

全彩修訂版

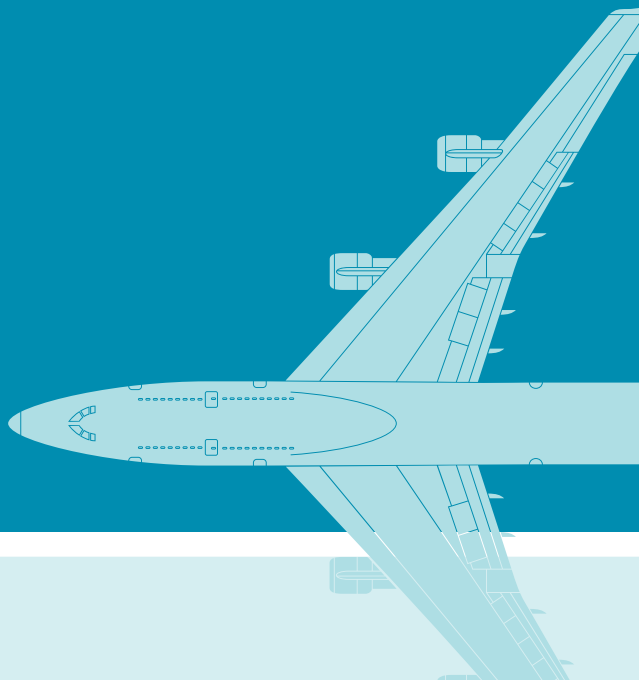
圖解版

# 飛機的構造 與飛行原理

探討引擎與機身結構、航空力學、飛行狀況及飛安機制

中村寬治◎著  
簡佩珊◎譯

晨星出版



## 重拾對於飛機的旺盛求知慾

「民航機可以在空中翻轉嗎？」「噴射引擎是如何出力的？」  
「從飛機看窗外明明都是雲霧，為什麼還有辦法降落呢？」「為什麼在起飛和降落時，必須把椅背豎直和桌子歸位呢？」……在搭乘飛機的同時，你是不是也會有這樣的疑惑呢？要不要和我們一起動動腦，想一下這些看似單純問題的解答呢？

在孩提時，我們常常會追著大人問「為什麼？為什麼？」問得大人暈頭轉向，但在我們慢慢長大之後，卻不知不覺地也漸漸遺忘了當時旺盛的求知慾。本書將以這些已被遺忘的「為什麼？為什麼？」為基礎，解答關於飛機的種種問題。

為了解答這些疑問，本書將以底下幾項為重點進行解說：

- 即使犧牲嚴密性，也要讓大家能夠用感受的方式理解。
- 為了以「百聞不如一見」的方式學習，將以圖解方式說明。
- 不只提供計算公式，更讓大家藉由實際的數值了解狀況。
- 讓大家從身邊的例子開始思考。

首先在第1章當中，將提出升力和浮力的差別，並且以之所以會產生升力的原因為研究題材。關於升力的發生原因有很多種說法，但在本書中將單純把升力當作是空氣的反作用力來進行解說。我會想這麼做，是因為比起大量地堆疊專業術語，我認為讓大家能夠用直覺的方式來理解相關的問題更為重要。

第2章將會提到飛行器和飛機的差異，以及調查為什麼沒有單引擎飛機的理由等。此外，在本章中探討音速和飛機的關係也是其中相當重要的課題之一。

第3章則進一步說明飛機的構造及系統。為什麼說是飛機的系統呢？這是因為飛機裡有相當多裝置都是有系統地相互連接，才使得飛機能夠在天空中飛行。這個為了使飛機能夠飛上天的系統，只要有一

---

個裝置故障就會連帶影響整體運作，所以每個裝置都有好幾層的備用模式。雖然說了解這些備用模式的架構也是相當有趣，但在此，主要還是將重點放在設置這些備用模式的理念上。

接著，在第4章將從噴射引擎是如何發出動力的、它的大小大概是如何來進行解說，並盡可能地用接近實際數值的東西來做運算，讓大家能夠感受到它力量的大小。

第5章則從實際上曾在空中航行過的人的觀點，講解有關飛機運行的相關話題。在飛機實際的飛行中，了解實際數值也是很重要的。因此，爲了讓大家能夠實際體會飛機在飛行時的力量關係，在本書中不只是提出公式，而是利用實際數值將其力量關係運算出來，讓大家理解飛行時各自不同的力量大小。

第6章的主要內容是針對飛機的安全對策進行說明。每架飛機都有根據最糟情況所設置的緊急系統，才能安心地在天空航行著。因此，在搭飛機時總有很多注意事項，或許大家會覺得搭飛機比搭其他交通工具還要麻煩，但是從風險管理的觀點來看，這些規定都是相當重要的。

當你讀完本書，下次再搭飛機時，如果能想起本書的內容並發出「原來如此！」的共鳴，那就是本書達成目的了。

飛機的工作就是在天空中飛行，爲了安全且確實地實踐這份工作，需要相當多的事前準備。包括調查準備事項，以及探討其成因，其實都是相當有意思的事情。我衷心期盼這本書能夠成爲各位讀者愛上飛機，並進而思考飛機大小事的起點。







## 航空器和飛機之間的差異

飛機是運用升力和推力飛行的航空器

車輛，是電車、汽車等利用車輪在地面上移動的運輸機器總稱。在道路上行駛的車輛包含汽車、摩托車、輕量車（如腳踏車、拖車）和無軌電車等。其中，汽車又可細分為大型汽車、中型汽車、普通汽車、大型特殊汽車、重型機車、普通機車及小貨車。

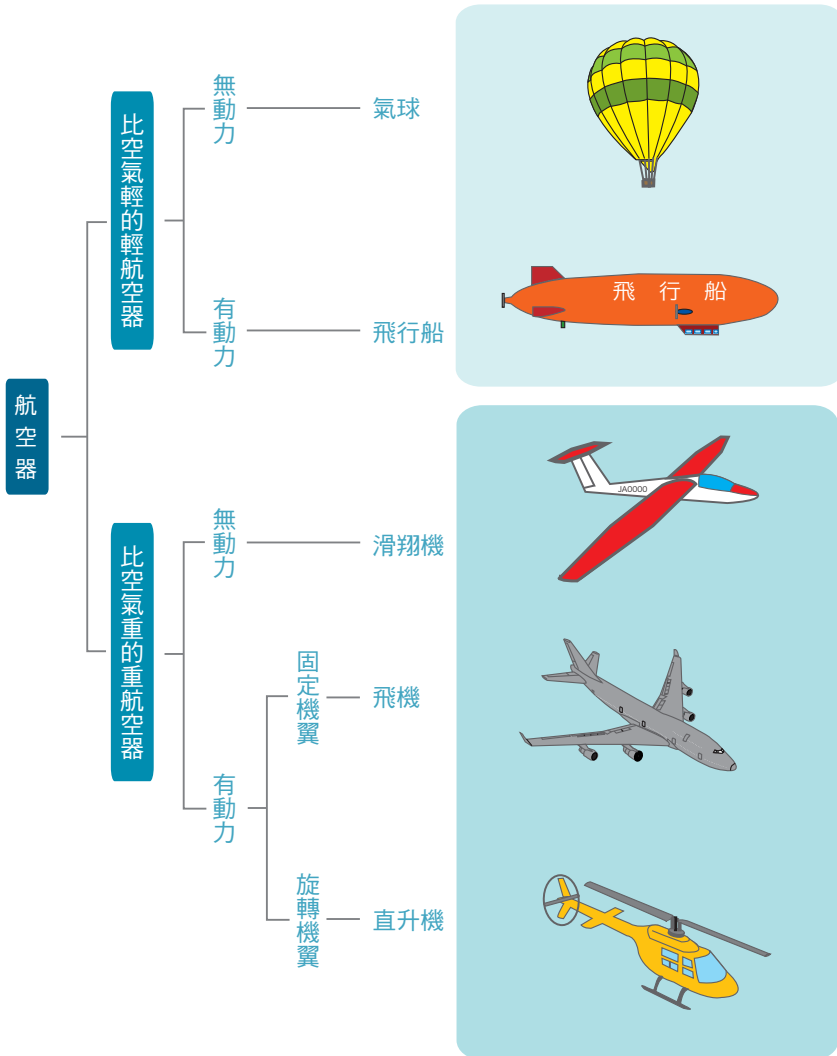
相同地，雖然在天空飛的運輸機器也都有各自的名稱，但就等於稱在陸地上移動的運輸機器為車輛一般，稱為航空器。也就是說，航空器代表了所有在天空中飛行的運輸機。如果將航空器分成兩大項，分別是輕航空器（比空氣還要輕的航空器）和重航空器（比空氣還要重的航空器）。輕航空器又包含了飛行船和氣球，重航空器則包括了飛機、直升機、滑翔機等。屬於輕航空器的飛行船是利用像是氦氣這類重量比空氣還要輕的氣體，產生浮力飛上天空，再利用動力裝置自由地在空中移動。

相較於此，氣球因為沒有推進力，所以正確來說（在日本的航空法上）它並不能列入航空器中。而屬於重航空器的滑翔機，雖然能利用升力飛行，但因為也沒有推進力，所以也不能算是飛機。此外，直升機是利用不停旋轉翅膀（螺旋槳），取代前進力以獲得升力在空中飛行。正因為它是一種轉動翅膀的航空器種，所以在日本的正式名稱不是飛機，而是旋翼機。

以上所稱的飛機，都是由自力產生前進的動力，並由固定的機翼產生升力在天空飛行的航空器。



## 各種種類的航空器



總而言之，即使單單一個航空器也可以大致分成5個種類。



## 民航機為什麼不能在空中翻轉呢？

飛機是依據用途來分類

我們都知道如果客機在空中翻轉，在內部乘坐的旅客一定會感到不舒服，因此在這一節中，將針對被製造出的客機其堅固度以及強度來進行討論。

首先，先來想一下當客機在空中翻轉時會增加多少G值。所謂G值，指的是飛機在空中突然轉換方向或降落時所產生的，將慣性力以重力加速度的倍數表現出來的數值，也稱為「負載因數」。假設飛機以時速630km的速度做了一個半徑1,000m的翻轉時，客機會受到離心力等力量影響，產生最大4G力量的作用力。若此客機的重量是200噸，它在翻轉時就會產生機身重量的4倍，也就是800噸的作用力，等於客機此時呈現的重量會變成800噸重。由於機翼為了支撐這800噸的作用力，必須產生等同800噸的升力，因此可知，此時機翼的負擔相當沉重。

但是，客機所能承受G值的最大限度（稱為負載因數上限）是2.5G。如果加上考慮安全因素的1.5倍，最後的終極負載因數上限也只有 $2.5G \times 1.5 = 3.75G$ 。因此，從客機本身的強度問題來說，要它承受飛機在翻轉最後產生的4G作用力，可說是相當困難的。順帶一提，即使客機真的能夠在空中翻轉，也會需要一種為避免全體乘客受傷而能停留在同一處的耐G套裝才有辦法。

當然，雖然客機根本不需要在天空中翻轉的能力，但是我們還是需要能夠翻轉的飛機。因此，根據耐航類別可以將飛機分成：特技A、實用U、普通N和運輸T等類型，而客機是屬於T類型。此外，不只是飛機有耐航類別，滑翔機和直升機也有同樣的耐航類別。



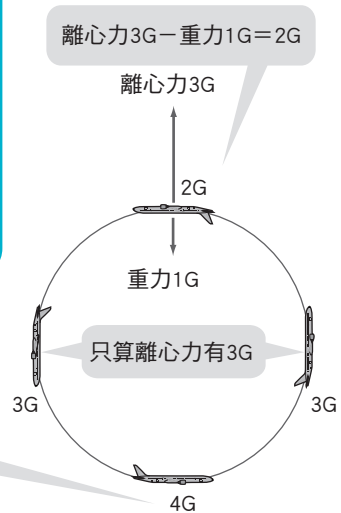
## 當飛機在天空翻轉時產生的G

從離心力 =  $\frac{\text{飛機的質量} \times (\text{速度})^2}{(\text{半徑})}$

可得知由離心力引發的G =  $\frac{(\text{速度})^2}{(\text{半徑}) \times (\text{重力加速度})}$

若代入半徑 1,000m、  
速度 630km/時 (175m/秒) 可得

$G = \frac{(175\text{m/秒})^2}{(1,000\text{m}) \times (9.8\text{m/秒}^2)} \approx 3.0$



## 飛機根據用途可分為四類

耐航類別：根據飛機的耐航性進行的分類情況。所謂的耐航性，指的是包含飛機在空中航行的安全性和可靠性所衍生出的飛機在飛行時適合飛行的程度。

飛機 特技A



- 飛機 特技A (Acrobatic Category) 適合特技飛行的飛機 (最大6.0G)
- 飛機 實用U (Utility Category) 包含可以進行急驟的飛行以及除了倒飛 (頭下腳上的反面飛行方式) 以外適合特技飛行的飛機 (最大4.4G)
- 飛機 普通N (Normal Category) 無法超越傾斜60°旋轉，適合普通飛行的飛機 (最大3.8G)
- 飛機 運輸T (Transport Category) 適合航空運輸業使用的飛機 (最大2.5G)



客機屬於「運輸T」類型。所謂的航空運輸業代表的是有償使用航空器運送旅客或貨物的運輸業 (也就是航空公司)。相對於此，另外一個航空器使用業 (進出口商) 所代表的是，有償使用航空器除了運送旅客或貨物以外，例如拍攝航空照片的飛行活動的行業。





## 飛機各個構造的作用

每個部位都缺一不可

所有的飛機不論大型或小型，大部分的構造都是一樣的：主翼、機身、垂直尾翼、水平尾翼、動力裝置、起飛著陸裝置等。接下來就來簡單地介紹一下各個部位的功能吧！

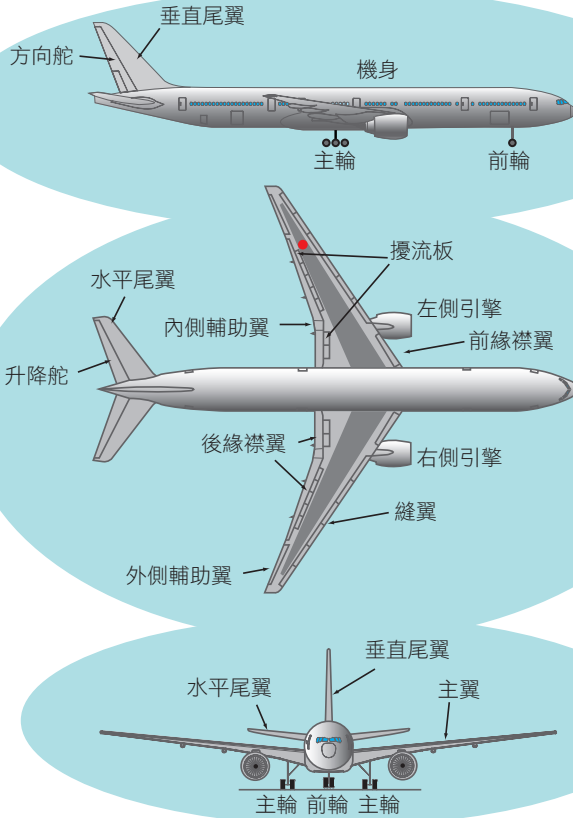
首先我們來看看飛機主翼的部分。主翼負有產生支撐飛機整體升力的重大責任，另外主翼也是有效利用翼內空間儲存燃料的燃料槽。此外，主翼還有一個部份被稱作副翼（Aileron）的輔助翼，用來在飛機轉換方向時傾斜的舵面（呈現舵狀並且會動的翼面，又稱作「動翼」）。順帶一提，由於副翼是法國人想出來的裝置所以是法文。Aileron在法文的意思裡有「羽毛尖端」或是「魚鰭」的意思。

就像尾翼還有另一個別稱叫做安定板一樣，它是讓飛機能夠平穩地在空中飛行的機翼。水平尾翼的部分有一個升降舵（Elevator）的舵面，負責在飛機上升或下降時控制機首往上或向下做俯仰運動。另外，在垂直尾翼的部分則有一個方向舵（Rudder），此方向舵不但控制飛機的飛行方向，同時在飛機轉彎時幫忙輔助、在引擎故障時負責維持方向。

機身截面呈現近似圓形，這是能夠保持機身的最佳形狀，並且也能將阻力降到最小，可說是一石二鳥的設計。由於飛機不只是在改變方向時會需要增加推進力，也必須思考因為機內和機外的氣壓差而產生的力量。因此，圓形是對抗此力量、保護機身結構的最佳選擇。另外，深海調查潛水艇「深海6500」的耐壓殼（船艙）爲了能承受680氣壓的水壓，它的形狀也是接近正圓的球形。



## 飛機的外觀及其名稱



- 主翼：產生升力時使機身安定不會左右傾斜的裝置
- 水平尾翼：負責保持機身上下方向（縱向）穩定的尾翼
- 垂直尾翼：負責保持機身左右方向（橫向）穩定的尾翼
- 副翼：控制機身左右滾轉的動作
- 升降舵：控制機身上下俯仰的動作
- 方向舵：控制機身往左右方向移動的動作
- 襟翼：起飛時讓升力加大的裝置
- 縫翼：讓機翼前緣往前突起形成空隙的裝置
- 擾流板：減低升力、增大阻力的裝置



## 機翼形狀五花八門的原因

根據飛行速度的不同而改變

從前，我們一直都認為飛機無法以超越音速的速度飛行，這是因為一旦飛機的飛行速度接近音速，通過機翼的空氣就會產生超越音速的震波，如此一來，通過機翼的紊亂空氣會使阻力迅速增高，造成飛機失速的現象，產生我們稱為「音障」的麻煩情況。但是，目前科學家已經在進行機翼形狀的研究，希望能設計出超越音障、又能夠配合飛行速度的飛機。

首先，短距離航行的螺旋槳飛機的飛行速度是500km/時，也就是50%的音速、大約0.5馬赫。只要在這種速度範圍內飛行，就不用擔心通過機翼的空氣速度超越音速，所以這種飛機的機翼構造都是簡單又穩固、接近單純長方形的矩形機翼。而這些類似螺旋槳飛機，飛行馬赫在0.7以下的速度區域內的速度則為「次音速」（Subsonic Speed）。

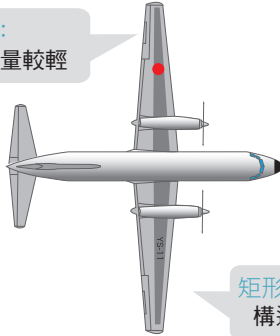
另一方面，噴射客機的飛行速度是850~900km/時，0.80~0.86馬赫。在這個範圍內飛行的飛機，通過機翼的空氣很有可能會超越音速、產生震波。因此，為了延緩震波產生的時間，這種飛機在朝翼前緣的方向，機翼會呈現往後退縮的形狀，稱為「後掠翼」。像這種飛機的某一部分會超越音速，且速度範圍在0.7~1.2馬赫的速度稱為「穿音速」（Transonic）。

然而，由於1.2~5.0馬赫的速度不論哪一部分都在超越音速的範圍中，因此稱為「超音速」（Supersonic）。在這個範圍內飛行的飛機，不論是機翼還是機身的形狀都和其他機種不同。例如一種叫做「三角翼」的機翼，這種類型的機翼有能夠增大後掠角角度和加強機體強度的優點。



## 飛行速度為次音速的飛機機翼

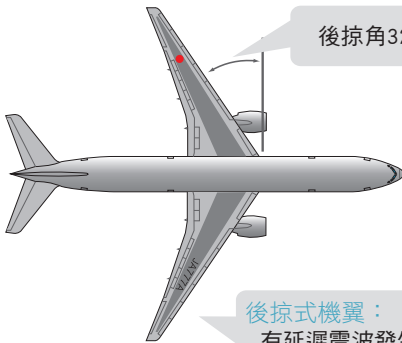
縮減式機翼：  
機翼整體重量較輕



矩形翼：  
構造簡單堅固

次音速範圍：  
0.7馬赫以下、YS-11  
巡航速度：  
0.40馬赫、469km/時

## 飛行速度為穿音速的飛機機翼

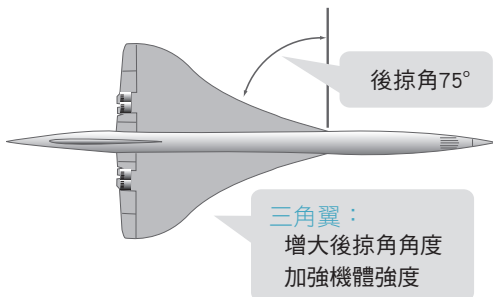


後掠角 $32^{\circ}$

後掠式機翼：  
有延遲震波發生的功能

穿音速範圍：  
0.7~1.2馬赫、波音777  
巡航速度：  
0.80馬赫、850km/時

## 飛行速度為超音速的飛機機翼



後掠角 $75^{\circ}$

三角翼：  
增大後掠角角度  
加強機體強度

超音速範圍：  
1.2~5.0馬赫、協和式客機  
巡航速度：  
2.02馬赫、2,145km/時



## 如果利用音速飛行就會產生震波！

### 馬赫數代表的意思

如果有物體在水面上活動，水就會受到擾亂產生波紋不斷往外擴散。即使是在空氣中也和水面的狀況相同，只要空氣中有物體活動，物體四周的空氣也會受到擾亂，因而產生些微的壓力變化形成波紋在空氣中擴散。不過因為這個壓力變化非常微小，所以通常不會被發現。但若是撥動吉他的弦使之震動時，那些許的壓力變化就會轉換成樂音讓我們聽見。而我們可以聽見吉他的音色是因為它是由音速在傳導，不過其實音速不只是空氣傳導聲音的速度而已，它也是物體在活動時產生的些微壓力變化的傳導速度。

當兩輛電車在隧道中擦身而過，會使得車內氣壓上升使我們產生耳鳴。這是因為對向行駛而來的電車所產生的壓力波集體往車內湧入的緣故。就算是飛機的情況也是一樣，飛機在空中航行所產生的壓力變化的波動也會由音速往四面八方擴散。例如一架飛機在次音速範圍中飛行時，因為飛機在空中產生的壓力波動會以音速傳導出去，所以不可能追得到它。但是如果是在穿音速範圍內飛行的話，即使追不到這股波動，它也會在飛機前面被壓縮、累積。然而當它以音速飛行時，空氣被壓縮的情況便會更嚴重，因而形成一整束的波動力量，這樣的波動就稱為「震波」。

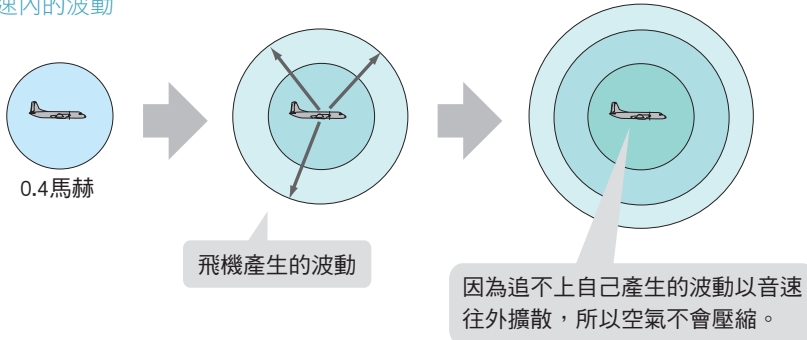
當我們在思考震波發生的原因時，可以知道以飛機飛行的速度和音速相較的方式會較為容易。而這個速度的單位就是「馬赫數」。馬赫數就是飛機的飛行速度和音速比較所呈現出來的值。若是0.8馬赫就代表飛機飛行的速度等於飛行高度音速的80%。順帶一提，在航空界不是用「馬赫」來代表速度，而是用「馬克」。理由是因為在無線通訊的情況下比較好分辨。



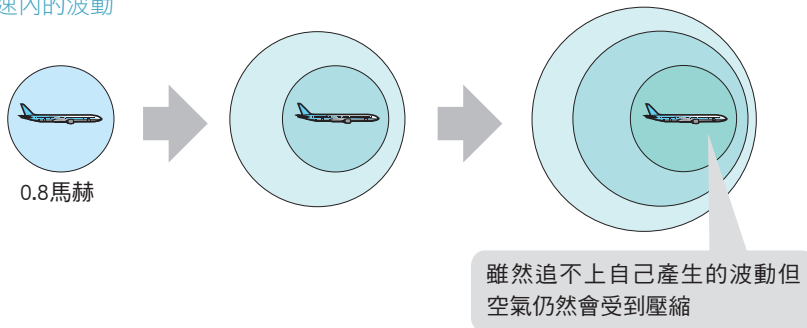
## 馬赫數與空氣波動的關係

馬赫數 =  $\frac{\text{飛行速度}}{\text{音速}}$ ，例如 0.8 馬赫就代表音速 80% 的速度。1 馬赫就等於音速。

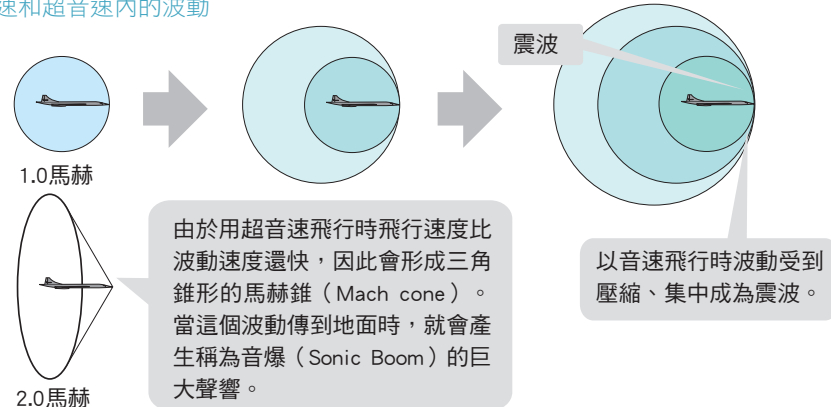
### 次音速內的波動



### 穿音速內的波動



### 在音速和超音速內的波動





## 現在之所以會沒有超音速客機的原因

除了聲音障礙外，還有許多其他的障礙

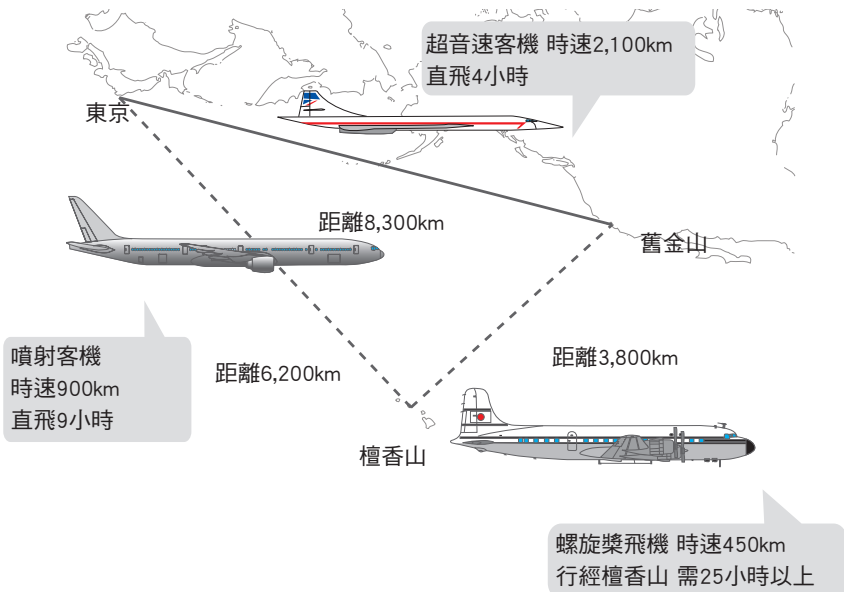
說到飛機的歷史，可以說是一直在追求愈快愈好、愈遠愈好和愈高愈好。在螺旋客機的時代，從東京到舊金山必須到檀香山補給燃料。又因為當時的飛行速度只有450km/時左右，所以總飛行時數超過25小時以上。但是自從噴射客機出現以後，便能以比螺旋槳飛機還要快兩倍的速度900km/時在高空飛行，從此橫越太平洋就再也不需要暫停，總飛行時數也大幅縮短為9小時。而且飛機的飛行距離之所以能夠增加，其實是因為飛機的飛行速度大幅上升。

然而，如果是超音速客機（Super Sonic Transport；SST）的話，從東京到舊金山只要4小時以內就可以到達了吧？只是，到現在仍無法實現。這是因為用超音速飛行會面臨到相當多的障礙。例如機體為了應付從零到音速以上的大速度範圍，在開發機體和引擎上必須花費龐大的費用，這是其中一項障礙。

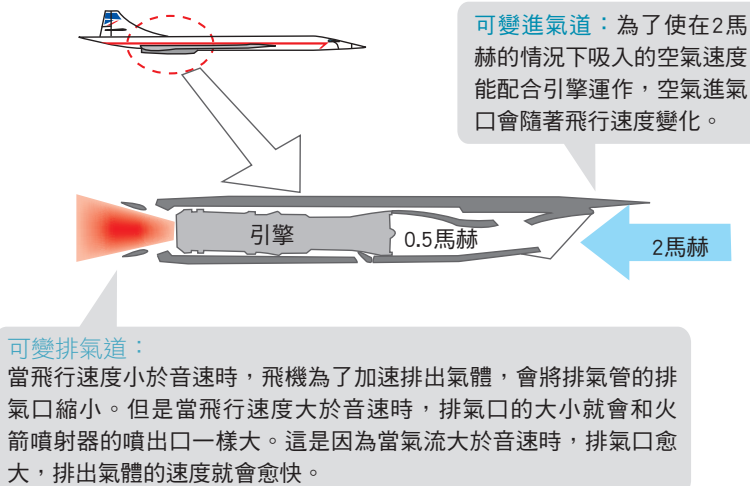
此外，由於三角翼在飛機起飛時速度特別快，所需的滑行距離也較長，不僅能符合此項要求的機場不多，而起飛時的噪音也相當大。而且超音速飛行引起的震波還會傳達到地面上，產生音爆問題。因此，只有在海面上空才能進行超音速飛行，即使超越了音速的障礙，也還有噪音的障礙擋在前面。但是在不久的將來，相信一定能製造出超越這些障礙的超音速客機。



## 飛到舊金山的總飛行時數

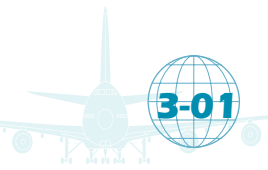


## 超音速客機的設計









## 飛機上的駕駛艙是什麼模樣？

景色優美但意外地狹窄

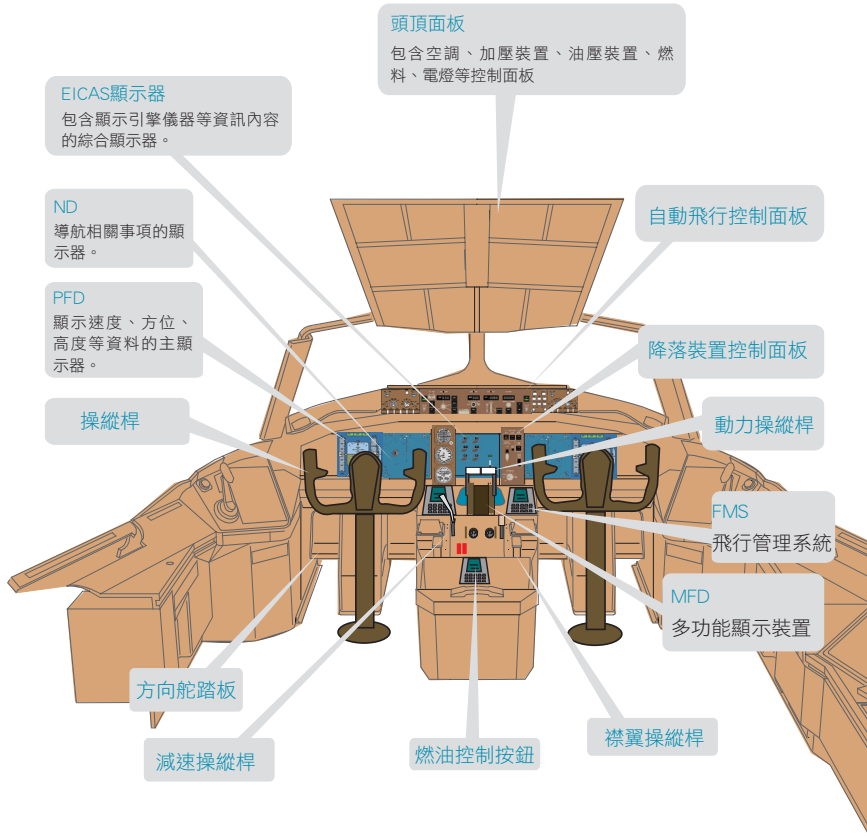
在駕駛艙（操控室）裡，機長坐的左側座位及副機長坐的右側座位附近幾乎都被相同且數不清的儀器和按鈕包圍著，這是爲了讓飛行員不論在左邊或右邊都能夠方便操縱儀器的設計方式。如此一來，就算哪一邊的儀器突然故障也不會有問題，而且當其中一名飛行員突然沒辦法操控時，還有另一位飛行員可以操控。像這種將飛機的內部裝置等儀器多重設置的方法，稱之爲重複性（Redundancy或稱爲備援），即使發生問題也有其他備用裝置可以使用以提高安全性。此外，飛行員在行駛中不只要繫安全帶和腰帶，還要繫上肩背式安全帶（Shoulder Harness）。爲配合飛行員被安全帶固定住的行動範圍，還要能夠控制其他按鈕和操縱桿，駕駛艙的大小才會是如此剛剛好。

關於駕駛艙內的儀器數量，有漸漸減少的傾向，主要是因爲能夠讓映像管和液晶畫面以彩色呈現的EFIS（電子飛行資訊系統）已成功問世。此外，在飛行員最方便操縱的位置還有標示速度、方位、高度等資料的PFD，PFD一旁還有將導航資訊顯示在螢幕上的ND。

中央部分則有由EICAS測得的引擎轉數和排氣溫度等指示值，以及顯示故障警報等的顯示器。這裡所提到的EICAS，指的是監視引擎和飛機裝置、警告飛行員飛機的異常現象的系統，也稱爲ECAM。而位於EICAS顯示器下方的MFD，則顯示著電子檢查表（操作順序表）、引擎及其他系統的詳細狀況、與地面通訊的通聯狀況等，是一種可以由飛行員選擇所需要顯示的項目的多功能顯示裝置。



## 飛行員座椅的模樣



波音777的飛行員座椅

EFIS: Electronic Flight Information System  
 PFD: Primary Flight Display  
 ND: Navigation Display  
 EICAS: Engine Indication and Crew Alerting System  
 ECAM: Electronic Centralized Aircraft Monitor  
 FMS: Flight Management System  
 MFD: Multi Function Display



## 飛機飛行的三個方向

### 在三度空間飛行的飛機需要三個舵

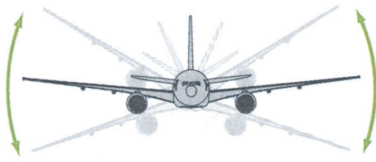
在三度空間中飛行的飛機，根據它搖晃（也就是運動）的方向有三種不同的名稱：飛機的前進方向稱為縱軸、垂直方向是垂直軸、機翼展開的方向是水平軸。於是，以縱軸為基準左右機翼上下搖擺的情況稱為滾轉（Rolling）。同樣地，若以垂直軸為基準機首往左右方向搖擺的情況則稱為偏航（Yawing）；而以水平軸為基準機首上下搖擺的情況就稱為俯仰（Pitching）。因此我們稱縱軸為滾轉軸（Roll軸）、垂直軸稱為偏航軸（Yaw軸）、水平軸稱為俯仰軸（Pitch軸）。

在三度空間中飛行的飛機，有主翼、水平尾翼和垂直尾翼三種機翼。其中主翼的功能是產生支撐飛機的升力，水平尾翼又稱為水平安定板、垂直尾翼又稱為垂直安定板，這是因為其具備讓飛機穩定飛行的效用，當飛機違反飛行員的意願，在受到急陣風影響導致飛機飛行姿態改變時，也能自然地回到原本的姿態。

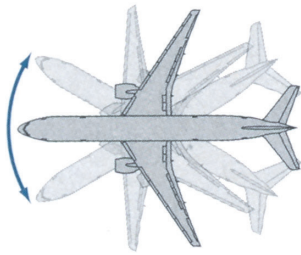
假設飛機朝下前進時，此時通過水平尾翼的氣流就會發生變化，因而產生朝下的升力，就是這一股力量讓飛機返回原本的姿態。即使是飛機的方向改變也是一樣，因為垂直尾翼產生的升力也會讓飛機回到原來的方向。像這樣不論產生的升力有多小，都能夠成功地改變飛機姿態，是因為利用槓桿原理所產生的結果。正是因為兩尾翼都和重心位置有一定的距離，所以只要用些微的力量就能有效地改變飛機的動向。因此能夠用（力量） $\times$ （距離）決定效能的，稱為力矩，以水平尾翼為基準的力矩稱為俯仰力矩或俯仰力矩（Pitching Moment），以垂直尾翼為基準時稱為偏航力矩（Yawing Moment）。



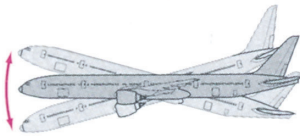
## 飛機的三軸移動



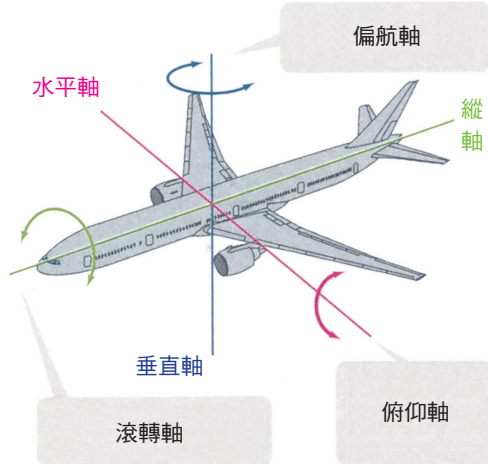
滾轉



偏航

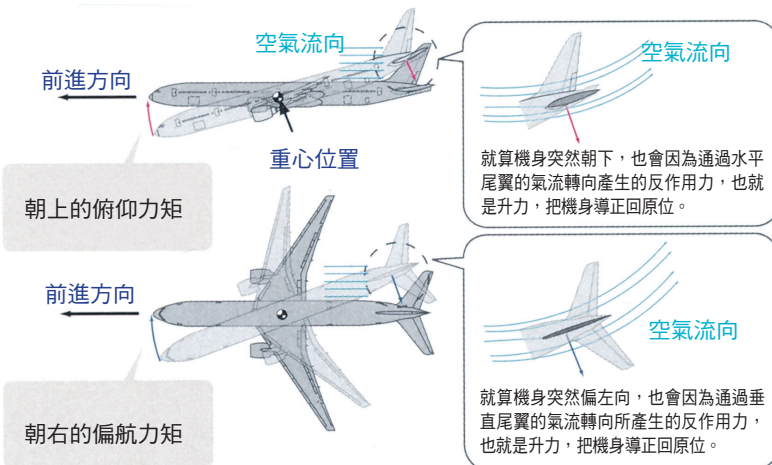


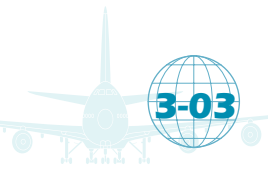
俯仰



操縱舵面	移動	角度
副翼	滾轉	側傾角度 (Bank Angle)
方向舵	偏航	偏航角度 (Yaw Angle)
升降舵	俯仰	俯仰角度 (Pitch Angle)

## 水平尾翼與垂直尾翼的功能





## 操縱桿與飛機動作的關係

### 手腳並用操縱飛機

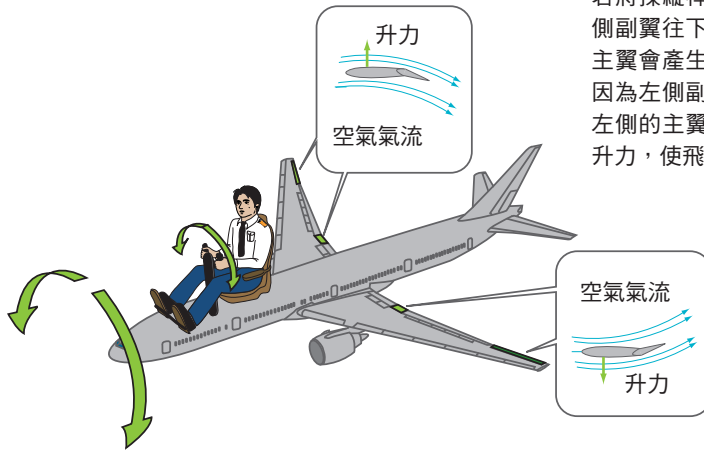
操縱桿位於操縱席的正前方，控制轉盤則是從Control Wheel直譯過來的名稱，不過在航空界多稱為操縱桿。如果像汽車上的方向盤一樣的方式旋轉操縱桿，副翼（Aileron）就會動。接著，可以藉由將操縱桿往前推或往身體方向拉控制升降舵（Elevator）的運作。當然，這個操縱桿可以同時進行旋轉和推壓的動作。此外，在腳下的地方有兩個併排在一起的踏板是方向舵踏板。只要踩下踏板，方向舵（Rudder）就會開始運作，例如若踩下右邊的踏板，左方的踏板就會往身體接近。也就是說其實這左右兩方的踏板是機械式地連接在一起，能夠交互運作。

我們在3-02提過飛機是利用主翼、水平尾翼和垂直尾翼這三種機翼維持平衡，才能筆直地在天空中飛行。如果從反向思考，就等於只要適當地改變這三種機翼的平衡關係，飛機就能自由地在空中飛翔。而用來控制這三種機翼的力量，是由離重心位置有一段距離的舵來控制，因為它是藉由槓桿原理來運作，所以即使這個力量不大也能夠發揮相當大的作用。

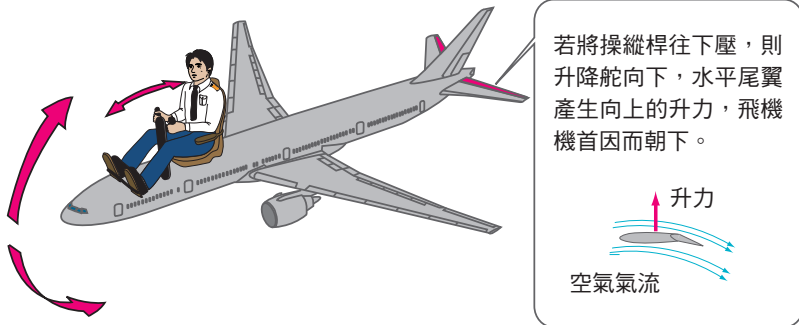
舉例來說，如果我們把操縱桿往下壓，如此一來，通過水平尾翼的氣流就會因為升降舵往下移動而往下彎曲，此時水平尾翼便會藉由氣流變化發生的反作用力產生升力。經由這股升力的形成，能使讓機首向下的俯仰力矩產生作用，機首便會往下移動。若相反地將操縱桿往上拉，則會因為升降舵往上移動產生朝下的升力，使得讓機首上提的力矩發生作用，機首就會朝上移動。方向舵的操作也和此原理相同。當我們踩下右方的踏板，由於方向舵會往右邊移動所以會在垂直尾翼的左側產生升力，使得向右旋轉的偏航力矩產生作用，讓機首面向右方。



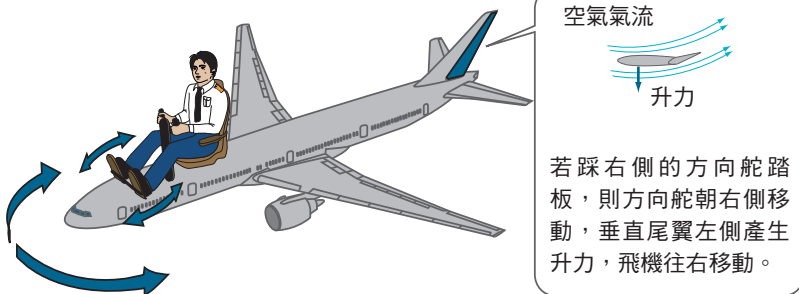
## 操縱桿與飛機的互動關係



若將操縱桿往左旋轉會讓右側副翼往下降，所以右側的主翼會產生向上的升力。而因為左側副翼會往上升所以左側的主翼會產生向下的上升力，使飛機向左傾斜。



若將操縱桿往下壓，則升降舵向下，水平尾翼產生向上的升力，飛機機首因而朝下。



若踩右側的方向舵踏板，則方向舵朝右側移動，垂直尾翼左側產生升力，飛機往右移動。