



普通高等教育“十五”国家级规划教材

航海学

郭禹 主编

杨守仁 主审



HANGHAI XUE

 大连海事大学出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

航 海 学

郭 禹 主编

杨守仁 主审

大连海事大学出版社

© 郭 禹 2005

内 容 提 要

本书共分四篇,第一篇为基础知识,介绍了航海的基本知识:地理坐标与大地坐标系、方向、航向、航程、海图投影原理、识图和海图分类与使用等;第二篇为船舶定位,介绍了航迹推算、陆标定位、电子定位、天文定位和罗经差的测定的各种方法;第三篇为航路资料,介绍了潮汐与潮流和航海图书资料;第四篇为航线与航行方法,介绍了大洋航行与最佳航线、沿岸航行、狭水道及运河航行、特殊条件下的航行、船舶交通管理与船舶报告系统及航行计划和航海日志。

本书的“附篇及附录”,单印出版。

本书为高等学校使用教材,也可作为海船驾驶与管理人员及航海从业人员的技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

航海学 / 郭禹主编. — 大连: 大连海事大学出版社, 2005.3
ISBN 7-5632-1834-3

I. 航… II. 郭… III. 航海学—高等学校—教材 IV. U675

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 008927 号

大连海事大学出版社出版

地址:大连市凌海路1号 邮编:116026 电话:0411-84728394 传真:0411-84727996

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连海事大学印刷厂印装 大连海事大学出版社发行

2005年8月第1版 2006年1月第2次印刷

幅面尺寸:185 mm×260 mm 印张:41.5

字数:1031千字 印数:4001~9000册

责任编辑:史洪源 高 炯 版式设计:海 韵

封面设计:王 艳 责任校对:金以铨

定价:69.00元

(含另册《〈航海学〉附篇及附录》)

前 言

本书是根据航海技术专业本科指导性教学计划,按照新修订的“航海学”教学大纲编写的。

“航海学”(Navigation)是航海技术专业的一门主要的专业课程。它的基本任务是研究有关船舶在海上航行的航线选择与设计、船位的测定和各种条件下的航行方法等重要问题,为船舶安全、经济航行提供保障。

现代科学技术的发展成就使航海技术取得了长足的进步。信息科学、计算机技术、电子技术、通信技术及空间卫星技术在航海上的成功应用,使航海技术发生了极为深刻的变革,使“航海学”的内容得到了极大的充实与发展。可以预测,21世纪的航海必将是全新的现代航海。

航海技术的进步对航海人员的素质提出了更高的要求。现代航海要求航海人员必须具有较扎实的现代科学技术的基础知识,通过实践能不断积累与丰富航海经验,对各种复杂的航海环境具有独立分析、判断与处理的理论基础知识和实践技能,在不断更新的技术条件下有较好的自适应能力。

本书编写人员1999年3月编写出版的《航海学》,于2002年获全国优秀教材二等奖。在这次重新编写过程中,适当地加强了理论基础,注意了阐述的准确性与逻辑性,采用最新的航海信息,力求反映国内外航海科技的新成就,突出了现代航海中新的知识点与新技术,着力于培养学生分析问题与解决问题的能力。

在内容编排上基本保持原《航海学》的逻辑系统。对于学习本课程必需的航海专业数学,列于本书的附篇。本书所用的附表与附篇一并单印出版。

本书中所用的专业科技名词术语及其英文译名均以1996年全国自然科学名词审定委员会(现为全国科学技术名词审定委员会)公布的《航海科技名词》为准。

本书由郭禹主编,并编写了第二篇第一章、第二章。参编者有东昉(第一篇第一章、第二章第一节至第五节及第八节,第二篇第三章)、丁勇(第二篇第四章第二、三、五、六节和第五章)、张吉平(第三篇及第四篇第一章)、戴冉(第二篇第四章第一节、第四节)、刘德新(第一篇第二章第六、七节,第二篇第二章至第四章)、王凤武(第四篇第五、六章)。附篇由丁勇、戴冉编写。全书由郭禹统稿。

本书由杨守仁主审。

本书插图由丁勇、刘德新、王凤武、张吉平采用计算机绘制。

欢迎使用本书的广大读者批评、指正。

编 者

2005年7月

目 录

第一篇 基础知识

第一章 坐标、方向和距离	(1)
第一节 地球形状、地理坐标与大地坐标系	(1)
第二节 航向与方位	(8)
第三节 能见地平距离和物标能见距离	(17)
第四节 航速与航程	(22)
第二章 海 图	(27)
第一节 地图投影	(27)
第二节 恒向线	(31)
第三节 墨卡托投影海图	(33)
第四节 港泊图与大圆海图的投影方法	(38)
第五节 海图的绘制与出版	(40)
第六节 识 图	(44)
第七节 海图的分类和使用注意事项	(54)
第八节 电子海图	(57)

第二篇 船舶定位

第一章 航迹推算	(64)
第一节 航迹绘算	(64)
第二节 风流压差的测算方法	(70)
第三节 航迹计算	(72)
第二章 陆标定位	(79)
第一节 位置线与船位线	(79)
第二节 陆标的识别与方位、距离的测定	(83)
第三节 方位定位	(87)
第四节 距离定位	(92)
第五节 方位距离定位	(93)
第六节 移线定位	(95)
第三章 电子定位	(100)
第一节 电子定位导航系统的发展	(100)
第二节 罗兰 C 定位	(104)
第三节 GPS 定位	(116)

第四章 天文定位·····	(133)
第一节 天球坐标·····	(133)
第二节 天体视运动·····	(147)
第三节 时间与天体位置·····	(155)
第四节 求天体真高度·····	(177)
第五节 天文船位线·····	(187)
第六节 观测天体定位·····	(197)
第五章 罗经差的测定·····	(210)
第一节 利用陆标测定罗经差·····	(210)
第二节 观测天体求罗经差·····	(213)
第三节 航海上计算罗经差的实用方法·····	(219)

第三篇 航路资料

第一章 潮汐与潮流·····	(221)
第一节 潮汐的基本成因和潮汐术语·····	(221)
第二节 中版《潮汐表》与潮汐推算·····	(229)
第三节 英版《潮汐表》与潮汐推算·····	(239)
第四节 潮流推算·····	(248)
第二章 航标与《航标表》·····	(253)
第一节 航标的分类·····	(253)
第二节 国际海区水上助航标志制度·····	(257)
第三节 中国水上助航标志·····	(264)
第四节 中国沿海《航标表》及英版《灯标和雾号表》·····	(268)
第三章 航海图书资料·····	(275)
第一节 《世界大洋航路》、航路设计图与航路设计指南图·····	(275)
第二节 《航路指南》和《进港指南》·····	(280)
第三节 英版《无线电信号表》·····	(286)
第四节 里程表·····	(291)
第五节 航海图书目录·····	(293)
第六节 《航海员手册》·····	(298)
第七节 航海通告·····	(300)
第四章 海图与航海图书资料的改正与管理·····	(309)
第一节 海图的改正与管理·····	(309)
第二节 航海图书的改正与管理·····	(315)

第四篇 航线与航行方法

第一章 大洋航行与最佳航线·····	(319)
第一节 大圆航线与混合航线·····	(320)
第二节 大洋航线的选择与航行注意事项·····	(325)
第二章 沿岸航行·····	(336)
第一节 沿岸航行的特点与航线的选择·····	(336)
第二节 沿岸航行注意事项·····	(338)
第三章 狭水道及运河航行·····	(342)
第一节 狭水道航行·····	(342)
第二节 运河航行·····	(357)
第四章 特殊条件下的航行·····	(369)
第一节 雾中航行·····	(369)
第二节 冰区航行·····	(373)
第三节 极区航行·····	(376)
第五章 船舶交通管理与船舶报告系统·····	(379)
第一节 船舶交通管理·····	(379)
第二节 船舶定线·····	(384)
第三节 船舶报告系统·····	(387)
第六章 航行计划和航海日志·····	(394)
第一节 航行计划·····	(394)
第二节 航海日志·····	(402)

第一篇 基础知识

第一章 坐标、方向和距离

第一节 地球形状、地理坐标与大地坐标系

船舶在一望无际的茫茫大海上航行,需要在了解地球形状的基础上,建立坐标系,然后确定船舶位置,才能保证船舶安全经济地驶向目的港。

航海离不开对地球的认识。人类认识大地的形状,经历了漫长的岁月和艰难的历程。公元前6世纪已经认识到大地是球形的;公元前2世纪通过测量一段弧长所对应的圆心角,以求得该段弧的曲率半径的弧度测量方法,求得地球半径大约为400 000埃及古尺($\approx 6\ 300\text{ km}$);17世纪采用精密的三角测量的弧度测量法,发现低纬度处地球表面曲率半径略小、高纬度处地球表面曲率半径略大的规律,建立了地球椭球理论;18世纪,将地球形状和重力场的研究结合起来,建立了物理大地测量学,使得大地测量建立在近代科学基础上,弧度测量越来越精确;20世纪,随着人造地球卫星发射成功,空间远程技术的进步,建立了现代空间大地测量学,大地测量越来越精确,对地球的认识越来越深刻;21世纪,大地测量向数字地球的方向发展。

下面从航海的角度来研究地球形状、地理坐标系与大地坐标系。

一、地球形状

地球自然表面有高山峡谷、平原、江河湖泊和海洋,是一个高低不平、非常复杂的不规则的曲面。在这种自然表面上建立坐标来确定船舶与物标的相对位置、确定方向基准和距离单位是不可能的,必须由一个数学表面来代替地球的自然表面才能够去研究航海问题。

地球半径约为6 367 km,珠穆朗玛峰虽高,但也仅约为地球半径的千分之一。可见,尽管地球自然表面高低不平,但这些局部起伏量与地球半径相比却是微不足道的。因此,用占地球表面约71%的海水面的形状去描述地球形状(earth shape)是可行的。所谓地球形状,并不是指地球自然表面的形状,而是指由大地水准面(geoid)所包围的几何体的形状。地球上任意一点的水准面是指通过该点且与该点的铅垂线垂直的平面。液体的静止表面就是水准面。设想一个与平均海面相吻合的水准面,并把它延伸到陆地内部,在延伸中始终保持此面处处与当地的铅垂线正交,这样形成的一个连续不断的、光滑的闭合曲面,叫做大地水准面。大地水准面是最重要的一个水准面,地球只有一个大地水准面。被大地水准面所围成的球体叫做大地球体。航海学所研究的地球形状就是指大地球体的形状。大地球体非常接近地球,并且它又具有长期的稳定性,因此,采用大地球体来代替地球是合理的。

由于地球内部物质分布不均匀及地球表面起伏的影响,大地球体依然是不规则的几何体,

大地水准面依然不是一个数学表面。经过长期的实践发现圆球体表面、椭圆体表面是两个与大地水准面非常接近的数学表面。一般在应用上,是以地球圆球体(terrestrial sphere)作为大地球体的第一近似体;而以地球椭圆体(earth ellipsoid)作为大地球体的第二近似体。

航海上为了计算上的简便,通常是将大地球体当作地球圆球体,地球圆球体的半径等于 6 366 707 m。

在大地测量学、海图学和需要较为准确的航海计算中,将大地球体当作两极略扁的地球椭圆体,才能够得出具有足够精度的结果。

地球椭圆体即旋转椭圆体(见图 1-1-1),它是由椭圆 $P_N Q P_S Q'$ 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 axis),短轴的两个端点 P_N 和 P_S 是地极(earth poles);长轴绕短轴旋转而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)。

表示地球椭圆体的参数有长半轴 a 、短半轴 b 、扁率 c 和偏心率 e 。它们之间的相互关系是:

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

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

实际使用中常常只用长半轴 a 与扁率 c ,或长半轴 a 与短半轴 b 表示地球椭圆体的形状与大小,其他参数都可由此计算出来。

地球椭圆体参数是根据大地测量中的弧度测量的结果计算出来的。由于各国所处地区不同,所采用的测量数据、数据质量及计算方法不同,因此所得的地球椭圆体的参数也略有差异。表 1-1-1 所列是几个较著名的地球椭圆体参数及其使用的国家。

表 1-1-1 地球椭圆体参数表

椭圆体名称	年份	长半轴 a (m)	扁率 c	主要使用国家及说明
白塞尔 Bessel	1841	6 377 397.155	1:299.152 8	德国、瑞士、日本
克拉克 Clarke	1866	6 378 206.4	1:294.978	美国、加拿大、墨西哥
海福特 Hayford	1910	6 378 388.0	1:297.0	美国和法国等西欧国家
克拉索夫斯基 Красовский	1940	6 378 245.0	1:298.3	原苏联、东欧、中国
IUGG 推荐值	1975	6 378 140.0	1:298.257	16 届国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)推荐
IUGG 推荐值	1983	6 378 136.0	1:298.257	16 届国际大地测量和地球物理联合会(IUGG)推荐
WGS-84	1984	6 378 137.0	1:298.257 223 563	美国 GPS 卫星导航系统

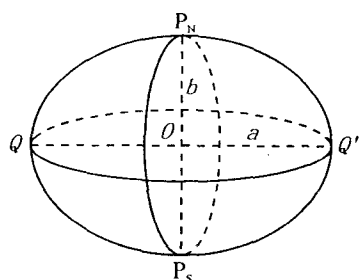


图 1-1-1 地球椭圆体

我国 1952 年用白塞尔地球椭球体参数,1954 年改用克拉索夫斯基地球椭球体参数,现在准备逐步采用 IUGG 1975 年推荐的地球椭球体参数。

二、地理坐标

地理坐标(geographic coordinate)是建立在地球椭球体表面上的。要建立地理坐标首先应在地球椭球体表面上确定坐标的起算点和坐标线图网,见图 1-1-2, O 为地球椭球体中心, P_N 为北极, P_S 为南极;过短轴 $P_N P_S$ 的任一平面是子午圈平面,它与地球椭球体表面相交的截痕是一个椭圆,称为子午圈,其中由北极到南极的半个椭圆,叫做子午线(meridian)或经线;通过英国伦敦格林尼治(Greenwich)天文台子午仪的子午线,叫做格林(尼治)子午线(Greenwich meridian);与赤道平面平行的平面,称为纬度圈平面,它与地球椭球体表面相交的截痕是一个小圆,称为纬度圈(parallel of latitude)。

地球椭球体表面任意一点的位置,可以用地理坐标,即地理纬度和地理经度来确定。航海上船舶的位置和物标的位置都是用地理坐标来表示的。

地理坐标的起算点是赤道与格林子午线的交点,经线与纬度圈构成坐标线图网。

地面上某点的地理纬度(geographic latitude)为地球椭球体子午线上该点的法线与赤道面的夹角,用 φ 或 Lat 来表示地理纬度。某点的地理纬度的计算方法是:从赤道起算,向北或向南,从 0° 到 90° 计量,算至该点所在的纬度圈,在赤道以北的叫做北纬,用 N 标示;在赤道以南的叫做南纬,用 S 标示。例如北京的纬度是 $39^\circ 54'.4$ N;好望角的纬度是 $34^\circ 21'.0$ S。

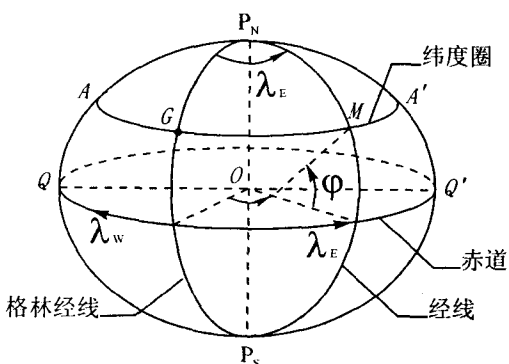


图 1-1-2 地理坐标

地面上某点的地理经度(geographic longitude)为地球椭球体格林子午线与该点子午线在赤道上所夹的劣弧长,或该劣弧所对应的球心角或极角,用 λ 或 Long 来表示地理经度。某点的地理经度的计算方法是:从格林子午线起算,向东或向西,从 0° 至 180° 计量,算至该点所在的子午线,向东计算的叫做东经,用 E 标示;向西计算的叫做西经,用 W 标示。例如北京的经度是 $116^\circ 28'.2$ E;纽约的经度是 $73^\circ 50'.0$ W。

同一纬度圈上任一点的纬度都是相等的,同一经线上任一点的经度也都是相等的。因此,经线与纬度圈构成的图网是坐标等值线图网,即坐标线图网。

除上述地理坐标外,在航海上个别场合还用地心坐标表示地面上某点的位置。地心坐标是由该点的地心纬度(geocentric latitude)和该点的地理经度组成的。某点的地心纬度 φ_c (见图 1-1-3)是该点地球椭球体的向径与赤道面的交角。地理纬度 φ 与地心纬度 φ_c 之间的关系如下:

若地球椭圆子午圈方程式为:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

则

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

而该点的斜率为

$$\frac{dy}{dx} = \tan(90^\circ + \varphi) = -\cot \varphi$$

所以

$$\tan \varphi = \frac{a^2}{b^2} \cdot \frac{y}{x}$$

但

$$\tan \varphi_e = \frac{y}{x}$$

所以

$$\tan \varphi = \frac{a^2}{b^2} \cdot \tan \varphi_e$$

$$= \frac{1}{(1 - e^2)} \tan \varphi_e$$

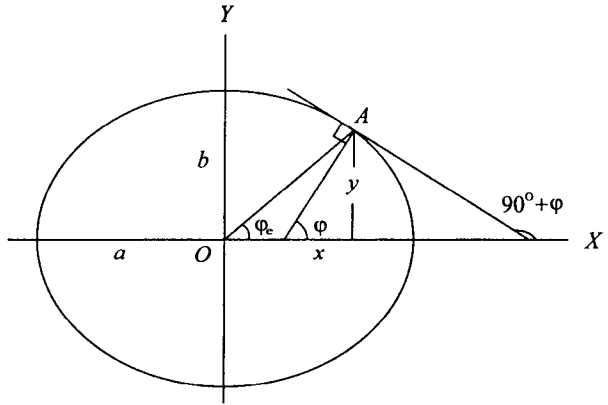


图 1-1-3 地心纬度

$$\tan \varphi - \tan \varphi_e = e^2 \tan \varphi$$

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

所以

$$(\varphi - \varphi_e)'' = \frac{c \sin 2\varphi}{\text{arcl}''}$$

取 $c = \frac{1}{298.3}$, 则

$$(\varphi - \varphi_e)'' = 691'' \cdot 5 \sin 2\varphi。$$

地理纬度与地心纬度之差,称为地心纬度改正量(correction of geocentric latitude),在赤道和两极均为零;而在 $\varphi = 45^\circ$ 时,此差值可达 $11'.5$ 。地心纬度改正量 $(\varphi - \varphi_e)$ 如表 1-1-2 所列。

表 1-1-2 地心纬度改正量表

φ	$\varphi - \varphi_e$	φ	φ	$\varphi - \varphi_e$	φ	φ	$\varphi - \varphi_e$	φ
1°	0'24".1	89°	16°	6'06".4	74°	31°	10'10".6	59°
2	0'48".2	88	17	6'26".7	73	32	10'21".5	58
3	1'12".2	87	18	6'46".5	72	33	10'31".7	57
4	1'36".3	86	19	7'05".7	71	34	10'41".1	56
5	2'00".1	85	20	7'24".5	70	35	10'49".8	55
6	2'23".8	84	21	7'42".7	69	36	10'57".7	54
7	2'47".3	83	22	8'00".4	68	37	11'04".7	53
8	3'10".6	82	23	8'17".4	67	38	11'11".0	52
9	3'33".7	81	24	8'33".9	66	39	11'16".4	51
10	3'56".5	80	25	8'49".7	65	40	11'21".0	50
11	4'19".0	79	26	9'04".9	64	41	11'24".8	49
12	4'41".2	78	27	9'19".4	63	42	11'27".7	48
13	5'03".1	77	28	9'33".3	62	43	11'29".8	47
14	5'24".6	76	29	9'46".4	61	44	11'31".1	46
15	5'45".8	75	30	9'58".9	60	45	11'31".5	45

两地纬度之代数差叫做纬差(difference of latitude),用 $D\varphi$ 表示。

两地经度之代数差叫做经差(difference of longitude),用 $D\lambda$ 表示。

纬差和经差都具有方向性,确定的原则是根据到达点在起航点之南或之北,来确定纬差的

方向是南或是北;同样,根据到达点在起航点之东或之西,来确定经差的方向是东或是西,其计算公式如下:

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

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

式中: φ_1, φ_2 ——起航点纬度和到达点纬度;

λ_1, λ_2 ——起航点经度和到达点经度。

计算中应注意:

- (1) 北纬、东经取正值(+), 南纬、西经取负值(-)。
- (2) 纬差、经差也有符号, 正值为北纬差、东经差, 负值为南纬差、西经差。
- (3) 经差的绝对值应不大于 180° , 如果大于 180° 时, 应由 360° 减去该绝对值, 并改变符号。

例 1-1-1: 某船由 $25^\circ 39' N, 150^\circ 42' E$ 航至 $12^\circ 43' S, 175^\circ 28' W$, 求两地经差和纬差。

$\begin{array}{r} \varphi_2 \quad 12^\circ 43' S(-) \\ -) \quad \varphi_1 \quad 25^\circ 39' N(+) \\ \hline D\varphi \quad 38^\circ 22' S(-) \end{array}$	$\begin{array}{r} \lambda_2 \quad 175^\circ 28' W(-) \\ -) \quad \lambda_1 \quad 150^\circ 42' E(+) \\ \hline D\lambda \quad 326^\circ 10' W(-) \end{array}$
	$360^\circ - 326^\circ 10' = 033^\circ 50' E(+)$

三、大地坐标系

对于地球椭圆柱体, 仅仅知道它的参数是不够的, 还必须确定它同大地球体的相互位置, 确定坐标轴的方向, 即必须把地球椭圆柱体定位和定向。建立大地坐标系 (geoid coordinate system) 就是对具有一定参数的椭圆柱体进行定位和定向。因此, 建立大地坐标系包括三个方面的问题:

- (1) 确定椭圆柱体的参数;
- (2) 确定椭圆柱体中心的位置(定位);
- (3) 确定坐标轴的方向(定向)。

也就是说, 建立起形状、大小、位置和轴向完全确定的椭圆柱体, 使它既不能变形, 也不能平移和旋转。前面所讲的地理坐标是在相应的大地坐标系下确定的椭圆柱体表面上建立的。因此, 用地理经、纬度来表示船舶位置与物标位置也只能在相应的大地坐标系下成立, 具有相对性。换言之, 相同船舶的位置与相同物标的位置在不同的大地坐标系中, 其地理经、纬度是不会相同的, 这一点在航海上是必须注意的。

各国在建立大地坐标系时, 主要考虑的是使选定的地球椭圆柱体与其所在地区的大地水准面更为接近, 因此, 所采用的大地坐标系往往不同; 即使采用相同的椭圆柱体参数, 也会因定位定向不同而采用不同的坐标系。

表 1-1-3 是部分国家采用的大地坐标系。

地球椭圆柱体在大地坐标系中的空间位置是确定的, 其表面与大地水准面(大地球体)在高度上的差异也是确定的。现代的大地测量结果表明, 大地水准面与地球椭圆柱体表面之间的高度差最大约为 100 m , 也就是说, 用地球椭圆柱体表面去代替大地水准面, 可以达到 10^{-5} 的精度。因此, 用地球椭圆柱体作为大地球体的近似体是足够精确、合理的。

表 1-1-3 部分国家采用的大地坐标系

大地坐标系名称	使用国家	原点	椭圆柱名称	椭圆柱参数
北京 1954 年	中国	北京	克拉索夫斯基 1940 年	$a = 6\,378\,245\text{ m}$ $c = 1:298.30$
西安 1980 年 坐标系	中国	陕西泾阳永乐镇 简称西安原点	IUGG 1975 年 推荐椭圆柱	$a = 6\,378\,140\text{ m}$ $c = 1:298.257$
1942 年坐标系	原苏联及东欧	普尔科夫	克拉索夫斯基 1940 年	$a = 6\,378\,245\text{ m}$ $c = 1:298.30$
1918 年东京 坐标系	日本	东京	白塞尔 1941 年	$a = 6\,377\,397.155\text{ m}$ $c = 1:299.1528$
1927 年北美 坐标系	美、加、墨	堪萨斯州	克拉克 1866 年	$a = 6\,378\,206.4\text{ m}$ $c = 1:294.98$
1950 年欧洲 坐标系	英、法、德、荷、 比、挪、土	波茨坦	海福特 1910 年	$a = 6\,378\,388\text{ m}$ $c = 1:297.00$
印度 卡兰普尔	印、巴、 孟、緬	卡兰普尔	埃弗勒斯特 1830 年	$a = 6\,377\,276.345\text{ m}$ $c = 1:300.8017$
NWL-8D	原 NNSS 卫 星导航系统 (美国)	地心	NNSS 卫星系统	$a = 6\,378\,145\text{ m}$ $c = 1:298.25$
WGS-72	美国军用卫 星导航系统、罗兰 C、奥米伽系 统	地心	世界测地系-72	$a = 6\,378\,135\text{ m}$ $c = 1:298.26$
WGS-84	GPS 卫星导 航系统 (美国)	地心	世界测地系-84	$a = 6\,378\,137\text{ m}$ $c = 1:298.257\,223\,563$

在 NWL-8D 大地坐标系中,大地水准面与地球椭圆柱表面之间的高度差为 +79 m 至 -99 m,具体见美国约翰·霍普金斯大学发布的《大地水准面等高线图》(图 1-1-4)。该高度差值在卫星导航定位中对计算接收机天线高度是一个不可忽略的因素。

由图 1-1-4 可知,在 30°N , 155°E 处大地水准面比地球椭圆柱表面高 20 m(标注 20);在 30°N , 180°E 处大地水准面比地球椭圆柱表面低 18 m(标注 -18)。

局部区域的地球自然表面、大地水准面和地球椭圆柱表面的关系,见图 1-1-5。

在卫星导航系统中有时要求输入接收机天线离地球椭圆柱表面的高度。对于船舶来说,可以近似把船舶所处的海面当作平均海面,此时:

$$\text{船舶接收机天线的高度} = \text{船舶接收机天线距海面的高度} + \\ \text{大地水准面与地球椭圆柱表面的高度差}$$

WGS-84 大地坐标系中大地水准面与地球椭圆柱表面的高度差与图 1-1-4 所示值相差不到 10 m。

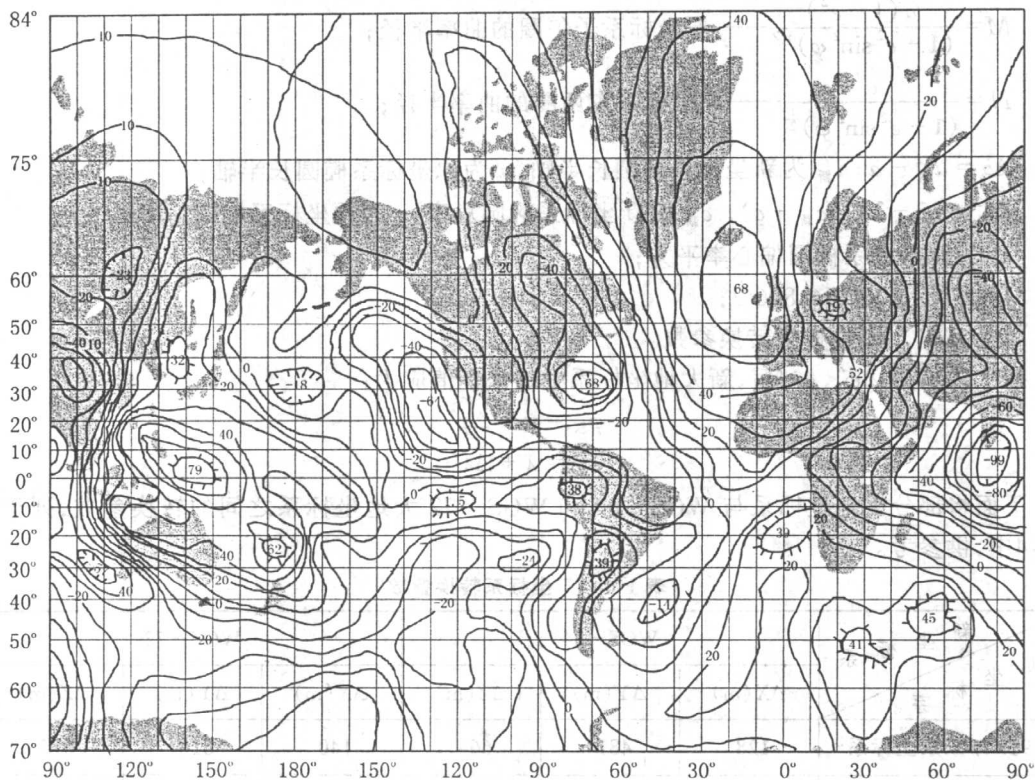


图 1-1-4 大地水准面等高线

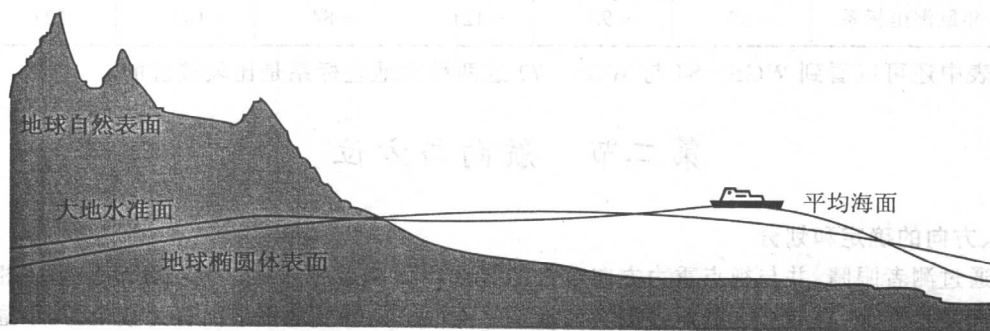


图 1-1-5 地球自然表面、大地水准面和地球椭球体表面关系图

四、不同大地坐标系间的坐标变换

在一些高精度的航海计算中,需要进行不同大地坐标系间的坐标变换。大地测量学中,具体的变换公式较多,这里仅介绍其中一种。

如果知道不同大地坐标系的原点移动量($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)后,可以用下式计算坐标改正值:

$$\begin{cases} \Delta\varphi'' = \frac{1}{M \sin 1''} [(a\Delta e^2 + e^2\Delta a)\sin\varphi\cos\varphi + ae^2\Delta e^2\sin^3\varphi\cos\varphi - \\ \quad \sin\varphi\cos\lambda\Delta X - \sin\varphi\sin\lambda\Delta Y + \cos\varphi\Delta Z] \\ \Delta\lambda'' = \frac{1}{N\cos\varphi\sin 1''} (\cos\lambda\Delta Y - \sin\lambda\Delta X) \end{cases}$$

式中: φ, λ 为原坐标系的纬度和经度;

$M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{3/2}}$ ——原坐标系子午圈的曲率半径；

$N = \frac{a}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{1/2}}$ ——原坐标系东西圈的曲率半径；

$\Delta a = a_{\text{新}} - a$, $a_{\text{新}}$ 为新坐标系椭圆长半轴, a 为原坐标系椭圆长半轴；

$\Delta e^2 = (2-2c)(c_{\text{新}} - c)$, $c_{\text{新}}$ 为新坐标系椭圆扁率, c 为原坐标系椭圆扁率；

e^2 为原坐标系椭圆偏心率平方；

$1/\sin 1'' = 206\,264.806\,2$ ；

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 也称为转换参数。

按上式求得 $\Delta\varphi''$, $\Delta\lambda''$ 后, 新大地坐标系中的坐标值应为：

$$\varphi_{\text{新}} = \varphi + \Delta\varphi''$$

$$\lambda_{\text{新}} = \lambda + \Delta\lambda''$$

下面将部分大地坐标系与 WGS-84 和 WGS-72 大地坐标系之间的转换参数, 列于表 1-1-4 中, 供参考。

表 1-1-4 坐标系转换参数

原坐标系 \ 新坐标系	WGS-84			WGS-72		
	$\Delta X(\text{m})$	$\Delta Y(\text{m})$	$\Delta Z(\text{m})$	$\Delta X(\text{m})$	$\Delta Y(\text{m})$	$\Delta Z(\text{m})$
1918 年东京坐标系	-128	481	664	-140	516	673
1927 年北美坐标系	-8	160	176	-22	157	176
1950 年欧洲坐标系	-87	-98	-121	-84	-103	-127

从表中还可以看到 WGS-84 与 WGS-72 这两种大地坐标系是比较接近的。

第二节 航向与方位

一、方向的确定和划分

凡通过测者眼睛, 并与视点重力方向重合的直线叫做测者铅垂线。凡与测者铅垂线相垂直的平面是水准面, 在航海上都叫做测者的地平平面(horizon)。地平平面有无数个, 其中通过地心的地平平面, 叫做测者真地平平面(true horizon)或天文地平平面(celestial horizon); 通过测者眼睛的地平平面, 叫做测者地面真地平平面(sensible horizon)。

测者周围的方向是在测者地面真地平平面上确定的。如图 1-1-6, 设测者位于 A 点, 眼高 AA', 过 A' 点并垂直于测者铅垂线的平面就是测者地面真地平平面 A'NESW; 测者 A 点的子午圈平面 $P_N AQP_S Q'$ 与其相交的直线 NA'S, 是测者方向的基准线——南北线。它近北极 P_N 的一方是测者的正北方向; 近南极 P_S 的一方是测者的正南方向。通过测者铅垂线 A'AO, 并与测者子午圈平面相互垂直的平面, 叫做测者的卯酉圈(东西圈, prime vertical)平面。卯酉圈平面与测者地面真地平平面相交的直线 EA'W, 叫做测者的东西线。当测者面北背南时, 测者东西线的右方是正东方向, 左方是正西方向。对于不同地点的测者来说, 都各有其不同的铅垂线方向、不同的地面真地平平面与不同的方向基准。

仅在测者地面真地平平面上确定北东南西4个基点的方向是不够的,它还不能完全表示出测者地面真地平平面上的其他各个方向。航海上常用的进一步划分方向的方法有以下三种:

1. 圆周法

以正北为 000° ,按顺时针方向计算至正东为 090° ,正南为 180° ,正西为 270° ,再计算至正北为 360° 。圆周法始终用三位数字来表示方向,它是航海上最常用的表示方向的方法。

2. 半圆法

以正北或正南为 0° ,向东或向西,由 0° 到 180° 计算到正南或正北。其方向的表示方法是:除度数外,还必须标明起算点和计算方向,如 24°NE , 135°NW , 145°SE 或 175°SW 等。度数后缀的字母,前者表示该方向是由北点(N)还是由南点(S)起算的;而后者则表示该方向是向东(E)还是向西(W)计算的。在天文航海学中,常用半圆法来表示天体的方位。

3. 罗经点法

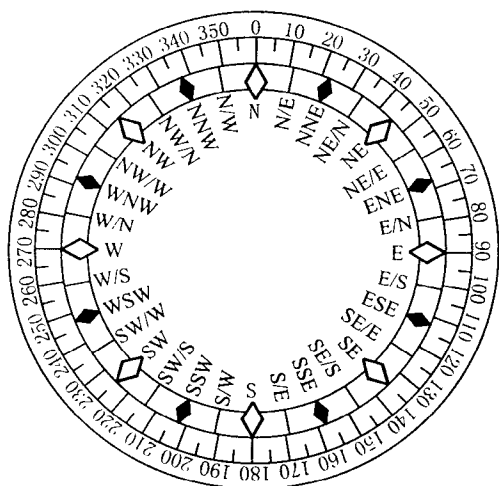


图 1-1-7 罗经点方向

这样,4个基点、4个隅点、8个三字点和16个偏点共计32个方向点,叫做32个罗经点。但罗经点也可以被认为是两个相邻的罗经点方向之间的角度,因此:

$$1 \text{ 点} = 11^\circ.25, \text{ 则} \quad 4 \text{ 点} = 45^\circ$$

罗经点在过去曾经被广泛地运用在航海上,但目前仅用它来表示风、流等的大概方向。

三种方向划分系统之间的换算方法如下:

1. 半圆法换算成圆周法的法则

在北东(NE)半圆,圆周度数等于半圆度数

在南东(SE)半圆,圆周度数等于 180° 减半圆度数

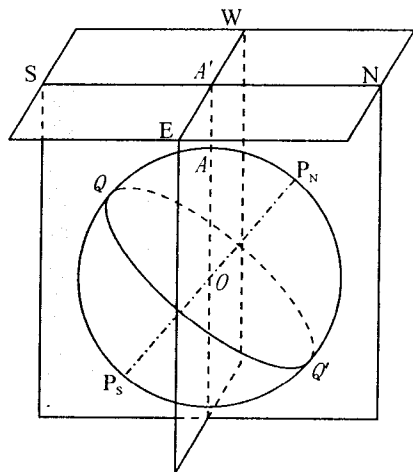


图 1-1-6 方向的确定

将等分北东南西4个方向基点之间地面真地平平面上的方向,叫做隅点,即东北(NE)、东南(SE)、西南(SW)和西北(NW)4个方向;又把等分基点和隅点之间地面真地平平面上的方向,叫做三字点。其名称是由基点名称之后加上隅点名称来组成,即北北东(NNE)、东北东(ENE)、东南东(ESE)、南南东(SSE)、南南西(SSW)、西南西(WSW)、西北西(WNW)和北北西(NNW)8个三字点;再把等分基点或隅点与三字点之间的地面真地平平面上的方向,叫做偏点。其名称是在基点或隅点名称之后加上偏向的方向来组成,如北偏东(N/E)、北东偏北(NE/N)、西南偏西(SW/W)等共16个偏点(图1-1-7)。

在南西(SW)半圆,圆周度数等于 180° 加半圆度数

在北西(NW)半圆,圆周度数等于 360° 减半圆度数

例 1-1-2: 将半圆法方向换算成圆周法方向。

解: 半圆法方向	圆周法方向
85°NE	85°
45°SE	$180^\circ - 45^\circ = 135^\circ$
75°SW	$180^\circ + 75^\circ = 255^\circ$
80°NW	$360^\circ - 80^\circ = 280^\circ$

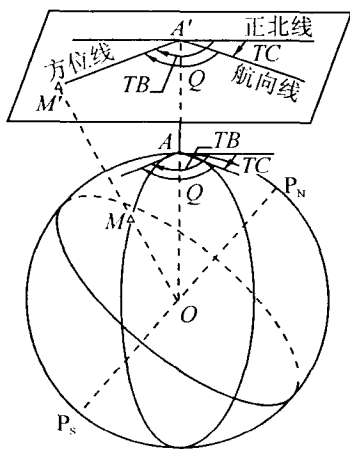


图 1-1-8 航向、方位和舷角

2. 罗经点法换算成圆周法的法则

1 点 = $11^\circ.25$ 。

例 1-1-3: 将方向点 SW/W 换算成圆周法度数。

解: 方向点 SW/W 在罗经点法中是第 21 个点, 因此将它换算成圆周法时, 则

$$\text{SW/W} = 11^\circ.25 \times 21 = 236^\circ.25$$

或者在隅点 SW 基础上加 1 个罗经点来求得:

$$\text{SW/W} = \text{SW} + 11^\circ.25 = 225^\circ + 11^\circ.25 = 236^\circ.25$$

二、航向、方位和舷角

航海上经常遇到的两种方向是船舶航行方向(航向, course)和物标方向(方位, bearing)。现将与此有关的几个定义解释如下(图 1-1-8)。

航向线(course line): 当船舶无横倾时, 通过船舶铅垂线的纵剖面, 是船首尾面; 它与测者地面真地平平面相交的直线, 叫做船首尾线(fore and aft line)。船首尾线向船首方向的延长线, 叫做航向线, 代号 CL。

真航向(true course): 船舶航行时, 在船上测者的地面真地平平面上, 从真北方向(true north, N_T), 即测者正北方向, 顺时针计算到航向线的角度, 叫做船舶的真航向, 代号 TC。它在地面上是测者子午圈平面到船首尾面之间的一个两面角。

船首向(heading, Hdg): 指在任何情况下, 船舶某一瞬间的船首方向, 代号 Hdg。

方位线(bearing line): 在地球表面上连接测者与物标的大圆 AM, 叫做物标的方位圈, 而物标方位圈平面与测者地面真地平平面相交的直线 $A'M'$, 叫做物标的方位线, 代号 BL。

真方位(true bearing): 在测者地面真地平平面上, 从正北方向线顺时针计算到物标方位线的角度, 叫做物标的真方位, 代号 TB。它在地面上是从测者子午圈平面到物标方位圈平面之间的两面角。

舷角(relative bearing): 在测者地面真地平平面上, 以航向线为基准, 从航向线到方位线之间的夹角, 叫做物标舷角或相对方位, 代号 Q。它是以前首方向为 0° , 按顺时针方向由 0° 到 360° 计量, 计算到物标方位线; 或以船首方向为 0° , 向右或向左由 0° 到 180° 计量, 计算到物标方位线, 它们分别叫做物标的右舷角 $Q_{\text{右}}$ 或左舷角 $Q_{\text{左}}$ 。在地面上, 舷角是船首尾面和地面相交的大圆与物标方位圈之间的球面角。