



航天器控制原理

# 第30讲 航天器的导航的 概念与分类

主讲：黄 河

西北工业大学 精确制导与控制研究所



# 第1讲 航天器的导航的概念 与分类

- 1、航天器导航、制导与控制的概念
- 2、航天器自主导航的分类
- 3、卫星导航系统
- 4、惯性导航系统
- 5、相对导航技术



# 一、航天器导航、制导与控制

基本概念：

从A位置去B位置，如何走的问题？

首先，已知自己的位置：导航

其次，选择一条路径：制导

最后，如何沿着这条路径走：控制



燃料最优，路径最短，时间最少？

# 一、航天器导航、制导与控制

导航 (Navigation):

在哪里? 速度? 偏差

制导 (Guidance):

消除偏差的策略

控制 (Control):

执行策略的手段

GNC 导航、制导与控制



## 导航——轨道确定

### 轨道确定分类：

➤ 非自主：地面站

➤ 自主：

- 被动方式

意味着与航天器以外的卫星  
或地面站没有任何合作，例  
如空间六分仪；

- 主动方式







## 导航——轨道确定

### 轨道确定分类：

- 非自主：地面站
- 自主：
  - 被动方式
  - 主动方式

意味着与航天器以外的地面站或卫星（例如数据中继卫星）有配合，例如全球定位系统。



## 二、航天器自主导航系统

自主导航的应用背景：

➤ 星座组网：

- 提升自主运行能力，减小对测控的要求

➤ 自主目标接近：

- 自主交会对接，减小人为因素影响


➤ 深空探测

- 信号时延
- 



## 二、航天器自主导航系统

自主导航的主要类型：

- 天文导航
  - 地面陆标导航
  - 利用已知信标导航
  - 惯性导航
  - 组合导航方法
- 



# (1) 天文导航

确定三维位置：  
需要三个基准源

$$a_1^2 + b_1^2 - 2a_1b_1 \cos \alpha = AB^2$$

$$b_1^2 + c_1^2 - 2b_1c_1 \cos \beta = BC^2$$

$$a_1^2 + c_1^2 - 2a_1c_1 \cos \gamma = AC^2$$

$AB, BC, AC$	预先已知
$\alpha, \beta, \gamma$	敏感器测量
$a_1, b_1, c_1$	待测量量

确定姿态和轨道



## (2) 地面陆标导航

路基无线电导航系统

按测量方式分为：

- 测向（测角），测距
- 测距差，测距测向

按作用距离：

- 近程(100~500km)
- 中程（500~1000km）
- 远程（1000~3000km）
- 超远程（1000km以上）



## (2) 地面陆标导航

### 典型的路基导航系统

#### ➤ 塔康

- 战术空中导航(tactical air navigation)
- 1955年研制
- 近程测向测距无线电导航系统
- 测距原理：二次雷达原理
- 350km~370km以内高度10km
- 绝对精度185m，方位精度 $\pm 0.1$ 度。





## (2) 地面陆标导航

典型的路基导航系统

➤ 测距器

按用途和精度分为：

- 航路用测距器
  - 终端用测距器
  - 精密测距器
- 

## (2) 地面陆标导航

### 典型的路基导航系统

#### ➤ 测距器

按用途和精度分为：

- 航路用测距器
- 终端用测距器

+ 伏尔 → 伏尔/测距器近程导航系统

+ 仪表着陆系统

→ 协助进场着陆

误差：+/-370m, 测距范围：370km

## (2) 地面陆标导航

### 典型的路基导航系统

#### ➤ 测距器

按用途和精度分为：

- 精密测距器

系统误差：

$\pm 12\text{m} \sim \pm 30\text{m}$

测距范围：40km





## (2) 地面陆标导航

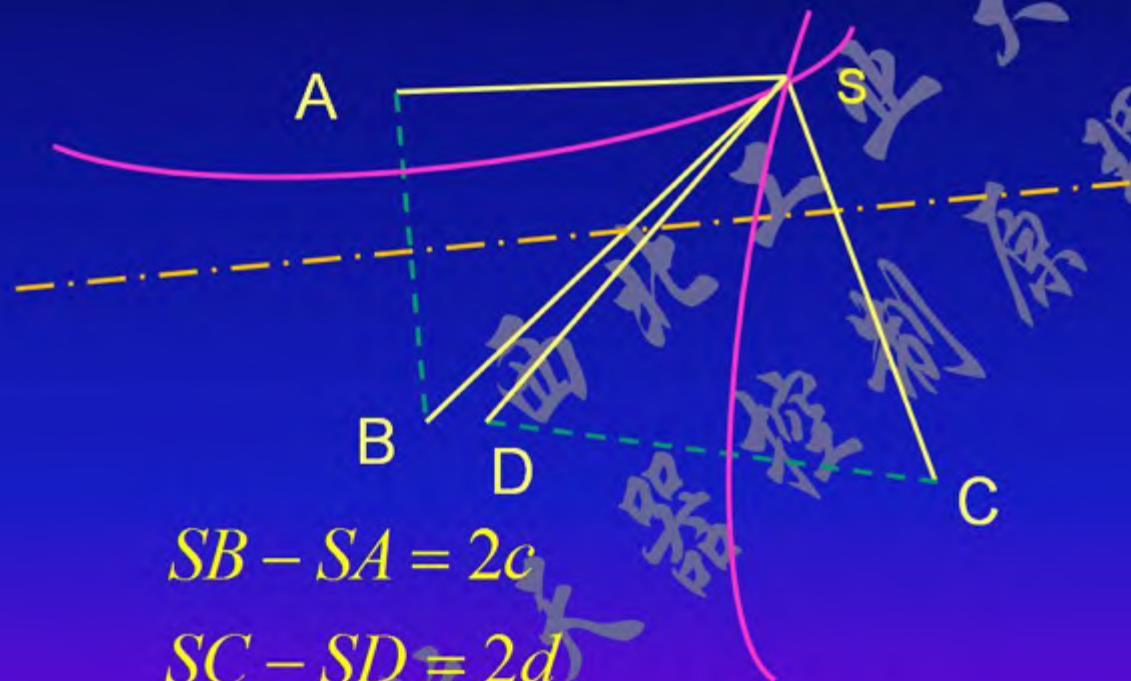
### 典型的路基导航系统

#### ➤ 罗兰C

- 远程导航(Loran Long Rang Navigation)
  - 路基、低频、脉冲相位导航体制
  - 双曲线无线导航系统
- 

## (2) 地面陆标导航

- 双曲线无线导航系统



$$SB - SA = 2c$$

$$SC - SD = 2d$$


$S$ 位于两条双曲线的焦点



## (2) 地面陆标导航

### 典型的陆基导航系统

#### ➤ 罗兰C

- 远程导航(Loran Long Rang Navigation)
  - 路基、低频、脉冲相位导航体制
  - 双曲线无线导航系统
  - 预测定位精度 460m
  - 相对定位精度 90m
  - 定位维数：2维
- 





## (2) 地面陆标导航

### 典型的路基导航系统


#### ➤ 伏尔导航系统

- 甚高频全向测距

#### ➤ 奥米伽


- 甚低频超远程无线电导航系统

#### ➤ 多普勒导航系统

- 自主式航位推算导航系统
  - 大量装备在飞机上
- 




### (3) 对已知信标测距

- 对已知目标点进行测距
  - 需要至少3个点的距离信息
  - GPS导航系统
- 

航天器控制原理2000  
西北工业大学



## (4) 惯性导航系统

- 由惯性测量设备组成
    - 陀螺：测量角速度
    - 加速度计：测量线加速度
  - 积分得到位置、速度和姿态
  - 存在常值漂移误差
  - 短时间内精度高
- 





## (5) 组合导航系统

- 将几种导航系统组合起来使用
  - 优势互补
  - 提高可靠性
  - 提高精度
- 典型的组合导航方式
  - 天文+惯导组合方式
  - GPS+惯导组合方式



### 三、GPS卫星导航系统

- GPS系统的基本组成
  - GPS定位的基本原理
  - GPS系统的特点
- 



## (1) GPS系统的基本组成

- 空间部分
- 地面控制部分
- 用户部分

西北工业大学  
航天器控制原理MOOC

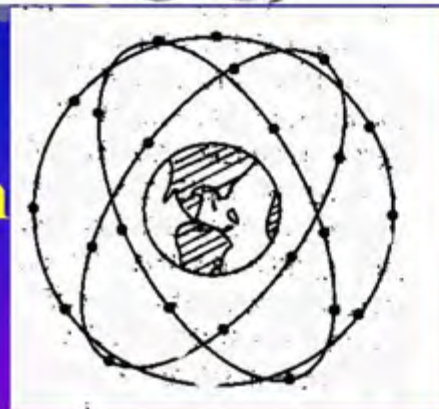




# (1) GPS系统的基本组成

## ➤ 空间部分

- 星座在不断优化
- 最初时星座配置：
  - ✓ 3个轨道面
  - ✓ 8颗/轨道面
  - ✓ 轨道倾角63度
  - ✓ 轨道高度20183km



# (1) GPS系统的基本组成

## ➤ 空间部分


### • 当前的星座配置:

- ✓ 21颗卫星+3颗备份
- ✓ 6个轨道面
- ✓ 4颗/轨道面
- ✓ 轨道倾角55度
- ✓ 轨道高度20200km



## (1) GPS系统的基本组成

### ➤ 地面控制部分

- 跟踪所有的卫星以进行轨道和时钟测定
  - 预测修正模型参数
  - 卫星时钟同步
  - 为卫星加载导航电文
- 





## (1) GPS系统的基本组成

### ➤ 地面控制部分

- 1个主控站
- 3个注入站
- 5个监控站

航天器控制原理MOOC



# (1) GPS系统的基本组成

## ➤ 地面控制部分

### • 1个主控站:

- ✓ 收集和处理本站和各监测站的跟踪测量数据
- ✓ 计算卫星的轨道和钟参数
- ✓ 编制导航电文，传送给注入站
- ✓ 轨道修正，卫星调度

# (1) GPS系统的基本组成

## ➤ 地面控制部分

### • 3个注入站:

- ✓ 将导航电文注入到卫星
- ✓ 每次注入14d的星历
- ✓ 向主控站发送信号, 报告状态





## (1) GPS系统的基本组成

### ➤ 地面控制部分

#### • 5个监测站:

- ✓ 配有精密的铯钟和伪距测量接收机
  - ✓ 为主控站提供卫星的测量数据
- 



## (1) GPS系统的基本组成

### ➤ 用户部分

- 各种类型的GPS接收机
- 接收卫星发播的信号
- 利用本机产生的伪随机码取得距离观测值和导航电文
- 根据导航电文提供的卫星位置和钟差改正信息，计算接收机位置。

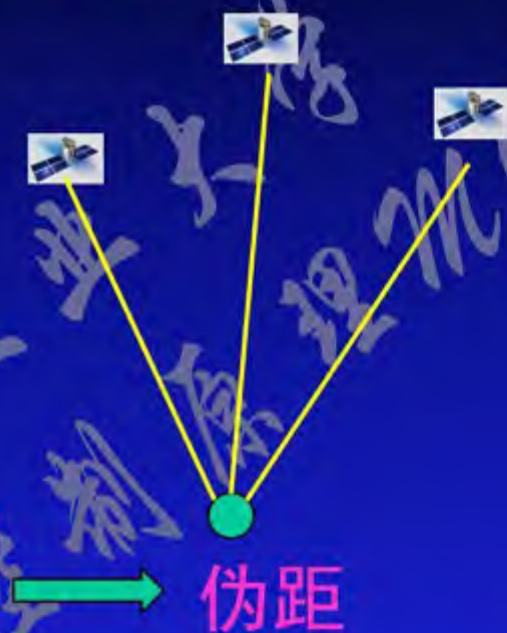


## (2) GPS系统的定位原理

➤ 确定三维空间位置  
至少需要三个基准

➤ 两个重要的参数：

- 卫星自身的位置
- 卫星和用户的距离



$c\Delta T$

$\Delta T$ 从卫星发送到接收机接收的时间  
接收机时钟 - 信号发送时钟  
不精确时钟          精确时钟



## (2) GPS系统的定位原理

伪距=真实距离+ $c\Delta t$



接收机时钟引起的误差

$$R = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + c\Delta t$$

$(x, y, z)$  接收机真实位置

$(x_i, y_i, z_i)$  第 $i$ 颗卫星真实位置

● 四颗卫星可以进行导航解算



### (3) GPS系统的特点

#### ➤ 全球覆盖

- 全球任何地方至少同时看到6~11颗卫星

#### ➤ 全天候

#### ➤ 高精度

- C/A码20m, P码m级精度

#### ➤ 多用途

- 定位、测速、定姿和授时



## 四、惯性导航系统

- 惯性导航系统的基本组成
  - 惯性导航系统的主要特点
  - 惯性导航系统的类型
- 
- 航天器控制原理MOOC



## (1) 惯导的基本组成

- 惯性测量元件
  - 陀螺+加速度计
- 导航计算机
- 导航算法
- 补偿算法

测量量：比力（加速度）+角速度

➡ 三维位置、速度和姿态信息



## (2) 惯导的基本特点

主要优势：

- 自主式导航系统
  - 不依赖外部信息
- 抗干扰能力强，隐蔽性好
- 可提供完备、连续的导航信息

主要不足：

- 误差随时间积累
- 





### (3) 惯导的主要类别

平台式惯导:

➤以陀螺为基础形成一个不随载体姿态和载体在地球上的位置而变动的稳定平台。

捷联式惯导:

➤将陀螺和加速度计直接关联在载体上, 需经受载体的线振动, 角振动, 动态环境恶劣, 动态误差较大。

➤有比较复杂的计算。




### (3) 惯导的主要类别





## 五、相对导航系统

- 相对导航的概念
  - 相对导航敏感器
  - 相对导航的基本方法
- 
- 航天器控制原理MOOC




## (1) 相对导航的概念

相对导航：

航天器用来确定另外一颗航天器相对于自身的位置和速度的过程。

➤ 主要应用：


- 交会对接
  - 卫星编队
  - 非合作目标绕飞，接近
- 





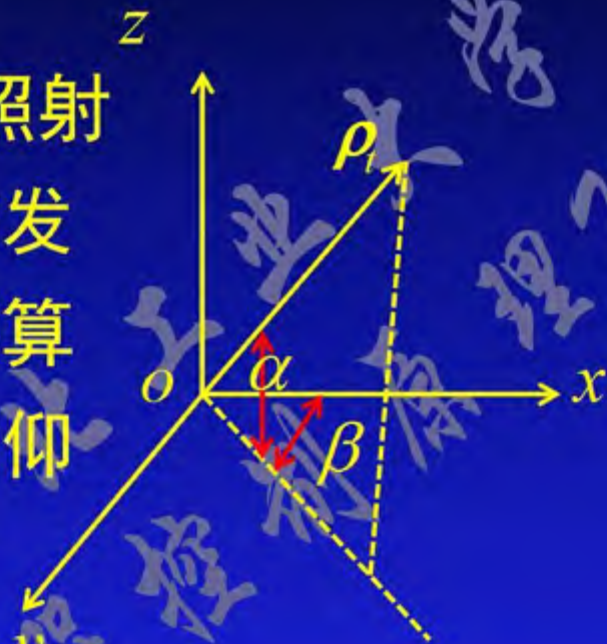
## (2) 相对导航敏感器

相对导航敏感器：

1. GPS设备
  2. 激光/微波雷达
  3. 光学成像敏感器
  4. 对接敏感器
- 

## ➤ 激光/微波雷达

利用激光/电磁波照射目标，测量接收与发射时间差及方向解算目标的方位角、俯仰角和距离



$$\begin{cases} \rho_r = \sqrt{x_r^2 + y_r^2 + z_r^2} + v_{\rho_r} \\ \alpha_r = \sin^{-1}(-z_r / \rho_r) + v_{\alpha_r} \\ \beta_r = \tan^{-1}(y_r / x_r) + v_{\beta_r} \end{cases}$$



## ➤ 激光/微波雷达

### 激光雷达:

- 角分辨率小于 $0.1\text{mrad}$ ;
- 距离分辨率小于 $0.1\text{m}$ ;
- 速度分辨率小于 $10\text{m}$ ;
- 作用距离较短, 约 $200\text{m}$ 。

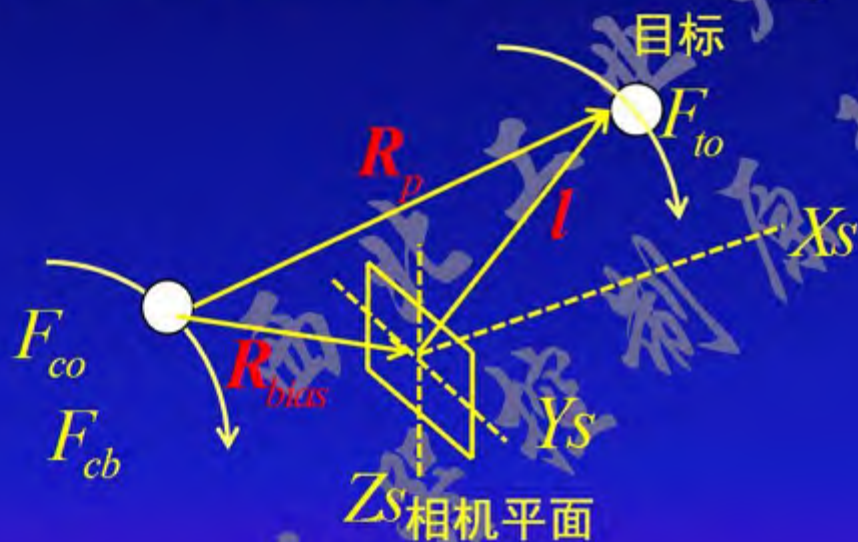
### 微波雷达:

- 波长变化范围大;
- 精度、作用距离等变化也较大;
- 作用距离约为 $100\text{km}$ 。



## ➤ 光学成像敏感器

利用目标在传感器上成像位置解算  
目标矢量的俯仰角和方位角。




$R_p$ 与 $l$ 的转换关系可以表示如下：

$$R_p = -C_{tc} C_{cob} (C_{cbs} l + R_{bias})$$



## ➤对接敏感器

- 包括敏感器和反射器;
  - 安装在两个飞行器上;
  - 当两个飞行器对接时, 敏感器和反射器几何结构位置完全吻合;
  - 作于距离小于10m。
- 

## ➤ 对接敏感器









### (3) 相对导航的方法

一般分为四类：

- 基于GPS的相对导航方法
  - 基于AFF测量的相对导航方法
  - 基于无线电+激光测量的相对导航
  - 基于视觉测量的相对导航
- 




## ➤基于GPS的相对导航的方法

- 采用单频/双频GPS接收机接收信号
  - 双站差分的方式进行解算
  - 应用于GRACE任务基线精确估计
  - 沿航迹方向精度达到1mm
  - 只能应用于近地轨道
- 





## ➤基于AFF测量的相对导航

- 基于类GPS接收和发射信号
  - 每个航天器上安装：
    - 1个或多个发射机
    - 至少3个接收机
  - 自主确定相对位置和姿态
  - 应用于PRISMA任务
  - 相对距离测量精度达到1m (15km)
  - 角度测量精度达到1角秒。
- 



## ➤ 基于无线电+激光测量的相对导航

- 主要设备:

微波雷达, 激光雷达,  
光学成像敏感器  
对接敏感器

- 无线电: 基线测量

- 激光: 相对距离, 相对角位置测量

- 相对位置和姿态的测量

- 美国XSS试验系列:

非合作目标接近, 绕飞, 交会



## ➤ 基于视觉测量的相对导航

- 在目标卫星上设置标志点
- 成像几何关系
- 解算相对位置和姿态
- 英国Surrey, SNAP-1纳卫星
- 神舟飞船交会对接敏感器

