

# 卫星导航原理与应用

Satellite Navigation System: Principle and Application

袁建平 罗建军 岳晓奎 方群

中国宇航出版社

# 卫星导航原理与应用

Satellite Navigation System: Principle and Application

袁建平 罗建军 岳晓奎 方群

中国宇航出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

卫星导航原理与应用 / 袁建平编著. —北京: 中国宇航出版社, 2003.9

ISBN 7-80144-704-2

I. 卫... II. 袁... III. 卫星导航 IV. TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 088537 号

出版 中国宇航出版社

社址 北京市阜成路 8 号 邮编 100830  
(010)68768548

网址 [www.caphbook.com](http://www.caphbook.com) / [www.caphbook.com.cn](http://www.caphbook.com.cn)

经销 新华书店

发行部 北京市和平里滨河路 1 号 邮编 100013  
(010)68373103 (010)68373185 (传真)

零售店 读者服务部 北京宇航文苑  
北京市阜成路 8 号 北京市海淀区海淀大街 31 号  
(010)68371105 (010)62579190

承印 北京京科印刷有限公司

版次 2003 年 9 月第 1 版 2003 年 9 月第 1 次印刷

开本 1/32 规格 850 × 1168

印张 11.75 字数 312 千字

书号 ISBN 7-80144-704-2/V·079

定价 45.00 元

本书如有印装质量问题可与发行部调换

加強衛星應用的創新

和推廣推動國民

經濟之發展與繁榮

葉思惠  
十一月廿八日

# 前 言

以全球定位系统(GPS)为代表的卫星定位导航系统的出现不仅是航天技术和大地测量、大气测量、高频无线电、数字通讯、计算机应用等技术飞速发展的产物,更是社会、军事、经济等诸多方面迫切需求的结果,是多学科高新技术的综合。与任何一种新技术相比,卫星定位导航技术的研究、实验与应用的进展都称得上迅猛异常。GPS的应用开发几乎与它本身的发展同步进行。国内外的实践已经证明了卫星定位导航技术应用的极其广泛性:从地面、海面到空中、空间,从高速飞行的卫星、导弹到地壳运动监测、地震预报,触及几乎每一个领域的每一个方面,它的应用“只受人们想像力的限制”。例如,在航空方面,可用于航路、终端近进与着陆、空中交通控制、编队飞行、空中加油、舰上起降及执行特种任务的飞行等。即使是在深空航行,有限的GPS信号也会提供有用的导航信息。美国政府的GPS新政策对民用用户的优惠和放宽以及精度的提高,使得GPS的应用更加不分场合、不限方式和对象,GPS已从高技术领域走向人们的日常生活,并且以不可想像的速度和方式融入了诸如授时、通信等多个领域。此外,GPS还引起了新的军事革命,出现了精确打击、单兵支持系统、信息化空间系统、智能化和信息化武器系统等。

作者做为中国较早从事卫星导航定位研究与应用的群体之一,最早是与德国同事一起完成首次卫星导航用于民航飞机自动着陆实验,1990年后参与我国的GPS应用研究工作,在中国导航与定位技术研究领域开拓了新的研究方向,特别是在航空航天中的应用研究,取得了可喜的研究成果。主持完成了多项国家、部委、基金项目。为国家培养了几十名具有硕士和博士学位的高级

技术人才。

本书是根据高级人才培养、新技术发展与应用的需求,结合国外卫星定位导航的最新进展,在概括总结近年来作者及其研究生们的研究工作的基础上写成的。主要包括:常用导航与定位系统的组成、工作原理和特点;卫星轨道和卫星定位导航基础;GPS 系统的信号结构和接收机工作原理;卫星定位导航的方法、数学模型和算法;卫星定位导航的误差及误差消除方法;差分 GPS 和 GPS 增强系统;GPS 相对定位与姿态确定的方法、算法及其在飞行器上的应用;双静止卫星定位通信系统的定位方法和误差分析;正在建设中的欧洲伽利略导航卫星系统结构及最新进展。

限于作者水平,书中难免有错误之处,敬请读者指正。

编者

2003 年 7 月

## 目 录

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 第 1 章 绪论 .....                  | 1   |
| 1.1 导航的概念、方法和要求 .....           | 1   |
| 1.2 常用导航定位系统简介 .....            | 5   |
| 1.3 GPS 系统的组成、工作原理和特点 .....     | 27  |
| 1.4 GPS 应用综述 .....              | 41  |
| 第 2 章 参考系和卫星轨道 .....            | 47  |
| 2.1 协议天球坐标系 .....               | 47  |
| 2.2 协议地球坐标系 .....               | 55  |
| 2.3 全球大地系统 .....                | 60  |
| 2.4 时间体系 .....                  | 67  |
| 2.5 卫星轨道描述 .....                | 70  |
| 第 3 章 GPS 信号结构与接收机工作原理 .....    | 77  |
| 3.1 信号结构与调制技术 .....             | 77  |
| 3.2 导航电文 .....                  | 94  |
| 3.3 卫星位置和速度的计算 .....            | 99  |
| 3.4 伪随机码测距 .....                | 103 |
| 3.5 GPS 接收机的工作原理 .....          | 106 |
| 第 4 章 GPS 观测方法及数学模型 .....       | 123 |
| 4.1 GPS 定位的基本概念 .....           | 123 |
| 4.2 观测方程 .....                  | 129 |
| 4.3 观测方程的线性化 .....              | 136 |
| 4.4 相位观测数据的组合处理 .....           | 139 |
| 第 5 章 GPS 测码伪距动态定位计算 .....      | 146 |
| 5.1 经典导航定位算法 .....              | 146 |
| 5.2 观测卫星的几何精度衰减因子及最佳星座的选择 ..... | 150 |
| 5.3 线性化求解的导航算法 .....            | 164 |
| 5.4 应用卡尔曼滤波器的导航算法 .....         | 168 |

## 2 卫星导航原理与应用

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 5.5 基于 GPS 的组合导航系统 .....          | 173        |
| <b>第 6 章 GPS 系统偏差和误差分析 .....</b>  | <b>191</b> |
| 6.1 偏差和误差分析 .....                 | 191        |
| 6.2 用户等效距离误差(UERE) .....          | 193        |
| 6.3 卫星的主要误差 .....                 | 194        |
| 6.4 信号传播中的主要误差 .....              | 197        |
| 6.5 与接收设备有关的误差 .....              | 212        |
| 6.6 其他误差来源 .....                  | 215        |
| 6.7 美国政府对 GPS 用户的限制性政策与用户的措施 ..   | 218        |
| <b>第 7 章 GPS 增强系统 .....</b>       | <b>224</b> |
| 7.1 概述 .....                      | 224        |
| 7.2 差分 GPS 的主要类型 .....            | 227        |
| 7.3 码伪距多重差分算法 .....               | 243        |
| 7.4 SCAT I 差分格式 .....             | 245        |
| 7.5 差分 GPS 的误差分析 .....            | 251        |
| 7.6 停止执行 SA 政策对民用航空及差分 GPS 的影响 .. | 254        |
| 7.7 GPS 的现代化及其实质 .....            | 259        |
| <b>第 8 章 GPS 相对定位与姿态确定 .....</b>  | <b>264</b> |
| 8.1 GPS 相对定位的概念和方法 .....          | 264        |
| 8.2 GPS 相对定位的原理 .....             | 267        |
| 8.3 GPS 相对定位的误差与精度分析 .....        | 270        |
| 8.4 GPS 确定姿态的原理和观测方程 .....        | 272        |
| 8.5 利用 GPS 确定姿态的方法和算法 .....       | 275        |
| 8.6 GPS 确定姿态的误差与误差分析 .....        | 288        |
| 8.7 GPS 相对定位与姿态确定在飞行器上的应用 .....   | 293        |
| <b>第 9 章 双静止卫星定位通信系统 .....</b>    | <b>305</b> |
| 9.1 双静止卫星定位通信系统的组成和特点 .....       | 306        |
| 9.2 双静止卫星定位通信系统的工作原理 .....        | 314        |
| 9.3 双静止卫星定位系统的定位方法 .....          | 324        |
| 9.4 双静止卫星定位系统的定位误差分析 .....        | 333        |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| <b>第 10 章 欧洲新一代卫星导航系统——GALILEO 系统</b> ..... | 337 |
| 10.1 GALILEO 系统概述 .....                     | 338 |
| 10.2 GALILEO 系统的总体结构和组成 .....               | 341 |
| 10.3 GALILEO 系统的信号 .....                    | 346 |
| 10.4 GALILEO 系统导航服务的定义 .....                | 348 |
| 10.5 GALILEO 系统的特点及其与 GPS 系统的关系 .....       | 354 |
| 10.6 新技术在 GALILEO 系统建设过程中的应用 .....          | 357 |
| 10.7 GALILEO 系统未来应用分析 .....                 | 358 |
| <b>参考文献</b> .....                           | 361 |

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 导航的概念、方法 and 要求

#### 1.1.1 导航的概念和方法

导航是将航行体从起始点导引到目的地的技术或方法。为航行体提供实时的位置信息是导航系统的基本任务，因此，导航是一种广义的动态定位。能够向航行体的操纵者或控制系统提供航行体的位置、速度、航向等即时运动状态的系统称为导航系统。

目前广泛使用的导航方法有以下几种：

1) 航标方法。过去人们习惯称之为目视方法，这是一种借助于信标或参照物把运动物体从一个地点引导到另外的一个地点的方法。目前，在飞机进场着陆时，这种方法仍在使用，经验性很强。

2) 航位推算法。它是通过推算一系列测量的速度增量来确定位置的。航位推算导航技术克服了前一种方法的缺点，不受天气、地理条件的限制，是一种自主式导航方法，保密性强。其缺点是：随着时间的推移，其位置累积误差会越来越大。惯性导航系统在原理上就是采用这种方法。但人们常说的航位推算大都采用方位仪（如磁罗盘）和速度表，利用方位仪将速度表所测的载体速度分解成东向和北向分量，然后分别积分，计算出各个方向上所经过的距离。目前，航位推算法仍广泛使用在航海、航空和车辆自动定位系统中。

## 2 卫星导航原理与应用

3) 天文导航。通过对天体精确地定时观测来定位的一种方法。它用(光学)六分仪、星跟踪器等光学传感器测量出视野中天体的方位,再根据当时的时间,便能确定载体处于地球表面上的某一个圆环上,观测两颗或更多天体并进行处理,便可以确定出载体在地球表面的位置。目前,天文导航仍广泛用在航海和航天,特别是星际航行中。它的缺点是误差累积及受时间和气象条件的限制,定位时间长,操作计算比较复杂。

4) 惯性导航。它是通过积分安装在稳定平台(物理的或数学的)上的加速度计输出来确定载体的位置和速度。它完全依靠载体上的导航设备自主地完成导航任务,和外界不发生任何光、电联系。因此,它是一种自主式导航方法,隐蔽性好,工作不受气象条件的限制。这一独特的优点,使其成为航空、航海和航天领域中一种广泛使用的主要导航方法。其主要缺点是导航误差随时间累积。目前,惯性导航系统常常和其他导航系统综合使用。

5) 无线电导航。它是通过测量无线电波从发射台(导航台)到接收机的传输时间来定位的一种方法,也可以通过测量无线电信号的相位或相角来定位。按照发射机或转发器所在的位置,无线电导航可分为地面(陆)基无线电导航和空间(星)基无线电导航。

6) 卫星定位导航。卫星导航是以人造卫星作为导航台的星基无线电导航,是一种利用人造地球卫星进行用户点位测量的技术,是以用导航卫星发送的导航定位信号确定载体位置和运动状态、引导运动载体安全有效地到达目的地的一门新兴科学。卫星导航在军事和民用领域具有重要而广泛的应用。它可为全球陆、海、空、天的各类军民载体,全天候、24小时提供高精度的三维位置、速度、姿态和精密时间信息。

### 1.1.2 航行体对导航系统的要求

导航的基本作用是为运载体航行服务,它所提供的服务应该

满足航行所提出的特定要求。现代导航不仅要解决航行的目的性,更要解决航行的安全性、服务连续性和有效性。为了便于国际和国内的顺利通航,要在全世界范围内使用一些具有规定性能的导航系统。导航系统的性能是由其信号特性和性能参数来描述的。一般说来,要衡量一个导航系统的优劣,必须考虑其精度、覆盖范围、信息更新率、可用性、可靠性、完善性、多值性、系统容量和导航信息的维数等参数。

### (1) 精度

导航系统的精度指系统为运载体所提供的位置与运载体当时的真实位置之间的重合度。常用导航误差的大小来衡量。受各种各样因素的影响,导航误差是一个随机变化的量,因此常用统计的度量单位来描述,即用定位误差不超过一个数值的概率来描述。

有些导航系统只为运载体提供一维位置,比如高度或方位,此时精度用  $2\sigma$  来描述,相当于 95% 的置信度。即每次测量结果有 95% 的可能性其误差小于等于这个  $2\sigma$  值。

有些导航系统给出运载体的二维位置,常常是水平位置,此时精度用  $2D_{rms}$  来描述。 $D_{rms}$  是距离误差均方根值的缩写。二维导航系统的误差分布是一个椭圆。椭圆的椭圆度影响着  $2D_{rms}$  与置信度之间的关系。如果椭圆是很扁的,即向一条线收束,那么  $2D_{rms}$  的置信度趋于 95%。如果椭圆很胖,向圆靠近,则置信度趋于 98%。在军事上常不用  $2D_{rms}$  而用圆概率误差 (CEP) 来描述水平定位精度。CEP 是一个以运载体真实位置为圆心的圆的半径,在所有可能的导航定位值中,有 50% 落在这个圆内,即相当于 50% 的置信度。一般来说,  $2D_{rms}$  值等于 CEP 值的 2.5 倍左右。

此外,衡量导航系统精度的方法还有:预测精度、重复精度和相对精度。预测精度是导航测量结果相对于地图上标出的位置的精度。重复精度是指用户回到从前曾用同一导航系统测定过的

位置的精度。相对精度指用户测量出的位置相对于另一个同时用同一导航系统测量出的位置的精度。

### (2) 可用性与可靠性

导航系统的可用性是指它为运载体提供可用的导航服务的时间的百分比。导航系统的可靠性是系统在给定的使用条件下在规定的时间内以规定的性能完成其功能的概率。可靠性的主要标志是系统发生故障的频度和平均无故障工作时间。在导航中还有信号可用性的提法。信号可用性指从导航台发射的导航信号可以使用的时间的百分比，它与发射台及电波传播环境有关。

### (3) 覆盖范围

覆盖范围指的是一个面积或立体空间，在这一范围内，导航信号足以使导航设备或操纵人员以规定的精度定出载体的位置。覆盖范围受到系统几何关系（许多无线电导航系统，当运载体与导航台之间的距离或方位不同时，导航精度不同）、发射信号功率电平、接收机灵敏度、大气噪声条件，以及其他影响信号可用性等因素的影响。

### (4) 导航信息更新率

导航信息更新率是指导航系统在单位时间内提供定位或其他导航数据的次数。对更新率的要求与运载体的航行速度和所执行的任务有关系。比如对于飞行器来说，如果导航信息更新率不够，在两次为飞行员提供定位数据之间的时间内，飞行器当前位置与上一次的指示位置有可能相差很远，这就会使导航系统服务的实际精度大打折扣。另外，现代飞行器常常依靠自动驾驶仪以实现自动化，因此，导航系统必须能与自动驾驶仪交联工作，自动驾驶仪要求导航系统输入的导航信息要与飞行器本身的航行条件和飞行操作相当的更新率，才能精确和平稳地操纵和控制飞行器。

### (5) 导航信息多值性

有些导航系统为运载体给出的位置信息可能有多种解释或位

置指示发生了重复,这便产生了多值性问题。当然运载体实际只能处在其中某一个位置上,不可能同时在几个位置上。为了认定其中确实的一个,必须采用辅助手段。因此一旦存在多值性时,具有解决多值性的手段也是对导航系统的要求之一。

#### (6) 系统容量

系统容量是导航系统提供导航服务的用户数量的多少。导航要求能在其覆盖区内同时为所有需要导航服务的用户提供服务。导航系统的容量通常由系统的工作方式决定。有些导航系统的工作方式是,导航台发射信号,运载体上只需载有导航接收机,因此无论有多少运载体都没有关系,即可以为无限的用户数提供导航服务。这种用户设备由于工作时不发射信号,称作无源工作。有些导航系统则不然,一个导航台只能与数目有限的用户设备配合工作,即系统只能为有限数量的运载体服务。

#### (7) 系统完善性

所谓完善性指的是当导航系统发生任何故障或误差变得超出了允许的范围时,系统发出及时报警的能力。这显然是必要的。比如飞机向跑道下滑的阶段,如果导航系统发生了故障或误差超过了允许的范围而驾驶员未及时发觉,而继续按导航系统的指示飞行,便有可能使飞机偏离或滑出跑道甚至撞到地上,酿成事故。

#### (8) 导航信息的维数

导航信息维数指的是导航系统为用户所提供的是一维、二维还是三维的运动状态信息。导航系统从导航信号中导出的第四维(如时间)信息和其他信息(如姿态)也属于这个参数。

## 1.2 常用导航定位系统简介

导航随着人类社会政治、经济和军事活动的发生而产生,发展而发展。第二次世界大战及战后时期形成的以陆基无线电导航系统为主的混合体对人类社会的繁荣与进步作出了巨大的贡献。

## 6 卫星导航原理与应用

60年代以后投入使用的自主式导航系统（特别是惯性导航系统和多普勒导航系统）在军事上对陆基无线电导航作了重要的补充。随着世界经济的发展和军事作战方式的变化，在70年代末信息技术发展的基础上形成并陆续投入使用的新的导航系统混合体，以卫星导航系统为核心，把导航覆盖范围、精度和其他性能提高到一个新的高度，极大地促进了军用和民用航行事业的发展，也使导航的作用扩展到社会生活的各个方面，同时将具有更强的作战功能，更能满足各种军事任务的导航需求，成为部队战斗力的重要组成部分。本节对陆基无线电导航系统、卫星定位导航系统和其他典型的导航定位系统进行了简要介绍。

### 1.2.1 陆基无线电导航系统

陆基无线电导航系统是以无线电技术为基础的导航台建在地球上的导航系统。陆基无线电导航系统按测量方式可分为测向（测角）、测距、测距差和测距测向等；按作用距离可分为：近程（100~500 km）、中程（500~1 000 km）、远程（1 000~3 000 km）和超远程（10 000 km 以上）。第二次世界大战军事的迫切需求，加速了陆基无线电导航系统的发展。在战争期间及战后不长的岁月里，便出现了品种繁多的陆基无线电导航系统及设备。20世纪60年代到70年代，又发展了不少新的陆基无线电导航系统。随着无线电导航技术特别是卫星定位导航技术的发展和完善，许多陆基无线电导航系统已停止使用或即将停止使用。以下对常用的典型陆基无线电导航系统，如塔康、伏尔、测距器、罗兰C、奥米伽以及多普勒导航系统等，作简要介绍。

#### (1) 塔康

塔康（TACAN—Tactical Air Navigation）是“战术空中导航”词头缩写的音译，是美国1955年研制并投入使用的近程测向测距无线电导航系统。该系统由塔康地面设备（也称塔康信标）和机载设备组成。信标架设于机场、航路点或航空母舰上，在特殊

需要时,也可装在大型飞机上。两者配合工作可连续给出飞机所在点相对于信标的方位角和距离。主要为以地面设备为中心,半径 350~370 km 范围内的飞机(高度 10 km)提供导航服务,也可提供地面站的声音识别。

塔康系统的距离测量依据二次雷达原理。机载设备以规定的速率发射询问脉冲对信号;地面信标接收到询问脉冲对信号后,经过固定延迟,再向机载雷达设备发射应答脉冲对信号;机载设备接收到信标发射的信号后,经过识别,选择出对自己的测距应答脉冲,并测量出询问脉冲与应答脉冲之间的时间间隔,从而计算出机载设备与信标台之间的距离。根据地面信标台的旋转天线图,系统可测量出飞机相对于地标的方位。目前,最好的数字式塔康系统可达到绝对距离精度 185 m,方位精度  $\pm 1.0^\circ$ 。

塔康系统地面设备天线体积小,便于机动和安装,很适合为航空母舰上的飞机提供安全导航;也广泛应用飞机的转场飞行和进场着陆。现在全世界约有 1 500 个塔康地面导航台在陆地和航母上工作,机载设备用户更多,仅美国就有 14 500 多架军用飞机装备了它,包括 F-16 飞机。

## (2) 测距器

测距器(DME—Distance Measurement Equipment)是一种近程测距的二次雷达型系统,采用脉冲制测距,其工作原理与塔康的测距原理相同。测距器由地面设备和机载设备组成。地面设备的基本组成包括:接收机、信号处理器、发射机和天线。机载设备的基本组成包括:询问发生器、发射机、天线、接收机和距离计算器。测距器从用途和精度分有航路用测距器、终端用测距器和精密测距器。航路用测距器和终端用测距器通常与伏尔联合工作,组成伏尔/测距器近程导航系统,也可与仪表着陆系统联合工作,协助进行进场着陆导引,按规定测距器的系统误差不超过  $\pm 370$  m ( $2\sigma$ );精密测距器专门用作与微波着陆系统联合工作,进行精密进场着陆导引,其精度比航路和终端用测距器要高得

多,系统误差按不同的标准要求要求在  $\pm 12\text{ m} \sim \pm 30\text{ m}$  ( $2\sigma$ ) 之间。不同用途的测距器,覆盖范围(作用距离)也不同。一般来说,航路用测距器的覆盖范围大于  $370\text{ km}$ ,终端用测距器的覆盖范围大于  $110\text{ km}$ ,精密测距器的覆盖范围仅在  $40\text{ km}$  以上。

### (3) 伏尔

伏尔(VOR—Very-High-Frequency Omnidirectional Ranging)是“甚高频全向测距”词头缩写的音译,是第二次世界大战后期在美国发展起来的近程测向航空导航系统。伏尔系统由地面台和机载接收机组成。伏尔地面台天线的方向图为一个旋转着的心脏形方向图;当飞机相对于地面台处于不同方位时,飞机上伏尔接收机所接收到的信号幅度调制包络具有不同的相位;利用地面台辐射场调制包络的相位与飞机方位角之间的一一对应的关系可为飞机提供相对于地面台磁北的方位坐标。

伏尔工作在甚高频频段,其作用距离受视距限制,典型作用距离为  $370\text{ km}$ ,方位信息准确度优于  $\pm 2.0^\circ$ 。伏尔系统从用途分有航路伏尔和终端伏尔,分别用于航路导航和飞机进场的导引设备。伏尔通常与测距器配合使用,合装在一起叫做伏尔/测距器台,伏尔为飞机提供方位信息,测距器为飞机提供距离信息。伏尔/测距器是陆地上无线电近程导航和非精密进场的国际标准设备。目前,美国大约有 950 个伏尔/测距器地面台,日本大约有 60 个伏尔/测距器地面台,中国有 100 多个伏尔/测距器地面台。

### (4) 罗兰 - C

罗兰(Loran-Long Range Navigation)是“远程导航”词头缩写的音译。根据作用距离和信号体制的不同,有罗兰 - A、罗兰 - B、罗兰 - C 和罗兰 - D。目前,罗兰 - C 的应用最为广泛。

罗兰 - C 是第二次世界大战末期在罗兰 - A 的基础上研制的,是一种陆基、低频、脉冲相位导航体制的中远程精密无线电导航系统。其基本组成为四大部分:地面设施、用户设备、传播媒介和应用方法。地面设施包括形成台链的一组发射台,工作