



三聯委員會專欄

國際單位制(SI)新制概述

TAF技術委員會／孫紀光



一、前言

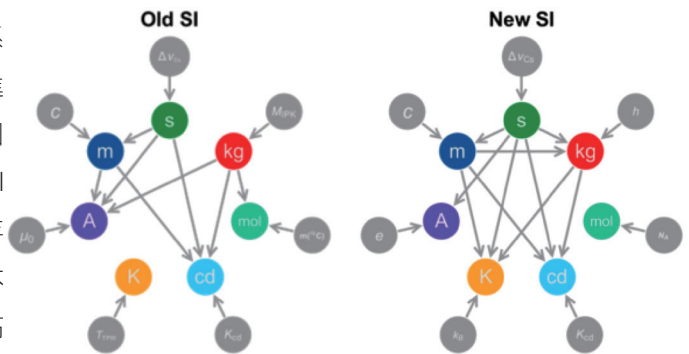
國際單位制SI新制已於2019年5月20日正式生效，新制對我們有何影響呢？較舊制又有甚麼變化呢？就讓我們一起來探討吧！

人類從遠古時期開始，人們就會以身體的部位來進行量測，像是古埃及人，以四隻手指的寬度定義為一掌尺，七個掌尺為一肘，聖經中的挪亞所造的方舟，要長三百肘，寬五十肘，高三十肘，而英王亨利一世則定義從他的大拇指到指尖的長度為一碼。然而這樣的量測方式造成許多問題，因為每個人的身體部位因人而異，且會隨者時間變遷而會有所改變，在國與國之間的交流上，造成極大不便，所以秦始皇在統一天下之後，統一了度(長度)、量(容量)、衡(重量)的計量單位。隨著時光推演到今日，世界各國也衍生出自己的單位系統，為了能讓各國能在統一的度量衡制度下進行交流，故由國際度量衡大會訂定出一套國際單位制(SI；源自法文的 *Système international d'unité*)。國際單位制(SI)的現行制度從1948年推展至今，由於量測技術的提昇，從目前基本單位的定義上，發現到有矛盾現象或無法提高精密度等限制。因此，國際度量衡局 (Bureau international des poids et mesures; BIPM) 著手推動SI單位之重新定義，期使所有的單位均直接由物理常數來定義，以跟上時代的腳步，更貼

近新的科技與產業。

二、現行與新版SI的差異

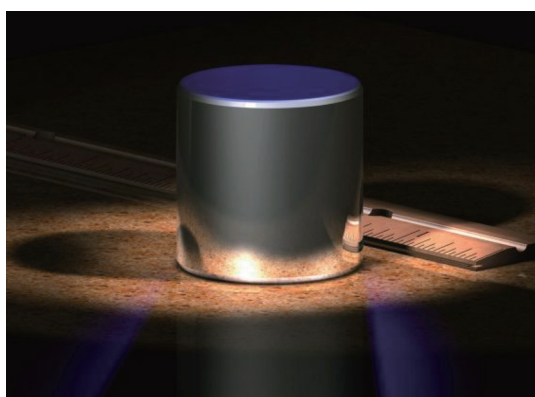
從現行的SI來看則面臨了許多問題，SI的七個基本單位，雖然視其量綱 (dimension) 似乎相互獨立，但實際上有些單位之間具有相連的關係 (圖1)。從定義可明確知道，莫耳取決於千克。燭光因為是功率的結果，故取決於千克、米和秒。此外，安培也是經由作用在導線上的力所定義，故取決於千克、米和秒。這樣的相依關係，或許對單位的實現具有互相監視的功能，而增強其可靠性，是其優點。而千克這種完全沒有相依關係的單位，則無法相互查驗。相同地，莫耳這個單位也沒有相互查驗的方法。



▲ 圖1

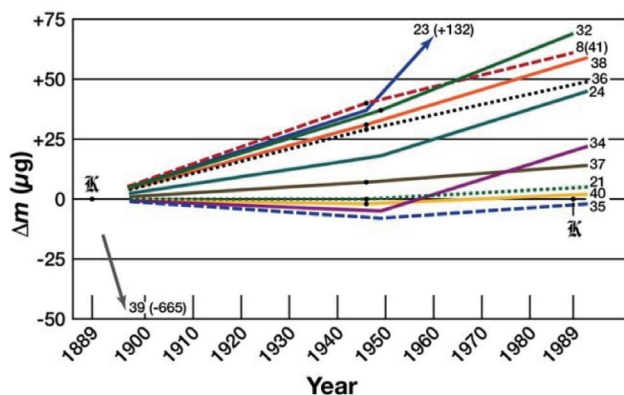
目前七大國際單位制當中，有六個單位是由沒有實體的自然現象所定義，只有一個單

位可以用實際物體來表示，那就是「公斤」。而公斤的定義則是來自於目前存放在法國巴黎近郊的國際標準局（BIPM）保險箱的標準砝碼「國際公斤原器（International Prototype of the Kilogram，簡稱 IPK）」，IPK是由90%鉑（platinum）及10% 鈱（iridium）打造，大小大概如高爾夫球的鉑合金直立圓柱體，平時放在真空封存的三層玻璃罩內(圖2)。



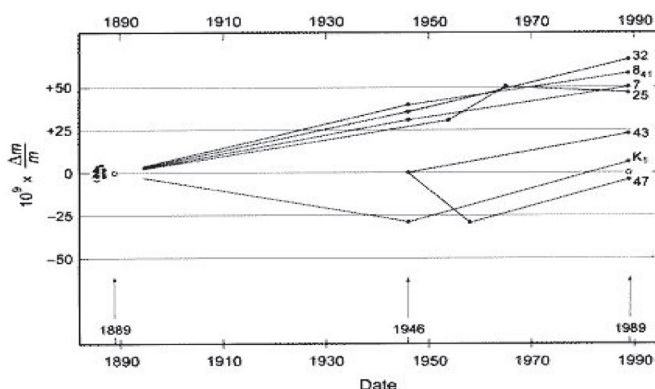
▲ 圖2

全球還有許多IPK的複製品，作為各國自己校正單位的標準。從1889年至1992年期間，各國從BIPM得到的副原器，和國際千克原器共進行了三次定期校正，比對結果之差異值從-0.50 μg到+65 μg (圖3)。



▲ 圖3 部份國家千克原器的變化

因此，1999年21屆CGPM即建議各國的國家計量機構 (National Metrology Institute; NMI) 對不依人工實物的質量之新定義進行研究。數年後，BIPM正式表示，六個保存在BIPM的副原器之平均質量與國際千克原器相較後，顯示在100年中國際標準千克原器的質量減少了50 μg (圖4)。此一結果表明國際千克原器的質量已不再是永久不變。



▲ 圖4 BIPM六個副原器與IPK比較

故SI面臨的第一個課題是以國際千克原器來定義質量有其存在的危險性。因此，CIPM即建議以基本物理常量為基礎，重新對千克進行定義。

三、新版SI的重大變革

根據計量單位諮詢委員會的提案，在2019年版本的定義中，所有基本單位的定義都將被改寫或者重寫。改寫核心是將定義由「單位中心」變為「常數中心」。在「單位中心」的定義中，一個單位是由實物例子定義。比如自1889年至2019年，公斤被定義為「國際公斤原器的質量」，即國際公斤原器的質量等於1公斤。在「常數中心」的定義中，自然常量被定以確定的值，單位的定義則通過自然常量



的定值作為結果呈現。比如自1983年至今，光速被定義為每秒299,792,458公尺，而秒已經被定義，因而米這個單位也因而被定義了。在2019年新定義中，秒、米和燭光的定義實質上沒有改變，只是文字上表達更為嚴格；公斤、安培、克耳文和莫耳則有根本上的重大改變。

1. 公斤

其中關於質量(公斤)的部分，計量學家們決議以自然界不變量：普朗克常數重新定義質量。普朗克常數是一個量子物理的常數，用以描述能量與電磁波頻率的關係。利用普朗克常數來實現質量的新定義的方式有2種，其一為瓦特天平法(watt balance)，紀念已故的發明者基布爾博士(Dr. Bryan Kibble)，2016年則正式改名為「基布爾秤(Kibble balance)」；另一為X光晶體密度法(XRCD method)，又稱為矽晶球法(圖5)，此方法亦為目前物量單位莫耳最準確的實現方法。



▲ 圖5

矽晶球法透過計數矽晶球中矽原子數量的方式來實現新公斤定義。取自自然界的矽經過純化、長晶、切割、研磨與拋光多道程序，製造出矽28同位素純度超過99.99%、直徑為93.7mm且真圓度為數十奈米的完美球體，藉

由計數矽晶球內含有多少顆矽原子，再乘以單顆矽原子平均質量實驗數值(此數值與普朗克常數聯結)，來算出矽晶球的質量。所以新制的“公斤”計算方式如下：

公斤，符號：kg，SI的質量單位。

當普朗克常數 h 以單位 $J\cdot s$ ，即 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ ，表示時，將其固定數值取為 $6.62607015 \times 10^{-34}$ 來定義公斤，其中米和秒用 c 和 $\Delta\nu_{CS}$ 定義。

2. 安培

另一個有重大變革的就是“安培”，原本的安培定義為在真空中，截面積可忽略的兩根相距1公尺的無限長平行圓直導線內，通以等量恆定電流時，若導線間交互作用在每米長度上的力為 2×10^{-7} 牛頓，則每根導線中的電流為一安培。此定義的最大貢獻是導出了真空中的導磁係數 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ ，但對於安培本身，由於此定義描述太過抽象且無法在實驗室中實現，故需藉由更準確的「基本電荷 e 」來重新定義安培，以提高其準確度。安培的新定義則是將安培以「基本電荷 e 的固定數值 $1.602176634 \times 10^{-19}$ 庫侖(C)定義之」，可表示為每秒流過 $1 / 1.602176634 \times 10^{-19}$ 個基本電荷的電流。此一定義，使電流的定義回歸「單位時間內通過的電荷數」之基礎物理原理。

在新電流標準實現上，可藉由單電子穿隧元件(single electron tunneling device)控制單個電子通過此元件的速率，以計算出電流。但是，目前單電子穿隧元件能產生的電流最高只能達到 10^{-10} A等級，且其相對不確定度約 10^{-6} 等級。因此，廣被各個國家計量院用來實現安培

新定義的方法，是藉由以基本電荷 e 及普朗克常數 h 所推導出之約瑟夫森電壓 ($V \propto h / 2e$) 與量化霍爾電阻 ($R \propto h / e^2$) 標準值，再利用歐姆定律 (Ohm's Law)，亦即：標準電流 (A) 為「約瑟夫森電壓 (V)」除以「量化霍爾電阻 (R)」，如此就能導出追溯至基本電荷 e 之電流標準。

3. 克耳文

克耳文定義：波茲曼常數的單位為J/K，以基本單位表示 $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$ ，是關係溫度和能量的物理常數，如此熱力學溫度即可從質量、長度、時間來定義。再者，波茲曼常數又是氣體常數 (gas constant) 和亞佛加厥常數的比，克耳文亦可於質量新定義之後，能和亞佛加厥常數或普朗克常數建立關係。從科學的觀點來看，這個新定義會使克耳文和其它基本單位連接起來，並且可以不再依賴某種特定物質在某特定溫度下的特性決定。從實際應用的觀點來看，這個新定義不會造成任何大的不良影響，水在一個大氣壓下的凝固點仍然是273.15 K (0 °C)。對於定義的實現，目前有音波氣體溫度計、熱雜訊溫度計等方法在研究中。

4. 莫耳

莫耳的定義：莫耳自1971年定義之後，即少有變更。不過，當千克進行重新定義時，「新SI」方案中，莫耳就連同安培、克耳文都一併被檢討要重新定義。2011年CGPM大會中，莫耳被提議重新定義為「莫耳是一個特定基本實體的物量單位，該實體可以是一個原子、分子、離子、電子、任何其他粒子，或是該等粒子的特定群組。其大小藉由固定亞佛加厥常數之數值等於 6.02214×10^{23} ，以SI單

位表示為 mol^{-1} 」。其中符號 X 表示一個或多個附加數字，將隨著時間實現更新。這提議的目的雖然是為使基本單位所定義方式有一致性，也有許多論點支持固定亞佛加厥常數的數值。因為依先前的定義，1莫耳純同位素碳12的質量是確切知道的，每個其他元素1莫耳的質量均具有該元素原子量的不確定度。不過無法陳述1莫耳實體的確切數，雖然其為亞佛加厥數，而亞佛加厥數卻有不確定度。如果改採固定亞佛加厥數的新定義，則任何元素1莫耳的實體的數目將被確切知道，只是任何元素1莫耳的質量將會有不確定度，即等於該元素原子量的不確定度。

四、結語

對科學界來說，準確的單位制度可是物理學研究的基礎，而新單位制度也是建立於最新的科學研究上，度量衡學家們預期在2026年實現對「秒」定義的更新。為了實現這個目標，度量衡業界需把世界各地的光學鐘進行對比，決定用哪種原子作為標準。到時也許會再有更重大的突破，身為專業計測人員的我們，則需跟上科學的腳步，精益求精，努力學習求進步才是。

✉ 參考文獻

- [1] SI基本定義 國家度量衡標準實驗室 陳兩興
- [2] SI基本單位的重新定義 科學月刊第586期 吳玉忻、陳士芳、蔡淑妃、劉信旺
- [3] 和百年公斤原器說再見！七大國際單位制520起換定義啦 泛科學