共模电感结构对开关电源EMI的影响

苏志春[1]，舒永春[2]，邵井国[3]，胡文干[1]

[1] 深圳晶辰电子科技股份有限公司，深圳 518105

[2] 无锡晶磊电子有限公司，无锡 214199

[3] 赛尔康技术（深圳）有限公司，深圳 518125

摘　要： 共模电感广泛地应用在开关电源中， 相同材质采用不同结构会有不同的效果， 因为共模电感的寄生参数Cr、Le、Cy等随结构而产生变化，通过结构调整寄生参数对EMI测试有比较大的改善。 本文对从原理上对改善内因进行分析，指导实际的EMI整改、测试。

关键词： 电感，漏感，匝间电容，阻抗，简化的等效原理图

Su Zhichun[1], Shu Yongchun[2], Shao Jing guo[3], Hu Wengan[1]

[1]Shenzhen Jewel Electronic & Technology CO., LTD, Shenzhen 518105

[2]Wuxi Jinglei Electronic CO., LTD, Wuxi 214199

[3]Salcomp(Shenzhen)Co.,Ltd, Shenzhen 518125

Abstract: Common mode inductors are widely used in switching power supplies, The same material with different structure,there will be different effects. because the Parasitic parameters of common mode inductor(the distributed capacitance and inductance)with the structure, will have a greater improvement in the EMI test。In this paper, the improvement of internal cause is analyzed in principle, which can guide the actual EMI test.

Keywords: L, Le, Cr, Z, Simplified equivalent principle diagram

1　引言

共模电感(Common mode Choke),也叫共模扼流圈，广泛地应用在开关电源 EMI 滤波电路中，过滤共模的电磁干扰信号。共模电感一般是绕在同一铁心（磁性）上的圈数相等、导线直径相等、绕向相反的两组线圈。实物和常用结构图分别见图 1 和图 2。

这样当电路中的电流流经共模电感时，电流在同相位绕制的电感线圈中产生反向的磁场而相互抵消，所以磁芯不怕饱和。市场上用的最多的磁芯材料是高导铁氧体材料。共模电感作用是在一定频率范围内由于共模电流的同向性，会在线圈内产生同向的磁场，而增大线圈的感抗，使线圈表现为高阻抗，产生较强的阻尼效果，以此衰减共模电流，达到滤波的目的。

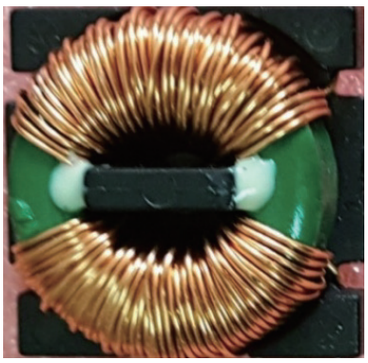


图 1 常用共模电感

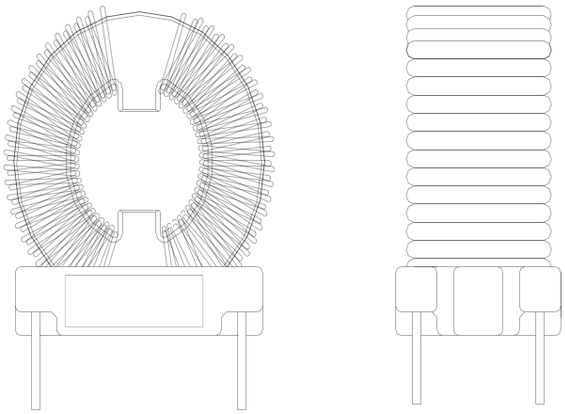


图 2 常用共模电感结构图

2 共模电感等效电路分析

共模电感有两个绕组，分别在电路中连接 L 线和 N 线，理想共模电感原理图很简单见图 3。

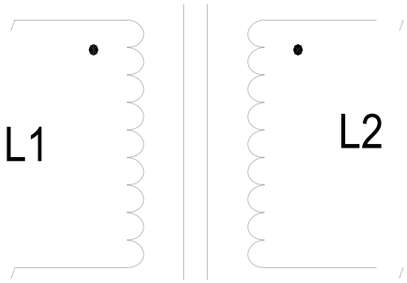


图 3 理想共模电感原理图

因为分别连接在电路 L 线和 N 线，为了安全起见，两个绕组之间需要相当大的间隙，这样就会产生磁通泄漏即漏感 Le，有时为了减少漏感 Le 采用双线并绕，因为安全需要其中的一根采用三重绝缘线，如图 4。

图 4 双线并绕共模电感

磁通泄漏形成差模电感。因此共模电感一般也具有一定的差模干扰衰减能力。共模电感的漏感其实是可以当做差模电感使用的。 漏感越大，效果越好！有时为增加共模电感的漏电感量 Le，提高差模电感成分，以达到需要的滤波效果。同时两个绕组之间存在匝间电容 Cr。具体 Le、Cr 取大还是取小需要根据实际的应用而定。共模电感实际等效图比较复杂，有些参数比较难用仪器测试，如同一绕组层间的等效电容 Cy、见下图 5。

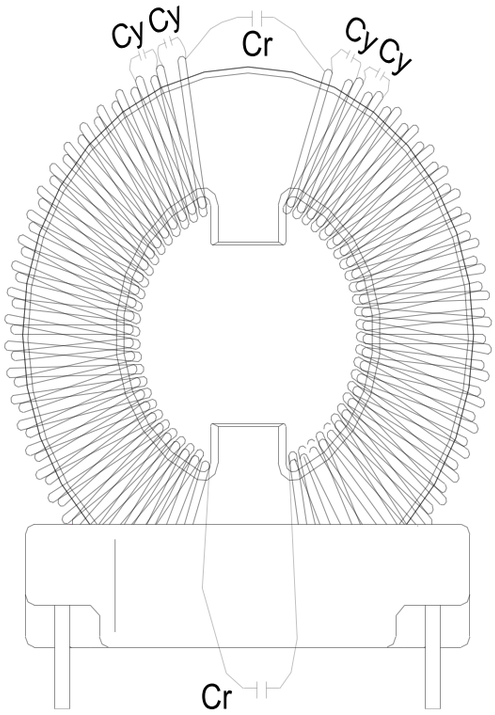


图 5 实际共模电感寄生电容

为了实际的可操作性，所以我们对等效模型进行了简化，取消了层间等效电容 Cy、保存可以通过仪器测试的参数，如电感 L、漏电感 Le、电阻 R、匝间电容 Cr 和阻抗 Z 等。简化后可测试的等效原理图如图 6。

两根电源线对地之间干扰叫共模干扰。两根电源线之间的干扰叫差模干扰。抑制共模干扰的滤波电感叫共模电感。抑制差模干扰的滤波电感叫差模电感。实际 EMC 电路需要共模电感、差模电感和 X 电容、Y 电容等组合应用，具体见后面的两个案例。差模电感由于一个铁心上绕的线圈，当流进线圈的电流增大时，线圈中的铁心会饱和，电感量一般没有共模电感高，因此市场上用的最多的是金属

粉心材料。如铁硅铝合材料见图 7。

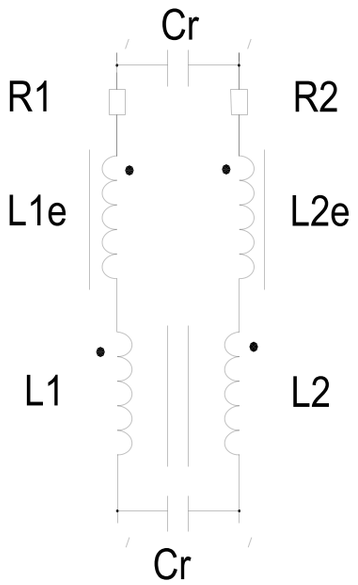


图 6 实际共模电感简化可测试的等效原理图

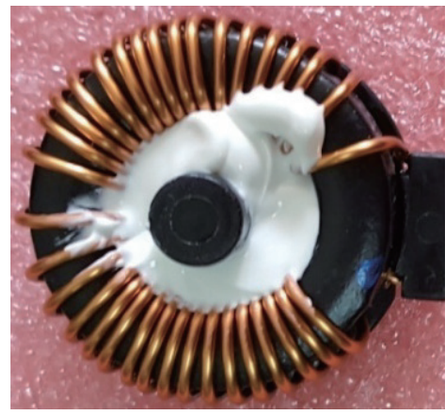


图 7 差模电感

3 分析案例：75W 开关电源（电动工具户外防水充电器）整改对比

3.1 改善前 L 线、N 线传导测试结果图 11、12(标准 EN55014)

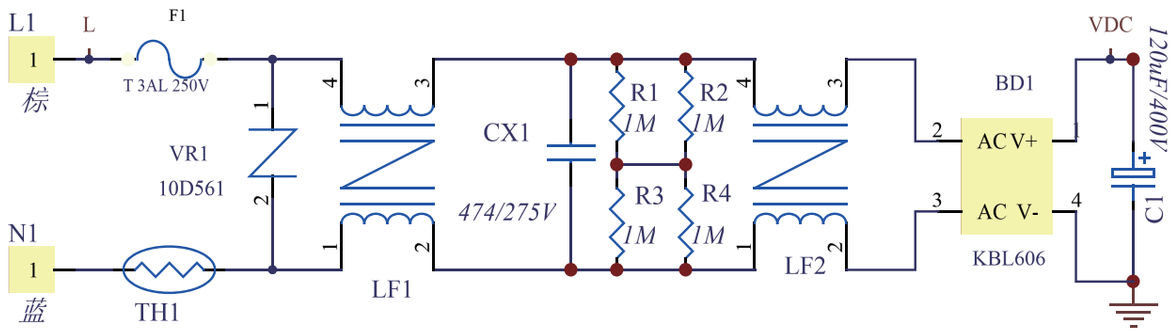


图 8 75W 开关电源 EMI 原理图

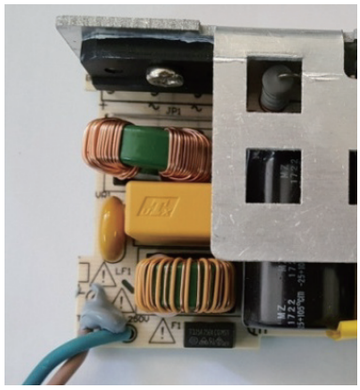


图 9 75W 开关电源 EMI 改善前电路成品

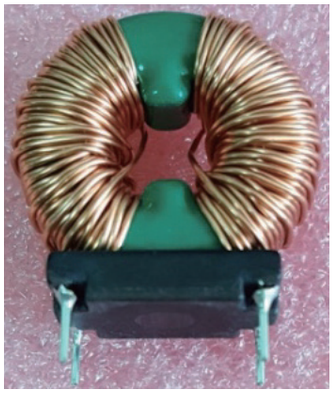
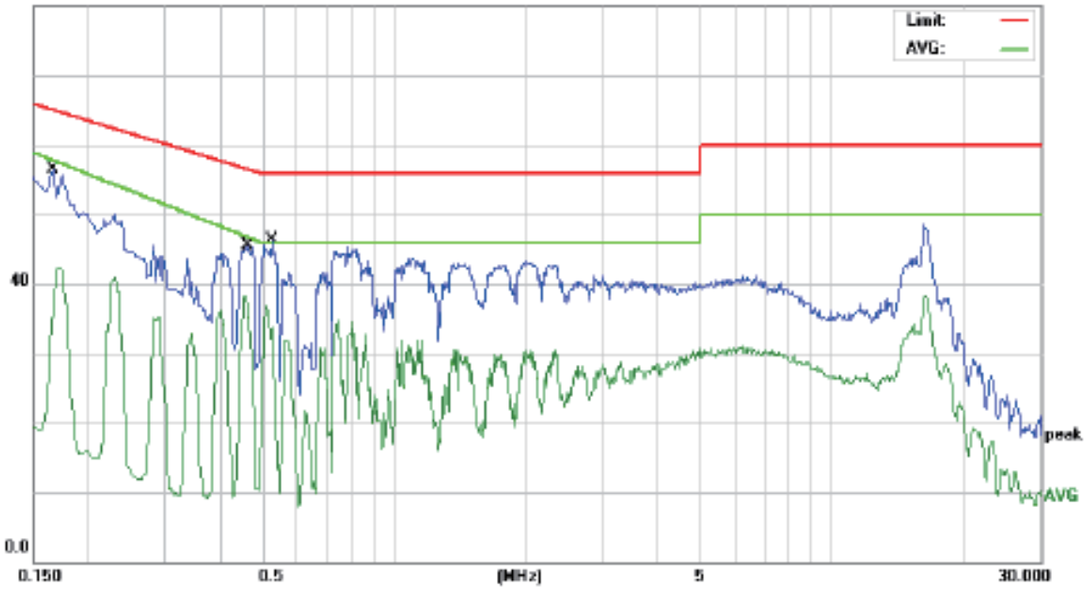


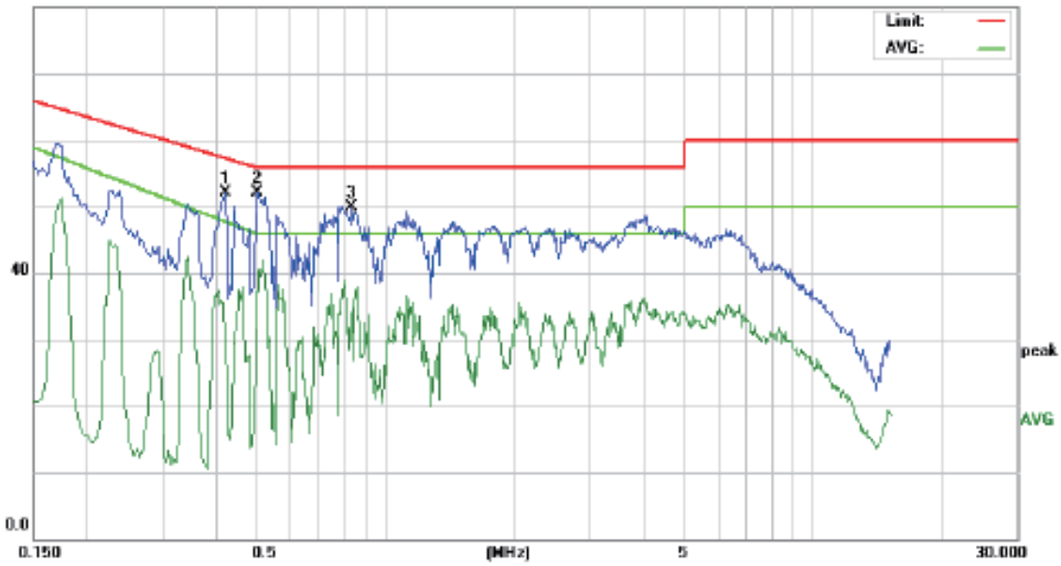
图 10 改善前采用的共模电感



Site 843 Phase: L1 Temperature: 26(C)
Limit: EN 55014-1 QP Power: AC 264V/50Hz Humidity: 60 %
EUT: Adapter
M/N: 1054
Mode: Full Load
Note: 改善前

No.	Mk.	Freq.	Reading Level	Correct Factor	Measure-ment	Limit	Over		
		MHz	dBuV	dB	dBuV	dB	dB	Detector	Comment
1		0.1660	38.98	10.18	49.16	65.15	-15.99	QP	
2		0.1660	26.77	10.18	36.95	57.90	-20.95	AVG	
3		0.4660	33.89	10.17	44.06	56.58	-12.52	QP	
4	*	0.4660	28.13	10.17	38.30	46.76	-8.46	AVG	
5		0.5260	33.48	10.17	43.65	56.00	-12.35	QP	
6		0.5260	21.82	10.17	31.99	46.00	-14.01	AVG	

图 11 改善前 L 线最小余量 AVG=8.46dB



Site 843 Phase: N Temperature: 26(C)
Limit: EN 55014-1 QP Power: AC 264V/50Hz Humidity: 60 %
EUT: Adapter
M/N: 1054
Mode: Full Load
Note: 改善前

No.	Mk.	Freq.	Reading Level	Correct Factor	Measure-ment	Limit	Over		
		MHz	dBuV	dB	dBuV	dB	dB	Detector	Comment
1		0.4220	41.95	10.17	52.12	57.41	-5.29	peak	
2	*	0.5020	42.02	10.17	52.19	56.00	-3.81	peak	
3		0.8340	39.71	10.17	49.88	56.00	-6.12	peak	

图 12 改善前 N 线最小余量 peak=3.81dB

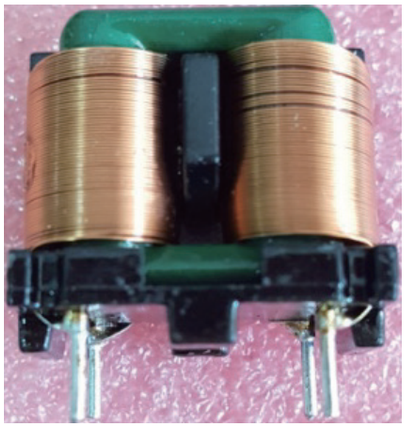


图 13 改善后采用的共模电感

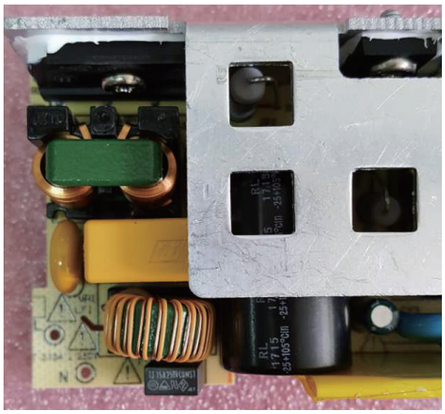
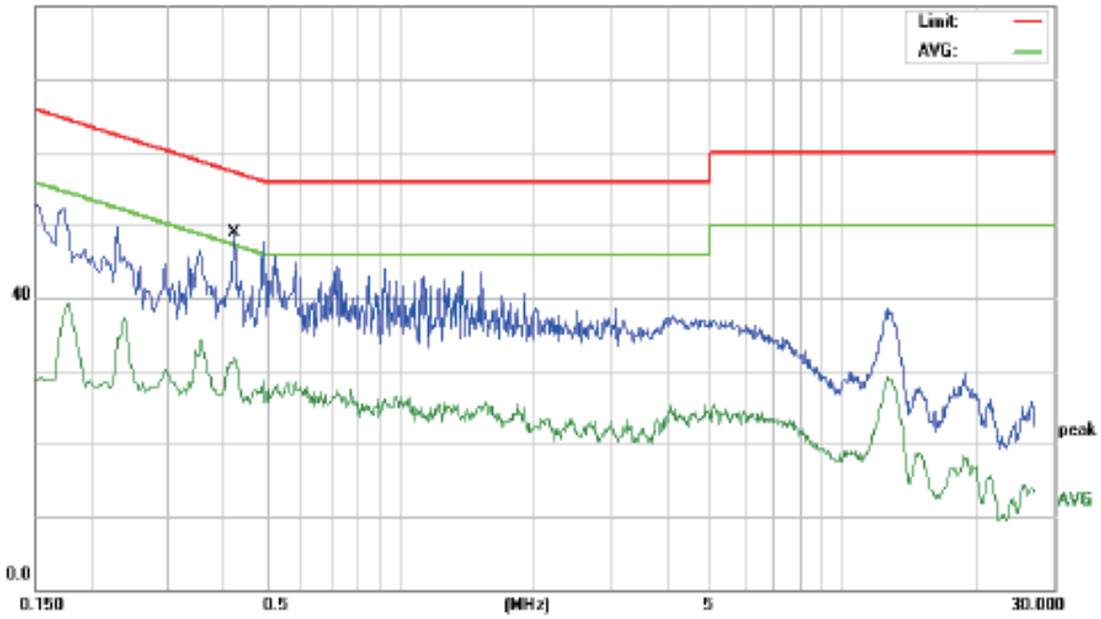


图 14 75W 开关电源 EMI 改善后电路成品图

因为产品测试无法使用客户的实际负载，数据是采用等效电阻测试，因为实际负载有电机和主控制板，对等效电阻测试余量要求比较高，需要测试数据大于 10dB。特别是 N 线余量不足，peak 值 3.81dB 就没有必要读点了，需要整改。

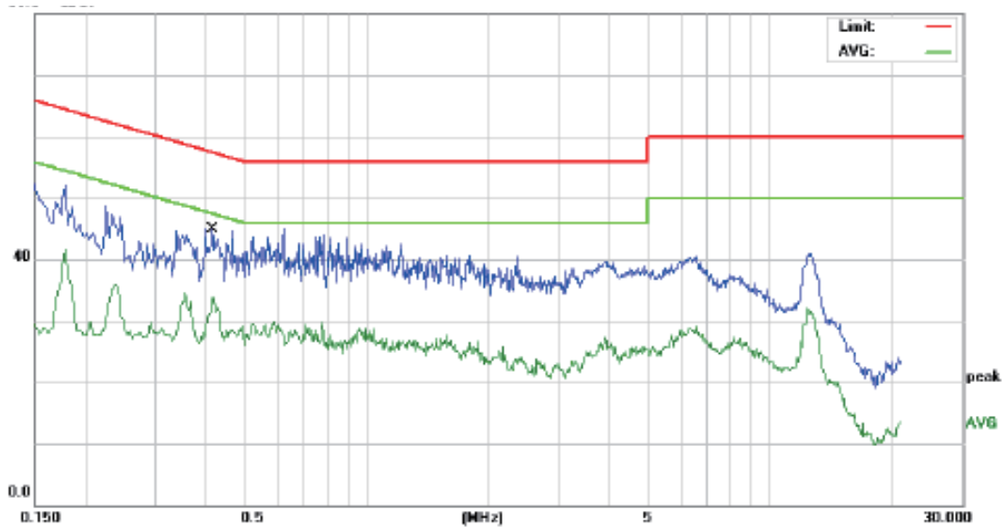
3.2　改善后 L 线、N 线传导测试结果如图 15、16



Site 843　　Phase: L　　Temperature: 26(C)
Limit: EN55014 Class B Conduction(QP)　　Power: AC 264V/50Hz　　Humidity: 60 %
EUT:
M/N: 1054
Mode: FULL LOAD
Note: 整改1# 扁平线共模电感

No.	Mk.	Freq.	Reading Level	Correct Factor	Measure-ment	Limit	Over		
		MHz	dBuV	dB	dBuV	dB	dB	Detector	Comment
1		0.4220	29.93	9.67	39.60	57.41	-17.81	QP	
2	*	0.4220	22.19	9.67	31.86	47.41	-15.55	AVG	

图 15 75W 开关电源 EMI 整改后 L 线最小余量 AVG=15.55dB



Site 843 Phase: N Temperature: 26(C)
Limit: EN55014 Class B Conduction(QP) Power: AC 264V/50Hz Humidity: 60 %
EUT:
M/N: 1054
Mode: FULL LOAD
Note: 整改1# 扁平线共模电感

No.	Mk.	Freq.	Reading Level	Correct Factor	Measure-ment	Limit	Over		
		MHz	dBuV	dB	dBuV	dB	dB	Detector	Comment
1		0.4140	30.43	9.67	40.10	57.57	-17.47	QP	
2	*	0.4140	23.36	9.67	33.03	47.57	-14.54	AVG	

图 16 75W 开关电源 EMI 整改后 N 线最小余量 AVG=14.54dB

4 改善原因分析

由测试数据可以明显知道：通过 LF2 采用扁平线测试数据 L 线、N 线余量都满足要求，采用扁平线共模电感明显改善了 0.4M、0.5M、0.8M 附近几个点的尖峰。通过对比两种共模电感的参数如电感量 L、漏电感 Le、匝间电容 Cr, 不同频率的阻抗 Z 等，具体分析如下。

4.1 漏感 Le 比较

扁平线共模电感的漏感因为结构原因相对要大。

4.2 电感 L 比较

扁平线共模电感因为圈数少，其电感量相对要小。

4.3 杂散电容 Cr 比较

扁平线共模电感因为结构原因，其杂散寄生电容相对要小。

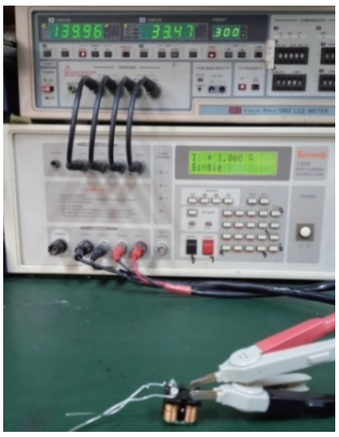


图 17 扁平线共模电感的漏感测试 Le=140uH

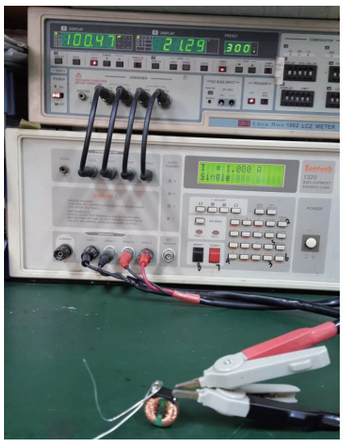


图 18 扁磁环共模电感的漏感测试 Le=100uH

图 19 扁平线共模电感的电感量测试 L=27uH

图 20 磁环共模电感的电感量测试 L=39uH

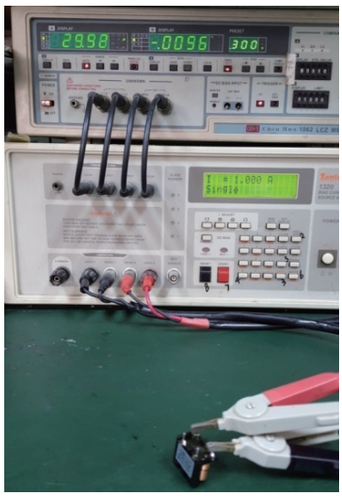


图 21 扁平线共模电感杂散寄生电容测试 Cr=30pF

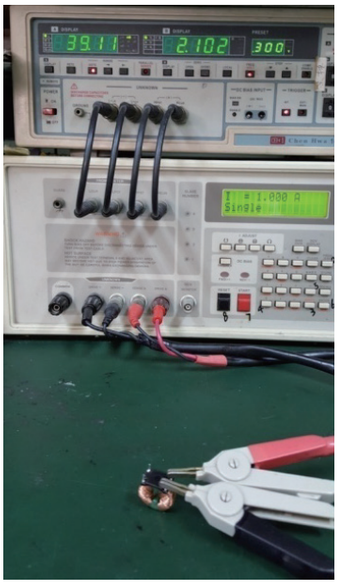
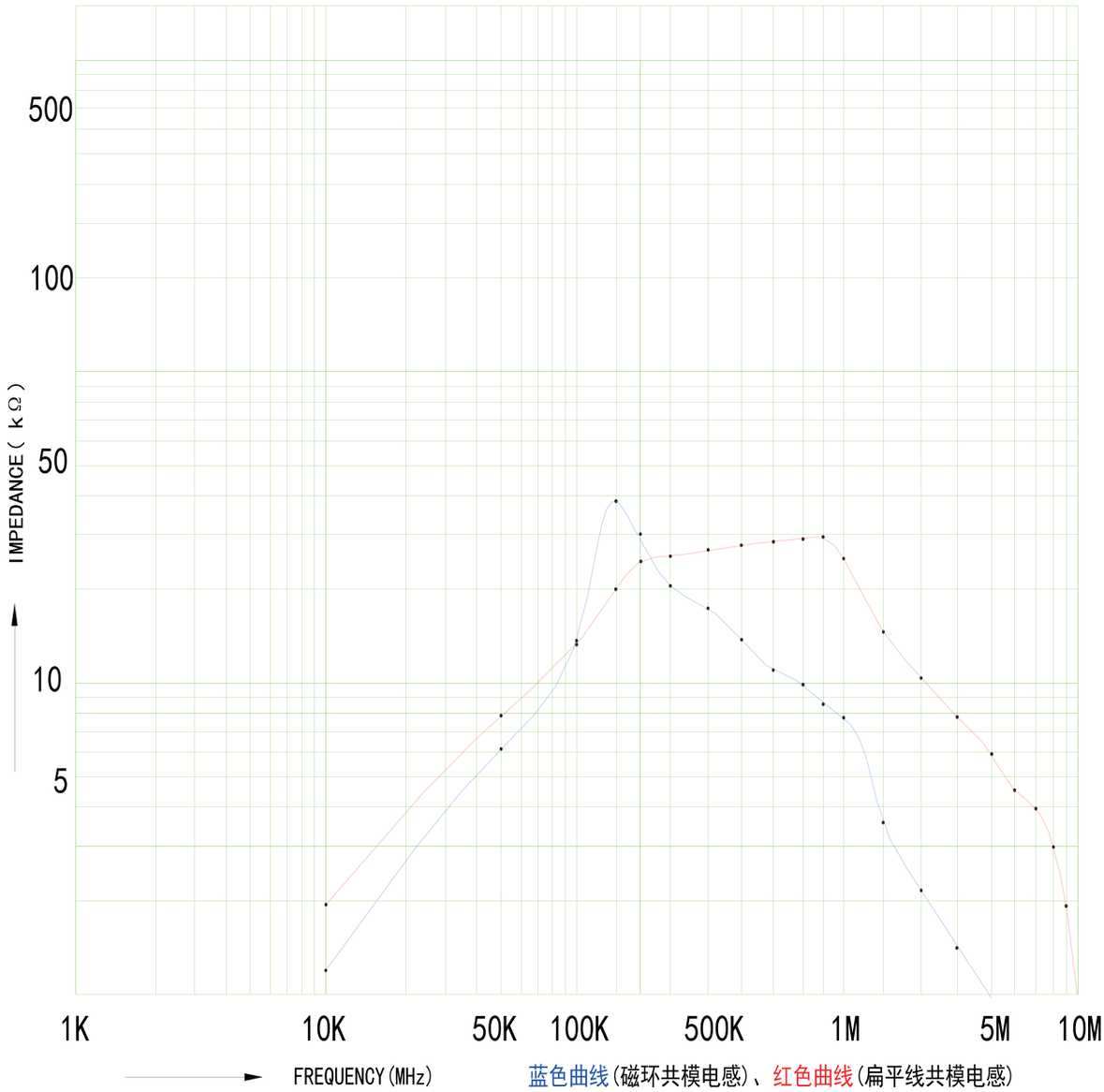


图 22 磁磁环共模电感杂散寄生电容测试 Cr=39pF

4.4 阻抗 Z 的比较

图 23 HP4192A 测试阻抗



f(MHz)	10K	50K	100K	200K	300K	400K	500K	600K	700K	800K	900K	1M	2M	3M	4M	5M	6M	7M	8M	9M	10M	共模电感分类
KΩ 20°C	1.38	6.6	15	37.69	31.6	21.76	17.8	14.1	11.7	9.9	8.6	7.8	3.66	2.26	1.45	0.80	0.24	0.022	0.09	0.03	0.02	磁环共模电感
KΩ 20°C	1.9	7.96	14	19.98	25	26	27	27.8	28.7	29	29.1	26.2	15.8	10.58	7.74	5.96	4.69	3.99	2.9	1.8	0.9	扁平线共模电感

图 24 两种共模电感阻抗和频率关系图

共模电感的阻抗超出 1K--10M 频段，基本就很小了。

从上图明显知道共模电感的阻抗值在超过 1K—10M 范围就会变很小了。 也就是说超出 1K—10M 共模电感阻抗基本就没有了，所以我们共模电感阻抗和频率关系图的水平坐标频率范围 1K—10M，改善前的 0.4M、0.5M、0.8M 附近几个尖峰。通过采用扁平线共模电感对应的阻抗 0.4M 处由 21.76K 增加到 26K；0.5M 处由 17.8K 增加到 27K、0.8M 处由 9.9K 增加到 29K.

5 应用

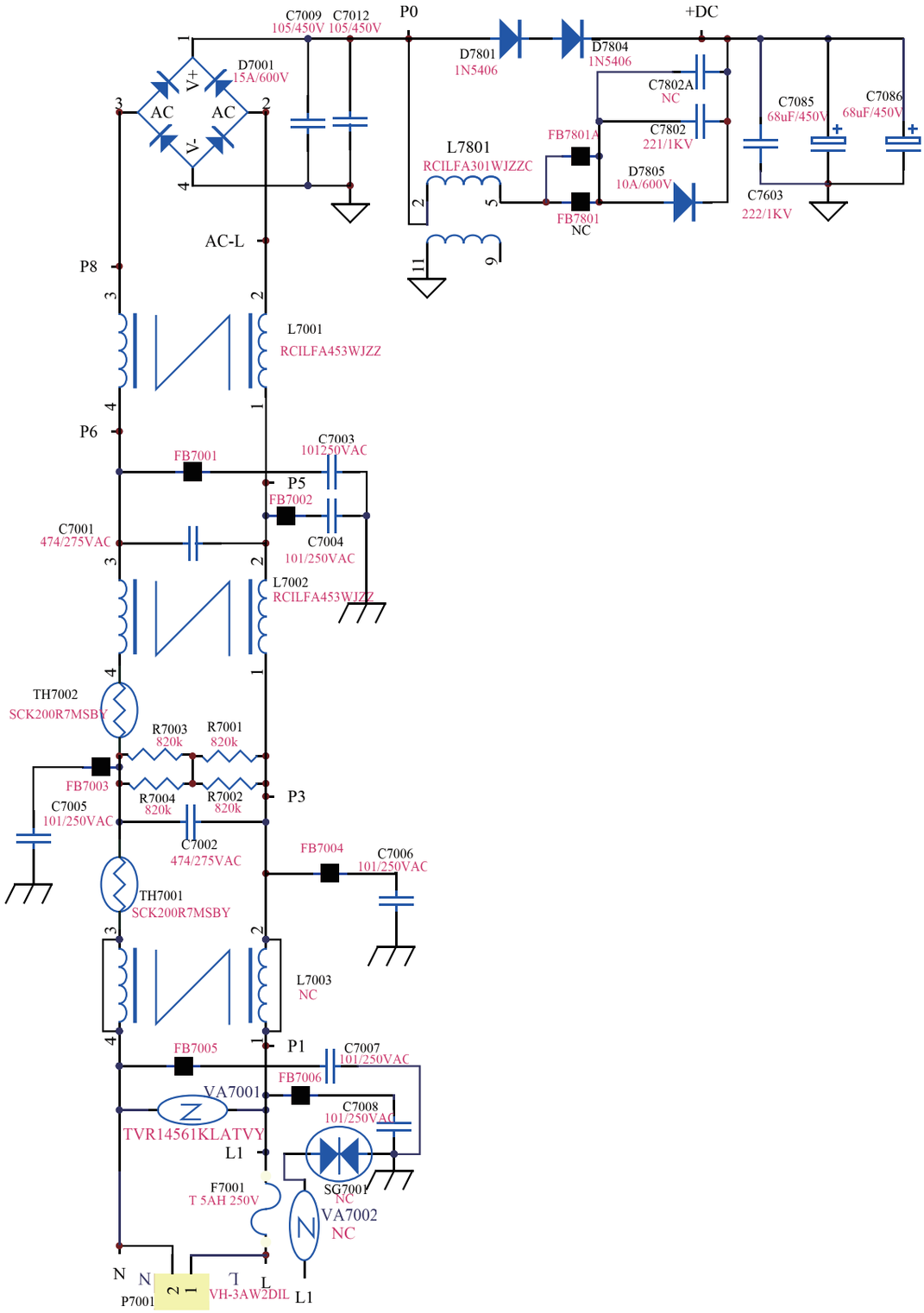


图 25 300W 的开关电源 EMI 电路原理图

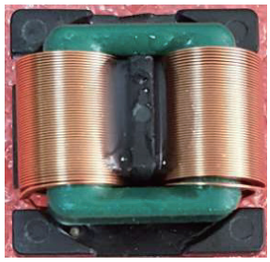


图 26 L7002、L7001 共模电感结构外形图

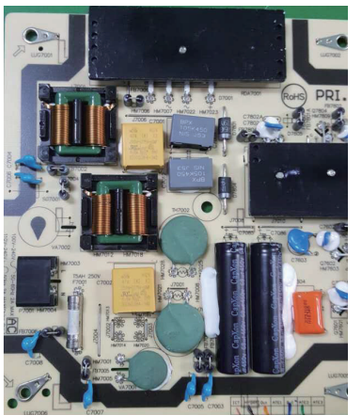
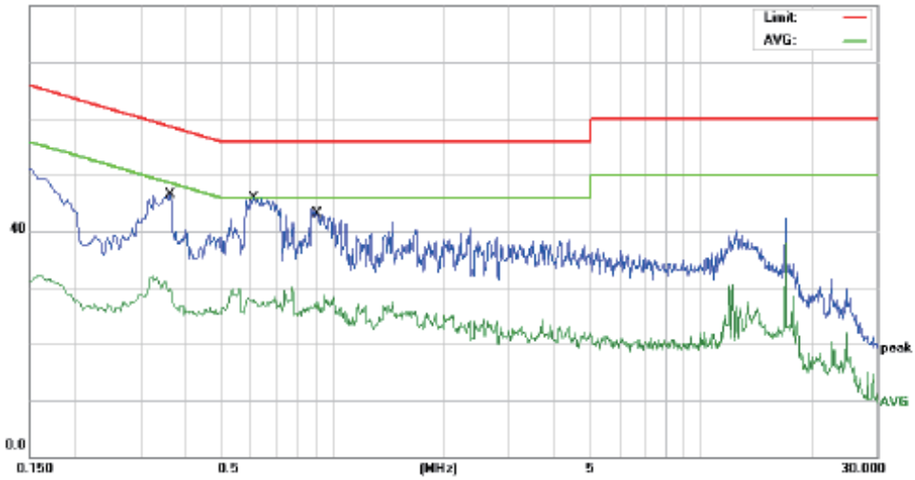


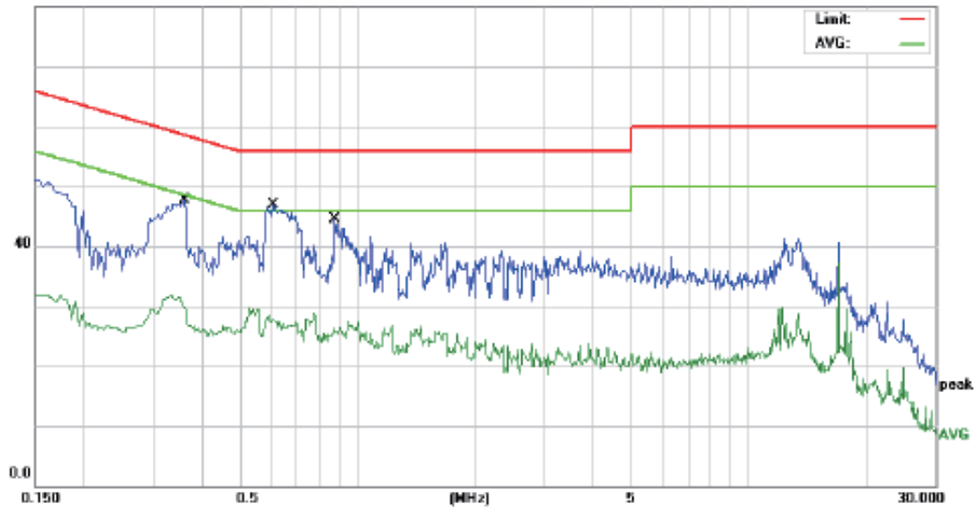
图 27 300W 的开关电源 EMI 电路实物图



Site 843 Phase: L1 Temperature: 26(C)
Limit: EN55032 Class B Conduction(QP) Power: AC 230V/50Hz Humidity: 60 %
EUT: TV
M/N: JSL4300-003
Mode: FULL LOAD
Note: 原状态

No.	Mk.	Freq.	Reading Level	Correct Factor	Measure-ment	Limit	Over		
		MHz	dBuV	dB	dBuV	dB	dB	Detector	Comment
1	*	0.3620	36.04	9.66	45.70	58.68	-12.98	QP	
2		0.3620	20.55	9.66	30.21	48.68	-18.47	AVG	
3		0.6100	33.00	9.69	42.69	56.00	-13.31	QP	
4		0.6100	18.34	9.69	28.03	46.00	-17.97	AVG	
5		0.9060	28.39	9.69	38.08	56.00	-17.92	QP	
6		0.9060	17.03	9.69	26.72	46.00	-19.28	AVG	

图 28 使用扁平线共模电感 300W 的开关电源 L 线最小余量 QP=12.98dB



Site 843 Phase: N Temperature: 26(C)
Limit: EN55032 Class B Conduction(QP) Power: AC 230V/50Hz Humidity: 60 %
EUT: TV
M/N: JSL4300-003
Mode: FULL LOAD
Note: 原状态

No.	Mk.	Freq.	Reading Level	Correct Factor	Measure-ment	Limit	Over		
		MHz	dBuV	dB	dBuV	dB	dB	Detector	Comment
1	*	0.3620	35.88	9.66	45.54	58.68	-13.14	QP	
2		0.3620	20.13	9.66	29.79	48.68	-18.89	AVG	
3		0.6100	32.29	9.69	41.98	56.00	-14.02	QP	
4		0.6100	17.65	9.69	27.34	46.00	-18.66	AVG	
5		0.8780	29.68	9.69	39.37	56.00	-16.63	QP	
6		0.8780	16.72	9.69	26.41	46.00	-19.59	AVG	

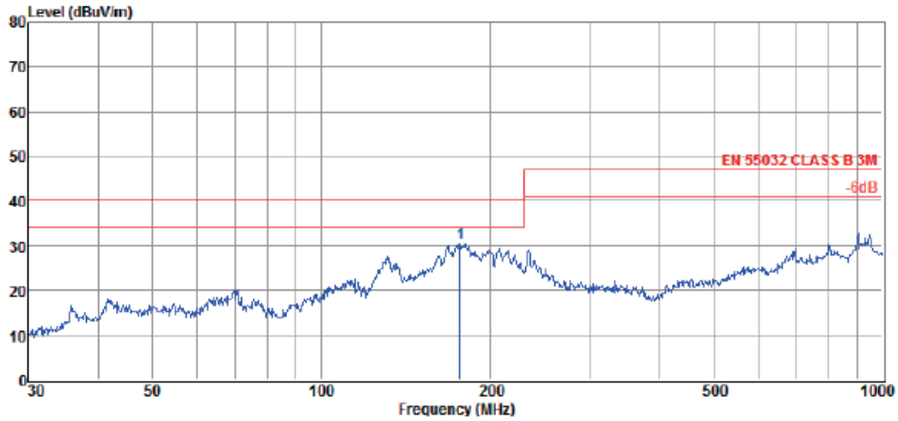
图 29 使用扁平线共模电感 300W 的开关电源 N 线最小余量 QP=13.14dB

本文两个例题 75W 和 300W 开关电源，主要是讲共模电感结构原因：杂散寄生参数产生的影响（其他方法不作概述）。因为扁平线共模电感在结构上的优势：具有通过电流大，温升小；分布电容 Cr 小，在高频状态下分布电容 Cr 会使绕组的高频电流增加，绕组电感和分布电容形成谐振回路，这样就会减弱共模电感的高频衰减作用；漏电感 Le 越大、等效差模电感效果越好；根据测试数据阻抗和频率曲线图可以很明显观测到：原磁环共模电感阻抗蓝色曲线以 200K 为最高点分布，扁平线共模电感阻抗红色曲线以 900K 为最高点分布．扁平线共模电感在 400K-10M 之间比磁环共模电感具有更高的阻抗，所以分析案例达到了需要的效果。

每个共模电感具体的阻抗分布曲线同一磁性可以通过改变圈数、电感量来移动阻抗和频率曲线，当然也可以改变磁性材质达到需要抑制的频率点，满足 EMI 设计要求。下面是一个 300W 的 LED 背光液晶电视开关电源，其共模电感 L7002、L7001 同时采用扁平线共模电感，无论是传导还是辐射效果都很好。

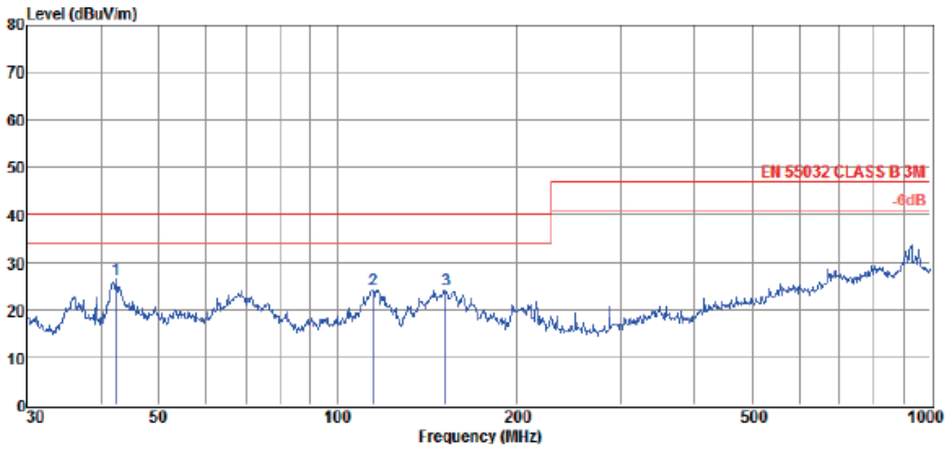
5.1　300W 的开关电源测试标准 EN55032，L 线、N 线传导测试结果如图 28、29

5.2　300W 的开关电源测试标准 EN55032，辐射的水平、垂直测试结果如图 30、31



Item (Mark)	Freq (MHz)	Read Level (dBμV)	Factor dB	Level (dBμV/m)	Limit Line (dBμV/m)	Over Limit (dB)	Detector	Polarization
1	176.89	43.29	-12.80	30.49	40.00	-9.51	Peak	HORIZONTAL

图 30 使用扁平线共模电感 300W 的开关电源 HORIZONTAL 最小 Peak=9.51dB



Item (Mark)	Freq (MHz)	Read Level (dBμV)	Factor dB	Level (dBμV/m)	Limit Line (dBμV/m)	Over Limit (dB)	Detector	Polarization
1	42.30	36.71	-10.39	26.32	40.00	-13.68	Peak	VERTICAL
2	114.92	35.71	-11.41	24.30	40.00	-15.70	Peak	VERTICAL
3	152.66	38.17	-14.03	24.14	40.00	-15.86	Peak	VERTICAL

图 31 使用扁平线共模电感 300W 的开关电源 VERTICAL 最小 Peak=13.68dB

6 结论

本文通过对共模电感等效图的简化，简化后的参数可以通过仪器测试，能更直观理解因为共模电感结构原因引起杂散寄生参数变化对 EMI 影响，根据需要改善的频点，有的放矢进行整改、设计，少走弯路。当然改善 EMI 传导某些频点有多种方法，1：譬如主动方法直接抑制开关元件的干扰源；2：采用软开关电路；3：改善电路板布线；4：改变 X 电容的容量，X 容量的容量有限制、太大会使交流断电后残余电压超标；5：增加 Y 电容的容量，但是 Y 容量的容量有限制，增加会导致产品漏电流超标；6：实际上需要采用多种方法综合、折中使用。

下转170页