


# 空氣力學

A blurred black and white photograph of a white glider flying over a field of trees. The glider is in the center of the frame, moving from left to right. The background is a dense forest of trees, all blurred to create a sense of motion and depth. The overall tone is artistic and scientific.

在這之前，  
它只不過是一張平凡的白紙。  
而現在，  
它卻轉化成一隻美麗的白鳥。  
輕盈地飛向藍天。

赫克洛斯 (H.G.G.Herkliots)

# 的世界

## 包舜華

無心折好的紙飛機正以優雅的姿態飛入童心未泯午后，不禁讓我們聯想起，到底空氣是真的不可捉摸？還是我們不能理解。數百年來，許多科學家都曾經這般想著！

空氣力學的發展很早，但是實際運用到的工藝設計卻是很晚的事。最早萌生空氣力學的是義大利科學家達文西，他仔細觀察捕捉到的漂鳥，發現翅膀的面積與其重量的比例才是飛行的關鍵。之後又經過伯努力等人的貢獻，慢慢地我們瞭解並學會使用空氣來產生浮力。目前空氣力學大都用於飛行相關的領域，因此無法像其它的基礎科學廣為人知。

科學實驗室的成立最主要的目的是想提供給一群喜愛科學的大小朋友。雖然我們知道理論科學的教學內容總是刻板且無趣的，但是我們若以設計玩具的心情來看待這些科學理論時，一定會發現遊戲與科學還真的是密不可分呢！

這一期我們將以簡單的手擲機製作為主題，介紹相關的力學背景以及我們的研發成果，希望您會覺得有趣。此外這些細部的內容亦可於本館網站上獲得。同時我們也開辦實驗課程的教學。若想知道更多訊息，請您隨時參觀我們的網站，我們的網址是：[www.tam.gov.tw](http://www.tam.gov.tw)。



## 空氣動力學簡介

作用在飛機的力主要分成**升力 (Lift)**、**阻力 (Drag)**、**推力 (Thrust)** 與 **重力 (Gravity)** (如圖一)。由於這四個力的合作無間，才能讓飛機在陣風或側風下維持穩定飛行。空氣動力學主要的研究課題比較著重於飛機的升阻力分析。如何製造較高升阻比值的飛機外型是空氣動力學家的工作。

空氣流過非對稱的外形時，就會產生不同方向的作用力。物體不可能只產生升力而沒有阻力的情形發生，若是物體能導致較少阻力的產生則稱為『**流線形**』。阻力的來源有兩種，來自於物體體積造成的**形狀阻力**，或稱為**壓力阻力**。另外一種則來自於物體表面因粗糙程度而衍生的**表面阻力**。

### 機翼如何產生升力

當空氣流過**機翼前緣 (Leading Edge)**時，

會分成上下兩道氣流，並於**機翼尾端 (Trailing Edge)**會合，稱為 Kutta 條件 (如圖二與圖三)。若是流場滿足 Kutta 條件，以下的解說將會協助我們瞭解升力是如何形成。

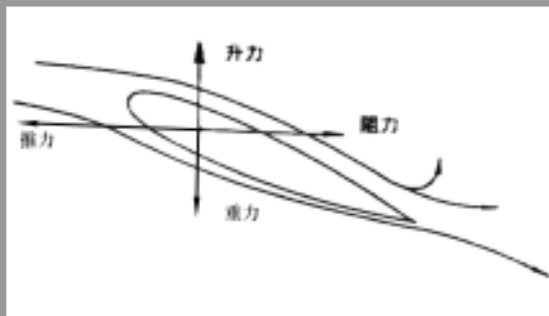
在無黏性或黏性極低的空氣流動時，為了滿足 Kutta 條件，空氣流過機翼上表面的速度必須比下表面的快，才能在機翼尾端相會合。根據**伯努力 (Bernoulli Law) 定律**，

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{(v_1)^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{(v_2)^2}{2} + g \cdot h_2$$

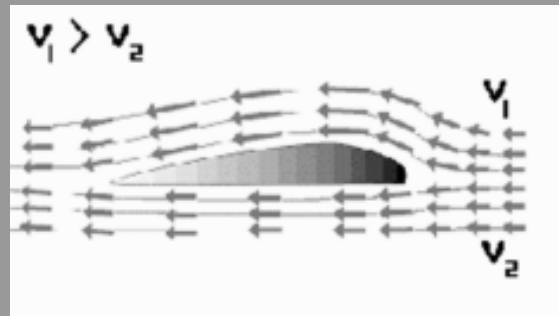
可以知道上下翼面的不同流速會造成壓力差，而導致升力的產生 (如圖四)。

### 翼型的選擇

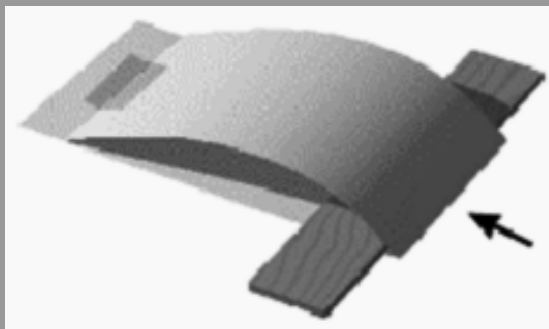
理論證明**橢圓形**的機翼升力的效果最好，此外**機翼的寬度與長度的比例 (展弦比)** 也很重要。我們可以從二次大戰的著



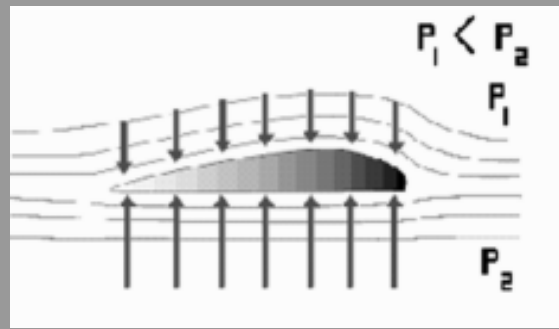
圖一



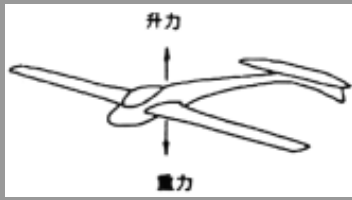
圖三



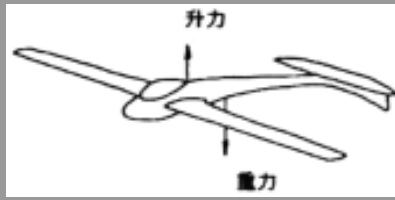
圖二



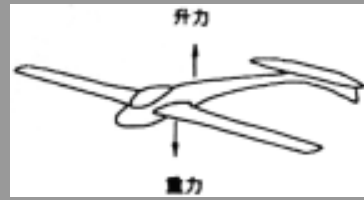
圖四



圖五



圖六



圖七



圖八



圖九

名戰鬥機發現它們大都具有橢圓翼形的特徵，以及近代的高級滑翔機誇張的翼展瞭解到飛行理論的實際運用情形。

## 什麼是空氣動力中心(Aerodynamic center)

上下翼面的壓力對於此點的合力矩不隨飛行的攻角而改變，就稱此點為『**空氣動力中心點**』(aerodynamic center)。一般而言，位於低速飛機翼面的前緣 1/4 弦長處。『空氣動力中心點』是非常重要的設計參數，在此無法詳細說明。

## 飛行力學簡介

飛機會發生失速或者一頭著地的情形，就是飛機在飛行時沒有達到預期的穩定平衡。其實飛機仿如蹺蹺板一樣，受到它本身的重力與其產生的升力彼此制衡。若是這兩個作用力沒有搭配好的話，那就無法順利飛行了。通常飛機起飛後除了燃油耗減導致重力的大小與位置改變之外，重力一直都是保持固定的，因此飛行員的主要工作就是控制飛機的升力來匹配重力。**穩定平衡**是飛行的重要關鍵，所以我們要特別說明『**縱向平**

**衡**』的條件。

### 中立的設計：

飛機的重心恰與**中立點 (Neutral Point)**重合。當飛機在飛行途中遇到陣風，很難從搖擺的狀態回到穩定飛行（如圖五）。

### 不穩定的設計：

飛機的重心落後中立點(Neutral Point)。當飛機在飛行途中遇到陣風，除非有特殊的控制系統，否則馬上進入**失速 (Stall)**狀態（如圖六），

### 穩定的設計：

飛機的重心超前中立點(Neutral Point)。當飛機在飛行途中遇到陣風時，很快地從搖擺的狀態回到穩定飛行。一般民航機均採取此種設計（如圖七）。

### 側向穩定：

如果飛行中遇到側風，會造成飛機翻滾；不進行修正回復的話，會導致嚴重的螺旋失速。一般我們對於『**側向平衡**』採取的方式有降低飛機重心（如圖八）與具有上反角的機翼（如圖九）等兩種。



## 手擲機設計方法

飛機設計使用的符號非常多，為了閱讀方便，特別將最重要的部分列出，希望對你有所幫助。手擲滑翔機的設計包含基礎的空氣動力學與飛行力學技巧，在一般大學用的教科書中均有詳細的推衍，所以此處僅以它的應用性來介紹手擲滑翔機的設計流程。由於我們嘗試以理論的方式來探索手擲滑翔機的時間並不長，加上許多設計方法多為個人經驗，錯誤之處難免。目前部分航空工程的計算仍使用英制單位。為了計算的一致性，以下的設計均以公制作業。例如空氣的密度（kg / 立方公尺）、面積（m<sup>2</sup>）、角度（°）、時間（sec）與速度（m/s）。

滑翔機的初步設計是需要許多經驗的。對於以肯特紙製作的紙飛機，基於材料本身的強度與重量，依目前的經驗大致如下（如圖十）：

**紙飛機重量：** 8 ~ 9gram

**紙飛機長度：** 20 ~ 25cm

**主翼面積：** 約 80 ~ 110 平方公分（依全機重量 65 % 計算）

**水平尾翼面積：** 15 ~ 35 平方公分

**滑空速度(Velocity of Trim)：** 5 ~ 12 m/s

**肯特紙主翼展弦比（雙層紙）：** 5 ~ 7

**水平尾翼展弦比（單層紙）：** 3 ~ 5

**靜力餘裕 (Static Margin)：** 1 ~ 2 cm

**中立點 (Neutral Point)：** 位於主翼後 0.5 ~ 1.2 弦長位置

## 符號說明

空氣密度  $\rho$

飛機重量  $W$

飛機長度  $L$

滑空速度  $V$

飛機主翼面積  $S$

主翼展弦比  $AR_w$

主翼裝置角  $\Delta_w$

水平尾翼面積  $S_t$

水平尾翼展弦比  $AR_t$

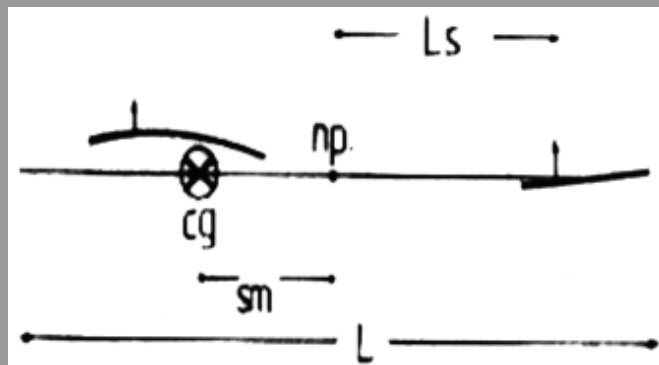
水平尾翼裝置角  $\Delta_t$

垂直尾翼面積  $S_v$

靜力餘裕 (static margin)  $sm$

中立點 (neutral point)  $hn$

重心  $C_g$



圖十



圖十一

### 第一步驟：

有了這些估算之後，就可以進行飛機的縱向穩定分析。安排主翼與水平尾翼的相對位置搭配，以及它們的裝置角。

### 第二步驟：

調整初始條件並重複計算流程直到適合滑翔機製作的條件，以及最佳的滑空性能。通常這需要大量的計算工作與篩選資料的經驗。目前是藉由數學軟體 **MATHCAD 8.0 Pro** 協助計算。

### 第三步驟：

造型草稿繪製。最困難之處是滑翔機重量的控制。由於滑翔機必須經過配重以達到預設的縱向穩定性，但是配重之後是否會影響之前的重量設計值？通常作法都是將配重控制在1.5公克以內，並估量機身的強度後盡可能削減其重量。由於依據以上的經驗初始設計值，應該與實際情形相去不多。最後進行**沈降速率 (Sinking Velocity)** 分析。

## 縱向穩定性算式說明

(A)利用預估的滑翔機重量與、滑空速度，計算主翼必須提供的升力係數。

$$\text{升力係數 } C_L = \frac{2 \cdot W \cdot 9.81}{\rho \cdot V^2 \cdot S}$$

(B)升力係數是升力斜率與有效攻角的乘積。對於無限長的機翼，其升力斜率為 0.11(1/deg)，但是對於有限長機翼的升力係數則必須以它的展弦比加以修正。透過較為正確的升力係數，計算飛行的有效攻角。展弦比 AR 值 (=  $b \times b/S$ )，其中的 b 為機翼的長度。

$$\text{主翼升力斜率 } A_w = \frac{0.11 \cdot AR_w}{2 + AR_w}$$

(C)由於有限機翼產生升力後，會在**尾流 (Wake)** 區產生**下洗氣流(Downwash)**(如圖十一)，造成有效攻角與實際攻角的差異量。其中的  $-2h/C$  表示在沒有升力時，主翼的攻角。

$$\text{主翼裝置角 } \Delta_w = AOA - \frac{2h}{C} + \varepsilon$$

**說明：**下洗氣流是由於有限機翼的翼尖壓力損失造成，最後造成機翼整體升力的減少。為了反應此現象，我們在飛機的主翼有效裝置角作了修正。修正的公式如下：

$$= 18.25 \times C_L \div AR_w。$$

另外，h 代表主翼的厚度、C 代表主翼的弦長（寬度）。越厚的機翼，產生升力的效果越好。

(D)計算尾翼位置與重心的距離。Ls 較大可換取較小的水平尾翼面積以減少尾翼造成的阻力。但是 Ls 越大，則會將飛機的重心往前移，造成全機配重上的困難。

$$\text{尾翼與重心距離 } L_s := \frac{(h_n - 0.25) \cdot C \cdot S \cdot A_t}{(1 - \sigma_0) \cdot S_t \cdot A_w}$$



(E)經由二元一次的聯立方程組求解，可同時獲得水平尾翼Downwash的與其裝置角。

解聯立方程組，求得水平尾翼的 downwash  $\alpha_t$  與裝置角  $\Delta t$

$$\alpha_t = \frac{35 \cdot \Delta t}{35 \cdot \Delta t + AR_t} \cdot \Delta t = \frac{35 \cdot \Delta t \cdot \alpha_t}{35 \cdot \Delta t + AR_t}$$

$$-1 \cdot \alpha_t + \Delta t = \frac{W \cdot 9.81 \cdot (-d)}{At \cdot (L_s + d)}$$

(G)全機阻力的估算較為麻煩，此處只針對主翼與水平尾翼的形狀阻力（Form Drag）與誘發阻力（Induced Drag）計算。

主翼的壓力阻力與誘發阻力

$$D_w := 9.81 \cdot W \cdot \left( AOA - \frac{2 \cdot h}{C} \right) + \frac{CL^2 \cdot S}{\pi \cdot AR_w} \cdot \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

尾翼的壓力阻力與誘發阻力

$$D_t := \left( \frac{\rho \cdot V^2}{2} \cdot St \cdot At \right) \cdot (\alpha - \Delta t) \cdot \frac{\alpha - \Delta t}{57.3} + \frac{(At \cdot (\alpha - \Delta t))^2}{\pi \cdot AR_t} \cdot \left( \frac{\rho \cdot V^2 \cdot St}{2} \right)$$

其中  $\alpha = AOA - \frac{2 \cdot h}{C}$

(H)最後的沈降速度評估大致可採取阻力估算與能量損耗的方法，分別計算出沈降速度與滯空時間（手擲 20m 高）。

沈降速度 
$$V_s = \sqrt{\frac{W \cdot 9.81}{0.5 \cdot \rho \cdot S} \cdot \frac{2 \cdot (D_t + D_w)}{(CL)^{1.5} \cdot (\rho \cdot V^2 \cdot S)}}$$

滯空時間 
$$Time = \frac{W \cdot (20 \text{ m}) \cdot 9.81}{(D_w + D_t) \cdot V}$$

## 電腦輔助設計

飛機設計前必須取得許多重要的參數，例如機翼的升力係數、升阻比值以及力矩平衡等。當然，最正確的資料獲得方式就是風洞測試。可惜風洞的製作不易，而且量測的工具十分昂貴，對於只是設計手擲滑翔機的我們稍嫌困難。反而倒是利用數值風洞的技術可行多了。

目前的數值風洞大都採取數學方程式的求解。對於三維的物體流場分析的數學模擬方式有

許多種類，例如精確但十分費時的 **Navier-Stokes** 全解，它主要用於具有黏性、紊流的流場分析。去除黏性效應後的 Navier-Stokes 方程組稱為**尤拉方程式 (Euler Equation)**，它在航空工程的領域十分實用，因為空氣的黏性力本來就不大。此外還有**無旋勢流場 (Potential Flow)** 的理論，它的主要代表作就是小板法 (Panel Method)。小板法對於物體表面壓力的分析十分有效率，很可惜它卻無法像尤拉方程式可以處理流場的問題，目前我們的科學教室就是使用三維的小板法以及二維的Navier-Stokes 全解來作為分析的工具。

## 我們的作品

機身：巴爾沙木、西卡紙 (250 磅)  
機翼：西卡紙 (250 磅)  
總重(W)：8.2公克  
機身長(L)：22公分  
主翼面積(Sw)：80平方公分  
主翼展弦比(ARw)：5.3  
主翼位置：5.6 公分 (由頭部算起)  
主翼裝置角：0度  
尾翼面積(St)：24平方公分  
尾翼展弦比(ARt)：4.1  
尾翼位置：19.2 公分 (由頭部算起)  
尾翼裝置角：-2.4度  
垂直尾翼面積(Sv)：15平方公分  
垂直尾翼位置：17.5 公分 (由頭部算起)  
平衡點(Neutral point)：9.2 公分 (由頭部算

起)

重心(Cg)：7.7 公分 (由頭部算起)

滑空速度：每秒8.4公尺

下降速率：大於每秒0.46公尺

靜力餘裕(Static margin)：1.5公分

配重：鉛片 (1.35 公克)

## 防水處理

紙質的滑翔機具有造型優美與容易製作的優點，但是卻不能沾上水滴。若不是很在乎滑翔機外表的質感，塗上薄薄一層透明漆或洋干漆是很不錯的點子。如此一來，即使雨天也不怕了！塗完漆的滑翔機後可能會增加5%的重量。

作者：現職台北市立天文科學教育館



## 下期預告：水火箭的世界

水火箭彷彿已成為新的時髦玩具，相信許多大小朋友已領略其中的樂趣。可是您可想過保特瓶製作的水火箭到底要裝多少水，2.0 公升與 1.25 公升誰好？水火箭可以飛多高、多遠？如果您有興趣，請留意我們下回的期刊。