

# 新型磁性材料和磁芯类型在电源转换器与滤波器中的应用

The application of new magnetic material and magnetic core type in power converter and filter

鲁思慧

**摘要：**本文将针对应用新型磁性材料和磁芯类型构建出的电感元件以满足电源转换器与滤波器高性能要求的问题作研讨分析。

**关键词：**磁性材料，开关频率，转换器，铁氧体，阻抗

**Abstract:** In this paper, a discussion and analysis is made on the application of the new magnetic material and the inductance components constructed by the core type to meet the high performance requirements of power converter and filter.

**Keywords:** magnetic material, switch frequency, converter, Ferrite, impedance

## 0 前言

未来 10 年将进入人工智能时代。如今人工智已开始融合移动互联网、物联网、大数据构建共享智能生态体系。与此同时，对人工智技术与设备的电源转换器及其滤波器的要求也愈来愈高。它表现为：其一是电源转换器的小型化要求，开关频率高的电源需求增加；其二是滤波器在减小电磁干扰及系统阻抗的研发需求也增加。对此伴随而来的是如何为实现小型化，提高电源电路的开关频率，构建出电感元件的挑战也日益增高。随着新材料与工艺的开发及提高，则新型磁性材料和磁芯类型的应用也与时俱进。它是应对上述挑战的有效选择，这是在电磁技术及其材料应用领域中的热门课题。

据此本文将针对如何应用新型磁性材料和磁芯类型构建出高性能的电感元件以适用电源转换器与滤波器高要求的问题作研讨分析。

## 1 金属电感与铁氧体电感是适应电源的发展的有效选择

随着电源的发展以及包括材料在内的金属电感与铁氧体电感的应用特征日益俱增。这是由于与近年来电源小型化及开关频率要求增高的引发密切相关。

\* 问题的提出 为实现小型化，提高电源电路的开关频

率，使用电感值小的电感、即尺寸小的电感的要求增加了。

众所周知，IC 随着工艺的微细化发展，电源电压也越来越低，而电源电流日益增大，也被表述为“低电压大电流化”。关于电感，要流过大电流，需要电感值小，作为电源电路，要以小的电感值工作，需要开关频率高。而原本很难实现大电感值的金属电感，现只要在电感值小的条件下，则在特性和尺寸两方面均可具有优势。从下图 1 铁氧体材料所构建的电感和金属材料所构建的电感对开关频率 / 电感值 / 电流的覆盖范围示意图可以得到验证。

\* 铁氧体材料与金属材料均可构建有电感值小的产品，它们具有何种优势？

为此先说明铁氧体材料与金属材料的特征区别（见表 1 所示）。

首先，金属的磁导率  $\mu$  低，因此是电感值很难提高的材料。然而，饱和磁通密度高，即直流叠加容许电流高，饱和也非常平缓。因此，如果直流叠加容许电流相同，则可比铁氧体的尺寸小。此外，还具有电感值对温度几乎无变化的特性，其频率特性最近已经显著改善，可支持高频率。最后，材料费是  $\Delta$  标记，这与最近需求高涨有关，已经越来越水涨船高了。作为很大的一个优点，金属材料的饱和磁通密度高，因此可实现具有优异叠加特性的电感。而要有效利用这一优点，必须要改善磁导率  $\mu$  低、电感值不易

表 1 所示为铁氧体材料与金属材料特征区别

	材料	磁导率	饱和磁通密度	电感温度特性	频率特性	绝缘	材料费	生产安全性
铁氧体	Ni-Zn	○	△	○	○	○	○	○
金属	Fe类	△	◎	◎	○	△	△	○
相关参数		L值	额定电流大小	设备温度	开关频率	输入输出压差	成本	成本

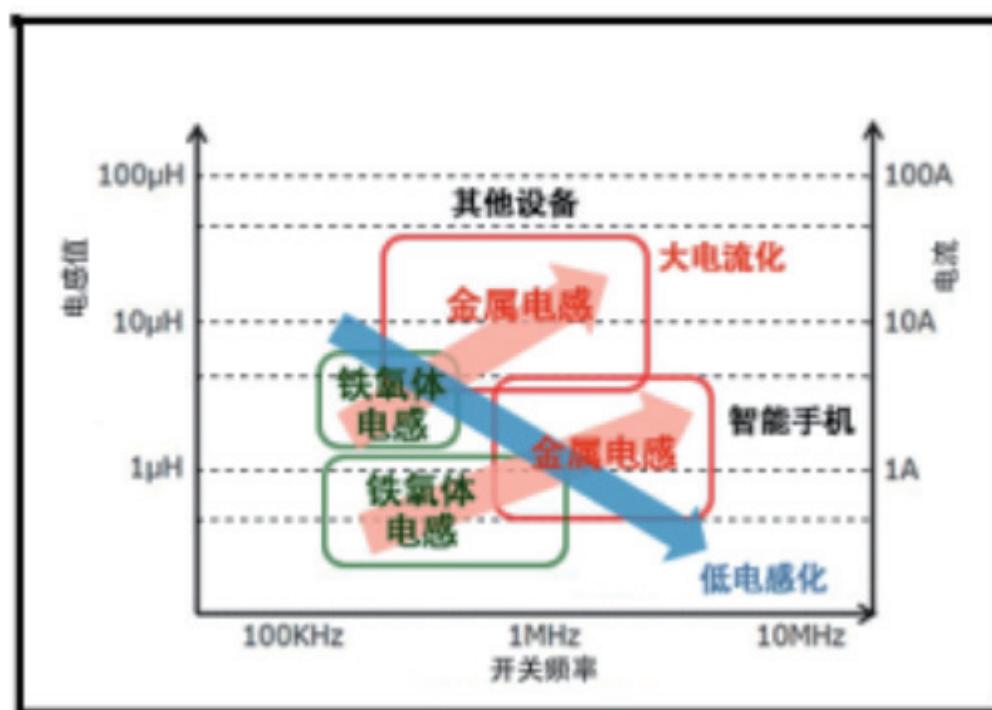


图 1 铁氧体材料所构建的电感和金属材料所构建的电感对开关频率 / 电感值 / 电流的覆盖范围示意图

提高这一点不足。

\* 据此，改善金属复合材料的金属磁性压粉材料脱颖而出。针对一般的金属复合材料，开发出称为“金属磁性压粉材料”的独有材料。金属磁性压粉材料与以往的金属复合材料相比，是具有更高的磁导率  $\mu$ ，具有更高的绝缘性能的材料。金属电感 (MCOIL™) 除采用金属磁性压粉材料外，是具有实用性电感值与优异叠加特性的金属电感。下图为金属电感 (MCOIL™) 的特征。

\* 这种独有材料具有优异的绝缘性能 因为同是材料相关内容，所以在此介绍一下。图 2 (b) 为金属复合型材料与采用金属磁性压粉材料的金属电感 (MCOIL) 的特性比较及改善点。

从图 2 (b) 可知，金属复合型铁粉通过铁粉间的有机树脂来绝缘。而 MCOIL™ 的铁粉间由无机氧化膜覆盖，相互绝缘。金属复合型的绝缘树脂尤其在高温下容易劣化，绝缘性能也随之恶化。于是 Q 劣化，损耗显著增加。铁粉内产生的涡流成为损耗，铁粉直径变大则涡流也增大，损耗也增加。此时，因树脂劣化而导致铁粉间的绝缘劣化，一些铁粉成为一个块，就是产生较大涡流的原因。覆盖 MCOIL™ 铁粉的氧化膜与有机树脂不同，是暴露于高温下也几乎不会产生劣化的材料。因此，金属电感的绝缘性能劣化、也就是最终的 Q 劣化得以大幅改善。此外，使用这种氧化膜的方法与磁导率  $\mu$  的提升也息息相关。

\* 不同的特性及对 DC/DC 转换器效率的影响

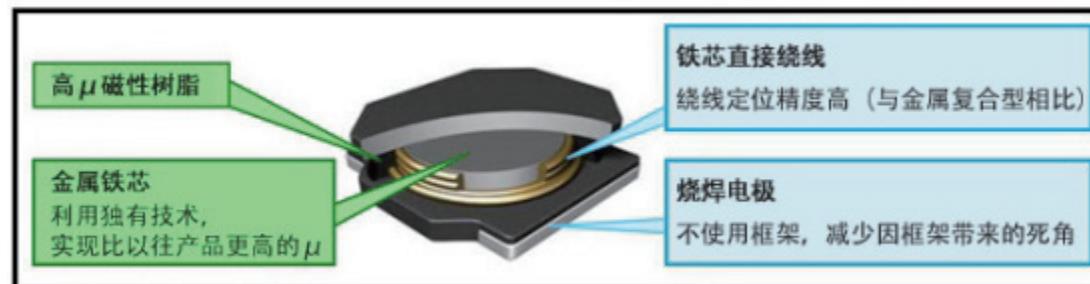


图 2 (a) 为采用金属磁性压粉材料的金属电感 (MCOIL) 的特征示意图

类型	金属复合型	MCOIL™
外观		
材料		
高温下的绝缘可靠性	树脂劣化导致绝缘劣化 (碳化?)	无机材料的绝缘膜带来高绝缘可靠性
高温下的Q可靠性	树脂绝缘劣化导致Q劣化 	因氧化膜的可靠性不易发生Q劣化 

图 2 (b) 为金属复合型材料与采用金属磁性压粉材料的金属电感 (MCOIL) 的比较特性

从试验数据可知：这是 MCOIL™与其他公司的金属复合标准型 (STD) 和高 Q 型材料在实施 125℃与 150℃的高温存储试验后的结果，是按绝缘电阻、电感值、Q 变化相对试验的。

其一、绝缘电阻的变化：在经过 500 小时后的时间点，金属复合型在 125℃试验中劣化到约百分之一、在 150℃试验中劣化到万分之五以下，劣化明显，而 MCOIL™几乎没有劣化；其二、电感值的变化：金属复合型可见轻微劣化趋势，而 MCOIL™则非常稳定；其三、Q 的变化：金属复合型在 125℃条件下劣化较缓和，但在 150℃条件下随时间推移劣化越来越严重，即呈现绝缘劣化、Q 也劣

化的结果。

总之，可以明确的是，温度越高，影响越大。这是高温存储试验，因此没有自身发热。然而在实际的电路中，除环境温度影响外，自身发热也是导致劣化的主要原因。这些电感劣化对 DC/DC 转换器特性产生怎样的影响呢，来看效率比较数据。下图 3 为使用高温放置试验前后的电感对 DC/DC 转换器效率比较的影响。

图 3 是将实施 150℃ / 500 小时高温存储试验前的试样与实施后的试样装入实际的 DC/DC 转换器电路后的测量效率结果。实线是试验前的数据，因初始值的不同而效率有所差异，不过每种类型都发挥了相应的作用。橘黄色

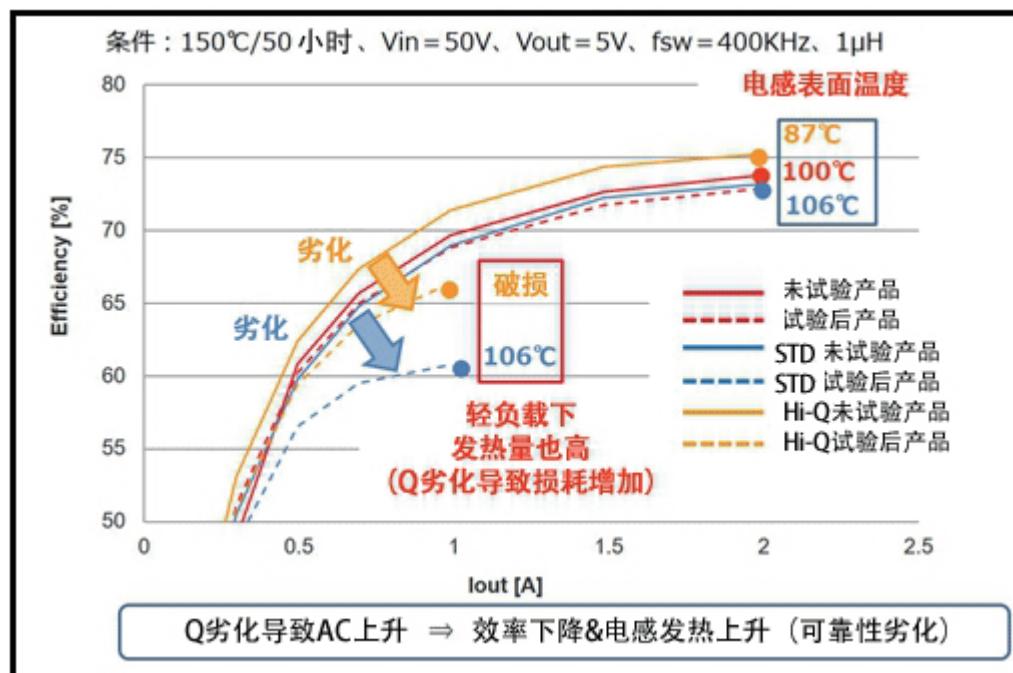


图 3 为使用高温放置试验前后的电感对 DC/DC 转换器效率比较的影响

的金属复合型为 Q 较高的类型，因此损耗少效率高。顺便提一下，输入输出条件是高降压比、相对严苛的条件。其他的确认事项还有 Iout 为 2A 时的电感表面温度。

图 3 中虚线表示使用 150°C / 500 小时高温存储试验后的电感的结果。MCOIL™ 可见些许效率降低，但毫无疑问可以实现 2A 的输出。两种金属复合型，蓝色 STD 品的表面温度在 1A 的时间点与试验前 2A 时相同，橘黄色 Hi-Q 品在 1A 的时间点产生破损。均如前所述，因 Q 劣化而效率下降，导致电感发热增加，进而助长 Q 和可靠性的劣化。

由此可知，通过这样的改善，金属电感（MCOIL）的优异特征部分可以用在电源电路中了。

\* 那金属材料的 MCOIL™ 与铁氧体材料的电感又何区别及应用

首先是直流叠加特性（见下图 4 所示），可通过以下数据作分析。

其一是 MCOIL 实现小型化：图 4 左边是铁氧体材料所构建电感的数据。以前使用过的磁性树脂的非屏蔽电感，是饱和特性比较缓和的类型。图 4 右边是金属磁性压粉材料的金属电感。两者均可流过超过 5A 的直流叠加电流，铁氧体材料的电感值缓和下降，金属材料的电感下

降非常缓和。在特性比较中，可以说几乎相同。通过该数据说明的是，要得到同等的直流叠加特性，在该例中相对于铁氧体的尺寸为 6×6mm×2，金属电感尺寸仅需 4×4mm×1.2 即可。面积比较结果则金属电感仅为 44%（一半以下），当然还可以降低高度。也就是说，有助于实现小型化。

其二是 MCOIL 稳定的温度特性：铁氧体这边随着温度升高，电感值下降的坡度越来越陡。而金属这边无论温度怎样，直流叠加特性几乎不变，可以说是对温度变化具有很稳定的特性。铁氧体随着温度升高而易于饱和，因此需要考虑实际使用时的温度条件进行设计。而金属虽然电感值会因 DC 偏置电流的增加而减少，但设计时关于饱和几乎无需考虑温度的影响，这是很重要的要点。

其三是标称电感值与直流叠加饱和电流和温度上升容许电流的关系：从获得几乎相同的直流叠加特性的尺寸的电感比较举例可知，到标称电感值 5μH 左右之前，铁氧体和金属几乎相同，当金属型当电感值提高时，直流叠加饱和电流比铁氧体小。换句话说，当电感值高时，铁氧体的特性更具优势。这在右侧的温度上升容许电流也是同样的。

其四是铁氧体有更高的 μ：前面也提到过，金属型的

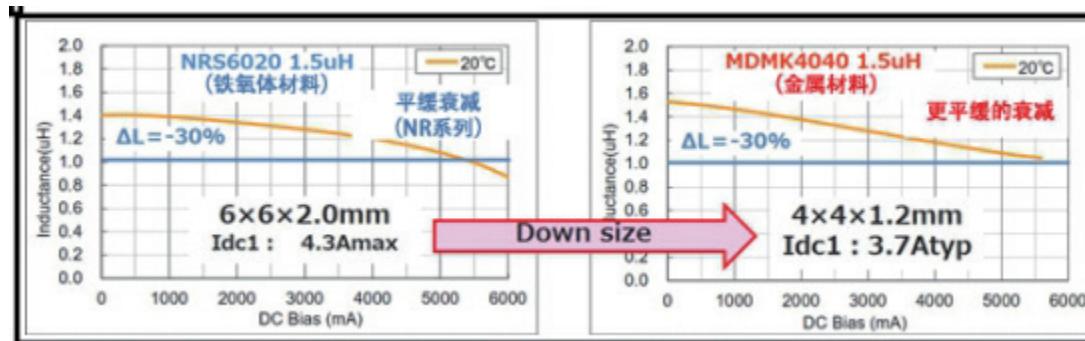


图 4 为铁氧体材料的电感与金属材料的 MCOIL™ 的直流叠加特性之区别

$\mu$  小，电感值很难提高。MCOIL™ 虽然通过材料的改善，实现了比金属复合型更高的  $\mu$ ，然而还是不及铁氧体。金属型也可通过增加卷线来提高电感值，但会导致  $R_{dc}$  增加，发热增加，因此并不现实。现实情况是， $4.7\mu F$  可能是享受金属型好处的界限。

\* 在开关电源方案中的应用 这样说来，对于最先提到的负载的低电压大电流化与小型化要求，电源端希望使用较小电感值的小型电感。因此，在致力于开关频率高速化的情况下，可以说金属电感正合适吧。这是为充分发挥金属电感具备的优良特性而进行改善，面向高速开关电源市场的做法。这也是为了让更多人了解现在的金属电感是对高速开关电源的优异解决方案。

## 2 采用性能优异的磁性材料和磁芯类型构建电感是设计滤波器的关键

如何正确使用优异磁性材料和磁芯类型，以减小电磁干扰这对于确保滤波器的设计尤为关键。与此同时了解系统阻抗对于确定滤波器类型很重要。

\* 从何而起 众所周知，滤波器采用了电阻 (R)，电感 (L) 和电容 (C) 等电子元件，来产生覆盖设计频段需要的阻抗不连续性。电阻、电感或电容能够单独作为滤波器，但是将它们组合在一起可以产生更好的衰减。LC 类型（见图 5 所示）比 RC 类型的衰减性能更好，并由于其低损耗特性经常应用于电源回路，但是所有的 LC 滤波器都是谐振器，它们会在某些频率上产生增益，以致需要对其进行仔细的设计，并充分考虑它们实际的源和负载阻抗，以确保在整个设计频段上都满足衰减要求。为此采用性能优异的磁性材料和磁芯类型构建电感 (L) 是设计滤波器的关键。

\* 软铁氧体的应用 所有电感 (L) 都受到射频谐振的影

响，并只在不高于它们第一个（平行）谐振点频率的范围内才有效。但是软铁氧体在射频频点呈现阻性，因此不会产生射频谐振，这有助于使采用它们的滤波器在射频频段具有更好和更能预测的性能。例如，典型的直径为几 mm 的小型软铁氧体，将在直流具有 1 微亨电感和  $0.1\Omega$  的阻抗，但是从 30MHz 到 1GHz 或更高频率，它将具有  $80\Omega$  的电阻（没有感性电抗）。有的导线式软铁氧体在 100MHz 频率具有  $1K\Omega$  以上的电阻，但是更宽范围的表面安装设备 (SMD) 软铁氧体在 30MHz 到 2GHz 的可选频段具有  $1K\Omega$  的电阻。

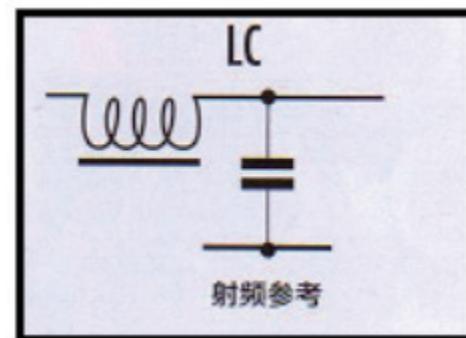


图 5 所示为 LC 滤波器类型

软铁氧体器件具有很多名字，如射频抑制器、干扰抑制器、干扰扼流圈以及屏蔽磁珠等。图 6 (a) 所示为大量可用的软铁氧体磁芯。图 6 (b) 显示了一些可用的线缆安装软铁氧体部分。图 7 包括标准的 VGA 电缆，显示所有的 VGA 电缆都需要在两端安装标准软铁氧体共模扼流圈，因为它们连接的产品需要满足国内外标准的发射规范。

而软铁氧体磁芯构建的实例见图 6 (b) 所示。它显示了用于共模扼流圈的环状软铁氧体磁芯，此时 41/2 的线圈缠绕在它周围。用标准的 VGA 电缆，都需要在两端安



图 6 (a) 为大量可用的软铁氧体磁芯

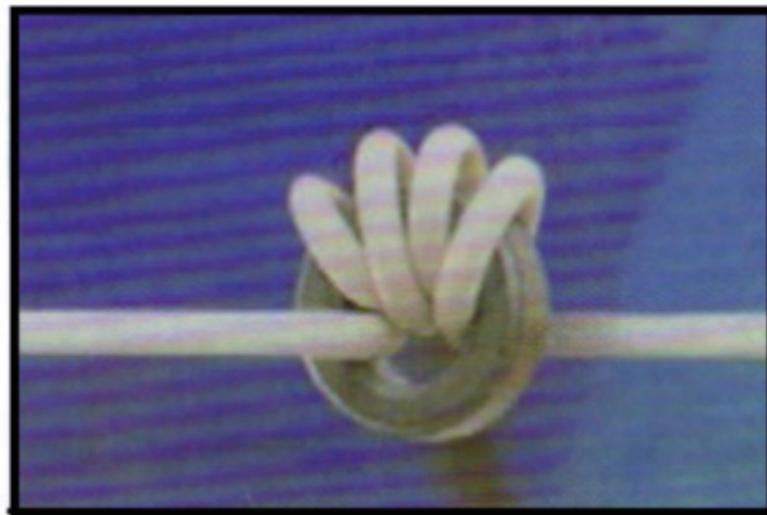


图 6 (b) 显示了用于共模扼流圈的环状软铁氧体磁芯

装标准软铁氧体共模扼流圈，其它们连接的产品需要满足国标国内的发射规范。

而滤波器在高频的衰减由输入导体和输出导体之间的杂散耦合决定，因此共模扼流圈的输入和输出导体，要尽量相互远离，这点至关重要，这可从图 6 (b) 中能够清楚看到缠绕方式，只缠绕了一半的磁芯，输入和输出电缆分处两边。

在软铁氧化物的应用上，圆柱形分裂模式（见图 6 (c)）是一种有用的软铁氧化物元件，将其安装在塑料夹壳体内，它可用于圆线缆及扁平线缆类型。

此类分裂铁氧化物很容易用在线缆上，并且电磁兼容工程师倾向于将许多这种元件用在线缆上，以便进行差模和共模的干扰诊断，隔离和解决电磁兼容问题。夹在整个线缆或线缆束上（包括所有发射和回流导体）的圆柱形铁氧



图 6 (c) 为多种圆柱形软铁氧体分裂模式

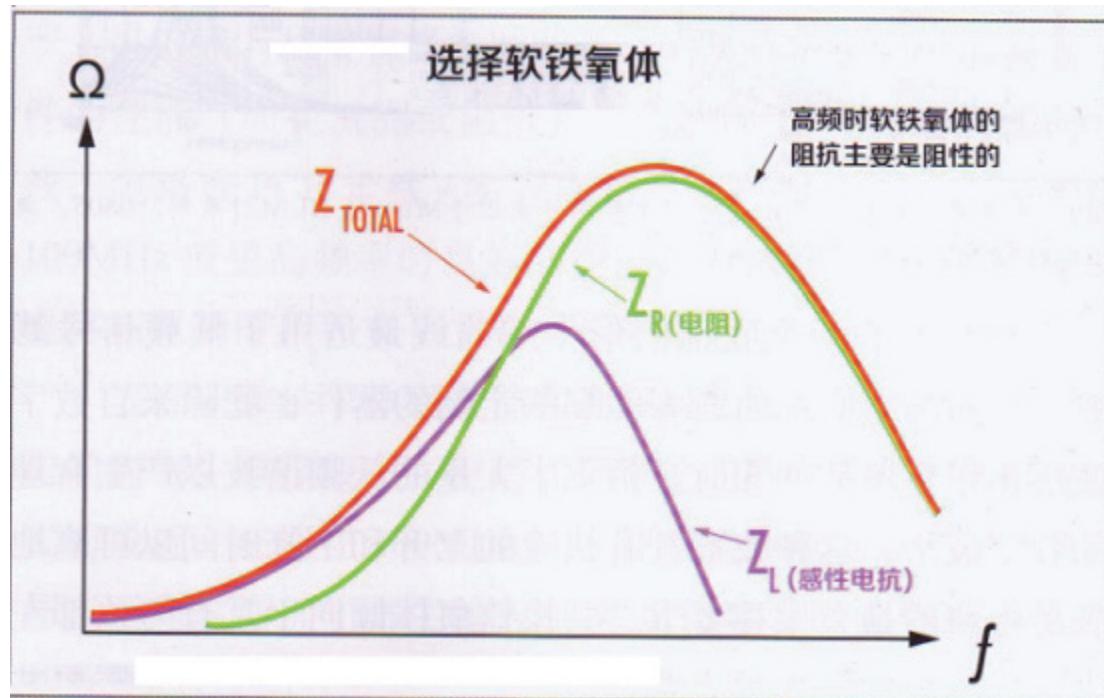


图 6 (d) 软铁氧体特性示意图

体是一个共模扼流圈，但如果只是将铁氧体缠绕一个发射或回流导体上，它就是差模扼流圈。

\* 软铁氧体的选择 选择软铁氧体时，了解系统阻抗对确定滤波器共类型很重要。需要确定它们的阻抗是否在较大衰减的整个频段上具有要求那么高的阻抗（见图 6 (d) 所示软铁氧体特性）？而掌握软铁氧体特性是软铁氧体首选的关键。

从图 6 (d) 可知，软铁氧体元件总是具有平滑不连续

的阻抗频率曲线，然而电感曲线通常具有一个或多个不连续点（斜率从正变到负，或从负变到正，这发生在某点上），这显示了谐振的存在。软铁氧体的阻抗与频率关系具有不连续性，应在需要抑制的频段选择高阻抗，并考虑流经它们的直流和低频电流。

下转154页