

# 人造衛星的軌道

蕭俊傑

為什麼人造衛星不會因受到地心引力而掉下來呢？

## 人造衛星

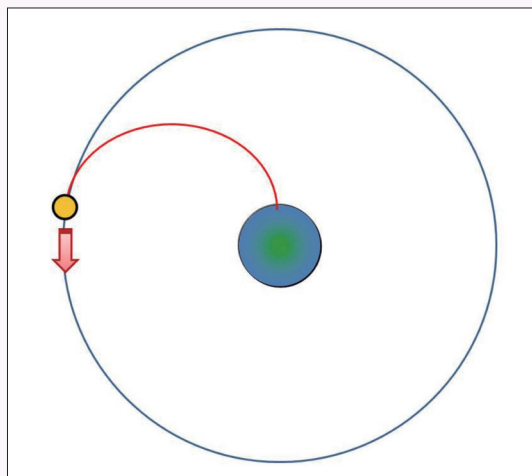
一般人感覺人造衛星好像都是「靜止」在地球軌道上的。如果問：「人造衛星為什麼不會掉下來？」答案大概都是「太空中是無重力的」之類。如果進一步追問：「明明地球有引力，為什麼人造衛星不會因受到地球引力而掉下來呢？」話題可能就此卡住。

因受到行星引力的吸引而繞著行星運行的天體就稱為衛星。大家熟悉的月球，就是因為被地球的萬有引力吸引而繞著地球運行的，所以月球就是地球的衛星。人造衛星是人類製造的太空船，就是利用上述的原理使其繞著行星運行。工程師與科學家會根據每一顆人造衛星任務的不同，而利用火箭或太空梭把它送到不同的軌道上。

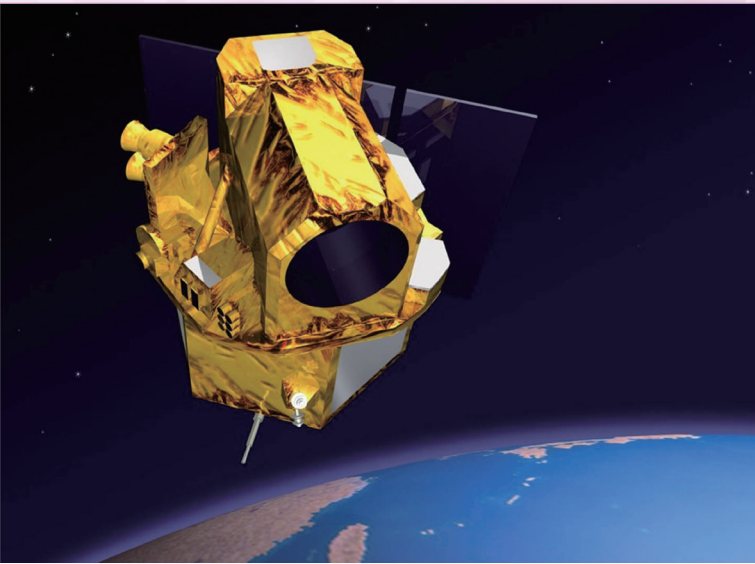
目前已經沒有太空梭任務，因此人造衛星都是由火箭發射。火箭發射時，雖然看似方向往上，朝著天空飛去。但其實到了設定的高度後，它會自動調整前進方向，以「以地心為圓心，從地心到衛星所在位置的距離為半徑」這個圓的切線方向前進。

當人造衛星被送到任務的高度後，它會與火箭脫離並保持著與火箭脫離瞬間的速度，以慣性的方式繼續往前進。在軌道上的人造衛星則利用衛星本身的推進力微調軌道。

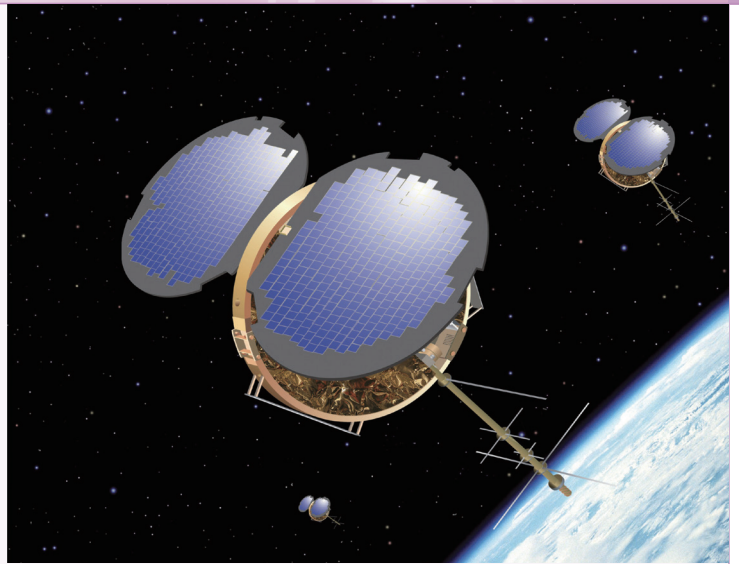
若是人造衛星的任務另有特別的規畫，則在送上軌道後，會利用自身的推進力進行軌道轉換。我國的福爾摩沙衛星二號就是由火箭送上 730 公里的暫駐軌道後，再使用本身的推進系統把它推升至 891 公里高的任務軌道。福爾摩沙衛星三號也是由火箭送到 500 公里的暫駐軌道後，再自行推升到 700 與 800 公里間的任務軌道。



衛星與地球的萬有引力



福爾摩沙衛星二號



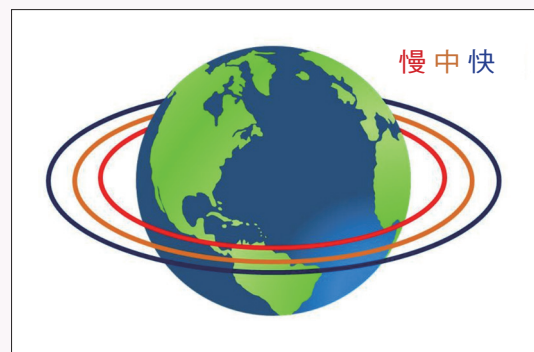
福爾摩沙衛星三號

從經驗中知道，用細線綁著重物並使其繞圈圈轉時，手的力量會透過細線提供重物繞圈圈時所需要的向心力。繞圈圈這個行為稱為「圓周運動」。在做這個實驗時，細線的長度通常是固定的，也就是重物繞圈圈的半徑是固定的。

我們來看一下圓周運動的公式： $F = mv^2 / r$ ，其中  $F$  是向心力， $m$  是重物的質量， $r$  是半徑， $v$  則是重物做圓周運動時的切線速度（嚴格來講，若依照教科書用詞，這裡的  $v$  應該稱為速率，本文是一般對象能了解的科普文章，因此以大家的習慣用詞「速度」稱之）。

在半徑固定的情況下，繞行的速度越快，需要的向心力就越大。這與我們的經驗一致，重物轉動的速度越快，就需要更大的力氣來抓住它。這意謂著，人的力量會透過細線的張力提供重物轉動的向心力。同理，人造衛星需要的向心力就是由地球與人造衛星間的萬有引力所提供。

因此上面的式子可改寫為  $GMm / r^2 = mv^2 / r$ ，其中  $m$  是人造衛星的質量， $G$  是萬



衛星繞轉速度與高度的關係

有引力常數， $G = (6.67384 \pm 0.00080) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ， $M$  是地球質量  $5.972 \times 10^{24}$  公斤。 $G$  與  $M$  這兩個數值都是固定的，因此把上面式子再簡化為  $r \times v^2 = G \times M = \text{常數}$ 。也就是說，一個在繞著行星做圓周運動的人造衛星，它轉動的速度只與半徑有關，而與人造衛星本身的質量無關。

火箭或太空梭把人造衛星送到所需高度時，只要衛星符合  $v^2 = GM / r$  中所計算出的速度，就可以在這個軌道上繞行。從這式子也可以看出，衛星的高度越低，前進的速度越快，繞地球一圈所需的時間就

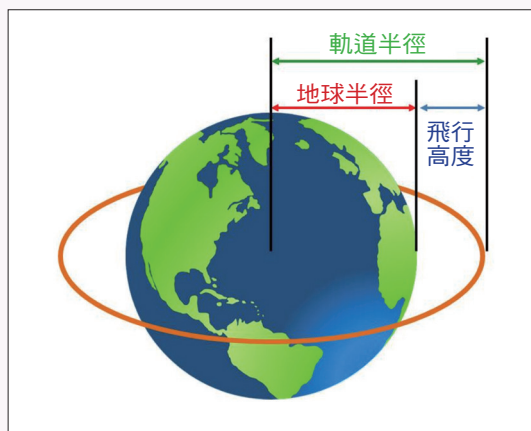
越短；反之，若衛星的高度越高，速度就越慢，繞地球一圈的時間就越長。因此相同高度的衛星，基本上繞地球的速度是相同的，即人造衛星繞地球所需要的時間只跟人造衛星與地球中心的距離有關。

前面只說明了「衛星繞地球時間」與「衛星高度」間的關係。但如果考慮地球本身的自轉會決定人造衛星與地面的相對位置，這就與衛星任務有很重要的關係了。

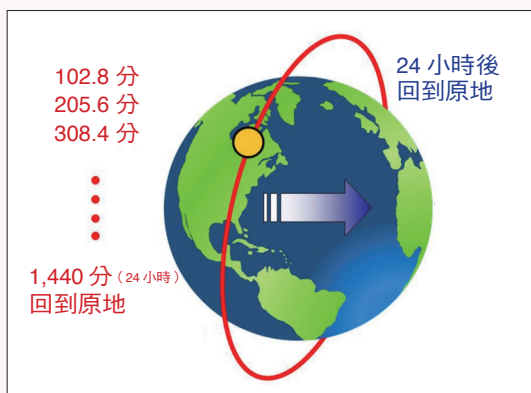
### 每日再訪性

以我國的福爾摩沙衛星二號來說，它是我國自主擁有的第一枚遙測衛星，於2004年5月21日成功發射，進入距地球表面891公里的軌道飛行。福衛二號主要的任務是對台灣與全球陸地及海域進行遙測取像作業，可把它想像為一台在地球上空軌道中運行的照相機，對著地球表面拍照。福衛二號攝得的影像資料可應用於我國的國土規畫、土地與海洋資源的探勘、環境保護、防災救災等。

既然福衛二號的影像是使用於救災，影像的即時性就很重要了。但災難的發生是無法預料的，為了在災難事件發生時，能在最短的時間內對災區取像，就必須把衛星安排在一個特殊的軌道上。這樣的軌道也讓福衛二號有一個非常重要的特性，稱為「每日再訪性」，意思是福衛二號有能力在每一天的同一個時間，對同一個地點反覆取像。



衛星繞行軌道



衛星的每日再訪性

舉個例子來說，福衛二號每天白天都會經過台灣上空一次，而每次經過的時間都在上午10點左右。也就是說，如果在某一段時間，台灣地區有救災的需求，福衛二號就可以在「下一個白天10點」回到台灣上空取像。而要達到這樣的特性，軌道就需要特別安排。

**福衛二號有一個非常重要的特性，稱為「每日再訪性」，意思是福衛二號有能力在每一天的同一個時間，對同一個地點反覆取像。**

要拍出一張清楚的衛星影像，除了人造衛星本身裝置的硬體規格要高標準外，也必須考慮軌道高度與對地速度。

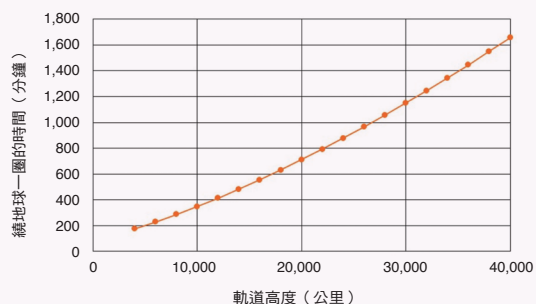
在前面已經提到，人造衛星繞地球轉動的速度只與飛行的高度，也就是繞行時的半徑有關。此式子  $r \times v^2 = G \times M$  可以整理為， $v = \sqrt{GM/r} = \sqrt{GM/(R_e + h)} \cong \sqrt{398,600.5/(6,378.14 + h)}$  km/sec 其中  $R_e$  是地球半徑，大約是 6,378.14 公里， $h$  是人造衛星相對於地球表面的高度。

以福衛二號為例，它運行於距離地球表面 891 公里處。代入上式中，可以得到衛星前進的速度大約是 7.41 km / sec。而在 891 公里上空繞行時，繞行地球一周的距離是  $2\pi \times (R_e + 891 \text{ km}) \cong 45,673.35 \text{ km}$ ，把繞行一周的距離除以它的速度，就可以得到繞行一周所需要的時間， $45,673.35 \div 7.41 \cong 6,167.87 \text{ 秒} \cong 102.8 \text{ 分}$ 。

一天有 24 小時，也就是 1,440 分鐘，差不多是 102.8 分鐘乘以 14。也就是說，地球花了 1,440 分鐘轉了一圈回到了原地，這時候人造衛星會剛剛好繞地球飛了 14 圈後再次回到原地。因此，可滿足「每日再訪性」的任務需求。

同樣的道理，若把人造衛星放在 566 公里左右的軌道高度，衛星繞一圈大約需要 95.98 分鐘，1,440 分鐘後會繞行 15 圈回到同一個位置，也可以達到每日再訪性的目標。在不同的飛行高度  $h$  時，人造衛星的速率  $v$  如前述，而繞地球一圈所需要的時間  $T = [2\pi \times (6,378 + h) / v] \text{ sec}$ 。

福衛二號的軌道規劃在 891 公里的高度，除了滿足每日再訪性之外，也須符合任務中衛星空拍照像的影像標準。在距離地球表面 891 公里時，福衛二號所拍出的



衛星繞行時間與軌道高度的關係

照片，對地解析度可以達到黑白影像 2 公尺，彩色影像 8 公尺。意思是如果以黑白影像來看，可以鑑別地面上一個 2 公尺大小的物體；以彩色影像來看，則可以鑑別 8 公尺大小的物體。

通常，拍照時若要把照片拍得清楚，可以縮短照相機與被拍攝物體間的距離。以此觀之，人造衛星拍照時雖然可藉著降低對地高度以縮短距離，但是，人造衛星高度越低時，飛行的速度越快，與地面之間的相對速度也越快，這對拍出來的影像有負面的影響。因此要拍出一張清楚的衛星影像，除了人造衛星本身裝置的硬體規格要高標準外，也必須考慮軌道高度與對地速度。

## 地球同步軌道

從地面上的固定位置來看，大部分的人造衛星都是處於移動的狀態。就像月亮，也不是固定在天上的某個位置。由於人造衛星是利用無線電訊號與地面傳遞資料，如果衛星一直固定在同一個地方，這顆衛

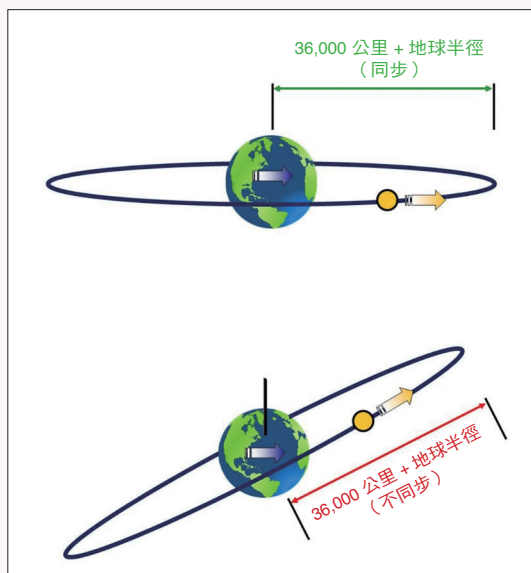


衛星圖

星能通信的範圍就只有無線電訊號所能涵蓋的範圍。如果衛星的任務是觀測地球，可以觀測的範圍就很有有限。但偏偏有些人造衛星的任務就是需要一直固定在地面上的同一個位置，這種衛星所運行的軌道就稱為地球同步軌道。

如前述，人造衛星繞地球一圈所需要的時間與飛行高度有一定的關係，繞行的半徑越長，所需要的時間就越長。如果希望人造衛星繞行一圈是 24 小時，它的高度必須是距離地表 36,000 公里。

值得注意的是，雖然衛星在距離地表 36,000 公里繞行一圈的時間，跟地球繞一圈的時間一樣，但是地球自轉是以通過南北極的軸心在轉動。如果目的是讓「人造衛星一直固定在相對於地面的同一個位置」，人造衛星也必須繞著地軸旋轉。也就是說，以地球的中心為圓心，繞著地軸而行的 36,000 公里上空，是唯一可以讓人造衛星與地球同步的一條軌道。這條軌道



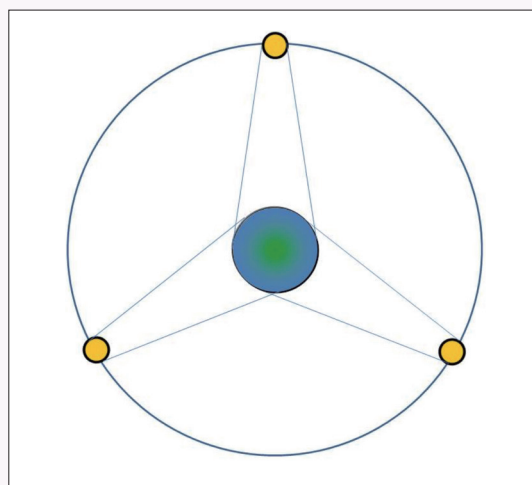
地球同步軌道

就是地球同步軌道，它就在地球赤道的上方。既然同步衛星會一直固定在相對於地面上的同一個位置，它可以持續地對地球上的同一個範圍連續觀測。以氣象衛星來

說，如果是取得同一地區衛星雲圖為任務，就很適合放在地球同步軌道上。日本就有一個地球同步的氣象衛星，它在赤道上空東經 140 度的同步軌道上。因為它相對於地球上的位置是固定的，所以從衛星上可以持續觀測日本的鄰近地區，並把雲圖資料做成動畫來協助氣象分析。

通訊衛星也需要在地球同步軌道上運行，像是電視實況轉播衛星訊號傳遞，必須在訊號不中斷的情況下進行。如果通訊衛星能夠一直保持在相對地面的同一個位置上，地面上的衛星訊號接收站就可以持續接收到衛星訊號，常見的碟形天線也只需要一直對準同一個方向就可以了。由於無線電訊號是直線前進的，如果希望讓通訊衛星的訊號可以覆蓋全球，至少需在地球同步軌道上的 3 個通訊衛星才能做到。

另外還有一些因素會影響人造衛星的運行，像地球並非正球形，這會造成衛星在運行時軌道面會轉動，這樣的轉動也常利用來設計軌道。還有衛星軌道上些微的空氣所產生的阻力會造成衛星的速​​度降低，而使得軌道高度逐漸降低。



地球通訊衛星覆蓋示意圖

人造衛星會因不同的任務，需要在各種不同的軌道上運行。本文中所介紹的人造衛星軌道，都是以理想情況來討論的。

蕭俊傑

國家實驗研究院國家太空中心

