一种典型共模电感的设计及优化

胡锋

合肥博微田村电气有限公司，合肥 230088

摘　要：本文通过对共模电感工作原理及特点的分析，提出了一种优化共模电感阻抗特性的设计方法。其中单层绕线设计极大地降低绕组分布电容，提高谐振频率，从而改善阻抗-频率特性；使用高导铁氧体磁芯与纳米晶磁芯的多磁芯共模电感设计，巧妙地利用铁氧体低频段优异的阻抗特性及纳米晶高频段优异的阻抗特性，从而使共模电感在很宽频段范围内均具有较高阻抗，这为优化共模电感阻抗特性及降低成本提供了一个全新的应用解决方案。

关键词：共模电感，阻抗，谐振频率，多磁芯共模电感

Design and Optimization of a Typical Common Mode Choke

Huffon Hu

HEFEI ECRIEE–TAMURA ELECTRIC CO., LTD, HEFEI 230088

Abstract: According to analyzing the mechanism of common mode choke and its features, a new solution to optimize the impedance performance of common mode choke is proposed in this paper. It will reduce the distributed capacitance and increase the resonance frequency by winding in one layer, and also this is a simple way to optimize the impedance performance. By the optimized design of common mode choke with high permeability ferrite and nanocrystalline multi-core, the choke will have excellent impedance performance in a wide frequency range due to the excellent performance of ferrite in low frequency range and the excellent performance of nanocrystalline in high frequency range, it also pointed a new way to improve the impedance performance and reduce the cost of common mode choke.

Keywords: Common Mode Choke, Impedance, Resonance Frequency, Multi-Core Common Mode Choke

1 引言

开关电源（SMPS）通常是最大的噪声发生器之一，它通常可产生共模噪声和差模噪声两类噪声。共模噪声在与共地底座相对应的两个导线之中同时产生，而差模噪声仅在输入导线的路径之间产生[1]。通常使用共模电感来抑制共模噪声。

开关电源产生的噪声谱频率通常在10kHz ~ 50MHz之间变化，为了达到合适的衰减效果，共模电感需在这一频率范围内具有足够高的阻抗[1]。本文介绍了共模电感的原理以及常用共模电感磁芯，以两个共模电感为例，介绍了共模电感的设计方法，尤其提出了一种优化共模电感阻抗特性的设计方法，使得共模电感在较宽的频率范围内都保持较高的阻抗。

2 共模噪声

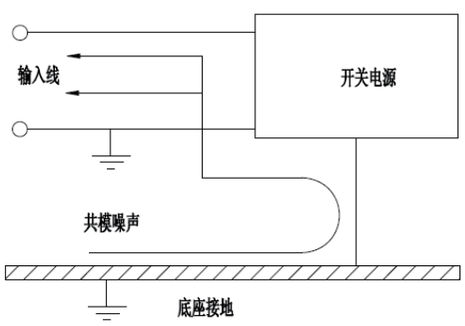

图 1 共模噪声及其传输路径[1]

共模噪声的简化示意图如图 1 所示。共模噪声在与共地点（底座）相对应的两个导线中同时产生，这种噪声的根源在于电源内部的开关速率较高，杂散电容 Cs 不断地充电放电 [1]。

共模噪声频率高（MHz 范围），幅度大，干扰大。减小共模噪声的方法是在信号线或电源线中串联共模电感。

3 共模电感

共模电感，又称共模扼流圈，对抑制共模噪声极为有效。从共模电感磁芯材质分，主要有铁氧体共模电感和纳米晶共模电感；从共模电感磁芯结构分，主要有环形共模电感和 UF 型共模电感；从共模电感安装结构分，主要有插针型共模电感和表面贴装型共模电感。

3.1 共模电感的工作原理

共模电感是由绕在磁环上的两个独立线圈（见图 2 及图 3）组成，其匝数相同，绕向相反。共模电感接入电路后，对差模电流，两线圈内电流产生的磁通在磁环内相互抵消，不会使磁环达到饱和状态；对通过电源线与地线之间的共模电流，由于方向相同，磁通相叠加，对共模电流产生高阻抗，从而大大削弱了共模噪声干扰 [2]。

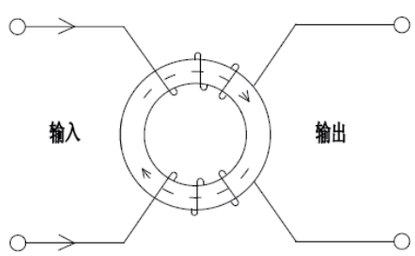

图 2 共模电感工作原理图

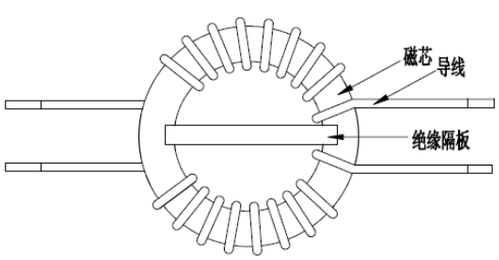

图 3 典型共模电感示意图

3.2 共模电感的主要电气特性

共模电感的主要技术要求是：

（1）电感值

要求两个线圈的电感值大于规定值。

（2）电感偏差

要求两个线圈的电感值偏差在规定范围内。

（3）直流电阻

要求两个线圈的直流电阻小于规定值。

（4）阻抗特性

在特定频率要求阻抗达到规定值。

除上述要求外，共模电感还有抗电强度、绝缘电阻以及可靠性要求。

3.3 共模电感的设计考虑

根据共模电感的额定电流、直流电阻以及特定频率下阻抗值要求，可按照以下步骤进行设计：

（1）根据阻抗值计算最小电感值。

（2）选择共模电感磁芯材料及磁芯尺寸。

（3）确定线圈匝数。

（4）选择导线。

4 共模电感磁芯

开关电源产生的噪音谱频率通常在 10kHz ~ 50MHz 之间变化。为了使共模电感在此频率范围具备足够高的阻抗，从而达到合适的衰减效果，共模电感磁芯必须具有较高的初始磁导率。对于大多数共模电感而言，可选择磁导率较高的铁氧体作为磁芯，亦可选择纳米晶材料作为磁芯。表 1 给出的是典型共模电感磁芯的材料特性。

表 1 磁性材料特性 [1]

制造商名称	材料名称	商品成分	初始磁导率 μi	磁通密度 Bs/T	典型工作频率 /Hz
Magnetics	Ferrite J	锰锌	5000	0.43	10k~2M
Magnetics	Ferrite W	锰锌	10000	0.43	10k~2M
VAC	V 500F	纳米晶	30000	1.2	10k~2M

4.1 高导锰锌铁氧体材料

高导类锰锌铁氧体材料具有较高的初始磁导率，较高的饱和磁感应强度，在 1kHz ~ 1MHz 频率段具有优良的磁性能。常用的高导类锰锌铁氧体材料磁导率约 5000 以上，并且由于环形磁芯漏磁小，高导铁氧体磁环被大量用

于制作各种共模电感。表 2 给出的是天通（TDG）高导类锰锌铁氧体材料的特性。图 4 和图 5 分别给出天通（TDG）TS10 材料的磁导率 – 频率特性和阻抗 – 频率特性。

表 2　高导类锰锌铁氧体材料的磁性能

特性		单位	TS5	TS7	TS10
初始磁导率 μ_i（10kHz）	25℃ H<0.08A/m		5500 ±30%	7500 ±30%	10000 ±30%
初始磁导率比温度系数 $\alpha_{\mu r}$	20℃~60℃	10^{-6}/℃	-0.5~2.0	-0.5~2.0	-0.5~2.0
比损耗因子 $\tan\delta/\mu_i$	100kHz	$\times10^{-6}$	<10	<20	<30
减落因子 D_F	1 to 10 minutes	$\times10^{-6}$	<3.0	<2.5	<2.0
饱和磁通密度 Bs	H=1194A/m 25℃	mT	410	410	380
剩磁 Br	25℃	mT	70	80	120
矫顽力 Hc	25℃	A/m	6	6	6
电阻率 ρ		Ω·m	1	0.3	0.2
居里温度 Tc		℃	≥150	≥125	≥125
密度 d		kg/m³	4.8×10^3	4.8×10^3	4.9×10^3

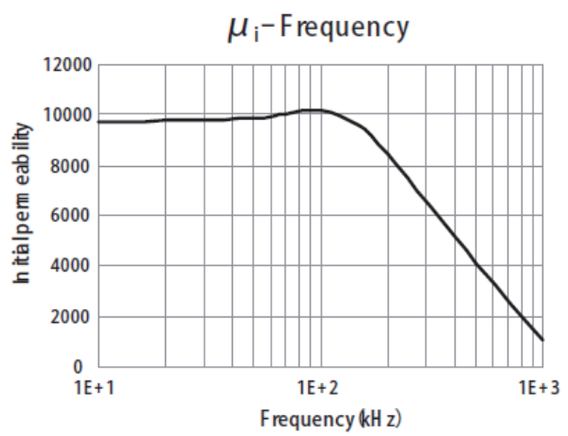

图 4　天通（TDG）TS10 材料的磁导率 – 频率特性

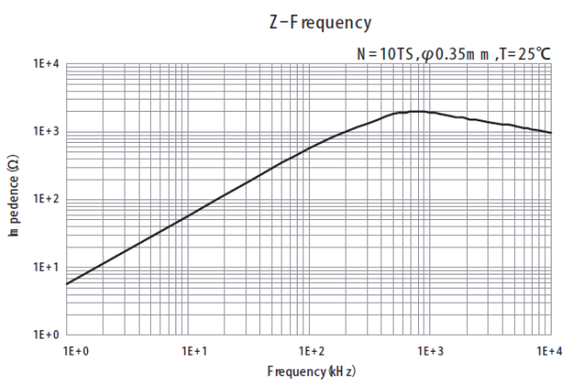

图 5 天通（TDG）TS10 材料的阻抗 – 频率特性

4.2　纳米晶材料

纳米晶材料具有比铁氧体材料高出许多的饱和磁通密度，具有更高的初始磁导率，优良的阻抗 – 频率特性，优良的温度稳定性，被广泛用于制作共模电感。表 3 给出的是纳米晶材料与铁氧体材料的基本特性对比。图 6 和图 7 分别给出索福泰克（SFTK）ui=30000 材料的磁导率 – 频率特性和 wul2610 阻抗 – 频率特性。

表 3　纳米晶材料与铁氧体材料的基本特性对比

磁性能	纳米晶	高导铁氧体
饱和磁通密度	1.2T	0.5T
矫顽力	< 2.4A/m	< 10A/m
初始磁导率（10kHz）	10000 ~ 100000	5000 ~ 15000
磁滞伸缩系数	$< 2*10^{-6}$	$< 4*10^{-6}$
居里温度	570℃	200℃
性能变化率（–50 ~ 120℃）	< ±10%	< ±50%

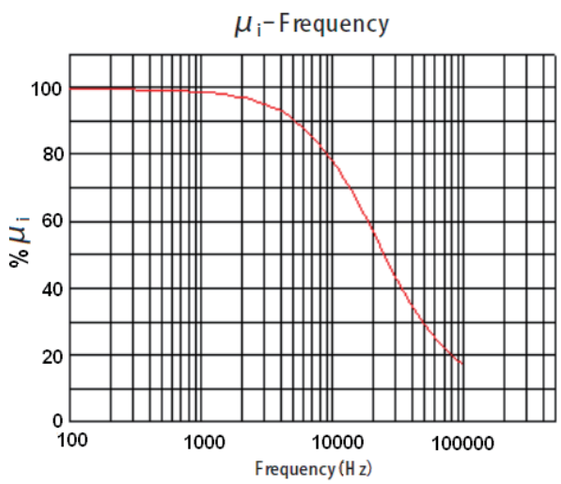

图 6　索福泰克（SFTK）ui=30000 材料的磁导率 – 频率特性

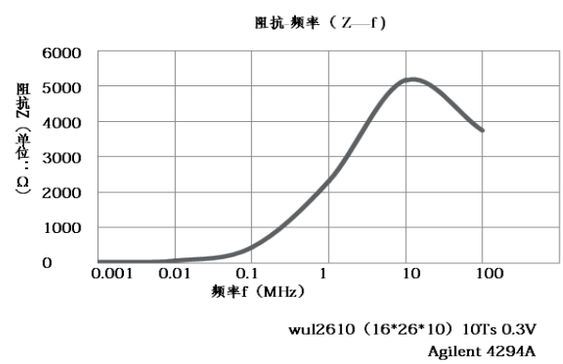

图 7　索福泰克（SFTK）wul2610 的阻抗 – 频率特性

5 设计举例

5A 单相共模电感设计参数要求：

（1）线电流 $I_{in}=5A$ ；

（2）单个线圈直流电阻 $R\leq 41m\Omega$ ；

（3）10kHz 阻抗值 $X_L\geq 220\Omega$ 。

5.1 方案一：T22*14*10 铁氧体双层绕线设计

5.1.1 选用天通（TDG）铁氧体作为共模电感磁芯；

5.1.2 计算最小电感 L：

$$L_{\min}=\frac{X_L}{2\pi f}=\frac{220}{2*3.14*10000}=0.0035(\mathrm{H})$$

5.1.3 磁芯选择：

从天通高导磁芯产品目录里，反复对比并选定 T22*14*10 u=10000，带环氧涂层磁芯；

$OD=22.4\mathrm{mm}$

$ID=13.6\mathrm{mm}$

$HT=10.4\mathrm{mm}$

$$A_L=9050\pm 30\%\frac{nH}{N^2}$$

5.1.4 计算单个线圈需要的匝数 N：

使用最低磁导率（-30%）即最低电感因数 A_L（1-30%）计算，并考虑铁氧体材料因应力特性电感 10% 的降幅，匝数 N：

$$N=\sqrt{\frac{L_{\min}}{A_L}}=\sqrt{\frac{0.0035}{9050*(1\text{-}30\%)*10^{-9}*90\%}}=24.78$$

匝数取整 N=25

5.1.5 计算裸铜线面积 $A_{w(B)}$：

电流密度 J 取：$10\frac{A}{\mathrm{mm}^2}$ ；

$$A_{w(B)}=\frac{I_{in}}{J}=\frac{5}{10}=0.5(\mathrm{mm}^2)$$

5.1.6 选导线直径：

选择最接近以上裸铜线面积 $A_{w(B)}$ 的线径：

裸铜线直径：0.8mm

导线面积：$0.5024\mathrm{mm}^2$

每米电阻：$0.03401\ \frac{\Omega}{\mathrm{m}}$

含绝缘层直径 Φ：0.855mm

5.1.7 设计绝缘隔板来隔离线圈

如图 8 所示：厚度 t=2.0mm；

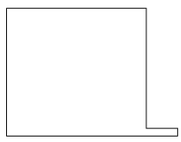

图 8 绝缘隔板示意图

5.1.8 计算绕线层数及绕线匝数分布：

单个线圈第一层可绕最大匝数：

$$N_{1st}=\frac{1}{2}*\frac{\pi*(ID-\Phi)-2*t}{\Phi}$$
$$=\frac{1}{2}*\frac{3.14*(13.6-0.855)-2*2}{0.855}=21.06$$

单个线圈第二层可绕最大匝数：

$$N_{2nd}=\frac{1}{2}*\frac{\pi*(ID-2*\Phi-\Phi)-2*t}{\Phi}$$
$$=\frac{1}{2}*\frac{3.14*(13.6-2*0.855-0.855)-2*2}{0.855}=17.92$$

总匝数要求 25 匝，考虑绕线排线难度，因此绕线按照 2 层绕线，单个线圈第一层 16 匝，第二层 9 匝。

5.1.9 计算平均匝长 MLT：

第一层绕线平均匝长 MLT：

$$MLT=(OD-ID)+2*HT$$
$$=(22.4-13.6)+2*10.4=29.6(\mathrm{mm})$$

第二层绕线平均匝长 MLT：

$$MLT=\{OD-(ID-2*\Phi)\}+2*(HT+2*\Phi)$$
$$=\{22.4-(13.6-2*0.855)\}+2*(10.4+2*0.855)$$
$$=34.73(\mathrm{mm})$$

5.1.10 计算线圈电阻：

$$R=\{16*29.6+9*34.73\}*10^{-3}*0.03401=0.0267(\Omega)$$

5.1.11 计算两个线圈的总铜损：

$$P_{Cu}=I_{in}{}^2*R*2=5*5*0.0267*2=1.335(\mathrm{W})$$

5.1.12 立式安装共模电感

待测试，如图 9 所示。

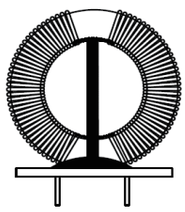

图 9 共模电感示意图

备注：磁芯成本 =0.45 元

铜线成本 =0.007*40=0.28 元

铜铁合计成本 =0.45+0.28=0.73 元

5.2 方案二：T25*15*10 铁氧体单层绕线设计

5.2.1 选用天通（TDG）铁氧体作为共模电感磁芯；

5.2.2 计算最小电感 L：

$$L_{\min}=\frac{X_L}{2\pi f}=\frac{220}{2*3.14*10000}=0.0035(\mathrm{H})$$

5.2.3 磁芯选择：

从天通高导磁芯产品目录里，反复对比并选定 T25*15*10 u=10000，带环氧涂层磁芯；

$OD=25.4\mathrm{mm}$

$ID=14.6\mathrm{mm}$

$HT=10.4\mathrm{mm}$

$$A_L=10200\pm30\%\frac{nH}{N^2}$$

5.2.4 计算单个线圈需要的匝数 N：

使用最低磁导率（–30%）即最低电感因数 A_L（1–30%）计算，并考虑铁氧体材料因应力特性电感 10% 的降幅，匝数 N：

$$N=\sqrt{\frac{L_{\min}}{A_L}}=\sqrt{\frac{0.0035}{10200*(1\text{-}30\%)*10^{-9}*90\%}}=23.34$$

匝数取整 N=24

5.2.5 计算裸铜线面积 $A_{w(B)}$：

电流密度 J 取：$10\frac{A}{\mathrm{mm}^2}$

$$A_{w(B)}=\frac{I_{in}}{J}=\frac{5}{10}=0.5(\mathrm{mm}^2)$$

5.2.6 选导线直径：

选择最接近以上裸铜线面积 $A_{w(B)}$，并兼顾单层绕线设计，选择线径如下：

裸铜线直径：0.75mm

导线面积：$0.4416\mathrm{mm}^2$

每米电阻：$0.03869\ \frac{\Omega}{\mathrm{m}}$

含绝缘层直径 Φ：0.805mm

5.2.7 设计绝缘隔板来隔离线圈

如图 8 示意，厚度 t=2.0mm；

5.2.8 计算绕线层数及绕线匝数分布：

单个线圈第一层可绕最大匝数：

$$N_{1st}=\frac{1}{2}*\frac{\pi*(ID-\Phi)-2*t}{\Phi}$$

$$=\frac{1}{2}*\frac{3.14*(14.6-0.805)-2*2}{0.805}=24.42$$

总匝数要求 24 匝，因此绕线按照单层绕线，单个线圈第一层 24 匝。

5.2.9 计算平均匝长 MLT：

第一层绕线平均匝长 MLT：

$$MLT=(OD-ID)+2*HT$$

$$=(25.4-14.6)+2*10.4=31.6(\mathrm{mm})$$

5.2.10 计算线圈电阻：

$$R=24*31.6*10^{-3}*0.03869=0.0293(\Omega)$$

5.2.11 计算两个线圈的总铜损：

$$P_{Cu}=I_{in}{}^2*R*2=5*5*0.0293*2=1.465(\mathrm{W})$$

5.2.12 立式安装共模电感

待测试，如图 9 示意。

备注：磁芯成本 =0.65 元

铜线成本 =0.006*40=0.24 元

铜铁合计成本 =0.65+0.24=0.89 元

5.3 方案三：WUL–1810 纳米晶单层绕线设计

5.3.1 选用北京索福泰克电子有限公司（SFTK）纳米晶作为共模电感磁芯；

5.3.2 计算最小电感 L：

考虑到纳米晶磁芯磁导率 u 随频率 f 下降迅速，低频段电感下降迅速，按照 10kHz 下阻抗值的 1.5 倍设计：

$$L_{\min}=\frac{X_L*1.5}{2\pi f}=\frac{220*1.5}{2*3.14*10000}=0.0053(\mathrm{H})$$

5.3.3 磁芯选择：

从北京索福泰克电子有限公司纳米晶磁芯产品目录里，反复对比并选定 WUL–1810，带塑料护壳磁芯；

$OD=20.1\mathrm{mm}$

$ID=9.3\mathrm{mm}$

$HT=11.7\mathrm{mm}$

$$A_L=65000\pm30\%\frac{nH}{N^2}$$

5.3.4 计算单个线圈需要的匝数 N：

使用最低磁导率（-30%）即最低电感因数 A_L（1-30%）计算，并考虑小尺寸纳米晶材料因应力特性电感 10% 的降幅，匝数 N：

$$N=\sqrt{\frac{L_{\min}}{A_L}}=\sqrt{\frac{0.0053}{65000*(1-30\%)*10^{-9}*90\%}}=11.37$$

匝数取整 N=12

5.3.5 计算裸铜线面积 $A_{w(B)}$：

电流密度 J 取：10 $\frac{A}{mm^2}$；

$$A_{w(B)}=\frac{I_{in}}{J}=\frac{5}{10}=0.5(mm^2)$$

5.3.6 选导线直径：

选择最接近以上裸铜线面积 $A_{w(B)}$ 的线径：

裸铜线直径：0.8mm

导线面积：0.5024mm²

每米电阻：0.03401 $\frac{\Omega}{m}$

含绝缘层直径 Φ：0.855mm

5.3.7 设计绝缘隔板来隔离线圈

如图 8 示意，厚度 t=2.0mm；

5.3.8 计算绕线层数及绕线匝数分布：

单个线圈第一层可绕最大匝数：

$$N_{1st}=\frac{1}{2}*\frac{\pi*(ID-\Phi)-2*t}{\Phi}$$
$$=\frac{1}{2}*\frac{3.14*(9.3-0.855)-2*2}{0.855}=13.17$$

总匝数要求 12 匝，因此绕线按照单层绕线，单个线圈第一层 12 匝。

5.3.9 计算平均匝长 MLT：

第一层绕线平均匝长 MLT：

$$MLT=(OD-ID)+2*HT$$
$$=(20.1-9.3)+2*11.7=34.2(mm)$$

5.3.10 计算线圈电阻：

$$R=12*34.2*10^{-3}*0.03401=0.0140(\Omega)$$

5.3.11 计算两个线圈的总铜损：

$$P_{Cu}=I_{in}^{2}*R*2=5*5*0.0140*2=0.700(W)$$

5.3.12 立式安装共模电感

待测试，如图 9 示意。

备注：磁芯成本 =0.75 元

铜线成本 =0.004*40=0.16 元

铜铁合计成本 =0.75+0.16=0.91 元

5.4 测试及分析

5.4.1 电感 - 频率特性及阻抗 - 频率特性：

图 10 及图 11 分别给出了三种设计 10kHz ~ 5MHz 和 10kHz ~ 1MHz 范围内电感 - 频率特性曲线。从图中可以看出，三种设计选用磁芯磁导率较高，磁导率随频率下降迅速，尤其是纳米晶磁导率下降速度比铁氧体明显迅速。

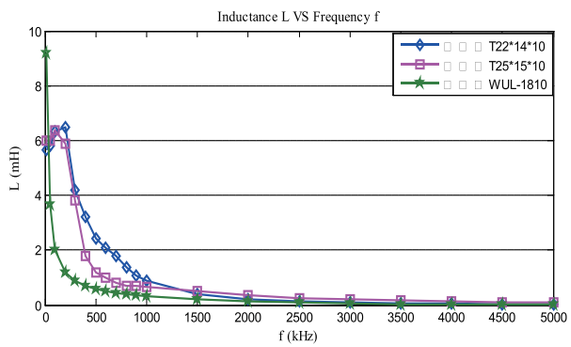

图 10 三种设计电感 - 频率特性（10kHz ~ 5MHz）

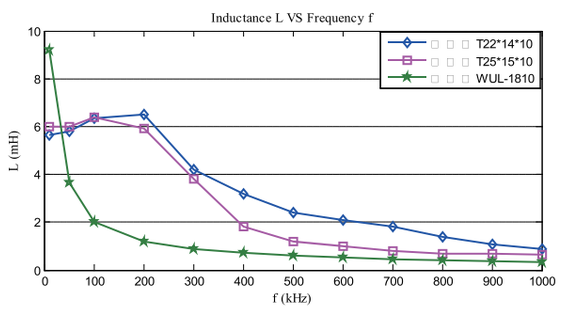

图 11 三种设计电感 - 频率特性（10kHz ~ 1MHz）

图 12 给出了三种设计 10kHz ~ 5MHz 范围内阻抗 - 频率特性曲线。从图中可以看出，T22*14*10 铁氧体双层绕线设计与 T25*15*10 铁氧体单层绕线设计在 1MHz 以前阻抗值高于 WUL-1810 纳米晶单层绕线设计，但 1MHz 以上远低于纳米晶；T22*14*10 铁氧体双层绕线设计在 400kHz 左右阻抗即达到最大值然后开始下降，T25*15*10 铁氧体单层绕线设计在 500kHz 左右阻抗即达到最大值然后开始下降，WUL-1810 纳米晶单层绕线设计 5MHz 尚未

达到阻抗最大值；T25*15*10 铁氧体单层绕线设计 1MHz 以上阻抗特性明显优于 T22*14*10 铁氧体双层绕线设计。

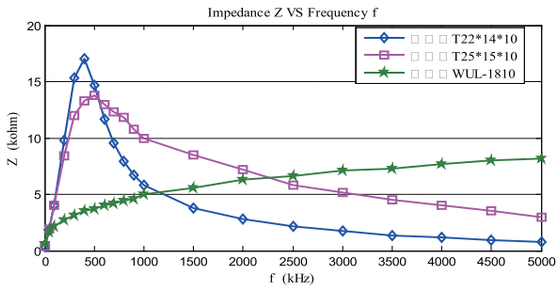

图 12 三种设计阻抗 – 频率特性（10kHz ~ 5MHz）

5. 4. 2 谐振频率：

图 13–15 分别给出了三种设计的谐振频率。从图中可以看出，T22*14*10 铁氧体双层绕线设计谐振频率为 398kHz；T25*15*10 铁氧体单层绕线设计谐振频率

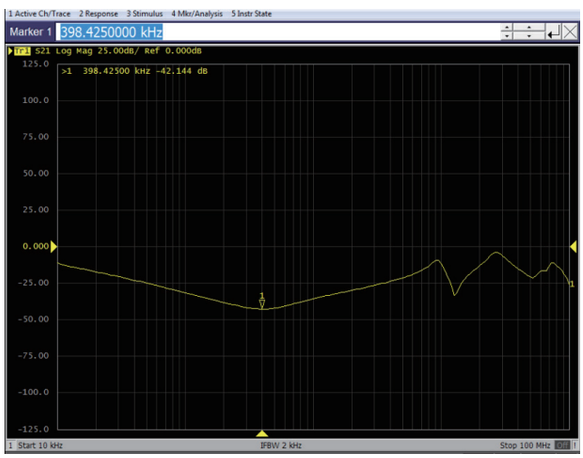

图 13 T22*14*10 铁氧体双层绕线设计谐振频率

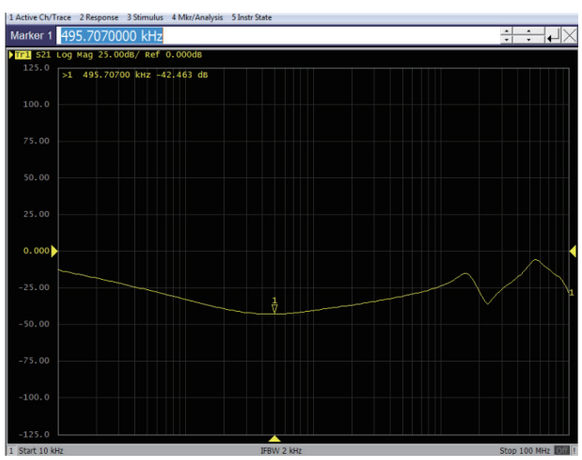

图 14 T25*15*10 铁氧体单层绕线设计谐振频率

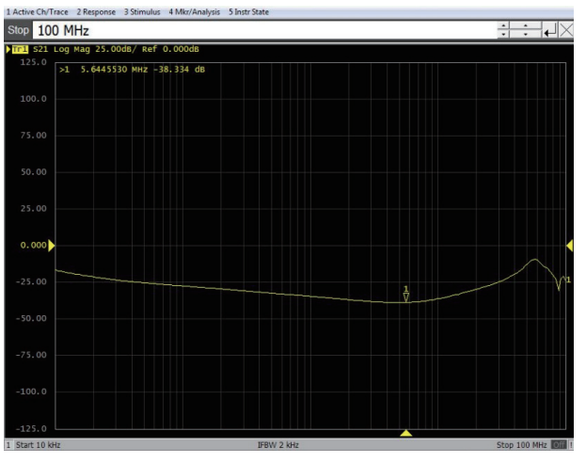

图 15 WUL–1810 纳米晶单层绕线设计谐振频率

为 495kHz；WUL–1810 纳米晶单层绕线设计谐振频率为 5.64MHz。以上谐振频率与前面测试得到的三种设计阻抗值达到最大值时对应的频率基本一致。

5. 4. 3 分析及小结：

比较 T22*14*10 铁氧体双层绕线设计与 T25*15*10 铁氧体单层绕线设计，后者绕线层数只有一层，比前者减少了层间电位差及层间电容，从而具有较高的谐振频率，在更高的频率点达到阻抗值最大然后缓慢下降，整体阻抗曲线优于前者。

比较 WUL–1810 纳米晶单层绕线设计与前两个设计，由于纳米晶磁导率更高，磁导率随频率下降比铁氧体更加迅速，因此在低频段共模电感阻抗主要表现为感抗时，纳米晶阻抗特性不如铁氧体。但第三种设计采用单层绕线设计且由于纳米晶更高的初始磁导率而匝数更少，因此具有很小的分布电容及很高的谐振频率，在高频段具有比前两个设计更优异的阻抗特性，越来越多的应用场合高频段阻抗特性尤为重要。

从成本分析，前两个设计相差不大，第三种设计材料成本略有增加，但因为匝数显著减少，实际人工成本减少，总成本与前两个设计相当甚至更低，并且具备更高的生产效率。

共模电感设计时分布电容不可忽视，分布电容包括绕组自身电容及绕组与磁芯间的电容。绕组自身电容包括匝间和层间的电容。反射到绕组两端的电容与层间电容及层间的电位差有关。在共模电感多层绕线线圈中，匝间电位差较小，但层间电位差较大，导致层间电容对线圈的固有

电容影响较大。

通常可通过绕组的分段来减小层间的电位差及层间电容或者从设计源头减少绕线层数，但作为环形共模电感，分段绕组增加了绕线难度，增加了成本，因此实际采用较少，如本设计案例中第二种及第三种设计，单层绕线设计是最好的选择。

6 设计举例二

25A 单相共模电感设计参数要求：

（1）线电流 $I_{in}=25A$ ；

（2）单个线圈直流电阻 $R\leq 4.2m\Omega$ ；

（3）150kHz 阻抗值 $X_L\geqslant 900\Omega$ 。

6.1 方案：多磁芯单层绕线设计

6.1.1 选用天通（TDG）铁氧体和北京索福泰克电子有限公司（SFTK）纳米晶作为共模电感磁芯；

6.1.2 计算 150kHz 最小电感 L：

$$L_{\min}=\frac{X_L}{2\pi f}=\frac{900}{2*3.14*150000}=0.00096(H)$$

6.1.3 磁芯选择：

从天通高导铁氧体磁芯产品目录里，反复对比并选定 T32*19*12 u=10000，带环氧涂层磁芯；

$OD=32.4mm$

$ID=18.6mm$

$HT=12.4mm$

$A_L=12450\pm 30\%\frac{nH}{N^2}@5kHZ$

$A_L\geq 7500\frac{nH}{N^2}@150kHz$

从北京索福泰克电子有限公司纳米晶磁芯产品目录里，反复对比并选定 WUL-3010，带塑料护壳磁芯；

$OD=32.4mm$

$ID=18.3mm$

$HT=11.7mm$

$A_L=65000\pm 30\%\frac{nH}{N^2}@5kHz$

$A_L\geq 6100\frac{nH}{N^2}@150kHz$

6.1.4 计算单个线圈需要的匝数 N：

使用最低磁导率即最低电感因数 A_L 计算，并考虑铁氧体材料及小尺寸纳米晶因应力特性电感10%的降幅，匝数 N：

$$N=\sqrt{\frac{L_{\min}}{A_L}}=\sqrt{\frac{0.00096}{(7500+6100)*10^{-9}*90\%}}=8.86$$

匝数取整N=9

6.1.5 计算裸铜线面积 $A_{w(B)}$：

电流密度J取：$7\frac{A}{mm^2}$；

$$A_{w(B)}=\frac{I_{in}}{J}=\frac{25}{7}=3.57(mm^2)$$

6.1.6 选导线直径：

选择最接近以上裸铜线面积 $A_{w(B)}$ 的线径：

裸铜线直径：2.1mm

导线面积：$3.462mm^2$

每米电阻：$0.004936\frac{\Omega}{m}$

含绝缘层直径Φ：2.194mm

6.1.7 设计绝缘隔板来隔离线圈

如图16所示：厚度t=2.0mm；

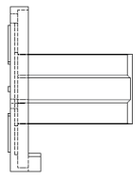

图 16 绝缘隔板示意图

6.1.8 计算绕线层数及绕线匝数分布：

两种磁芯叠加，取内径小的尺寸来计算，单个线圈第一层可绕最大匝数：

$$N_{1st}=\frac{1}{2}*\frac{\pi*(ID-\Phi)-2*t}{\Phi}$$
$$=\frac{1}{2}*\frac{3.14*(18.3-2.194)-2*2}{2.194}=10.61$$

总匝数要求9匝，因此绕线按照单层绕线，单个线圈第一层9匝。

6.1.9 计算平均匝长 MLT：

两种磁芯叠加，取内径小的磁芯尺寸来计算，第一层绕线平均匝长MLT：

$$MLT=(OD-ID)+2*HT$$
$$=(32.4-18.3)+2*(12.4+11.7)=62.3(mm)$$

6.1.10 计算线圈电阻：

$$R = 9 * 62.3 * 10^{-3} * 0.004936 = 0.00277\,(\Omega)$$

线径较粗，考虑绕线铜线与磁芯的接触紧密度，按1.2倍计算：

$$R = 0.00277 * 1.2 = 0.00332(\Omega)$$

6. 1. 11 计算两个线圈的总铜损：

$$P_{Cu} = I_{in}^{\ 2} * R * 2 = 25 * 25 * 0.00332 * 2 = 4.15(\mathrm{W})$$

6. 1. 12 卧式安装共模电感

待测试，如图17所示。

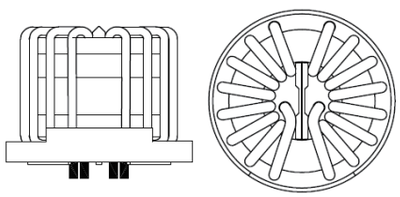

图 17 共模电感示意图

备注：磁芯成本=3+1.3=4.3元

铜线成本=0.042*40=1.68元

铜铁合计成本=4.3+1.68=5.98元

6.2 测试及分析

6. 2. 1 电感－频率特性及阻抗－频率特性：

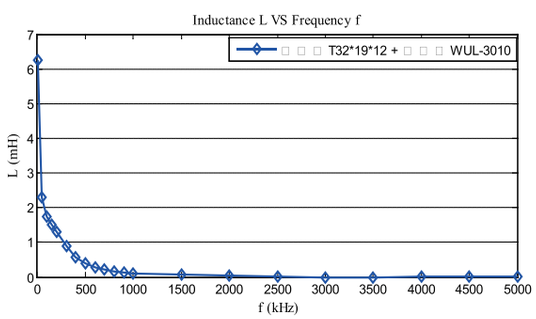

图 18 多磁芯单层绕线设计电感－频率特性（5kHz ~ 5MHz）

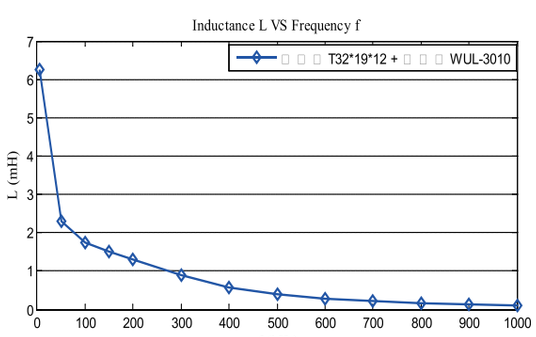

图 19 多磁芯单层绕线设计电感－频率特性（5kHz ~ 1MHz）

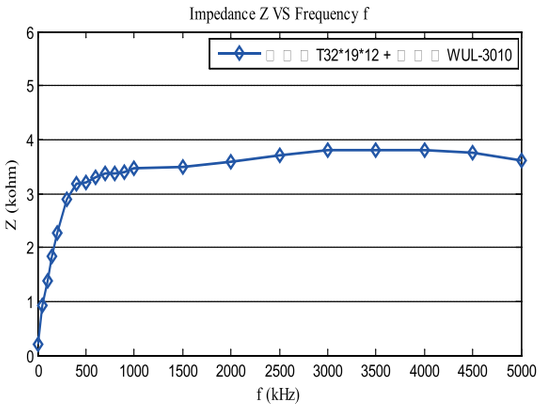

图 20 多磁芯单层绕线设计阻抗－频率特性（5kHz ~ 5MHz）

图18及图19给出了5kHz ~ 5MHz和5kHz ~ 1MHz范围内电感–频率特性曲线。与图10及图11中第三种纳米晶单层绕线设计比较，前者从100kHz到200kHz，电感从2mH降到1.19mH，降幅40%；多磁芯单层绕线设计从100kHz到200kHz，电感从1.73mH降到1.31mH，降幅24%。从比较可以看出，通过铁氧体与纳米晶的多磁芯设计，磁导率随频率下降比纯纳米晶磁导率随频率下降速度缓慢。

图20给出了5kHz ~ 5MHz范围内阻抗–频率特性曲线。从图中可以看出，多磁芯单层绕线设计在较低频率300kHz即达到较高阻抗值，并且在很宽（300kHz ~ 5MHz）频率范围内均维持较高阻抗值，4MHz时开始缓慢下降。与图12第三种纳米晶单层绕线设计比较，前者因为低频段纳米晶磁导率随频率下降迅速而影响阻抗增幅，从100kHz到200kHz，阻抗从2.14kΩ增加到2.73kΩ，增幅28%；多磁芯单层绕线设计从100kHz到200kHz，阻抗从1.37kΩ增加到2.27kΩ，增幅66%。

6. 2. 2 谐振频率：

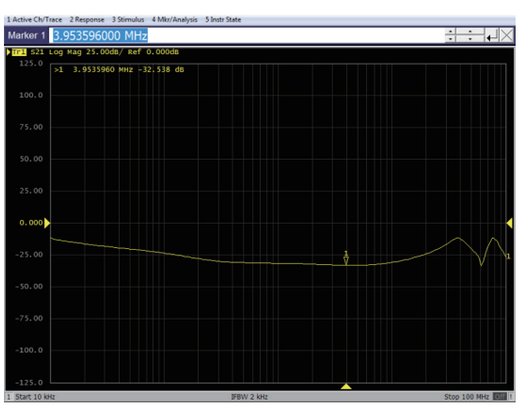

图 21 多磁芯单层绕线设计谐振频率

图21给出了多磁芯单层绕线设计的谐振频率。从图中可以看出，谐振频率为3.95MHz。以上谐振频率与前面测试得到的设计阻抗值达到最大值时对应的频率基本一致。

6.2.3 分析及小结：

比较多磁芯单层绕线设计与WUL-1810纳米晶单层绕线设计，多磁芯设计由于选用了低频段磁性能优异的铁氧体材料及高频段磁性能优异的纳米晶材料，低频段由于铁氧体磁导率随频率下降比纳米晶缓慢，因此在低频段共模电感阻抗主要表现为感抗时，多磁芯设计电感随频率下降比纳米晶缓慢，因此此频段阻抗特性明显优于纳米晶。在高频段由于纳米晶自身很高的初始磁导率而匝数较少，单层绕线设计，因此具有很小的分布电容及很高的谐振频率，在高频段具有优异的阻抗特性，从而实现共模电感在很宽频段范围内均具有较高阻抗，这为优化共模电感阻抗特性及降低成本提供了一个全新的应用解决方案。

7 结论

本文通过对共模电感工作原理、特点的分析及两个共模电感的设计举例、测试分析，得出的结论如下：

（1）高导铁氧体材料由于磁导率随频率下降比纳米晶缓慢，因此在低频段具有优异的阻抗特性，但由于自身磁导率不够高而匝数较多甚至层数较多，在高频段阻抗特性不好。

（2）纳米晶材料由于磁导率随频率下降比铁氧体迅速，因此在低频段阻抗较低，但由于自身磁导率很高而匝数较少甚至可实现单层绕线设计，在高频段阻抗特性优异。

（3）共模电感设计时分布电容不可忽视，其中绕组自身电容包括匝间和层间的电容。通常可通过绕组的分段来减小层间的电位差及层间电容或者从设计源头减少绕线层数，但作为环形共模电感，分段绕组增加了绕线难度，增加了成本，实际采用较少，因此单层绕线设计是最好的选择。

（4）多磁芯单层绕线设计，巧妙地利用铁氧体低频段优异的阻抗特性及纳米晶高频段优异的阻抗特性，从而使共模电感在很宽频段范围内均具有较高阻抗，这为优化共模电感阻抗特性及降低成本提供了一个全新的应用解决方案。

参考文献

[1] 周京华译,变压器与电感器设计手册[M]. 北京:中国电力出版社，2014.

[2] 王全保，新编电子变压器手册[M]. 沈阳：辽宁科学技术出版社，2007.

作者简介

胡锋，男，1987年10月出生，硕士，硕士研究方向为磁性材料及器件。现就职合肥博微田村电气有限公司，主管高频功率磁元件设计部。Email：huffon@ecthf.com；联系电话：17756068609；地址：合肥市高新区天智路41号。