

第四章 航空器操作特性

任何一段飛行的完成都可分為後推、滑行、起飛、離場、巡航、進場、降落與滑行八個階段，其中除了巡航之外，其餘 7 個階段皆與航空站的硬體設施與營運規範息息相關。由於航空器在起飛、離場、進場與降落階段速度不大，但需要最大的升力，故性能無法充分發揮，且航空器高度有限，遇緊急事件發生時，沒有足夠的高度讓前艙的機組人員完成緊急事件的處理程序。因此，起飛、離場、進場與降落階段是整個航行最關鍵的階段，而飛安事件的調查分析也顯示這些階段的失事率遠高於其他階段。

航空站的營運者必須熟悉其所服務飛機種類在起飛降、離場與進場的操作特性，才能確保飛航安全。本章的目的即分別介紹航空器在起飛、降落、離場與進場 4 個階段的操作特性。

4.1 起飛

飛機的飛行受到重力(weight)、升力(lift)、推力(thrust)與拖曳力(drag)的影響，重力是地心引力作用於飛機重量的結果，因此是向下指向地心的力。升力是飛機移動時，因為流過機翼上下表面的氣體速率不同產生壓力差，而造成向上的力。推力是由飛機的動力系統所產生，通常是向前的力。拖曳力通常伴隨推力而產生，但是方向與推力相反。想要對影響飛行的 4 種力有更深入瞭解的同學可參考「飛行原理」、「航空動力學」或「飛行員訓練手冊」的書籍。

前述 4 種力的相互作用與飛機的飛行原理極為複雜，但是簡單的原則是如果升力大於重力則飛機會持續爬升，升力小於重力則飛機會下降。推力大於拖曳力則飛機會向前加速，若推力等於拖曳力則飛機將以定速飛行。因此，一架以定速在一定高度巡航的飛機，其所受的重力、升力、推力與拖曳力維持平衡狀態。

由於升力源於流經機翼上下表面空氣分子因速度不同所造成的壓力差，而且壓力與面積的乘積即等於力的單位，因此影響升力的因素可歸納為(1)流經機翼空氣分子的多寡、(2)空氣分子與機翼的相對速度與(3)機翼面積。以下分別說明：

1. 流經機翼空氣分子的多寡

在其他條件不變的條件下，流經機翼空氣分子愈多，可造成愈大的壓力差，產生愈大的升力。因此會影響流經機翼空氣分子多寡的因素都會影響飛機的升力，譬如海拔比

較高的地區因為氣壓較低，單位體積內的空氣分子較少，故相同條件下產生的升力較小。又如空氣的相對溼度較高時，單位體積內的水分子較多，相對而言，空氣分子較少，因此相同條件下產生的升力亦較小。讀者可以依此推論當氣溫較高時，相同條件下飛機產生的升力亦較小。

2. 空氣分子與機翼的相對速度

由於機翼造型的影響，流經上表面的空氣速度較快，流經下表面的空氣速度較慢，且根據伯努利定律，流體的速度快則壓力低，速度慢則壓力高，故機翼下表面空氣的壓力較高，上表面的壓力較低，此壓力差即飛機升力的來源。在其他條件相同的情況下，空氣分子與機翼的相對速度愈大，升力也愈大。

3. 機翼面積

由於力等於壓力與面積的乘積，因此若其他條件相同，則機翼較大的飛機將可產生較大的升力。

飛機起飛的過程為藉由動力系統產生的推力讓機體向前加速，利用空氣與機翼的相對速度產生升力，當升力可以克服飛機重量產生的重力時，飛機即可起飛。可知飛機能否起飛的關鍵在於升力是否足以克服重力，因此重力在起飛的過程中扮演極為重要的角色。首先，升力必須大於重量所產生的重力，飛機才能起飛。其次，根據牛頓第二定律 ($F = ma$)，外力(F)等於物體質量(m)與加速度(a)的乘積，當外力(即飛機的動力系統所產生的推力)固定時，愈重的飛機加速度愈小，愈難達到產生一定升力(起飛所需升力亦隨重量增加而加大)所需的空氣與機翼的相對速度。因此重量愈大的飛機需要愈長的加速時間，即需要愈長的跑道。

除了重量是影響飛機起飛所需的跑道長度之外，其他會影響升力的因素亦會影響起飛所需的跑道長度。如前所述可知，當飛機重量與機翼面積固定時，海拔較高、氣壓較低、相對溼度較高或氣溫較高的時段所需的飛機起飛跑道長度較長。這些因素對起飛跑道長度的影響如表 2-1 所示。此外，起飛時的風向亦會影響起飛跑道長度。由於影響升力大小者為空氣分子與機翼的相對速度，若順風起飛則飛機需達到較大的對地速率(ground speed)，亦即需要較長的跑道。若逆風起飛則飛機可以在較小的對地速率時即可達到所需的相對速度。式 2-1 即說明風向對相對速度的影響：

$$V_R = V_G + V_W \quad (2-1)$$

其中 V_R 為空氣分子與機翼的相對速度， V_G 為飛機的對地速率， V_W 為風速， θ 為風向參數，若為順風則 $\theta = -1$ ，若為逆風則 $\theta = +1$ ，若為橫向風則 $\theta = 0$ 。雖然起飛時風向會

影響所需跑道長度，但是通常機場跑道的設計皆讓飛機可以選擇逆風起飛，因此除了特殊情形，風向並不足以構成影響起飛跑道長度的重要因素。

表 4-1 影響飛機起飛跑道長度因素

影響因素	與飛機所需起飛跑道長度的關係 ^a
重量	正向
機翼面積	負向
機場海拔	正向
氣壓	負向
氣溫	正向
相對溼度	正向
起飛風向	b

註a：各影響因素與所需跑道長度的關係是假設其他因素皆不變的條件下的分析結果。

註b：逆風起飛所需跑道長度較順風起飛短。

飛機的最大結構起飛重量(maximum structure takeoff weight, MSTOW 包含三部分，即 operating empty weight(OEW)、酬載(payload)與燃油(fuel)重。OEW 包含飛機機體、飛行所需機電裝備與飛航機組人員的重量，同型飛機的 OEW 會隨航空公司對於機位安排不同而有些微差異，但是當飛機開始飛行服務後，其 OEW 可視為固定，不會改變。酬載是指航空公司所載運的旅客(包託運與隨身行李)、貨物與郵件的重量，由於這些是航空公司可以有營收的載重，故稱為「酬載」。雖然飛機酬載受到最大結構酬載(maximum structural payload)的限制，但是航空公司在決定酬載時通常與其燃油重量(fuel weight, FW)一起考慮，以保證 OEW、payload 與 FW 的重量和不會超過 MSTOW，如式 2-2 所示。

$$\text{MSTOW} = \text{OEW} + \text{payload} + \text{FW} \quad (2-2)$$

由於飛機上所載燃油重量會影響其航程，因此航空公司在不超過最大結構酬載的前提下，會權衡酬載與燃油(即航程)。譬如中華航空公司台北 - 香港航線以 B747-400 飛行，因為航程短，僅約 1 小時 40 分鐘，所需燃料少，故可以搭載較多的旅客與貨物。但是台北到美洲西岸的跨太平洋航線則由於航程遠，所需燃料多，航空公司必須降低酬載，以符合 MSTOW 的規定。

此外，航空公司的服務路網也會影響航空站所需的跑道長度，譬如中正國際機場與高雄小港機場都服務 B747 的飛機，但是以往跨太平洋航線的班機大多由中正機場起飛，小港機場起飛的航線以航程較短的東南亞為主，因此飛機上的燃油較少，起飛總重亦較小，故所需的起飛跑道長度較短。近年則由於高雄起飛的美國航線逐漸增加，但是高雄小港機場的跑道長度不足，為了滿足航程所需的燃油，航空公司必須犧牲酬載(減少營

收)。因此高雄小港機場將其跑道延長，以符合航空公司營運的特性。

4.2 降落

飛機降落所需的跑道長度比起飛時短，因此降落所需跑道長度不是決定跑道長度的因素。影響飛機能否安全降落的最重要因素為「最大結構降落重量」，最大結構降落重量(maximum structure landing weight, MSLW)與最大結構起飛重量差別極大，以波音公司的 B747-400 型飛機為例，其 MSLW 為 57.4 萬磅，僅有 MSTOW(80 萬磅)的 71.8%，兩者的差異最主要在於飛機的油箱容量。以民國 91 年 5 月 25 日在澎湖上空失事的華航 CI611 班機(B747-200 型)為例，其 MSTOW 為 78.5 萬磅，MSLW 為 58.5 萬磅，其油箱容量為 36.1 萬磅，約為 53864 加侖。

以飛機的操作與安全而言，風向為影響飛機降落的最主要因素。如同飛機起飛時風向對起飛所需跑道長度的影響，逆風降落所需要的降落跑道長度較短，順風降落所需的跑道長度較長。此外，由於飛機駕駛員在接近落地(touch down)階段會感受到飛機與地面的相對速度(即 2-1 式的 V_G)，但其無法感受到決定最佳落地的飛機與空氣分子的相對速度(V_R)。因此習慣逆風降落的駕駛員在順風降落時可能因誤判對地速度而在不適當的時機落地，因飛機落地不平順而造成旅客不舒適，甚至可能因重落地而造成機件損傷人員傷亡。

橫向風亦是挑戰飛機是否能平穩降落的主要因素之一，駕駛在降落階段必須同時控制飛機的下降斜率，並確保飛機的水平軌道對準跑道的中心線。橫向風會將飛機吹離跑道中心線所延伸的軌跡，駕駛員必須以左右機翼的升降來修正橫向風的影響，因此會增加旅客的不舒適感。而且飛機在降落階段通常皆持續地減少其動力，因此操作性能比起飛時(通常為動力全開)差很多，更增加駕駛的困難度。

飛機重量除了影響起飛跑道長度之外，也影響跑道兩端延伸線所需保持的淨空(protect obstacle clearance surface)，主要的因素在於飛機的爬升必須以推力(由飛機的動力系統所提供)來克服飛機重量所產生的重力。當飛機的推力固定時，其爬升能力隨著飛機重量增加而降度。通常飛機的爬升能力是用單位時間所爬升高度與單位水平距離所爬升高度兩項指標來衡量。若飛機重量較大，起飛後的爬升速度較慢，無法在一定的水平距離爬至機場周圍的淨空以上，則雖然該機場的跑道長度足夠讓此航機起飛，但是其性能亦不能滿足機場的操作標準。解決的方法與前述跑道長度不夠的情形類似，第一，航空站營運者可以降低一定水平距離的淨空，以降低對航機爬升能力的要求。第二，航空站營運者可以限制這些爬升能力不足航機的起飛總重，以符合現有對爬升能力的要求。

1. gross performance
2. net performance

4.3 離場

起飛程序的完成一般以飛機達到一定高程(AGL)做為標準，起重量低於 6,700 公斤 (12,500 磅)的輕型飛機以 AGL 達 15 公尺(50 呎)為判定標準，其他飛機則以 11 公尺(35 呎)為標準。航機完成起飛之後即進入離場階段，離場可分為 4 個階段，第一階段為航機完成起飛程序到起落降收起的階段，第二階段為起落降收起到飛機翼襟(flap)準備回復到正常巡航位置的階段，第三階段為翼襟回復(retraction)的過程，第四階段為航路爬升(En route climb)階段。

在前述 4 個階段中，除了第 3 階段飛機沒有爬升之外，其他 3 個階段航機皆持續爬升，對航機的性能要求而言，以第 2 階段對航機的爬升能力要求最為嚴苛。因此，在機場高程較高與氣溫較高的天氣，通常第二階段爬升能力的要求會限制航機的最大起飛重量。但是在接近海平面高程與正常溫度的機場，則通常是跑道長度限制最大起飛重量。

除了跑道長度與爬升能力的要求之外，簽派員還必須檢查其他因素以決定最大起飛重量：航路爬升性能、降落性能、輪胎與剎車限制，但是這些因素通常很少是關鍵因素。除此之外，離場程序航路下方地區對於噪音的敏感程度，亦是調整離場 4 個階段的影響因素。

綜合前述起飛與離場的討論，影響航機最大容許起飛重量(maximum allowable take-off weight)包含：

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.
- 6.
- 7.
- 8.

4.4 進場