

磁芯损耗

磁芯损耗是磁芯材料内交替磁场引致的结果。某一种材料所产生的损耗，是操作频率与总磁通摆幅(ΔB)的函数。磁芯损耗是由磁芯材料的磁滞、涡流和剩余损耗引起的。

每个材料页面都有显示每种材料的磁芯损耗曲线及与曲线配合的公式。这些资料是用卡拉克-希斯瓦特计(Clark-Hesse V-A-W Meter)所测得的正弦波磁芯损耗算出的，这些曲线的典型公差为 $\pm 15\%$ 。各种频率的磁芯损耗作为一个 AC 磁通密度峰值的函数时，以每立方厘米多少毫瓦特(mW/cm^3)显示。

查阅 [Core Loss Comparison Table](#) 提供了每种材料在某一特定 AC 磁通密度下相应于不同频率的磁芯损耗(单位为 mW/cm^3)的快捷比较，各种材料在其他磁通密度下的相对磁芯损耗，会随每种材料对所操作的 AC 磁通密度反应而不同。

用于计算在某一交变信号下的 AC 磁通密度峰值的公式，是以每半周平均电压的国际单位(SI Unit)为依据：

$$B_{pk} = \frac{E_{avg}}{4 A N f}$$

Where: B_{pk} Peak AC flux density (tesla)
 E_{avg} Average AC voltage per half-cycle
(volts)
A Cross-sectional area (m^2)
N Number of turns
f frequency (hertz)

若用 cgs 单位时，下面公式常用于正弦波讯号，其中电压以 rms 值计算：

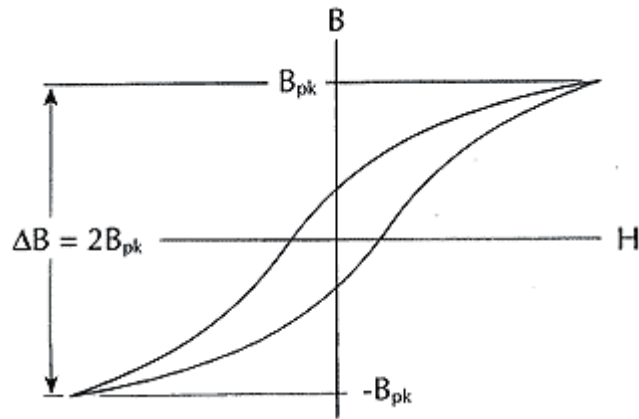
$$B_{pk} = \frac{E_{rms} 10^8}{4.44 A N f}$$

Where: B_{pk} Peak AC flux density (gauss)
 E_{rms} RMS AC voltage (volts)
A Cross-sectional area (cm^2)
N Number of turns
f frequency (hertz)

因数 10^8 是因为要将 B_{pk} 由特斯拉(Tesla)转为高斯(1 特斯拉= 10^4 高斯)及将横截面积(A)由 m^2 换算为 cm^2 ($m^2=10^4 cm^2$)的结果。常数由 4 转为 4.44，是基于正弦波的波形，由于波形因数等于 rms 值除以半周平均值，所以，正弦波的波形因数是 1.11 ($\pi/(2\sqrt{2})$)。方形波的波形因数为 1.00。

这一公式是用于测定 AC 磁通密度的峰值(B_{pk})，与磁芯损耗曲线并用，在正弦波的应用上，例如 60Hz 的差模线性滤波电感器，电源谐振电感器及功率因数校正抗流器的基本线路频率讯号方面均适合。

在这状态下，磁芯产生一种 AC 磁通密度峰与峰之间的摆幅(ΔB)，这一摆幅是上述公式所计算出的 AC 磁通密度峰值(B_{pk})的两倍，如下图所示：



在总损耗主要是由磁芯损耗而不是铜损耗引起的电感器用途上，可用磁导率较低的磁芯材料改进总体的表现。这在高频谐振电感器方面是典型的方法。

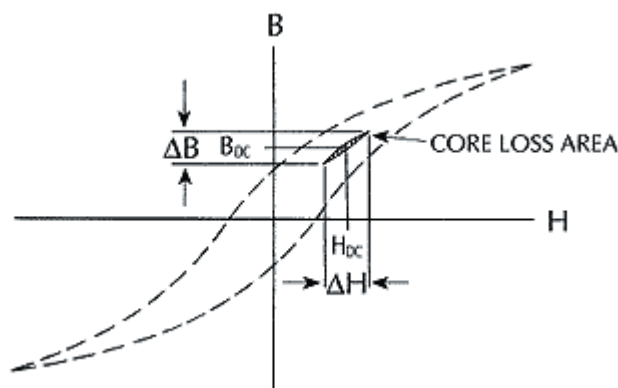
采用磁导率较低的磁芯材料时(例如材料-2, $\mu = 10$)，则需另加圈数来取得所要求的电感值。增加圈数固然会增加线圈损耗，但也会降低操作的 AC 磁通密度，令磁芯损耗减少。

在铁氧结构内造一个特定的气隙，也可降低磁芯的有效磁导率，从而降低操作磁通密度，但此种气隙可以造成严重的局部气隙损耗问题，当频率高于 100 kHz 时尤其显注。在很多例子里，气隙损耗都会超过磁芯损耗。由于铁粉磁芯里的气隙是均匀分布的，所以这类局部气隙损耗基本上是不存在的。

要显示出磁导率较低的材料在磁芯损耗方面的长处,我们考虑一个设定在某值的电感器.用材料-2 ($\mu_0 = 10$)比用材料-8 ($\mu_0 = 35$)的圈数要多 87%，这个较大的圈数令材料-2 的 AC 磁通密度只有材料-8 的 53%左右。结果用材料-2 的电感器的磁芯损耗，只有材料-8 的四份之一。一般情况下建议以材料-2, -14 作谐振电感器用途。

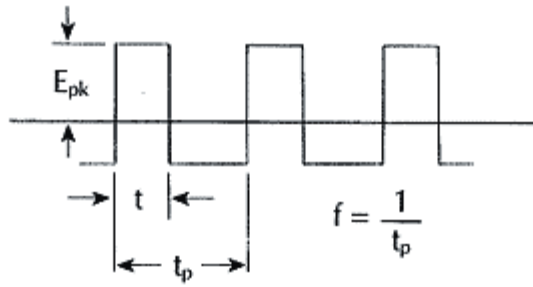
铁粉磁芯在开关电源中最普遍的用途之一是 DC 输出扼流圈，在这用途上,DC 电流及由方波电压所引起的少量纹波电流，会在线圈造成偏置。此 DC 电流会产生一种 DC 磁通密度，而方形波电压则产生一种交变(AC)磁通密度。

磁性材料上的直流偏置，会引至较次要的交变 BH 回线位移，但不会对磁芯损耗造成明显影响，只有交变的磁通密度(ΔB)才能产生磁芯损耗。此种情况如下图所示:



在相同的频率和磁通密度总摆幅(ΔB)下所作的磁芯损耗测量，可得知方形波比正弦波的磁芯损耗略高。

下图显示了一典型的方波电压在一个开关电源中经过电感器时的情况:



由于伏特-秒(Et 积)在一个周期内开与关的部分必须在稳定状态下相等，因此，计算一个方波(不一定是对称的)的磁通密度峰峰值，以 cgs 为单位的公式如下：

$$\Delta B = \frac{E_{pk} t 10^8}{A N}$$

- Where: ΔB Peak to Peak flux density (gauss)
 E_{pk} Peak voltage across coil during "t" (volts)
 t Time of applied voltage (seconds)
 A Cross-sectional area (cm²)
 N Number of turns

同样用途下，也可以用以下的公式(以 cgs 为单位)来计算：

$$\Delta B = \frac{L \Delta I 10^8}{A N}$$

- Where: ΔB Peak to Peak flux density (gauss)
 L Inductance (Henries)
 ΔI Peak to Peak ripple current (amps)
 A Cross-sectional area (cm²)
 N Number of turns

在单端应用中，例如反激变换，需要用前面提到的总磁通密度峰峰值公式，来检验在磁芯材料的最大磁通密度限值内的动作以防止磁饱和。

但是，因业界习惯于以对称零点的操作状态下的 AC 磁通密度峰值的函数来表示磁芯损耗，所提供的磁芯损耗曲线假设 $B_{pk} = \Delta B/2$ 。所以，磁芯损耗是以在全周期的频率下，用磁通密度峰峰值的一半从图表中得出的，这里的 $f = 1/t_p$ 。

下列的公式应用于计算 AC 磁通密度峰值，此值与磁芯损耗曲线图连用，可确定应用于各种 DC 偏置电感器的铁粉磁芯的高频磁芯损耗：

$$B_{pk} = \frac{E_{pk} t 10^8}{2 A N} = \frac{L \Delta I 10^8}{2 A N}$$

Where: B_{pk}	Peak AC flux density (gauss)
E_{pk}	Peak voltage across coil during "t" (volts)
t	Time of applied voltage (seconds)
L	Inductance (Henries)
ΔI	Peak to peak ripple current (amps)
A	Cross-sectional area (cm ²)
N	Number of turns

在有功功率因数校正升压拓扑的电感器中，不存在单稳态波形。而是在高频时（典型为 100 kHz），通过电感器的电压峰值(E)和动作时间(t)，在整个电网频率(50 或 60Hz)周期不断变化。在这状态下的磁芯损耗，是电网频率周期内各脉冲的平均时间磁芯损耗