# 稳定与操纵

- 运动方程 Force Equations
  - 轴系 Axes System
    - 惯性轴系 Inertial Axes System
    - 地轴系 Earth-Fixed Axes System
    - 航迹轴系 Navigational System
    - 体轴系 Body Axes System
      - 风轴系 Wind
      - 稳定轴系 Stability
  - 坐标变换 Axes Transformation
    - 欧拉角法 Euler angles
    - **三个坐标变换矩阵**

$$L_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \qquad L_2 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{bmatrix} \qquad L_3 = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

  - 运动方程 Force Equations
    - 力方程
    - 力矩方程
    - 角速度方程
    - 速度方程
  - 小扰动线化 Equations of Motion with Small Disturbances
    - 一阶状态空间方程形式

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

系统矩阵 · 操纵效能矩阵 · 状态向量 · 控制向量

  - 气动力/力矩估算 Estimation of Aerodynamic Forces and Moments
    - 稳定导数 Stability derivatives
      - 静导数
      - 动导数
        - 阻尼导数
          - $C_{mq} < 0$
          - $C_{lq} > 0$
        - 洗流时差导数
          - $C_{m\dot{\alpha}} < 0$
          - $C_{L\dot{\alpha}} > 0$
    - 操纵导数 Control derivatives

- 动稳定
  - 动静稳区别
    - **动稳：飞机受扰动后运动随时间变化趋势**
    - 静稳：回到初始状态的趋势
  - 运动方程
    - 一阶状态空间方程形式
      - 瞬态特性，动稳定性
        - 强迫响应
      - 稳态特性
        - 自由响应
    - 特征方程
      - 实根
        - 单调响应
        - 用倍幅或半衰做参数
      - 复根
        - 振荡响应
        - **有包线**
    - 动稳定性的判据
      - Routh's Criterion
        - 充分条件
        - 必要条件：特征方程细数全部为正 或 符号相同
    - 传递函数
      - 零极点
      - 频率 $\omega n$
      - 阻尼比 $\zeta$
  - 运动方程的求解
  - 纵向模态
    - α；q；θ
      - 无需干预
        - 短周期：大阻尼，高频率
      - $\omega nsp$ 和 $C_{m\alpha}$ 成反比（重心位置，零升力矩）
      - $\zeta sp$ 和 尾容比V 成正比，$C_{mq}$、$C_{m\dot{\alpha}}$ 有关
    - v；θ
      - 可轻易干预
        - 长周期：小阻尼，低频率
      - $\omega p$ 和 速度V 成反比
      - $\zeta p$ 和 升阻比E 成反比
  - 横航向模态
    - **零根：偏航中性稳定**
    - 大负实根：滚转收敛模态
      - 滚转收敛阻尼很大，飞行员感受不到
      - 近似精确度高
    - 小负（正）实根：螺旋模态
      - **允许不稳定，只要发散不太快，可改出**
      - 近似精确度低
    - 共轭复根：荷兰滚模态
      - **$\omega$-航向静稳导数**
      - **$\zeta$-偏航阻尼**
      - 近似精确度较高
  - 飞行品质
    - 飞行品质分级
      - 一级
      - 二级：工作负担 完成质量
      - 三级：工作困难 完成不能
      - Cooper-Harper评分标准
    - 飞行阶段
      - 非场域
        - A 高机动
        - B 和缓机动
      - 场域
        - C 进场 起降 复飞
    - 飞机分类
      - I 小飞机
      - II 中型飞机
      - III 大重型飞机
      - IV 高机动飞机

- 静稳定性 Static Stability
  - 纵向 longitudinal
    - 稳定Cma
      - 中性点 Neutral Point
      - 松杆稳定性 Stick-free Stability
        - 松杆中性点 Stick-free Neutral Point
    - 操纵
      - 改变机翼弯度 Camber
      - 改变重心位置
        - 协和 Concorde
        - 重心范围
      - 尾翼/鸭翼控制
        - 配平偏角 Trim angle
          - 效率因子 τ
          - 操纵效能 Control power $C_{m\delta}$
          - 勺型区的原因
            - 焦点后移
        - 升降舵 Elevator
          - 下偏为正，上偏为负
          - 地面效应 Ground Effect
            - 降低下洗
              - 提高平尾升力和效率
              - 提高机翼升力
              - **增稳**
                - 太大：过于迟钝
                - 太小：过于灵敏
          - 操纵力
            - 铰链力矩 Hinge moment
              - 气动补偿 Aerodynamic Balancing
            - 定常平飞杆力 Stick Force
        - 全动平尾
        - 鸭翼
    - 机动飞行稳定性 Stability in Maneuvering Flight
      - 过载系数 Lord Factor
        - 单位过载升降舵偏角
        - 单位过载杆力
        - **用于衡量机动性**
      - 机动点
        - 握杆机动点 M0
          - 单位过载升降舵偏角=0
        - 松杆机动点M0'
          - 单位过载杆力=0
        - **松杆总在握杆前**
  - 航向 Directional
    - 稳定Cnβ
      - 机翼 Wings
        - 上反角 Dihedral
          - 降稳
          - 两侧机翼局部 迎角不同 ，动压不同
        - 后掠角 Leading-edge Sweep
          - 增稳
      - 机身 Fuselage
        - 降稳
      - 尾翼 Tail
        - 平尾 Horizontal tail
          - 与机翼类似
          - 可忽略
        - **垂尾 Vertiacl tail**
          - 最大来源
      - 动力 Power
        - 复杂 可忽略
    - 操纵
      - 操纵面
        - 方向舵 Rudder
          - 操纵效能 Control power
      - 单位侧滑方向舵偏角
      - 临界操作要求
        - 不利偏航 Adverse Yaw
        - 侧风起飞着陆 Crosswind takeoff & landing
        - 不对称动力 Asymmetric Power
        - 尾旋改出 Spin Recovery
  - 横向 Horizontal
    - 稳定Clβ
      - 上反效应 Dihedral Effect（侧滑-恢复滚转力矩）
        - 机翼位置
          - 上单翼 $C_{l\beta} < 0$ 稳定
          - 中单翼 $C_{l\beta} = 0$ 中立稳定
          - 下单翼 $C_{l\beta} > 0$ 不稳定
          - 上反角
            - 改变两侧局部迎角
              - 正上反效应
                - 提高稳定性
        - 各部分贡献 Contribution
          - **机翼 Wings**
            - 翼身干扰 Interference
              - Higher
                - 稳定
              - Lower
                - 不稳定
            - 上下反 Dihedral/Unhedral
              - 正比于上反角
            - 后掠 Leading-edge Sweep
              - 正比于后掠角、升力系数
          - 机身 Fuselage
            - 可忽略
          - 平尾 Tail
            - 平尾 Horizontal Tail
              - 面积小，可忽略
            - 垂尾 Vertical Tail
              - 取决于迎角，通常增稳
          - 动力 Power
            - 可忽略
    - 操纵
      - 侧风起飞着陆
      - 操纵舵面
        - 副翼 Aileron
          - 升降副翼 Elevon（无尾飞机）
          - 右下左上为正
        - 扰流板 Spoiler