

自主學習期末報告—動物飛行機制的探索

黃弘岳 物理學系丙組光電物理組 26 級 111022211
劉宏艾 物理學系甲組一般組 26 級 111022123
李偉誠 物理學系甲組一般組 26 級 111022138
袁仕竣 動力機械工程學系 26 級 華班 111033224
唐榕徽 動力機械工程學系 26 級 華班 111033239
許如來 清華學院國際學士班 26 級 111006261

指導老師：動機系 楊佩良 教授、通識教育中心 顏士清 教授

一、 目的

WingSync 團隊持續汲取各類飛行知識，以打造性能效率高且安全穩定的無人機為目標。在自主學習中，本團隊將刺激團員積極涉獵無人機相關資訊，並定期互相交流與報告，期許達成共同進步、學以致用之成效。

二、 前言

自人類誕生以來，我們就一直在仰望天空，總是羨慕能自由翱翔在天際的飛鳥們，夢想著能夠克服地心引力，無拘無束地遨遊於天穹之中。飛行有許多的方法，原理為利用空氣動力學產生升力，方法如拍翅使氣體凝聚、高速飛行產生之震波所導致的壓縮升力，而所有方法的目的皆是為了克服重力，使物體的移動範圍從面到體。

希臘神話中的伊卡洛斯使用蠟製作出了飛鳥的翅膀並得以飛翔；達文西的手稿之中發現了關於飛行器的設計圖稿；而等了二十世紀初，萊特兄弟才真正地實現了人類想要在天空中展翅高飛的夢想。從此開始，人類對於飛機的設計與製造也逐漸演進，從最初的蒸汽動力木造飛機，逐漸演變為柴油動力並以金屬蒙皮的大鐵鳥，到如今甚至已經廣泛的運用噴氣引擎來作為飛機的設計。

三、 昆蟲的飛行機制

昆蟲飛行是一個劇烈的運動，所以有些昆蟲會有兩組分別用以進出氣的氣門提升換氣效率。保持高體溫也是昆蟲飛行的必要條件，因此多數昆蟲都在溫度高、太陽大時才飛行。其中蚱蜢會在白天高溫時，正面太陽提高體溫；反之則側身以寬闊面對低垂的太陽。蝴蝶也會調整翅膀角度以最大面積吸收太陽熱量。

翅膀的拍動機制也是研究的一大重點。蜻蜓及蚱蜢等的翅膀底部有外及內側肌肉，透過一收一縮和體內支點達成翅膀上舉和下拍，此機制被稱為「直接式」，其特點在於各翅可獨立運行，如豆娘的前後兩對翅膀能採異相運動，差距更可達半個週期，對振翅頻率低於二十五的昆蟲而言很方便。而振翅頻率更高的蒼蠅等的神經系統就無法使用此系統，取而代之是使用稱為「間接式」。其機制包含了一對從胸頂部延伸到底部的垂直肌肉與一對由前方連接到後方之水平肌肉，同樣其一收一縮就形成了振翅。

但不論是何種機制，翅膀用以連接側盾板和胸壁的節肢彈性組織都為高速的振翅行為貢獻良多，且這類蛋白為現今無法人工合成卻是已知彈性最強、跡近完美的材料。除上下振翅外，翅也需要以其他兩個方向大幅且精細的運動、扭轉，這都歸功於位於翅根的微小輔助肌肉群完成。

討論到拍翅與空氣的關係，比起機翼更像是直升機的螺旋槳，因兩者都是靠移動翅膀(螺旋槳)產生力，而通常都是以高禎數攝影機研究。以蒼蠅飛行週期為例，從完全上舉且高攻角開始，翅向前及下揮動且攻角減小。直到超過中央位置時翅開始減速，同時從翅根開始轉往反方向使的攻角再次提高。之後翅猛的往後上移動並回到初始位置完成飛行週期。由此可知飛行時翅的複雜運動，且不同昆蟲也可能有截然不同的週期。

四、 鳥類的飛行機制

不同於昆蟲，鳥類大多具有流線造型，這是因為飛行速度相對昆蟲要快的多。鳥類也需要具備輕體重、高強度及高身體機能，不論是輕盈的骨骼、以鳥喙代替較重的牙齒、和特別的呼吸方式都反映了飛行的特殊需求。其中呼吸方式更為突出，不僅呼吸時空氣會流入全身上下的多個氣囊，其肺臟還能接受氧氣供給，這些特性是支持鳥類在高海拔飛行的一大原因。

另一大特殊構造就是羽毛。即便羽毛的起源仍是個謎(現代認為是由爬行動物的鱗片不斷變異演化而來的)，其特殊結構仍有許多功能，如恆溫、流線化、防水或展示等等。其中絨羽結構中，羽小支上的羽小鈎使的整個羽毛如拉鍊般互相銜接，其力量非常強大又靈活。而鳥類常見的潤羽行為就是在書裡脫鈎之羽小鈎，以恢復其網狀結構。

比起定翼機甚至昆蟲，鳥類翅膀更為精密，由肌、腱、無數的血管及神經組成。這使鳥可以變換翅的形狀。如游準下充時，腕關節部位和初級飛羽會折攏以最小化阻力，使其可加速到一百九十公里每小時捕獵。為了降低失速速率，像鴉等慢速鳥類會有小羽翼以及初級羽毛上的深縫都可以大幅降低失速速率，甚至可以進一步減少紊流。

而根據不同鳥類的生存策略的不同，翅膀當然也會有不同的形式。以需要長時間滑翔的鳥類，如信天翁或是禿鷲等，其翅膀通常都具有高展弦比的特性，使其能以最低能量消耗率進行長距離滑翔，此特性也可以在滑翔機等飛機上看到。而若是如鷓鴣等需要高靈活度且翅膀操控性好的翅膀，其翅就會呈現低展弦比，如同多數戰鬥機，其可以在短時間內高速變向飛行，即便高耗能，卻能保證較好的生存率。

而多數鳥類振翅週期可以參考蒼蠅的振翅模式，當然不同鳥類或是同種鳥類在不同需求下的振翅模式就可能完全不同。

五、 飛行阻力

飛機的設計，不論是機翼、整體的外型，皆是為了使其在高空中飛行時能受到最少阻力，使空氣的運動、動力成為飛機的動力而非阻力。

機翼的各部分皆會產生不同的阻力，主要分為寄生阻力與誘導阻力。

1. 寄生阻力：包含形狀阻力、表面摩擦力與干擾阻力。

- 形狀阻力顧名思義是指因物體形狀而產生的阻力，主要是因為物體和流體之間有相對運動時使得物體後方壓強小於前方壓強。
- 表面摩擦力則是源自於流體相對於物體表面的運動所產生之摩擦力。
- 干擾阻力則是容易出現在零件的交接處，空氣對兩零件分別產生的流場互相干擾而成，也因此鑲片經常被安裝在零件的交接處使干擾阻力因素降低。

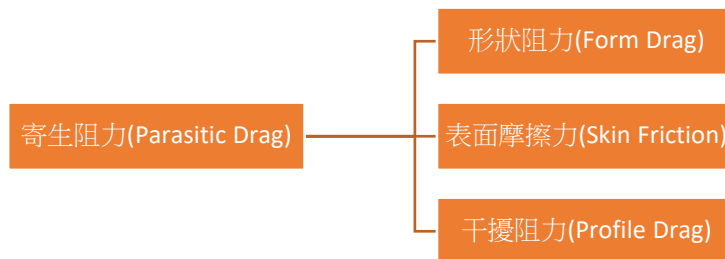


圖 1：寄生阻力組成

2. 誘導阻力：就是由翼尖渦流產生的阻力，在飛行時在機翼下方的壓力較大，氣流會從翼尖兩端流向壓力較小的機翼上方，翼尖小翼（winglet）的設計可以減少翼尖渦流的產生。

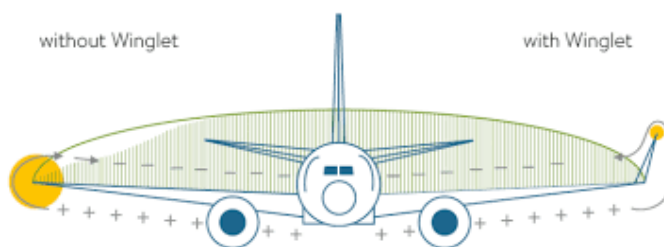


圖 2：翼尖小翼比較

減少寄生阻力必須調整機翼的形狀和翼面大小（翼面越大表面摩擦力越大），而減少誘導阻力則可以提高展弦比和漸縮機翼。有漸縮翼可以增加操控性，但耗能會較高，所以在設計飛機時，要同時考量機翼形狀、大小和漸縮翼的設計。

形狀的差異是造成阻力的原因之一，在不同的速度下適合的展弦比機翼也不同。如高速的戰鬥機所適合的即為短而寬的機翼（低展弦比），而低速的即適合高展弦比的機翼以降低誘導阻力。而 F-14 的設計（可變後掠翼）則可以兼顧兩種性能，使其能在各種高度、速度下維持穩定飛行。



圖 3：提高展弦比可減少誘導阻力(圖源：安捷飛航訓練中心)

六、 不穩氣流與翅的演化

常用的空力分析也被稱為「標準型氣流」，常用以分析固定翼飛機及鳥類展翅滑翔時的分析，且常為穩態；與之相對的是「不穩氣流」，顧名思義就是非穩態之氣流運動，昆蟲或鳥類，如蜂鳥、蜻蜓等，透過振翅實現懸停及飛行就是倚靠不穩氣流。

當要利用標準型氣流去延伸分析不穩氣流時，科學家遇到了一些問題。飛機等速飛行時，機翼周圍的氣流可以如下圖四分成環流及水平流。飛機起動時，由於環流(或稱束縛渦流)及其反渦流(或稱起始渦流)的產生及抵銷，此期間機翼的淨生力微乎其微。以上延遲升力產生之現象也被稱為「華格納效應」，而此效應運用在振翅行為時，翅膀反覆之停止起動的結果就是幾乎不會產生升力，這也是需要特別分析不穩氣流之原因。



圖 4：翼切型周圍的液體環流-華格納效應(圖源:飛行的奧秘 2006)

而分析最早擁有自主飛行的生物，昆蟲，的飛行機制，研究其翅膀演化目的和軌跡是非常有幫助的。不同於其他器官，翅膀不太可能剛開始就是用以飛行，因為主動飛行不僅需要高精度控制，也需要夠大之翅膀。以下有三種主流的翅膀演化理論：

1. 太陽能胸板：

此理論認為翅膀是從橫向延伸之胸板演化而來。初始之功用可能為吸收

太陽能，演化是為了加大面積吸收更多能量。最後當胸板夠大，使昆蟲與到危險跳躍時足以增加穩定性。以上理論具有符合之昆蟲化石作為佐證。

2. 活動式側板

由加拿大的卡爾頓大學學者賈庫卡洛瓦-佩克提倡，其聲稱翅膀原為水棲若蟲的具鉸接關節之活動式側板，且側板可能具有鰓板及游泳之功能。當水棲若蟲過渡到陸棲階段時，側板可能就足以發揮空力效應。艾希特大學的伍頓博士及劍橋大學的埃林頓博士據此理論製作之模型實驗證實了理論之可能性，並且優化空力表現之方向也符合現代昆蟲之特徵。

3. 水面飛掠：

以馬爾登和克拉馬的研究藍本延伸之理論認為早期可能有半水棲型昆蟲，利用拍動側板翅在水面飛掠，最後變演化出用以飛行之翅膀。

七、 機翼設計與選擇

除了對於飛機動力來源的研究外，對於飛機翼型的設計方法也已經被深入研究。最簡單的翼型只有一片平板，然而能帶來的升力卻顯得稍微不足。而後機翼發展出了些許弧度，以便能夠在流場中運動的更流暢，然而卻會在翼弦尾端會造成湍流，增大空氣對機翼的拖曳力，而造成速度的下降。

因此，工程師將翼弦拉長、機翼高度降低，以此讓空氣在經過機翼的時候更貼合機翼，使機翼尾端的氣流不會和機翼前緣的氣流產生太大的偏差，以減少干擾阻力。

關於機翼的升力和阻力，還有許多因素需要考慮的，像是翼尖渦流，而翼尖渦流和翼展和翼弦的比例(展弦比)還有機翼的面積有關，機翼越長，產生的翼尖渦流就越小，但是這樣會增加機翼的面積，從而增加機翼表面和氣流之間

的摩擦力。為了因應此類問題，漸縮翼（減少翼尖面積）也隨之被設計出來。

這兩者有各自的優點和劣處：高展弦比的機翼耗能較低，但是比較難操作；而漸縮翼型的耗能比較高，但是操控性比較好。至於要如何選擇兩種方案，則要看飛機是如何設計的了。

八、 飛行穩定性

這部份報告的主題主要是飛行穩定性及飛行體邊界層物理現象的介紹。最常見穩定性的問題如前端升舉造成攻角上升，壓力中心(CP)往前移，造成飛機繼續升舉，進而形成惡性循環直至飛機墜落。因此，多數的飛機都有設置尾翼以維持其縱向的穩定性。水平尾翼用來維持縱向平衡，而垂直尾翼則用來維持橫向的穩定性。除了這兩種之外，重力亦有可能導致飛機容易產生側滑，通常會藉由上反角、高翼式結構使飛機達成平衡。

邊界層部分在整個報告中最有趣的是流體部分，為了減少表面阻力因此在設計上要減少紊流（方向不一致）。提到紊流、層流則必須提到雷諾數，其定義為 $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$ 和流體密度、相對物體之速度成正比，與流體黏度成反比。這也是為何飛機在高速行駛時總會多少受到紊流的影響。

另外，高爾夫球的設計也和層流紊流相關，光滑球體繞流時在層流邊界層較易發生流動分離現象，造成球體背後產生大的死水區，形成形阻。然而透過小凹槽的設計，凹痕促使紊流產生，紊流較不易發生流動分離現象，雖然在摩擦阻力上大於層流，但解決形阻的問題能使其飛行距離更遠。

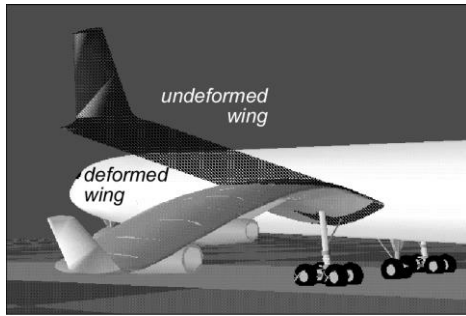


圖 5：偏轉示意圖(圖源: Martin Spieck)

如上所示，偏轉是一種結構，使機翼產生變形以獲得某些優勢。例如，它可以增加飛機的穩定性。

令人驚奇的是，飛機可以與空氣有豐富的互動，這導致各種飛行特性。例如，機翼與空氣之間的摩擦導致層流層和紊流層。

九、 延伸問題

Q1：為何高速時適合低展弦比的機翼？

展弦比的短而寬機翼通常在高速飛行時產生較低的阻力（並非單指誘導阻力），這有助於提高飛行器的極速，且低展弦比的機翼擁有更好的機動性，對於高速飛行來說是一個關鍵的優勢。

Q2：細度比的定義及其影響之性能？

細度比指的是機身長與最大寬度的比值，細度比最主要影響著機身的表面積，也就連帶影響到表面摩擦力的大小。

亞音速飛機機身的理想長細比約為 6:1，但其他設計因素可能會影響該比率，像是座位配置、貨物大小等。此外，有時也會為了控制效率而刻意改變細度比，大多數飛機的細度比明顯高於 6:1，這是由於需要將尾部控制面放置在較長力臂的末端以提高效率。

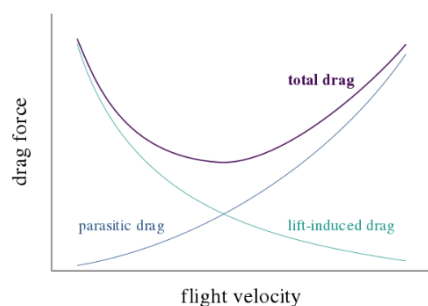
Q3：在報告中提及翼尖渦流會造成阻力，但為何不是所有飛機都裝有 winglet 來減少阻力呢？

首先，飛機的設計取決於多種因素，包括機型、使用用途、燃油效率等。部分飛機設計本身已經減少了翼尖渦流帶來的阻力，因此不需要額外的 winglet。

此外，winglet 雖然可以減少阻力，但也會增加飛機的重量和複雜性，可能對綜合性能產生負面影響。而且，飛機經常在不同的環境和任務中運行，因此需要在設計上做出妥協，以確保整體性能的平衡。

Q4：所以誘導阻力與寄生阻力的分類是怎麼分類的？

在查詢資料後，得知寄生阻力與速度大小正相關，誘導阻力則是和機翼本身的形狀、飛行當下的攻角有關。



▲圖 6：飛行阻力與速度關係(圖源:維基百科)

Q5：甚麼是下洗氣流？

下洗氣流，又稱旋翼下洗流，是指直升機處於懸停狀態時，旋翼轉動使氣流從旋翼上面流到旋翼下面而產生誘導速度，誘導速度和葉素圓周運動速度的合速度形成葉素真速使空氣就向著拉力相反的方向流動。

這種條件下，旋翼上表面壓強小，下表面壓強大，在旋翼上下表面之間產生升力，由於直升機飛行時高度不變，下表面壓強大的空氣會向下方流動，形成下洗氣流。

Q6：機翼的壓力中心(CP)及空力中心(AC)，這兩者有什麼差異呢？

機翼壓力中心和空氣動力中心分別位於機翼上不同位置。壓力中心是平均壓力合力點，影響穩定性。空氣動力中心通常位於前緣 25%-30%，影響俯仰穩定性，也就是說在空氣動力中心提供升力不會產生力矩。

Q7：甚麼是死水區？

死水區通常指的是一個區域，其中水流(流體)非常緩慢，幾乎靜止，甚至可能停滯不前，而不是像水流順暢的其他區域一樣。這種現象可能出現在流體運動中的某些特定情境中，例如在球體的背後，可能會形成一個死水區，因為流體流過球體後會受到球體形狀的阻礙，導致水流減速或停滯。

Q8：由於上反角和高翼的設計能提高穩定性但會降低機動性，因此有一個發想：除了使用上反角和高翼來提高飛機的穩定性，是否還有其他飛機設計策略可以更好地平衡穩定性和機動性？

短翼跨度和低機身位置也有助於提高機動性，但可能會降低穩定性。飛控系統的精確調節以及飛機的質量分佈也在平衡穩定性和機動性方面扮演關鍵角色。此外，新材料和數值模擬技術的進步也使得更複雜的翼型和飛機幾何形狀成為可能，進一步優化性能。

十、 工程實作成果展示

在這份成果報告書中，我們深刻反思了原定計畫的初衷與過程。最初，我們的目標是透過製作能夠飛行的動物模型，探索並研究其飛行機制。然而，我們迅速面臨到技術上的龐大挑戰，這促使我們重新審視過去人們在研究和製造飛機上的努力與嘗試。

透過這次反思，我們認識到模仿動物飛行機制的複雜性，以及類似的嘗試在過去已經存在並且面臨極高的技術難度。考慮到這一現實，我們團隊共同決定調整原始計畫，轉而尋找更具可行性的方向。

在重新檢視的過程中，我們傾向於探索無人機技術，這是一個在現代科技

領域中發展迅速的領域。相較於模仿動物飛行機制的複雜性，無人機的研發相對較為成熟，且技術難度相對可控。這個轉變是經過深思熟慮的，我們相信這是一個更符合實際情況且能夠更有效發揮我們專業能力的選擇。

最終，我們成功地轉向無人機的研發，並在這一領域取得了實質的成果。這次轉變不僅是對技術挑戰的理性回應，更是我們團隊在面對困難時靈活調整、堅持尋求更好解決方案的體現。透過這次經歷，我們深刻體會到在科技領域中，不斷反思和調整是取得成功的關鍵，而我們為能夠克服挑戰，成功完成這次無人機的研發感到自豪。

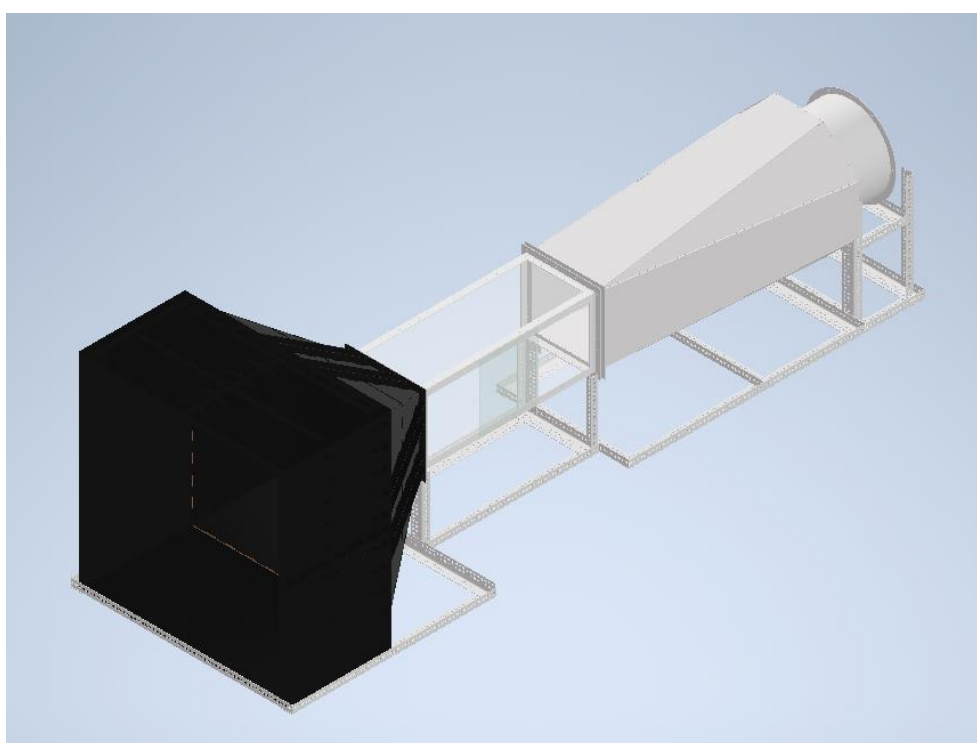


圖 7：自製風洞設計圖



圖 8：自製風洞



圖 9：自製無人機(3D 列印製程)



圖 10：自製無人機(玻璃纖維複材製程)



圖 11：自製無人低翼機(碳纖維複材製程)



圖 12：自製無人低翼機(碳纖維複材製程)



圖 13：自製無人高翼機(碳纖維複材製程)



圖 14：自製無人高翼機(碳纖維複材製程)

十一、心得統整

1. 報告者角度

這次報告的內容是飛行力學的基礎知識，因為不論是動物或是人造飛行體的飛行，都需要遵循基本物理中的空氣動力學。

首先有了一個重要的概念，飛行體的飛行最深層機制都是因為空氣的運動而產生。而空氣與其他媒介的不同之處，最明顯在於壓縮性。除了在近音速下，基本上空氣都是可以忽略其壓縮性。然而，在超音速時，空氣的壓縮性就不能忽視，而快速壓縮的結果就是產生震波(Shock Wave)。

接著講到的就很吸引我的注意，因為阻力及升力是了解飛行力學最基礎的單元。我們了解了空氣動力與空氣密度、速度等有很大的關聯。其中在介紹飛機翼型的來由的變化圖時更讓我興奮，因為看到了翼型在後方延伸的一段居然是為了彌補 Separation Area 而產生的，而這個概念也深深刻在腦中。

最讓我印象深刻的是翼尖小翼(Winglet)。此前知悉了機翼下的空氣比上邊的空氣壓力更大，也了解到飛機有翼尖渦流，但是這次藉由上述圖 2 才將兩者聯繫，也清楚看出翼尖小翼對於改善翼尖渦流的效果。

最後在前面翼尖渦流的基礎上，知道了高展弦比或漸縮翼的優缺點。最讓我驚訝的是鳥類已經熟練利用了這個知識。像是長程飛行的禿鷲及鷗鳥就擁有高展弦比的翅膀，而需要高操作性的鷓鴣則擁有低展弦比的翼型。最後，我們人類甚至造出了可以改變展弦比的 F-14 戰鬥機，這真的讓我太驚訝了。

這次學到了很多空力的基本知識，期待之後能在不同的飛機及飛行動物中看到這些性質的用武之地，並加以學習與分享！

2. 聽者角度

這次報告者分享了多爾頓的《飛行的奧秘》，第一部分以各種不同的角度簡單但完整地介紹了人類有關飛行的研究。內容包括飛行在生物及人類發展中的角色、飛行的分類、飛行的物理及人類對飛行研究的發展過程。這次的分享，並非把重點一味放在非常艱深的知識，而是讓人對飛行有更廣闊且更全面的認知，這對於想研究物理的人來說是十分重要的。

而第二部分的分享則聚焦在飛行的分析方法，特別是對其阻力、升力及拖拽力的研究。通過這種方法，我們能精確地分析不同形狀機翼的飛行行為，並且可據此總結出展弦比、攻角、機翼形狀等對升力和阻力造成主要影響的重要特徵。在理論基礎的幫助下，團隊對於改進飛機的設計和操作將更加完備。

此外，在介紹誘導阻力時，也讓模擬組的成員產生共鳴。由於跑模擬時有分析到關於展弦比對於阻力係數升力係數的影響，當時就有發現類似的現象，也因此出現了實驗與理論互相證實的成就感。

在後續的報告中，講者提到了飛行穩定性。原本很好奇尾翼設計的必要

性，一般對此問題的回覆也只停留在為了穩定機身，但藉此機會了解到在產生持續上舉與下降，會生成一個反向力矩，使飛機達到穩定，也學到 V 型側翼能防止側滑。接著業對邊界層與雷諾數有了新的了解，意識到原來空氣的黏滯性對於飛行的影響是非常重要的。

此分享中，在穩定性的方面，其實最主要的概念就是惡性循環，在報告中提到的例子是：前端升舉 → CP 前移 → 繼續升舉 → 惡性循環。這樣的模式使我們聯想到普物課所教授的最低位能問題，在位能最高點時該系統不穩定；反之若在位能最低點則相較穩定(比如簡諧運動)。所以我們試圖猜測與了解是否在某個穩定的氣流下可能也會有類似位能的物理量可以表示當下飛行的穩定狀態，使得相關計算更為精準。

最後，在這種輪流分享的模式下，每個人將知識消化後與團隊分享，這是非常有效率且對團隊很有幫助的學習方式。相信在一次次的分享中，報告者與聽者都能夠藉此機會多加了解飛行運作原理並與實作相印證，使整個團隊在完成主線任務之餘，也能共同增進報告能力與理論知識。

3. 實作心得

在模擬動物的飛行之中，我們發現想要實際的模擬動物藉由拍動翅膀來製造升力，在工程層面上來說無疑是一項巨大的挑戰，於是我們選擇了觀察鳥類的滑行，並嘗試製作與模擬出類似鳥類在滑行時展翅模樣的模型，再搭配其他的動力來源，最後我們得出的結論就是製造飛機。

在參與飛機製造的實作過程中，我深刻體驗到製造一架飛機所需的團隊協調、技術和創造力。首先，團隊合作是不可或缺的，由於一架飛機的誕生需要經過一個漫長的過程，每位成員都會在這個過程中扮演一個重要的角色，而當我的任務完成後與剛開始的時候，我都需要跟成員進行深入的溝通與交流，如

此才能夠正確地完成飛機。

接著，在實際的製造過程中，對於材料的選擇和使用顯得極為關鍵。我們必須仔細考慮每個零部件的功能需求，並選擇具有足夠強度和輕量化特性的材料，因此我們選擇了使用具有此優勢的複合材料。這項挑戰不僅考驗我們的材料科學知識，還要求我們在成本和效能之間取得平衡。

製造飛機的過程中，我學到了在高度技術性的環境下保持冷靜的重要性。每一步驟都需要細心的操作和確保質量的控制，以確保最終的飛機符合嚴格的安全標準。這不僅考驗了我的技術技能，還培養了我處理挑戰時的應變能力。總的來說，製造飛機的過程讓我更加了解航空工程的複雜性和挑戰性。這不僅是一個技術層面的挑戰，更是一個需要無比細心和團隊協作的過程。這段經歷不僅讓我了解人類要如同鳥類展翅高飛的困難，更讓我深深體會到飛機製造背後所蘊含的工程奇蹟。