

高等学校统编教材

# 航海学

上册

潘琪祥 主编  
钱淡如 主审

大连海事大学出版社

高等学校统编教材

# 航海学

下 册

潘琪祥 主编  
钱淡如 主审

大连海事大学出版社

## 内容提要

本书下册包括电子定位与导航、潮汐推算、航海图书资料、航行方法、船舶交通管理和航线拟定等内容。在编写时力求涵盖 IMO 关于 STCW 1995 年修正案的要求,同时反映航海科技的新成就。本书第二篇第五章由张品生编写,其中第七节由吴广华编写,第三篇第一、二、三章由赵仁余编写,其余各章由张登火编写,全书由潘琪祥统稿。

本书为高等学校使用教材,也可作为有关船舶驾驶和管理人员的技术参考书。

## 前 言

《航海学》(Navigation)是海洋船舶驾驶专业的主干课程,它是一门研究船舶如何安全而经济地从一个港口航行到另一个港口的实用科学。因此,它研究的主要课题是:

1. 拟定一条既安全又经济的航线,制定一个切实可行的航行计划。
2. 船位论。即研究航迹推算和航行定位,引导船舶航行在既定的计划航线上。

航行定位的方法有如下三大类:

陆标定位——利用目视物标测定船位;

天文定位——利用日月星辰测定船位;

电子定位——利用船上装备的电子定位系统(Electronic fixing system)的接收机测定船位。

3. 航路学。它包括潮汐推算 航海图书资料和各种航海条件下的航行方法。

在以往的教学计划中,上述内容是通过《航海专业数学》、《航海学》和《航海天文学》(Nautical Astronomy)三门课程来讲授的,即在本课程中的天文定位,加上天文定位所需要的普通天文学知识及卫星定位等内容,组成《航海天文学》。《航海专业数学》是学习《航海学》和《航海天文学》的数学基础,它包括球面几何和球面三角学,观测误差和船位误差理论等内容。因此,《航海专业数学》、《航海学》和《航海天文学》有其独立性,可以自成体系,但它们之间的关系却又是极其密切的。

由于航海科学技术的不断发展,随着教学改革的不深入,根据党中央关于“教育面向现代化、面向未来、面向世界”的指示精神,以往的课程体系是不适应今天教学改革的需要的。时代要求我们必须进行彻底的改革。鉴于这三门课程具有极其密切的关系,完全有基础将它们统一在《航海学》的课程中。这种统一绝不是简单地将这三门课程的内容各自独立地拼凑在一起,因为这样难以克服相关内容的重复,难以精简教材,难以较大幅度地减少教学时数。这种统一必须打破原来的课程体系,其内容必须具有系统性和科学性,建立一个完整的、崭新的《航海学》体系。为此,我们设想《航海学》课程的新体系由航海学基础知识、船位论和航路学组成。其内容和特点概述如下:

航海学基础知识包括地球和天球及其坐标,航向、方位和距离,天文三角形,天体位置坐标的变化,时间,海图等内容。球面几何知识放在“地球和天球”内介绍;球面三角与“天文三角形”合并介绍,重点落实在天体高度和方位的计算上,大大精简解球面三角形的内容。

船位论包括船舶航迹推算,航海观测误差与船位误差理论基础,陆标定位,天文定位,电子定位与导航(包括电子海图显示信息系统(ECDIS))等。第一,在船舶航迹推算之后,各种定位之前,讨论观测误差与船位误差理论基础,一方面可以紧密联系航海实践,从而不再感到误差理论抽象难学;另一方面为学习各种定位方法打下基础。第二,天文定位与陆标定位、电子定位和导航并立,实际上体现出天文定位仅仅是海上船舶航行定位的一种方法,因而可较大幅度地精简天文航海的内容。第三,科学合理地将卫星定位划分到电子定位与导航中。

航路学的内容基本上与原《航海学》的下册相同,不同的是介绍最新的航海图书资料。

编写过程中,充分考虑了为提高教学质量、加强理论基础、拓宽知识面、增强学生分析问题和解决问题的能力需要,参考国内外有关文献,结合我国的航海教育实践和国内外航海科技的新成就。同时考虑到国际海事组织(IMO)1995年STCW公约修正案的要求,力求涵盖IMO1995年STCW公约修正案对海洋船舶驾驶操作级和管理级人才的培训和考证大纲的要求。

本书由上海海运学院潘琪祥主编,钱淡如主审。第一篇和第二篇的第一、二、三章由潘琪祥编写,第四章、第五章第七节由集美航海学院吴广华编写;第五章第一、二、三、四、五、六节由武汉华中科技大学张品生编写;第三篇第一、二、三章由上海海运学院赵仁余编写;第四、五、六、七、八章由上海海运学院张登火编写。全书由潘琪祥统稿。

由于编写水平有限,缺点和错误难免,希望广大读者予以批评指正。

编者

1998年1月

## 目 录

前言	(1)
----	-----

## 第一篇 基础知识

第一章 地球和天球	(1)
第一节 球面几何	(1)
第二节 地球形状与地理坐标	(4)
第三节 天球和天球赤道坐标	(7)
习题一	(13)
第二章 航向、方位和距离	(16)
第一节 航向、方位和距离	(16)
第二节 海上方向的测定和向位换算	(24)
第三节 天体的方位、顶距和高度	(33)
第四节 天体高度的测定和改正	(36)
习题二	(51)
第三章 天文三角形	(54)
第一节 天文三角形	(54)
第二节 球面三角形的边角函数关系	(54)
第三节 天体高度和方位的计算	(62)
习题三	(65)
第四章 天体视运动和天体位置坐标的变化	(66)
第一节 天体周日视运动	(66)
第二节 太阳周年视运动	(72)
第三节 月球视运动	(77)
第四节 岁差、章动和光行差	(79)
习题四	(83)
第五章 时间和求天体位置坐标	(85)
第一节 恒星时	(85)
第二节 视(太阳)时和平(太阳)时	(86)
第三节 地方时、世界时和协调世界时	(89)
第四节 区时、法定时、船时和船舶计时器	(92)
第五节 天体位置坐标的计算	(99)
习题五	(103)
第六章 海图	(106)
第一节 地图投影及其分类	(106)
第二节 恒向线	(109)
第三节 航用海图的投影方法	(111)
第四节 识图	(118)

第五节 海图的分类、改正、管理和使用	(128)
习题六	(131)

## 第二篇 船位论

第一章 航迹推算	(132)
第一节 航迹绘算	(133)
第二节 航迹计算	(149)
习题七	(156)
第二章 航海观测误差和船位误差理论基础	(158)
第一节 航海观测误差及其分类	(158)
第二节 单一观测的标准差与误差传播规律	(161)
第三节 位置线和船位线及其误差	(166)
第四节 船位误差	(175)
习题八	(187)
第三章 陆标定位	(189)
第一节 方位定位	(189)
第二节 距离定位	(195)
第三节 水平角定位	(197)
第四节 移线定位	(198)
第五节 综合定位	(205)
第六节 单一船位线的应用	(206)
习题九	(207)
第四章 天文定位和测定罗经差	(209)
第一节 白昼测天定位	(209)
第二节 晨昏测星定位	(220)
第三节 天文船位误差分析	(248)
第四节 测定罗经差	(255)
习题十	(259)
附录 1 太阳、星体高度改正表	(262)
附录 2 四星纪要	(263)
附录 3 中天时刻图	(264)
附录 4 天体位置	(265)
附录 5 恒星视位置	(274)
附录 6 北极星高度求纬度	(276)
附录 7 北极星方位角	(277)
附录 8 纬度渐长率表	(278)
附录 9 海图作业试行规则	(280)
附录 10 太阳和恒星视位置计算的数学模型	(283)
附录 11 天文定位的数值计算	(286)

## 目 录

## 第二篇 船位论

第五章 电子定位与导航 .....	(289)
第一节 无线电测向定位 .....	(289)
第二节 雷达定位与导航 .....	(292)
第三节 罗兰定位 .....	(298)
第四节 台卡定位 .....	(304)
第五节 卫星定位 .....	(308)
第六节 船舶组合导航 .....	(317)
第七节 电子海图显示信息系统 .....	(319)
习题十一 .....	(323)

## 第三篇 航路学

第一章 潮汐与《潮汐表》的应用 .....	(324)
第一节 潮汐的基本成因与潮汐不等 .....	(324)
第二节 中版《潮汐表》与潮汐推算 .....	(331)
第三节 英版《潮汐表》与潮汐推算 .....	(342)
第四节 潮流推算 .....	(351)
习题十二 .....	(355)
第二章 航海图书资料 .....	(358)
第一节 世界大洋航路 .....	(358)
第二节 航路设计图 .....	(362)
第三节 航路指南 .....	(363)
第四节 进港指南 .....	(369)
第五节 中版《航标表》与英版《灯标雾号表》 .....	(372)
第六节 英版《无线电信号表》 .....	(379)
第七节 航海图书目录 .....	(387)
第八节 英版《航海通告》 .....	(391)
习题十三 .....	(401)
第三章 大洋航行与最佳航线 .....	(404)
第一节 大洋航线 .....	(404)
第二节 大洋航行注意事项 .....	(417)
第三节 气象定线概述 .....	(418)
第四章 沿岸航行 .....	(420)
第一节 沿岸航行的特点和航线的选定 .....	(420)



---

第二节 沿岸航行的注意事项.....	(422)
第五章 狭水道航行.....	(426)
第一节 狭水道航行的特点.....	(426)
第二节 狭水道航行方法.....	(427)
第三节 岛礁区航行.....	(431)
第六章 雾中和冰区航行.....	(434)
第一节 雾中航行.....	(434)
第二节 冰区航行.....	(438)
第七章 船舶交通管理.....	(442)
第一节 船舶交通.....	(442)
第二节 船舶交通管理系统.....	(444)
第三节 船舶报告系统.....	(447)
第四节 船舶定线制.....	(450)
第八章 航行计划.....	(456)
习题十四.....	(460)
参考文献.....	(464)

# 第一篇 基础知识

## 第一章 地球和天球

### 第一节 球面几何

《航海学》研究的课题是如何使船舶安全而经济地从一个港口航行到另一个港口的科学技术。为此,必须研究地球面上点的位置、方向和距离,必须研究船舶与位置坐标已知的物标间的几何关系。除此之外,还必须研究太阳、行星、月亮和恒星等航用天体与船舶间的几何关系,而航用天体与测者是通过天球——一个假想的、任意长为半径的圆球体建立起相互的位置关系。因此,为了研究和分析地球和天球面上的几何位置关系,必须首先研究和分析圆球面上几何图形的性质,即球面几何的问题。

#### 一、球和球面上的圆

##### (一) 球和球面

在空间与一定点等距离的点的集合称为球面。球面所包围的空间称为球,或称圆球体。该定点称为球心。球心与球面上任意点之间的距离称为球半径。过球心与球面相交的直线段称为球直径。一个球的所有半径都相等,所有直径也都相等。显然,半径相等或直径相等的球全等。球面又可以定义为以直径为转轴的半圆周的旋转面。

##### (二) 球面上的圆

平面与球面相截的截痕是圆。

如图 1-1-1 所示,平面  $\pi'$  与球面相截。自球心  $O$  向截面  $\pi'$  作垂线  $OO'$ , 在截痕上任取一点  $A$ , 连结  $O'A$  和  $OA$ 。显然  $\angle OO'A = 90^\circ$ ,  $\triangle OO'A$  是一直角三角形。于是

$$O'A = \sqrt{OA^2 - OO'^2} \quad (1-1-1)$$

因为  $OO'$  是球心到截面  $\pi'$  的距离,  $OA$  是球半径, 它们都是定值, 所以  $O'A$  也是定值。由此可见, 截

痕上任一点至  $O'$  的距离为定值,  $\pi'$  平面与球面的截痕是一个以  $O'$  为圆心、 $O'A$  为半径的圆。

由式(1-1-1)知,若  $OO'$  的长度为零,即与球面相截的平面通过球心  $O$ ,如图 1-1-1 中的平面  $\pi$ ,相截所得的圆半径等于球半径  $OA$ 。这种圆是从球上能截出的半径最大的圆。因此,凡是截面通过球心的圆统称为大圆。大圆的半径等于球半径。

若垂线  $OO'$  的长度不为零,即截面不通过球心,则截得的圆的半径将小于大圆的半径(即球半径)。因此,凡是截面不通过球心的圆称为小圆。截面至球心距离近的小圆比距离远的小圆

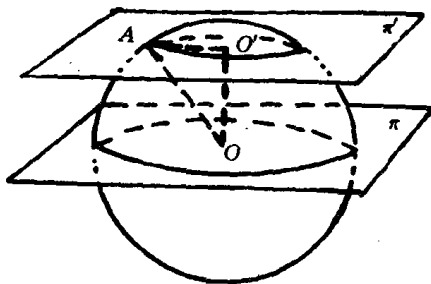


图 1-1-1

大。若截面至球心的距离相等,则所截得的小圆也相等。

大圆的一段圆周称为大圆弧。大圆弧的弧距由其所对的圆心角度量,以角度或弧度为单位。整个大圆的弧距为  $360^\circ$  或  $2\pi$ , 半个大圆的弧距为  $180^\circ$  或  $\pi$ ,  $\frac{1}{4}$  个大圆的弧距为  $90^\circ$  或  $\frac{\pi}{2}$  等等。

小圆的一段圆周称为小圆弧。小圆弧的弧距也是由其所对的圆心角度量。

### (三) 大圆的性质

大圆具有下列一些显而易见的性质:

1. 大圆的圆心与球心重合;
2. 大圆的直径等于球直径;
3. 同球或等球上的大圆的大小相等;
4. 大圆等分球面,大圆平面等分球体;
5. 同一球上的两个大圆平面一定相交,交线是它们共同的直径;
6. 过球面上同一直径的两端点可作无数个大圆而作不出小圆;
7. 过球面上不在同一直径两端的两点能作且只能作一个大圆,却能作无数个小圆;

8. 球面上两定点间小于  $180^\circ$  的大圆弧(称为劣弧)是该两点间最短的球面距离。

如图 1-1-2 所示,  $A, B$  为球面上任意两点,  $\widehat{AmB}$  为过  $A, B$  的大圆弧劣弧,  $AC \dots GB$  为过  $A, B$  的任意曲线。现将该曲线划分为无穷小段的圆弧  $\widehat{AC}, \widehat{CD}, \widehat{DE}, \dots, \widehat{GB}$ 。由于这些圆弧都是无穷小,所以可以认为它们都是大圆弧。由球心  $O$  连结  $OA, OC, OD, OE, \dots, OG, OB$ , 得一多面角  $O - ACD \dots GB$ 。

由立体几何学得知,多面角中任一面角小于其它面角之和,即

$$\angle AOB < \angle AOC + \angle COD + \angle DOE + \dots + \angle GOB$$

$$\text{即 } \widehat{AmB} < \widehat{AC} + \widehat{CD} + \widehat{DE} + \dots + \widehat{GB} = \text{球面曲线 } ACDE \dots GB$$

这就证明了:大圆弧劣弧是球面上两点间的最短球面距离,即两点间的球面距离以大圆弧距离为最短。根据这个原理,当将地球视作圆球体时,船舶在海上从  $A$  地到  $B$  地的最短航程线应该是这两地间小于  $180^\circ$  的大圆弧,这就是所谓的大圆弧航线。

### 二、轴、极、极距和极线

垂直于圆面的球直径称为这个圆的轴。球面上的圆都有而且只有一根轴。垂直于同一轴的圆面可以有无数个,这些圆面互相平行,其中只有一个是通过球心的大圆面,其余的都是小圆面。

轴的两端点称为极。球面上的每个圆都有而且只有两个极,但是极所对应的圆可以有无数个,其中只有一个是大圆,其余的都是小圆。

如图 1-1-3 所示,球直径  $PP'$  垂直于圆面  $B_1B_2B_3B_4$  和  $A_1A_2A_3A_4$ , 因而是这两个圆的轴,  $P,$

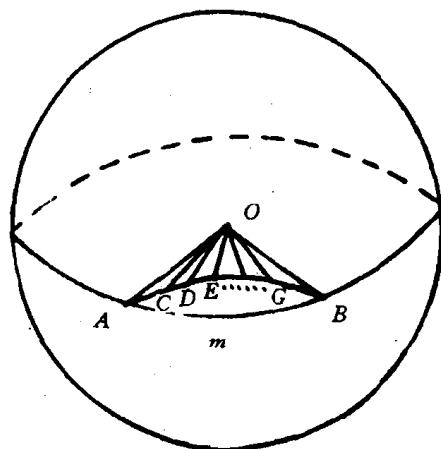


图 1-1-2

$P'$  是它们的极。过两极可作无数个大圆, 如  $PB_2A_2P'$ ,  $PB_3A_3P'$  等。这些大圆都垂直于该轴的圆  $B_1B_2B_3B_4$ ,  $A_1A_2A_3A_4$  等。

从大圆弧或小圆弧上的一点到极的大圆弧称为极距, 又称为该圆的球面半径, 该极就是球面圆的中心。一个球面圆的极距或球面半径都相等, 如  $\widehat{PB}_1 = \widehat{PB}_2 = \widehat{PB}_3 = \widehat{PB}_4$ 。

大圆上任一点到其极的大圆弧距均为  $90^\circ$ , 如  $\widehat{PA}_1 = \widehat{PA}_2 = \widehat{PA}_3 = \widehat{PA}_4 = 90^\circ$ , 即大圆的极距或球面半径等于  $90^\circ$ 。因为极所对应的大圆只有一个, 而且极距等于  $90^\circ$ , 所以, 把大圆弧称为所对应的极的极线。极的极线必然是

大圆弧。例如:  $P$  点是大圆  $A_1A_2A_3A_4$  的极, 而大圆弧  $A_1A_2A_3A_4$  则是极点  $P$  的极线。不难证明, 如果球面上一点至某一大圆弧上任意两点间的球面距离都是  $90^\circ$ , 则该点必然是这个大圆的极, 而这个大圆弧是该点的极线。

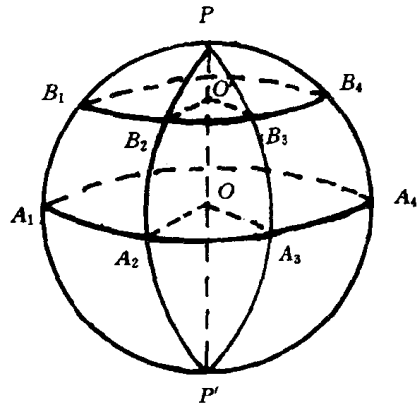


图 1-1-3

### 三、球面角及其度量

球面上两个大圆弧相交构成的角称为球面角, 其交点是球面角的顶点, 两大圆弧称为球面角的两边。球面角的大小是由其两边的大圆弧平面所构成的两面角来确定的。

如图 1-1-4 所示, 大圆弧  $\widehat{PA}$ ,  $\widehat{PB}$  相交于  $P$  点, 构成球面角  $\angle APB$ , 它可简记为  $\angle P$  或  $P$ 。  $P$  点是该球面角的顶点, 大圆弧  $\widehat{PA}$ ,  $\widehat{PB}$  是它的两边。大圆弧  $\widehat{CABD}$  是以球面角顶点  $P$  为极的极线。  $PE$ ,  $PF$  是过  $P$  点所作的大圆弧  $\widehat{PA}$ ,  $\widehat{PB}$  的切线。

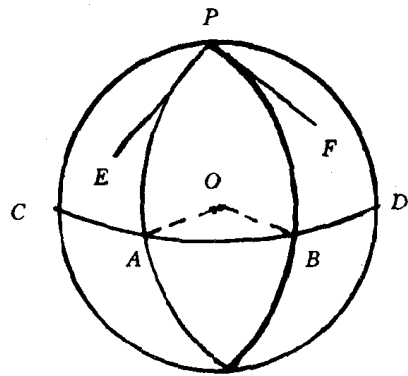


图 1-1-4

由于球面角的大小是由其两边的大圆弧平面所构成的两面角来确定的, 因此可得到球面角的如下三种度量方法:

1. 过顶点所作两大圆弧边切线的夹角  $\angle EPF$ ;
2. 球面角的两边在其顶点的极线上所夹的大圆弧  $\widehat{AB}$ ;

3. 大圆弧  $\widehat{AB}$  所对的球心角  $\angle AOB$ 。

因为两个大圆弧所构成的两面角可以是锐角、直角或钝角, 所以球面角也可以是锐角、直角或钝角。当两个大圆弧重合时, 球面角为  $0^\circ$ 。显然, 同一公共顶点的所有球面角之和等于  $360^\circ$ 。

在《航海学》中经常用到球面角的如下性质:

以球面角顶点为极的球面小圆和大圆在该球面角两边间的弧长之比等于小圆极距的正弦。

如图 1-1-5 所示,  $\widehat{ab}$  是以球面角  $\angle APB$  的顶点  $P$  为极的小圆在两边  $\widehat{PA}$ ,  $\widehat{PB}$  间的圆弧,  $\widehat{AB}$

是以  $P$  为极的大圆弧。 $PO'O$  是小圆面  $o'ab$ 、大圆面  $OAB$  的轴。于是  $\angle ao'b = \angle AOB$ ,  $\widehat{ab} = \angle ao'b(\text{弧度}) \times o'a$ ,  $\widehat{AB} = \angle AOB(\text{弧度}) \times OA$ 。所以

$$\frac{\widehat{ab}}{\widehat{AB}} = \frac{o'a}{OA} = \frac{o'a}{oa} = \sin \angle poa = \sin \widehat{pa}$$

## 第二节 地球形状与地理坐标

### 一、地球形状

#### 1. 大地球体

为了研究船位、方向和距离等航海问题,必须对地球的形状和大小作一定的了解。但地球的自然表面的形状是非常复杂的,有高山和深谷,崎岖不平。然而从整个地球外表来看,由于地球的体积较大,地球表面的高低起伏与整个地球比较起来,显得非常之小。同时地球表面上海洋的面积约占地球总面积的  $3/4$ ,而且比较平坦,所以,航海上讨论地球形状时,并不是指地球自然表面的形状,而是指由假想的大地水准面所包围的大地球体(Geoid)的形状。所谓大地水准面,它是一个假想的、与完全均衡状态的海洋面相吻合的水准面。如果将它向大陆延伸,并且使这一延伸面始终保持在任何地方都与该地的铅垂线正交,则这一连续的、无叠痕的、无棱角的闭合水准面,叫做大地水准面。被大地水准面所围成的几何体,是理想的地球形状,叫做大地球体。

大地球体是一个不规则的几何体。一般在应用上,将地球圆球体作为它的第一近似体;地球椭圆体作为它的第二近似体。

#### 2. 地球圆球体

航海上为了计算的简便,通常是将大地球体当作地球圆球体。根据航海上的长度单位 1 海里(n mile)等于 1 852 m 的规定,按照地球圆球面上大圆弧  $1'$  的弧长等于 1 n mile 长度推算出地球圆球体的半径  $R_E$ :

$$\begin{aligned} R_E &= \frac{360 \times 60}{2\pi} \text{ n mile} \\ &= 3\,437.746\,8 \text{ n mile} = 6\,366\,707 \text{ m} \end{aligned}$$

#### 3. 地球椭圆体

在大地测量学、地图学和需要精确的航海计算中,应该将大地球体当作两极略扁的地球椭圆体,才能够得到有足够精度的计算结果。

如图 1-1-6 所示,地球椭圆体(Spheroid)即旋转椭圆体,是由椭圆  $p_n q p_s q'$  绕其短轴  $p_n p_s$  旋转而成的几何体。椭圆短轴  $p_n p_s$  即地球的自转轴——地轴(Earth's axis);短轴的两个端点  $p_n$  和  $p_s$

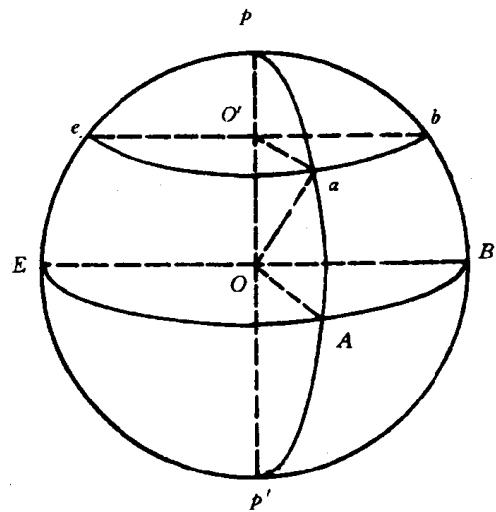


图 1-1-5

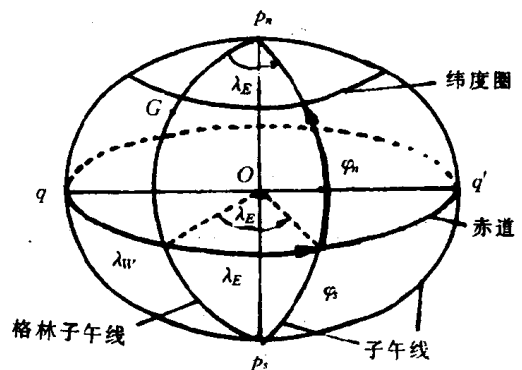


图 1-1-6

是地极 (Poles), 分别称为地理北极  $p_n$  和地理南极  $p_s$ ; 长轴绕短轴旋转所成的平面是赤道平面; 长轴端点  $q$  旋转而成的圆周是赤道  $qq'$  (Equator); 过短轴  $p_n p_s$  的任一平面是子午圈平面, 它与地球椭圆柱体表面相交的截痕是一椭圆, 称为子午圈 (Meridian), 其中由地理北极到地理南极的半个椭圆, 叫做地理子午线、子午线或经线 (Meridian line)。与赤道平面相平行的、与地轴正交的平面, 称为纬度圈平面, 它与地球椭圆柱体表面相交的截痕是一个圆, 称为纬度圈 (Parallel of latitude)。

地球椭圆体的形状和大小, 可用下列椭圆体参数表示: 长半轴  $a$ 、短半轴  $b$ 、扁率  $c$  和偏心率  $e$ 。它们之间有关系式:

$$c = \frac{a-b}{a}, \quad e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

所以

$$e^2 = \left(1 - \frac{b}{a}\right)\left(1 + \frac{b}{a}\right) = c(2 - c) \approx 2c$$

地球椭圆体参数是根据大地测量成果计算出来的。由于各个国家在测量时, 采用的纬度和测量的精度有所不同, 因此所得的地球椭圆体的参数也略有差异。我国现在采用的是原苏联克拉索夫斯基的地球椭圆体参数, 其值是:

$$a = 6\,378\,245 \text{ m}, \quad b = 6\,356\,863 \text{ m}$$

$$c = \frac{1}{298.3} = 0.003\,352\,333, \quad e = 0.081\,813\,369$$

1924 年国际测量学协会决定, 国际上采用 1910 年海福特测量的地球椭圆体参数, 其值是:

$$a = 6\,378\,388 \text{ m}, \quad b = 6\,356\,912 \text{ m}, \quad c = \frac{1}{297}$$

当用地球椭圆体代替大地球体时, 各地的大地水准面与地球椭圆体表面是不一致的, 但它们之间的高度差最大不超过 100 m, 通常可以忽略不计。只是在某些对精度要求较高的计算中, 例如利用人造地球卫星定位, 计算卫星接收机天线高度时, 必须考虑这个高度差。在卫星接收机中, 这项高度差改正是自动进行的。

## 二、地理坐标

地球椭圆体表面上任意一点的位置是用地理坐标表示的, 即用地理经度和地理纬度来确定该点在地球椭圆体表面上的位置。航海上船舶的位置与物标的位置都是用地理坐标来表示的。

地理坐标的基准圈是赤道和格林子午线。所谓格林子午线就是通过英国伦敦格林尼治 (Greenwich) 天文台的子午线, 它作为计算地理经度的起始子午线或称零度经线 (Prime meridian)。格林子午线与赤道的交点是地理坐标的起算点。

地面上某点的地理经度 (Geographical longitude) 是这样确定的: 它是格林子午线和该点子午线之间所截的赤道短弧或此短弧所对的球心角或极角 (图 1-1-6); 它以格林子午线为基准, 向东或向西, 由  $0^\circ$  到  $180^\circ$  计量, 算至该点子午线作为该点的地理经度。航海上用  $\lambda$  或 Long. 来表示地理经度。地理经度简称经度。由格林子午线向东计量的叫东经, 缀以“E”; 向西计量的叫西经, 缀以“W”。例如: 我国北京的地理经度  $\lambda = 116^\circ 28' . 2E$ 。

地面上某点的地理纬度 (Geographical latitude) 是这样确定的: 它是该点的椭圆子午线的法线与赤道面的交角 (图 1-1-7), 作为该点的地理纬度; 它以赤道面为基准, 向北 (极) 或向南

(极),由 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 计量。航海上用 $\varphi$ 或 Lat. 来表示地理纬度。地理纬度简称为纬度。由赤道面向北计量的叫北纬,缀以“N”;向南计量的叫南纬,缀以“S”。例如:我国北京的地理纬度 $\varphi = 39^\circ 54'.4N$ 。

除地理坐标外,航海上还可能会碰到地心坐标来表示地球椭圆柱体表面任意一点的位置。

地心坐标是由地理经度和地心纬度(Geocentric latitude)组成的。某点的地心纬度 $\varphi'$ (图 1-1-7)是由该点与地球椭圆体中心的连线(向径)与赤道面的交角来度量的。

地理纬度和地心纬度的关系如下:

地球椭圆子午圈有方程式: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ ,其中 $a, b$ 为地球椭圆体的长、短半轴。微分后求得:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{b^2x}{a^2y}$$

因为椭圆子午圈上地理纬度为 $\varphi$ 的点的切线斜率:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}(90^\circ + \varphi) = -\operatorname{ctg}\varphi$$

所以

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{a^2y}{b^2x}$$

而

$$\operatorname{tg}\varphi' = \frac{y}{x}$$

所以

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{a^2}{b^2}\operatorname{tg}\varphi' = \frac{1}{(1-e^2)}\operatorname{tg}\varphi'$$

这里: $e$ 为地球椭圆体的偏心率。于是

$$\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi' = e^2 \operatorname{tg}\varphi'$$

$$\sin(\varphi - \varphi') = e^2 \sin\varphi \cos\varphi \approx c \sin 2\varphi$$

其中 $c$ 为地球椭圆体的扁率,所以,地理纬度和地心纬度有关系式:

$$(\varphi - \varphi')'' = \frac{1}{\operatorname{arc}1''} c \sin 2\varphi = 691''.5 \sin 2\varphi$$

显然,地理纬度和地心纬度之差,在赤道和两极为最小,它们都等于0;而在 $\varphi = 45^\circ$ 时,其差值为最大,可达 $11'.5$ 。

### 三、经差和纬差

两地经度之代数差叫作经差(Difference of longitude),用符号 $D\lambda$ 表示;两地纬度之代数差叫作纬差(Difference of latitude),用符号 $D\varphi$ 表示。如果起航点的地理坐标为 $\varphi_1, \lambda_1$ ,到达点的地理坐标为 $\varphi_2, \lambda_2$ ,那么,它们的经差、纬差的计算公式为:

$$D\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$

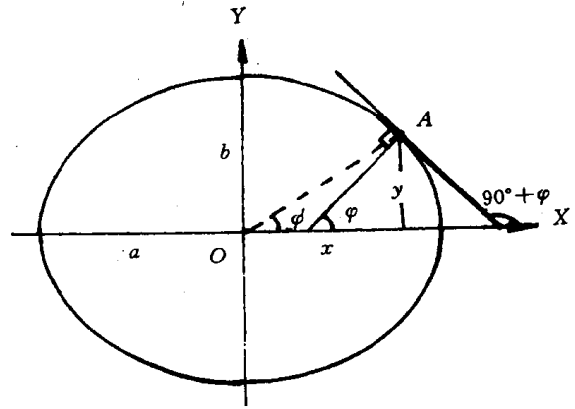


图 1-1-7

$$D\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

计算时,可以将东经作为正值(+),西经作为负值(-);北纬作为正值(+),南纬作为负值(-)。经差和纬差都应有其方向性。按公式求得的经差为“+”,则称东经差,说明到达点在起航点之东;经差为“-”,则称西经差,说明到达点在起航点之西。按公式求得的纬差为“+”,则为北纬差,说明到达点在起航点之北;纬差为“-”,则为南纬差,说明到达点在起航点之南。

例 1. 某船由  $32^{\circ}26'N, 122^{\circ}06'W$  航行至  $45^{\circ}14'N, 96^{\circ}04'W$ , 求两地的经差和纬差。

$$\begin{array}{r} \text{解:} \\ \varphi_2 \quad 45^{\circ}14'N(+), \quad \lambda_2 \quad 96^{\circ}04'W(-) \\ -) \quad \varphi_1 \quad 32^{\circ}26'N(+), \quad -) \quad \lambda_1 \quad 122^{\circ}06'W(-) \\ \hline D\varphi \quad 12^{\circ}48'N(+), \quad D\lambda \quad 26^{\circ}02'E(+). \end{array}$$

例 2. 某船由  $24^{\circ}38'S, 150^{\circ}42'E$  航行至  $12^{\circ}44'N, 176^{\circ}12'W$ , 求两地的经差和纬差。

$$\begin{array}{r} \text{解:} \\ \varphi_2 \quad 12^{\circ}44'N(+), \quad \lambda_2 \quad 176^{\circ}12'W(-) \\ -) \quad \varphi_1 \quad 24^{\circ}38'S(-), \quad -) \quad \lambda_1 \quad 150^{\circ}42'E(+). \\ \hline D\varphi \quad 37^{\circ}22'N(+), \quad D\lambda \quad 326^{\circ}54'W(-) \\ \text{即 } 33^{\circ}06'E \end{array}$$

经差不能大于  $180^{\circ}$ 。当计算结果经差大于  $180^{\circ}$  时,则应该用  $360^{\circ}$  减之,其结果方向相反。如果计算经差和纬差的两点,并不是航行中的起航点和到达点,则应该以计算的基准点作为起航点,而另一点作为到达点进行计算。

### 第三节 天球和天球赤道坐标

船舶在海上航行时,为了利用太阳、行星和恒星等天体测定船位,必须了解观测时刻的天体位置和观测所得到的天体与测者之间的相互位置关系问题,所以人们首先通过一个假想的天球,把天球与地球、天体与测者通过球面几何关系联系起来。

#### 一、航用天体和天球

##### (一) 航用天体

天体(Celestial body)是宇宙空间各种天体的统称。例如恒星(包括太阳)、行星(包括地球)、卫星(包括月亮)、小行星、彗星、流星等等。恒星是炽热发光的天体,围绕着恒星运行的天体称为行星,围绕着行星运行的天体称为卫星。

航海上常用的天体称为航用天体(Navigational celestial body)。航用天体有太阳、月亮和四大行星(金星、火星、土星和木星)以及 159 颗航用恒星。航海上经常观测这些天体进行定位和测定罗经差。

##### (二) 天球

人们仰望天空,觉得天空好像一个空心的半球罩在地面上,日、月、星辰都好像分布在这个空心球的球面上。由于这些天体离地球都很遥远,我们的眼睛无法分辨它们的远近,只能判断它们之间的方向关系,而且不论我们走到那里,总觉得自已位于球心。在实用天文学中,将测者为中心,任意长为半径的空心的假想球面定义为天球(Celestial sphere)。根据研究不同对象的需要,可以将球心取在地球中心或太阳中心。于是可得到地心天球和日心天球。天球的实物模型有星球仪和天象仪等。

在《航海学》中,天球的中心定义在地球中心,因此是一个地心天球。天体在天球上的位



置,可以用投影的方法将天体投射在天球面上。这里把地球作为圆球体,自地球中心引向某时刻所见的天体的方向线在天球上所得的交点,表示该天体投影在天球面上的视位置,称为天体位置。如图 1-1-8 所示, $B$  点是自地心  $O$  引向天体  $B'$  的方向线与天球面的交点,因此  $B$  是天体  $B'$  在天球上的位置。该方向线和地球面的交点  $b$  是天体  $B'$  在地球上的投影点,称为天体的地理位置(Geographical position)。同样,天体  $C'$  在天球上的位置是  $C$ ,它的地理位置是  $c$ 。空中每一个天体都可以求得它在天球上的位置点,以及与其相对应的地球上的地理位置点。这样,不论天体离地球的远近,可把所有的天体位置统一表示在天球上,并且与其投影在地球上的地理位置相对应。

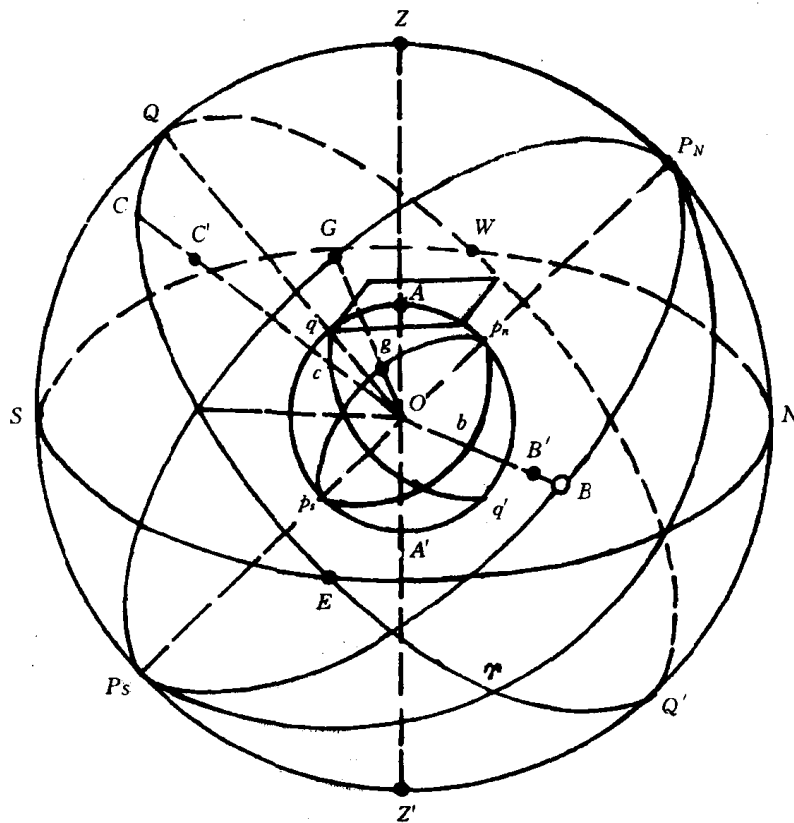


图 1-1-8

## 二、天球赤道坐标

天球上的赤道坐标系是与地球上的地理坐标系相对应的一种坐标系。

### (一) 基本点、线、圈和辅助圈

#### 1. 天极

天极(Celestial pole)是天球赤道坐标系的基本点,它是地轴  $p_n p_s$  延伸后与天球所得的交点。由地理北极  $p_n$  方向延长的交点  $P_N$  称为北天极,由地理南极  $p_s$  方向延长的交点  $P_S$  称为南天极(图 1-1-8)。

#### 2. 天轴

天轴(Celestial axis)是两天极的连线  $P_N P_S$ ,它是天球赤道坐标系的基本线。

#### 3. 天赤道

天赤道(Celestial equator)是天球赤道坐标系的基本圈,它是地球赤道面(平面  $qq'o$ )与天