

Optimal Design of the Wireless Power Transfer for the Cable Wiring Problem of Chargers on Mechanical Garages

Chih-Hao-Chen¹, Chung-Neng Huang^{2*}

Graduate Institute of Mechatronic System Engineering, National University of Tainan¹

Department of Electrical Engineering, National University of Tainan^{2*}

Email: kosono@mail.com.tw^{2*}

Abstract

With the escalating severity of air pollution and the growing necessity for diverse energy utilization, electric vehicles have emerged as an inevitable trend, serving as an alternative to traditional internal combustion vehicles. However, the charging time and convenience of electric vehicles continue to pose obstacles to their development. To tackle this issue, the concept of "park and charge" has emerged as the most effective solution, leading to the installation of charging stations in numerous flat parking areas. Nonetheless, the installation of charging stations becomes more intricate in the case of mechanical garages due to wiring complications.

To overcome this challenge, the objective of this study is to devise a wireless charging system that seamlessly integrates with the movement requirements of the platforms in mechanical garages. This is accomplished through the utilization of wireless charging technology to facilitate efficient charging. The research employs Ansys Maxwell simulation analysis techniques, with a particular focus on magnetic circuit design and the simulation study of wireless charging. Furthermore, the study optimizes design parameters by utilizing Taguchi's method.

* Corresponding author: kosono@mail.com.tw

可解決機械停車設備充電樁配線問題之無線電力傳輸的最佳化設計

陳治豪¹ 黃崇能^{2*}

國立臺南大學機電系統工程研究所¹

國立臺南大學電機工程學系^{2*}

Email: kosono@mail.com.tw^{2*}

摘要

隨著空氣污染問題日益嚴重，以及對能源多樣性利用的需求，電動車作為替代傳統內燃機車輛的解決方案已成為一個不可避免的趨勢。然而電動車的充電時間和充電便利性仍然是其發展的瓶頸。為解決這一問題，「停車即充電」成為目前最有效的解決方案，因此在許多平面車位上均配置了充電樁。然而在機械停車設備設備上，由於配線困難，充電樁的安裝變得更加複雜。為了克服這一挑戰，本研究的目標是設計一種無線充電系統，該系統能與機械停車設備的移動需求相結合，並利用無線充電技術以實現有效的充電。通過使用Ansys Maxwell模擬分析技術對磁路設計和無線充電進行模擬研究，並以田口法來求得最佳化設計參數。

關鍵字：機械停車設備、無線充電系統、磁路設計、田口最佳化實驗法

1 研究背景與動機

隨著各大汽車製造商推出全新電動車款，2020年電動汽車的註冊數量相較於2019年顯著增加了186%，大約翻了兩倍。台灣的電動車市場正經歷著一個跨越式的增長。但是多數車主對於購買純電動汽車望而卻步的原因大都是因為里程焦慮，車主認為車輛沒有足夠的續航以抵達其目的地，對其在路途中拋錨的擔心有關，因此充電市場也隨之蓬勃發展。

在現代城市中，停車位日益緊張，為了解決這一問題，許多城市開始使用機械停車設備來提高停車空間的利用率。這種機械停車設備最大的優點在於能在有限的空間內容納更多車輛，有效緩解城市停車位不足的困境。然而隨著電動汽車的日益普及，傳統有線充電方案在機械停車設備中難以適應其特殊需求。機械停車設備內的停車台在進行旋轉和移動時，固定式充電樁無法持續穩定地連接電線。因此為機械式停車設備提供電力以及為電動汽車充電成為了一個迫切需要解決的問題。

對於機械停車設備而言，探索創新的充電方案至關重要。無線充電技術或許是一個值得探討的解決方案[1]，因為它能夠跨越傳統有線充電方式的限制，為電動汽車提供更加便捷的充電體驗。這將有助於滿足現代城市中日益緊張的停車需求，同時促進電動汽車在市場中的普及和推廣[2]。

2 研究目的與方法

如圖1所示，為了解決機械停車設備因停車台移動，導致固定式充電樁難以安裝的問題，本研究設計一種巨觀模型，該模型配合機械式停車設備的車台移動需求，並整合無線充電技術以實現充電系統。

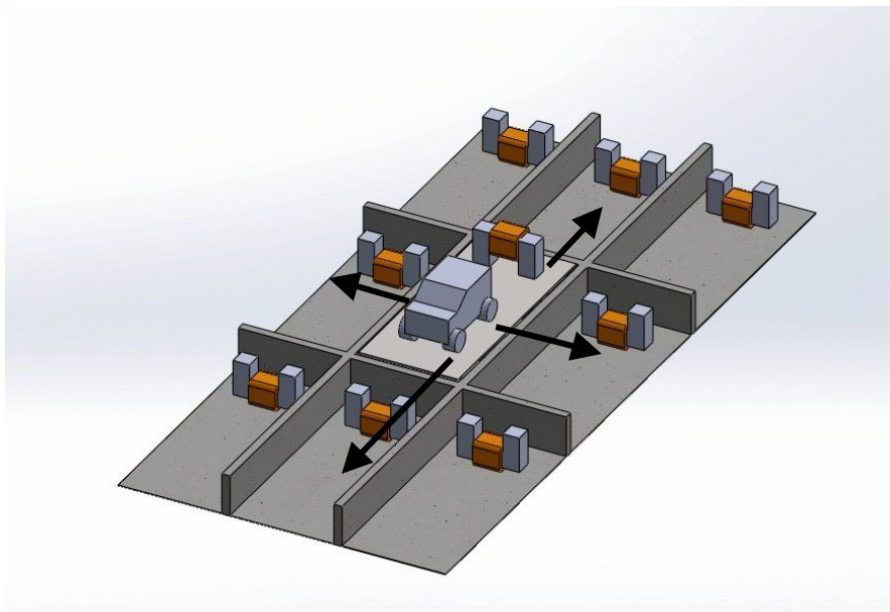


圖1 機械停車設備車台移動及充電樁配置問題示意圖

本研究利用 Ansys Maxwell 進行磁路設計和無線充電的模擬分析[3-4]，並透過田口設計找出最佳的磁路設計參數，以達到最大化的功率輸出。

3. 無線充電磁路設計

在無線電力系統設計過程中，重要的一環是根據功率求得鐵芯截面積、初、次級匝數及線徑[4-5]。以下是各步驟的詳細說明，並進一步描述各步驟的目的和影響：

步驟一、計算鐵芯截面積：鐵芯截面積對性能和效率具有重要影響。選擇合適的截面積可以降低變壓器的磁通密度，減少磁性材料的損耗，提高效率。公式如下：

$$S = 1.25\sqrt{P} \quad (1)$$

步驟二、計算每伏匝數：每伏匝數是變壓器性能的一個重要參數，它決定了初次級線圈的匝數比例。選擇合適的每伏匝數可以確保變壓器在不同工作條件下保持良好的性能。公式如下：

$$N_i = 4.5 \frac{100000}{BS} \quad (2)$$

其中，B 為矽鋼片導磁率，一般在 10000 高斯附近。經過簡化，公式變為：

$$N_i = \frac{4.5}{S} \quad (3)$$

步驟三、計算初、次級匝數：初、次級匝數直接影響變壓器的電壓轉換比例。適當的匝數比可以確保變壓器能夠在不同負載下保持良好的性能。公式如下：

$$N1、N2 = \frac{V}{N_i} \quad (4)$$

在計算 N2 時，需考慮漏感氣隙、銅阻等因素，因此匝數需增加 5% 至 20%，具體取決於實際情況

步驟四、求導線直徑：導線直徑對變壓器的性能和效率具有重要影響。選擇合適的導線直徑可以降低線圈的電阻，減少銅損，提高效率。公式如下：

$$i1、i2 = \frac{P}{V} \quad (5)$$

$$D = 1.13 \sqrt{\frac{i}{\delta}} \quad (6)$$

其中， δ 表示電流密度，一般標準線規為每 mm^2 ：2~3A 間選取，取 2.5A

步驟五、參考電工法規線徑安培容量對照表進行線材選擇。通過選擇適當的線材，可以確保變壓器在不同負載和環境條件下能夠保持良好的性能和壽命。本研究參考特斯拉 7kW 充電樁規格標準來設計無線充電系統的鐵芯。由於必須考慮漏磁和損耗的問題，所以在設計鐵芯時，參考了市場上大功率 10kVA 變壓器的體積作為基準。藉由該體積與公式(1)來計算截面積，並考慮機械式停車設

備的規格，設定氣隙為 5cm。根據這些參數，設計出不同形狀的鐵芯。起初的設計考慮的形狀為 UU，後來進一步衍生出 EE、EI、Ee 等形狀(圖 2)的設計。然而在相同的體積條件下，EI 形狀的鐵芯在其二次側 I 的接收效率遠遠低於其他形狀，因此被排除在外。最終 EE、UU 以及 Ee 這三種形狀的鐵芯被選為田口法的控制因子來進行設計與實驗。

在實施了上述的步驟二至步驟五後，結果顯示，在發射端電壓為 480v 和接收端電壓為 220v 的條件下，適合的發射端和接收端的匝數分別為 194 匝和 93 匝。接下來的步驟是選擇適當的線徑。此選擇主要是參考了公式(5)的計算結果，並考慮了相關文獻的建議。因此選擇了發射端的線徑為 5.5 平方毫米，而接收端的線徑為 14 平方毫米。

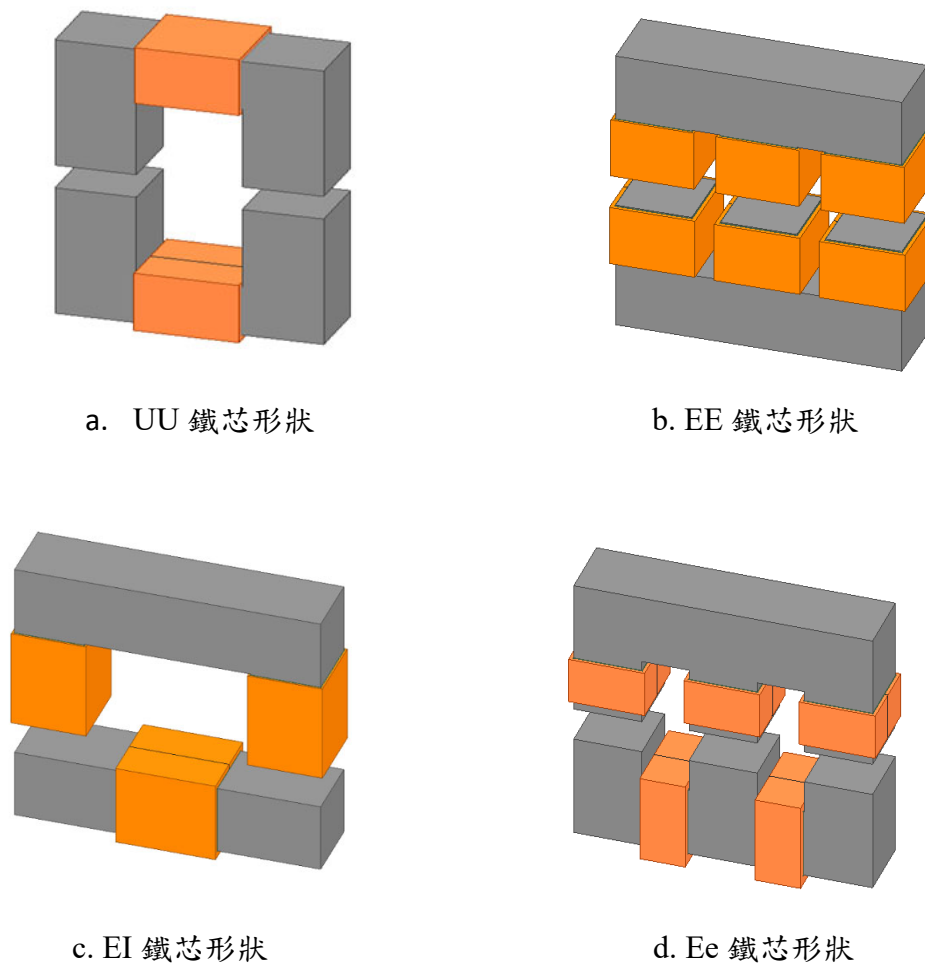


圖 2 鐵芯設計

表 1 無線充電系統初始參數

發數端 tx	接收端 rx	鐵芯形狀	鐵芯材料
匝數 194 匝	匝數 93 匝	UU	Steel_1008

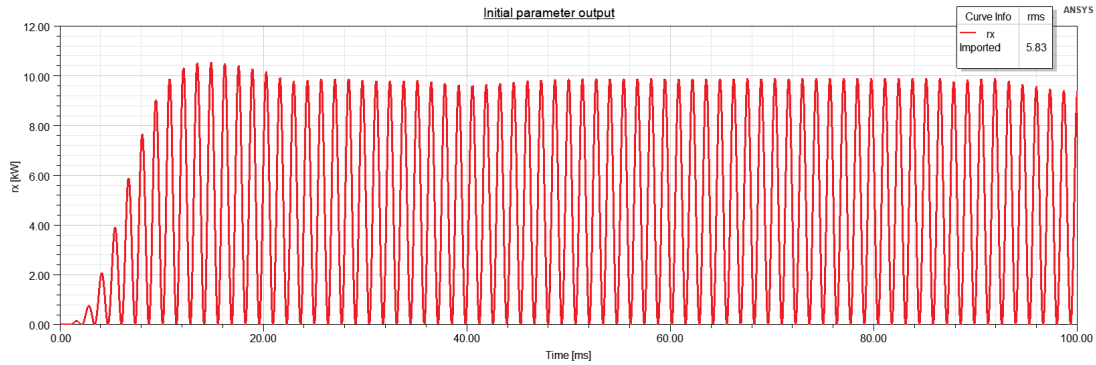


圖 3 無線充電系統初始參數的效能分析

靜態無線充電磁路設計中，獲得了無線充電系統的初始參數如表 1 所示。然後在 Ansys Maxwell 軟體中建立模型進行分析和模擬，這項分析導致了圖 3 顯示的結果。在電路穩定後，輸出效率的 RMS 為 5.8kW。這些結果為後續的田口設計方法奠定了基礎。

4. 田口最佳化與品質分析

田口方法是一種系統化且高效的實驗設計方法[6-7]，用於引入數值實驗並優化設計參數。在本研究以特斯拉 7kW 充電樁規格為例，將使用 Ansys Maxwell 電腦模擬軟體對不同設計參數的性能進行分析和計算，以找到最佳的無線電力傳輸系統設計。在田口方法中，選擇了 L_93^4 作為本次實驗的直交表如表 2，對無線充電系統的效率進行實驗分析[5]。

表 2 L_93^4 的直交表

Exp	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

表 3 田口法各項參數水準

因子	說明	Level 1	Level 2	Level 3
A	發射端匝數	194	213	232
B	接收端匝數	93	112	130
C	鐵芯材料	Steel_1008	Steel_1010	Iron
D	鐵芯形狀	UU	EE	Ee

本實驗選擇的控制因子有以下，A.發射端匝數（194 匝、213 匝、232 匝）、B.接收端匝數（93 匝、112 匝、130 匝）、C.鐵芯材料（iron、steel_1008、steel_1010）、D.鐵芯形狀（UU、EE、Ee），每個參數均有三個水準如表 3 所示，表中以灰色底部標示的參數代表無線充電系統的初始參數。這些初始參數包括：發射端匝數為 194 匝，接收端匝數為 93 匝，所使用的鐵芯材料為 Steel_1008，以及鐵芯形狀選擇為 UU 型。

鐵芯材料 iron、steel_1008 和 steel_1010 均引用 Ansys Maxwell 的材料資料庫。而鐵芯形狀 UU、EE、Ee 則是根據磁路設計所得出的三種磁路形狀為圖 1 之 a、c、d 通過這些實驗，將找出最佳的無線充電系統設計參數。要具有較大的輸出功率因此選用望大的品質特性，表 4 為輸出效率之 $L_9 3^4$ 望大特性直交表實驗。

表 4 $L_9 3^4$ 望大特性直交表實驗

EXP	A	B	C	D	y1	y2	y3	y4	\bar{y}	S	S/N
1	1	1	1	1	5.7	5.7	5.8	5.7	5.72	0.05	15.15
2	1	2	2	2	6.1	6.1	6	6.1	6.07	0.05	15.67
3	1	3	3	3	6.7	6.6	6.7	6.6	6.65	0.06	16.46
4	2	1	2	3	5.9	6	6	5.9	5.95	0.06	15.49
5	2	2	3	1	5.3	5.2	5.3	5.1	5.22	0.1	14.36
6	2	3	1	2	5.9	5.8	5.8	5.9	5.85	0.06	15.34
7	3	1	3	2	6	6.1	6	6	6.03	0.05	15.6
8	3	2	1	3	6.2	6.2	6.1	6.2	6.2	0.05	15.81
9	3	3	2	1	5.7	5.6	5.6	5.7	5.65	0.06	15.04

表 5 變異數分析表

	Level 1	Level 2	Level 3	DOF	SS	V	rho	confidence
A	15.76	15.06	15.48	2	0.74	0.37	27.66%	96.32%
B				Pooled				
C				Pooled				
D	14.85	15.54	15.92	2	1.76	0.88	65.78%	99.18%
				4	0.18	0.004	6.56%	

表 5 為變異數分析表，其中將影響最小的兩個參數作為 error 值，通過分析可得知 A、D 參數的信心水準分別為 96.32%和 99.18%。接著在進行兩階段最佳化過程中，首先需要調整對信號與噪音比 (S/N) 具有影響的因子，目的是使 S/N 達到最大值。

在第一階段最佳化過程中，根據 SN 比的反應表表 6 和反應圖(圖 3)參數，選擇了影響最大的參數，分別是 A1 和 D3。接著在第二階段最佳化中，從品質特性的反應表表 7 和反應圖圖 5 中選擇其他影響參數，選擇了 B3 和 C3。經過上述分析後，確定了最佳化參數組合為(A1、B3、C3、D3)。選擇這些最佳參數將有助於提高無線充電系統的性能。

表 6 S/N 比反應表

S/N	A	B	C	D
Level 1	15.76	15.41	15.43	14.85
Level 2	15.06	15.28	15.39	15.53
Level 3	15.48	15.61	15.47	15.91
Range	0.7	0.33	0.08	1.06
Rank	2	3	4	1

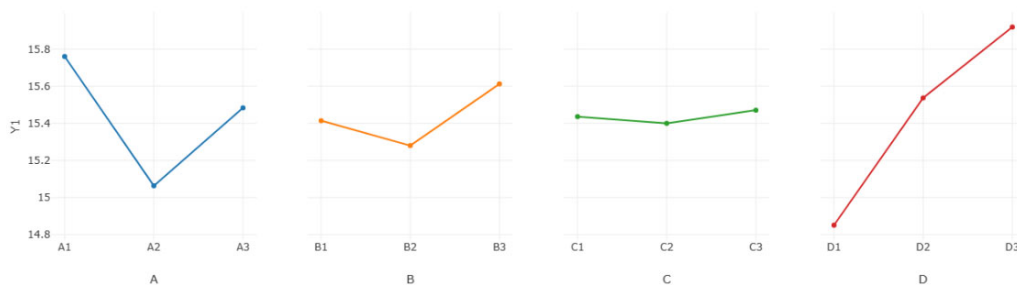


圖 4 S/N 比反應圖

表 7 品質特性反應表

品質特性	A	B	C	D
Level 1	6.15	5.9	5.91	5.53
Level 2	5.67	5.82	5.89	5.98
Level 3	5.95	6.05	5.96	6.25
Range	0.48	0.23	0.07	0.72
Rank	2	3	4	1

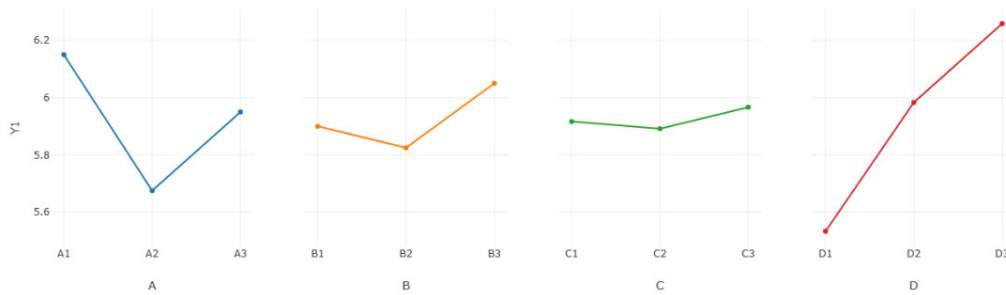


圖 5 品質特性反應圖

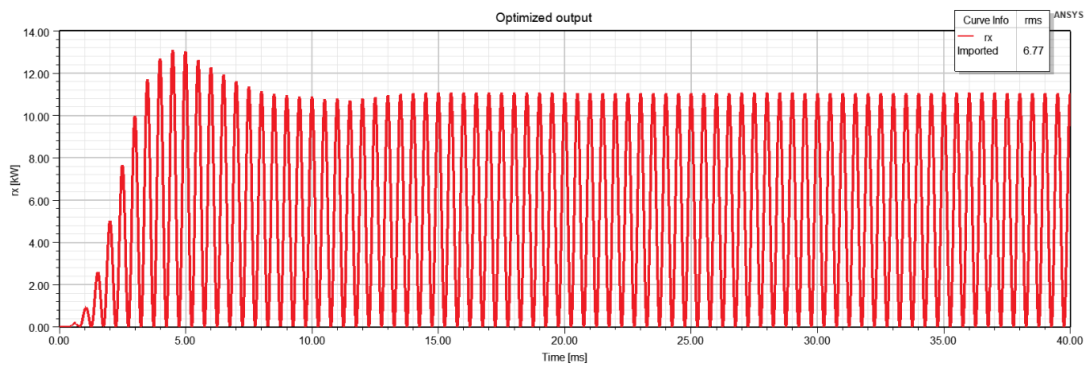


圖 6 無線充電系統最佳化參數的效能分析

初始參數為 (A1、B1、C1、D1)。經過田口方法的實驗設計和分析，最佳參數組合被確定為 (A1、B3、C3、D3)將最佳參數進行分析後得出圖 6，在電路穩定後輸出效率的 RMS 為 6.7kw。

通過這次優化過程，無線充電系統的輸出效率從初始 5.8kw 提升到 6.7kw，實現了 0.9kw 的效率提升。

Reference

- [1] S. Li and C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 3(1), 2015: 4-17.
- [2] Jayalath, Sampath, and Azeem Khan. "Design, challenges, and trends of inductive power transfer couplers for electric vehicles: A review." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 9(5), 2020: 6196-6218.
- [3] Aishwarya, M., and R. M. Brisilla. "Design of Energy-Efficient Induction motor using ANSYS software." Results in Engineering 16 (2022): 100616.
- [4] Uddin, M. S., et al. "Enhancing the corrosion resistance of biodegradable Mg-based alloy by machining-induced surface integrity: influence of machining

- parameters on surface roughness and hardness." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90 , 2017: 2095-2108.
- [5] Naik, A. Balaram, and A. Chennakeshava Reddy. "Optimization of tensile strength in TIG welding using the Taguchi method and analysis of variance (ANOVA)." *Thermal Science and Engineering Progress* 8, 2018: 327-339.
- [6] Roy, Ranjit K. *Design of experiments using the Taguchi approach: 16 steps to product and process improvement*. John Wiley & Sons, 2001.
- [7] Razali, W. K. M., et al. "Parameter influence in wireless power transfer system using analysis of Taguchi method." *Journal of Fundamental and Applied Sciences* 10(6), 2018: 1051-1068.