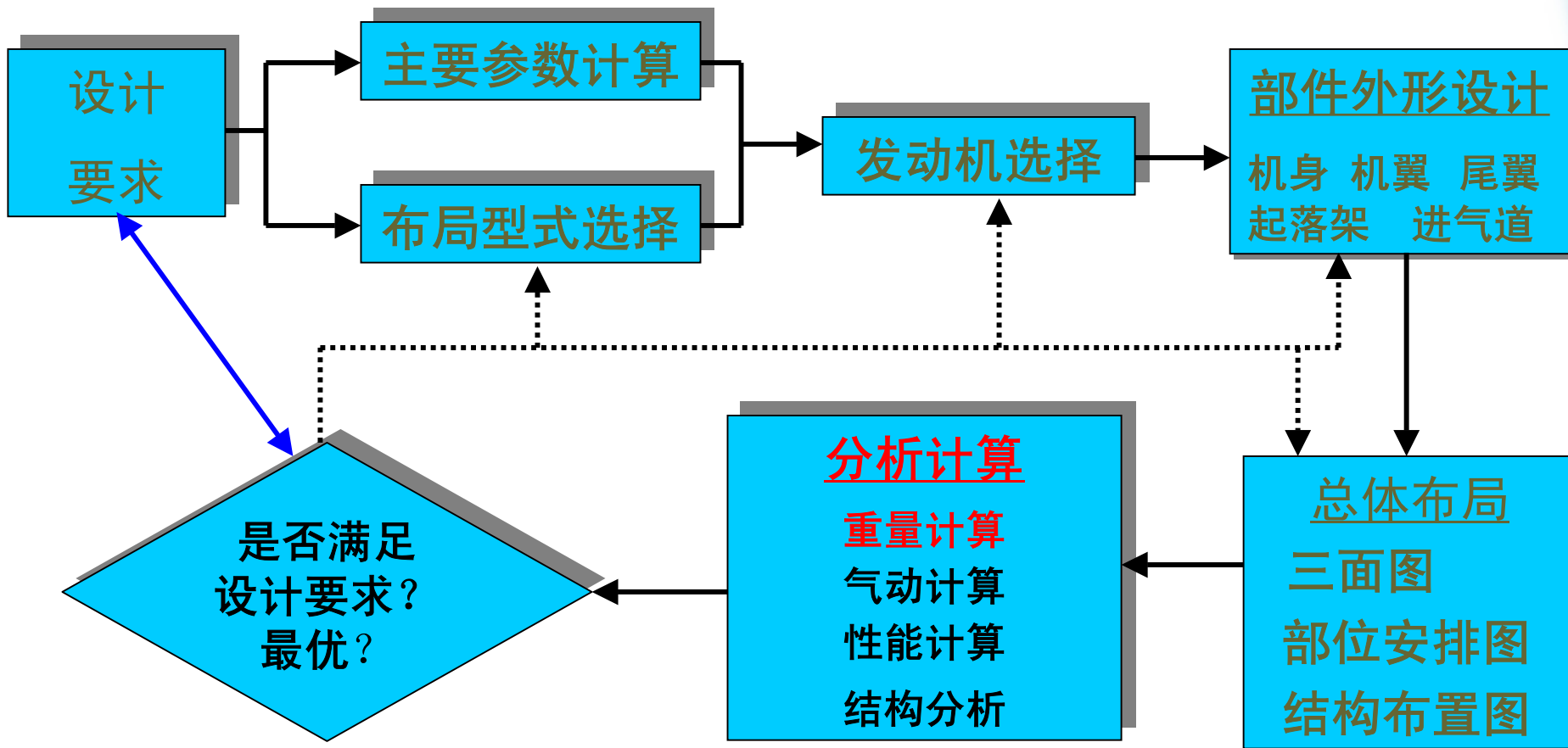




飞机重量和重心计算

飞机总体设计框架





内容提要

- 重量的分组
- 飞机的过载
- 飞机结构重量估算
- 飞机重心的几个概念
- 各部件的重心位置估算
- 全机重量计算和重心定位
- 飞机重心位置的调整
- 飞机重量重心计算报告



飞机的过载

- 结构重量与飞机过载有关
- 几种飞机的使用过载：
 - 战斗机: $n_y = 8 \sim 9$
 - 教练机和攻击机: $n_y = 5 \sim 6$
 - 轰炸机: $n_y = 3 \sim 4$
 - 运输机和货机: $n_y = 1.5 \sim 2.5$
- 最大过载: $n_{\max} = 1.5 n_y$



机翼结构重量 (运输机)

• 基本公式

以下公式为基本公式—只适于起落架可收，发动机不安装在机翼上的情况：

$$W_{\text{机翼}} = K_w \cdot b_s^{0.75} \cdot \left(1 + \sqrt{\frac{b_{\text{ref}}}{b_s}}\right) \cdot n_{\text{max}} \cdot \left(\frac{b_s / t_r}{W_G / S}\right)^{0.30} \cdot W_G$$

其中： $b_{\text{ref}} = 1.905$

b_s 为结构展长： $b_s = b / \cos \chi_{1/2}$

S — 机翼面积； W_G — 零燃油重量；

n_{MAX} — 最大过载系数； t_r — 根弦最大厚度

对于轻型飞机 ($W_{\text{to}} < 5670$)： $K_w = 4.90 \times 10^{-3}$

对于运输飞机 ($W_{\text{to}} > 5670$)： $K_w = 6.67 \times 10^{-3}$



机翼结构重量 (续)

- 如机翼上有扰流板和减速板，增加2%；
- 当机翼安装2台或4台发动机时，分别减少5%或10%；
- 如果起落架不安装在机翼，减少5%。
- 讨论：
 - $b_s \uparrow \rightarrow W_{\text{机翼}} \uparrow$
 - 可通过增加翼载来减缓由于 $b_s \uparrow$ 带来的不利因素，故大型飞机通常有较高的翼载



尾翼结构重量

平尾结构重量:

$$W_{\text{平尾}} = 0.034 \cdot \{(W_{to} \cdot n_{\text{max}})^{0.813} \cdot S_{\text{平}}^{0.584} \cdot (b_{\text{平}} / t_{r,\text{平}})^{0.033} \cdot (c_A / l_{\text{平}})^{0.28}\}^{0.915}$$

垂尾结构重量:

$$W_{\text{垂}} = 0.19 \cdot \{(1 + Z_h / b_{\text{垂}})^{0.5} (W_{to} \cdot n_{\text{max}})^{0.365} \cdot (S_{\text{垂}})^{1.089} \cdot (M_H)^{0.601} \\ l_{\text{垂}}^{-0.726} (1 + S_r / S_{\text{垂}})^{0.217} (\lambda_{\text{垂}})^{0.337} (1 + \frac{1}{\eta_{\text{垂}}})^{0.363} (\text{COS} \chi_{1/4})^{-0.484}\}^{1.014}$$

其中: $S_{\text{平}}$ — 平尾面积 (ft²);

$l_{\text{平}}$ — 平尾尾力臂 (ft);

$t_{r,\text{平}}$ — 平尾根部最大厚度 (ft);

$t_{r,\text{垂}}$ — 垂尾根部最大厚度 (ft);

$S_{\text{垂}}$ — 垂尾面积 (ft²);

$l_{\text{垂}}$ — 垂尾尾力臂 (ft);

$b_{\text{平}}$ — 平尾展长 (ft);

$b_{\text{垂}}$ — 垂尾展长 (ft);

尾翼结构重量 (续)

n_{MAX} — 最大过载系数;

$\lambda_{\text{垂}}$ — 垂尾展弦比;

S_r — 方向舵面积 (ft);

W_{to} — 起飞重量 (磅);

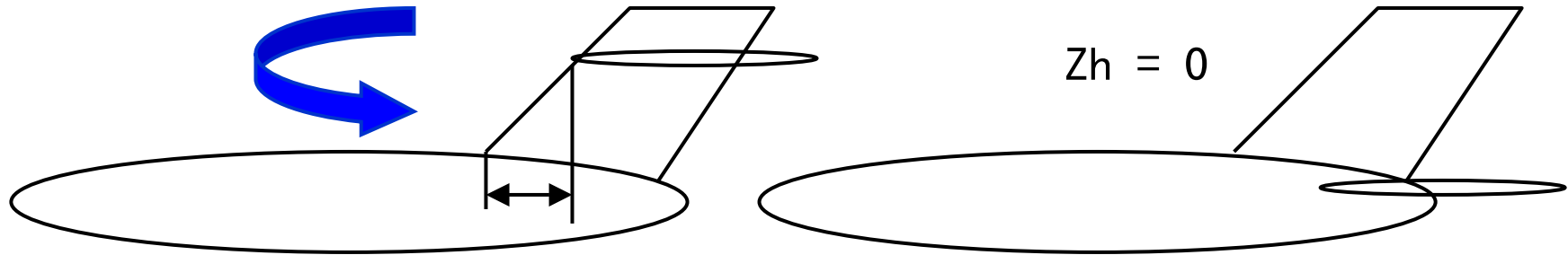
Z_h — 定义见图:

$\chi_{1/4}$ — $1/4$ 弦线后掠角 (度);

$\eta_{\text{垂}}$ — 垂尾梯形比;

M_H — 海平面最大马赫数;

$W_{\text{平}}$ 、 $W_{\text{垂}}$ 的单位为磅



From 《Airplane Design》, Part 5, Roskam.



机身结构重量

$$W_{\text{机身}} = K_{Wf} \sqrt{V_D \cdot \frac{l_t}{b_f + h_f}} \cdot S_G^{1.2} \quad (\text{kg})$$

$$K_{Wf} = 0.23$$

V_D — 设计俯冲速度 (km/h)

l_t — 机翼根弦1/4处至平尾根弦1/4处之间的距离

b_f — 机身最大宽度 (m) ;

S_G — 机身壳体面积 (m) ;

- 对于增压客舱，增加8%；
- 后机身安装发动机，增加4%；
- 主起落架在机身上，增加7%；
- 若无主起落架支撑结构，也无机轮舱减少4%；
- 对于货机，增加10%。

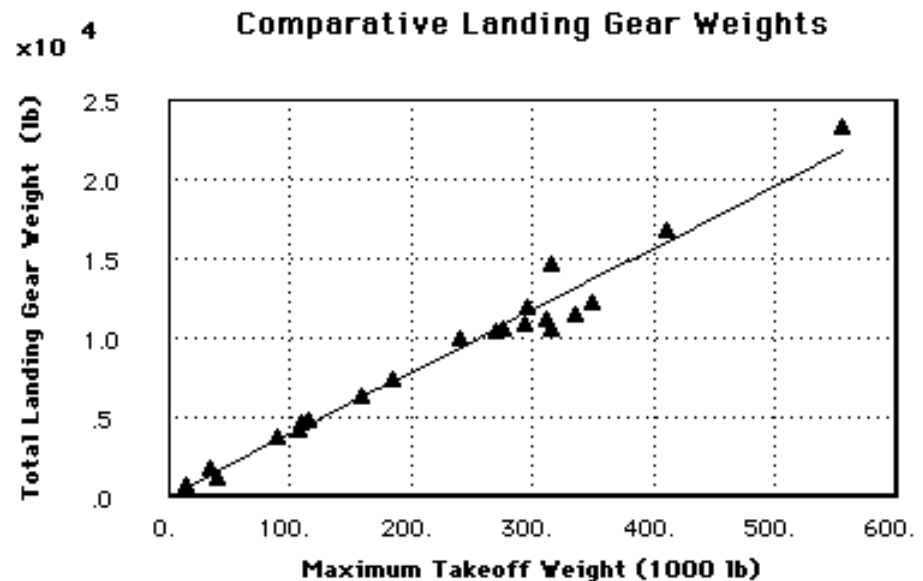


起落装置重量

起落装置重量包括:

- 主结构（支柱和撑杆）
- 机轮、 刹车装置、 轮胎、 导管和冷气装置；
- 收放机构、 阻尼器、 操纵器件、 机轮小车等。

$$W_{\text{起落装置}} = 0.04 \cdot W_{to}$$



From 《Introduction to Aircraft Design: Synthesis and Analysis》, Kroo



控制面操纵系统的重量

$$W_{\text{操纵}} = K_{SC} \cdot (W_{to})^{2/3} \cdot 0.768 \quad (\text{kg})$$

- 设有双重操纵机构的轻型飞机: $K_{SC}=0.23$
- 用于手操纵的运输机和教练机: $K_{SC}=0.44$
- 运输机, 动力操纵系统, 仅有后缘襟翼: $K_{SC}=0.64$
- 有前缘襟翼时, 增加20%。



推进系统重量

推进系统重量包括：

- 发动机
- 安装发动机的结构
- 短舱
- 操纵发动机的附件（起动和控制系统等）
- 反推力装置
- 燃油系统

$$W_{\text{推进系统}} = 1.6 \cdot W_{\text{发动机}}$$



固定设备重量

- 包括：
 - 辅助动力装置 (APU)
 - 仪表、 导航、 电子设备
 - 液压、 冷气、 电气
 - 装饰和设备
 - 空调和防冰
 - 其它.....

$$W_{\text{固定设备}} = 0.11 \cdot W_{to}$$



飞机重心的几个概念

- 飞机重心的前、后限

- 中立重心位置

纵向静稳定度为零时的重心位置

- 后限位置

- * 最低纵向静稳定度由设计规范或适航性条例规定：
运输机：5-10%； 战斗机：5% 或为放宽静稳定
- * 应保证每增加单位过载杆力增量的最小值不应过小

- 重心前限位置

飞机操纵所允许的飞机重心最前的位置

- * 着陆时全动水平尾翼应有四分之一的备用偏度
- * 起飞滑跑时：抬前轮的速度不应超过0.85倍的离地速度
- * 要求每增加单位过载的杆力增量的最大值不应超过4kg



- 飞机重心位置

- 正常使用重心

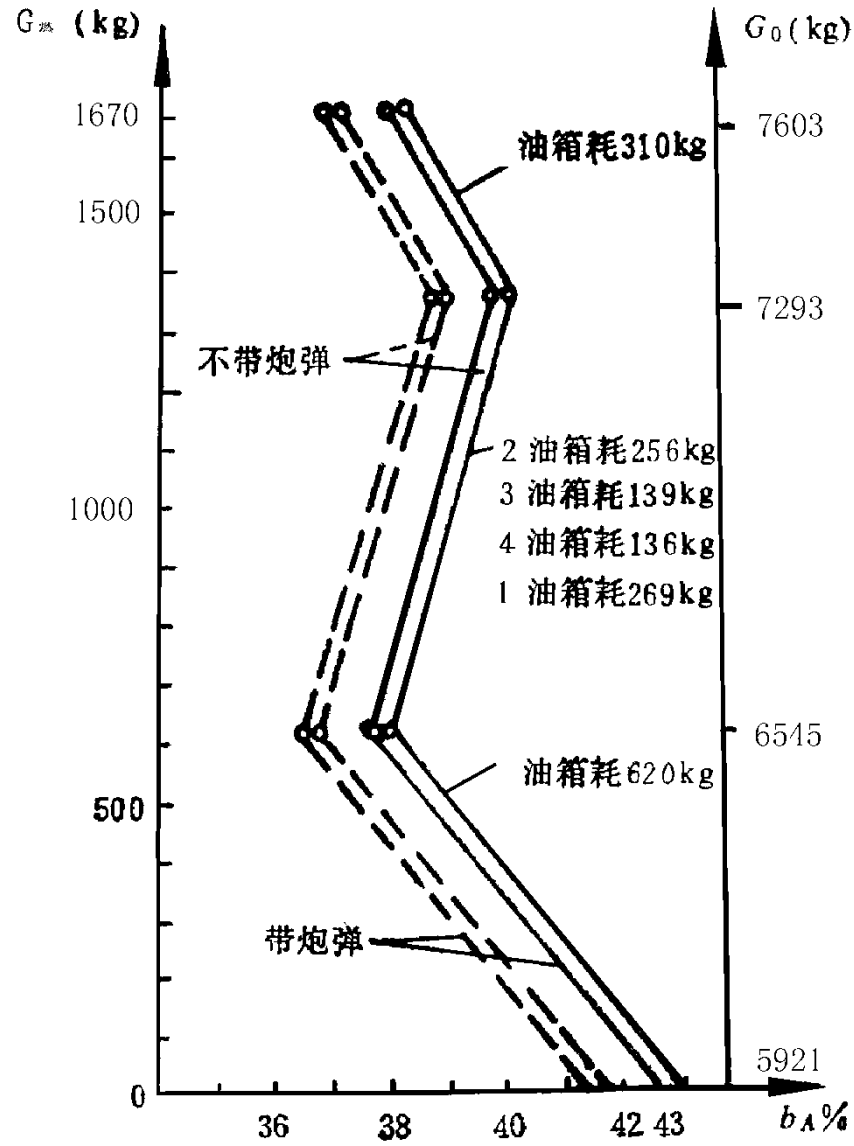
- 指飞机在正常飞行过程中，经常保持的重心位置。

- 使用重心前限

- 指飞机在飞行过程中，重心可能的最前位置。

- 使用重心后限

- 指飞机在飞行过程中，重心可能的最后位置



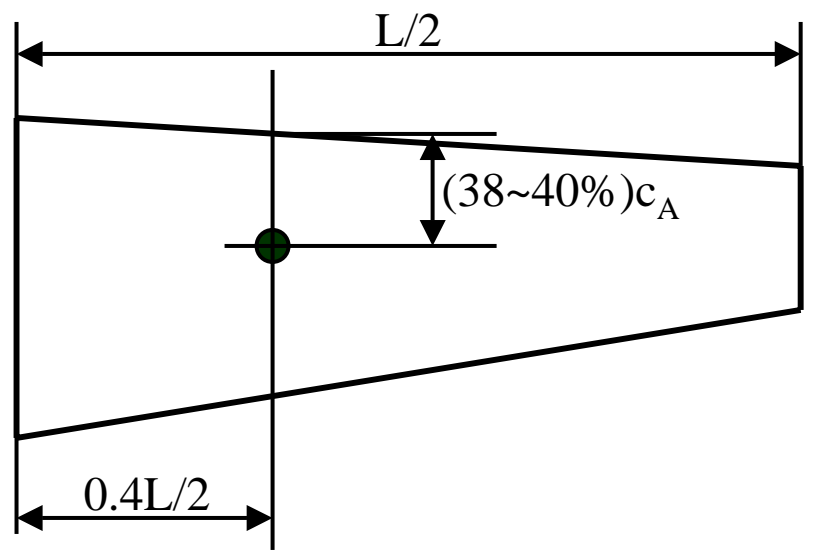
歼-6重心范围； ——起落架放下； — —起落架收起



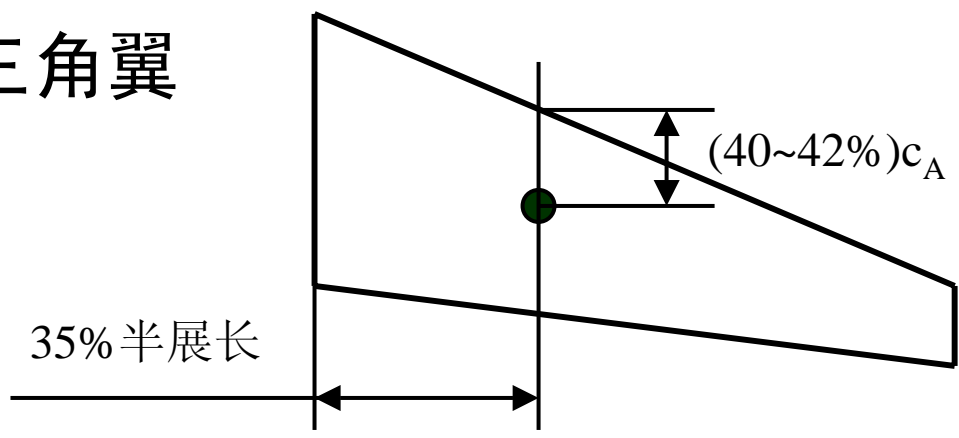
各部件的重心位置估算

- 机翼

- 直机翼

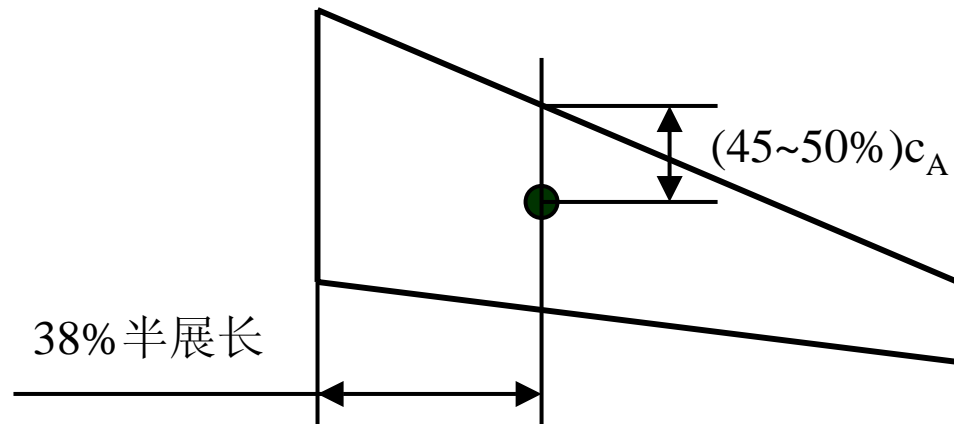


- 后掠角和三角翼



各部件的重心位置估算 (续)

- 平尾
- 垂尾





各部件的重心位置估算 (续)

• 机身

■ 螺旋桨单发

- ▶ 拉力式: $0.32 \sim 0.35 L_{\text{身}}$
- ▶ 推进式: $0.45 \sim 0.48 L_{\text{身}}$

■ 螺旋桨双发:

- ▶ 拉力式: $0.38 \sim 0.40 L_{\text{身}}$
- ▶ 推进式: $0.45 \sim 0.48 L_{\text{身}}$

■ 喷气运输机:

- ▶ 发动机安装在机翼上: $0.42 \sim 0.45 L_{\text{身}}$
- ▶ 发动机安装在机身后部: $0.47 \sim 0.50 L_{\text{身}}$

■ 战斗机:

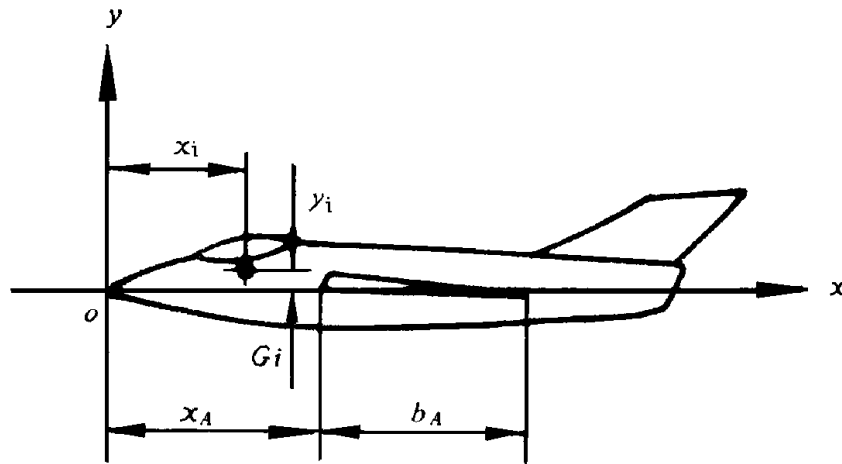
- ▶ 发动机安装在机身内: $0.45 L_{\text{身}}$



各部件的重心位置估算

- 起落装置
 - 与全机重心重合
- 动力装置
 - 由发动机重心位置来确定
- 固定设备
 - 与全机重心重合
- 燃油
 - 根据油箱布置的位置
 - 计算油箱的体积和重量，燃油密度 $\rho=0.8\text{g}/\text{cm}^3$
- 有效载荷（乘客和行李、货物或武器弹药）
 - 由载荷的布置来确定

全机重量计算和重心定位



$$x_G = \frac{\sum (mgx)_i}{\sum (mg)_i}$$

$$y_G = \frac{\sum (mgy)_i}{\sum (mg)_i}$$

重心在平均空气动力翼弦的位置:

$$\bar{x}_G = \frac{x_G - x_A}{c_A} \times 100\%$$

飞机质心定位细目表

航空宇航学院



部件、载重	$mgx(10N \cdot m)$	$x(m)$	$mg(10N)$	$y(m)$	$mgy(10N \cdot m)$
I 结构 机翼 机身 平尾 垂尾 前起落架（收上） 主起落架支柱 II 动力装置 中部的发动机 两侧的发动机 中部发动机短舱 两侧发动机短舱 燃油系统 III 设备和操纵系统 IV 装备 飞行员 随机工程师 服务员 专用设备 V 燃油 第一组 第二组 第三组 VI 载重 乘员 行李					
总 合	$\sum (mgx)_i$		$\sum (mg)_i$		$\sum (mgy)_i$

第



飞机重心位置的调整

- 调整装载:

$$\Delta \bar{x}_G = \frac{\Delta x_i}{c_A} \cdot \frac{W_i}{W_{to}}$$

- 移动机翼:

$$\Delta \bar{x}_G = \frac{1}{c_A} \left[\left(\frac{W_{\text{机翼}}}{W_{to}} - 1 \right) \right] \Delta x_{\text{机翼}}$$



飞机重量重心计算报告

- 计算各重量组的重量
- 计算全机重量
- 计算各部件重心
- 全机重量重心细目表