

電磁波之父—赫茲 的電磁波實驗

田慶誠

中華大學電機系 副教授

1865年，英國物理學家麥克斯威爾(James Clerk Maxwell, 1831-1879)延伸了法拉第關於場的概念，統一了電學和磁學理論，發表著名的論文「電磁場中的動態理論」(A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field)，提出著名的電磁場理論。在這個理論中，他預言了電磁波的存在，並預見到光也是一種電磁波。麥克斯威爾的電磁場理論把電、磁和光三個領域綜合在一起，的確具有劃時代的意義。人們對麥克斯威爾提出的電磁場方程組的對稱和完美十分推崇，但是卻沒有人能夠證明電磁波的存在，直到1888年，德國物理學家赫茲(Henrich Hertz, 1857-1894)從實驗發現了電磁波，並證實它的傳播速度正是光速，才證實電磁理論是完全正確的。

1878年赫茲進入德國柏林大學，並成為德國當代電磁學大師Helmholtz及Kirchhoff的學生。1879年，麥克斯威爾去世的同一時間，Helmholtz向德國柏林科學院爭取獎金向當時科學界徵求對麥克斯威爾電磁理論(介電質中時變電通量等效於位移電流並能感應出磁場，時變磁場感應出的電場能將介電質極化)進行實驗驗證。在老師的影響和要求參與下，他深入研究了電磁理論，雖然在1880年拿到了博士學位時並未解完全開謎底，此舉卻深深影響了年輕的赫茲萌發驗證電磁波存在與否的動機。

早在1853年William Thomson就曾指出，當圖(一)所示的萊頓瓶(電容器)通過一個有線圈(電感器)的回路放電時，其放電電流呈現高頻振盪現象。其實就是如今電路學課本所提的RLC串聯振盪迴路問題。過了30年，1883年英國的斐茲杰惹(G. F. FitzGerald)從理論推測用純粹電學的辦法使電路中(如今的天線)的電流作周期性變化，就能產生電磁輻射，放電的電容器可以充當電磁波的振源。可惜，他本人沒有去實地進行實驗。赫茲當時並不知道他的研究，但在同時間重新推導過Maxwell's equations並發表文章贊同其理論。同年他接受了Kiel大學的理論物理講師工作，又於1885年到Karlsruhe技術學院任教，並且在實驗室無意中發現了兩片12吋像蚊香且上下重疊的Riess感應線圈主線圈電池電流瞬間切斷，次級線圈的兩個末端金屬球所構成的間隙可以產生高壓放電火花(Spark)。這個設備讓赫茲引起極大的興趣，在不斷的實驗改進中，逐漸的把上述三件事給湊了起來，完



成了他的電火花系統(Spark system)。應該比韓劇的“火花”酷吧！



圖(一) 來登瓶(Leyden Jar)—人類第一個玻璃介質電容器

赫茲從別人的研究當中知道Spark system的次級線圈實際上就是一電感器與一電源，且向迴路提供高頻高壓電動勢。線圈末端金屬小球則構成了一個開口的電容器，兩者合成一個開口的LC振盪迴路，於是迴路中形成振盪電流。然而由於高壓次級線圈電感較大，無法製造出非常高振盪頻率的電流，且此電流並不是造成電磁輻射的原因。真正形成輻射的主因在於次級線圈產生的高電壓足以在兩球之間會形成振盪的火花放電，形成了另外數個週期的脈衝電流源，如圖(二)照片中所示。如今從數學上我們很快的可以知道脈衝電流的成份中帶有從低頻到高頻的極寬頻信號，就像閃電時的脈衝電流所產生的寬頻電磁輻射會使所有頻道的收音機遭到干擾一樣。赫茲當然也開始考慮到脈衝電流可能產生的更高頻率振盪電流及電壓，希望藉著製造如此的一種振盪電花，可以在空氣中產生足夠強烈的電磁擾動好讓他偵測出來。他想證實那些振動就是麥克斯威爾所說的電磁波。於是他對自己的試驗工作做了一番規畫，其中一部分是製造電花，一部分是偵測空氣裡的任何電磁擾動。



圖(二) 金屬球間的振盪電花



圖(三) 中間兩球為放電端，左右兩球為天線左右延伸的兩端。

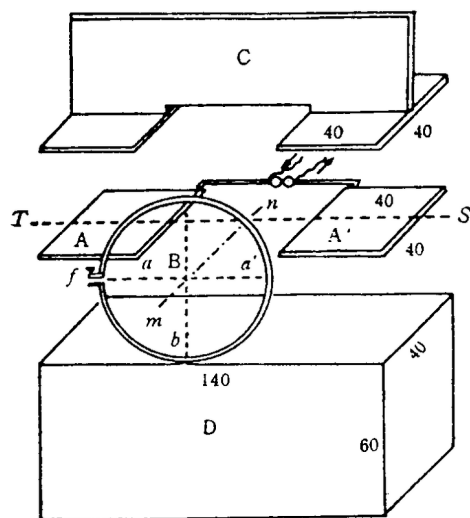
1886年的實驗中，赫茲首先將放電的兩金屬球分別接上對稱朝外延伸的金屬線，如圖(三)所示無意中完成了人類的第一對偶極天線(Dipole antenna)，然而無色無味的電磁波輻射並未被發現，如何偵測電磁擾動依舊是難解的習題。

1886年10月，赫茲在做放電實驗時，由天線導線上任一點接上一條線，連接上一個單圈線圈，

單圈線圈截斷後加上兩個間隙很小的放電金屬球。當主脈衝電流發生時，意外的發現單圈線圈的放電金屬球也在發出火花；若單圈線圈周長越長，火花就更明顯。這現象讓赫茲感到困惑不已，因為它完全違反了當時所知的電路學理論。但也使已經花費了相當時間於這一課題的赫茲非常高興立即敏銳地覺察到這或許就是所要尋求的電磁共振。一個月之後，赫茲拿掉了單圈線圈與天線連接的導線，單圈線圈的放電金屬球仍在發出火花，他終於得到了"在兩個振盪電路之間會引起共振現象"的結論。實際上因為赫茲所產生的電磁波波長為數公尺(頻率為數十MHz)，長導線上電壓電流已有波動性發生，電壓電流不可再視為相同，電路學的Kirchhoff's voltage and current laws當然也不成立了。單圈線圈在高頻也已成爲不錯的環形接收天線。接下來的實驗，赫茲在離發射器幾尺遠的地方，放一個銅線環，環的上面留了一個小縫，一邊末端為銅球，另一邊為可調距離的針尖。這樣就做出一個較小的「電火隙」(spark gap)，也就是他的「檢波器」(detector)或「接收機」。然後，他從發射機放電。當電越過發射機的兩塊銅板間的空隙，跳出一個大電花時，另一個不到一公釐長的電花，也在銅線環的小縫中冒了出來。

現在他相信有些越過發射機空隙的電，用一種看不見的波的方式放射出去，越過幾公尺的距離到達環形接收機，感應出的微弱電壓讓接收機的小縫冒出火花。赫茲想辦法求證這股看不見的力的性質，是不是和麥克斯威爾所預言的一樣。它會不會以直線的方式前進？波速是否等同光速？碰到物體以後會不會反射？折射？偏極化？一個接一個的答案，終究使他確信麥克斯威爾的理論是正確的。

經過1886-1887年的改良，赫茲的新實驗裝置一部分如圖(四)所示。AA'是兩塊40厘米見方的銅板，焊上直徑0.5厘米，長70厘米的銅棒，頭上各接一小銅球，相對放置，球中間留有空隙約0.75厘米。銅球表面仔細磨光，兩棒分別接到感應圈的兩端，當通電時，兩棒之間產生放電，形成振盪。再取2毫米粗的銅棒做成圓環，半徑為35厘米，如圖(四)中的B。圓環的空隙寬度f可用精密螺旋調節從零點幾毫米調到幾毫米，當放到適當位置時，f間隙會跟隨AA'產生火花放電，火花可長達6-7毫米。B環可圍繞平行於AA'面的法線mn旋轉，旋轉到不同位置，f放電的火花長度不一樣。當f處於a或a'時，完全沒有火花；轉動些許角度，開始會產生火花；轉至b或b'時火花最大。赫茲把完全不產生火花的位置稱為"中性點"，用"中性點"的位置來鑒別各種介質對電磁輻射方向的影響。

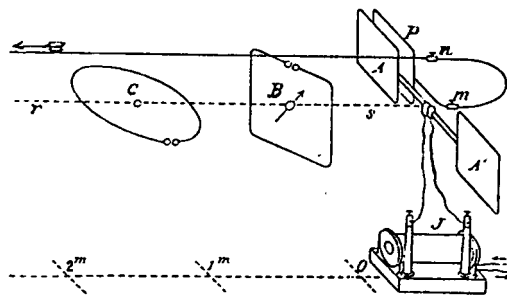


圖(四) 赫茲的實驗裝置

從現代的角度可知從A至A' 構成了長度約3m的偶極天線，當T與S兩端的電流為零，若天線長度剛好等於半波長時，T至S的電流分佈剛好形成Sine function的半週期駐波共振形式，通過中央金屬球兩端(位移)電流達到最大，亦即形成較強的電磁輻射。在電火花產生的寬頻脈波成份中，滿足半波長條件的50MHz電壓及電流信號即在偶極天線中每秒來回振盪五千萬次，每振盪一次就將50MHz電磁波能量輻射一次。偶極天線此時就像是一帶通濾波器，只讓某一特殊的共振頻帶信號輻射至空間中。環形接收器其實就如同電視機魚骨頭(八木)天線主接收端的folded dipole antenna，圖(四)中的AA' 偶極天線輻射電場為水平極化方向(即a-a' 方向)，然而接收天線只能感應出與f端垂直的b-b' 垂直方向電場，因此f端此時偵測不到電火花。當天線f端旋轉至b-b' 方向時，即能接收a-a' 方向的水平輻射電場，f端此時將偵測到最強的火放電。藉由接收天線f端的旋轉，即可辨別接收到的電場呈現何種的偏極化方向。

接著赫茲取來一塊金屬箔片C，當把C向AA'靠近時，看得出它對B放電的影響，因為"中性點"必須改變位置。他詳細地作了試驗，證明這是由於在金屬C中生的感應電流影響了電磁場的分佈。然後，他又拿一塊重800公斤的瀝青塊D放在AA'下面。瀝青塊長1.4米、寬0.4米、高0.6米，實驗結果正如麥克斯威爾理論所預計的，絕緣體也會影響電磁場分佈，"中性點"同樣必須改變位置。接著，赫茲用許多不同的材料(Asphalt, paper of book, sandstone, wood and petroleum)研究它們對放電產生的100MHz電磁波"中性點"之影響，證明這些都是由於介質使空間電磁場重新分佈的結果。赫茲把它的重要發現總結在《論絕緣體中的電過程所引起的感應現象》一文中，並把這篇重要論文於1887年11月5日首先寄給他的老師Helmholtz。他相信這個結果應該符合1879年老師Helmholtz與柏林科學研究院所定的挑戰題目之解答了。(介電質中時變電通量等效於位移電流並能感應出磁場，時

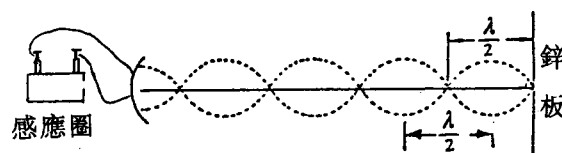
變磁場感應出的電場能將介電質極化，導致空間中的輻射場改變，因而使量測到的中性點偏移。)



圖(五) 赫茲測電磁波速度的裝置

赫茲最有說服力的實驗是直接測出電磁波的傳播速度。他用的裝置如圖(五)，導體AA'(赫茲稱之為原導體)在感應圈的激勵下產生電磁波。AA'平面與地板垂直，在圖中赫茲標了一條基線r-s下面是距離標記，從離AA'中心點45厘米處計程。實驗在一間15x14米的大教室進行，在基線的12米內無任何傢具，整個房間遮黑，以便觀察放電火花。次回路就是那個半徑為35厘米的圓環C或邊長60厘米的方形導線框B。根據麥克斯威爾理論，已經知道這個速度大概是每秒30萬公里，要直接測這樣的速度是十分困難的。赫茲想起了二十年前他的老師昆特(Kundt)用駐波測聲速的方法，巧妙地設計了一個方案。

他在教室的牆壁上貼了一張4米高，2米寬的鋅箔，並將鋅箔與牆上所有的煤氣管道、水管等聯接，使電磁波在牆壁遭遇反射。前進波和反射波疊加的結果就會組成駐波，如圖(六)所示。根據波動理論，駐波的節距等於半波長，測出節點的位置就可以知道波長。

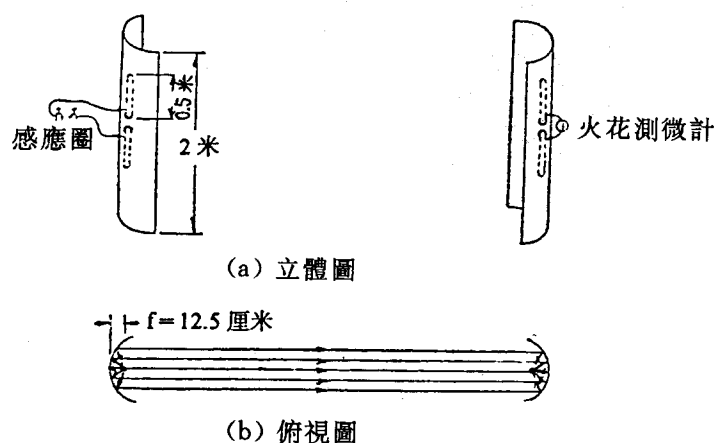


圖(六) 駐波的形成

赫茲沿基線rs移動探測線圈，果然在不同的位置上火花隙的長度不一樣，有的地方最強，這是波腹；有的地方最弱，甚至沒有火花，這是波節。根據偶極天線半波長的振盪理論赫茲算得電磁振盪的波長及周期，從光速就是電磁波的速度的假設和測得的波長也可算出周期，赫茲計算了電磁波的速度果然與光的速度接近。這就證實了麥克斯威爾所說光是一種電磁波的預言。赫茲於1888年7月將這些進一步的成果總結在題為” On Electric Waves in Air and Their Reflection,” 一文中。

為了進一步考察電磁波的性質，赫茲又設計了一系列實驗，其中有聚焦、直進性、反射、偏極

化和折射。他用2米長的鋅板彎成拋物柱面形，如圖(七)柱面的焦距大約為12.5厘米。他把半波長30 cm的偶極天線安置在一塊柱面的焦線上，使其發射出500MHz的特高頻電磁波，並重複了測量電磁波速的實驗，且量測到的半波長節點距離平均為33cm，兩者相差大約為10%，再一次更準確的驗證電磁波以光速前進的事實。接著他把發射和接收偶極天線分別安在兩塊柱面的焦線上，調整感應圈使發射振子產生電火花。當兩柱面光軸正好面對面時，接收振子也會發出火花；位置偏離15度就不產生效果，由此證明電磁波和光波一樣也有聚焦和直進性的性質。赫茲還用1.5米高重500多公斤的大塊瀝青做成三稜鏡，讓高頻電磁波通過。和光一樣電磁波也發生折射，他測得最小偏向角時偏角為 22° ，三稜鏡的稜角為 30° ，由此算出瀝青對電磁波的折射率為1.69。電磁波與光同樣滿足Snell's law折射定律。



圖(七) 電磁波的聚焦和直進性

赫茲在1888年12月13日向柏林科學院作了題為《論電力的輻射》的報告，他以充分的實驗證據全面證實了電磁波和光波的同一性。他寫道：「我認為這些實驗有力地鑷除了對光、輻射熱和電磁波動之間的同一性的任何懷疑。」，他還用「金屬柵」顯示了電磁波的偏極化特性。由於赫茲於六年後(1894年)去世，因此沒有看到無線電波(Radio wave)的廣泛應用。如果他能活到20世紀初，他肯定會獲得諾貝爾獎的。

赫茲的實驗震動了當時整個物理學界，全世界許多實驗室立即重複了他的實驗。"赫茲波"成了當時物理學家口頭常用的詞。赫茲的發現不僅證實了麥克斯威爾理論的正確性，並且也為人類利用電磁波奠定了基礎，開創了電子技術新時代。在赫茲宣佈他的發現後不到六年，意大利工程師馬可尼(Guglielmo Marconi, 1874-1937)和俄國的波波夫(A. S. Popov, 1859-1906)分別實現了無線電遠距離傳播，並很快投入實際應用。其他無線電技術也如雨後春筍般地涌現了出來，無線電報(1894年)、無線電AM廣播(1906年)、導航(1911年)、無線電話(1916年)、短波通訊(1921年)、傳真(1923年)、電視(1929年)、微波通訊(1933年)、雷達(1935年)以及近代的無線電遙控、遙測、衛星通訊、大哥

大、無線網路等等各種各樣技術的發明可以說都是赫茲實驗的產物。讓我們尊稱他為電磁波之父或微波之父，實在一點都不為過。