

「飞行」和「纸飞机」的教学活动

吴本韩

香港教育学院

苏若望

冯汉柱资优教育中心

电邮: phng@ied.edu.hk

收稿日期：二零零四年四月十三日(于四月二十七日再修定)

内容

摘要

壹、飞行的历史

贰、飞机飞行的物理

2.1、柏努利定律 (Bernoulli's Principle)

2.2、错误概念 (一)

2.3、牛顿第三定律与康达效应 (Coanda Effect)

2.4、实验一：形状与冲角

2.5、实验二：升力测试器

2.6、错误概念 (二)

参、飞机的教学活动

3.1、例 (一)：咭纸飞机

3.2、例 (二)：改变飞行的方向

肆、结语

参考数据

摘要

长久以来，人类对「飞行」都充满了好奇和兴趣。飞行和其它运动现象一样，背后基本的物理就是牛顿的三条运动定律，在飞行物体身上的作用力有重力、升力、阻力、推进力和浮力等，一切飞行现象都是由这些力的合力所做成。所以飞行是一个既可引起学生兴趣，又可促进学生运用有关物理概念的课题。本



文首先会撮要地介绍飞行的历史和物理，并会指出一些课本在解释如何产生升力时的一些错误，为了不想引用复杂的流体力学运算，文中会用现象论的方式 (phenomenological approach) 来说明产生升力的原因，最后会介绍一些飞行和纸飞机的教学活动。

壹、飞行的历史

最早的飞行器械出现在中国，风筝早于公元前 5 世纪已经有记录，稍后竹蜻蜓 (Chinese Top or Flying Top) 也出现了。两者都可能是从对大自然的观察得到灵感。载人飞行器械的试验一直没有停下来，中国和日本都有载人风筝的试验。在十四世纪时，明朝有一位名叫万户的官员，曾以数十个火箭绑在自己坐着的椅上试图飞行，很可惜他亦因此而丧生。

16 世纪达文西观察雀鸟的飞行和运用逻辑推论，设计了三种重于空气的飞行器械 (Heavier-Than-Air Craft): 扑翼飞机 (Ornithopter)、直升机的雏型 (Air-Screw) 和滑翔机 (Glider)。虽然这些设计未必都真能飞行，不过他可算是对这个课题作出科学化建议的第一人。

到了 18 世纪启蒙运动时期，罗吉尔 (J. F. P. Rozier) 和达尔郎迪斯 (D'Arlandes) 乘坐蒙戈尔费埃兄弟 (Montgolfier brothers) 制造的热气球，进行了第一次轻于空气的飞行器械 (Lighter-Than-Air Craft) 的载人飞行。19 世纪乔治·凯莱爵士 (Sir George Cayley) 发表了令他被喻为「航空之父」的文章，其中提出了使用固定而倾斜的机翼来产生升力、利用方向舵控制方向、流线形的概念、以及直升机的设想。他在 19 世纪中叶造出了第一艘载人滑翔机。之后各种动力飞行的试验不断出现，直至 1903 年莱特兄弟 (Wright Brothers) 成功进行了第一次的载人动力飞行 (First Powered Flight)。

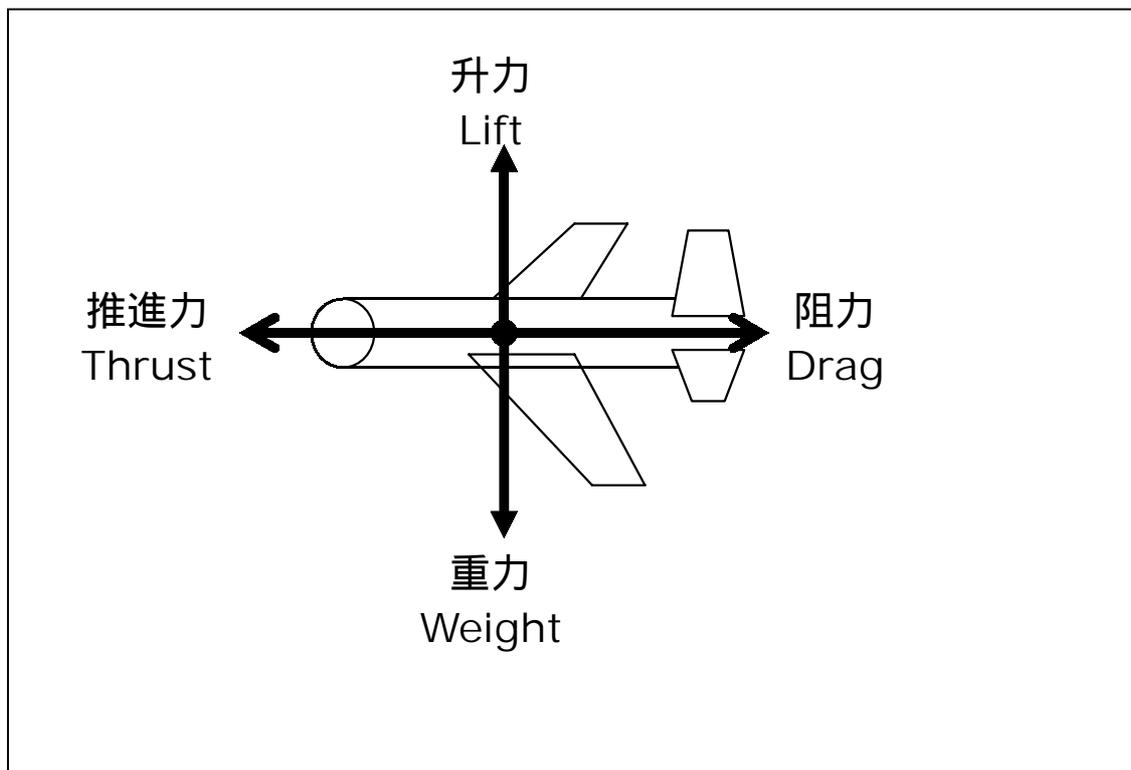
其后，投放在研究飞行的资源急速增加，而最大的支持来自军方。两次世界大战令航空业有飞跃的发展（航空发展和军事研究之间的关系是一个很有趣的 STS 课题），随着日后商业、邮务、载人、载货飞行的需求增加，才使航空变得平民化。到了现在，飞机已经成为最方便的长途交通工具。

贰、飞机飞行的物理

图一显示作用在飞机上最主要的数种力。推进力 (Thrust) 是由飞机引擎产生的推进力；阻力 (Drag) 是指空气和飞机表面的相互作用而产生向后的力，简单地说，阻力主要是指空气的摩擦力，在正常飞行的情况下，小部份来自升力的水平分



量; 重力(Weight)是作用在飞机上的地心吸力; 升力(Lift)是由飞机和空气的相对运动所产生偏向上方的力, 在本文中, 我们简单地假设它绝对垂直于水平。除这四种力外, 还有当飞机需要改变方向时由机翼升降舵和尾翼方向舵所产生转向的力, 和相对比较小的空气浮力。



图：飞机的主要四种作用力

学生一般会容易明白为何会有推进力、阻力和重力, 但对于如何产生升力往往感到疑惑。很多高中物理课本会以柏努利定律(Bernoulli's Principle)来说明升力产生的原因, 但是部份课文内容并不绝对正确, 例如 Nolan (1993)、Culver (1993)、Griffin (2001) 和 Dobson & Grace (2002), 这些会在 2.2 和 2.6 两部份里讨论。(Weltner, 1990a; Raskin, 1994; Waltham, 1998; Eastlake, 2002)用了不同的方法来指出和纠正这些错误, 当中有用流体力学来运算(Waltham, 1998), 亦有以计算机仿真运算结果来说明翼型(或称「空气动力面」, Airfoil)上下的压强差与飞行角度和速度的关系(NASA: FoilSim II)。但对于中学生来说, 这些方法会比较艰深和抽象, 以下我们会用现象论的方法来处理这些问题, 当中会介绍一些简单的器材来说明产生升力的原因。

2.1、柏努利定律 (Bernoulli's Principle)

在不可压缩和无黏滞性的流体中, 沿着某一流线 (streamline) (Duncan, 1992)



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

当中 P 是流体静态压强， ρ 是流体密度， g 是重力， h 是高度， v 是流体速率， $\rho v^2 / 2$ 是流体动态压强。

假设以上条件适用于空气。当飞机飞行时，机翼穿越空气；经过机翼上下的气流的压强和速率会有差别，经过上面的气流压强较小，速率较快，此外 $\rho g h$ 的差别很小，我们可以将柏努利定律重写可成：

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

当中 v_U 是经过机翼上面的气流的速率， v_L 是经过机翼下面的气流的速率， ΔP 是机翼上下的压强差。作用于机翼不同方向的压强，最后合成一个向上的力，这就是升力了。机翼在空气中划过的速率愈快，或是机翼的面积愈大时，所产生的升力就越大，而翼型的设计就是使流经上下气流可产生更大的压强差别。

2.2、错误概念（一）

高中物理课本大都会用翼型来演示柏努利定律的应用，但是部份课文内容把上下气流速率的差别，说成是因为机翼上面的长度比下面的要长，上下气流为了要同时在机翼后面会合，上面气流的速率会较快 (Nolan, 1993; Dobson & Grace, 2002)。这种解释的出现很可能和翼型的形状有关，部份课文甚至指翼型导致气流速率的差别就是产生升力的原因，它们忽略了平直的机翼也能导致气流速率出现差别。这种说法亦不能解释一些飞机为何能倒飞，而纸飞机更是和翼型扯不上任何关系。

以下我们会以简单的计算来证明「同时到达理论」的错误之处，然后在下一部份用一些简单的实验来说明产生升力的主要原因。

以波音 747-400ER 为例： 最大载重， $W \approx 400,000 \text{ kg}$
主翼面积， $A \approx 525 \text{ m}^2$
巡航速率（于 10700 米高空）， $v \approx 910 \text{ km h}^{-1}$
（约等于 253 m s^{-1} ）

（资料来源 — 波音公司 747 网页：

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



假设波音 747-400ER 的机翼底部是平的，下面经过的气流相对速率会和巡航速率一样。

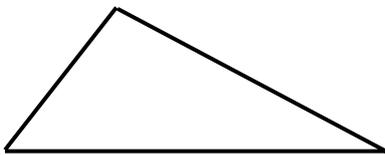
$$V_L = v \approx 253 \text{ ms}^{-1}$$

空气密度 (于 10700 米高空) = 0.38 kg/m^3

用算式 (2) 来计算，得出 $v_U = 323 \text{ m s}^{-1}$ 。如果「同时到达理论」是正确的话，气流经过机翼上下表面的速率和机翼上下表面的长度成正比。

机翼顶部的长度：机翼底部的长度 = $323 : 253 = 1.28 : 1$

下图是以这比例画成的机翼草图，它显示了一块中间非常「厚」的机翼。

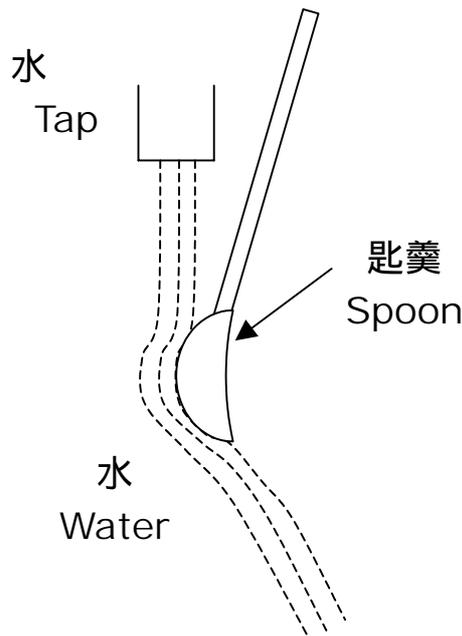


很明显，机翼不可能有这样的长度比例。在以上计算里作了数项假设，当中最不能成立的就是「同时到达」这说法。风洞的实验结果或计算机的仿真运算都显示：机翼顶部的气流要比底部的气流快很多到达机翼后沿，而不是同时到达 (Waltham, 1998; Eastlake, 2002)。此外，以机翼顶部的长度和底部长度计算气流速率的差别，会发现单靠这些因素根本不能产生足够升力令飞机升空 (Raskin, 1994; Anderson & Eberhardt, 2001)。

2.3、牛顿第三定律与康达效应(Coanda Effect)

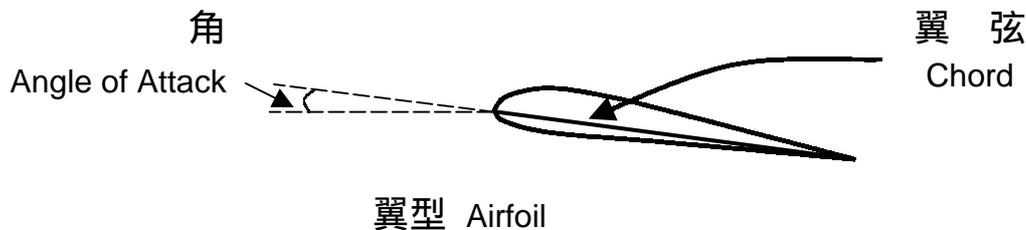
让我们仔细观察机翼设计。除了设计成翼型之外，亦有设计成上下对称，也有像一块平直的木板一样，甚至是倒翼型而能以正常方式飞行的。第一个例子还可以用柏努利定律来解释升力的部份成因；而后三者，明显以柏努利定律来解释存在困难，因为机翼底部的表面长度和顶部的相等，甚至更长。而飞机上下倒转飞行，即是倒翼型，哪又应如何解释呢？

首先，让我们看一看有关流体的特性：流动中的物质，都会有依附接触面的倾向，宏观的解释是与流体的「黏度」(Viscosity)有关。试把匙羹弯曲的底部贴向由水龙头流出的水柱，观察水流过曲面后的情况，会发现水流的方向改变了，由垂直向下变成跟随匙羹曲面的方向 (图二)。此外，你的手会感觉到有力把匙羹拉近水柱。这感觉可用牛顿第三定律来解释：因为匙羹改变水流的方向 (作用力 Action)，匙羹亦同时被拉向水柱 (反作用力 Reaction)。这种现象称为康达效应 (Raskin, 1994)。



图二：康达效应

再次观察机翼设计，不论是翼型、上下对称、平板式、或是倒翼型，它们的「翼弦线」(Chord)大多不是水平的，机翼前沿稍为向上而后沿向下，与水平做成一夹角。这个夹角称为「冲角」(或称「攻角」，Angle of Attack)，就算翼弦线是水平的，机翼的「襟翼」(Flap)角度的改变也会形成「冲角」。



图三：翼型和冲角

机翼的作用就是改变气流的方向，从而产生升力。把机翼设计成翼型，以及做成一个冲角，都是旨在改变气流的方向。本来水平运动的气流，因为黏度而依附接触的表面，流经翼型和(或)向后倾斜的机翼后，流动的方向变成偏向下方。换言之，机翼作用于空气，就好像把空气「扔」向下；因而使空气对机翼产生反作用力，把机翼推向上，产生升力(Weltner, 1990a; Waltham, 1998; Eastlake, 2002; Beginner's Guide to Aeronautics)。

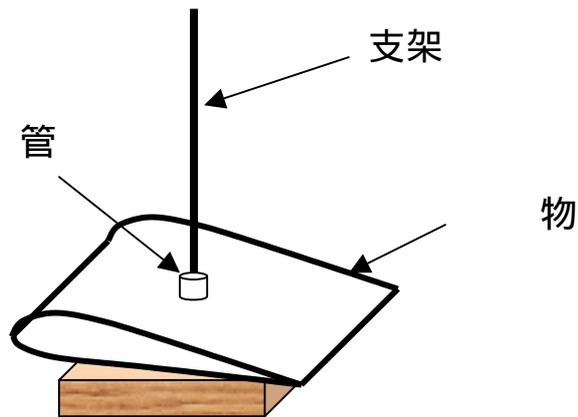
另外，冲角越大，气流偏下的情况越剧烈，所产生的升力也越大。不过当冲角太大时，因大量湍流的形成使气流不能再依附机翼表面流动，升力大幅下降，



而阻力却大幅上升，这就会发生「失速」(Stall)的情况。

2.4、实验一：形状与冲角

图四的装置是以简单的器材来观察升力与形状和冲角的关系，在这里，我们用了翼型和平板两种形状。如支架像图四所示平放在桌子上时，可假设冲角是0度。把支架向风扇的一端抬高，便可产生大于0度的冲角。启动风扇后，可观察测试物是否升起来判断是否有升力；同一测试物在不同冲角下上升的速度可用来判断升力的大小。



图四：观察升力与形状和冲角的关系

以下四个录像片段显示在不同情况下的实验结果。

测试物	冲角 = 0 度	冲角 > 0 度
翼型	影片 (一)	影片 (二)

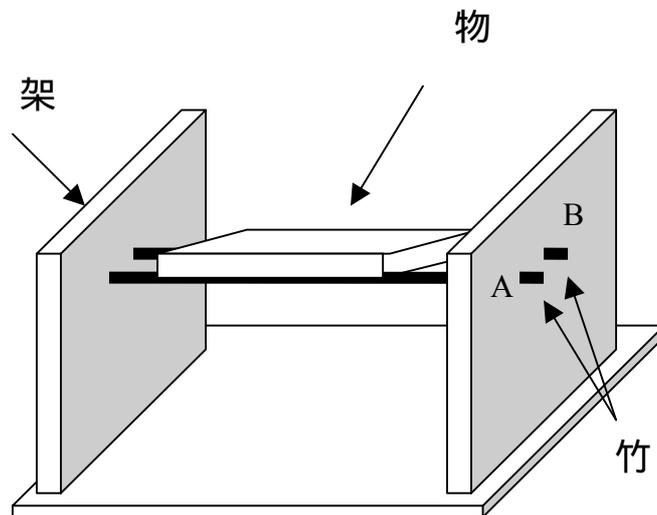
测试物	冲角 = 0 度	冲角 > 0 度
平板式	影片 (三)	影片 (四)

影片 (一) 和 (二) 都显示有升力，从上升的速度可推断影片 (二) 的升力大些。影片 (三) 显示平板式的“机翼”在没有冲角的情况下不能升起；当冲角大于0度时，影片 (四) 很清楚显示这时有升力，这情况是「同时到达理论」无法解释的。



2.5、实验二：升力测试器

图五的测试器是以电子磅量度升力的大小，概念源于 (Weltner, 1990b)，现在是以简单的材料来组装整个测试器。



图五：升力测试器（将整个测试架放在电子磅上直接测量升力的大小）



测试器的两侧和底部是用发泡胶造成，彼此用竹签临时固定在一起。用胶纸将测试物贴在竹签 A 和 B 上，改变 B 的上下位置便可得到不同的冲角。这简单设计的最大缺点是不耐用，启动风扇前更要加上砝码来帮助牢固结构；不过优点是可轻易拆开测试器来改变实验情况，例如不同形状和大小的测试物、不同的冲角等，而且制作成本非常便宜。风扇吹出来的气流不会太稳定，不需要太精确而昂贵的电子磅，反而因为需要在支架不同的地方放置砝码，电子磅的可量度最大值不可太小。这里用的是精确度 1 克、最大值 500 克的电子磅。

影片 (五) 是测量平板式测试物的升力，冲角是 15 度。实验结果显示：当启动风扇后（可从片段里的红线是否飘动来判断有没有气流），电子磅读数从 473 克降至 468 克，即是升力大约是 5 克。如果是用翼型作为测试物，升力可大至 20 克左右。

2.6、错误概念 (二)

部份人对冲角大于 0 度的飞行有另一种误解，他们把冲角飞行看成是机翼底部不停地撞击空气，因而产生一个有向上分量的反作用力。NASA 称这种错误的看法为「漂石理论」 (Skipping Stone Theory:



<http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/wrong2.html>)，情况就好像以小石打水漂一样。

假如「漂石理论」是正确，那么和空气的撞击面（即机翼底部）便是唯一产生升力的地方，背面（即机翼顶部）是甚么形状并不重要，这很明显是不合理的事情。空气产生升力不是因为飞行物撞击空气，而是整个飞行物的形状、与气流造成的相对角度等因素，使气流同时从机翼的底部和顶部流向下方，从而产生一个有向上分量的反作用力，即是机翼的底部和顶部都会影响气流。

以下两个片段是用来反证「漂石理论」是错的，片段中的测试物是一个 15 度的楔形物，大小和重量与影片（五）的平板式测试物一样。假如「漂石理论」是正确，影片（六）的升力应和影片（五）一样，即是 5 克；而影片（七）里的实验应不会产生升力。但结果显示在两个实验里都测量到一个大约 2 克的升力。

	影片 (六)	影片 (七)
实验设计		
电子磅的始读数	473 克	473 克
电子磅的末读数	471 克	471 克
升力	2 克	2 克

参、飞机的教学活动

飞行是一个很有趣的物理课题，如能有效地把它融入教学中，肯定可提高学生的学习兴趣，刺激他们思考。教学活动中当然不可能有真的飞机，但用会自行推进的模型飞机也有很多限制，除了成本比较贵外，课室或实验室的有限空间亦不宜这些模型飞机飞行，而最大的缺点是很难去改变它的外形来比较不同的飞行情况。最简单和最便宜的解决方法是用纸飞机，除了不能产生推力外，纸



飞机和真正的飞机一样承受如【图一】里的力。

纸飞机的最大缺点是它的不稳定性，速度、冲角和升力会在飞行中不断改变，飞行轨迹每次都不一样。不过如果以纸飞机引导学生预测或解释它的飞行情况，它不失为一个有用和有趣的教具。

3.1、例（一）：咕纸飞机

暂且放下各式各样折纸飞机的方法，现在先看看如何使一张目录咕纸在空中滑翔。对！只是一张咕纸，作用于纸飞机的力不会因纸张不折成飞机的模样而消失。

首先拿着咕纸较长的一端，把咕纸水平地推出去，从咕纸后面看过去，会看到咕纸不断向后翻腾，原因是升力在重心前方，即是在咕纸前端产生一个向上的力矩。此外，向前运动的距离亦很短，开始时的升力会使前端向上的角度增加，很快便到达「失速」的状态，因而减慢向前的速度。

一般学生应该不可能预测到咕纸「飞行」的情况。但当看过咕纸飞行后，由老师引导学生讨论，用升力、重力和力矩等已有知识，应该不太困难便可解释咕纸看似杂乱无章的运动。接着便可对咕纸作一些结构上的改变，使它更像一架可稳定滑翔的纸飞机。例如：

- 改变重心的位置

视乎咕纸的大小和重量，可在「机首」的中在线加一些重物（例如加一个或两个万字夹），如果飞机依然向后翻腾，试把重物移前或再加重，当升力和重力的位置差不多在一起时，它就能比较稳定地向前滑翔飞行。

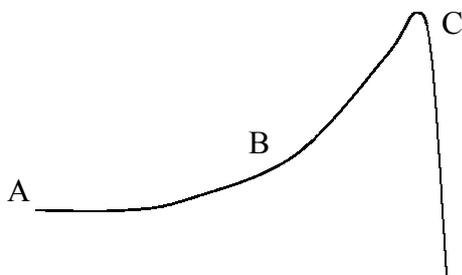
- 造一对上反角（Dihedral）的机翼

就算纸飞机能够向前滑翔，亦会经常出现偏左或偏右的情况，原因是纸飞机左右不对称或有气流。解决方法是把咕纸左右对折，然后把它摊开，使飞机有了一对上反角（Dihedral）的机翼，这可使飞行更稳定。例如当飞机是倾右飞行时，右边机翼的冲角会比左边机翼的冲角大，造成右边的升力比较大，而使飞机倾左复原。如果飞机还是偏右飞行，可加大右翼的上反角，减少左翼的上反角；反之亦然。此外，进一步可在两边机翼的后面端加上「控制器」，如图六所示，这些控制器等同真正飞机的辅助翼（Ailerons），使飞行更稳定。



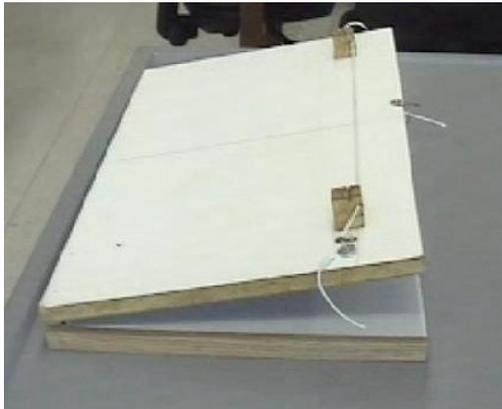
图六：上反角的咭纸“飞机”

任何纸飞机的飞行（滑翔）都不会稳定和理想，它在教学上有用的地方是可用牛顿定律和力矩等概念便可解释不理想飞行的原因。图七是一个很普遍的飞行轨迹，就算是小心调校重心位置的模型飞机也会经常这样滑翔。我们可将整个轨迹分成三段来分析：在 A 至 B 的滑翔中，升力和重力大致平衡，不过在这短暂的过程中，升力使飞机前端开始朝上，冲角开始增加，升力亦开始增加而令飞机爬升（从 B 至 C），不过当冲角增加至某一程度时，失速发生，向前的速度会急剧减少（B 至 C 的较后部份），升力急剧下降，当向上的速度降至零（C 点）后，飞机便会跌下地面。



图七：一条很普遍的纸飞机飞行轨迹

手的抛掷力度和角度是两个引致每次飞行都不相同的主因，图八是一台以橡胶线和平板造成的发射台，方便对投射速度和角度进行有系统的探究。



图八：发射台

3.2、例（二）：改变飞行的方向

真正的飞机主要是以机翼后端的升降舵来改变上下的飞行方向，我们也可在纸飞机剪出一对简单的升降舵。图九显示一对朝上的升降舵，它会使空气在机翼的后端产生一个向下的反作用力，而使机首相对朝上，冲角增加，升力增加，因而产生一个向上飞行的效果。



图九：朝上的升降舵

下表总结各升降舵的不同方向而产生的飞行效果。

升降舵 1	升降舵 2	从飞机后方看过去的飞行情况
朝上	朝上	向上飞行
朝下	朝下	向下飞行
朝上	朝下	逆时针翻滚
朝下	朝上	顺时针翻滚



当学生明白有关概念后，可着他们进行更深入的探究，例如：

- 如何改变爬升的高度？（改变初始速度和升降舵的角度）
- 如何控制飞机偏左或偏右飞行？（可在机尾剪出一个方向舵来改变飞行方向）
- 飞机的重量或重心的位置对飞行有何影响？（可加万字夹在适当的地方）

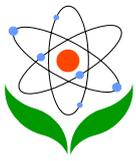
肆、 结语

「飞行」是一个很有趣的课题，不过当要严紧地分析它的运动情况时，便需要用到昂贵的器材和复杂的流体力学运算，本文介绍了一些简单的实验，以廉价的材料和仪器，来观察升力和速度、形状及角度之间的关系。

本港不少学校也曾举行「纸飞机比赛」作为课外活动，学生玩得十分愉快，你的纸飞机不出五步就「坠机」，他的却在打转。可惜认真考虑有关原理的不多，活动完了就忘了。本文举出一些活动例子，介绍如行用纸飞机来引导学生预测或解释它的飞行情况。

此外，「飞行」也是一个很有趣和内容很广的专题研习课题（苏若望与吴本韩，2003），形式可以是：

1. 深入和有系统地探讨飞机的结构和相关的物理，以下这些网址对飞行动力学有详尽的介绍，而内容亦适合中学生的程度。
 - 模型飞机的空气动力学
<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、整理和分析资料，例如：
 - 飞行的历史和故事
 - 飞机的研究和未来发展



● 飞行有关的 STS 课题

3. 设计、制作和测试一些简单的飞行玩意，例如风筝、竹蜻蜓、飞盘、热气球、回力棒等。苏若望与吴本韩（2003）在这方面有详细的介绍。

参考资料

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.着，刘一贯、周显光译（1992）：《高级物理学上册》，香港，导师出版社。

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>, 浏览日期：7-4-2004。风洞模拟软件，有各种情况的示范，可作为事后与学生讨论的资料。

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.

苏若望、吴本韩（2003）：「飞行」的专题研习，《香港数理教育学会会刊》，21(2)，页 48-52。