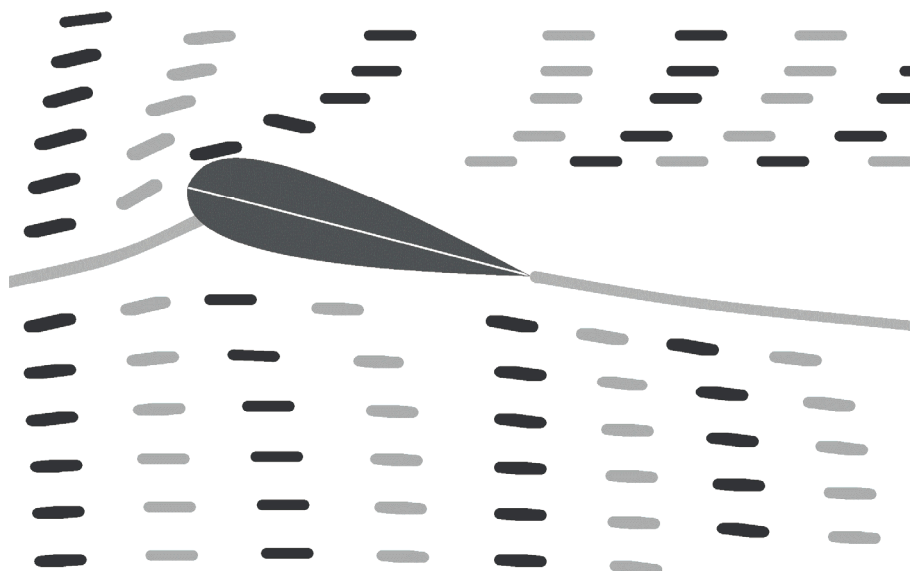


新版

飛行原理概論

(含計算題練習)



郭兆書·著

第一章 流體力學基礎

首先來瞭解一下飛行原理的基礎—流體力學。當年研究流體力學的科學家或許未曾想到他們的努力成果有朝一日會使人類像鳥一樣在空中翱翔，但他們所描述的各種流體性質和現象，早已奠定了 20 世紀航空科技快速發展的成功基石。

本章將介紹：(1) 標準大氣與各種高度值、(2) 流體力學的基本名詞、(3) 各種流動與理想流體、(4) 勢流 (potential flow) 理論。其中有部份內容可能只會出現在特定考試類別，但因關連性不小，故仍納入本書範圍內。若時間有限可以先行忽略這些加註特定考試類別的內容，讀熟本書大部分內容之後，再回頭來讀這幾節。

第一節 標準大氣與各種高度值

大氣的情況是一直改變的，以臺灣氣溫為例，每天白晝通常比夜間來得熱，每年冬季則較夏季來得冷。但同樣是白晝，臺灣的氣溫可能比南邊的菲律賓來得涼快一些；同樣是冬季，臺灣的氣溫又不像北邊的日本來得酷寒。由於大氣情況會因時間不同、地點不同而有所變化，如果沒

第一章 流體力學基礎

有一個全球性的共同標準，世界各地將因氣溫有別、氣壓有別、大氣密度有別，而造成許多困擾。所以國際民航組織(ICAO)在1952年11月7日制訂全球統一的標準大氣，成為民航界的準則。

1.1.1 標準大氣

標準大氣以海平面為零高度，並具有下列性質(如圖1-1)：

高度(註)	溫度	壓力	密度
海平面	15°C	101.3 kN/m ² 或說是1013百帕(hectopascal, hPa)	1.23 kg/m ³
3000英尺	9.1°C	90.57 kN/m ² 或說是905.7百帕(hectopascal, hPa)	1.12 kg/m ³
10000英尺	-4.8°C	69.50 kN/m ² 或說是695.0百帕(hectopascal, hPa)	0.91 kg/m ³
36089英尺	-56.5°C	22.56 kN/m ² 或說是225.6百帕(hectopascal, hPa)	0.37 kg/m ³
40000英尺	-56.5°C	18.71 kN/m ² 或說是187.1百帕(hectopascal, hPa)	0.30 kg/m ³

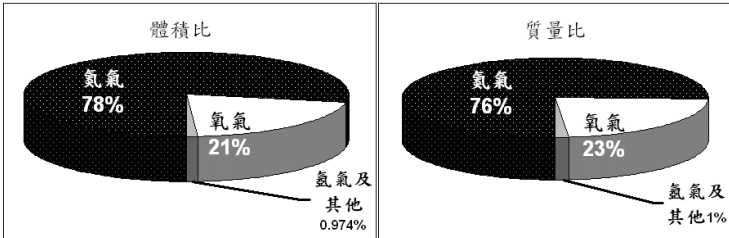


圖 1-1 標準大氣的性質及空氣成分

由圖1-1可知：隨著高度不斷增加，氣溫會越來越低，就像夏天時山上會比平地來得涼快。但到了某一個高度，氣溫就維持在-56.5°C而不會變冷，在這個高度以下稱為對流層(troposphere)，而氣溫不變的範圍則稱為同溫層(stratosphere)。

正如前述，世界各地的大氣情況不盡相同。對流層的頂部在赤道比較高，平均值為 55000 英尺，在南北極區比較低，平均值為 28000 英尺；且對流層的頂部隨季節而變，夏季比冬季更高。就標準大氣而言，同溫層是 11100 公尺以上，但由於絕大多數國家的民航界都以英尺做為高度單位，所以通常說是 36089 英尺。

絕大多數的民用航空器都在對流層或同溫層飛行。對流層內的大氣會有明顯的垂直方向運動，因此航空器可能遭遇上升氣流而快速地被抬高，也可能遭遇下沉氣流而急速下降。此外，大部份的水氣集中在對流層，所以會造成許多雲雨雷冰霧的氣象變化。反觀同溫層，大氣多半是水平方向運動，也沒有什麼劇烈的雲雨雷冰霧等氣象變化。

其次，氣壓同樣隨著高度增加而降低，所以在平地充滿氣體的氣球，升到高空就會因為氣球內的壓力高於周遭大氣的壓力而炸破。即使到了溫度維持不變的同溫層，氣壓仍是繼續隨著高度增加而降低。

習慣在低海拔高度(例如臺灣)生活的人們一旦到了高海拔高度(例如青康藏高原)，有些人會因為不習慣稀薄的空氣而感到呼吸急促或困難，這是因為空氣密度也隨著高度增加而降低、造成吸入肺部的氧氣分子數量不足的緣故。為了不影響乘客的呼吸，在高空飛行的民航機都會透過加壓的方式把客艙維持在 8000 英尺標準大氣的氣壓值，以確保空氣密度不會太低(即空氣不會太稀薄)。若沒有加壓設備，像是許多熱氣球、超輕型載具和小型航空器，飛行高度就很難到達 8000 英尺以上。即使有加壓設備的飛

機，萬一加壓功能故障，不能把客艙壓力保持在 8000 英尺以下的標準大氣氣壓值，就形成所謂「失壓」(depressurization)狀況，乘客可能需要立刻使用氧氣面罩以免呼吸困難。

註：儘管連英國人都不再使用英尺來描述一個人的身高，但美國人仍然在這方面一意孤行，始終不願放棄英尺這個單位。而臺灣民航界也因多年來習慣使用英尺而不肯回歸到國際 SI 制，故本書在此仍得遷就現況而繼續以英尺來描述高度。但為了與正規學校教育所用的單位一致，臺灣民航界應該慎重考慮採用公尺 (meter) 做為高度的單位。

【練習題】

已知標準大氣在各高度的溫度、壓力和密度如下表：

高度	溫度	壓力	密度
海平面	15°C	101.3 kN/m ² 或說是 1013 百帕 (hectopascal, hPa)	1.23 kg/m ³
10000 英尺	-4.8 °C	69.50 kN/m ² 或說是 695.0 百帕 (hectopascal, hPa)	0.91 kg/m ³
36089 英尺	-56.5 °C	22.56 kN/m ² 或說是 225.6 百帕 (hectopascal, hPa)	0.37 kg/m ³
40000 英尺	-56.5 °C	18.71 kN/m ² 或說是 187.1 百帕 (hectopascal, hPa)	0.30 kg/m ³

試求 (1) 20000 英尺的溫度？(2) 壓力為 900 百帕的高度是多少英尺？(3) 高度 39000 英尺的大氣密度？

〔解〕 假設大氣溫度、壓力和密度在一段小區間內都是線

性變化，可利用內插法來推算(1)氣溫、(2)氣壓高度、(3)大氣密度。

(1) 令 20000 英呎溫度是 T ，則

$$\frac{T - (-4.8)}{(-56.5) - (-4.8)} = \frac{20000 - 10000}{36089 - 10000} \Rightarrow T = -24.6 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

)

(2) 令 900 百帕的高度是 h ，則

$$\frac{h - 0}{10000 - 0} = \frac{900 - 1013}{695 - 1013} \Rightarrow h = 3553 \text{ (英呎)}$$

(3) 令 39000 英呎的密度是 ρ ，則

$$\frac{\rho - 0.37}{0.30 - 0.37} = \frac{39000 - 36089}{40000 - 36089} \Rightarrow \rho = 0.32 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

1.1.2 高度

對飛航管制員而言，所謂的「高度」(altitude)定義為「指自平均海平面至空中某平面或某點或某目標物間之垂直距離」，也稱為「真實高度」(true altitude)。類似地，對航務員而言，所謂的「高程」(elevation)是指該處地表與標準海平面之間的垂直距離。高度和高程都是日常生活所說的海拔高度，差別在於高程專指某一地表位置的海拔高度，而高度則可以是某個面或地點或物體的海拔高度。

但航空器駕駛艙所顯示的高度值並非海拔高度，而是另四種高度：(1)氣壓高度(pressure altitude)、(2)艙壓

高度 (cabin altitude)、(3) 絕對高度 (absolute altitude)、(4) 衛星定位高度。前兩者都與氣體壓力和標準大氣有關，後兩者則與氣體壓力或標準大氣無關。

此外，還有一個高度稱為「密度高度」(density altitude)。雖然不會顯示在駕駛艙的儀表上，主要用途是在航空氣象方面，但因密度高度與標準大氣有關，故在此一併說明。

1.1.3 氣壓高度與艙壓高度

測得航空器所在位置的大氣壓力後，再利用標準大氣表來估算當時航空器所在的高度，這個高度估算值就是氣壓高度。在轉換空層(transition level)以上，一律把海平面氣壓視為 1013 百帕來決定氣壓高度，故此時氣壓高度是指航空器與 1013 百帕標準氣壓面之間的垂直距離。在轉換高度(transition altitude)以下，若海平面的實際氣壓與標準大氣不同，就需要進行修正(詳見第 1.1.7 小節)。轉換空層、轉換高度、飛航空層的名詞定義請見飛航規則第 2 條第 78、72、46 款，台北飛航情報區的轉換空層為飛航空層 130，轉換高度為 11000 英尺。

同樣地，測得客艙內部的氣壓後，也可以利用標準大氣表來估算當時客艙內的環境相當於高度多高的空氣，這個高度估算值就是艙壓高度。一般情況都會把客艙高度維持在 8000 英尺以下，確保客艙內有足夠大的空氣(氧氣)密度使人員正常呼吸。若不能維持客艙高度在 8000 英尺以

下，例如客艙高度上升到 12000 英呎，就會造成客艙失壓，而需要靠氧氣面罩來確保肺部吸到足夠多的氧氣分子。

1.1.4 絕對高度

航空器接近地面時，例如降落在青康藏高原或在喜馬拉雅山區飛行，即使氣壓高度很高，不代表航空器與地面之間就有足夠的安全距離。所以藉由雷達或無線電波來測量航空器與地面之間的距離遠近，便能讓駕駛員意識到是否有安全間隔。由航空器發射雷達或無線電波至地面再反射回航空器，此時所量到的高度就是航空器的絕對高度，也就是說「絕對高度是指物體與正下方地表之間的垂直距離。」，即 height above ground level；可寫成：絕對高度=高度(真實高度)－正下方高程。

由於測量絕對高度的訊號來源是從地面反射回到航空器的雷達或無線電波，故絕對高度又稱為雷達高度 (radar altitude) 或無線電高度 (radio altitude)。雷達高度或無線電高度對航空器駕駛員來說很重要，因為這個高度值代表航空器距離正下方的地面有多大的垂直方向淨空。電波強度隨距離越遠而越弱，有效範圍一般都 ≤ 2500 英呎。

1.1.5 衛星定位高度

目前已有許多航空器配備衛星定位系統，接收來自美

國 GPS(Global Positioning System)、俄羅斯 GLONASS(Global Navigation Satellite System)以及中國大陸北斗衛星導航定位系統、歐洲伽利略衛星系統(Galileo Positioning System)的訊號，藉此計算航空器所在經緯度和高度；此時所測量的高度就是航空器距離地心的距離。若知道航空器所在位置的地表與地心間的距離，則航空器距離地心的高度扣掉地表與地心間的距離就是衛星定位高度。但實際上很難精確量出地表與地心間的距離，所以通常用一個橢圓球來代表地球，再由經緯度座標來求得橢圓球上距球心的距離，當成地表與地心間的距離，以便算出衛星定位高度。

1.1.6 密度高度

所謂密度高度是指「某地當時空氣密度值相當於在標準大氣中同等密度時之高度」。例如某一高山氣象站測出空氣密度為 0.96 kg/m^3 ，這個密度相當於標準大氣的 8000 英尺，則此氣象站的密度高度就是 8000 英尺(約 2438.4 公尺)。

濕度和溫度都是影響密度高度的因素。由狀態方程式 $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ 可知，當大氣壓力 p 、氣溫 T 都不變的情況下，氣體的莫耳數(分子數) n 與體積 V 成正比。這代表蒸發的水分(H_2O)進入空氣中，會使潮濕空氣所含分子數變多，因此體積變大，增加的體積就是水分的體積；換個角度來看，單位體積空氣所含的分子數是固定的，水分進入

空氣中就會排擠原有單位體積內的空氣。然而，水分(H₂O)的分子量較少，一莫耳僅 18 公克，被排擠掉的乾燥空氣分子量較大，一莫耳約 29 公克，故單位體積內的潮濕空氣(水分+乾燥空氣)密度就減少。也就是說，濕度越大，空氣密度 ρ 越小。此外，由於狀態方程式也可寫成 $p = \rho \cdot R \cdot T$ ，故在大氣壓力 p 保持不變的情況下，空氣密度 ρ 和氣溫 T 成反比。

故在濕熱的炎夏中午，高濕度、高溫度使空氣較為稀薄，即空氣密度 ρ 降低，於是密度高度變高；反之，在乾冷的寒冬拂曉，低濕度、低溫度會使空氣變得濃縮，即空氣密度 ρ 升高，於是密度高度變低。例如某一高山氣象站原本的密度高度是 8000 英呎(約 2438.4 公尺)，在某一濕熱炎夏中午測出空氣密度下降成 0.91 kg/m^3 ，這個密度相當於標準大氣的 10000 英呎，則此氣象站的密度高度就升高為 10000 英呎；在某一乾冷寒冬拂曉測出空氣密度上升成 1.06 kg/m^3 ，這個密度相當於標準大氣的 5000 英呎，則此氣象站的密度高度就降低為 5000 英呎。

1.1.7 各種高度之比較

本節開頭所述的標準大氣是一個不隨時間、地點而改變的狀態，但真實的大氣情況卻是時時不同、各地有別，所以氣壓高度並不是航空器的真實高度。標準大氣的海平面氣壓是 1013 百帕、500 英呎高度的氣壓是 995 百帕，當航空器在 500 英呎的低空飛行時，若當地被高氣壓籠罩，

使 500 英尺高度的氣壓剛好是 1013 百帕，那麼航空器系統測量到 1013 百帕的壓力後，再以標準大氣來換算，結果變成航空器貼著海平面飛行，但實際上航空器卻是在 500 英尺飛行。由此可知當氣壓高於 1013 百帕時，航空器的真實高度會比標準大氣的氣壓高度來得高。反之，當航空器欲降落在接近海平面的機場時，且此機場處於低氣壓環境中，當時氣壓剛好是 995 百帕，那麼航空器系統測量到 995 百帕的壓力後，再以標準大氣來換算，結果變成航空器還在 500 英尺的空中，但實際上航空器卻已到達地面。由此可知當氣壓低於 1013 百帕時，航空器的真實高度會比標準大氣的氣壓高度來得低。

因為海平面的大氣壓力不會永遠都是標準大氣的 1013 百帕，所以需要進行高度表撥定值 (altimeter setting) 的修正。修正方法有兩種，一是直接測量機場地表的大氣壓力，此地表氣壓稱為 QFE，另一是由 QFE 來估算海平面大氣壓力，此海平面氣壓稱為 QNH。若將高度表撥定值設定為 QFE，即以機場地表氣壓做為氣壓高度的基準，則無論機場高程多少，當航空器停在機場地面時，所顯示的氣壓高度就是 0。若將高度表撥定值設定為 QNH，即以海平面氣壓做為氣壓高度的基準，則當航空器停在機場地面時，所顯示的氣壓高度就是機場的高程 (海拔高度)。因此，即便經過高度表撥定值的修正，若是 QFE 修正，當飛機在空中，氣壓高度就一定是相對於機場的高度 (height above aerodrome level) 而非真實高度。

以圖 1-2 為例，一架 EMS (Emergency Medical Services,

緊急醫療服務)直昇機正將病患送至醫院樓頂的飛行場,當時海平面大氣壓(QNH)大約 900 百帕(空心菱形),故 1013 百帕(長虛線)位於海平面以下,而醫院樓頂的氣壓更低, QFE 大概是 800 百帕左右(空心圓圈)。所以若直昇機駕駛員以 1013 百帕做為高度表撥定值,則顯示的氣壓高度將會很高,但實際上直昇機並沒有那麼高。若駕駛員將高度表撥定值調整為 QNH 900,所測量的 QNH 氣壓高度才是距離海平面的高度;而當直昇機降落飛行場後,氣壓高度表顯示飛行場的高程。若駕駛員將高度表撥定值調整為 QFE 800,所測量的 QFE 氣壓高度則是直昇機距離醫院樓頂飛行場的高度;而當直昇機降落飛行場後,氣壓高度表顯示 0。如果直昇機在接近醫院時飛越一摩天大樓的上空,距離摩天大樓頂端的高度則是絕對高度。

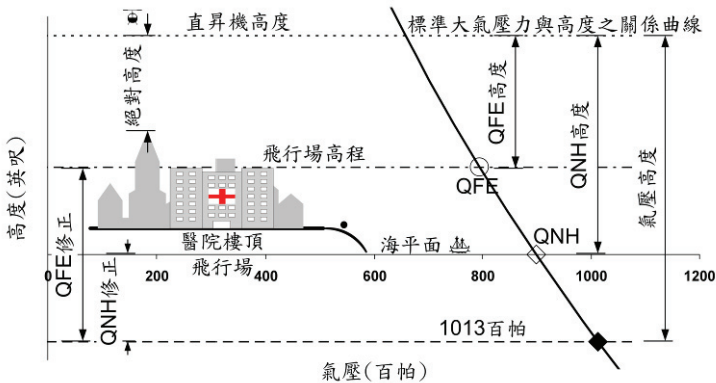


圖 1-2 QFE 和 QNH 修正之比較

即使衛星定位高度也不是真實高度。此乃因為地球並非一顆完美的橢圓球,故真實高度與衛星定位高度仍然存

在一點點誤差，若此誤差不算太大，還可以接受，就以衛星定位高度當成真實高度來使用。

1.1.8 氣壓、密度之高度函數(適於高考航空駕駛)

由於同溫層的溫度 T 保持不變，但高度 h 越高氣壓 p 越小，故密度 ρ 也是隨著高度 h 遞增而遞減。然而，無論氣壓 p 和高度 h 抑或密度 ρ 和高度 h 的關係卻都不是線性變化，而是較為複雜的指數形式，且對流層和同流層的數學式並不相同。本節將以同溫層為例，先導出氣壓 p 和高度 h 的關係，再寫出密度 ρ 和高度 h 的關係。

要推導氣壓 p 和高度 h 的關係式，首先由 hydrostatic equation: $dp = -\rho g dh$ 出發，其中希臘字母 ρ 是空氣密度、 g 是重力加速度，由於同溫層內重力加速度變化不大，故 g 是定值，寫成 g_0 。

將 $dp = -\rho g dh$ 除以狀態方程式 $p = \rho RT$ 可得

$$\frac{dp}{p} = \frac{-\rho g_0 dh}{\rho RT} = -\frac{g_0}{RT} dh。$$

再由同溫層的底部(高度 h_1 、氣壓 p_1)開始將上式做積分，得到 $\int_{p_1}^p \frac{dp}{p} = -\int_{h_1}^h \frac{g_0}{RT} dh \Rightarrow \ln \frac{p}{p_1} = -\frac{g_0}{RT} (h - h_1)。$

接著將等號左右兩側都化成自然對數底 (Base of Natural Logarithm) e 的指數，可得 $e^{\ln \frac{p}{p_1}} = e^{-\frac{g_0}{RT} (h - h_1)}$ ，即

$$\frac{p}{p_1} = e^{-\frac{g_0}{RT}(h-h_1)},$$

等號右側的指數部份帶負號表示高度 h 增

加會使氣壓 p 減少。

另外，密度 ρ 與氣壓 p 的關係可用狀態方程式 $p = \rho RT$ 來表示，故 $\frac{p}{p_1} = \frac{\rho RT}{\rho_1 RT_1} = \frac{\rho}{\rho_1}$ ，其中 $T=T_1$ =同溫層底部的溫度。

因此密度 ρ 和高度 h 的數學式就是 $\frac{\rho}{\rho_1} = e^{-\frac{g_0}{RT}(h-h_1)}$ 。

計算題練習單元 1 狀態方程式

$$p = \rho \times R \times T$$

提醒：

壓力 p 的 SI 制單位是 N/m^2 ，但在航空界習慣用百帕 (hectopascal, hPa) = $100 \text{ N}/\text{m}^2$ 做單位

密度 ρ 的 SI 制單位是 kg/m^3

空氣的 $R = 287 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K} = 287 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ，通常題目會給

溫度 T 要用絕對溫度， $0^\circ\text{C} = \text{絕對溫度 } 273.15 \text{ K}$

單位：

等 號 右 邊 的 單 位

$$\rho \times R \times T = (\text{kg}/\text{m}^3) \times (\text{N} \cdot \text{m}/\text{kg} \cdot \text{K}) \times (\text{K}) = \text{N}/\text{m}^2 \text{ 與 等}$$

號左邊單位 N/m^2 相同

【例題 1-1】基本題

已知海平面的空氣密度為 1.225 kg/m^3 ，在絕對溫度 288.15 K 時，空氣的壓力是多少？空氣的 $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

〔解〕

$$\begin{aligned} p &= \rho \times R \times T \\ &= 1.225(\text{kg/m}^3) \times 287(\text{N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}) \times 288.15(\text{K}) \\ &= 101306(\text{N/m}^2) \end{aligned}$$

公制的大氣壓力常以百帕(hectopascal, hPa)做單位
1 百帕=100(N/m²)，故空氣壓力是 1013.06 hPa

〔註〕

這是直接代公式就可算出結果的基本題目，只是讓您牛刀小試。

《自我練習》

已知海平面的空氣密度為 1.225 kg/m^3 ，在絕對溫度 300 K 時，空氣的壓力是多少？

答案：1054.73 hPa

【例題 1-2】單位換算

已知海平面的空氣密度為 1.225 kg/m^3 、空氣的 $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ，在溫度 15°C 時，空氣的壓力是多少？

〔解〕

先做單位換算

15°C 相當於絕對溫度 $273.15+15=288.15 \text{ K}$

$$p = \rho \times R \times T$$

$$= 1.225(\text{kg/m}^3) \times 287(\text{N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}) \times 288.15(\text{K})$$

$$= 101306(\text{N/m}^2)$$

習慣上大氣壓力以百帕(hectopascal, hPa)做單位

1 百帕=100(N/m²)，故空氣壓力是 1013.06 hPa

〔註〕

題目給的是攝氏溫度，但代入公式要用絕對溫度，如果直接把數字 15 代入計算就是錯誤答案。要先做單位換算，把溫度 15°C 換算成絕對溫度 288.15 K ，再代入公式才能算出

正確答案。這是間接換算成正確單位才可代公式求解的基本題目，雖然有點難度，但民航特考也不會考這麼簡單的計算題。

《自我練習》

已知海平面的空氣密度為 1.225 kg/m^3 ，在溫度 0°C 時，空氣的壓力是多少？

答案：960.33 hPa

【例題 1-3】求密度

已知空氣的 $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ，某一機場的氣象站測得空氣壓力 1000 百帕(hectopascal)、空氣溫度 20°C ，試計算當時的空氣密度。

〔解〕

先做單位換算

20°C 相當於絕對溫度 $273.15+20=293.15 \text{ K}$

$$p = \rho \times R \times T$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow \rho &= \frac{p}{R \times T} \\ &= \frac{100000(\text{N}/\text{m}^2)}{287(\text{N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}) \times 293.15(\text{K})} \\ &= 1.19 (\text{kg}/\text{m}^3)\end{aligned}$$

故空氣密度是 1.19 kg/m³

〔註〕

這是直接代公式就可算出結果的基本題目，只是讓您牛刀小試。

《自我練習》

某一機場的氣象站測得空氣壓力 960.33 百帕 (hectopascal)、空氣溫度 0°C，試計算當時的空氣密度。

答案：1.225 kg/m³。

【例題 1-4】溫度變化

在堅硬不變形的鋼瓶內裝有空氣，科學家將鋼瓶密閉使空氣無法流出，再將此鋼瓶由室溫 25°C 開始加熱。加熱前測

得鋼瓶內的空氣壓力是 1000 百帕(hectopascal)，則加熱到 100°C 後，鋼瓶內的空氣壓力變成多少？

〔解〕

先做單位換算

25°C 相當於絕對溫度 $273.15+25=298.15$ K

100°C 相當於絕對溫度 $273.15+100=373.15$ K

解法(1)：先求出加熱前的空氣密度，

$$p = \rho \times R \times T$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{p}{R \times T}$$

$$= \frac{100000(\text{N/m}^2)}{287(\text{N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}) \times 298.15(\text{K})}$$

$$= 1.17(\text{kg/m}^3)$$

再 求 出 加 熱 後 的 空 氣 壓 力 ，

$$p = \rho \times R \times T$$

$$= 1.17(\text{kg/m}^3) \times 287(\text{N} \cdot \text{m} / \text{kg} \cdot \text{K}) \times 373.15(\text{K})$$

$$= 125300(\text{N/m}^2)$$

習慣上大氣壓力以百帕(hectopascal, hPa)做單位

1 百帕=100(N/m²)，故空氣壓力是 1253 hPa

解法(2)：雖然不知道空氣密度是多少，但因為鋼瓶密閉使空氣無法流出，故空氣質量維持不變，且因鋼瓶堅硬不變形，故空氣體積維持不變，因此加熱前的空氣密度=加熱後的空氣密度

$$p = \rho \times R \times T$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\text{加熱前}p}{R \times \text{加熱前}T} = \frac{\text{加熱後}p}{R \times \text{加熱後}T}$$

$$\Rightarrow \frac{100000(\text{N/m}^2)}{298.15(\text{K})} = \frac{\text{加熱後}p}{373.15(\text{K})}$$

$$\text{故加熱後空氣壓力} = \frac{37315000(\text{K} \cdot \text{N/m}^2)}{298.15(\text{K})}$$

$$= 125155(\text{N/m}^2)$$

習慣上大氣壓力以百帕(hectopascal, hPa)做單位

1 百帕=100(N/m²)，故空氣壓力是 1251.55 hPa

〔註〕

知道密度和溫度就可代入公式求出壓力，雖然題目並未告知加熱前的空氣密度是多少，可以比照例題 1-2 算出加熱前的空氣密度，再比照例題 1-1 算出加熱後的空氣壓力。但其實從題目的敘述可知鋼瓶內的空氣質量和體積都不變，故密度不變，且題目不要求算出加熱前的空氣密度，

所以根本不必花時間計算加熱前的空氣密度。如果加熱前的空氣密度計算錯誤，加熱後的空氣壓力也跟著算錯。因此不建議使用解法(1)來算兩次。只要利用加熱前後空氣密度相同的關鍵條件，就可以利用解法(2)一次把答案算出來。

公式 $p = \rho \times R \times T$ 有一個意義是：當密度不變時，壓力 p 和溫度 T 成正比，溫度變成幾倍，壓力就變成幾倍；同樣地，壓力變成幾倍，溫度就變成幾倍。題目所述溫度由 25°C 變成 100°C ，代表絕對溫度由 298.15 K 變成 373.15 K ，溫度變成 1.25155 倍，當然壓力也會變成 1.25155 倍，由 1000 百帕變成 1251.55 百帕。

飛航管制員經常要在很短的時間內立刻做決定。用考題來篩選出誰能看清問題的本質，用最簡單的方法快速反應、一次到位，這才是民航特考取才的命題重點。

《自我練習》

在堅硬不變形的鋼瓶內裝有 25°C 的空氣，科學家將鋼瓶密閉使空氣無法流出，此時空氣壓力是 1000 百帕 (hectopascal)。若科學家想要讓此鋼瓶內的空氣壓力變成 800 百帕，則應加熱或冷卻鋼瓶到多少 $^{\circ}\text{C}$ ？

答案：冷卻鋼瓶到 -34.63°C 。