

圈称为“恒显圈”,后者对应的周日平行圈称为“恒隐圈”。

如果观测者站在地球北(南)极,由于天顶与北(南)天极重合,天体的周日平行圈与地平圈相互平行,天体既不升起,也不下落,永远保持同一地平高度,因此,观测者只能看到天球北(南)半部的天体。对于地处赤道上的观察着来说,由于天体的周日平行圈与地平圈相互垂直,所以能够看见天球上的全部天体。除了天极处的天体外,所有天体都有东升西落现象。

显然,在天体的周日视运动过程中,站在不同纬度上的观测者所看到的星空形状和天体的周日视运动现象是不同的。

2. 天体中天

天体经过观测者所在的子午圈时称为中天;经过包括天极和天顶的那半个子午圈时,天体到达最高位置,称为上中天;经过包括天极和天底的那半个子午圈时,天体到达最低位置,称为下中天。如图3-1-5所示,假设天体 σ 在天顶以南、天赤道以北上中天,若记观测者的地理纬度为 φ ,天体的赤纬为 δ ,其上中天时的天顶距为 z_m ,不难得出三者的关系如下:

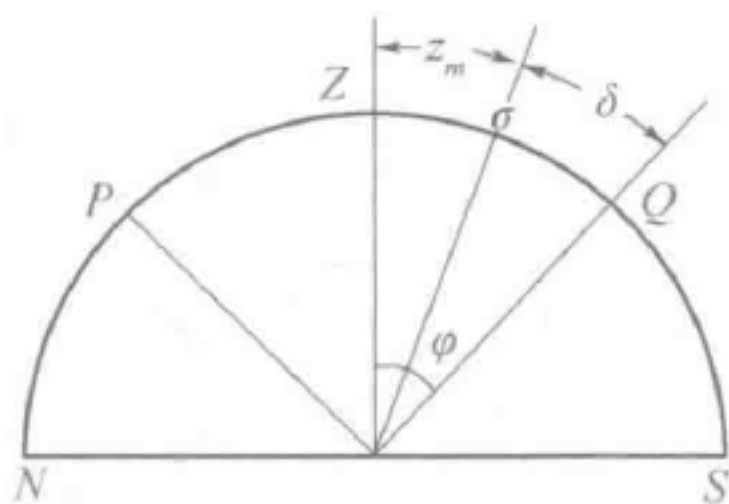


图3-1-5 天体中天

$$\varphi = z_m + \delta \quad (3-1-1)$$

上述关系具有很大的实用价值。观测时刻天体的赤纬 δ 可以通过天文年历获得,那么利用天文观测仪器测量出天体上中天时的天顶距 z_m (一般测量天体的地平高度角 $h_m, h_m = 90^\circ - z_m$)以后,就可以确定观测者的地理纬度 φ ;反之,如果观测者的地理纬度 φ 已知,天文观测得到天体上中天时的天顶距 z_m ,那么就可以确定天体的赤纬 δ 。天文年历就是通过大量的这类天文观测形成的。同样,可以建立天体在其他情况下上中天时 φ, δ 和 z_m 之间的关系,这里不再一一讨论。

3. 太阳的视运动

地球除了绕地轴自西向东自转运外,还绕太阳作公转运动。因此,太阳除参与因地球自转引起的周日视运动外,还存在因地球公转引起的周年视运动。太阳因为存在周年视运动,在黄道上自西向东平均每天移动 1° ,移动周期为一年。在一年内,太阳依次在黄道上经过春分点、夏至点、秋分点和冬至点,分别对应中国农历的24个节气中的春分日、夏至日、秋分日和冬至日;在太阳周年视运动过程中,由于其赤经和赤纬的变化,从而引起昼夜长短的变化和寒来暑往四季的变更。例如在北半球,春季从春分日开始,这天昼夜一样长,此后白昼变长、黑夜缩短,到夏至日这天白天最长、黑夜最短;夏至日阳光直射北回归线(北纬 $23^\circ 27'$),夏季开始,之后白昼逐日变短,黑夜逐日增长,到秋分日这天昼夜变为一样长;秋

分以后白昼逐日变短,黑夜逐日增长,到冬至日这一天白昼最短、黑夜最长;冬至日阳光直射南回归线(南纬 $23^{\circ}27'$),冬季开始,此后白天变长、黑夜变短,到春分日昼夜再次相等,太阳完成一年一周的运动;此外,对于地球上的观测者而言,纬度不同,所看到的太阳周年视运动的变化情况也有所不同。纬度越高,夏季白天越长,冬季白天越短;在极圈以北会出现“白夜”和“黑昼”现象,在北极则是半年白天、半年黑夜。南半球情况与北半球类似,只是冬季与夏季、春季与秋季刚好相反。在赤道上,一年四季昼夜的长短则基本不变。

4. 月球的视运动

月球绕地球运转,而地球绕太阳运转,这样使得月球、地球和太阳三者的相对位置不断发生变化,因此,月球除了参与因地球自转而引起的周日视运动外,由于月球绕地球每月(按中国的农历)做公转一周,地球上的观测者还会看到它从西向东在星空中移动。月球的这种运动,会引起月球的赤经和赤纬的变化,使月球的周日视运动轨迹发生相应的改变。由于月球的自转周期恰好与月球绕地球公转的周期相等,使得月球总是以相同的一面朝向地球,所以地球上的观测者只能看到月球的半个表面。

5. 行星的视运动

行星是太阳系内的天体,它们除了参与因地球自转引起的周日视运动外,还因地球和行星皆绕太阳公转而不断改变行星对于恒星的相对位置。行星在天球恒星背景中的相对运动与太阳和月球的情况不同,对于太阳和月球来说,这种运动的方向始终是朝东的。对于行星来说,则有时朝东,有时朝西。这是地球和行星二者的公转运动合成后在天球上的反映。行星的朝东视运动称为顺行,朝西视运动称为逆行。顺行与逆行之间的转折点称为“留”,在“留”的附近行星相对恒星背景的运动是很慢的。同样,行星的视运动也具有周期性。按照行星相对于太阳的视运动,可将行星分为地内行星和地外行星两类,运行轨道在地日之间的行星称为地内行星,如水星和金星,否则称为地外行星,如火星、木星、土星等。

3.1.3 天文年历与天文钟

1. 天文年历

天文导航需要知道被观测天体的投影点位置。人们通过长期的观测与研究,掌握了自然天体的运动规律,可以给出按年度出版、反映自然天体运动规律的历表,即天文年历。天文年历是天文导航的重要资源,它的内容主要包括三个方面:一是太阳、月球、各大行星和千百颗基本恒星在一年内不同时刻、相对于不同参考系的精确位置;其次是日食、月食、行星动态、日月出没和时晨光昏影等天象的预报;再者就是用于天体在各种坐标系之间换算时必要的的数据,如岁差、章动、极移、蒙气差、视差、光行差等。依据这些资料,根据不同的应用需求,可以单

独出版航海天文年历或航空天文年历。早期的天文年历大多少是纸质版的,随着信息技术的发展,现在天文年历在出版纸质版的同时,也出版电子版。在天文导航中,怎样正确使用天文年历提供的资源,是一项专门的技术,在此不作深入讨论。

2. 天文钟

准确的时间信息对于天文导航来说十分重要,因为如果已知了世界时,就可以从天文年历中获取被观测天体当前的空间位置。天文钟是用来指示世界时的装置,目前常用的天文钟主要包括机械天文钟和石英天文钟两大类。显然,天文钟的准确性直接影响天文导航的精度。机械天文钟与一般的民用机械钟表相比,结构基本相似,但走时要准确得多。钟内配有保持水平的装置,以保证在发条松紧不同情况下的等时性;此外,钟内还配有温度补偿装置,以降低温度变化对钟摆摆动周期的影响。这两项措施有利于提高机械天文钟的走时精度。机械天文钟被设置成世界时,钟面也是12小时,因此每天下午的钟面时间应加上12小时才等于世界时。天文钟与世界时之间的偏差称为钟差,钟差一天的变化值称为日差。日差的稳定性是衡量天文钟走时精度的重要指标,如果日差出现不稳定现象,说明天文钟有故障,需要维修。通常采取两项措施来保证机械天文钟日差的稳定性,一是每天定时上发条,而且要求上发条的位置是固定的;二是定期进行清洗和检修,时间间隔不超过三年。石英天文钟是由石英晶体振荡器和电子电路构成的电子钟,其优点是成本低廉、计时精度高、不怕载体的倾斜和摇摆。石英天文钟通常配有自动调时装置,可以通过无线电时间信号来消除钟差,因此,在天文导航中得到日益广泛的应用,已逐步替代了机械天文钟。随着原子时钟技术的发展,具有更高精度的原子天文钟将逐步成为天文钟发展的主流。

3.2 航海天文导航

航海天文导航的发展至今已有六七百年的历史。在惯性导航和无线电导航出现之前,简单实用的天文导航是舰船航海的唯一导航手段。在航海中一般要在早晚晨昏时段对天体进行观测,因为此时既可观测到天体,又便于户外作业。航海常用的天文导航仪器有六分仪和天文钟。六分仪有千分尺鼓轮六分仪、游标尺六分仪和人造地平六分仪等类型。本节主要介绍航海天文定位和定向的基本原理,其中太阳偏振光定向技术尚处于研究阶段,在航海导航中还没有得到实际应用,因此只介绍一些基本概念。

3.2.1 航海天文定位

1. 基本原理

确定运动载体的空间位置通常需要三个坐标参数,即所谓的三维定位。对

航海导航而言,由于舰船相对于海平面的高度为零,此时三维定位问题退化为二维定位问题。航海天文定位的基本原理如图 3-2-1 所示。

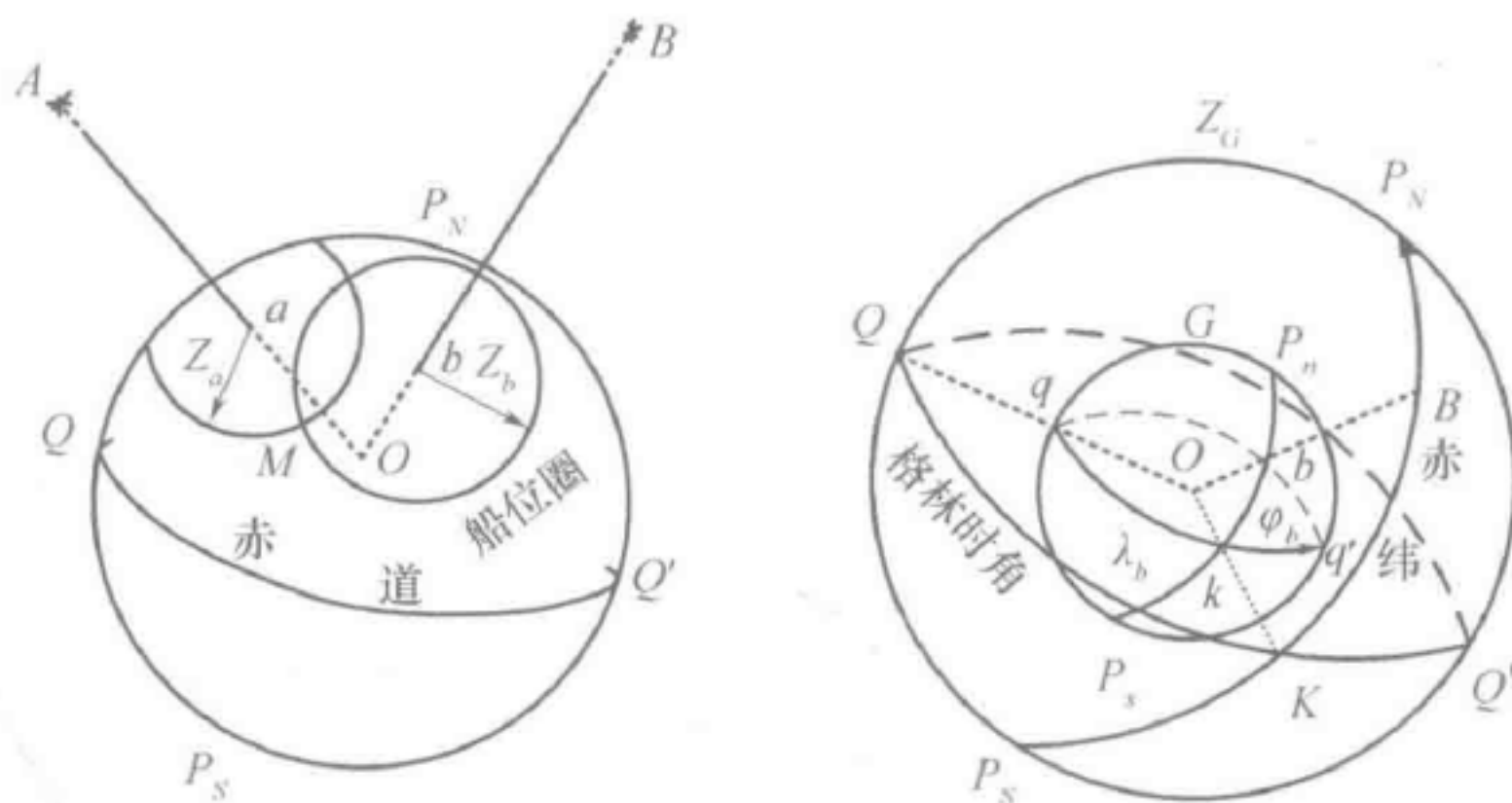


图 3-2-1 天文定位原理图

假设 A 、 B 为两个已知的天体,天体 A 、 B 与地心 O 的连线与地球表面交于 a 、 b ,这两个交点称为天体投影点,如果能够知道这两个投影点的经度和地心纬度,并且观测者能测出舰船到投影点的地心角分别为 z_a 和 z_b ,则以 a 、 b 为极点,分别以 z_a 、 z_b 为半径,在地球圆球上作出两个平行圈,这两个平行圈称为等高圆(有时也称作等高圈或位置圆),两个等高圆交于 M 和 M' 两点。这两点何者为真实船位,这就是所谓的模糊度问题,通常可以根据舰船的先验位置信息来判断。

根据上述定位原理,确定舰船位置的方法大致可分为解析法和图解法两类,早期的航海导航通常采用图解法,现代航海导航则主要采用解析法。

2. 解析法求舰船位置

所谓解析法就是根据天体投影点与船位之间构成几何关系,利用球面天文学的基本原理,通过解天文三角形来求得舰船位置。如图 3-2-1 所示,观测时刻天体投影点的经度和纬度可以借助天文钟和天文年历获得。具体步骤是:天文钟给出观测时刻的世界时,从天文年历中查出天体的赤纬 δ 和格林时角 t_G 。在航海天文导航中通常使用的格林时角是由格林尼治午半圈起算的地方时角,简称为格林时角。格林时角的度量方法有两种:一种称为格林西行时角 t_G ,这是在天赤道由格林尼治午半圈向西度量到天体时圈的角度;另一种称为格林半圈时角,当 t_G 小于 180° 时,半圈时角即为西行时角,并将时角命名为西(W),当西行时角 t_G 大于 180° 时,用 360° 减去西行时角即为半圈时角,并将时角命名为东(E)。在已知 δ 和 t_G 后,由于投影点的地心纬度与赤纬 δ 相等,经度与格林半圈时角相等,则可求出天体投影点的经度和纬度。

在求解舰船到已知天体投影点间的地心角时,注意到天体 B 距地球很远,因此,可以将从天体射向地球表面的光线看作为一束平行光,如图 3-2-2 所

示。由图可知,舰船 M 到天体投影点的地心角即为天体对舰船的天顶距 z ,若天体相对于当地水平线的高度角为 h ,则有

$$z = 90^\circ - h \quad (3-2-1)$$

h 可用六分仪观测天体与地平线垂直夹角并经修正后求得。之所以要对观测到的高度角进行修正,是因为天体射向地球表面的光线穿过大气时会发生折射。

在北半球由天顶 Z 、天北极 P_N 和天体 B 构成的球面三角形称为天文三角形或定位三角形,如图 3-2-3 中的阴影三角形所示。因此,天文定位的基本算法就是求解天文三角形。

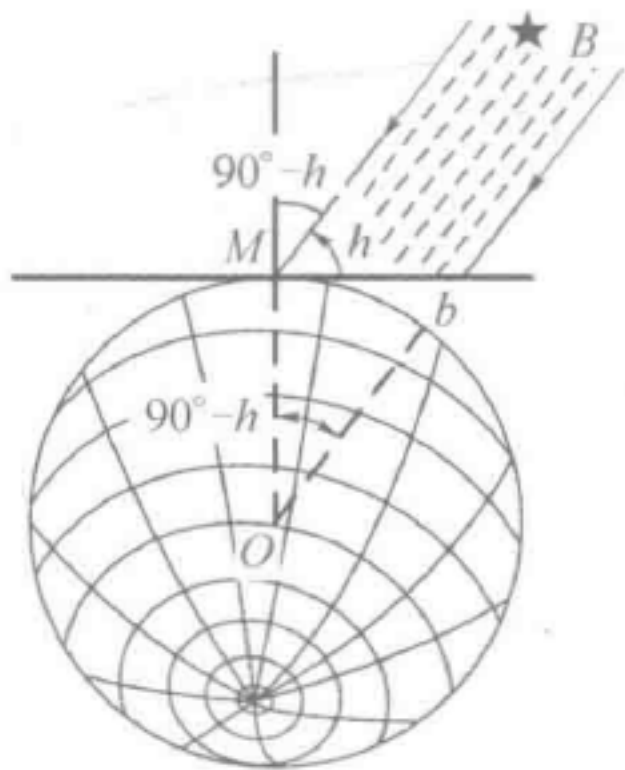


图 3-2-2 天体高度角

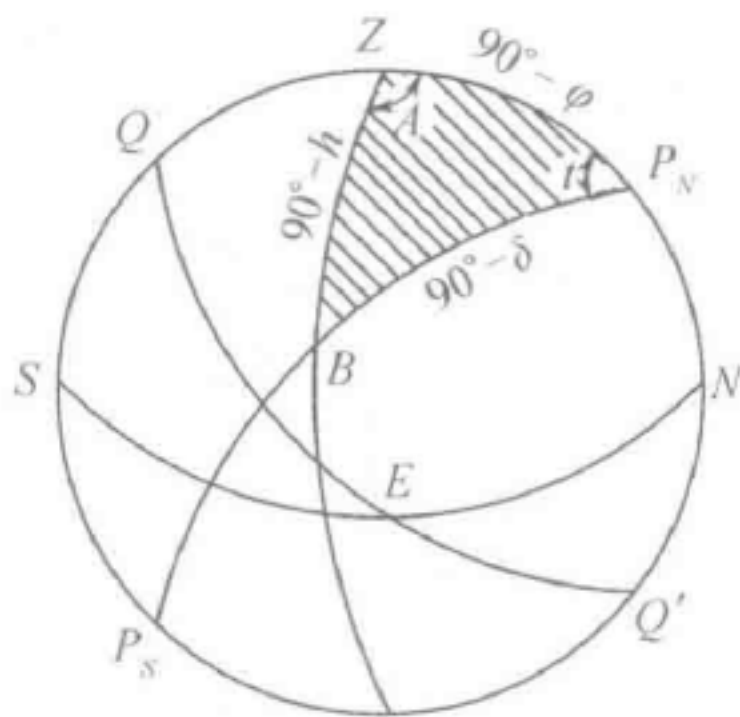


图 3-2-3 天文三角形

在天文三角形中的三边为

$$ZP_N = 90^\circ - \varphi, \varphi \text{ 为观测者纬度};$$

$$P_NB = 90^\circ - \delta, \delta \text{ 为天体赤纬};$$

$$BZ = 90^\circ - h, h \text{ 为天体高度角}。$$

三角形的三角为

$$\angle P_NB = A, A \text{ 为天体方位角};$$

$$\angle ZP_NB = t, t \text{ 为天体时角};$$

$$\angle ZBP_N = q, q \text{ 为天体星位角}。$$

天文三角形建立了天体在天球上的位置与观测者的地理位置之间的联系,天文三角形在天文导航中有广泛的用途。在天文三角形中常用的球面三角形公式为

$$\sinh = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos t \quad (3-2-2)$$

和

$$\begin{aligned} \sin A \cosh &= \cos\delta \sin t \\ \cos A \cosh &= \cos\varphi \sin\delta - \sin\varphi \cos\delta \cos t \end{aligned} \quad (3-2-3)$$

上述利用 A 、 B 两个天体对舰船进行定位的方法称为双星定位法。由式(3-2-2)可以得出以下定位算法公式

$$\begin{aligned}\sin h_A &= \sin \varphi \sin \delta_A + \cos \varphi \cos \delta_A \cos t_A \\ \sin h_B &= \sin \varphi \sin \delta_B + \cos \varphi \cos \delta_B \cos t_B \\ t_A &= t_{GA} \pm \lambda_W^E \\ t_B &= t_{GB} \pm \lambda_W^E\end{aligned}\quad (3-2-4)$$

式中： $h_A, h_B; \delta_A, \delta_B; t_{GA}, t_{GB}$ 分别为 A 、 B 两天体的高度角、赤纬和格林西行时角，而 φ 和 λ 为舰船待求的经纬度，求解上述方程可求出 φ 和 λ 。式中 $\pm \lambda_W^E$ 表示当观测者在东经时 λ 前符号为“+”，当观测者在西经时， λ 前符号取为“-”。

式(3-2-3)和式(3-2-4)由两组球面三角形公式组成，包含了 φ 和 λ 两个未知数，理论上讲是可以求解的。然而，这是两组超越方程，若想得到其解析解则非常复杂，实际应用中通常采用迭代的方法进行数值求解。双星定位算法流程如图 3-2-4 所示。

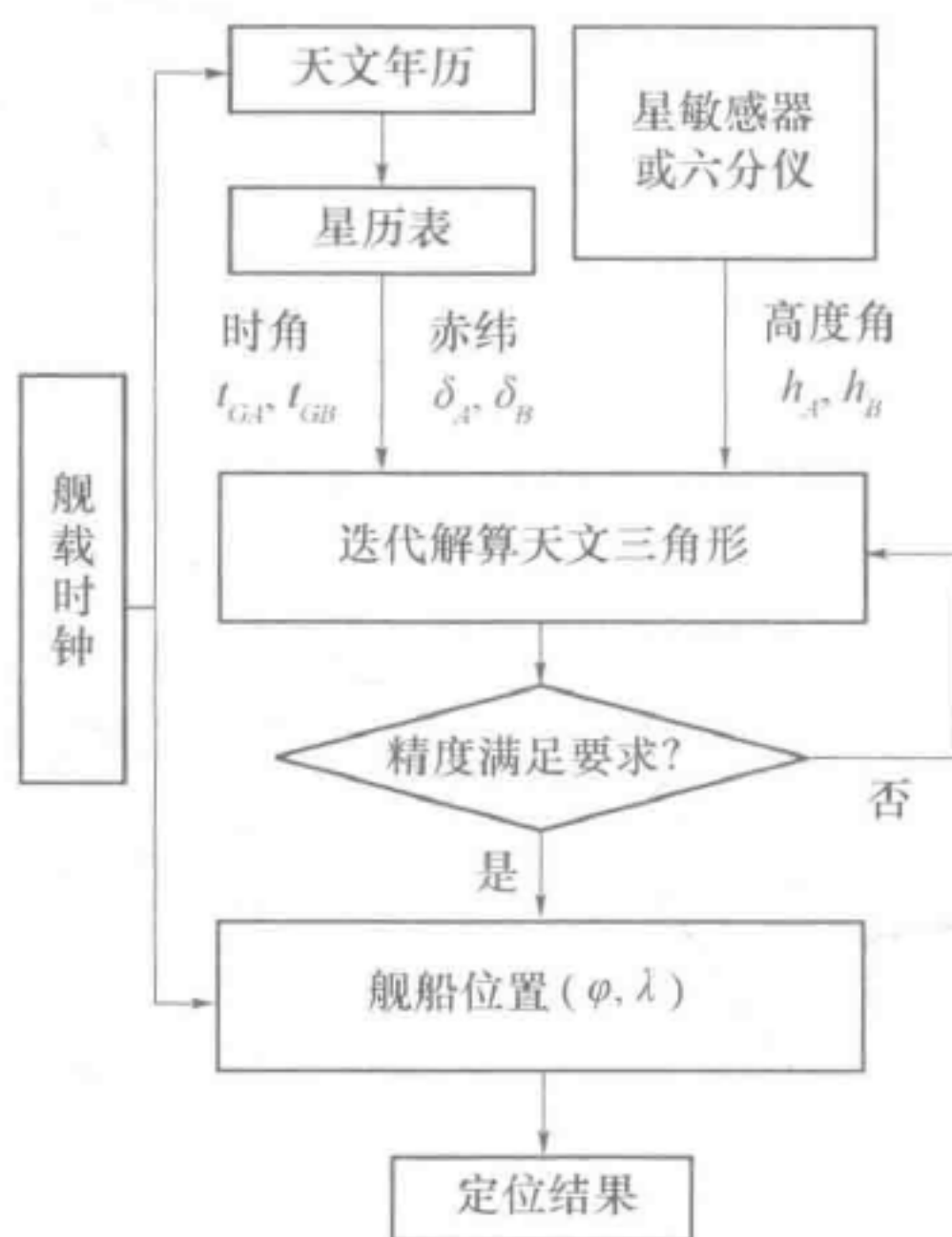


图 3-2-4 双星定位算法流程

综上所述，航海天文定位主要包括三个基本步骤：①测量两个或更多天体的高度角或天顶距；②得到观测时刻的每个天体投影点的位置；③依据天体的高度角（或天顶距）和天体投影点数据求得舰船的位置。

3. 在海图上画等高圆求舰船位置

地图是用数学方法在平面上显示地球表面各种信息的一种图解形式。当地球表面上的经纬线（球面坐标曲线）形成的网格与地图平面上的网格建立了相互对应的数学关系后，则地球表面各网格内的要素（如长度、角度、面积等）也以

满足这种数学关系的形式表示在平面上。因此,地图投影是指以一定的数学关系将地球表面上的经纬线网格表示到平面上去的投影方法。常用的地图投影有圆柱投影、圆锥投影、透视方位投影等。航海专用地图简称为海图,大约 95% 以上的海图是采用墨卡托投影,所绘制的海图称为墨卡托海图。墨卡托投影是一种等角正圆柱地图投影,其经纬线网格(球面坐标 λ, φ) 与平面网格(平面坐标 X, Y) 之间有如下的数学关系:

$$X = R\lambda$$

$$Y = R \ln \left[\tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$

式中: R 为地球半径。墨卡托投影的特点可以概括为:①地球上所有经线成为与赤道垂直的直线,所有纬线成为与赤道平行的直线;②地球上不同纬度的纬线在地图上拉长得与赤道纬线一样长,纬度越高,地图上的经线和纬线就被拉长得越多,到两极地区,经线被拉长得在地图上无法表示;③地球上的等角航线在地图上是一条直线,因此,墨卡托投影地图在航海和航空中得到广泛应用。

从理论上讲,在已知等高圆的圆心和半径的前提下,就可以在地球仪或墨卡托海图上直接画等高圆,用图解的方法求得天船位。但是,实践证明通过在海图上画等高圆的方法来求得舰船位置是不可取的,其原因有以下几点:

(1) 如果在地球仪上直接画等高圆,根据海上定位精度的要求,在地球仪的表面上用肉眼能分辨的 1mm 的长度至少应为 1 海里,这样,地球仪的直径约为 6.9m。

(2) 通常等高圆的半径很大。例如,天体的真高度角为 30° 时,等高圆的半径为 60° ,在地球圆球表面画出的圆的半径约为 3600 海里,大比例海图根本容不下。

(3) 如果采用小比例海图,由于墨卡托投影会产生很大的变形,等高圆在海图上的投影是一条复杂的“周变曲线”(非圆形),这种周变曲线用一般的作图方法绘制十分困难,此外,等高圆的这种变形会导致很大的定位误差,不能满足航用的要求。

1875 年,法国航海家圣·希勒尔(St·Hilaire)发明的高度差法,解决了等高圆作图的问题。该方法的基本思路是:在海图上无需画出整个等高圆,只需使用每个等高圆的一小段圆弧就可以求得舰船的位置,而这一小段圆弧通常比较短,可以用圆周的割线或切线来代替。这样就将画等高圆的难题转化成了画船位线的问题,简单易行。高度差法被认为是现代航海天文导航的开端,逐渐成为天文定位的标准方法。

高度差法的基本原理比较简单。对于任何一个观测者来说,天体的高度角与观测者所在的地理纬度、天体的赤纬和格林时角有确定的函数关系,如果在实际船位附近任选一点(称为假定船位,或称计算点,记为 O),则根据式(3-2-

2), 可以计算出天体在该点的高度角, 如此获得的天体高度角叫做天体的计算高度 h_c 。显然, 它与在实际船位处获得的天体观测高度 (记为 h_i) 是有差别的, 通常把观测高度与计算高度之差称为高度差, 记为 dh ($dh = h_i - h_c$)。当 O 点在实际船位附近 (偏差在几十海里以内) 时, dh 为小量, 对式 (3-2-2) 两边做微分, dh 可以表示成如下形式

$$dh = \frac{\partial h}{\partial \varphi} d\varphi + \frac{\partial h}{\partial t_c} dt_c$$

对式 (2-2-2) 两边求微分, 可以得到

$$\cosh \cdot dh = (\cos\varphi \sin\delta - \sin\varphi \cos\delta \cos t_c) \cdot d\varphi - \cos\varphi \cos\delta \sin t_c \cdot dt_c$$

因为 dh 和两个微分参数都是常数, 上式可以简化为如下形式:

$$d\varphi = a + b \cdot dt_c$$

这是一个直线方程, 即所谓的船位线方程, 如图 3-2-5 所示。下面分别讨论 $dt_c = 0$ 和 $d\varphi = 0$ 时的两种特殊情况。

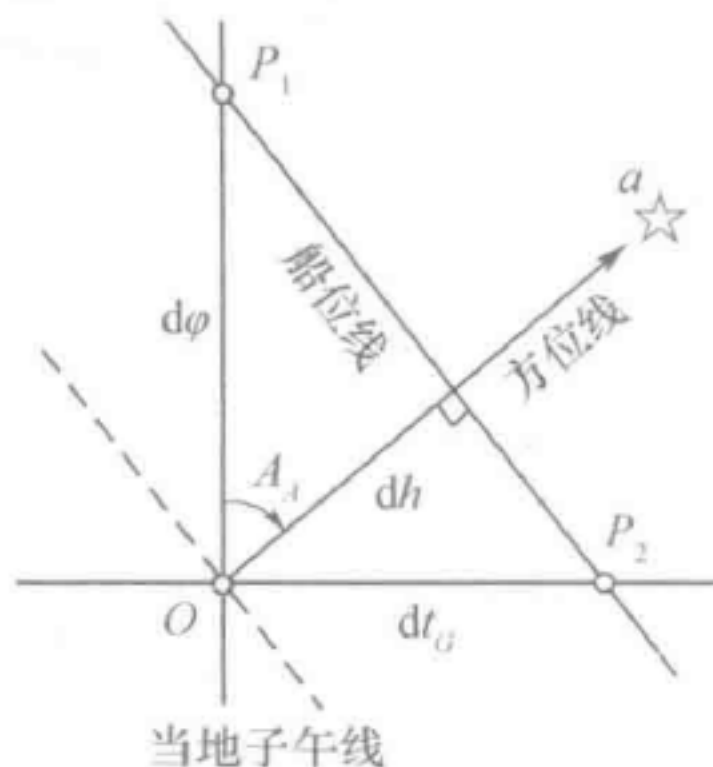


图 3-2-5 高度差法原理图

当 $dt_c = 0$ 时, t_c 保持不变, 实际船位与计算点 O 在同一条子午线上, dh 完全由纬度的变化量 $d\varphi$ 决定。增加 $d\varphi$, 可得到 P_1 点, 该点位于观测者等高圆上。

当 $d\varphi = 0$ 时, φ 保持不变, 实际船位与计算点 O 在同一条纬度圈上, dh 完全由子午线角的变化量 dt_c 决定。增加 dt_c , 可得到 P_2 点, 同样 P_2 点也位于观测者等高圆上。

在 P_1 点和 P_2 点观测到的天体高度均为 h_i , 直线 P_1P_2 是等高圆的切线, 也即是我们所求的位置线。连接计算点 O 和天体投影点 a 的直线叫做方位线, 方位线与位置线的交点到 O 的距离即为高度差 dh 。方位线与 O 点当地子午线之间的夹角叫做方位角 A , 显然, 它等于位置线与 O 的纬度圈之间的夹角。

下面讨论高度差法求船位的作图规则, 如图 3-2-6 所示。

(1) 高度差 dh 为“+”, 计算点 O 在等高圆之外。过计算点 O 作天体的计算方位线 (方位角为 A), 在该线上, 以 O 为原点, 朝向天体 (沿天体计算方位的方向) 截取 dh , 得截点 K ; 过 K 点作计算方位线的垂线, 即位置线。

(2) 高度差 dh 为“-”, 计算点 O 在等高圆之内。过计算点 O 作天体的计算方位线(方位角为 A), 在该线上, 以 O 为原点, 背向天体(沿天体计算方位的反方向)截取 dh , 得截点 K ; 过 K 点作计算方位线的垂线, 即位置线。

(3) 高度差 $dh=0$, 计算点 O 在等高圆之上。过计算点 O 作天体的计算方位线(方位角为 A); 再过 O 点作计算方位线的垂线, 即位置线。

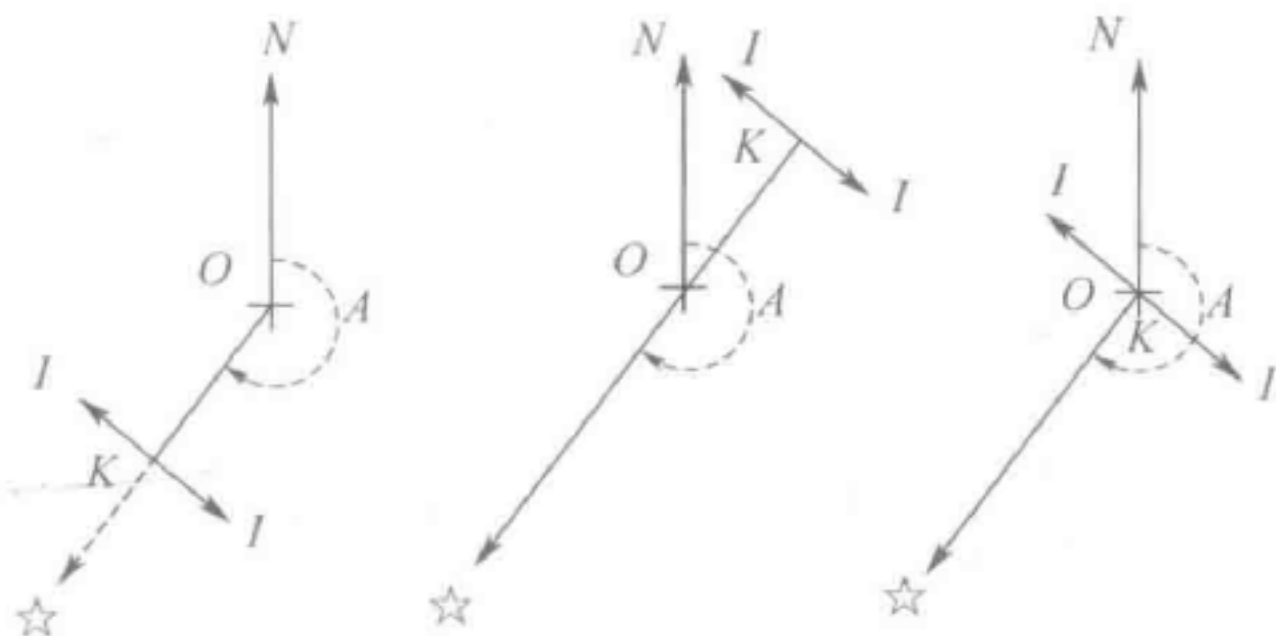


图 3-2-6 高度差法画船位线规则

例 3-2-1: 如图 3-2-7 所示, 以推算船位 $O(\varphi, \lambda)$ 为计算点, 若求得天体计算高度 $h_c = 46^\circ 27.5'$, 计算方位 $A = 225^\circ$, 同时求得天体真高度 $h_t = 46^\circ 25.2'$, 则可画出位置线, 具体方法如下:

已知计算点 $O(\varphi, \lambda)$, 计算方位 $A = 225^\circ$

真高度 $h_t = 46^\circ 25.2'$

计算高度 $h_c = 46^\circ 27.5'$

则得到高度差 $dh = -2.3'$

为保证定位精度, 通常选择的计算点偏离实际船位不应超过 30 海里, 通常以推算船位为基准, 规定选择船位的经纬度与其经纬度的差值限制在 $30'$ 之内。为保证利用高度差法画出的位置线所必需的精度, 应选择观测高度低于 70° 的天体为宜; 高度越高, 等高圆的半径就越小, 等高圆的曲率就越大, 这时在墨卡托海图上

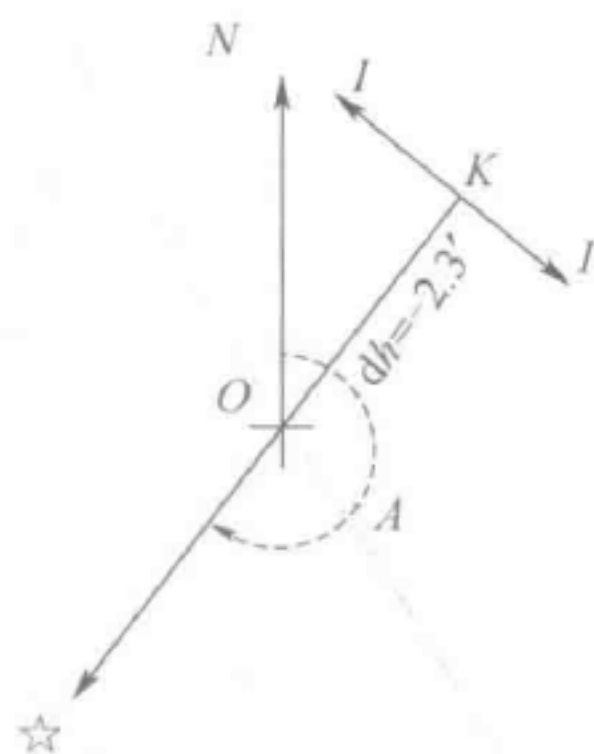


图 3-2-7 高度差法画船位线

用恒向线直线代替等高圆曲线所产生的误差也相应地增大。如果在求得观测船位之后发现计算点偏离观测船位大于 30 海里, 可把求得的观测船位作为新的计算点重新计算(迭代计算)和作图, 这样做可以进一步提高舰船的定位精度。

4. 定位误差分析

在实际应用中, 从航海天文年历中得到的天体赤纬和时角与实际值之间的误差很小, 通常可以忽略。天体高度角误差包括了天文观测仪器的标定误差、地平俯角测量误差、大气折射误差等, 要获得精确的天体高度角就需要对测量值进行修正。关于测量误差的修正问题, 这里不作深入讨论。天体高度角误差即相

当于等高圆半径的不确定度,由于等高圆半径通常很大,因此在误差分析时可以将图 3-2-1 中的等高圆等效为船位线,如图 3-2-8(a)图所示。

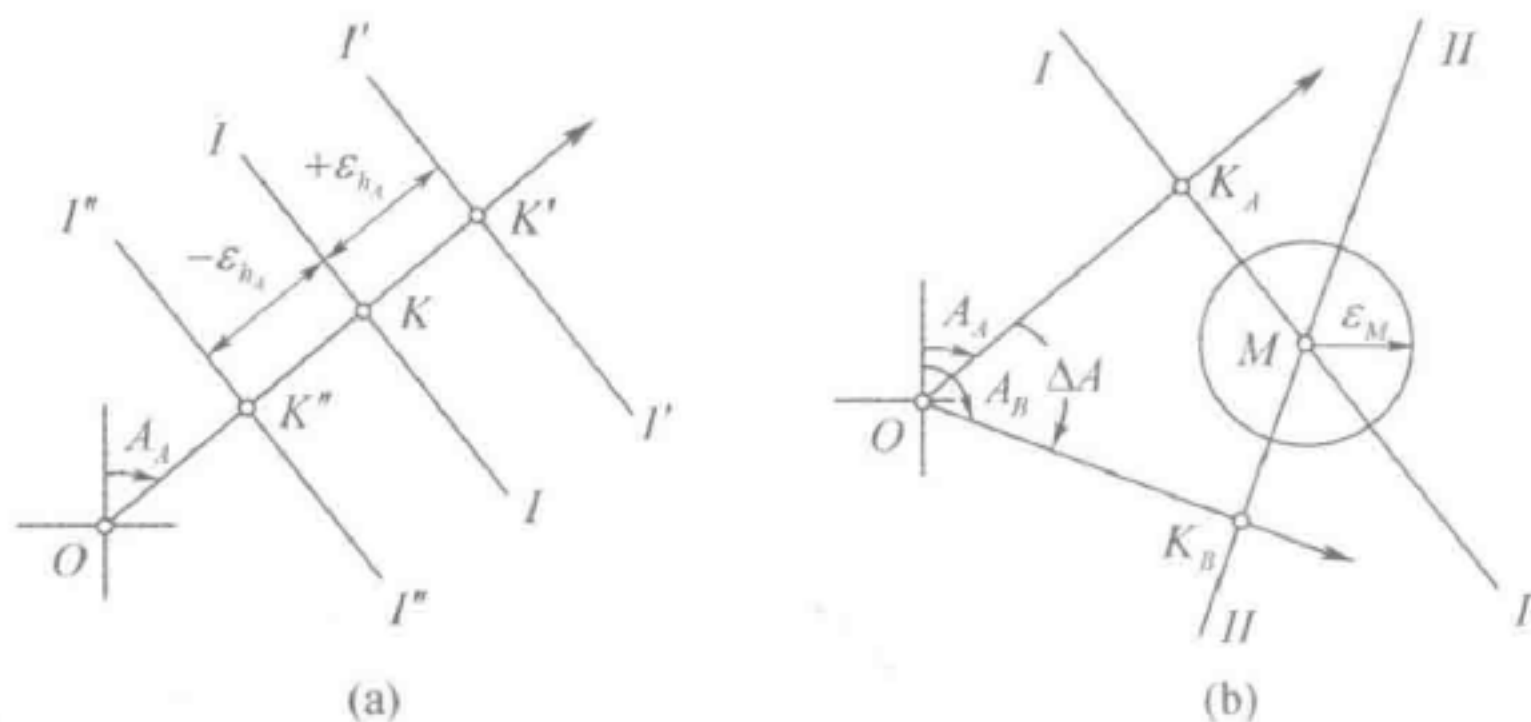


图 3-2-8 双星定位的船位线误差及误差圆

(a)图中的 ε_{h_A} 表示由观测天体A引起的船位线误差,(b)图中误差圆的半径 ε_M 表示双星定位的均方误差。因此双星定位的均方误差可以近似地表示为:

$$\varepsilon_M = \frac{\sqrt{\varepsilon_{h_A}^2 + \varepsilon_{h_B}^2}}{\sin(A_A - A_B)} \quad (3-2-5)$$

式中: ε_M 为定位误差的圆半径; $\varepsilon_{h_A}, \varepsilon_{h_B}$ 分别为两个天体高度角的测量误差; A_A, A_B 为两个天体的方位角, $(A_A - A_B)$ 表示了所观测天体的空间几何分布特征。若舰船与两个天体的投影点共线,则 $\sin(A_A - A_B) = 0$,此时,双星定位误差为无穷大;若 $A_A - A_B = 90^\circ$,即,两个投影点相对于测量点的方位角差值为 90° ,则有 $\varepsilon_M = \sqrt{\varepsilon_{h_A}^2 + \varepsilon_{h_B}^2}$ 。因此,选择位置较好的观测天体的空间几何分布特征,可以有效地减小双星定位法的误差。如果 $A_A - A_B = 90^\circ$,两个天体高度角的测量误差均为 $\varepsilon_{h_A} = \varepsilon_{h_B} = 30''$,此时双星定位法的误差圆半径 $\varepsilon_M \approx 0.7$ 海里。换句话说,若要获得1海里量级的定位精度,天体高度角的测量误差必须控制在几十角秒的量级。需要指出的是这里只简单讨论了用均方误差圆来评定舰船定位误差的方法,还有一些评定方法诸如均方误差椭圆和均方误差四边形等,感兴趣的读者可参阅相关资料。

由于双星定位的两个等高圆相交于两点,需要解所谓的模糊度问题,在实际应用中通常是再增加对第三个天体的观测,称为三星定位。三星定位的三个等高圆必交于一点,即真实船位,这样,既避免了求解模糊度问题,又可提高定位精度。此外,还可以利用对第三个天体的观测值来检查前两个观测值的可信度。

3.2.2 航海天文定向

航海天文定向是通过对天体观测来确定舰船航向的技术,天文罗盘是天文