

教育部特色专业自动化类示范教材

“十一五”重点规划教材
高等学校自动化系列教材



导航定位系统工程

袁赣南 周卫东 刘利强 王 伟 / 主编 郝燕玲 / 主审



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

导航定位系统工程

主编 袁赣南 周卫东 刘利强 王 伟
主审 郝燕玲

哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书主要叙述舰船导航定位的原理、方法及相关系统。内容共八章,包括舰船导航基础知识、推算航行定位、地文和天文导航定位、无线电导航、卫星导航定位、电子海图、组合导航和特殊导航系统。

本书可作为导航、制导与控制专业的高年级大学生和研究生的教材,并可供相近专业的学生、教师和科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

导航定位系统工程/袁赣南主编. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2008

ISBN 978-7-81133-318-3

I. 导… II. 袁… III. 全球定位系统(GPS)
IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 148020 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省教育厅印刷厂
开 本 787mm×1 092mm 1/16
印 张 17.5
字 数 427 千字
版 次 2009 年 2 月第 1 版
印 次 2009 年 2 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: beupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着导航技术的深入发展,为了适应教学需求,编者根据多年的教学和科研工作经验,编写了《导航定位系统工程》一书。本书是哈尔滨工程大学“十五”期间的重点规划教材,可供高等院校导航、制导与控制或相近专业的本科生、研究生选用,也可以作为教师和工程技术人员的参考书。

全书共分为8章,其中第1章介绍舰船导航基础知识,主要叙述地球的形状、坐标系及其转换和海图;第2章介绍推算航行系统,包括风流中的计算航法、流速流向的测量及估算;第3章介绍地文和天文导航定位系统,包括自行研制的组合导航系统中的地文和天文定位系统的组成及功能、射电天文导航的原理;第4章介绍无线电导航系统,内容有基础知识、雷达导航及避碰、AIS自动识别系统、脉冲-相位双曲线导航系统;第5章介绍卫星导航系统,主要介绍了全球卫星导航系统及其应用;第6章介绍电子海图系统、海图数据结构及其模型等;第7章介绍组合导航系统,重点叙述了组合导航系统中的数据处理方法,介绍了IBS综合船桥系统;第8章介绍特殊导航系统,包括地形匹配、水声导航和气象导航。

本书内容丰富、知识面广,编写时侧重舰船导航的基本原理及方法,并在编写内容中加入了编者科研中的部分研究成果。

本书的第1章和第2章由周卫东编写、第3章和第8章由袁赣南编写、第4章和第5章由王伟编写、第6章和第7章由刘利强编写。

本书由哈尔滨工程大学郝燕玲教授主审。编写中吴简彤教授对本书稿提出了许多宝贵的意见和建议,并得到了自动化学院407教研室的大力支持。本书编写中还引用了参考文献中的相关内容,在此一并表示衷心感谢!

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中一定存在不少缺点和错误,希望广大读者和师生给予批评指正。

编 者

目 录

第1章 舰船导航基础知识	1
1.1 地球的形状与地理坐标	1
1.2 坐标系统	11
1.3 海图	26
第2章 推算航行系统	37
2.1 不计风流的计算航法	37
2.2 风流中航行的舰位推算	40
2.3 流速与流向的测量及估算	46
第3章 地文和天文导航定位系统	52
3.1 地文定位	52
3.2 天文定位	67
第4章 无线电导航系统	86
4.1 概述	86
4.2 雷达导航及避碰	97
4.3 AIS 船舶自动识别系统	109
4.4 脉冲-相位双曲线导航系统	121
第5章 全球卫星导航定位系统	139
5.1 卫星定位系统概述	139
5.2 GPS 卫星导航系统基础知识	144
5.3 GPS 系统及信号	147
5.4 GPS 卫星定位原理	161
5.5 GPS 测量的误差分析	176
5.6 GPS 的应用	184
第6章 电子海图系统	190
6.1 电子海图系统概述	190
6.2 空间数据结构	195
6.3 电子海图的数据模型	200
6.4 电子海图显示与信息系统的主要功能实现	214
第7章 组合导航系统	226
7.1 组合导航系统概述	226
7.2 组合导航系统数据处理方法	231
7.3 组合导航系统的常用组合模式	244
7.4 综合船桥系统	249

第 8 章 特殊导航系统	256
8.1 地形匹配导航系统	256
8.2 水声导航系统	264
8.3 气象导航系统	270
参考文献	273

第1章 舰船导航基础知识

导航是一个技术门类的总称,导航学科是研究物体的位置、运动方向、速度以及运动物体姿态的一门科学。导航最基本的作用是连续测量运载体(导弹、火箭、飞机、舰船等)的位置、速度、加速度、航向和姿态等参数,并引导运载体沿着所选定的路线安全、准时地到达目的地。导航随着人类政治、经济和军事活动的产生而产生,并随其发展而不断从初级向高级发展。

航海离不开对地球的认识,地球是人类生存活动的舞台。地球上各种物体的运动都是相对于地球的运动,为了研究舰船在海上航行的方向、速度、距离及位置等导航定位问题,首先要了解地球的形状和地理坐标。

1.1 地球的形状与地理坐标

1.1.1 地球的形状和大小

1. 地球的形状

地球自然表面有陆地、海洋、高山、峡谷,是一个高低起伏不平、极不规则、非常复杂的曲面,不能用简单的数学关系来描述。相对陆地,海面的形状比较规则,为了科学研究的方便,可以采用某种近似的数学表面来代替地球不规则表面。

(1) 大地水准面

水准面即水平面。地球上某点的水准面是通过该点且垂直于该点铅垂线的平面。液体静止表面就是水准面。由于潮汐、洋流和风浪等影响,海面也有高低变化,其平均高度称为平均海面。

假设海洋高度为平均海面,并将平均海面延伸到陆地内部,且在延伸中一直保持与当地的铅垂线相垂直,由此而形成的一个连续、光滑的假想闭合曲面称为大地水准面。

(2) 大地球体

将平静的海面延伸到地球的全部表面,即由大地水准面包围的几何体,称为大地球体。

(3) 地球圆球体

由于地球椭圆体的长、短半轴相差很小,约 21 km,扁率为 1/298 左右,因此可以将大地球体当作圆球体。1964 年国际天文学学会通过的圆球体的平均半径 R 为 $6\,371.02 \pm 0.05$ km。将地球形状视为半径为 R 的一个圆球体,作为航海应用的第一近似体,如图 1-1 所示。

在图 1-1 中, O 点为地球中心。 $P_N P_S$ 为地球自转轴,称为地轴。地轴与地球表面相交的两点称为地极。其中,

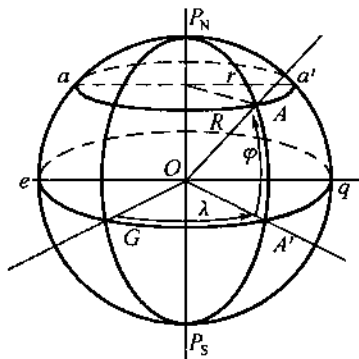


图 1-1 地球圆球体示意图

P_N 称为地理北极, P_S 称为地理南极。在地球北极上空俯视地球, 地球以逆时针方向作自转。

通过地心的平面与地球表面相截的交线, 称为大圆。大圆把地球分为相等的两半。通过南北极的大圆称为子午圈。两极之间半个子午圈称为经线, 也叫子午线。通过英国格林尼治天文台的经线, 规定为基准经线。与地轴垂直的大圆是赤道。赤道把地球分为上下两个半球, 含北极的上半球, 称为北半球; 含南极的下半球, 称为南半球。与赤道平行的平面与地球表面的交线, 称为纬度圈。地轴与纬度圈的距离, 称为纬度圈半径。按照子午圈与纬度圈的定义, 子午圈平面是一系列通过地轴的平面族, 纬度圈平面是与地轴垂直的一系列互相平行的平面族。用圆球体来近似大地球体, 误差较大, 在要求比较高的导航计算中, 不能满足要求, 需要采用第二近似, 即用椭球体来近似大地球体。

(4) 地球椭球体

测量结果表明, 大地水准面非常接近于一个扁率很小的旋转椭圆体面, 在测量和制图工作中采用椭圆形的子午圈, 绕其短轴 $P_N P_S$ 旋转形成的旋转椭球体——地球椭球体, 用来近似代替不规则的大地球体。其形状和大小, 可用椭圆主要参数来表示: 长半轴 a (赤道半径), 短半轴 b , 第一偏心率 e 和第二偏心率 e' , 扁率 f 。它们之间的关系是

$$f = (a - b) / a$$

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

$$e' = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}}$$

这些参数, 由于推求它的方法、时间和测定的地区不同, 其数值并不一致。我国目前采用的地球椭球体的参数值为

$$a = 6\,378\,137 \text{ m}$$

$$b = 6\,356\,752 \text{ m}$$

$$f = 1/298.257$$

2. 地球的大小

由于地球形状的不规则性, 不同国家在不同的历史时期对地球椭球体进行过多次测量, 导致出现了各种不同的椭球体, 所以在应用时应该根据各个国家或地区的具体情况选择合适的地球椭球体。北美常用克拉克椭球体, 而我国从 1953 年起采用克拉索夫斯基椭球体。表 1-1 列出了世界各国常用的各种椭球体及其主要参数。

表 1-1 地球椭球体主要参数表

椭球体名称	年份	长半径 a/m	扁率 $1/a$	主要使用国家及说明
白塞尔	1841	6 378 397	299.15	德国、瑞士、日本
克拉克	1866	6 378 206	294.98	加拿大、美国、墨西哥
海福特	1910	6 378 388	297.00	英、法等西欧国家
克拉索夫斯基	1940	6 378 245	298.30	前苏联、东欧、中国
IUGG 推荐值	1967	6 378 160	298.25	14 届 IUGG 推荐
IUGG 推荐值	1975	6 378 135	298.26	16 届 IUGG 推荐
WGS-84	1984	6 378 137	298.26	美国 GPS 卫星导航系统

3. 地球椭球体定位

不同地区的国家,选用不同椭球体,反映它与大地球体的相对位置关系,以适应不同地区的需要。为了获得测量计算的基准面和起算数据,按一定条件,将选定的地球椭球体与大地球体的相对位置确定下来,称为地球椭球体定位。经过选定并定位的椭球体称为参考椭球体。地球椭球体定位分相对定位和绝对定位两种。

地球椭球体的相对定位:①椭球体短轴与地轴相平行,相应地,椭球体赤道面与大地球体赤道亦相平行;②椭球体上基准子午面与大地球体上基准子午面相平行;③椭球体面与本测区范围内的大地水准面充分接近。如图 1-2 所示, OqP_N 为大地球体的一部分,由图可知,以 O' 为中心的椭球体(II)与大地球体表面不能充分接近,不满足相对定位的要求;以 O' 为中心的椭球体(I),符合相对定位的三项要求,故椭球体(I)的表面是该地区大地测量的基准面。

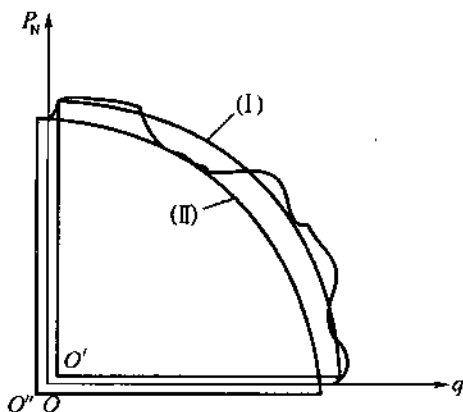


图 1-2 地球椭球体相对定位示意图

世界各国或地区,根据各自局部的特点,选定椭球体参数,并确定它与大地球体的相关位置,建立起各自独立的表示地面点位置的大地坐标系。如我国 1954 年建立的北京坐标系,以北京市某个经过精确测量的点作为定位点(即测量原点)。美国采用 1866 年克拉克椭球参数建立了 1927 年北美坐标系。日本 1918 年建立了东京坐标系。

相对定位的坐标系,在一定的测量范围内与该地区的大地球体能较好吻合,但离定位点越远,坐标误差就越大,因此,它只限于局部地区使用。

随着航行科学技术的发展,相对定位难以满足全球高精度航行定位的需要和现代化战争对运载武器高精度定位的要求,故还应进行绝对定位。

地球椭球体的绝对定位:①椭球体中心与地球质心重合;②椭球短轴与地轴重合;③基准大地子午面与基准天文子午面重合;④椭球体面与整个大地水准面充分接近。

用绝对定位建立的坐标系称为地心坐标系。能满足上述条件的椭球体称为总椭球体。总椭球体与某一局部的大地球体比较,不一定是最好吻合的,但就地球总体而言,它的主要参数能最恰当地表达地球的形状和大小。

总椭球体主要参数的精度对发射人造地球卫星、洲际弹道导弹的精度有相当大的影响。美国国防部于 1975 年 12 月确定以 WGS-72(世界大地系,即 $a = 6\,378\,135\text{ m}$)的地心坐标系作为美军统一的全球通用坐标系。美国子午仪卫星导航系统,也使用了自己的地心坐标系。我国也建立了自己的地心坐标系。

4. 地球椭球体的高度差

地球椭球体定位后,大地水准面与地球椭球体表面之间,仍存在着由于地球重力场分布不均匀而引起的高度差。1975 年美国的约翰·霍普金斯大学发布了表示地球形状与参考椭球体形状偏差的大地水准面图,即“大地水准面等高线图”。图中用数字表示了大地水准面高出或低于 NWL-80 椭球体面的值。在水准面上可以看出,在斯里兰卡附近的印度洋面,大地水准面比地球椭球体面低 99 m,标志为 -99;在澳大利亚东北的太平洋面则比地球椭

球体面高出79 m,标志为+79。在高精度的导航定位计算中,必须考虑高度差的修正,如在卫星导航定位计算中为保证计算精度,就必须修正卫星接收天线的高度。

在目前的各种导航定位计算中,采用第二近似,即用旋转椭球体来近似大地球体,已经足够精确了。

实际的大地球体还要复杂得多,在与赤道相平行的各个地球截面内,即所有纬圈,都不是一个圆形,而都是一个椭圆。考虑子午圈、纬圈都是椭圆的情况,这是第三近似。通过人造地球卫星的测量,还发现地球的北极要高出参考椭球一定值,在南极要凹进去一定值,实际地球的形状像一个不规则的扁平的梨形体。

1.1.2 地理坐标

地理坐标(Geographic Coordinate)是建立在地球椭圆体表面上的。地球椭圆体表面任意一点的位置可以用地理坐标,即地理经度和地理纬度来确定。海上航行船舶的位置和物标的位置都是用地理坐标来表示的。

1. 经度、纬度

(1) 经度

通过A点的经线与基准经线在赤道上所夹的劣弧长即为A点的经度,图1-1中GA'称为经度,用符号 λ 表示。经度也可用经过A点的子午面与基准子午面之间的两面角,或用赤道上劣弧GA'所对的圆心角 $\angle GOA'$ 来量度。以基准经线为 0° ,A点所在经线在基准经线之东称为东经,A点所在经线在基准经线之西,称为西经,东西经各从 0° 计至 180° ,东、西分别用E,W表示。计算时,东经为“+”,西经为“-”。单位用度、分、秒(°,'")表示。

(2) 纬度

当把地球近似为半径等于R的圆球体时,纬度的定义是地球表面上一点A所在的纬圈与赤道在经线上所夹的弧长即为A点的纬度,图1-1中AA'称为纬度,用符号 φ 表示。纬度也可用地心与A点的连线OA与赤道平面的夹角 $\angle AOA'$ 来量度。A点在北半球,所处纬度称北纬,在南半球则称南纬,南、北分别用S,N表示。计算时,北纬为“+”,南纬为“-”。

例如,哈尔滨某地的位置用地理坐标表示为: $\varphi = 45^\circ 46' 48'' \text{N}$, $\lambda = 126^\circ 39' 36'' \text{E}$ 。

当把地球近似为长半轴为a,短半轴为b的旋转椭球体时,地球表面某点的纬度是该点垂线方向与赤道平面之间的夹角。因为地球是一个不规则的球体,垂线可以有如下不同的定义。

地心垂线—地球表面一点与地心的连线。

引力垂线—地球引力的方向。

测地垂线—地球椭球体表面一点的法线方向。

重力垂线—重力的方向,也称天文垂线。

对应于上述不同的垂线,就有如下不同的纬度定义:

地心纬度—地心垂线与赤道平面之间的夹角,如图1-3(a)中的角 ψ 。在研究一般导航问题时,就是采用地心纬度的概念。实际上是把地球看作一个圆球体。

引力纬度—引力垂线与地球赤道平面之间的夹角,一般不采用。

测地纬度—地球椭球体法线方向与赤道平面之间的夹角,如图1-3(a)中的角 φ 。它是通过大地测量定出的纬度,也称大地纬度,习惯上称地理纬度。目前,大地测量及精确导航中均采用此概念。

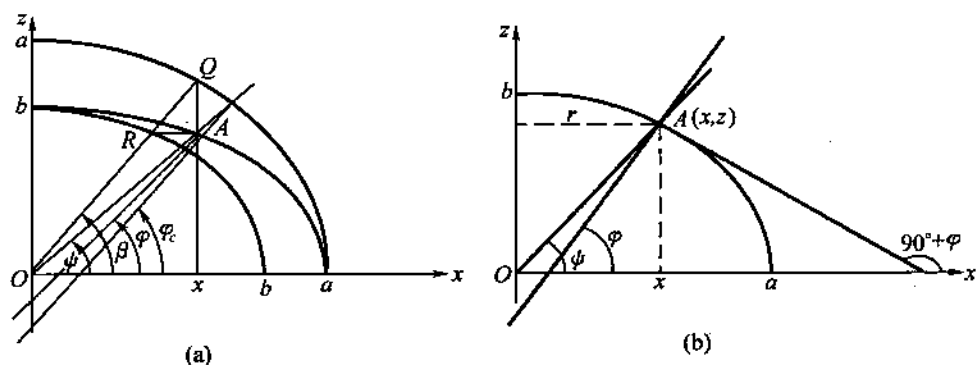


图 1-3 各种纬度、地心纬度与地理纬度的关系

天文纬度—重力垂线与赤道平面之间的夹角,如图 1-3(a)中的 φ_c 角。它是通过天文方法测定的纬度。由于地球椭球体表面和大地水准面也不完全相符,因此,天文纬度与测地纬度也不一致,但二者的偏差很小,通常可以忽略。

在地球椭球体上,除了在赤道和两个极点上,其法线通过椭球中心外,其他位置上法线都不通过地球中心,因而地心纬度 ψ 和地理纬度 φ 都不相等。

以下推导地心纬度与地理纬度之间的关系。

如图 1-3(b)所示,设在地球椭球体表面上有一点 A,过 A 点的椭圆子午圈中心为 O, A 点的直角坐标为 (x, z) 。椭圆方程为

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1 \quad (1-1)$$

对 x 求导得

$$\frac{2x}{a^2} + \frac{2z}{b^2} \cdot \frac{dz}{dx} = 0$$

因为

$$\frac{dz}{dx} = \tan(90^\circ + \varphi) = -\cot \varphi \quad (1-2)$$

所以

$$\cot \varphi = \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cdot \frac{x}{z} \quad (1-3)$$

又因为

$$\frac{x}{z} = \cot \psi$$

所以

$$\cot \varphi = \left(\frac{b}{a} \right)^2 \cot \psi = (1 - e^2) \cot \psi$$

$$\cot \psi = (1 - e^2) \tan \varphi$$

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

$$\tan(\varphi - \psi) = \frac{\tan \varphi - \tan \psi}{1 + \tan \varphi \cdot \tan \psi} = \frac{e^2 \tan \varphi}{1 + \tan \varphi \cdot \tan \psi}$$

因为 φ 与 ψ 相差很小,所以 $\tan(\varphi - \psi) \approx \varphi - \psi$, 则得

$$\varphi - \psi = e^2 \cdot \frac{\tan \varphi}{1 + \tan \varphi \cdot \tan \psi} = e^2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi$$

$$\varphi - \psi = \frac{1}{2} e^2 \sin 2\varphi \quad (1-4)$$

若 $(\varphi - \psi)$ 以秒为单位,将克拉索夫斯基椭球体参数 $e^2 = 0.006\,693\,421$ 代入,得

$$\varphi - \psi = \frac{1}{2} 690.3'' \times \sin 2\varphi$$

式(1-4)反映了地心纬度与地理纬度的关系。当 A 点纬度为 0° 或 90° 时,地心纬度与地理纬度相等,当 $\varphi = 45^\circ$ 时,两者相差最大,其差值约为 $11.5'$ 。

在导航系统的位置解算中,为了数学计算上的方便,还引入归化纬度 β 的概念,如图1-3(a)中角 β 。在图中过 A 点,作平行于短半轴 b 的直线,交半径等于长半轴 a 的圆于 Q , QO 连线与赤道面的夹角称为归化纬度。

2. 经度差、纬度差

当载体从某一点航行到另一点,则它的地理坐标 (φ, λ) 就发生变化,其改变的大小和方向可用经差和纬差来表示,如图1-4所示。载体从 A 点 (φ_1, λ_1) 航行到 B 点 (φ_2, λ_2) ,其纬差和经差如下。

$$\text{纬差:} \quad \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (1-5)$$

如果 $\Delta\varphi > 0$,为向北纬差,即载体由南向北航行;
如果 $\Delta\varphi < 0$,则为向南纬差,表示载体由北向南航行;
当 $\Delta\varphi = 0$ 时,载体沿纬圈作等纬度航行。

$$\text{经差:} \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 \quad (1-6)$$

如 $\Delta\lambda > 0$,为向东经差,即载体由西向东航行;
 $\Delta\lambda < 0$,为向西经差,即载体由东向西航行;
 $\Delta\lambda = 0$ 时,为载体沿子午线作南北向航行。但要注意,当载体穿越 180° 经线航行时,容易出现计算差错,例如由 $\lambda_1 = 160^\circ\text{E}$ 向东航行到 $\lambda_2 = 140^\circ\text{W}$,根据式(1-6)计算

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = -140^\circ - 160^\circ = -300^\circ$$

实际载体向东航行,经度变化为 60° 。

在实际航行计算时,为防止出现上述差错,可以根据载体穿越 180° 经线的情况,按 360° 进行计算。则上例为

$$\Delta\lambda = (\lambda_2 - \lambda_1) + 360^\circ = 60^\circ$$

对于慢速航行的船舶类载体,计算一次经差一般不会出现 $|\Delta\lambda| > 180^\circ$ 的情况,因此可以不加人工判别的方式,由下述计算公式自动处理,即

$$\Delta\lambda = \begin{cases} (\lambda_2 - \lambda_1) & |\Delta\lambda| \leq 180^\circ \\ (\lambda_2 - \lambda_1) \pm 360^\circ & |\Delta\lambda| > 180^\circ \end{cases} \quad (1-7)$$

1.1.3 地球的主曲率半径

把地球球体近似为旋转椭球体,长半轴是 a ,短半轴是 b ,则子午圈是一个扁平的椭圆,且子午圈上各点的曲率都不相同。如图1-5所示,在极点处,曲率最小,在赤道处曲率最大。子午圈上各点的弯曲程度用子午圈曲率半径 R_M 来表示。

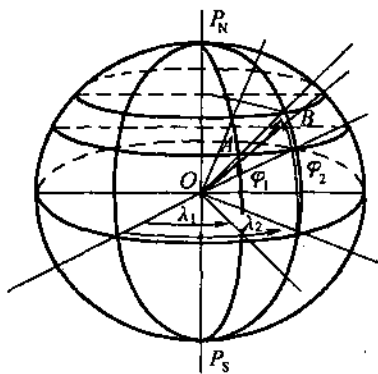


图1-4 经差纬差计算示意图

图 1-5 中,包含地球表面点 A 的法线且与该点子午面垂直的平面,与地球椭球体表面的交线,也是一个椭圆,这个椭圆称为该点的卯酉圈,卯酉圈的曲率半径用 R_N 表示。显然地球表面某点 A 的子午圈曲率半径和卯酉圈曲率半径是不相等的。当 $\varphi = 0^\circ$ 时,卯酉圈即为赤道,这时的 R_N 即为长半轴 a ,而子午圈曲率半径 R_M 最小。只有当 $\varphi = 90^\circ$ 时,卯酉圈就是子午圈,这时 A 点在极点, R_N 与 R_M 才相等,曲率半径最大。

地球上某点的子午圈曲率半径 R_M 与卯酉圈曲率半径 R_N 总称为该点的主曲率半径。

1. 纬度圈半径 r

子午圈绕地球短轴旋转而成旋转椭球体,因此赤道和纬度圈均为圆。赤道的半径即地球椭球体的长半轴 a 。那么如何来求纬度圈的半径 r 呢? 由图 1-3 可知,纬度圈半径 r 即是点 A 的横坐标。由式(1-3)可知

$$z = \left(\frac{b}{a}\right)^2 \tan \varphi \cdot x \quad (1-8)$$

代入椭圆方程式(1-1),得

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{b^2}{a^4} \tan^2 \varphi \cdot x^2 = 1$$

整理得

$$\begin{aligned} x^2 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 \tan^2 \varphi \cdot x^2 &= a^2 \\ x^2 (1 - e^2 \sin^2 \varphi) &= a^2 \cdot \cos^2 \varphi \end{aligned}$$

所以

$$r = x = \frac{a \cdot \cos \varphi}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (1-9)$$

2. 子午圈曲率半径 R_M

如图 1-6 所示,地球表面点 A 的纬度为 φ ,该点处的子午圈曲率半径为 R_M 。在子午圈上点 A 附近取弧微分 ds ,则

$$ds = R_M \cdot d\varphi$$

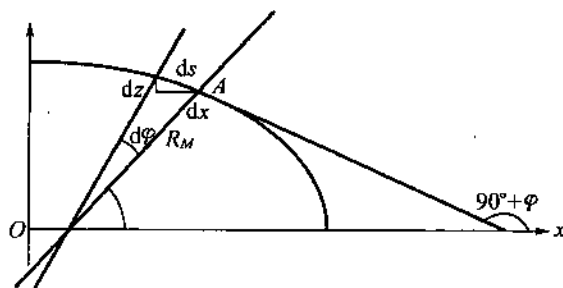


图 1-6 子午圈曲率半径 R_M 与子午圈弧长

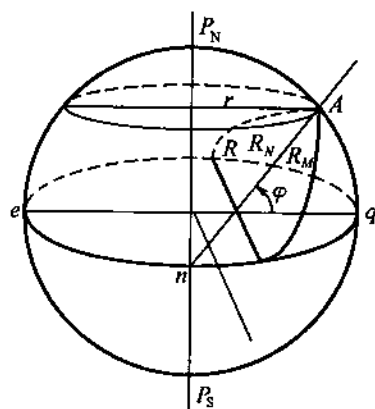


图 1-5 地球主曲率半径

式中 $d\varphi$ ——纬度的微分。

因为

$$ds = [(dx)^2 + (dz)^2]^{1/2} = (dx) \left[1 + \left(\frac{dz}{dx} \right)^2 \right]^{1/2}$$

由式(1-2)知

$$\frac{dz}{dx} = -\cot\varphi$$

代入得

$$ds = dx \cdot (1 + \cot^2 \varphi)^{1/2} = \csc \varphi \cdot dx$$

所以

$$R_M \cdot d\varphi = \csc \varphi \cdot dx$$

$$R_M = \csc \varphi \cdot \frac{dx}{d\varphi} \quad (1-10)$$

式中 $\frac{dx}{d\varphi}$ ——纬度圈半径 r 对纬度的导数。

由式(1-9)得

$$\frac{dx}{d\varphi} = \frac{-a \cdot \sin \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2} + a \cdot \cos \varphi (1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-1/2} \cdot e^2 \sin \varphi \cos \varphi}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$$

整理得

$$\frac{dx}{d\varphi} = -\frac{a \cdot (1 - e^2) \sin \varphi}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$$

代入式(1-10),由于注意到是子午圈的曲率半径,故不考虑其符号。

$$R_M = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \quad (1-11)$$

由式(1-11)可看出, R_M 是随纬度而变化的。

当纬度 $\varphi = 0$ 时,

$$R_{M0} = a \cdot (1 - e^2) = b \cdot \frac{b}{a}$$

这时 $R_{M0} < b$ 。

当纬度 $\varphi = 90^\circ$ 时,

$$R_{M90} = \frac{a}{(1 - e^2)^{1/2}} = a \cdot \frac{a}{b}$$

这时 $R_{M90} > a$ 。

子午圈曲率半径 R_M 随纬度增加而增大,在赤道处,子午圈弯曲最大,曲率半径最小, R_{M0} 小于地球短半轴 b 。在极点处,子午圈弯曲程度最小,曲率半径最大, R_{M90} 大于地球长半轴 a 。

3. 子午圈 $1'$ 的弧长

根据定义,子午圈 $1'$ 的弧度 $S = R_M \times 1'$,即

$$S = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}} \times 1' \quad (1-12)$$

将式 $(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2}$ 根据二项式定理展开,略去四次方以上各项,得

$$(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{-3/2} \approx 1 + \frac{3}{2} e^2 \sin^2 \varphi$$

$$S = a(1 - e^2) \left(1 + \frac{3}{2} e^2 \sin^2 \varphi \right) \times 1' \quad (1-13)$$

把 a, e 参数代入, 可得

$$S = 1852.9 - 9.3 \cos 2\varphi (\text{m}) \quad (1-14)$$

由式(1-14)可知, 子午线 $1'$ 的弧长随纬度的增高而增大, 在 $\varphi = 45^\circ$ 处, $S = 1852.2 \text{ m}$; 在赤道上, $S = 1842.9 \text{ m}$; 在极点达到最大值, $S = 1861.5 \text{ m}$ 。

航海领域通常以 $n \text{ mile}$ (海里) 来度量航程, $1 n \text{ mile}$ (1 海里) 的定义是地球椭球体子午圈上 $1'$ 的弧长。但在不同的纬度处, $1'$ 的弧长是不相同的。

为了适应航海上的需要, 必须确定一个固定的值作为 $1 n \text{ mile}$ 的标准长度。目前国际上各国都采用 1929 年国际水文地理学会议通过的国际海里长度作为统一的海里标准长度, 即 $1 n \text{ mile} = 1852 \text{ m}$ 。因此在航海计算时, 用 1852 m 等于 $1 n \text{ mile}$ 算出的航程与子午圈 $1'$ 的弧长等于 $1 n \text{ mile}$ 计算的航程是不同的, 在赤道和两极处, 其误差分别为 9.1 m 和 9.5 m 。

4. 卯酉圈曲率半径 R_N

根据数学推导, 卯酉圈曲率半径与纬度圈半径有如下关系:

$$R_N = \frac{r}{\cos \varphi} \quad (1-15)$$

把纬度圈半径 r 公式(1-9)代入, 得

$$R_N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}} \quad (1-16)$$

由式(1-16)可知, 当 $\varphi = 0$ 时, $R_N = a$, 即在赤道平面内, 卯酉圈曲率半径 R_{N0} 等于椭球体长半轴 a ; 当 $\varphi = 90^\circ$ 时, $R_{N90} = a \cdot a/b = R_{M90}$ 。即在极点, R_N 达到最大, 且与子午圈曲率半径 R_M 相等。

由式(1-11)和式(1-16)可得

$$\frac{R_N}{R_M} = \frac{\frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}}{\frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}} = \frac{1 - e^2 \sin^2 \varphi}{1 - e^2} = 1 + \frac{e^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2} \quad (1-17)$$

由式(1-17)可看出, 除在 $\varphi = 90^\circ$ 处, $R_N = R_M$ 外, 在其他任何纬度上, $R_N > R_M$ 。

1.1.4 航向、方位和距离

1. 航向的定义及度量

航向线 (Course Line, CL): 当舰船在无横倾时, 船艏面与地面真地平平面相交的直线称为船艏线, 船艏线向艏方向的延长线, 称为航向线。

北向线与航向线的夹角称为航向, 北向线分为真北向线、罗经北向线和磁北向线。所以航向的划分如下。

真航向 (True Course, TC): 船舶航行时, 在船上测者的真地平平面上, 真北线与航向线之间的夹角。计量方法为从真北线开始顺时针计量到航向线, 用圆周法表示, 范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

陀螺航向 (Gyrocompass Course, GC): 陀螺北线与航向线之间的夹角。从陀螺北线开始, 顺时针计量到航向线, 用圆周法度量, 范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

磁航向(Magnetic Course, MC):磁北线与航向线之间的夹角。从磁北线开始,顺时针计量到航向线,用圆周法表示。磁航向与真航向之间的关系可表示为 $MC = TC - Var$ 。

船舶向(Heading, Hdg):指在任何情况下,船舶某一瞬间的船舶方向与北向线的夹角。

2. 方位的定义及度量

方位线(Bearing Line, BL):在测者真地平面上,由测者向物标的连线。北向线与方位线的夹角称为方位角。方位的划分如下。

真方位(True Bearing, TB):在测者真地平面上,真北线与方位线之间的夹角。计量方法为从真北线开始,顺时针计量到方位线,用圆周法表示,其范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

陀螺方位(Gyrocompass Bearing, GB):陀螺北线与物标方位线之间的夹角。以陀螺北线开始,顺时针计量到物标方位线,用圆周法表示,范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

磁方位(Magnetic Bearing, MB):磁北线与物标方位线之间的夹角。从磁北线开始,顺时针计量到物标方位线,用圆周法表示,范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

3. 舷角的方位与度量

舷角(Relative Bearing, Q):相对方位,在测者地面真地平面上,以航向线为基准,计量方法为从航向线到方位线之间的夹角。从船艏线开始顺时针方向计量到物标方位线,用半圆周法表示,其范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。

4. 真航向、真方位与舷角之间的关系

三者关系为:真方位(TB) = 真航向(TC) + 舷角(Q),如图 1-7 所示。

在运算中,当被减数小于减数,则在被减数中加上 360° ;当相加结果大于 360° 时,则减去 360° ,对结果并无影响。

5. 航速与航程的定义及度量

航速是指船舶在水中航行的速度。

对水航速(Speed through Water, V):船舶相对水的航行速度,通常所说的航速是指船舶对水的速度。

对地航速(Speed over Ground, V_G):船舶相对地的航行速度,有时称为速度。实际航速是由对水航速和流速矢量的叠加。

推算航速(Speed Made Good)或计划航速(Speed of Advance):习惯上在航迹推算中预配或考虑风、流影响后的航行速度。

航速和流速的单位用节来表示,1 节 = 1 海里/h。

航程指船舶在水中航行的距离。

对水航程(Distance through Water, S):由起始点至到达点的船舶航行里程。

对地航程(Distance over Ground, S_G):船舶在风、流等影响下对地的航行里程,又称实际航程。

航程的单位用海里来表示,海里(Nautical Mile, n mile)是指地球椭圆子午线上纬度 $1'$ 所对应的弧长,简写为 1 n mile 或 $1'$ 。数学公式表示为 $1 \text{ n mile} = (1852.25 - 9.31 \cos 2\varphi) \text{ m}$ 。赤道最短,为 1842.9 m;两极最长,为 1861.6 m。两地最大差值是 18.7 m。我国采用 1929 年国际水文地理学会会议通过的海里标准,即 $1 \text{ n mile} = 1852 \text{ m}$ 。

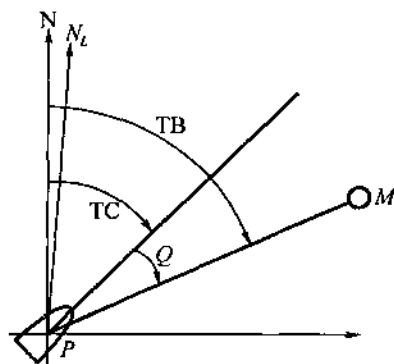


图 1-7 真航向、真方位与舷角之间的关系

航程也可以用链来表示,十分之一海里为一链(Cable, Cab)。链是用来测量较近距离的单位。

1.2 坐标系

物体的运动都是相对某个参考系而言的。导航系统的任务就是确定载体的运动参数,即确定载体在某坐标系中的位置,以及位置的变化率,所以在研究导航问题时,首先要确定坐标系。

1.2.1 坐标系的基本概念

定义一个空间坐标系,要明确地指出下列三点。

1. 坐标系原点的位置

如日心惯性坐标系,以太阳中心为坐标原点;大地坐标系,以地球中心(绝对定位)或地球中心附近某一点(相对定位)为坐标原点;地理坐标系,以载体在地球椭球体表面上投影的某点位置为坐标原点。

2. 坐标系轴的定向

如东北天取向的地理坐标系。

3. 在所属的坐标系中确定某点位置的参数。

如用笛卡儿坐标(X, Y, Z),用曲线坐标(纬度 φ 、经度 λ 和高度 h)等。

对选取和确定一个坐标系,通常要确定:①两个极,即基极和第二极;②两个面,即基面和第二面;③三个轴,即基轴、第二轴和第三轴。

基极(线)是坐标系统的对称轴,例如地球的自转轴。基面是与基极垂直的平面,如赤道平面第二面是包含基极且与基面相垂直的平面,例如格林尼治子午面。第二极就是基面与第二面的交线,基轴就是第二极。第三轴就是基极。第二轴正交于基轴和第三轴,构成右手(或左手)直角坐标系。

以地球椭球为基准的坐标系叫做地心坐标系。其主要特点是:①坐标原点在地球中心(或附近某点);②坐标系的基极是地球自转轴;③基轴是赤道面和格林尼治子午面的交线;④右手直角坐标系;⑤表面某确定点的位置参数,可用笛卡儿坐标,也可用曲线坐标表示。

在大地测量中,为精确测定地球表面上各点的坐标位置,并绘制出适合于各种用途的地图和海图,主要选用地心坐标系。在舰船导航中,为控制舰船的航行和进行航海作业,通常选用地理坐标系。

地理坐标系的主要特点是:①坐标原点在地球表面附近某点。大地测量中,是在地球表面设置的固定标志点——基准点。在舰船航行中,该点随舰船而运动;②基面是过该点对地球表面的切平面;③基轴是切平面与子午圈的交线,指向北;④右手直角坐标系。

1.2.2 地心坐标系

在大地测量中,为了精确地测出地面上物标的位置,把地球地心坐标进一步分为地球平坐标系、地球瞬时坐标系。

1. 地球平坐标系($A \cdot T$)

地球平坐标系是理想的世界地心坐标系,它的特点是:①坐标原点在地球中心;②基极