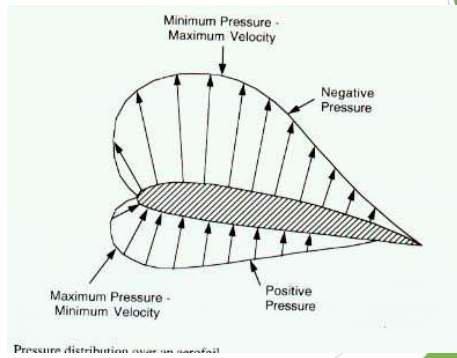




## 機翼上壓力的分佈



7

## 機翼上壓力的分佈

- ▶ 弓曲的翼面與空氣作用，產生上流場與下流場對機翼不同的作用力
- ▶ 翼面上產生一個負壓，提供大約2/3的升力，最大速度下獲得最大作用壓力
- ▶ 翼面下產生一個正壓提供1/3的升力
- ▶ 與氣流正交的翼前緣在低速度下會有最大的作用壓力

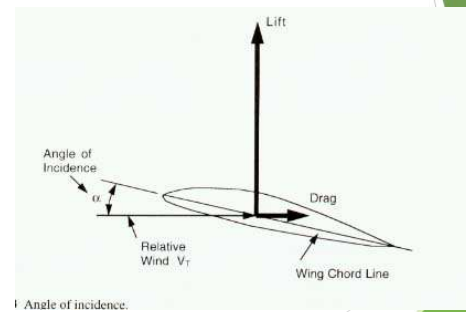
8

## 攻角的定義

- ▶ 空氣流場向量相對於機翼弦線(wing chord line)的夾角稱為攻角
- ▶ 美國方面稱為 angle of attack (AOA)
- ▶ 英國方面稱為 angle of incidence

9

## 攻角、升力、阻力的關係



10

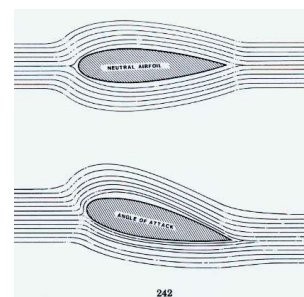
## 翼剖面與流場的角度關係

- ▶ 翼剖面與流場的相對角度，可以改變流場對於機翼的作用關係與作用力
- ▶ 當機翼的攻角增加時，會產生更大的升力
- ▶ 當機翼的翼形與剖面結構被改變時，流場被破壞了，升力也將急速衰減

11

## 翼剖面對流場的影響

- ▶ 0攻角
- ▶ 高攻角



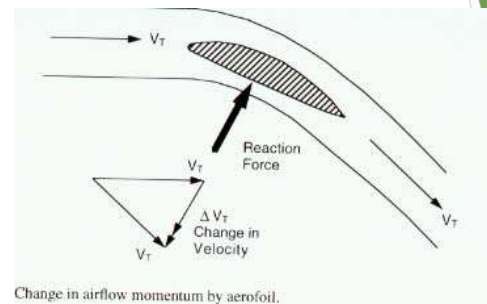
12

## 機翼與流場的相互作用

- ▶ 升力的產生也可用氣流動量的改變來解釋
- ▶ 氣流從翼前緣水平方向進來，經過仰角的翼面後，氣流被帶往後方及下方。
- ▶ 向下氣流稱為下洗流(down wash)，所產生的合力即是沿著速度變化量 $\Delta V_T$ 的方向
- ▶ 氣流作用在機翼上的合力分成兩個分量：(1) 沿著入射氣流的方向者稱為阻力；(2) 垂直於入射氣流的方向者稱為升力。

13

## 機翼與流場的相互作用



14

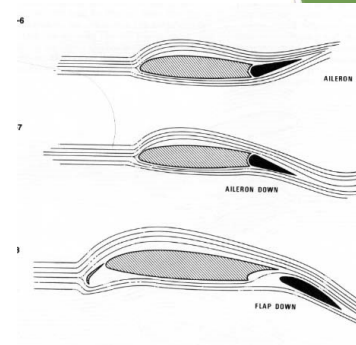
## 動壓與升力的計算

- ▶ 當空氣流 $V_T$ 速度衝擊翼面，並瞬間變為零，此速度變化所產生的衝擊壓力稱為動壓 $Q$  (dynamic pressure)，假設空氣為不可壓縮
  - ▶  $Q = 1/2\rho V_T^2$ ， $\rho$ 為空氣密度
  - ▶ 衝擊力 $= QS$ ， $S$ 為翼面面積
- ▶ 升力係數(lift coefficient) $C_L$ 及升力 $L_w$ 為
  - ▶  $C_L = \text{升力} / \text{衝擊力} = L_w / QS$
  - ▶  $L_w = (1/2\rho V_T^2 S) C_L$

15

## 機翼操作的流場變化

- ▶ 副翼上揚
- ▶ 副翼下俯
- ▶ 襟翼伸出  
翼面積增大



16

## 影響升力大小的因素

- ▶ (1) 升力係數 $C_L$ 
  - ▶  $C_L$ 決定於翼剖面的形狀，提高翼面的弧度有助於 $C_L$ 的增加
  - ▶ 起飛或降落時利用後緣襟翼(Flap)和前緣縫翼(Slat)增加翼面弧度，以增加飛機之升力。
  - ▶ 前後襟翼都伸出 $C_L$ 可增加100%
  - ▶ 升力 $L = C_L QS$ ，起飛或降落時速度低、動壓 $Q$ 小，只能透過 $C_L$ 的增加來增加 $L$
  - ▶ 當飛機起飛後速度提高，動壓 $Q$ 已足夠大，此時前後襟翼即可收回，避免在高速飛行下產生大的阻力
  - ▶ 前後襟翼都收回時升力係數最小、阻力也最小

17

## 影響升力大小的因素

- ▶ (2) 動壓 $Q$ ：
  - ▶ 升力和 $Q$ 成正比， $Q = 1/2\rho V_T^2$ ，大的動壓 $Q$ 與飛行速度、空氣密度成正比
  - ▶ 低空飛行阻力太大，耗油甚大
- ▶ (3) 機翼面積：
  - ▶ 機翼面積越大，升力也成線性比例增加。
  - ▶ 低速飛機，增加翼面積來獲得足夠的升力
  - ▶ 機翼的面積隨著飛機的攻角成正比而變化呈現線性關係。

18

## 升力與阻力的關係

- ▶ 動壓作用在機翼上的力，可分為兩個分量，垂直於相對風向的為升力，以及沿著相對風向的則為阻力。
- ▶ 動壓越大或翼面積越大，不僅升力變大，也伴隨著阻力變大。
- ▶ 阻力可表成： $D_w = QSC_D$
- ▶ 升力係數與阻力係數間有下列近似關係：
  - ▶  $C_D = C_{D0} + K C_L^2$
  - ▶  $C_{D0}$ 、 $K$ 為常數是用於各已知翼剖面值

19

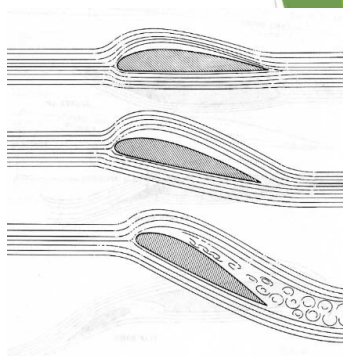
## 升力與阻力的關係

- ▶ 可知  $C_D$  和  $C_L^2$  成正比，當  $C_L$  小時平方會更小；但  $C_L$  大於1時，其平方會快速增加
- ▶ 對大多數攻角而言，阻力係數都很小，只有在接近失速角時，阻力係數才會迅速增加
- ▶ 因此攻角的增加大部分是升力增加的正面效益，阻力增加的負面效益較小

20

## 主翼攻角操作與流場變化

- ▶ 低攻角
- ▶ 較高的攻角
- ▶ 太高的攻角已經破壞流場的升力貢獻



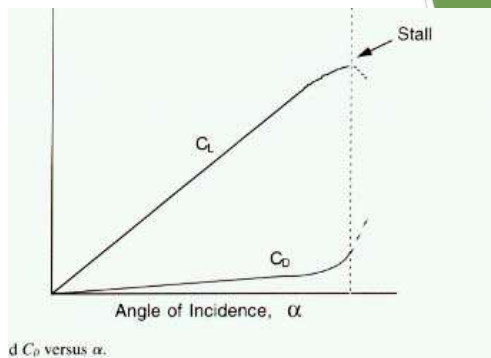
21

## 攻角與失速(Stall)

- ▶ 民航機設計的攻角大約在15~25度以內
- ▶ 軍機的攻角達25度以上可能大到35度
- ▶ 當攻角大到某一極值時反而阻力急速變大而且升力急速下降，產生所謂失速(Stall)的現象而最後升力喪失
- ▶ 攻角大小也會影響引擎的進氣，影響引擎燃燒，導致推力降低

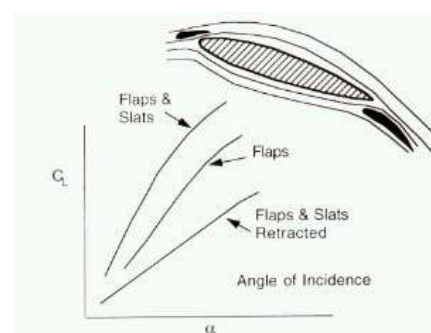
22

## 攻角與升力、阻力係數的關係



23

## 前後襟翼的升力效果



24

### 動壓與升力、阻力的關係

- ▶ 動壓也會產生俯仰力矩使得機頭上仰或下俯
- ▶ 俯仰力矩一部份由升力造成，另一部份則和升力無關
- ▶ 與升力無關的俯仰力矩稱為零升力俯仰力矩
  - ▶  $M_0 = 1/2\rho V_T^2 C_{M0} S C_R$
  - ▶  $C_R$  表平均弦長，因機翼設計而異
  - ▶  $C_{M0}$  為俯仰力矩參數
- ▶ 因此阻力係數將會隨著升力係數的增加而有急劇的變化，升力係數與阻力係數對攻角呈線性變化關係

25

### 動壓與升力、阻力的關係

- ▶ 升力、阻力、等各種的力量會對機體作用成一個力矩，而在機體上力矩為零的那一個點我們稱為壓力中心 (center of pressure)，但在其它位置的點，其力矩將不會是零，此力矩為俯仰力矩
- ▶ 俯仰力矩參數定義：
  - ▶  $C_{M0} = M_0 / (1/2\rho V_T^2 S C_R)$

26

### 攻角修正角與俯仰力矩係數

- ▶ 假若飛機想要保持固定高度平衡的飛行，外力對重心的總力矩必須為零，且升力必須剛好等於飛機的重量
- ▶ 飛機會隨著攻角的變化，使得力矩也產生變化，這時對於飛機穩定性能影響極大。
- ▶ 對飛機穩定性有關的攻角修正角  $\alpha_T$  (trim angle of incidence) 定義為  $C_M$  為零時的攻角
- ▶ 飛機的操作攻角大於或小於  $\alpha_T$  時，將會導致  $C_M$  反向應變，使得飛機可以維持在穩定的狀態下飛行

27

### $C_M$ 、 $\alpha_T$ 與穩定的關係

28

### $C_M$ 、 $\alpha_T$ 與穩定的關係

29

### 飛行時攻角變化的效果

30

### 飛行時攻角變化的性能

- ▶ 飛行時攻角改變，以增加或減少升力
- ▶ 速度低時升力較差，必須採用較高的攻角，例如在近場減速的階段
- ▶ 飛機荷重時，需要較大的升力採用較高的攻角飛行
- ▶ 民航機旅客較少時，都將可入分散於各位置，以利操控

31

### 飛行時攻角變化的性能

32

### 飛行時攻角變化的性能

33

### 飛行控制與穩定

- ▶ 飛機系統以機翼前緣後1/3為機翼的升力中心
- ▶ 配合機翼前端可能的重心以及尾翼的升力作用
- ▶ 形成一個穩定了力平衡關係

34

### 穩定的飛機力的關係

35

### 飛機的力平衡

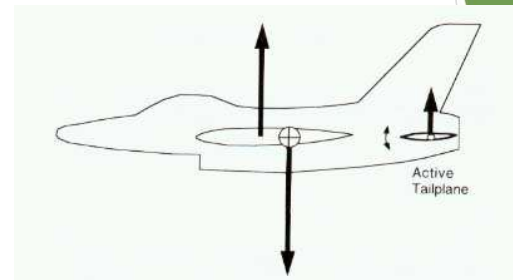
36

### 氣動力不穩定的狀況

- ▶ 當空氣作用在飛機機翼上的力量無法維持自然穩定平衡，稱為氣動力不穩定性
- ▶ 氣動力不穩定可能可以獲得達到極限操作的性能
- ▶ 簡單的狀況，必須依賴精密的操控，提供維持穩定的條件，飛機才能保持安全飛行

37

### 氣動力不穩定的飛機



3.12 Aerodynamically unstable aircraft.

38

### 控制的穩定效果

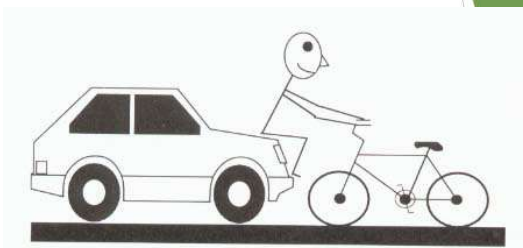
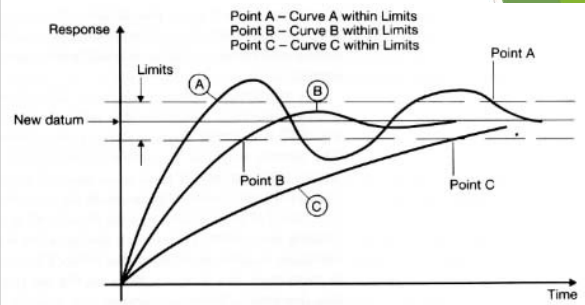


Fig. 3.13 A balance of opposites is essential to control a system.

39

### 控制系統特性



91

40

### 控制系統特性

- ▶ 根據系統性能需求設計控制器的特性，以使控制效應趨於穩態
- ▶ A 曲線發生較多的反覆振盪漸趨穩態
- ▶ C 曲線則緩慢趨向穩態
- ▶ B 曲線則在極小的振盪下快速達到穩態
- ▶ 三種控制策略效果各有其應用價值

41

### 系統穩定與不穩定

- ▶ 穩定的定義從日常生活的觀測可以思考

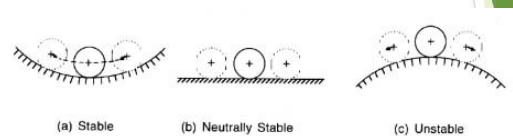


Fig. 3.8 Simple example of stability conditions.

42

### 系統穩定與不穩定

- ▶ 趨於最終目標值以內的傾向稱為穩定

3.9(a) Static stability

43

### 系統穩定與不穩定

- ▶ 趨於最終振幅以內的傾向稱為穩定
- ▶ 不穩定則必然發散到無窮大

3.9(b) Dynamic stability

44

### 系統穩定與不穩定的判斷

- ▶ 任何系統在依段時間內的輸出狀態，可觀測的部分逐漸傾向於更大，表示系統有放大效果，或對外來的能量會繼續的一再吸收，最後變得無法掌握、無法控制，稱為不可控系統或不穩定系統
- ▶ 任何系統在長時間下輸出狀態可以抑制的、或維持現狀的，此種系統稱為可控系統或穩定系統

45

### 系統穩定與不穩定

— Stable (Curve 1)  
 - - - Neutrally stable (Curve 2)  
 - - - Unstable (Curve 3)

46

### 飛行控制的原理

- ▶ 飛機在飛行中可以藉由固定的需求操作飛機，利用開路系統，給予飛機一個操控指令、及飛行參數
- ▶ 當飛機受到外來擾動時，開路系統的指令可能與事實環境不符，而發生不穩定
- ▶ 閉回路系統控制則需擷取環境中的即時數據，進行分析後決定操控參數的大小

47

### 閉迴路飛行控制系統

48



### 飛行員的角色

- ▶ 飛行員事實上是扮演一個環境狀態迴授的即時系統
- ▶ 包括精密的感測器—觸覺、視覺、聽覺、方向感，以及精密的電腦—經驗與思考，敏捷的致動器—手、腳的操作
- ▶ 飛行員可能無法適應極高速度、極快的變化，此時需要飛行控制器的輔助

49

### 閉迴路飛行控制系統

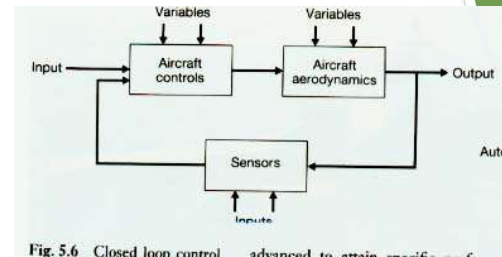


Fig. 5.6 Closed loop control advanced to attain specific

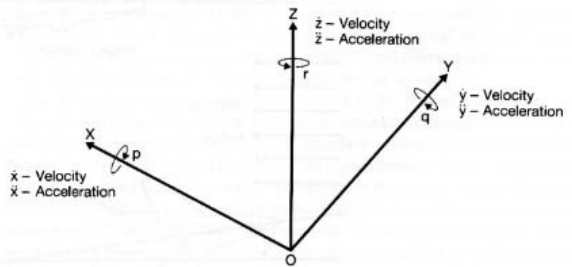
50

### 飛行運動的六個自由度

- ▶ 飛機有六個運動自由度，包括：
  - ▶ 沿著x, y, z三個軸的平移運動，
  - ▶ 繞著x, y, z三個軸的旋轉運動。
- ▶ 六個自由度的運動分別對應到六個常微分方程式，這六個常微分方程式的輸入、輸出時間函數分別為：
  - ▶ 輸入函數：陣風或控制翼面的偏轉角度，
  - ▶ 輸出函數：三個移動及三個轉動對時間的響應函數。

51

### 飛行座標的六個自由度



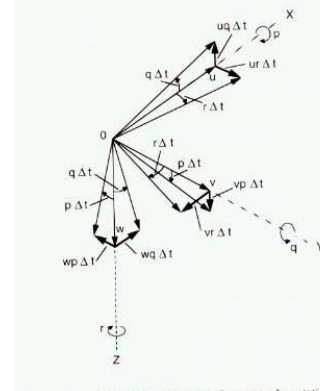
52

### 飛行運動的軸體座標

- ▶ 飛機的六個自由度運動三個互相垂直的軸X、y、Z的定義如下：
  - ▶ X軸：沿著機身的方向，即縱向(longitudinal)，機首或向前方向為正
  - ▶ y軸：沿著主翼方向，即側向(lateral)，以駕駛員的右手邊為正
  - ▶ Z軸：和X軸與y軸平面垂直之方向，即垂直向(vertical)，向下為正

53

### 飛行操作的六個自由度



54

## 飛行運動的軸體座標

- ▶ 三軸座標系統的體軸座標(body axis)及其運動之定義：
  - ▶ 沿x軸的速度分量稱為前進速度： $U$
  - ▶ 繞x軸的旋轉分量稱為側滾率： $p$
  - ▶ 沿y軸的速度分量稱為側滑速度： $V$
  - ▶ 繞y軸的旋轉分量稱為俯仰率： $q$
  - ▶ 沿z軸的速度分量稱為垂直速度： $W$
  - ▶ 繞z軸的旋轉分量稱為偏航率： $r$

55

## 六個自由度的向量

軸向 (axis)	線性速度 (linear velocity)	角速度 (angular velocity)
滾軸 OX	前向速度 $U$	滾率 $p$
俯仰軸 OY	側向速度 $V$	俯仰率 $q$
偏航軸 OZ	垂直速度 $W$	偏航率 $r$

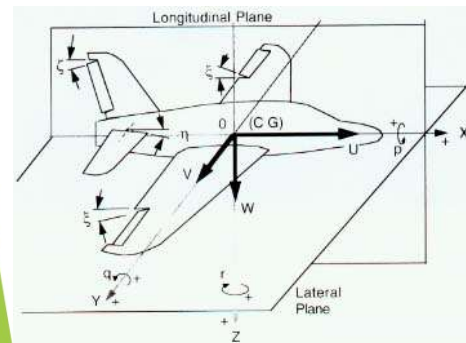
56

## 飛行運動的控制翼面

- ▶ 為達到飛行控制的效果，飛機設計了許多各自獨立的控制翼面，包括
  - ▶ 副翼的轉動角： $\xi$ ，做橫向運動的控制
  - ▶ 升降舵的轉動角： $\eta$ ，做縱向運動的控制
  - ▶ 方向舵的轉動角： $\zeta$ ，做橫向運動的控制

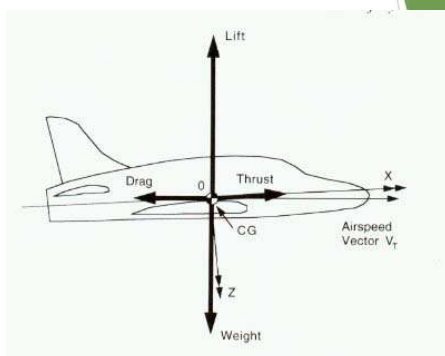
57

## 飛行操作的控制面



58

## 飛機的力平衡



59

## 飛行中力平衡的條件

- ▶ 巡航飛行中，保持一定的高度，升力與重力必須保持平衡
- ▶ 推力必須稍大於阻力，以獲得必要的速度變化的力
- ▶ 升力攸關速度、高度、溫度、氣流等因素，因此推力必須隨時修訂
- ▶ 每一個翼面操作都將導致力平衡的變化

60

### 飛行時的重心

- ▶ 飛機離地前，所有的重量都支撐於輪子上，因此除了副翼、前後襟翼推出使翼面積增大所獲得的效應外，其餘各翼面的控制均不明顯
- ▶ 飛機在空中飛行，則以其重心為操作控制的參考點

61

### 飛機平衡的槓桿原理

- ▶ 依據牛頓力學支點在中間的平衡原理，一邊受到向下的作用力，另一邊必定向上揚起
- ▶ 當尾翼受到作用力時，機頭必然上揚，產生較大的攻角
- ▶ 依此類推其他自由度的控制

62

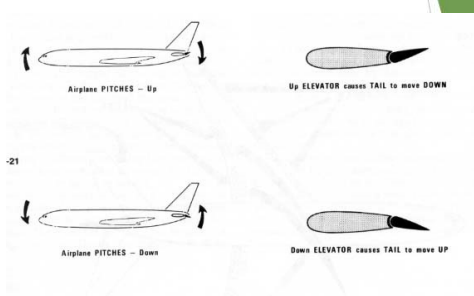
### 操控飛行的各部機翼



Ailerons (roll)  
Elevator (pitch)  
Rudder (yaw)

63

### 水平尾翼的操作

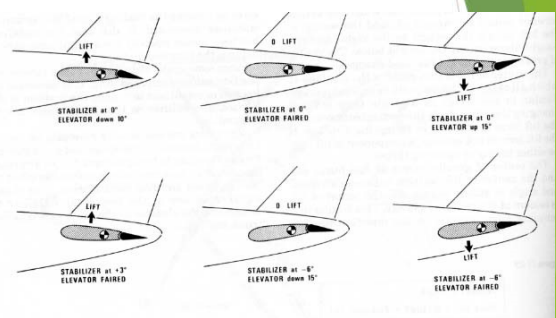


Airplane PITCHES - Up  
Up ELEVATOR causes TAIL to move DOWN

Airplane PITCHES - Down  
Down ELEVATOR causes TAIL to move UP

64

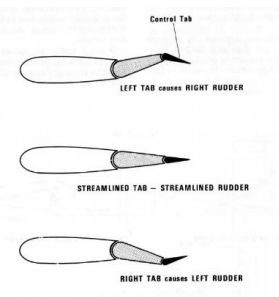
### 水平尾翼的操作



STABILIZER at 0° ELEVATOR down 10°  
STABILIZER at 0° ELEVATOR FAIRED  
STABILIZER at 0° ELEVATOR up 15°  
STABILIZER at -2° ELEVATOR FAIRED  
STABILIZER at -6° ELEVATOR down 15°  
STABILIZER at -6° ELEVATOR FAIRED

65

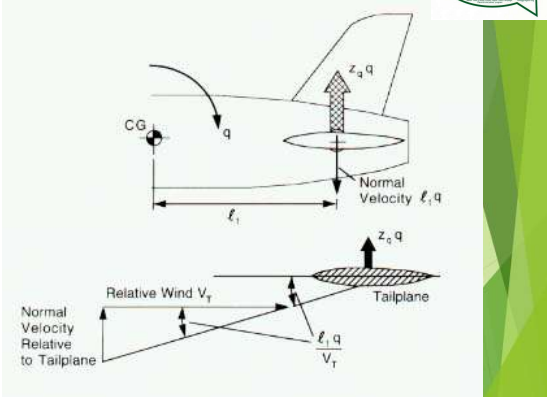
### 水平尾翼的操作



Control Tab  
LEFT TAB causes RIGHT RUDDER  
STREAMLINED TAB - STREAMLINED RUDDER  
RIGHT TAB causes LEFT RUDDER

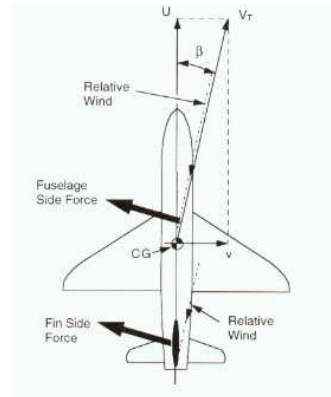
66

### 水平尾翼的控制操作



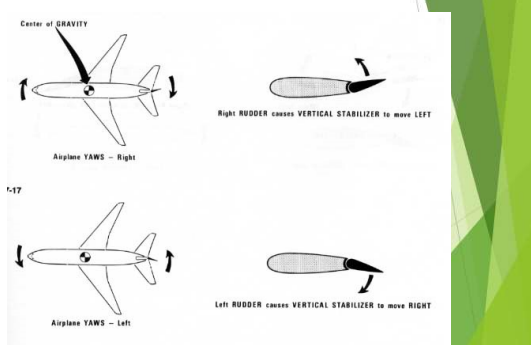
67

### 側向飛行控制操作



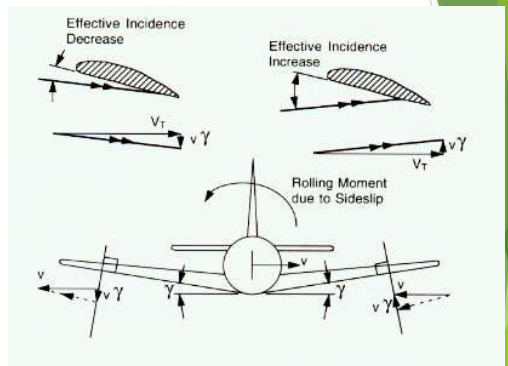
68

### 垂直尾翼的操作



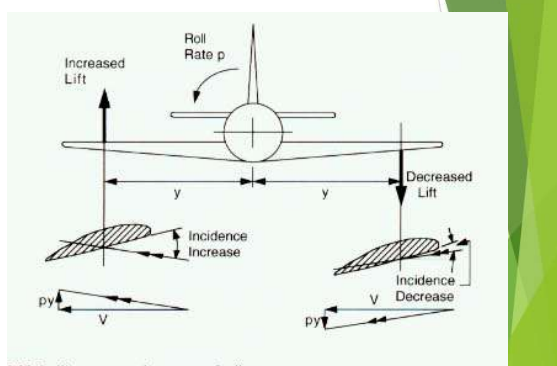
69

### 滾向飛行控制操作



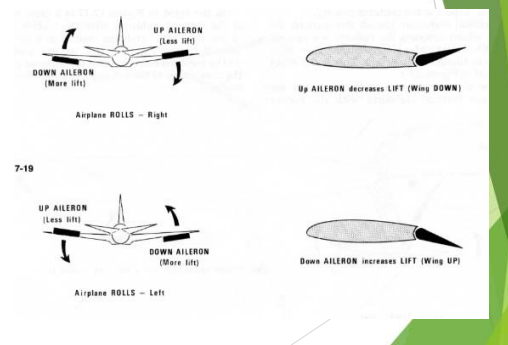
70

### 滾向飛行控制操作



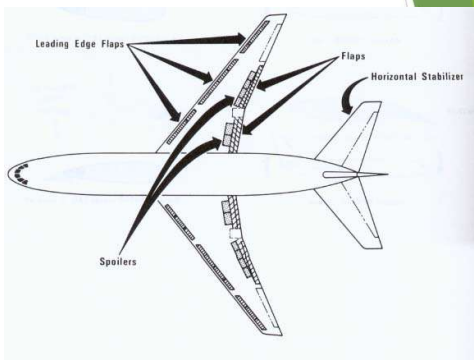
71

### 副翼的操作



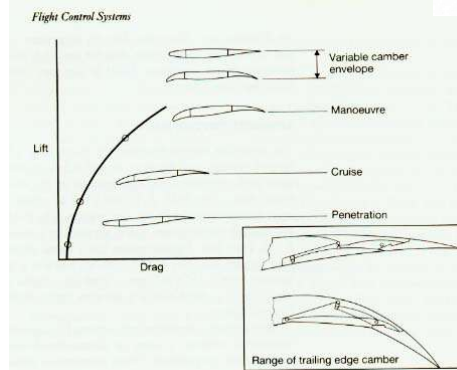
72

### 機翼的操作與控制



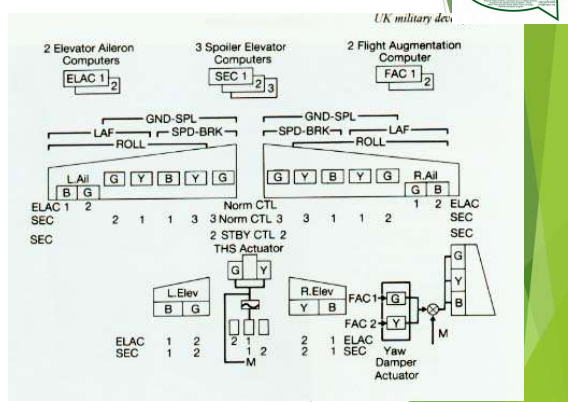
73

### 機翼控制面的操作



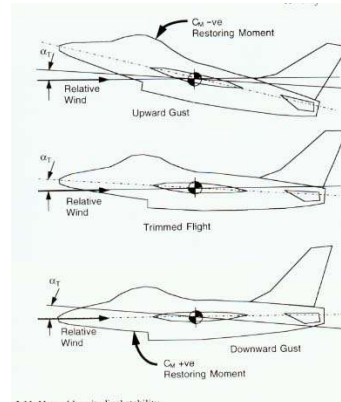
74

### 飛行控制面的規劃安排



75

### 自然的縱向穩定



76

### 航電硬體

▶ 數位航電系統的電路板及區域電路箱



77

### 聯絡

- 電話: 6778 2670 / 6976 2635 (行動單位); 2876 2855 (辦公室)
- 無線電: 409.8375 (8號頻道) - 參加者亦可使用 / 462.6875 (CTCSS-110.9MHz)
- (國際呼號 CALLSIGNS: VR2YMF / VR2XGN)
- 電郵: info@hkgnu.org / pr@hkgnu.org 傳真: 3971 1469
- 活動網址: <http://www.hkgnu.org>
- 香港區委員會聯絡處: 尖沙咀新港中心2座907室
- 香港區委員會郵政信箱: 郵政信箱68046號

CIMTPNHK/HKGNU/HIMA/FPPLPHK-PFTPFHK/PNU-UNEP

78




**\*聯合國環境署 - 國際百萬森林計劃香港區委員會 (包括十億樹木行動及地球植林計劃), 香港綠色自然聯盟(HKGNU)等**

**\*\*Le comité du projet et du réseau mondial de million d'arbres - la division hongkongaise (avec la campagne pour un milliard d'arbres, et le programme de 'plantons pour la planète'), sous le cadre du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) ; et L'association d'écologie de Hong Kong (HKGNU), et caetera.**

**\*\*\*[ The committee of international million trees / forest project and network - Hong Kong Region (with the Billion Trees Campaign, and the the 'Plant for the Planet' Program), under the framework of United Nations Environment Programme (UNEP); Hong Kong Green Nature Union [HKGNU], etc. ]**

二零一三年六月 06/2013  
<http://www.hkgnu.org> info@hkgnu.org  
 TEL: 2876 2855 / 6778 2670 / 6976 2635

79








80






完 - 謝謝  
 La fin, merci  
 The end, thank you

二零一三年六月修訂  
 二零二三年十一月重審於法國巴黎

81