



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

航海类专业精品系列教材

# 航海学

郭禹 主编



大连海事大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
航海类专业精品系列教材

# 航 海 学

郭 禹 主编

大连海事大学出版社

© 郭 禹 2009

## 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,包括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等;第三篇为航路资料,介绍了潮汐与潮流、航标与《航标表》、航海图书资料、海图与航海图书资料的改正与管理;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、航行计划和航海日志。

本书编有附录,单独装订成册。

本书为高等学校教材,也可作为海船驾驶与管理人員及航海从业人員的技术参考书。

## 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, 2009. 12 (2011. 9 重印)

(航海类专业精品系列教材)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5632-2402-9

I. ①航… II. ①郭… III. ①航海学—高等学校—教材 IV. ①U675

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 001060 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

大连金华光彩色印刷有限公司印装 大连海事大学出版社发行

2009 年 12 月第 1 版 2011 年 9 月第 2 次印刷

幅面尺寸:185 mm × 260 mm 印张:38

字数:934 千 印数:3001 ~ 6000 册

责任编辑:史洪源 林晓阳 版式设计:海 韵

封面设计:王 艳 责任校对:高 炯

ISBN 978-7-5632-2402-9 定价:70.00 元(含附录)

## 前 言

海上运输是交通运输的重要组成部分,在促进外贸运输发展和推动对外贸易增长等方面以其他运输方式不可比拟的优势发挥出越来越重要的作用。

大连海事大学作为我国唯一的国家重点航海类专业院校,多年来为我国乃至国际海上运输业培养了大量的航海类专业高级人才,对促进航运业的发展起到了重要作用。近年来,随着科学技术的进步和交通运输业的发展,学校针对航海类专业的鲜明特色,在人才培养方案、教学内容及课程体系改革等方面进行了一系列的研究和实践。在此基础上,我校组织编写出一套与新的培养方案、教学内容及课程体系相适应的航海类专业精品系列教材,旨在加强航海类专业建设,提高航海类人才培养的质量和水平,进一步推动高等航海教育的发展。

为了保证航海类专业精品系列教材顺利出版,学校在人力、物力和财力等方面予以充分保证。组织校内航海类专业的资深专家、骨干教师和管理干部做了大量工作,从筹备、调研、编写、评审直至正式出版,历时三载有余。2005年5月,学校先后组织召开了两次航海类专业教学改革研讨会,来自交通运输部海事局、辽宁海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、中国船级社等单位的专家为教材编写的筹备工作提出了中肯的意见和建议。2006年初,教材编写工作正式启动,确定重新编写航海类专业教材22种,其中航海技术专业教材13种、轮机工程专业教材9种。教材编写大纲先后征求了中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司及大连海事大学等单位10多位专家的意见。学校组织教材主要编写人员分赴北京、天津、青岛、上海、广州、武汉及厦门的多家航运企事业单位进行调研,收集了大量的最新技术资料,同时听取了有关领导和专家的意见。2007年,我校先后召开了五次评审会,来自交通运输部海事局、驻英大使馆海事处、中国海事服务中心考试中心、辽宁海事局、山东海事局、中国远洋运输(集团)总公司、中国海运(集团)总公司、大连港引航站、上海海事大学、海军大连舰艇学院、大连水产学院、集美大学、青岛远洋船员学院及大连海事大学等单位的多位专家对22种教材的初稿就内容、文字及体例等方面逐一评审,反复推敲,几易其稿,逐步完善,反复审核,最终正式出版。该套教材中共有16种教材入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

这套航海类专业精品系列教材以履行修订后的STCW公约为前提,结合海上运输业发展的国际性和信息性等特点,以更新教学内容为重点,对原有教材做了大量的增删与修改,注重理论基础及内容阐述的逻辑性和准确性,力求反映国内外航海科技领域的新成就与新知识,适应21世纪海上运输业对航海类人才的知识、能力和素质结构的要求,兼顾各教材内容之间的衔接与整合,避免重复与遗漏。我衷心地希望,通过全体编写人员的不懈努力,这套精品系列教材,能够进一步加强我校航海类专业的建设,为国内兄弟院校航海类专业的发展提供有益的借鉴,为我国高等航海教育发展尽微薄之力。

教材在编写和出版过程中,得到了方方面面领导、专家和同仁(具体名单附后)的大力支持和热心帮助。我谨代表大连海事大学及教材编写全体成员对以上单位和个人致以最诚挚的谢意。各位专家和同仁渊博的专业知识、严谨的治学态度、精益求精的学术风范以及细致入微

的工作作风为教材的顺利出版作出了卓越的贡献,在很大程度上可以说,这套教材的成功出版,是全体编写人员,各港航企事业单位的领导、专家和同仁共同努力的成果。

航海类专业精品系列教材的编写是一项繁重而复杂的工作,鉴于时间和人力等方面的因素,这套教材在某些方面还不是十分完善,缺点和不妥之处在所难免,希望同行专家不吝指正。同时,希望以此为契机,吸引更多航海技术领域的专家、学者参与到这项工作中来,为我国航海教育献计献策,为我国乃至国际海上运输事业培养出大量高素质的航海类专业人才。

大连海事大学校长



2008年3月

对教材出版给予大力支持和帮助的单位及个人如下(以姓氏笔画为序):

于晓利	教授	大连水产学院
于智民	高级船长、高工	中远散货运输有限公司
马文华	高工	大连远洋运输公司
方伟江	轮机长	中海国际船舶管理有限公司上海分公司
王 阳	高工	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
王 健	高工、高级引航员	大连港引航站
王国荣	高级轮机长	中远散货运输有限公司
王征祥	船长	中远集装箱运输有限公司
王新全	高工、总轮机长	中国远洋运输(集团)总公司
车 毅	船长	大连远洋运输公司
叶依群	高级船长	中远散货运输有限公司
田喜林	高工	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
石爱国	教授	海军大连舰艇学院
任辰西	高级船长	中远散货运输有限公司
刘 屹	高工	大连远洋运输公司
刘世长	船长	日照海事局
孙 广	高工	辽宁海事局
安 彬	高级船长	大连远洋运输公司
邢 钺	高工	中远散货运输有限公司
吴 恒	教授、博导	大连海事大学
吴万千	副教授	青岛远洋船员学院
张仁平	教授	驻英大使馆海事处
张文浩	高工	中远散货运输有限公司
张均东	教授、博导	大连海事大学
张秋荣	教授	上海海事大学
李 录	高级轮机长	广州远洋船员管理公司

李志华	副教授	大连海事大学
李忠华	高工	珠海海事局
李恩洪	船长、高工	交通运输部海事局
李新江	副教授	大连海事大学
杜荣铭	教授	大连海事大学
杨君浩	轮机长	中海国际船舶管理有限公司上海分公司
沈毅	工程师	辽宁海事局
邱文昌	教授	上海海事大学
邱铁卫	高级轮机长	大连远洋运输公司
邵哲平	教授、船长	集美大学
邹文生	高级轮机长	大连远洋运输公司
陈志强	高级轮机长	中远集装箱运输有限公司
陈建锋	高工、高级船长	中远散货运输有限公司
周邱克	高工、高级船长	中海客轮有限公司
房世珍	大副	青岛远洋对外劳务合作有限公司
易金华	指导船长、高级船长	中海国际船舶管理有限公司广州分公司
林长川	教授	集美大学
金松	教授级高工	中国船级社大连分社
金义松	船长、高工	中海国际船舶管理有限公司
姚杰	教授	大连水产学院
姜勇	教授级高工	山东海事局
洪碧光	教授、船长	大连海事大学
赵金文	高工、轮机长	大连远洋运输公司
赵晓玲	副教授	青岛远洋船员学院
赵爱屯	高级船长	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
夏国忠	教授	大连海事大学
徐波	高工	中远集装箱运输有限公司
敖金山	高级船长	枫叶海运有限公司
殷传安	高级轮机长	中海国际船舶管理有限公司大连分公司
郭子瑞	教授	辽宁海事局
郭文生	高级船长	广州远洋船员管理公司
顾剑文	高工	大连国际船员培训中心
崔保东	船长	青岛远洋对外劳务合作有限公司
黄党和	轮机长	中国海事服务中心
蔡振雄	教授	集美大学
魏茂苏	轮机长	青岛远洋对外劳务合作有限公司

## 编者的话

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。21世纪的航海是全新的现代航海。

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。

本书编写人员编写的1999年3月出版的《航海学》,于2002年获全国优秀教材二等奖;2005年7月修订出版的《航海学》,于2007年获辽宁省精品教材奖。本书在这次重新编写过程中,根据航海科学技术的新成就,增加了电子航海的新知识与新技术,介绍了信息技术在航海上的应用的新功能;在表述上注重理论与实践的结合,力求培养学生对不断发展的航海科学技术的适应能力;在内容编排上基本保持原《航海学》的体系;在天文定位中,仅介绍利用太阳和恒星定位,并新增加电子航海天文历及计算机天文定位等有关内容。

本书所用的附表作为附录单独装订成册。

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、二、三、四、五、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、四、七节),刘德新(第一篇第二章第六、七节,第四篇第二、三、四章),王凤武(第四篇第五、六章)。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、张吉平绘制。

欢迎使用本书的广大读者批评、指正。

编者

2009年10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 .....	(9)
第三节 能见地平距离和物标能见距离 .....	(18)
第四节 航速与航程 .....	(23)
第二章 海 图 .....	(28)
第一节 地图投影 .....	(28)
第二节 恒向线 .....	(32)
第三节 墨卡托投影海图 .....	(34)
第四节 港泊图与大圆海图的投影方法 .....	(39)
第五节 海图的绘制与出版 .....	(41)
第六节 识 图 .....	(45)
第七节 海图的分类和使用注意事项 .....	(55)
第八节 电子海图 .....	(58)

## 第二篇 船舶定位

第一章 航迹推算 .....	(65)
第一节 航迹绘算 .....	(65)
第二节 风流压差的测算方法 .....	(71)
第三节 航迹计算 .....	(73)
第二章 陆标定位 .....	(80)
第一节 位置线与船位线 .....	(80)
第二节 陆标的识别与方位、距离的测定 .....	(84)
第三节 方位定位 .....	(87)
第四节 距离定位 .....	(93)
第五节 方位距离定位 .....	(94)
第六节 移线定位 .....	(95)
第三章 电子定位 .....	(101)
第一节 电子定位导航系统的发展 .....	(101)
第二节 GPS 定位 .....	(105)



第四章 天文定位 .....	(123)
第一节 天球坐标 .....	(124)
第二节 天体视运动 .....	(138)
第三节 时间与天体位置 .....	(146)
第四节 求天体真高度 .....	(167)
第五节 天文船位线 .....	(177)
第六节 观测天体定位 .....	(187)
第七节 天文航海发展趋势 .....	(201)
第五章 罗经差的测定 .....	(205)
第一节 利用陆标测定罗经差 .....	(205)
第二节 观测天体求罗经差 .....	(208)
第三节 航海上计算罗经差的实用方法 .....	(215)

### 第三篇 航路资料

第一章 潮汐与潮流 .....	(217)
第一节 潮汐的基本成因和潮汐术语 .....	(217)
第二节 中版《潮汐表》与潮汐推算 .....	(225)
第三节 英版《潮汐表》与潮汐推算 .....	(234)
第四节 潮流推算 .....	(244)
第二章 航标与《航标表》 .....	(249)
第一节 航标的分类 .....	(249)
第二节 国际海区水上助航标志制度 .....	(253)
第三节 中国水上助航标志 .....	(260)
第四节 中国沿海《航标表》及英版《灯标和雾号表》 .....	(264)
第三章 航海图书资料 .....	(272)
第一节 《世界大洋航路》、航路设计图与航路设计指南图 .....	(272)
第二节 《航路指南》和《进港指南》 .....	(277)
第三节 英版《无线电信号表》 .....	(283)
第四节 里程表 .....	(290)
第五节 航海图书目录 .....	(292)
第六节 《航海员手册》 .....	(297)
第七节 航海通告 .....	(299)
第四章 海图与航海图书资料的改正与管理 .....	(307)
第一节 海图的改正与管理 .....	(307)
第二节 航海图书的改正与管理 .....	(314)

## 第四篇 航线与航行方法

第一章 大洋航行与最佳航线 .....	(317)
第一节 大圆航线与混合航线 .....	(317)
第二节 大洋航线的选择与航行注意事项 .....	(323)
第二章 沿岸航行 .....	(334)
第一节 沿岸航行的特点与航线的选择 .....	(334)
第二节 沿岸航行的注意事项 .....	(336)
第三章 狭水道及运河航行 .....	(340)
第一节 狭水道航行 .....	(340)
第二节 运河航行 .....	(355)
第四章 特殊条件下的航行 .....	(367)
第一节 雾中航行 .....	(367)
第二节 冰区航行 .....	(371)
第三节 极区航行 .....	(374)
第五章 船舶交通管理与船舶报告系统 .....	(377)
第一节 船舶交通管理 .....	(377)
第二节 船舶定线 .....	(382)
第三节 船舶报告系统 .....	(386)
第六章 航行计划和航海日志 .....	(393)
第一节 航行计划 .....	(393)
第二节 航海日志 .....	(401)
参考文献 .....	(407)

# 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,必须由一个数学描述的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。通过测量,发现约占地球表面71%的海水的平均海面高度具有长期不变的特性,因此,用地球表面平均海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,并且又具有长期的稳定性,因此,采用大地球体代替地球是合理可行的。

由于地球内部物质分布不均匀及地球表面形状的影响,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(如图 1-1-1 所示),它是由椭圆  $P_NQP_SQ'$  绕其短轴  $P_NP_S$  旋转而成的几何体。椭圆短轴  $P_NP_S$  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:

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

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

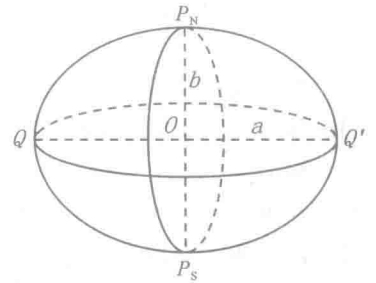


图 1-1-1 地球椭圆体

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 或推荐组织
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、法国等西欧国家
克拉索夫斯基 Красовский	1940	6 378 245.0	1: 298.3	俄罗斯、东欧国家、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

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

## 二、地理坐标

地理坐标 (geographic coordinate) 是建立在地球椭圆柱体表面上的。要建立地理坐标首先应在地球椭圆柱体表面上确定坐标的起算点和坐标线图网。如图 1-1-2 所示,  $O$  为地球椭圆柱体中心,  $P_N$  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, 它与地球椭圆柱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, 它与地球椭圆柱体表面相交的截痕是一个小圆, 称为纬度圈 (parallel of latitude)。

地球椭圆柱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) 为地球椭圆柱体子午线上该点的法线与赤道面的夹角, 用  $\varphi$  或  $Lat$  来表示。某点的地理纬度的计算方法是: 从赤道起算, 向北或向南, 从  $0^\circ \sim 90^\circ$  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  $34^\circ 21'. 0 S$ 。

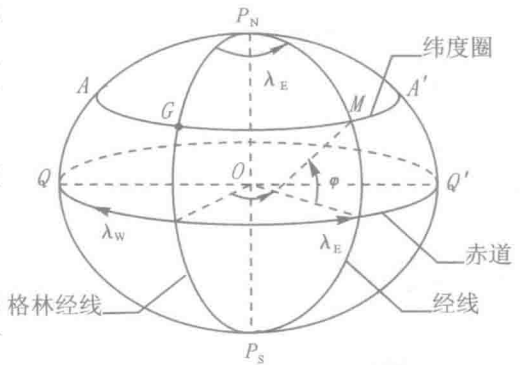


图 1-1-2 地理坐标

地面上某点的地理经度 (geographic longitude) 为地球椭圆柱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  $\lambda$  或  $Long$  来表示。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  $0^\circ \sim 180^\circ$  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  $\varphi_c$  (如图 1-1-3 所示) 是该点地球椭圆柱体的向径与赤道面的交角。地理纬度  $\varphi$  与地心纬度  $\varphi_c$  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

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

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

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

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

所以

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

取  $c = \frac{1}{298.3}$ , 则

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

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  $11'31''.5$ 。地心纬度改正量  $(\varphi - \varphi_e)$  如表 1-1-2 所示。

表 1-1-2 地心纬度改正量表

$\varphi$	$\varphi - \varphi_e$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi - \varphi_e$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi - \varphi_e$	$\varphi$
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

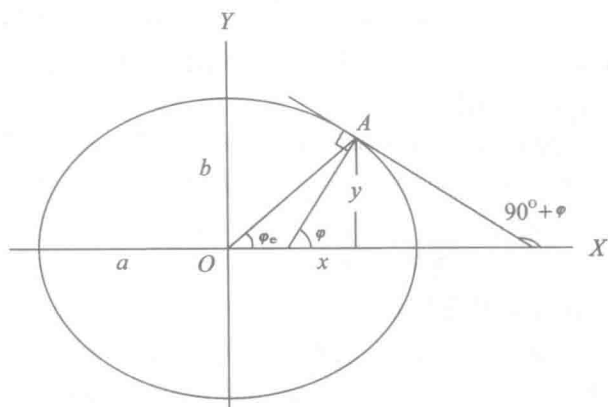


图 1-1-3 地心纬度

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:  $\varphi_1, \varphi_2$ ——起航点纬度和到达点纬度;

$\lambda_1, \lambda_2$ ——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  $180^\circ$ , 如果大于  $180^\circ$ , 应由  $360^\circ$  减去该绝对值, 并改变正负符号。

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。

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

### 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, 这一点在航海上必须注意。

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, 也会由于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  $100\text{ m}$ , 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	椭球体名称	椭球体参数
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 推荐椭球体	$a = 6\,378\,140\text{ m}$ $c = 1: 298.257$
1942 年坐标系	俄罗斯及 东欧国家	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	美国、加拿 大、墨西哥	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	英国、法国、 德国、荷国、 比利时、挪 威、土耳其	波茨坦	海福特 1910 年	$a = 6\,378\,388\text{ m}$ $c = 1: 297.00$
印度 卡兰普尔	印度、巴基斯 坦、孟加拉 国、缅甸	卡兰普尔	埃弗勒斯特 1830 年	$a = 6\,377\,276.345\text{ m}$ $c = 1: 300.8017$
NWL-8D	NNSS 卫星导 航系统 (美 国)	地心	NNSS	$a = 6\,378\,145\text{ m}$ $c = 1: 298.25$
WGS-72	美国军用卫 导系统、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 (美国)	地心	世界测地系-84	$a = 6\,378\,137\text{ m}$ $c = 1: 298.257\,223\,563$

大地坐标系分成两类:相对大地坐标系与绝对大地坐标系。

相对大地坐标系的原点在地球表面  $O$  点  $(\varphi_0, \lambda_0)$ , 其余物标的坐标  $(\varphi, \lambda)$  是通过相对的弧度测量来确定的, 如图 1-1-4 所示。

坐标系原点  $O$  为  $(\varphi_0, \lambda_0)$ , 为求物标  $A$  点坐标  $(\varphi, \lambda)$ , 可通过弧度测量, 求得东西向弧长  $l_\lambda$  与南北向弧长  $l_\varphi$ 。根据  $\varphi_0$ , 椭球体参数可求得相应纬度圈半径  $r_1$ , 则  $\Delta\lambda$  (rad) =  $\frac{l_\lambda}{r_1}$ 。根据  $\varphi_0$ , 椭球体参数及  $l_\varphi$ , 就可在椭圆子午线上求得  $\Delta\varphi$ 。  $A$  点坐标为  $\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi, \lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 。

NWL-8D, NGS-72 及 WGS-84 是绝对大地坐标系。以目前应用最广泛的 WGS-84 坐标系为例, 该系统是利用测时与三维测距来导航的卫星系统, 其坐标系原点在地心, 空间各物标的坐标是通过三维坐标  $(X, Y, Z)$  测量来确定的, 地球表面各物标的位置的经纬度是通过该



物标的三维坐标与定点定向的椭圆体之间的坐标转换来求得的,如图 1-1-5 所示。

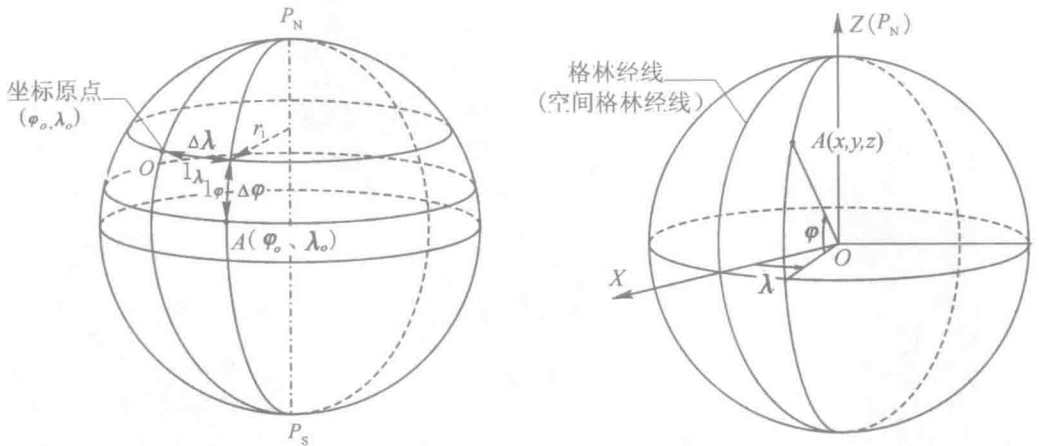


图 1-1-4 相对大地坐标系物标经纬度的确定示意图 图 1-1-5 绝对大地坐标系物标经纬度的确定示意图

根据物标 A 的三维坐标  $(X, Y, Z)$ , 求得物标所处经线, 就可以求得在赤道上与格林尼治零度经线的夹角  $\lambda$ , 在相应的椭圆经线求 A 点的纬度  $\varphi$ 。

由于绝对大地坐标系的三维坐标测量的精度高是构建数字地球的基础, 因此绝对大地坐标系是大地坐标系发展的方向。

在 NWL-8D 大地坐标系中, 大地水准面与地球椭圆体表面之间的高度差为  $+79 \sim -99$  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》(如图 1-1-6 所示)。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 1-1-6 可知, 在  $30^\circ\text{N}, 155^\circ\text{E}$  处, 大地水准面比地球椭圆体表面高 20 m (标注 20); 在  $30^\circ\text{N}, 180^\circ\text{E}$  处, 大地水准面比地球椭圆体表面低 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体表面的关系如图 1-1-7 所示。

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

$$\begin{aligned} \text{船舶接收机天线的高度} &= \text{船舶接收机天线距海面的高度} + \\ &\quad \text{大地水准面与地球椭圆体表面的高度差} \end{aligned}$$

在 WGS-84 大地坐标系中, 大地水准面与地球椭圆体表面的高度差与图 1-1-6 所示值相差不到 10 m。

#### 四、不同大地坐标系间的坐标变换

在一些高精度的航海中, 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  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$  量后, 可以用下式计算坐标改正值:

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

式中:  $\varphi, \lambda$  为原坐标系的纬度和经度;