

高等学校电子信息类教材

# 卫星导航系统概论

边少锋 李文魁 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校电子信息类教材

# 卫星导航系统概论

边少锋 李文魁 编著

电子工业出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书叙述卫星轨道确定的常用坐标系和基础知识,在此基础上比较全面地介绍了目前得到广泛应用的三种卫星导航系统,即美国 GPS 全球卫星定位系统、俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统和中国北斗双星定位通信系统的基本组成、定位原理、导航电文特点和误差,最后对卫星导航系统的发展进行了展望。为加深对所学知识的理解,部分章节附有用 Mathematica 计算机代数系统计算的典型问题的例题。

本书可作为大学本科高年级学生或研究生学习卫星导航的教科书或教学参考书,也可作为相关专业科研人员的业务参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

卫星导航系统概论/边少锋,李文魁编著. —北京:电子工业出版社,2005.2  
(高等学校电子信息类教材)

ISBN 7-121-00903-X

I. 卫… II. ①边… ②李… III. 卫星导航—高等学校—教材 IV. TN967.1  
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 007137 号

责任编辑:韩同平

印 刷:北京天竺颖华印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 印张:12.75 字数:326.4 千字

印 次:2005 年 2 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:28.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 前 言

本书是为导航工程专业本科生或研究生学习卫星导航课程而编写的教材。

全书共分7章。第1章介绍卫星导航系统的发展概况和基本原理,第2章介绍卫星导航系统常用的坐标系与时间系统,第3章介绍卫星轨道确定的基础知识,第4章介绍GPS全球定位系统和GPS用户接收机,第5章介绍俄罗斯GLONASS卫星导航系统,第6章介绍我国北斗双星定位通信系统,第7章为卫星导航定位系统发展展望。为加深对所学知识的理解,部分章节附有Mathematica计算机代数系统计算的一些导航定位典型问题的计算实例。

为使本书不但可以供导航专业学生作为教材使用,而且也可以作为导航或相关专业人员的参考书,本书在内容上要比教学大纲要求的学时数多一些,具体使用时,有些内容可以不讲或少讲。

在本书编写过程中,参考和引用了许多知名专家、学者的著作和论文,如李济生院士的《人造卫星精密轨道确定》,童凯院士的《中国导航定位系统的进展》,许其凤教授的《空间大地测量学》,言中、丁子明教授的《卫星无线电导航》,以及其他一些文献。由于引用和参考之处甚多,因此未能在正文中一一注明。在此,编著者谨向有关引用和参考文献的作者表示由衷的感谢。

本书编写过程中,还得到了国家自然科学基金委地球物理处于晟主任的关怀,得到了海军工程大学导航工程系许江宁、陈永冰、周永余等同志的帮助和支持,书中插图由研究生金际航、纪兵绘制,空军工程大学导航工程系吴德伟教授、空军指挥学院任留成教授审阅了书稿,并提出了许多宝贵意见,特此表示感谢。

由于编著者学识水平有限,书中错误和不足之处一定不少,恳请广大读者批评指正。

编著者的电子邮件地址:sfbian@sina.com

编著者  
于海军工程大学

## 本书中的文字符号及其说明

$B, L, H$	大地纬度, 大地经度, 大地高
$\varphi, \lambda, r$	天文(或地理)纬度, 经度, 地心向径
$X, Y, Z$	地心地固(ECEF)空间直角坐标系分量
$x, y, z$	局部切平面空间直角坐标系分量
$\alpha, \delta$	天球赤道坐标系赤经, 赤纬
$\xi, \eta, N(\zeta)$	垂线偏差, 大地水准面差距(高程异常)
$a, b$	参考椭球长半径, 短半径
$e, e'$	椭球第一偏心率, 第二偏心率
IAT, UTC	国际原子时, 协调世界时
$\Omega, i, \omega$	升交点赤经, 轨道倾角, 近地点角
$T, \omega$	卫星运行周期, 地球自转角速度
$\mu = GM$	开普勒常数
$f, E, M$	真近点角, 偏近点角, 平近点角
$R, \bar{C}_{nm}, \bar{S}_{nm}$	摄动力位函数, 正常化球谐函数系数
$\bar{P}_{nm}(\sin\varphi)$	正常化 $n$ 阶 $m$ 级勒让德函数
$J_2$	地球引力场二阶带谐项
$A, Q$	误差方程系数矩阵, 几何精度系数矩阵
$\sigma, P$	单位权方差, 观测值权阵
DOP, PDOP	几何精度系数, 位置精度系数
$X_0, Y_0, Z_0$	测站近似坐标
$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	坐标改正数
$f$	载波频率
$\rho_i$	卫星至地面观测站距离, 伪距
GEO, IGEO	(赤道)地球同步卫星, 倾斜轨道地球同步卫星
GPS, GIS	全球定位系统, 地理信息系统
GNSS, GLONASS	全球导航卫星系统, (俄罗斯)全球卫星导航系统
WGS-84	美国 1984 年定义的“世界大地坐标系”

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 导航的基本概念和发展 .....	( 1 )
1.2 卫星导航定位系统的特点 .....	( 3 )
1.3 卫星导航定位系统的发展概况 .....	( 4 )
1.4 卫星导航定位系统的分类 .....	( 8 )
1.5 卫星定位的基本原理 .....	( 10 )
1.6 卫星导航的应用和发展 .....	( 12 )
思考题与习题 .....	( 14 )
<b>第 2 章 导航常用坐标系与时间系统</b> .....	( 15 )
2.1 卫星轨道确定常用坐标系统 .....	( 15 )
2.2 天球坐标系 .....	( 16 )
2.3 大地水准面与参考椭球 .....	( 19 )
2.4 WGS—84 世界大地坐标系 .....	( 20 )
2.5 地固空间直角坐标系与大地坐标系的转换 .....	( 22 )
2.6 大地坐标微分公式 .....	( 26 )
2.7 站心切平面坐标系 .....	( 27 )
2.8 天文坐标系 .....	( 29 )
2.9 高斯投影平面直角坐标系 .....	( 32 )
2.10 墨卡托投影平面直角坐标系 .....	( 34 )
2.11 卫星时间系统 .....	( 37 )
思考题与习题 .....	( 40 )
<b>第 3 章 导航卫星轨道确定基础知识</b> .....	( 41 )
3.1 开普勒三定律与卫星轨道参数 .....	( 41 )
3.2 二体问题的运动方程 .....	( 43 )
3.3 卫星星历计算基础 .....	( 48 )
3.4 卫星的受摄运动 .....	( 51 )
3.5 卫星的工作区域 .....	( 54 )
3.6 导航卫星轨道参量的选择 .....	( 59 )
3.7 地球同步卫星(GEO) .....	( 60 )
思考题与习题 .....	( 64 )
<b>第 4 章 GPS 全球定位系统</b> .....	( 65 )
4.1 GPS 全球定位系统组成与功能 .....	( 65 )
4.2 伪随机码与 GPS 测距码 .....	( 71 )
4.3 GPS 卫星信号的构成 .....	( 75 )
4.4 GPS 卫星的导航电文 .....	( 78 )

4.5	GPS 定位测速的基本原理 .....	(82)
4.6	GPS 信号的接收 .....	(86)
4.7	GPS 系统定位误差与几何精度系数 .....	(91)
4.8	差分 GPS 定位 .....	(97)
4.9	NavTrac GPS 导航仪 .....	(101)
4.9.1	NavTrac GPS 导航仪的基本组成和性能特点 .....	(101)
4.9.2	NavTrac GPS 导航仪的操作和使用 .....	(103)
	思考题与习题 .....	(123)
<b>第 5 章</b>	<b>俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统 .....</b>	<b>(124)</b>
5.1	GLONASS 系统简介 .....	(124)
5.2	GLONASS 星座和卫星结构 .....	(127)
5.3	地面测控系统和用户 .....	(130)
5.4	GPS/GLONASS 技术体制比较 .....	(133)
5.5	GLONASS 信号特性 .....	(136)
5.6	GLONASS 卫星位置计算 .....	(141)
5.7	PZ-90 与 WGS-84 坐标转换参数 .....	(142)
5.8	GPS/GLONASS 组合应用与兼容技术 .....	(144)
	思考题与习题 .....	(146)
<b>第 6 章</b>	<b>北斗双星定位通信系统 .....</b>	<b>(147)</b>
6.1	双星导航定位系统简介 .....	(147)
6.2	双星系统定位解算方法 .....	(150)
6.3	北斗系统定位误差分析 .....	(157)
6.4	北斗定位接收机组成与功能 .....	(162)
6.5	基本型用户机静、动态试验结果与分析 .....	(167)
6.6	双星定位系统的技术特点 .....	(169)
6.7	北斗系统应用展望 .....	(171)
	思考题与习题 .....	(176)
<b>第 7 章</b>	<b>导航对抗与卫星导航定位系统展望 .....</b>	<b>(177)</b>
7.1	导航对抗与 GPS .....	(177)
7.2	GPS 干扰与对抗 .....	(179)
7.3	GPS 现代化 .....	(181)
7.4	GPS 与 GIS .....	(183)
7.5	欧洲 GALILEO 卫星导航系统计划 .....	(185)
7.6	中国第二代导航卫星系统展望 .....	(190)
	思考题与习题 .....	(192)
<b>附录 A</b>	<b>Mathematica 计算机代数系统 .....</b>	<b>(193)</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>(195)</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 导航的基本概念和发展

导航是引导运载体按一定航线航行的过程。从导航的“航”和其英文名称 Navigation, 以及从导航的历史来看, 导航最先被应用于海上航行的舰船和海军, 以后随着科学技术的发展, 其应用对象又被扩展至飞机、导弹、飞船、坦克、车辆和单兵, 等等。这是很自然的, 因为在茫茫的海上, 根本不可能像陆地那样找到可供利用的参照物。导航过程中应能够随时提供反映载体运动状态的位置、速度、姿态, 以及相对于航行目的地的其他一些参数, 以便载体沿着航行安全、用时较短、费用经济的路线到达目的地。但在这些参数中, 最重要的参数还是确定载体的位置, 即定位, 所以导航的核心是定位。要实现导航必须对运动体实施实时定位, 以便与目的地的位置相比较, 进而计算前进的距离和方位。一般来说, 导航与定位的区别在于: 导航是对运动点而言的, 观测时间很短, 观测数据要实时处理, 提供相对参考位置的相对坐标, 定位精度不及固定点高; 定位一般是对固定点而言的, 允许较长时间的观测, 观测数据事后处理, 提供绝对坐标, 定位精度较高。能够导航的系统必须能够定位, 能够定位的系统未必能够导航, 这取决于观测器材能否在运动体上获得足够精度的观测量。

导航的实现依赖于一定的设备或系统, 能够完成这种引导功能的设备就称为导航设备或系统。这些设备或系统有的非常简单, 如指南针、罗盘; 有的非常庞大, 如近代的卫星导航系统。根据导航所依附的物理技术手段, 导航又可分为地磁导航(如指南针)、陆标导航(如港口灯塔)、天文导航、惯性导航、无线电导航, 直至近代的卫星导航。

导航设备有两种工作状态: 一是指示状态, 这种状态下导航设备只提供载体的运动参数和引导驶向目的地的航行参数, 驾驶人员根据这些信息控制载体航行(如操舵), 导航设备不直接参与对载体的控制; 二是控制状态, 即导航设备将导航信息直接提供给自动驾驶仪, 根据导航系统提供的导航参数, 结合预先设定好的计划航线, 可自行控制舵机改变舰船航向、控制主机调速装置调节舰船航速, 使舰船按照预定航线到达目的地。这种用导航系统控制航行系统的方式, 称为制导。弹道导弹、人造卫星运载火箭的飞行控制系统就是制导, 也就是自动导航系统。不论导航系统工作在何种状态, 导航系统的核心任务就是准确地、及时地、全面地提供载体的运动参数和导航参数。

导航系统可分为自主式和非自主式两大类。自主式导航系统可在不依靠外界信息或不与外界发生联系条件下, 独立完成导航任务。而非自主式导航系统必须有地面设备或依靠其他外部信息才能完成导航任务。自主式导航系统在军事上特别重要, 它可保证载体(如军用飞机、水面舰艇、潜艇等)能独立自主、安全、隐蔽地执行自己的任务, 而不受外部导航设施的制约。

导航(或早期的航海)是一门古老的学科。中国是世界四大文明古国之一, 据史料记载, 早在四千年以前, 黄帝和蚩尤作战时, 为了辨明方向以追击敌人, 就曾使用了指南车, 有“蚩尤作大雾, 黄帝用指南车战而胜之”; 中国很早就发明了利用地球磁场指明方向的司南(指南针), 如



图 1-1 所示。沈括在《梦溪笔谈》中对指南针技术做了系统阐述,认为磁针“时偏东,不全南也”。磁偏角的发现,对提高辨向精度,保障航行安全起了重要作用。

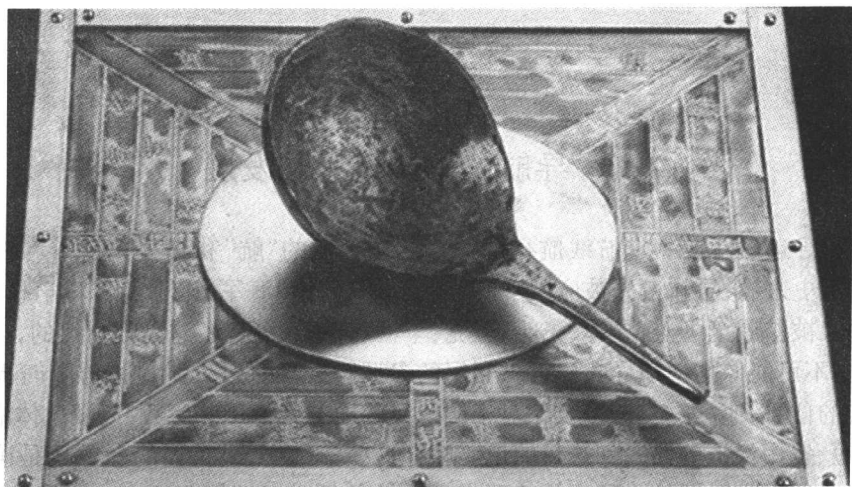


图 1-1 司南(指南针)

15 世纪,明代永乐年间的郑和七下“西洋”,规模庞大,船队最多时达 200 多艘船,其中长 148m、宽 60m 的大型船只有 60 艘。“舟师”使用了罗盘、测深器、牵星板(类似于现在的六分仪)等世界先进技术,航程十万余里,创造了我国和世界航海史上的壮举。现在航空和航海上使用的磁罗盘,就其原理来说,也是一个指南针。古代地中海国家的航海和贸易也促进了导航和天文导航的发展。17 世纪初,欧洲各国开始进入资本主义社会,对外贸易的发展和海上掠夺殖民地的战争也导致了当时航海业的发展。但是,要在无边无际的大海中航行,没有导航定位手段是不可能的。在当时的条件下,天文科学已经发展到了一定的水平,为了确定船舶的位置,人们就利用星体在一定时间与地球的地理位置具有固定关系的原理,发展了通过观测星体确定船舶位置的天文导航方法。随着科学的发展和时代的进步,运动载体对导航定位精度及其他要求也越来越高,磁罗盘和原始的天文导航方法也就不能满足需要了。

惯性导航是依据牛顿力学原理来测量载体运动状态的。1942 年德国在 V-2 火箭上第一次安装上了初级的惯性导航系统,以提供火箭的姿态和入轨初速度。这一工作引起了人们极大的重视,推动了惯性导航的研究。但是惯性导航的定位误差是随时间积累的,很难满足海上舰船长时间使用的要求,并且高精度惯性导航设备属于精密仪器,造价非常昂贵,因此只能在少数大型舰船上装备,难以普及利用。

19 世纪电磁波的发现为近代无线电导航奠定了基础,无线电导航根据无线电波在地面传播的时间来测定载体的位置。无线电导航系统种类较多,典型的有罗兰 A、罗兰 C、奥米伽、测向仪等。按定向原理又有测向、测距、测距离差之分。一般测距离对时间同步的要求比较高。实践上多使用测距离差的双曲线定位体制。20 世纪 60 年代,我国在沿海地区布设了罗兰 A 台链,取名为中导-I 型系统。20 世纪 90 年代,又分别在南海、东海和北海布设了罗兰 C 台链,取名为远导-I 型系统,其作用距离可达 2000 km 左右。罗兰 C 东海台链如图 1-2 所示。虽然这些系统定位不像天文导航那样受气象条件的影响较大,但定位是区域性的,且定位精度仍然比较低,精度约为几百米量级。

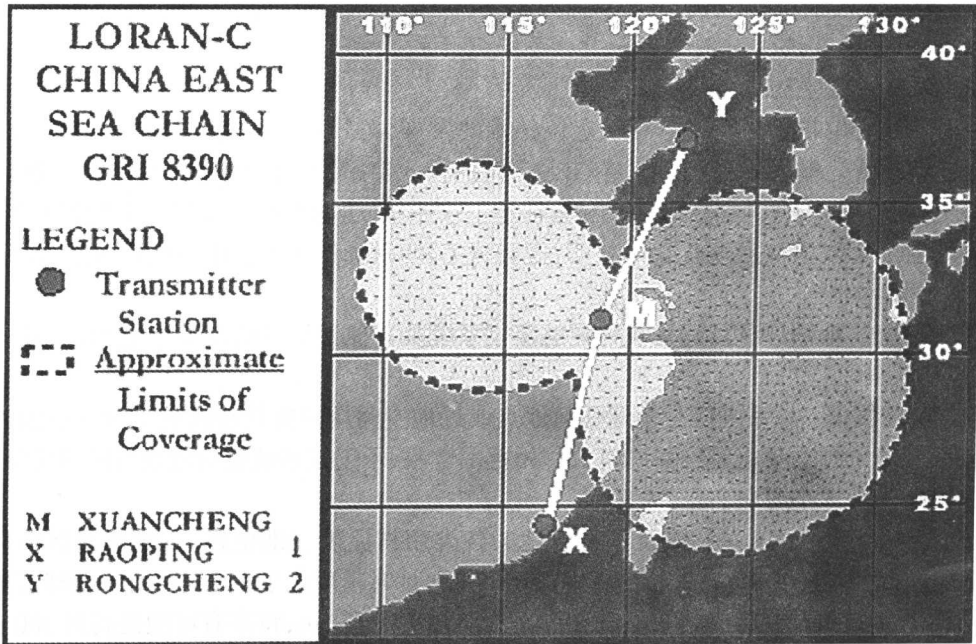


图 1-2 罗兰 C 东海台链  
M 代表宣城, X 代表饶平, Y 代表荣成

与天文定位相比,无线电定位无论是在定位的速度还是在自动化程度方面都有了长足的进步,定位精度也有所改善,而且定位已基本不受气象条件的限制;然而,地面无线电导航定位系统的作用距离(覆盖)和定位精度之间会产生矛盾。低频率的无线电波可以沿着地球表面传播;因而只要具有足够大的发射功率,信号就能传播到很远的地方。长波信号的观测精度较差,且信号的传播路径难以准确确定;再加上信号需要在稠密的大气层中远距离传播而用户又无法测定信号传播路径上的气象元素,难以进行准确的气象更正,所以一些覆盖面大的地面无线电导航定位系统的定位精度较低。使用高频的信号虽然可以获得较高的精度,但信号是沿着直线传播的,受地球曲率影响,覆盖面很小。因此,各个部门为了满足各自的应用要求相继建立了各种不同类型的地面无线电导航定位系统,如罗兰、奥米伽和台卡等。

随着 1957 年前苏联第一颗人造地球卫星的发射和 20 世纪 60 年代空间技术的发展,各种人造卫星相继升空,人们很自然地想到如果能从卫星上发射无线电信号,组成一个卫星导航定位系统,就能较好地解决覆盖面与定位精度之间的矛盾。于是,出现了卫星导航定位系统。由于它具有比地基无线电导航系统所无法比拟的优点和精度,因而得到了迅速的发展。特别是美国全球定位导航系统(GPS)的投入使用和应用范围的不断扩大,逐渐使传统的天文导航和地面/近地无线电导航定位系统结束了长期的垄断地位。

## 1.2 卫星导航定位系统的特点

卫星导航定位系统属于星基无线电导航定位系统,与惯性导航、天文导航等导航技术相比,它具有下列特点:

- (1) 受外界条件(如昼夜、季节、气象条件等)的限制较小;

(2) 导航定位精度高(如子午仪系统为 40~500 m, GPS 系统为 5~100 m, 北斗系统为 30~100 m), 定位速度快(如 GPS 系统、北斗系统可近乎实时定位);

(3) 可靠性高, 经济效益好。

卫星导航定位技术是无线电导航定位技术的发展, 尤其是 GPS 系统的投入使用, 代表了无线电导航现代化的发展趋势。随着 GPS 系统的投入使用, 罗兰、奥米伽、台卡等导航系统都可能关闭, NNSS 子午仪卫星导航系统(简称子午仪系统)也将退出。美国已把发展 GPS 系统作为促进整个无线电导航现代化的核心, 把建成 GPS 系统作为无线电导航进入 21 世纪的重要标志。

GPS 系统与地面(或近地)无线电导航定位系统及其他卫星导航定位系统相比, 具有以下特点:

(1) 全球覆盖: 该系统能为全球任何地点或近地空间用户提供连续的全球导航能力。而地面(或近地)无线电导航定位系统有效作用范围有限, 子午仪系统也只能进行断续定位, 且平均定位间隔为 1.5 小时左右。

(2) 高精度三维定位: 该系统能连续地为各类用户提供三维位置、三维速度和精确的时间信息, 定位精度优于 10 m, 测速精度优于 0.1 m/s, 计时精度优于 10 ns(相对于全球定位系统的时间标准), 而相对于世界协调时(UTC)的授时精度优于  $1\mu\text{s}$ ; 将来有可能提高到 100 ns。

(3) 近乎实时导航: 系统一次定位时间一般只要几秒, 最多几十秒就可以完成, 这对于高动态用户来说很有意义。而子午仪系统一次定位需时约十几分钟, 对飞机来说, 这段时间飞机的飞行距离可达几十千米, 甚至几百千米, 因此子午仪系统对高速用户意义不大。

(4) 抗干扰能力强: 系统采用“伪随机码”扩频技术, 导航信息表面上是随机噪声信号, 但实际上是按预先确定的数学公式编码而产生的信号, 因此具有抗干扰能力强、保密性好等优点。

(5) 通用全球导航系统: 这也许是全球定位系统的最重要特点之一。由于子午仪系统只能作为辅助导航手段向海上用户提供断续定位, 因此, 用户还必须装备其他能连续提供导航信息的设备, 如惯性导航设备等。而 GPS 系统能向全球任何地点和近地空间的独立用户提供连续的高精度导航信息, 并给出用户在全球定位系统坐标系的位置、速度和时间, 因此, 该系统能克服其他各种导航手段的局限性, 而成为能真正独立的通用全球定位系统, 这就有可能从根本上解决各种导航设备种类繁多和费用不断增加的问题。

(6) GPS 系统卫星轨道高度为 20183 km, 轨道周期为 12 小时, 受地区重力场和大气阻力的影响较小, 轨道的进动不像子午仪系统那样严重。

### 1.3 卫星导航定位系统的发展概况

卫星导航定位系统的建立, 最初完全是出于军事目的。例如, 1964 年投入使用的子午仪系统, 就是为北极星导弹潜艇在远海中导航定位而研制的。随着冷战时代的结束, 以及卫星导航定位系统的发展和完善, 卫星导航定位中的国际协作活动日益增多, 卫星导航定位中的商业化趋势也越来越明显, 从而形成今后卫星导航定位技术的发展特点。

美国与俄罗斯是空间技术十分发达的国家。目前, 美国与俄罗斯已拥有实用的卫星导航定位系统, 其他具有空间技术实力的国家也发展和提出了各自的卫星导航计划, 概况如下所述。

## 1. 美国子午仪卫星导航系统

美国子午仪卫星导航系统,又称为海军导航卫星系统(Navy Navigation Satellite System,缩写成 NNSS)。它于 1964 年在军事上正式投入使用,1967 年开始提供民用,目前已停止使用。

子午仪系统由三部分组成,即空间部分、地面监控部分和用户部分。

空间部分由 6 颗高约 1000 km 的卫星组成,它们分布在 6 个轨道平面内,其轨道面相对于地球赤道的倾角约为  $90^\circ$ ,轨道形状近似为猿形,运行周期约为 108 分钟。卫星发播 400 MHz 及 150 MHz 两种频率的载波,供用户及监控站对卫星进行观测。在 400 MHz 的载波上调制有导航电文,它向用户提供卫星位置和时间信息,用于测站位置解算。

地面监控部分包括卫星跟踪站、计算中心和注入站。跟踪站不断地观测卫星,将数据传至计算中心;计算中心根据跟踪数据计算卫星轨道,并形成对应不同时间的一系列导航电文;注入站将电文注入卫星存储器,由卫星定时提供给用户。

用户部分主要是用户接收机。用户接收机接收卫星发播的无线电信号,测量因卫星对接收机不断运动而产生的多普勒频移,并根据卫星发播的导航电文,计算卫星位置。由于多普勒频移反映了卫星与接收机相对运动速度,因此,它包含了卫星与接收机相对位置信息,根据卫星位置就可以计算接收机的位置。

子午仪系统只能提供二维导航解,取得一次导航解需对一颗卫星观测 8~10 分钟,定位精度一般优于  $\pm 40$  m。不同地理位置的测站,平均 1.5 小时才能定位一次。利用卫星的瞬时位置和测站坐标之间的数学关系,可以计算出测站地心坐标。固定地面测站,每隔 1 小时可以观测到子午仪卫星通过一次,一般观测 40~50 次,利用收到的卫星星历和单点定位技术求得的测站地心坐标,其精度约为  $\pm 3 \sim \pm 5$  m。

前苏联在 20 世纪 70 年代也建成过类似于子午仪系统的奇卡达(Tsikada)卫星导航系统。奇卡达由 6 颗导航卫星组成卫星网,轨道高约 1000 km,与赤道面夹角为  $83^\circ$ ,绕地球一周的时间为 105 分钟。系统工作频率为 400 MHz 和 150 MHz,信号调制方法和子午仪系统有所不同。

## 2. 全球定位系统

子午仪卫星导航系统实现了全球导航定位,但是,它不能实现连续定位、实时定位和三维定位。为克服子午仪卫星导航定位系统的这些局限,美国国防部于 1973 年正式批准陆、海、空三军共同研制国防卫星导航系统——全球定位系统,即 GPS 系统。

导航星全球定位系统(Navstar Global Positioning System),简称 GPS 系统或导航星(Navstar)系统。GPS 计划是美国国防部的一项规模宏大的战略性计划,其目的是要以比迄今为止高得多的精度,满足美国陆、海、空等各军兵种的全天候导航定位及定时之用。

GPS 计划自 1973 年起步,1978 年首次发射卫星,1994 年完成 24 颗中高度圆轨道(MEO)卫星组网,共历时 16 年,耗资 120 亿美元。至今,已先后发展了三代卫星,共发射了 41 颗卫星。目前,在轨工作卫星有 28 颗,其中还发射成功 2 颗新型的 2R 型卫星,还将发射 19 颗,总共耗资 190 亿美元。计划从 2003 年开始部署 33 颗 2F 型卫星。此外,现在又开始了全改进型 GPS-III 的概念研究,以适应未来的系统升级要求。GPS 系统由美国国防部运作。

GPS 计划的执行机构是设在美国空军系统部航天处的“联合计划办公室”。办公室的官员来自美国陆军、海军、空军、海军陆战队、国防测绘局、交通部,以及澳大利亚和北约九国(英、法、德、意、挪、荷、丹、比、加)的代表。办公室的职责主要是负责 GPS 计划的管理和协调,并提

出有关政策和实施的建议。此外,北约九国还成立了一个“北约组织工作队”,其任务是:①把欧洲/加拿大的应用要求列入该计划;②进行信息获取和相互间的技术转让;③在 GPS 接收机方面实现标准化。

GPS 计划分三个阶段实施。第一阶段(1973~1979 年)是原理可行性研究和方案论证阶段。第二阶段(1979~1984 年)是工程研制和系统试验阶段,测试结果表明方案正确,系统达到了预定设计目标。第三阶段为改善系统性能,整个系统投入使用阶段。原计划从 1986 年起,由航天飞机分批把工作型卫星送入轨道,1989 年系统全面组网使用,达到三维定位能力。由于 1986 年初航天飞机失事,GPS 系统的第三阶段计划被迫推迟到 1989 年 2 月才开始执行,1993 年初全面组网使用(1993 年 5 月使用 MX-5400—GPS 接收机实测有 22 颗 GPS 导航卫星在轨道上飞行)。

GPS 系统由三大部分组成,即空间部分、地面控制部分和用户部分。

### (1) 空间部分

原计划布署 24 颗卫星,均匀分布在 3 个轨道面上,但经 1979 年方案论证完成之后,调整为 21 颗(18 颗工作星,3 颗备用星)卫星,配置在 6 个轨道面上,每个轨道面均匀分布 3 颗,高度约 20000 km,倾角  $55^\circ$ ,周期 12 小时,每个轨道面卫星间隔为  $120^\circ$ ,相邻轨道面的邻近卫星的相位差  $40^\circ$ ,卫星轨道为近似圆形。因此,全球任一地点的用户都能在任意时刻至少看到 4 颗 GPS 卫星。卫星上的设备主要有具有长期稳定度的、产生精密时间和导航信息的原子钟(铯钟,其误差为 1 秒/300 万年),以及连续发射无线电载波的发射机。无线电载波有 L 波段的两个频率: $f_1=1575.42\text{ MHz}$ , $f_2=1227.60\text{ MHz}$ ,波长分别为 19 cm 和 24 cm,采用三种伪随机噪声码(PRN)调制,这三种码即 P 码、C/A 码和 Y 码。P 码(Precision)每七天重复一次(码率为 10.23 MHz),且各颗卫星的 P 码不同,码的变化复杂,不易捕获,可用于精密定位和时间测量,故又称为“精码”;C/A 码(Coarse/Access)每 1 ms 重复一次(码率为 1.023 MHz),用来快速捕获导航信号,仅用于实时粗略定位,故称之为“粗码”或 S 码(Standard Positioning Service);Y 码与 P 码类似,但因为编制 P 码的方程已为许多人熟知而使得编制 Y 码的方程一开始就严格保密,所以将来可能用 Y 码代替 P 码。通常, $f_1$ 上调制 P 码(或 Y 码)和 C/A 码两种信号,它们在相位上是正交的, $f_2$ 上只调制 P 码(或 Y 码)信号。但对于特殊应用,可以把  $f_1$ 上调制的 P 码转换到 C/A 码上。P 码和 Y 码只限于美国及盟国的军事部门或授权的民用部门使用。

### (2) 地面控制部分

由一个主控站、三个注入站和五个监控站组成。这些站都设在美国本土,所以即使在战时也不容易受到破坏而能保障连续工作。目前主控站已由范登堡空军基地移至科罗拉多州,三个注入站设在迪戈加西亚、关岛和阿森松岛,五个监控站分别设在关岛、夸贾林岛、夏威夷、阿拉斯加州埃尔门多夫空军基地和范登堡空军基地。这些地面站的位置已由国防部测绘局精确测定,其作用是对卫星进行连续监控(对卫星的跟踪率可达  $90.6\% \sim 100\%$ ),取得各项观测资料,算出每颗卫星的 15 分钟平滑数据,传送到主控站进行处理和分析。由主控站完成轨道和时钟改正参数的计算,发给注入站以向每颗卫星(每隔 8 小时)注入导航信息和其他控制参数。为克服监控站分布不均匀的缺陷,近几年美国国防测绘局还在英国、南美、澳大利亚和中国等地增设了观测站,以进一步提高轨道预报精度和计算精密星历。由于卫星上不断储备有新的导航信息,所以即使有朝一日万一整天地面控制部分失效,则预先存储在星内的导航信息仍可支持 14 天预报。为支持地面控制系统,海军天文台和国防测绘局还将提供与 GPS 时间协调

的世界时,并为计算星历提供精确的地球定向数据。

### (3) 用户部分

由天线、接收机、数据处理机和控制/显示装置组成。现在,世界范围内已有许多厂家生产出百种以上的 GPS 接收设备,根据用户的任务不同,所用设备的复杂程度也不同。例如,地面部队一般采用较简单的便携式接收机,用于高动态环境的用户(如导弹、飞机)则采用较复杂的接收/处理机。而所谓“简单”和“复杂”,一般是根据通道的多少(有单、双、多通道接收机等几种)和测量的功能如何(有连续、时序、多路复用接收机等几种)来划分的。

美国政府为了加强其在全球导航市场的竞争力,已于 2000 年 5 月 1 日午夜撤销对 GPS 的 SA 干扰技术,标准定位服务双频工作时实际定位精度可提高到 20 m,授时精度提高到 40 ns,并承诺以后逐步增加两个民用频率,即  $f_2$  增加 C/A 码和民航安全专用的  $f_5$ (频率 1176 MHz),希望以此来抑制其他国家建立与其平行的另一个系统,并提倡以 GPS 和美国政府的增强系统作为国际使用的标准。

为了提高导航精度、可用性和完整性,世界各地发展了各种差分系统。特别是利用地球静止轨道卫星建立的地区性广域差分增强系统(如美国民航局开发的 WAAS,欧洲的 EGNOS 及日本的 MSAS),可提供附加区域卫星导航测距信号、导航精度校正数据和在轨导航卫星的可用性信息,成为显著提高导航精度和可靠性的重要手段。

## 3. 俄罗斯 GLONASS 卫星导航系统

俄罗斯要用 20 年时间发射 76 颗 GLONASS 卫星。1995 年完成 24 颗中高度圆轨道卫星加 1 颗备用卫星组网,耗资 30 多亿美元,由俄罗斯国防部控制。GLONASS 空间部分也由 24 颗卫星组成,卫星高度 19130 km,位于 3 个倾角为  $64.8^\circ$  的轨道平面内。这一高度除避免和 GPS 同一高程以防止两个星座相互影响外,其周期为 11 小时 15 分钟,8 天内卫星运行 17 圈回归,3 个轨道面内的所有卫星都在同一条多圈衔接的星下点轨迹上顺序运行。这有利于消除地球重力异常对星座内各卫星的影响差异,以稳定星座内部的相对布局关系。系统工作基于单向伪码测距原理,不过它对各个卫星采用频分多址,而不是码分多址。它的码速率是 GPS 的一半。GLONASS 未达到 GPS 的导航精度。它的主要好处是没有加 SA 干扰,民用精度优于加 SA 的 GPS。其应用普及情况则远不及 GPS。GLONASS 卫星平均在轨道上的寿命较短,后期延长为 5 年。前一时期由于经济困难无力补网,原来的在轨卫星陆续退役。1998 年 12 月和 2000 年 10 月各发射 3 颗卫星,目前在轨道上只有 6 颗卫星可用,不能独立组网,只能与 GPS 联合使用。其计划改进型卫星 GLONASS-M 平均寿命为 7 年,民用频率将由 1 个增加到 2 个,正在对外寻求合作以弥补经费不足。

## 4. 北斗导航系统

北斗导航系统是全天候、全天时提供卫星导航信息的区域性导航系统。这个系统建成后,主要为公路交通、铁路运输、海上作业等领域提供导航服务,对中国国民经济建设将起到积极的推动作用。

北斗导航系统在国际电信联盟登记的频段为卫星无线电定位业务频段,上行为 L 频段(频率 1610~1626.5 MHz),下行为 S 频段(频率 2483.5~2500 MHz);登记的卫星位置为赤道面东经  $80^\circ$ 、 $140^\circ$  和  $110.5^\circ$ (最后一个为备份星星位)。

美国的静止卫星公司和欧洲的本地卫星公司曾从事区域卫星系统(RDSS)的研制工作,但都失败和破产了。中国首先实现了 RDSS 系统这项卫星导航定位创新工程。工程投资是很少

的,它将导航定位、双向数据通信和精密授时结合在一起,系统自身包含广域差分标校以提高定位精度。当用户提出申请或按预定时间间隔进行定位时,不仅用户知道自己的测定位置,而且其调度指挥或其他有关单位也可得知用户所在位置。北斗系统由 2 颗经度上相距  $60^\circ$  的地球静止卫星(GEO)对用户双向测距,由 1 个配有电子高程图的地面中心站定位,另有几十个分布于全国的参考标校站和大量用户机。

北斗导航系统的研制,成功地解决了中国自主卫星导航定位系统的有无问题。它是一个成功的、实用的、投资很少的初级起步系统。此外,该系统的建设并不排斥国内民用市场对 GPS 的广泛使用。相反,在该系统的基础上,还将建立中国的 GPS 广域差分系统,可以更好地促进 GPS 在民间的利用。目前,卫星运行一直正常,系统调试与试运行表明该导航定位系统在国内及周边服务区的定位精度是很好的,简短双向数据很正常,满足系统预定要求。北斗导航系统尤其适合于同时需要导航与移动数据通信的场所,例如交通运输、调度指挥、有关地理信息系统的实时查询等。其正式运行将进一步促进中国导航应用市场的快速发展,刺激大批量用户机的迫切需求。

北斗导航系统需要中心站提供数字高程图数据和用户机发上行信号,从而使系统用户容量、导航定位维数、隐蔽性等方面受到限制,在体制上不能与国际上的 GPS、GLONASS 及将来的伽利略兼容。因此,中国还需要在第一代导航卫星系统成就的基础上发展第二代导航卫星系统,以满足今后国家对卫星导航应用和长远经济发展的需求。

## 5. 欧洲伽利略导航卫星系统计划

欧洲在经过几年的酝酿研究之后,1999 年初正式推出伽利略导航卫星系统计划。该计划方案由 21 颗以上中高度圆轨道核心星座组成,公布的卫星高度为 24000 km。经概算估计,回归轨道卫星高度应为 24045 km,周期为 52810.10 s(或 0.6129 恒星日),每 31 圈回归一次,回归周期为 19 个恒星日。卫星位于 3 个倾角为  $55^\circ$  的轨道平面内,另加 3 颗覆盖欧洲的地球静止轨道卫星,辅以 GPS 和本地差分增强系统,首先满足欧洲需求(估计全球增强需要 9 颗地球静止轨道卫星),位置精度达几米。这是一种具有区域加强的全球系统。系统计划几经挫折后,终于在 2001 年 4 月 5 日欧盟交通部长会议上获得批准;确定 30 颗卫星总投资为 35 亿欧元,主要投资将由欧洲联盟、欧空局提供,并从欧洲工业界和私人投资商中集资。预计系统于 2008 年投入运行,运营费和维持费由私营企业组成的运营公司承担。伽利略系统独立于 GPS,频段分开,但将与 GPS 系统兼容和相互操作,包括时间基准和测地坐标系统、信号结构以及两者的联合使用。根据欧委会的文件,伽利略系统虽是民间系统,但仍受控使用,采取反欺骗、反滥用和反干扰措施,在战时可以对敌方关闭。

## 1.4 卫星导航定位系统的分类

根据系统工作的不同特点,可对卫星导航定位系统进行不同的分类。下面从五个方面概要介绍卫星导航定位系统的分类。

### 1. 按测量的参数分类

#### (1) 测距导航系统

这种系统通过测量卫星与用户之间的距离来进行定位。测距系统可分为:

① 无源测距——卫星发射信号,用户通过测量卫星到用户间距离的方法实现定位。GPS系统就属于无源测距导航定位系统。

② 有源测距——采用双向测距定位。例如,地面站通过2颗(或更多颗)卫星向用户发射询问信号,用户接收并发回应答信号,由地面站测量信号的传播距离。由于地面站和卫星的坐标是已知的,因此可以求得用户位置。我国北斗双星定位系统就属于有源测距导航定位系统。

测距系统的卫星可以是静止卫星,也可以不是静止卫星,只要工作过程中位于地面站视界内即可,用户则要处于卫星的工作区内。

测距的方法有电磁波测距和激光测距两种。激光测距比电磁波测距精确,但成本高,使用较少。

## (2) 测距差导航系统

在同一时刻对几颗卫星进行距离测量,或在几个位置上对同一颗卫星的距离进行测量,利用距离差来定位的系统,称为测距差导航系统。

## (3) 卫星多普勒导航系统

用测量卫星多普勒频率实现导航定位的系统,称为卫星多普勒导航系统。子午仪系统就是一种卫星多普勒导航系统。

卫星在轨道上运行,由于卫星与卫星导航仪之间的距离在变化,会产生多普勒效应,使卫星导航仪接收到的卫星信号频率与卫星发射频率之间相差一个多普勒频率,或称多普勒频移。多普勒频移与卫星和卫星导航仪之间的距离变化率成正比,所以可用它来确定卫星导航仪与卫星之间的相对位置。

一般卫星导航仪用测量多普勒频移积分值的方法来定位,而不是通过测量瞬时的多普勒频率来定位,因为测量多普勒频移积分值比测量瞬时多普勒频率要精确。

## (4) 测角导航系统

用确定一颗或多颗卫星相对于某一基准方向的夹角(例如仰角),来实现定位的系统,叫做测角导航系统。

## (5) 混合导航系统

同时采用两种以上测量方法来定位的系统,叫做混合导航系统。例如测距法与测量多普勒频移积分值相结合的系统。

# 2. 按用户设备是否发射信号分类

## (1) 无源系统

在无源系统里,仅由卫星发射信号,用户只需装备接收设备就可通过接收卫星信号进行导航定位。由于用户不发射信号,所以这种系统隐蔽性好,且用户数量不受限制,但卫星设备和用户设备都较复杂。子午仪系统、GPS系统都属无源系统。

## (2) 有源系统

有源系统的卫星和用户设备都要发射和接收信号,隐蔽性不好,但卫星设备和用户设备较简单。

# 3. 按工作区域分类

## (1) 全球覆盖系统

在这种系统里,导航定位的作用范围可覆盖全球。例如,子午仪系统和GPS系统都可实



现全球范围的导航定位。

#### (2) 区域覆盖系统

区域覆盖系统的导航定位作用范围有限。例如,我国的北斗双星定位系统,是用来提供我国本土范围内和沿海周边地区的导航定位服务。

### 4. 按能否连续定位分类

#### (1) 连续定位的卫星导航系统

这种系统可实现连续的、近乎实时的导航定位。例如, GPS 系统每天可提供 24 小时的连续导航定位,系统一次定位时间只要几秒钟,最多几十秒就可以完成。

#### (2) 断续定位的卫星导航系统

这种系统每次导航定位之间有较长的间隔,只能间断定位。例如,子午仪系统只能实现间断定位,系统一次定位时间需 8~10 分钟,不同地理位置的测站,则需 1.5~4 小时才能定位一次。

### 5. 按卫星运行轨道的高度分类

#### (1) 低轨道(近地轨道)

低轨道的卫星轨道高度为 900~2700 km。子午仪系统的卫星轨道约 1000 km,属于近地轨道。

#### (2) 中高度轨道

中高度轨道的卫星轨道高度为 10000~20000 km。GPS 系统的卫星轨道约 20000 km,属于中高度轨道。

#### (3) 同步轨道

同步卫星轨道高度为 36000 km。我国北斗双星定位系统的卫星轨道就是同步轨道。

## 1.5 卫星定位的基本原理

导航的核心是定位。卫星定位就是在测站上以卫星为观测目标,获取测站至卫星的观测矢量  $\rho$ ,利用观测矢量和已知的卫星位置矢量  $r$  计算测站点坐标。

卫星定轨或定位示意图如图 1-3 所示。在测站观测卫星,已知卫星位置矢量为  $r$ ,若得到观测矢量  $\rho$ ,则测站的位置矢量  $x$  为

$$x = r - \rho \quad (1.1)$$

相反,若已知测站矢量  $x$ ,则由观测矢量  $\rho$  可求出卫星位置矢量  $r$ ,即

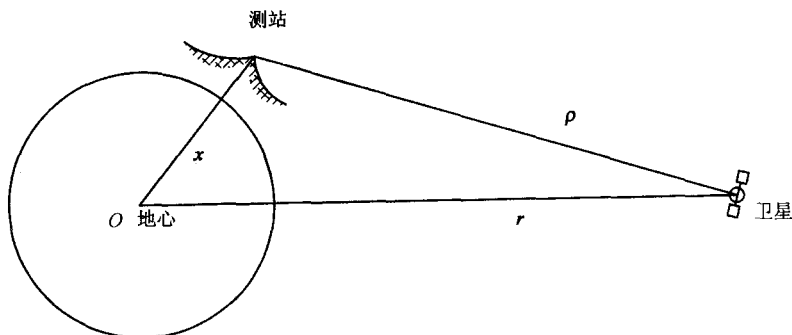


图 1-3 卫星定轨或定位示意图