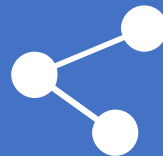


研究生核心课程

# 飞行仿真技术

自动化科学与电气工程学院





飞行控制系统功能 1

飞机飞行控制模态 2

3 飞行控制系统控制  
原理分析

4 飞行控制系统仿真  
软件





# 1 飞行控制系统功能

□ 飞机运动是一种在空中具有方向、速度、加速度的矢量运动，为某种任务建立飞行轨迹，飞机自然稳定性类似惯性将阻碍飞行轨迹的改变，控制则使飞机运动矢量易于快速变化

□ 飞机有两种控制方式

➤ 人工操纵，即飞行员控制

- 飞行员通过驾驶杆、脚蹬和发动机油门操纵飞机，依靠人的创造性、协调能力、自适应能力、学习能力和智力
- 动态能力有限，控制质量取决于主观，有时错误操作

➤ 自动控制

- 传感器和测量设备—机载设备（惯性基准系统、无线电导航系统等）—机载计算机进行信息综合、控制
- 飞行自动控制比人工驾驶的反映速度快，能更好更可靠完成任务，可进行复杂的计算

电子飞行仪器  
系统控制面板



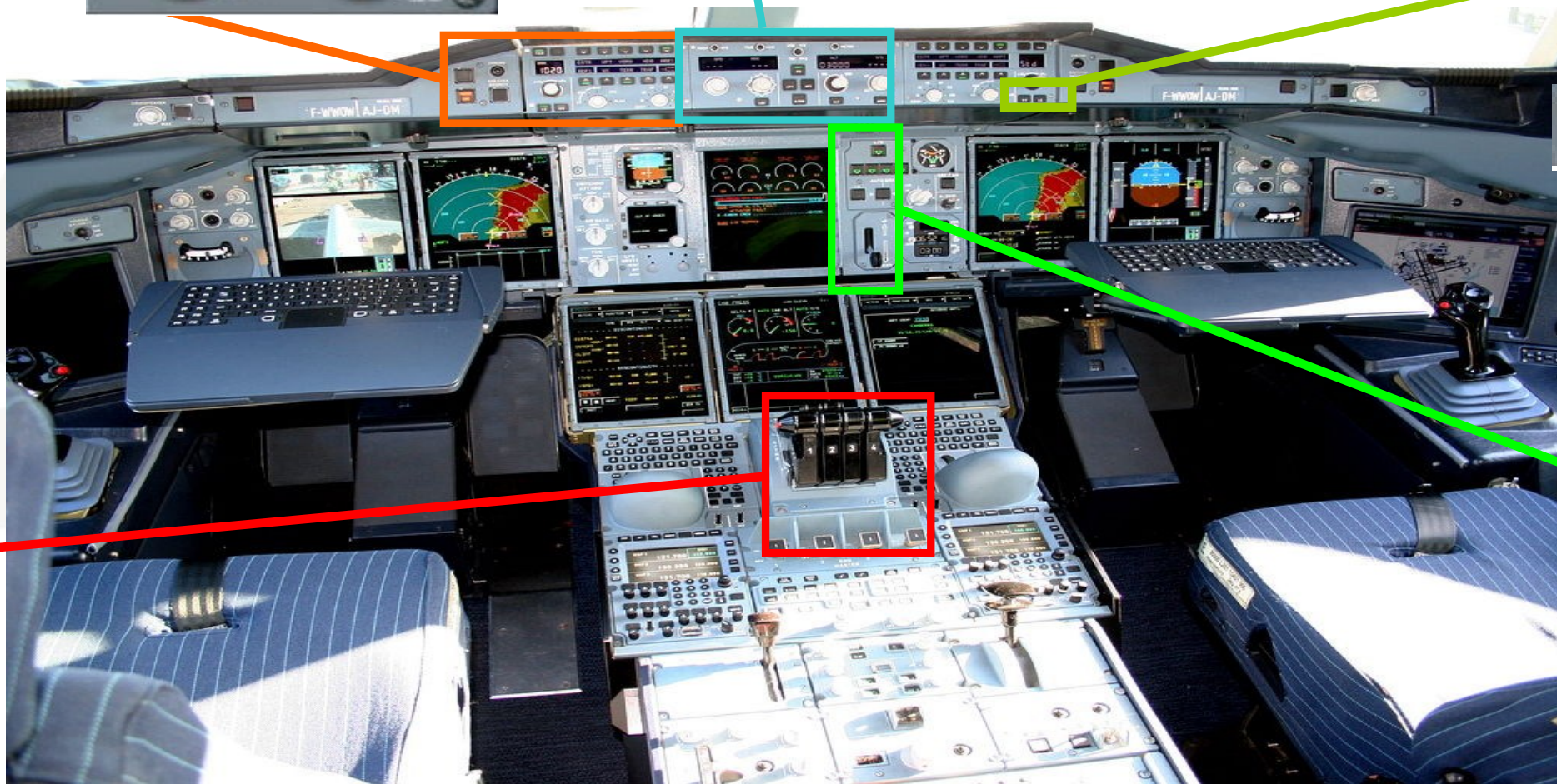
飞行控制  
面板



飞行指引  
和着陆系  
统开关



发动机开  
关及油门

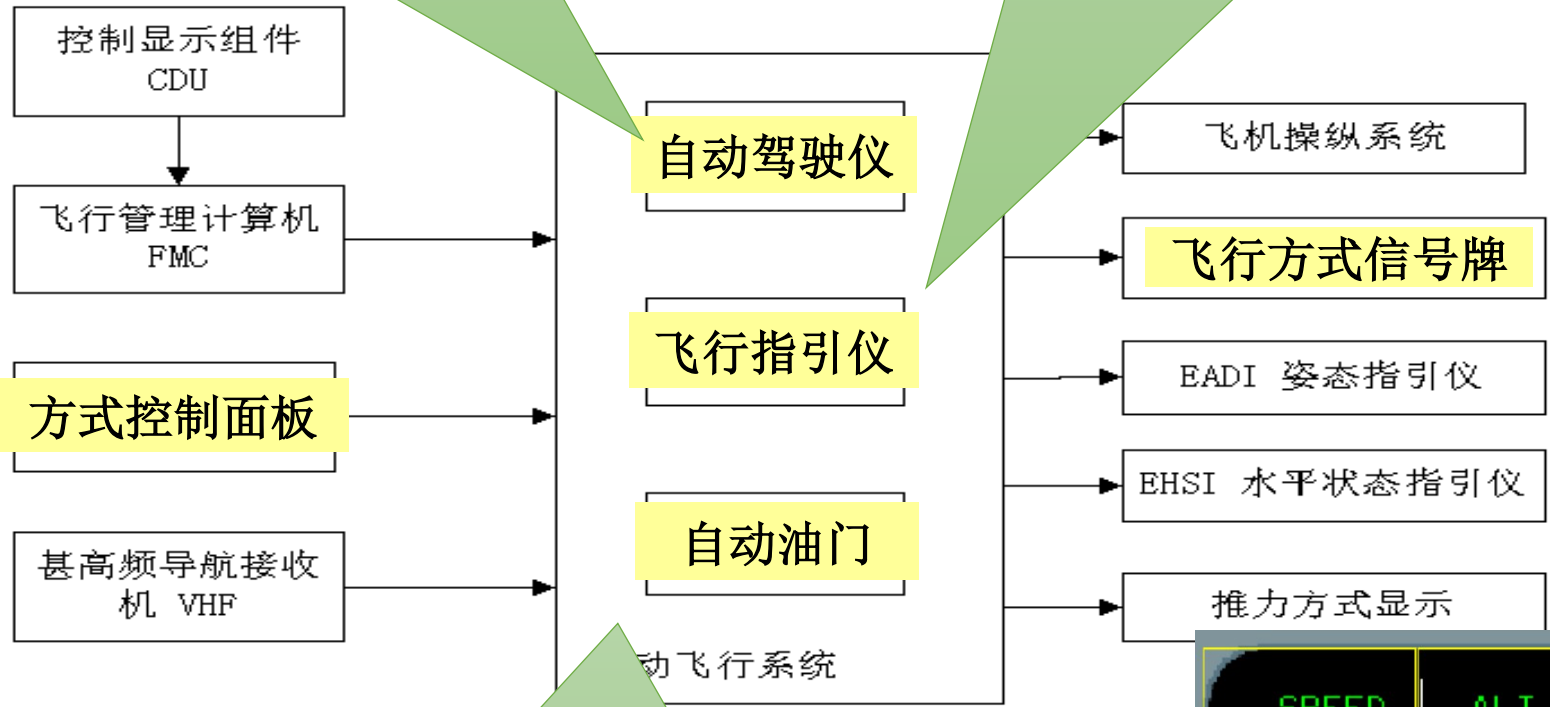


起落架  
和自动  
刹车



自动驾驶仪是一种不需要飞行员干预就能保持飞机飞行姿态的自动控制设备。用于稳定飞机的俯仰角、倾斜角和航向角、飞行高度和飞行速度。计算出升降舵和副翼等操纵面的控制指令，并驱动升降舵和副翼等操纵面自动偏转，操纵飞机按照指令杆的指令改变俯仰角或滚转角

根据俯仰/横滚通道选择的飞行方式和飞机当前的纵侧向飞行参数，按照不同飞行模式控制律计算出飞机的俯仰角和滚转角指令信号，在姿态指引仪做出指示，并显示与飞机当前实际俯仰角和滚转角的差值，引导驾驶员操纵，使飞机的实际姿态角跟踪指令杆指示姿态角，实现预选的飞行方式



提供飞行操作的各种开关、按钮以及参数选择。由飞行员操作通断开关和接通电门；飞行高度、速度、垂直速度、航向、航道预选旋钮及数字显示窗，指示灯

提供飞机从起飞至着陆的推力自动控制。根据飞机的不同飞行状态和工作模式，给出油门杆驱动信号，使油门杆位置自动调整到保证发动机推力处于最佳配置状态



## 2 飞机飞行控制模态

### □ 俯仰方式

- ◆ 升降速度保持模式 V/S
- ◆ 高度保持模式 ALTHOLD
- ◆ 高度层改变模式 LVL CHG
- ◆ 垂直导航模式 VNAV
- ◆ 起飞/复飞模式 TO/GA

### □ 横滚方式

- ◆ 航向预选及航向保持 HDG SEL
- ◆ 横向导航模式 LNAV
- ◆ VOR/LOC 无线电导引模式
- ◆ 进近模式 APP

### □ 自动油门方式

- ◆ 自动油门预位模式 ARM
- ◆ N1 模式
- ◆ 推力保持模式 THR HOLD
- ◆ 方式控制面板速度模式 MCP SPD
- ◆ 收油门模式 RETARD
- ◆ 复飞模式 GA

# 俯仰方式



## □升降速度保持模式 V/S

- 为了改变现有高度，进行自动爬升和下降时
- 捕获和跟踪驾驶员选择的垂直速度，同时控制发动机推力
- 在方式控制面板上选择要求的升降速度，按下升降速度模式电门

## □高度保持模式 ALTHOLD

- 自动爬升或下降到某一高度，并保持在此高度上飞行
- 在方式控制面板上预选高度，按压高度保持模式电门ALTHOLD

## □垂直导航模式 VNAV

- 数字飞行控制系统从飞行管理计算机获得预选的垂直剖面上必需的爬升速率、巡航高度、速度、下降速率、航路点上的高度限制等，完成预选航线的飞行
- 自动接通自动油门N1方式
- 在方式控制面板上按压垂直导航模式电门

# 横滚方式



## □航向预选及航向保持HDG SEL

- 通过偏转副翼改变飞机滚转角，使飞机调整到预选航向上，并保持在该航向上飞行
- 在方式控制面板预选航向
- 在方式控制面板上按压HDG SEL电门，自动飞行系统通过偏转副翼改变飞机滚转角，使飞机调整航向

## □横向导航模式 LVAN

- 跟踪飞管计算机确定的航路。通过接收飞管计算机预选航路的导航参数，控制飞机横滚切入，跟踪既定航路
- 在方式控制面板上按压LNAV电门

## □VOR/LOC无线电导引模式

- 机载导航接收机接收全向信标无线电导航信号（VOR）/航向信标台导航信号（LOC），输给自动飞行系统，计算出滚转指令，跟踪航道
- 由地面信标台和机载导航接收机组成，按压方式控制面板上的VOR/LOC电门



# 自动油门方式



## □自动油门预位模式 ARM

- 接通自动油门其他工作模式的准备条件
- 按压方式控制面板上ARM电门

## □N1模式

- 使油门杆保持在飞行管理计算机选定的N1限制值对应的推力位置
- 起飞/复飞时，应工作在N1模式，需要接通N1模式
- 飞机处于LVL CHG或V/S模式时，自动接通N1模式

## □推力保持模式 THR HOLD

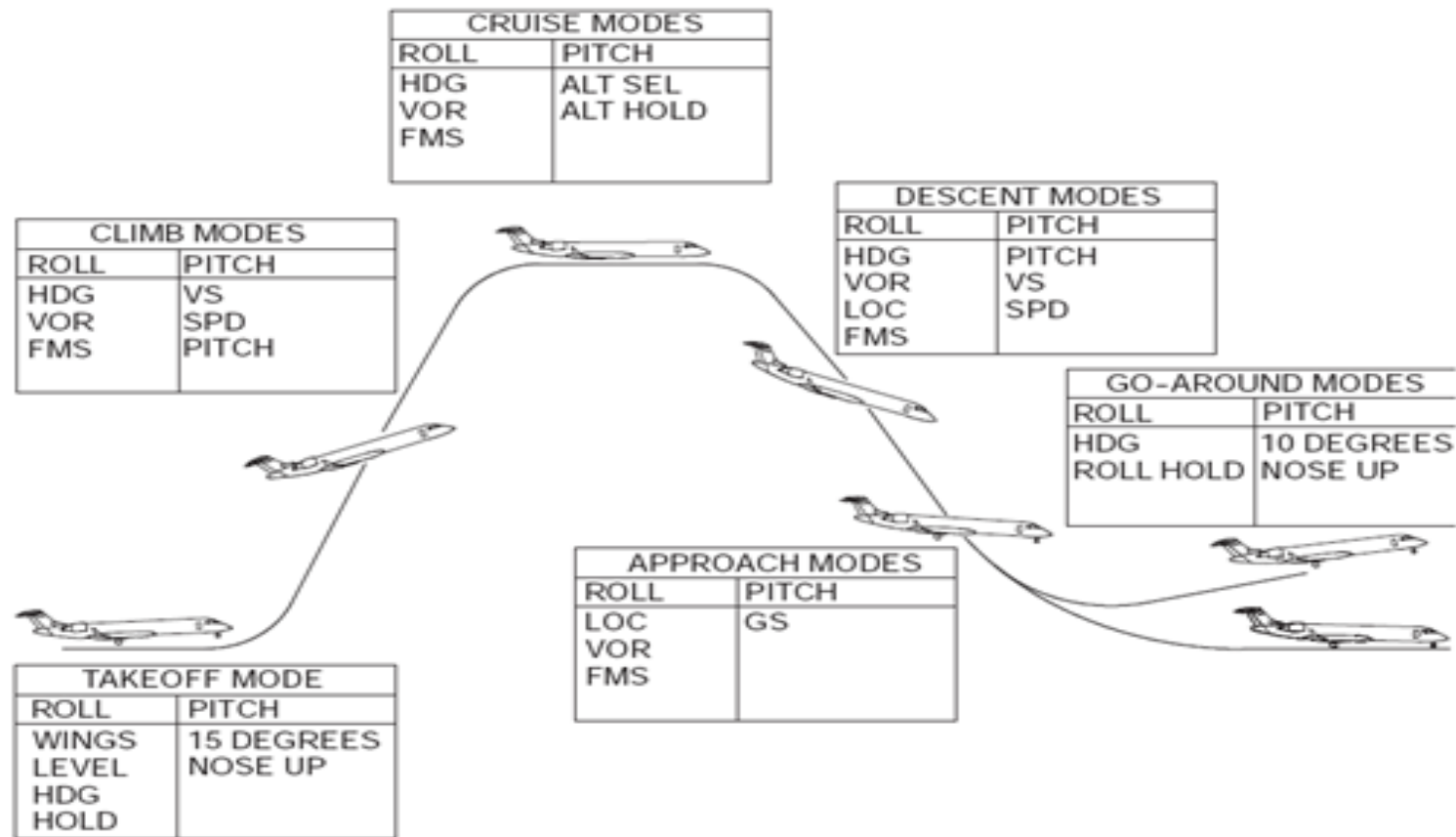
- 飞机达到一定速度后，自动油门系统工作在THR HOLD模式
- 自动油门不能改变油门手柄位置

## □方式控制面板速度模式 MCP SPD

- 控制自动推力手柄位置，使飞机保持目标速度
- 在方式控制面板上预选目标速度，接通自动油门的速度电门

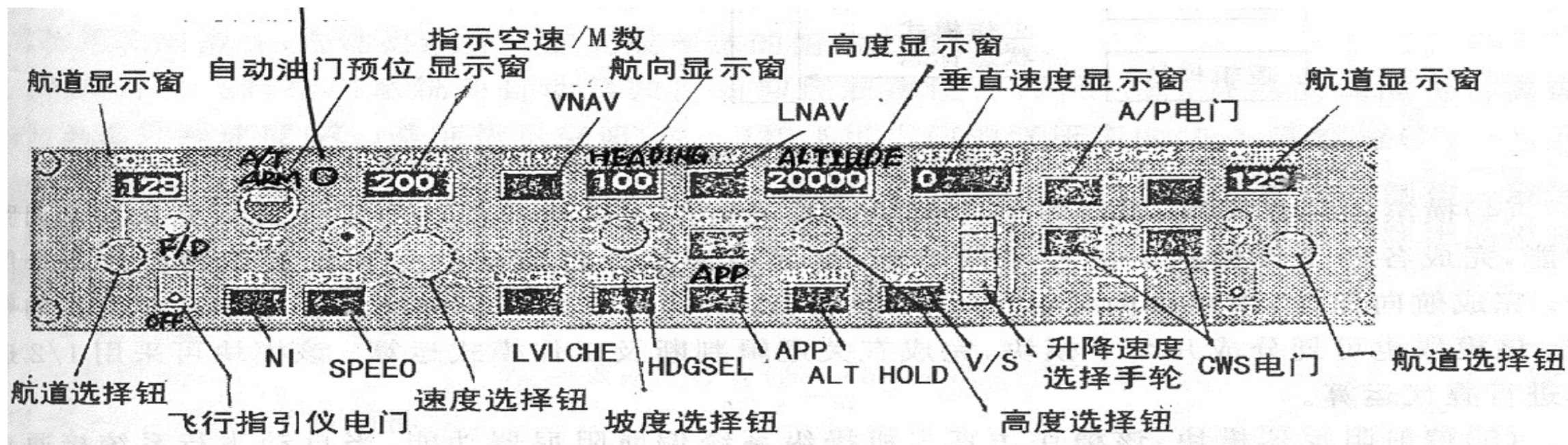


# 飞机飞行阶段与典型控制模态



- 起飞 ( TAKE-OFF ) 阶段：保持飞机航向和机翼水平；
- 巡航飞行 ( CRUISE ) 阶段：保持飞行高度；
- 进场飞行 ( APPROACH ) 阶段：按方向台、下滑台指引轨迹飞行。

# 方式控制面板（举例）





# 方式控制面板（实例）



## 1、航道选择钮和航道显示窗

- 航道显示窗：显示所选定的航道数值。
- 航道选择钮：范围设定为 $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 。

## 2、自动油门预位电门及自动油门指示器灯

- 自动油门预位电门A/T ARM预位后，自动油门指示器灯变亮。

## 3、飞行指引仪电门及主飞行指引仪灯

- 当飞行指引仪电门F/D在ON位，飞行指引仪灯变亮。

## 4、空速/马赫数（IAS/MACH）转换电门及显示窗

- C/O：转换电门，按压此电门则改变速度显示方式，在空速/马赫数之间进行转换。
- IAS/MACH显示窗：根据C/O状态进行速度显示。
- 速度选择钮：转动该速度选择钮调定IAS/MACH显示窗的速度。

## 5、航向选择钮、航向显示窗和坡度选择钮

- 航向显示窗：显示选择的航向。
- 航向选择钮：调定航向显示窗的航向。
- 转弯坡度选择钮：可以选择 $\pm 10$ 、 $\pm 15$ 、 $\pm 20$ 、 $\pm 25$ 和 $\pm 30$ 度转弯坡度角。

【B737上，航向选择钮和坡度选择钮叠在一起。内圈是航向选择钮，外圈是坡度选择钮】

# 方式控制面板（举例）



## 1、高度选择钮和高度显示窗

- 高度显示窗：显示以100英尺增量的0到50000英尺的选择高度
- 高度选择钮：转动高度选择钮，调定高度显示窗内的高度

## 2、垂直速度拨轮和垂直速度显示窗

- 垂直速度拨轮：可选择 -7900到+6000英尺/分钟的垂直速度
- 垂直速度显示窗：显示垂直速度，V/S方式未生效时空白，用V/S方式电门接通V/S方式时显示目前垂直速度

## 3、飞行指引仪电门开关与指示灯

## 4、航道选择旋钮与航道显示窗

## 5、自动驾驶仪脱开杆DISENGAGE及CWS、CMD电门

- 推下该脱开杆，露黄色背景，则脱开两部自动驾驶仪，阻止自动驾驶接通。也就是说，CMD电门和CWS电门不起作用；推上该脱开杆、盖住黄色背景，则允许自动驾驶接通，这时，CMD电门和CWS电门才会起作用
- 自动驾驶仪接通电门CMD：这些电门为瞬间接触式。同时按压两个CMD电门，接通所有自动飞行指引的指令方式和自动驾驶的CWS操作。若CMD电门处于关闭状态，自动飞行指引的功能都无法使用
- CWS电门：在CMD电门开启状态，若同时开启两个CWS电门，则可直接进行人工操纵





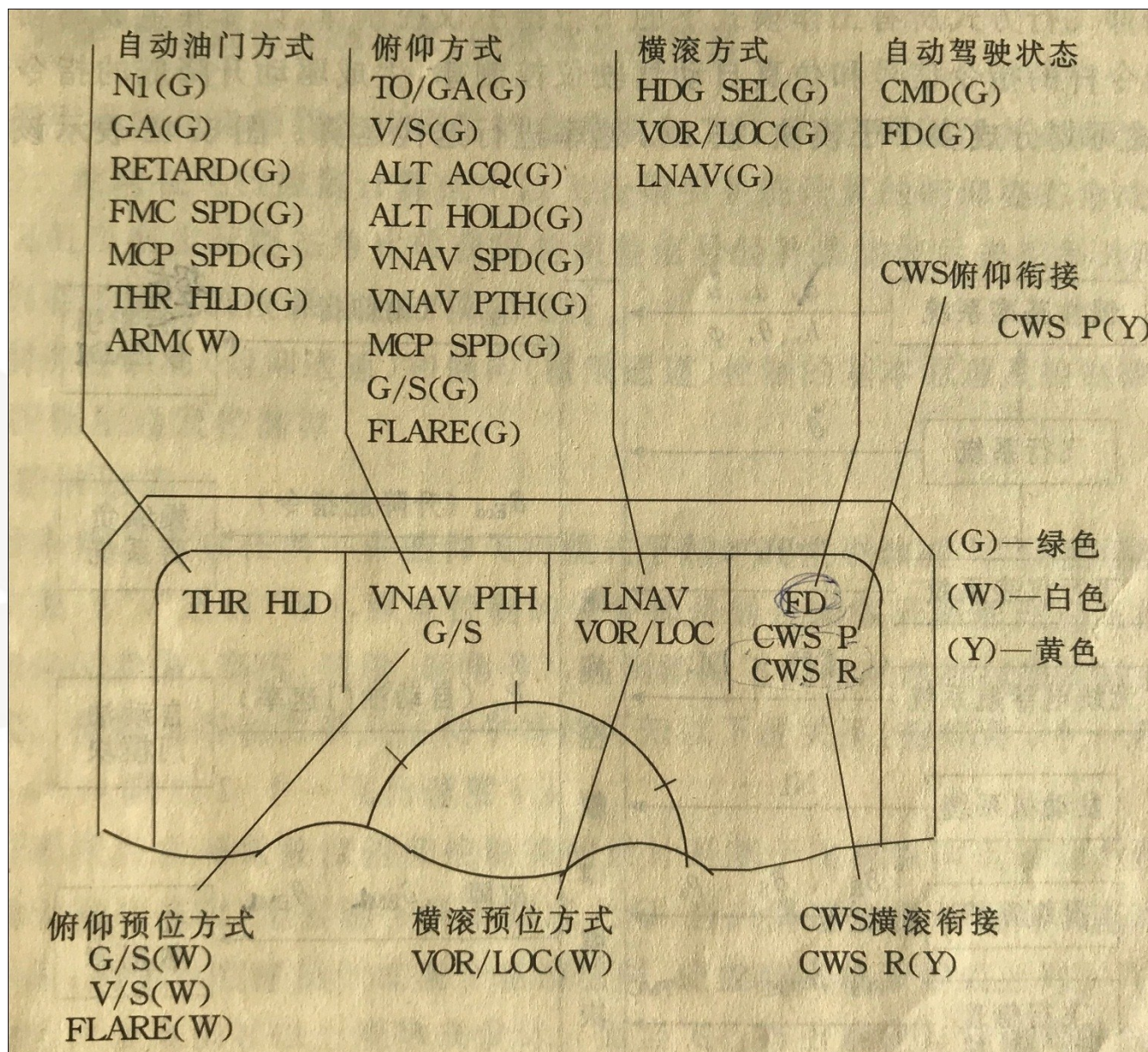
## □黑色方框带灯开关按键

- N1开关：发动机低压时转子转速开关
- SPEED开关：速度保持开关
- LVL CHE开关：高度层改变开关
- HDG SEL开关：航向预选及航向保持开关
- APP开关：近进方式开关
- VOR/LOC开关：无线电导引，导航开关
- L NAV开关：横向导航开关
- V NAV开关：垂直导航开关
- ALT HOLD开关：高度保持开关
- V/S开关：升降速度保持开关
- A/P开关：自动驾驶仪电门开关

## □按键工作逻辑

- N1、SPEED：在A/T选中方式下才起作用
- 在VNAV方式：飞行速度，高度不能变
- LVL CHE方式：速度可变，高度不能变化
- LNAV方式和HDG SEL方式：二者矛盾，只能选一
- VOR/LOC方式：独立控制
- APP方式：独立控制

# 飞行方式信号牌显示实例







# 3 飞行控制系统控制原理分析

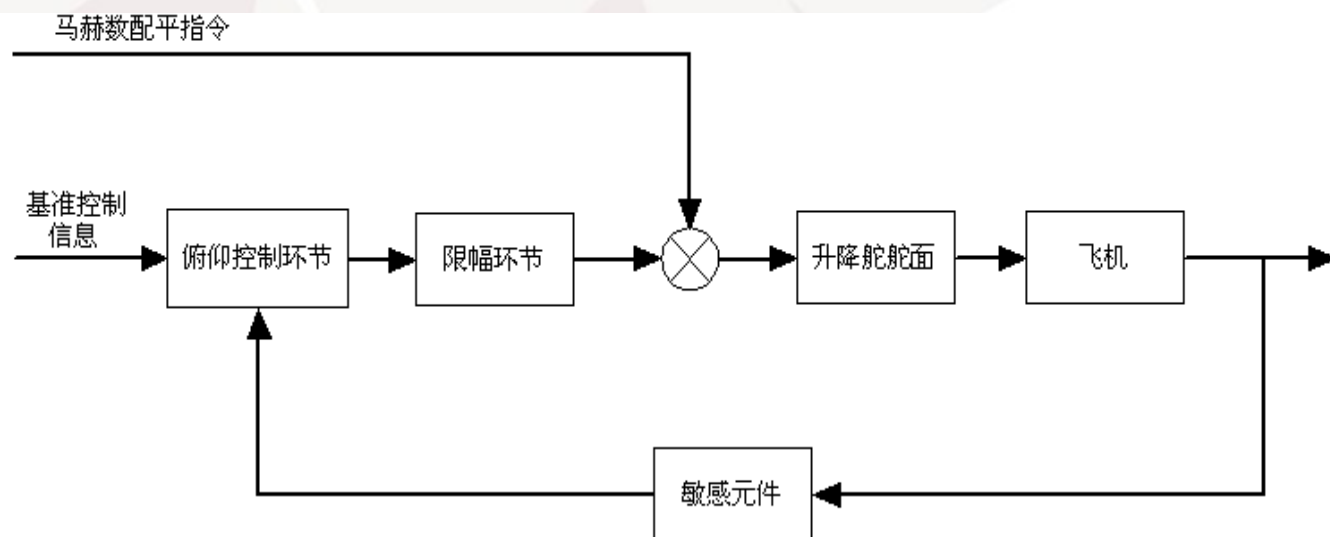
## 纵向（俯仰）通道控制原理

### ➤ 基本原理

- 飞行指引系统计算得到俯仰角与飞机当前实际俯仰角进行比较，获得的误差信号经补偿滤波后控制升降舵，改变飞机俯仰角
- 俯仰飞行模式下，纵向控制任务都是通过操纵升降舵改变飞机俯仰角，从而改变飞机纵向运动参数，如高度、速度、迎角等，实现预选的飞行模式

### ➤ 物理过程

- 通过操纵升降舵改变飞机俯仰角
- 升降舵上偏—>俯仰力矩使飞机抬头—>俯仰角增大—>迎角增大  
—>升力加大—>航迹角增大  
—>阻力上升—>飞行速度下降



# 举例：V/S模式俯仰控制律设计

俯仰指令杆控制律：

$$\theta_{PC} = K_{PC} \bullet W_{PC}(S)(\theta_{AP} - \theta_{RP} \bullet W_R(S))$$

增益系数

飞机当前俯仰角

在预选俯仰飞行方式下对应的  
基准俯仰角

补偿滤波环节

升降舵控制律：

$$\delta_{EC} = (\theta_{dI} + \theta + \dot{\theta} \cdot T)$$

飞机当前俯仰角，作为低频  
阻尼信号

增益系数

俯仰控制指令，由升降舵俯仰  
指引指令及其指令的积分组成

俯仰角速度变化率经一阶滞后滤波，  
作为高频阻尼信号

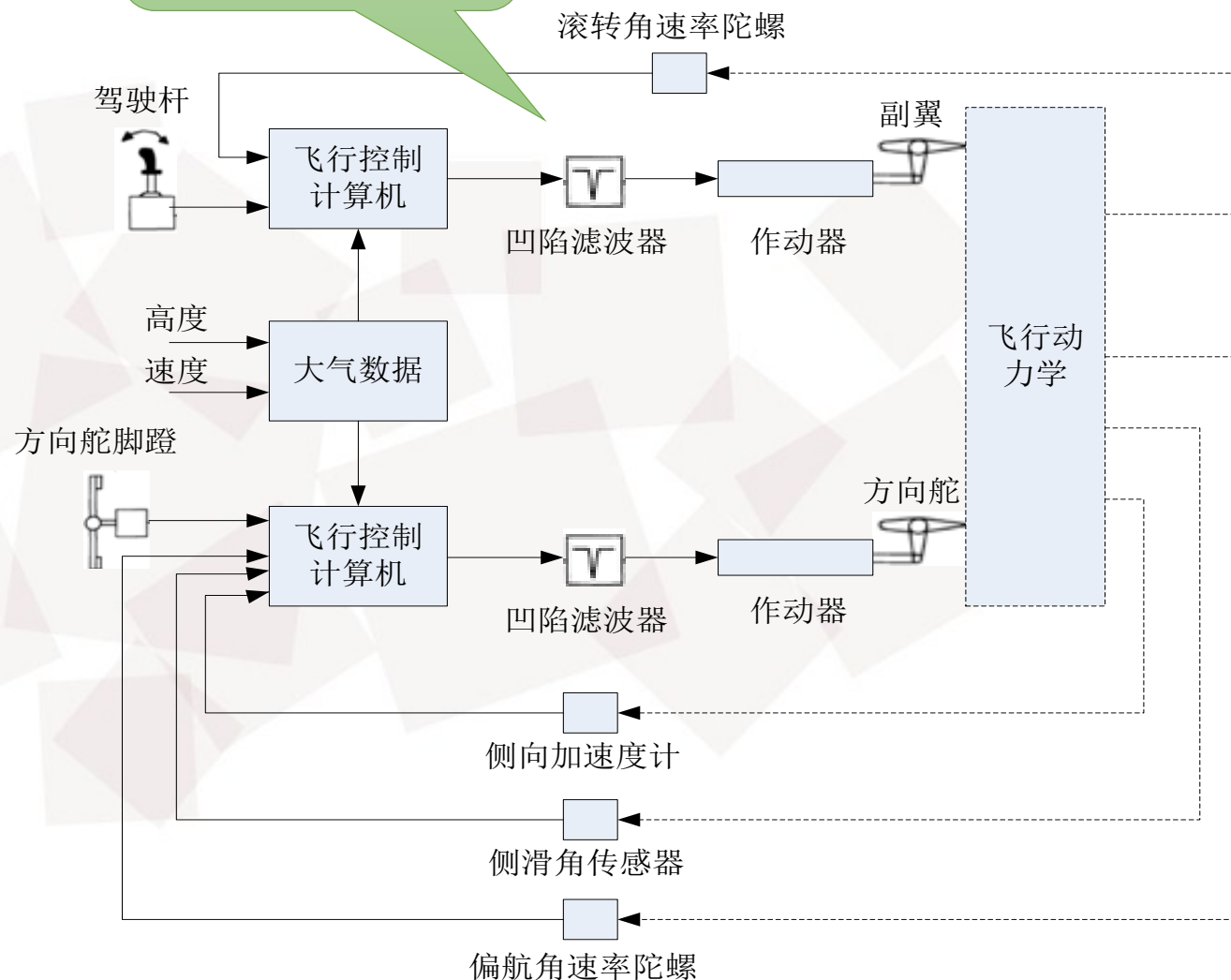
## □ 横向（横滚）通道控制原理

### ■ 基本原理

- 基于飞机侧向动力学特性，消除飞机的航向偏差和航迹偏差，通过飞行指引系统解算滚转角指令驱动信号，经滤波变成驱动副翼偏转的控制指令

### ■ 物理过程

- 飞行指引系统计算得到的横滚姿态角与飞机当前实际姿态角比较，获得的误差信号经补偿滤波后去控制副翼，通过偏转副翼，控制飞机滚转角，改变飞机所受侧力和侧向力矩，从而达到保持航向或使飞机转向基准航向的目的



一种侧向俯仰角控制律设计方案





# 4 飞行控制系统仿真软件

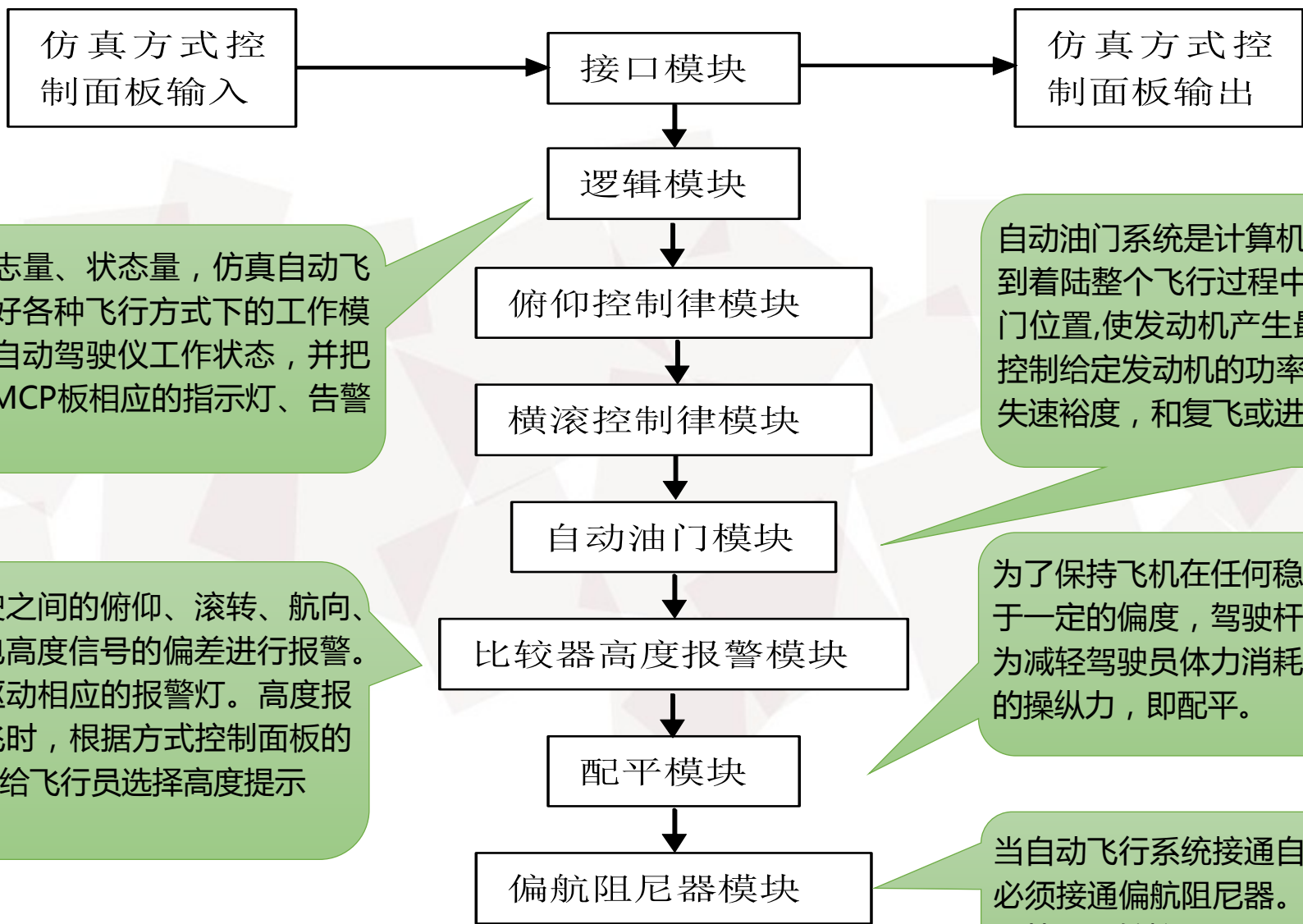
## □要求

- 实现与真实飞机自动飞行系统完全相同的功能
- 工作状态：俯仰方式、横滚方式、自动油门方式
- 控制模态：实现三种工作状态下的控制模态

## □方法——软硬件结合

- 硬件
  - 接口：飞控系统的输入大部分来自飞行方式控制面板，需要采集这些信号，锁存其中的开关量（接通开关、按钮等）；将预选高度、速度、航向信息变换为MCP上数字量，同时输入控制模态
- 软件
  - 通过俯仰及横滚两个通道的飞行指引系统，自动驾驶仪及自动油门系统协调运行实现
  - 选用偏航阻尼器、配平等方法提高飞机飞行品质





接收多种开关量、标志量、状态量，仿真自动飞行系统各种接通逻辑好各种飞行方式下的工作模式，以及飞行指引、自动驾驶仪工作状态，并把这些状态输出，驱动MCP板相应的指示灯、告警灯

自动油门系统是计算机控制的机电综合系统。从起飞到着陆整个飞行过程中，自动油门系统连续地控制油门位置，使发动机产生最佳的推力。通过推动油门杆，控制给定发动机的功率，实现对飞机飞行速度，安全失速裕度，和复飞或进场平飘状态的控制。

比较器对机长与副驾驶之间的俯仰、滚转、航向、定位下滑坡度及无线电高度信号的偏差进行报警。计算偏差，利用偏差驱动相应的报警灯。高度报警系统是在进场和起飞时，根据方式控制面板的选择，在视觉和听觉上给飞行员选择高度提示

为了保持飞机在任何稳定状态下飞行，各操纵面要置于一定的偏度，驾驶杆、脚蹬要施加一定的操纵力。为减轻驾驶员体力消耗应设法消除或减轻稳态飞行时的操纵力，即配平。

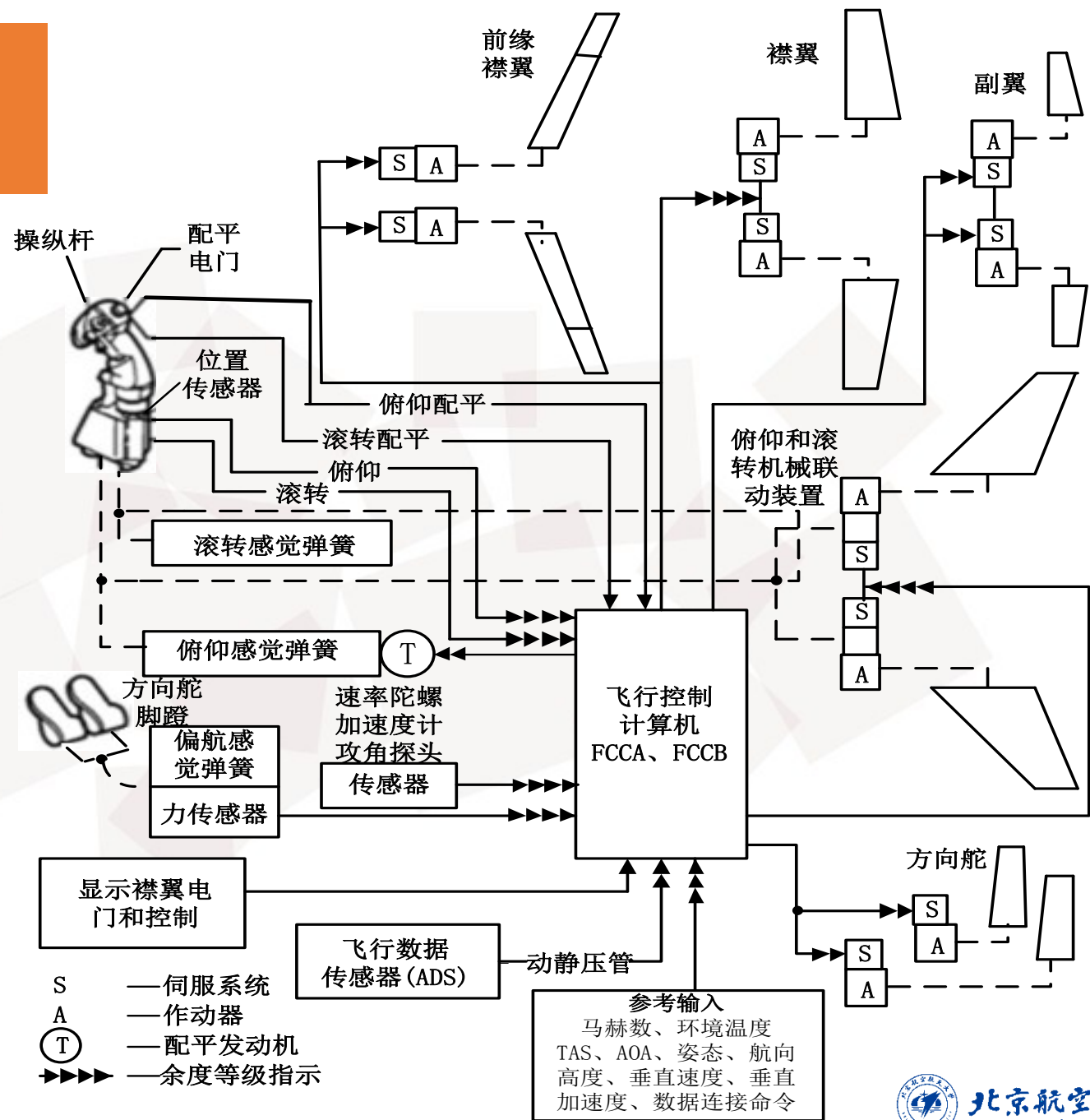
当自动飞行系统接通自动驾驶仪的俯仰横滚通道时，必须接通偏航阻尼器。引入偏航速率信号作为反馈，计算方向舵控制指令，达到航向稳定性。

# 讨论题

## 飞行控制系统分析

RESEARCH TOPIC

- 美国NASA系统研究飞机 (SRA)
- 数字行控制系统结构如图
- 根据所学知识进行分析





# 致谢感恩

---

THANKS TO

