

# Flight Engineering

CHAPTER

2

## 航空氣象與 大氣概況

### 2-1 航空氣象

近年來，極端天氣所造成的事故頻傳，也引起科學家、政府機關、民間組織的高度關注，如熱浪、霸王寒流、暴雨、超級颱風等劇烈天氣，已經嚴重危害到人們的生活品質。2011年新北市新店出現龍捲風，2015年台南也出現了龍捲風，2018年3月鋒面過境時，彰化地區還降下冰雹，極端天氣距離我們並不遙遠。台灣極端氣候與降雨的現象與聯合國評估報告指出的地球升溫風險極為一致，該報告指出，未來發生如熱浪、豪大雨、乾旱、颱風強度增加、海平面升高等極端事件的機率高達66%至90%，再加上全球經濟發展與人口成長趨勢，未來災害的次數、受影響人口與災害損失將會大幅增加（聯合國 - 極端氣候，2019）。即使有再先進的技術，也有無法突破的瓶頸，如突發性的天氣現象、颱風的移動路徑等，科學家還無法完全掌握，尤其是小尺度的天氣現象。對於長期的氣候趨勢，科學家還有一定的掌握能力，例如他們透過什麼現象或標準去判別今年是聖嬰年、反聖嬰年？對氣候的影響又會如何？尤其在氣候變遷的當下，這些資訊愈來愈受重視，對台灣的氣候又會有什麼影響？對飛行器之飛航安全是否可能造成激烈的衝擊？

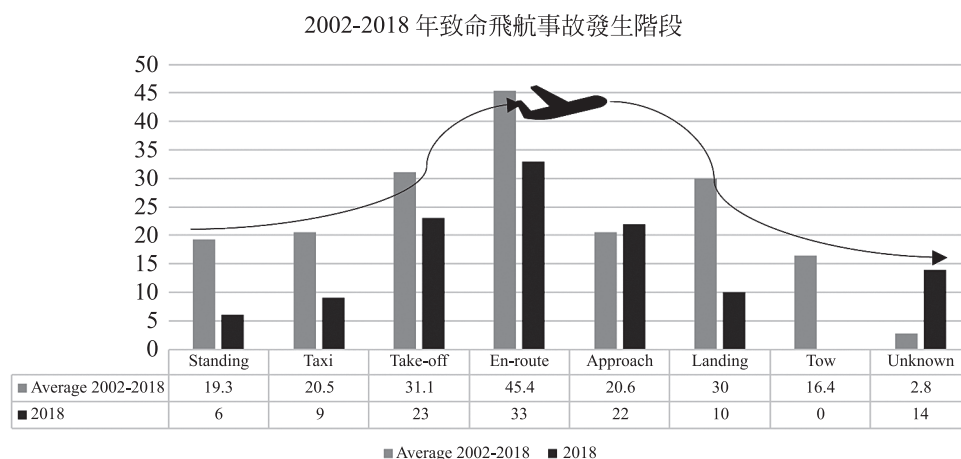
天氣簡單地指的是在特定地點和時間的地球上的空氣狀況。科學和技術的應用是爲了預測未來時間內大氣狀態由於其在人類生活中的有效性而非常重要。今天，天氣預報是通過收集有關大氣現狀的定量數據，並利用對大氣過程的科學認識來預測



大氣將如何演變。大氣的混沌特性意味著需要大量的計算能力來解決描述大氣條件的方程式。這是因為對大氣過程的理解不完全，這意味著當前時刻與預測時間之間的時間差異增加時，預測變得不那麼準確。天氣是一個連續的，數據密集的，多維的，動態的和混亂的過程，這些屬性使天氣預報成爲一個巨大的挑戰。天氣預報是一種概率系統，未來的結果很難提前說明。天氣取決於多種氣象條件，如溫度、氣壓、濕度、風流速度和方向、雲高和密度以及降雨量，任何參數的更改都可能對未來的天氣產生或多或少的影響。天氣預報是一種實時系統，用於多種應用，如機場、農業、電力、水庫和旅遊業。因此，天氣預報的準確性對決策至關重要。

惡劣天氣是影響飛機運行，增加運行成本並導致事故的主要原因；能提升不良天氣的預報性能，它將絕對有助於飛 計劃、備用油、飛 中決策與機場作業。隨著值預報模式和電腦計算能 的發展，目前我們對綜合規模天氣系統的發展、移動和消散等 爲已有相當 錯的預報能，然而對霧、低雲霧、熱 雨和地面風場等牽涉到邊界層非線性過程的天氣系統，模型的預測結果與實際天氣通常會有很大的差異。終端機場預測是否能掌握這 天氣，正是決定航空作業是否會延遲或關閉的重要關鍵，因此這個問題已成爲近 各國相關單位投注最密集及最多資源的研究目標。

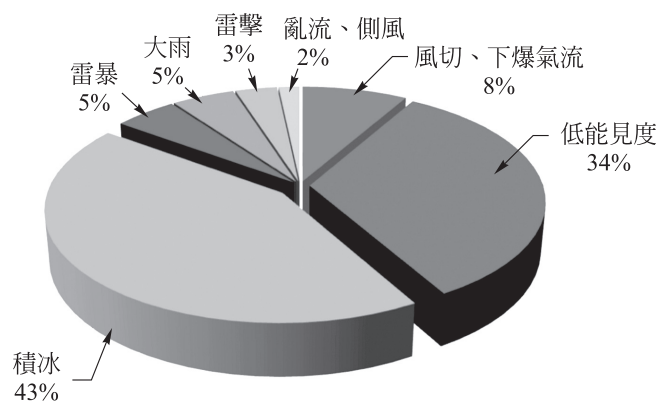
根據以往飛安數據統計，天氣因素直接或間接造成飛安事故的比例已超越三分之一以上，在飛行中，最有可能發生事故是起飛和降落階段，在 2002 年至 2018 年的死亡總數共占了 74%，比巡航（水平飛行）階段和滑行階段高出相當多倍。



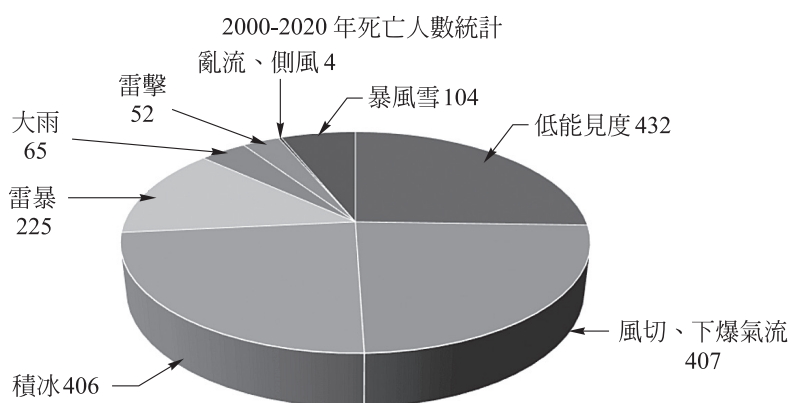
▲ 圖 2-1-1 在飛行中，最有可能發生事故是起飛和降落階段



最直接影響飛航安全和飛機操作之航空氣象因素可以概括為風、雲、溫度、能見度、氣壓、降水、密度和其他重大顯著危害天氣例如亂流、飛機結冰、低空風切、雷暴雨引發下爆氣流、濃霧所引起的低能見度等。其中，與天氣相關的致命飛航事故中，以飛機遭遇積冰(43%)及低能見度(34%)最多，分別造成406人及432人罹難，雷暴、風切及下爆氣流也是飛機在起降階段的危險天氣，2000年至2020年造成的事故共有600多人罹難。下爆氣流為雷雨胞下方常出現的下衝風，飛機通過這個區域時會因風向及風速迅速改變，讓飛機升力不夠而往下沉，若在降落階段是相當危險的。



▲ 圖 2-1-2 與天氣有關的致命航空事故



▲ 圖 2-1-3 不同天氣因素導致之死亡人數

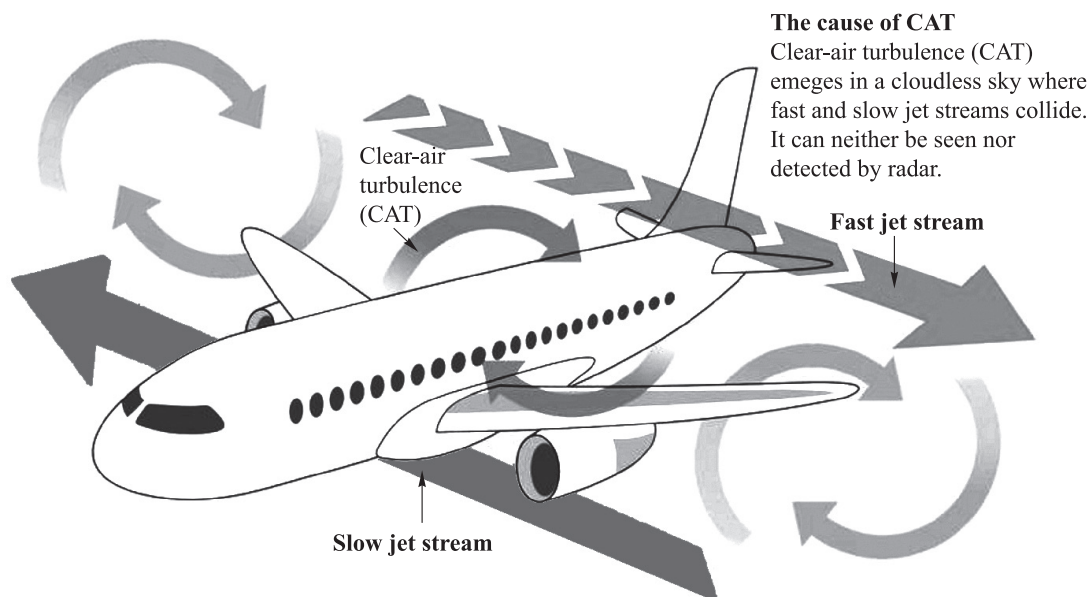


## 2-2 影響飛航安全之天氣

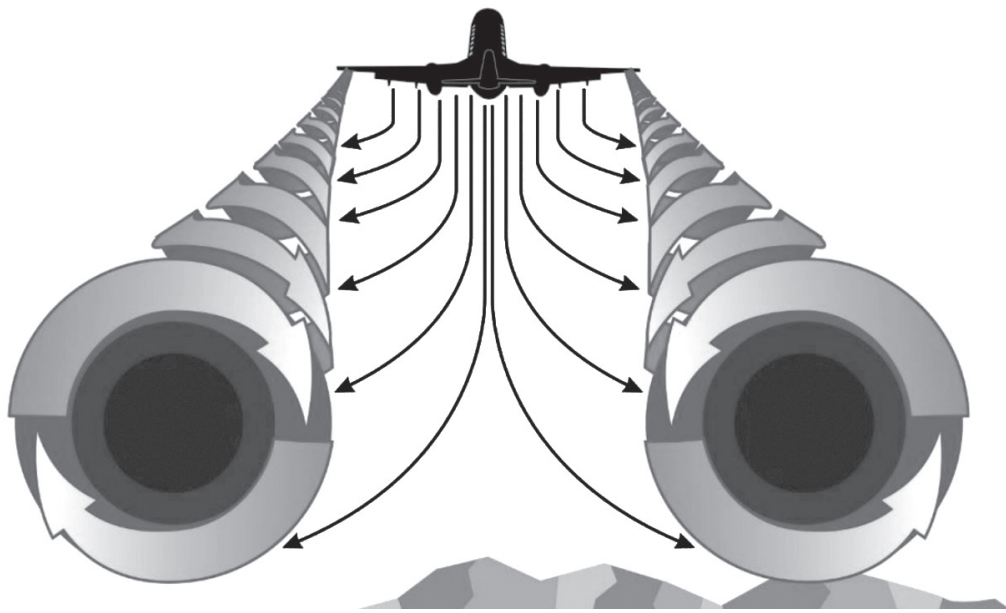
### 1. 大氣亂流 (Air Turbulence)

所謂大氣亂流，即當空氣不規則劇烈運動時，能使飛機發生一連串顛簸與震動之現象，其強度可視空氣穩定性而定。凡是氣流發生任何細微或垂直流動，只要能使航機飛行高度或路線突發劇變者，均可稱為亂流。大氣亂流可由對流、表面摩擦、重力波 (Gravity Wave) 與在亂流層中之平均氣流等四種主要來源獲得能量。

亂流生存於不同天氣情況中，甚至無雲時亦會發生，其存在區域或大或小，或高至 4,000 呎，或低至靠近跑道，影響飛機起降。大氣中各種類型之亂流擾動，均能影響飛行操作、航空安全與乘客舒適等。小範圍局部氣流擾動，可使飛行中航機突然上抬或下衝，致乘客有不適之感；大規模強烈氣流起伏翻騰，使航機顛簸震動，最嚴重者可導致飛機結構損壞。因大氣亂流與各型天氣情況有關連，故明瞭各種亂流擾動之成因與影響，將有助於避免或減少在飛機起降及飛行時遭遇亂流之危險。



▲ 圖 2-2-1 大氣亂流的影響



▲ 圖 2-2-2 機翼尖端旋渦產生亂流之現象。

大氣亂流無法直接測量，航空氣象預報人員知道產生亂流之地形及天氣徵兆，但對寶貴之天氣徵兆僅為少數定時而地點遙遠之報告，故氣象預報員在預報亂流方面，較其他天氣預報更為需要依賴飛行員之飛機氣象報告。因此多年來航空科學家們曾致力於解決之問題，係用客觀方法決定亂流之強度，其他各天氣狀況與亂流之關連性，以及制定表示亂流程度之通用文字。

## 2. 晴空亂流 (Clear Air Turbulence)

晴空亂流者，通常表示航機在無雲天空飛行時發生顛簸 (Bumpiness)，甚至上下翻騰現象之亂流。即使在卷雲中發生之亂流，亦稱為晴空亂流。一般所謂晴空亂流，大多指高空噴射氣流附近之亂流，即高空風切亂流 (High Level Wind Shear Turbulence)，就像噴射氣流大都指高空噴射氣流而言。當寒潮爆發，衝擊南方之暖空氣時，沿冷暖空氣交界處噴射氣流附近一帶之天氣系統加強，晴空亂流在此兩相反性質氣團間以擾動能量交換之方式發展，冷暖平流伴著強烈風切在靠近噴射氣流附近發展，尤其在加深之高空槽中，噴射氣流彎曲度顯著增加之地方，特別加強發展，當冷暖空氣溫度梯度最大之冬天，晴空亂流則最為顯著。

晴空亂流最容易出現的位置，是在噴射氣流冷的一邊 (極地) 之高空槽中，另外較常出現的位置，是在沿著高空噴射氣流而在快速加深中之地面低

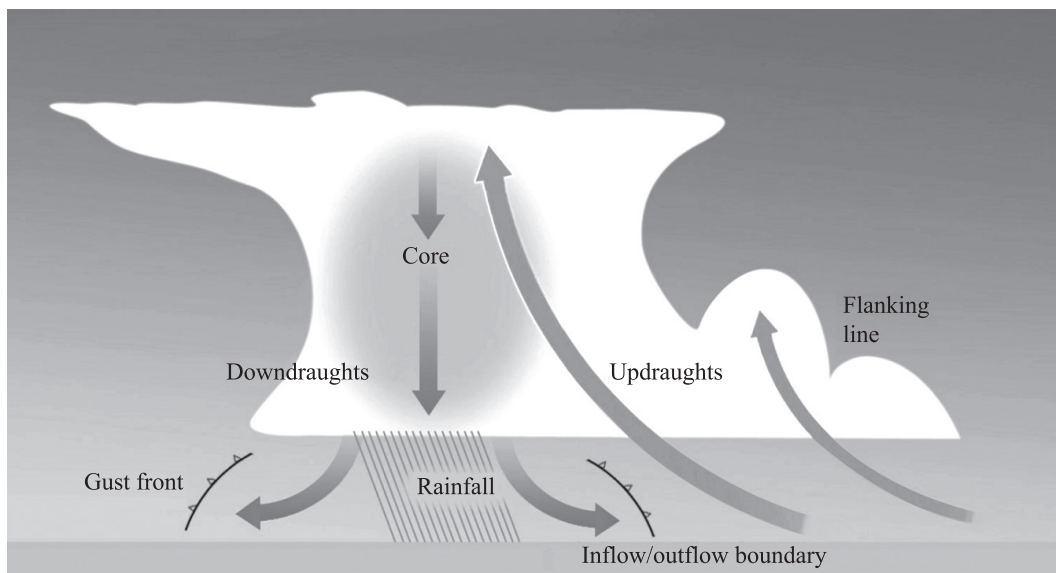


壓槽之北與東北方。有時即使沒有發展良好的噴射氣流存在，但在加深低壓、高空槽脊等高線劇烈彎曲地帶以及強勁冷暖平流區域之風切區，仍會遇到晴空亂流。此外山岳波也會產生晴空亂流，其垂直範圍可自山峰以上至對流層頂上方 5,000 呎之間出現，水平範圍可自山脈背風面向下游延展 100 哩以上。有時看起來似乎不可能出現晴空亂流，仍然遭遇亂流，是因為強風把一團擾動空氣帶離其源地，在下風區出現亂流，但其強度將大為減弱，當晴空亂流預報區被伸展至某一方向，即表示亂流從源地飄向下風區。

晴空亂流預報之空間體積，屬於塊狀散佈，與整個航空區域體積相比，實在藐小，但與局部亂流實際範圍相比，仍屬相當廣大，飛航於亂流預報區中，平均只有 10 ~ 15% 的機率遭遇到輕度擾動之亂流，大約有 2 ~ 3% 的機率需要作機艙安全措施。晴空亂流的頻率已有增加，推測可能是全球暖化效應。在《自然氣候變化》期刊中，雷丁大學的保羅·威廉斯 (Paul William) 及東英吉利亞大學的 Manoj Joshi 提出了若大氣中的二氧化碳是工業革命前的二倍，中等到強烈的晴空亂流會較現在增加 40% 至 170%。

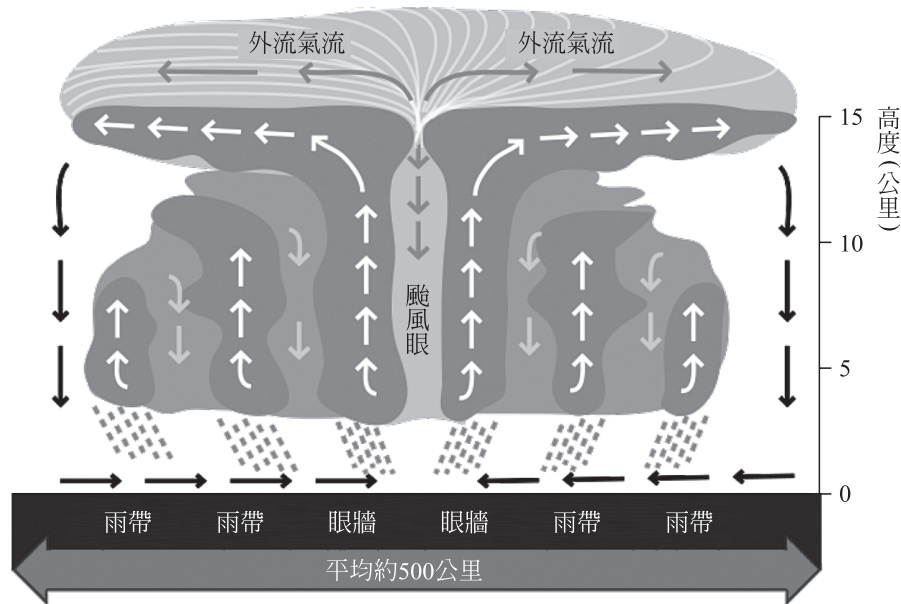
### 3. 雷雨 (Thunderstorm)

雷雨或稱雷暴，係由積雨雲所產生之一種地區性風暴，代表最強烈之大氣對流現象。經常伴有閃電、雷聲、強烈陣風、猛烈亂流、大雨、偶或有冰雹等。對飛行操作威脅最嚴重之惡劣天氣，諸如亂流、下衝氣流、積冰、冰雹、閃電與惡劣能見度等項。熱力對流 (Thermal Convection) 與抬舉作用 (Dynamic Lifting) 造成初期之上升氣流，上升氣流之氣態水氣因絕熱膨脹冷卻而凝結成冰或冰晶之積雲。凝結作用放出之潛熱會抵銷飽和上升氣流之部份絕熱冷卻，使得積雲中空氣更具有浮力，而加強上升氣流，浮力更帶動上升氣流快速吸取更多水氣投入雲中，並增加水滴碰撞結合之機會，均會加速積雲之發展。由於塔狀積雲向上增長，濕絕熱冷卻之繼續進行上升，直至雷雨雲頂層溫度低於其周圍空氣溫度為止。溫度差別與水滴或冰晶重量增加，上升氣流再無力托住，且也阻礙氣流之上升。較大水滴不克懸浮空中，而致降落地面，即為降雨。雨滴在降落途中，因為摩擦所生拖曳力之關係，便帶著大小水滴及充分水氣之周圍空氣也隨著下降，並因氣壓增加，再加強下降氣流，於是在降雨區造成強烈之下衝氣流。這種濕冷之空氣到達地面時，迅速向外流出，而在與周遭較暖空氣之接觸面附近形成強烈之陣風鋒面。



▲ 圖 2-2-3 雷雨形成之現象

飛機如飛入猛烈雷雨中，必遭致危險性之困擾，機身被措手不及之投擲轉動，時而上升氣流將其抬高，時而有下降氣流行將其摔低，冰雹打擊，雷電閃擊，機翼或邊緣積冰，雲霧迷漫，能見度低劣，機身扭轉，輕者飛行員失去控制飛機之能力，旅客暈機發生嘔吐不安現象；重者機體破損或撞山，造成飛航事故。大多數雷雨均兇猛異常，飛機偶或遭遇，應設法避開為上策，如實不可能，則提高其飛行高度。更有進者，如雷達螢幕上發現雷雨雲頂至六、七萬呎者，可採取危險性較少之途徑飛行。據統計全球每天約有 44,000 個雷雨發生，以熱帶地方佔大多數，中緯度地帶大概自晚冬至初秋間雷雨比較頻繁，隆冬季節雷雨偶而與強烈冷鋒伴生者，但機會不多，炎夏季節雷雨能遠達北極區。



▲ 圖 2-2-4 熱帶氣旋形成之現象

#### 4. 視程障礙與低雲幕 (Poor Visibilities and Low Ceilings)

雲幕係指天空最低雲層或視障 (Obscuring Phenomenon) 之垂直高度，而所謂雲層係指雲量在八分之五以上之“裂雲 (Broken)”和“密雲 (Overcast)”；視障係指整個天空朦朧昏暗看不清之現象。低雲幕與低能見度是造成多數飛機失事原因之一，它們對於飛機起飛降落之影響，比其他惡劣天氣因素更為多見。

能見度係對著地面上明顯的目標物，以正常目視所能辨識之最大距離。通常氣象觀測所指的能見度係指在地面上任一水平方向之最低能見度，飛航應用上除了需要知道地面能見度之外，尚須飛行能見度 (Flight Visibility or Air to Air Visibility) 與斜視能見度 (Slant Range Visibility) 或稱近場能見度 (Approaching Visibility)。此三種能見度有時不盡相同，通常地面能見度最容易觀測，而飛行能見度與斜視能見度尚無儀器和實際測定法則，目前僅能從飛行員報告中獲知這些資料。當飛機 (尤其是噴射機) 在低雲幕和低能見度下降落時，位在近場區域之斜視能見度就非常重要了。

跑道視程 (Runway Visual Range ; RVR) 係指飛機駕駛員在跑道中心線上，能夠看見跑道面標線或跑道邊界，能辨識跑道中心線燈光之最大距離。跑道能見度 (Runway Visibility) 為飛行員在跑道上無燈光或中等亮度無距焦





燈光下所能見到之最大距離。目前國際民航組織 International Civil Aviation Organization (ICAO) 規定當機場能見度低於 1500 公尺時，飛機起飛或下降能見度改以機場跑道視程為起降標準，除了可確保飛機起降安全之外，並可提高跑道使用率。由於觀測員無法在跑道上觀測，因此依 ICAO 規定，在距離跑道中心線 120 公尺以內，跑道兩端降落區和跑道中段位置之跑道側邊，各裝設有跑道視程儀，利用跑道燈光、背景光及消光係數等三項計算跑道視程，換言之，跑道視程係在強烈跑道燈光下測得之跑道水平能見度數值，它與飛行員在飛機上斜視所見之能見度是有所不同。

#### 5. 飛機積冰 (Aircraft Icing)

飛機積冰，指飛機飛經冷雲層 (Supercooled Clouds) 或雨雪區域，於適當條件下，機翼、機尾、螺旋槳或其他部分，常積聚冰晶，多者厚至數吋，影響飛機操作甚巨。雖然航空工程科學不斷進步，儀器設備不斷更新，企圖克服飛機積冰之困擾，可是氣溫在冰點以下，水氣容易凍結之事實，仍然構成飛機操作之危險。在發展儀器飛行 (Instrument Flight) 以前，因強度積冰通常發現於惡劣天氣中，飛機常避開惡劣天氣飛行，所以飛行員絕少遭遇飛機積冰問題。近年來，航空儀表更加精密，儀器飛行全面採用，飛機常在最惡劣天氣之雲層中飛行，則飛機積冰之嚴重情勢仍舊存在。

飛機積冰最能影響機翼機舵、螺旋槳、油箱、空速管、天線、擋風玻璃與駕駛艙罩、機體以及其他顯露之部分。在兩翼及方向舵上積冰者，大多在翼舵之前緣，但有時可擴展至半個翼面。在機體及天線上積冰者，有時可積聚甚厚。螺旋槳上積冰，較難沉聚，因螺旋槳轉動過速，冰體隨積隨脫，但極堅固者仍能停留於螺旋槳葉上，使螺旋槳失去原有之平衡。美國聯邦航空總署 (Federal Aviation Administration ; FAA) 與美國軍民航空氣象單位達成協議，訂立飛機積冰強度標準，統一實施，將其分為四種等級，供航空人員研究與認識每一強度等級之冰晶累積率與對航機構成之影響。尤應注意者，當積冰強度增加時，飛行操作應變時間如何被縮短，如果積冰非常快速，飛行員幾乎沒有充裕時間，對飛行操作應變措施和作成決定。飛機上雖具備除冰與防冰設備，可於飛行時有備無患，但不能保證解決所有飛機積冰之一切問題，所以非必要，飛機盡可能避開積冰現象最為上策。



## 參考資料

- Ref.1 : Chen, C. J., Huang, C. N., 2021, March 26, “Application of a Deep Learning Neural Network to Aviation Weather Forecasting,” 2021 Aviation and Maritime Conference, 2021, pp. 413-427. (ISBN: 978-986-06557-2-8) [MOST 109-2410-H-309-003-]
- Ref.2 : Chen, C. J., Ou, Y. R., 2020, March 27, “Extreme Weather and its Effects for Aircraft Operation and Aviation Safety,” 2020 Aviation and Maritime Conference, 2020, pp. 1-18. (ISBN: 978-986-6358-75-3) [MOST 108-2813-C-309-007-H]
- Ref.3 : Chen, C. J., 2019, March 29, “A study on Application of Artificial Neural Network for Aviation Weather Forecasting,” 2019 Aviation and Maritime Conference, 2019, pp. 146-163. (ISBN: 978-986-6358-67-8) [MOST 108-2813-C-309-007-H]
- Ref.4 : 蕭華、蒲金標，航空氣象學，秀威資訊科技出版社，2008。
- Ref.5 : [http://www.chinadaily.com.cn/hkedition/2017-10/20/content\\_33474331.htm](http://www.chinadaily.com.cn/hkedition/2017-10/20/content_33474331.htm)
- Ref.6 : [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_90-23G.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_90-23G.pdf)
- Ref.7 : <https://www.abc.net.au/news/2016-11-15/cross-section-of-thunderstorm-with-wind-circulation---bom.jpg>
- Ref.8 : <https://pweb.cwb.gov.tw/PopularScience/index.php/weather/94-%E6%97%8B%E8%BD%89%E7%9A%84%E6%B0%A3%E6%B5%81%E2%80%94%E9%A2%B1%E9%A2%A8>

### 2-3 大氣的溫度、壓力、密度與高度的關係

飛機在地球的大氣層內飛行，我們稱之為航空 (Aviation) 在大氣層之外運作例如太空船或是衛星的領域，我們稱之為太空 (Space) 或是外太空 (Outer Space)，爲了了解飛機在大氣層內運行，我們必須了解大氣層內空氣的特性，這包括了溫度、壓力以及密度、黏滯度的變化，因爲氣象的關係，大氣的概況是千變萬化的，因此我們先設定了一個標準狀況 (Standard Condition) 這個標準狀況是假設空氣這個流體滿足或適合下列兩個公式：一個是理想氣體公式 (Equation of State of Perfect Gas) 或簡稱為 (Perfect Gas Law)。





其中

$$\rho g dh = (\text{密度}) \times (\text{體積}) = \rho g(1)(1)dh = \text{此流體之重量}$$

則由上式可得：

$$dP = -\rho g dh$$

即為前述之水靜力平衡 (公式 2-2)。

請注意，公式 2-2 可應用至任何流體 (液體或氣體)。

本公式為一微分方程式，表示極小高度變化即引起極小的壓力變化。

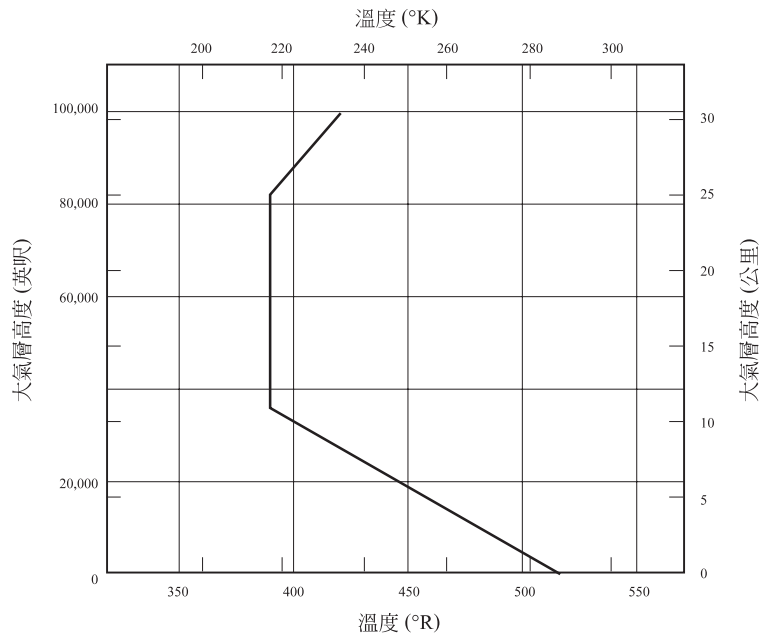
為了積分方便，我們再假設地球的重力加速度  $g$ ，在大氣層內為一常數而等於其  
在海平面的數值  $g_0$ ，事實上，由牛頓的重力定律可證明  $g$  是與其距地球中心的距離  
的平方成反比，假如地球半徑為  $r_0$ ， $h$  為大氣層的的高度則

$$g = g_0 \left( \frac{r_0}{r_0 + h} \right)^2$$

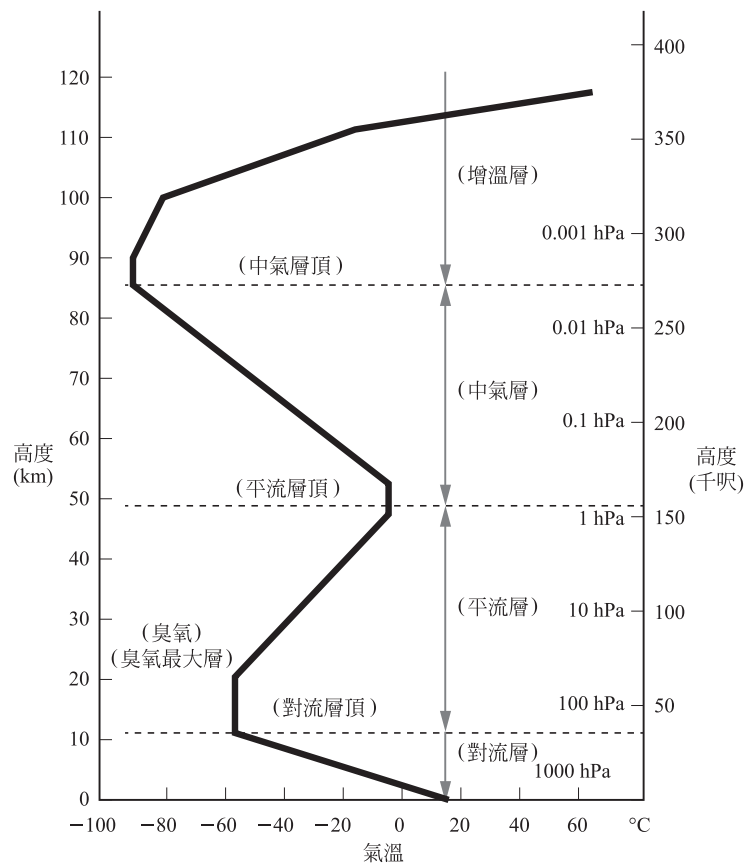
但因  $r_0$  比  $h$  大得太多，故假設  $g = g_0$  是相當可靠的。如此則公式 2-2 可重寫為：

$$dP = -\rho g_0 dh$$

如今我們有了空氣壓力與高度的關係，我們另外要找的是溫度與高度的關係。  
這個關係必須由實驗而取得，這方面美國標準局做得最多，是利用氣象汽球或儀器  
測得的如圖 2-3-2 所示是大氣溫度及高度的變化，這完全是測量的結果，在整個的大  
氣層中，(約 47 公里或 154,000 英尺厚)溫度的變化可以大約分為三區域，第一區域  
稱為對流層 (troposphere) 大約是自海平面到 11 公里 (36150 ft) 高處，此區域內大氣  
溫度是由海平面溫度成直線遞減，然後 11 公里高處再向上至差不多 25 公里 (82,300  
ft) 處其溫度保持不變，此區域稱之為同溫層 (Stratosphere) 過了 25 公里高處再向上，  
則又到了另一梯度區 (Gradient Region) 這時溫度則隨高度成直線增加直至 47 公里處  
(154,000 ft)。圖 2-3-2 僅標明至 100,000 ft 高度，這已是足夠了，因為大部份飛機的  
飛行高度均在 60,000 ft 以下，當然一些高空偵察機例如 U-2 或是 SR-71 等可以超過  
100,000 ft，但一般而言，圖 2-3-2 的資訊是足夠了。



▲ 圖 2-3-2 美國標準大氣層溫度隨高度之變化



▲ 圖 2-3-3 大氣分層與平均氣溫之垂直分佈



有了這些公式及溫度 - 高度關係，我們就可以計算大氣層中任何一點的大氣概況了，我們來看看如何進行這些計算。

首先，合併公式 2-1 及公式 2-2

$$dP = -\rho g_0 dh \text{ 及 } P = \rho RT$$

$$\frac{dP}{P} = -\frac{\rho g_0 dh}{\rho RT} = -\left(\frac{g_0}{RT}\right) dh$$

爲了積分方便，必須找到  $T = Th$  之關係式。

我們先考慮圖 2-1-2 中的恆溫區 (Stratosphere)，此區域內  $T$  爲一垂直直線的一常數，請注意，上式  $g_0$ 、 $R$ 、 $T$  這時皆爲常數，可以放在積分外則得：

$$\int_{P_1}^P \frac{dP}{P} = -\frac{g_0}{RT} \int_{h_1}^h dh$$

取積分，則得

$$\ln \frac{P}{P_1} = -\frac{g_0}{RT} (h - h_1)$$

上式中， $h_1$  爲恆溫區內某一點，而  $h$  則爲較高處之另一點，如此在此區域內任何高處，36,150 ft 至 82,300 ft 之間，其壓力爲

$$\frac{P}{P_1} = e^{-(g_0/RT)(h-h_1)} \quad (2-3)$$

由理想氣體公式，可得

$$\frac{P}{P_1} = \frac{\rho T}{\rho_1 T_1} = \frac{\rho}{\rho_1}$$

所以 
$$\frac{\rho}{\rho_1} = e^{-(g_0/RT)(h-h_1)} \quad (2-4)$$

公式 2-3 及公式 2-4 可以計算在大氣層中恆溫區之壓力及密度與高度之變化概況。



再看看大氣層中的兩個溫梯度區，一個是直線式遞增，一個是直線式遞減，可以書寫成：

$$T = T_1 + \alpha(hh_1)$$

這裡  $\alpha = \frac{dT}{dh}$  表示每單位高度的變化引起之溫度變化，也就是這兩直線的斜率，為一常數，有時稱之為遞變率 (Lapse-rate) 遞增或遞減率。

$h_1$  及  $T_1$  為兩梯度區內之某一參考點。 $T$  及  $h$  則為此區域某一更高處之點，即須計算者。

因為  $dh = \frac{dT}{\alpha}$

及  $\frac{dP}{P} = -\left(\frac{g_0}{RT}\right)dh$

所以  $\frac{dP}{P} = -\frac{g_0}{\alpha R} \frac{dT}{T}$

取積分，則得

$$\ln \frac{P}{P_1} = \frac{g_0}{\theta R} \ln \frac{T}{T_1}$$

或  $\frac{P}{P_1} = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-g_0/\alpha R}$  (2-5)

要找密度的關係必須再用理想氣體公式 2-1，

$$\frac{P}{P_1} = \frac{\rho T}{\rho T_1}$$

代入公式 2-5，得，

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{\left[\left(\frac{g_0}{\alpha R}\right)+1\right]} \quad (2-6)$$



公式 2-5 及公式 2-6 可以用來計算壓力及密度與高度的變化在兩個梯度區內 (Gradient Region)。首先必需計算梯度區內直線之遞增或遞減率，或者是這兩直線之斜度自圖 2-1-2 中，我們可以很容易求出在第一梯度區。

$$\begin{aligned} \text{或} \quad \alpha &= -0.0065^\circ\text{K Per Meter (公制)} \\ &= -0.00356^\circ\text{R Per Foot (英制)} \end{aligned}$$

第一梯度區範圍，海平面至 11019 m 或 36,150 ft 處。

我們可以依同法計算第二梯度區內壓力，密度與高度之變化，由圖 2-1-2 求出，然後由公式 2-5 及公式 2-6 求得該區域之  $P$  及之數值。第二梯度區之範圍為 82,300 ft 至 154,000 ft 高度。

在圖 2-1-2 中海平面 ( $h = 0$ ) 狀況常用為參考點；標準海平面狀況為：

$$\begin{aligned} P_0 &= 1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 2116.2 \text{ lb/ft}^2 = 14.69 \text{ lb/in}^2 \\ \rho_0 &= 1.225 \text{ kg/m}^3 = 0.002377 \text{ slug/ft}^3 \\ T_0 &= 288.16 \text{ K} = 518.69^\circ\text{R} \end{aligned}$$

上述數值可作為第一梯度區之參考值，然後用圖 2-1-2 求得  $T$  與  $h$  之直線關係計算出恆溫區之起點  $T = 216.6\text{K}(289.99^\circ\text{R})$ ，在  $h = 11,019 \text{ m}(36,150 \text{ ft})$ ，用這些數值及公式 2-4 及公式 2-5 計算第一梯度區內之  $P$  及  $\rho$  變化，另外在  $h = 11,019 \text{ m}$  用作恆溫區之終點  $h = 25.1 \text{ km}$ ，這裡又成為第二梯度區之起點 (參考點)，再用公式 2-5 及公式 2-6 計算  $P$  及  $\rho$  在第二梯度區之變化直至  $h = 47 \text{ km}$  為止，如此則整個大氣層中之航空領域皆可計算出其壓力、溫度及密度與高度之變化。

依上述之計算方法，大氣層中之各項特性數值經美國國家標準局 (U.S.N.B.S) 公佈發表摘錄於附錄 A 中其表 A-1 是以公制刊出，表 A-2 是以英制刊出。此兩表中又加添了音速 (Speed of Sound) 及動黏滯度 (Kinematic Viscosity)，後者對計算雷諾數 (Reynolds Number) 非常方便。例如：

$$\begin{aligned} R_N = \text{雷諾數} &= \frac{(\text{飛行速度})(\text{飛行物尺寸})}{\text{動黏滯度}} \\ &= \frac{V \cdot l}{\nu} = \frac{(\text{ft/s})(\text{ft})}{(\text{ft})^2/\text{s}} \text{ 或 } \frac{(\text{m/s})(\text{m})}{\text{m}^2/\text{s}} \end{aligned}$$

其中  $\nu$  為動黏滯度，定義為  $\nu = \mu / \rho$ ， $\mu$  為一般稱之為黏滯度 (Viscosity)。





## 參考資料

- Ref.1 : Shevell, Richard S. “Fundamentals of Flight” second Edition, prentice-Hall, Inc. New Jersey, 1979 ◦
- Ref.2 : Anderson, John D. Jr. “Introduction to Flight” McGraw-Hill, New York, 1978 ◦
- Ref.3 : Minzner, R.A. “The ARDC Model Atmosphere” , AF-CRCTR-SO-267, 1959 ◦

