

# 高壓線、微波爐及電磁武器 Q&A

文/朱國瑞

過去一年來，作者以「微波及微波的應用」為題，在多所大學作通俗科學演講。聽眾大都是高中同學和社會人士，他們的問題生動有趣，討論的時間，往往比演講還長。演講內容已刊載於國科會「科學發展」月刊。這裡再將當時和聽眾的交談作一整理，為本期雙月刊提供一些輕鬆的話題。謹此感謝高雄應用科技大學李旺龍教授及呂淑雅、林士雄二位助理費心整理錄音紀錄。本系多位同學對初稿提出寶貴意見，在此也一併致謝。

## 高壓線

**Q1：**高壓線如何傳輸能量？

**A：**高壓線是兩條平行導線構成，它的規格通常用電流及電壓表示，這兩個量可以用來計算傳輸的功率，但不足以顯現能量的傳輸機制。從物理角度來看，高壓線是藉著周圍的電場和磁場來傳輸能量。高壓線附近的電磁場稱為近場(near field)，其中的磁場主要由導線中的電流產生(電流方向一正一反)，電場主要由二線之間的電壓差產生，二者正好相互垂直，以光速沿線流動(稱為 Poynting vector)，因此可以傳輸能量。電壓和電流以 60 Hz 的頻率變化，但因為電場和磁場的方向一起跟著變，能量維持在同一方向傳輸。

這樣看來，高壓線的四周像是一條電磁場的大洪流，高場強區的橫截面半徑大約等於二線之間的距離。反而是導線內的電磁場係垂直於表面向內傳播，並且迅速變為熱能，所以導線的裡面，不僅不能傳輸能量，還會造成歐姆損耗，甚至連線內損耗掉的能量也是從線外的電磁場傳輸進去的。

除了高壓線外，只要是傳輸能量的一對導線，不論是否平行排列，都是利用線外的電磁場作為傳輸工具，從插座接到家用電器的兩條導線，是常見的例子。即使是直流電，也有電壓差及電流，二線周圍的靜電場和靜磁場照樣可以藉 Poynting vector 傳輸能量，否則汽、機車電瓶裡的能量就無法送到前端的照明燈了。

**Q2：**高壓線如何使人觸電？

**A：**相對於地面，高壓線上的電壓高達幾萬甚至幾十萬伏。電場值是電壓差除以距離，假如一個人腳著地，把手伸向一條高壓線，等於把地面移向高壓線，手和線越接近，其間的電場越強，接近到某個程度，電場會將空氣中少數的游離電子加速到足夠能量，把中性分子中的電子撞出來，再將這些電子一起加速，撞出更多電子，產生連鎖效應，頓時在手和線之間造成一條導電通道，而人體和地面對 60 Hz 的低頻電源也是導體，電流因此經由通道和人體傳入地面，人就像被雷擊一樣。兩條高壓線之間要有相當距離，就是為了避免彼此之間的電場太強，而高壓線的危險性不僅在於碰到線會致命，而是一進到電磁場的洪流區就有觸電的可能。

**Q3：**住在高壓線附近的人，雖然不會觸電，但長期暴露在電磁場中，是不是比較容易罹患癌症？

**A：**有些個案研究認為高壓線有導致某種癌症的危險，也有報導指出，某一區住在高壓線附近的居民，癌症患者人數高於平均，因而造成許多的訴訟案件，而電力公司也不知為此作了多少疏通的工作，訴訟和疏通的費用都非常龐大。

高壓線是否會導致癌症，是一項極為艱巨和費時的研究工作，雖然目前仍是一個全球性的研究課題，但究竟已進行了數十年之久，相關文獻已具參考價值。美國物理學會在檢視現有的疾病

分佈和生物研究資料，以及參閱其他小組對高壓線致癌的評估報告後，認為這些資料和報告並未顯示高壓線和癌症之間的科學關連性，因此於 1995 年及 2005 年兩度發表聲明，要點是：「曝露在任何環境因素之下，都不可能絕對證明其無害於健康，但是要作出某一環境因素有害健康的結論，仍必須舉證二者之間一致的、有意義的、和互為因果的關係。基於此一觀點，高壓線導致癌症的臆測尚無科學依據」(“While it is impossible to prove that no deleterious health effects occur from exposure to any environmental factor, it is necessary to demonstrate a consistent, significant, and causal relationship before one can conclude that such effects do occur. From this standpoint, the conjectures relating cancer to power line fields have not been scientifically substantiated.”)。這份措辭嚴謹的聲明也反映了其他一些學術和公益團體對此問題的看法。

## 微波爐

**Q4：**微波爐如何加熱食物？

**A：**微波進入任何物質，都會帶動裡面的電子，撞擊鄰近分子，或多或少都有加熱的效果。但介電質中的電子被原子核束縛住，位移極小，電場對它作的功也很少。微波爐的快速加熱，靠的是水分子的大動作。水分子和一般原子、分子不同，它天生就有電偶極。沒有外加電場的時候，各個水分子的電偶極排列很絮亂。把微波爐打開，裡面就有電磁場，電偶極在電場中受到力矩作用，會朝著電場方向轉動，電場的方向不斷改變，水分子的方向也跟著改變，不斷的反覆轉動。相較之下，一般的原子和分子只有在電場中才會感應出電偶極，而感應產生的電偶極是朝著電場方向的，受到的力矩為零，因此不會轉動。

多轉動一次，並不表示就會增多一點能量。水分子在交流電場中反覆轉動，是有序的「受力振盪(forced oscillation)」，能吸收也能回傳能量，

很快就會達到平衡狀態。並且，這種有序的動能也不叫作熱能。熱能是亂無秩序的動能(例如空氣中分子的運動)，有序的動能要靠碰撞，才能轉換為熱能。所以水分子在轉動的時候，必須和其他分子(包括其他水分子)擠在一起，相互擦撞，才會產生熱能。一旦成為熱能，就無法再回傳給電場，溫度因此持續上升。比如一塊肉，電場讓裡面的水分子轉動，去擠動旁邊的肉分子，水和肉都熱了起來。一杯水也可以加熱，換成水蒸氣就無法加熱了。冰塊是固體，裡面的水分子轉動不易，加熱很慢，但表面多少會融化出一點液體，所以冷凍食物在微波爐裡加熱，常常外熱內冷。

**Q5：**微波爐為什麼選擇 2.45 GHz 的電磁波？是否會干擾通訊？為什麼加熱速度快？為什麼省電？

**A：**微波的頻率範圍很廣，介於 0.3 GHz 和 300 GHz 之間。用微波加熱，不但要微波能進到食物裡面，還要能被吸收。頻率太低，吸收太慢；頻率太高，吸收太快，以致在表面上就被吸收，進不到裡面。微波爐的頻率(大都是 2.45 GHz)，就是在這兩個考慮下的折衷選擇，這是微波加熱的專用頻率，不會干擾通訊。

傳統烤箱是先加熱食物表面，再靠傳導加熱內部。微波則能直接進到食物裡面，各處同時加熱，所以加熱速度快得多。加熱腔的四周是金屬腔壁，2.45 GHz 的微波可以滲入腔壁約 0.002 毫米深度(skin depth)，電場在這個薄層內驅動電流，其強度恰好能把微波反射回去，由於腔壁是良導體，電流的歐姆加熱效應很小，腔壁熱不起來，因此微波大部份都在加熱食物。這種加熱方法效率高達 50% 左右，比傳統烤箱的加熱效率(約 10%)大得多，所以也省電。

某些原子或分子對某些特定頻率反應特別激烈，產生共振吸收現象。2.45 GHz 並非水分子的共振頻率，共振吸收也非(但常被誤解為)微波爐的加熱原理。

**Q6：**用微波爐加熱食物為什麼有時冷熱不均？

**A：**前面提到，2.45 GHz 的微波，不但能進到食物裡面，還能被快速吸收。儘管如此，還是不能面面顧到。例如微波爐內部的加熱空間是一個共振腔(cavity)，微波在裡面形成駐波結構，有些地方強，有些地方弱，造成加熱不均。食物放置在一個轉盤上，就是為了避免它一直停留在駐波最強或最弱的地方。共振腔壁不用弧形的，是避免弧面的聚焦作用。另外，食物所含的水份有多有少，吸波係數有很大的差別，若吸收特別快，裡面還沒加到熱，微波就已經被表層吸收掉了。食物內部的水份也可能分佈不均，加熱後，裡面反而特別燙。

加熱不均不只是影響口味，還可能傷到身體，例如不小心吞下外溫內燙的食物，灼傷腸胃，或者有的地方還有病菌未被殺死，就吃進肚裡。

**Q7：**微波爐漏出的輻射對人體會不會造成傷害？

**A：**就頻率而言，微波屬於非游離性輻射，亦即其光子能量太小，沒辦法破壞身體的細胞組織，但輻射太強仍會造成灼傷。相較之下，游離輻射(如 X 光)的光子能量大，會破壞細胞組織的化學鍵，導致癌症等，不過也需累積到一定的劑量才會如此。微波是以瞬間強度(單位面積通過的功率)為安全標準，游離輻射則以累積劑量為安全標準，例如單位體積的空氣中，在照射時間內，被游離分子的累積總數。

高強度微波造成灼傷，屬於顯而易見的熱效應(thermal effect)。輕度微波不會灼傷人，但長期曝露其下，是否會產生諸如頭痛、焦慮、疲勞、失眠等非熱效應(non-thermal effect)，則是一個爭議極大，目前尚無定論的問題。微波的非熱效應，是設定微波爐安全標準的因素之一，由於各國對此效應的認知不同，所規定的安全標準也不相同。美國的標準是離開微波爐表面 5 公分處，輻射強度不得高於每平方公分 5 毫瓦，俄國的標準則嚴得多。在政府單位的管制下，正常微波爐外

洩的輻射強度是低於規定值的。

微波爐有時受到損壞，門關不緊，自動斷電機制也失靈，不小心拿來用，大量微波就會露了出來。最可能發生的情況是人感覺到燙，馬上閃開，不致造成重大灼傷。體內的血液流動還有冷卻效果，可以保護身體。但是微波外洩絕非小事，嚴重的灼傷，無法痊癒，眼球的水晶體中沒有血管，比較容易受到灼傷(例如造成白內障)，尤其要避免微波的照射。

微波爐的發明，其實還得歸因於微波的外洩。1946 年，美國 Raytheon 公司的雷達工程師 Dr. Percy LaBaron Spencer 在測試微波發射器時，受到輕度的微波照射，口袋裡的糖融化了，使他想到微波加熱的用途。他的公司於 1947 年製造出第一個微波爐，幾乎有一個人高，重達三百多公斤，價格 5000 美元，還需要用水冷卻。二十年後，微波爐才成為實用的家電產品。1999 年，Dr. Spencer 被選入發明家名人堂，成為歷史人物。

**Q8：**微波加熱會不會破壞食物的分子，對人體造成間接傷害？

**A：**用微波爐烹煮食物，特別熱的地方，食物的分子結構可能會被破壞。其實煎和烤破壞的程度更厲害，不過都不如吃進肚子後，遭到腸胃分解的破壞來得大，所以破壞不一定就是有害，目前並無確切證據顯示微波加熱會產生有害食物。烹飪技術之一就是如何把食物的分子結構破壞得宜，讓它口感更好。就美食觀點而言，微波加熱達到的溫度較低，對分子的破壞力較小，即使是名廚，也難以發揮手藝。

**Q9：**電視上曾看到，用微波爐加熱的水會突然「爆炸」，這是什麼原因？

**A：**某些情況下，微波爐可以把一杯水加熱到沸點以上，卻完全沒有沸騰的跡象，拿出來輕輕一碰就突然大量噴出，像爆炸一樣。因為意想不到，常常燙傷人。

水隨時都在蒸發，但那只是表面上和大氣接觸的水。內部的水沒有汽化的空間，若要化成蒸氣，需要「種子」來促成，這些種子，就是汽泡。極燙的容器表面、粗糙的容器表面、或雜質附近，有助於形成汽泡。汽泡產生後，它四週界面上的水就有了汽化的空間，於是蒸發到汽泡內；溫度越高，蒸發越多。

在一般火爐上燒開水，因為鍋底溫度特高，容易產生汽泡。汽泡在浮出水面時，沿途的水不斷蒸發到汽泡內，最後一起逸出水面，水溫到了沸點後，汽泡源源不絕的逸出，熱量全部用在蒸發上，溫度不再上升。相較之下，水在微波爐中加熱均勻，沒有特別熱的接觸點，也沒有對流，若杯面平滑，水中雜質也不多，氣泡就無法形成，內部的水因此無法靠蒸發散熱，溫度可以一直上升到沸點以上[稱為「超熱(superheated)」狀態]。超過沸點的水，外表看來，沒有一點動靜，一旦受到觸動，內部會產生一些汽泡，大量的水驟然蒸發到汽泡裡面，使汽泡瞬間漲大，幾乎將整杯水擠了出來，造成電視上看到的爆炸現象。水和咖啡等飲料，放在微波爐裡加熱，千萬要小心。若是熱過了沸點，擺一塊糖進去或用湯匙攪動，就會觸發這種現象。

## 電磁武器

**Q10：**是否有一種武器，可以產生很強的脈衝電磁波，破壞電子器材？

**A：**這種武器俗稱電磁炸彈(E-bomb)，射出的是電磁波，可依頻率分為兩類：朝特定方向發射的微波炸彈(頻率約幾個 GHz，波長 10 公分上下)和有如閃電四射的低頻波炸彈(頻率低於 1 MHz，波長 300 公尺以上)，功率都高達  $10^{10}$  瓦以上，比一個城市的供電量還高，所以只能維持一瞬間(微秒至毫秒)，在高空，得用炸藥提供瞬間能源。

電磁炸彈射出的若是微波，可以直接進入電子器材(甚至還會在裡面短暫累積，形成駐波，有如微波爐的共振腔)，或者在銜接於器材的電路上

激發駐波，再耦合到器材裡面，藉放電或歐姆加熱等機制，燒壞裡面的敏感零件(例如電晶體)。射出的若是低頻脈衝波，由於波長太長，無法直接進入器材，但可以在輸電及通訊網路上，藉磁通量的快速變化，感應出仟伏以上的尖峰電壓，從電源或信號線，滲入與網路連線的電子器材，使器材不勝負荷。據一般評估，微波炸彈的威力較強。

在敏感儀器的外圍覆蓋電磁波屏蔽，可以減少微波進入。但通訊及雷達器材總得留一個微波出入口(天線)，屏蔽上也有冷卻洞口，所以還是有一些微波進得去。器材深藏在地下，微波也可以沿著通風洞進去。至於經由電源或訊號線進來的脈衝電壓，可以用隔離電路保護，即使如此，也可能連同器材一起被破壞。將電磁炸彈用飛機或巡弋飛彈投射到目標區上空引爆，有潛力破壞數百公尺範圍內的雷達、通訊及電腦等器材，在大舉侵犯前就癱瘓敵人，並且不造成人員的傷亡。

這種武器確實很吸引人，許多國家都投入了高額經費作這方面研究，有的國家業已進行了幾十年，報紙上也常常把它描述為超級武器。電磁炸彈是先進國家的秘密武器，相信已有雛型存在，可是要達到大家想像中的威力，據悉還需要不少物理和技術上的突破，例如功率和脈衝時間的提昇、功率的有效輸出和避免彈體內部放電等等，都是困難重重的問題。

**Q11：**是否有一種用電磁波照射人體的武器？

**A：**美國已經發展出這樣的武器，準備用來驅退群眾，並且試驗過，但是還沒有實地使用過。它用一種稱為迴旋管(gyrotron)的新型波源，射出 95 GHz 的毫米波。頻率選擇 95 GHz，一方面是因為大氣在這個頻率附近的吸收率較低，另一方面是波長只有 3 毫米左右，可以用輕便的碟形天線控制方向，俾可將整個系統裝在卡車上。目前還在設法將尖峰功率提昇至百萬瓦級，輕便度也有待改進。

美國軍方曾在慎密控制的情況下，用這種武

器對志願者作過實驗。人的身體被照射了約兩秒鐘，就好像被熱鍋燙到一樣的痛苦，可是電磁波只集中在表皮約 0.3 毫米的深度，剛好觸及痛覺神經最敏感的地方，進入體內的能量並不多，關掉後疼痛即止，沒有什麼傷害，眼睛會直覺式地閉下，也沒有受到傷害。在真實情況下使用，傷害恐怕還是難免。這種武器和前述的微波炸彈通稱為「定向能量武器(directed energy weapon)」，前者對人，後者對器材，類似的武器還有超高功率雷

射等，均被歸類為非致命性武器。

---

---

### 作者簡介

朱國瑞

清華大學物理系教授，中央研究院院士

e-mail: krchu@phys.nthu.edu.tw