

研究生教材

国防科技大学研究生教材专项经费资助

自主导航理论与应用

ZIZHU DAOHANG

LILUN YU YINGYONG

胡小平 主编

国防科技大学出版社

研 究 生 教 材

国防科技大学研究生教材专项经费资助

自主导航理论与应用

主 编 胡小平

副主编 吴美平

编 著 任 莹

刘恒春

郝小宁

国防科技大学出版社

湖南·长沙

内 容 简 介

本书主要论述了自主导航的基本理论及其在飞行器中的应用。在简要介绍自主导航的基本概念、坐标系统与时间系统的基础上,详细论述了航天器天文导航理论,以及在不同应用环境下的数学模型、误差因素与对策方案;卫星导航系统的工作原理、GPS接收机的工作原理,以及GPS在航天器定轨和测姿中的应用;平台式惯导系统、捷联式惯导系统的导航理论及其工作原理,分析了惯导系统的误差特性,并系统地论述了组合导航系统的基本原理。

本书力求反映当前自主导航技术的最新理论,突出工程实践与理论发展相结合。本书适用于自主导航技术及相关专业的研究生教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

自主导航理论与应用/胡小平主编. -长沙:国防科技大学出版社,2002.10
ISBN 7-81024-904-5

I.自… II.胡… III.自主制导 IV.V448.131

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 075860 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4572640 邮政编码:410073

E-mail: gfdcb@publ.cs.hn.cn

责任编辑:唐卫斌 责任校对:张静

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

开本:787×960 1/16 印张:14 字数:274千

2002年10月第1版第1次印刷 印数:1-2000册

*

定价:22.00元

前 言

导航技术是涉及自动控制、机械工程、计算机、微电子学、光学、数学、力学等多学科的高技术,是实现飞行器特别是航天器飞行任务的关键技术,也是巡航导弹、弹道导弹、制导弹药等精确制导武器的核心技术,对于提高武器装备的机动性、反应速度和远程精确打击能力具有重要意义,在海、陆、空、天等现代高技术武器及武器平台中得到广泛的应用。美、俄、英、法等军事强国均投入巨资发展导航技术。

随着武器系统性能的不断提高,军事战略思想也在不断地发展,武器系统对导航技术提出更高的技术要求,自主导航技术就是适应军事战略和武器系统的新要求发展起来的。自主导航技术是飞行器在不依赖于外部信息的条件下实现精确导航的关键技术,它大大提高了武器系统的机动性、隐蔽性、强抗干扰性和生存能力。

特别是随着军事高技术武器的发展,空间作战成为未来军事思想发展的主流。天基网是实现未来空间作战任务的信息平台和天基武器平台,要求组网卫星在接受地面指挥中心的指挥调度后,能够实现卫星的自主轨道转移与定位,同时卫星具有自主导航控制的功能,能提高天基网的自主性与生存能力。航天器自主导航技术可以实现卫星不完全依赖于地面系统支持(只需定期检查和必要时的干预)的自主运行,不但可以有效地降低地面支持成本,从而降低航天计划的费用,而且提高了卫星的生存能力。如在战时,当地面支持系统遭受破坏或来自敌方的人为干扰情况下,仍能实现卫星的轨道确定和轨道保持的功能,保证天基网的正常运行,从而保证空间作战任务的进行。

本书深入地论述了自主导航的基本理论及其在飞行器中的应用。全书共分六章:第一章简要介绍自主导航的基本概念及其在飞行器中的应用,并着重介绍了导航理论常用的坐标系定义和时间系统;第二章详细论述了航天器天文导航

11-25

理论,分析了不同应用环境下的应用模型,详细分析了天文导航的误差因素及其对策方案;第三章介绍了卫星导航系统的发展过程和各系统的特点与应用情况,详细论述了卫星导航系统的工作原理和 GPS 接收机的工作原理;第四章介绍了 GPS 在航天器导航中的应用,详细推导了利用 GPS 定轨的数学模型,并介绍了 GPS 在航天器姿态确定中的应用;第五章系统地论述了平台式惯导系统、捷联式惯导系统的导航理论及其工作原理,并详细分析了惯导系统的误差特性;第六章介绍了组合导航系统的基本原理。

本书由胡小平教授主编,第一章由郝小宁、胡小平编著,第二章由任萱编著,第三章由胡小平编著,第四章由吴美平、胡小平编著,第五章、第六章由刘恒春、吴美平编著。全书由胡小平策划并定稿。

本书力求反映当前自主导航技术的最新理论,突出工程实践与理论发展相结合。部分内容是作者多年研究的成果。本书适用于自主导航技术及相关专业的研究生教材,也可作为相关专业技术人员的参考书。

自主导航技术随着军事技术的发展得以迅速发展,囿于编者的实践经验和认识水平有限,本书难免存在错误和不妥之处,敬请读者指正。

在编著本书过程中,作者参考了装备指挥技术学院张守信教授、南京航空航天大学袁信教授及其国防科大其他教师的研究成果和部分研究生的论文,并得到他们的大力帮助;同时,国防科技大学出版社唐卫葳、卢天祝同志对本书的出版给予极大的支持与帮助,在此一并表示诚挚的感谢。

作 者

2002 年 4 月

目 录

前 言

第一章 概 论

§ 1.1 引 言	(1)
§ 1.2 常用坐标系	(5)
§ 1.3 时间系统	(18)
参考文献.....	(20)

第二章 航天器天文导航

§ 2.1 概 述	(21)
§ 2.2 天文导航中的位置面	(29)
§ 2.3 简化的量测方程	(33)
§ 2.4 天文导航的误差分析及最优观测方案	(39)
§ 2.5 时钟误差及测量时间间隔的校正	(47)
§ 2.6 有冗余测量时的状态估值	(49)
参考文献.....	(50)

第三章 卫星导航

§ 3.1 概 述	(51)
§ 3.2 卫星导航定位原理	(54)
§ 3.3 导航星全球定位系统概述	(59)
§ 3.4 GPS 定位系统基本原理	(66)
§ 3.5 差分 GPS 与相对定位法	(98)
参考文献.....	(107)

第四章 GPS 在航天器导航中的应用

§ 4.1 概 述	(109)
§ 4.2 GPS 在航天器轨道确定中的应用	(114)
§ 4.3 GPS 在航天器姿态确定中的应用	(123)
参考文献	(132)

第五章 惯性导航

§ 5.1 概 述	(135)
§ 5.2 平台式惯导系统的工作原理	(143)
§ 5.3 捷联式惯导系统的工作原理	(155)
§ 5.4 惯性导航系统的误差分析	(171)
参考文献	(183)

第六章 综合导航

§ 6.1 概 述	(185)
§ 6.2 阻尼式综合导航系统	(186)
§ 6.3 最优综合导航系统	(188)
§ 6.4 GPS/惯性组合导航系统	(194)
参考文献	(211)

附录 A 勒让德函数、缔合勒让德函数及其一、二阶导数	(213)
----------------------------------	-------

附录 B 系统状态矩阵 A_G 中各元素的表达式	(216)
----------------------------------	-------

1.1.2 航天器的自主、非自主导航

导航方法通常分为自主与非自主两大类。所谓自主导航,其严格的定义是:运动体完全依靠所载的设备,自主地完成导航任务,和外界不发生任何光、电联系;否则称为非自主导航。因此自主导航隐蔽性好,工作不受外界条件(自然、非自然)的影响。

航天器导航也分为自主和非自主两大类。非自主导航是依靠地面站的测量,通过数据处理,以非实时方式进行的,这种方法存在很大的局限性。首先要依靠地面站,而一个地面站跟踪航天器的时间是很短的,例如若要求地面站100%时间连续跟踪航天器,对300km轨道高度的地球卫星来说,至少需要56个地面站,而且这些站都需要理想地分布于全世界,其中大多数势必在国外、或海上、或高山等地,这样建设、维修和运行费用就相当巨大;其次,非自主导航实时性差,对某些航天器将丧失非常有价值的功能,大量积压日益猛增的传输数据(如图像数据),甚至使数据失去作用;另外,非自主导航易受外界的影响,运行安全性差,不宜用于军事用途的航天器。随着星载敏感器技术的发展以及星载计算机功能越来越强大,航天器的自主导航也得以迅速发展,其研究范围不断扩展。虽然,航天器自主导航至今尚无一个完全统一的定义,但是在20世纪70年代初,美国学者 Lemay^[4]提出用下列四个特点来代表航天器自主导航的概念:(1)自给或者独立;(2)实时;(3)无发射;(4)不依靠地面站。

1.1.3 现有的航天器自主导航系统

现有的航天器自主导航系统按其工作原理可分为以下四种^[3]:

(1) 测量对天体能敏感的角度来确定航天器的位置。该方法属于天文导航方法,这种天文导航方法一般可以通过测量恒星和行星的位置来实现。天文导航因基本观测量为角度量,故该方法不仅能确定轨道位置,同时也能提供三轴姿态信息。

(2) 对已知信标测量。这种自主导航系统要测量航天器到四个或更多已知点的伪距、伪距变化率、距离差(后两者利用多普勒效应)来确定航天器的位置和速度,通过载波相位测量来确定航天器的姿态信息。已知信标通常为卫星,所以该方法也称为卫星导航,属于这类自主导航方法有美国的GPS(Global Positioning System,即全球定位系统)和俄罗斯的GLONASS(Global Navigation Satellite System,即全球导航卫星系统)等。GPS等导航卫星全球定位系统,具有全球和全天候、高精度、实时三维的测定位置和速度的能力,显示出了它在导航中的优越性,以致有人称它为导航技术的新突破。虽然采用这类卫星导航要测量航天

器与导航卫星的伪距等观测量,导航卫星需要地面监控站的跟踪,而且航天器要定期获得导航卫星的修正信号,所以按自主导航的严格定义,它不是完全自主的。但人们仍然把这种导航系统列为自主导航系统的范畴加以研究,并已开发了许多基于卫星导航自主导航方法^[11]。

(3) 测量地面目标基准来确定航天器的位置。这种导航原理要依靠地面陆标来测量,而这些陆标从空间是可以被识别出来的。在地球表面的湖泊、山峰等可作为陆标,陆标分为已知和未知的两种。这基本上属图形匹配导航,这种自主导航方法特别适用于图像处理的低轨道资源卫星,测量方式有光学、红外等。

(4) 惯性导航方法。惯性导航的固有特点是自主性,它主要由惯性测量装置(陀螺和加速度计)、计算机和稳定平台(捷联式为“数学”平台)组成。由陀螺和加速度计测量航天器相对于惯性空间的角速度和线加速度,通过计算机进行导航解算,从而获得航天器相对某一基准的导航参数。

自主导航技术从 20 世纪 70 年代开始在航天活动中进行了成功应用,例如在美国的林肯试验卫星-6、阿波罗飞船登月、前苏联的飞船和空间站的交会对接等航天飞行任务。目前比较典型的自主导航系统有以下几种:

- (1) 多用途姿态确定和自主导航;
- (2) 空间六分仪;
- (3) 卫星导航系统——GPS 和 GLONASS;
- (4) 利用陆标跟踪器的低轨道导航系统。

对于低轨道航天器,卫星导航的精度最高。GPS 标准定位精度为 25m,有 SA(Selective Availability 选择可用性,即一种让非特许用户、非军事用户不能获得高精度位置的方法,其影响到测量及发送的卫星轨道参数,从而导致位置、速度和时间的精度降低。虽然 GPS 已在 2000 年 5 月 1 日取消了 SA 政策,但在不利于美国国家利益的情况下,SA 政策仍会实施。)时定位精度为 100m, GLONASS 的定位精度约为 20m(GLONASS 信号及数据信息不会实行 SA);其次为陆标跟踪器,它的导航位置精度约 100m(对低轨道卫星);空间六分仪的导航位置精度约 250m;多用途姿态确定和自主导航位置精度为 1km,这种导航方法随轨道高度增高,位置误差将增大。

每一种导航方法,在相应飞行条件下各有其优缺点。惯性导航自主性强,但由于惯性器件误差使得系统误差随时间不断积累,在长时间的航天飞行中是很不利的。天文导航的优点是测量是离散的,误差不积累,但天文测量受到天体能见度的限制。由于天文导航的精度与航天器的飞行状态无关,因而在航天飞行器的导航中有着强大的生命力。如果将各种导航方法综合使用,即为组合导航方法。组合导航方法可以集中各种导航方法的优点,避免某些导航设备的缺点,

提高导航的准确性和可靠性,是比较理想的导航方法。把两种以上导航系统综合起来,应用最优估计理论,形成最佳综合导航系统或最优容错综合导航系统已成为导航技术的发展方向。载人飞船的自主导航系统就是一个典型的应用实例。

以美国“水星”飞船和前苏联“东方号”飞船为代表的国外第一代载人飞船以及以“双子座”飞船为代表的第二代载人飞船均采用非自主导航技术;第三代载人飞船以“阿波罗”和“联盟号”为代表。阿波罗载人飞船的 GNC (Guidance Navigation and Control) 系统为了确保登月和返回地面的可靠性,采用了平台式惯导系统,增加了空间六分仪导航系统,并以捷联式惯导系统作备份。欧空局和日本正在分别研制的“赫尔姆斯”和“希望号”航天飞机,其 GNC 系统采用高精度捷联式惯导系统,同时采用 CCD 星敏感器对 GNC 系统的惯性测量单元进行在轨标定;用 GPS 系统提供导航手段,精确确定飞船的轨道位置和速度;采用冗余船载 GNC 计算机实现故障自动诊断、隔离和系统重构,从而大大提高了系统的可靠性、安全性和自主性。

飞船在长时间的轨道运行期间,惯性测量装置的陀螺漂移是主要的测量误差源。因此,一般用天文方法(例如利用星跟踪器对恒星测量)来定期校准惯性测量单元的误差,使其积累误差影响降到最低限度,以保证飞船有较高的姿态精度。如前所述,在近地轨道上运行的载人飞船,其轨道位置和速度与飞船的姿态是相互耦合的。飞船进行轨道机动时,一般要已知飞船相对于轨道坐标的姿态信息,而这种姿态信息与飞船的位置是相关的。目前国外已经发射的载人飞船,其轨道确定方法在一般情况下仍是由地面站对飞船进行跟踪遥测,然后进行数据处理,得到其位置和速度信息。但在实际飞行过程中,由于地面覆盖和可测控区的局限性,加上各种未知的干扰因素,飞船不可能获得很高的导航精度,因此要求载人飞船具有自主导航能力。这样飞船可充分利用船上测量仪表获得信息,给出飞船的姿态信号,同时形成导航信息。

国外已发射的和正在研制中的载人航天器,为了提高系统的可靠性,其 GNC 系统采用了冗余技术和自主导航技术。一般说来,载人飞船导航系统由下列测量系统和部件组成:惯性平台系统、捷联式导航系统、红外地球敏感器、空间六分仪、星跟踪器、多普勒测距仪等。这种综合导航系统由多套系统互为备份。当局部出现故障时,可以进行故障隔离、结构重构,而不致影响系统功能。在正常运行时,利用表决系统增加系统可信度。这种导航系统将惯性导航与天文导航等结合起来,可以发挥各自的优点,提高导航精度,完成飞船的各项飞行任务。

§ 1.2 常用坐标系

航天器自主导航涉及到的坐标系有航天器的坐标、已知卫星信标的坐标、地面基准目标的坐标、天体的坐标等等。地面基准目标的坐标显然应在地球坐标系(其与地球固连、随地球一起运动)内表示。但航天器和作为已知信标的卫星不随地球自转,它在地球的引力作用下绕地球旋转,如在地球坐标系内表示它的运动方程(从而给出它的位置)将会十分复杂,故它们的位置通常是在惯性坐标系中给定,天体的位置用以地心或日心为原点的球面坐标来表示。而导航解算必须在同一坐标系中进行的,这就需要进行各种坐标系之间的转换,下面对与航天器的自主导航相关的坐标系做一简略的介绍。

1.2.1 地球几何形状与重力场

由于地球绕其极轴转动,所以赤道各处的地球半径较极轴方向的半径长,地球类似一个旋转椭球体,但地球表面有高山、盆地,它的真实形状是很不规则的。这种不规则的真实球体很难用数学模型表达,所以在导航中不用它来描述地球形状。

海洋中各处的海平面与该处重力矢量相垂直,若设想地球被海洋全部包围,则各处海平面所形成的地球形状称为大地水准体,它在各处的局部表面称为大地水准面。大地水准体体现了地球各处重力矢量的分布情况,且因地球各处经纬度的测量与重力测量有关,所以用大地水准体表示地球是比较合理的。但地球形状不规则,各处质量不均匀,大地水准体还只是一个近似旋转椭球体,仍不能用数学模型来表达。

在测量各处大地水准体的基础上,采用差异的平方和最小的准则,可以将大地水准体用一个有确定参数的旋转椭球体来逼近代替,这种旋转椭球体称为参考旋转椭球体,简称参考椭球或椭球。

一、参考椭球体介绍

参考椭球的赤道平面是圆平面,所以参考椭球可以用赤道平面半径(即长半径) R_e 和极轴半径(即短半径) R_p 来描述,或用长半径 R_e 和椭圆度(扁率) f 来描述:

$$f = (R_e - R_p) / R_e \quad (1.1)$$

还用偏心率 e 来描述参考椭球体的椭圆程度,即第一偏心率:

$$e = \frac{\sqrt{R_e^2 - R_p^2}}{R_e} \quad (1.2)$$

第二偏心率:

$$e' = \frac{\sqrt{R_e^2 - R_p^2}}{R_p} \quad (1.3)$$

直到目前为止,各国选用的参考椭球已有十余种,但大部分参考椭球都仅在局部地区测量大地水准面的基础上确定的,因而仅适用于某些局部地区。世界上部分参考椭球列于表 1.1。

表 1.1 世界上部分参考椭球参数

名 称	$R_e(\text{m})$	$1/f$	使用国家或地区
克拉索夫斯基(1940)	6378245	298.3	苏联
1975 年国际会议推荐的 参考椭球	6378140	298.257	中国 ^①
贝塞尔(1841)	6377397	299.15	日本及中国台湾
克拉克(1866)	6378206	294.98	北美
海福特(1910)	6378388	297.00	欧洲、北美及中东
WGS-84(1984)	6378137	298.257	全球 ^②
SGS-85(1985)	6378136	298.257	苏联 ^③

① 我国在 1980 年前采用克拉索夫斯基椭球,1980 年后采用此椭球;

② GPS 采用的参考椭球;

③ GLONASS 采用的参考椭球。

二、三种纬度

由于地球不是一个正球体,真正的地球表面不同于旋转椭球面,这是由于地球内部质量分布的不规律性和地球自转造成的。一般来说,地球上某点 P 的向径(地心到该点的直线)方向、 P 点的参考椭球面法线方向和 P 点的铅垂线(重力)方向互不重合,见图 1.1。因此,在精密的导航工作中应区分三种纬度:

(1) 地心纬度 Φ' ,这是 P 点的地心向径和地球赤道面的交角;

(2) 大地纬度 B ,这是通过 P 点的参考椭球体法线和地球赤道面的交角;

(3) 天文纬度 Φ ,这是 P 点的铅垂线和地球赤道面的交角,通常天文纬度被采用为地球纬度。

天文观测只能定出天文纬度 Φ ,地心纬度 Φ' 可按下式由天文纬度算得:

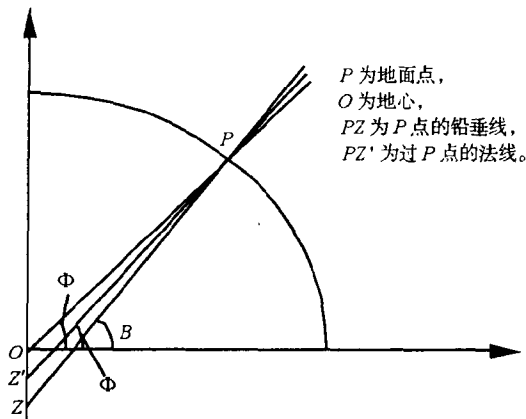


图 1.1 三种纬度关系示意图

$$\Phi' - \Phi = 1132.6267'' \sin 2\Phi + 1629'' \sin 4\Phi - 0.0026'' \sin 6\Phi \quad (1.4)$$

三、地球重力场

地球周围空间的物体都受到地球重力的作用,地球重力在地球周围形成重力场。地球表面 P 点的重力 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 (即单位质量的离心惯性力 $\Omega \times (\Omega \times R)$) 的合成 (见图 1.2), 即

$$g = G - \Omega \times (\Omega \times R) \quad (1.5)$$

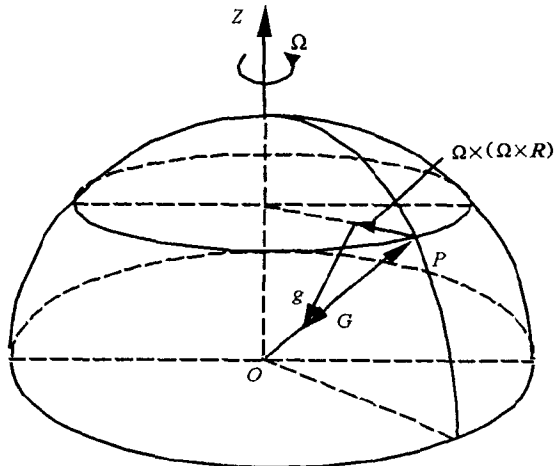


图 1.2 重力矢量图

式中, R 为 P 点相对地球中心的位置矢量, Ω 为地球转动角速度矢量, 国际天文学协会(IAU)提供的数据值 $\Omega = 7292115.1467 \times 10^{-11} \text{ rad/s} \approx 15.04108^\circ/\text{h}$ 。

按照参考椭球参数, 理论上可计算出不同纬度处的重力。WGS-84 全球大地坐标系体系选用的重力解析式如下:

$$g = g_e(1 + k \sin^2 B)/(1 - e^2 \sin^2 B)^{1/2} \quad (1.6)$$

式中, $k = (R_p \cdot g_p / R_e) - 1$; g_e 和 g_p 分别为参考椭球赤道和极点的理论重力; B 为大地纬度; e 为参考椭球体第一偏心率。

WGS-84 的重力数值式为

$$g = 978.03267714 \times \frac{1 + 0.00193111185138639 \sin^2 B}{(1 - 0.00669437999013 \sin^2 B)^{1/2}} \quad (1.7)$$

由于地球形状不规则, 质量分布不均匀, 所以地球上某点实际测量的重力数值与理论值有差别, 这种差别称为重力异常。实测的重力方向(大地水准面的铅垂方向)与该点在参考椭球处的法线方向也不一致, 这种偏差称为垂线偏差。常用南北方向和东西方向的两个偏斜角(ξ 和 η)来表示垂线偏差 ξ , 就是天文纬度与大地纬度的夹角, 垂线偏斜一般为角秒数量级, 通常都在“ ± 2 ”的范围之内, 与 g 有关的精密导航方法(例如高精度惯性导航)必须考虑这种影响。

1.2.2 天球坐标系

由于各个天体并不在同一球面上, 而且与地球上的观测者之间的距离彼此相差很大。如果在球面上作一些假想的点和弧段后, 利用它们来确定天体的视位置, 为此在天文导航中引入天球的概念: 以空间任一点为中心, 以任意长为半径(或把半径看作数学上的无穷大)做成的圆球称为天球。天体在天球上的投影, 即天球中心和天体的连线与天球的交点, 称为“天体在天球上的位置”, 或称为天体的视位置。一般将天球中心设置在地面观测点上, 但有时为了研究问题方便, 也可将天球中心设置在地球中心或太阳中心, 则分别称为地心天球或日心天球。

一、天球坐标系的基本概念

为了确定天球上任一点的位置, 必须引入天球坐标系, 即以天球上任何一个大圆 $BCDE$ 作为球面坐标系的基圈, 如图 1.3 所示。基圈所在的平面称为基本平面。基圈有两个几何极 A 和 A' , 任选其中一个 A 作为球面坐标系的极, 过极 A 作天球半个大圆 $\widehat{ACA'}$, 作为球面坐标系的主圈或始圈, 主圈与基圈的交点 C 称为球面坐标系的主点或原点。天球上过极的每一个大圆都与基圈垂直, 称为副圈。为确定球面上任何一点 σ 的位置, 可通过极 A 和 σ 点作一大圆弧即副

圈,与基圈交于 D ,则点 σ 的位置可由两段大圆弧 $\widehat{\sigma D}$ 和 $\widehat{CD}$ 来确定,也可由极距 $A\sigma$ 及球面角 $CA\sigma$ (或平面角 $\angle COD$) 加以确定。大圆弧 $\widehat{\sigma D}$ 或极距 $A\sigma$ 称为球面坐标系中的第一坐标,而大圆弧 $\widehat{CD}$ 或球面角 $CA\sigma$ 称为第二坐标。这样的球面坐标系是一种正交坐标系,对于不同的基圈、主圈和主点,以及第二坐标所采用的不同量度方式,可以引出不同的天球坐标系。

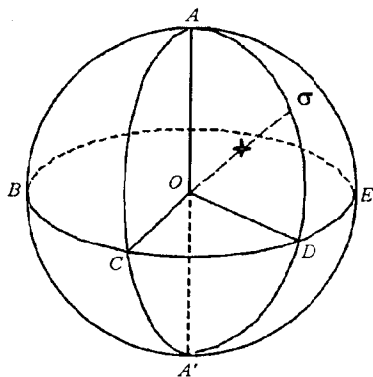


图 1.3 天球坐标系

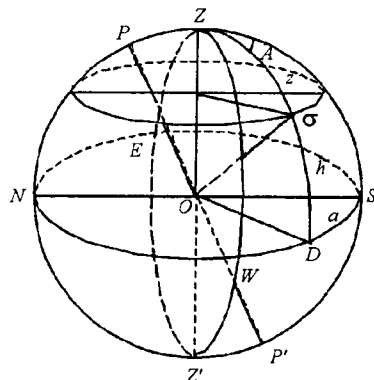


图 1.4 地平坐标系

二、地平坐标系

首先介绍天球上有关的点和圈,见图 1.4。

1. 天顶与天底

过观测者 O (天球中心) 的铅垂线,延伸后与天球交于两点,朝上的一点 Z 称为天顶,朝下的一点 Z' 称为天底。

2. 地平面与地平圈

过 O 点并与铅垂线 ZZ' 相垂直的平面称为地平面,地平面与天球相交而成的大圆称为地平圈,天顶 Z 是地平圈的极,也是地平坐标系的极。

3. 天轴与天极

通过天球中心 O 作一直线与地球自转轴平行,这条直线叫天轴。天轴与天球相交于两点 P 和 P' ,这两点分别叫做北天极和南天极,并与地球的北极和南极相对应。天轴是一条假想的直线,天球绕这条直线做周日视运动。

4. 子午圈与卯酉圈

经过天顶的任何大圆都称为地平经圈,又称垂直圈。过北天极 P 的地平经圈称为子午圈,它与地平圈相交于 N 和 S 两点。靠近北天极的点 N 叫做北点,与北点相对应的点 S 称为南点;与子午圈相垂直的地平经圈称为卯酉圈,它与

地平圈相交于 E 和 W 两点。若观测者面向北,则在观测者右方的点 E 叫东点,在观测者左方的点 W 称西点,而 E, W, S, N 合称为四方点,如图 1.4 所示。

应注意,由于地面上不同观测地点的铅垂线方向彼此不同,因此,各个观测地点都有自己的天顶、地平圈、子午圈、卯酉圈和四方点,也就是说,这些点和圈有“地方性”。

5. 地平坐标系

以天球的地平圈为基圈,子午圈为主圈,南点(或北点)为主点的坐标系称为地平坐标系。若过天顶 Z 和天体 σ 做一垂直圈,与地平圈相交于垂足 D ,则天体 σ 在地平坐标系中的第一坐标就是大圆弧 $\widehat{\sigma D}$ 或极距 $\widehat{\sigma Z}$, $\widehat{\sigma D} = h$ 称为地平纬度,又称地平高度,简称高度;而 $\widehat{\sigma Z} = z$ 称为天顶距。地平高度也可以用平面角 $\angle \sigma OD$ 来量度,而天顶距也可以用平面角 $\angle \sigma OZ$ 来量度。由图 1.4 可知,地平纬度 h 和天顶距 z 互为余角,即

$$h + z = 90^\circ \quad (1.8)$$

天球上与地平圈相平行的小圆称为地平线纬圈。也称平行圈。在同一地平纬圈上任一点的地平高度都是相等的,因此可以叫做等高圈。

南点 S 与垂足 D 之间的大圆弧 $\widehat{SD} = a$,是地平坐标系中的第二坐标,称为地平经度或天文方位角,简称方位角。方位角也可以用平面角 $\angle SOD$ 来量度,或以天顶 Z 为顶点的球面角 $\angle SZ\sigma = A$ 来表示。

在天文学中方位角习惯从南点起按顺时针方向量度。但有时为了应用方便,计算方位角不自南点而自北点开始。自北点 N 起算的方位角 A_N 与自南点 S 起算的方位角 A_S 彼此相差 180° ,即

$$A_N = A_S \pm 180^\circ \quad (1.9)$$

方位角有时从南点分别向西和向东计量,为避免混淆,在具体问题中应说明量度的方法。

由于天球的周日视运动,天体随天球一起也做周日视运动,因此天体的地平坐标即天顶距和方位角不断地发生变化;另外方位角 A 是以子午圈与地平圈的交点即南点(或北点)作为起算点,子午圈、地平圈和四方点有“地方性”,所以方位角还随观测点的位置而异。

三、赤道坐标系

1. 天赤道、赤经圈和赤纬圈

通过天球中心 O 做一平面与天轴垂直,这平面称为天球赤道面。显然当天球中心不在地心时,天球赤道面与地球赤道面是相互平行的,且分别垂直于两平行线——天轴和地轴。天球赤道面与天球相交所截出的大圆(如图 1.5 中

QBQ')叫天赤道,根据天球性质可知,它应和地球赤道面延伸后与天球相交之大圆相重合。

天极 P 与 P' 是天赤道的几何极,过天极的大圆(如 PBP')称为赤经圈,或叫时圈,任何一个赤经圈都与天赤道相垂直。天球上与天赤道平行的小圆(如 $R\sigma R'$)称为赤纬圈。

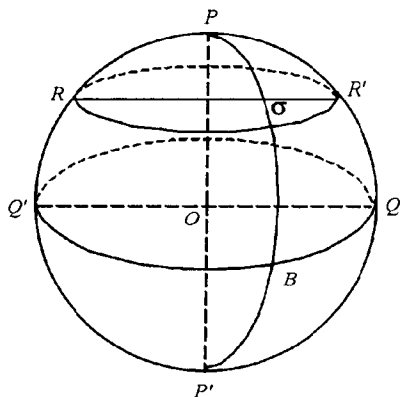


图 1.5 赤经圈与赤纬圈

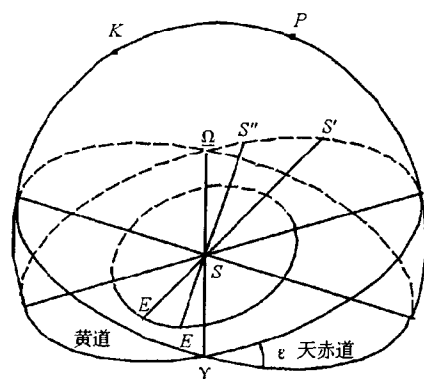


图 1.6 黄道与天赤道

2. 黄道与黄赤交角

地球中心绕太阳中心公转的轨道可近似地看做一条平滑的椭圆曲线,这条平滑曲线所在的平面叫做黄道面。黄道面与天球相交的大圆称为黄道,故黄道是太阳周年视运动轨迹在天球上的投影。黄道的两个几何极称为黄极,按其所处的天区位置不同,又有北黄极和南黄极之分。黄道与天赤道的交角 ϵ 称为黄赤交角。它是黄极 K 与天极 P 之间的角距离, $\epsilon = 23^\circ 37'$, 如图 1.6 所示。

3. 二分点与二至点

黄道与天赤道在天球上相交于两点,这两点称为二分点:太阳沿黄道从天赤道以南向北通过天赤道的那一点,称为春分点 Υ ;与春分点相对的另一一点,称为秋分点 ϖ 。黄道上与二分点相距 90° 的两点,称为二至点:位于天赤道以北的那一点,称为夏至点 σ ;与夏至点相对的另一一点称为冬至点 φ , 如图 1.6 所示。二分点和二至点通常又合称为分至点。

当太阳沿着黄道按与周日运动相反方向由西向东作周年视运动时,依次经过春分点、夏至点、秋分点和冬至点。当太阳在这些点的日子则分别称为春分、夏至日、秋分日和冬至日。

在天球上通过天极和二分点的大圆称为二分圈,通过天极和二至点的大圆