



優化磁感應電能轉換 無線充電線圈設計最佳化

文 · 洪碩國 發布日期：2021/02/01 關鍵字：[WPC](#) · [無線充電](#) · [Qi](#) · [AirFuel](#) · [線圈耦合](#)

由 WPC 聯盟主導的磁感應式無線充電，雖為業界普遍採用的架構，但其仍存有多項技術瓶頸有待突破。對此，本文進一步挑戰現行的無線充電標準，針對線圈感應設計的客製化提出可能存在的影響因素，並嘗試可行的解決之道。

無線充電在科學及物理實驗上，並非是新穎的創舉或發明，然而，近年來於 3C、穿戴式，乃至於車載領域的運用上，從市場驚鴻一瞥的偶遇，到目前愈來愈多的產品導入，由實際面觀察，除了可改善因眾多不同充電接頭，而衍生的連接器充電線環保，以及避免兒童、銀髮族在插孔對接障礙問題外，主要體現的競爭優勢，似乎著重於宣示能夠隨放即充的便利性、車載時的安全性，比方在車載無線充電裝置，使用者不用為了充電，一邊取待充物並一邊取充電線連接，而增加發生事故的風險。同時，也著重產品防水/防塵等級提升的最佳化，而附屬於科技感的價值上，反倒沒有帶給消費者太多的驚喜。

各廠相繼競逐 WPC Qi 躋身贏家

既然在科技感中稱不上驚奇，那為何在產品運用初期，會吸引多方科技大廠，諸如佳邦 (PSA-INPAQ)、瑞薩(Renesas)旗下 IDT、德州儀器(TI)、英特爾(Intel)、高通(Qualcomm)、恩智浦(NXP)旗下 Freescale、羅姆(ROHM)、意法(ST)、三星(Samsung)、戴爾(Dell)、蘋果(Apple)、東芝(Toshiba)、Sumida 等等紛紛加入這個領域？且陸續發表了包括：

1. 電波式(將天線接收到的電波訊號轉換成電能方式)；
2. 電場耦合方式(將兩個平面電極平行對應，以電場耦合作供電)；
3. 磁共振式(與電磁感應方式雷同，運用磁共振現象進行非接觸式供電)；
4. 磁感應式—WPC Qi(兩個平行排列的線圈，運用線圈間電磁感應的原理進行電力傳遞)；

上述相關架構，除了隨放即充、提升防水/防塵功能外，當中如圖 1 中調研機構 IHS 的市調預估資料，應屬其重要成因之一。

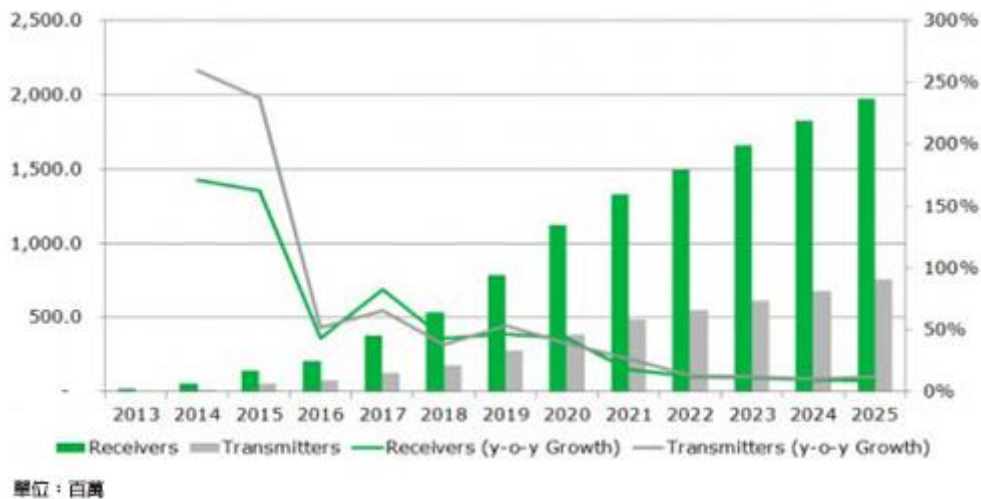


圖 1

無線充電市場預測 (資料來源：IHS)

然而在百家爭鳴及各種架構的捉對廝殺之後，市場中的「倖存者」一為何說是「倖存者」，因為在這其中已有許多當初雄心勃勃且懷英豪壯氣的上、中、下游，於此中已不復現，若體現於現行市場，並以架構上來分野，大多僅剩下 AirFuel 聯盟主導的「磁共振式」與 WPC 聯盟主導的「磁感應式」；再者，若以市場占有率來評斷，則以 WPC 的磁感應式為其箇中翹楚，在 3C、穿戴式，乃至於車載無線充電的占有率上，已然全面領先於其它架構。

WPC 磁感應式現已成為無線充電架構中普遍接受的架構，市場上絕非只聞樓梯響，未見伊人來的空洞。諸如 3C 知名品牌—Apple iPhone、ASUS ROG 電競系列、穿戴式的 Apple AirPods、LV 手表，以及奧迪(Audi)、賓士(Benz)、寶馬(BMW)、福特(FORD)、SKODA 等車載系統消費鏈，也紛紛導入這項便利的配備，當中也不乏其主要的模組研發製造供應鏈，目前以亞洲地區來說，業者如台灣的佳邦科技與大陸的立訊精密(Luxshare)等，在其模組供應鏈上的知名度及其競爭力，已具備相當的優勢。

談到優勢，最直接聯想到的便是技術、成本、服務等眾多競爭條件的整合，此篇將著重於技術方向，與關心此文者共同分享之。

感應式無線充電技術四大障礙

感應式無線充電的發展歷程中，常被提及反饋的問題，不外乎—需要準確對位、充電效率不佳、充電速度慢與溫度較高、充電距離受限等因素。

在需要準確對位問題上

由於磁感應式的作動原理中，受限於發射端(Transmitter Coil，俗稱 TX Coil)/接收端(Receiver Coil，俗稱 RX Coil)，在傳遞電氣能量時，兩造線圈(Coil)之間的重疊比例(Overlap)如圖 2 所示，與角度偏移、充電距離(圖 3)，都會影響到充電效能，亦會影響到 TX/RX 初步溝通建立時，能否順利啟動電能傳遞功能，進而對被充物作電能傳輸，以達到充電作動功能，在此物理特質上，對位的必須性在所難免，就算藉以擴大發射線圈充電範圍的 Dual Coil(如 WPC MP-A20)，根據圖 4 及圖 5 所示，三線圈(Triple Coil)(如 WPC MP-A9)在某些特定條件下，仍會有微小的機會產生盲區，導致使用者可能會面臨必須重置被充物後，方能進行充電，有鑑於此問題，根據來自模

具廠的訊息，在結合品牌廠、IC 廠、模組廠的緊密合作下，透過偵測調整以及線圈偏移調整(在不違反 WPC 公規的條件下)，已能克服此狀況，在其三線圈的有效範圍內讓使用者可隨放即充，不易甚至不會產生盲區問題(圖 6)。

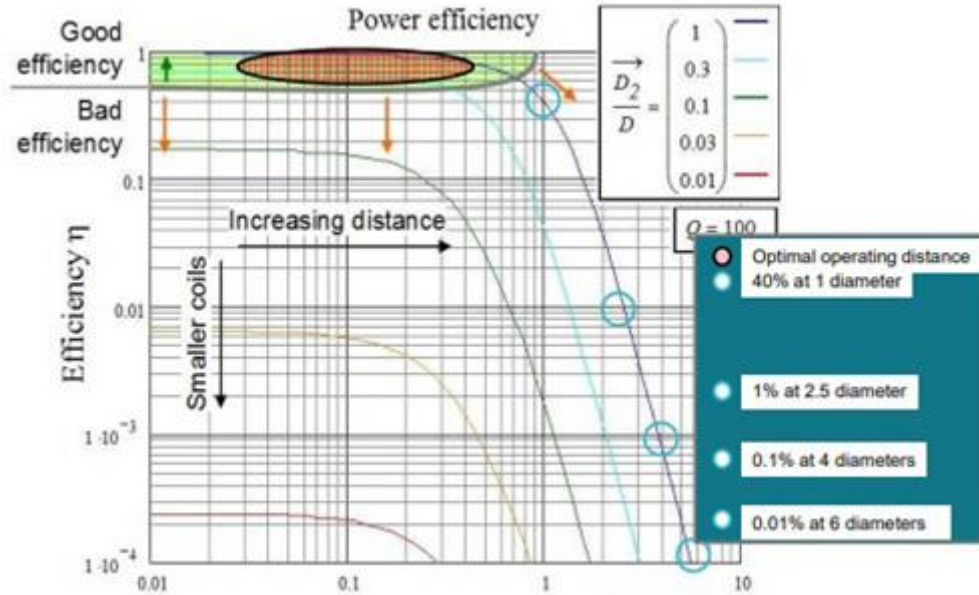


圖 2

線圈間的重疊比例、偏移角度、充電距離等因素皆會影響磁感應式充電效率 (資料來源：TI)

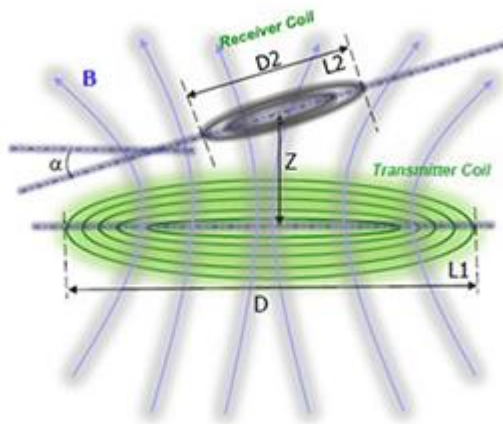


圖 3 線圈間的重疊比例、偏

移角度、充電距離等因素皆會影響磁感應式充電效率 (資料來源：TI)

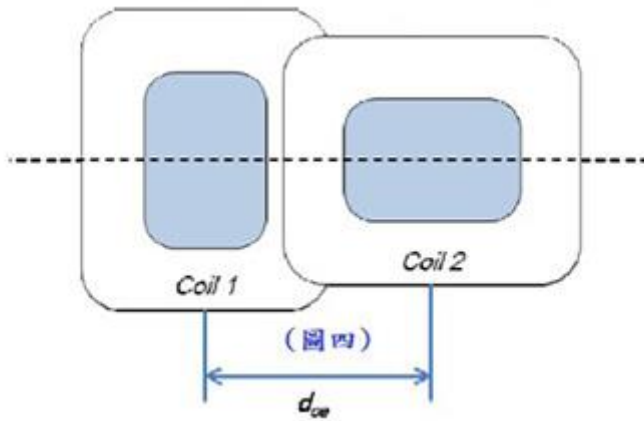


圖 4 若擴大發射線

圈充電範圍的 Dual Coil，在某些情況下仍會有微小的機率產生盲區 (資料來源：WPC)

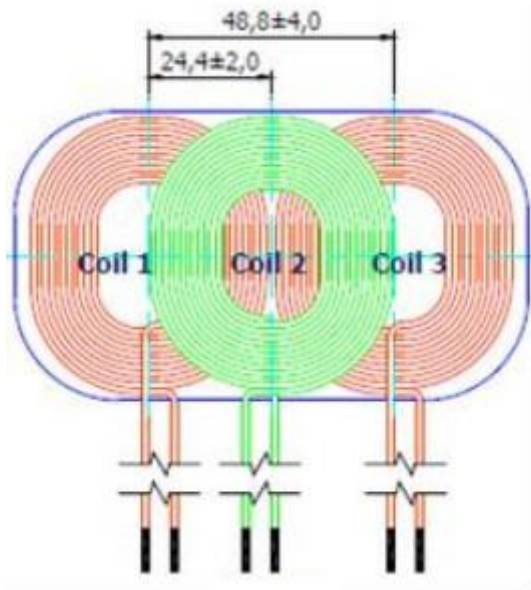


圖 5 就算擴大發射線圈充

電範圍的 Triple Coil，也可能仍會產生盲區 (資料來源：WPC)



圖 6 透過偵測調整及線圈偏移調整，在其三線圈的有效範圍內可隨放即充，不易產生盲區問題（資料來源：INPAQ-佳邦科技）

充電效率不佳

此項反饋往往與充電速度慢與溫度較高等因素，同時出現在使用者的疑慮中，成因為何？請參考如下的綜合分享。首先，本文先從效率與充電速度談起，此兩項在無線充電推廣初期，是最常被混為一談的項目，以效率的字面解釋來說，屬於經濟面的程度占大部分，換句話說，即是 TX 輸入端以多少能量(Power In)提供，經過 DC 轉 AC，再經過線圈耦合(此時即是在進行磁感應)，將 AC 能量從一次側(TX 線圈)，感應至二次側(RX 線圈)，透過接收端晶片作 AC 轉 DC 繼而穩壓後，來到了電池受電端的大門口—Charger In，此時基本整體感應式無線充電，作了初步的供電建立，將產生一個產品獲得總能量(Power Out—視被充電端產品的供電需求決定功率大小)，當中還結合了一些電壓/電流偵測、調變、解調變、保護判定等(圖 7)

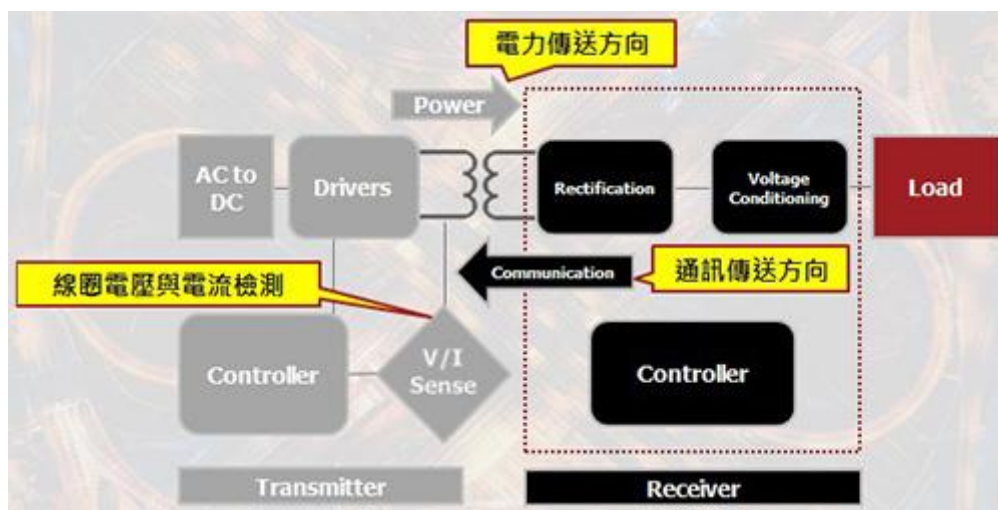


圖 7

初步的供電建立，將產生 **Power Out**，並結合一些電壓/電流偵測、調變、解調變、保護判定等因素（資料來源：TI）

於是乎可見 WPC 無線充電走完一趟如馬拉松式的電力傳遞、耦合、穩壓及溝通後，其效能 **Power Out/Power In**，依照其 RX 供應電瓦特數大小，可區分為 **BPP**(Baseline Power Profile，為 $\leq 5W$)與 **EPP**(Extended Power Profile，為 $5W \leq 15W$)。在初期的 BPP，早期稱為 **Low Power**($\leq 5W$)

的運用中，標榜的效率約莫落在 72.8%。以 BPP 初步的效率計算基準(圖 7)，一般而言 DC to AC(Transmitter Side)、線圈耦合感應(Coil Coupling)、AC to DC(Receiver Side)，在此三級中，共各損耗 10%，故以效率換算= $100 \times 0.9 \times 0.9 \times 0.9 = 72.8\%$ 。用以效率一詞來解釋，似以效能一詞來詮釋，或許來得貼切一些，換言之，即是消費者花費 100 元買的電，實際上用在裝置上得到約 72.8 元的等值電能，此項與使用者的荷包較有直接關聯。

而在近來晶片及線圈設計的改善下，BPP 的效率已可提升至 75%以上，若將功率提升至 EPP 等級，早期稱之為 Middle Power($>5W \leq 15W$)，則在最大負載 15W(12V/1.25A)/TX Vin=19V 時，效率已達 80%以上，數字看來好像並不怎麼漂亮，但與一般直接用 Adapter 的效率介於 80~90% 間，已逐步接近當中，在多了一級電力傳遞下(線圈感應耦合)能有此能源表現，已屬尚可接受的範圍，相信在各大廠商共同努力，以及各項運用產品日漸增需的帶動下，效率的再提升將指日可待。

充電速度與溫度

而最容易與效率混淆的充電速度上，其實與上述提到的 BPP/EPP 提供瓦特數有其直接的關聯性，在此用生活化一點話術來舉例，以避免讀者看到此時有一種想打瞌睡的錯覺：例如使用者的手機開始充電時，他的電池容量就像是一個大水池，而充電時提供的能量即是水瓢，在單位時間內，且取水倒水的頻率相同下，水瓢的容量愈大，則充電的速度將愈快。再白話一點，當以插線式的 Adapter 充電，Adapter 最大輸出功率為 10W 時，相較於無線充電也以 EPP 的架構也提供 10W 時，於兩者皆能滿足手機的 Charger In 條件需求時，其充電時間將幾乎雷同。

在此同時，除了因無線充電需靠線圈感應，兩者接觸所產生的積熱問題，會相較以插線式來得高一些，造成某些不便與疑慮外，倒也未造成消費市場及使用者太多的負評，原因在於此問題從早期(約莫 2013 年的消費問題反饋中，各家品牌廠已對此有所警覺)，紛紛提出設計標準，以目前大宗的設計需求下，將被要求充電後，待充物表面溫度需低於 48°C(圖 8)，且 WPC 協會也於異物偵測(FOD)條件下，提出充電條件下，溫度不得超過定值及過溫保護(NTC)的機制。於此前提下，誠如上述相較於充電線式所帶來的一些疑慮將隨之降低，然而反應在無線充電支援下，所達到防水防塵功能的全面提升，是一般充電線所無法分庭抗禮的。話雖如此，為了揚善除惡，期間在上、中、下游積極努力下，於導熱、散熱材質與技術上，不餘遺力的運用開發，使得此項問題也將慢慢得到解決及精進，其中「石墨片」散熱的方式即為方案之一。

	Accessible parts ^a	Maximum temperature (T_{max}) °C			
		Metal ^f	Glass, porcelain and vitreous material	Plastic and rubber	Wood
TS1	Handles, knobs, grips, etc., and external surfaces either held, touched or worn against the body in normal use (> 1 min) ^{a, c}	48	48	48	48
	Handles, knobs, grips, etc., and external surfaces held for short periods of time or touched occasionally (> 10 s and < 1 min) ^c	51	56	60	60
	Handle, knobs, grips etc., and external surfaces touched occasionally for very short periods (> 1 s and < 10 s) ^c	60	71	77	107
	External surfaces that need not be touched to operate the equipment (< 1 s) ^c	70 ^d	80 ^d	94 ^d	140
TS2	Handles, knobs, grips, etc., and external surfaces held in normal use (> 1 min) ^c	58	58	58	58
	Handles, knobs, grips, etc., and external surfaces held for short periods of time or touched occasionally (> 10 s and < 1 min) ^d	61	66	70	70
	Handle, knobs, grips etc., and external surfaces touched occasionally for very short periods (> 1 s and < 10 s) ^d	70	81	87	117
	External surfaces that need not be touched to operate the equipment (< 1 s) ^d	80 (100) ^e	90 (100) ^e	104	150
TS3	Higher than the TS2 limits				

圖 8 目前主流設計需求，為將被要求充電後，待充物表面溫度需低於 48°C，且 WPC 協會也有過溫保護(NTC)機制 (資料來源：IEC/EN/UL/CSA/62368-1)

充電距離

關於充電距離受限的問題上，最主要的原因不外乎規範不同的 TX/RX 在限制公規充電距離下，才得以建立標準化及相容性，在 WPC 認證中，相容性的測試通過是不可或缺的一環。

除此之外，筆者個人認為，若不需依照標準化，且無申請無線充電認證條件下，充電距離的受限是可有有限度的增加，原因為何？充電距離的受限，乃出自於機構尺寸、設計材質、產品電性需求、以及設計參數等因素。若克服這些瓶頸或了解產品的充電實際需求，將可讓磁感應式的無線充電感應距離增加，亦更能廣泛地被運用，而這些 Know-how，往往存在於客製化產品的設計者與模組廠之間，讀者可從如下幾個關係中略窺一二。

無線充電客製化設計考量因素

在無線充電客製化的產品設計中，其線圈的設計優劣與否，往往決定其產品的效能，別異於標準化產品中，硬體設計及線圈規格上，已有公規參數可供參考，有道是一會動就有 60 分，按圖施工、保證成功，以致於標準品的工程 Effort 大多落在 EMI 的防範以及 Layout 的功力展現，產品競爭力主要集中在價格與服務關係上。然而在穿戴式-小型客製化(諸如耳機、手表、運動手環、電競商品等)在有限機構中，追求效能、輕薄、提高充電距離等需求條件下，線圈的設計占有舉足輕重的地位。

從無線充電的整體架構中不難發現，幾乎與早期 NB 所使用的背光模組中，CCFL 陰極管的驅動模組—Inverter 非常相似，主要差異在於變壓器與感應線圈的設計變化，本質上也屬異曲同工之勢。從事過電源設計的業者，相信都了解到變壓器在電源設計中的地位，是除了主控 IC 外重要的靈魂元件，於是乎，線圈的設計在客製化的無線充電設計上，也成為設計優劣的主要因子之一。線圈的幾個主要設計參數中，例如感量(L)、品質因素(Q 值)、直流阻抗(DCR)、交流阻抗(ACR)等，都是廣泛流傳於業界，普遍被提及的項目。然而除了這些，尚有一些重要參數，諸如耦合係數(K 值)等設計 Know-how 是較不常見，為了保留一些空間，筆者不於此多加贅述，僅分享上述幾項參數。

· **感量：**

其受到鐵氧體(Ferrite)本身材質以及線圈圈數的直接影響。

· **品質因素：**

受到感量及阻抗的直接影響，在諧振之後，更影響到整體充電效能。

· **直流阻抗：**

受到線材本身材質、產品機構限制，因在有限的機構內，欲達到所需感量，其圈數及內徑為必然的條件要求、欲達到需求的圈數以及考量外徑會不會與機構干涉、線材總長度—(DCR 與長度成正比)、堆疊後的總厚度會不會干涉機構—(DCR 與線截面積成反比)…光是 DCR 的設計考量便如過江之鯽。

· **交流阻抗：**

與鐵氧體本身材質係數、繞線方式所產生的雜散等。

· **耦合係數：**

與 L/Q 的對應等等，總而言之，客製化的線圈設計，必須綜合考量評估所有影響參數及機構、電氣需求，有其專業性的 Know-how 組合及判斷，且各個特性交互作用又可能互相矛盾抵觸。(例如在有限的機構內，若需要一定的感量時，必須增加圈數來達成，但增加圈數後，DCR 必將增加(此項特性需愈低愈好)，然而此時的 Q 值又會因上述品質因素的基礎造成抵銷，Q 值的大小需求與實際運用有關聯性)，細節部分在後續更深入研討時再分享。簡單來說，把跑車的高馬力引擎置於卡車上，或把高扭力的柴油貨車引擎置於房車中，將會增加正常動作時的安全風險—綜合以上所述，一個好的無線充電設計，除了 IC 晶片的素質及功能要符合規格需求外，線圈中的參數最佳化設計考量，亦為當中舉足輕重的角色之一。

然而，既已知線圈之於無線充電，猶如捕手之於棒球一樣重要，雖非最主要的投手，卻也主宰著賽事的成敗，何哉？因從上述多項感應式無線充電的待改善問題中，或直接、或間接，多多少少都會影響到整體成效，在此，將以倒述方式與讀者分享。

未來參考選項解析

從 K/Q 值、DCR、ACR、L 等參數關聯性中，不難發現在有效的機構限制內，線材的選用及工序，將對所有參數產生正向與逆向的設計矛盾點，即為研發工程最常談到的術語「翹翹板」現象，更白話點，就是閩南語中的「有一好沒兩好」。

而從設計功力足以影響到的層面中，由帳面上解析，除了前文提及的耦合損耗，初級及三級於電力轉換所產生的功率損耗，也同時影響著效率、溫度。綜以言之，在解決現行數種較普遍的問題

上，筆者建議方案包含下列項目(其中已有項次已於某些 IC 方案中使用，如降低 RX 參考電位基準與輸出電壓的差距，以獲較低的功率損耗、降低溫度等)：

- 1.降低 TX 於全橋或半橋架構作動時，切換損耗與元件中的固定損耗(與元件內阻有關聯性)。以降低第一級的損耗，達到提升效率的主要目的與降低溫度的可行性方案。
- 2.依照感應式無線充電的電能特性(作動原理、工作運用頻率等)，最佳化 Ferrite 原材及線圈材料—藉由磁性及線材材料的最佳化，以改善磁感應中磁力線的分布與場形，進而改善充電面積或充電高度，同時降低耦合的損耗，以求更好的電能轉換效率，降低線圈耦合時的積熱問題，甚而增加感應範圍及充電距離。
- 3.線性穩壓器(LDO)雖有設計簡單、零件較少、所需空間較省、便宜等優勢，但也同時會有壓差大時效率不佳、易產熱等負面影響。將功率回饋中的溝通架構，由現行的固定參考位準，與輸出電壓位準的方式，進階成主動修正的方式，以減少 LDO 因壓差帶來損耗，避免造成熱的問題。筆者先以上述三點粗略提供建議，項中大多牽涉研發/材料等相關成本，抑或已有同業先進早有此構思，礙於成本與消費者的性價比考量，以致未能導入相關改善方案中，在此若有雷同，希請見諒指導。本文有關基礎 WPC 無線充電標準及客製化論述，為筆者個人淺談，更多設計的 Know-how 問題，歡迎對無線充電有需求或興趣者，與筆者聯繫切磋。
(本文作者為佳邦科技穿戴裝置部資深經理)