

高等学校教材

卫星无线电导航

言中丁子明

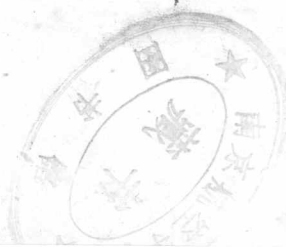
国防工业出版社

V474.2
1007

卫星无线电导航

本书共分五章。第一章介绍卫星无线电导航系统的基本原理和组成。第二章介绍卫星无线电导航系统的定位原理。第三章介绍卫星无线电导航系统的测速原理。第四章介绍卫星无线电导航系统的测距原理。第五章介绍卫星无线电导航系统的测角原理。本书可作为高等院校相关专业教材，也可供从事卫星无线电导航工作的工程技术人员参考。

作者：丁子明



30271292

国防工业出版社

（北京）
地址：北京市海淀区中关村大街22号
电话：010-68411111

1988年1月第1版 1988年1月第1次印刷 160页 32开 0.85元

ISBN 7-118-00488-X/V-42

662651

内 容 简 介

本书叙述卫星导航的基本原理及有关新技术与新进展。全书分七章：
1. 卫星导航系统所用的坐标系及转换关系；2. 卫星运行的基本规律，决定卫星轨道的基本参量，有关卫星的特点；3. 卫星导航定位和卫星定位定轨的一般方法；4.~6. 无源定位卫星导航系统及子午仪卫星导航系统、GPS 卫星导航系统，重点在用户设备工作原理和设计、误差因素分析等；7. 一种具备双向通信能力，适合于区域覆盖的有源卫星导航系统。

本书供大学本科高年级学生或研究生作教科书或教学参考书，对有关工程技术人员也有参考价值。

卫星无线电导航

育 中 丁子明

*

国防工业出版社出版

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张17¹/₂ 402千字

1989年7月第一版 1989年7月第一次印刷 印数：0,001—1,030册

ISBN 7-118-00488-X/V·42 定价：3.50元

1288333

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会电子系统编审组组织征稿、评选、推荐出版的。

全书共七章。第 1 章介绍卫星导航系统中所用的坐标系及各种坐标系之间的转换关系。第 2 章介绍卫星运行的基本规律,决定卫星轨道的基本参量、用于导航定位系统的卫星的特点。第 3 章介绍卫星导航定位和卫星定位定轨的一般方法。第 4 章至第 6 章为本书重点,介绍无源定位卫星导航系统,即现今和本世纪内将会得到广泛使用的子午仪卫星导航系统和 GPS 卫星导航系统,着重点放在用户设备的工作原理和设计考虑,引起误差的主要因素的分析等方面。第 7 章介绍一种具备双向通信能力,适合于区域覆盖的有源卫星导航系统。

自从人造地球卫星问世以来,卫星导航技术随之出现,给导航领域揭开了一个新篇章。由于其覆盖区域广、精度高、功能全、用途多,受到各技术发达国家的重视,发展迅速。本教材在着重阐述基本原理的同时,力求反映卫星导航方面的一些新技术、新进展。

本书供大学本科高年级学生或研究生作教科书或教学参考书用。教学参考时数为 50~60 小时。对从事这一领域工作的工程技术人员也有一定参考价值。为了方便阅读,大部分章节后面载有附录,给出一些数学式子的推导。

本教材由北京航空航天大学言中副教授、丁子明教授编写,国防科技大学沈振康教授、成都电讯工程学院肖先赐教授担任主审。编审者均依据电子系统教材编审组审定的大纲进行编写和审定。

由于编者水平有限,书中定有错误和缺点,殷切希望广大读者批评指正。

言 中

丁子明

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978年至1985年,已编审、出版了两轮教材,正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻“努力提高教材质量,逐步实现教材多样化,增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神,我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会,在总结前两轮教材工作的基础上,结合教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿,是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

目 录

第1章 用于卫星导航系统的坐标系	1
1.1 宇宙直角坐标系	1
1.2 大地水准球体、基准椭球和地理坐标	1
1.3 宇宙直角坐标与地理坐标的关系	3
1.4 不同基准椭球之间坐标的转换	7
1.5 天球、地心天球坐标系	8
附录 1.1 $O'P$, $Q'P$ 与 α , f , φ 之间的关系	10
附录 1.2 已知 P_H 点的坐标, 求 H	11
附录 1.3 地球极轴的进动及春分点的漂移	12
第2章 导航卫星的星历及工作区域	14
2.1 卫星的基本运行规律	14
2.2 基本轨道参量	17
2.3 有扰动的轨道及轨道参量	19
2.4 卫星的工作区域	30
2.5 导航卫星轨道参量的选择	41
附录 2.1 人造地球卫星的运行轨道	43
附录 2.2 卫星在椭圆轨道上运行的速度	46
附录 2.3 卫星椭圆运行轨道的近地点、远地点	48
附录 2.4 真近点角 ν , 偏近点角 E , 平近点角 M 以及它们的相互关系	48
附录 2.5 地球引力场位的求法	50
附录 2.6 卫星覆盖区的经度范围	52
附录 2.7 推导 $\sin\Delta\lambda_{\varphi_1}$, $\sin\Delta\lambda_{\varphi_2}$ 的表达式	53
附录 2.8 推导 $\Delta u = \arccos\left(\frac{\cos\beta}{\cos\gamma_0}\right)$	54
第3章 卫星导航的一般原理	55
3.1 导航定位参量和位置面	56
3.2 用户导航定位的方法	58
3.3 卫星定位定轨的方法	76
第4章 子午仪系统	86
4.1 系统的组成	86
4.2 工作原理	88
4.3 主要误差因素	95
4.4 导航信号及信号的接收处理	105
4.5 对部分系统参量的说明	111

4.6 对系统的评述.....	114
附录 4.1 子午仪卫星导航仪	115
附录 4.2 证明公式 $\frac{(1-e^2)\sin v}{1+e\cos v} = \sqrt{1-e^2} \sin E$	153
附录 4.3 求 η_i 在宇宙直角坐标系三个坐标轴上的分量 $\eta_{ix}, \eta_{iy}, \eta_{iz}$	153
第 5 章 导航星全球定位系统	155
5.1 系统的组成.....	155
5.2 工作原理.....	158
5.3 主要误差因素.....	165
5.4 导航信号及信号的接收处理.....	174
5.5 对部分系统参量的说明.....	194
5.6 对系统的评述.....	195
附录 5.1	196
附录 5.2	197
附录 5.3	197
第 6 章 GPS 卫星导航仪	200
6.1 多通道 GPS 导航仪的组成	200
6.2 接收通道.....	201
6.3 非相干延时锁定环路.....	207
6.4 载波跟踪环路.....	216
6.5 伪码扩频信号的搜捕.....	224
6.6 导航定位算法.....	227
第 7 章 双静止卫星定位通讯系统	250
7.1 系统的组成.....	250
7.2 系统工作原理.....	253
7.3 系统的信号格式.....	258
7.4 主要误差因素.....	261
7.5 系统评述.....	267
附录 7.1	269
附录 7.2	270

第1章 用于卫星导航系统的坐标系

1.1 宇宙直角坐标系

无线电导航系统进行导航定位时, 为了方便, 常采用不同的坐标系。地基系统常用地平坐标系; 空基系统常用机轴坐标系; 以卫星作为时空基准点的卫星导航系统, 通称卫基系统, 常用空间直角坐标系。

卫星导航的最基本任务是确定用户在空间的位置。确定用户的位置, 简称为定位, 实际是确定用户在某特定坐标系的位置坐标。为此, 首先应设立一个适当的坐标系。组成卫星导航系统的卫星网(空间分系统)、地面站组(地面分系统)、全体用户设备(用户分系统)极庞大, 分布的空间既广又深。由多颗卫星组成的卫星网常配置在宽广的空域, 全球导航系统则需配置全球分布的卫星网。由多座跟踪站、测控中心、计算中心、注入站等组成的地面站组, 也常需分布在宽广的地域, 当然一般尽量在国内设站。卫星导航系统的工作区域广阔, 可扩展至全球、深空、水下(用户采用漂浮天线)。系统不仅可为在地面、水面和近地空间的用户服务, 也可为在全球、外层空间及水下的用户服务。因此, 所设立的坐标系应能容纳得下如此深广的空间。系统中地面站组及用户的位置, 通常用与地球相联系的地理坐标(经度, 纬度, 高度)表示。卫星在空间的位置, 则通过卫星的轨道参量来表示。卫星和地球的相对位置不仅取决于卫星的轨道参量, 而且与地球自转有关。用户通过测定对卫星的相对位置, 进而确定自身的地理坐标。用户对于卫星的相对位置一般是用测得的导航定位参量表示。选择的坐标系应便于将地理坐标, 卫星的轨道参量, 地球的自转, 导航定位参量联系起来。最后, 所选的坐标系应便于导航定位解算。

宇宙直角坐标系是与地球牢固联接, 即随着地球旋转的直角坐标系, 如图 1.1 所示。坐标系的原点 O 位于地心, XOY 平面与地球赤道面重合, OX 轴穿过格林威治子午线和赤道的交点, OZ 轴与地球极轴重合。由图可见, 三条坐标轴从地心 O 出发, 一直延伸至无穷远, 是个能容纳整个宇宙空间的坐标系。后面将会看到, 这个坐标系易于将地理坐标、地球自转、卫星轨道参量、导航定位参量联系在一起。直角坐标系又是便于计算机应用线性代数知识进行定位解算的坐标系。

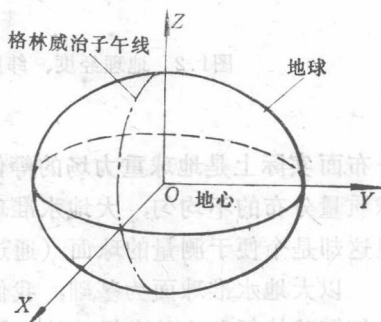


图1.1 宇宙直角坐标系

1.2 大地水准球体、基准椭球和地理坐标

确定用户在空间的位置, 最经常的是要求确定用户在地面上或地球上空的位置, 并

以此为基础, 确定到达目的地的时间和距离、应选用的航向、航速等。卫导系统的地面站组不言而喻是设置在地球上的。用户或地面站在地球上的位置常用地理坐标, 即经度、纬度、高度来表示。什么是地球上一点的经度、纬度和高度呢? 在对位置精度要求不高的场合, 将地球看成一圆球。其平均半径为 6370.997km (Clarke's 1866 椭球的平均半径)。赤道将圆球分成南、北二个半球, 格林威治子午圈把圆球分成东、西二个半球, 格林威治子午圈和赤道在过格林威治一边的交点为零经度, 零纬度点。以零经纬度点为起始点, 将赤道分成东西各 180° 等分, 即东经 180° 和西经 180° 。以零经纬度点为起点将格林威治子午线分成南北各 90° 等分, 即南纬 90° 和北纬 90° 。如图 1.2 所示, 地球上空任一点 P_H 的位置可用经度 λ , 纬度 φ , 高度 H 来表示。

P_H 点和地心的连线与圆球面交于 P , P 在赤道面的投影为 P' , P' 点和地心的连线为 OL , 那末 OL 与零经纬度点和地心连线间的夹角 λ 即是经度。 OL 和 OP_H 之间的夹角 φ 即是纬度。 P_H 点与 P 点之间的距离 H 即为高度。但正如我们所知道的, 地球并非圆球, 地球北极地区要凸出十几米, 而地球南极地区要凹进二十几米, 地球的赤道直径比地球二极间距离约大四十多公里。卫星导航系统的定位精度一般要达几十米甚至几米。显然, 以圆球来代替地球, 误差就太大了。为了高精度定位, 须用与大地水准球面最吻合的椭球体来代表地球。

大地水准球面是一个假想的海面, 这种海面无潮汐、无温差、无风、无盐, 海水能渗透到陆地每一处, 这种海面海水的分布仅由地球重力场决定。如图 1.3 所示, 海水的

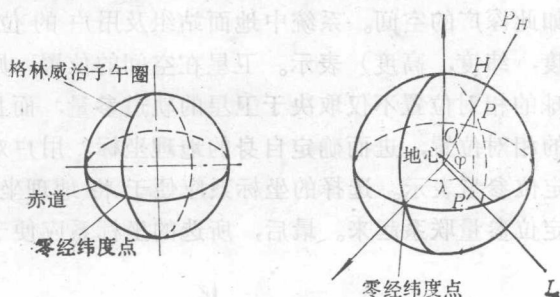


图1.2 地理经度、纬度和高度

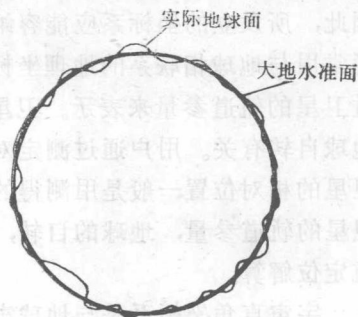


图1.3 大地水准面

注: 大地水准面也不是规则的几何体

分布面实际上是地球重力场的等位面, 称为大地水准球面。由于地球形状的不规则和地球质量分布的不均匀, 大地水准球面并不是平滑的球面, 仍然是一个不很规则的球面, 但这却是个便于测量的球面 (通过测量地球的重力场位可确定大地水准球面)。

以大地水准球面为基础, 我们选取一个几何球体使之与大地水准球体最吻合, 这个几何椭球体便称为基准椭球体。用它来代表地球。人们曾选用不同的基准椭球来代表地球, 如附表 1.1 所示。克拉克 (Clarke) 1866 椭球是与北美地区 (包括加拿大和美国) 大地水准面最吻合的基准椭球。而克拉索夫斯基 (Карсовский) 椭球则是与苏联及中国大部分地区大地水准面最吻合的基准椭球。这些基准椭球称为局部地区基准椭球。对全球卫星导航系统来说, 应选用与整个地球的大地水准面最吻合的基准椭球。所谓最吻合, 是指所选取的椭球面和大地水准面之间高度差的平方和最小。这种基准椭球称为全球基准椭球, 例如卫导系统采用的 WGS-72 椭球, 椭球中心与地心重合, 半长轴

$a = 6378.135\text{km}$, 扁平系数 $f = 1/298.26$ 。

$$\text{扁平系数 } f = \frac{a - b}{a} \quad (1.1)$$

局部地区基准椭球和全球基准椭球都是旋转椭球体。是半长轴为 a , 半短轴为 b 的椭圆绕短轴旋转而成的几何椭球体。但它们的 a 和 f 互不相同, 椭球中心的位置也互不相同, 这些椭球的短轴通过地球极点的平均位置 (因有极移现象, 地球极点位置也是变化的), 而大致看成不变。

有了基准椭球就可以定义地球上任一点的地理坐标——经度、纬度、高度。如图 1.4 所示, 地球上一点 G , 过 G 点作基准椭球面的垂线 GO' , GO' 与基准椭球面交于 P , 与赤道半径 OL 交于 Q' , 与地轴 OZ 交于 O' 。 P 点在 XOY 面上的投影为 P' 点。地球上点 G 的经度是 OP' 与 OX 轴的夹角 λ 。纬度是 GO' 与 OL 的夹角 φ 。高度是 G 点和 P 点的距离 H 。

$$H = N + h \quad (1.2)$$

式中, N : 大地水准面高度, 是 G 点处大地水准面与基准椭球面之间的距离。

h : 海拔高度, 是 G 点处实际地形与大地水准面之间的距离。若 G 点在地面上空, 那末海拔高度即 G 点和 G 点处大地水准面之间的距离。

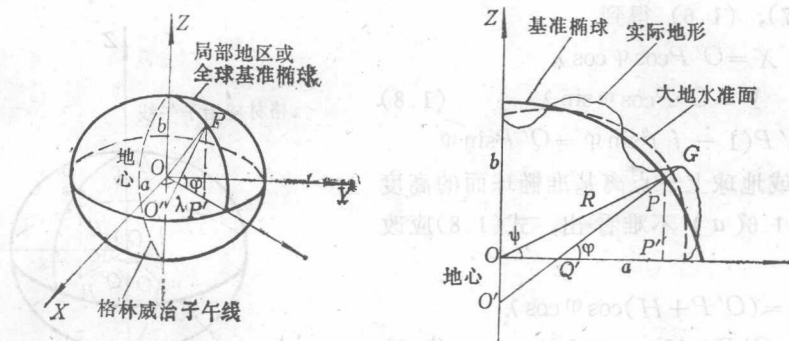


图 1.4 基准椭球和地理坐标

λ , φ , H 分别称为地理经度、纬度和高度。有时 φ 也用图 1.4 中所示的地心纬度 ψ 代替, 地心纬度是 OP 与 OL 之间的夹角。地理纬度和地心纬度间的关系为 (见附录 1.1):

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{b^2}{a^2} \operatorname{tg} \varphi = (1 - f)^2 \operatorname{tg} \varphi \quad (1.3)$$

由此可见, 我们可用 λ , φ , H 准确无误地表示在实际地球面或其上空任一点的位置。

1.3 宇宙直角坐标与地理坐标的关系

我们先来找基准椭球上任一点的地理坐标和宇宙直角坐标之间的关系。由图 1.5 可见, 基准椭球上任一点 P 的经度、纬度分别为 λ 、 φ 。 P 点在宇宙直角坐标系的坐标为 X 、 Y 、 Z 。

X 、 Y 、 Z 可表示为:

$$\begin{aligned} X &= OP' \cos \lambda \\ Y &= OP' \sin \lambda \\ Z &= PP' \end{aligned} \quad (1.4)$$

由图 1.5 可知

$$\begin{aligned} OP' &= O'P \cos \varphi \\ PP' &= Q'P \sin \varphi \end{aligned} \quad (1.5)$$

将式 (1.5) 代入 (1.4) 得到

$$\begin{aligned} X &= O'P \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= O'P \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= O'P \frac{Q'P}{O'P} \sin \varphi \end{aligned} \quad (1.6)$$

可以证明 (见附录 1.1)

$$\begin{aligned} O'P &= \frac{a}{\sqrt{\cos^2 \varphi + (1-f)^2 \sin^2 \varphi}} \\ \frac{Q'P}{O'P} &= \frac{b^2}{a^2} = (1-f)^2 \end{aligned} \quad (1.7)$$

综合式 (1.7), (1.6) 得到

$$\begin{aligned} X &= O'P \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= O'P \cos \varphi \sin \lambda \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$Z = O'P(1-f)^2 \sin \varphi = Q'P \sin \varphi$$

若用户或地球上一点离基准椭球面的高度为 H , 由图 1.6(a) 不难看出, 式(1.8)应改写为:

$$\begin{aligned} X &= (O'P + H) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y &= (O'P + H) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z &= [O'P(1-f)^2 + H] \sin \varphi \\ &= (Q'P + H) \sin \varphi \end{aligned} \quad (1.9)$$

若用 P_H 点的地心经纬度和 P_H 点到地心的距离 r 来表示 X, Y, Z , 如图 1.6(b) 所示, 应有

$$\begin{aligned} X &= r \cos \psi \cos \lambda \\ Y &= r \cos \psi \sin \lambda \\ Z &= r \sin \psi \end{aligned} \quad (1.9')$$

当 $H \neq 0$ 时, ψ 与 φ 将不满足关系式 (1.3), 由式 (1.9) 及式 (1.9') 可得

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{(Q'P + H) \sin \varphi}{(O'P + H) \cos \varphi} = \frac{(b^2 O'P + a^2 H) \sin \varphi}{(a^2 O'P + a^2 H) \cos \varphi} \quad (1.3')$$

$$O'P = \frac{a}{\sqrt{\cos^2 \varphi + (1-f)^2 \sin^2 \varphi}}$$

因此, 我们已知某点的地理经纬度和高度或地心经纬度和距离 r 时, 就可利用式 (1.9) 或 (1.9') 求得该点在宇宙直角坐标系中的坐标 X, Y, Z 。反之, 已知某点的

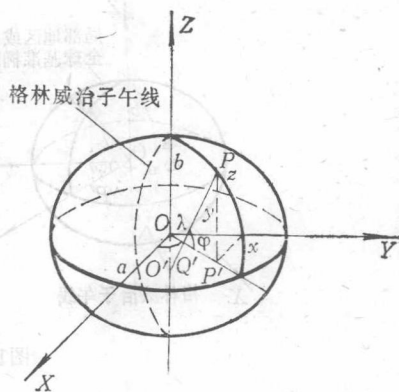


图 1.5 宇宙直角坐标和地理坐标

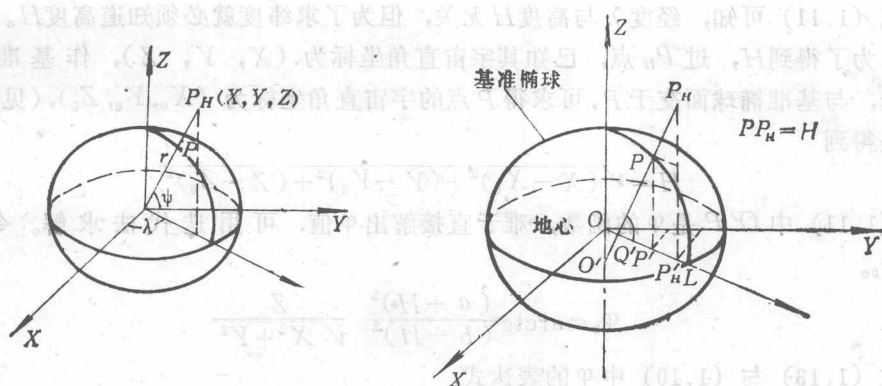


图 1.6

(a) 空间任一点的宇宙坐标和地理坐标;

(b) 空间任一点的宇宙直角坐标和地心坐标。

宇宙直角坐标, 也可用下面的公式求得该点的地理或地心坐标。

若某点在椭球面上, 则 $H = 0$, 从式 (1.8) 可得

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{Y}{X}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{(1-f)^2} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$\operatorname{tg} \psi = (1-f)^2 \operatorname{tg} \varphi$$

因而有

$$\lambda = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X}$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{(1-f)^2} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

$$H = 0$$

或

$$\lambda = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X}$$

$$\psi = \operatorname{arctg} [(1-f)^2 \operatorname{tg} \varphi]$$

(1.10)

$$r = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$$

若某点不在椭球面上, $H \neq 0$, 从式 (1.9) 可以求得

$$\operatorname{tg} \lambda = \frac{Y}{X}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{O'P + H}{O'P(1-f)^2 + H} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}$$

(1.11)

其中

$$O'P = \frac{a}{\sqrt{\cos^2 \varphi + (1-f)^2 \sin^2 \varphi}}$$

由式 (1.11) 可知, 经度 λ 与高度 H 无关, 但为了求纬度就必须知道高度 H 。

为了得到 H , 过 P_H 点, 已知其宇宙直角坐标为 (X, Y, Z) , 作基准椭球面的垂线, 与基准椭球面交于 P , 可求得 P 点的宇宙直角坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) , (见附录 1.2)。于是得到

$$H = \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2} \quad (1.12)$$

式 (1.11) 中 $O'P$ 是 φ 的函数, 难于直接解出 φ 值, 可用迭代法求解。令 φ 的初值为 φ_0 。

$$\varphi_0 = \arctg \frac{(a + H)^2}{(b + H)^2} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (1.13)$$

将式 (1.13) 与 (1.10) 中 φ 的表达式:

$$\varphi = \arctg \frac{a^2}{b^2} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (1.14)$$

相比较可知, 用式 (1.13) 计算 φ_0 , 是将基准椭球均匀地加厚 H , 把 P_H 点仍看成在基准椭球面上, 只是将基准椭球的 a 换成 $a + H$, b 换成 $b + H$ 。显然用式 (1.13) 计算得的 φ_0 值是 φ 的近似值, 但没有关系, 因为只是将它作为初值。将 φ_0 值代入下面 $O'P$ 表达式, 求得 $O'P$, 将 $O'P$ 代入 φ_{n+1}

$$\varphi_{n+1} = \arctg \frac{O'P + H}{O'P(1 - f)^2 + H} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (1.15)$$

$$O'P = \frac{a}{\sqrt{\cos^2 \varphi_n + (1 - f)^2 \sin^2 \varphi_n}}$$

表达式求得 φ_1 , 再将 φ_1 代入式 (1.15) 之 $O'P$ 及 φ_{n+1} 中, 又可得到 φ_2 , 迭代多次直到 φ_{n+1} 与 φ_n 之差小于某给定值 ε , φ_{n+1} 的误差将小于与 ε 值相对应的误差值。这时可将 φ_{n+1} 作为式 (1.15) 的解。

总之, 已知某点的宇宙直角坐标 (X, Y, Z) , 就可用公式

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \arctg \frac{Y}{X} \\ H &= \sqrt{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2} \\ \varphi_0 &= \arctg \frac{(a + H)^2}{(b + H)^2} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ \varphi_{n+1} &= \arctg \frac{O'P + H}{O'P(1 - f)^2 + H} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ O'P &= \frac{a}{\sqrt{\cos^2 \varphi_n + (1 - f)^2 \sin^2 \varphi_n}} \end{aligned} \right\} \quad (1.16)$$

求得地理坐标 λ, φ, H 。并可用下面公式求得地心坐标 λ, ψ, r 。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \arctg \frac{Y}{X} \\ \psi &= \arctg \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ r &= \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.16')$$

1.4 不同基准椭球之间坐标的转换

用不同的基准椭球代替地球时, 空间同一点有不同的地理坐标。由于宇宙直角坐标系是以地球为基础建立起来的, 因此空间同一点也将有不同的宇宙直角坐标。

不同基准椭球及其相应的宇宙直角坐标系如图 1.7 所示。设以全球基准椭球为基础的地理坐标为 λ, φ, H 。宇宙直角坐标为 (X, Y, Z) 。以局部地区基准椭球为基础的地理坐标为 λ', φ', H' 。相应的宇宙直角坐标为 (X', Y', Z') 。

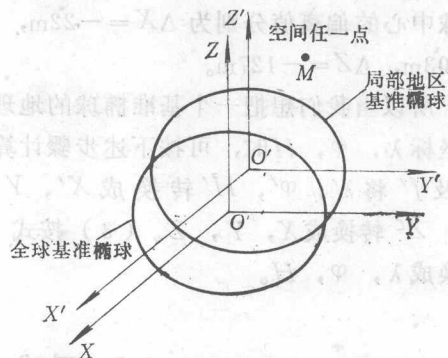


图1.7 全球基准椭球和局部地区基准椭球

前面曾经指出, 不同基准椭球的半长轴 a , 扁平度 f 以及椭球中心的位置均不相同。宇宙直角坐标系的原点与基准椭球中心重合, OZ 轴指向地球北极的平均位置, OX 轴指向格林威治子午线。因此一般来说, 以不同基准椭球为基础的宇宙直角坐标系的坐标轴, 不但不重合, 而且方向也不一致, 即 OX 与 $O'X'$, OY 与 $O'Y'$, OZ 与 $O'Z'$ 不重合, 也不平行。

设 $O'X'Y'Z'$ 坐标系的原点 O' 在 $OXYZ$ 坐标系中的坐标为 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 。坐标系 $O'X'Y'Z'$ 与坐标系 $OXYZ$ 各坐标轴之间的方向余弦如表 1.1 所示。

表1.1 二坐标系坐标轴之间的方向余弦

方 向 余 弦	OX	OY	OZ
$O'X'$	$\cos\alpha_1$	$\cos\beta_1$	$\cos\gamma_1$
$O'Y'$	$\cos\alpha_2$	$\cos\beta_2$	$\cos\gamma_2$
$O'Z'$	$\cos\alpha_3$	$\cos\beta_3$	$\cos\gamma_3$

注: $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2, 3$ 是坐标轴间的夹角。

我们就可将空间一点在 $O'X'Y'Z'$ 中的坐标 X', Y', Z' 利用下面的公式转换成在 $OXYZ$ 中的坐标 X, Y, Z 。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 & \cos\alpha_2 & \cos\alpha_3 \\ \cos\beta_1 & \cos\beta_2 & \cos\beta_3 \\ \cos\gamma_1 & \cos\gamma_2 & \cos\gamma_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

在要求精度不很高的场合, 由于地球平均半径远大于 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 。 $OXYZ$ 坐标系和 $O'X'Y'Z'$ 坐标系各相应的坐标轴可看成是相互平行的, 即

$$\alpha_1 = \beta_2 = \gamma_3 = 0^\circ \quad (1.18)$$

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \beta_1 = \beta_3 = \gamma_1 = \gamma_2 = 90^\circ$$

式(1.17)则变成

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (1.19)$$

例如克拉克 (Clarke) 1866 椭球中心和国际 (International) 椭球中心对于 WGS72 椭球中心的偏离值分别为 $\Delta X = -22\text{m}$, $\Delta Y = 157\text{m}$, $\Delta Z = 176\text{m}$ 和 $\Delta X = -84\text{m}$, $\Delta Y = -103\text{m}$, $\Delta Z = -127\text{m}$ 。

所以当我们想把一个基准椭球的地理坐标 λ' , φ' , H' 转换成另一基准椭球的地理坐标 λ , φ , H 时, 可按下述步骤计算: (1) 按公式 (1.9), 并利用该基准椭球的 a' 及 f' 将 λ' , φ' , H' 转换成 X' , Y' , Z' 。(2) 按式 (1.17) 或 (1.19) 将 X' , Y' , Z' 转换成 X , Y , Z 。(3) 按式 (1.17) 及另一基准椭球的 a , f 将 X , Y , Z 转换成 λ , φ , H 。

1.5 天球、地心天球坐标系

卫星导航系统的导航卫星及它的某些用户, 如宇宙飞船、航天飞机等, 都运行或航行在宇宙空间。如何描述这个宇宙空间呢? 我们设想整个宇宙空间是以地球的地心为中心, 半径为无穷大的球。实际上到目前为止, 人类仍是以地球作为一切活动的中心。这个无穷大的圆球如图 1.8 所示, 称为地心天球。把整个宇宙空间看成地心天球便于我们自地球观察整个外部世界。

为了确定卫星、飞船在宇宙空间的位置, 先得在宇宙空间找一个可视为固定不变的参考系。宇宙直角坐标系是固定于地球的, 因而这个坐标系随地球自转而转动, 宇宙空间某点在宇宙直角坐标系的坐标也随着地球的自转而变化。为了寻找固定不变的轴或平面。地球绕其极轴自转, 就象是个大陀螺, 由于陀螺的定轴性, 地球的极轴在宇宙空间的指

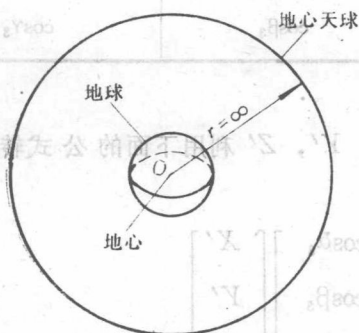


图1.8 地心天球

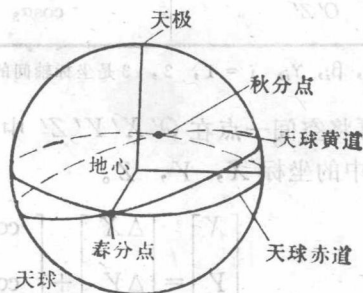


图1.9 天球赤道和天球黄道

向 (即赤道平面在宇宙空间的方向) 是稳定不变的。当然地球的赤道平面也可视为在宇宙空间的一个稳定平面, 可以作为一参考面。设想把地球赤道面无限延展, 它和天球相交, 交线称为天球赤道, 如图 1.9 所示。

要建立一个固定不变的参考系, 需有三条稳定的参考轴或两个互不平行的稳定平面。

如图 1.10 所示, 地球绕太阳公转的轨道面, 也是一个稳定平面, 此轨道面称为黄道平面, 也可视为参考面。黄道平面通过地心, 与赤道平面约有 23.44° 的夹角。设想把黄道平面也无限延展, 它和天球相交, 交线称天球黄道。如图 1.9 所示, 天球赤道和天球黄道相交于二点, 一点称春分点, 另一点称秋分点, 由于天球赤道面和黄道面在宇宙空间的位置稳定不变, 春分、秋分点的位置也不变。地心和春分点连线称春分点轴是一条在宇宙空间稳定的参考轴。天球极轴, 春分点轴加上与这两轴垂直并位于天球赤道平面内的第三条轴 (自然是稳定的轴), 构成在宇宙空间不变的参考轴, 称地心天球坐标系。

应当指出, 实际上地球极轴的指向, 地球赤道面和黄道面的夹角, 春分点在天球上的位置均非绝对固定不变, 都有漂移, 只是漂移的速度极其缓慢, 因此在一段时间内能把它们看成基本不变! 例如春分点的位置, 如图 1.11 所示, 每年沿着天球黄道向西漂移约 $50''$, 漂移的周期约为 258000 年 (见附录 1.3)。

建立了地心天球坐标系, 就可用来确定卫星的运行轨道参量, 从而确定卫星在宇宙空间的位置。

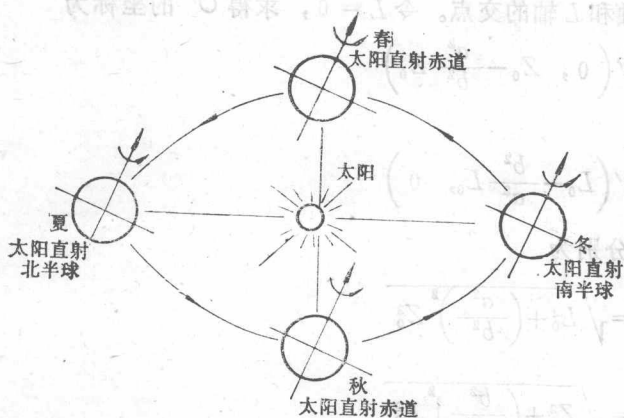


图 1.10 地球自转和地球绕太阳公转

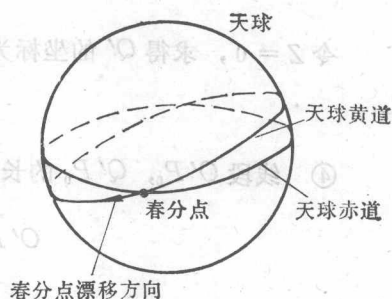


图 1.11 春分点及春分点漂移

附表 1.1 各种椭球及其平均半径

	克拉克 (Clarke) 1866 椭球	国际 (International) 椭球	克拉索夫斯基 (Красовский) 椭球
长半轴 a , 扁平系数的倒数 $1/f$	6378.206 km 295	6378.388 km 297	6378.245 km 298.3
按椭球面积计算得到的平均 半径 R	6370.997 km	6371.228 km	6371.116 km
按椭球体积计算得到的平均 半径 R'	6370.990 km	6371.221 km	6371.109 km

表面积等于椭球表面积的圆球半径称为按椭球面积计算得到的平均半径。
体积等于椭球体积的圆球半径称为按椭球体积计算得到的平均半径。

附录1.1 $O'P$, $Q'P$ 与 a , f , φ 之间的关系

如图 1.12 所示: 椭球上一点 $P = P_0$, 其坐标为 (L_0, Z_0) 。椭圆的方程为

$$\frac{L^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1$$

① 过 P_0 点椭圆切线的斜率为

$$Z'|_{P=P_0} = -\frac{b^2}{a^2} \frac{L_0}{Z_0}$$

② 过 P_0 点法线的斜率及法线方程分别为:

$$n'|_{P=P_0} = -\frac{1}{Z'|_{P=P_0}} = \frac{a^2}{b^2} \frac{Z_0}{L_0};$$

$$(Z - Z_0) = \frac{a^2}{b^2} \frac{Z_0}{L_0} (L - L_0)$$

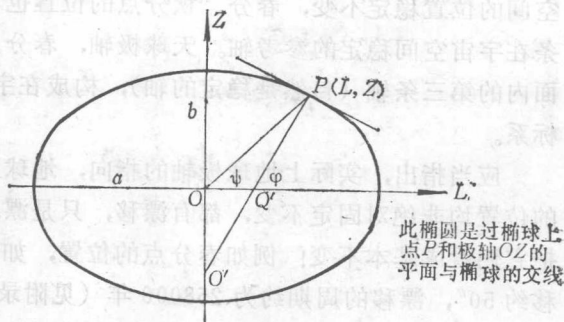


图1.12 基准椭球面上任一点的 $O'P$, $Q'P$

③ O' , Q' 分别是法线与 Z 轴和 L 轴的交点。令 $L = 0$, 求得 O' 的坐标为

$$O' \left(0, Z_0 - \frac{a^2}{b^2} Z_0 \right)$$

令 $Z = 0$, 求得 Q' 的坐标为

$$Q' \left(L_0 - \frac{b^2}{a^2} L_0, 0 \right)$$

④ 线段 $O'P_0$, $Q'P_0$ 的长度分别为

$$O'P_0 = \sqrt{L_0^2 + \left(\frac{a^2}{b^2} \right)^2 Z_0^2}$$

$$Q'P_0 = \sqrt{Z_0^2 + \left(\frac{b^2}{a^2} \right)^2 L_0^2}$$

P_0 为任意点 P 时, 则有

$$O'P = \sqrt{L^2 + \left(\frac{a^2}{b^2} \right)^2 Z^2}$$

$$Q'P = \sqrt{Z^2 + \left(\frac{b^2}{a^2} \right)^2 L^2}$$

$$\therefore \frac{Q'P}{O'P} = \frac{b^2}{a^2} = (1 - f)^2$$

$$\therefore \frac{L^2}{a^2} + \frac{Z^2}{b^2} = 1 \text{ 且 } n' = \tan \varphi = \frac{a^2}{b^2} \frac{Z}{L}$$

$$\therefore L^2 = \frac{a^2}{1 + \frac{b^2}{a^2} \tan^2 \varphi} \quad Z^2 = \frac{\frac{b^4}{a^2} \tan^2 \varphi}{1 + \frac{b^2}{a^2} \tan^2 \varphi}$$