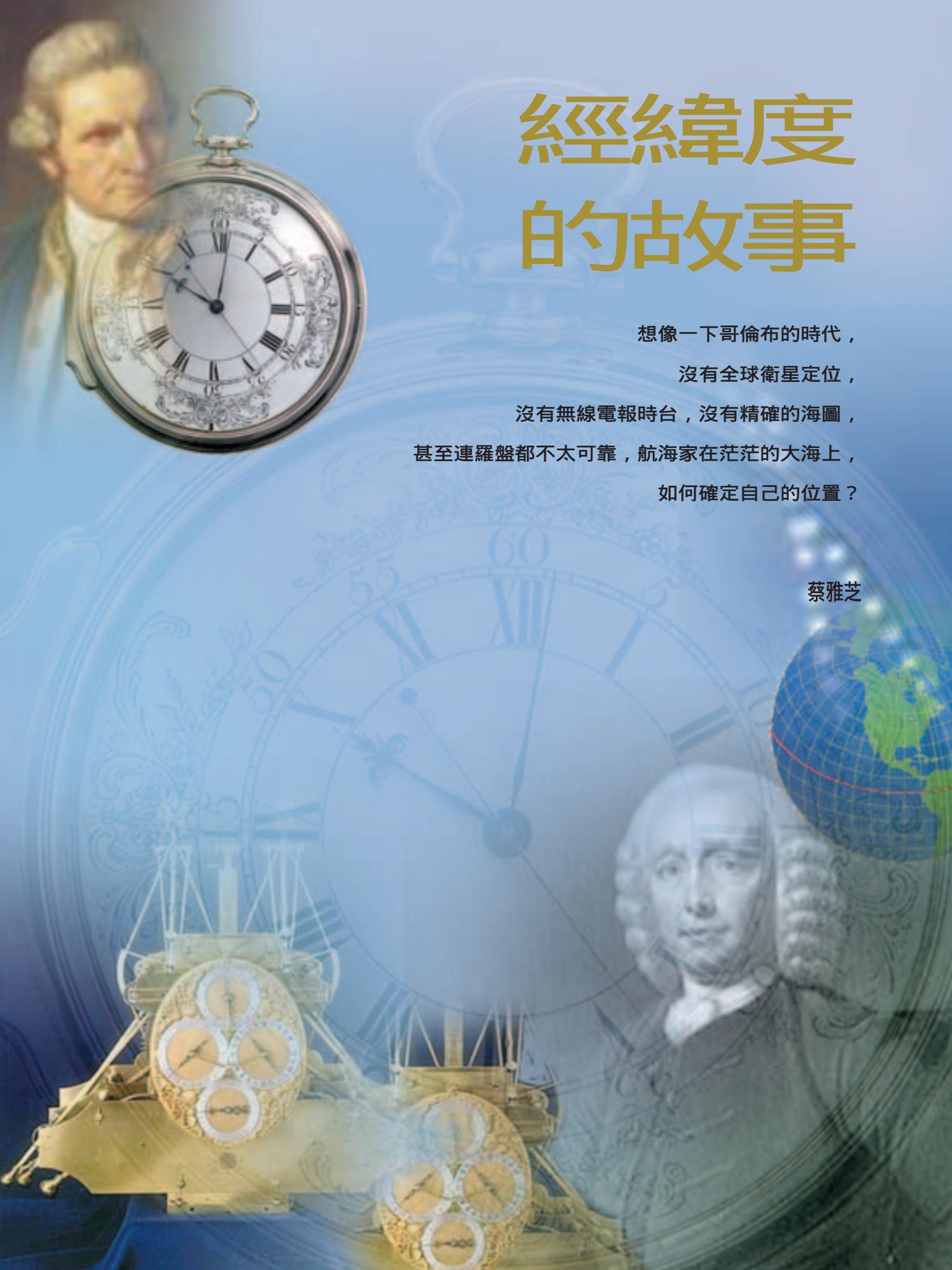


# 經緯度 的故事

想像一下哥倫布的時代，  
沒有全球衛星定位，  
沒有無線電報時台，沒有精確的海圖，  
甚至連羅盤都不太可靠，航海家在茫茫的大海上，  
如何確定自己的位置？

蔡雅芝



在最近幾齣描寫大航海時代的電影中，佇立在船首的船長頻頻仰望天空，您猜他在做什麼？向上帝禱告嗎？其實除了祈禱以外，更多的時候他是在觀星，因為星辰（包括太陽）的方位提供了判斷船艦位置所需的資訊，而一艘船是否能平安地往返於各個大陸之間，不致迷失在汪洋中，全靠船長是否能確實地掌握船隻的位置。

迷失在大洋中可能會有兩種下場，一是島嶼或大陸突然出現，船隻來不及應變而觸礁或擱淺，或是找不到陸地，不待船上的糧食飲水用罄，船員便會因壞血症而逐漸凋零，最後整艘船成為空無一人的鬼船。事實上，由於缺乏可靠的海上定位方法，早期的人類只敢沿著海岸線航

**地球近似球形，因此海上航行只需要描述南北和東西方向的兩個角度，就可以標定地球表面上的任何一點，這樣的座標系統就是經度和緯度。**

行，因此活動範圍僅限於近海，或者是像地中海之類的小片水域。直到13世紀，浩瀚的大洋依舊是人類無法跨越的天然障礙。

15世紀的葡萄牙人首先發展出用天體位置計算緯度的方法，讓人類逐漸具有在大洋中定位的能力。隨著天文航海學的成熟，勇敢的航海家開始深入大洋探索

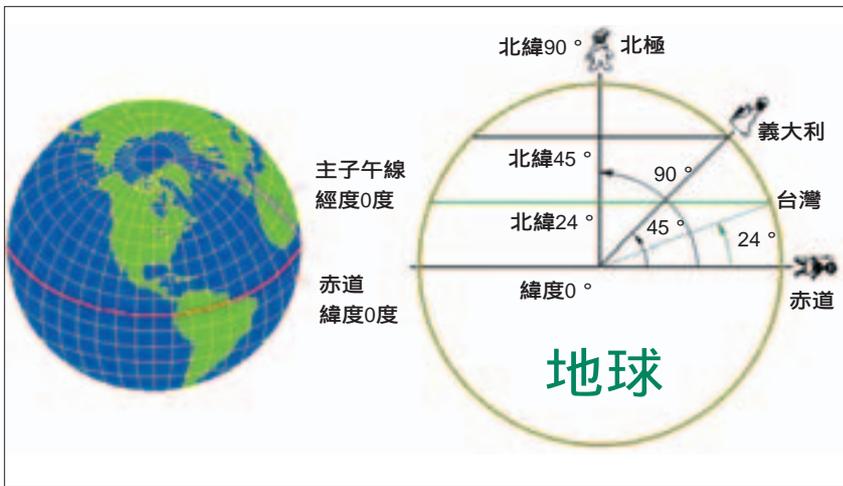
新世界，揭開了大航海時代的序幕。究竟人類是如何利用天體來定位的呢？

### 海上座標 -- 經緯度的劃分

要討論海上定位，得先認識表示船舶位置的座標系統。船舶都是在海面上航行，而地球又近似球形，因此只需要描述南北和東西方向的兩個



偉大的英國探險家詹姆斯·庫克 (James Cook) 船長第二次發現之旅所搭乘的帆船「決心號」(Resolution)。航海家在茫茫大海中，如何確定自己的位置？



經緯度劃分的示意圖

角度，就可以標定地球表面上的任何一點，這樣的座標系統就是經度和緯度。

緯度線是東西走向、平行於赤道的圓。由赤道開始，北至北極、南至南極各劃分成90度，也就是說赤道是零度，地理北極是北緯90度，地理南極則是南緯90度。台灣的位置在北緯24度左右，因此如果從我們腳下畫一條線連接地球中心，這條線和赤道面的夾角大約就是24度。

經度線又稱作子午線，是南北走向的半圓弧。經度零度線稱作主子午線，以它為基準，向東至地球的正背面共劃分成180度，稱作東經，向西也劃分為180度，稱作西經，合起來繞地球一圈正好是360度。經度和時

間有相當密切的關係，地球平均每24小時自西向東轉1圈，相當於每小時轉15度。換句話說，經度每向東1度，時間便提早4分鐘。根據這個關係，如果以經度零度所在的時間為標準時間，不論你身在何處，只要知道當地時間與標準時間差多少，就可以大略換算出當地的經度，主子午線的重要性自不言而喻。

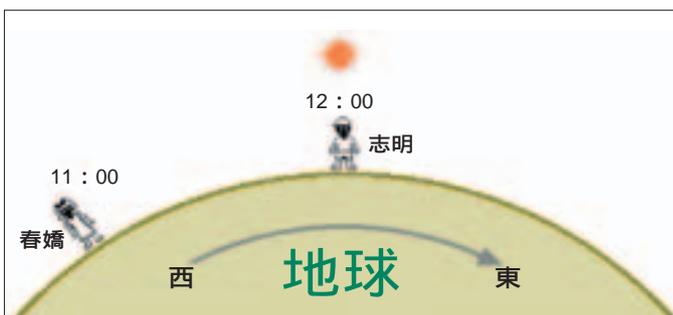
**主子午線** 然而經度零度的選定不像緯度有赤道做為客觀的基準，主子午線要選在哪裡，純屬人為操作，這就牽涉到強權間的角力。始於15世紀的海權時代，最早的霸主是葡萄牙人，當時的葡製海圖是以穿過大西洋葡屬馬德拉島的經線做為主子午線。在這以後的3個世紀中，儘管葡萄牙

的國勢日趨沒落，航海家仍然以馬德拉島做為計算經度的基準。

到了18世紀，英國崛起，選擇以穿過格林威治的經線做為主子午線，於是航海者開始同時使用葡製和英製的海圖。然而，傳統還是敵不過局勢的發展，到了19世紀的後半期，七成的海圖都已經採用英式基準，終於在1884年，25個國家在華盛頓召開國際子午線會議，通過以英國的格林威治為經度零度的基準，於是格林威治的時間正式成為標準時間，這就是「格林威治標準時間」的由來。讀者如果有機會到格林威治天文台一遊，千萬別錯過一件事：跨立在那條鑲在地面的主子午線上拍張紀念照，那可是足跨東西兩半球的最佳證明！

**緯度的測量** 天空中最常見也最容易觀察的天體莫過於太陽了，人們自然以它為參考天體。太陽與地平線的夾角稱作太陽高度。太陽每天由東方升起，高度逐漸增加，在正午（又稱中天）時，高度達到一天的最大值，然後太陽逐漸下降，黃昏時沒入地平線。

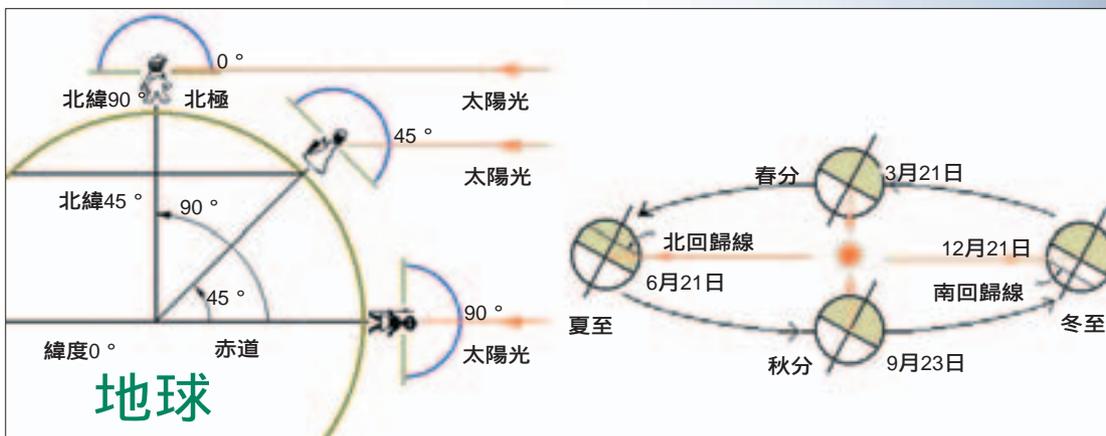
為了方便說明，先假設地軸垂直於公轉面，這代表太陽永遠直射在赤道上。正午的時候，觀察者所在的經線正好轉到面對太陽的位置，這時的



如果志明住在春嬌東邊的15度經度的地方，那麼在中午12點，志明肚子開始咕嚕咕嚕叫的時候，春嬌的手表顯示才剛剛好是上午11點鐘。



1516年製的葡萄牙海圖，可以由它的局部放大圖清楚看見：主子午線就緊鄰著馬德拉島。

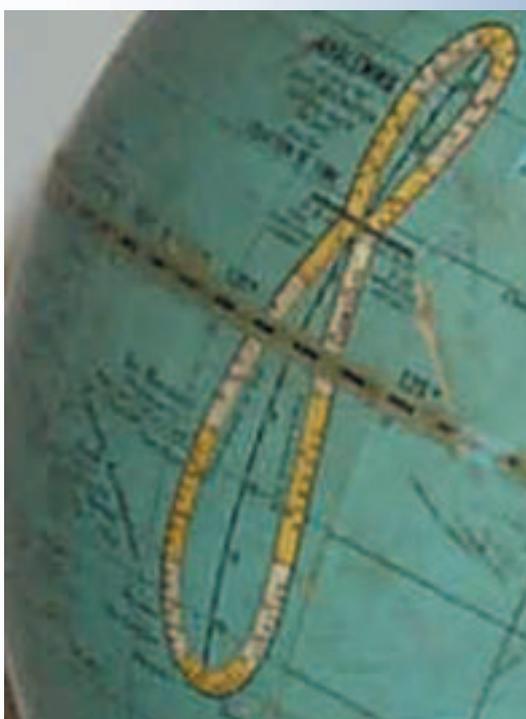


太陽直射赤道時，觀察者所處的緯度，等於90度和所能看到太陽高度最大值的差值。

太陽高度是一天的最大值。然而由於觀察者所處的緯度不同，見到的太陽高度也不同，緯度越高，見到的太陽也越低，也就是觀察者所處的緯度恰等於90度減去正午時的太陽高度。

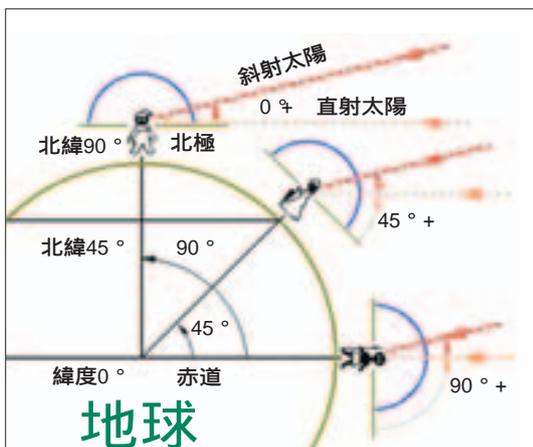
事實上，由於地軸不垂直於公轉面，一年365天中只有春分（3月21日左右）及秋分（9月23日左右）兩天太陽會直射在赤道上。在其他日子裡，太陽的直射點是在南北回歸線之間來回移動，因此在大部分的日子裡，觀察者所見到的太陽是斜射的。太陽光與赤道的夾角稱作太陽傾角，它的大小是由地球在公轉軌道上的位置來決定，也就是只跟日期有關，而和觀察者在地球上的位置無關。

所以，真正的緯度等於前面所得到的緯度再加減太陽傾角，如果是在北半球就用加的，在南半球則用減的。因此，只要知道太陽高度和太陽



<http://www.20thcenturyglobes.com/glossary.htm>

地球儀上的8字圖案，位置通常在南美洲厄瓜多爾外海的赤道上。



圖中的 就是太陽傾角

傾角，就可以算出自己所在的緯度了。

**日行跡8字圖** 太陽高度可以透過測量取得，那麼太陽傾角呢？由於太陽傾角只跟日期有關，不會受觀察者在地球上的位置所影響，因此不必等到出海，陸地上的天文學家早就幫你觀察記錄好，製成方便的圖表了！細心的讀者可能曾經在地球儀上看過類似8字型的圖案，它的位置通常在南美洲厄瓜多爾外海的赤道上，這就是有名的日行跡，俗稱8字圖，而我們需要的太陽傾角便在圖中。



每天在同一時間記錄太陽的位置，一年下來，太陽的軌跡會形成一個8字型。

這個8字形是怎麼來的？如果你每天在同一個時間記錄下太陽的位置，你會發現太陽的位置每天都略有改變，一年下來，它的軌跡會形成一個8字型。太陽的位置為何天天會變？這個圖又要怎麼使用？讓我們以一個簡化的8字圖為例來說明。

在8字圖中，縱軸代表的是不同日期下的太陽傾角。若由春分開始，春分時太陽直射赤道，傾角是零度。之後，隨著北半球夏季的到來，傾角向北逐漸增加，到了夏至的時候，太陽直射點抵達北回歸線，北傾達到最大值，然後直射點開始往南移，傾角日漸減少。到秋分的時候，太陽再度直射赤道，傾角再一次是零度，然後傾角向南逐漸增加，一直到冬至的時候，太陽直射點抵達南回歸線，傾角達到最大。然後，直射點開始往北移，傾角日漸變小，等到次年春分時，再回到零點，進入另一次循環。

8字型曲線上任一點在縱軸的投影，就是該點對應日期時的太陽傾角。使用的時候，只需要先找出當天在曲線上的位置，再挑出對應的角

度，就可以算出緯度了。

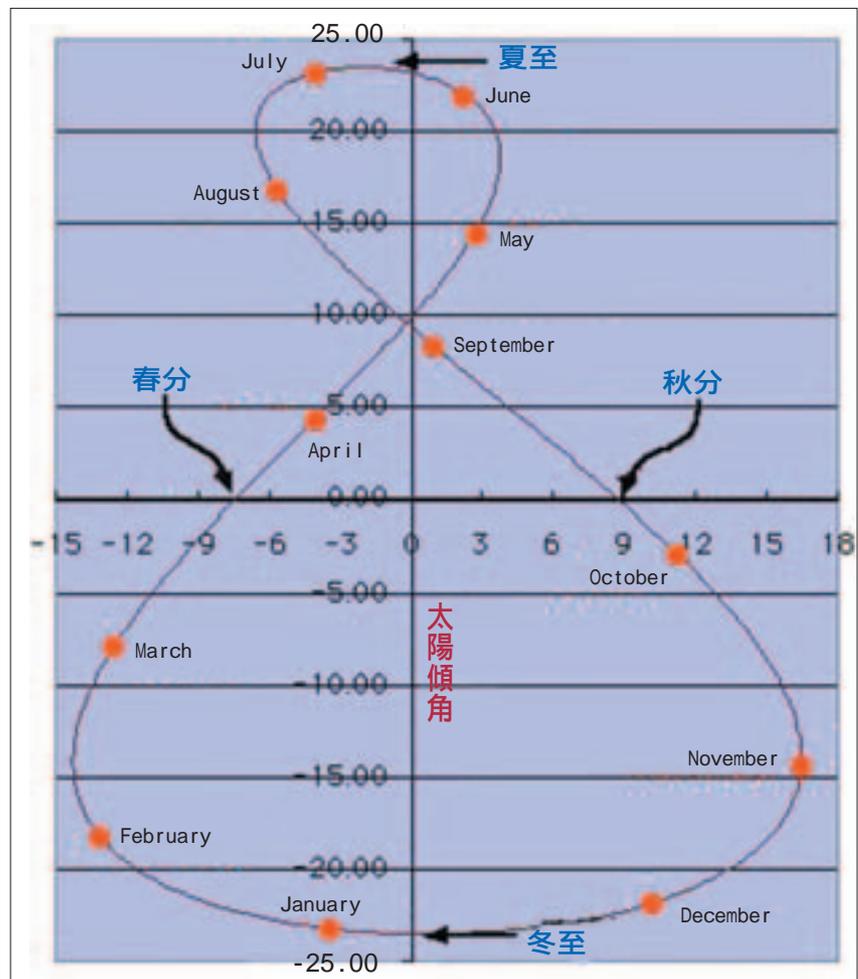
當然，前面所講的如何計算緯度的方法，只是簡化以後的結果。真正的船長靠的是更精密的航海曆，採用的計算方法也複雜許多，除了要顧慮地球並不是真正的球形外，甚至連甲板離海平面的高度、大氣折射所造成的誤差等細節，也都得納入修正。

**經度的測量** 接下來我們來看如何決定經度。前面提過，由於地球每24小時自西向東轉1圈，所以，經度每向東1度，時間就提早4分鐘。因此，觀察者出海的時候，只要帶著一個設定為格林威治標準時間的精準時鐘，在當地正午的時候，比較當地的時間和格林威治的時間差了多少小

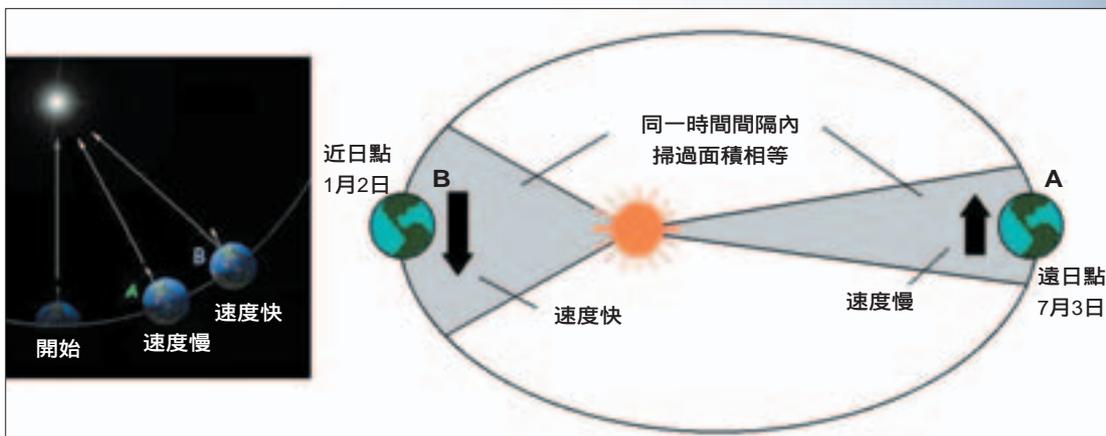
時，就可以算出自己所在的經度了。

可惜事情並非這麼簡單。如果把一個正午到下一個正午所經過的時間稱為一天，那你會發現每天的長短略有不同，有時候不到24小時，有時候卻會超過24小時。這種根據太陽位置所定出的一天稱為「真太陽日」，而人們常說的一天24小時，僅僅是一整年下來的平均值，稱為「平均太陽日」。

換句話說，我們有兩種計時系統，上述設定為格林威治標準時間的精準時鐘屬於「時鐘時間」，而觀察者根據太陽位置定出的當地正午屬於「太陽時間」。必須先把格林威治標準時間轉換成「格林威治太陽時間」，



縱軸代表的是不同日期下的太陽傾角，橫軸是計算經度所需要的時間方程式。



克卜勒第二定律說明太陽與地球的連線在相同時間內所掃過的面積相等，因此地球距離太陽越近，在軌道上走得就越快。

才能與「當地正午的太陽時間」做比較。

為什麼一天有長有短呢？這與地球的公轉軌道並非圓形以及地軸不垂直於公轉面有關。大家都知道地球的公轉軌道是橢圓形，根據高中物理所提過的克卜勒第二定律，太陽與地球的連線在相同時間內所掃過的面積相等，因此地球距離太陽越近，在軌道上走得就越快；相反地，離太陽越遠，走得就越慢。

地球公轉的速率隨地球在軌道上的位置而有所不同，但是地球自轉的速率卻是固定的，當公轉速率小於平均值時，地球上的同一點只要轉動較小的角度就能再度面對太陽，因此一天比較短。相反地，公轉速率大於平均值時，地球需要轉動更大的角度才能再次面對太陽，所花的時間也比較長，因此一天變長了。如果再加上地軸傾斜的效應，每天長短不均的現象就更明顯了。科學家把太陽時間與時鐘時間的差距稱為「時間方程式」，也就是說，只要知道時間方程式，就可以把格林威治標準時間轉換成格林威治太陽時間，然後求出經度。

問題是哪裡可以找到時間方程式？這時8字圖再度派上用場。8字圖的橫軸正是計算經度所需要的時間方程式，只要挑出時間方程式當天的值，就能換算出自己的經度。有興趣的讀者不妨按照上述方法，算出自己家所在的經緯度，然後再找一台全球定位系統比對一下，看看結果準不準。

經緯度的計算仰賴正確的航海曆或8字圖，說明了天文學在航海上的重要性，這也是當時西歐各國紛紛設立天文台的原因。對於緯度來說，除了8字圖外，大抵上還需要精密的測角儀器，這一點在六分儀問世後已經不再是問題了；但是在經度方面，還欠缺一個精確的海上計時器來顯示格林威治標準時間，為了找到這個可靠的海上計時器，西方可是花了400年的時間。

提到計時器，人們最先想到的是時鐘。17世紀的歐洲大陸不乏準確度夠高的擺鐘，然而它們在陸地上的優越表現到了海上卻大為走樣。撇開氣壓與濕度的變化不談，船上的時鐘還得忍受由於季節和日夜造成的劇烈溫度起伏，而熱脹冷縮往往會造成鐘擺長度的改變，使調節器的周期不再固定。更嚴重的問題是，船身的擺盪會導致鐘擺周期大亂，因此擺鐘在船上根本無從發揮。由於缺乏能在海上使用的人造時鐘，天文學家便把腦筋動到天體上，試圖在天空中尋找所謂的「上帝的時鐘」。

**上帝的時鐘** 所謂的「上帝的時鐘」，其實就是一種可以在地球上的兩個不同地方，但是同時可以觀察到的天象，例如日、月食等。只要知道天象發生時兩地的各別時間，就可以換算出兩地的經度差。但是，日、月食實在太罕見了，航海者要的是最好天天發生且容易觀察的天象。

1610年，伽利略（Galileo Galilei, 1564-1642）發現了木星的4顆衛星，並且觀察到它們大約每



伽利略



詹姆士 庫克

隔 42 小時，就消失在木星背後（也就是木星的「月食」），於是他計劃以它們做為計算經度所需的天體時鐘。

伽利略不但向西班牙國王菲利普三世提出這個構想，甚至設計了一種附望遠鏡的航海頭盔，以方便觀測木星的衛星。可惜他的提議並未被採納，原因無它，別說是在顛簸的船上，即使在陸地上都很難看見木星的衛星。白天當然看不見，在夜間少數可以觀測的時段，還得天公作美沒有雲層遮掩才行，因此太不實用了。伽

利略的「木星月食法」雖不適合海上使用，稍後卻在陸地上廣受採納，測量員及製圖家據以重新繪製各種地圖，大大提高了地圖的可信度。

**月距法** 除了木星的衛星之外，另一個受到青睞的天體也是衛星——月球。早在 16 世紀初，天文學家就已經想到以月球為自然時鐘，做為計算經度的參考。

這種稱為月距法的原理大概如下，首先，由天文台把各恆星的位置繪製成精確的星圖，然後每隔 3 小時觀測、記錄月球在恆星間的位置，製成表格出版。在海上使用的時候，航海家必須觀測月球與特定亮星間的相對位置，然後根據天文台的表格計算出格林威治時間。一直到 17 世紀中葉，這個方法還只是紙上談兵，因為實際上要克服的問題很多：例如由於缺少觀測數據，當時尚不清楚各個恆星的位置，也不了解月球運動的規則，更缺乏能在顛簸的船上精確測量角度的工具。

月球由於分別受到地球與太陽的引力作用，白道（月球繞地球公轉軌道）與黃道（地球繞日公轉軌道）中間，又有 5 度的夾角，因此它的運動其實相當複雜，牛頓雖然發現了萬有引力定律，但窮其一生也無法釐清月球的運動。到後來，他甚至懷疑天文學家給他的觀測數據是錯的。

不過隨著各國天文台的設立，大量觀測資料出爐，天文學家逐漸能掌握月球與恆星間的相對位置，而六分儀在 1730 年代問世後，缺乏精確測量工具的問題也迎刃而解。各種障礙一一排除後，月距法有很長一段時間成為地圖界及航海界賴以計算經度的主

要方法。不過這個方法在使用上既複雜又耗時，計算一次平均要花約 4 小時，在顛簸的船上本來就很難做精確測量，如果遇上陰天或朔日這種沒有月亮的夜晚就更沒輒了。因此，自從可靠的航海計時器發明以後，月距法便逐漸被更簡單、也更直接的時差法（時間方程式法）所取代。

事實上，偉大的英國探險家詹姆士 庫克船長在他的第一次發現之旅，還是採用月距法，但到了第二次的發現之旅，就改用航海計時器了。

## 經度大賞

17 世紀末，英國的海上貿易隨著殖民地的拓展而日益蓬勃，然而，船隻卻因為缺乏有效的海上定位方法，而失事頻繁。最嚴重的一次船難發生在 1707 年，4 艘皇家海軍的船艦在即將返抵國門前觸礁沈沒，死亡超過 2 千人，舉國為之震驚。來自社會各界要求解決經度問題的聲浪越來越大，終於迫使英國國會祭出重賞，這就是有名的經度大賞。

1714 年 7 月 8 日，英國國會通過了一項法案，懸賞高額獎金，徵求能解決經度問題的「實用」方法。這個方法必須在由大不列顛駛往西印度群島的船隻上測試，如果誤差在 1 度（4 分鐘）以內，可以得到獎金 1 萬英鎊；誤差如果在 0.75 度（3 分鐘）以內，可以得到獎金 1 萬 5 千英鎊；誤差如果在 0.5 度（2 分鐘）以內，可以獲得全額獎金 2 萬英鎊（現在折合約新台幣 1 億元）。官方同時成立了「經度委員會」，負責把關審核。

其實在英國之外，其他海權國家也設立了類似的獎金，像前面提到的

伽利略，就是打算用「木星月食法」爭取西班牙的獎金。伽利略沒能贏得獎金，月距法儘管受到幾任的皇家天文學家的支持，但也因為不夠「實用」而敗下陣來。最後，懸宕400年的經度問題，不是解決在什麼大師、教授的手裡，而是由一個沒受過多少正規教育，但創造力與意志力過人的鄉下鐘表匠約翰 哈里遜 (John Harrison, 1693-1776) 所破解。

**哈里遜的航海計時器** 哈里遜出生在英國的約克郡，但旋及舉家遷至林肯郡。對繁華的首都倫敦來說，兩郡都算是生活步調緩慢，甚至落伍的鄉下地方。哈里遜的父親是木匠，自小耳濡目染，他很快就展露出機械設計方面的天賦（當時許多機械還是木製品），20歲時完成生平的第一個木製立鐘。他與幼弟詹姆士搭檔，兩人在1720年代設計製造了許多傑出的立鐘，其中有些到目前還在運轉。

為了克服熱脹冷縮所造成的鐘擺長度變化，哈里遜發明了以兩種膨脹係數不同的金屬交錯製成的擺棍，使擺鐘的準確度大幅提高到每個月只有1秒的誤差。在這同時，經度大賞的消息傳到了偏僻的林肯郡。如果哈里遜能製造出一台便於

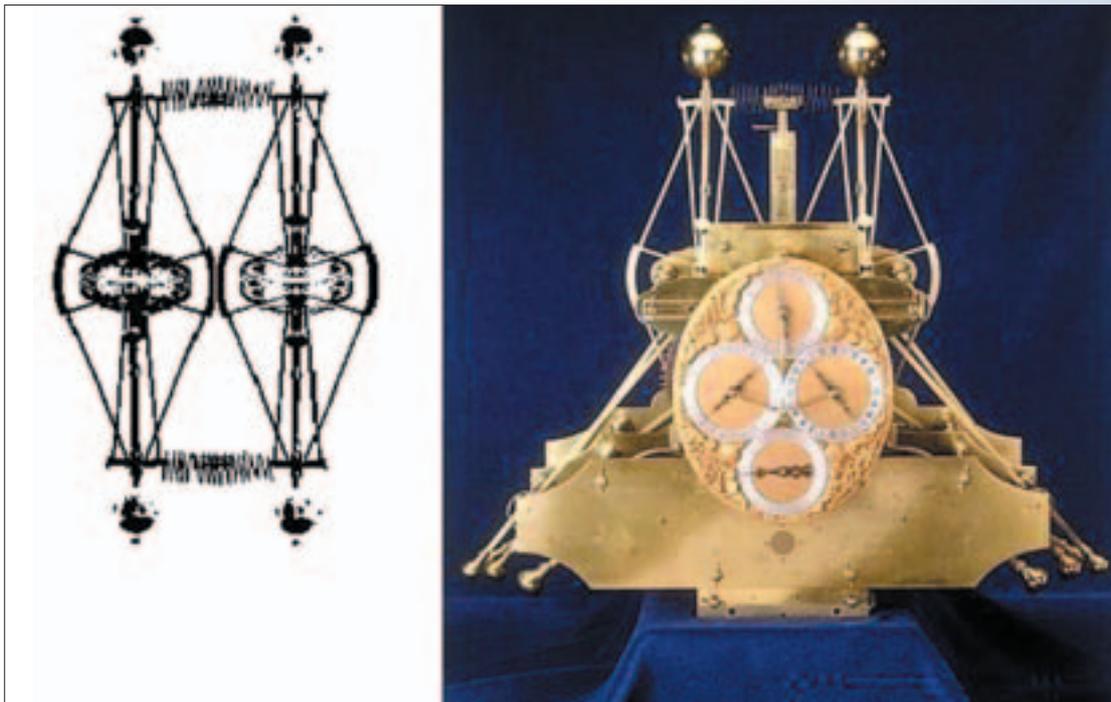


Copyright: National Maritime Museum

約翰 哈里遜

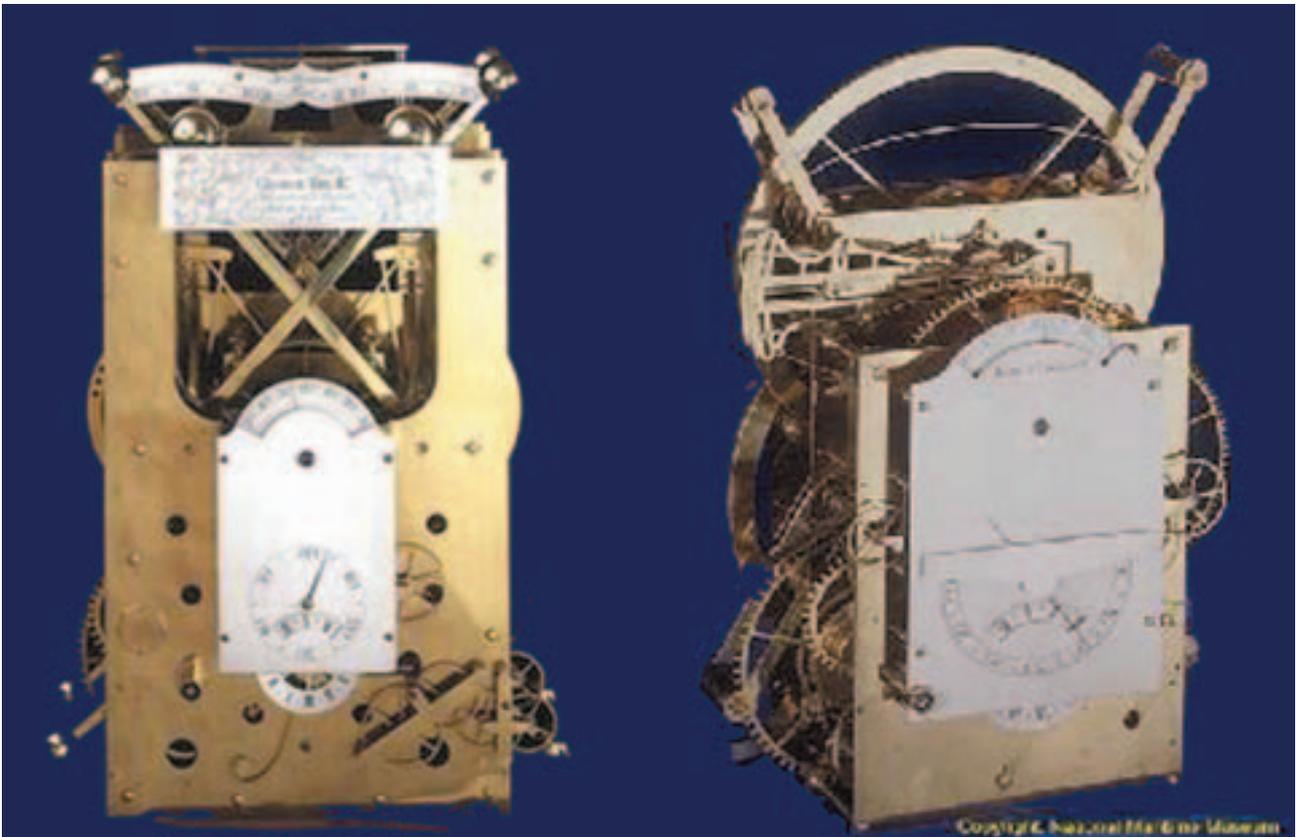
攜帶，但仍能保持相同準確度的時鐘，經度的解決就有望了，然而他得先面對最大的困難 -- 船身搖擺造成鐘擺周期不定的問題。

為了解決這個問題，哈里遜在擺鐘內添加了平衡裝置，並用彈簧把兩個平衡桿上下相連，如此鐘體本身的運動對其中一個平衡桿的影響，會由另外一個平衡桿補償回來，使得時鐘的規律性



Copyright: National Maritime Museum

航海計時器 H1 及其平衡裝置



航海計時器 H2 (左) 及 H3 (右)

不會受到鐘體的運動而影響，於是哈里遜的第一個航海計時器H1（其中H是取其姓氏的第一個字母）出爐了。

H1基本上是他的木造時鐘的金屬翻版，重達35公斤，靠發條驅動。1736年，哈里遜刀小試，帶著H1由葡萄牙的里斯本登船航行到牛津，H1的表現良好，不過事事求完美的他並未要求經度委員會舉行正式測試，而是申請經費製造第二個計時器。

第二個計時器H2與H1的原理相似，但體積與重量都更大。工作進行了3年，哈里遜才發覺平衡桿並不會完

全抵銷船身搖擺造成的影響，必須改成平衡輪才可以，於是向委員會申請更多的經費製造第3個計時器。H3花了哈里遜19年的工夫，委員會大感



航海計時器H4

不耐，可是最後破解經度問題的卻不是它。儘管如此，由它衍生的幾項發明，例如雙金屬條和抗摩擦的珠形承軸等，在今日的許多機器內部依然可見，因此也不算是白走一遭。

1753年，哈里遜請鐘表匠根據他的設計，製作一個私人用的表，目的是協助他測試H3。沒想到無心插柳成蔭，哈里遜發現只要稍做改良，這隻表便能成為出色的航海計時器，這就是最後破解經度問題的H4。當時根本沒有人敢想像，連歷代衰衰諸公都束手無策的經度問題，竟然能被一隻表解決！

**破解經度問題** H4的直徑只有13公分，重1.45公斤，貌似一只大型懷表。1761年H4登場時，哈里遜已經68歲，再也禁不起海上的折騰，因此由兒子威廉代勞。威廉兩度帶著

H4 航行到西印度群島，H4 的表現都遠遠超過經度大賞的要求，照理說應該可以贏得全額獎金，可是委員會卻一再刁難。委員會質疑 H4 只是僥倖之作，他們要求哈里遜公開他的設計，卻只肯付一半的獎金，至於另一半的獎金，必須等到 H4 的複製品通過測驗，才能付給哈里遜。

最初哈里遜拒絕接受這種無理的要求，但後來還是妥協了。1765 年，他公開了 H4 的內部構造，並應委員會的要求交出 H1 到 H4 共 4 個計時器，還推薦當時頂尖的鐘表匠肯道爾複製 H4，這才領到一半的獎金。

為了得到剩下的獎金，年過七旬的哈里遜與威廉又造了 H5，同時肯道爾也模仿 H4 製造了後來稱為 K1 的計時器。1772 年，高齡 79 歲的哈里遜向英王喬治三世陳情，國王非常同情他們，甚至親自上陣測試，H5 的表現也沒讓人失望，但委員會卻拒絕認可御駕親征的結果。不得已，父子倆轉向國會申訴，最後終於在 1773 年 6 月獲國會頒發獎金 8,750 英鎊（不是剩下的一半獎金 1 萬英鎊），算是承認他解決了經度問題。哈里遜的大名從此與他的航海計時器一塊兒永垂不朽。

**西方世界自 15 世紀開始，經由科學上的一連串進展與發明，掌握了判斷經緯度的方法，從此大洋不再是不可跨越的屏障，海權時代的序幕於焉揭開。**

值得一提的是，肯道爾的 K1 於 1772 年隨著庫克船長出海進行第二次的發現之旅。在長達 3 年的航期中，庫克的足跡遍及大洋洲和南極洲，然而不論天氣如何變化，環境如何惡劣，K1 每天的誤差從未超過 8 秒（在赤道相當於 3.6 公里或 2 海里），深得庫克的信賴與讚賞。

哈里遜在庫克歸來後的第二年過世。在他眼前，至少親睹了他的航海計時器，受到當代最偉大航海家的肯定，對於一個窮其一生追求精確航海計時器的天才來說，再也沒有比這個更崇高的讚美了。從此，船長只要帶著航海計時器出海，便可以根據時差推算自己所在的經度，人類在茫茫大海中，不再進退失據。

哈里遜的這幾個計時器，如今還陳列在格林威治天文台的航海博物館內，繼續發揮教育的功能。讀者如果有機會到格林威治一遊，務必要看看這些對天文航海具有重大貢獻的精巧儀器。

經緯度的故事凸顯了科學對人類文明及政治勢力興衰的巨大影響。西方世界自 15 世紀開始，經由科學上的一連串進展與發明，使天文航海學趨於完備，因而掌握了判斷經緯度的方法，從此大洋不再是不可跨越的屏障，海權時代的序幕於焉揭開。西方列強的勢力不再局限於大陸，而是乘風御浪向全世界拓展，英國之所以能成為稱霸七海的日不落國，與其說是靠船堅砲利，不如說是扎根於科技的實力。這一點值得地狹人稠但標榜是科技島的我們做為借鏡。

蔡雅芝  
逢甲大學光電學系

**版權說明：**

所有附圖及人像都出自格林威治航海博物館，有關「哈里遜及經度問題」的網頁（<http://www.nmm.ac.uk/server/show/con WebDoc.355/viewPage>）



[http://www.nmm.ac.uk/uploads/jpg/D9661\\_20021217102852.jpg](http://www.nmm.ac.uk/uploads/jpg/D9661_20021217102852.jpg)

計時器 K1