

熱空氣的魔力

包舜華





飛行船的起源與發展

孟特戈爾非兄弟熱氣球

人類對於機械製造還不成熟之初，用來升空離地以克服地心引力的方法均採取有翼飛機的形式。當時空氣動力學家希望的是一架高度流線加上薄的像刀子一樣的機身來減低飛行阻力，此外最好能在極小的體積下裝置強力的動力設備。不過在這之前，人類早已採用比空氣更輕的氣球達成這個願望。

於 1766 年，由英國科學家亨利·卡文迪把氣囊充入「人造空氣」（比空氣輕的混合氣體）後發現有浮力的現象。對卡文迪而言，這不過是一個平常的物理實驗與觀念，沒想到它可以實際運用到航空科學上。

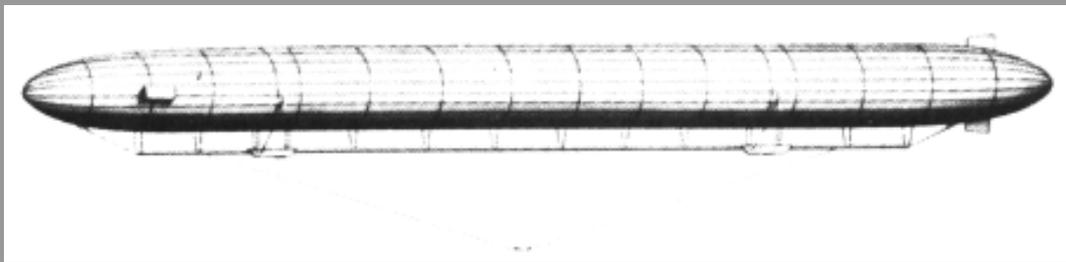
十八世紀，龐大的飛行氣球是因為發現了比空氣更輕的氣體「氫氣」，由傑奎斯·查爾斯設法控制氫氣的升舉力，才達成實際的飛行。但是最初利用大氣球載人浮升的乃是法國的孟特戈爾非兄弟。據說他們兄弟於 1782 年某個晚上，在壁爐旁邊

間坐，發現熱空氣產生浮力的現象，於是在戶外做一個雄心萬丈的實驗。他們在空中燒起一堆火做熱力來源，真的放起了一隻氣球，升空了一哩多高，引來了不少觀眾。

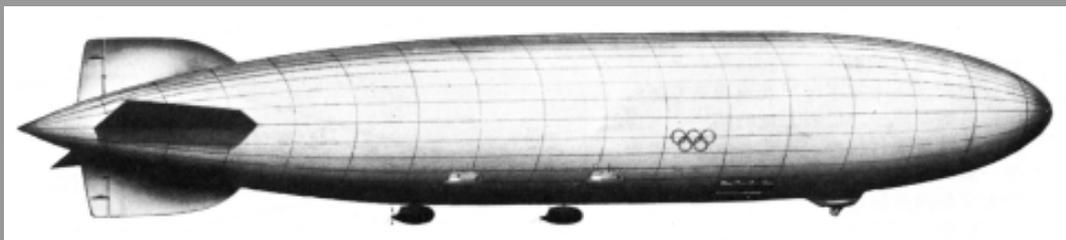
興登堡號

有動力的熱氣球到 1910 年達到了頂峰。當時德國展開了商業性的飛船服務，這種航空服務採用身長 775 英尺的齊柏林飛船（如圖一）。它是以創始人非迪南·馮·齊柏林伯爵命名紀念。1936 年，德國造了一具更大的齊柏林型飛船，804 英尺的興登堡號（如圖二），它可載客 72 人，擁有雙人房、熱水供應、餐廳、酒吧與鋼琴等。不幸的事終於發生了，1937 年 5 月 6 日，當興登堡號在該年第一次北美航行結束，一團大火從尾翼蔓延並且於短短數秒鐘造成 36 人喪生，結束了氫氣飛船的時代。

比空氣輕的飛行船，除了安全問題外，作為交通工具的話，還有不少缺點。氣球與飛船的體積太大而升力卻是奇差，以致



圖一 1910 年建造的第一艘齊柏林型飛船，船身長 420 英尺。



圖二 興登堡號飛船，全長達 804 英尺，是全世界最大的飛船。

於造成實際飛行的巨大空氣阻力，難以達到飛機的速度。因此，目前鮮少飛行船被使用為大眾運輸工具。

駕馭熱空氣

(一) 物理背景

「浮力」曾經是一個十分抽象的的物理名詞。當一個具有體積的固體沒入液體中，會因為作用在固體的壓力差而導致浮力的產生（如圖三）。

代表空氣的密度， V 代表塑膠袋的體積， W_0 為塑膠袋的淨重， ρ 為塑膠袋內部的氣體密度。

A. 若是我們想要知道一個塑膠袋在空氣中具有的浮力是多少？浮力的計算方法可以數學表示如下：

$$B = \rho \times V$$

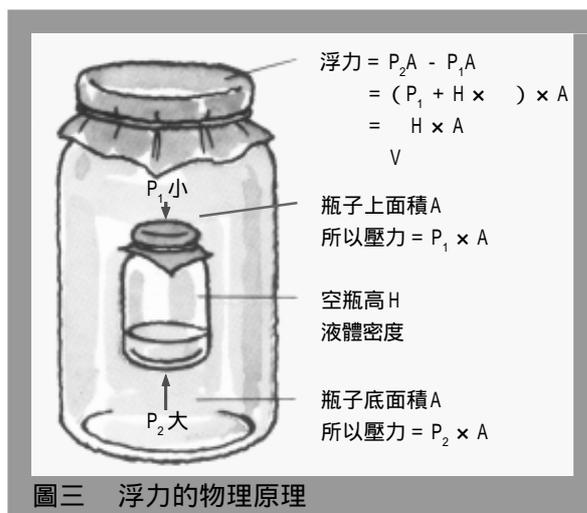
B. 同時我們也可以計算含空氣的塑膠袋總重為：

$$W = \rho \times V + W_0$$

對於一個開放系統的塑膠袋，其內部的空氣密度會與外界相同，因此 $\rho = \rho_0$ 。

結論：對於一個開放系統的塑膠袋，因為 W （重量） $>$ B （浮力），所以我們很肯定地說，塑膠袋一定飛不起來。

C. 如果我們可以設法降低塑膠袋內部的氣體密度，例如以加熱的方式來處理。從最基本的理想氣體方程式，只要您知道外界壓力 P （例如 1ATM，一大氣壓）與塑膠袋內部氣體溫度 T ，則其密度可以簡單的表示如下：



$$\rho = P / (R \times T)$$

R 為理想氣體常數

說明：一個開放系統的塑膠袋，其內部的氣體壓力是與外界相同的。所以在有熱源的情況下，塑膠袋總重可以改寫為：

$$W = P \times V / (R \times T) + W_0$$

由此可見，只要 T （溫度）越大， W （總重）也就越小。

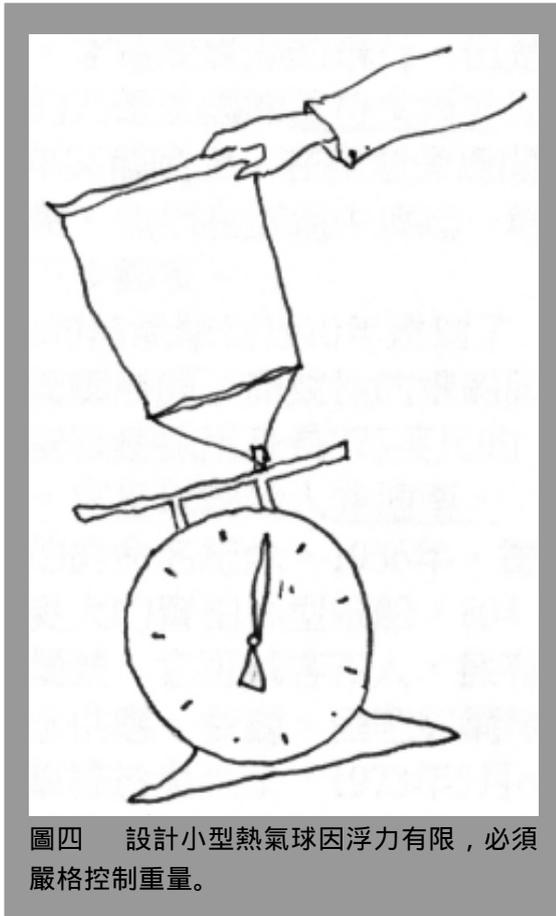
D. 由此可知，若是希望加熱塑膠袋內部氣體產生的浮力來飛行，必須滿足

$$B \text{ (浮力)} > W \text{ (重量)}$$

或者經過算式整理得到：

$$T > P \times V / [R \times (\rho - \rho_0)]$$

E. 塑膠袋若是想持續飛行，必須不斷提供袋內氣體的熱源以達到可以浮升的溫度。因此我們必須讓塑膠袋裝載燃料與支撐燃料的支架，這個載重 M 必須滿足以下的數學關係式：



圖四 設計小型熱氣球因浮力有限，必須嚴格控制重量。

$$M \times V - W_0 = 0$$

(塑膠袋內外空氣密度差值)

(二) 設計過程

要設計一個可以浮升的熱氣球必須經過不斷的嘗試以及巧思來減低結構重量卻不會危及它的強度。尤其越小的熱氣球越是難以製作，試想在如此有限的浮力之下，如何可以升舉自己本身的重量呢？為了要製作小的熱氣球，我們必須透過物理與數學的運作來斤斤計較每一個關係著重量的零組件，並且嚴格控制完成後的重量是否達成初始的設計（如圖四），否則怎麼飛得上去呢？

A. 雖然現在已經實施使用環保垃圾袋了，所以早期一捲裝的垃圾袋不知道還找

的著嗎？根據我們之前的實驗，以 #22（五金行買的 22 號細鐵絲）以及 XL 大型垃圾袋（一般超市均有販售）來製作熱氣球，效果很不錯。至於小一點的規格，經過理論分析是不行的，同樣的在實驗中也驗證它不適飛行的結果。所以第一個過程必須找到您想要製作的材料並顧及其耐熱性與強度。

例如：

- XL 塑膠袋（浮力機構）**
- #22 細鐵絲（支架）**
- 碎布與煤油（熱源）**
- 天平（精密度至少一公克）**

B. 製作並仔細計算所使用 XL 塑膠袋的浮力大小、載重分配等。如設計圖依序組裝，必須精密且牢靠。

C. 完成後加入碎布與燃料燃料後是否符合當初設計的要求？利用天平秤重，並且修改到符合當初設計。若是經過修改後仍不行，可能需要再次更換使用的材料並重新設計，直到符合規格為止。

(三) 讓垃圾袋飛揚

為了簡化內容的陳述，我們以實際的例子來設計並說明。

A. 塑膠袋體積的估算：

我們從市售的 XL 塑膠袋測量的尺寸為，高 80 公分，寬 60 公分。因此，

$$\text{總體積} = \pi \times (\text{寬}/2)^2 \times \text{高} \times \text{安全係數}$$

例如：

$$V = 3.1415 \times (0.3\text{m})^2 \times 0.8\text{m} \times 0.9 = 0.061 \text{ 立方公尺}$$

= 61 公升

B. 預估升力，並評估燃料載重：

利用我們已知的常數：

空氣密度 1.225 公斤/立方公尺
一大氣壓 101300 牛頓/米平方
理想氣體常數(空氣) 287
溫度使用凱氏溫度 $K = + 273$

$$= 1.225 - 101300 / (287 \times T)$$

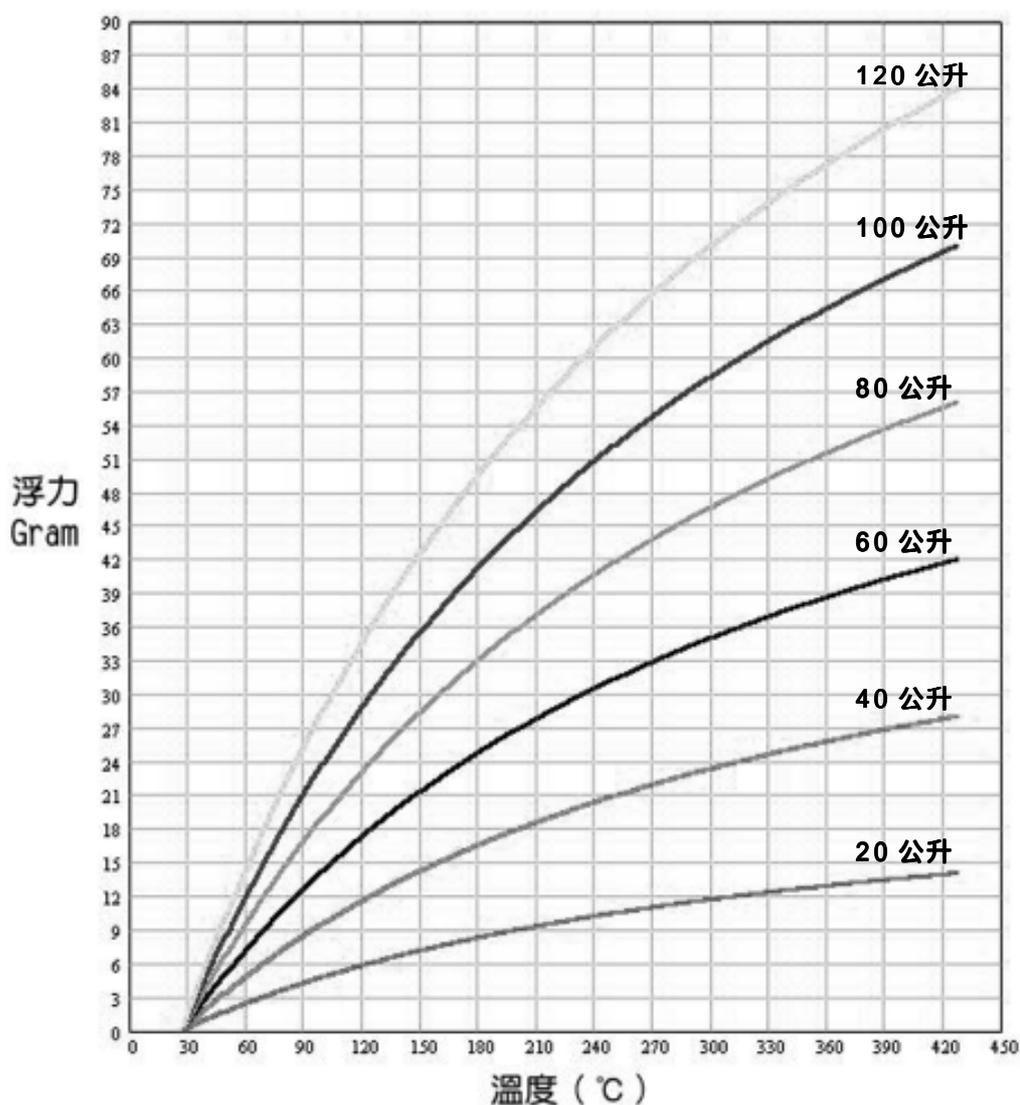
$$M = \quad \times V \text{ (含袋子淨重)}$$

因此，我們利用給定的體積、袋內氣體溫度來製作預估載重的圖表(如圖五)。

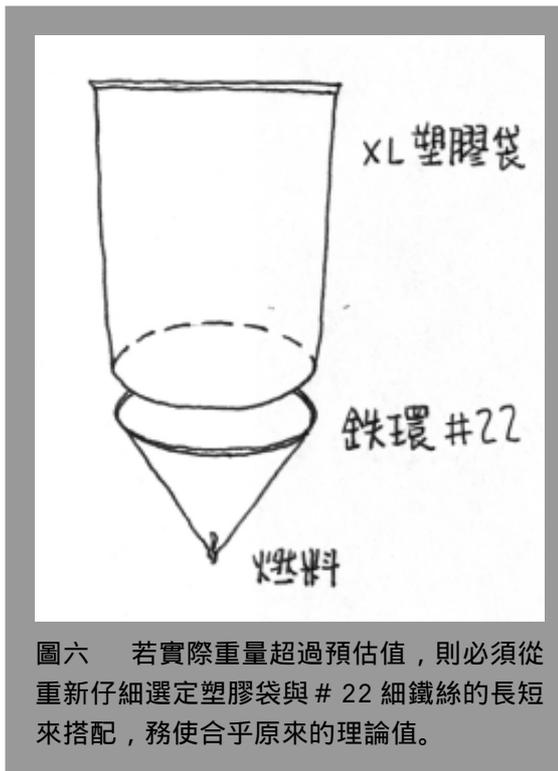
若是以 61 公升的塑膠袋，加熱空氣至 120 約可載重 18 公克(含袋子淨重)。

C. 完成製作並重量分析：

若實際重量超過預估值，則必須從重新仔細選定塑膠袋與 # 22 細鐵絲的長短來搭配，務使合乎原來的理論值(如圖六)。



圖五 溫度與浮力的特性曲線



圖六 若實際重量超過預估值，則必須從重新仔細選定塑膠袋與 # 22 細鐵絲的長短來搭配，務使合乎原來的理論值。

D. 試飛：

天候因素，例如側風造成的熱氣外漏而無法升空等。

注意安全，避免加太多燃料而導致熱氣球飛得太高，而且離開視界造成莫名其妙的火災。

準備一盆水，升空失敗時，要把火源完全撲滅以免危險。

總之，試飛是所有過程中最危險的一項，非得小心進行不可。看著本來癩癩的熱氣球逐漸漲大，然後浮起，最後離開地面的感覺有說不出的趣味。

結語

實際上的熱氣球在不同的環境下飛行，狀況特別多。例如地面空氣密度、氣壓大與溫度高，因此熱氣球較易起飛。相對地，到了高空後，熱氣球的浮升力就會逐漸下降，所以任何熱氣球一定有其飛行高

度的限制。

從理論上，您一定會發現曾經出現在歷史上的熱氣球有兩種截然不同的設計。

一種是利用密閉的氣囊填充氫氣以產生浮力。它的好處是整個行程都不需要攜帶額外的燃料筒，因為氫氣本來就比外界的空氣輕盈。不過為了達到升力的效率，它必須有一具抽氣與壓縮兩用機來控制氣囊內的壓力。只有當氣囊內的壓力與外界相同，升力效率才會最大。後來這種密閉式熱氣球被淘汰的原因主要還是因為氫氣的危險性。

另外一種就是現今最常使用的熱氣球，在一個龐大的氣囊下方開個小口，把加熱的氣體不斷地送入氣囊來維持其內部的溫度。這是一種開放的系統，所以沒有之前的壓力改變問題，但是卻要不斷補充熱源以彌補為數可觀的氣囊表面因熱傳導而散失到外界的熱。通常這類熱氣球必須攜帶加熱裝置與燃料，不過為了安全問題考量還算是頗好的設計。

當我們能透過物理的觀念來簡化熱氣球飛行的理論並且進行實驗，您一定會覺得十分慶幸，同時也感激以前的科學家替我們建設好的思索歷程。讓我們輕而易舉地利用浮力的概念與理想氣體的特性解決了熱氣球的工程問題。至此，連續三期的飛行專題大致已經完成，希望您能透過我們以物理與數學的方法看待紙滑翔機、水火箭與熱氣球的陳述而興起一股曾經有過的童頑之心。

作者：現職台北市立天文科學教育館