



X電容、共差模電感、磁環對高頻電磁 干擾功率輻射抑制性能研究

林昆平／台南分局技正

一、前言

電機電子產品高頻電磁干擾主要由電子控制基板及馬達類干擾源引起，電子控制基板有半導體高速開關，直流馬達與串激式感應馬達則有換向片火花問題，這些干擾源會衍生差模雜訊與共模雜訊兩類雜訊，「差模雜訊電流」由產品內部→電源線 L 相→電源端→N 相→再回至產品內部，過程中由於線路電壓降而在 L 相及 N 相產生雜訊電壓(μV)，傳導至插座電源端形成電源電壓干擾；「共模雜訊電流」則是有導流地點特性，此路徑可能有兩個：一個是產品本身接地點，一個是插座電源 N 相延伸的供電系統中性接地點，因此 LN 相上因共模雜訊電流經過產生電壓降，傳送至電源插座端形成電壓干擾。利用雜訊分離器及頻譜分析儀可量測並分離此兩種成份雜訊的各別干擾；若實驗室無採購雜訊分離器，量測結果是共差模雜訊的綜合效應，傳導性電壓干擾並非本文要探討的，闡釋它只是告訴讀者產品電源線 LN 相上存在著兩種雜訊成份，其電流走向並不相同，而這對功率輻射問題認知會有幫助。功率輻射干擾主要由共模雜訊電流在接地點產生共模電壓，反過來以產品電源線作為天線放射引起，量測需以具磁環之滑車來回穿梭電源線偵測(pW)。本文要研究電機電子產品控制基板電源部常見 EMI 對策元件(X 電容、差模電感、共模線圈、磁環(磁扣)對功率輻射抑制特性，量測以 CNS 13783-1 家電產品電磁干擾規範進行，研究結果也適合 CNS 13439 電子音響、CNS 13438 資訊設備、CNS 13483 醫工科等產品電磁干擾輻射防制，雖然電子資訊產品在個別規範中因頻段不同而改採天線式的場強強度量測。

二、對策元件對輻射干擾抑制推論

我們以圖 1(c)推論各對策元件執行功率輻射抑制特性。假設產品干擾源僅由直流馬達產生，因此在馬達碳刷上會流出差模雜訊電流 I_{dm} 與共模雜訊電流



I_{cm} ，考慮差模雜訊僅流通 LN 相間並互為反向形成回路，因此 I_{dm} 由馬達碳刷端出發經 LN 相線路再流回馬達碳刷另一端；而共模雜訊流往接地點，接地點有兩個途徑，一為產品本身機殼的接地如馬達殼，一為產品電源線插入插座後的台電供電系統中性點接地，故其在 LN 相流動方向為同向導地並非回路。由直流馬達兩碳刷端流出的共模雜訊電流將被分流成 I_{cm1} 與 I_{cm2} ，前者流向供電系統中性點，後者流向產品接地點且是兩碳刷端同時產生。有了前述概念後，要了解各對策元件抑制功率輻射特性就容易多了。

(1) X 電容

安置後，高頻的差模雜訊電流 I_{dm} 會使 X 電容呈低阻而將 I_{dm} 推回直流馬達產生處，若不安裝 X 電容， I_{dm} 回倒入電源插座端，經 L1 及中性點再回至直流馬達產生處，因此 X 電容只能防制差模雜訊電流倒入電源插座端所產生的電壓干擾，對共模雜訊電流引起的空間輻射問題並無效果，本文實驗將證明共模雜訊電流不會流經 X 電容。

(2) 差模電感

為 2PIN 元件，可個別安置在 L 相及 N 相上，從差模兩字看，此元件似乎僅能抑制差模雜訊電流，沒辦法抑制共模雜訊電流，因此對功率輻射問題應該起不了作用，我們將以實驗證實它對共模雜訊引起的功率輻射問題是有抑制的，其道理就在差模電感對高頻共模雜訊電流 $I_{cm1-1'}$ 、 $-2'$ 通過時仍會產生高電抗，共模雜訊電流被衰減成 $I_{cm1-1''}$ 、 $-2''$ ，使得接地共模電壓 V_{cm1} 變小，功率輻射量降低。

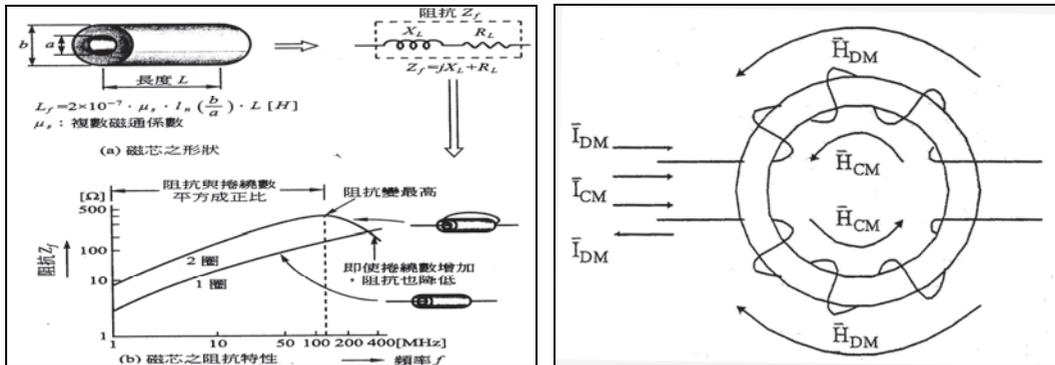
(3) 共模電感

為 4PIN 元件，由兩組互為反向線圈共同纏繞錳鋅磁體形成，共模線圈對共模雜訊電流抑制有效，對差模雜訊電流無效，這是因為差模雜訊經過共模線圈時，磁通互相抵消使電抗變零，但共模雜訊電流經過時，卻因磁通增強兩倍使電抗變兩倍(圖 1(b))。當共模雜訊電流 $I_{cm1-1,2}$ 通過時，共模雜訊電流被衰減成 $I_{cm1-1',2'}$ ，連帶使接地共模電壓 V_{cm1} 變小，功率輻射量降低。

(4) 磁環

磁環通常以產品電源線同向纏繞，LN 相上差模雜訊電流因互為反向，故在磁環上產生的磁通互相抵消使電抗變零，因此其對差模雜訊防制無效；當共模雜訊電流經過時，因同向而使磁通增強兩倍電抗變兩倍，可衰減通過的共模雜訊電流(圖 1(a))，使接地共模電壓 V_{cm1} 變小，功率輻射量降低。

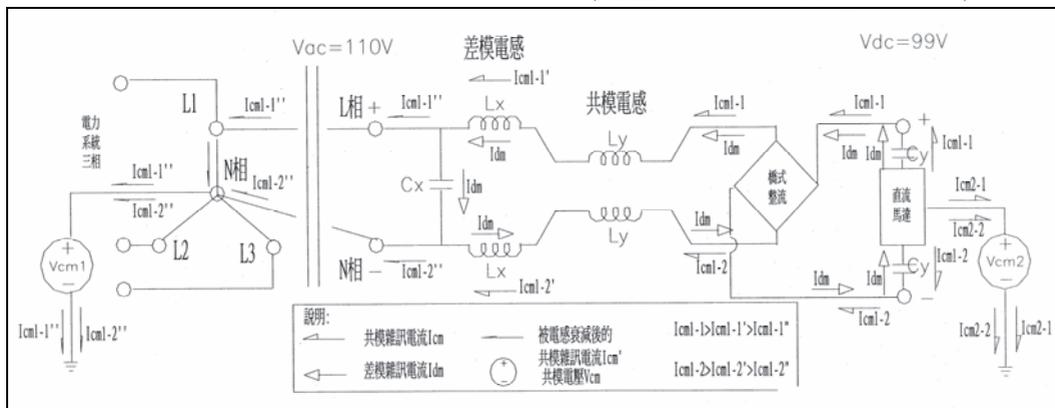
因此四個對策元件僅 X 電容對功率輻射抑制無效，剩下三個均會出現效果。



(a)磁環產生電抗原理

(b)共模線圈電抗原理

(遇差模 $X=0$; 共模 $X=2X_{dm}$)



(c)X 電容、共差模電感、磁環對共模雜訊抑制的理解圖(目標在使 V_{cm1} 變小)

圖 1 各對策元件防制功率輻射說明

三、CNS13783-1家電功率輻射規範介紹

家電功率輻射量測需在隔離室進行，其測試頻率範圍與限制值如表 1，測試情形如圖 2，量測儀器採用電磁干擾雜訊譜分析儀(EMI receiver)及吸收夾具(Absorbing clamp)，量測程序則如下：

- (1) 將 EUT 置於地 80 cm 之測試平台上，打開 EUT 電源開始進行量測。
- (2) 將量測頻率設定於 50 MHz，電源電壓由 99 V(0.9x110 V)調整至 121 V(1.1x110 V)，觀察干擾值隨電壓變化情形，記錄干擾值最大時之電壓，以此電壓輻射干擾功率之量測電壓。
- (3) 將電器產品電源打開，若產品強中弱模式者得選擇干擾最嚴重者為操作



模式，掃瞄頻率為 30 MHz~300 MHz。

- (4) 對於頻率點 30 MHz、45 MHz、65 MHz、90 MHz、150 MHz、180 MHz、220 MHz、300 MHz(頻率有 ± 5 MHz 之容許範圍)，進行復測，吸收夾具於 6 米長平台上前後移動，將偵測到最大干擾值記錄下來。
- (5) 於 45 MHz、90 MHz、220 MHz 重複執行第二次量測以確定其與第一次量測之強度值差異是否小於 2 dB，若其強度值小於 2dB 則保留第一次之測試結果，如果差異值大於 2 dB 則重複步驟(2)~步驟(4)。

表 1 CNS13783-1 功率輻射管制值

| 頻率範圍 (MHz) | 家電產品 | |
|---------------|---------------|---------------|
| | 準峰值 QP dB(pW) | 平均值 AV dB(pW) |
| 30-300 | 45-55 | 35-45 |
| | 以上限制值隨頻率作線性遞增 | |

要強調的是：EMI 掃圖曲線記錄的是過程中出現最大干擾值(即以 peak detector 作測試之掃瞄測試，而非限制值所規定的準峰值 QP 及平均值 AV，所以曲線雖然有異常點或超過復測點並不代表不符合規定，必須針對異常點的 QP 值與 AV 值再進行量測，量測時以滑車(clamp)至異常頻率點附近來回滑動，直到儀器量測值出現最差狀況，記錄此值並與限制值比對。另八個復測點屬商用頻段坐落點故需復測再確認。

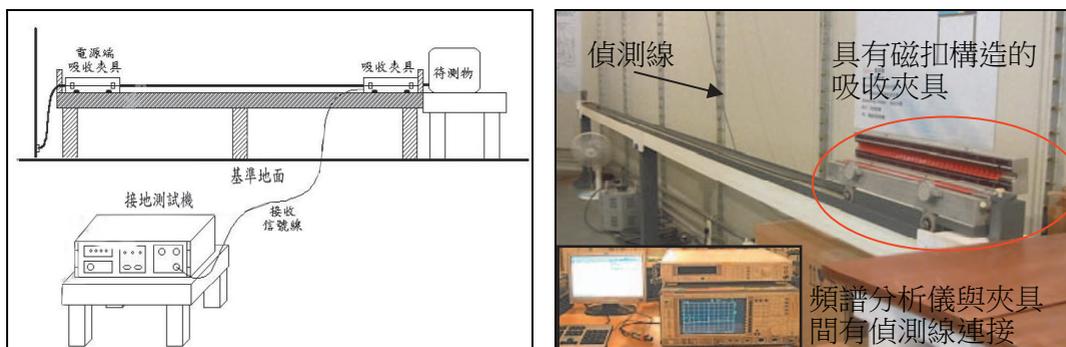


圖 2 功率輻射量測架構及實體



四、干擾源及其原始輻射量測

為了驗證第二節的推論，我們以一 110 V 30 W 直流馬達驅動的電動按摩枕作為樣品(圖 3)，量測時先清除原 EMI 對策元件設計以測出原始功率輻射值，實驗依第三節規定進行，輻射干擾掃圖如圖 4 及復測如表 2，可發現：



圖 3 30W 電動按摩枕本體、內部干擾源、拔除對策元件後作功率輻射

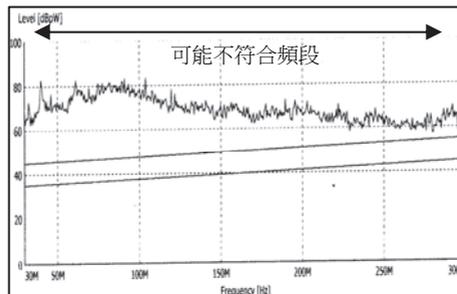


圖 4 功率輻射掃圖(單位：dB(pW))

表 2 功率輻射復測值(陰影為不符)

| | | | | | | | | |
|---------|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|
| 復測點 | 30MHZ | | 45MHZ | | 65MHZ | | 90MHZ | |
| 準峰值/平均值 | QP | AV | QP | AV | QP | AV | QP | AV |
| 量測值 | 50.1 | 18.1 | 50.7 | 17.4 | 59.3 | 23.4 | 67.9 | 30.0 |
| 輻射管制值： | 45.0 | 35.0 | 45.6 | 35.6 | 46.3 | 36.3 | 47.2 | 37.2 |
| 復測點 | 150MHz | | 180MHz | | 220MHz | | 300MHz | |
| 準峰值/平均值 | QP | AV | QP | AV | QP | AV | QP | AV |
| 量測值 | 55.9 | 18.3 | 54.1 | 17.4 | 51.7 | 16.3 | 48.3 | 13.2 |
| 輻射管制值： | 49.4 | 39.4 | 50.6 | 40.6 | 52.0 | 42.0 | 55.0 | 45.0 |



1. 產品產生的功率輻射干擾曲線均在限制描繪線上，有嚴重輻射干擾情形(觀察圖 4)。
2. 復測點干擾值轉換為平均值 AV 與準峰值 QP 後，AV 值符合限制，但 QP 值於 30 MHz、45 MHz、65 MHz、90 MHz、150 MHz、180 MHz、220 MHz 等頻率點不符限制，又以 65 MHz 及 90 MHz 最嚴重，超過限制值 13 dB 以上(觀察表 2)。

伍、對策元件抑制特性驗證

將清除對策元件後所遺留的插孔位置，以導線焊錫連至麵包板上方便插件測試。圖 5 顯示 X 電容、差模電感、共模電感、磁環等規格插件情形。(附件 1) 及(附件 2)為各對策元件安置後對功率輻射干擾抑制的掃圖及復測結果。

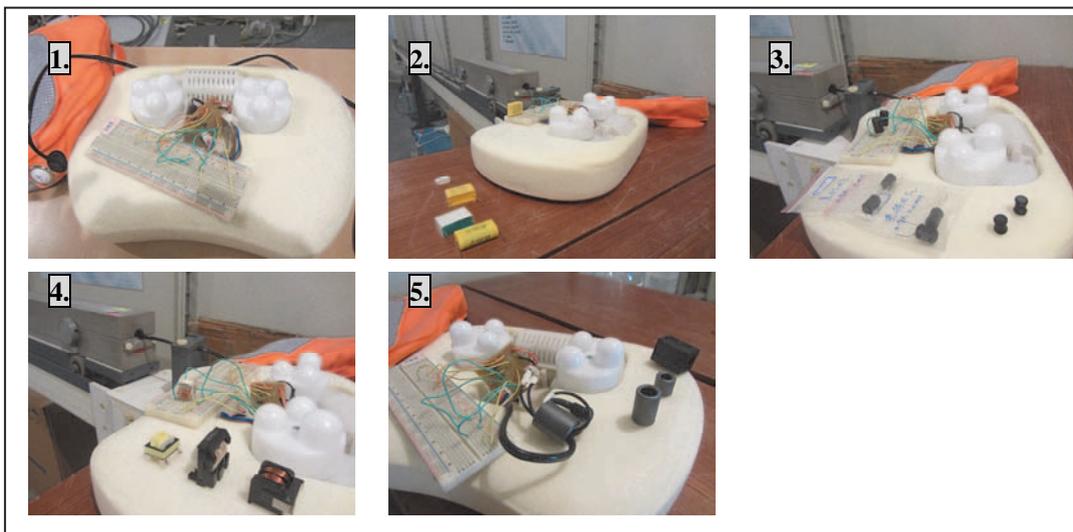


圖 5 對策元件分別插件 (1：拔除所有對策、2：X 電容、3：差模電感、4：共模電感、5：磁環)

5.1 X 電容

1. 從掃圖來看(附件 1)，X 電容由 0.1uF 提升到 3.3 uF，抑制效果並不顯著。
2. 從復測表觀察(附件 2)，不符合復測點的準峰 QP 值與平均 AV 值近乎沒什大變動，在 300 MHz 還發生干擾值被放大現象，可能原因為電容本身與麵包板連接金屬線及本身金屬腳所產生電感形成的共振點就在 300 MHz 附近，發生共振現象。



- 量測結果，印證 X 電容對共模雜訊確實無效，其對共模雜訊引起的功率輻射干擾問題沒有改善效果。

5.2 差模電感

- 從掃圖來看(附件 1)，差模電感由 0.47 uH x 2 提升到 5 mH x 2，比起 X 電容干擾曲線明顯出現變化。
- 從復測表觀察(附件 2)，不符合復測點的準峰 QP 值與平均 AV 值有明顯降低，在 300 MHz 仍發生干擾值被放大現象，原因有可能麵包板連接金屬線及本身金屬腳所產生電感與電感線圈寄生電容形成的共振點靠近 300 MHz 附近。
- 量測結果，印證差模電感對功率輻射干擾抑制是有效的。

5.3 共模電感

- 從掃圖來看(附件 1)，共模電感由 0.46 mH 提升到 40 mH，比起差模電感干擾曲線有更明顯的變化。
- 從復測表觀察(附件 2)，不符合復測點的準峰 QP 值與平均 AV 值明顯下降，抑制效果比差模電感更佳。
- 量測結果，印證共模電感對功率輻射干擾抑制改善有較佳的效果。
- 另共模線圈的投入並不是電感值越大抑制效果越佳，而是必需參考廠商提供的頻率阻抗圖，圖 6 顯示共模電感 0.46 mH(ASC-0901)曲線在 65 MHz 與 90 MHz 附近頻段擁有較高阻抗，代表對 65 MHz 與 90 MHz 附近頻段的各頻率共模雜訊電流會有較大衰減。

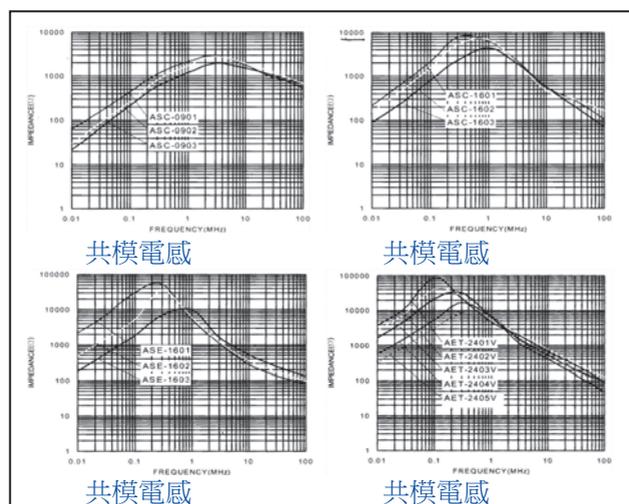


圖 6 各共模電感阻抗頻率圖



5.4 磁環

1. 從掃圖來看(附件 1)，磁環跟共模線圈的抑制干擾曲線相似。
2. 從復測表觀察(附件 2)，不符合復測點的準峰 QP 值與平均 AV 值與共模電感之抑制相當。
3. 量測結果，印證磁環對功率輻射干擾抑制有效。
4. 另磁環投入並不是越大顆或纏繞越多圈效果就較好，而是必需參考廠商提供的頻率阻抗圖，圖 7 顯示 RH16X17X9 曲線在 65 MHz 與 90 MHz 附近頻段擁有較高阻抗，代表對 65 MHz 與 90 MHz 附近頻段的各頻率共模雜訊電流會有較大衰減。

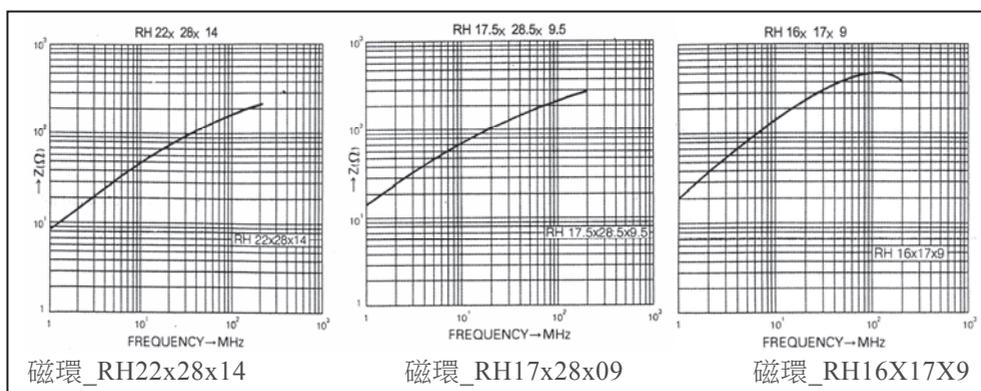


圖 7 各磁環的頻率阻抗特性圖

陸、結論

本文先推論各對策元件如何抑制功率輻射問題，再以實驗驗證推論的正當性，可釐清長久以來電磁干擾工程師對對策元件抑制特性的混亂觀念，尤其共差模雜電流走向、傳導電壓干擾、功率輻射干擾等物理含意都作了解釋，也是筆者延續十七年來從事低頻諧波(harmonic)至高頻諧波干擾抑制工作經驗累積分享。另拉至麵包板的金屬線過長，加上導線及元件金屬腳有電感效應，及元件纏繞線圈間存在寄生電容，使量測結果會有誤差問題，不管如何，各對策元件投入均在相同狀況進行，功率輻射抑制掃圖及復測趨勢仍可作為參考。最後總結如下：

1. X 電容果然沒有抑制效果。
2. 不要因名詞關係而誤解差模電感僅對差模有效對共模雜訊無效。
3. 共模線圈及磁環本來就是對付共模雜訊的利器所以會有效果。



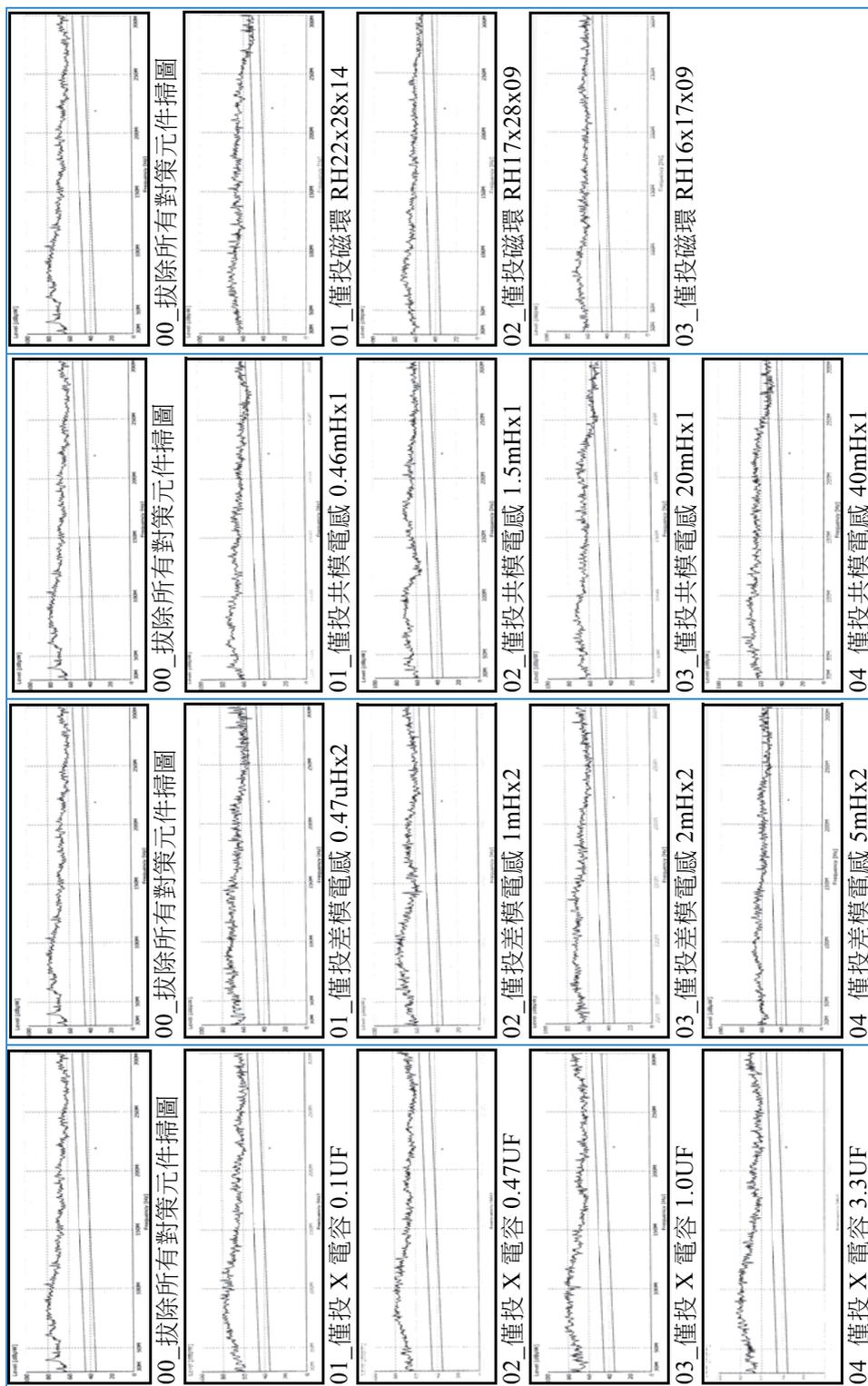
4. 圖 1(c)可觀察到混合差模電感、共模電感、磁環等可能才有辦法解決這個案例產生的功率輻射問題，在本文圖 3 電子基板上，眼尖的讀者應該可發現筆者所拔除原設計方案包括 X 電容、差模電感、共模電感、磁環(磁扣)等四樣，不幸的是原設計在 65 MHz、90 MHz、150 MHz、180 MHz 等頻率點的功率輻射干擾仍無法通過限制值。
5. 圖 1(c)可看到兩顆 Y 電容共同接地，Y 電容在電磁干擾的是傳導電壓干擾的對策元件，還是功率輻射對策元件，這留給讀者去思考。

柒、參考文獻

1. CNS13783-1 標準，“家電產品電磁相容”，93。
2. 林昆平著，“電磁干擾濾波器接地對國家標準 CNS3765 及 CNS13783-1 影響”，電機月刊 184 期。
3. 林昆平著，“電磁干擾抑制對策元件 XY 電容、共模電感、磁珠、磁環研究”，檢驗雜誌 121 期。
4. 林昆平著，“電磁干擾抑制對策元件 X 電容、差模電感研究”，檢驗雜誌 120 期。
5. 林昆平著，“電磁干擾抑制對策元件 Y 電容及其安規”，全國認證 TAF2008 論文。
6. Lin, Kun-Ping, “An Advanced Computer Code For Single-Tuned Harmonic Filter Design”, IEEE Transation on Industry Application, Vol.34, No.4, July/Aug, 1998, PP.640-648.
7. 國家標準、IEEE 標準、IEC 標準、ISO 標準購買，請電洽“經濟部標準檢驗局資料中心”，(02)23431984。
8. 電磁干擾相關技術研究可至下列網址下載：
<http://www.bsmi.gov.tw/wSite/index.jsp> -> 台南分局-> 本分局簡介-> 業務簡介-> 第一課->技術文章。



【附件 1】各對策元件規格投入後的輻射干擾抑制掃圖





【附件 2】各對策元件規格投入後的輻射干擾抑制復測(陰影為不符值)

| 復測點/單位：dB(pW) 準峰值/平均值 | 30 MHz | | 45 MHz | | 65 MHz | | 90 MHz | | 150 MHz | | 180 MHz | | 220 MHz | | 300 MHz | |
|--|--------|------|--------|------|--------|------|--------|------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | QP | AV | QP | AV | QP | AV | QP | AV | QP | AV | QP | AV | QP | AV | QP | AV |
| (0) 拔除所有對策元件 | 50.1 | 18.1 | 50.7 | 17.4 | 59.3 | 23.4 | 67.9 | 30.0 | 55.9 | 18.3 | 54.1 | 17.4 | 51.7 | 16.3 | 48.3 | 13.2 |
| (1) 僅投 X 電容 0.1uF | 48.2 | 18.5 | 49.7 | 17.5 | 59.2 | 23.5 | 66.9 | 32.0 | 55.1 | 21.5 | 54.0 | 19.9 | 49.3 | 16.9 | 48.6 | 14.1 |
| (2) 僅投 X 電容 0.47uF | 51.2 | 19.2 | 49.1 | 17.6 | 58.8 | 23.8 | 67.0 | 31.8 | 55.4 | 19.0 | 53.8 | 19.3 | 50.3 | 17.5 | 51.4 | 17.9 |
| (3) 僅投 X 電容 1.0uF | 49.7 | 17.7 | 51.3 | 17.9 | 60.7 | 23.6 | 66.3 | 31.4 | 55.9 | 20.8 | 55.0 | 20.1 | 49.4 | 16.8 | 49.5 | 17.8 |
| (4) 僅投 X 電容 3.3uF | 51.3 | 17.8 | 50.3 | 17.4 | 60.8 | 23.4 | 66.1 | 30.1 | 55.8 | 18.2 | 54.5 | 18.1 | 49.0 | 15.7 | 54.6 | 20.3 |
| (5) 僅投差模電感 0.47uHx2 | 45.3 | 16.6 | 46.6 | 16.6 | 57.1 | 21.2 | 63.6 | 28.9 | 56.4 | 22.2 | 53.4 | 19.6 | 50.7 | 17.8 | 50.6 | 15.8 |
| (6) 僅投差模電感 1mHx2 | 46.2 | 16.7 | 47.9 | 17.4 | 55.2 | 21.5 | 63.5 | 30.5 | 49.6 | 16.0 | 54.1 | 17.3 | 50.4 | 15.3 | 54.5 | 19.0 |
| (7) 僅投差模電感 2mHx2 | 45.6 | 17.5 | 47.4 | 15.9 | 54.9 | 20.7 | 60.0 | 26.8 | 52.6 | 15.7 | 51.3 | 16.3 | 46.6 | 12.7 | 54.5 | 18.5 |
| (8) 僅投差模電感 5mHx2 | 44.6 | 14.9 | 43.4 | 11.8 | 49.1 | 13.7 | 56.9 | 21.2 | 48.6 | 16.8 | 46.4 | 16.4 | 49.1 | 16.7 | 47.7 | 14.5 |
| (9) 僅投共模電感 0.46mH | 46.9 | 16.9 | 49.5 | 16.5 | 58.5 | 22.8 | 60.5 | 27.2 | 53.6 | 16.5 | 52.8 | 16.4 | 46.4 | 9.7 | 48.9 | 10.8 |
| (10) 僅投共模電感 1.5mH | 45.3 | 16.1 | 46.6 | 15.9 | 50.8 | 19.0 | 59.7 | 26.3 | 49.4 | 14.9 | 53.5 | 17.2 | 52.0 | 15.3 | 42.9 | 7.6 |
| (11) 僅投共模電感 20mH | 45.8 | 16.4 | 47.9 | 16.3 | 53.9 | 19.5 | 61.4 | 25.4 | 50.2 | 14.3 | 51.5 | 15.7 | 50.9 | 14.3 | 39.1 | 6.3 |
| (12) 僅投共模電感 40mH | 44.7 | 16.1 | 46.5 | 15.9 | 54.9 | 20.6 | 58.7 | 24.9 | 54.6 | 17.6 | 53.1 | 15.6 | 51.0 | 15.6 | 46.7 | 9.6 |
| (13) 僅投磁環(RH22x28x14) | 45.8 | 17.0 | 46.2 | 15.1 | 52.5 | 19.6 | 56.4 | 24.0 | 53.4 | 17.3 | 55.2 | 19.5 | 52.2 | 15.7 | 36.3 | 4.6 |
| (14) 僅投磁環(RH17x28x9) | 49.7 | 19.1 | 45.7 | 16.1 | 50.8 | 18.6 | 55.7 | 22.8 | 50.4 | 16.1 | 51.9 | 17.2 | 47.5 | 12.4 | 44.9 | 9.2 |
| (15) 僅投磁環(RH16x17x9) | 48.6 | 18.6 | 46.6 | 16.5 | 51.0 | 18.9 | 53.3 | 21.3 | 48.9 | 13.7 | 50.6 | 16.5 | 46.7 | 11.9 | 45.9 | 11.3 |
| (16) 混合差模電感(2mHx2)+ 共模電感(1.5mH)+磁環 (RH16x17x8) | 42.3 | 16.9 | 43.9 | 15.0 | 49.5 | 17.7 | 49.1 | 19.6 | 47.2 | 13.5 | 58.3 | 22.7 | 51.3 | 18.4 | 48.2 | 15.1 |
| 輻射管制值： | 45.0 | 35.0 | 45.6 | 35.6 | 46.3 | 36.3 | 47.2 | 37.2 | 49.4 | 39.4 | 50.6 | 40.6 | 52.0 | 42.0 | 55.0 | 45.0 |