

第 1 章 绪 论

GPS 是全球定位系统 global positioning system 的英文缩写,它是随着现代化科学技术的发展而建立的新一代精密卫星定位系统。本章主要介绍 GPS 卫星定位系统发展的概况、特点、组成以及 GPS 定位技术应用。

1.1 卫星定位技术发展概况

1957 年 10 月,世界上第一颗人造地球卫星的发射成功,标志着空间科学技术的发展跨入了一个崭新的时代。随着人造地球卫星的不断发射,利用卫星进行定位测量已成为现实。

1.1.1 初期的卫星定位技术

卫星定位技术是指人类利用人造地球卫星确定测站点位置的技术。最初,人造地球卫星仅仅作为一种空间观测目标,由地面的观测站对卫星的瞬间位置进行摄影测量,测定测站点至卫星的方向,建立卫星三角网。同时也可利用激光技术测定观测站至卫星的距离,建立卫星测距网。用上述两种观测方法,均可以实现大陆同海岛的联测定位,解决了常规大地测量难以实现的远距离联测定位问题。

1966~1972 年期间,美国国家大地测量局在英国和联邦德国测绘部门的协作下,用上述方法测设了一个具有 45 个测站点的全球三角网,获得了 $\pm 5\text{m}$ 的点位精度。然而,这种观测和成果换算需耗费大量的时间,同时定位精度较低,并且不能得到点位的地心坐标。因此,这种卫星测量方法很快就被卫星多普勒定位技术所取代。这种取代使卫星定位技术从仅仅把卫星作为空间测量目标的初级阶段,发展到了把卫星作为动态已知点的高级阶段。

1.1.2 卫星多普勒测量

1958 年 12 月 美国海军和詹斯·霍普金斯(Johns Hopkins)大学物理实验室为了给北极核潜艇提供全球导航,开始研制一种卫星导航系统,称之为美国海军导航卫星系统 简称 NNSS(navy navigation satellite system)系统。在该系统中,由于卫星轨道通过地极,因此被称为“子午(transit)卫星系统”。1959 年 9 月美国发射了第一颗试验性卫星,经过几年试验 1964 年该系统建成并投入使用。1967 年美国

政府宣布该系统解密并提供民用。在美国子午卫星系统建立的同时，原苏联于1965年也建立了一个卫星导航系统，叫做CICADA该系统有12颗卫星。

虽然子午卫星系统对导航定位技术的发展具有划时代的意义，但由于该系统卫星数目较少(6颗工作卫星)运行高度较低(平均约1000km)从地面站观测到卫星的时间间隔也较长(平均约1.5小时)，因而不能进行三维连续导航。加之获得一次导航解所需的时间较长，所以难以充分满足军事导航的需求。从大地测量学来看，由于它的定位速度慢(测站平均观测1~2天)精度较低(单点定位精度3~5m相对定位精度约为1m)，因此，该系统在大地测量学和地球动力学研究方面受到了极大的限制。

为了满足军事及民用部门对连续实时三维导航的需求，1973年美国国防部开始研究建立新一代卫星导航系统，即为目前的“授时与测距导航系统/全球定位系统”(navigation system timing and ranging / global positioning system——NAVSTAR /GPS)，通常称之为全球定位系统(GPS)。

1.2 GPS的特点

为了使GPS具有高精度的连续实时三维导航性能及良好的抗干扰性能，在卫星的设计上采取了若干重大改进措施。GPS与NNSS的主要特征比较见表1-1。

表 1-1 GPS与 NNSS 的主要特征

系统特征	NNSS	GPS
载波频率/GHz	0.15,0.40	1.23,1.58
卫星平均高度/km	约1000	约20200
卫星数目/颗	5~6	27(3颗备用)
卫星运行周期/min	107	718
卫星钟稳定度	10^{-11}	10^{-12}

1.2.1 GPS相对于其他导航定位系统的特点

从1978年发射第一颗GPS试验卫星至今，人们利用该系统进行了大量的定位研究，其主要特点如下：

1. 功能多、用途广

GPS系统不仅可用于测量、导航，还可用于测速、测时。测速的精度可达0.1m/s，测时的精度可达几十毫微秒。其应用领域不断扩大。

2. 定位精度高

GPS 可为各类用户连续提供动态目标的三维位置、三维速度及时间信息，其精度如表 1-2。随着 GPS 定位技术及数据处理技术的发展，其精度还将进一步提高。

表 1-2 GPS 实时定位、测速与测时精度

采用的测距码	P 码	C/A 码
单点定位/m	5~10	20~40
差分定位/m	1	3~5
测速/(m/s)	0.1	0.3
测时/ns	100	500

3. 实时定位

利用全球定位系统进行导航，即可实时确定运动目标的三维位置和速度，由此可实时保障运动载体沿预定航线运行，亦可选择最佳航线。特别是对军事上动态目标的导航，具有十分重要的意义。

1.2.2 GPS 定位技术相对于常规测量技术的特点

目前，GPS 定位技术已高度自动化，是其所达到的定位精度及潜力（图 1-1）使广大测量工作者产生了极大的兴趣。尤其从 1982 年第一代测量型无码 GPS 接收机 Macrometer V-1000 投入市场以来，在应用基础的研究、应用领域的开拓、硬件

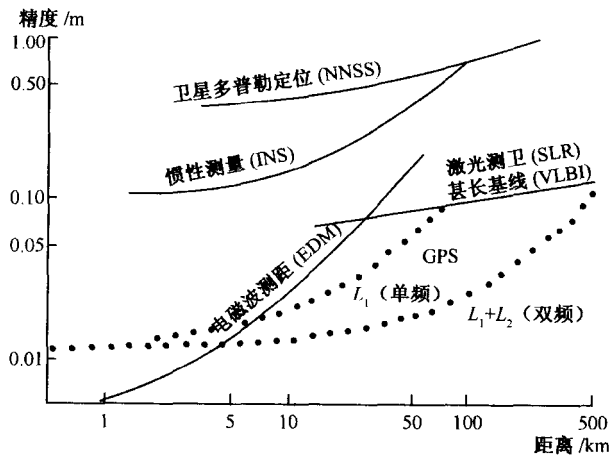


图 1-1 几种定位方法的精度比较

和软件的开发等方面,都得到了蓬勃发展。广泛的试验活动为 GPS 精密定位技术在测量工作中的应用展现了广阔的前景。

相对于经典的测量技术来说, GPS 定位技术主要有以下特点:

1. 观测站之间无需通视

既要保持良好的通视条件,又要保障测量控制网的良好结构,这一直是经典测量技术在实践方面的问题之一。而 GPS 测量不需观测站之间互相通视,因而不再需要建造规标。这一优点既可大大减少测量工作的经费和时间(一般造标费用约占总经费的 30%~50%),同时也使点位的选择变得更加灵活。

不过也应指出, GPS 测量虽不要求观测站之间相互通视,但必须保持观测站的上空开阔(净空)以便接收 GPS 卫星的信号不受干扰。

2. 定位精度高

大量实验表明,目前在小于 50km 的基线上,其相对定位精度可达 $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 而在 100~500km 的基线上可达 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 。随着观测技术与数据处理方法的改善,可望在大于 1000km 的距离上,相对定位精度达到或优于 10^{-8} 。

3. 观测时间短

目前,利用经典的静态定位方法,完成一条基线的相对定位所需要的观测时间根据要求精度的不同,一般约为 1~3h。为了进一步缩短观测时间,提高作业速度,近年来发展的短基线(不超过 20km)快速相对定位法,其观测时间仅需数分钟。

4. 提供三维坐标

GPS 测量中,在精确测定观测站平面位置的同时,可以精确测定观测站的大地高程。GPS 测量的这一特点,不仅为研究大地水准面的形状和确定地面点的高程开辟了新途径,同时也为其在航空物探、航空摄影测量及精密导航中的应用,提供了重要的高程数据。

5. 操作简便

GPS 测量的自动化程度很高,在观测中测量员的主要任务只是安装并开关仪器、量取仪器高、监视仪器的工作状态和采集环境的气象数据,而其他观测工作如卫星的捕获、跟踪观测和记录等均由仪器自动完成。另外, GPS 用户接收机一般重量较轻、体积较小,例如 NovAtel RPK-L₁/L₂型 GPS 接收机重量约为 1.0kg,体积为 1085cm³,携带和搬运都很方便。

6. 全天候作业

GPS 测量工作,可以在任何地点、任何时间连续地进行,一般不受天气状况的影响。因此, GPS 定位技术的发展是对经典测量技术的一次重大突破。一方面,它使经典的测量理论与方法产生了深刻的变革;另一方面,也进一步加强了测量学与其他学科之间的相互渗透,从而促进了测绘科学技术的现代化发展。

1.3 GPS 系统的组成

GPS 系统主要由三大部分组成,即空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分(图 1-2)。

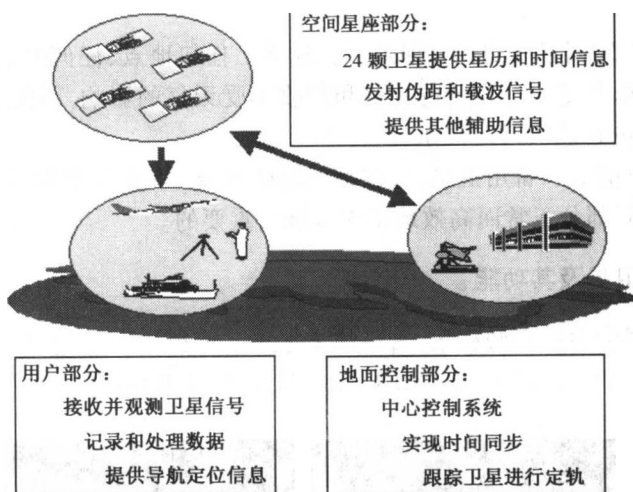


图 1-2 GPS 系统的组成

1.3.1 空间星座部分

1. GPS 卫星星座的构成

全球定位系统的空间卫星星座见图 1-3,由 24 (3 颗备用卫星)颗卫星组成。卫星分布在 6 个轨道面内,每个轨道上分布有 4 颗卫星。卫星轨道面相对地球赤道面的倾角约为 55° ,各轨道平面升交点的赤经相差 60° 。在相邻轨道上,卫星的升交距相差 30° 。轨道平均高度约为 20200km,卫星运行周期为 11 小时 58 分。因此,在同一观测站上,每天出现的卫星分布图形相同,只是每天提前 4 分钟。每颗卫星每天约有 5 个小时在地平线以上,同时位于地平线以上的卫星数目,随时间和地点而异,最少为 4 颗,最多可达 11 颗。

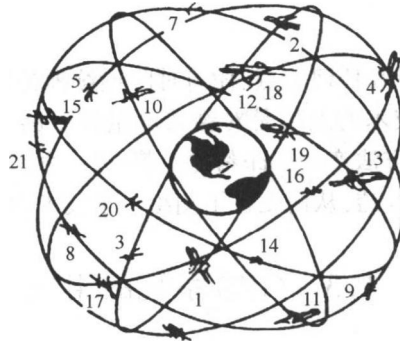


图 1-3 全球定位系统的空间卫星星座

GPS 卫星空间星座的分布保障了在地球上任何地点、任何时刻至少有 4 颗卫星被同时观测，加之卫星信号的传播和接收不受天气的影响，因此，GPS 是一种全球性、全天候的连续实时定位系统。

空间部分的 3 颗备用卫星，可在必要时根据指令代替发生故障的卫星，这对于保障 GPS 空间部分正常而高效地工作是极其重要的。

2. GPS 卫星及其功能

GPS 卫星的主体呈圆柱形，直径约为 1.5m 重约 774kg(包括 310kg 燃料)两侧设有两块双叶太阳能板，能自动对日定向，以保证卫星正常工作用电(图 1-4)。



图 1-4 GPS 卫星示意图

每颗卫星装有 4 台高精度原子钟(2 台铷钟和 2 台铯钟)这是卫星的核心设

备。它将发射标准频率信号，为 GPS 定位提供高精度的时间标准。

GPS 卫星的基本功能是：

(1) 接收和储存由地面监控站发来的导航信息，接收并执行监控站的控制指令；

(2) 卫星上设有微处理机，进行部分必要的数据处理工作；

(3) 通过星载的高精度铯钟和铷钟提供精密的时间标准；

(4) 向用户发送定位信息；

(5) 在地面监控站的指令下，通过推进器调整卫星的姿态和启用备用卫星。

一般来说，在卫星大地测量学和大地重力学中，或者把人造地球卫星作为一个高空观测目标，通过测定用户接收机与卫星之间的距离或距离差来完成定位任务；或者把卫星作为一个传感器，通过观测卫星运行轨道的摄动，来研究地球重力场的影响和模型。不过对于后一种应用通常要求卫星轨道较低而 GPS 卫星的轨道高度平均达 20200km，对地球重力异常的反应灵敏度较低。所以它主要是作为具有精确位置信息的高空目标，被广泛的用于导航和测量。

1.3.2 地面监控部分

GPS 的地面监控部分，目前由分布在全球的 5 个地面站组成，其中包括卫星监测站、主控站和信息注入站。其分布如图 1-5 所示。

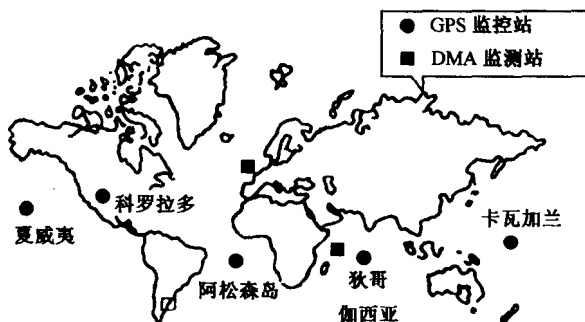


图 1-5 GPS 的地面监控部分

1. 监测站

现有 5 个地面站均具有监测站的功能。监测站是在主控站直接控制下的数据自动采集中心。站内设有双频 GPS 接收机、高精度原子钟、计算机各一台和若干台环境数据传感器。接收机对 GPS 卫星进行连续观测，以采集数据和监测卫星的

工作状况。原子钟提供时间标准，而环境传感器收集有关当地的气象数据。所有观测资料由计算机进行初步处理，并储存和传送到主控站，用以确定卫星的轨道。

2. 主控站

主控站一个，设在美国本土科罗拉多·斯平士 (Colorado Springs) 的联合空间执行中心 CSOC。主控站除协调和管理地面监控系统工作外，其主要任务是：

(1) 根据本站和其他监测站的所有观测资料，推算编制各卫星的星历、卫星钟差和大气层的修正参数等，并把这些数据传送到注入站；

(2) 提供全球定位系统的时间基准。各测站和 GPS 卫星的原子钟，均应与主控站的原子钟同步，或测出其间的钟差，并把这些钟差信息编入导航电文，送到注入站；

(3) 调整偏离轨道的卫星，使之沿预定的轨道运行；

(4) 启用备用卫星，以代替失效的工作卫星。

3. 注入站

注入站现有三个，分别设在印度洋的迭哥加西亚 (Diego Garcia)、南大西洋的阿松森岛 (Ascension) 和南太平洋的卡瓦加兰 (Kwajalein)。注入站的主要设备包括一台直径为 3.6m 的天线，一台 C 波段发射机和一台计算机。其主要任务是在主控站的控制下将主控站推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文和其他控制指令等，注入到相应卫星的存储系统，并检测注入星系的正确性。

整个 GPS 的地面监控部分，除主控站外均无人值守。各站间用现代化的通讯网络联系起来，在原子钟和计算机的驱动和精确控制下，各项工作实现了高度的自动化和标准化。

1.3.3 用户设备部分

GPS 的空间部分和地面监控部分，是用户应用该系统进行定位的基础，而用户只有通过用户设备，才能实现应用 GPS 定位的目的。

根据 GPS 用户的不同要求，所需的接收设备各异。随着 GPS 定位技术的迅速发展和应用领域的日益扩大，许多国家都在积极研制、开发适用于不同要求的 GPS 接收机及相应的数据处理软件。

用户设备主要由 GPS 接收机硬件和数据处理软件，以及微处理机及其终端设备组成。而 GPS 接收机的硬件，一般包括主机、天线和电源，主要功能是接收 GPS 卫星发射的信号，以获得必要的导航和定位信息及观测量，并经简单数据处理而实现实时导航和定位；GPS 软件部分是指各种后处理软件包，其主要作用是对观测数据进行精加工，以便获得精密定位结果。

由于 GPS 用户的要求不同 ,GPS 接收机也有许多不同的类型 ,一般可分为导航型、测量型和授时型。

1.4 GPS 的应用

1.4.1 GPS 系统的应用前景

最初设计 GPS 的主要目的是用于导航、收集情报等军事目的。但后来的应用开发表明 ,GPS 不仅可以达到上述目的 ,而且用 GPS 卫星信号能够进行厘米级甚至毫米级精度的静态相对定位 ,米级至亚米级精度的动态定位 ,亚米级至厘米级精度的速度测量和毫微秒级精度的时间测量。

用 GPS 信号可以进行海、陆、空、地的导航 ,导弹制导 ,大地测量和工程测量的精密定位 ,时间传递和速度测量等。在测绘领域 , GPS 定位技术已用于建立高精度的大地测量控制网 ,测定地球动态参数 ;建立陆地及海洋大地测量基准 ,进行高精度海陆联测及海洋测绘 ;监测地球板块运动状态和地壳形变 ;在工程测量方面 ,已成为建立城市与工程控制网的主要手段 ;在精密工程的变形监测方面 ,它也发挥着极其重要的作用 ;同时 GPS 定位技术也用于测定航空航天摄影瞬间相机的位置 ,可在无地面控制或仅有少量地面控制点的情况下进行航测快速成图 ,引起了地理信息系统及全球环境遥感监测的技术革命。

在日常生活方面是一个难以用数字预测的广阔的领域 ,手表式的 GPS 接收机 ,将成为旅游者的忠实导游。GPS 将像移动电话、传真机、计算机互联网对我们生活的影响一样 ,人们的日常生活将离不开它。

1.4.2 我国 GPS 定位技术的应用和发展概况

新中国成立后 ,我国的航天科技事业在自力更生、艰苦创业的征途上 ,逐步建立和发展 ,跻身于世界先进水平的行列 ,成为世界空间强国之一。从 1970 年 4 月把第一颗人造卫星送入轨道以来 ,我国已成功地发射了 30 多颗不同类型的人造卫星 ,为空间大地测量工作的开展创造了有利条件。

20 世纪 70 年代后期 ,有关单位在从事多年理论研究的同时 ,引进并试制成功了各种人造卫星观测仪器。其中有人卫摄影仪、卫星激光测距仪和多普勒接收机。根据多年的观测实践 ,完成了全国天文大地网的整体平差 ,建立了 1980 年国家大地坐标系 ,进行了南海群岛的联测。

20 世纪 80 年代初 ,我国一些院校和科研单位已开始研究 GPS 技术。10 多年来 ,我国的测绘工作者在 GPS 定位基础理论研究和应用开发方面作了大量的工作。80 年代中期 ,我国引进 GPS 接收机 ,并用于各个领域 ,同时着手研究建立我

国自己的卫星导航系统。

在大地测量方面 利用 GPS 技术开展国际联测，建立全球性大地控制网，提供高精度的地心坐标，测定和精化大地水准面，组织各部门（10 多个单位，30 多台 GPS 双频接收机 参加 1992 年全国 GPS 定位大会战。经过数据处理，GPS 网点地心坐标精度优于 0.2m，点间位置精度优于 10^{-8} 。在我国建立了平均边长约 100km 的 GPS A 级网，提供了亚米级精度地心坐标基准。而后，在 A 级网的基础上，我国又布设了边长为 30~100km 的 B 级网，全国约 2500 个点。A、B 级 GPS 网点都联测了几何水准。这样，就为我国各部门的测绘工作和建立各级测量控制网，提供了高精度的平面和高程三维基准。我国已完成西沙、南沙群岛各岛屿与大地的 GPS 联测，使海岛与全国大地网联成一个整体。

在工程测量方面，应用 GPS 静态相对定位技术，布设精密工程控制网，用于城市和矿区油田地面沉降监测、大坝变形监测、高层建筑变形监测、隧道贯通测量等精密工程。加密测图控制点，应用 GPS 实时动态定位技术（简称 RTK）测绘各种比例尺地形图和施工放样。

在航空摄影测量方面，我国测绘工作者也经历了应用 GPS 技术进行航测外业控制测量、航摄飞行导航、机载 GPS 航测等航测成图的各个阶段。

在地球动力学方面，GPS 技术用于全球板块运动监测和区域板块运动监测。我国已开始用 GPS 技术监测南极洲板块运动、青藏高原地壳运动、四川鲜水河地壳断裂运动 建立了中国地壳形变观测网、三峡库区形变观测网、首都圈 GPS 形变监测网等。

在海洋测绘方面，GPS 技术已经用于海洋测量、水下地形测绘。

我国的《全球定位系统（GPS）测量规范》已于 1992 年 10 月 1 日起实施 并于 2001 年 9 月 1 日起实施新的国家标准。

此外，在军事部门、交通部门、邮电部门 地矿、煤矿、石油、建筑以及农业、气象、土地管理、金融、公安等部门和行业 在航空航天、测时授时、物理探矿、姿态测定等领域 也都开展了 GPS 技术的研究和应用。

在静态定位和动态定位应用技术及定位误差方面作了深入的研究，研制开发了 GPS 静态定位和高动态高精度定位软件以及精密定轨软件。在理论研究与应用开发的同时，培养和造就了一大批技术人才的产业队伍。

近几年，我国已建成了北京、武汉、上海、西安、拉萨、乌鲁木齐等永久性的 GPS 跟踪站 进行对 GPS 卫星的精密定轨，为高精度的 GPS 定位测量提供观测数据和精密星历服务，致力于为我国自主的广域差分 GPS（WADGPS）方案的建立，参与全球导航卫星系统（GNSS）和 GPS 增强系统（WAAS）的筹建。同时，我国已着手建立自己的卫星导航系统（双星定位系统）能够生产导航型 GPS 接收机。在我国 GPS 技术的应用正向更深层次发展。

习 题

1. 从卫星大地测量的发展史，说明各阶段的特点。
2. 简述 GPS 定位系统的构成，并说明各部分的作用。
3. 为什么说 GPS 定位技术的应用是测绘发展史上的一场革命？
4. 简述 GPS 定位技术的应用前景。
5. 简述我国 GPS 定位技术的应用概况。

第 2 章 GPS 定位的坐标系统 及时间系统

GPS 卫星定位技术是通过安置于地球表面的 GPS 接收机，同时接收四颗以上的 GPS 卫星信号来测定地面点位置的技术。观测站固定在地球表面，其空间位置随地球自转而变动，而 GPS 卫星围绕地球质心旋转且与地球自转无关。因此，在卫星定位中，需建立描述卫星运动的坐标系，并寻求卫星运动的坐标系与地面点所在的坐标系之间的关系，从而实现坐标系之间的转换。

在 GPS 定位测量中，采用两类坐标系，即天球坐标系与地球坐标系。天球坐标系是一种惯性坐标系，其坐标原点及各坐标轴指向在空间保持不变，用于描述卫星运行位置和状态。地球坐标系则是与地球相关联的坐标系，用于描述地面点的位置。本章主要介绍几种天球坐标系和地球坐标系，以及坐标系之间的转换模型。

2.1 协议天球坐标系

2.1.1 天球的基本概念

所谓天球，是指以地球质心 M 为中心，半径 r 为任意长度的一个假想的球体。在天文学中一般均把天体投影到天球的球面上，并利用球面坐标系统来表达

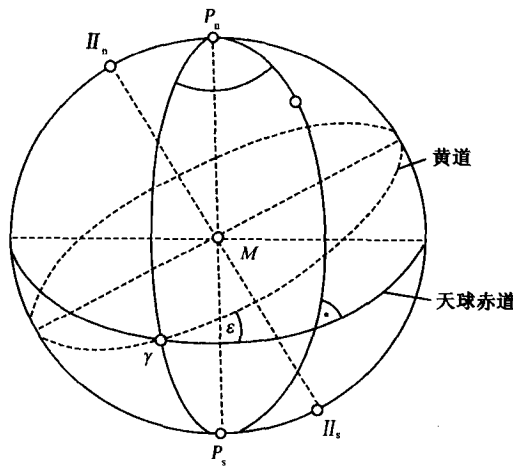


图 2-1 天球的概念

或研究天体的位置及天体之间的关系。为了建立球面坐标系，必须确定球面上的一些参考点、线、面和圈。在全球定位系统中，为描述卫星的位置也将涉及这些概念。对此，现按图 2-1 介绍如下。

1. 天轴与天极

地球自转轴的延伸直线为天轴；天轴与天球的交点 P_n 和 P_s 称为天极 其中 P_n 称为北天极， P_s 称为南天极。

2. 天球赤道面与天球赤道

通过地球质心 M 与天轴垂直的平面称为天球赤道面。此时天球赤道面与地球赤道面重合。该赤道面与天球相交的大圆，称为天球赤道，显然天球赤道是一个半径任意大的圆圈。

3. 天球子午面与子午圈

包含天轴并通过地球上任意点的平面，称为天球子午面。天球子午面与天球相交的大圆，称为天球子午圈。

4. 时圈

通过天轴的平面与天球相交的半个大圆称为时圈。

5. 黄道与黄极

地球公转的轨道面与天球相交的大圆。即当地球绕太阳公转时，地球上观测者所见到太阳在天球上运动的轨迹称为黄道。黄道面与赤道面的夹角 ϵ 称为黄赤交角 约为 23.5° 。通过天球中心且垂直于黄道面的直线与天球的交点称为黄极。其中靠近北天极的交点 II_n 称为黄北极，靠近南天极的交点 II_s 为黄南极。

6. 春分点

当太阳在黄道上从天球南半球向北半球运行时，黄道与天球赤道的交点 γ 称为春分点。在天文学和卫星大地测量学中，春分点和天球赤道面，是建立参考系的重要基准点和基准面。

2.1.2 天球坐标系

如图 2-2 所示 任意天体 s 的位置，在天球坐标系中，可用天球空间直角坐标系和天球球面坐标系两种形式来描述。

在天球空间直角坐标系中 天体 s 的坐标为 (x, y, z) 。该系统的定义是：原点

位于地球质心 M ; z 轴指向天球北极 P_n ; x 轴指向春分点 γ ; y 轴垂直于 xMz 平面与 x 轴和 z 轴构成右手坐标系。

在天球球面坐标系中天体 s 的坐标为 (α, δ, r) 。该系统的定义是: 天球中心与地球质心 M 重合 赤经 α 为含天轴和春分点的天球子午面与过天体 s 的天球子午面之间的夹角; 赤纬 δ 为原点 M 至天体 s 的连线与天球赤道面之间的夹角; 向径 r 为原点 M 至天体 s 的距离。各坐标值以图 2-2 中箭头所指方向为正。

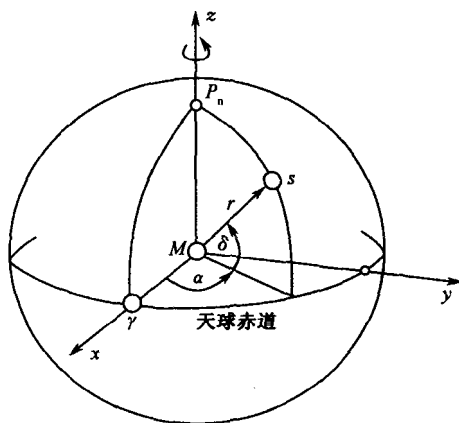


图 2-2 天球空间直角坐标系与天球球面坐标

由于在上述两种坐标系统中, 表达同一天体的位置是等价的, 故有下列转换关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} \cos\delta \cdot \cos\alpha \\ \cos\delta \cdot \sin\alpha \\ \sin\delta \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

或

$$\left. \begin{aligned} r &= \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \\ \alpha &= \arctan \frac{y}{x} \\ \delta &= \arctan \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

在实践中, 以上关于天体坐标系的两种表达形式, 应用都很普遍。由于它们和地球的自转无关, 所以对于描述天体或人造地球卫星的位置和状态尤为方便。

2.1.3 岁差与章动的影响

这里必须指出，上述坐标系统的建立，是基于假设地球为均质的球体，且没有其他天体摄动力影响的理想情况，即假定地球的自转轴在空间的方向是固定的，因而春分点在天球的位置保持不变。但是，实际上地球的形体接近于一个赤道隆起的椭球体，在日月引力和其他天体引力对地球隆起部分的作用下，地球自转轴方向不再保持不变，这使春分点在黄道上产生缓慢的西移现象，这种现象在天文学中称为岁差。在岁差的影响下，地球自转轴在空间绕黄北极产生缓慢的旋转（从北天极上方观察为顺时针方向，以下同），因而使北天极以同样的方式在天球上绕黄北极产生旋转。

地球自转轴在空间的方向变化，主要是日月引力共同作用的结果，其中又以月球的引力影响为最大。由于太阳距地球较远，所以其引力的影响仅为月球影响的0.46倍。如果月球的引力及其运行的轨道都是固定不变的，同时忽略其他行星引力的微小影响，那么日月引力的影响，将仅使北天极绕黄北极以顺时针方向缓慢的旋转 构成如图 2-3 所示的一个圆锥面。这时，天球北天极的轨迹近似的构成一个以黄北极 II_n 为中心 以黄赤交角 ϵ 为半径的小圆。在这个小圆圈内，北天极每年西移约 $50.71''$ 周期大约为 25800 年。

在天球上，这种有规律运动的北天极，通常称为瞬时平北天极（简称为平北天极），而与之相应的天球赤道和春分点，称为瞬时天球赤道和瞬时平春分点。但是，在太阳和其他行星引力的影响下，月球的运行轨道以及月地之间的距离都是不断变化的，所以，北天极在天球上绕黄北极旋转的轨迹，实际上要复杂的多。如果把观测时的北天极称为瞬时北天极（简称真北天极），而与之相应的天球赤道和春分点 称为瞬时天球赤道和瞬时春分点 或称真天球赤道和真春分点)那么 在日

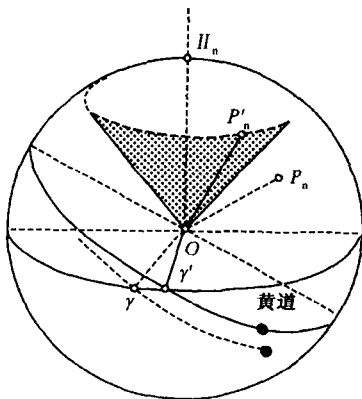


图 2-3 岁差影响

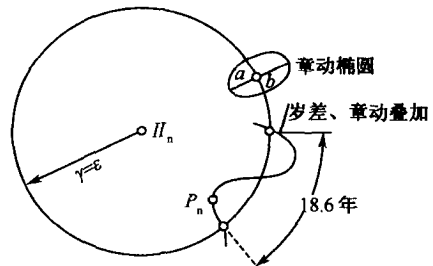


图 2-4 章动影响

月引力等因素的影响下，瞬时北天极将绕瞬时平北天极产生旋转，大致成椭圆轨迹 其长半径约为 $9.2''$ 周期约为 18.6 年(图 2-4)。这种现象称为章动。

因此，为了描述北天极在天球上的运动，通常均把这种复杂的运动，分解为两种规律的运动，首先是北天极绕黄北极的运动，这就是上面介绍的岁差现象；其次是瞬时北天极绕平北天极顺时针的转动，即章动现象。在岁差和章动的共同影响下，瞬时北天极绕黄北极旋转的轨迹如图 2-4 所示。

2.1.4 协议天球坐标系的定义和转换

由以上讨论可知，在岁差和章动的影响下，瞬时天球坐标系的坐标轴的指向在不断的变化。在这种非惯性坐标系中，不能直接根据牛顿力学定律来研究卫星的运动规律。为了建立一个与惯性坐标系相接近的坐标系，人们通常选择某一时刻作为标准历元，并将此刻地球的瞬时自转轴（指向北极）和地心至瞬时春分点的方向，经该瞬时的岁差和章动改正后，分别作为 z 轴和 x 轴的指向。由此所构成的空间固定坐标系，称为所取标准历元 t_0 时刻的平天球坐标系，或协议天球坐标系，也称协议惯性坐标系 conventional inertial system 简称 CIS) 天体的星历通常都是在该系统中表示的。国际大地测量学协会 (IAG) 和国际天文学联合会 international astronomical union 简称 IAU 决定从 1984 年 1 月 1 日后启用的协议天球坐标系 其坐标轴的指向 是以 2000 年 1 月 15 日 TDB 太阳质心力学时 为标准历元 标以 J2000.0) 的赤道和春分点所定义的。

为了将协议天球坐标系的卫星坐标，转换到观测历元 t 的瞬时天球坐标 通常可分为两步，即首先将协议天球坐标系中的坐标，换算到瞬时平天球坐标系；然后再将瞬时平天球坐标系的坐标，转换到瞬时天球坐标系。

1. 将协议天球坐标系转换为瞬时平天球坐标系（岁差旋转）

根据定义，协议天球坐标系与瞬时平天球坐标系的差别，仅在于由岁差引起的坐标轴指向不同。所以，为了进行上述转换，只需将协议天球坐标系的坐标轴加以旋转。如果取 $(x, y, z)_{\text{CTS}}$ 和 $(x, y, z)_{\text{MT}}$ 分别表示协议天球坐标系和瞬时平天球坐标系 则其间关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{MT}} = R_{zyz} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{CTS}}$$

$$R_{zyz} = R_z(-z)R_y(\theta)R_z(-\zeta)$$

$$R_z(-z) = \begin{bmatrix} \cos z & -\sin z & 0 \\ \sin z & \cos z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$R_z(-\zeta) = \begin{bmatrix} \cos\zeta & -\sin\zeta & 0 \\ \sin\zeta & \cos\zeta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, ζ 、 θ 、 ζ 分别为与岁差有关的三个旋转角, 其表达式为

$$\begin{aligned} \zeta &= 0.6406161^\circ T + 0.0000839^\circ T^2 + 0.0000050^\circ T^3 \\ \theta &= 0.6406161^\circ T + 0.0003041^\circ T^2 + 0.0000051^\circ T^3 \\ \zeta &= 0.6406161^\circ T - 0.0001185^\circ T^2 - 0.0000116^\circ T^3 \end{aligned} \quad (2-4)$$

T ($t - t_0$) 是从标准历元 t_0 至观测历元 t 的儒略世纪数。

2. 将瞬时平天球坐标系转换为瞬时天球坐标系 (章动旋转)

若要将瞬时平天球坐标系转换为瞬时天球坐标系, 还需将瞬时平天球坐标系进行旋转。

如果取 $(x, y, z)_T$ 表示瞬时天球坐标系, 则它与瞬时平天球坐标系之间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_T = R_{xxx} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{MT}$$

$$R_{xxx} = R_x(-\epsilon - \Delta\epsilon) R_z(-\Delta\varphi) R_x(\epsilon)$$

$$R_x(-\epsilon - \Delta\epsilon) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\epsilon + \Delta\epsilon) & -\sin(\epsilon + \Delta\epsilon) \\ 0 & \sin(\epsilon + \Delta\epsilon) & \cos(\epsilon + \Delta\epsilon) \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$R_z(-\Delta\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\varphi) & -\sin(\Delta\varphi) & 0 \\ \sin(\Delta\varphi) & \cos(\Delta\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_x(\epsilon) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\epsilon) & \sin(\epsilon) \\ 0 & -\sin(\epsilon) & \cos(\epsilon) \end{bmatrix}$$

儒略日是公元前罗马皇帝儒略·凯撒所实行的一种历法, 故称儒略历。一个儒略世纪含有 36525 个儒略日。儒略日是从公元前 4713 年儒略历 1 月 1 日格林尼治平正午起算的连续天数。新标准历元 J2000.0 相应的儒略日为 2451545.0。