹方向上的速度(speed over ground) $SOG_R(i)$。航向和航迹向均以真北方向作为参考方向。航迹方向上的速度在 DGPS 中往往将它称作对地速度。

根据航向、航迹向以及航迹方向上的速度,我们可以很方便地算得测速参照系统的速度测量值:

$$U_{YR}(i) \approx SOG_R(i) \times \cos[COG_R(i) - BRG_R(i)]$$

$$U_{XR}(i) \approx SOG_R(i) \times \sin[COG_R(i) - BRG_R(i)]$$

如果 $U_{YR}(i)$和 $U_{XR}(i)$的测量精度很高,我们就可以将它们当作速度的真值。再采用同样的方法就能得到测速精度。

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[1],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测速参照系统。由于系统的实时性很好,所以在航行过程中仍可用作实时观察。

3 准实时法

若对高精度平台罗经和高精度差分卫星定位仪所给出的数据进行准实时处理,则系统的精度就会进一步提高,从而满足多普勒计程仪的测速精度的测定要求。

新型的平台罗经的航向精度已经能达到 0.1°,载体姿态测量精度达到 0.02°,因此,航向 $BRG_R(i)$ 的测量误差对多普勒计程仪测速精度的测定不会构成明显的影响,载体姿态变化引起的误差经三角投影补偿后也可忽略。只要我们能提高 DGPS 的 COG 与 SOG 的精度,就能把这个系统当作测速参照系统。

若采用匀速直线运动,则我们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。若航程段中点的航向为 $BRG_R(i)$、航迹向为 $COG_R(i)$、航程段的航程为 $L_R(i)$,而该航程段的航行时间为 $\Delta T_R(i)$,则

$$U_{YR}(i) = \frac{L_R(i)}{\Delta T_R(i)} \times \cos[COG_R(i) - BRG_R(i)] \quad (5)$$

$$U_{XR}(i) = \frac{L_R(i)}{\Delta T_R(i)} \times \sin[COG_R(i) - BRG_R(i)] \quad (6)$$

下面我们将讨论:如何利用航程段起点的时间与地理坐标以及航程段终点的时间与地理坐标得到航程段的航迹向、航程和航行时间。假设:载体在航行时采用恒向线航行法(rhumb line sailing)作匀速直线运动,特别在航程段内载体的航向与速度是严格恒定的。在讨论具体方法之前,我们先对第 i 个航程段作如下假设:

起点时间: $T_1(i)$, 起点经度: $LON_1(i)$

起点纬度: $LAT_1(i)$, 终点时间: $T_2(i)$

终点经度: $LON_2(i)$, 终点纬度: $LAT_2(i)$

这些数据可以很方便地从 DGPS 得到。显然该小段航程段的航行时间为:

$$\Delta T_R(i) = T_2(i) - T_1(i) \quad (7)$$

利用中分纬度法、墨卡托法以及波林法可以由第 i 个航程段的 $LON_1(i)$ 、$LAT_1(i)$、$LON_2(i)$和 $LAT_2(i)$得到该航程段中点的 $COG_R(i)$与 $L_R(i)$。

3.1 中分纬度法[2]

中分纬度法是航海学中的一种方法,即 mid-lat

sailing。这种方法把地球近似地看作一个圆球体，因此算法简单。但是，只适用于纬度不太高和航程不太大的场合，并且不能用于跨赤道航行。首先，我们计算终点与起点的经度差：

$$Delta\_LON(i) = LON_2(i) - LON_1(i)$$

而终点与起点的纬度差为：

$$Delta\_LAT(i) = LAT_2(i) - LAT_1(i)$$

进而计算中分纬度：

$$AVR\_LAT(i) = \frac{LAT_1(i) + LAT_2(i)}{2}$$

东西距为：

$$Dep(i) = Delta\_LON(i) \times \cos[AVR\_LAT(i)]$$

航迹向为：

$$COG_R(i) = \mathrm{arctg}\left[\frac{|Dep(i)|}{|Delta\_LAT(i)|}\right] \quad (8)$$

航程段的航程(米)为：

$$L_R(i) = \sqrt{[Dep(i)]^2 + [Delta\_LAT(i)]^2} \times 6371000 \quad (9)$$

3.2 墨卡托法[2]

墨卡托(Mercator)法也是航海学中的一种方法，这种方法把地球看作一个椭球体，因此算法就比较复杂一些。但是，使用限制也就少。首先，我们计算终点与起点的经度差：

$$Delta\_LON(i) = LON_2(i) - LON_1(i)$$

而终点与起点的纬度差为：

$$Delta\_LAT(i) = LAT_2(i) - LAT_1(i)$$

进而计算起点与终点的纬度渐长率：

$$MP_1(i) = 7915.7 \times \lg\left\{\mathrm{tg}\left[45° + \frac{LAT_1(i)}{2}\right]\right\} - 23.0\sin[LAT_1(i)]$$

$$MP_2(i) = 7915.7 \times \lg\left\{\mathrm{tg}\left[45° + \frac{LAT_2(i)}{2}\right]\right\} - 23.0\sin[LAT_2(i)]$$

而纬度渐长率的差值为：

$$Delta\_MP(i) = MP_2(i) - MP_1(i)$$

航迹向为：

$$COG_R(i) = \mathrm{arctg}\left[\frac{|Delta\_LON(i)|}{|Delta\_MP(i)|}\right] \quad (10)$$

航程段的航程(米)为：

$$L_R(i) = Delta\_LAT(i) \times \sec[COG_R(i)] \times 6371000 \quad (11)$$

3.3 波林法[3]

波林(Bowring)法是1981年公布的一种算法，按椭球面对球面的正形投影导出的主题解算公式，不需考虑归化纬度与大地纬度的转换，使用限制很少，在两点间距1000公里范围内精度较高。计算时采用WGS-84推荐的参数。首先，我们计算终点与起点的经度差：

$$Delta\_LON(i) = LON_2(i) - LON_1(i)$$

而终点与起点的纬度差为：

$$Delta\_LAT(i) = LAT_2(i) - LAT_1(i)$$

然后计算出下述中间变量：

$$Ra = 6378137 \pm 2$$

$$Ke = 0.00669437999013$$

$$A(i) = \sqrt{1 + Ke \times \{\cos[LAT_1(i)]\}^4}$$

$$B(i) = \sqrt{1 + Ke \times \{\cos[LAT_1(i)]\}^2}$$

$$C = \sqrt{1 + Ke}$$

$$W(i) = A(i) \times \frac{Delta\_LON(i)}{2}$$

$$D(i) = \frac{Delta\_LAT(i)}{2 \times B(i)} \times \left\{1 + \frac{3 \times Ke \times Delta\_LAT(i) \times \sin\left[2 \times LAT_1(i) + \frac{2 \times Delta\_LAT(i)}{3}\right]}{4 \times [B(i)]^2}\right\}$$

$$E(i) = \sin[D(i)] \times \cos[W(i)]$$

$$F(i) = \frac{\{B(i) \times \cos[LAT_1(i)] \times \cos[D(i)] - \sin[LAT_1(i)] \times \sin[D(i)]\} \times \sin[W(i)]}{A(i)}$$

$$Alpha(i) = \left|\mathrm{arctg}\left[\frac{F(i)}{E(i)}\right]\right|$$

$$Beta(i) = \mathrm{arctg}\left\{\frac{\sin[LAT_1(i)] \times \mathrm{tg}[W(i)] + B(i) \times \cos[LAT_1(i)] \times \mathrm{tg}[D(i)] \times \mathrm{tg}[W(i)]}{A(i)}\right\}$$

$$Sigma(i) = 2 \times \arcsin\{\sqrt{[E(i)]^2 + [F(i)]^2}\}$$

航迹向为：

$$COG_R(i) = Alpha(i) - Beta(i) \quad (12)$$

航程段的航程(米)为：

$$L_R(i) = \frac{Ra \times C \times Sigma(i)}{[B(i)]^2} \quad (13)$$

3.4 航程段的航程选取

引入航程段的概念是为了提高DGPS测量$COG_R(i)$和$SOG_R(i)$精度。DGPS在测量起点与终点的时间和地理坐标时均存在误差。时间的测量误差在微秒级，因此可忽略不计。但是，地理坐标的

定位误差一般在几分之一米至数米之间，取决于DGPS定位精度的好坏。定位的误差就会构成$COG_R(i)$和$L_R(i)$的误差，进而构成$U_{YR}(i)$与$U_{XR}(i)$的误差。若把航程段的航程取成远大于定位误差，例如数百倍，则可以大大减少$COG_R(i)$与$L_R(i)$的误差。

航程段的航程又不能取得过大，否则就会违反在该航程段中载体是严格按照匀速直线运动，从而不能将第i个航程段的航迹向与平均航速当作$COG_R(i)$与$SOG_R(i)$。

3.5 均方根速度误差的计算

由于航程段的航程很短，一般为百米量级，采用中分纬度法、墨卡托法和波林法的差别不会太大，使用者可以根据实际情况选用。因此，均方根速度误差的计算我们只以中分纬度法为例，其它方法可以依次类推。

首先，选择航程段的航程。航程选定后，就可以确定第i个航程段的起点和终点的时间与地理坐标。必须指出的是第$i+1$个航程段与第i个航程段有相当一部分是互相重叠的，只不过第$i+1$个航程段的起点较第i个航程段的起点落后了一个测量点。

利用中分纬度法中的式(8)和式(9)，计算$COG_R(i)$与$L_R(i)$。然后利用算得的结果以及式(7)代入式(5)和式(6)算得$U_{YR}(i)$与$U_{XR}(i)$。根据式(3)和式(4)，将$U_{YR}(i)$与$U_{XR}(i)$近似地当作$U_Y(i)$与$U_X(i)$。

当全部航程段的数据均计算完毕后，进行去野点处理。把处理后的结果$V_{YL}(i)$、$V_{XL}(i)$、$V_Y(i)$和$V_X(i)(i=1,2\cdots\cdots K)$，代入式(1)和式(2)就能得到均方根速度误差$RMS_VYL$与$RMS_VXL$。

4 结 语

当进行测速精度测定时，我们还需要一台数据处理计算机。通过串行口与被测的多普勒计程仪、高精度平台罗经以及高精度差分卫星定位仪相连。数据处理软件可以根据本文所讨论的内容进行编制。但是必须特别注意：

(1) 被测的多普勒计程仪的速度修正系数与安装角修正量已经标定。

(2) 东半球的经度取正值，西半球的经度取负值。北半球的纬度取正值，南半球的纬度取负值。

(3) 航向与航迹向以真北方向为参考方向，顺时针方向为正。

(4) 角度均用弧度表示。

(5) 反三角函数在取值时，应特别注意主值区间。

(6) 距离的单位为米，时间差的单位为秒，速度的单位为米/秒。若要以航海学中的常用单位为单位，需自行转换。

(7) 补偿载体姿态变化引起的误差，未在本文中讨论。

(8) 在数据处理软件中，最好加入计算RMS_VYR和RMS_VXR的公式，以便考察测速参照系统的均方根误差。

$$RMS\_VYR = \sqrt{\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}[V_{YR}(i) - AVR\_VYR]^2}$$

$$RMS\_VXR = \sqrt{\frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}[V_{XR}(i) - AVR\_VXR]^2}$$

式中：

$$AVR\_VYR = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}V_{YR}(i)$$

$$AVR\_VXR = \frac{1}{K}\sum_{i=1}^{K}V_{XR}(i)$$

RMS_VYR和RMS_VXR中包括了DGPS的定位误差、平台罗经的航向误差以及载体运动的稳定性。当DGPS的定位精度以及平台罗经的航向测量精度足够高时，则RMS_VYR和RMS_VXR代表了载体运动的稳定性。若载体严格按照匀速直线运动，则这两个量就应当很小。

(9) 高精度平台罗经和高精度差分卫星定位仪所组成的测速参照系统，还可以用具有测向功能的卫星定位系统来代替。这种系统具有两副天线，天线被安装在载体的艏艉线上，间距约为10m。系统采用实时运动学技术(real-time-kinematic technology)进行航向测定和定位，简称RTK。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°，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。当不存在RTK基站时，航向的均方根误差仍小于0.03°，定位均方根误差为亚米级。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小于10km。当载体上没有高精度平台罗经和高精度差分卫星定位仪时，RTK卫星定位系统可能就是一个最好的测速参照系统。

参考文献：

[1] 潘琪祥.《航海学》下册[M]. 大连：大连海事大学出版社，1999.307-311.

[2] 潘琪祥.《航海学》上册[M]. 大连：大连海事大学出版社，1999.151-155.

[3] 董绪荣.导航应用中的大地主题解算[J].导航，1988,2:103-108.