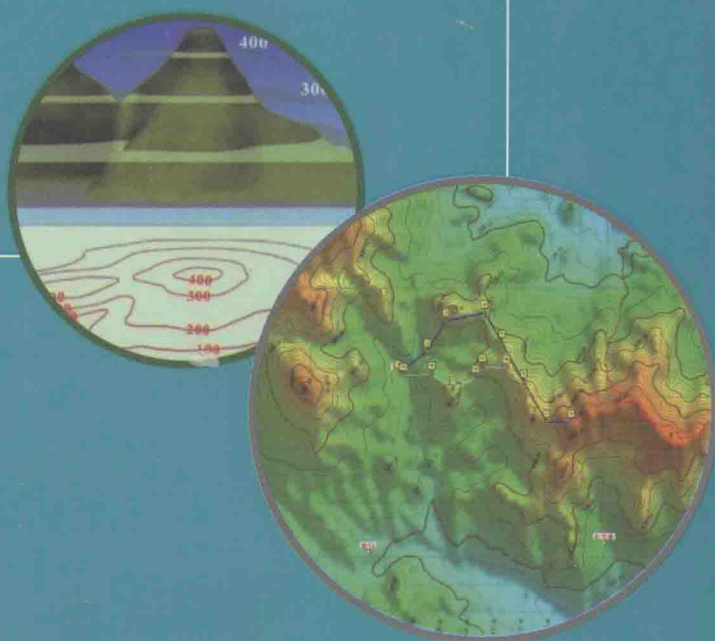


自主定位定向技术

苏中 马晓飞 赵旭 李超 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

自主定位定向技术

苏中 马晓飞 赵旭 李超 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书全面系统论述了自主定位定向技术的基本理论以及主要器件、定位定向系统和捷联导航系统的原理、设计和应用。

全书共分6章,分别介绍了定位定向技术基础理论,陀螺仪、加速度计、地磁传感器和天体敏感器等自主定位定向元件,惯性稳定器及惯性定向装置、数字式磁罗盘和天文定向系统,捷联式惯导系统的机械编排、初始对准、动基座自对准和传递对准、地磁定位和天文定位算法,捷联惯导系统误差及其传播特性、导航解算、卡尔曼滤波技术等自主定位定向系统的基本原理和设计,并介绍了自主定位定向技术的实际应用。

本书可作为高等院校自动化及导航类专业的本科生、研究生教材,也可供相关专业的研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自主定位定向技术/苏中等编著. —北京:国防工业出版社,
2015.1

ISBN 978-7-118-10019-8

I. ①自... II. ①苏... III. ①定位—技术②定向—
技术 IV. ①P228

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 033996 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 15¼ 字数 250 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

自主定位定向技术包含惯性技术、地磁学、天文学等多种学科,是一种不依赖于任何外部设备,也不向外部辐射能量的自主式导航技术,具有隐蔽性好、不易受外界干扰影响、可全天候工作于空中地球表面乃至水下等优点,在军事应用领域具有重要作用。

自主定位定向技术涉及物理、数学、光学、地磁学、天文学、材料学、精密机械学、电子技术、计算机技术、控制技术、测试技术、仿真技术、加工制造及工艺等技术,集光、机、电、算等高新技术为一体,广泛应用于航空、航天、航海、陆地导航、现代工业、交通运输、测量勘探、机器人、医疗设备、农业、林业,以及摄影、手机、玩具等领域。它是武器装备信息化的主要支撑技术之一,更是衡量一个国家科学技术水平和国防实力的重要标志之一。

本书共6章,以自主定位定向技术具体应用为主线,全面系统介绍了自主定位定向技术基本理论以及主要敏感元件和定位定向系统的原理、设计和应用。第1章讲述定位定向技术基础知识;第2章讲述陀螺、加速度计、地磁传感器、天体敏感器等自主定位定向器件的原理及结构;第3章讲述惯性稳定器及惯性定向装置、数字式磁罗盘定向系统和天文定向系统;第4章讲述捷联惯导系统的机械编排、对准及定位、地磁定位和天文定位算法原理;第5章讲述捷联惯导系统误差及其传播特性、导航解算和卡尔曼滤波技术的原理及应用;第6章讲述自主定位定向技术的各种实际应用。

本书从基本物理概念出发,以实用、易懂为宗旨组织本书各章节的内容,在基本物理概念的引导下,由浅入深地阐述复杂的数学、物理和系统方程,并给出完整的结果和结论,为便于教学和自学,附有思考与练习。有利于读者系统掌握自主定位定向技术,将理论知识应用于实践,为进一步的深入研究和应用打下基础。

本书可作为高等院校自动化及导航类专业的本科生、研究生教材,也可供相关专业的研究和工程技术人员参考。

本书的第1~3章由苏中教授编著,第4章由马晓飞编著,第5章由赵旭编著,第6章由李超编著。本书的编写与出版得到国家自然科学基金(60972118)、北京市学术创新人才项目(PHR201006115)和北京市教育委员会本科专业综合改革试点项目(71M1310829)的资助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,本书不足和疏漏之处在所难免,敬请专家、同仁和广大读者批评指正。

作者

2014年11月

目 录

第1章 定位定向基础知识	1
1.1 基本概念	1
1.2 地球参考椭球及地球重力场特性	1
1.2.1 地球的形状和时间的定义	1
1.2.2 垂线、纬度、高程的定义	3
1.2.3 地球重力场特性	5
1.3 地球磁场特性	5
1.3.1 地球磁场的要素及其分布特征	6
1.3.2 地球磁场的解析模式	7
1.3.3 地球磁场变化特性	7
1.4 恒星特性及天球坐标系	8
1.4.1 恒星的特性	8
1.4.2 天球及天球坐标系	8
1.4.3 星表及星图识别技术	10
1.5 载体的空间位置和姿态的描述	12
1.5.1 常用坐标系	13
1.5.2 刚体的空间角位置描述	15
1.5.3 坐标系之间的变换、载体位置、姿态和方位的确定	20
1.6 导航技术	23
1.6.1 惯性导航	23
1.6.2 地磁导航	26
1.6.3 天文导航	27
思考与练习	29
第2章 自主定位定向器件	32
2.1 陀螺仪	32
2.1.1 陀螺效应	33
2.1.2 陀螺仪的分类与发展趋势	39
2.1.3 陀螺仪原理	44
2.1.4 陀螺仪的技术指标及漂移分析	64
2.2 加速度计	67

2.2.1	哥氏加速度、绝对加速度和比力	67
2.2.2	加速度计的分类和发展趋势	75
2.2.3	加速度计原理	76
2.2.4	加速度计的技术指标及误差分析	82
2.3	地磁传感器	84
2.3.1	磁罗经技术	84
2.3.2	磁通门技术	88
2.3.3	直感式地磁导航系统的一般结构	91
2.3.4	地磁测量误差模型及其补偿	93
2.4	天体敏感器	93
2.4.1	天体敏感器的分类	94
2.4.2	航海六分仪和空间六分仪	100
	思考与练习	106
第3章	自主定向系统	108
3.1	舒勒原理	108
3.1.1	数学摆跟踪垂线的舒勒原理	108
3.1.2	物理摆跟踪垂线的舒勒原理	110
3.2	姿态稳定器	111
3.2.1	单轴稳定器基本原理	111
3.2.2	三轴稳定平台	121
3.2.3	四平衡环系统	123
3.3	惯性定向系统	126
3.3.1	陀螺地平仪	126
3.3.2	陀螺寻北仪	127
3.4	地磁定向系统	134
3.4.1	磁定向基本原理	135
3.4.2	数字式磁罗盘基本组成和原理	135
3.4.3	数字式磁罗盘的误差分析及补偿	137
3.5	天文定向系统	137
3.5.1	天文定向系统基本原理	137
3.5.2	天文定向系统误差分析	139
	思考与练习	141
第4章	自主定位系统	142
4.1	捷联惯导系统	142
4.1.1	组成和算法概述	142
4.1.2	姿态矩阵的更新计算	145

4.1.3	三通道捷联惯导系统的计算	148
4.2	捷联惯导系统的初始对准	151
4.2.1	粗对准	152
4.2.2	卡尔曼滤波法精对准	154
4.3	捷联惯导系统的动基座传递对准	156
4.3.1	主、子惯导误差	156
4.3.2	传递对准中的匹配量	157
4.4	地磁定位系统	162
4.4.1	地球磁场组成及分布描述	162
4.4.2	地磁匹配定位系统算法原理	164
4.4.3	地磁辅助惯性组合导航方法	167
4.5	天文定位系统	168
4.5.1	多星定位算法原理及误差分析	169
4.5.2	单星定位算法原理及误差分析	170
4.5.3	多传感器融合定位算法原理	174
	思考与练习	176
第5章	系统误差方程与导航解算	177
5.1	捷联惯导系统的误差	177
5.1.1	速度误差和位置误差方程	177
5.1.2	姿态误差方程	179
5.1.3	捷联惯导系统的误差传播特性	181
5.2	导航解算	182
5.2.1	姿态计算	183
5.2.2	加速度矢量变换算法	185
5.2.3	导航算法	185
5.3	卡尔曼滤波与辅助导航计算	186
5.3.1	卡尔曼滤波简单推导	186
5.3.2	几种最优估计和卡尔曼滤波基本方程	188
5.3.3	卡尔曼滤波中的技术处理	191
5.3.4	卡尔曼滤波理论在自主定位定向系统设计中的应用	202
5.3.5	卡尔曼滤波的推广	209
	思考与练习	210
第6章	自主定位定向技术的应用	212
6.1	大地测量	212
6.2	铁路检轨	215
6.3	陀螺测斜仪和陀螺经纬仪	217

6.4	车辆稳定系统	219
6.5	摄像陀螺仪	220
6.6	船舶惯性导航系统	222
6.7	自动驾驶仪	224
6.8	导弹滚转被动控制(陀螺舵)	228
6.9	飞机弹射座椅	229
6.10	搜救机器人	230
6.11	个人自主航位推算	230
6.12	消费电子	231
附录 常用符号术语及定位定向技术参数常用单位		233
参考文献		236

第1章 定位定向基础知识

定位这一概念源自军事领域,本义是“驱动军队抵达决战地点”。在导航领域中,定位是指确定某一事物在一定环境中的位置,如载体在某一地理坐标系下的位置等。常用的定位装置有全球卫星定位系统、惯性导航系统、定位雷达等。

定向是确定载体的运动方向或辨别地理方向的过程。常用的定向装置有指南针、陀螺罗经、陀螺寻北仪等。

定位定向技术是指载体在运动过程中精确确定其所在位置的地理坐标、北向方位及姿态角等参数的技术。定位定向技术广泛运用于陆用、航天、航空、航海等军事领域;随着定位定向技术和计算机技术的不断发展以及成本降低,近年来,定位定向技术逐步推广应用于智能机器人、汽车,以及地震、地籍、河流、油田、重力测量甚至某些精密检测设备中。因此,对定位定向技术的研究一直是各国研究的热点。

本章在假设载体为刚体的前提下,主要介绍定位定向的一些基础知识,讲述与载体空间位置、姿态、方位相关的地球特性、惯性技术的动力学和运动学基础等。

1.1 基本概念

定位定向技术分为自主定位定向与非自主定位定向两种。自主定位定向是指在定位定向过程中不与外界进行信息传输和交换、不依赖于任何外部设备,也不向外部辐射能量的自主式导航技术,具有隐蔽性好,不易受外界干扰影响、可全天候工作于空中地球表面乃至水下等优点,在军事应用领域具有重要作用。非自主定位定向是指在定位定向过程中需要有关的地面或空中设备相配后导航,精度较高,但隐蔽性差,易被干扰,军事应用受限。

导航是一个技术门类的总称,它是引导飞机、船舶、车辆以及机器人等运动物体(总称作运载体、载体)安全、准确地沿着选定的路线,准确到达目的地的一种手段。最基本导航参数为载体的即时位置、速度和姿态。导航包括定位、定向。

导航分两类:自主式导航,用于飞行器或船舶上的设备导航,有惯性导航、多普勒导航和天文导航等;非自主式导航,用于飞行器、船舶、汽车等交通设备与有关的地面或空中设备相配合导航,有无线电导航、卫星导航(GPS、GLONASS、Beidou、Galileo)。

1.2 地球参考椭球及地球重力场特性

1.2.1 地球的形状和时间的定义

在地球重力场中的运动物体都和地球发生联系。如图1-1(a)所示,地球表面形状



不规则。在描述其形状时,采用海平面作为基准。把“平静”的海平面延伸到全部陆地所形成的表面称为“大地水准面”。它所包围的几何体称为“大地体”或“地球体”。大地体的表面是地球重力场的一个等位面。由于地球内部质量分布不均匀,致使大地水准面成为一个有微小起伏的复杂曲面。

把地球看作具有半径为 R_0 的球体,这是一般工程技术中所采用的最简单的近似表示方法。国际上采用的地球半径 $R_0 = 6367.65\text{km}$ 。进一步精确近似地球为一个旋转椭球体,称其为参考椭球,长半轴 a 在赤道平面内,短半轴 b 和自转轴重合,如图 1-1(b) 所示。

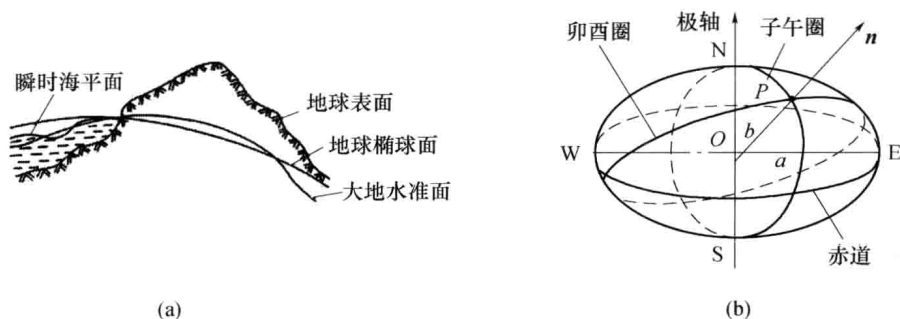


图 1-1 大地水准面与地球椭球体

目前不同国家和地区所采用的旋转椭球的参数是不同的,它们根据各自不同的地理条件选择不同的参数旋转椭球体,参考椭球的主要基本数据见表 1-1。

表 1-1 参考椭球的主要基本参数

名称(年份)	长半轴 a/m	扁率 e	使用国家或地区
克拉索夫斯基(1940)	6378245	1/298.3	苏联
克拉克(1866)	6378096	1/294.98	北美
海福特(1909)	6378388	1/297.00	欧洲、北美及中近东
WGS-84(1984)	6378137	1/298.257	全球 ^①

① WGS-84 是美国国防部地图局于 1984 年制定的全球大地坐标系,考虑了大地测量、多普勒雷达、卫星等的测量数据

表 1-1 中, e 为地球扁率(椭圆度),可表示成

$$e = \frac{a - b}{a} \quad (1-1)$$

由于地球是一个旋转椭球体,所以在地球表面不同地点其曲率半径也不相同。如图 1-1(b) 所示: P 点子午圈曲率半径是指过极轴和 P 点的平面与椭球表面的交线上 P 点的曲率半径; P 点卯酉圈是指过 P 点和子午面垂直的法线平面与椭球表面的交线,而 P 点卯酉圈曲率半径是指该交线上 P 点的曲率半径。即使在同一点 P ,它的子午圈曲率半径 R_m 与卯酉圈曲率半径 R_n 也不相同。在此推导从略,给出它们的表达式。

子午圈曲率半径为



$$R_m = \frac{a(1 - e_1^2)}{(1 - e_1^2 \sin^2 \phi)^{3/2}} \approx R_e(1 - 2e + 3e \sin^2 \phi) \quad (1-2a)$$

或

$$\frac{1}{R_m} \approx \frac{1}{R_e}(1 + 2e - 3e \sin^2 \phi) \quad (1-2b)$$

卯酉圈曲率半径为

$$R_n = \frac{a}{(1 - e_1^2 \sin^2 \phi)^{1/2}} \approx R_e(1 + e \sin^2 \phi) \quad (1-3a)$$

或

$$\frac{1}{R_n} \approx \frac{1}{R_e}(1 - e \sin^2 \phi) \quad (1-3b)$$

式中: e_1 为椭球的第一偏心率; ϕ 为地理纬度; $e_1^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2}$ 。

比较式(1-2a)和式(1-3a)可以看出, $R_n > R_m$ 。

由于地球是一个旋转椭球体, 所以地球表面不同的点至地心的直线距离也不相同。地球表面任意一点至地心的直线距离可按下式计算。

$$\begin{aligned} R &= a(1 - \alpha \sin^2 \phi - \frac{3}{8} \alpha^2 \sin^2 \phi - \dots) \\ &\approx a(1 - \alpha \sin^2 \phi) \end{aligned} \quad (1-4)$$

1.2.2 垂线、纬度、高程的定义

经度、纬度和高程(λ, ϕ, H)是近地航行载体的位置参数。在导航计算中, 纬度是十分重要的参数。地球表面某点的纬度是指该点的垂线方向和赤道平面之间的夹角。因为地球本身是一个椭球体, 形状、质量分布又极不规则, 所以纬度的定义显得比较复杂。地球表面某点常用的垂线和纬度定义分别有如下几种(图1-2):

1) 垂线的定义

地心垂线(几何垂线)——从地心通过所在点的径向矢量。

地理垂线(椭球法线)——沿大地水准面法线方向的直线。

天文垂线(重力垂线, 铅垂线)——沿重力 g 方向的直线。

引力垂线(质量引力垂线)——任一等势面的法线方向。

通常比较关心的是地理垂线和天文垂线, 它们之间的偏差一般不超过 $0.5'$, 因此在导航时可以忽略, 并把地理垂线和天文垂线看成是重合的。

2) 纬度的定义

地球纬度的定义有如下4种(分别对应于以上的4种垂线):

地心纬度——地心垂线与赤道平面之间的夹角 ϕ_e 。

地理纬度——地理垂线与赤道平面之间的夹角 ϕ_g 。

天文纬度——天文垂线(重力方向)和赤道平面之间的夹角 ϕ_a 。

引力纬度——引力垂线和赤道平面之间的夹角。

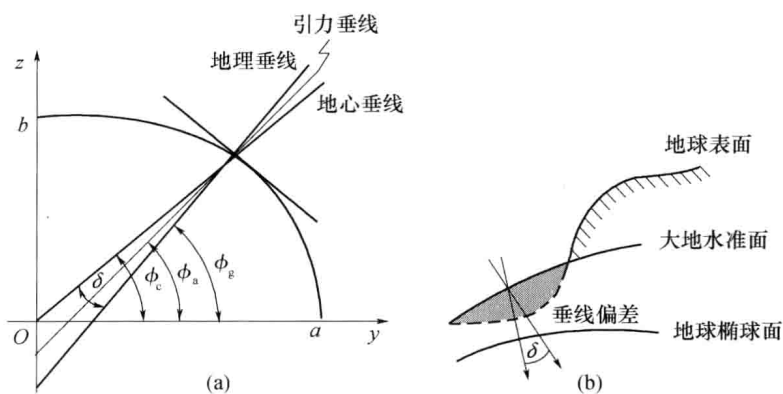


图 1-2 垂线、纬度、垂线偏差

因为地理垂线和天文垂线之间的偏差很小,所以地理纬度 ϕ_g 和天文纬度 ϕ_a 通常可看成是近似的。往往把这两种纬度统称为地理纬度。通常说的纬度 ϕ 是指地理纬度。

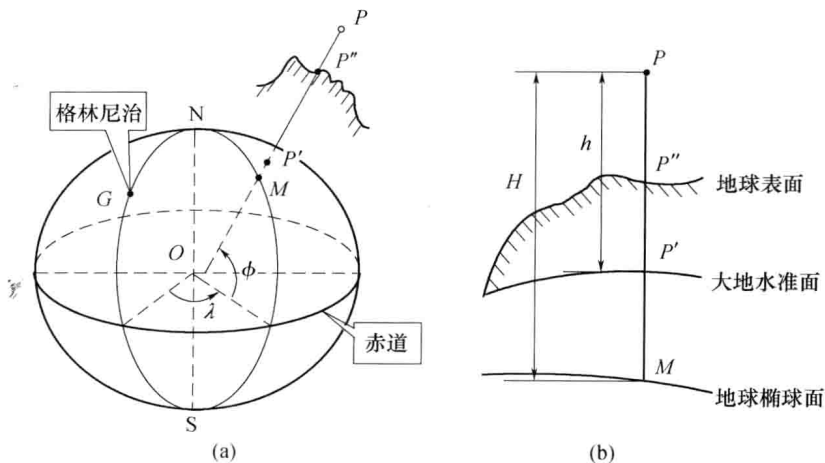
地心纬度 ϕ_c 和地理纬度 ϕ 之间存在一个角度差,称为地球表面的垂线偏差 δ ,可表示为

$$\delta \approx e \sin 2\phi$$

通常,导航中使用地理纬度,而在理论计算中又常以地心纬度来计算。在使用中,需对二者之间进行必要的换算。

3) 高程的定义

假设空中载体在 P 点(图 1-3),该点对应于参考椭球体的法线交参考椭球体于 M 点,设 PM 交大地水准线于 P' 点,交地球真实地形线于 P'' 点,那么 PM 称为飞行高度 H (简称高程), PP' 称为海拔高度 h (或绝对高度), PP'' 为相对高度, $P'P''$ 为当地的海拔高度, MP' 为大地起伏。严格来讲,无论哪种高度,都是指当地大地水准面法线方向的长度。为描述方便,通常用参考椭球面上的法线代替大地水准面法线进行测量计算。

图 1-3 高程 H 的定义



1.2.3 地球重力场特性

由于地球的吸引而使物体受到的力称为重力。地球表面 A 点单位质量在重力场的作用下所获得的加速度为重力加速度,通常用符号“ g ”表示。重力 g (确切讲是重力加速度)是引力 G (确切讲是引力加速度)和负方向的地球转动向心加速度(单位质量的离心惯性力) F 的合成(图 1-4),即

$$g = G + F$$

式中: g 为重力矢量; G 为地心引力矢量; F 为地球自转离心力矢量, $F = -\Omega \times (\Omega \times R)$, 其中 Ω 为地球转动(包括自转和公转)角速度,国际天文学协会(IAU)提供的数值为 $\Omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad/s} \approx 15.04108(^{\circ})/\text{h}$ 。

由于离心力 F 比重力 g 小得多,所以 $\Delta\theta$ 角只有几角分。例如,当 $\phi = 45^{\circ}$ 时, $\Delta\theta$ 约为 $9'$ 。

当考虑地球为椭球体时,巴罗氏通过复杂的推导得出任一纬度下重力加速度的表达式为

$$g_{\phi} = g_0(1 + 0.0052884 \sin^2\phi - 0.0000059 \sin^2 2\phi)$$

式中: $g_0 = 978.049 \text{ cm/s}^2$ 。

在地球上随着纬度和高度的变化,重力加速度 g 的大小和方向也要变化,其通用表达式(重力数值式)为

$$g = g_0(1 + 0.0052884 \sin^2\phi - 0.0000059 \sin^2 2\phi) - (0.00000030855 + 0.000000022 \cos 2\phi)h + 0.000000072(h/10^3)^2 \quad (1-5a)$$

式中: $g_0 = 9.78049 \text{ m/s}^2$; h 的单位为 m 。

通常,重力数值式还可取为

$$g = g_0 \frac{R^2}{(R+H)^2} \approx g_0 \left(1 - 2 \frac{H}{R}\right) \quad (1-5b)$$

g 的大小和方向还取决于 A 点附近物质密度的分布状况,而且也可能随时间受地质变化的影响。实际测量数据表明,100 年重力 g 的方向变化小于 $10''$ 。

由于地球质量分布不规则造成的 g 的实测值和计算值之差称为重力异常。它是研究地球形状、地球内部结构和重力勘探,以及修正空间载体的轨道的重要数据。

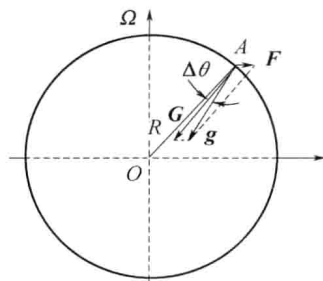


图 1-4 重力矢量图

1.3 地球磁场特性

地球磁场与地球重力场一样是地球的固有物理场,具有无源、无辐射、全天候、全地域、自主、可靠、简便、抗干扰能力强等优点,一直是不可缺少的基本导航定位手段。地磁场各要素更是与空间紧密相关的函数,地球上的每个地点的地磁场矢量与其所在的空间位置基本上呈一一对应的关系,因此可以通过载体所在地的地磁场矢量特征来推算出载体所在的空间位置。



地球磁场由基本磁场与变化磁场两部分组成。基本磁场是地磁场的主要部分,起源于地球内部,比较稳定,变化非常缓慢;变化磁场包括地磁场的各种短期变化,与电离层的变化和太阳活动等有关,并且很微弱。

1.3.1 地球磁场的要素及其分布特征

地磁场的分布与其他磁场分布相似,也存在 S、N 两极。如图 1-5 所示,地球磁极在北半球的为 S 极,在南半球的为 N 极。地球两个磁极与地理极靠近,其位置各在 75°N 、 105°W 以及 67°S 、 143°E 附近。磁轴与地球自转轴夹角约为 11.5° 。两极处的总磁场强度为 $0.6 \sim 0.70\text{e}$,赤道处的总磁场强度为 $0.3 \sim 0.40\text{e}$ (在无磁性介质存在下, $10\text{e} = 1\text{Gauss} = 10^{-4}\text{T}$)。

地球表面上任意一点的地磁场可由地磁场要素来描述。如图 1-6 所示,设观测点在 O 处,并以 O 点为原点建立地理坐标系 $OXYZ$, X 轴指向北, Y 轴指向东, Z 轴垂直指地。

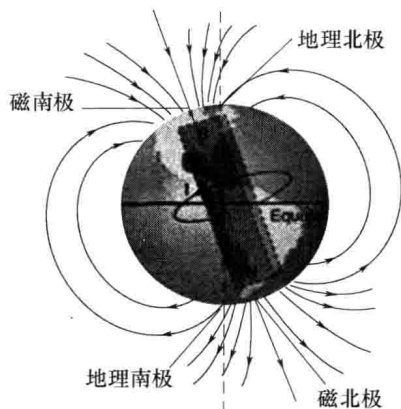


图 1-5 地球磁场分布示意图

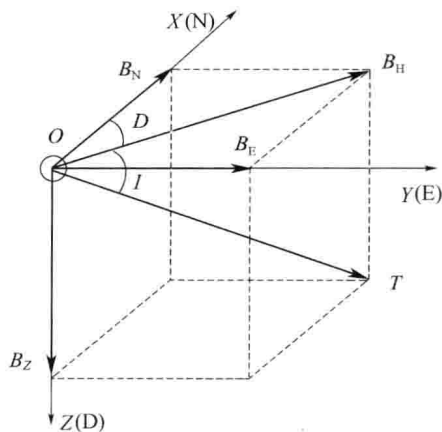


图 1-6 地磁要素图

地磁场强度 T 在 X 轴上的投影 B_N 称为地磁场的北向分量; T 在 Y 轴上的投影 B_E 称为东向分量; T 在 Z 轴上的投影 B_Z 称为地磁场的垂向分量。 T 在水平面 $O-XY$ 的投影 B_H 称为地磁场的水平分量。地磁水平分量 B_H 和垂向分量 B_Z 所在平面称为磁子午面,磁子午面与地理子午面 $O-XZ$ 平面的夹角称为磁偏角,用 D 表示,并规定其东偏为正,西偏为负。地磁场强度 T 与水平面 $O-XY$ 的夹角称为磁倾角,用 I 表示。上述 T 、 B_H 、 B_N 、 B_E 、 B_Z 、 D 、 I 统称为地磁场的七要素,可作为定位定向的参考量。七要素中只要知道三个独立的要素,就可以求其余的要素,常用的是磁倾角、磁偏角和水平分量。七要素间有如下关系:

$$\begin{cases} B_H = T \cos I, B_Z = T \sin I, I = \arctan(B_Z/B_H) \\ B_N = B_H \cos D, B_E = B_H \sin D, D = \arctan(B_E/B_N) \\ T^2 = B_H^2 + B_Z^2 = B_N^2 + B_E^2 + B_Z^2 \end{cases} \quad (1-6)$$

地磁要素在世界各地不完全相同,其分布呈现一定的规律。世界上各国家为了了解其领土内地磁要素的分布情况和变化规律,在其领土内设立地磁观测点测量地磁要素,将测定结果按类绘制等值线图,形成不同国家地域的地磁图。



中国的地磁要素大致分布情况:国境内地磁强度总量范围 0.41 ~ 0.60Oe;水平分量 B_H 由南至北从 0.40 降至 0.21Oe;垂直分量 B_Z 由南至北从 -0.10 增至 0.56Oe;磁倾角 I 由南至北从 -10° 增至 70°;磁偏角 D 由东至西从 -11° 增至 5°, 零偏线在中国中部偏西处, 由北向南经过甘肃的安西以及西藏的得宋。

1.3.2 地球磁场的解析模式

在研究地磁场时,了解地磁场的分布和变化情况首先需要建立地磁场及其长期变化分布的数学解析模式,即地磁场的数学模型。最简单的地球磁场解析模式是均匀磁化球体的一级近似模式,还有偶极子模式和球谐模式。

作为对地磁场的一级近似,是把地磁场看成一个均匀磁化球体或地心偶极子的磁场,如图 1-7 所示。在物理学中,偶极子磁场与均匀磁化球体磁场等同。在上述近似条件下,若不考虑磁轴与地球自转轴的偏离问题,地磁强度分量可用以下解析式来描述:

$$\begin{cases} B_H = B_N = \mu_0 M \cdot \cos\varphi / 4\pi R_e^3 \\ B_E = 0 \\ B_Z = 2\mu_0 M \cdot \sin\varphi / 4\pi R_e^3 \end{cases} \quad (1-7)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; φ 为磁纬度; M 为地球磁场磁矩; R_e 为等效均匀磁化球体的等效半径。

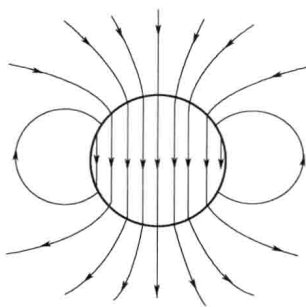


图 1-7 均匀磁化球体的磁场分布

由式(1-7)可得总磁场强度为

$$T = \sqrt{B_Z^2 + B_H^2} = \sqrt{\left(\frac{\mu_0 M}{4\pi R_e^3}\right)^2 (1 + 3 \sin^2 \varphi)} \quad (1-8)$$

研究表明,由上述近似公式计算的结果与实际观测值相比基本变化规律相符,只有个别地方有较大的差异。因此,用均匀磁化球体的磁场来描述地球磁场,是可以作为一级近似值的。

1.3.3 地球磁场变化特性

地磁变化场主要包括长期变化和短期变化。地球主磁场随时间的缓慢变化称为地磁场的长期变化。地球磁场长期变化是一个全球性现象。学者们主要是通过对世界各地长期、连续的地磁长期变化的观测数据的平均值而进行研究分析。



国际地磁场的参考场(IGRF)是以地球的主磁场,即地球的基本磁场为参考场。对于地磁导航中的关键技术之一——地磁数据库的制备,要考虑到长期变化的影响。因此,在制备地磁数据库时,同时要得到该地磁基准图的数据的年变化率,在用实测数据进行匹配时要根据变化率对实时的基准图进行修正处理。

地磁场的短期变化主要起源于电离层和磁层的电流体系。它可以分为平静变化和扰动变化。平静变化基本上是由周期性的规则变化所组成;扰动变化则主要是由非周期性的无规则变化所组成。

在地磁导航中,对于载体上地磁探测仪实时获取地磁数据序列的过程,必须对获得的实时数据进行基于短期变化磁场的修正,以确保实测数据的准确性。而对于该修正方案,主要研究的是基于周期性的日变化因素进行修正。这些日变化因素即为针对短期变化场中的平静变化及扰动变化中的有规律的周期变化因素。

1.4 恒星特性及天球坐标系

天文导航是根据天体来测定载体位置和航向的导航系统。描述载体的位置坐标和测量天体的方位坐标离不开天体的特性和坐标系。本节主要介绍天文导航的基本知识与相关坐标系的数学描述方法等,为能更好地理解天文导航的定位定向方法作为铺垫。

1.4.1 恒星的特性

恒星的特性如下:

- (1) 恒星间的相对位置在较长时间内看不出明显变化,相对位置稳定,便于认星。
- (2) 恒星的亮度和颜色一般比较稳定,在一个星座中最亮的一般是 α 星。
- (3) 由于地球公转,在同一地区各星座的出现随着季节有规律地变化。

1.4.2 天球及天球坐标系

无论在什么地方,所能看到的天空总是像一个巨大的空心半球罩在头顶上,使得以为自己或地球位于球心位置,天空中的各种天体则像分布在这个球的内表面上。而在天文学中,假定整个天空是以地球球心为中心、以无限长为半径的球体,称为天球。

天球坐标系在天文导航中起着重要的作用,是观测天体的基础,坐标系的选取直接影响天文导航的计算精度和复杂程度。下面介绍几种常用的天球坐标系。

1. 天球上基本点、线、圆

天球是以地球球心为中心、半径无限大的想象球体。所有天体不管其距地球的远近,一律把它们投影到天球的球面上。确定天体的位置,就是确定天体在天球上的位置。虽然天球并不是宇宙的准确模型,但很有用,一方面它给出了不同天体方位的一个方便、直观的表达方式,另一方面可以使用球面几何进行相关的计算。

天球上的基本点、线、圆是由地球上的基本点、线、圆扩展到天球上而形成的。如图 1-8 所示,将地轴无限延长与天球相交所得的天球直径叫做天轴。天轴与天球面相交的两点叫做天极(天南极 P_S 、天北极 P_N)。将赤道平面无限扩展与天球球面相交的大圆叫做天赤道。将测者(D)的铅垂线无限延长与天球相交的两点,在测者头顶正上方的一



点叫做天顶点(Z),在测者正下方的一点叫做天底点(n),这两者的连线叫做测者垂直线(Z_n)。在地球上,过测者和地球两极的大圆叫做测者子午圆。子午圈中经过测者位置的半个大圆称为上子午圈,另外的半个大圆称为下子午圈。过地球中心垂直于测者垂直线的平面扩展与天球球面相交的大圆叫做测者真地平圈。测者真地平圈把天球等分为两个半球:包含天顶的半球称为上天半球,上天半球的天极叫做极高;天底点所在的半球称为下天半球,下天半球的天极叫做低极。测者真地平圈与测者子午圆相交于两点:靠近天北极的一点为正北点;靠近天南极的一点为正南点。真地平圈与天赤道相交于两点,测者面向正北:右手方向的一点为正东点(E);左手方向的一点为正西点(W)。

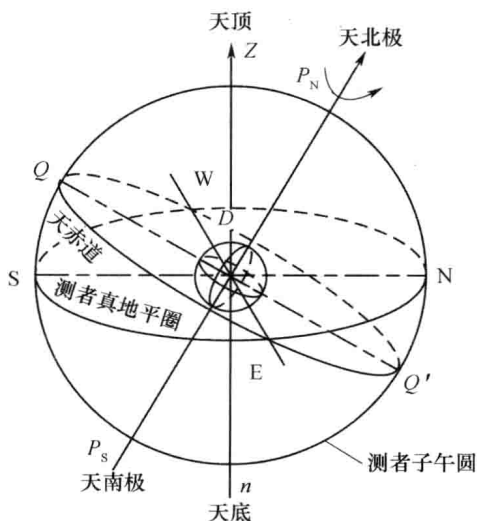


图 1-8 天球

2. 赤道坐标系

天球坐标系由基本大圆、基本点和天体坐标度量方式组成。由于所选择的基本大圆和基本点不同,可得到不同的天球坐标系。

赤道坐标系是以天赤道作为基本大圆构造的天球坐标系,根据坐标原点的不同又可分为第一赤道坐标系和第二赤道坐标系。

1) 第一赤道坐标系

(1) 坐标系的组成:

① 基本大圆:天赤道。

② 坐标原点:天赤道和测者子午圆在午半圆的交点 Q' 。

(2) 坐标:

① 天体地方时角(LHA):测者午半圆到天体时圆在天赤道上顺时针所夹的弧距,如图 1-9 所示。天体时圆为过天体和南北极的半个大圆。从原点 Q' 开始顺时针度量的弧长 $Q'D$,即过天子午圆与过天体的赤经圈所夹的角,叫做时角,用 t 表示,范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

② 天体赤纬和天体极距:天体赤纬是从天赤道到天体在天体时圆上所夹的弧距,用 δ 表示;天体极距是从天极到天体在天体时圆上所夹的弧距,用 Δ 表示。天体赤纬和天体极距的代数和为 90° 。