

# 基于软铁氧体磁芯构建低通滤波器 是实现电磁兼容的重要举措

The construction of low pass filter based on soft ferrite core is an important measure to achieve electromagnetic compatibility

叶云燕

**摘要：**本文从实现电磁兼容要求角度，对应用软铁氧体磁芯构建低通滤波器的相关特性作重点分析，并先后对正确选择低通滤波器的特性参数是电磁兼容理要求的依据作研讨。

**关键词：**电磁兼容，软铁氧体，低通滤波器

**Abstract:** this article from the Angle of realizing electromagnetic compatibility requirements, the application of soft ferrite core build focus analysis on related properties of low pass filter, and successively for correct selection of the characteristics of low pass filter parameter is the electromagnetic compatibility requirements on the basis of a discussion.

**Keywords:** electromagnetic compatibility, soft ferrite, low pass filter

## 1 问题的提出

互联网与 5G 和大数据及人工智能等新技术备的发展与应用，伴随的除需要对这些设备和系统的如何通信（包括频谱分配及带宽等）进行管理外，而还更要在它们辐射发射时所会受到电磁干扰问题作技术安保措施。据此以应用优异磁芯构建低通滤波器，并为正确选择低通滤波器的特性参数为前提，从而引发出设计满足电磁兼容要求的各系统或设备问题成为主题。

为此本文从实现电磁兼容要求角度，对应用软铁氧体磁芯构建低通滤波器的相关特性作重点分析，并对正确选择低通滤波器的特性参数是电磁兼容要求依据的问题先后阐述作研讨。

为何选择与设计无源滤波器是实现电磁兼容(EMC)性要求所必须呐？

应该说，满足电磁兼容性要求系统或设备有多种举措，在此仅以选择与设计低通滤波器为例作重点分析。

作为电磁兼容(EMC)工程师，很重要的是，应能做到完成对滤波器的设计并将其加入到电路中，从而使相关产品满足各种各样的电磁兼容抗扰度和电磁兼容发射标准。如静电放电抗扰变相关标准 IEC 61000-4-2、射频(RF)辐射抗扰度相关标准 IEC 61000-4-3、电快速瞬变脉冲群

抗扰度相关标准 IEC 61000-4-4 等等。只有这样才能满足电磁兼容的相关要求，并将电磁干扰(EMI)滤波器还能适当的会和屏蔽措施一起使用。

然而如何挑选一个合适的滤波器，或许对那些电磁兼容领域里的新手或者没有处理过相关问题的人来说，可能还是一件令人困惑的事情。因为对电磁兼容的从业者而言，他们必须能会解决一个问题，即什么结构的滤波器可以成为任何应用的最佳滤波器？或者，在给定频率、阻抗和电路其它参数的情况下该如何正确选择滤波器的器件参数。由于其它如高通、带通和带阻等类型的无源滤波器，它们在电磁兼容中的应用不像低通滤波器一样常见，因此本文也只以低通滤波器为重点作正确选择滤波器的器件参数的研讨。

## 2 正确选择无源低通滤波器

### 2.1 无源低通滤波器基本特性

电磁兼容滤波器的设计，在大多数情况下，为了实现产品的电磁兼容性，实际上需要了解的是如何将无源低通滤波器使用到电路里。对低通滤波器而言，低于某个特定频率的频率成分能够很容易的通过滤波器，而高于该特定频率的那些频率成分则会被剧烈衰减。一个无源低通滤波

器就是一个简单的分压器，它不包含什么放大设备，只由电阻和电容，电感（或者铁氧体）和电容，或者在某些情况下只是这些器件中的某一种构成。

例如阻容(RC)低通滤波器。一种最基础类型的低通滤波器只包括一个电阻和一个电容，即所谓的阻容(RC)滤波器。在一个阻容滤波器中，截止频率发生在谐振的时候，此时容抗(x)的大小和电阻(R)的大小相等，其中电容的容抗大小为  $x_0 = 1/2\pi f C$ 。

在一个理想的低通滤波器所具备的理论上的响应特性中，所有低于所谓临界频率（响应曲线下降3dB的频率点）的信号都可以轻松通过，而所有高于该临界频率的信号都会被剧烈衰减。一个理想低通滤波器的响应曲线如图1所示。

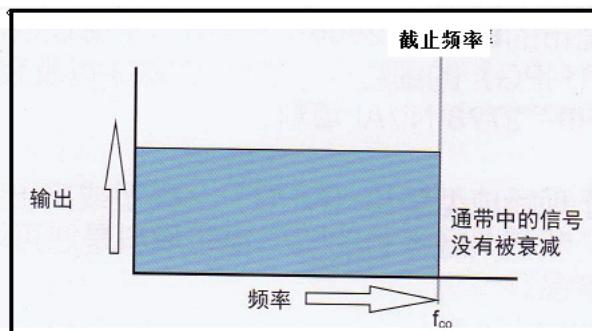


图1 理想低通滤波器的响应曲线

在实际应用的时候，滤波器的输出响应曲线不会像图1一样突然下降到零。实际上的滤波器输出会按照6dB/倍频或者20dB/十倍频的速率逐渐降低，见图2所示。图2所示为实际的低通滤波器响应曲线。

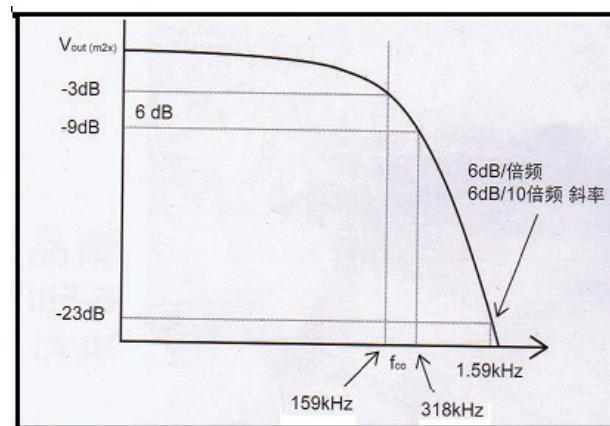


图2 为实际的低通滤波器响应曲线

#### \* 截止频率(FOC)的选择

当我们为一个低通滤波器选择截止频率的时候，考虑各种将出现在滤波线路上的有用信号（例如：数据和时钟信号）和其它目标信号的基础频率是非常重要的。如果截止频率选择得太低，那么有用信号就会和那些您想抑制的高频信号一起被衰减。为此应该将波器的截止频率至少设置在有用信号5次谐波的频率上，而理想的情况是设置在10次谐波的频率上。对很多非屏蔽电缆上的输入/输出(I/O)信号而言，为了满足电磁兼容性标准的相关要求，需要给它们使用某些类型的滤波器。这些信号的频率通常为1MHz或者更低。

滤波器器件的参数一旦选定，接下来需要仔细考虑的问题就是应该把滤波器放置在电路或者系统的什么位置很重要。实践证明，应将滤波器放置在尽可能靠近被保护部分的位置是最有利的。对大多数设计而言，理想的间隔距离是1厘米。为了防止任何额外的无用电感对滤波器性能造成影响，要保证接线长度尽可能的短。

\* 关于阻抗失配问题不容小视 在选择合适的滤波器结构的时候，必须考虑源和负载的阻抗。为了工作正常，如果源驱动的是低阻抗的并联器件（即电容器）构成的输入，那么这些源就应该选择高阻抗的。如果源的输出是低阻抗的，那么它就应该接一个高阻抗的串联器件。同样的概念也适用于负载的输入阻抗和滤波器的输出阻抗之间的对应。一般来说，源和负载的阻抗如果在100Ω以下，我们将其视为低阻抗；如果高于100Ω，我们视其为高阻抗。

### 3 低通滤波器在电磁兼容中的应用

#### 3.1 使用低通滤波器来解决诸如快速瞬变或者静电放电抗扰度等方面的电磁兼容问题

关于将低通滤波器投入使用，其工作究竟该如何开始才为更好？为此可应用这种方法，即开始的时候可以在信号线上使用一个47Ω～100Ω的串联电阻，在信号线和电源返回线之间使用一个1nF～10nF的电容。开始的时候选择一个阻值为100Ω的电阻( $R=100\Omega$ )和一个电容量为10nF的电容( $C=10nF$ )构成低通滤波器，那么其截止频率(f)将会约等于159kHz，其大致的响应曲线将如图3所示。对高于1.59MHz的信号而言，因为它们的响应会比滤波器截止频率(159kHz)处任意信号的响应低20dB，

所以它们中只有很少的一部分能够通过滤波器。

### 3.2 电抗元器件的滤波器的呈现与应用

当抑制一个无用高频信号的时候，可能会发现仅包含一个电抗元器件（换言之，仅包含一个电容或者一个电感）的滤波器可能无法提供足够的衰减量。应往滤波器中增加第二个电抗元器件会将响应曲线的下降速率增加到 12dB/ 倍频或者 40dB/ 十倍频。这些类型的滤波器有各种各样的名称，例如：双极滤波器、两级滤波器、双元滤波器或者二阶滤波器等等。具备 3 个电抗元器件的滤波器能够提供 18dB/ 倍频或者 60dB/ 十倍频的衰减量，而具备 4 个电抗元器件的滤波器能够提供 24dB/ 倍频或者 80dB/ 十倍频的衰减量。由此可知电抗元器件的滤波器的选择是低通滤波器在电磁兼容应用必不可少。

在低通滤波器中也可以用一个电感来替代电阻或者铁氧体，特别是在处理 10 ~ 30MHz 频率范围内的信号的时候，尤其如此。当我们使用电感的时候，需要意识到在这些高频范围内，电感器件既有感抗 ( $X_L=2\pi fL$ ) 也会有寄生电容。因此，在构建一个低通滤波器的时候，实际上建立的可能是一个高通滤波器，则设计目的将无法实现。

## 4 铁氧体磁芯电阻的选用是关键

### 4.1 铁氧体磁芯选用的理念

如果串联电阻上引起的压降达到无法容忍的地步，那么可以使用诸如铁氧体的装置来代替电阻。因所有的铁氧体都是陶瓷的，但它们并非绝缘—不同类型的材料具有不同的电阻。因此如果绕线的绝缘对于缠绕到磁芯上的压力不够，那么磁芯会使线圈短路，或者至少产生影响性能的并联电阻。如果线圈携带了危险电压，故障绝缘会导致线圈带电，这会对服务人员甚至用户造成安全影响。

在线圈和它的磁芯之间总是存在寄生电容，由于铁氧体是陶瓷的，它们的介电常数很高，因此寄生电容会有所增加。线圈上的射频电压会产生线圈上的射频电流，由于铁氧体是导电性的，这些电流会通过寄生电容或阻性接触从磁芯流到其他导体上。

服务人员可能会被电击，并且线圈滤波器元件或变压器磁芯上的射频电击携带了大量的射频能量。这些杂散射频磁芯电流是共模电流，因此可能引起严重的电磁兼容问题。可以将磁芯绝缘以有助于抑制杂散共模电流的流动，

或者提供磁芯连接以便杂散电流回流到电路的适当部分。

磁芯电流回流的电路最适当的部分不一定是地、底盘、边框或 OV。所有的电流都沿着回路流动，良好的电磁兼容设计回路面积必须尽可能小，因此提出了正确的技术以确定杂散射频磁芯电流本来应该从哪里产生，并沿着最小面积的回路流回到它们的源。对于典型电子产品中的滤波器，通常不需要担心与铁氧体磁芯相关的射频电流和电压。但是控制磁芯电流对于实现开关电源转换（反馈式扼流圈、变压器等）的铁氧体的电磁兼容至关重要，因为开关模波形包括大量的射频频谱能量。

它们作为高频电阻，引起的压降很小。因为铁氧体对电路呈现出交流阻抗的同时还不会影响到信号质量，所以它们是频率高于 30MHz 滤波器的理想选择。在使用铁氧体的时候，需要仔细考虑出现在电路中的直流或者低频电流的幅度。因为当电路中出现的电流过大的时候，铁氧体容易变得饱和，而这会让铁氧体失去原本的效果。

### 4.2 采用性能优异的磁性材料构建电感是低通滤波器的关键

根据电抗元器件的滤波器选用要求，应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。这是由于该滤波器采用了电阻 (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的问题而引发。

\* 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 0.1Ω 的阻抗，但是从 30MHz 到 1GHz 或更高频率，它将具有 80Ω 的电阻（没有感性电抗）。有的导线式软铁氧体在 100MHz 频率具有 1KΩ 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 1KΩ 的电阻。

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 3 (a) 所示为大量可用的软铁氧体磁芯。图 3 (b) 显示了一些可用的线缆安



图 3 (a) 为大量可用的软铁氧体磁芯



图 3 (c) 为多种圆柱形软铁氧体分裂模式

装软铁氧体部分。

而软铁氧体磁芯构建的实例见图 3 (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。

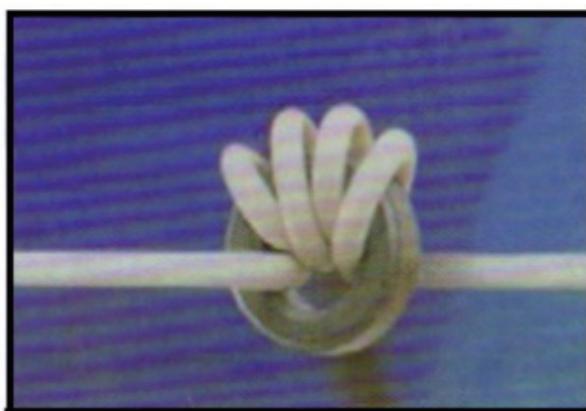


图 3 (b) 显示了用于共模扼流圈的环状软铁氧体磁芯

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，这可从图图 3 (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。

\* 在软铁氧体的应用上 圆柱形分裂模式（见图 3 (c)）是一种有用的软铁氧体元件，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。

此类分裂铁氧体很容易用在线缆上，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。

\* 软铁氧体的优异性能选择是系统阻抗对于确定滤波器类型的依据 选择软铁氧体时，需要确定它们的阻抗是否在需要提供较大衰减的整个频段具有要求那么高的阻抗（见图 3 (d) 所示特性）。而掌握软铁氧体特性是软铁氧体首选的关键。

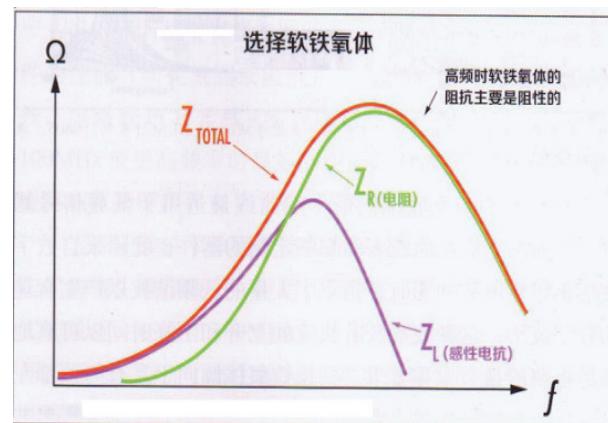


图 3 (d) 软铁氧体特性示意图

从图 3 (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。

选择软铁氧体时经常被忽略的一个方面在于，它们的阻抗频率曲线随着它们的直流和低频电流变化而变化。典型的数据表曲线假设设备中电流为零，但是随着电流增加，发生峰值阻抗的频率也会增加，可能不如没有电流通过时的频率高。通常，当某些频点的发射或敏感度测试没有通过时（如发生在 228MHz 的时钟谐波），可以在这些频率附近选择非常高阻抗的软铁氧体，将它与产生问题的印刷电路板走线串联。

但是这些走线上的直流或低频电流极大增加了发生峰值阻抗的频率，以致在问题频点具有的实际阻抗并不足够高以提供较大的衰减从而通过测试。相反，当走线电流流经时，走线中的电流和此类使用设备中的频率 / 电流变化将在问题频点上产生峰值阻抗。

需要注意的是，当模拟采用软铁氧体元件的滤波器或其他电路时，不能采用简单的设备模型，参数与频率和电流相关，还可能与温度相关，对此进行模拟以实现整个频段上的模拟准确性。

#### 4.3 应优先选择闭合磁性电路以减小杂散场

由于电感是线式感性元件（包括电感、变压器、扼流圈等）之一，故线式感性元件应控制它们的杂散磁场与它

们参量随电流及电阻等问题同样对存在于电感元件之中。

为此绕线式元件的电磁兼容应优先选择闭合磁性电路以减小杂散场。这是为什么呐？

具体分析如下：如果磁场路径包括空气，那么元件将是引起发射的主要原因，它能挑出周围的磁场并引起电路中的噪声。因此，绕线式元件的电磁兼容受益于它具有闭合的磁场回路，如铁氧体磁珠、圆柱形或环形。这对于滤波器很重要，对于开关模式的功率变换器中的扼流圈和变压器也很重要，不管是交流转直流、直流转交流（如逆变器）还是直流转直流。

例如，磁棒上的绕线式电感与调幅广播上常用的铁氧体棒状天线基本一样。目前市面上有许多低电流电感（最高到 1mH）或铁氧体抑制元件和轴向元件，基本上铁氧体磁棒上都有缠绕。当它们完全适用于某些应用时，它们能从周围场中拾取出噪声，产生或受害于串扰和发射或敏感度问题。因此采用基于铁氧体磁芯的类型如磁珠，圆柱体或磁环等更为可靠，它们具有闭合的磁场电路。见图 4 可说明了阐述了这个问题。

当差模扼流圈携带高频电流时，这会引起严重的问题，因为它们具有大的磁通量，并依赖于空气间隙以防止它们的磁芯饱和。当不可避免产生空气间隙时，在元件上采用屏蔽体以使杂散场处于屏蔽体中，或者采用由铁制成的磁

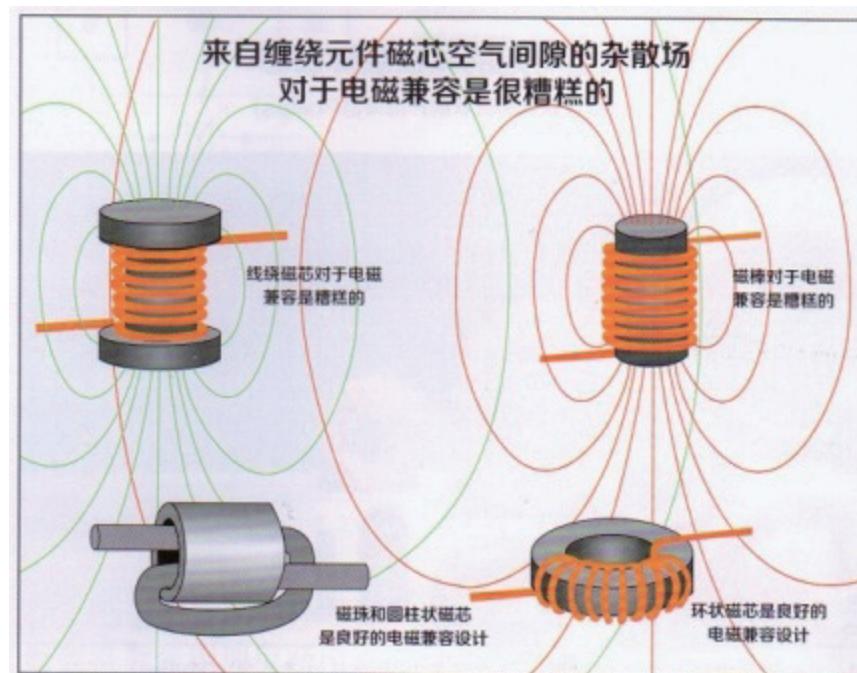


图 4 来自缠绕元件磁芯空气间隙的杂散场对于电磁兼容是很糟糕的

芯，或在环氧胶粘剂中使用铁氧体粉或类似的分布空气间隙材料。

\* 在临近放置屏蔽体会减少元件的电感。由于高强度场强屏蔽体可能变得饱和，不再提供屏蔽性能，因此不能将屏蔽体放在离磁芯或线圈太近。铁粉或类似的磁芯具有离散的空气间隙，取决于它们磁芯中磁性粒子间数亿微小的空气间隙，因此具有更小的杂散磁场。

## 5 后话

上述应用软铁氧体磁芯构建低通滤波器的相关特性的重点分析是应用低通滤波器（尤其是无源低通滤波器）来实现电磁兼容性的相关要求的重要保证。由于无源低通滤波器能为射频电流回流到本地电源提供一条低阻抗的通道，或者为阻止无用射频信号的流通而提供高阻抗。一个滤波器在这两个方面都应该有效果。设计一个低通滤波器抑制电磁干扰并非很难。若在需要使用低通滤波器之前，如果能掌握相关的磁芯和 EMC 等相关的原理就能为开发人员设计开发出满足电磁兼容性的要求的各类系统设备。

上接144页

表 2. 与其他操作的比较

Parameter	Active Inductor [This work]	Passive Inductor	Other work [9]	Other work [10]	Other work [11]	Other work [12]
$s_{11}$ (dB)	-1	-19.3	12.6	-10	-9	-10
$s_{12}$ (dB)	-42.3	-38.3	-	-	-	-
$s_{21}$ (dB)	20.7	17.9	14.6	13	16.4	14.18
$s_{22}$ (dB)	-19.8	-19.9	-19.6	-10	-8	-16.21
NF (dB)	2.1	1.66	2.5	3	4	2.78
Power dissipation (mW)	24.9	4.19	8.14	62.5	14.5	10.36

所示，有源电感的噪声系数增加了 0.44dB。

LNA 有源电感和无源电感之间的布局比较如图 7 所示。当使用有源电感取代无源电感时，布局尺寸可降低 73%。LNA 有源电感器还可以降低制造芯片的成本，因为它比 LNA 无源电感器消耗更少的面积。

## 4 结论

本项目采用浮动有源电感和单端有源电感来

代替 LNA 电路的无源电感。LNA 有源电感器采用 Silterra 0.13μm CMOS 技术进行设计和调谐。通过设计有源电感，可以减小芯片面积，而不会影响 LNA 电路中两个最重要的因素，NF 和功率增益， $S_{21}$  分别为 2.1dB 和 20.7dB。减少面积使得芯片制造成本降低。LNA 有源电感的总功耗为 24.9mW。未来的建议是能够更换所有有源电感器，因为这项工作能够替代三个电感器中的两个，而不会影响功率增益和噪声系数。

上接150页

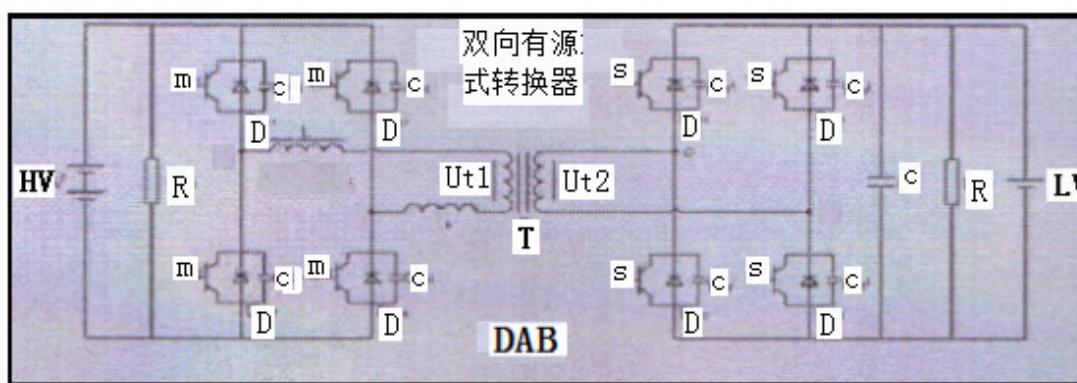


图 8 (b) 所示为应用于能源存储 PCS (电力控制系统) 和公共交通的磁性器件的双向有源式转换器架构图解示意