

用于电磁干扰滤波器的共模电感器需要慎重选择磁芯材料

Robert West, Magnetics, A Division of Spang and Co.

多数电磁干扰滤波器必须使用共模电感器。由于共模电感器在很宽的频率范围内阻抗很高，所以可抑制高频开关电源产生的高频噪声。

开关电源会产生以下两类噪声：共模和差模。差模噪声（图 1a）的传播途径和输入电流相同。共模噪声（图 1b）表现为彼此相等且同相的噪声，其传播途径经绕组与地线相连。
为抑制电磁干扰，典型滤波器应包含共模电感器、差模电感器和 X 及 Y 电容器。Y 电容器和

共模电感器用于衰减共模噪声。电感器对高频噪声显示高阻抗，并反射或吸收噪声，同时，电容器成为到地的低阻抗路径，使噪声从主电路中分流出去（图 2）。为了实现以上功能，共模电感器必须在开关频率范围内提供合适的阻抗。
共模电感器由两组匝数相同

的绕组构成。这两个绕组使每个绕组中的线路电流所产生的磁通大小相等，而相位相反。所以这两组绕组产生的磁通相互抵消使磁芯处于未偏置状态。差模电感器仅有一个绕组，磁芯需要承受全部线路电流，并且在工作状态下不能饱和。

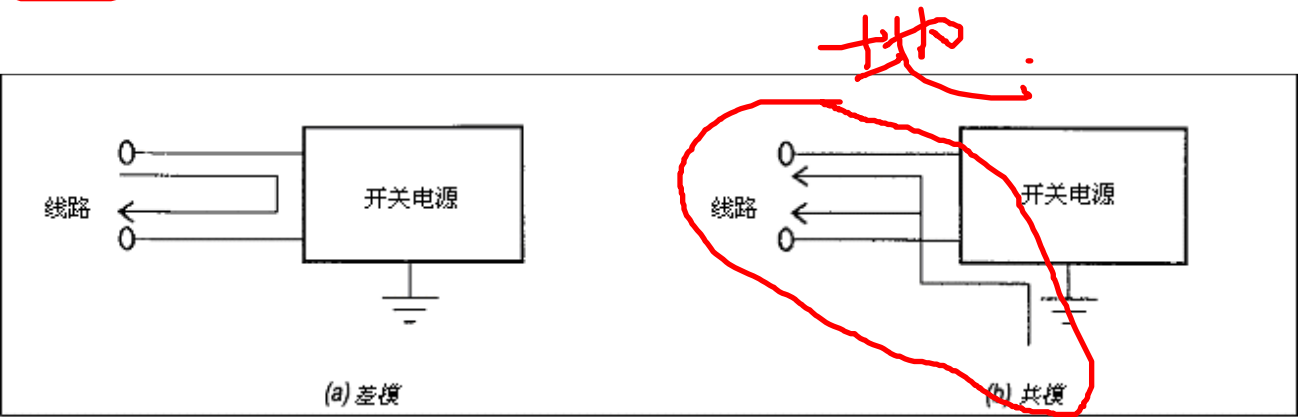


图 1. 噪声类型

所以共模电感器和差模电感器有很大差异。为防止磁芯饱和，差模电感器磁芯的有效磁导率必须低（间隙铁氧体或磁粉芯）。但是共模电感器可使用高磁导率材料，并可用较小的磁芯获得非常大的电感。

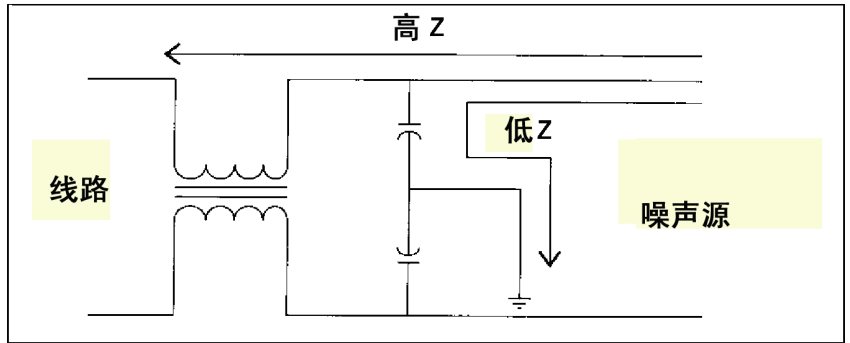


图2. 共模滤波器

选择材料

开关电源产生的噪声主要位于装置基频处，并包括高次谐波。也就是说，噪声频谱一般包括10kHz 到 50MHz 之间的部分。为了提供合适的衰减，电感器的阻抗在此频带内必须足够高。

共模电感器的总阻抗由两部分构成，一部分是串联感抗(X_s)，另一部分是串联电阻(R_s)。在低频时，电抗是阻抗的主要部分，但随着频率升高，磁导率的实部减小，磁芯损耗增大，如图3所示。这两个因素综合起来有助于在整个频谱上实现可接受的阻抗(Z_s)。

多数情况下，共模电感器使用铁氧体。铁氧体可分为两类：镍锌类和锰锌类。镍锌材料的特点是初始磁导率低($<1000\mu$)，但是它们可在非常高的频率($>100\text{MHz}$)下保持磁导率不变。

如何才能选择理想的磁芯？



MAGNETICS 为您提供解决方案！

MAGNETICS 能提供最大的选择余地。

铁氧体磁芯：用于功率变压器和电感器的高频材料（10kHz - 2MHz）；用于电磁干扰滤波器、ISDN 变压器和宽带变压器的高磁导率材料（高达 15,000 μ ）；以及用于电信应用的温度稳定材料。

磁粉芯：（钼坡莫合金、高磁通材料和铁硅铝（Kool M μ ®））：用于串联滤波器、输出扼流圈和反激变压器。

带绕磁芯：（带绕磁芯、切割 c 型磁芯、骨架磁芯和叠片式磁芯）用于大功率变压器、音频变压器、磁放大器、接地故障断路器和电流互感器。如需详细信息、技术手册或应用设计帮助，请联系：



相反，锰锌材料的磁导率可超过 15,000，但是在频率为 20kHz 时磁导率就可能开始下降。

由于初始磁导率低，镍锌材料在低频时不能产生高阻抗。噪声主要部分的频率大于 10 或 20MHz 时，它们是最常用的材料。但是锰锌材料在低频时磁导率非常大，所以非常适用于抑制 10kHz 到 50MHz 范围内的电磁干扰。因此，下文着重讨论高磁导率锰锌铁氧体。

高磁导率铁氧体可以采用多种形状：环形磁芯、E 型磁芯、罐型磁芯、RM 和 EP 磁芯等等，但共模滤波器大多绕制在环形磁芯上。

使用环形磁芯有两大原因。第一，环形磁芯比其他形状的磁芯便宜，因为环形磁芯是一整个零件，而其他形状磁芯是由两半构成。磁芯由两半构成时，必须研磨这两半的结合面，使它们平整光滑，从而使两半之间的气隙最小。另外，高磁导率磁芯一般需要额外的研磨程序，使它们更为光滑（产生镜面般的表面）。环形磁芯不需要上述额外加工过程。

第二，环形磁芯的有效磁导率比其他任何形状的磁芯都高。如果采用其他形状的磁芯，就要采用两半式结构，这样会在两半结构之间出现气隙，从而减小整个部件的有效磁导率（一般大约减小 30%）。研磨可以减小气隙，但无法消除气隙。由于环形磁芯是整体结构，不是由两半构成的，所以没有气隙，有效磁导率也不会减小。

但是环形磁芯也有一大缺点，那就是绕制成本很高。其他磁芯绕制可以使用骨架绕制既快速又经济。环形磁芯需要专用绕线机，或者必须人工绕制，这使单件绕制成本较高。不过还好，

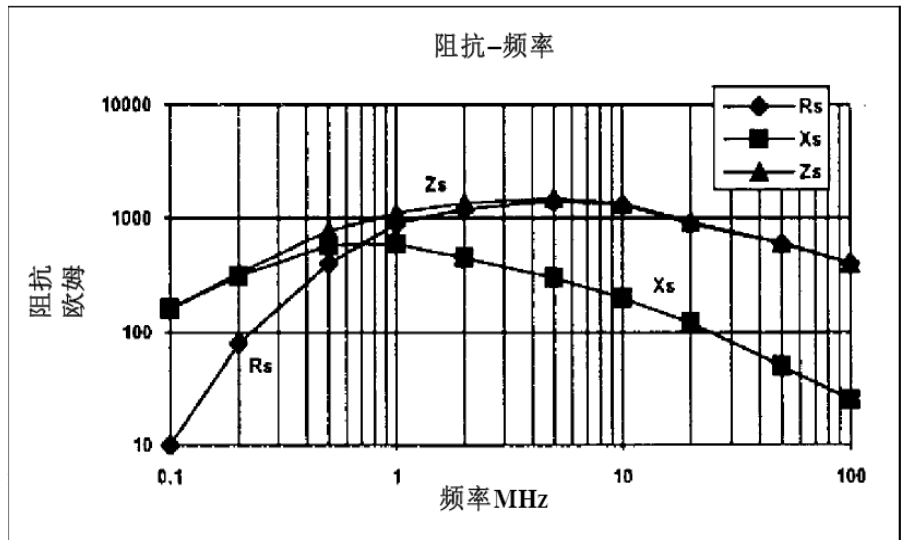


图3 阻抗-频率曲线图

绕制成本不会过高。

因此，共模电感器最好采用环形磁芯，下文着重讨论环形磁芯。

设计时需要考虑的因素

设计共模电感器所需的基本参数是输入电流、阻抗和频率。输入电流决定绕组导体尺寸。计算线径时，一般采用每平方厘米四百安培的设计值，但是根据电感器可接受的温升，也可能采用其他设计值。几乎在所有情况下都采用单股导线，因为它不但最便宜，而且因高频肌肤效应产生的铜损有助于减弱噪声。

电感器的阻抗通常取给定频率下的最小值。此阻抗与线路阻抗串联，可实现期望的噪声衰减。可惜线路阻抗大多未知，所以设计人员经常要使用 50Ω 线路阻抗稳定网络 (LISN) 测试滤波器。这已经成为测试滤波器性能的标准方法，但是其结果可能和实际

真正的一阶滤波器在超出转折频率时可使衰减在每个倍频上增加 -6dB。转折频率一般较低，足以使感抗成为阻抗的主要部分，所以可用下式计算电感： $L_s = X_s / 2\pi f$ 。

知道电感后，余下的设计工作就是选择磁芯和材料，以及计算匝数。

设计时第一步常常是选择磁芯尺寸。如果对设计有尺寸要求，那么只要能保证磁芯经绕制后仍能满足这些要求，就应选择可满足要求的最大尺寸磁芯。如果没有尺寸限制，可以随意选择磁芯尺寸。

接着是计算磁芯上要绕制的最大匝数。共模电感器需要两个绕组，通常都是单层，各绕制在磁芯一端，互相隔离。有时也使用双层和叠绕绕组，但是这两种绕组会使绕组的分布电容增大，从而降低电感器的高频性能。

因为线径已经由线路电流确定，所以根据磁芯内半径减去导线半径所得的值，可计算出内周长。每个绕组所占内周的长度除以导线直径加上绝缘厚度所得的值，就可以计算出最大匝数。

注：如果在绕组之间隔离，每个绕组一般占据 150° 到 170° 的内圆周。

计算出最大匝数后，下一步是选择材料，以及确定电感。选择材料时要考率许多因素，例如工作温度、频率范围和成本。但首先要验证所选磁芯尺寸，其他因素可稍后考虑。所以，应选择具有合适磁导率的材料，然后计算电感。

多数铁氧体制造厂家会给出所生产磁芯的电感系数 (A_L) 值，这样计算电感就方便很多。匝数和电感之间的关系是：

$$N=1000 (L/A_L)^{1/2}$$

其中：

$$N = \text{匝数}$$

$$L = \text{电感 (毫亨)}$$

$$A_L = \text{电感系数, 单位是毫亨/1000匝}$$

表 1 列出了典型设计资料，并给出使用 A_L 值进行计算的例子：

对于该例子：

选用 J 材料 (5000 μ)， A_L 值是 3020

N 为 20 匝，所以：

$$L = 1.208 \text{ 毫亨}$$

如果此最小电感对于设计来说太小，可以选择磁导率更高的材料或更大的磁芯。但是，如果计算出的电感远高于设计限制，则可以换成更小的磁芯，使用匝数更少。

设计示例：

在 10kHz 时需要 100 Ω 阻抗。输入线路电流为 3A RMS。

1. 选择线径：

电流为 3A，电流密度为 400 A/cm²，所以导线截面积是 0.0075cm²。

选择 #19 AWG，其导线截面积是 0.007907cm² (直径为 1 mm)，包括绝缘层。

2. 计算最小电感：

$$L_{\text{最小}} = 100\Omega / 2\pi (10,000\text{Hz}) = 1.59 \text{ 毫亨}$$

3. 从表中选择磁芯尺寸和材料：

选择 J-42206-TC
 $A_L = 3020 \pm 20\%$

$$\text{内径} = 13.72\text{mm} \pm 0.38\text{mm} = 13.34\text{mm} \text{ (最小)}$$

4. 计算内周长 (I.C.) 和可能实现的最大匝数：

$$I.C. = \pi \text{ (磁芯直径 - 导线直径)}$$

$$I.C. = \pi (13.34\text{mm} - 1 \text{ mm})$$

$$I.C. = 38.76\text{mm}$$

$$\text{最大匝数} = (160^\circ / 360^\circ) * (38.76\text{mm}) / (1\text{mm}/\text{匝})$$

$$I.C. = 17.2 \text{ 匝, 或 } 17 \text{ 匝}$$

5. 计算 17 匝时的最小电感：

$$A_L = 3020 \pm 20\%$$

$$N = 1000 (L/A_L)^{1/2}$$

$$17 = 1000 (L/3020 - 20\%)^{1/2}$$

$$L = 0.698 \text{ 毫亨 (最小)}$$

这个值远低于所需的 1.59 毫亨，所以必须进行修改。可改变的参数是磁芯尺寸、材料磁导率和线径。磁芯越大，内径就越大，因而在磁芯上绕制更多匝 (磁芯越大 A_L 值也越大)。材料磁导率越高，电感就越大，并且线径越小，可绕制的匝数就越多。(但这也增加铜损)

继续上面的例子，如果保持 42206-TC 的尺寸，就要为每种材料重新计算匝数。

表 1 列出了典型设计资料和使用 A_L 值的计算例子。

磁芯类型	外径 (mm)	内径 (mm)	高度 (mm)	A_L (毫亨/1000 匝)			l_e (cm)	A_e (cm ²)	V_e (cm ³)
				J 20% (5000 μ)	W 30% (10,000 μ)	H 30% (15,000 μ)			
42206-TC	22.1	13.72	6.35	3020	6040	9060	5.42	0.250	1.36

U.LV.H 啥?

J 材料 (5000 μ):N = 1000
(1.59 毫亨/3020-20%)^{1/2} = 25.6 匝

W 材料 (10,000 μ):N = 1000
(1.59 毫亨/6040-30%)^{1/2} = 19.4 匝

H 材料 (15,000 μ):N = 1000
(1.59 毫亨/9060-30%)^{1/2} = 15.8 匝

如果使用 J 材料, 那么肯定要使用较小的线径, 而原来的线径很适合 H 材料。W 材料所需的匝数只比以上第 4 步计算出的最大匝数 (17 匝) 稍大一点。

应在此磁芯上绕制试验性的绕组, 看看是否需要更小的线径。

上述选择磁芯的步骤可能非常费时。为加快选择过程, 在图 5 中给出“磁芯选择图”。使用方法很简单, 只需用 RMS 线路电流乘以所需电感 (单位毫亨), 然后在横坐标轴上找出相应点。沿此图向上移动, 一直到和适当的材料对角线相交, 然后继续向上移动, 一直到刚好到达下一条水平“磁芯的尺寸线”。这条线相应于图中纵坐标轴上的某一磁芯尺寸。图中包括了 J、W 和 H 材料。显然使用 H 材料时磁芯尺寸最小。

在此图中, 假设电流密度是 400 A/cm², 磁芯为单层绕组。如果采用其他电流密度, 需要作些推测 (J μ 在 200A/cm² 时可使用 W μ 线)。此图仅仅是为了方便选择磁芯, 最终设计可能会稍大些或稍小些。

频率特性

通过上述设计方法可获得磁芯尺寸和材料, 但是没有涉及太多其他必须考虑的细节。例如, 共模滤波器的工作频率范围非常宽 (有关电磁干扰的政府法规可达 30MHz), 所以必须了解超出转折频率的材料性能。

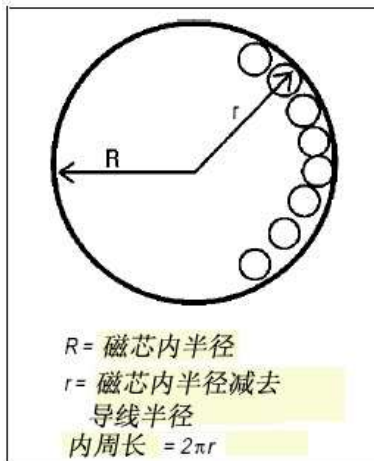


图 4. 环形磁芯内圆周

锰锌铁氧体在低频 (<500kHz) 时磁导率较高, 但随着频率增大磁导率减小。磁导率越高, 开始下降处的频率越低。但还

好, 这些材料在高频时 (超过 100MHz) 损耗也变得很大, 这些电阻损耗使电感器的总阻抗较高。图 6 和 7 说明三种高磁导率材料 (J、W 和 H) 的串联感抗 (X_s) 和串联电阻 (R_s) 如何随频率变化。图 8 是每种材料的总阻抗—频率特性。所示测量结果是在绕了 10 个线匝的 42206-TC 磁芯上取得的。

从图中可看出, H 材料在低频时明显比 W 和 J 材料优越。但是在 100kHz 到 200kHz 之间, H 材料的磁导率降低很多, 使总阻抗远低于 W 材料的阻抗。

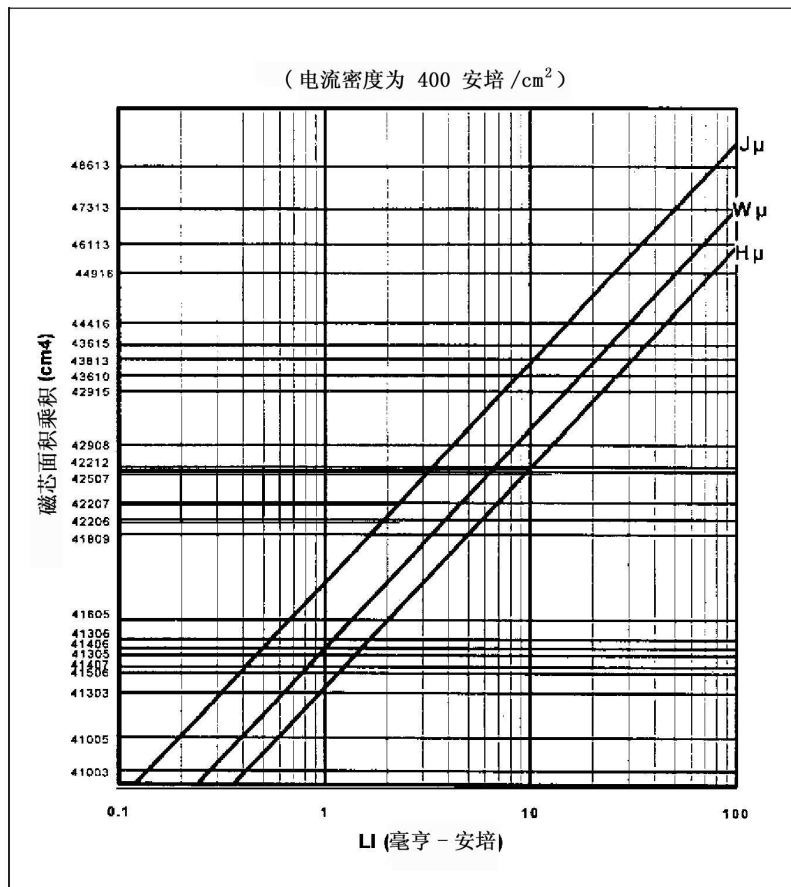


图 5. 共模滤波器磁芯选择图

所以达到 2MHz 之前W 材料阻抗最高，而 2MHz 之后J 材料阻抗最高。如果噪声频谱已知，此类曲线就能帮助设计人员选择适当材料。

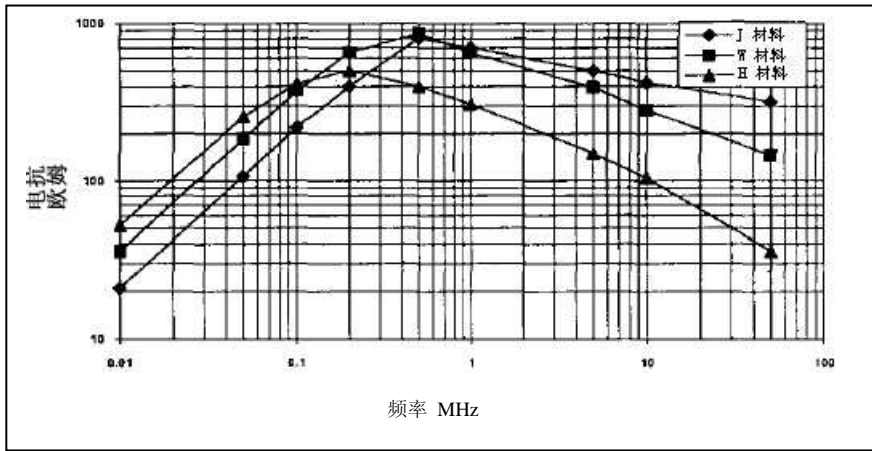


图 6. 串联电抗—温度。

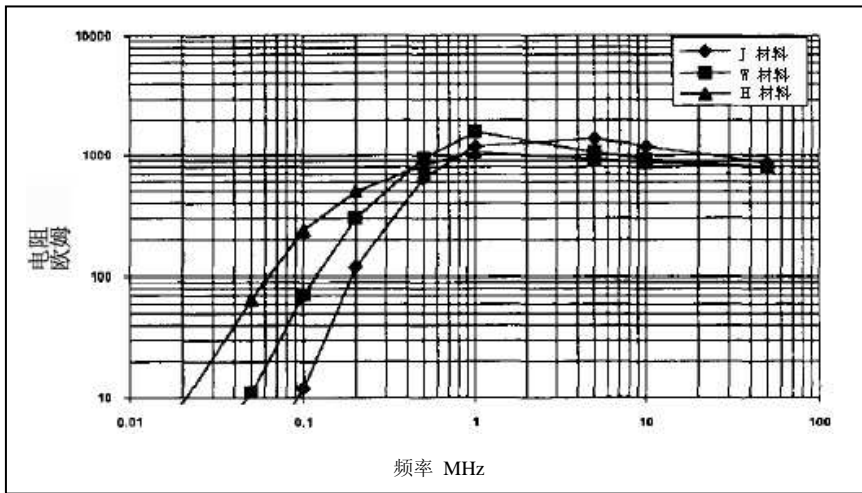


图 7. 串联电阻—频率。

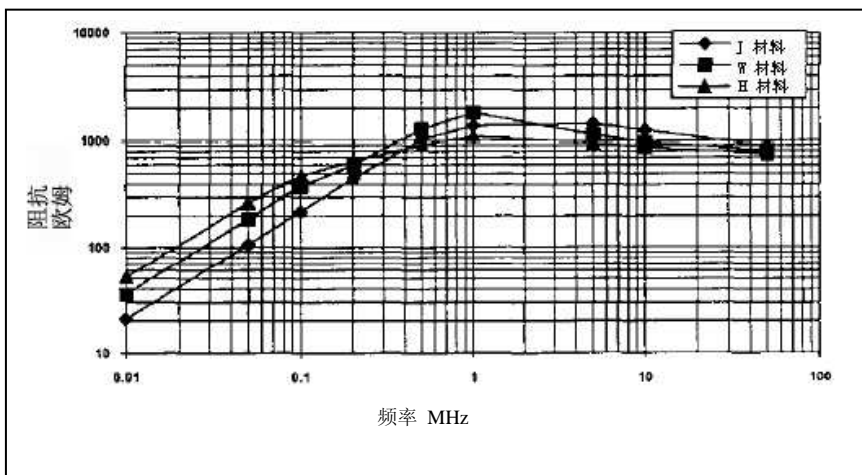


图 8. 总阻抗—频率。

多数铁氧体材料性能受温度影响。共模扼流圈设计人员主要关注对磁导率和磁感应强度的影响。随着温度升高，多数材料磁导率增大。图 9 是 W 材料的曲线。同样，温度低于 25°C 时预计磁导率会下降。设计最小滤波器电感时，必须考虑到最坏情况的磁导率波动。温度还影响饱和磁感应强度。图 10 说明 W 材料的磁感应强度一般随着温度升高而减小。可用磁感应强度减小使磁芯更容易饱和。

另外，所有磁性材料都有居里温度，在此温度下材料失去磁性。高磁导率铁氧体的居里温度通常在 120°C 到 175°C 之间。必须知道居里点在哪里，必须使磁芯工作温度低于居里温度。铁氧体不会因超过居里温度而损坏（例如在焊接期间），但是如果在工作期间达到居里温度，铁氧体会失去磁性。

最后，铁氧体环形磁芯通常涂有绝缘涂层（即聚对二甲苯或环氧树脂等），使磁芯和绕组互相绝缘。这些涂层有自己的额定温度，可能因受热或接触装配期间使用的强洗涤剂而受损。查找有关磁芯涂层的资料，以及前面提到的其他材料性质时应注意参考的制造厂家的数据手册。

铁氧体材料容易产生机械应力，包括压应力和张应力。在合适的应力作用下，高磁导率材料特别容易受影响，而且磁导率可能产生严重的有害变化。磁芯应力有两大原因：密封剂和绕组。

如果密封剂的热膨胀系数和铁氧体不同，就会导致应力。

所选密封剂的热膨胀系数应尽可能和铁氧体接近，即使很小的差别也可能引发问题。所以，可以使用一种补救措施，就是在封装磁芯之前，在磁芯上加一层 RTV 之类的弹性材料。温度波动期间密封剂产生应力时，这种弹性涂层可以分散一些应力。

在磁芯上绕制导线时会产生绕组应力。共模电感器通常绕有相当重的导线，这些导线必须拉紧才能很好地缠绕在磁芯上。因此产生的应力可能非常大。通过温度循环一般能消除大部分绕组应力。温度循环范围应为 -55°C 到 $+150^{\circ}\text{C}$ ，在每一端温度下都要保持 30 分钟到 1 小时。变化速度应仅为每分钟几度，防止对铁氧体产生热冲击（裂解）。在此过程中，铜线会膨胀和收缩，从而消除施加在磁芯上的力。

为说明应力对铁氧体的作用，对磁导率不同的四个环形磁芯（ 3000μ 、 5000μ 、 $10,000\mu$ 、 $15,000\mu$ ）施加张力，并测量它们的电感。图 11 中是测量结果，以占初始磁导率的百分比对应每单位磁芯截面积上的力的形式给出。不出所料， $15,000$ 磁导率材料的磁导率减小最多，而 $3,000$ 磁导率材料的磁导率减小最少。

磁芯饱和

一般认为共模电感器不会饱和，磁芯中的差模磁通抵消掉了，而共模磁通因为非常少可以忽略。但这并不完全对。其他人^[4,5]已经证明一部分差模磁通经绕组离开了磁芯。这种漏磁通和导线中的电流以及绕组的漏感成比例。漏磁通离开磁芯而没有抵消掉，所以漏磁通有可能在导线电流很大时使磁芯材料饱和，或至少使工作点从 BH 回路的原点偏移至磁导率增量（ $\mu\Delta$ ）较小的点。磁导率减小导致串联感抗（ X_S ）成比例减小，还会导致有害的噪声通过滤波器。

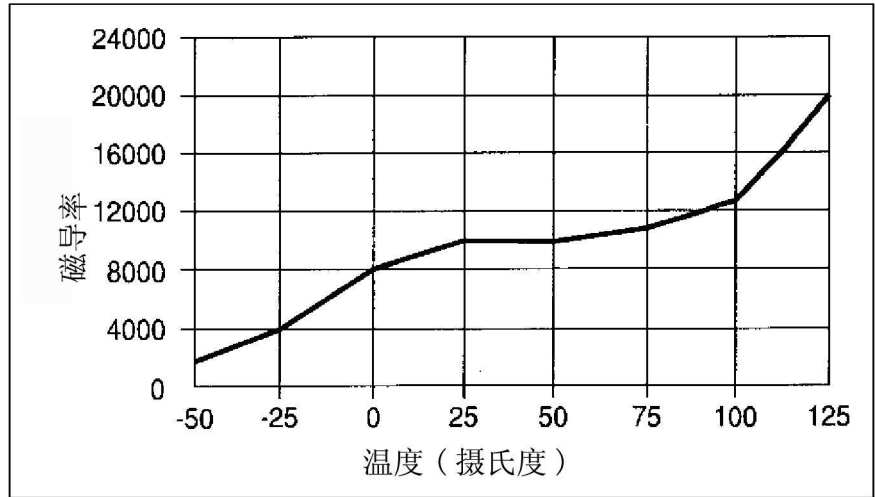


图 9. 磁导率—温度

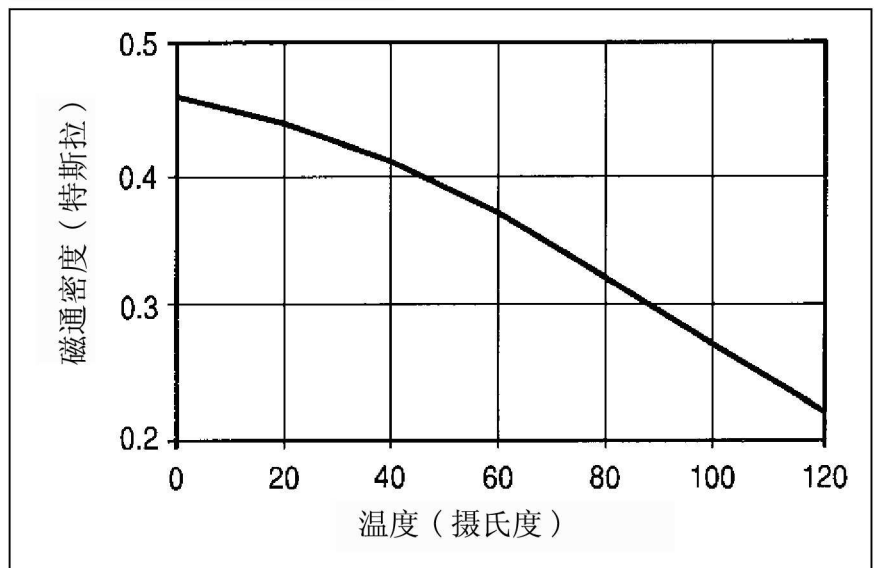


图10. 磁通密度—温度

磁芯饱和问题在不含校正功率因数的开关电源中会加剧。电容器充电电流较高，而且振幅因数比 RMS 电流大 3 到 4 倍时，很容易使磁芯饱和，同样也会使共模噪声通过（图 12）。另外，正如前面提到的，工作温度高会降低饱和磁感应强度，从而加剧这些问题。

为说明磁芯饱和的影响，将三个磁芯（J、W 和 H 三种材料各一个磁芯）绕制成共模滤波器形式。每个磁芯都有两个 15 匝绕组，导线采用 #18 AWG。

第三个 10 匝绕组放在磁芯上，并和电感分析仪相连。

然后将共模绕组串联起来，于是通过它们的任何电流都会产生相反磁通。接着，将这些绕组接到直流电源上。在直流电流从 0 增大到 15A 过程中，测量 10 匝绕组的电

感。直流电流模拟通过共模电感器的瞬间线路电流。如图 13 所示，随着电流增大，所有磁芯电感都减小。J 和 W 材料在 10 安和 15 安时减小的百分比相同（分别为

10% 和 24%），而 H 材料减小的稍多一些（分别为 15% 和 35%）。

这些结果说明共模电感受漏感影响，而且在峰值电流下磁芯可能饱和。如果发现电感器出现局部磁芯饱和现象，就可能需要换用磁导率更高的材料。由于磁导率更高，因而可通过增大起始电感来抵消磁芯饱和的影响，如图 13 所示，或者通过减小匝数而降低饱和度，从而减小漏感。采用不同磁芯尺寸和绕制技术也可以减小漏感。

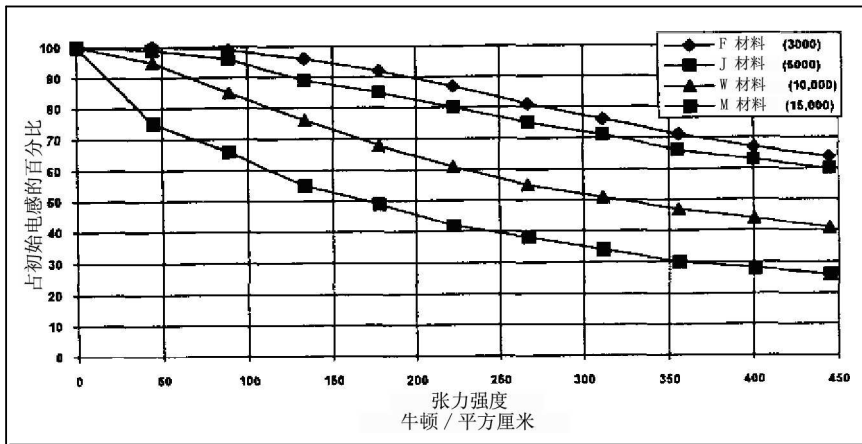


图 11. 电感—张力强度。

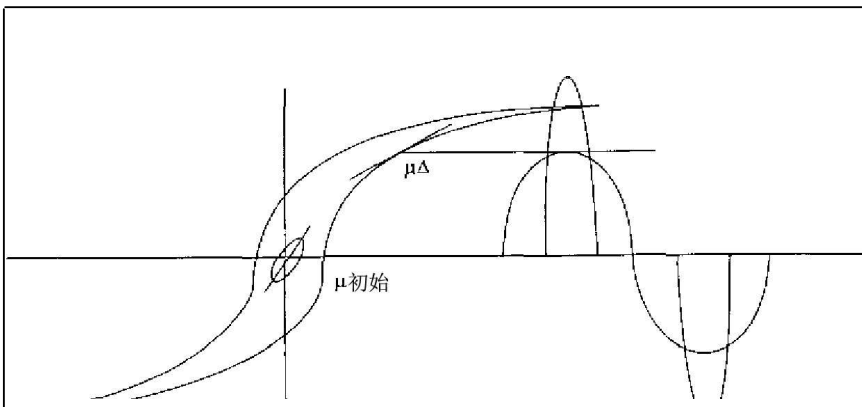


图 12. 因大的振幅因数导致的磁芯饱和 B-H 曲线。

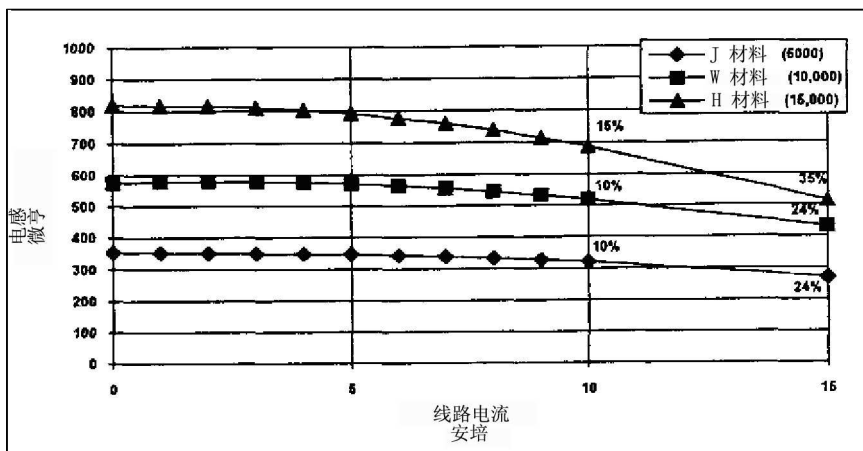


图 13. 电感—导线电流。

参考文献

1. MAGNETICS 技术公报, FC-S2, 1994.
2. MAGNETICS 铁氧体磁芯产品目录, FC-601, 1994.
3. Srebranig、Steven 和 Leonard Crane, 共模滤波器设计指南, Coilcraft Publication 出版公司, 1985.
4. Nave、Mark, 共模电感器建模, 出版商和日期未知。
5. Nave、Mark, 一种用于诊断传导干扰的新式差模抑制网络, IEEE, 1989.
6. Crane、Leonard 和 Steven Srebranig, 共模滤波电感器分析, Coilcraft Publication 出版公司, 1985.
7. Knurek、D.F., 减少开关电源中的电磁干扰, IEEE, 1988.

©1995, 摘自 PCIM 杂志(1995 年 7 月刊重印)。