

舰船导航概论

Introduction to Marine Navigation

杨晓东 赵琳 编著

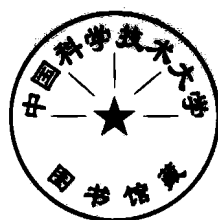


科学出版社
www.sciencep.com

舰船导航概论

Introduction to Marine Navigation

杨晓东 赵琳 编著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面介绍了涉及舰船导航的基本理论,全书共分为7章。首先简要阐述舰船导航基础理论。然后分别介绍船位推算与陆标定位方法;天文导航方法;陆基无线电导航方法基本理论和误差分析;卫星导航基本理论及影响卫星导航精度的主要因素;以GPS为例讨论卫星导航的主要组成、信号体制、导航电文式。最后介绍舰船导航系统常用的数据处理方法等。

本书可作为舰船导航专业师生和工程技术人员的教科书或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

舰船导航概论 / 杨晓东,赵琳编著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-024795-7

I. 舰… II. ①杨…②赵… III. 航海导航 IV. U675.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第099288号

责任编辑:贾瑞娜 / 责任校对:李奕莹

责任印制:张克忠 / 封面设计:何成 耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009年8月第一次印刷 印张:19 1/4

印数:1—2 000 字数:378 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

引导运动体安全、准确地航行到预定目标或指定点的理论和方法,称为导航。舰船导航方法大致可分为地文导航、天文导航、无线电导航、惯性导航和综合导航。

地文导航主要是利用对陆上标志的观测确定船位和方位。大约在 12 世纪,中国发明的指南针开始在航海中应用,继而产生罗经,罗经导航标志着航海技术取得重大突破。1730 年发明了航海六分仪。1767 年天文钟在船上使用,开始了对天体进行观测确定舰船方位的天文导航。1687 年建立的牛顿力学定律奠定了惯性导航理论基础。1851 年发现的傅科理论奠定了陀螺理论基础。1908 年发现的舒勒周期奠定了平台罗经和稳定平台理论基础。无线电导航经历了 1921 年的无线电测向仪、1935 年的雷达、1943 年的罗兰 A、1944 年的台卡、1958 年的罗兰 C、1964 年的卫星导航系统、1993 年的全球定位系统的发展历程。为摆脱对美国 GPS 的依赖,俄罗斯开发了 GLONASS 全球导航系统,中国开发了“北斗”卫星定位系统,欧盟正开发伽利略卫星导航定位系统。1962 年 R. E. Kalman 提出了最优线性递推滤波。1988 年 N. A. Carlson 提出的联合滤波理论为两个以上的导航传感器信息融合奠定了理论基础。

舰船导航系统和设备体现了其系统性、综合性、特殊性、复杂性和适装性,舰船导航设备的发展是舰船技术发展的必然。无源性、自主性、参数全面性和精度长期稳定性是导航技术未来发展中的重要内容。这些导航方法和技术的发展均离不开对与其相关的基础理论的深入学习和研究。

本书共分为 7 章,在第 1 章中,阐述了与舰船导航相关的基础理论,主要包括导航中常用名词的定义、常用的坐标系变化、地球重力场和地球磁场的基本概念及与海图相关的基本计算;第 2 章系统地介绍了船位推算与陆标定位方法,主要包括船位推算、有无风流影响计算和陆标定位计算;在第 3 章中,全面地介绍了计算天文导航的方法,主要包括天体预报、天体定位、天测罗经差等的计算方法;第 4 章介绍了陆基无线电导航方法基本理论和误差分析,主要包括无线电导航的定位体制和工作模式、无线电导航精度分析、传播条件对陆基无线电导航信号的影响和罗兰 C 导航的基本原理;第 5 章介绍了卫星导航方法及影响卫星导航精度的主要因素,包括卫星运动分析、卫星导航方式、系统误差分析和引起卫星导航信息传播中的主要误差;在第 6 章中,以 GPS 为例讨论了卫星导航的主要组成、信号体制、导航电文等,在一定程度上是对第 5 章的有效补充,为研究其他卫星导航系统提供了范例;在第 7 章中,较详细地介绍了在舰船导航系统中常用的数据处理、评定和融合

方法,主要包括导航系统误差、导航信息的不确定度评定方法、导航信息的线性估计方法和导航信息的非线性滤波方法。

各章间既有一定的连贯性,又相对独立,读者可根据需要自行选用所需内容。

参加本书编写的人员有海军潜艇学院的杨晓东教授、哈尔滨工程大学的赵琳教授。在本书的编写中,得到了海军潜艇学院和哈尔滨工程大学的大力支持。

由于作者水平有限,加上时间紧迫和资料较少,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2008 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 导航基础理论	1
1.1 地球与坐标系	1
1.2 常用坐标系与坐标变换	6
1.3 地球重力场.....	15
1.4 地球磁场.....	28
1.5 海图及相关计算方法.....	36
第 2 章 船位推算与陆标定位方法	48
2.1 无风流情况下的航位推算和误差分析.....	48
2.2 风流中航行船位推算与误差分析.....	51
2.3 陆标导航.....	62
第 3 章 天文导航方法	72
3.1 天文定位三角形与时间.....	72
3.2 恒星视位置预报.....	77
3.3 太阳系天体视位置预报.....	98
3.4 天体真高度	106
3.5 船位定位计算	112
3.6 观测天体测定罗经差	120
第 4 章 陆基无线电导航方法	122
4.1 无线电导航的技术基础	122
4.2 无线电导航精度分析	131
4.3 传播条件对无线电导航信号的影响	138
4.4 罗兰 C 导航系统	143
4.5 罗兰 C 电波传播	151
4.6 罗兰 C 导航系统误差	159
附表 1 主要罗兰 C 台链.....	164
第 5 章 卫星导航方法	170
5.1 卫星导航技术发展概述	170
5.2 卫星定位基础	173
5.3 卫星导航原理	179

5.4	与传播途径有关的误差	195
5.5	相对论效应引起的误差	208
	附表 2 GPS 相对论效应的主要常数	214
第 6 章	GPS 卫星导航系统	216
6.1	GPS 系统组成	216
6.2	伪随机码	221
6.3	GPS 卫星信号	231
6.4	GPS 导航电文	234
第 7 章	导航信息处理中的数学方法	251
7.1	导航系统的误差	251
7.2	导航信息的不确定度评定	252
7.3	导航信息的线性估计	261
7.4	导航信息的非线性滤波	282
参考文献		297

第 1 章 导航基础理论

1.1 地球与坐标系

1.1.1 地球的形状

地球表面是一个凹凸不平、形状复杂的物理面,其高低相差达 20km 左右。为研究方便,假想让风平浪静的海平面向陆地延伸,则由海水平面所包围的曲面就定义为地球的形状,并将这个曲面称为大地水准面。大地水准面是一个重力等位面,其水准面的法线与重力方向一致。由大地水准面所包围的几何形体称为大地球体。但由于地球的重力是引力和自转向心力的合力,加之地球质量的分布不均匀,以及受太阳、月亮等天体的影响,大地球体不是一个规则的几何体。在实际应用中,可将它近似成一个可以利用数学公式描述的几何形体,其近似程度根据实际需要来确定。

若把地球看成是一个圆球体,则有

$$X^2 + Y^2 + Z^2 = R^2 \quad (1.1.1)$$

式中, R 为地球的平均半径, $R=6371.02\text{km}\pm 0.05\text{km}$ 。

把地球近似看成圆球体,常称为地球的第一近似体。第一近似体对于要求精度不高或在较小范围内进行的导航计算而言既方便又实用,并可使实际问题大为简化。

一种更为接近地球实际形体的近似是把地球看成是一个旋转椭球体,称为第二近似。若将赤道和纬度圈均当成椭圆,则为地球体的第三近似体,称为三轴椭球体或地球椭球体。这种近似体给测量带来极大的不便,因此,除个别专门问题外,通常采用第二近似体。在大地测量中,用以代表地球的某种旋转椭球体称为地球椭球,即旋转椭球。

第二近似体以地球的极(地)轴为旋转轴,以某一子午圈为母线,绕地轴旋转一周而成。长半轴 a 在赤道平面内,短半轴 b 在极轴上,如图 1.1.1 所示,其描述公式为

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{Y^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \quad (1.1.2)$$

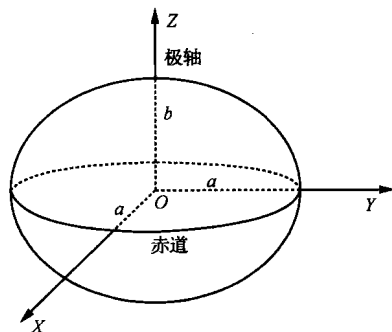


图 1.1.1 旋转椭球体

椭球体的参数除长半轴 a 、短半轴 b 外,还有扁率(又称椭圆度) ϵ ,其计算表达式为

$$\epsilon = \frac{a-b}{a}$$

由于世界各国对地球的测量所采取的方法不尽相同,在工程计算中往往采用不同的椭球体。常见的地球参考椭球体有五种,其椭球体参数如表 1.1.1 所示。

表 1.1.1 地球椭球体参数

椭球	长半轴 R_e /km	短半轴 R_p /km	椭圆度 ϵ	适用地区或系统
克拉克(1866 年)	6378.206	6356.584	1/295	美
海福特(1909 年)	6378.388	6356.912	1/297	西欧
克拉索夫斯基(1938 年)	6378.24500000	6356.86301877	1/298.3	俄、中
IUGG1975 椭球	6378.14000000	6356.75528816	1/298.257	
WGS-84	6378.137	6356.752	1/298.257	GPS 系统

自 1952 年以来,我国一直采用克拉索夫斯基椭球,直到 1980 年采用国际大地测量和地球物理联合会 1975 年推荐的椭球,简称 IUGG1975 椭球。

从 2008 年 7 月 1 日起,我国启用 2000 国家大地坐标系。2000 国家大地坐标系的原点为包括海洋和大气的整个地球的质量中心,其 Z 轴由原点指向历元 2000.0 的地球参考极的方向,该历元的指向由国际时间局给定的历元 1984.0 作为初始指向来推算,定向的时间演化保证相对地壳不产生残余的全球旋转; X 轴由原点指向格林尼治参考子午线与地球赤道面(历元 2000.0)的交点; Y 轴与 Z 轴、 X 轴构成右手正交坐标系。2000 国家大地坐标系的尺度为在引力相对论意义下的局部地球框架下的尺度。2000 国家大地坐标系采用的地球椭球参考数值为

长半轴	$a=6378137\text{m}$
扁率	$f=1/298.257222101$
地球引力常数	$GM_e=3.986004418\times 10^{14}\text{m}^3/\text{s}^2$
自转角速度	$\omega=7.292115\times 10^{-5}\text{rad/s}$
短半轴	$b=6356752.31414\text{m}$
极曲率半径	$c=6399593.62586\text{m}$
第一偏心率	$e=0.0818191910428$
第二偏心率	$e'=0.0820944381519$
1/4 子午圈长度	$Q=10001965.7293\text{m}$
椭球平均半径	$R_1=6371008.77138\text{m}$
相同表面积的球半径	$R_2=6371007.18092\text{m}$
相同体积的球半径	$R_3=6371000.78997\text{m}$

椭球的正常位

动力形状因子

球谐系数

球谐系数

球谐系数

赤道正常重力值

两极正常重力值

正常重力平均值

纬度 45° 的正常重力值

$$U_0 = 62636851.7149 \text{ m}^2/\text{s}^2$$

$$J_2 = 0.001082629832258$$

$$J_4 = -0.00000237091126$$

$$J_6 = 0.00000000608347$$

$$J_8 = -0.00000000001427$$

$$\gamma_e = 978.03253361 \text{ Gal}^\text{①}$$

$$\gamma_p = 983.21849379 \text{ Gal}$$

$$\gamma = 979.76432224 \text{ Gal}$$

$$\gamma_{45^\circ} = 980.61977695 \text{ Gal}$$

1.1.2 地球的点、线、面

1. 地极

如图 1.1.2 所示,地球的自转轴 $P_N P_S$ 为地轴。地轴与地球表面相交的两个点 P_N 和 P_S 为地极,其中 P_N 为地理北极, P_S 为地理南极。

2. 赤道与纬度圈

过地心并垂直于地轴的平面为赤道面,它与地球表面的交线为赤道。赤道把地球分为两个半球,包含北极的称为北半球,包含南极的称为南半球。平行于赤道的小圆为纬度圈。

3. 子午面与子午圈

通过地球两个极点的平面为子午面,它有无数个。其中,通过英国格林尼治天文台的子午面为格林子午面,也称为本初子午。格林子午面把地球分成东西两个半球,即东半球和西半球。子午面与地球表面的交线为子午圈。

4. 经度线与基准经度线

自地球两极子午圈的一半为经度线。规定通过格林尼治天文台的经度线为基准经度线,又称本初子午线。规定基准子午线为 0° 。自基准子午线向东 180° ,为东经;自基准子午线向西 180° ,为西经。

1.1.3 地球的曲率半径

当把地球近似为旋转椭球体来研究时,需要用到椭球的曲率半径等参数。由于地球是椭球体,在地球表面的不同位置,曲率半径是不同的,是纬度的函数。在

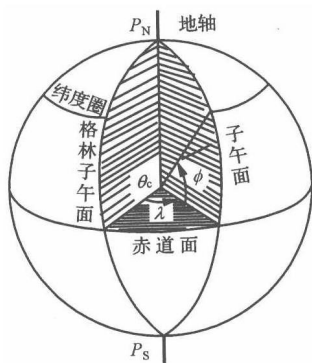


图 1.1.2 地球上的点、线、面

① Gal(伽)为加速度单位, $1\text{Gal} = 1\text{cm}/\text{s}^2$ 。

导航中,常用到以下三种曲率半径。

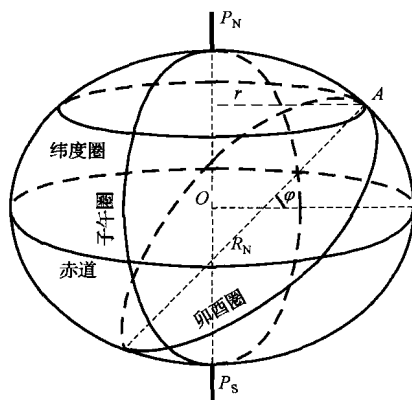


图 1.1.3 地球曲率半径

也不同。子午圈曲率半径 R_M 为

$$R_M = \frac{a(1-e^2)}{\sqrt{(1-e^2\sin^2\varphi)^3}} \quad (1.1.4)$$

子午圈曲率半径 R_M 随纬度 φ 的增高而增大,在赤道处 R_M 最小,在极点处 R_M 最大。

3. 卯酉圈曲率半径

过 A 点作和子午面垂直的法线平面与椭球表面的交线称为卯酉圈,如图 1.1.3 所示,其曲率半径 R_N 为

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} \quad (1.1.5)$$

卯酉圈曲率半径 R_N 随纬度 φ 的增高而增大,在赤道处最小, $R_N = a$, 即卯酉圈与赤道重合;在地理极点处 R_N 最大,即变成子午圈。

由式(1.1.3)、式(1.1.5)可知,卯酉圈曲率半径 R_N 与纬度圈半径 r 的关系为

$$r = R_N \cos\varphi$$

比较式(1.1.4)和式(1.1.5)可以看出,除在两极点处 $R_M = R_N$ 外,在其他任何纬度上均有 $R_N > R_M$ 。同一点的 R_M 、 R_N 在同一条直线上,但长短不等。 R_N 的端点落在地球短轴上。

1.1.4 地球自转角速度

地球在惯性空间既绕其地轴自转,又绕太阳公转。地球自转一周为一天,公转一周为一年。在一年中,地球相对于太阳转约 365 转,但由于有一周公转,地球相对于惯性空间即遥远的恒星实际上转了 366r。地球在 24h 内相对惯性空间的自

1. 纬度圈半径

纬度圈是一个圆,如图 1.1.3 所示,过 A 点的纬度圈半径 r 为

$$r = \frac{a \cos\varphi}{\sqrt{1-e^2\sin^2\varphi}} \quad (1.1.3)$$

式中, $e^2 = (a^2 - b^2)/a^2$, e 为椭球偏心率。

纬度圈半径 r 随纬度 φ 的增高而减小。在赤道上, $r = a$, 在地理极点上, $r = 0$ 。如果将地球视为半径为 R 的圆球体,则

$$r = R \cos\varphi$$

2. 子午圈曲率半径

子午圈是一个椭圆,纬度不同,弯曲度

转角速度为

$$\Omega = 1.0027379r/24h = 7.2921158 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$$

如果用每小时旋转的度数来表示,则

$$\Omega = 15.041069^\circ/\text{h}$$

地球自转角速度是一个矢量,与地轴平行,指向北极。如果在北极上空俯视地球自转的方向,为逆时针方向。

1.1.5 地球上的方向、位置、速度和航程

1. 地球上方向的确定

舰船在地球上的运动都有一定的方向。地球上任意一点的方向都是以真北线为基准来确定的。

在舰船处于平稳状态时,通过舰船首尾两点连线的铅垂面与真地平面的交线,称为舰船首尾线,首尾线向舰首延长的方向线叫航向线,如图 1.1.4 所示。真北线与航向线之间的夹角叫真航向,用符号 C_t 表示(或用 TC 表示)。真航向 C_t 以真北线为基准,按顺时针划分为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

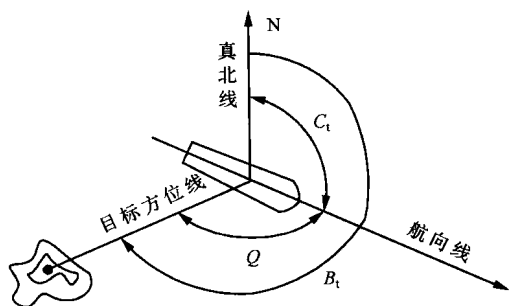


图 1.1.4 地球上的方向与方位

测者与目标的铅垂面在真地平面的交线叫目标方位线。目标方位线与真北线之间的夹角叫做真方位,用符号 B_t 表示(或用 TB 表示)。真方位 B_t 也是以真北线为基准顺时针划分为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。航向线与目标方位线之间的夹角叫舷角,用符号 Q 表示。以航向线为基准向左、右各划分为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。目标在左舷时叫左舷角,为负;目标在右舷时叫右舷角,为正。舷角为 90° 时,又叫正横。

在航海上,航向、方位、舷角往往要进行换算,真方位 B_t 、真航向 C_t 和舷角 Q 三者之间的关系为

$$B_t = C_t + Q \quad (1.1.6)$$

式中, Q 值的符号为左舷角“—”,右舷角“+”。

2. 地球上的位置

地球上任意一点的位置可以用地理坐标纬度和经度两个参量来表示。地球表面上某点 O 的法线 OO' 与赤道面的夹角叫该点的地理纬度,简称纬度,用符号 φ 表示,如图 1.1.5 所示。纬度是以赤道为基准,分别向北、南各划分为 $0^\circ \sim 90^\circ$,赤道以北的叫北纬,赤道以南的叫南纬。地球椭球面上某点 O 的向径 OO_e 与赤道面的夹角叫该点的地心纬度,用符号 φ' 表示。地心纬度一般不等于地理纬度,最大误差为 $11'5$ 。当纬度为 0° 或 90° 时, $\varphi' = \varphi$ 。若把地球看成圆球体,那么法线将通过地心

O_e , 则地心纬度与地理纬度一致。

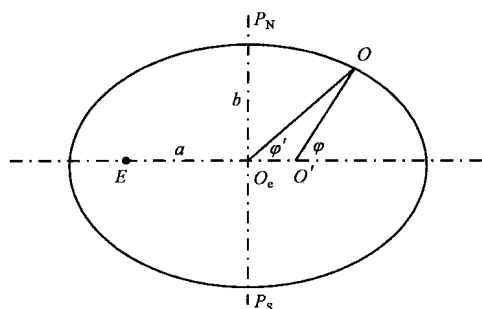


图 1.1.5 地理纬度与地心纬度

在图 1.1.5 中, a 为椭球体的长半径, b 为椭球体短半径, E 为焦点。地球表面上某点 O 的子午面与格林尼治子午面的夹角, 或该两面夹角在赤道上所对应的弧长, 叫该点的地理经度, 简称经度, 用符号 λ 表示, 如图 1.1.2 所示。经度是以格林尼治经度线为基准, 向东、西各划分为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。基准经度以东的叫东经, 以西的叫西经。东经(或西经) 180° 的经度线叫日界线(又称为为国

际日期变更线)。当舰船向东航行通过日界线时, 应将日期减少一天, 反之则增加一天。日界线是一条折线, 目的是为了避开太平洋中的某些国家或岛屿在同一天内出现两个日期。

在航海上度量距离的单位常用海里, 用 n mile 表示。地球椭圆子午线上纬度 $1'$ 的弧长称为一海里, 并规定其长度为 1852m。实际上, 若以米为单位, 则在不同的地理纬度 $1'$ 的弧长是不同的, 其计算公式为

$$S_{1'} = 1852.3 - 9.3 \cos 2\varphi \quad (1.1.7)$$

1.2 常用坐标系与坐标变换

1.2.1 导航常用坐标系

1. 地心惯性坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$

以地心 O_i 为原点, $O_i Z_i$ 轴沿地球自转轴方向而指向某颗恒星, $O_i X_i$ 和 $O_i Y_i$ 轴在赤道平面内, 也指向两颗恒星。由这三根坐标轴构成的右手直角坐标系称为地心惯性坐标系, 如图 1.2.1 所示。地心惯性坐标系不参与地球的自转, 即地球的自转不改变三根坐标轴在惯性空间的方位, 它代表了惯性空间。

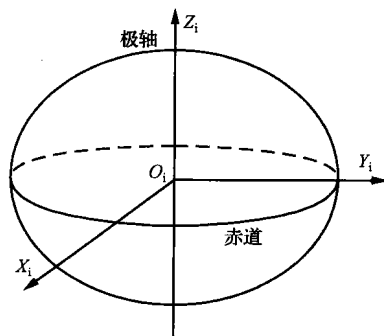


图 1.2.1 地心惯性坐标系

2. 地理坐标系 $OXYZ$

它是舰船的水平及方位信息的测量基准。如图 1.2.2 所示, 以舰船在地球表面上的位置 O 为坐标原点, 通过此点作地球的切平面(当地水平面), 在此平面内

指东为 OX 轴, 指北为 OY 轴, 沿法线方向指天顶为 OZ 轴, 由此组成的右手直角坐标系 $OXYZ$ 称为地理坐标系。该坐标系随舰船一起运动, 但各坐标轴相对地球的方位不变, 该坐标系也称东北天坐标系。

舰船导航定位常采用这一坐标系。舰船所在的地理位置可用经度 λ 和纬度 φ 来表示。地理坐标系 $OXYZ$ 还有其他描述方法, 如北、西、天坐标系及北、东、地坐标系等。

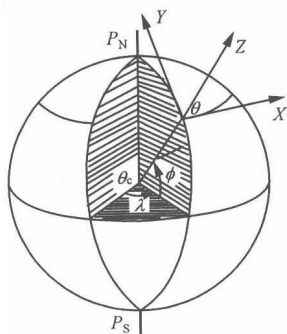


图 1.2.2 地理坐标系

3. 甲板坐标系 $OX_bY_bZ_b$

甲板坐标系 $OX_bY_bZ_b$ 是一组与舰船甲板相关联的右手直角坐标系。如图 1.2.3 所示, OZ_b 轴垂直于船体甲板平面指向上方, OX_b 轴指向船体右舷, OY_b 轴指向船首。

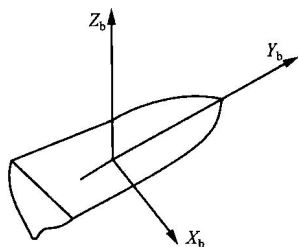


图 1.2.3 甲板坐标系

该坐标系随船体一起运动, 其与地理坐标系 $OXYZ$ 之间的夹角, 描述了舰船的姿态角, 即纵摇角、横摇角和航向角。

4. 平台坐标系 $OX_pY_pZ_p$

在平台式惯性导航系统中, 有一个与舰船姿态运动相隔离的稳定平台, 用这个平台来模拟地理坐标系, 称为立平台坐标系 $OX_pY_pZ_p$ 。其中, OZ_p 轴垂直于平台平面指向上方, OX_p 指向平台东, OY_p 指向平台北, O 点为平台的旋转中心。该坐标系最终模拟地理坐标系, 所以也构成东北天右手直角坐标系。

平台坐标系 $OX_pY_pZ_p$ 与地理坐标系 $OXYZ$ 之间的夹角为平台的误差角, 反映了平台模拟地理坐标系时偏离水平面和子午面的误差, 分别用 α, β, γ 表示。

5. 计算机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$

在导航系统的实际使用中, 还需要建立一组计算机坐标系 $O_cX_cY_cZ_c$, 它是根据导航系统计算出来的经度 λ_c 和纬度 φ_c 作为坐标原点而建立的地理坐标系。这是一个人为引进的虚拟坐标系。计算机坐标系的原点 O_c 与舰船的真实地理位置 O 点不可能完全一致, 两者之间的误差为

$$\begin{cases} \delta\varphi = \varphi_c - \varphi \\ \delta\lambda = \lambda_c - \lambda \end{cases} \quad (1.2.1)$$

由于两坐标系原点不一致, 因而计算机坐标系各坐标轴与地理坐标系各坐标轴在惯性空间的指向也不一致。

6. 时空系统

天球坐标系统是用一对球面坐标来描绘天体(恒星、行星)的位置。在天球坐

标系统中给出的天体位置,只代表天体的方向,没有考虑天体的实际距离。任何时候,只能看到天球的一半。天球的可见部分和不可见部分的分界线称为地平。直指观测者头顶和脚下的两个点,分别为天顶 Z 和天底 Z' 。天球自东向西绕着一个固定点旋转,这一点在北(南)半球称为北(南)天极 $P_N(P_S)$ 。通过北南天极的直线,即为地球的自转轴。通过天极和天顶的大圆为子午圈。子午圈与地平分别相交于北极点 N 和南极点 S 。

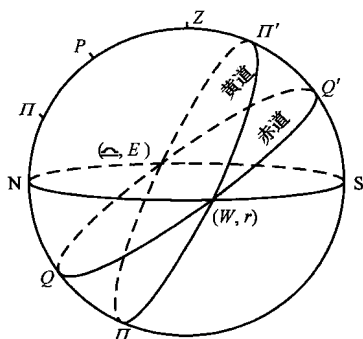


图 1.2.4 天球上的点、圆

地球绕太阳公转所成平面在天球上所截得的大圆为黄道,此平面为黄道面,其两极分别定义为北(南)黄极 $\Pi(\Pi')$ 。黄道面与天赤道面的交角称为黄赤交角 ϵ ,黄赤交角为一变值,其平均值约为 $23^\circ 5'$ 。黄道与天赤道的两个交点通常称为二分点。太阳在春初通过春分点(白羊座第一点)向北移动,秋初通过秋分点向南移动。地平、天赤道和黄道每一个都是天球坐标系统的基本参考圆。其中,只有地平比较容易识别。上述各点、圆如图 1.2.4 所示。

除采用球面坐标系外,还采用空间直角坐标系。空间直角坐标系的原点就是天球的中心,通常取在地心、日心或太阳系质心处。空间直角坐标系的 X 、 Y 、 Z 轴与天球的各基本点、圆联系在一起。在惯性坐标系中,天体的位置可用下式表示,即

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}(x, y, z) \quad (1.2.2)$$

7. 地平坐标系

通过观测者的与地方重力场相一致的直线为天文垂线。所谓地平,即一个大圆,其中心为观测者,其轴为天文垂线。地平坐标系取天顶 Z 为基本轴,取真地平为基本圆,如图 1.2.5 所示。 BZN 是天体 B 的方位角,在地平坐标系中用弧距 NK 、 KB 确定天体 B 在天球球面上的位置,其中, NK 为横坐标,是天体的方位 A , KB 为纵坐标,是天体的高度 h 。高度的余数,即 $BZ = 90^\circ - KB = 90^\circ - h = z$,称为天体的天顶距。这时天体的位置矢量为

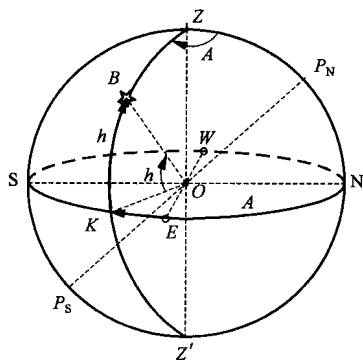


图 1.2.5 地平坐标系

$$\mathbf{R}_{Ah} = \begin{bmatrix} \cosh \cos A \\ \cosh \sin A \\ \sinh \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin z \cos A \\ \sin z \sin A \\ \cos z \end{bmatrix} \quad (1.2.3)$$

地平坐标系为左手系,并具有地方性。

8. 时角坐标系

取天极 P_N 为基本极,天赤道与观测者子午圈为基本圆,以天赤道与午半圆的交点为原点构成球面坐标系,也称为第一赤道坐标系,如图 1.2.6 所示。在时角坐标系中,确定天体位置的坐标分别为:横坐标 ϵK ,即天体地方时角 t_M ,具有地方性;纵坐标 KB ,即天体赤纬 δ 。天体地方时角为观测者午半圆和天体在高级 P_N 处所夹的球面角,或由天赤道和观测者午半圆交点 ϵ 起逆时针度量到 K 的大圆弧 ϵK ,范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,天体地方量角的这种定义方法称为西行时角法。

天体赤纬自天赤道起向北天极 P_N 方向度量为正,向南天极 P_S 方向度量为负。弧 $P_N B$ 称为天体的极距 Δ ,即 $\Delta = 90^\circ - \delta$ 。时角坐标系为右手系,天体 B 的位置可表述为

$$\mathbf{R}_\theta = \begin{bmatrix} \cos\delta \cos t_M \\ \cos\delta \sin t_M \\ \sin\delta \end{bmatrix} \quad (1.2.4)$$

天体时角的度量还有一种定义方法。在天赤道上,从测者午半圆起,向东或向西量到天体为止,范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 。天体在东半天球时,向东量取,时角命名为东(E);天体在西半天球时,向西量取,时角命名为西(W)。

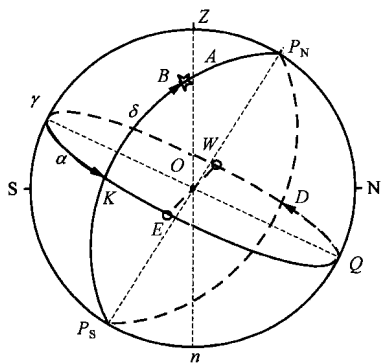


图 1.2.7 赤道坐标系

9. 赤道坐标系

以天极 P_N 为基本极,在天赤道上取一固定点 Y ,春分点为原点,取天赤道和春分点时圈为基本圆构成的球面坐标系为赤道坐标系,或第二赤道坐标系,如图 1.2.7 所示。天体在赤道坐标系中的坐标用天体赤经 α 和天体赤纬 δ 来表示。天体赤经从春分点向东度量,其范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。赤道坐标系为右手系,赤道坐标系中,天体 B 的位置矢量可表述为

$$\mathbf{R}_{\alpha\delta} = \begin{bmatrix} \cos\delta \cos\alpha \\ \cos\delta \sin\alpha \\ \sin\delta \end{bmatrix} \quad (1.2.5)$$

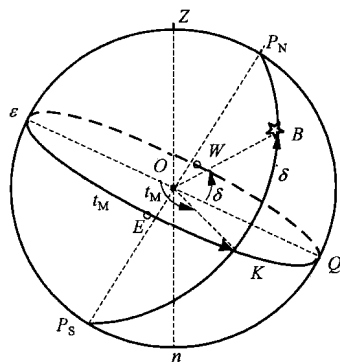


图 1.2.6 时角坐标系

10. 黄道坐标系

地球瞬时平均轨道面与天球相交产生的大圆为黄道,黄道上的特殊点(坐标系

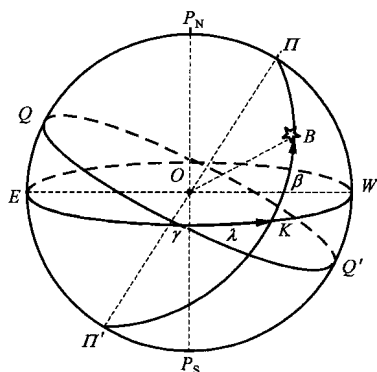


图 1.2.8 黄道坐标系

原点)也是春分点 Y 。太阳系的大天体几乎都在黄道平面内运动。取黄极 Π 为基本极,黄道为基本圆,选择春分点 Y 为经角起始点,这样所建立起来的天球坐标系称为黄道坐标系,如图 1.2.8 所示。在黄道坐标系中,天体 B 的坐标由黄经 λ 和黄纬 β 来确定。 B 点的黄纬 β 为从黄道沿经过 B 点和北黄极的大圆测量的角距离,向北度量为正,向南度量为负。 B 点的黄经 λ 为从春分点 Y 向东沿黄道到通过 B 点和北黄极的大圆的交点测量的角距离。秋分点的黄经为 180° 。天体 B 的坐标 (λ, β) 不具有地方性。黄道坐标系为右手系,天体 B 的位置矢量可表述为

$$\mathbf{R}_{\lambda\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta\cos\lambda \\ \cos\beta\sin\lambda \\ \sin\beta \end{bmatrix} \quad (1.2.6)$$

1.2.2 坐标变换

在分析导航系统的运动时,经常涉及两种或两种以上坐标系之间的相互关系,把某一坐标系内所表示的物理量转换到另一坐标系去表示。在这种坐标变换中,主要涉及的坐标系包括正交坐标系和非正交坐标系。实现坐标系之间相互变换的数学工具之一,是方向余弦矩阵。正交坐标系与非正交坐标系间或两个正交坐标系之间都可进行变换。

1. 正交变换

正交旋转矩阵将一个矢量分量从一个坐标系变换到另一个坐标系中,用到的坐标系为右手笛卡儿坐标系,所有旋转矩阵元素都是方向余弦。

设矢量 $\mathbf{P}^i$ 用正交的单位矢量 $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 的三元组表达成

$$\mathbf{P}^i = x_e \mathbf{i} + y_e \mathbf{j} + z_e \mathbf{k} \quad (1.2.7)$$

用原点相同而方位不同的新的正交三元单位矢量 $\mathbf{i}', \mathbf{j}', \mathbf{k}'$ 表征,矢量 $\mathbf{P}^i$ 可表达成

$$\mathbf{P}^i = x'_e \mathbf{i}' + y'_e \mathbf{j}' + z'_e \mathbf{k}' \quad (1.2.8)$$

由于 $\mathbf{P}^i \cdot \mathbf{i}'$ 为 $\mathbf{P}^i$ 在单位矢量 $\mathbf{i}'$ 上的投影,因此

$$\begin{cases} x'_e = \mathbf{P}^i \cdot \mathbf{i}' = (\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}')x_e + (\mathbf{j} \cdot \mathbf{i}')y_e + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{i}')z_e \\ y'_e = \mathbf{P}^i \cdot \mathbf{j}' = (\mathbf{i} \cdot \mathbf{j}')x_e + (\mathbf{j} \cdot \mathbf{j}')y_e + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{j}')z_e \\ z'_e = \mathbf{P}^i \cdot \mathbf{k}' = (\mathbf{i} \cdot \mathbf{k}')x_e + (\mathbf{j} \cdot \mathbf{k}')y_e + (\mathbf{k} \cdot \mathbf{k}')z_e \end{cases} \quad (1.2.9)$$