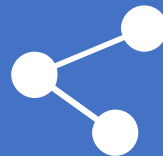


研究生核心课程

# 飞行仿真技术

自动化科学与电气工程学院





导航基本概念 1

常用导航参数 2

3 无线电导航系统仿真

4 惯性导航系统仿真





# 1 导航基本概念

□ **导航**：把运动物体从一个地方按照指定的航线、在规定的时间内引导到目的地的过程

□ **飞行器导航系统功能**：根据机载传感器测量得出的飞行器位置、速度和时间进行计算，引导飞行器按照预定航线飞行

□ **多种导航系统**

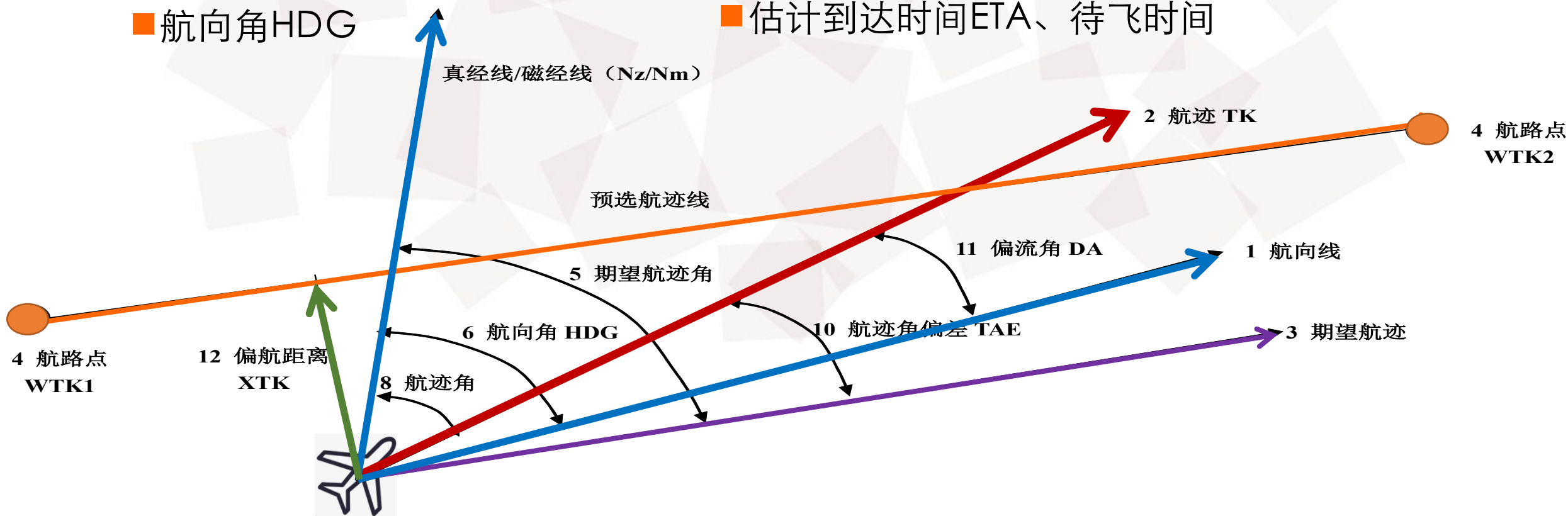
- **无线电导航系统**：利用无线电波的传播特性测定飞行器相对导航台的导航参量（方位、距离、速度），以确定飞行器的位置、速度、航迹等参数，引导飞行器保持正确的航线
- **惯性导航系统**：利用陀螺仪和加速度计等惯性敏感元件，测量飞行器的加速度，自动进行积分运算，获得飞行器瞬时速度和瞬时位置数据。不依赖外界信息，只靠对载体自身的惯性测量来完成导航任务，也称为自主式导航
- **卫星导航系统**：用于导航的人造地球卫星严格控制在预定的轨道上运行，利用装在飞行器上的无线电装置测出飞行器与卫星之间的相对速度或位置，从而确定飞行器在地球上的位置
- **组合导航**：将两种以上的导航系统进行组合，大多数组合导航以惯导系统为主，如无线电—惯导系统，卫星—惯导系统，无线电—天文—惯导系统等



## 2 常用导航参数

- 航向线
- 航迹 期望航迹
- 航路点
- 预选航迹线
- 航向角HDG

- 实际航迹角、期望航迹角DTK、航迹角偏差TAE
- 偏流角DA
- 偏航距离XTK
- 待飞距离DIS
- 估计到达时间ETA、待飞时间





# 3 无线电导航系统仿真

## □定义

- 利用各种地面和机载无线电导航设备，通过无线电波，向飞机提供准确、可靠的方位、距离和位置信息

## □功能

- 确定飞机当前所处的位置（经、纬、高）及航行参数
- 引导飞机沿既定航线飞行
- 导引飞机在夜间和复杂气象条件下安全着陆

## □特点

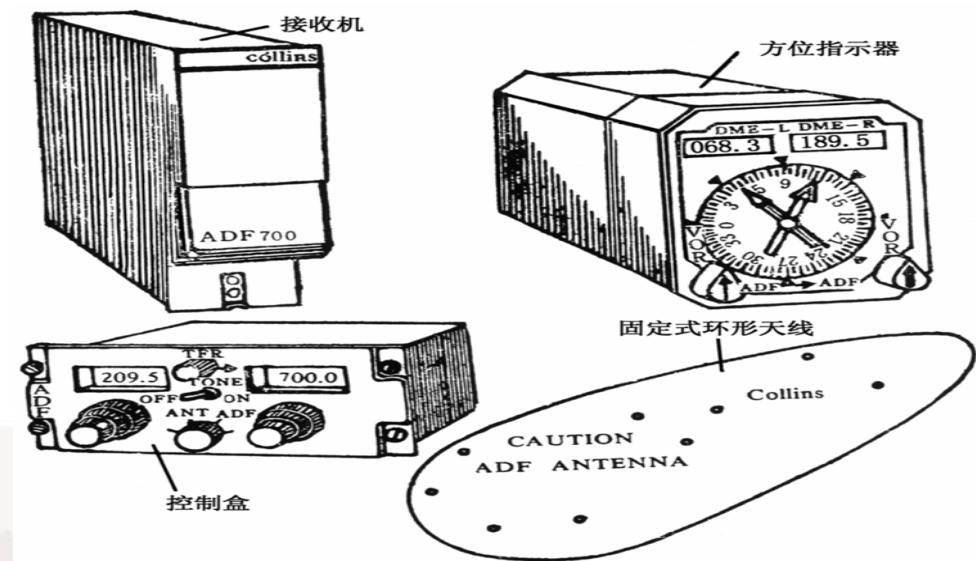
- 不受时间、天气限制，精度高，作用距离远，定位时间短，设备简单可靠
- 必须辐射和接收无线电波，易被发现和干扰



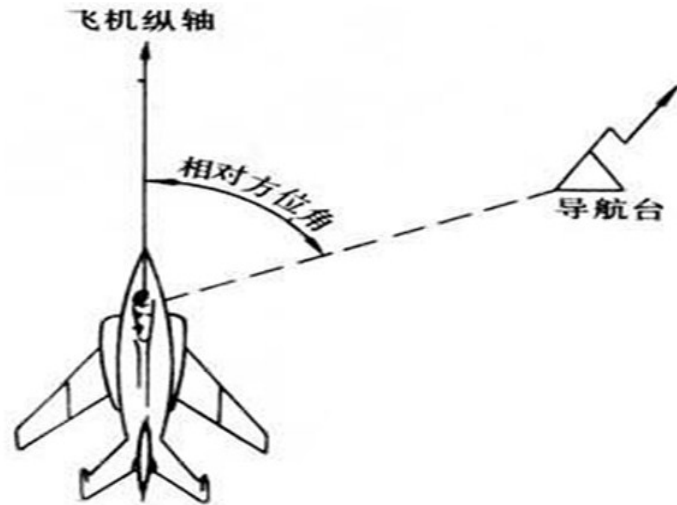
# 常用机载导航设备

## □ 自动定向机 (ADF)

- 也称无线电罗盘，具有广泛用途，工作频率190kHz~1750kHz，频率间隔0.5kHz
- 测定飞机纵轴方向（航向）到地面导航台的相对方位角，并在指示器上显示
- 利用ADF和地面导航台组成的导航系统，引导飞机飞向导航台或飞离导航台
- 利用飞机上装有的二部ADF测得相对已知地面两个导航台的相对方位角，根据两个相对方位角在地图上画出飞机相对两个导航台的位置线，两线交点即飞机位置
- 利用地面导航台抄收气象报告，利用民用广播电台定向和收听新闻音乐



## 测向无线电导航设备

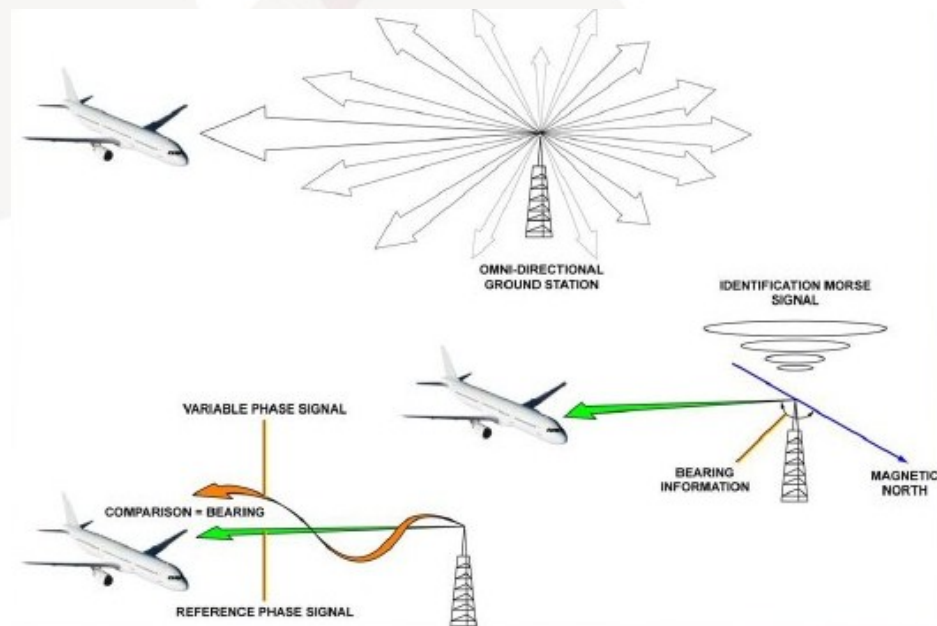




## □甚高频全向信标接收机（VOR）

- 也称伏尔，国际标准航向的无线电导航系统。提供以地面台为中心，360度范围内飞机相对于地面发射台的磁方位角，确定飞机位置
- 引导飞机沿预选航道飞往目的地或引导飞机进近
- 测角精度比ADF高，受天电干扰小，应用广泛
- 工作频率
  - ✓ A台：航线上的全向信标台，工作在112MHz~118 MHz
  - ✓ B台：机场附近的全向信标台，工作在108MHz~118 MHz

测向无线电  
导航设备



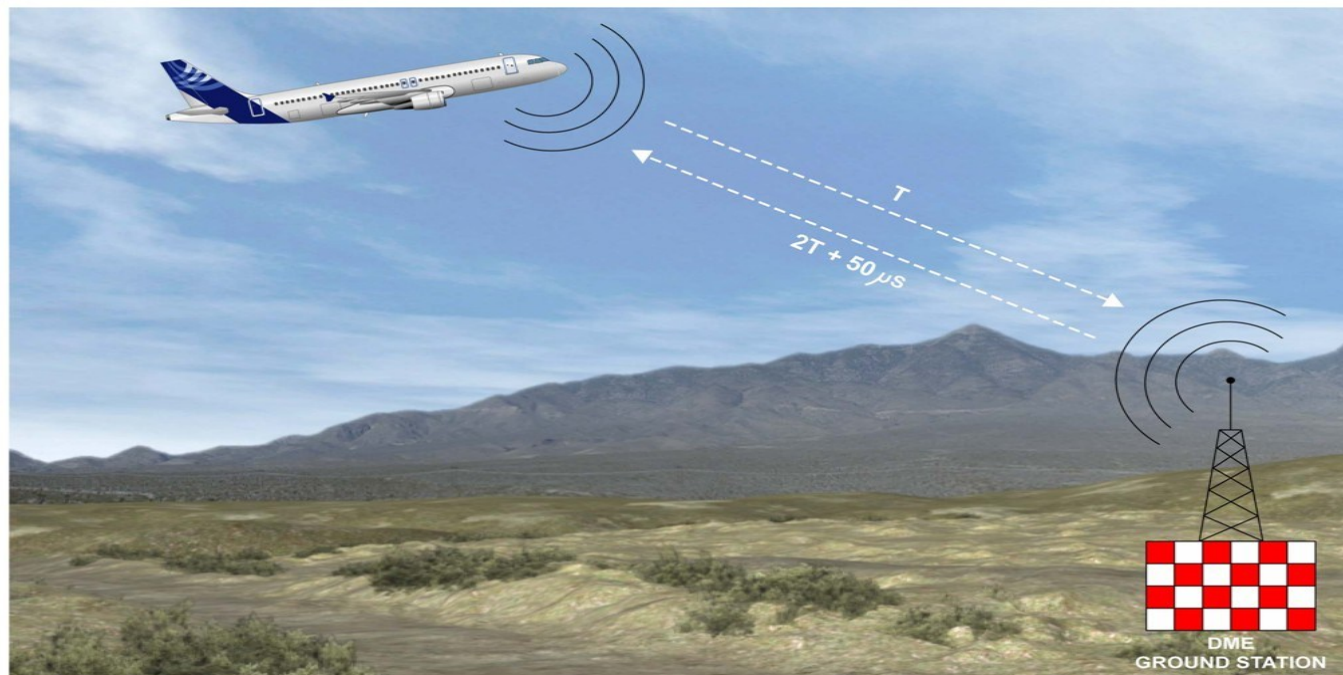




## □ DME测距机

- 机载测距机和地面测距信标台配合工作，测量从飞行器上发出的询问脉冲到收到地面导航台发射的应答脉冲之间的时间，换算出飞行器到地面导航台的斜距
- 提供地速、到台时间等信息
- VOR/DME → 无线电测角测距系统

测距无线电  
导航设备







## □ OMEGA导航接收机

- 接收地面OMEGA导航台的信息，可确定多个导航参数，包括航向、偏流角、地速、航迹角偏差、到下一个航路点的距离、到导航点的时间、风速、风向等

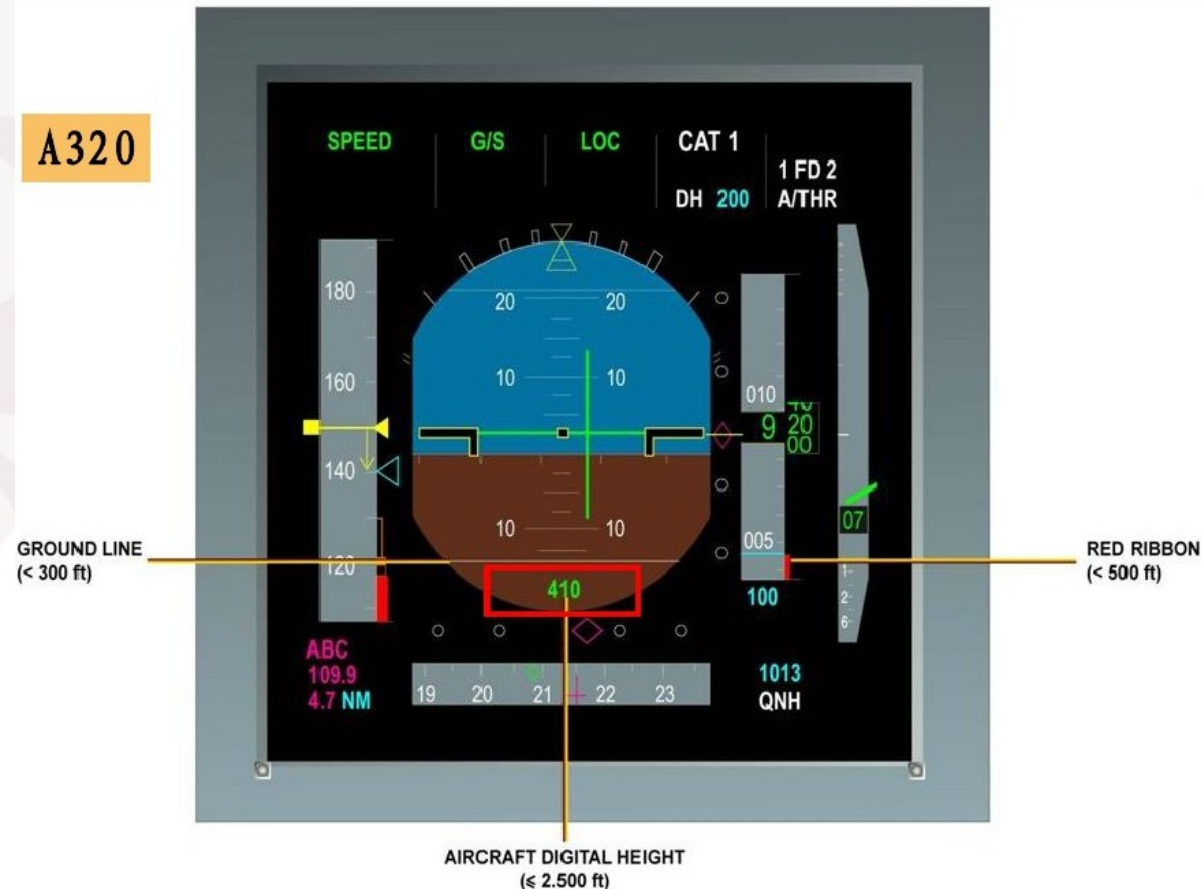
## □ TACAN接收机

- 军用TACAN系统同时提供飞机相对地面台的方位和距离信息
- 测距部分与民用测距机兼容

## □ 无线电高度表RA

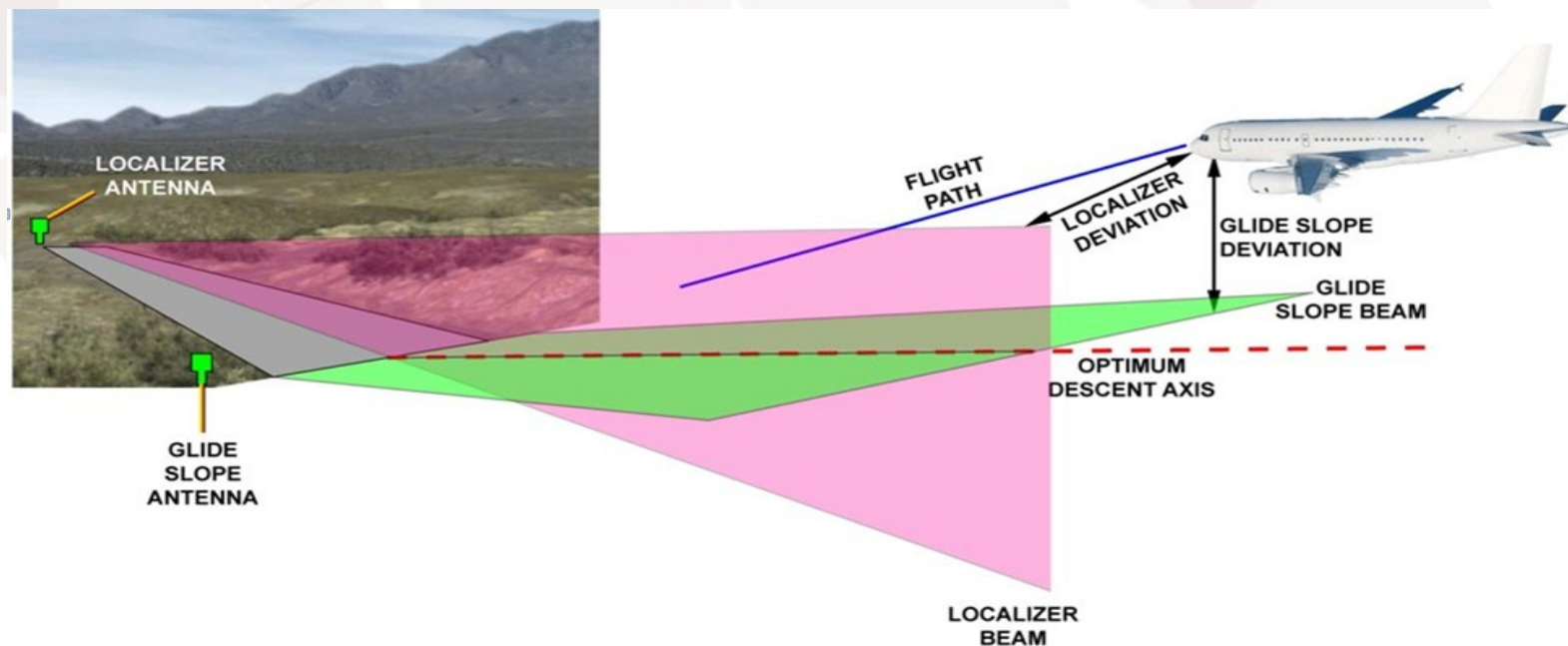
- 测量飞机离开地面的实际高度，不受气候条件影响
- 主要用于在进近和着陆过程中，配合近地警告系统（EGPWS）保证飞行安全
- 无线电高度表的指示随地形而改变，与地面覆盖层和大气条件无关
- 测量高度范围一般为 0~2500英尺

A320



## □ 仪表着陆接收机 ( ILS )

- 结合无线电高度表的高度信息，引导飞机在能见度很低情况下着陆
- 组成
  - 航向信标(LOC) 提供飞机偏离跑道中心线的侧向偏差
  - 下滑信标(GS) 提供飞机偏离下滑道的垂直方向偏差信息
  - 指点信标(MB) 提供飞机相对跑道端头的距离信息
- 每个分系统都包括地面发射设备和机载设备
- 航向台：航向台天线安装在跑道末端的中心线延长线上，一般距离跑道末端约400m~500m，为飞机提供横向引导
- 下滑台：下滑台的天线安装在跑道入口内的一侧（左侧），一般距离入口250m前后，与跑道中心线的横向距离为150m左右。下滑道的下降角度为 $2.5^{\circ} \sim 3.5^{\circ}$  范围内，为飞机提供垂直引导

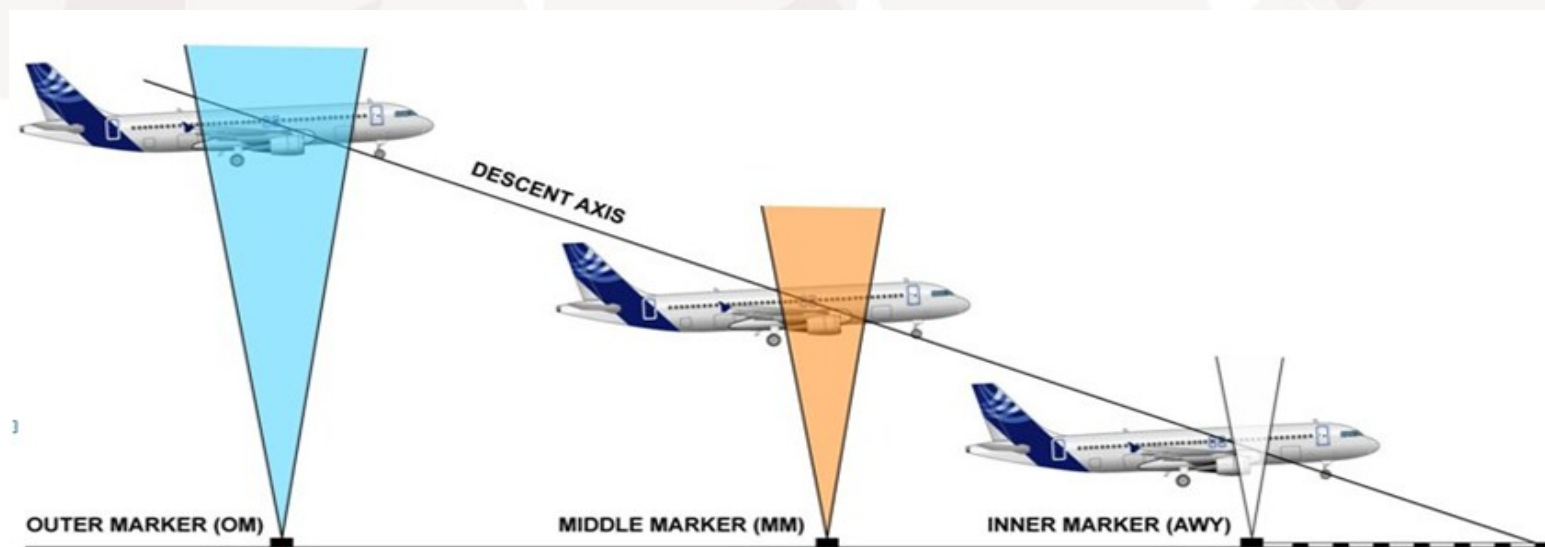


## □ 仪表着陆接收机 ( ILS )

### ■ 组成

- 航向信标(LOC) 提供飞机偏离跑道中心线的侧向偏差
- 下滑信标(GS) 提供飞机偏离下滑道的垂直方向偏差信息
- 指点信标(MB) 提供飞机相对跑道端头的距离信息

- 指点信标机：提供距离引导，向飞行员提示到跑道入口的距离。指点标机向上空发射一束锥形波束，当飞机通过指点标上空时，飞机内的接收显示设备即发出灯光和音响信号，使飞行员知道自己所处位置。指点信标台为2~3个，装在着陆方向的跑道中心线延长线的一定距离上，分别称为内、中、外指点信标。



# 无线电导航系统仿真方法

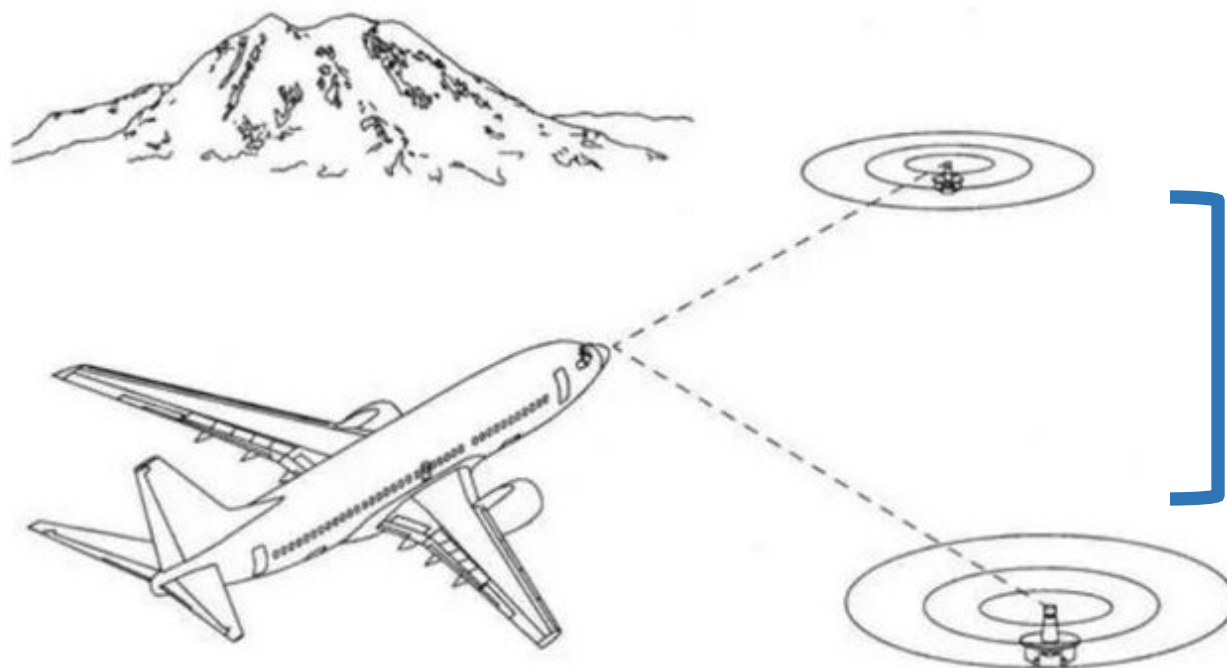
## ■ 仿真方法：软硬件结合/软件仿真

### 1、机载导航接收机设备

- 无线电高度表模块
- 测距机模块
- ADF接收机模块
- VOR/ILS接收机模块
- 指点信标接收机模块
- OMEGA导航接收机模块

### 2、电台调谐设备（导航控制盒、指示器、I/O接口电路）

### 3、导航类仪表



地面导航台设备

导航参数计算

# 机载导航设备仿真

使用机载设备原件或改装或仿制，要求与机载设备外观一致，功能相同

## ■ 导航控制盒、指示器、I/O接口电路 —— 硬件

## ■ 机载导航接收机设备仿真 —— 软件

- 对每种机载导航接收机都建立仿真模型，反应该设备的功能、动/静态性能
- 各模块通过计算机接口与相应仿真控制面板和仿真指示器连接
- 指点信标接收机模块、指点信标台搜索模块、DME测距器模块、ADF（自动定向机）接收机模块、无线电高度表模块、甚高频全向信标（VOR）/仪表着陆系统接收机（ILS）模块、电台调谐模块、导航台识别信号发送模块
- 所有导航软件模块组成无线电导航软件分系统，与其它分系统进行信息交换

## ■ 电台调谐设备仿真

- 各地DME、VOR/ILS、NDB地面台都有特点工作频率，机载接收机接收的电台类型由控制盒上的频率选择来确定
- 电台调谐的任务是根据飞行人员在控制盒上的频率选择，在地面导航台数据库中查找与机载导航设备相匹配的地面台，给出地面台参数以及数据有效标志





# 地面导航台数据库

## □甚高频全向信标台 (VOR)

- 存储参数：使用频率、标高、地理经度、纬度、识别信号、磁偏差、最大作用距离

## □无方向信标台 (NDB)

- 发射方式：以水平面无方向性的方式发射信号，在垂直方向上有一个盲区。为自动定向机提供方位信息
- 存储参数：使用频率、标高、地理经度、纬度、识别信号、磁偏差、作用距离、盲区

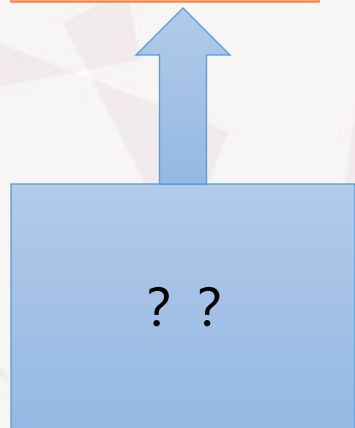
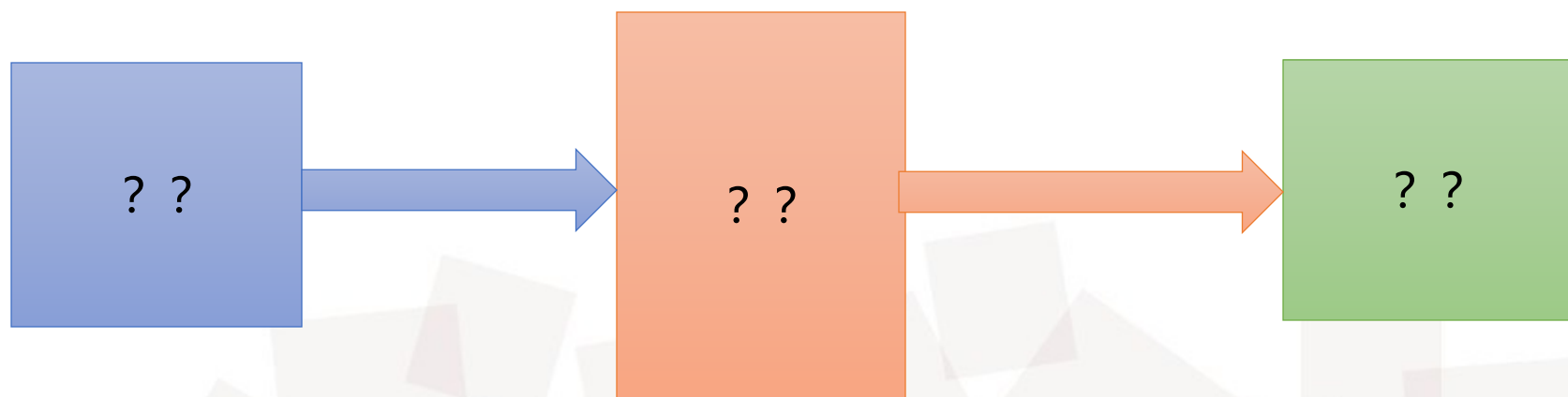
## □测距台 (DME)

- 存储参数：使用频率、标高、地理经度、纬度、识别信号、最大作用距离

## □仪表着陆信标台

- **指点信标台**：标高、地理经度、纬度、识别信号、信标类型、短轴取向
- **航向信标台、下滑信标台**：使用频率、标高、地理经度、纬度、识别信号、下滑角、作用距离

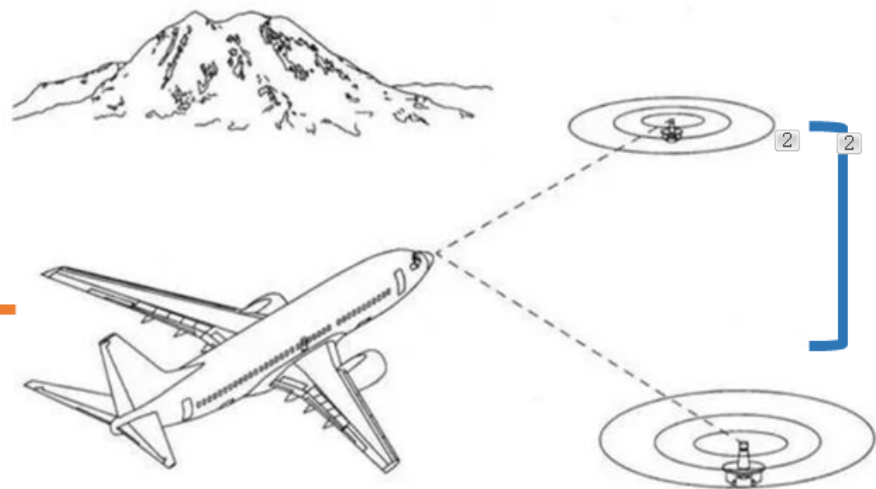




1、机载导航接收机设备

2、电台调谐设备（导航控制盒、指示器、I/O接口电路）

3、导航类仪表



地面导航台设备

3 导航参数计算

# 4 惯性导航系统仿真

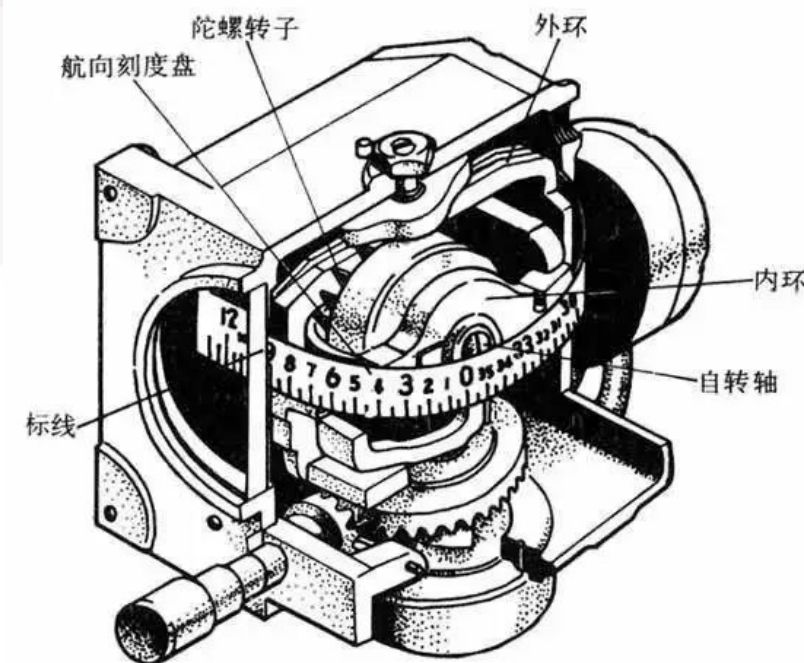
□ 惯性导航系统：一种自主式导航系统，依靠机载设备完成导航任务，不受气象条件限制

## □ 惯性导航基本方法

- 使用惯性敏感测量元件测量飞行器相对于惯性空间的线运动和角运动参数，在给定飞行器初始条件下，通过计算机计算出飞行器的姿态、方位、速度、位置等参数，从而引导飞机完成预定的航行任务
- 陀螺在惯性参照系中用于测量系统的角速率。通过以惯性参照系中系统初始方位作为初始条件，对角速率进行积分，就可以时刻得到系统的当前方向
- 加速度计在惯性参照系中用于测量系统的线加速度，但只能测量相对于系统运动方向的加速度（由于加速度计与系统固定并随系统转动，不知道自身的方向）

□ 常用惯性导航元件：加速度计、陀螺仪

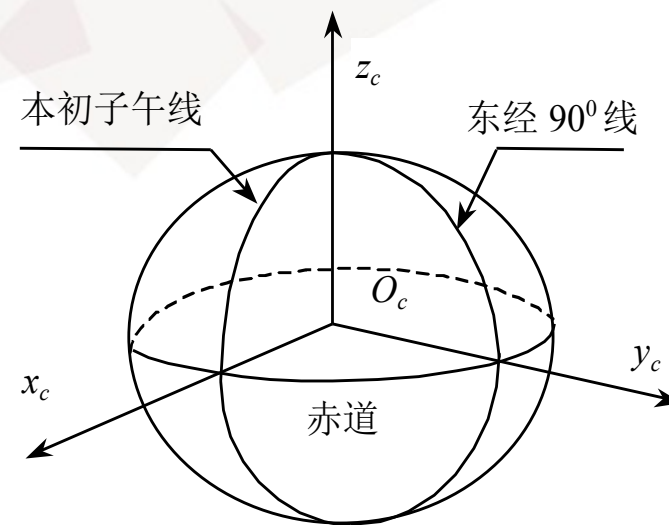
□ 导航参数（同）



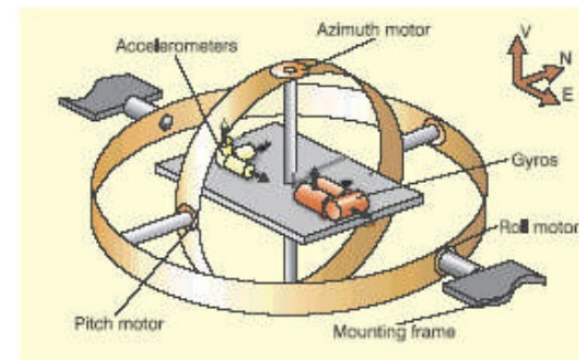
航向陀螺仪结构原理

# 飞机惯导系统常用坐标系

- **惯性坐标系**：绝对不动；地心惯性坐标系，原点在地球中心，垂直轴通过地心沿地球自转方向，另两轴在地球赤道平面内
- **地球坐标系**：固联于地球，原点取在地心， $x$  轴指向赤道平面与本出子午面的交点， $z$  轴与地球自转轴重合， $y$  轴构成右手坐标系
- **地理坐标系**：原点取在地球表面某一点， $x$  轴指向北， $y$  指向东， $z$  沿当地的地垂线指向地心
- **机体坐标系**：同
- **平台坐标系**：利用平台（电气机械平台或数学平台）建立的导航坐标系，可以与地理坐标系重合，也可以在水平面内与地理坐标系成一夹角



# 平台式惯导系统和捷联式惯导系统



## □ 平台式惯导系统

### ➤ 组成

- 惯导组件INU
  - 三轴稳定平台
  - 惯性测量元件(3高精度陀螺+3加速度计)
  - 导航计算机
- 控制/显示组件CDU
- 方式显示组件MSU

### ➤ 安装方式

- 电气机械平台

### ➤ 测量方式

- 加速度计测得飞机沿导航坐标系的线加速度，如果导航坐标系是地理坐标系，输出姿态角

### ➤ 测量参数

- 线加速度、姿态角

## □ 捷联式惯导系统

### ● 惯导组件INU

- 惯性测量元件(3速率陀螺+3加速度计)
- 导航计算机

### ● 控制/显示组件CDU

### ● 方式显示组件MSU

### ● 固联于飞机上

### ● 直接得到沿机体各轴的线速度和角速度

### ● 线加速度、绕机体轴的角速度

# 惯导系数计算

## □ 建立机体坐标系与导航坐标系间的方向余弦变换矩阵

加速度计测得飞机沿导航坐标系的线加速度，如果导航坐标系是地理坐标系，输出姿态角

沿机体各轴的线速度和绕机体各轴的角速度



某种导航坐标系内的线加速度和角速度

## □ 计算初始姿态变换矩阵

## □ 计算当前时刻相对上一时刻姿态矩阵的变化增量

## □ 完成导航参数的计算

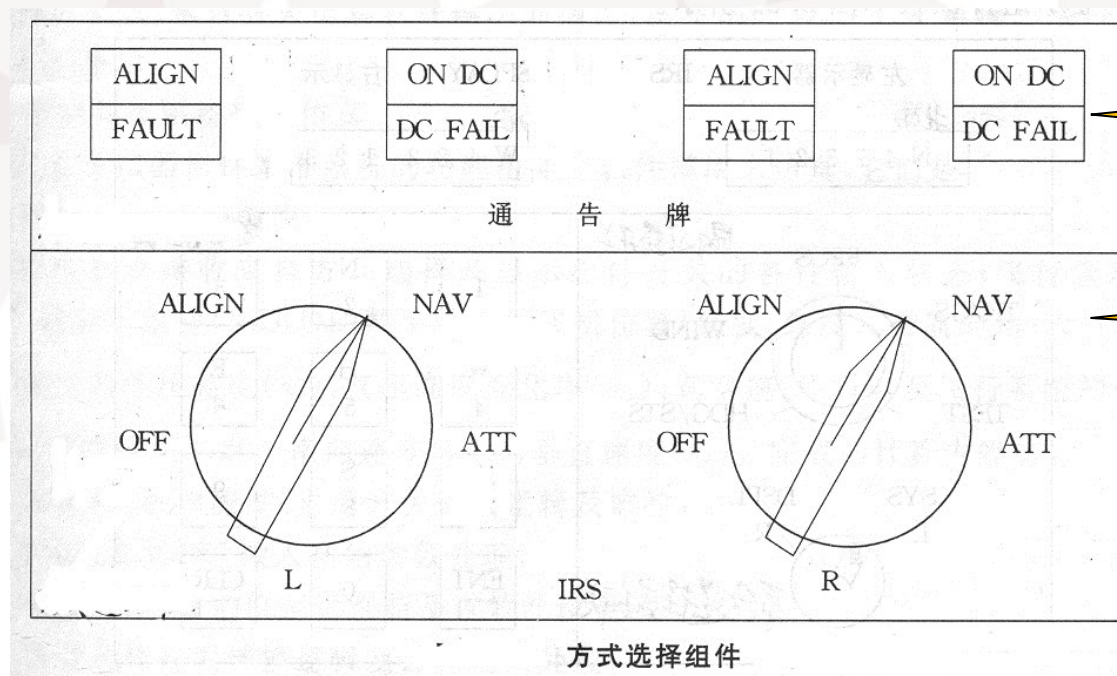




# 飞机惯导系统仿真实例

## 惯性基准系统硬件仿真

- 方式选择组件MSU：控制系统工作状态，准备、对准、导航、姿态基准、断开



- ALIGN：方式选择开关放在“对准”位时，通告牌灯亮
- FAULT：惯性基准系统检测到故障
- DC FAIL：备用电瓶供电，电压下降到18伏
- ON DC：使用备用电瓶供电

### 方式和状态通告牌

### 方式选择开关

- OFF：断开惯导组件电源，系统停止工作
- ALIGN：将惯导平台调整到所要求的导航坐标系内
- NAV：惯导系统工作
- ATT：系统只提供飞机姿态角和航向信号



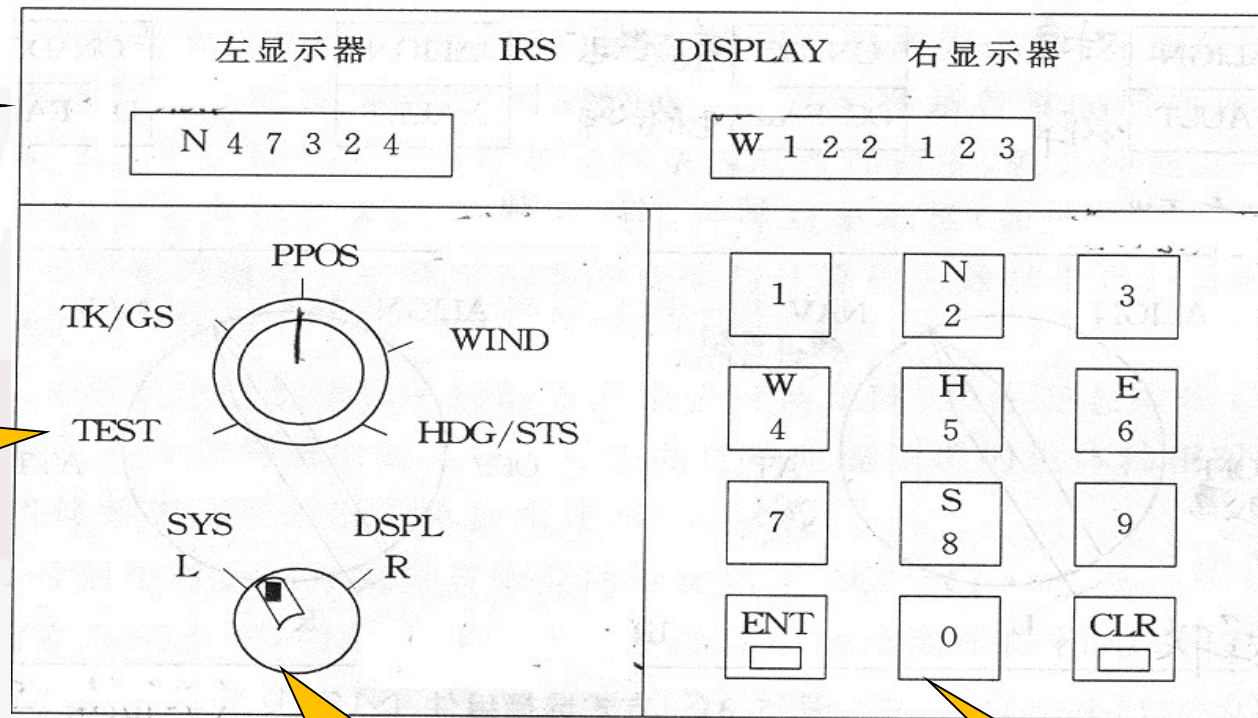


## □ 控制显示组件CDU：参数显示、初始值设定、系统测试、故障显示告警

显示装置

显示选择开关

- TK/GS：航迹角/地速
- PPOS：当前纬度/经度
- WIND：风向（角）/风速
- HDG/STS：真航向角/状态号

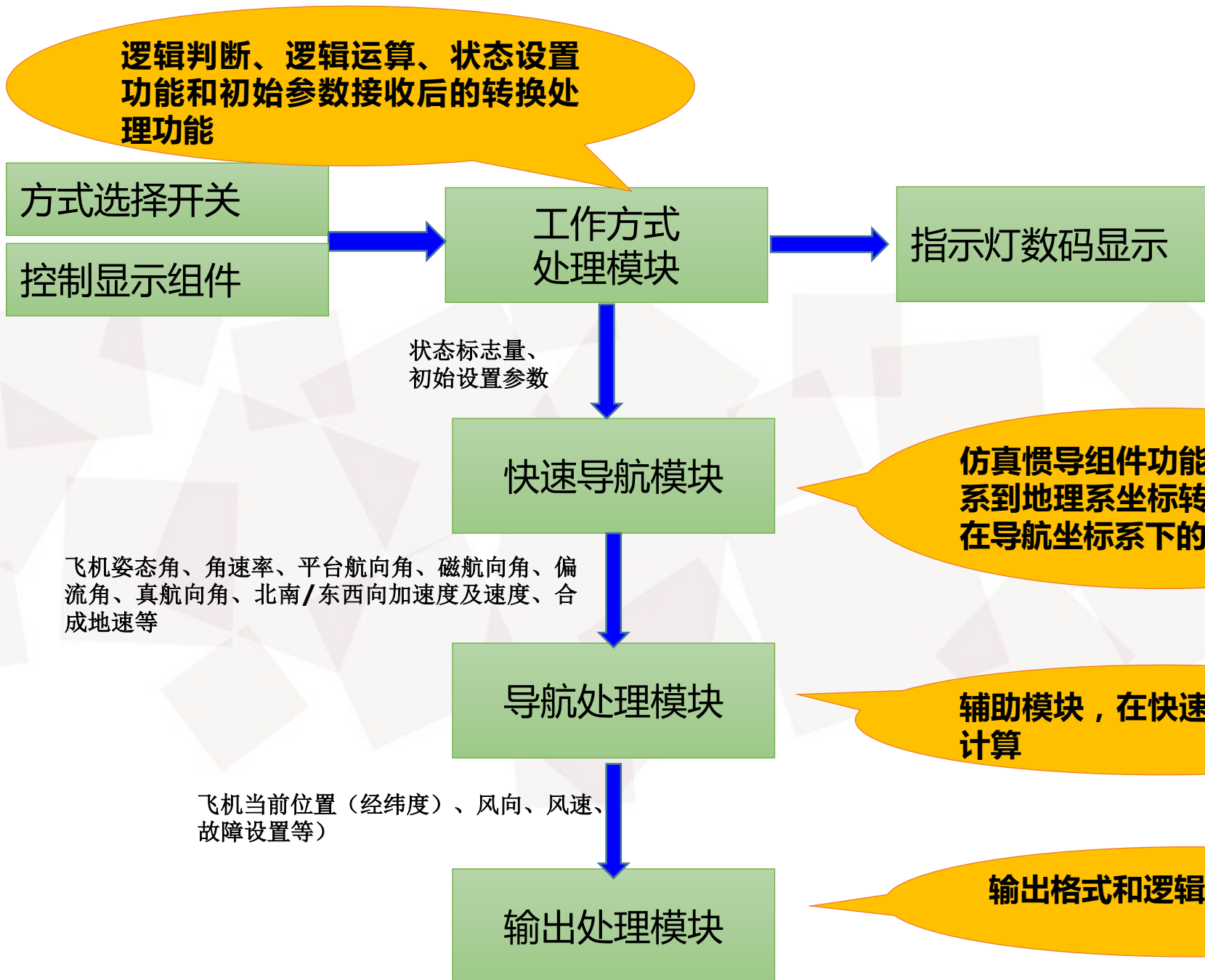


惯性基准系统控制显示组件面

系统选择显示开关（显示装置只有一个）

数字字母键

# 惯性基准系统软件仿真



仿真惯导组件功能，完成机体系到地理系坐标转换，计算出在导航坐标系下的导航参数

辅助模块，在快速导航模块中计算

输出格式和逻辑控制模块



## 组合导航系统

RESEARCH TOPIC

- 由“惯性导航——VOR/DME”组成组合导航系统，论述其
  - (1) 特点；
  - (2) 工作模式；
  - (3) 仿真方法及流程。





# 致谢感恩

---

THANKS TO

