

非接觸式充電平台之研究

潘冠蒲、李宗麟、江霽驊*、孫卓勳
國立台北科技大學電腦與通訊研究所

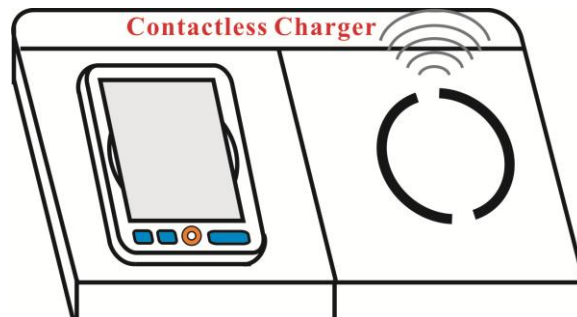
摘要—本文以無線功率傳輸原理設計出非接觸式充電平台，此設計可對行動電話或其它電子裝置進行充電。充電平台和電子裝置間採用電磁感應方式耦合，其藉由繞線式線圈作為非接觸式功率傳輸，以及為了使充電平台在待機時，有低功率損耗，因此利用磁簧開關做切換。

本文首先比較單一感應線圈的不同結構對於磁場分佈之影響，並選擇較合適的線圈結構，以此結構設計單位陣列線圈，最後以單位陣列線圈為基準，延伸為較大的陣列結構。別於以往的非接觸式充電系統，本文之陣列結構除了保有原系統的傳輸效率之外並能提升電子設備擺放之範圍。經由實測驗證，當感應線圈間隙為 3mm 且平行位移為 0mm 時，次級側經由電壓調整電路輸出直流電壓為穩定 5V。次級側最大輸出功率可達 2.4W，最大傳輸效率為 60%，且次級線圈平行位移 6mm 內，其傳輸效率仍可維持在 58% 左右。最後可透過設計適當的次級側電路，以滿足不同行動裝置的充電需求。

一、簡介

近幾年來，由於資訊的快速流通，使得整體消費性電子產品的市場快速的增加。許多的新型消費式電子產品如智慧型手機、平板電腦等拜資訊發達之賜在市場上能占有一席之地，電子裝置不再只侷限於房間或辦公室。由於這些可攜式電子產品都必須由電池進行供電，雖然使用充電電池能有效減少資源的浪費，但隨著消費者對可攜式電子產品的需求增加，充電電池的使用量也隨之增加，而各家廠商所生產的傳統式充電器也不盡相同，導致購買多種不同的電子產品即必須購買其專用的電源而造成了充電器的氾濫，同時各家廠商間的充電器亦無法共用，長久下來浪費對於環保問題也是一大考驗。

非接觸式充電平台是利用電磁感應方式進行無線功率傳輸，原理可由法拉第定理得知。相較於傳統的充電器，非接觸式充電器與行動裝置間不需要金屬接觸點即可進行充電[1]-[4]，避免了電能傳輸過程中導體的裸露，在安全考量上使其能夠於較為惡劣的環境下使用如高溫、高濕度等場合，進一步提升非接觸充電之價值。如圖一所示。非接觸式充電平台對於不同的消費型電子產品有著便利性，為目前市場的一大趨勢，它實現一個充電平台同時對多個電子產品充電之應用，提升電子產品在使用上之安全性和便利性。感應耦合的距離僅數公分，能量只集中在平台上的小塊區域，人在附近並不會受到安全上的危害。



圖一：非接觸式充電平台示意圖

設計非接觸式充電平台需先了解電磁感應運用於非接觸式充電平台的各種基本特性，再將其分為三個階段來完成。第一階段為設計初級側與次級側線圈的最佳化參數，並討論初級側線圈的陣列型式使其產生的磁場分佈以及排列方式。第二階段為研製初級側電路，其目的為產生一時變電流於感應線圈上，提供充電平台線圈產生相對應的耦合磁場。第三階段為研製次級側之接收端，包含次級線圈結構、整流電路、濾波電路、穩壓電路，將對可攜式電子裝置進行充電。次級側最終是必須整合於電子裝置中因此電路元件採用表面黏著裝置 (Surface Mount Device; SMD) 所設計，目的是為了使次級側的電路能夠小型化，符合現今科技產品輕、薄、短、小之需求，亦能輕易將電路與目前行動裝置整合。

在設計第一階段，以商用電磁模擬軟體進行電腦模擬觀察電磁場的分佈情形，選擇出最佳化的陣列結構，並藉此了解所設計之充電平台線圈是否符合理論與期望結果。充電平台線圈設計過程中各項參數影響與探討，皆以電腦模擬方式進行，可減少設計過程中人力及材料之浪費。待模擬分析設計完成後，即進行充電平台線圈實體製作。

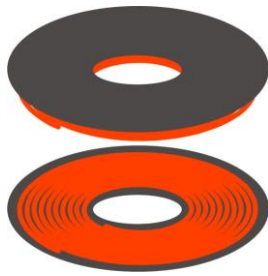
在設計第二和第三階段，以商用電路模擬軟體來進行電腦模擬，方便觀察電流與電壓等特性，藉此了解所設計之電路是否能正常動作。帶模擬分析設計完後，進行初級側電路與次級側電路實體製作，並透過示波器來實際量測電路運作之電壓和電流波形；直流電壓及直流電流部份，則透過數位式三用電表來量測值。最後，進行實驗與模擬值之比對，針對相關結果進行討論。

二、感應耦合結構與參數設計

2.1 概述

感應線圈的設計有許多種型式，其中較為常見的是鐵芯[5]與印刷式結構[6]。而由於鐵芯結構的體積較大，

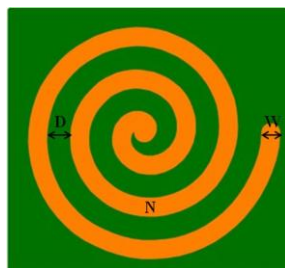
不適合小型化之設計，但此結構卻能有效增加磁通密度，因此為了提高轉換效率仍必須仰賴鐵芯材料。而若改由印刷電路板製作使感應結構變為平面式，能夠有效減少整個感應結構的體積和厚度。但印刷電路板有著最小線距製作的限制，以及難以解決熱效應問題，本身阻抗也較鐵芯結構大。因此本文取其上述兩者結構之優點，採用平面繞線式線圈搭配平面鐵芯做為感應結構，提高轉換效率並結合實際應用，如圖二所示。就初級側之發射端而言，結構的大小對整體系統不會有太大影響，因此採用體積較大的繞線式線圈加上平面鐵芯結構是可行的。另外，次級側之接收端則必須考量線圈的體積，因此平面鐵芯的應用使得次級側體積可以減少，較適合與行動裝置整合。



圖二：平面鐵芯搭配繞線線圈結構圖

2.2 線圈參數分析

影響線圈參數主要有三種，如圖三所示，分別為線圈匝數(N)、銅線寬度(W)和銅線間距(D)。最後討論出最佳單一耦合結構，並將此結構以陣列型式擺放增加感應面積，使行動裝置能放置在平台上進行充電。

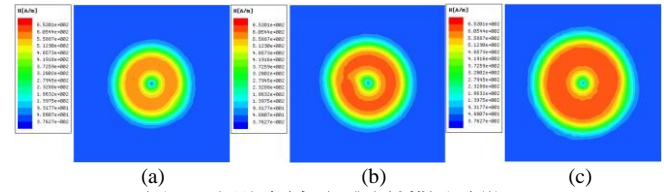


圖三：印刷電路板之線圈參數圖

而對於充電平台來說，目的是要設計出磁場強度較強且分佈均勻的充電平台，以提高轉換效率。在此利用商用電磁模擬軟體來做線圈參數探討，模擬選用印刷電路板的材質為 FR4 之玻璃纖維板，尺寸大小為 $40 \times 40 \text{mm}^2$ ，厚度為 0.4mm ，相對介電常數 $\epsilon_r = 4.4$ ，損耗正切(loss tangent) $\tan \delta = 0.0245$ ，銅箔厚度為 0.035mm ，並且設定通過線圈的電流大小為 1A ，電流方向由外圈向內圈流動，然後觀察線圈平面上 2mm 位置的磁場分佈情形。而線圈的形狀採用圓形螺旋線圈來做為感應結構之設計，其主要是因為磁場分佈會比六邊形或方形結構來的均勻，以及多邊形的結構會再銅線彎角處產生一個彎角電阻，使電流在流過此彎角時較不連續，造成不必要的能量損耗。

2.2.1 線圈匝數

圖四與表一所示為線圈匝數探討之磁場分佈與強度圖。比較三者可以觀察到，當線圈匝數越來越多，印刷電路板上的磁場強度就越強且越較均勻。



圖四：印刷電路板之感應結構圖(改變 N)

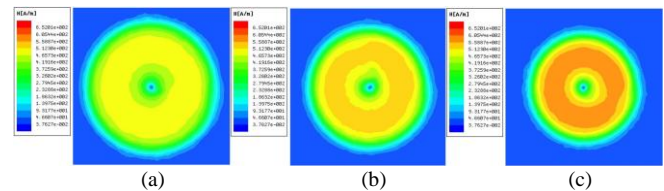
表 I

線圈匝數探討與磁場強度關係表

	線圈匝數 N	銅線寬度 W(mm)	銅線間距 D(mm)	磁場強度 H(A/m)
(a)	12	0.4	0.4	6.0758×10^2
(b)	14	0.4	0.4	6.3573×10^2
(c)	16	0.4	0.4	6.5201×10^2

2.2.2 銅線寬度

圖五與表二所示為銅線寬度探討之磁場分佈與強度圖。比較三者可以了解，當銅線寬度越來越小，印刷電路板上的磁場強度就越強。



圖五：印刷電路板之感應結構圖(改變 W)

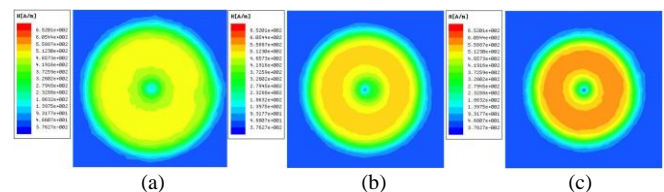
表 II

銅線寬度探討與磁場強度關係表

	線圈匝數 N	銅線寬度 W(mm)	銅線間距 D(mm)	磁場強度 H(A/m)
(a)	16	0.7	0.4	4.9589×10^2
(b)	16	0.6	0.4	5.5546×10^2
(c)	16	0.5	0.4	5.9189×10^2

2.2.3 銅線間距

圖六所示為銅線間距探討之磁場分佈圖。比較三者可以了解，當銅線間距越來越小，印刷電路板上的磁場強度就越集中，且強度隨之增大，其相關數據列於表 III。



圖六：印刷電路板之感應結構圖(改變 D)

表 III

銅線間距探討與磁場強度關係表

	線圈匝數 N	銅線寬度 W(mm)	銅線間距 D(mm)	磁場強度 H(A/m)
(a)	16	0.4	0.7	4.9600×10^2
(b)	16	0.4	0.6	5.4084×10^2
(c)	16	0.4	0.5	5.9432×10^2

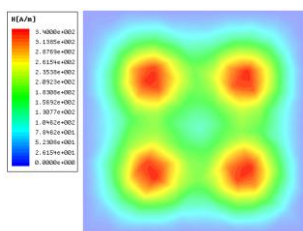
2.3 感應線圈設計準則

分析前三小節所做的線圈參數探討可以得到設計準則：單位面積內線圈數量越多，能夠得到最強的磁場分佈，但這是在不考慮線圈內阻以及熱效應的前提下所得到的結論。降低內阻可藉由減少線圈匝數或調整工作頻率來達成，而發熱效應則是由銅箔導線在高頻下的集膚效應所導致，因此為了去除發熱效應使得導線間沒有最小線距的限制，本文的初級與次級側線圈將採用絞合漆包銅線即俗稱的麗茲線(Litz wire)來設計感應耦合線圈。

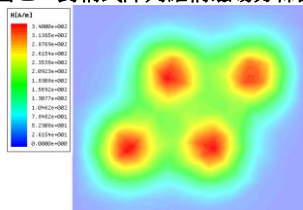
2.4 製作初級側陣列線圈結構

陣列結構能提升電子產品在使用上之便利性，然而在未使用電路控制之情況下必須全部激發，將會導致兩個結果：(1)磁場相消進而引發中央場凹陷(center-flog depression)[7]；(2)陣列線圈之串連架構整體的交流電阻倍增。由於通過磁場強度決定於流入電流大小因此以串連結構所組成之陣列平台不符合用於高效率充電平台之設計，必須以單一線圈為單位激發才能有效的維持磁場。

陣列結構主要的排列方式分為對稱式排列以及交錯排列，首先是對稱式排列，以四個 2×2 線圈做為基準，並利用模擬軟體觀察對稱式排列陣列線圈上 2mm 之磁場分佈情形，如圖七所示。由於線圈與線圈之間的磁場空乏區較大，導致磁通密度變低使得整體磁場分佈較不均勻；接著觀察交錯排列，以四個同樣的線圈來表示，並同樣的觀察線圈上方 2mm 之磁場分佈，如圖八所示。由於交錯排列的關係有效的減少了磁場空乏區，故在陣列線圈的設計上本文採用交錯排列式來製作。



圖七：對稱式陣列結構磁場分佈圖



圖八：交錯排列陣列結構磁場分佈圖

而基於實際上的應用，單層的交錯排列方式可能產生無法感應的情況。一般而言，偵測線圈的開關都是安裝在線圈中間，由圖九所示。動作空乏區示意圖可看出，若次級側放置於陣列線圈中央，可能會造成無法感應的狀況。因此需增加第二層線圈結構來彌補此空乏區，如圖十所示。由於線圈是採用個別激發方式，意為一次只驅動一個發射線圈，因此能夠降低線圈間彼此產生的磁場互相干擾，進而提升整體效率。

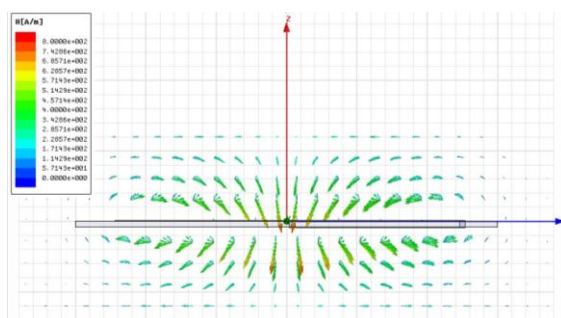


圖九：動作空乏區示意圖 圖十：加入第二層線圈之陣列平台

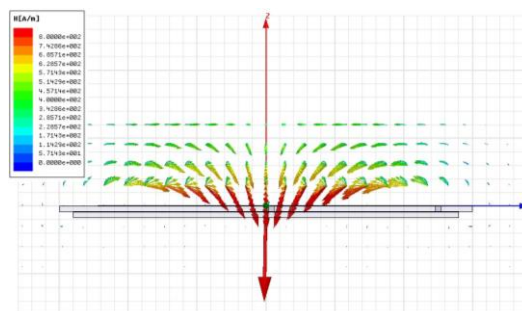
2.5 鐵磁性材料的應用

由於非接觸式充電系統於傳輸介面存在著較大的氣係，空氣的導磁係數較小使得磁通密度較低導致輸出功率減小。因此藉著加入鐵磁性材料來改變線圈附近之邊界條件使其磁通密度增加。為符合現今電子設備精簡之設計，採用平面式的鐵氧體加入感應耦合線圈，一方面對整體感應結構之體積不會有太大影響，也利於線圈結構的變化。鐵氧體形狀與線圈皆為圓形因此能夠完全放置於感應線圈下方。

為了比較線圈加入鐵磁性材料前後的場型變化，以模擬軟體分析磁場分佈情形。首先建立感應線圈之模型，其後於下方加上厚度為 1mm 之錳鋅鐵氧體，如圖十一所示。可觀察到在自由空間中磁場方向會在線圈周圍形成封閉迴路，並平均分佈於線圈周圍，此時線圈上下的磁通密度一致。圖十二為單一線圈加入平面鐵氧體的磁場分佈側視圖，可以發現由於平面鐵氧體改變原本線圈周圍的邊界條件使得磁場集中於線圈上方，且能量密度較先前強，因此可藉由此項方式來達到提升非接觸式能量傳輸效率之目的。除了能集中磁場強度以外，線圈產生的多餘磁場將有可能干擾手機內部之運作，因此能運用平面鐵氧體材料的屏蔽效果來避免磁場對手機內部運作之干擾。



圖十一：感應線圈磁場分佈側視圖

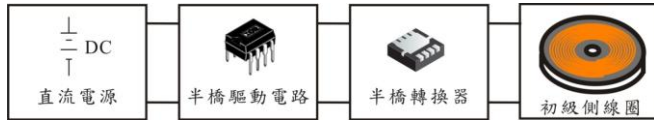


圖十二：感應線圈加入平面鐵氧體磁場分佈側視圖

三、電路設計

3.1 初級側電路設計

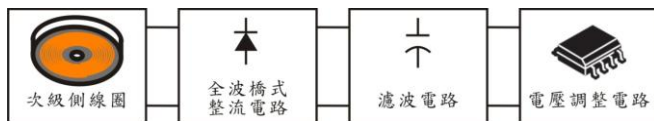
初級側電路架構圖，如圖十三所示，輸入直流電源經由半橋驅動電路轉換為高頻時變訊號，提供半橋轉換器正常動作，使初級側線圈產生均勻的磁場。電路設計上使用高效率之元件，且簡化電路設計來降低功耗，使非接觸式充電系統轉換效率提高。



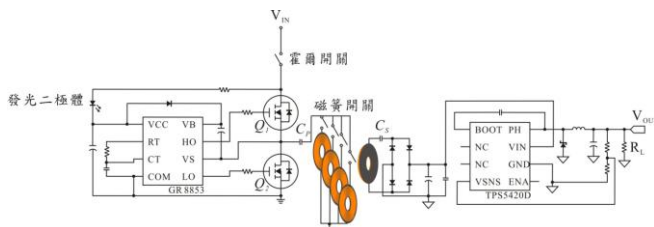
圖十三：初級側電路架構圖

3.2 次級側電路設計

次級側電路架構圖，如圖十四所示，次級側線圈感應出的電壓為交流電壓，且感應電壓隨著次級線圈擺放位置不同而有所差異。整流電路採用四顆二極體所構成的全波橋式整流器，將交流訊號的正負半週整流成脈動直流電壓，其後再設計一濾波電路，將脈動直流電壓轉換成具有漣波效應的直流電壓。雖然此為直流電壓，但仍然不適合直接來拿對電子產品進行充電，因為其漣波電壓過大，必須再經過一個電壓調整電路，將其電壓穩定成更接近純直流電壓，才能對行動裝置進行充電。其完整電路圖如圖十五所示。



圖十四：次級側電路架構圖



圖十五：非接觸式充電系統完整電路圖

四、實驗結果

本文的傳輸效率定義為次級側負載端的總輸出功率除以初級側提供的總輸入功率，所以傳輸效率計算已包含電路元件損耗和感應線圈轉換損耗的部分。

而實測結果間隙為 3mm 且平移為 0mm 時，初級與次級側的感應線圈較為貼近使得互感量增加，導致反射回初級側的阻抗減少，電流亦跟著減少，相對來說可以得到較佳的傳輸效率，約為 60%；當次級側線圈平行位移 0~6mm，傳輸效率可維持在 58%；當間隙達到 4~6mm 且平移為 0mm 時，傳輸效率減少至 53%，這是由於感應線圈垂直距離越遠，使感應線圈耦合效率變差。要提升系統傳輸效率，電路設計上應該要盡量減少使用不必要的元件，以降低電路的功率損耗；而感應線

圈的垂直距離和平行位移要保持在一定的範圍內，以提升感應線圈的耦合效率。圖十六所示為非接觸式充電平台對行動裝置充電之實體圖。



圖十六：非接觸式充電平台對行動裝置充電之實體圖

五、結論

本文所設計出的非接觸式充電平台，大小為 100mm×150mm×60mm。充電平台的功能設計，分別有 LED 動作指示燈，可讓使用者清楚的知道充電平台是否正常運作，以及利用霍爾 IC 與磁簧開關作為感應開關使用，讓充電平台在待機時降低功率損耗，符合節約能源之設計。

在感應線圈的設計中採用多芯漆包線製作，線圈體積相對於平面式印刷電路板結構略微增加，但能夠平均分配電流使得整體阻抗降低，因此有助於提升轉換效率。同時在線圈下方加入錳鋅鐵氧體材料，讓磁場集中。次級側電路設計則全部採用 SMD 製程，有效減少次級側電路的面積，最後將次級側線圈及電路整合在同一塊印刷電路板上，其面積大小為 70mm×50mm，亦可將其整合於行動裝置背部。

而轉換效率在感應線圈間隙於 3mm 且平行位移等於 0mm 時，次級側最大輸出功率可達 2.4W，最大傳輸效率為 60%。

參考文獻

- [1]W. P. Choi, W. C. Ho, X. Liu, and S. Y. R. Hui, "Bidirectional communication techniques for wireless battery charging systems & portable consumer electronics," in *Proc. Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Palm Springs, Feb. 2010, pp. 2251-2257.
- [2]K. C. Wang et al., "Study of applying contactless power transmission system to battery charge," in *Proc. Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems*, Taipei, Nov. 2009, pp. 257-262.
- [3]C. M. Lai, "Study and Realization of a Non-Contact Power Supply System with Fast Information Transmission Capability," in *Proc. Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, Jun. 2011.
- [4]W. Zhou and H. Ma, "Winding structure and circuit design of contactless power transfer platform," in *Proc. Industrial Electronics, Orlando*, Nov. 2008, pp. 1063-1068.
- [5]H. Y. Shen, J. Y. Lee, and T. W. Chang, "Study of Contactless Inductive Charging Platform with Core Array Structure for Portable Products," in *Proc. Consumer Electronics Communications and Networks*, Xian Ning, Apr. 16-18 2011, pp. 756-759.
- [6]H. Ma and L. Ma, "An improved multi-layer PCB winding and circuit design for universal contactless charging platform," in *Proc. Industrial Electronics Society*, Glendale, Nov. 2010, pp. 1763-1768.
- [7]X. Liu and S. Y. R. Hui, "Simulation study and battery charging platform with localized charging features," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 6, pp. 2202-2210, Nov. 2007.