



## 「飛行」和「紙飛機」的教學活動

吳本韓

香港教育學院

蘇若望

馮漢柱資優教育中心

電郵: [phng@ied.edu.hk](mailto:phng@ied.edu.hk)

收稿日期：二零零四年四月十三日(於四月二十七日再修定)

---

### 內容

#### 摘要

#### 壹、飛行的歷史

#### 貳、飛機飛行的物理

##### 2.1、柏努利定律 (Bernoulli's Principle)

##### 2.2、錯誤概念 (一)

##### 2.3、牛頓第三定律與康達效應 (Coanda Effect)

##### 2.4、實驗一：形狀與衝角

##### 2.5、實驗二：升力測試器

##### 2.6、錯誤概念 (二)

#### 參、飛機的教學活動

##### 3.1、例 (一)：咭紙飛機

##### 3.2、例 (二)：改變飛行的方向

#### 肆、結語

#### 參考資料

---

### 摘要

長久以來，人類對「飛行」都充滿了好奇和興趣。飛行和其他運動現象一樣，背後基本的物理就是牛頓的三條運動定律，在飛行物體身上的作用力有重力、升力、阻力、推進力和浮力等，一切飛行現象都是由這些力的合力所做成。所以飛行是一個既可引起學生興趣，又可促進學生運用有關物理概念的課題。本



文首先會撮要地介紹飛行的歷史和物理，並會指出一些課本在解釋如何產生升力時的一些錯誤，爲了不想引用複雜的流體力學運算，文中會用現象論的方式(phenomenological approach)來說明產生升力的原因，最後會介紹一些飛行和紙飛機的教學活動。

## 壹、飛行的歷史

最早的飛行器械出現在中國，風箏早於公元前 5 世紀已經有記錄，稍後竹蜻蜓(Chinese Top or Flying Top)也出現了。兩者都可能是從對大自然的觀察得到靈感。載人飛行器械的試驗一直沒有停下來，中國和日本都有載人風箏的試驗。在十四世紀時，明朝有一位名叫萬戶的官員，曾以數十個火箭綁在自己坐著的椅上試圖飛行，很可惜他亦因此而喪生。

16 世紀達文西觀察雀鳥的飛行和運用邏輯推論，設計了三種重於空氣的飛行器械(Heavier-Than-Air Craft)：撲翼飛機 (Ornithopter)、直昇機的雛型(Air-Screw)和滑翔機(Glider)。雖然這些設計未必都真能飛行，不過他可算是對這個課題作出科學化建議的第一人。

到了 18 世紀啓蒙運動時期，羅吉爾(J. F. P. Rozier)和達爾郎迪斯(D'Arlandes)乘坐蒙戈爾費埃兄弟(Montgolfier brothers)製造的熱氣球，進行了第一次輕於空氣的飛行器械(Lighter-Than-Air Craft)的載人飛行。19 世紀喬治·凱萊爵士(Sir George Cayley)發表了令他被喻爲「航空之父」的文章，其中提出了使用固定而傾斜的機翼來產生升力、利用方向舵控制方向、流線形的概念、以及直昇機的設想。他在 19 世紀中葉造出了第一艘載人滑翔機。之後各種動力飛行的試驗不斷出現，直至 1903 年萊特兄弟(Wright Brothers)成功進行了第一次的載人動力飛行(First Powered Flight)。

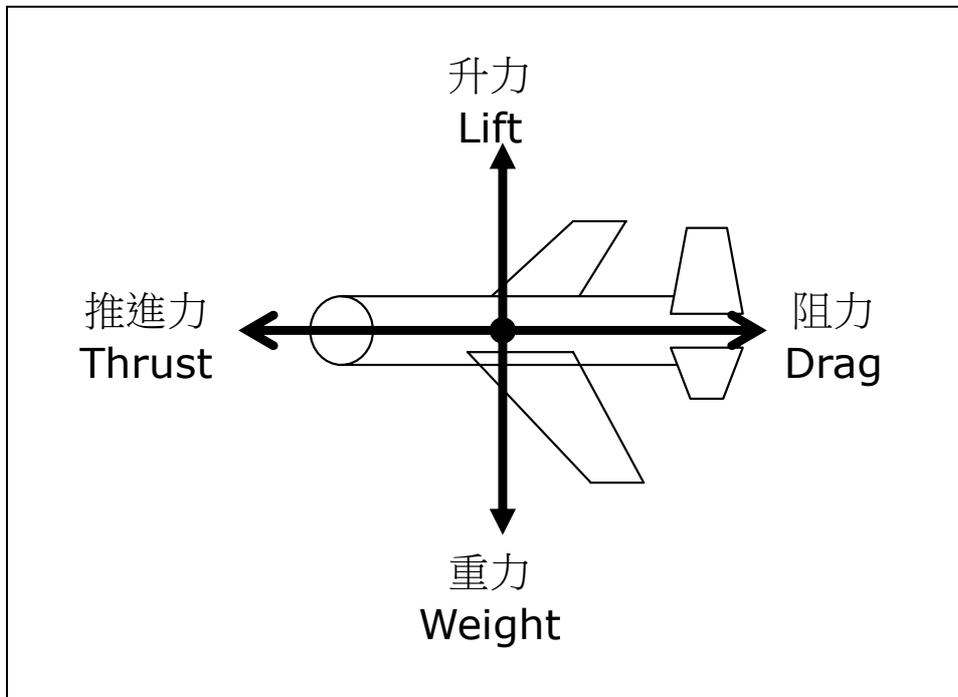
其後，投放在研究飛行的資源急速增加，而最大的支持來自軍方。兩次世界大戰令航空業有飛躍的發展（航空發展和軍事研究之間的關係是一個很有趣的 STS 課題），隨著日後商業、郵務、載人、載貨飛行的需求增加，才使航空變得平民化。到了現在，飛機已經成爲最方便的長途交通工具。

## 貳、飛機飛行的物理

圖一顯示作用在飛機上最主要的數種力。推進力(Thrust)是由飛機引擎產生的推進力；阻力(Drag)是指空氣和飛機表面的相互作用而產生向後的力，簡單地說，阻力主要是指空氣的摩擦力，在正常飛行的情況下，小部份來自升力的水平分量；重力(Weight)是作用在飛機上的地心吸力；升力(Lift)是由飛機和空氣的相



對運動所產生偏向上方的力，在本文中，我們簡單地假設它絕對垂直於水平。除這四種力外，還有當飛機需要改變方向時由機翼升降舵和尾翼方向舵所產生轉向的力，和相對比較小的空氣浮力。



圖一：於飛機的主要四種作用力

學生一般會容易明白為何會有推進力、阻力和重力，但對於如何產生升力往往感到疑惑。很多高中物理課本會以柏努利定律(Bernoulli's Principle)來說明升力產生的原因，但是部份課文內容並不絕對正確，例如 Nolan (1993)、Culver (1993)、Griffin (2001) 和 Dobson & Grace (2002)，這些會在 2.2 和 2.6 兩部份裏討論。(Weltner, 1990a; Raskin, 1994; Waltham, 1998; Eastlake, 2002)用了不同的方法來指出和糾正這些錯誤，當中有用流體力學來運算(Waltham, 1998)，亦有以電腦模擬運算結果來說明翼型(或稱「空氣動力面」，Airfoil)上下的壓強差與飛行角度和速度的關係(NASA: FoilSim II)。但對於中學生來說，這些方法會比較艱深和抽象，以下我們會用現象論的方法來處理這些問題，當中會介紹一些簡單的器材來說明產生升力的原因。

## 2.1、柏努利定律 (Bernoulli's Principle)

在不可壓縮和無黏滯性的流體中，沿著某一流線 (streamline) (Duncan, 1992)

$$P + \rho g h + \rho v^2 / 2 = \text{恆量} \quad (1)$$



當中  $P$  是流體靜態壓強， $\rho$  是流體密度， $g$  是重力， $h$  是高度， $v$  是流體速率， $\rho v^2/2$  是流體動態壓強。

假設以上條件適用於空氣。當飛機飛行時，機翼穿越空氣；經過機翼上下的氣流的壓強和速率會有差別，經過上面的氣流壓強較小，速率較快，此外  $\rho g h$  的差別很小，我們可以將柏努利定律重寫可成：

$$\Delta P = (v_U^2 - v_L^2) \rho / 2 \quad (2)$$

當中  $v_U$  是經過機翼上面的氣流的速率， $v_L$  是經過機翼下面的氣流的速率， $\Delta P$  是機翼上下的壓強差。作用於機翼不同方向的壓強，最後合成一個向上的力，這就是升力了。機翼在空氣中劃過的速率愈快，或是機翼的面積愈大時，所產生的升力就越大，而翼型的設計就是使流經上下的氣流可產生更大的壓強差別。

## 2.2、錯誤概念（一）

高中物理課本大都會用翼型來演示柏努利定律的應用，但是部份課文內容把上下氣流速率的差別，說成是因為機翼上面的長度比下面的要長，上下氣流爲了要同時在機翼後面會合，上面氣流的速率會較快 (Nolan, 1993; Dobson & Grace, 2002)。這種解釋的出現很可能和翼型的形狀有關，部份課文甚至指翼型導致氣流速率的差別就是產生升力的原因，它們忽略了平直的機翼也能導致氣流速率出現差別。這種說法亦不能解釋一些飛機爲何能倒飛，而紙飛機更是和翼型扯不上任何關係。

以下我們會以簡單的計算來證明「同時到達理論」的錯誤之處，然後在下一部份用一些簡單的實驗來說明產生升力的主要原因。

以波音 747-400ER 爲例： 最大載重， $W \approx 400,000 \text{ kg}$   
主翼面積， $A \approx 525 \text{ m}^2$   
巡航速率（於 10700 米高空）， $v \approx 910 \text{ km h}^{-1}$   
（約等於  $253 \text{ m s}^{-1}$ ）

（資料來源 — 波音公司 747 網頁：

<http://www.boeing.com/commercial/747family/technical.html>）

假設波音 747-400ER 的機翼底部是平的，下面經過的氣流相對速率會和巡航速率一樣。

$$V_L = v \approx 253 \text{ ms}^{-1}$$

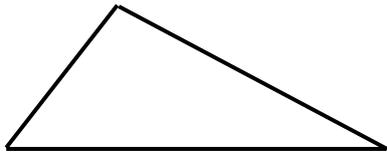


空氣密度 (於 10700 米高空) =  $0.38 \text{ kg/m}^3$

用算式 (2) 來計算，得出  $v_U = 323 \text{ m s}^{-1}$ 。如果「同時到達理論」是正確的話，氣流經過機翼上下表面的速率和機翼上下表面的長度成正比。

機翼頂部的長度：機翼底部的長度 =  $323 : 253 = 1.28 : 1$

下圖是以這比例畫成的機翼草圖，它顯示了一塊中間非常「厚」的機翼。

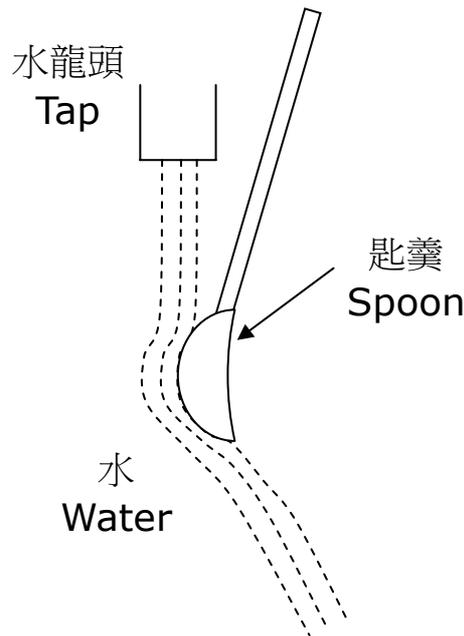


很明顯，機翼不可能有這樣的長度比例。在以上計算裏作了數項假設，當中最不能成立的就是「同時到達」這說法。風洞的實驗結果或電腦的模擬運算都顯示：機翼頂部的氣流要比底部的氣流快很多到達機翼後沿，而不是同時到達 (Waltham, 1998; Eastlake, 2002)。此外，以機翼頂部的長度和底部長度計算氣流速率的差別，會發現單靠這些因素根本不能產生足夠升力令飛機升空 (Raskin, 1994; Anderson & Eberhardt, 2001)。

### 2.3、牛頓第三定律與康達效應(Coanda Effect)

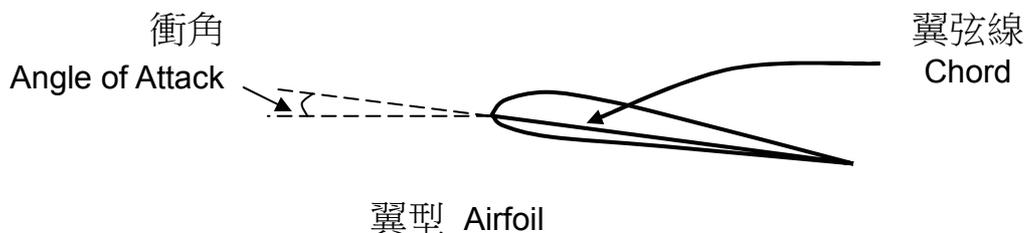
讓我們仔細觀察機翼設計。除了設計成翼型之外，亦有設計成上下對稱，也有像一塊平直的木板一樣，甚至是倒翼型而能以正常方式飛行的。第一個例子還可以用柏努利定律來解釋升力的部份成因；而後三者，明顯以柏努利定律來解釋存在困難，因為機翼底部的表面長度和頂部的相等，甚至更長。而飛機上下倒轉飛行，即是倒翼型，哪又應如何解釋呢？

首先，讓我們看一看有關流體的特性：流動中的物質，都會有依附接觸面的傾向，宏觀的解釋是與流體的「黏度」(Viscosity)有關。試把匙羹彎曲的底部貼向由水龍頭流出的水柱，觀察水流過曲面後的情況，會發現水流的方向改變了，由垂直向下變成跟隨匙羹曲面的方向 (圖二)。此外，你的手會感覺到有力把匙羹拉近水柱。這感覺可用牛頓第三定律來解釋：因為匙羹改變水流的方向 (作用力 Action)，匙羹亦同時被拉向水柱 (反作用力 Reaction)。這種現象稱為康達效應 (Raskin, 1994)。



圖二：康達效應

再次觀察機翼設計，不論是翼型、上下對稱、平板式、或是倒翼型，它們的「翼弦線」(Chord)大多不是水平的，機翼前沿稍為向上而後沿向下，與水平做成一夾角。這個夾角稱為「衝角」(或稱「攻角」，Angle of Attack)，就算翼弦線是水平的，機翼的「襟翼」(Flap)角度的改變也會形成「衝角」。



圖三：翼型和衝角

機翼的作用就是改變氣流的方向，從而產生升力。把機翼設計成翼型，以及做成一個衝角，都是旨在改變氣流的方向。本來水平運動的氣流，因為黏度而依附接觸的表面，流經翼型和(或)向後傾斜的機翼後，流動的方向變成偏向下方。換言之，機翼作用於空氣，就好像把空氣「扔」向下；因而使空氣對機翼產生反作用力，把機翼推向上，產生升力(Weltner, 1990a；Waltham, 1998；Eastlake, 2002；Beginner's Guide to Aeronautics)。

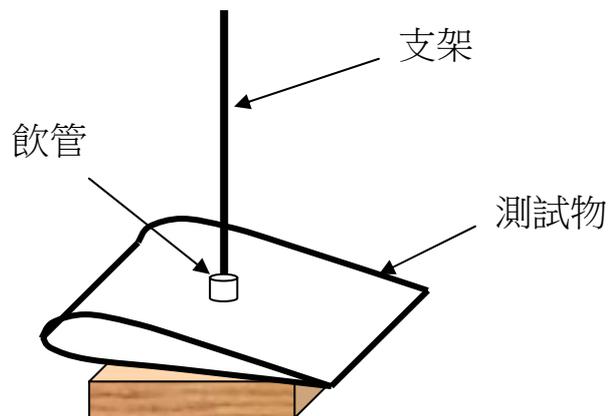
另外，衝角越大，氣流偏下的情況越劇烈，所產生的升力也越大。不過當衝角太大時，因大量湍流的形成使氣流不能再依附機翼表面流動，升力大幅下降，



而阻力卻大幅上升，這就會發生「失速」(Stall)的情況。

## 2.4、實驗一：形狀與衝角

圖四的裝置是以簡單的器材來觀察升力與形狀和衝角的關係，在這裏，我們用了翼型和平板兩種形狀。如支架像圖四所示平放在桌子上時，可假設衝角是0度。把支架向風扇的一端抬高，便可產生大於0度的衝角。啟動風扇後，可觀察測試物是否升起來判斷是否有升力；同一測試物在不同衝角下上升的速度可用來判斷升力的大小。



圖四：觀察升力與形狀和衝角的關係

以下四個錄影片段顯示在不同情況下的實驗結果。

測試物	衝角 = 0 度	衝角 > 0 度
翼型	影片 (一)	影片 (二)

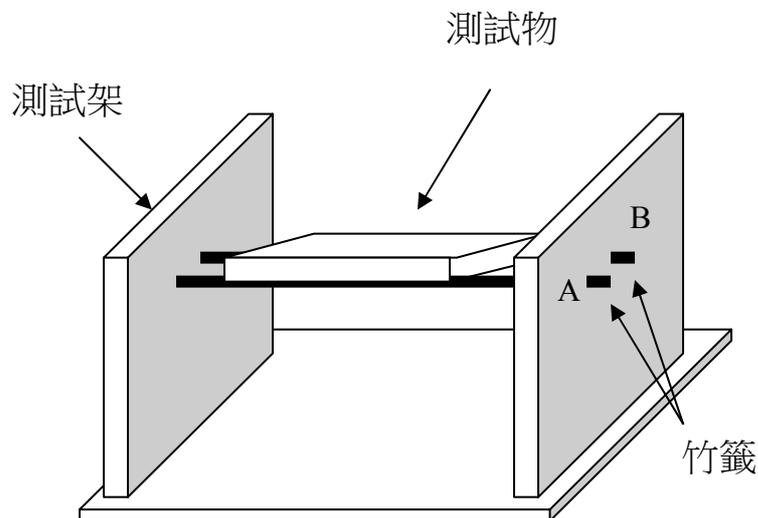
測試物	衝角 = 0 度	衝角 > 0 度
平板式	影片 (三)	影片 (四)

影片 (一) 和 (二) 都顯示有升力，從上升的速度可推斷影片 (二) 的升力大些。影片 (三) 顯示平板式的“機翼”在沒有衝角的情況下不能升起；當衝角大於0度時，影片 (四) 很清楚顯示這時有升力，這情況是「同時到達理論」無法解釋的。



## 2.5、實驗二：升力測試器

圖五的測試器是以電子磅量度升力的大小，概念源於 (Weltner, 1990b)，現在是以簡單的材料來組裝整個測試器。



圖五：升力測試器（將整個測試架放在電子磅上直接測量升力的大小）



測試器的兩側和底部是用發泡膠造成，彼此用竹籤臨時固定在一起。用膠紙將測試物貼在竹籤 A 和 B 上，改變 B 的上下位置便可得到不同的衝角。這簡單設計的最大缺點是不耐用，啟動風扇前更要加上砝碼來幫助牢固結構；不過優點是可輕易拆開測試器來改變實驗情況，例如不同形狀和大小的測試物、不同的衝角等，而且製作成本非常便宜。風扇吹出來的氣流不會太穩定，不需要太精確而昂貴的電子磅，反而因為需要在支架不同的地方放置砝碼，電子磅的可量度最大值不可太小。這裏用的是精確度 1 克、最大值 500 克的電子磅。

影片 (五) 是測量平板式測試物的升力，衝角是 15 度。實驗結果顯示：當啟動風扇後（可從片段裏的紅線是否漂動來判斷有沒有氣流），電子磅讀數從 473 克降至 468 克，即是升力大約是 5 克。如果是用翼型作為測試物，升力可大至 20 克左右。

## 2.6、錯誤概念 (二)

部份人對衝角大於 0 度的飛行有另一種誤解，他們把衝角飛行看成是機翼底部不停地撞擊空氣，因而產生一個有向上分量的反作用力。NASA 稱這種錯誤的



看法為「漂石理論」(Skipping Stone Theory:

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/wrong2.html>)，情況就好像以小石打水漂一樣。

假如「漂石理論」是正確，那麼和空氣的撞擊面(即機翼底部)便是唯一產生升力的地方，背面(即機翼頂部)是甚麼形狀並不重要，這很明顯是不合理的事情。空氣產生升力不是因為飛行物撞擊空氣，而是整個飛行物的形狀、與氣流造成的相對角度等因素，使氣流同時從機翼的底部和頂部流向下方，從而產生一個有向上分量的反作用力，即是機翼的底部和頂部都會影響氣流。

以下兩個片段是用來反証「漂石理論」是錯的，片段中的測試物是一個 15 度的楔形物，大小和重量與影片(五)的平板式測試物一樣。假如「漂石理論」是正確，影片(六)的升力應和影片(五)一樣，即是 5 克；而影片(七)裏的實驗應不會產生升力。但結果顯示在兩個實驗裏都測量到一個大約 2 克的升力。

	影片(六)	影片(七)
實驗設計		
電子磅的始讀數	473 克	473 克
電子磅的末讀數	471 克	471 克
升力	2 克	2 克

## 參、飛機的教學活動

飛行是一個很有趣的物理課題，如能有效地把它融入教學中，肯定可提高學生的學習興趣，刺激他們思考。教學活動中當然不可能有真的飛機，但用會自行推進的模型飛機也有很多限制，除了成本比較貴外，課室或實驗室的有限空間亦不宜這些模型飛機飛行，而最大的缺點是很難去改變它的外形來比較不同的



飛行情況。最簡單和最便宜的解決方法是用紙飛機，除了不能產生推力外，紙飛機和真正的飛機一樣承受如【圖一】裏的力。

紙飛機的最大缺點是它的不穩定性，速度、衝角和升力會在飛行中不斷改變，飛行軌跡每次都不一樣。不過如果以紙飛機引導學生預測或解釋它的飛行情況，它不失為一個有用和有趣的教具。

### 3.1、例（一）：咭紙飛機

暫且放下各式各樣摺紙飛機的方法，現在先看看如何使一張目錄咭紙在空中滑翔。對！只是一張咭紙，作用於紙飛機的力不會因紙張不摺成飛機的模樣而消失。

首先拿著咭紙較長的一端，把咭紙水平地推出去，從咭紙後面看過去，會看到咭紙不斷向後翻騰，原因是升力在重心前方，即是在咭紙前端產生一個向上的力矩。此外，向前運動的距離亦很短，開始時的升力會使前端向上的角度增加，很快便到達「失速」的狀態，因而減慢向前的速度。

一般學生應該不可能預測到咭紙「飛行」的情況。但當看過咭紙飛行後，由老師引導學生討論，用升力、重力和力矩等已有知識，應該不太困難便可解釋咭紙看似雜亂無章的運動。接著便可對咭紙作一些結構上的改變，使它更像一架可穩定滑翔的紙飛機。例如：

- 改變重心的位置

視乎咭紙的大小和重量，可在「機首」的中線上加一些重物（例如加一個或兩個萬字夾），如果飛機依然向後翻騰，試把重物移前或再加重，當升力和重力的位置差不多在一起時，它就能比較穩定地向前滑翔飛行。

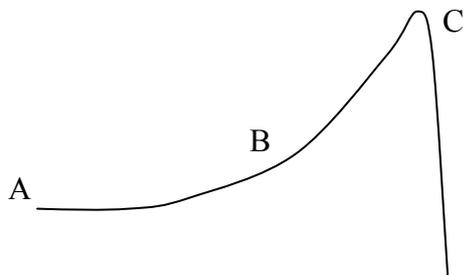
- 造一對上反角（Dihedral）的機翼

就算紙飛機能夠向前滑翔，亦會經常出現偏左或偏右的情況，原因是紙飛機左右不對稱或有氣流。解決方法是把咭紙左右對摺，然後把它攤開，使飛機有了一對上反角（Dihedral）的機翼，這可使飛行更穩定。例如當飛機是傾右飛行時，右邊機翼的衝角會比左邊機翼的衝角大，造成右邊的升力比較大，而使飛機傾左復原。如果飛機還是偏右飛行，可加大右翼的上反角，減少左翼的上反角；反之亦然。此外，進一步可在兩邊機翼的後面端加上「控制器」，如圖六所示，這些控制器等同真正飛機的補助翼（Ailerons），使飛行更穩定。



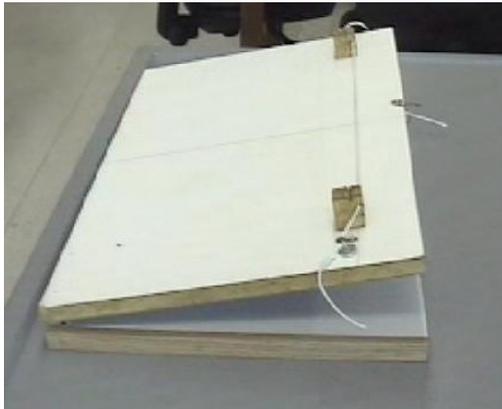
圖六：上反角的咭紙“飛機”

任何紙飛機的飛行（滑翔）都不會穩定和理想，它在教學上有用的地方是可用牛頓定律和力矩等概念便可解釋不理想飛行的原因。圖七是一個很普遍的飛行軌跡，就算是小心調校重心位置的模型飛機也會經常這樣滑翔。我們可將整個軌跡分成三段來分析：在 A 至 B 的滑翔中，升力和重力大致平衡，不過在這短暫的過程中，升力使飛機前端開始朝上，衝角開始增加，升力亦開始增加而令飛機爬升（從 B 至 C），不過當衝角增加至某一程度時，失速發生，向前的速度會急劇減少（B 至 C 的較後部份），升力急劇下降，當向上的速度降至零（C 點）後，飛機便會跌下地面。



圖七：一條很普遍的紙飛機飛行軌跡

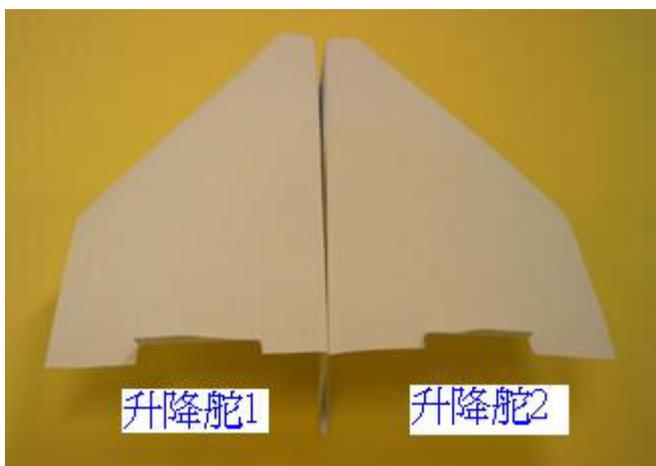
手的拋擲力度和角度是兩個引致每次飛行都不相同的主因，圖八是一台以橡膠線和平板造成的發射台，方便對投射速度和角度進行有系統的探究。



圖八：發射台

### 3.2、例（二）：改變飛行的方向

真正的飛機主要是以機翼後端的升降舵來改變上下的飛行方向，我們也可在紙飛機剪出一對簡單的升降舵。圖九顯示一對朝上的升降舵，它會使空氣在機翼的後端產生一個向下的反作用力，而使機首相對朝上，衝角增加，升力增加，因而產生一個向上飛行的效果。



圖九：朝上的升降舵

下表總結各升降舵的不同方向而產生的飛行效果。

升降舵 1	升降舵 2	從飛機後方看過去的飛行情況
朝上	朝上	向上飛行
朝下	朝下	向下飛行
朝上	朝下	逆時針翻滾
朝下	朝上	順時針翻滾



當學生明白有關概念後，可着他們進行更深入的探究，例如：

- 如何改變爬升的高度？（改變初始速度和升降舵的角度）
- 如何控制飛機偏左或偏右飛行？（可在機尾剪出一個方向舵來改變飛行方向）
- 飛機的重量或重心的位置對飛行有何影響？（可加萬字夾在適當的地方）

## 肆、結語

「飛行」是一個很有趣的課題，不過當要嚴緊地分析它的運動情況時，便需要用到昂貴的器材和複雜的流體力學運算，本文介紹了一些簡單的實驗，以廉價的材料和儀器，來觀察升力和速度、形狀及角度之間的關係。

本港不少學校也曾舉行「紙飛機比賽」作為課外活動，學生玩得十分愉快，你的紙飛機不出五步就「墜機」，他的卻在打轉。可惜認真考慮有關原理的不多，活動完了就忘了。本文舉出一些活動例子，介紹如行用紙飛機來引導學生預測或解釋它的飛行情況。

此外，「飛行」也是一個很有趣和內容很廣的專題研習課題（蘇若望與吳本韓，2003），形式可以是：

1. 深入和有系統地探討飛機的結構和相關的物理，以下這些網址對飛行動力學有詳盡的介紹，而內容亦適合中學生的程度。
  - 模型飛機的空氣動力學  
<http://home.kimo.com.tw/hsudonghorng/>
  - Beginner's Guide to Aeronautics  
<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/index.html>
  - Aeronautics Learning Laboratory for Science, Technology and Research  
<http://www.allstar.fiu.edu/aero>
2. 搜集、整理和分析資料，例如：
  - 飛行的歷史和故事
  - 飛機的研究和未來發展



● 飛行有關的 STS 課題

3. 設計、製作和測試一些簡單的飛行玩意，例如風箏、竹蜻蜓、飛盤、熱氣球、回力棒等。蘇若望與吳本韓（2003）在這方面有詳細的介紹。

## 參考資料

Anderson, D. F. & Eberhardt, S. (2001). *Understanding Flight*. New York: McGraw-Hill.

Culver, R.B. (1993). *Facets of Physics: A Conceptual Approach*, (pp.206). Minneapolis/St. Paul: West Publishing Company.

Dobson, K., Grace, D. & Lovett, D. (2002). *Physics*, (pp.97). London: Collins Educational.

Duncan, T.著，劉一貫、周顯光譯（1992）：《高級物理學上冊》，香港，導師出版社。

Eastlake, C. N. (2002). An Aerodynamicist's View of Lift, Bernoulli and Newton. *The Physics Teacher*, 40, 166-173.

NASA Glenn Research Centre : 《FoilSim II Version 1.5a》,

<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/foil2.html>，瀏覽日期：7-4-2004。風洞模擬軟件，有各種情況的示範，可作為事後與學生討論的資料。

Griffin, W. T. (2001). *The Physics of Everyday Phenomena*, (pp.173). Boston: McGraw Hill.

Nolan, P. J. (1993). *Fundamentals of College Physics*, (pp.381). Iowa: WCB.

Raskin, J. (1994). Foiled by the Coanda Effect. *Quantum*, 5(1), 4-11.

Waltham, C. (1998). Flight without Bernoulli. *The Physics Teacher*, 36, 457-462.

Weltner, K. (1990a). Aerodynamic Lifting Force. *The Physics Teacher*, 28, 78-82.

Weltner, K. (1990b). Bernoulli's Law and Aerodynamic Lifting Force. *The Physics Teacher*, 28, 84-86.

蘇若望、吳本韓（2003）：「飛行」的專題研習，《香港數理教育學會會刊》，21(2)，頁 48-52。