

薄型大電流電感器鐵芯粉末調配之穩健最佳化設計

鄭明得¹、余志成^{2*}

¹百泉工業股份有限公司

²國立高雄第一科技大學機械與自動化工程系

摘要

傳統電感器的外型發展為開放式，往往因線圈暴露在外，造成磁力線不均勻，與飽和電流低，電子產業進入輕薄短小的需求，密閉型電感器具有低電阻高電感能耐大電流的特性，且隨著電子產業進入輕薄短小的需求，遂為各家廠商極欲先後投入開研發。密閉型電感器的製程主要是藉由線圈與粉末同時封裝一體成型，本文是以電感鐵芯粉末的調配比例來作控制參數，並以田口式直交表實驗法，探討薄形低電阻高電感的電感器在磁性的製程的最佳化。本文探討電感、熱額定電流及飽和電流為三個權衡目標，結合 Pareto 最佳化，以解決多目標組合最佳化問題，而後最佳鐵芯粉末配置應用於試量產的驗證，其實驗結果與初始鐵芯配置設計比較降低平均電感的誤差由原有的 7.2% 降為 0.9%，因而提升良率 11%，而熱額定電流增加 13% 與飽和電流增加 55%，證明本文提出的方法的有效性，進而得到高品質的鐵芯粉末配置。

關鍵字：田口方法；Pareto 最佳化，非凌駕解，電感，多目標最佳化。

1 前言

磁性元件在現今的電子電路中是非常重要的元件，尤其是各式的電感器，其相關應用線路至今仍然無法由積體合成電路完全取代。被動元件仍是高科技電子產品的生產中所不可或缺的零組件，精密電子電感器在電子產業進入輕薄短小的需求下，從早期的上下蓋組合的方式，至今用粉末壓製的方式來製作，減少製作流程，並且產生低電阻，高電感值，可承受大電流的電感器。精密電子電感器的高電感值及低電阻成為重要的產品規格。本文研究電感器一體成型時鐵芯的製作，藉由粉末的調配來提高電感、熱額定電流和飽和電流的特性。

2 電感器特性

電感器結構分成：鐵芯及空心線圈，如圖 1 所示。

(1) 鐵芯：

金屬粉末與黏劑調配完後，將線圈與粉末放入模具內來進行封裝，形成一體成型。

(2) 空心線圈：

空心線圈是一種以紅銅為素材，外層塗佈絕緣漆的漆包線，藉由模具繞成一螺旋形且緊密靠在一起的圓形空心之元件，與粉末一體成型後，與電流相交之電流之磁束依電流的變化，會產生妨礙電流變化的電動勢，此電動勢與電流之變化成正比。此元件對於交流電路中具有著直流電路中之電阻相同的作用，亦即具感應性電抗的作用，稱為電感器，

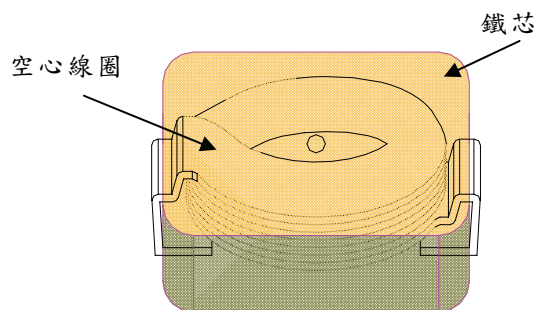


圖 1 密閉型電感器結構示意圖

本研究採用一般業界最常使用的銅製扁平線，且用同一種的線徑及尺寸，因有可能的粉末有五種皆會影響 3 個目標的品質特性，希望藉由最佳化來尋找出趨近電感目標值、飽和電流下降緩和及低鐵損的特性[1]。

電感的作用是阻礙電流的變化，但是這種作用與電阻阻礙電流流通作用是有區別的。電阻阻礙電流流通作用藉以消耗電能，而電感阻礙電流流通的作用則是不讓電流變化，當電流增加時電感阻礙電流的增加，當電流減小時電感阻礙電流的減小。電感阻礙電流變化過程並不消耗電能，阻礙電流增加時它將電的能量以磁場的形式暫時儲存起來，等到電流減小時它也將磁場的能量釋放出來，以阻礙電流的變化。

此時熱額定電流(安全電流)就發揮其作用，電流持續增加時，溫度跟著上升，當溫度上升至常溫加 40°C 時，設定為熱額定電流，來確保在此電流情況，電子迴路並不會燒毀。相對的電流持續增加，溫度跟著上升，電感值開始衰退，當電感下降至原來的 80%，設定為飽和電流，此飽和電流係為避免感量下降太快，造成無法阻礙電流變化，而產生燒毀現象，所以有較高的飽和電流時，電感的穩定性將會提昇。

*聯絡作者；jcyu@ccms.nkfust.edu.tw

此電感器是由線圈藉由金屬粉末封裝一體成型，封裝體與線圈之間的絕緣就必須達到直流 50V，1GΩ 以上，這是避免因電流增加，溫度會持續增加，而將絕緣破壞，電感值下降，因此粉末在添加絕緣粉末時，即須有一定量以上方可將粉末包覆完全，始可達到 1GΩ 以上。

3 穩健多目標最佳化

薄型大電流電感器穩健多目標最佳化設計是藉用設計參數配合目標函數、拘束條件、製造、環境條件的影響而改變參數值。最佳化在追求滿足拘束條件下最佳設計性能。穩健化設計則是降低設計目標對設計參數變異的敏感性。多目標設計就是處理目標相互抵觸的問題，但仍有穩健且有最佳設計性能。

本研究採用田口實驗計畫法來進行因子效果的分析，田口式穩健設計(robust design)法，是由日本田口玄一(Genichi Taguchi)博士在 1949 年建立產品品質的觀念所發展的實驗設計方法 [2]，改良自傳統的部份因子實驗法而來。此分析參數變異對設計目標的影響，以最佳化設計滿足限制條件，降低設計參數變異的敏感性，藉由低成本來獲得高品質 [3][4]。

本文所探討的電感設計目標有：電感、熱額定電流與飽和電流，並應用 Pareto 在 1986 年所提出多目標的非凌駕解 (Non-dominated solution) 的觀念，來進行參數最佳化 [5]。柏拉圖最佳化假設任何二參數解如 S^1 及 S^2 ，對所有品質目標而言， S^1 均優於 S^2 ，則稱 S^1 凌駕 S^2 ，若 S^1 的解沒有被其他解所凌駕，則 S^1 稱為非凌駕解。這些非凌駕解的集合即所謂的 Pareto front，如圖 2 所示。座落在 Pareto front 中的所有解皆為非凌駕解，且較其他解擁有最少的目標衝突，因此可提供設計者作為權衡設計的選擇空間，穩健多目標最佳化設計程序，如圖 3 所示。

為考量元件生產的穩健性，目標函數的計算採用田口方法中的訊噪比公式，以尋求輸出性能的最佳化與品質的穩定性。本研究所分析的載具電感規格為 $2.2 \mu\text{H}$ ，因此採用望目特性：

$$S/N_i = 10 \times \log \left[\frac{-2}{\frac{y_i}{\sigma^2}} \right] \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

n 為直交表實驗總次數， y_i 為直交表實驗計畫第 i 組設計目標計算值， \bar{y} 為直交表實驗計畫的設計目標平均值， σ^2 是產品間的變異。對於望目行問題的最

佳化，田口博士根據工程經驗，將設計分成二階段，首先藉由因子水準間的改變對其特性的非線性的關係來縮小變異，再利用因子對特性的線性關係來調整平均值至目標值。平均值由敏感度 (Sensitivity) 來判定，可藉由調整此因素之水準位置將實驗結果移至目標位置，敏感度 S 的計算如下式：

$$S_i = 10 \times \log(\bar{y}^2) \quad (4)$$

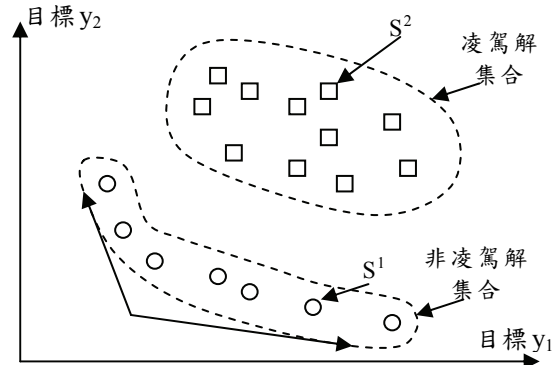


圖 2 多目標凌駕解與非凌駕解

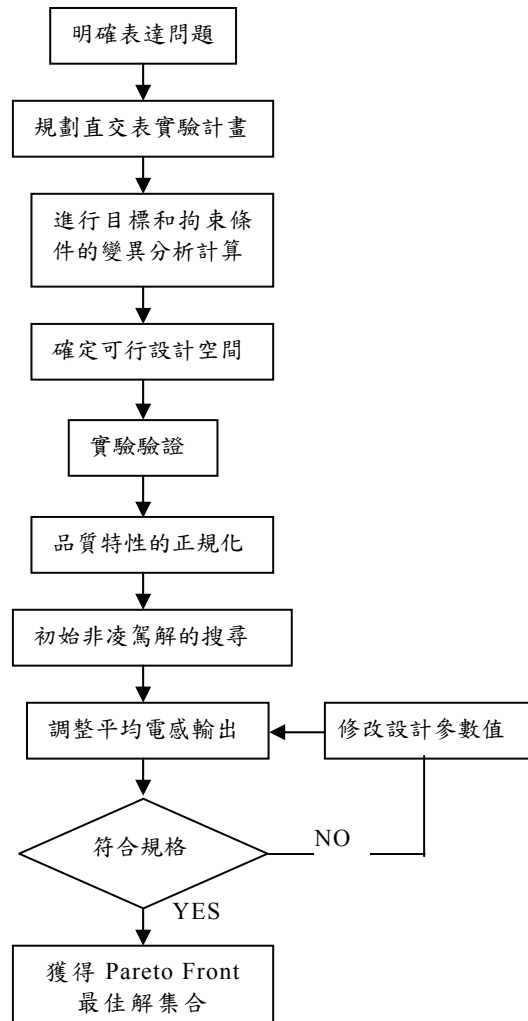


圖 3 電感器鐵芯粉末調配多目標最佳化流程圖

第二個目標為熱額定電流，即安全電流，當電流值越高，能承受的電流越大，熱額定電流規格為 13A 為連續、非負值且越大越好的情況，所以熱額定電流的(S/N_H)為望大特性：

$$S/N = -10 \times \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (5)$$

第三個目標飽和電流表示電流增加時，磁場呈現衰退現象，飽和電流越高，即表示衰退越少，飽和電流規格為 18A 為連續、非負值且越大越好的情況，所以定為望大特性，其訊噪比 S/N_S 公式同式(5)。

之後針對 S/N 比進行變異數分析 (ANOVA)，ANOVA 是以統計檢定的方法，識別控制因素之影響效果，藉由變異數分析，找出對個別目標影響最大的設計參數，來權衡多目標穩健設計集合。

為客觀比較品質特性，以目前輸出的最大與最小值，進行特性的正規化，使每一值皆介於 0~1 之間，並作標準性能指標的排序，並以最重要目標值當排序第一階。而後進行，初始非凌駕解的搜尋。3 個目標值的初始非凌駕解的搜尋，因以最重要值作以小到大的排序，然後選擇非凌駕解，即另 2 個標準性能指標，其中的一個值必須小於先前的值，趨近於零的值。並建立初始的 Pareto Front 最佳解集合。

最後由所導出的線性加法模式推估全因子的輸出，並搜尋 Pareto Front 最佳解，因其中電感輸出為望目特性，因此所找出的參數組合需以電感比例因子來調整電感目標，為了減少實驗成本，在此僅針對非凌駕解的組合，進行電感的調整試驗，之後再進行第二次 Pareto Front 的確認。

4 個別品質特性最佳化

4.1 實驗計畫

現有線圈是用紅銅的扁平線，其尺寸為 1.8mm*0.2mm*內徑 ϕ 4.0mm*6.5 圈；鐵芯由 5 種粉末混合調配壓製成一體的電感器，其外形如圖 1 所示，最初製作的粉末用在生產上所量測出的數據，如表 1 所示。

表 1 目前生產上所量測出的數據

| | 電感 | 熱額定電流 | 飽和電流 |
|-----|------------------|------------|------------|
| 量測值 | 平均值 2.04 μ H | 平均值 12.40A | 平均值 13.80A |
| 標準差 | 0.023 | 0.548 | 0.447 |

五種粉末的比例將會影響到電感的特性，A 及 D 粉末混合為粘劑兼絕緣作用，B、C 和 E 為金屬粉末，為了便於實驗規劃，以 E 粉末當基

底，其它成份皆以相對於 E 粉的重量的比例來決定，以現有的產品粉末比例做為中點水準值，上下變動取 3 水準。因此粉末的混合比例的設計參數包括 A, B, C, D 共 4 個，採用 L_{18} 直交表實驗。而元件性在頻率 100 KHz、電壓 0.25V 的測試設定下，必須滿足的拘束條件限制如下：

- (1) 電感值 2.2 ± 0.22 (μ H)。
- (2) 直流電阻 6~7 (m Ω)。
- (3) 絕緣值 1 (G Ω) 以上。

為了獲得不同反應非線性效果，各設計參數值，依 A、B、C、D，不計設計參數間彼此交互作用效果，選用 L_{18} ($2^1 \times 3^7$) 直交表實驗計畫，來量測三個品質特性：電感、熱額定電流、飽和電流，計算 S/N ，再以 ANOVA 與因子回應圖 (圖 4)，來分析控制因子對三項品質特性的影響。

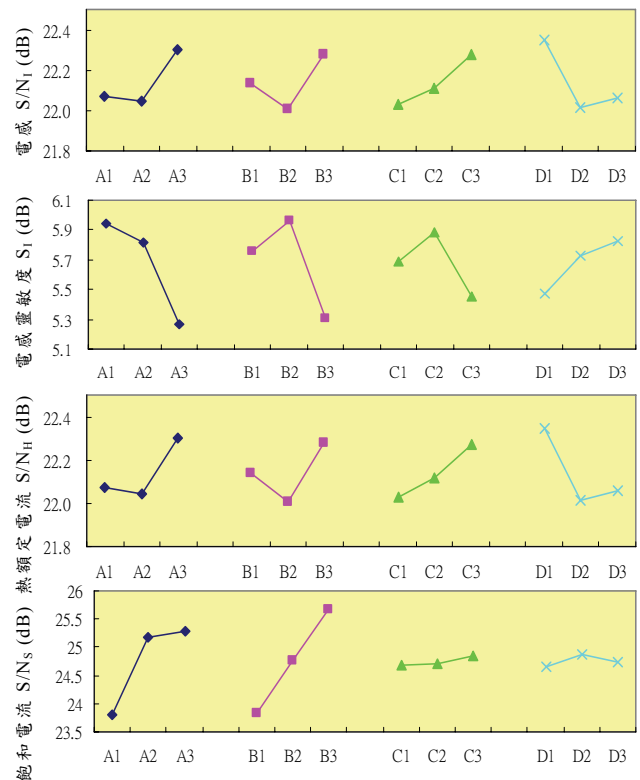


圖 4 因子回應圖

在此先以找出個別品質特性最佳化的參數設計，藉由因子回應圖可得電感 (S/N_I) 的極大值化參數設計為 $A_1B_1C_1D_3$ 。而熱額定電流訊噪比 (S/N_H) 極大化的參數設計為 $A_3B_3C_3D_1$ 。飽和電流其訊噪比 (S/N_S) 極大化的參數設計為 $A_3B_3C_3D_2$ ，而個別訊噪比最大化參數組合其輸出表現如表 2 所示。

表 2 各別目標極大化設計之實驗量測

| EXP | 最佳設計值 | | | | 電感值 | | 熱額定電流值 | | 飽和電流值 | |
|----------------|-------|---|---|---|--------------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | A | B | C | D | 平均值 (μH) | S/N_I (dB) | 平均值 (A) | S/H_H (dB) | 平均值 (A) | S/N_S (dB) |
| 電感 Y_I | 1 | 1 | 1 | 3 | 2.17 | 38.46 | 13.00 | 22.28 | 12.80 | 22.13 |
| 熱額定電流 Y_H | 3 | 3 | 3 | 1 | 1.74 | 35.11 | 14.00 | 22.92 | 20.00 | 26.02 |
| 飽和電流 Y_S | 3 | 3 | 3 | 2 | 1.79 | 32.22 | 13.40 | 22.53 | 20.20 | 26.10 |

5 多目標最佳化

5.1 初始非凌駕解的搜尋

電感設計共有三個品質特性：電感、熱額定電流與飽和電流，本文採用 Pareto 所提出多目標的非凌駕解的觀念，來進行多目標參數最佳化。如流程圖 3，首先我們將三個品質正規化，以田口方法，藉由 S/N 的主效應加法模式，預測 81 組全因子參數組合與三個個別品質特性最佳化的參數組合的三個訊噪比 S/N_I , S/N_H , S/N_S ，並轉換為標準化性能指標，來搜尋初始非凌駕解，總共得 18 組非凌駕解如圖 5。

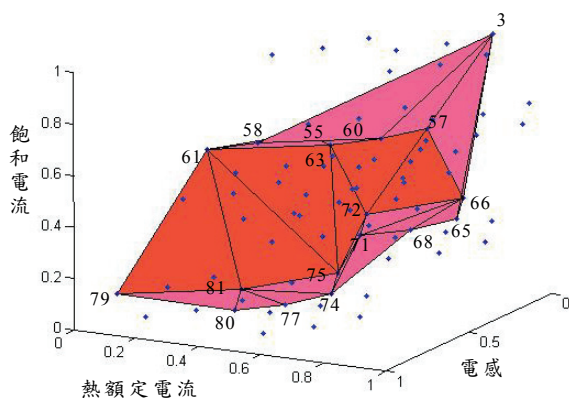


圖 5 預測全因子組合的非凌駕解設計

5.2 二階段最佳化

非凌駕解只比較正規化的訊噪比，但最終合理的參數組合必須滿足電感的目標需求，為節省實驗成本，本研究以標準化性能指標的幾何平均找出非凌駕解中較佳的 6 組設計與個別指標最佳組合的 3 組設計共 9 組，進行二階段的電感調整。

而調整方式係以比例因子來改變電感輸出，而比例因子(Scaling Factor)選定時，則以對

(S/N)影響不大，但對靈敏度(S_I)影響大的因子來調整。

個別目標的訊噪比最大化參數組合其輸出表現如表 2 所示，因為電感值的規格為 2.2 ± 0.22 (μH)，因此必須藉由二階段最佳化找出比例因子，將電感值調至規格範圍內。所謂比例因子的選擇則是對訊噪比影響低而對電感靈敏度高的因子。所以可藉圖 4 的電感電感靈敏度與個別品質特性訊噪比來找出個別的比例因子進行電感調整。

對於電感訊噪比最大化的參數組合 Y_I ，其平均電感輸出為 $2.17(\mu\text{H})$ 分析其 99% 的分佈區間已在規格內，因此不必調整。有些參數組合其電感輸出低於規格，如飽和電流最佳化組合 Y_S ，因此需進行第二階段調整；為了增加電感值，且不使其優勢指標，即該設計之所以成為非凌駕解的優勢品質特性下降，如 Y_S 組合中的最佳飽和電流，因此在調整時參考圖 4 的電感靈敏度，來調整。

目前 Y_S 組合的平均輸出電感只有 $1.79(\mu\text{H})$ ，由圖 4 中 S/N_S 與 S_I 的回應圖可看出，將因子 A 由 A_3 改至 A_2 對 S/N_S 的下降有限，但可明顯提升 S_I 。而因子 C 與 D 適合作為比例因子，因其對飽和電流訊噪比影響不大，但對電感靈敏度 S_I 具有相當的影響，因此先改為 C_2 與 D_3 。然而其電感值仍無法達到規格要求。但由圖 4 可看出 S_I 與因子 D 有線性遞增的關係，目前 D_3 值已至電感靈敏度的最大值，因此嘗試進一步往比 D_3 更高的靈敏度前進，即增加 D_3 的粉末比例至 D_{3a} ，得到參數組合 $Y'_S = A_2B_3C_2D_{3a}$ 。用此參數組合作實驗來進行特性量測，如表 3 所示。

表 3 最佳飽和電流參數組合電感調整性能量測

| EXP | 最佳設計值 | | | | 電感值 | | | 熱額定電流值 | | 飽和電流值 | |
|--------|-------|---|---|----|--------------------------|--------------------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|
| | A | B | C | D | 標準差 (μH) | 平均值 (μH) | S/N_I (dB) | 平均值 (A) | S/H_H (dB) | 平均值 (A) | S/N_S (dB) |
| Y'_S | 2 | 3 | 2 | 3a | 0.023 | 2.18 | 39.60 | 14.00 | 22.92 | 21.40 | 26.60 |

由表 3 實驗得知，其電感平均值為 2.18 (μH)，分佈標準差為 0.023 ，以 t 分佈樣本數為 5，其 99% 的信任區間為 $\bar{y} \pm 4.6S$ ，因此 $Y'_S = A_2B_3C_2D_{3a}$ 輸出電感 99% 的信任區間為 $2.18 \pm 0.105(\mu\text{H})$ ，其分佈如圖 6，已符合電感規格 2.20 ± 0.22 (μH) 規格要求，且其飽和電流訊噪比並未下降。其他的參數組合比照類似方式調整電感至規格其結果如表 4，在此省略其調整細節。

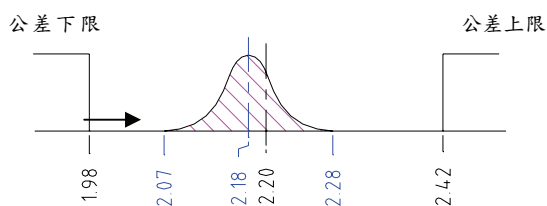


圖 6 最佳飽和電流參數組合第二次電感調整 99%信賴區間分佈

表 4 調整後參數組合的非凌駕解集合

| EXP | S/N_I | S/N_H | S/N_S | NPI_I | NPI_H | NPI_S |
|------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Y_S | 39.6 | 22.92 | 26.6 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Y_I | 38.46 | 22.28 | 22.13 | 0.237 | 0.598 | 1.000 |
| 63 ^{1*} | 38.27 | 22.4 | 24.39 | 0.277 | 0.486 | 0.494 |
| 71 ^{1*} | 37.67 | 22.13 | 25.73 | 0.401 | 0.738 | 0.195 |
| 74 ^{1*} | 37.53 | 22.65 | 25.18 | 0.430 | 0.252 | 0.318 |
| 72 ^{1*} | 37.53 | 22.13 | 25.73 | 0.430 | 0.738 | 0.195 |
| Y_H | 37.2 | 21.85 | 22.53 | 0.499 | 1.000 | 0.911 |
| 81 ^{1*} | 36.39 | 22.53 | 25 | 0.667 | 0.364 | 0.358 |
| 75 ^{1*} | 34.79 | 21.99 | 25.91 | 1.000 | 0.869 | 0.154 |

5.3 最佳化結果與試量產驗證

在經由電感調整後，初始非凌駕解集合中的訊噪比輸出會因比例因子調整的關係而影響訊噪比的輸出，因此修正原先訊噪比後重新搜尋非凌駕解，搜尋過程發現表 4 中的 Y_S^2 的參數設計 $A_2B_3C_2D_{3a}$ ，其輸出凌駕所有的其他解，因而為理想最佳化解(Utopian optimum)，免除目標特性間的權衡。

本文將田口式實驗法所找出的最佳化參數設計值 $A_2B_3C_2D_{3a}$ 與表 1 原有設計之參數值各 30 個樣本作比較如表 5，最佳化設計在電感 (S/N_I) 增加 0.92 dB、熱額定電流 (S/N_H) 增加 1.07dB、飽和電流 (S/N_S) 增加 3.79dB。再以 t 分佈來求 99.8% 的信賴區間，因樣本數為 30 個，經查表得其 99.8% 的信賴區間為 $\bar{y} \pm 3.4S$ ，其中 \bar{y} 為輸出平均值， S 為輸出標準差，由表 5 得知最佳參數設計的輸出標準差為 0.023 (μH)，因此輸出電感 99.8% 的信任區間為 2.18 ± 0.078 (μH)。各目標之信賴區間如表 6 所示。

結合表 5 及表 6，將原有生產參數值與最佳化參數值的分佈預測值，繪製於圖 7。圖 7 (a) 為電感輸出分佈，電感容許公差的上限規格 (UCL) 為 2.42 (μH)，下限 (LCL) 為 1.98 (μH)，原有參數組合的信賴區間約有 1% 低於下限值，平均電感離電感目標值 2.2 (μH) 的額定值誤差有 0.16 (μH)；而最佳化參數組合電感平均值離電感目標值 2.2 (μH) 的額定值誤差只有 0.02 (μH)，且分佈都在規格內。

而圖 7 (b) 為熱額定電流分佈，平均熱額定電流從初始參數組合的 12.40A 增加至最佳設計的 14.00A；此外最佳參數組合的信賴區間也從 3.72 降低為 1.57，最佳設計不僅提升了熱額定電流性能，也增加其品質穩定性。

圖 7 (b) 為平均飽和電流分佈，最佳的平均飽和電流從初始參數組合的 13.80A 增加至 21.37A，雖然最佳參數組合的信賴區間從初始設計的 3.04(A) 增加至 4.47(A)，整體特性表現遠高於初始參數的值，仍然有效的提升平均飽和電流的品質特性。

表 5 最佳化參數設計值與原有生產之參數值比較

| EXP | 電感值 | | | 熱額定電流值 | | | 飽和電流值 | | |
|-------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|---------|--------------|-----------------------|---------|--------------|
| | 標準差 (μH) | 平均值 (μH) | S/N_I (dB) | 標準差 (μH) | 平均值 (A) | S/N_H (dB) | 標準差 (μH) | 平均值 (A) | S/N_S (dB) |
| 初始設計 | 0.024 | 2.04 | 38.63 | 0.548 | 12.40 | 21.85 | 0.447 | 13.80 | 22.79 |
| 最佳化設計 | 0.023 | 2.18 | 39.55 | 0.258 | 14.00 | 22.92 | 0.657 | 21.37 | 26.58 |
| 增益 | | +0.14 | +0.92 | | +1.60 | +1.07 | | +7.57 | +3.79 |

表 6 原有生產參數值與最佳化參數值各目標之 99.8% 的信任區

| | 電感分佈 (μH) | 熱額定電流分佈 (A) | 飽和電流分佈 (A) |
|---------|------------------------|------------------|------------------|
| 原有設計輸出 | 2.04 ± 0.08 | 12.40 ± 1.86 | 13.80 ± 1.52 |
| 最佳化設計輸出 | 2.18 ± 0.08 | 14.00 ± 0.88 | 21.36 ± 2.24 |

6 結論

本研究運用田口實驗計畫法與柏拉圖多目標最佳化方法，進行 Choke 的一體成型粉末製程參數研究，運用非凌駕解找出最佳化設計。最佳化的參數組合，3 個目標平均值皆有提昇，電感平均值增加 0.14 μH 、熱額定電流平均值增加 1.60A、飽和電流平均值增加 7.57A。平均電感誤差由原來的 7.3% 降低到 0.9%，額定電流增加 13%、飽和電流增加 55%，驗證最佳化結果的改善。

而原有參數組合於生產線製作，不良率為 18% (電感過低 12%、缺角 2%、粉裂 1%、露銅 2.5%、長短腳 1%、刮痕 0.5%)，經由最佳化後的參數組合，應用於生產線上製作，由於產品特性常態分佈趨近於 2.2 μH 的位置，產品性能穩定，因電感過低所造成的不良率降為 1%，因此藉由田口直交實驗法及多目標最佳化的參數組合有非常好的成效。

Robust Optimization of the Powder Composition for the Core of Thin and High Current Inductors

Ming-Te Cheng and Jyh-Cheng Yu

Department of Mechanical and Automation Engineering
National Kaohsiung First University of Science and
Technology

Abstract

Current package designs of the iron core of inductors are mostly of open types. However, the coil exposure of open package design causes various distributions of magnetic lines of force and low saturation currents. Closed package designs of inductors have the features of lower resistance, higher inductance, and higher allowable current. Many inductor industries aim to develop closed inductors. Closed inductors apply integrated molding of coils and powders at one time instead of conventional powder sintering. This paper addresses the optimum mixture design of metallic and adhesion powders for the iron core of closed inductors. The study applies Taguchi's experimental designs to analyze the effects of the mixture proportions on the inductance quality, the heat rating current and the saturation current. Pareto optimization is applied to solve for the multi-objective problem. An Utopian optimum is derived at the end of the searching process. The optimum design is verified from a test production run and compared with the initial design. The deviation of the mean inductance of the optimum design is reduced from 7.2% to 0.9%, which increases the yield rate by 11%. The heat rating current increases 13%, and the saturation current increases 55%. The study verified the proposed design strategy.

Keywords: Taguchi's method, Pareto Optimum, Non-dominated solution, Inductor, Multi-objective optimization

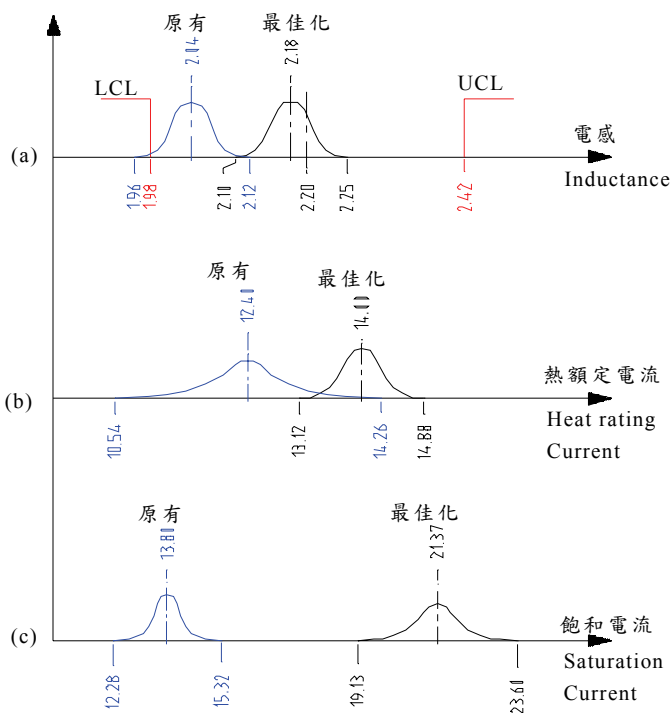


圖 7 目前量產參數與最佳化參數以 99.8% 信賴區間之比較

7 參考文獻

- [1] Imanishi, T., 2002, "NX series power choke coil", *Matsushita Technical Journal*, v49, n 6, p 58-62.
- [2] Park, S.H., 1996, *Robust design and analysis for quality engineering*, Chapman & Hall, London.
- [3] Guimaraes, F.G., Lowther, D.A. and Ramirez, J.A., 2006, "Multiobjective approaches for robust electromagnetic design", *IEEE Transactions on Magnetic*, v 42, No.4.
- [4] Canova, A., Gruosso, G. and Repetto, M., 2003, "Magnetic design optimization and objective function approximation", *IEEE Transactions on Magnetics*, v 39, No. 5.
- [5] 何文獻, 2003, 型鋼吊樑及甲板貨櫃支柱之強健多目標最佳化設計, 國立第一科技大學, 碩士論文。
- [6] Glodberg, D.E., 1989, *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*, Addison-Wesley, Reading, Mass.
- [7] 劉昱江, 2001, 基因演算法在重複性工程時間成本分析之應用, 朝陽科技大學, 碩士論文。