

通訊電源近場磁耦合干擾的診斷與抑制

和軍平¹ 陳爲² 白新民² 姜建國¹

(1. 清.大.機工程與.用.子技.系北京100084

2. 台.能源技.(上海)有限公司上海201209)

Diagnosis and Improvement on the EMI Effect of Stray Magnetic Field in a Telecom Power Supply

He Junping¹ Chen Weiz Bai Xinmin² Jiang Jianguo¹

(1. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University Beijing 100084 China

2. Delta Electronics Company, Shanghai 201209 China)

摘要：開關電源主電路產生的強雜散電磁場會耦合到EMI濾波器上，會降低濾波器的衰減性能，導致電源傳導干擾發射異常。本文提出“引線移位”調試方法，來迅速辨識電源中主要的磁場源和敏感體。考察了通訊電源輸出濾波電感雜散磁場的特性和電源EMI濾波器共模電感的磁場敏感性，建立了反映磁場耦合效應的開關電源差模傳導干擾基本模型。根據磁耦合機理，提出了幾種改善電源的差模干擾發射的措施，並進行了驗證。

關鍵字：磁耦合、共模電感磁敏感性、傳導干擾模型、干擾抑制

Abstract: The attenuation characteristic of on board EMI filter may be deteriorated greatly by the stray magnetic field produced by main circuit of switched mode power supply. In this paper, a novel debug method is proposed and validated, which is suit for the diagnosis of magnetic field sources and sensitive object. The magnetic coupling effect between an inductor in main circuit and an EMI common mode inductor is studied by experiments and analysis. The stray magnetic field distribution characteristic of the DC/DC inductor and the sensitivity of common mode inductor are analyzed in detail. A basic EMI model of this PFC converter is built up, which includes the magnetic coupling effect. In the end, several measures are proposed to decrease DM EMI emission and verified by experiments.

Key words: magnetic field coupling, sensitivity of common mode inductor, EMI model, EMI debug

1 引言

隨著開關電源功率密度的不斷提高，電源體積不斷減小，電源內雜散耦合效應更為突出。在電源主電路元器件間、EMI濾波器元器件間、以及主電路和濾波器間均存在著雜散耦合效應，使電源電磁干擾的傳播通道更加複雜，導致高功率密度電源電磁干擾問題的分析、調試更加困難。目前，國內外針對開關電源雜散電磁耦合效應的作用模式、空間分佈特性等方面還缺少深入的研究，尚未有系統有效的理論來指導近場耦合干擾調試實踐^[1-3]。文獻[1]雖對Boost電路產生的近場輻射分佈特性進行了分析，但未揭示近場對傳導干擾發射的作用。文獻[2, 3]對簡單結構濾波器內部的雜散耦合效應進行了研究，但未分析主電路對EMI濾波器的近場耦合效應。目前，對實際開關電源近場耦合形成的干擾問題依然還是通過經驗和湊試來進行分析和調試。

本文以一台通訊電源模組為例，提出“引線移位”辦法，迅速識別電源主要近場源和敏感體，對電源主電路和EMI濾波器件間的近場耦合問題進行了有效的診斷和抑制。文章首先介紹了電源結構和傳導干擾發射異常現象，進而結合實際電源，詳細介紹了“引線移位”辨識近場源和敏感體的步驟，分析了場源和敏感體的特性，得出了基本電路模型。最後，在實驗考察主要近場源和敏感體間耦合效應的基礎上，提出了幾種有效的抑制措施。

2 通訊電源模組傳導干擾發射異常現象

所研究的800W通訊電源模組具體的電路框圖如圖1所示。電源由Dual Boost型PFC電路和全橋DC/DC電路兩級串聯構成，輸入單相220V交流，輸出48V/16A。電源EMI濾波器由兩級共模LC濾波和一級差模LC濾波電路構成，除靠近電網側的共模電感1採用環形分繞結構外，其餘電感採用PQ磁芯結構。電源元件呈“C”型佈局，見圖2所示。在這種佈局下，DC/DC級中的元器件距離電源的EMI濾波器很近。其中，DC/DC級的環形輸出濾波電感距離EMI濾波器約8釐米，其上加有開關頻率為148kHz的電壓方波，通有峰峰值約3A的三角形紋波電流，在其周圍有較強的雜散電、磁場。

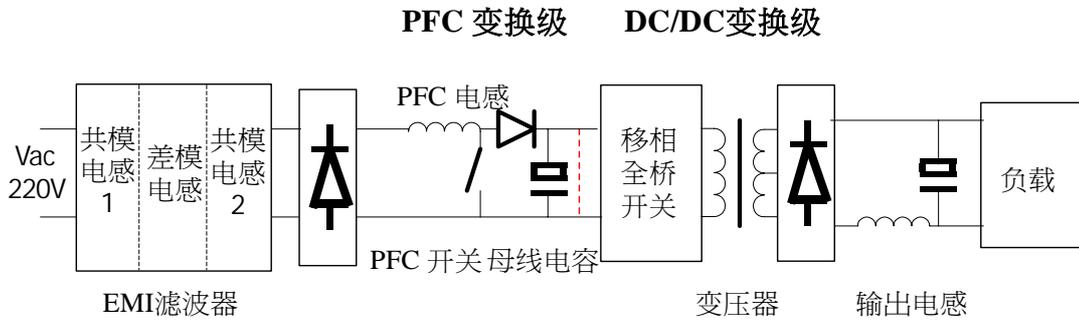


圖1 800W 通訊電源模組電路原理框圖

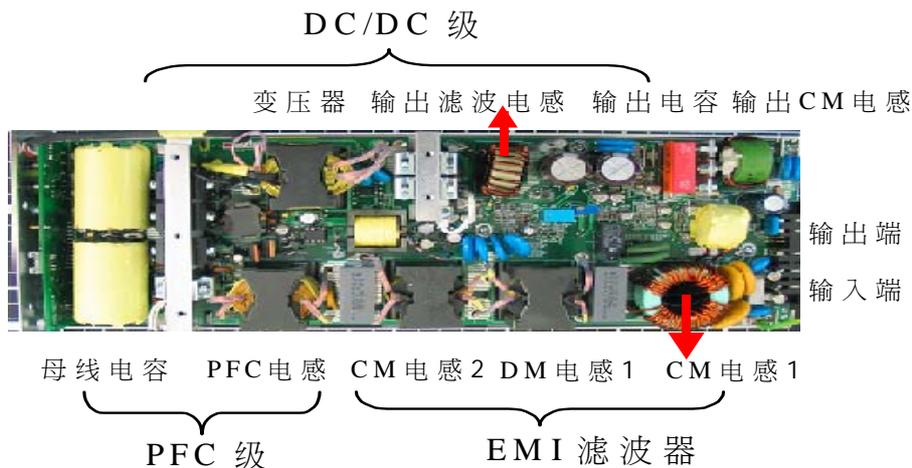


圖2 800W 通訊電源模組佈局和主要元件位置

依據通常的差模發射機理分析來看，該電源的差模傳導發射主要由PFC級來產生。DC/DC級雖然也有很高的電壓、電流跳變，但母線上並聯的大電解和高頻電容具有很小的交流阻抗，將DC/DC級的差模脈衝電流旁路，使其不易流到PFC級。母線電容的隔離作用如圖1中虛線所示。故而，在整個電源模組對電網的傳導干擾發射中，差模發射頻譜裏DC/DC級開關頻率及其倍頻成分的數值應該很小。然而，實測發現，電源差模發射頻譜裏DC/DC級開關頻率及其倍頻成分的數值比較大，出現了異常頻譜成分。具體如圖3所示，圖中清楚地標出了PFC、DC/DC、副助電源的差模發射頻譜。從而可以肯定，電源差模傳導干擾傳播通道中存在著近場耦合效應。

為判明近場性質，採用EM-Scanner 儀對電源進行掃描。圖4、5顯示的是電源模組正面上方5mm平面上磁場垂直分量和電場的掃描結果。可以看出，主電路磁器件和交流回路產生了比較強烈的雜散磁場，同相應的電場掃描圖相比，雜散磁場的覆蓋範圍更廣，已涵蓋了一部分EMI 濾波器；

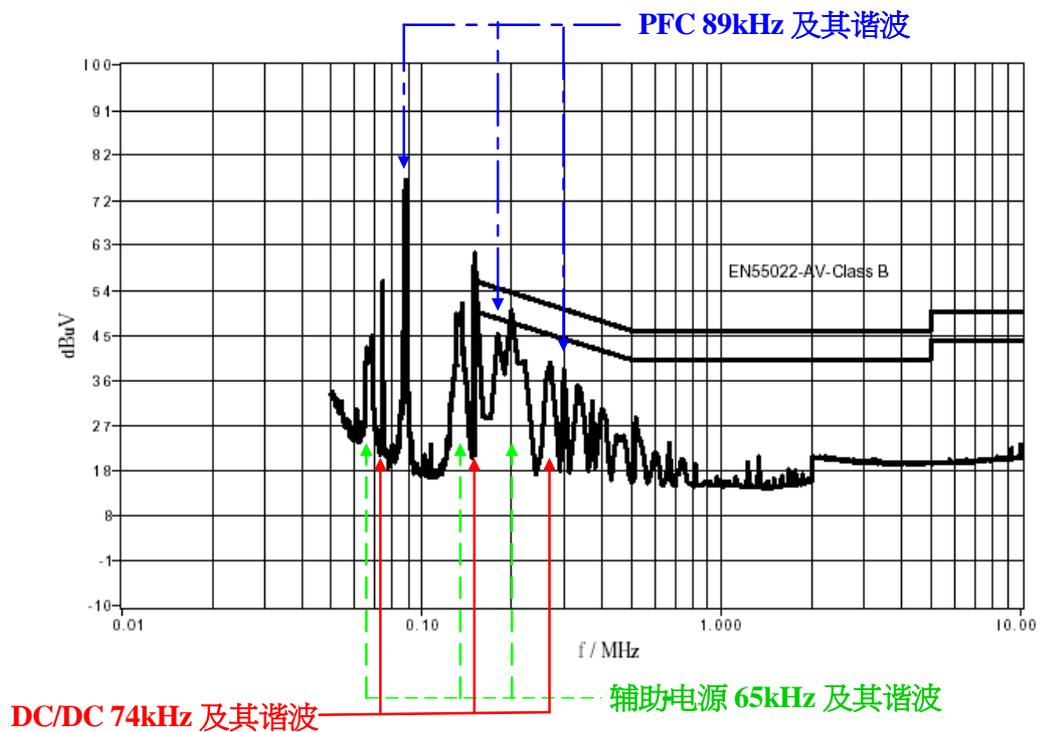


圖3 電源模組差模干擾發射頻譜

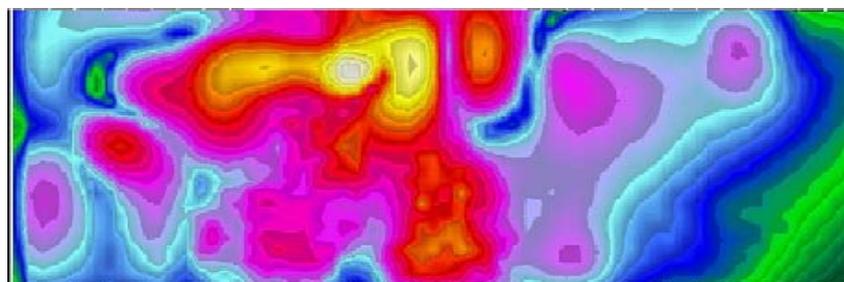


圖4 電源模組正面上方5mm平面上垂直磁場掃描結果

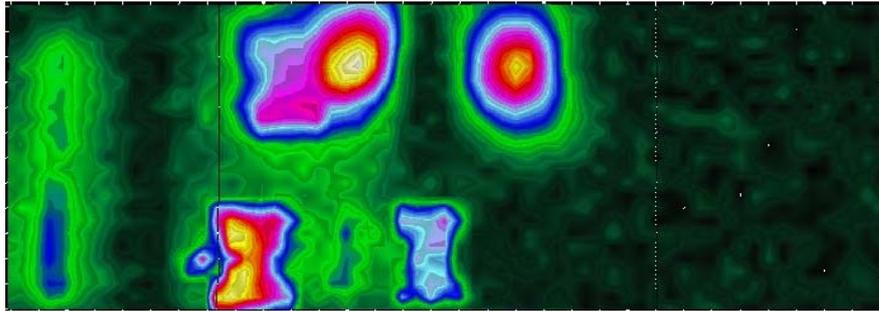


圖5 電源模組正面上方5mm平面上電場掃描結果

同時，由於電場耦合主要對共模干擾起作用，一般不會影響到電源的差模發射，因而可排除是電場耦合。進一步的，在EMI濾波器中，共模電感磁芯的導磁率很高，易吸引其周圍的磁力綫，在線圈中感應出電壓，且恰為差模性質的。因此，可以判斷，電源主電路雜散磁場與EMI濾波器間的磁場耦合是電源傳導干擾發射異常的主要原因。

3. 利用引線移位法判別干擾源和敏感體

確定電源中主要磁場源和敏感物體，是分析近場耦合具體成因和有效抑制的基礎。僅依靠圖4掃描結果無法判斷出具體的干擾源和敏感體。通過電遮罩、磁遮罩方式可以判斷近場源和敏感體，然而，在實際電源EMI調試中，遮罩體不易做到密閉，很難徹底隔絕耦合通道，因而該方法的使用有一定局限性。在電源裝配好之後，各元器件的位置已焊接固定，不易調整距離和相對角度。然而，根據近場耦合效應受近場源、敏感體間的距離影響大的特點，可以將主電路和EMI濾波器的所有器件用雙絞軟引線從PCB連接出來，從而可以方便地調整各元器件的間距離和相對角度，觀察位置和角度變化對電源傳導干擾發射的影響，從而迅速辨識近場源和敏感體。

3.1 敏感體的確定和特性分析

電源主電路和EMI濾波器間存在磁耦合，由於主電路中變化的電壓、電流幅值遠大於EMI濾波器中電壓、電流成分，因而可將互感的交互作用簡化為單向的主電路影響EMI濾波器。從而可將EMI濾波器視為敏感體。對於EMI濾波器中的共模、差模電感和電容，採用“引線移位”法進一步的深入判斷。圖6顯示了對EMI濾波器中環形分繞共模電感敏感性的移位測試示意圖。

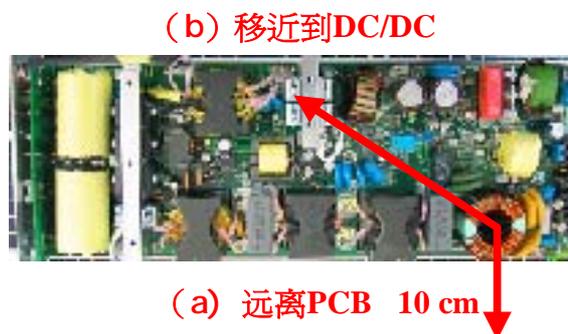


圖6 環形分繞共模電感移位測試示意圖

該辦法又分為兩步，先是將該電感移出電源外10cm，觀察差模干擾發射DC/DC級頻譜的變化。隨後，再將該電感移到DC/DC級的上方，觀察差模干擾發射DC/DC級頻譜的變化。差模發射頻譜如圖7所示，

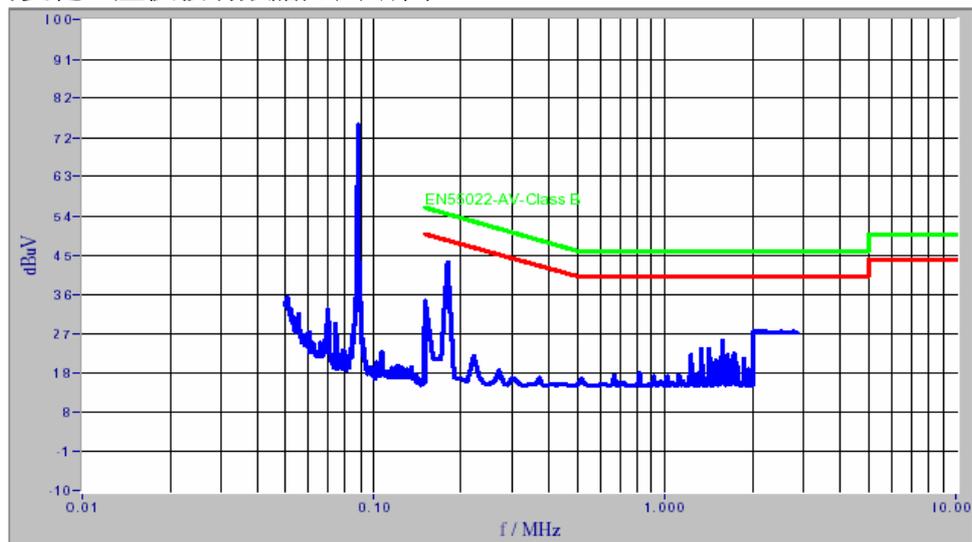


圖7a CM1遠離PCB，差模頻譜大大降低

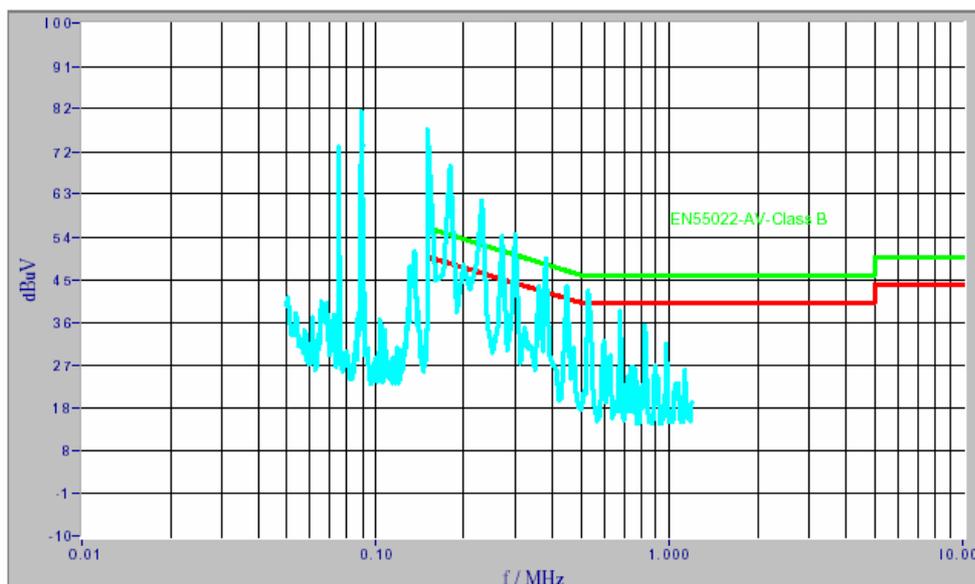


圖7b CM1移近DC/DC級，差模頻譜大大升高

可以看出，當EMI 環形共模電感遠離DC/DC級時，DC/DC級差模發射頻譜成分大大降低，而當靠近DC/DC級時，DC/DC級差模發射頻譜成分大大增加，表現出很強的變化。用類似的方法，移動EMI 濾波器中另外兩個PQ結構的電感器和電容，實驗發現其幾乎不受DC/DC級的影響。從而，最終可確定，EMI 濾波器中環形分繞共模電感是主要的敏感體。

環形分繞共模電感易受擾的基本原因分析如下。圖8顯示了環形分繞共模電感的結構及在均勻外磁場作用下的感應原理圖和等效電路。可以看出，當外界磁場依圖

所示方向入射時，在線圈中會感應出差模成分的電壓。

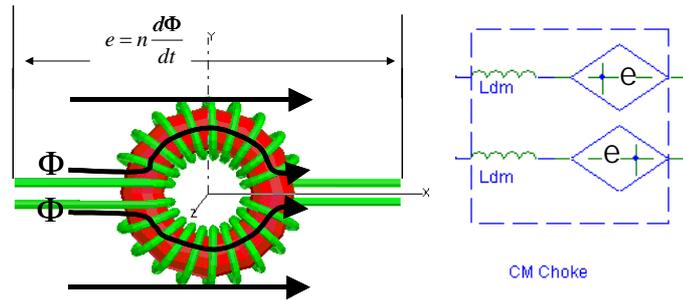


圖8 環形分繞共模電感感應原理及等效電路

由於共模電感多採用高磁導率的磁芯材料，加之線圈匝數較多，因而會感應出較大差模性質的電壓。當該共模電感外側的差模濾波電容較小時，所感應的電壓會有較多的分量加到LISN電阻上，從而導致差模干擾發射大大增加。需要注意的是，感應電壓同外界入射磁場的強度、方向和分佈特性都有關係。圖8顯示的是外磁場平行於繞組入射時，最大感應情況。而當外界磁場垂直於繞組入射，這時感應電壓達到最小，接近零，具體圖略。這為通過調整相對角度來改善差模發射提供了可能。

3.2 磁場源的確定和特性分析

為判定具體的輻射源頭，同樣採用“引線移位法”進行。分別移動主電路PFC級的電感、DC/DC級的變壓器和輸出濾波電感，觀察模組對電網的差模干擾發射變化。將上述磁元件各移出PCB約10cm。圖9顯示的是DC/DC級輸出電感移動前後，電源差模干擾發射的頻譜曲線。仔細檢查資料表明，在輸出電感電流基波和二倍頻點上，有10-15dB的大變化。而其他器件移動後，電源差模干擾發射在DC/DC基波及其倍頻上，僅有2-3dB的變化。因此，可以確定，主要的磁場源是輸出濾波電感。

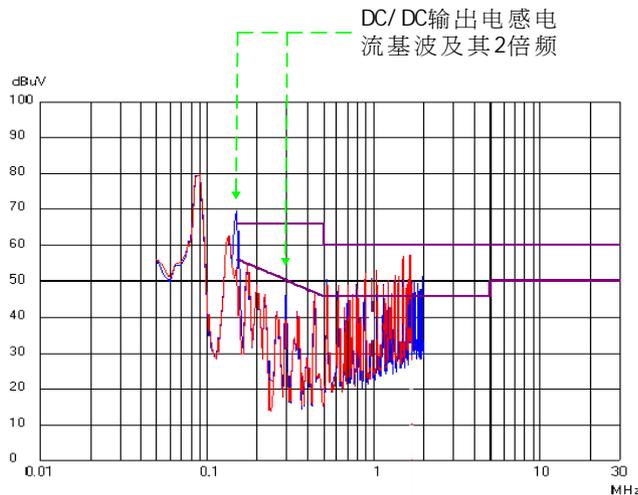


圖9 DC/DC級輸出電感移動前後差模干擾發射曲線（藍為原始發射，紅為移出後的發射）

DC/DC級輸出濾波電感採用環形結構，由低磁導率的鐵粉芯構成。利用Ansoft有限元分析軟體2D仿真表明，其周圍的雜散磁場分佈比較複雜，受繞組不均勻性的影響極大。由於3維仿真準確建模困難，本研究採用實測的辦法分析環形電感的磁場分佈。

由於在實際電源中，磁芯比較多，會改變磁力線的分佈。為仔細考察DC/DC輸出電感雜散磁場的分佈，將輸出電感單獨取出進行磁場測量。具體測量佈局可參考圖10，其中用信號發生器作為激勵源，信號發生器輸出峰峰值10V、200kHz的正弦波。為避免信號發生器輸出電場的影響，採用具有良好電遮罩的平衡變壓器進行隔離。

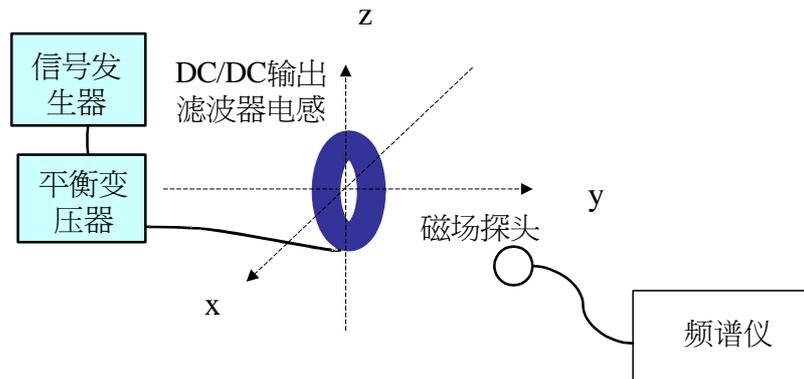


圖10 DC/DC輸出濾波電感雜散磁場測量佈局

根據磁場探頭最大感應電壓方向即可確定磁力線方向，圖11顯示了xy平面的實測雜散磁場情況。圖中可以清楚地看出，有一些磁力線會穿過共模電感的環形磁芯，導致感應電壓的產生。仿真和實測結果均證實了，電感雜散磁場的分佈範圍遠遠超過磁器件本身的尺寸。

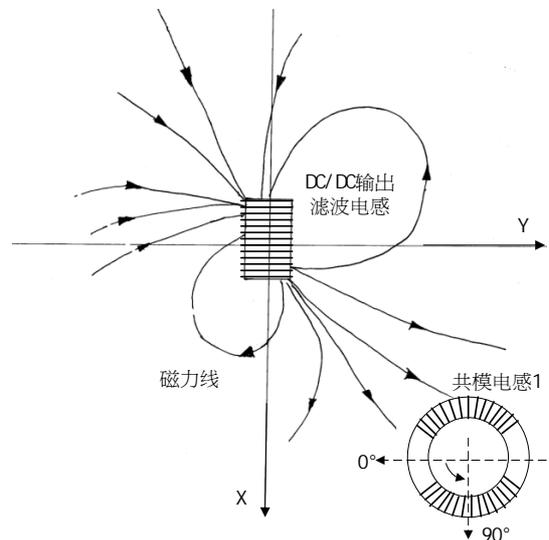


圖11 DC/DC級輸出濾波環形電感x-y平面磁力線

4 基本耦合模型和干擾的改善

4.1 基本耦合模型

根據前述分析，考慮到DC/DC級，輔助電源同EMI濾波器共模電感存在互感，就可得出包含了磁耦合效應的800W通訊電源模組差模傳導干擾的基本模型框圖，具體如圖12所示。減小互感就可以降低DC/DC級和輔助電源對通訊電源模組差模干擾發射的影響。

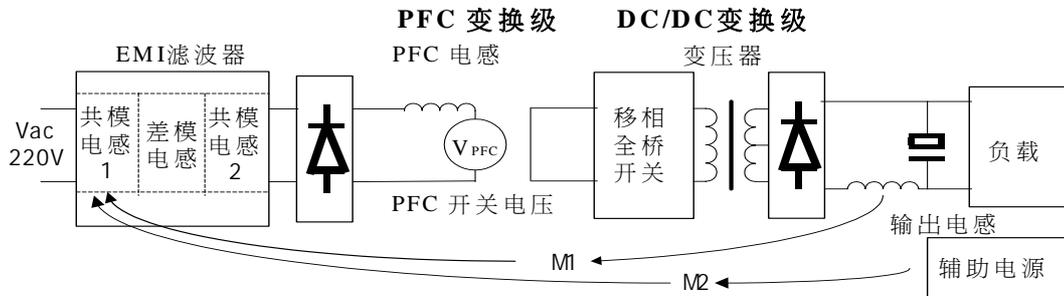


圖12 800W 電源模組差模干擾基本模型框圖

4.2 磁場耦合效應的改善

調整磁場源和敏感體間的距離、方向都可改變互感。在電源結構基本已定的條件下，距離、位置已基本固定，無法調節。利用EMI共模電感對外界磁場方向具有很強的敏感性的特點，可通過調整共模電感的相對角度來改變互感。

在圖10測量佈局基礎上，將磁場探頭改為共模電感，使兩電感的間距與在電源內的相同。將共模電感一側的端子短路，另一側用同軸線引入到頻譜儀。保持輸出電感位置不變，調整共模電感1的角度，測量感應電壓，得到表1資料。可見，存在最大感應和最小感應角度。

共模電感1 轉角	0°	60°	90°	135°	180°	190°	225°	270°	315°	360°
感應電壓 (dBuV)	32	10	31	31	26	10	32	37	37.5	32

表1 共模電感1旋轉角度和感應電壓

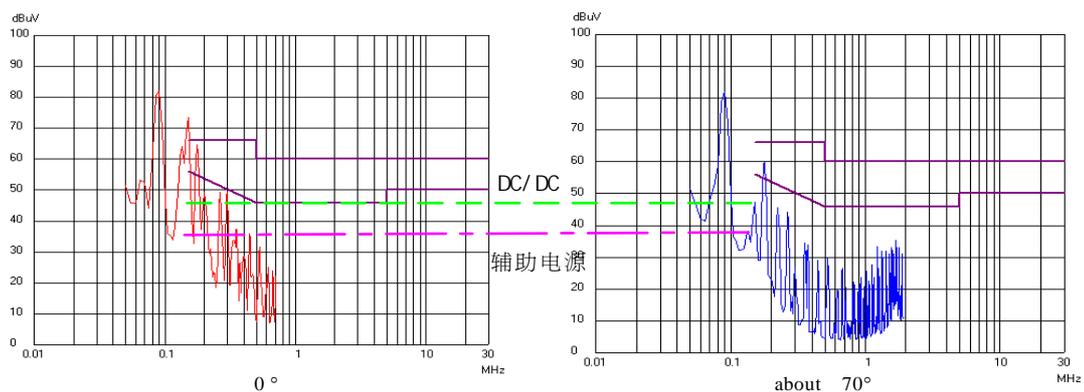


圖13 通訊電源模組共模電感1實際最小感應角度

當磁力線以接近平行共模電感繞組的角度入射時，感應最大，如135o和315o。當磁力線以接近垂直繞組的角度入射時，感應最小，如60o和190o。具體也可參考圖11。由於實際共模電感繞組並不完全對稱和均勻，最小角度和理想的有些偏差。根據上述研究分析結果，對實際800W電源模組的EMI共模電感角度進行了調整，在70o附近找到了最小感應角度。具體測量結果如圖13所示，這時DC/DC級和輔助電源在EMI共模電感中感應產生的差模電壓大大減小，測試結果證實了前述分析的正確性。角度的偏差主要是由於電源模組中多磁芯影響磁場分佈而致。

其他的，如使用雙線並繞共模電感、遮罩磁場源等辦法也都可有效降低磁耦合的影響。

5 結論

- 1) 開關電源主電路雜散磁場耦合到EMI濾波器上，導致濾波器差模衰減性能下降，電源差模干擾發射出現異常頻率成分。
- 2) 通過“引線移位”辦法，移動電源中元器件的位置，可以迅速有效地判別電源近場耦合效應的強弱，辨識主要的敏感體和近場源。
- 3) EMI濾波器中，環形分繞共模電感容易受到外界的雜散磁場的影響，感應出差模性質的電壓，且具有極強的方向敏感性。當外磁場入射角度與繞組方向平行時，感應出最大電壓；當入射角度與繞組垂直時，感應電壓最小。
- 4) 對具有強方向性的輻射體或敏感體，採用調整相對角度的辦法，可有效減小磁場耦合，降低電源對外差模干擾發射。

參考文獻

- [1] Giulio Antonini, Antonio Orlandi. EMC characterization of SMPS devices: circuit and radiated emission model. IEEE Transactions on EMC, 1996, Vol.38 No.3: 300-309
- [2] C. P. Wang, D. H. Liu, Jianguo Jiang. Study on coupling effects among passive components used in power electronic devices. Proceedings of 4th international power electronics and motion control conference, Xi'an, China: 2003.
- [3] Wang Shuo, F. C. Lee, W. G. Odendaal. Controlling the Parasitic Parameters to Improve EMI Filter Performance Proceedings of APEC 2004, USA: 503-509

作者簡介

和軍平 男，1971年生，博士，台達能源技術（上海）有限公司企業博士後，從事電力電子裝置電磁相容方面的研究。
陳為 男，1959年生，博士、教授，博士生導師，任台達能源技術（上海）有限公司高級研發經理。研究方向為電力電子功率變換及高頻磁技術等。

姜建國 男，1938年生，教授，博士生導師，主要從事電機檢測與故障診斷和電力電子裝置電磁相容方面的研究。

聯繫地址：上海浦東斯米克工業園民夏路238號DPEC磁組和軍平
201209 Tel: 021-68723988-8330

E-mail: hejunping@tsinghua.org.cn
he.junping@del.tadq.com.cn

屬：徵文的其他類