

开关电源中电磁干扰的抑制

0 引言

随着开关电源技术的不断发展和日趋成熟，各个应用领域对开关电源的需求也不断增长，但是，开关电源存在严重的电磁干扰(EMI)问题。它不仅对电网造成污染，直接影响到其它用电电器的正常工作，而且作为辐射干扰闯入空间，对空间也造成电磁污染。于是便产生了开关电源的电磁兼容(EMC)问题。电磁兼容是指设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力。

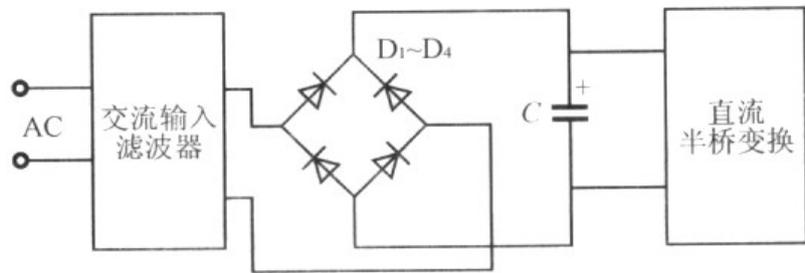
开关电源的电磁干扰可分为传导干扰和辐射干扰两大类。传导干扰通过交流电源传播，频率低于 30 MHz。辐射干扰通过空气传播，频率在 30MHz 以上。

本文针对一种桌面式 180W 塑壳开关电源(负载是 12V / 15A 的半导体制冷冰箱，电源外形大小 205mm×90mm×62mm)所存在的电磁干扰超标问题，从原理上进行了分析，并探讨了解决方案。

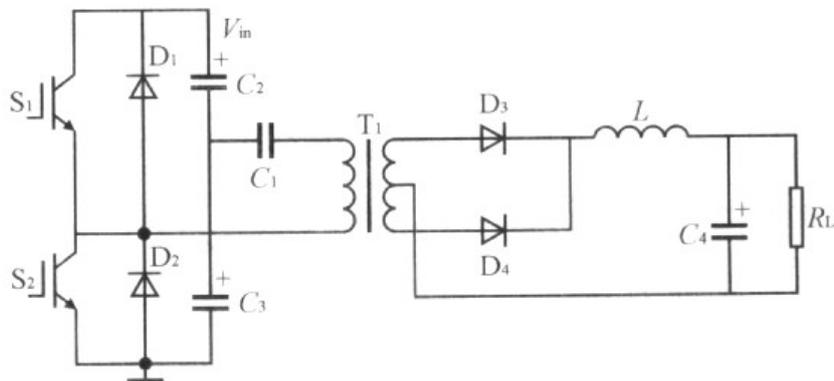
1 180 W 开关电源的电路结构分析与电磁干扰测试

1. 1 主电路与结构布局分析

该开关电源的电路原理如图 1 所示。



(a) 电容滤波整流部分



(b) 半桥开关电路部分

图 1 180 W 开关电源电路

电容滤波整流器功率因数低，整流二极管导通时间较短，滤波电容充电电流瞬时值的峰值大，整流后的电流波形为脉动状，产生高的谐波电流。

半桥电路中高频导通和截止的 S1、S2、D3、D4 和变压器 T1 是开关电源的主要骚扰源，产生高频高压的尖峰谐波振荡，该谐波振荡产生的高次谐波，通过开关管与散热器间的分布电容传入内部电路或通过散热器及变压器向空间辐射。

该开关电源的内部布局如图 2 所示，左边是交流电源输入和直流输出，靠左边上下两侧留有通风孔，风机在

右边，采用向外抽风方式散热，保证塑壳内的热量及时排出，避免热量在塑壳内积聚。该布局的优点是通风路比较通畅，但也存在缺点—输入输出接口电缆安装得较近，在它们之间容易产生空间耦合，形成辐射骚扰。

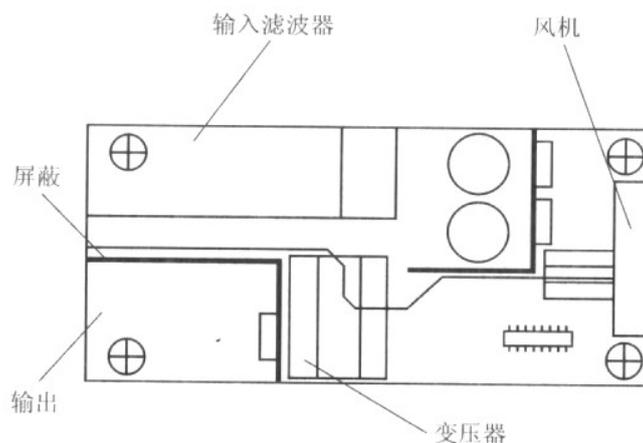


图 2 内部结构图

1. 2 电磁干扰测试

表 1 所列为测得的 7~21 次谐波电流的数值，其中 11、15、17 次谐波电流都超标。

表 1 实测的谐波电流数值

谐波次数	实测数值/A	谐波限值/A
7	0.694	0.770
9	0.397	0.400
11	0.334	0.330
13	0.209	0.210
15	0.165	0.150
17	0.151	0.132
19	0.101	0.118
21	0.084	0.107

辐射骚扰预测结果在 30~50MHz 和 100MHz 处超出限值，如图 4 所示。

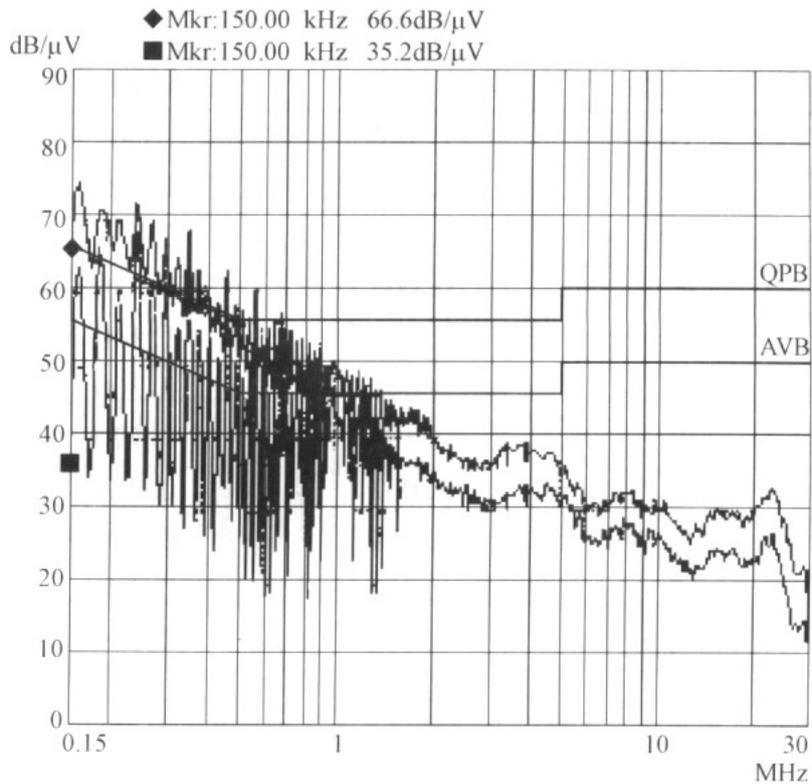


图 3 传导干扰低频超标

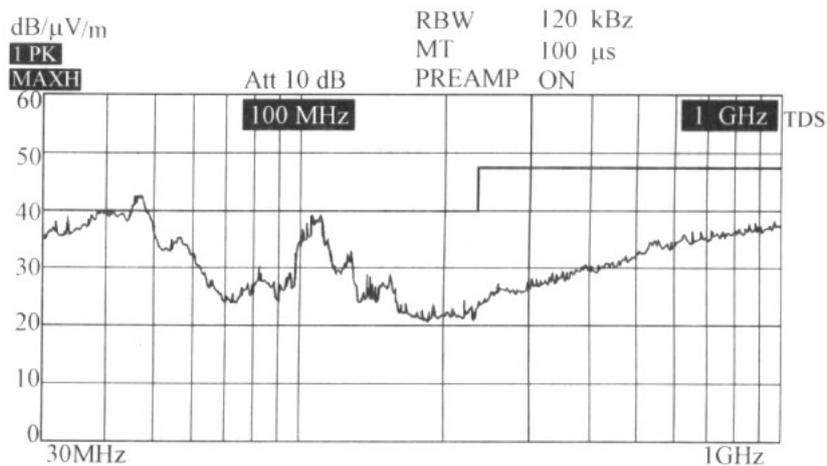


图 4 辐射骚扰预测图

2 电磁干扰的抑制

2.1 谐波电流的抑制

采用功率因数校正可以解决谐波电流超标的问题。有源功率因数校正采用 Boost 升压 PFC 电路，功率因数提高到 0.99 以上，使得谐波电流很小，但电路复杂，成本也不低，而且电路中的开关管和高压整流二极管的开关噪声将成为新的骚扰源，使整机的 EMI 达标增加了难度。

考虑到在交流输入电压(AC 220~250V)范围内，满足电压调整率情况下，适当减小滤波电容，输入串联电阻可以在一定程度上降低滤波电容充电电流瞬时值的峰值，满足谐波电流限值，且功率损耗在可以接受的范围之内，整机电源效率下降不多，也不失为较好方法。采用这一方法后实测谐波电流值如表 2 所列。

表 2 滤波后谐波电流值

谐波次数	实测数值/A	谐波限值/A
1	1.120	Nan
2	0.004	1.080
3	0.990	2.300
4	0.004	0.430
5	0.812	1.140
6	0.003	0.300
7	0.594	0.770
8	0.002	0.230
9	0.379	0.400
10	0.002	0.184
11	0.212	0.330
12	0.001	0.153
13	0.142	0.210
14	0.002	0.131
15	0.141	0.150
16	0.002	0.115
17	0.132	0.132
18	0.001	0.102
19	0.100	0.118
20	0.001	0.092
21	0.064	0.107
22	0.001	0.084
23	0.050	0.098
24	0.001	0.077
25	0.054	0.090
26	0.001	0.071
27	0.051	0.083
28	0.001	0.066
29	0.037	0.078
30	0.001	0.061
31	0.026	0.073
32	0.001	0.058
33	0.027	0.068
34	0.001	0.054
35	0.027	0.064
36	0.001	0.051
37	0.023	0.061
38	0.001	0.048
39	0.015	0.058
40	0.001	0.046

2.2 传导骚扰的抑制

传导噪声主要来源半桥变换器中功率开关管 S1 及 S2 以频率 25 kHz 交替工作，功率开关管集电极发射极电压 U_{ce} 和发射极电流，。波形接近矩形波。傅立叶分析表明，矩形波脉冲具有相当宽的频率带宽，含有丰富的谐波，脉冲波形的频谱幅度在低频段较高。另外，功率开关管在截止期间，高频变压器绕组漏感引起的电流突变，也会产生尖峰干扰。

输入滤波器是为变换器的电磁骚扰电平和外界的电磁骚扰源设计的一种低阻抗通道(即低通滤波器)，以抑制或去除电磁骚扰，达到电磁兼容的目的。

如图 5 所示，输入滤波器是由电感(LF1、LF2)和 CY 电容(C4、C5)及 Cx 电容(C1、C2、C3)组成的低通滤波器电路构成。对频率较高的噪声信号有较大的衰减。C1、C2、C3 是滤除共模干扰的电容，C4、C5 是滤除差模干扰的电容，LF1、LF2 是共模线圈。

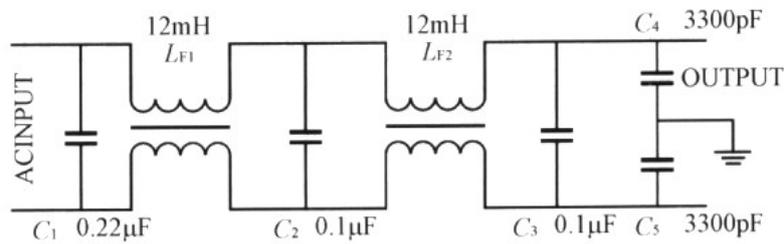


图 5 输入滤波器

图 3 中低频传导干扰(0.15~1MHz 范围)超标，共模噪声的主要骚扰源是功率开关管，低频传导干扰抑制以增加共模电感的电感量为主，当共模电感从原设计的 15mH 增加到 24mH 时，低频传导干扰最大处下降 30dB，得到了显著改善。如图 6 所示。

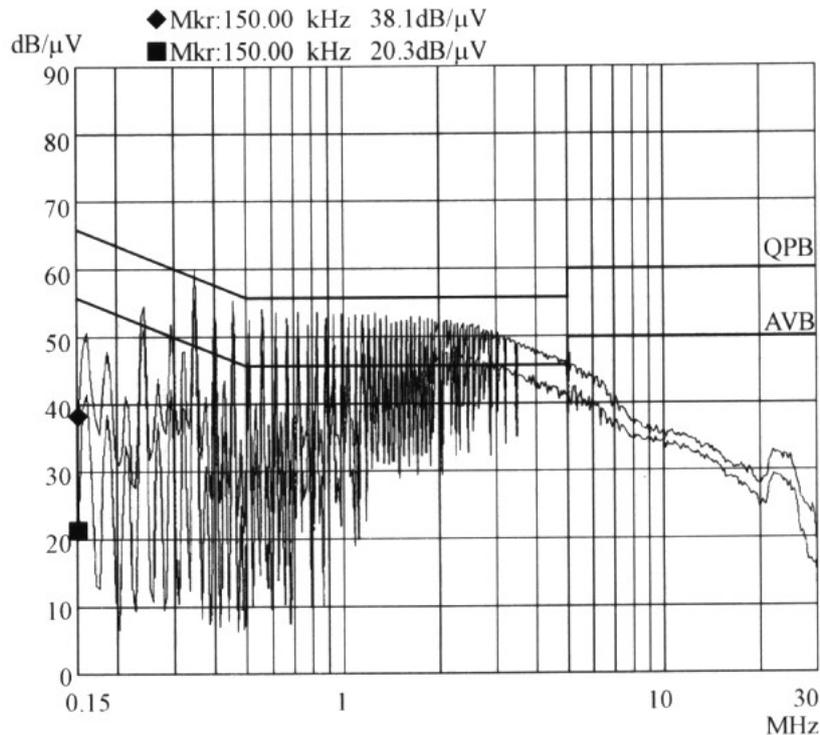


图 6 寄生参数影响传导超标

输入滤波器对 20MHz 以下噪声抑制有明显的效果。理想输入滤波器是低通滤波器，但实际上是带阻滤波器，电容器的引线电感和电感线圈上的寄生电容，在频率较高时影响就不能忽视。在 1MHz 时就变得十分明显了。

当开关电源频率增加时，所需的共模电感可大大减小，共模电感体积也减小。但是，开关电源在 20MHz 以上频带的辐射噪声份量有所增加，给辐射骚扰的达标带来麻烦。开关频率和共模电感的表 3 所列。

表 3 开关频率和共模电感的表 3 所列。

开关频率	共模电感的电感量
50 kHz	约 30 mH
75 kHz	约 15 mH
100 kHz	约 10 mH

由于共模电感线圈存在寄生电容，高频噪声成分经过寄生电容向外发射骚扰，故使用单个大感量共模电感不容易达到好的高频滤波效果，一般采用两个共模电感，同样的电感量抑制高频噪声很见效，将有 6dB 以上的差值。

Cx 电容器高频阻抗频率特性是一个关系电磁骚扰抑制效果的重要参数。电容器在高频使用时等效为 r(等效串联电阻)+c+L(等效串联电感)电路。由于电容器自身的固有电感(即等效串联电感)存在，在频率低的范围，电容器电抗呈容性，在频率高的范围，电容器电抗呈感性，这时抑制骚扰的能力就明显下降。电容器的固有引线电感越小和骚扰源的高频内阻抗越大，则抑制骚扰的效果越好。

首先，从电磁骚扰源产生的机理入手，查找辐射骚扰源的所在，从根本上降低其产生辐射骚扰噪声的电平。在输出电压比较低的情况下，输出整流器和平滑电路的干扰可能比较严重+通过减小环路面积可以抑制 di / dt 环路产生的磁场辐射。整流及续流二极管工作在高频开关状态，也是个高频骚扰源。二极管的引线寄生电感、结电容的存在以及反向恢复电流的影响，使之工作在很高的电压及电流变化率下，且产生高频振荡，二极管反向恢复的时间也越长，则尖峰电流的影响也越大。

C4 及 Cs 的引线和连接地引线应尽量短，以使接地阻抗尽量小，噪声能经过电容旁路到地线，C4 及 C5 取较大电容量滤波效果好，但是，随着电容量的增加泄漏电流也增加了，而泄漏电流值是电气安全中的重要指标，决不允许超过规定数值——一般的漏电流限制是 3.5 mA，此桌面式塑壳开关电源属手持式设备，最大漏电流限制为 0.75 mA，实测值为 0.55mA。

电源输入线缆要短，滤波器尽量靠近输入端口，避免滤波器输入输出发生耦合，而失去滤波作用。接地尽量简短可靠，减小高频阻抗，使干扰有效旁路。经过数次整改后，得到满意的结果如图 7 所示。

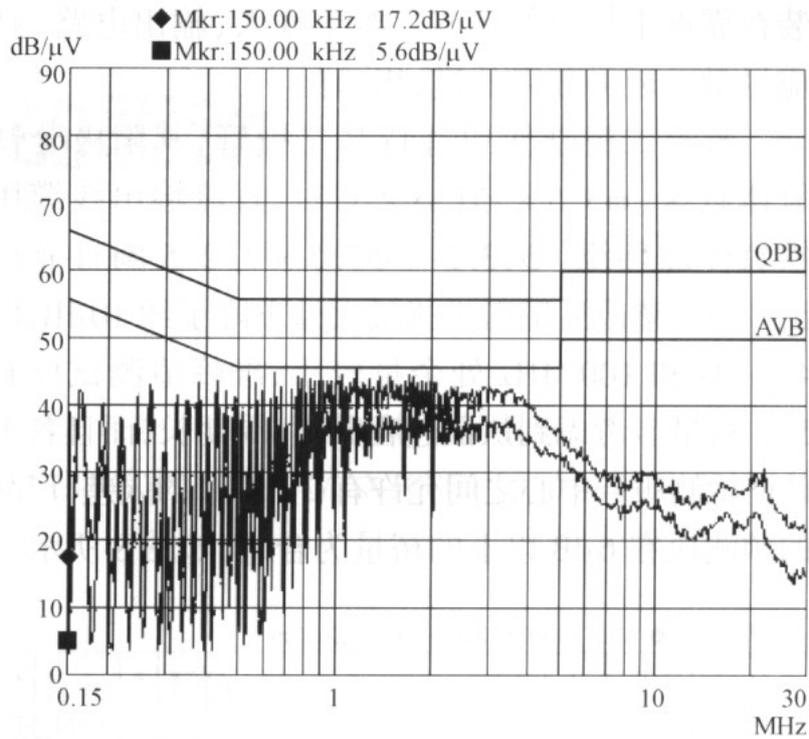


图 7 传导骚扰合格

2. 3 辐射骚扰的抑制

辐射骚扰是指由任何部件、天线、电缆或连接线辐射的电磁干扰。

通常在电路元件布局上，应尽量使输入交流和输出直流插座(包括引线)分开并远离。采用一端输入另一端输出是种合理的布局。但考虑电源内部散热通风，该电源采用图 2 的散热结构。不可回避的问题是输入输出线缆之间可能发生空间耦合，当有高频传导电流通过时就会产生强烈的辐射。

首先，从电磁骚扰源产生的机理入手，查找辐射骚扰源的所在，从根本上降低其产生辐射骚扰噪声的电平。在输出电压比较低的情况下，输出整流器和平滑电路的干扰可能比较严重，通过减小环路面积可以抑制 di/dt 环路产生的磁场辐射。整流及续流二极管工作在高频开关状态，也是个高频骚扰源。二极管的引线寄生电感、结电容的存在以及反向恢复电流的影响，使之工作在很高的电压及电流变化率下，且产生高频振荡，二极管反向恢复的时间也越长，则尖峰电流的影响也越大。

铁氧体磁环和磁珠使用方便，价格便宜，抑制电磁干扰效果明显。铁氧体电感的等效电路为由电感 L 和电阻 R 组成的串联电路， L 和 R 都是频率的函数。电阻值随着频率增加而增加，这样就构成了一个低通滤波器。低频时 R 很小， L 起主要作用，电磁干扰被反射而受到抑制；高频时 R 增大，电磁干扰被吸收并转换成热能，使高频干扰大大衰减。不同的铁氧体抑制元件，有不同的最佳抑制频率范围。通常磁导率越高，抑制的频率就越低。此外，铁氧体的体积越大，抑制效果越好。在体积一定时，长而细的形状比短而粗的抑制效果好，内径越小抑制效果也越好。铁氧体抑制元件应当安装在靠近干扰源的地方。对于输入、输出电路，则应尽量靠近屏蔽壳的进、出口处。

整流二极管使用肖特基二极管，其阳极套铁氧体磁珠($\varnothing 3.5 \times \varnothing 1.3 \times 3.5$)，直流输出线缆用铁氧体磁环绕($\varnothing 13.5 \times \varnothing 7.5 \times 7$)2.5 圈且靠近出口处。整改后辐射干扰最大处下降了约 10dB，但 40MHz 和 100 MHz 处余量较小，准峰值测试仅有 5dB 裕量。考虑到认证过程繁琐，周期长，而且各个认证检测服务中心之间允许有 2~3dB 的误差，产品的预测应在 6dB 以上的裕量为合适，如图 8 所示。

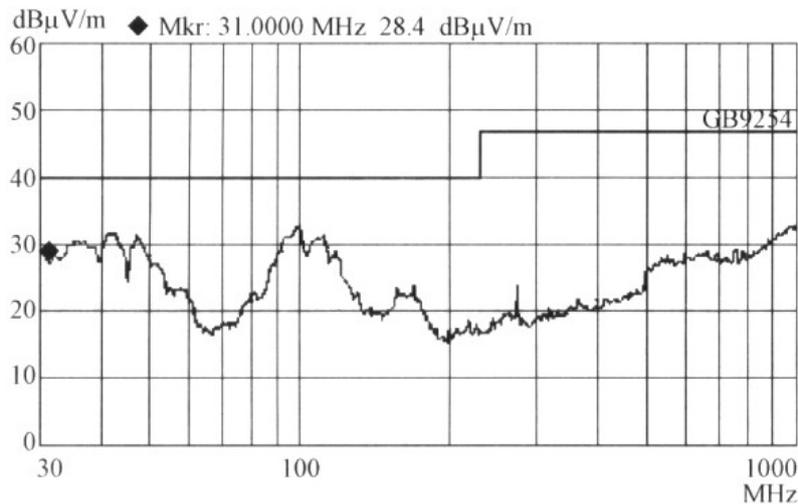


图8 3m法电波暗室测试(一次整改后)

铁氧体磁珠、铁氧体磁环的使用对骚扰源噪声的抑制有了较大改善，如仍还不能满足要求，只好采用屏蔽措施，在输入输出之间用 2mm 厚的铝板隔离，以切断通过空间耦合形成的电磁噪声传播途径。结果辐射骚扰噪声裕量达到了 12dB 以上，抑制噪声效果相当明显。通过以上措施大大降低辐射骚扰噪声电平，如图 9 所示。

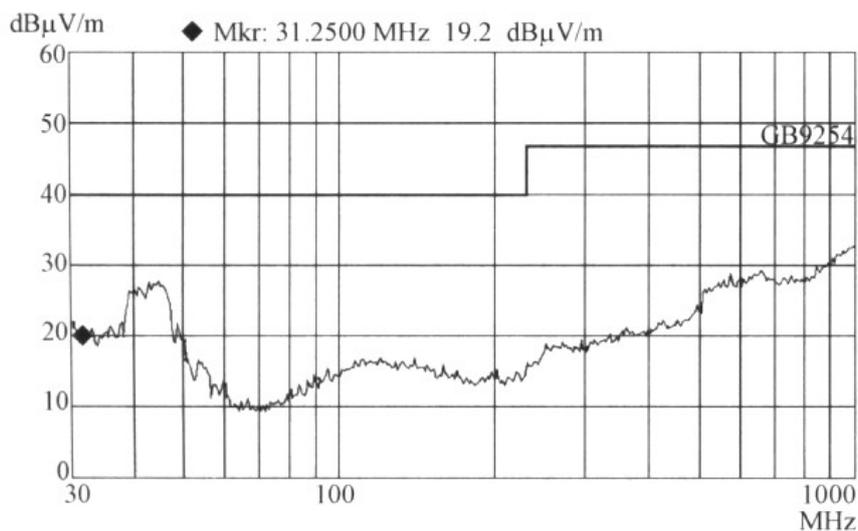


图9 3m法电波暗室测试(辐射骚扰合格)

3m法电波暗室与10m法电波暗室测试规定限值的转换：由于标准 GB9254 认定 ITE(信息技术设备)在 10m 测量距离处得到辐射骚扰限值，而较多的 EMC 检测服务中心是在 3m 电波暗室内测试，因为场强大小与距离成反比，所以在 3m 法中测得的噪声电平比在 10m 法时的噪声电平值要下降 10 dB。

图 4、图 8、图 9 是由 3m 法电波暗室测得，其辐射骚扰限值为 30~230MHz 准峰值限值 40dB，230~1000 MHz 准峰值限值 47dB。图 10 是由 10m 法电波暗室测得，图 9 与图 10 比较，辐射噪声波形相差不多。仅在几个频率点的噪声电平略有增加。

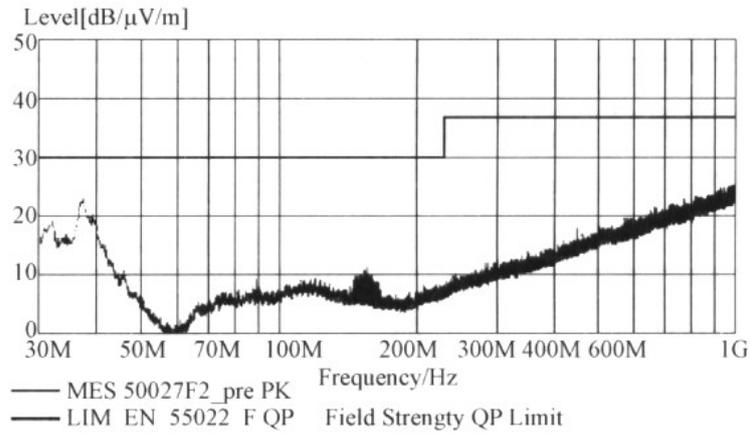


图 10 10m 法电波暗室测试

3 结语

经过以上的整改后，再次测试 180W 电源的电磁兼容完全达到了设计要求。在电源设计初期解决 EMI 问题，结构尚未定型，可选用的方法多，有利于降低成本。

除以上所述的抑制措施外，还有其它一些方案，但设计方案都要兼顾电源成本。与 EMI 相关的因素多且复杂，仅做到上述的几点是远远不够的，还有接地技术、PCB 布局走线等都是很重要的。电磁兼容的设计任重而道远，我们要不断进行研究，以使我国的电子产品电磁兼容水平与国际同步。